

博士論文

コンクリートダムにおける  
施工の高速化に関する研究

田代 民治



## 目 次

<b>第1章 序論</b>	.....1
1.1 研究の背景	.....1
1.2 研究の目的	.....10
1.3 本論文の構成	.....12
第1章の参考文献	.....14
<b>第2章 著者が携わったダム</b>	.....17
2.1 概要	.....17
2.2 川治ダム	.....19
2.2.1 概要	.....19
2.2.2 技術的に工夫した主な内容	.....20
2.3 巖木ダム	.....25
2.3.1 概要	.....25
2.3.2 技術的に工夫した主な内容	.....26
2.4 宮ヶ瀬ダム	.....30
2.4.1 概要	.....30
2.4.2 技術的に工夫した主な内容	.....31
2.5 奥三面ダム	.....45
2.5.1 概要	.....45
2.5.2 技術的に工夫した主な内容	.....46
2.6 温井ダム	.....64
2.6.1 概要	.....64
2.6.2 技術的に工夫した主な内容	.....65
2.7 滝沢ダム	.....84
2.7.1 概要	.....84
2.7.2 技術的に工夫した主な内容	.....85
2.8 嘉瀬川ダム	.....92
2.8.1 概要	.....92
2.8.2 技術的に工夫した主な内容	.....93
2.9 湯西川ダム	.....99
2.9.1 概要	.....99
2.9.2 技術的に工夫した主な内容	...100
2.10 第二浜田ダム	...107
2.10.1 概要	...107
2.10.2 技術的に工夫した主な内容	...108
2.11 五ヶ山ダム	...116

2.11.1 概要	・・・116
2.11.2 技術的に工夫した主な内容	・・・117
2.12 当別ダム	・・・125
2.12.1 概要	・・・125
2.12.2 技術的に工夫した主な内容	・・・126
2.13 第2章の結論	・・・133
第2章の参考文献	・・・135
<b>第3章 コンクリートダムの施工方法の発展経緯</b>	・・・139
3.1 概要	・・・139
3.2 コンクリートダムの型式と施工方法による分類	・・・140
3.2.1 重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダム	・・・140
3.2.2 柱状工法と面状工法	・・・145
3.3 RCD 工法の特徴	・・・149
3.3.1 RCD 用コンクリート配合	・・・150
3.3.2 製造方法	・・・152
3.3.3 運搬方法	・・・153
3.3.4 打込み方法	・・・155
3.3.5 養生方法	・・・165
3.4 最新の RCD 工法	・・・168
3.4.1 最新の RCD 工法の概要	・・・168
3.4.2 最新の RCD 工法の開発経緯	・・・170
3.4.3 最新の RCD 工法の特徴および基本的な施工方法	・・・174
3.5 第3章の結論	・・・196
第3章の参考文献	・・・198
<b>第4章 高速施工に対応する運搬方法とその有効性</b>	・・・201
4.1 概要	・・・201
4.2 コンクリートダムの施工設備	・・・202
4.3 コンクリート運搬・打設設備の変遷	・・・205
4.3.1 概要	・・・205
4.3.2 インクラインによるダンプ運搬	・・・207
4.3.3 ケーブルクレーン	・・・212
4.4 SP-TOM による運搬とその効果	・・・223
4.4.1 SP-TOM の概要	・・・223
4.4.2 SP-TOM による大量搬送機構	・・・227
4.4.3 SP-TOM によるコンクリート材料分離抑制機構	・・・264
4.5 第4章の結論	・・・299
第4章の参考文献	・・・301

<b>第5章 温度応力の抑制方法</b>	・・・303
5.1 概要	・・・303
5.2 コンクリートダムにおける温度応力の発生機構	・・・305
5.2.1 コンクリートダムに発生する温度応力の特徴	・・・305
5.2.2 コンクリートダムの温度応力を抑制するための施工計画	・・・309
5.3 高速施工方法を利用した温度抑制方法	・・・310
5.3.1 従来のコンクリートダムの温度抑制	・・・310
5.3.2 高速施工における温度抑制方法	・・・312
5.4 実規模ダムでの温度応力の抑制方法の効果の検証	・・・313
5.4.1 温度応力抑制を考慮した工程	・・・314
5.4.2 温度応力の抑制効果の検証	・・・316
5.4.3 温度応力の抑制効果の確認	・・・319
5.5 実施工における温度応力の抑制方法の効果の確認	・・・328
5.5.1 施工実績	・・・329
5.5.2 実施工における温度応力の抑制効果の検証	・・・331
5.5.3 実施工における温度応力の抑制効果の検証結果	・・・334
5.6 実施工よりもさらに工期短縮した際の温度応力の検証	・・・343
5.6.1 3ヵ月短縮の工程概要	・・・344
5.6.2 3ヵ月の工程短縮が温度応力に及ぼす影響の確認	・・・345
5.6.3 3ヵ月の工程短縮が温度応力に及ぼす影響の確認結果	・・・349
5.6.4 高速施工を活用したリフトスケジュールによる温度応力抑制効果の整理	・・・358
5.7 第5章の結論	・・・360
第5章の参考文献	・・・361
<b>第6章 結論</b>	・・・373



# 第 1 章 序 論



# 第1章 序 論

## 1.1 研究の背景

日本におけるコンクリートダムは、1900年に水道専用の目的で、神戸市に粗石コンクリート形式の布引五本松ダムが構築されたのが初めてであり、それ以降、発電、治水、利水等を目的として全国に構築されている。ダムの型式としてはコンクリートダムとフィルダムの2種類に大別される。当初はコンクリートダムが主流で1970年以前は、85%以上のダムがコンクリートダムであった。しかし、戦後初めてロックフィルダムの技術が取り入れられると、徐々にこの型式が取り入れられるようになり1985年頃にはその割合は50%程度となった。そのうち、本論文ではコンクリートダムを対象とした。

コンクリートダムは、表-1.1.1に示すように、堤高30m程度の粗石コンクリートに始まり、1924年に大河川の本流を締め切った大井ダム、コンクリートダムの設計・施工技術が確立された小牧ダムが1930年に完成した。戦後は、高度経済成長の背景のもと、水資源開発の要請が増え、五十里ダム(1956年)・奥只見ダム(1960年)といった大規模重力式コンクリートダムや、上椎葉ダム(1955年)・黒部ダム(1963年)等の大規模アーチ式コンクリートダムが完成し、ダム建設の最盛期を向かえた。その後、合理化施工法であるRCD工法が開発され<sup>1)</sup>、1987年の大川ダム(マット部での採用)を皮切りに2000年には重力式コンクリートダムでは日本最大規模の宮ヶ瀬ダムが建設された。最近では、材料・設計・施工の合理化による新しい形式の台形CSGダムとして2012年に当別ダムが構築された。

表-1.1.1 日本のコンクリートダム年表

ダム名称	形式*1	目的	堤高 (m)	堤体積 (千m3)	所在地	ダム事業者	竣工	特筆すべき事項
布引五本松 (ヌノビキゴホンマツ)	G	W	33.3	22	兵庫県 神戸市	神戸市	1900	日本で最初のコンクリートダム 粗石コンクリートダム
大井 (オオイ)	G	P	53.4	153	岐阜県 恵那市	関西電力 (株)	1924	玉石投入軟練コンクリートダム 初めてカーテングラウチング施工
小牧 (コマキ)	G	P	79.2	289	富山県 砺波市	関西電力 (株)	1930	耐震設計(震度法)を用いた最初のダム 収縮継目・止水板設置 初めて堤体内に監査廊を構築
上椎葉 (カミシイバ)	A	P	110	390	宮崎県 東臼杵郡	九州電力 (株)	1955	日本初の大規模アーチダム
五十里 (イカリ)	G	FNP	112	468	栃木県 日光市	国土交通省 関東地方 整備局	1956	100mを超える初めてのハイダム
奥只見 (オウタダミ)	G	P	157	1,658	新潟県 魚沼市	電源開発 (株)	1960	重力式コンクリートダムでは堤高1位 日本最大出力56万kWの水力発電
黒部 (クロベ)	A	P	186	1,582	富山県 中新川郡	関西電力 (株)	1963	日本のダムでは堤高1位
大川 (オオカワ)	G	FNAWI P	75	1,000	福島県 南会津郡	国土交通省 北陸地方 整備局	1987	マット部で初めてRCD工法を採用
島地川 (シマヂガワ)	G	FNWI	89	317	山口県 周南市	国土交通省 中国地方 整備局	1981	ダム本体で初めてRCD工法を採用
玉川 (タマガワ)	G	FNAWI P	100	1,150	秋田県 仙北市	国土交通省 東北地方 整備局	1990	ダム本体でRCD工法を採用
宮ヶ瀬 (ミヤガセ)	G	FNWP	156	2,000	神奈川県 相模原市	国土交通省 関東地方 整備局	2000	最大級のRCD工法によるダム 堤体積日本最大
当別 (トウベツ)	CSG	FNAW	52	813	北海道 石狩郡	北海道	2012	世界で最初の台形CSGダム

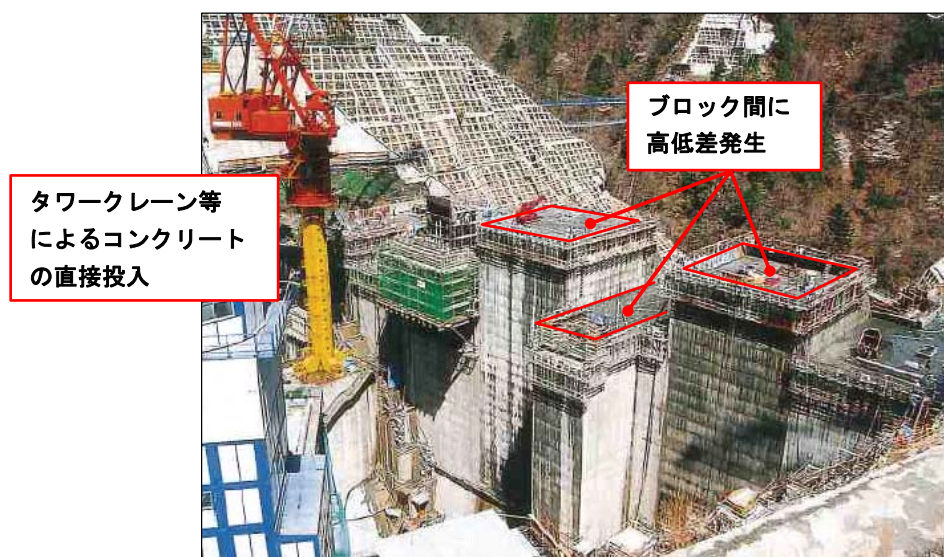
戦後、1945年から1980年頃までの約35年間、経済復興の鍵として大規模のコンクリートダムが相次いで建設されてきた<sup>2)</sup>。ダムの形式としては、主には重力式とアーチ式の2つの形式が採用された。第二次世界大戦期間中は、日本のダム技術の進歩は大きく停滞したが、戦後は欧米の施工技術の習得に努めた。その中で特に大きな影響を受けたのは米国開拓局が1936年に建設したHooverダムである。Hooverダムでは15mを基本とするブロック割による柱状ブロック工法、パイプクーリングの計算法と設備、継目グラウチングのための設備や方法、ケーブルクレーンによるコンクリート運搬、それらを達成するための仮設備計画が確立され、我が国の戦後のコンクリートダ

ム建設の基礎的な技術として導入された<sup>3) 4) 5)</sup>。

Hoover ダムで確立された柱状ブロック工法はダムコンクリート施工時に問題となる温度応力によるひび割れ制御、および施工能力の関係から、堤体を適当な大きさに分割して施工する工法である<sup>6)</sup>。ダム軸に平行な縦継目、直角方向の横継目により分割した区画ごとにコンクリートを打設する。縦横継目は、パイプクーリングにより温度制御を行った後、ブロックが安定温度に達した段階で継目をグラウトすることで、堤体の一体化と水密性を確保する<sup>6)</sup>。一方でパイプクーリングは、その敷設に多大な労力を要するだけでなく、コンクリート打設中にパイプが破断・漏水する等のトラブルも少なくなく、コンクリートの品質に多大な影響を与えることもあり、後述する面状工法では異なる手法で温度制御を行うこととなる。

柱状ブロック工法におけるブロック割は、海外の事例<sup>7) 8)</sup>では、横継目間隔は 15m、縦継目間隔は 40～100mとしている。それに対して国内のダム事例では、横継目間隔は 15m、縦継目間隔は 30～50m程度としたものが多かった。柱状ブロック工法の場合、隣接ブロックとの高低差が、写真－1.1.1 に示すように外周 4 面の型枠存置期間等により、最大、横継目間で 12m（8 リフト）、縦継目間で 6 m（4 リフト）となるため、コンクリートを初めとして、型枠や施工重機など、すべてのものをケーブルクレーンもしくは、タワークレーンで運搬する必要があった。このような柱状ブロック工法の課題をまとめると以下のとおりである。

- ① ダム工事専用の施工機械を多く使用するとともに、それらの運搬がすべてクレーンによる。
- ② ブロック間に高低差が発生するため、作業員の移動に労力を要するとともに墜落・転落災害の発生等、安全上の懸念がある。
- ③ 型枠、パイプクーリング、継目グラウチングが煩雑で、かつ熟練技術者が必要である。



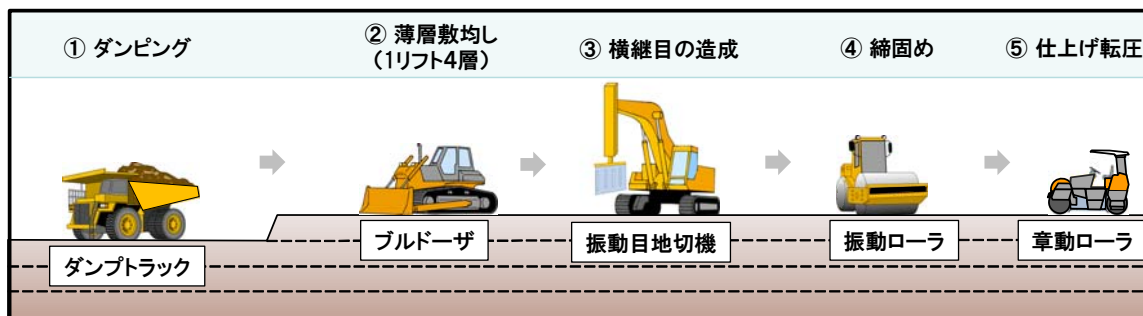
写真－1.1.1 柱状工法による施工状況（深城ダム）

この課題を解決するために開発されたのが面状工法である。この面状工法は海外では 1964 年完成のイタリア AlpeGera ダムにおいて採用され<sup>8)9)</sup>、1969 年完成の QualreDellaMimera ダムへと続き、これによる急速施工が実施された。面状工法はブロック間に極力リフト差を設けず、面状に打ち上げるため、堤体上でのコンクリートの運搬にダンプトラックなどを使用することが可能である。このため、バッチャープラントから堤体までの主なコンクリート運搬設備は、堤体上でのダンプトラック運搬と組合せが前提となり、重力式コンクリートダムの施工方法を一変させることとなった。このように、面状工法とすることによって、柱状ブロック工法の課題がほとんど解決することとなり、欧米では、安全でかつ急速に施工される工法がある程度確立されていた<sup>9)</sup>。これに対して、日本では、依然として柱状工法による施工を行っていたことから、パイプクーリングや継目グラウチングなどの作業を要するため、施工速度が欧米に比べて遅いままであった。

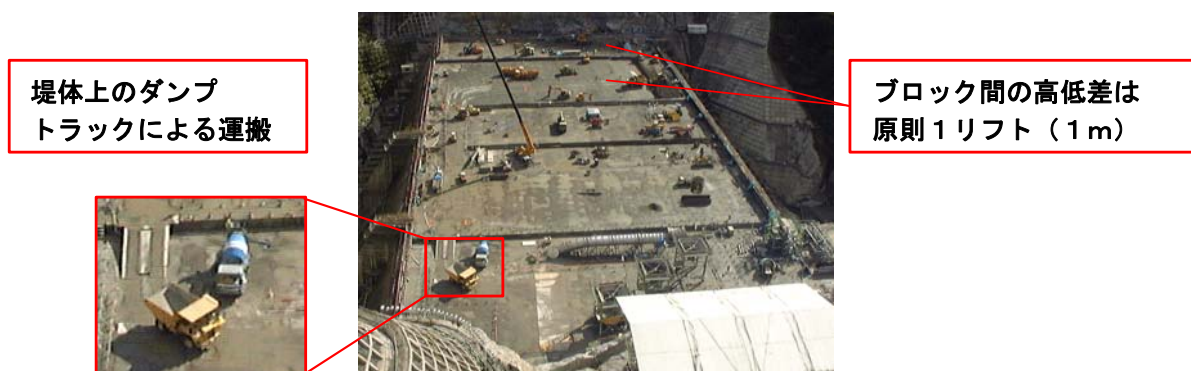
そうした中、1970 年代になると欧米をはじめ世界の技術目標は、主に重力式ダムを対象とし、いかに安全に速く施工をするかという施工の合理化による経済性の向上に移った。このような状況を踏まえて、我が国においても 1974 年に建設省主導のもとに「コンクリートダム合理化施工に関する研究委員会」<sup>10)</sup>が設置され、コンクリートダムの新しい施工法について本格的な検討が始まり、世界に先駆け、コンクリート運搬について、ダンプトラックによる運搬の有効性を活かす施工方法が開発された<sup>11)</sup>。新しい施工方法では、効率よくコンクリートを打ち込むためには、可能な範囲で広く水平な打設面においてレヤー打設することが妥当であり、このためには、従来の収縮継目を造成するための型枠を廃止する必要が生じた。この問題を解決するためにコンクリートを敷均した直後に横継目を造成する技術を開発するとともに、縦継目は完全に廃止することとした。このようなダンプトラックによる運搬を研究する中で開発された新しい工法は汎用機械であるブルドーザで敷均し、振動ローラで転圧を行うその施工方法から RCD (Roller Compacted Dam-Concrete) 工法と命名された<sup>11)</sup>。

RCD 工法は前例のない施工方法であったため、ダムコンクリートとして要求される強度・耐久性・ひび割れに対する抵抗性を有し、汎用機械による施工が可能であるコンクリートの製造・運搬・打込み方法およびその配合設計の方法や、その品質管理手法の確立等、技術的課題が挙げられた。それらについては、各種の室内試験よりもむしろ現場での試験施工を重視して解決する方針で、1976 年の大川ダム上流締切における試験施工を皮切りに(財)建設機械化研究所構内や島地川ダム貯水池内の試験ヤードにおける試験施工を経て基本課題は解決された。これを受けて、大川ダムマットコンクリートおよび 1978 年には島地川ダム堤体に本工法が適用されることとなった<sup>12)</sup>。

RCD 工法は図-1.1.1 および写真-1.1.2 に示すように、ダンプトラックなどで打設箇所まで運搬された超硬練りの貧配合コンクリートをブルドーザで敷き均し、振動目地切機などで横継目を設けた後、振動ローラで締固めを行う工法である。一連の作業は汎用機械を用いて連続して行うことが可能であり、大量打設とこれによる工期の短縮および工事費の低減などを図ることができる。



図－1.1.1 RCD 工法（100cm/1リフト）における打設順序の例



写真－1.1.2 RCD 工法による施工状況（滝沢ダム）

一方、海外においては同様に貧配合固練コンクリートを振動ローラにより転圧するという面状工法の一つとして RCC(Roller Compacted Concrete)工法が 1982 年完成の WillowCreekDam で採用された<sup>13)</sup>。海外で開発された RCC 工法は、先行して開発された RCD 工法と同じ面状工法である。しかし、開発当初の RCC 工法は所定の品質を確保した上でより経済性を重視する一方で、RCD 工法は地震および日本での環境条件等からより高い品質、耐久性を確保することを基本的なスタンスとした<sup>13)14)</sup>。そのため RCC 工法は、RCD 工法とコンクリート運搬・敷均し・転圧の使用機械は共通するが施工方法には多くの相違がある。RCC 工法と RCD 工法の相違を以下に列挙する<sup>15)</sup>。

#### ① リフト厚と打継目処理

RCD 工法では 1 リフト 1 m が基本となっている一方で、RCC 工法は 25～40cm とする。これは RCD 工法では弱点となる打継ぎ部をできるだけ少なくするのに対して、RCC 工法は打継ぎ時間の制限により打継ぎ部の品質を確保している。また、処理後は RCD 工法はモルタル塗布後に打継ぎを行うが、RCC 工法ではモルタル塗布を行わないか、行う場合でも上流面付近に限られる。

#### ② 横継目の造成

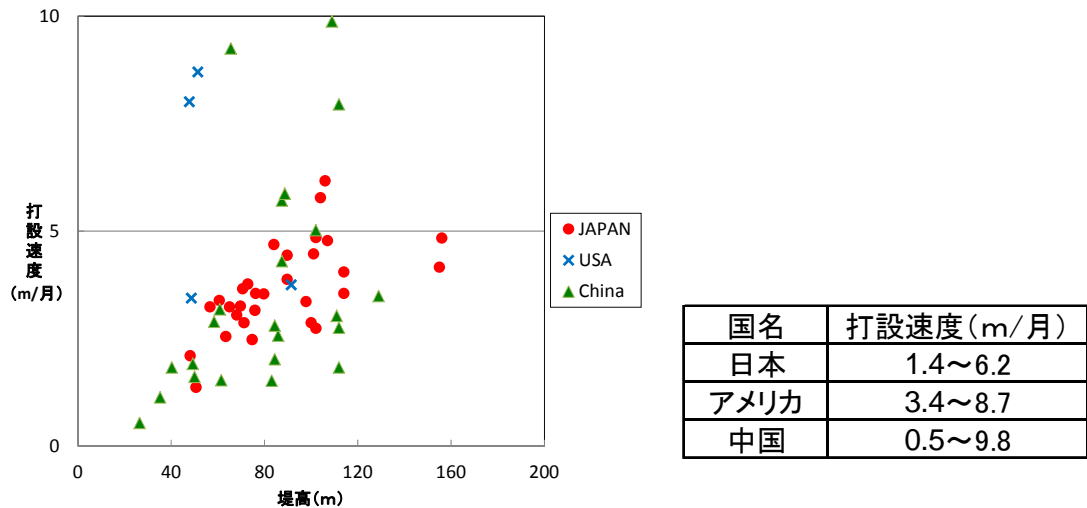
RCD 工法では打止型枠、もしくは振動目地切機により 15m ごとに横継目を造成するが、RCC 工法では 15～75m 間隔で造成もしくは、横継目を造成しないダムもある。

#### ③ 上下流面コンクリートの施工

堤体上下流面の施工は、RCD 工法では、耐久性、止水性の観点から富配合の有スランブコンク

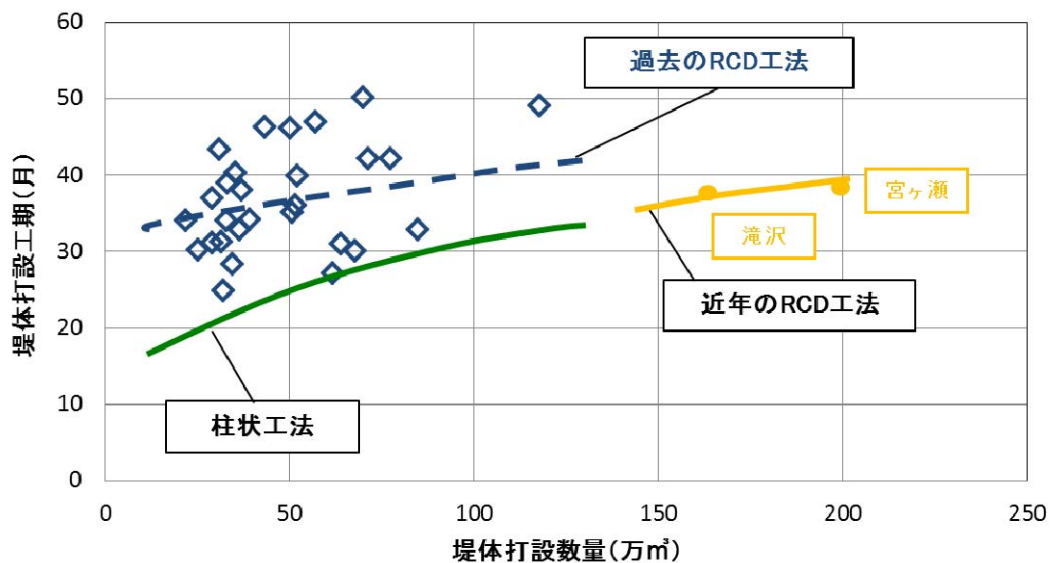
リートを打設する。それに対して、RCC 工法ではプレキャストパネル設置後に RCC を直接打設し、また下流面は RCC のみとする等、経済性を重視した施工法である。

上記の相違により、図－1.1.2 に示すとおり、より高い品質、耐久性の確保を重視した RCD 工法が、RCC 工法に施工速度という面で及ばない結果となった<sup>16)</sup>。



図－1.1.2 堤高と打設速度の関係（堤体積 19 万 m<sup>3</sup> 以上）<sup>16)</sup>

日本においては、1981 年の島地川ダム以降、面状工法としての RCD 工法で重力式コンクリートダムが施工されてきたが、柱状工法との比較においても、本来、急速施工となるはずの RCD 工法が、図－1.1.3 に示すように、むしろ柱状工法よりも遅くなっており、面状工法の優位性が得られない結果となった<sup>17)18)</sup>。近年、従来の RCD 工法で施工した宮ヶ瀬ダムや滝沢ダムは、超大型ダムであったことに加え、施工の合理化の工夫を図ることで、過去の RCD 工法よりも打設速度が向上し、柱状工法と同程度の打設速度となった。



図－1.1.3 堤体打設数量と堤体打設工期の関係<sup>17)18)</sup>

その要因としては、図-1.1.4に示すように理想的な区画割とされている1リフト3分割より細分化しすぎていること、図-1.1.5に示すように打設能力を十分に発揮していないことが挙げられている<sup>19)</sup>。

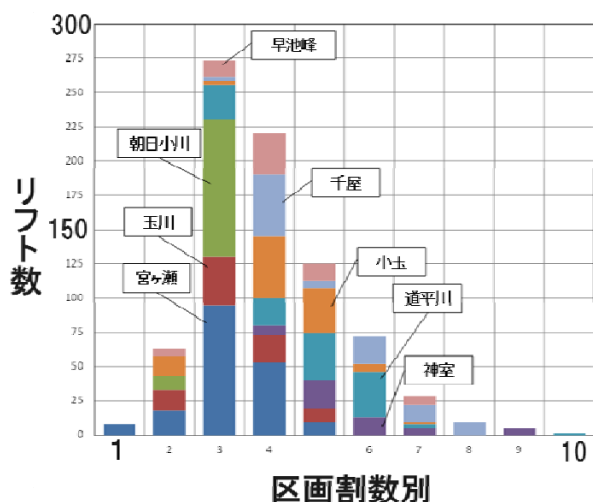


図-1.1.4 区画割数別のリフト数分布

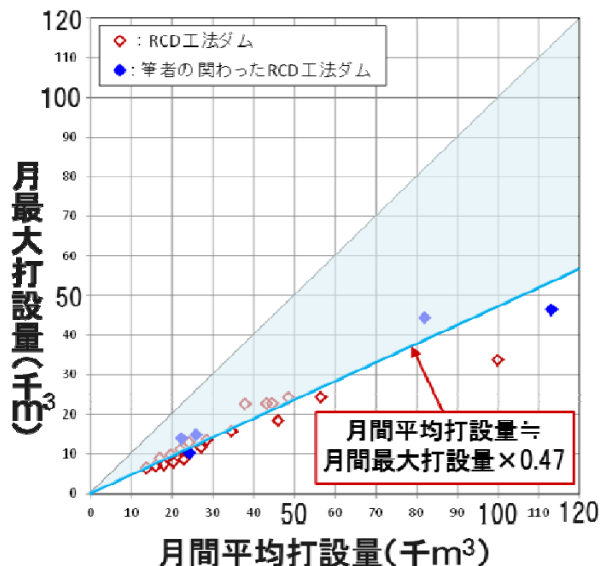


図-1.1.5 月間最大数量と月間平均打設量の比較

RCD工法の1サイクルは、打設、養生、清掃を含む打継面処理の3工程で構成される。それらを各1日の計3日で完了させる、1リフト3分割施工が最速の工程である。図-1.1.4で示すとおり、調査した8ダムにおいて4分割以上のリフトが半分以上あり、区画が細分化されすぎていることが分かる。その結果、1リフトあたりの所要日数が増大し、堤体打設工期が延びている。さらに、月間打設量の変動に着目したのが図-1.1.5であるが、これは月間最大打設数量と月間平均打設量との関係を示すグラフである。その割合は平均打設数量は最大打設数量の47%と低い値となっている。これはコンクリートの製造、運搬、打設のための設備、機械が、その能力を十分に発揮していないことを示す。その理由として、RCD工法では、外部コンクリート（有スランプコンクリート、打設速度：低）と内部コンクリート（RCD用コンクリート、打設速度：高）を規定の打継時間を遵守しながら打設を進めるため、全体の打設速度が打設速度の遅い外部コンクリートの打設に拘束され、打設速度を上げられないことが挙げられる。

それらの課題を解決し、品質を確保した上で、さらなる高速化を達成する工法として最新のRCD工法（巡航RCD工法）が、（一財）ダム技術センターにより開発された<sup>20)</sup>。最新のRCD工法（巡航RCD工法）の施工方法の実現にあたって以下の4つの工夫がなされている<sup>21)</sup>。

#### ① RCDコンクリートの先行打設

従来のRCD工法では、外部コンクリートと内部コンクリートの打継時間規制を守り一体化を図っていたため、打設速度が低い外部コンクリートに拘束を受けていた<sup>22)</sup>。そのため、打設速度を速めることが困難であった。そこで、内部コンクリートを先行打設し外部コンクリートと内部コンクリートを分離・独立して施工する方法が考案された。この方法によれば、内部・外部の

コンクリートを交互に打設する必要が無くなり、開始直後から設備能力を十分活かした打設<sup>22)</sup>が可能となる。

## ② 外部コンクリートの独立・後行打設

上記の工夫を実現するために外部コンクリートは RCD から独立して後行施工する方法を考案している。その場合、外部コンクリートと内部コンクリートとの打継時間が大幅に長くなり、その打継部での一体性の確保が懸念された。しかし、内部コンクリートである RCD コンクリートはブリーディングがないためレイタンスが発生せず、打継時間が長くなっても、外部コンクリートと十分な一体性を確保することを場外試験<sup>23)</sup>などで確認されている。これにより、施工の自由度、打設効率の向上のみならず、内部コンクリート施工との錯綜もなくなることで安全性も向上した。

## ③ 端部締固め技術

RCD コンクリートを先行打設するためには、RCD コンクリートと外部コンクリートの接合部となる端部を確実に締め固める技術が必要となった。端部締固めは、開発当初 2013 年までは、**写真－1.1.3**に示す二面拘束型端部法面締固め専用機（以降、「二面拘束型専用機」と称する）により実施された<sup>24)</sup>。二面拘束型専用機は、転圧前に転圧水平面と法面を高い精度で成形する必要があり、熟練作業員と整形用の油圧ショベルが別途必要であった。そこで、2014 年の五ヶ山ダム施工時には改良を加え**写真－1.1.4**に示すプレート型端部締固め機（Flat Plate Compactor、以下 FPC と称す）を開発、法面整形も可能とし、油圧ショベル作業を不要とし施工速度も向上させた<sup>25)</sup>。

## ④ 打止型枠の省略

従来の RCD 工法では打止時に打止型枠を設置していたため、1 日の打設区画を打設後に変更することができなかった。そこで、上記の端部締固め技術を利用して、内部コンクリートの打継部を前述の端部締固め機によって締め固め、打継部に敷きモルタルを敷設して内部コンクリートどうしで打ち継ぐ方法が考案された。内部コンクリートどうしの一体性については、場外試験<sup>26)</sup>、実現現場施工箇所からの RCD コア採取<sup>27)</sup>などで確認されている。これによって、先行打設する RCD 用コンクリートを自由な位置で打ち止めることが可能となり、打止型枠の設置作業も省略でき打設可能時間を有効に使えることとなった。



写真－1.1.2 二面拘束型専用機



写真－1.1.3 FPC

この最新の RCD 工法によれば、従来の RCD 工法に比較して、打設速度が 1.5～2.0 倍（湯西川ダムで実施した巡航 RCD 工法の平均打ち上がり速度の対他ダム比）<sup>28)</sup>になることから、大幅な工期短縮が可能となる。しかしながら、打設速度が上昇することへの対応として、施工設備能力、特に打設する場所への運搬能力の確保が重要となる。また、急速施工となることから、本来大型ダムで問題となる温度ひび割れがより顕在化する可能性がある。

また、材料面では、コンクリートダムで使用するセメントの種類は、20 年ほど前までは、高炉セメント B 種、C 種やフライアッシュセメント B 種、C 種、高炉スラグ微粉末とフライアッシュセメントを混合した 3 成分セメント等、様々なセメントが使用されていた<sup>29)30)31)</sup>が 2000 年以降の大型ダムでは、ほとんどの場合、中庸熟フライアッシュセメント 30%もしくは 20%が使用されている<sup>32)</sup>。その理由としては、温度上昇量が最も小さく、かつ施工性も良いことによる。コンクリートダム、特に大型のダムにおいては、温度ひび割れの抑制が最も重要であり、土木学会コンクリート標準示方書「ダムコンクリート編」や多目的ダムの建設「第 5 巻設計Ⅱ編」等では、温度応力を極力発生させないように、コンクリート配合（単位セメント量やセメントの種類等）、施工条件（打込み温度等）、施工方法（打込み厚、打継ぎ間隔等）等の標準が示されている。

## 1.2 研究の目的

研究の背景で示したように、近年ではより速くダムを構築することが望まれており、施工を合理化する工法として、面状工法の一つである RCD 工法が考案された。この RCD 工法は、現在、一般的な重力式コンクリートダムの打設工法として採用されており、大規模重力式ダムの低中標高部に適用されている。コンクリートの運搬に関しては、従来の柱状工法ではクレーンに限られるのに対して、面状工法では RCD 工法を適用することによって運搬の自由度が広がる。具体的には、クレーンによる運搬だけでなく、ダンプやベルトコンベヤ等による運搬も可能となる。これらの運搬を併用することによって RCD 工法では運搬能力が向上したにもかかわらず、打設速度は、従来の柱状工法よりもむしろ遅くなる傾向にあった。海外における面状工法である RCC 工法では施工速度が速いにも関わらず、日本の RCD 工法では打設速度が遅くなる理由として、RCC 工法は所定の品質を確保した上でより経済性を重視する一方で、RCD 工法は日本での地震および環境条件等からより高い品質・耐久性を確保することを基本的なスタンスとしたことが考えられる。

このような状況を踏まえて、高い品質・耐久性を確保した上で急速施工できる工法として、最近では、内部コンクリート(RCD 用コンクリート)を先行して打設し、その後外部コンクリートを独立して打設していく工法（巡航 RCD 工法）が開発された。

この最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）は、今後の面状工法の標準工法となっていくものと思われる。最新の RCD 工法では、従来の RCD 工法に比べコンクリートの打設速度が 1.5～2.0 倍程度に向上することから、大幅な工期短縮が可能となる。ただし、打設能力が大幅に向上することによって、逆に従来の運搬設備による運搬方法を組み合わせて運搬能力を上げても十分な運搬能力を確保できない場合があり、運搬能力からコンクリート打設速度が制約されることが考えられた。

そこで、運搬能力がさらに向上するコンクリートの運搬方法の開発を目的として、SP-TOM を考案し、実施工に適用した。考案した SP-TOM は、高所にあるバッチャープラントから低所にある堤体等の打設位置へ、法面に設置したパイプ（搬送管）の中にコンクリートを通して運搬するものである。一般に高所から低所にコンクリートを移動させると、斜めシュート等に見られるようにコンクリートは著しく材料分離する。特に、ダムコンクリートでは、 $G_{max}150mm \sim 80mm$  の大きな粗骨材が入っているため通常のコンクリートよりも材料分離しやすい。そこでこの搬送管の内部に羽根を付け、かつ回転させるものとした。搬送管の中に羽根などを付けずにコンクリートを通した場合、大量のコンクリートを短時間に運搬できるが、コンクリートは著しく材料分離する。一方で羽根などを多く付けた場合、材料分離は抑制できるが運搬能力が低下する。そこで、十分な運搬能力を確保して、かつ材料分離を抑制できるように、法面の勾配やコンクリートの種類を考慮し、最適な羽根の形状、大きさ、間隔などを検証し、各ダムサイトの地形、堤体形状等に応じた配置、構造を選定採用した。

最新の RCD 工法を適用した際のもう一つの課題として、温度ひび割れが挙げられる。特に大型のコンクリートダムでは温度ひび割れの抑制が最も重要であり、土木学会コンクリート標準示方書

「ダムコンクリート編」や多目的ダムの建設「第5巻設計Ⅱ編」等では、温度応力を極力発生させないように、様々な標準が示されている。その中でコンクリート打設速度(打上がり速度)は堤体のコンクリートの上昇温度に大きく影響するため、温度ひび割れ抑制の観点からはできるだけ打設速度を遅くした方が好ましい。RCD用コンクリートは、柱状工法で用いられる有スランプコンクリートに比べて単位セメント量が少ないため、有スランプコンクリートよりも温度上昇量を低く抑えられる。しかし、最新の RCD 工法を適用した場合、従来の RCD 工法と比べて打設速度が 1.5～2.0 倍となる<sup>28)</sup>ことから、特に大型ダムにおいてはコンクリートの温度上昇が大きくなり、温度ひび割れの発生が懸念された。

そこで、最新の RCD 工法の特長を活かして、従来の RCD 工法で施工するよりも温度ひび割れを抑制する工法を考案した。一般に、通常のコンクリートを用いた構造物の温度応力を抑制するためには、コンクリートの最高到達温度を低減することが最も効果的である。しかしながら、ダムのような非常にマスなコンクリート構造物の場合、この最高到達温度の低減に加えてコンクリート全体の温度分布の平準化が温度応力の低減につながる。そこで、最新の RCD 工法が急速施工できることを活かして冬期の打設量をできる限り多くし、その代わりに温度が高くなる夏期の打設量を少なくする工法を考案した。そのことにより、夏期の温度上昇を抑制できる一方で、冬期の温度上昇を従来の RCD 工法よりも高くでき、コンクリート堤体全体の温度の平準化が図れるものと考えた。これにより、従来の RCD 工法と同等以上の打設速度で、温度ひび割れを抑制できることを解析および実施工の計測によって検証した。また、実施工よりもさらに工期を短縮（3ヶ月短縮）させた場合において本施工法を採用した場合を想定し、その場合の温度応力がどのようになるかについても解析によって確認した。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、次の6章から構成されており、各章の関係は図－1.3.1に示すとおりである。

第1章 序論

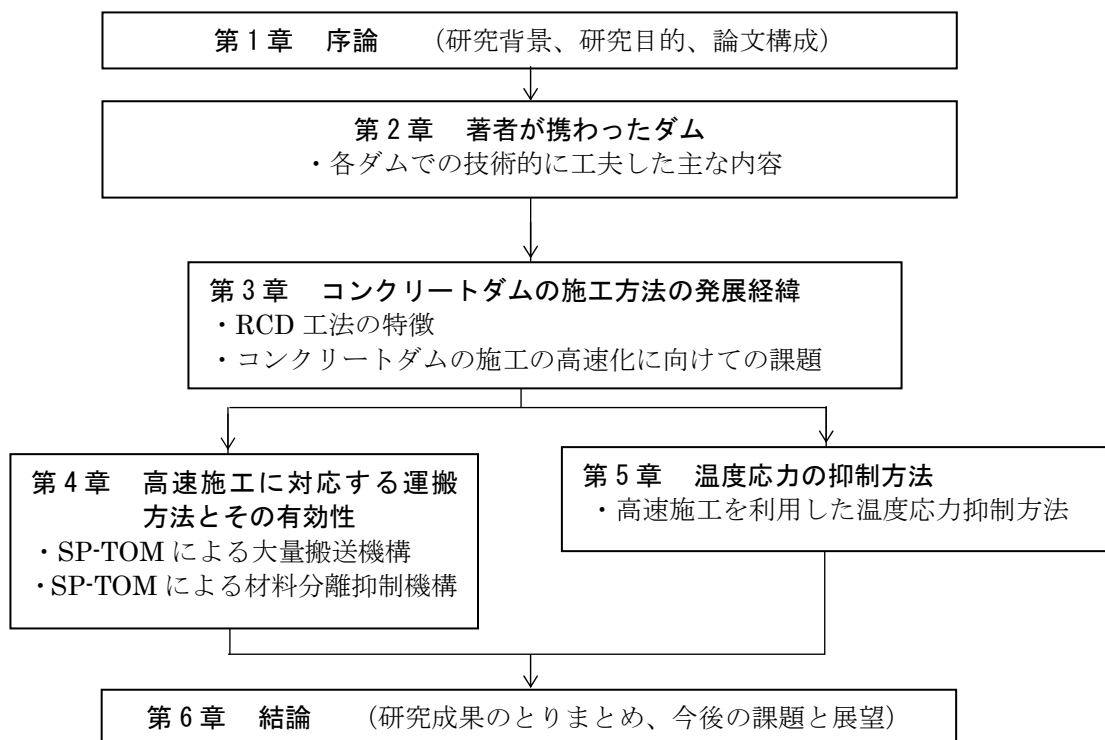
第2章 著者が携わったダム

第3章 コンクリートダムの施工方法の発展経緯

第4章 高速施工に対応する運搬方法とその有効性

第5章 温度応力の抑制方法

第6章 結論



図－1.3.1 本論文の各章の関係

各章の主な内容を以下に示す。

## 第1章 序論

本研究の背景について述べ、ダムコンクリートの高速施工方法を踏まえたうえで課題を整理し、本研究の目的を示した。

## 第2章 著者が携わったダム

筆者が現場の最前線で従事した川治ダム、巖木ダム、宮ヶ瀬ダム、温井ダムの4ダムおよび計画段階から施工・管理段階まで幅広く技術指導した奥三面ダム、滝沢ダム、嘉瀬川ダム、湯西川ダム、第二浜田ダム、五ヶ山ダム、当別ダムの7ダム、計11ダムでの技術的に工夫した主な内容について示した。

## 第3章 コンクリートダムの施工方法の発展経緯

コンクリートダムの形式と施工方法を分類して示すとともに、施工方法として、柱状工法から面状工法へと移行してきた背景を工期、コスト、品質などの観点から示した。また、現在のダムコンクリート施工の主流である従来のRCD工法および最新のRCD工法の技術的な特徴を示すとともに、コンクリートダム施工において更なる高速化・工期短縮に向けた技術的課題を整理した。

## 第4章 高速施工に対応する運搬方法とその有効性

コンクリートダムの高速施工の技術的課題である運搬能力の確保として、運搬能力を向上するコンクリートの運搬方法として考案したSP-TOMの開発経緯を示すとともに、SP-TOMの大量搬送機構および材料分離抑制機構について示した。

## 第5章 温度応力の抑制方法

コンクリートダムの高速施工のもう一つの技術的課題である温度応力の抑制として、最新のRCD工法が急速施工できることを活かして、冬期の打設量をできる限り多くし、その代わりに温度が高くなる夏期の打設量を少なくする工法を考案した。それにより、従来のRCD工法と同等以上の打設速度で、標準工法と比較して温度ひび割れを抑制できることを解析および実施工の計測によって検証した内容を示した。また、実施工よりもさらに工期を短縮（3ヶ月短縮）させても、本施工法を採用することで、温度応力が同程度以下となることを示した。

## 第6章 結論

本研究から得られた知見を整理するとともに、残された課題と今後の開発への展望を述べた。

## 第1章の参考文献

- 1) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.51、2010.7
- 2) 水野光章：我が国コンクリートダムの設計、施工の変遷（一）、ダム日本、No.806、pp.11-28  
2011.12
- 3) 水野光章：我が国コンクリートダムの設計、施工の変遷（二）、ダム日本、No.807、pp.33-52  
2012.1
- 4) David P Billington and Donald C Jackson, "Big Dams of the New Deal Era",  
University of Oklahoma Press, 2006.10
- 5) "Boulder Canyon Project, Final Report", 1947 Denver 米国開拓局
- 6) 上坂恒雄、塩入淑史：締固め工法における進歩、コンクリート工学、Vol.23、pp.74-81、1985.7
- 7) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.40、2010.7
- 8) Henry H. Thomas, "The engineering of large Dams", John Wiley & Sons Inc, 1976
- 9) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.41、2010.7
- 10) (一財) ダム技術センター：RCD 工法技術の進歩、pp.2-1-2-2、2005.12
- 11) 廣瀬利雄：コンクリートダムの合理化施工に関する研究、東京大学学位論文、pp.46、1989.1
- 12) (一財) ダム技術センター：RCD 工法技術の進歩、pp.2-2、2005.12.
- 13) 4th International Symposium on RCC dams, General Report; 2003.11, Madrid Spain
- 14) 鈴木徳行、志水茂明：RCD 工法と RCC 工法との特性について、土木学会論文集、第 403 号/  
VI-10、pp.93-102、1989.3
- 15) 永山 功、新高庸 介、RCD(Roller Compacted Dam-concrete) と RCC(Roller Compacted  
Concrete)ー日本と諸外国におけるコンクリートダムの新しい施工法の相違一、土木学会誌、  
pp.76-79、1995.6
- 16) (社)日本大ダム会議施工の合理化分科会：RCD 工法の工期短縮に関する検討、大ダム No.179、  
pp.8、2002.4
- 17) 梅田貞夫：RCD 工法ダムの高速施工に関する研究、京都大学学位論文、pp.33、2000.12
- 18) (一財) 日本ダム協会：RCD 工法ダムの施工効率の分析 その 1 (案)、pp.47、2000.6
- 19) 梅田貞夫：RCD 工法ダムの高速施工に関する研究、京都大学学位論文、pp.34、2000.12
- 20) (一財) ダム技術センター：巡航 RCD 工法 施工技術資料、pp.1-1、2010.3
- 21) (一財) ダム技術センター：巡航 RCD 工法 施工技術資料、pp.1-2、2010.3
- 22) 藤澤侃彦、吉田等、山口嘉一、佐々木隆：巡航 RCD 工法の開発、大ダム、No.228、pp.32-37、  
2014.7
- 23) 中島修、永松和彦：「巡航 RCD 工法」の技術開発と嘉瀬川ダム本体工事での試みーその 3ー、  
ダム技術、No.279、pp.26-35、2009.12
- 24) 高橋政則、渡邊正美、飯原征敏、須田健一：湯西川ダム本体工事における「巡航 RCD 工法」

- の適用－その１－、ダム技術、No.297、pp.56-76、2011.6
- 25) 鴨打章、住吉正浩、竹内康秀、田中元輝、四元秀哲、林健二、取達剛：五ヶ山ダム本体工事における「巡航 RCD 工法」－その１－、ダム技術、No.340、pp.80-106、2015.1
- 26) 高橋政則、渡邊正美、飯原征敏、須田健一：湯西川ダム本体工事における「巡航 RCD 工法」の適用－その２－、ダム技術、No.298、pp.35-58、2011.7
- 27) 高橋政則、渡邊正美、飯原征敏、須田健一：湯西川ダム本体工事における「巡航 RCD 工法」の適用－その４－、ダム技術、No.301、pp.60-78、2011.10
- 28) 藤澤侃彦：RCD 工法の真の実力と巡航 RCD 工法、ダム技術、No.331、pp.3-20、2014.4
- 29) 加納茂紀、新屋敷隆、稲木敏行：セメントとフライアッシュの現場混合とフライアッシュ置換率について－富郷ダムにおける置換率 40%の採用について、ダム技術、No.121、pp.41-54、1996.10
- 30) 堀口敬：高炉スラグ微粉末の RCD 工法と日本一美しい河川－札内川ダム－、土木学会誌、No.80、pp.6-9、1995.2
- 31) 宮越勇次、田村順一：札内川ダムの設計・施工について、ダム日本、No.627、pp.47-73、1997.1
- 32) （一財）ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.238-309、2010.7



## 第2章

# 筆者が携わったダム



## 第2章 筆者が携わったダム

### 2.1 概要

筆者は1971年7月に鹿島建設(株)に入社後、ダム建設工事およびダム建設指導に主に携わることとなった。川治ダム、巖木ダム、宮ヶ瀬ダム、温井ダムの大規模コンクリート4ダムの工事では最前線で従事し、それ以降は鹿島建設(株)が関連したすべてのダムについて計画段階から施工・管理段階まで幅広く技術指導している。

筆者が携わったダムの諸元、工事内容および筆者の業務内容を表-2.1.1にまとめて示す。なお、ダムの諸元などは(財)日本ダム協会編：ダム年鑑2015年に基づいた。

表-2.1.1 筆者が携わったダムの諸元

No.	ダム名称	形式 <sup>*1</sup>	所在地	ダム事業者	工事名称	工期		工事内容	著者の担当業務
1	川治 (カワジ)	A	栃木県 日光市	国土交通省 関東地方 整備局	川治ダム本体建設 工事	着手	1974	アーチダムとしては国内4番 目の堤高140mの放物線 アーチダム	1974～1982 工事係長 (現場従事)
						竣工	1981		
2	厳木 (キュウラギ)	G	佐賀県 唐津市	国土交通省 九州地方 整備局	厳木ダム建設	着手	1980	堤高117mの大型重力式コ ンクリートダム	1985～1985 工務係長 (現場従事)
						竣工	1986		
3	宮ヶ瀬 (ミヤガセ)	G	神奈川県 相模原市	国土交通省 関東地方 整備局	宮ヶ瀬ダム本体建 設工事	着手	1987	RCD工法を用いた国内最大 の堤体積2,000千m3の大型 重力式ダム	1987～1996 工事所長 (現場従事)
						竣工	1998		
4	奥三面 (オクミオモテ)	A	新潟県 村上市	新潟県	奥三面ダム本体工 事	着手	1991	磐梯朝日国立公園に位置 する堤高116mのアーチダ ム	1997～2002 土木技術本部他 (技術指導)
						竣工	2002		
5	温井 (ヌクイ)	A	広島県 山県郡	国土交通省 中国地方 整備局	温井ダム本体工事	着手	1991	アーチダムとしては国内2番 目の堤高156mのアーチダ ム	1995～2000 工事長 (現場従事)
						竣工	2002		
6	滝沢 (タキザワ)	G	埼玉県 秩父市	(独)水資源機 構	滝沢ダム本体建設 工事	着手	1999	堤高132mの大型重力式コ ンクリートダム	1999～2008 土木技術本部他 (技術指導)
						竣工	2008		
7	嘉瀬川 (カセガワ)	G	佐賀県 佐賀市	国土交通省 九州地方 整備局	嘉瀬川ダム堤体建 設工事	着手	2005	堤高97mの大型重力式コン クリートダム	2005～2011 土木管理本部他 (技術指導)
						竣工	2011		
8	湯西川 (ユニシガワ)	G	栃木県 日光市	国土交通省 関東地方 整備局	湯西川ダム本体建 設工事	着手	2008	堤高119mの大型重力式コ ンクリートダム	2008～2012 土木管理本部他 (技術指導)
						竣工	2012		
9	(施工中) 第二浜田 (ダイニハマダ)	G	島根県 浜田市	島根県	浜田川総合開発事 業 第二浜田本体 建設工事	着手	2009	堤高97.8mの大型重力式コ ンクリートダム	2009～2015 土木管理本部他 (技術指導)
						竣工	2016 (予定)		
10	(施工中) 五ヶ山 (ゴカヤマ)	G	福岡県 筑紫郡	福岡県	五ヶ山ダム堤体建 設工事	着手	2012	堤高102.5mの大型重力式 コンクリートダム	2012～2015 本社役員 (技術指導)
						竣工	2018 (予定)		
11	当別 (トウベツ)	CSG	北海道 石狩郡	北海道	当別ダム建設事業 本体工工事	着手	2008	世界で初めて施工された堤 高52mの台形CSGダム	2008～2012 土木管理本部他 (技術指導)
						竣工	2012		

\*1: ダム形式 A:アーチダム, G:重力式ダム, CSG:台形CSGダム

- : 従来の RCD 工法
- : 最新の RCD 工法(巡航 RCD 工法)一部採用
- : 最新の RCD 工法(巡航 RCD 工法)本格採用

## 2.2 川治ダム

### 2.2.1 概要



写真－2.2.1 川治ダム全景

- ダム事業者 : 関東地方整備局
- 所在地 : 栃木県日光市川治温泉川治
- 工事名称 : 川治ダム本体建設工事
- 施工者 : 鹿島建設
- 工期 : 1974年1月6日～1981年11月30日
- ダム形式 : アーチ式コンクリートダム
- 諸元 : 利根川水系鬼怒川  
有効貯水量 76,000 千 m<sup>3</sup>  
堤高 140m、堤頂長 320m、堤体積 700 千 m<sup>3</sup>
- 筆者の従事業務 : 岩盤を緩めない発破方法としてのプレスプリット工法、長大法面に対する安全対策、最適なリフトスケジュール・グラウトに対する電算化を推進した。



写真－2.2.2 川治ダムプレスプリット工法

## 2.2.2 技術的に工夫した主な内容

### (1) プレスプリット工法の採用<sup>1)</sup>

#### 1) プレスプリット工法に期待する効果

アーチダムの堤体掘削を改善するため、爆破工法としてプレスプリット工法を採用した（写真－2.2.2 参照）。その採用理由は以下のとおりである。

##### ① 品質の向上

アーチダムの基礎岩盤は重要な構造物であり、掘削時の爆破作業によって損傷することは全体に避けなければならない。特に、主掘削の爆破振動については、過去のダム（川俣・奈川渡・矢作等）で振動実験を行い、主掘削の斉発量、段発量の規制や適切な段発間隔を決定することで対処していた。

これに対し、川治ダムでは主掘削実施前に仕上げ面沿いに破断面を造成し、主掘削時の爆破振動が基礎岩盤へ伝達する割合をさらに軽減することで基礎岩盤の品質向上を図った。

##### ② 工期短縮・コストダウン

従来、基礎岩盤より約3m以内は、基礎岩盤への影響を考慮し、ジャックハンマー爆破および人力主体の仕上げ掘削で施工しており、川治ダムの場合もこれに準じた仕様になっていた。この2次掘削は人力施工ということもあって主掘削に対して遅れがちで常に工期管理上の課題となっていた。

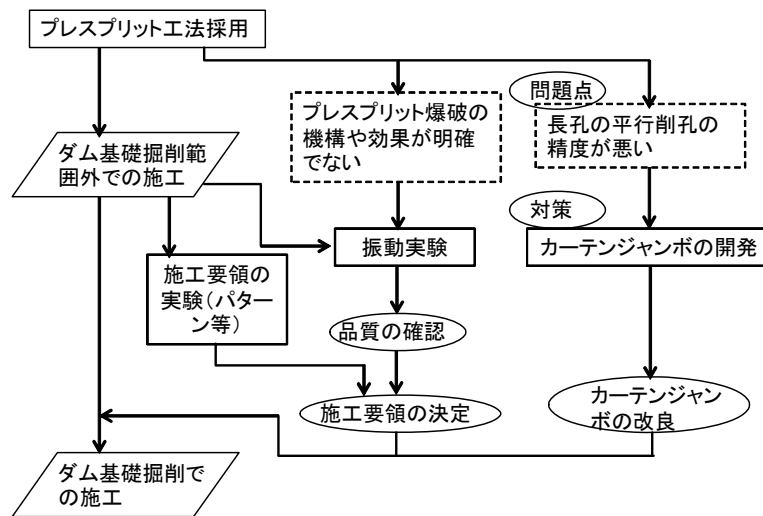
プレスプリット工法の導入によって、2次掘削量の軽減を図るとともに、主掘削の爆薬量の制限の緩和にもつながる掘削能率の向上を図って、工期およびコスト面で改善を図ることとした。

##### ③ 安全性の確保

2次掘削は人力による不安定作業であり、また、主掘削と上下作業となり、崩落や墜落事故の発生の高い工種であったため、これらの軽減により安全性を高める効果を期待した。

#### 2) プレスプリット工法の開発手順

図－2.2.1 にプレスプリット工法の開発フローを示す。本採用に先駆け、ダムの基礎岩盤の範囲外で爆破振動実験を行い、品質の確認や施工要領の決定を行うとともに、平行な長孔前孔用に新たに開発したカーテンジャンボ機の改良を行って、本格的採用に移行した。



図ー2.2.1 プレスプリット工法の開発フロー

### 3) プレスプリット工法の効果と課題

プレスプリット工法の効果として以下が確認できた。

#### ① 品質の向上

振動実験により主掘削の基礎岩盤に対する爆破振動値が約 30%減少することが確認でき、破断面造成時のプレスプリット爆破も写真ー2.2.3 に示すように、孔列方向に卓越した亀裂を発生し、併せて基礎岩盤への影響が少ないことが確認できた。

#### ② 工期短縮

設定工期内に掘削法面の安全対策を十分に講じながら施工を完了することができ、仕上げ部分の 2 次掘削について約 15%の省力化が図れた。

#### ③ 安全性

2 次掘削の省力化と迅速施工により法面処理が遅滞なく進められ、過去の事例で多く見られた崩落、墜落による事故をゼロにすることができた。



写真ー2.2.3 プレスプリット工法による岩盤面

## (2) 現場管理業務の電算化<sup>2)</sup>

ボーリンググラウト工はデータ量が膨大で、その整理に多くの時間を要し、施工中の管理が不十分であったため、注入データの整理および日報、出来形資料の作成に電算化を図った。

### 1) 電算化計画の方針

ボーリンググラウト工の電算化計画の方針を表-2.2.1 に示す。また、川治ダムのボーリンググラウト工の数量とグラウト工の書類作成フローを表-2.2.2 と図-2.2.2 に示す。

ボーリンググラウト工は多段式ステージ方式で施工しており、データ処理しなければならない情報量は、40 個（1 ステージ当り）×40,000st=1,600,000 個となり、施工中に十分な整理ができる量ではなかった。転記集計の作業量が多く、転記集計ミスをなくす必要性から電算化処理を行うこととした。

表-2.2.1 電算化計画の方針

順序	問題点	電算処理項目	期待する効果
I	日報の作成に時間がかかり 注入分析の時間が不足	日報・出来形等の作成 の電算化	・日報, 出来形等作成の省力化, 正確化 ・注入分析のデータ収集の自動化
II	データが多すぎて施工中 に十分な分析ができない	注入分析資料作成の電 算化	・注入分析資料作成の省力化, 迅速化 ・資料作成内容の多様化, 細分化
III	注入分析方法が確立してい ない(特にカーテングラウト)	カーテングラウト工の注 入分析方法の確立	・注入分析方法の定量化, 標準化 ・カーテングラウト網の品質の均一化

表-2.2.2 ボーリンググラウト工の数量

グラウトの種類	延 長(m)	ステージ数(st)
1次コンソリデーショングラウト	28,000	5,600
2次コンソリデーショングラウト	35,000	7,000
トンネル周辺グラウト	8,000	2,600
特殊コンソリデーショングラウト	9,000	1,800
ショルダー部コンソリデーショングラウト	15,000	3,000
カーテングラウト	100,000	20,000
計	195,000	40,000

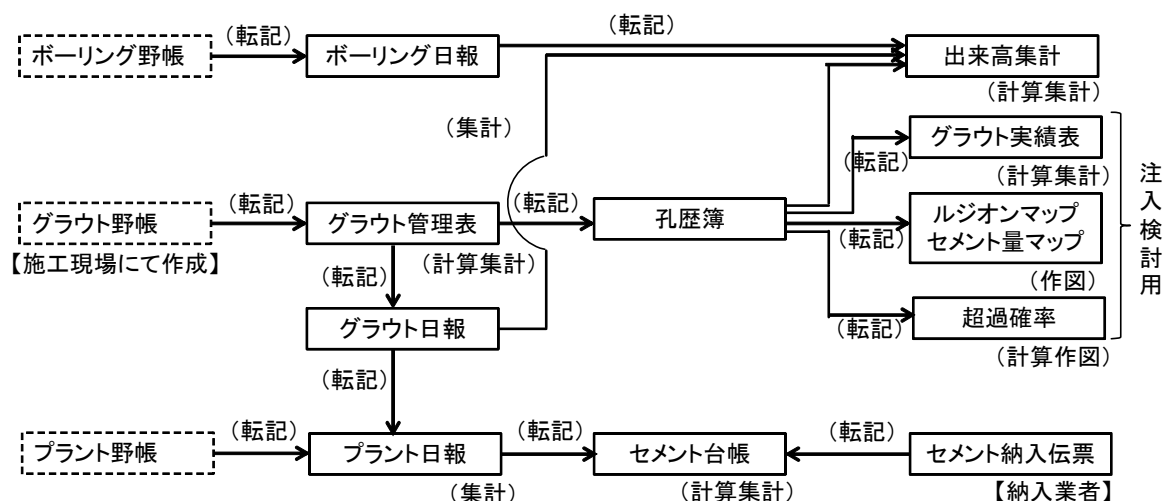


図-2.2.2 グラウト工の書類作成フロー

## 2) 電算化の効果

### ① 書類作成時間の削減

日報・出来高、注入検討資料の書類作成時間にあって建設会社の社員の従事時間が 82%削減でき、協力会社の従業員の従事時間が 28%削減できる効果が得られた。書類数においてもボーリング日報データ、グラウト管理表データ、プラント日報データ（プラントに納入されるセメント量のみ）を作成するのみで、これまで作成していた全ての書類をアウトプットとして入手可能となった。

### ② ミスの減少

転記・計算・集計の自動化により、ミスは記入ミスに限られるため、数の減少とチェックの手間の軽減に効果があった。また、電算機自体で記入時のミスを可能な限り自動的に発見する仕組みにしたため、出来高集計時の発注者との突合せ手間も激減できた。

### ③ 注入検討資料作成の迅速化・多様化

従来、注入検討資料作成に 20～30 日を必要としたが、電算化により 1 日で入手可能となった。また、場所別や圧力別など必要に応じて資料の細分化・多様化が可能となった。ルジオンマップなどはボーリング孔の座標や削孔長・方向を入力することにより、注入状況を座標的に正確に把握できるようになった。

### ④ データの蓄積

注入実績のデータが電子化されたため、今後の他ダムの検討の際にも利用可能となった。

### (3) 油圧バイブローチの開発<sup>3)</sup>

従来のダムコンクリートは電気式のバイブレータを締め固め機として使用していたが、故障率が高く、耐用時間が短い欠点を補うため、油圧駆動方式のバイブレータを開発した。また、このバイブレータを搭載したベースマシンについても実用化した。

#### 1) 油圧バイブレータの概要

開発した油圧式のバイブローチ専用設計・製作したバイブレータで油圧モータを駆動源として高い振動数と強力な遠心力を発生し、かつ過酷な使用に耐えられるように堅牢としたバイブレータである。その特徴と仕様は以下のとおりである。

- ・ ベースマシンの駆動用油圧を共用し、油圧モータは高速・高振動・重荷重に耐えるギヤモータで、軸受け潤滑は材質・油を厳選して軸受の寿命の増大を図っている。
- ・ 振動数はコンクリートの締め固め状況に合わせて 3,000～8,000v.p.m の間に任意に調整可能である。
- ・ 振動部は特殊鋼管を使用し、先端部分は耐摩耗処理を施している。
- ・ 振動体と継手の間を円筒型防振ゴムで防振処理を行い、ブーム取付けも上部・中間を各々防振処理し、摩耗と不快感を減少している。
- ・ ベースマシンはパワーショベル (0.3m<sup>3</sup>級バックホウ) を改造したものである。
- ・ バイブレータの配列はピン 1 本の手動操作で四角または 1 列に変えられ、上下スライド機構で任意の本数が使用できる。



写真-2.2.4 油圧バイブレータ（四角配列）

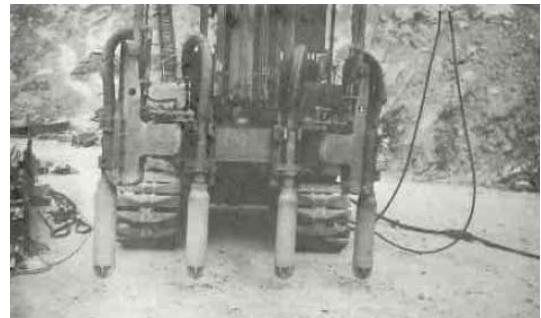


写真-2.2.5 同左（1列配列）

#### 2) 使用実績

本体コンクリート (スランプ  $2 \pm 1$  cm、粗骨材最大寸法 150mm) の約 17.5 万 m<sup>3</sup> に使用したが、初期の軽微な故障以外全く故障もなく良好な成果を得ている。

## 2.3 蔵木ダム

### 2.3.1 概要

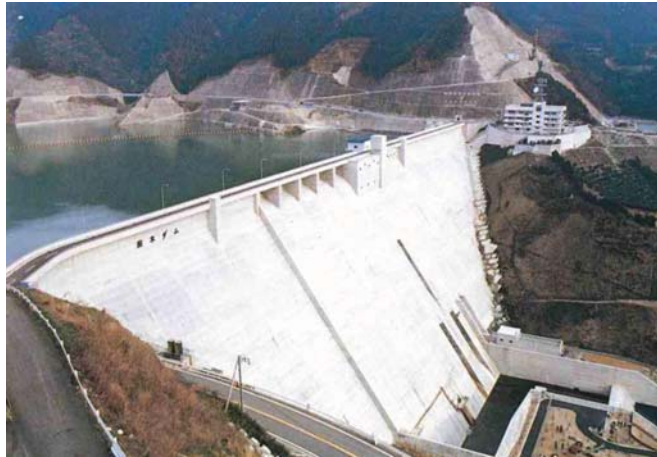


写真-2.3.1 厳木ダム全景

- ダム事業者 : 九州地方整備局
- 所在地 : 佐賀県唐津市厳木町広瀬
- 工事名称 : 厳木ダム建設工事
- 施工者 : 鹿島・清水・鴻池共同企業体
- 工期 : 1980年8月5日～1986年9月30日
- ダム形式 : 重力式コンクリートダム
- 諸元 : 松浦川水系厳木川

有効貯水量 11,800 千 m<sup>3</sup>

堤高 117m、堤頂長 390.4m、堤體積 1,088 千 m<sup>3</sup>

- 筆者の従事業務： 基礎処理工に対して、省力化とグラウチングデータの迅速かつ正確な処理を目的として、全自動化した中央プラントとグラウト作業を IT 管理するシステムを導入した。

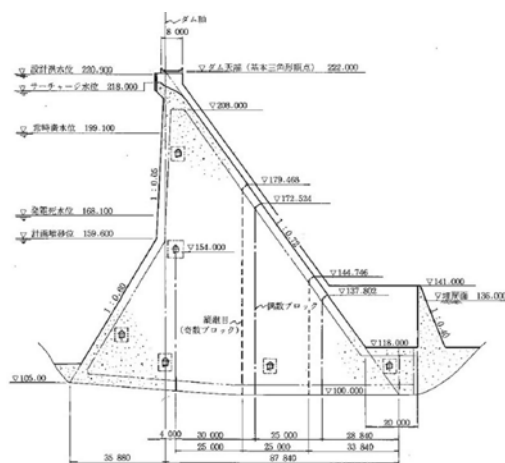


図-2.3.1 巖木ダム断面図

## 2.3.2 技術的に工夫した主な内容

### (1) 基礎処理工の省力化・IT化

#### 1) 基礎岩盤清掃の省力化<sup>1)</sup>

ダム工事の基礎岩盤清掃作業は高圧水で岩盤に付着している粘土、ゴミ等を完全に洗浄し、岩盤の凹部分に溜まった粘土、砂、礫を取り除く作業で、当時は人力により多人数で長時間かけて行われているのが大半であり、省力化が課題とされていた。なお、当工事の岩盤清掃の全体数量は約42,000m<sup>2</sup>である。

##### ① ジェットヘドラーの採用

ジェットヘドラーは強力な真空ポンプで吸引し、真空輸送にて粘土、砂、礫などを回収する機械である。30mm程度の岩くずまで吸引し、1,000m圧送できるコンパクトな機械であり、ホース1本で作業ができるなど岩盤清掃作業の工程の省力化とスピードアップを図るものである。

表-2.3.1にジェットヘドラーによる方法と従来工法の工程比較を示す。また、表-2.3.2と表-2.3.3にジェットヘドラーと回収タンクの仕様を示す。

表-2.3.1 ジェットヘドラーと従来工法との工程比較

従来工法	洗浄	→	洗浄汚染水のポンプ排水	→	レイタンス、土砂の回収	→	処理		
	ウォータージェット ワイヤーブラシ ホリシヤ		水中ポンプ		人力 ベルトコンベア		ベッセル ケーブルクレーン ダンプトラック		
採用工法	洗浄	→	洗浄汚染水の清掃および回収タンクまで真空輸送			→	回収物の圧送	→	処理
	ウォータージェット ハイウォッシャー		↑ ジェットヘドラー				↑ アースワームタンク	↑	ベッセル ケーブルクレーン ショベル ダンプトラック

表-2.3.2 ジェットヘドラー（真空発生ユニット、V740-20）の仕様

寸法 (m)	重量 (kg)	真空ポンプ kW極種	最高到達真空度 (mmHg)	最大風量 (m <sup>3</sup> /min)	最大封水量 (ℓ/min)	口径 (mm)	作業可能 水平距離 (m)
長 幅 高 3.4 × 1.1 × 1.0	1,500	22-4-E	740	18	60	100	1,000

表-2.3.3 アースワームタンク（ズリ・ヘドロ回収タンク、KA-1000型）の仕様

寸法 (m)	重量 (kg)	容積 (m <sup>3</sup> )	排水ポンプ	コンプレッサ	口径 (mm)
長 幅 高 1.8 × 1.2 × 1.78	1,000	1.5	mH m <sup>3</sup> /min kW 10 × 1.3 × 5.5	kW kgf/cm <sup>2</sup> V 0.4 × 7 × 200	100

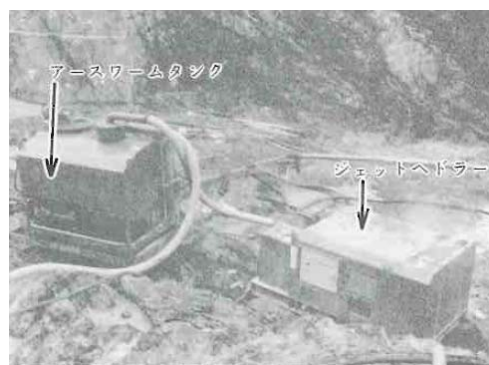
## ② ジェットヘドラー採用の効果

写真－2.3.2にジェットヘドラーの設置状況、および写真－2.3.3にジェットヘドラーを示す。

ジェットヘドラーを採用した結果、清掃時間の短縮、人力でも少人数で施工可能、清掃状況が良好、ホース1本の作業で作業能率のばらつきがなく、安全に作業が可能であった。ただし、回収土砂の径はホース内での詰まり防止の観点から 30mm 以下が適当であり、また、揚程は 10m 程度であり、高低差のない広い岩盤部で非常に有効であることが確認された。



写真－2.3.2 ジェットヘドラーの設置状況

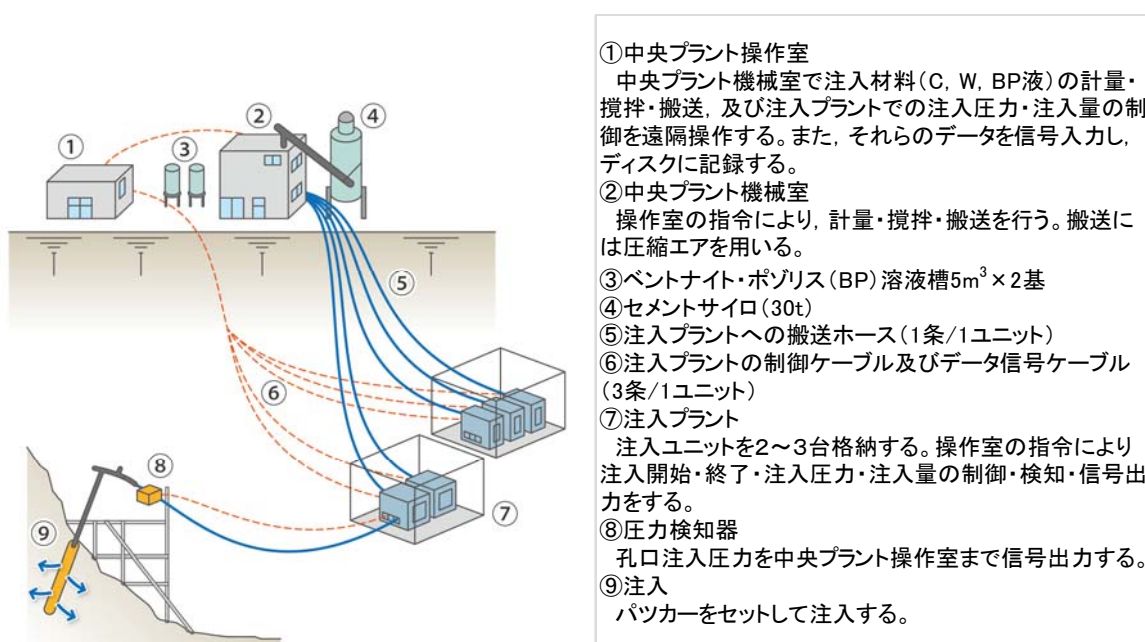


写真－2.3.3 ジェットヘドラー

## 2) ボーリング・グラウチング工の省力化・IT化<sup>2)</sup>

### ① 省力化・IT化の概要

当工事のコンソリデーショングラウトとカーテングラウトのボーリング延長は、三期工事（昭



図－2.3.2 グラウト系統図

和 59 年 3 月 20 日～昭和 60 年 3 月 30 日) でそれぞれ 11,552m と 12,309m であり、省力化とグラウトデータの迅速かつ正確な処理を図るため、全自動化した中央プラントと練混ぜ・注入・解析までをコンピュータ管理するシステムを導入した。

図-2.3.2 に、グラウト系統図、コンピュータ管理システムの概要を示す。

## ② コンピュータ管理システム導入の効果

表-2.3.4 にコンピュータ管理システムを導入したことによる効果を従来方式と比較して示す。

全自動プラントとコンピュータ管理システムの組合せにより、労働者数を大幅に削減することができ、1つの部屋にいれば、グラウト工事（計量・攪拌・搬送・圧入）をしながら、岩盤変位量を観測し、日報作成までできるようになった。また、システムとして人間操作の単純なミスに対して、チェック機構が働き、警報を発する機能を取り入れている。

表-2.3.4 従来方式との比較

比較項目	従来の人手による方式	電算機導入による全自動化方式
1.労働者数 (注入プラント5セット当り)	中央プラント 3人 注入プラント 10人 注入孔口 5人+ $\alpha$ リーク処理大 計 18人 の場合、増加。	中央プラント(操作室) 3人 注入プラント 2人 注入孔口 5人+ $\alpha$ 計 10人
2.プラント仮設備及び撤去に 要する日数	据付 7日 撤去 5日 計 12日	据付 2日 撤去 1日 15tレックカー必要 計 3日
3.報告書作成の迅速化	日報作成(30st/日) 2人 …1日 解析資料 3人 …7～14日	日報作成(30～100st/日) 操作室兼務 解析資料 1人 …1～2日
4.報告書の信頼性	人手業務のため、転記ミス・計算間違い 等個人差があり、チェック業務が大きい。	コンピュータによる全自動処理のため信 頼性大である。
5.品質管理	人手業務のため、注入材品質・注入圧 力・注入量測定管理等に個人差が出 てばらつきがある。	全自動化、電算化処理のため、品質に ばらつきが少ない。
6.データの保管及び資料の 再利用について	日報・書類として残すため膨大な資料と なり、他ダムへの資料水平展開が大変 である。	超大型コンピュータ(M280H)に資料を登 録するため、資料の再利用が容易であ る。

## (2) トンネル式バンカー線の採用<sup>3)</sup>

トランスファーカのルートまたは走行路が堤体内（2BL、EL213）にあり、全体工程を検討した結果、この部分のトンネル施工を行い、工程短縮を図ったものである。

### ① 当初計画の問題点

当初計画により施工を行う場合、以下の問題点が考えられたため、検討の結果、トンネル案を採用した。

- ・ ケーブルクレーンの運転室が堤体下流側にあり、コンクリートバケットを上流側で吊り上げることはケーブルクレーン運転の安全性、能率向上の意味でマイナスである（ケーブルクレ

ーン配置が下流吊上げに有利になっている)。

- ・ カーテングラウト、天端工等の工程を考えた場合、湛水開始に間に合わない。

## ② トンネル式バンカー線の採用の効果

写真－2.3.4にトンネル式バンカー線の設置状況を示す。

トンネル式バンカー線を採用したことによる効果は以下のとおりである。

- ・ 運転室からトランスファーカの出入りが見え、安全面で好評であった。
- ・ 堤体コンクリート打設完了を約1か月間短縮できた。

トンネル部の閉塞工は一般的な堤内仮排水路の考え方を取り入れ、止水工とコンタクトグラウト工を実施した。なお、閉塞工のコンクリート数量は212m<sup>3</sup>であった。



写真－2.3.4 トンネル式バンカー線の設置状況<sup>4)</sup>

## 2.4 宮ヶ瀬ダム

### 2.4.1 概要



写真－2.4.1 宮ヶ瀬ダム全景

- ダム事業者 : 関東地方整備局
- 所在地 : 神奈川県相模原市緑区青山
- 工事名称 : 宮ヶ瀬ダム本体建設工事
- 施工者 : 鹿島建設・大林組・戸田建設共同企業体
- 工期 : 1987年11月19日～1998年3月20日
- ダム形式 : 重力式コンクリートダム
- 諸元 : 相模川水系中津川  
有効貯水量 183,000 千 m<sup>3</sup>  
堤高 156m、堤頂長 375m、堤体積 2,000 千 m<sup>3</sup>
- 筆者の従事業務 : 1987年12月より1996年3月まで工事所長を含めて約10年従事し、大型重力式コンクリートダム施工法である RCD 工法の合理化に努め、各種機械化・プレキャスト化・品質課題に対する克服に主体的にかかわった。



写真－2.4.2 宮ヶ瀬ダム施工状況写真状況写真

## 2.4.2 技術的に工夫した主な内容

### (1) RCD 用コンクリートの品質確保

当ダムは、堤高 156m、堤体積 200 万  $\text{m}^3$  の日本では最大級のハイダムであるが、これを RCD 工法により通年で急速施工することから、品質管理や施工において以下の課題があった。

- ① 堤高、コンクリート量とも最大級のため、より高品質で施工性の良いコンクリートが要求される
- ② 河床部では、堤幅が約 180m とレーヤ長が長く、しかも大量のコンクリートを打設する
- ③ 約 200 万  $\text{m}^3$  のコンクリートを短期間（約 39 ヶ月）で通年施工することから、品質を確保するための方策が必要になる

当ダムの品質管理実績として、以上の課題に対して実施した凝結遅延剤を使用した対策<sup>1)</sup>について以下に述べる。

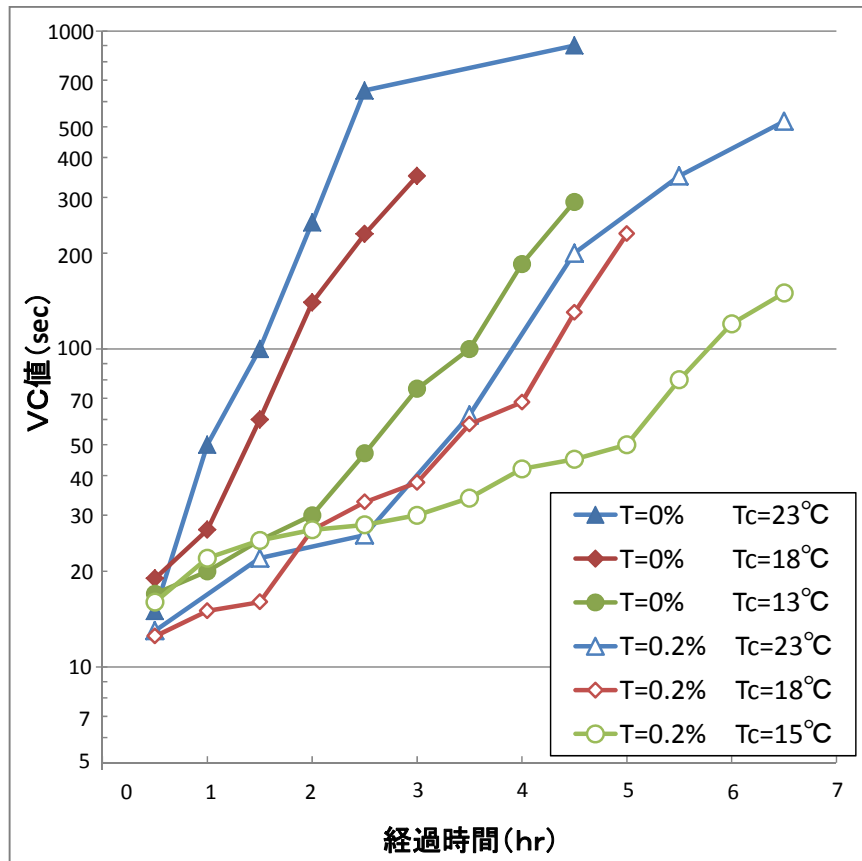
RCD 工法においては、コンクリートの撒出しから振動ローラによる締固めまでの時間が長く、締固め時に所要のコンシステンシーを確保することが必要となる。一方、施工能率を向上させるには、施工エリアを可能な限り広くすることが必要となり、撒出しから締固めまでの所要時間は少なくとも 4 時間程度となる。

また、当ダムの RCD 用コンクリートでは、原石山で採取される細骨材中にモンモリロナイト等の粘土鉱物が 2～5 % 含有されていることが原因でコンシステンシー（VC 値）の経時変化が大きいことが明らかとなっていた。

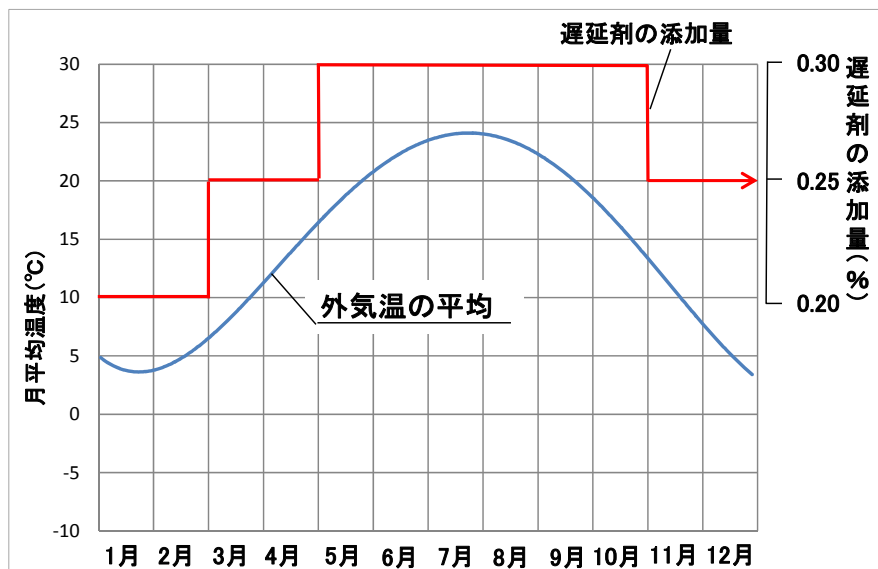
そこで、この対策としてコンクリート用の混和剤として凝結遅延剤を導入することとした。凝結遅延剤はオキシカルボン酸塩を主成分とするもので、セメント粒子に吸着して表面に薄い膜を形成し、これによってセメントと水の接触を遮断して水和反応を遅延させるものである。図-2.4.1 に凝結遅延剤の有無による VC 値の経時変化の違いを示す。

凝結遅延剤の添加率と外気温の関係を図-2.4.2 に示す。実施工に先立って実施した試験施工によって、当ダムの設計密度（ $2.35\text{t}/\text{m}^3$ ）と配合強度（ $160\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）を確保できる締固め時の VC 値の上限値は 50 秒程度であることが判明していたため、練上がり時の VC 値を 20 秒、コンクリートの練上がり温度が外気温に等しいと仮定して、練混ぜより 4 時間後の VC 値が 50 秒になるように添加率を定めた結果、図のような実績が得られた。

凝結遅延剤を添加したコンクリートの圧縮強度の月毎の平均値を図-2.4.3 に示す。一般に、通常のダムコンクリートにおいては、夏期において圧縮強度が低下する傾向が認められる。これは、夏期におけるコンシステンシーを一定に保つために単位水量を増加するためと考えられるが、図に示したように当ダムにおいては逆の傾向を示し、夏期の圧縮強度が大きい結果となった。この原因として、凝結遅延剤が減水効果を有することが挙げられる。図-2.4.2 に示したようにコンクリート温度が高いほど凝結遅延剤の添加率は増えており、凝結遅延剤の減水効果によりコンシステンシー確保のための単位水量の増加がなかったものと考えられる。



図－2. 4. 1 凝結遅延剤の有無による VC 値の経時変化の違い



図－2. 4. 2 外気温の変化と凝結遅延剤の添加率の推移

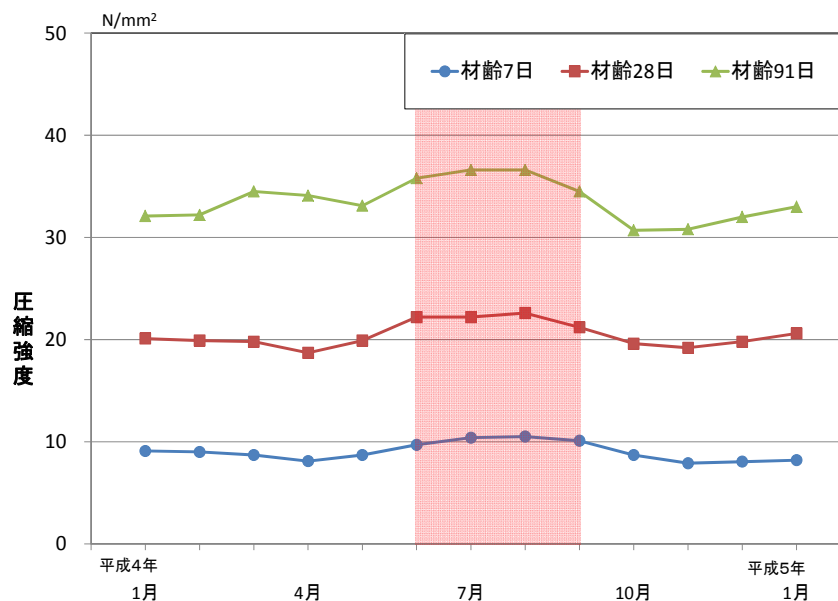


図-2.4.3 圧縮強度の推移

当ダムでは、定期的にボーリングコア（直径 200mm）を採取し、圧縮強度試験、単位容積重量およびコア評価を実施した。コア試験結果の凝結遅延剤の添加率毎の平均値を表-2.4.1 に示す。なお、コア強度の試験材齢は 91 日である。

表に示すように、凝結遅延剤を使用しない場合のコア強度、単位容積重量およびコア評価値は、使用した場合よりも明らかに小さい（理論単位容積重量=2.45 t/m³）ことから、転圧時の VC 値が 50 秒よりも大きく、締固めが不十分であると考えられる。一方、凝結遅延剤を使用した場合は、全添加率において単位容積重量が理論値と同程度であり、コア評価値にも差異が認められないことから、十分に締固めがされていると考えられる。また、当ダムの配合、材料に対して図-2.4.2 に示した凝結遅延剤の添加率は妥当であったものと考えられる。

以上より、凝結遅延剤の使用は締固め時のコンシステンシーの確保に有効であるとともに、夏期における圧縮強度の増進効果にも寄与することが確認できた。

表-2.4.1 コアサンプルによる試験結果

添加率 (C×%)	コア強度 (kgf/cm²)	単位容積重量 (t/m³)	コア評価量 (5 点法)
0	189	2.40	3.5
0.2	195	2.47	4.7
0.25	211	2.45	4.5
0.3	233	2.45	4.8

## (2) 施工の合理化（機械化・プレキャスト化・省力化）

当ダム最重要課題は、大量のコンクリートを急速かつ経済的に施工することであり、同時に大規模ダムにおける合理化施工を追及することであった。ここでは、その一環として実施した

- ① ダンプトラック搭載型インクライン設備
- ② 通廊のプレキャスト化
- ③ 打継面処理作業の合理化

について述べる。

### 1) ダンプトラック搭載型インクライン設備<sup>2)</sup>

RCD 工法におけるバッチャープラントから打設ブロックに至るコンクリート運搬設備は、ダムサイトの地形・地質やダムの規模等を勘案して、最も経済的で施工性の良い方法が選択される。当ダムが建設されるまでの他ダムの実績では、進入路を造成して直接ダンプトラックで運搬する方法、コンクリートバケットに積み替えてケーブルクレーンで運搬する方法、左右岸どちらかの本体法面を利用して軌条を敷設しインクラインのバケットに積み替えて運搬する方法などがあった。

当ダムでは、コンクリートの品質確保と省力化を考慮し、主運搬設備であるインクラインにダンプトラック搭載型（カウンターウェイトバランス方式）を導入した。これにより、コンクリートの積替え回数を少なくし、運搬サイクルの短縮とコンクリートの材料分離を防止して品質確保を実現するとともに、他の施工用重機や資機材を堤体内に直接搬入することを可能とした。

本インクラインは、ダム本体の右岸部斜面に専用の軌条を2系列設け、同軌条延長線上の右岸天端に機械室を設置して、その中の巻上げ機によって軌道上のダンプ台車を昇降させた。ダンプ台車は、9 m<sup>3</sup>のコンクリートを積載した 20 t ダンプトラックを直接搭載し、ダンプの運転手は搭乗状態のままで、専任の運転員の操作により堤体打設標高までダンプを運搬した。インクライン設備の全景を写真－2.4.3 に、設備のダンプ台車を図－2.4.4 に、設備の主要仕様を表－2.4.2 にそれぞれ示す。



写真－2.4.3 インクライン設備の全景

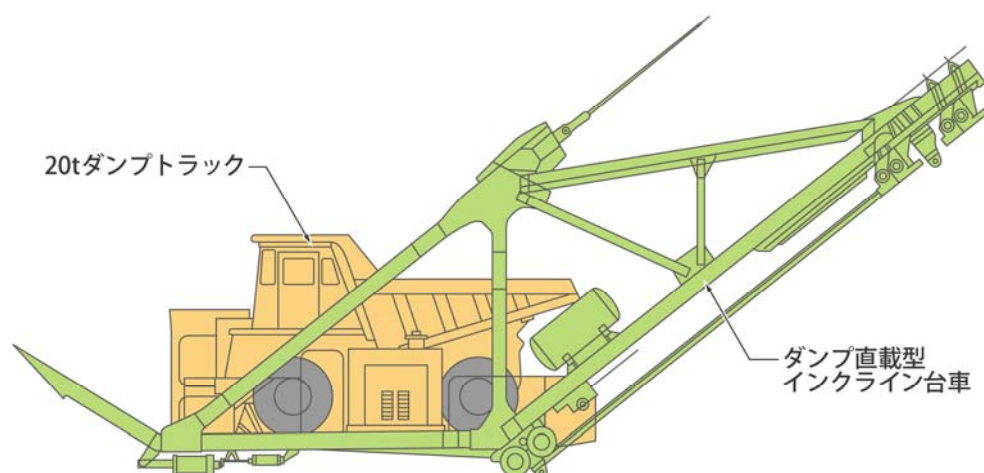


図-2.4.4 インクライン設備ダンプ台車

表-2.4.2 インクライン設備の主要仕様

形 式	ダンプ搭載型カウンターウェイト方式
積 載 重 量	42t (20t ダンプ+9 m <sup>3</sup> コンクリート)
定 格 速 度	180m/min
制 御 方 式	サイリスターレオナード方式
電動機出力	DC440V、450kw
制 御 装 置	常用：直流電磁ブレーキ 非常用：ポスト形エアブレーキ 非常用：レールキャッチ方式
鋼 索	60mm 異形線ストランドロープ
軌 道	高低差：155m 勾配：31° 18' ~37° 24' 全長：約 280m レール：37kg/m 軌条間隔：6m (ダンプ台車) 3.6m (ウェイト台車)

ダンプトラック搭載型インクライン設備は、ダムコンクリート打込みの主要運搬設備であることから、これの稼働状況がコンクリートの打設能力に影響する。施工実績を表-2.4.3 に示す。

表-2.4.3 インクライン設備の運転実績

項目 No.	運転 日数 (日)	運転時間 (h)			修理 時間 (h)	コンク リート 運搬量 (m <sup>3</sup> )
		コンク リート	雑用	計		
1号機	643	9,302	1,845	11,147	357.7	951,700
2号機	658	9,286	1,977	11,263	158.7	950,100

## 2) 通廊のプレキャスト化<sup>3)</sup>

当ダムの通廊の施工については、RCD 工法による施工速度の妨げにならないよう、様々な工夫を試みている。特に EL238.5m 通廊では、通廊設置日数の超短期化、組立・設置作業の省力化、短期間だけ熟練工を集めることの困難の克服、危険な解体作業の回避および堤体コンクリートの防護を目的としてプレキャスト化を試みた。

プレキャスト部材を写真-2.4.4 に示す。内空寸法は 2.5m×3.0mH、長さ 1.5m、厚さ 250mm であり、その特徴は次のとおりである。

- ① 設置作業が効率的な門型の形状（ベースコンクリートは現場で配筋して打設）
- ② プレキャスト部材内に構造用鉄筋を配筋
- ③ 外面は粗面仕上げとして堤体との付着強度を確保
- ④ 部材同士の一体性向上と接合簡素化のため、部材の端部は凹凸のかみ合わせ接合
- ⑤ ケーブルクレーンで運搬可能な重量（最大 8.7t）
- ⑥ 吊上用アンカーを装着



写真-2.4.4 プレキャスト通廊（EL238.5m）

また、EL238.50 には高位常用洪水吐のゲート操作室が 2 室設けられ、内空寸法は 5.5m×12.6m×8mH である。これも次の観点からプレキャスト化を図った。

- ① 空洞寸法が大きいので、プレキャスト部材は型枠機能だけを期待
- ② 部材厚を小さくして周囲に補強筋を組立て
- ③ 壁と天井に分割、重量 9.5t 以下に割付
- ④ 天井部材は堤体部から吊下げ補助

この結果、壁部材は打設リフトに合わせて高さ 75cm とし、壁・天井部材とも厚さ 30cm、最大重量 5.3t とした。

通廊およびゲート操作室のプレキャスト部材設置作業について、所要日数と所要工数を表-2.4.4

および表－2.4.5 に整理して示すが、工数短縮と省力化の効果が得られた。特にプレキャスト型枠の導入により内部支保工が省略され、メーカーのゲート据付けが堤体打設と並行して進められたので、据付けによる打設休止を省略できた。

表－2.4.4 堤体内構造物の設置日数

場所	規模	計画		実績	
		組立	解体	組立	解体
通廊 EL.238.5	※190m	10 日	15 日	5 日	—
ゲート操作室 EL.238.5	2 室	12 日／室	16 日／室	5 日／室	—

表－2.4.5 堤体内構造物の設置工数

場所	規模	計画		実績	
		組立	解体	組立	解体
通廊 EL.238.5	※190m	0.22 人／m <sup>2</sup>	0.32 人／m <sup>2</sup>	0.04 人／m <sup>2</sup>	—
ゲート操作室 EL.238.5	2 室	0.25 人／m <sup>2</sup>	0.37 人／m <sup>2</sup>	0.04 人／m <sup>2</sup>	—

なお、コアボーリングを行って、プレキャスト部材と堤体コンクリートの接触面のせん断強度試験を実施して、両者の付着性の確認を行った。その結果は表－2.4.6 に示すとおりであり、部材と堤体の間に十分な付着があることが確認できた。

表－2.4.6 コア供試体のせん断強度試験結果

試験場所	材齢	せん断強度
エレベータシャフト	392 日	51.4(41.2～61.0)kgf/cm <sup>2</sup>
プレキャスト通廊	91 日	37.7(31.2～46.6)kgf/cm <sup>2</sup>
堤体内	91 日	40.3(30.2～49.9) kgf/cm <sup>2</sup>

### 3) 打継面処理作業の合理化<sup>3)</sup>

当ダムは、堤体の水平断面積が大きいので、打継面処理作業が膨大となり、打設サイクルを効率化する上での重要なポイントとなる。そこで、作業の機械化を図り、高圧水使用型の自走式打継面処理機（機械名称：KAME）を導入した。本機は既に開発済みの機械であるが、当ダムにおいてRCD コンクリート部のグリーンカット専用機として実用化に取り組んだ。外観を写真－2.4.5に示す。本機の特徴は以下のとおりである。

- (a) 打継面の不陸に影響されにくく一様な処理が可能
- (b) 1パスで処理し、施工能力は 300m<sup>2</sup>/h 以上
- (c) 吐出圧力の最大は 450kgf/cm<sup>2</sup>、通常は 200kgf/cm<sup>2</sup> で使用
- (d) 無段変速装置を持ち、連続定速走行が可能
- (e) 高圧水発生装置は別置式で小型・軽量化を図る

実施工では、本機の導入によりグリーンカット作業に係る作業員を2人とすることができ、省力化に大きく貢献した。



写真－2.4.5 自走式打継面処理機（KAME）

グリーンカットの主力機である自走式打継面処理機（KAME）と高圧洗浄機は水を大量に消費する。水は河川水をそのまま利用しているが、降雨などにより濁りが発生するとノズルの急激な摩耗と前処理フィルターの目詰まりが頻発して、維持管理費の増加と打設サイクルの遅れを引き起こした。そこで、機械化だけで解決するのは困難と考え、表面凝結遅延剤を用いた施工を試みた。遅延剤導入の目的は、

- ① 打継面処理の時間的制約を少なくする
- ② 作業速度を向上させる
- ③ 省人化を図る
- ④ 苦渋作業を低減する

ことにある。

使用薬剤は、表面凝結遅延剤として市販されている3種類（ルガゾール C、ディスパライト、パ

リック TG) を試用したが効果に差異は認められなかった。いずれも主成分はグルコン酸ナトリウムであり、この化合物がセメント粒子の表面に吸着されて保護膜を形成し、セメントと水の接触を妨げてセメントの水和反応を遅延させる原理を応用している点で差異がないためと考えられる。

遅延剤散布量は  $200\text{g/m}^2$  とし、散布はジョウロまたは噴射器で行うほか、写真－2.4.6 に示すような散布車を製作して広い面積の均等な散布を可能とした。また、表面凝結遅延剤を散布した場合、レイタンスを含むコンクリート表面の薄膜除去は通常の低圧水で十分に可能であった。

打継面の強度を比較するために、堤体で  $\phi 200\text{mm}$  のコアボーリングを行い、材齢 28 日のせん断強度を測定した結果を表－2.4.7 に示す。通常の方法よりも遅延剤を使用した方がせん断強度が大きい結果となった。

以上のように、表面凝結遅延剤の導入により、グリーンカットに要する水の消費を抑制して河川水の濁りによる工程遅延の回避が可能となるとともに、グリーンカット班の削減による省人化の実現を得ることができた。



写真－2.4.6 遅延剤散布車による作業状況

表－2.4.7 せん断強度試験結果

グリーンカットの方法	単位容積重量 ( $\text{tf/m}^3$ )	せん断強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )		変動係数 (%)
凝結遅延剤を使用した方法	2.44	35.6	37.6	11.4
	2.47	34.6		
	2.43	42.5		
通常の方法	2.46	34.9	31.8	18.9
	2.43	24.8		
	2.43	35.6		

### (3) PCD 工法の開発

PCD (PUMPED CONCRETE FOR DAMS) 工法は、コンクリートダム施工法の合理化の一環として検討されたもので、小規模コンクリートダムの他に、RCD ダムの天端付近やフィルダムの洪水吐への適用が想定されている。

本工法の実施例は試験施工も含めると数例あるが、当ダムにおいては、シリンダ貫入式ポンプの試験施工の成果を踏まえ、かつ最大骨材寸法 80mm・スランプ 5cm 程度の本格的なダムコンクリートの圧送にとともに、実施工に向けてのコンクリートの配合や品質の確認、コンクリートポンプの性能及び施工性の確認を実施した<sup>4)</sup>。

PCD 工法のために開発したダブルシリンダ貫入式コンクリートポンプを図-2.4.5に示す。本機は最大骨材寸法 80mm、スランプ 5cm 程度のコンクリートを圧送するため、以下の特徴を有している。

- ① 輸送配管を 10 インチとするため、内部の貫入シリンダの径は揺動バルブ他すべて 10 インチとしている
- ② ダブルシリンダ貫入方式として、硬練りコンクリートを確実に送れるようにしている
- ③ 硬練りコンクリートを約 300m 送れるように最大主油圧 150kgf/cm<sup>2</sup>にしている

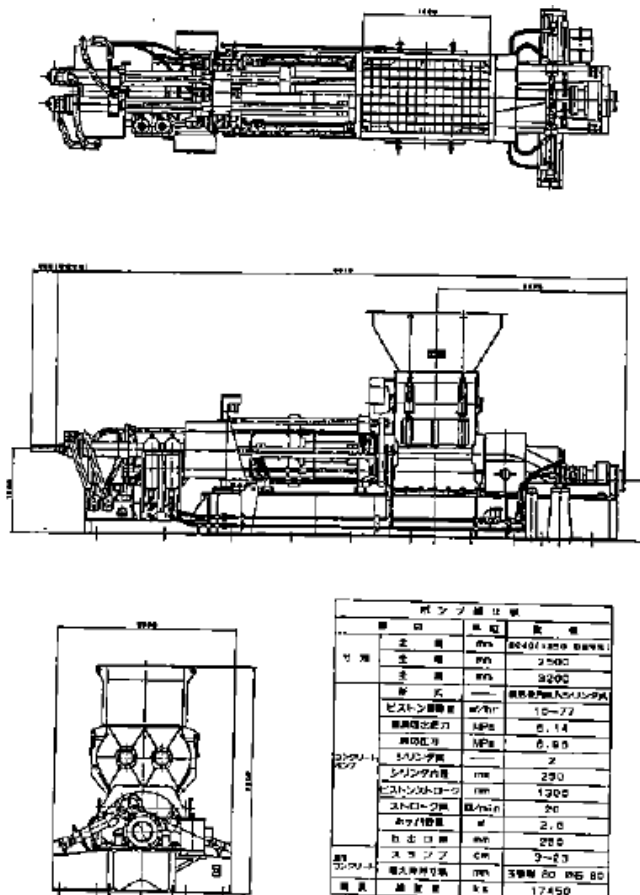


図-2.4.5 PCD 工法用コンクリートポンプ

コンクリートポンプの仕様は、図-2.4.6に示すように①、②で吸入・貫入行程を構成し、この行程の終了後に吐出弁が閉じ、④の状態でのコンクリート圧送の一行程を終了するものである。

従来型の滑り弁式ポンプと相違点を挙げると、図-2.4.7に示すようにまず吸入行程においては、従来式の滑り弁方式では、ホッパー内コンクリートをピストンの動きに合わせて連続的に吸い込むのに対し、シリンダ貫入方式はホッパー内のコンクリートを重力により落下させた後、貫入シリンダを挿入させ、あらかじめ輸送コンクリート分の縁切りを行う点で異なる。

また、吐出行程滑り弁方式では2ヶ所にコンクリート剪断面ができるのでバルブ内圧損が大きいのに対し、シリンダ貫入式では通路形状の変化が少ないためバルブ内の圧損が小さいという特徴がある。

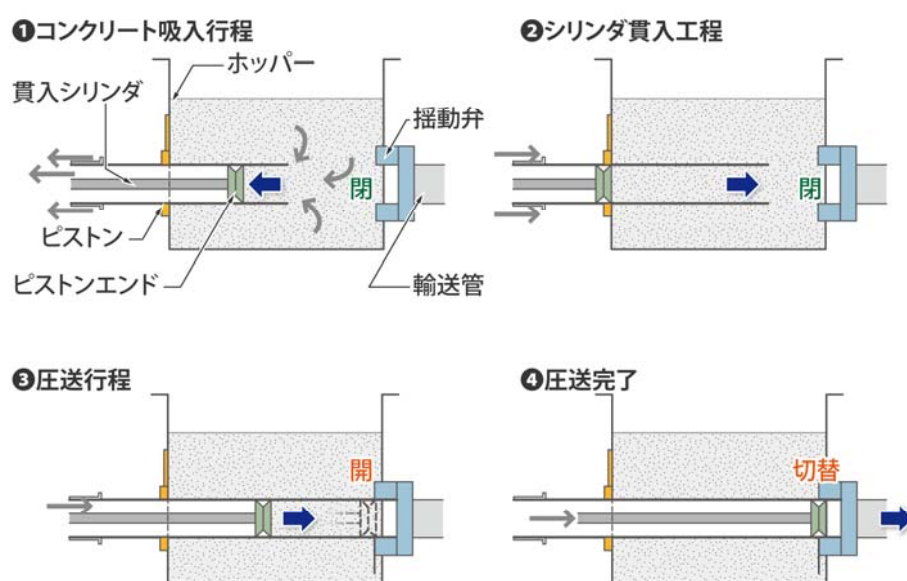


図-2.4.6 シリンダ貫入式コンクリートポンプの作動原理

	シリンダ貫入式ポンプ	従来形（滑り弁式）ポンプ
吸入工程		
吐出工程		

図-2.4.7 シリンダ貫入式と滑り弁式コンクリートポンプの比較

コンクリートの配合は、室内試験および圧送試験により種々のものを試した結果、セメント量は230kg/m<sup>3</sup>程度、スランプ5cm、細骨材率38%とし、混和剤についてはダム本体コンクリートと同様のAE減水剤（パリックRA、表中の記号AE）と凝結遅延剤（パリックT、同T）に加え、惣の関ダムでも使用したコンクリートの分離抵抗性を増す混和剤（ヤマソー80P、同P）を使用する配合を採用することとした。コンクリートの配合を表-2.4.8に示す。

表-2.4.8 PCD 工法用コンクリート配合

最大粗骨材寸法 (mm)	スランプ SL (cm)	空気量 Air(%)	水セメント 比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )								
					セメント	水	細骨材	粗骨材			混和剤 (C+F) × %		
								G20	G40	G80	AE	T	P
80	5±1	3.5±1	55	38	236	133	756	495	434	310	0.40	0.25	1.00

PCD 工法を減勢工導流壁に施工した実績を表-2.4.9に示す。減勢工導流壁は左右岸各7ブロックで構成されており、これを1リフト75cm、日当り打設量250m<sup>3</sup>程度を基準とし、左岸側5レーン、右岸側2レーンでレヤー打設しており、約10,000m<sup>3</sup>を打設した。

表-2.4.9 減勢工導流壁におけるPCD 工法の実績

	7月	8月	9月	10月	11月	12月	計
打設数量(m <sup>3</sup> )	1480.0	459.5	1672.5	2021.0	2411.5	1782.0	9832.5
打設日数(日)	11	5	15	15	16	12	74
打設時間(hour)	85.2	23.8	95.4	106.4	110.7	74.1	495.6
平均打設量(m <sup>3</sup> /day)	135.1	91.9	111.5	134.7	150.7	148.5	132.9
平均打設量(m <sup>3</sup> /hour)	17.4	19.3	17.5	19.0	21.8	24.0	21.1
最大打設量(m <sup>3</sup> /day)	203.5	172.5	195.0	199	248.5	238.0	—
最大打設量(m <sup>3</sup> /hour)	20.6	23.8	24.5	25.2	29.1	29.0	—
閉塞回数(回)	3	3	1	6	1	3	17

コンクリートの品質測定は、スランプ、空気量、コンクリート温度について1時間毎に、配管温度（湿潤マットで配管を養生）、外気温については2時間毎に行った。その結果、外気温30℃ではスランプラス1cm、空気量のロスが0.5%、コンクリート温度上昇が2℃程度であったが、外気温20℃以下の場合にはコンクリートの品質の変化はほとんど見られない結果であった。

一方、施工状況としては、配管の切替え回数と打設機械の稼働可能範囲が施工性を左右する大きな要因となっており、当ダムの場合、

- ① 打設ブロックの形が、上下流方向に細長い長方形であること

- ② 配管の吐出口におけるコンクリートの分配方法（設備）が未開発であること
  - ③ PCD 工法用コンクリート配合では、現状の打設機械は打ち込まれたコンクリート面に乗っての作業が不可能であること
- 等が問題であることが判明した。



写真－2.4.7 PCD 工法による施工状況

施工時には、コンクリートポンプの稼働状況も調査した。これは、コンクリートポンプの設計理論値に対する実施工における性能の確認が主たる目的であり、主油圧、弁油圧、貫入油圧、油温、シリンダの総回数、貫入不良回数およびストローク時間を 1 バッチ毎に記録している。測定の結果から得られた理論吐出量は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{総吐出量} &= \frac{\text{打設量}}{\text{ストローク時間}} = \frac{9,832.5\text{m}^3}{285.5 \text{ 時間}} = 34.4\text{m}^3/\text{時間} \\ \text{理論吐出量} &= \frac{0.0638\text{m}^3/\text{回}}{1\text{ストローク当り吐出量}} = \frac{20 \text{ 回/分}}{\text{ストローク回数}} \times 60 \text{ 分} \\ &= 77\text{m}^3/\text{時間} \end{aligned}$$

このコンクリートポンプ理論吐出能力 77m<sup>3</sup>/h に対して、吐出量の実績は、表－2.4.10 に示すとおりであり、当ダムにおける片番施工では日最大打設量 250m<sup>3</sup> が限界である結果が得られた。

表－2.4.10 PCD 工法用の施工実績

項目	実績(m³/h)	主たる要因
圧送のみ実績吐出力	34.4	コンクリートの配合 ピストンのストローク回数 シンダラー貫入不良回数および充填率
配管切替等を含む平均打設量	21.1	配管切替（分配方法） 閉塞による中断

このほかの PCD 工法の課題として、コンクリートの先端部における分配方式が挙げられる。現状で考えられる方法は以下のとおりであるが、今後、PCD 工法をより広い範囲に適用させるためには、柱状工法や大きな打設ブロックにおいて配管切替作業をせずにコンクリートを分配できる方法を開発し、施工性を向上させることが必要であると考えられる。

a) 先端ホース分配式

通常のコンクリートポンプ打設と同様に、先端に取り付けたホースでコンクリートを分配する

b) ベルトコンベア式

吐出口側を回転軸、先端側にキャスターを装着した 5 m 程度の小型ベルトコンベヤでコンクリートを分配する

c) 配管回転分配式

ボーリングマシンのスイベルやコンクリートポンプ車のブーム屈曲部の構造原理を基本にコンクリートを分配する

また、本ダムの PCD 工法のように Gmax=80mm という骨材を使用したコンクリートでは、管径が 10 インチとなりコンクリートを含めた総重量は配管 1 m あたり 150kg にもなるので、閉塞時における対応策を考えると、現状ではその採用範囲は限られてしまう。

以上、現状において PCD 工法を普及展開するには多くの課題が存在するが、その反面、圧送可能コンクリートの範囲が広いのでダムのように複数の配合のコンクリートで構成されている構造物を単一設備で施工できるという利点もあり、条件次第ではあるがダム施工法の一つの選択肢にはなり得るものと考えられる。

## 2.5 奥三面ダム

### 2.5.1 概要



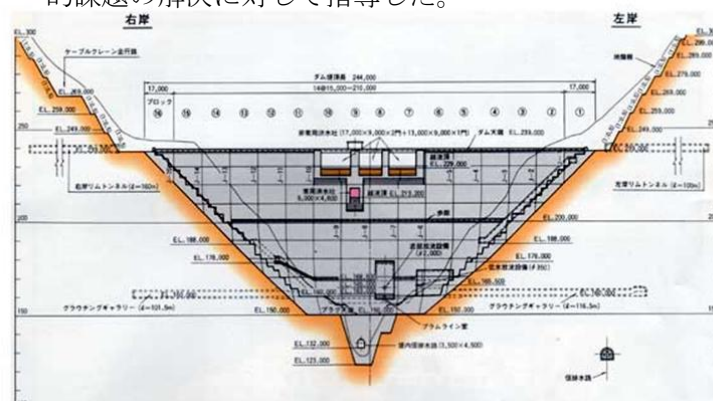
写真－2.5.1 奥三面ダム全景

- ダム事業者 : 新潟県
- 所在地 : 新潟県村上市三面
- 工事名称 : 奥三面ダム本体工事
- 施工者 : 鹿島・青木・本間特定共同企業体
- 工期 : 1991年3月19日～2002年8月15日
- ダム形式 : アーチ式コンクリートダム
- 諸元 : 三面川水系三面川

有効貯水量 108,000 千 m<sup>3</sup>

堤高 116m、堤頂長 244m、堤体積 257 千 m<sup>3</sup>

- 筆者の指導業務 : 新潟県初の技術難易度の高いアーチダムに対して、川治ダムの経験を活かし特殊工法である岩盤 PS 工法などの技術を指導した。また、本体コンクリートの単位セメント量の低減、ダムでは初適用となる高流動コンクリートに対して、コンクリート配合および施工方法、温度応力対策などの技術的課題の解決に対して指導した。



図－2.5.1 奥三面ダム下流面図

## 2.5.2 技術的に工夫した主要内容

### (1) 単位セメント量の低減

当ダムの本体コンクリートは、設計基準強度  $325\text{kgf/cm}^2$  (配合強度  $390\text{kgf/cm}^2$ )、目標スランプ  $3\pm 1\text{cm}$  であり、工事当初の配合は、表-2.5.1 に示すように、工事前の試験練り、過去の実績などから、単位水量  $100\text{kg/m}^3$ 、単位セメント量  $220\text{kg/m}^3$  とした。使用材料は、表-2.5.2 に示すとおりであり、セメントには中庸熟ポルトランドセメントを使用した<sup>1)</sup>。

表-2.5.1 コンクリート配合

内 容	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )								
			W	C	S	G1	G2	G3	G4	AE 減水剤	AE 助剤
現行配合	45.5	24.0	100	220	496	426	395	355	448	2.200	0.0110

表-2.5.2 使用材料

項 目		摘 要
セメント		中庸熟ポルトランドセメント (N 社製, 比重 3.20)
細骨材		河床骨材を骨材プラントにて破砕し, 製造した製造骨材 (比重 2.58 吸水率 1.61 粗粒率 2.70)
粗骨材		河床骨材を骨材プラントにて破砕し, 製造した製造骨材 (G1 : 比重 2.69 粗粒率 9.92) (G2 : 比重 2.70 粗粒率 8.85) (G3 : 比重 2.65 粗粒率 7.80) (G4 : 比重 2.63 粗粒率 6.52)
混和剤	AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩
	AE 助剤	変性カルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	流動性改善剤	$\beta$ -ナフトリンスルホン酸塩 (95%), ウェランガム (5%)
水		三面川河川水

工事初年度（平成 6 年）の圧縮強度の実績として、表－2.5.3 に示すように、材齢 91 日圧縮強度の平均が 467kgf/cm<sup>2</sup>であり、配合強度 390kgf/cm<sup>2</sup>よりも余裕のある結果であった。また、材齢 91 日圧縮強度の変動係数は、6.2%と当初計画 10%よりも小さい値となった。

表－2.5.3 圧縮強度の品質管理データ（A 配合）

		平成 6 年				
		9 月	10 月	11 月	12 月	全データ
材齢 7 日	平均値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	216	244	218	214	224
	変動係数 (%)	7.2	10.4	13.8	4.4	11.6
	データ数 (個)	15	15	15	6	51
材齢 28 日	平均値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	369	394	382	367	380
	変動係数 (%)	5.1	5.7	7.4	5.0	6.5
	データ数 (個)	15	15	15	6	51
材齢 91 日	平均値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	457	479	473	450	467
	変動係数 (%)	5.4	5.0	6.6	7.0	6.2
	データ数 (個)	15	15	15	6	51

そこで、温度応力の緩和を目的として、単位セメント量の低減を検討した。特に、当ダムでは、一般に使用される中庸熱フライアッシュセメント 30%よりも発熱が大きい中庸熱ポルトランドセメントを使用しており、少しでも温度上昇量を低減することが求められていた。

単純に単位セメント量だけを低減した場合、既に打設したコンクリートの圧縮強度よりも小さくなること、単位セメント量が減ることによってフレッシュコンクリートの性状が悪くなり、スランプが小さくなることに加えて締固め時の材料分離が大きくなること、さらに、圧縮強度のばらつきが大きくなることが懸念された。

そこで、単位セメント量を低減したことを補うため、流動性と材料分離性を付与できる混和剤として、粉体の高性能減水剤と増粘剤を 95 : 5 でブレンドしたものを使用することを検討した。

高性能減水剤として一般に高流動コンクリート等に使用されているナフタレンスルホン酸塩を、また増粘剤として併用系高流動コンクリートに使用されているウェランガムを使用した。

配合を選定するため、コンクリート試験を行い、フレッシュ性状、特にワーカビリティを確認するとともに、各材齢での圧縮強度を確認した。検討ケースとしては、現行配合に加え、単純に単位セメント量  $20\text{kg}/\text{cm}^2$  を低減したもの、単位セメント量  $10\text{kg}/\text{m}^3$  および  $20\text{kg}/\text{m}^3$ 、それぞれ低減し、水セメント比を一定として混和剤を添加したものの 4 ケースとした。

実験に供したコンクリート配合を表-2.5.4 に示す。

表-2.5.4 コンクリート配合

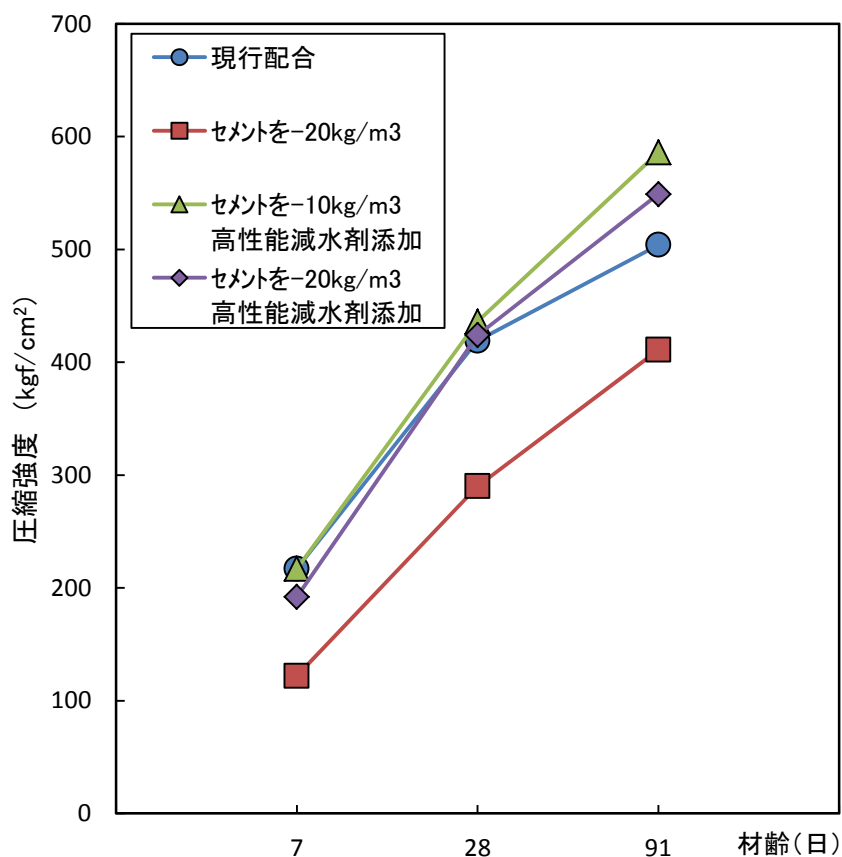
No.	内 容	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )									
				W	C	S	G1	G2	G3	G4	AE 減水剤	AE 助剤	流動性改善剤
①	現行配合	45.5	24.0	100	220	496	426	395	355	448	2.200	0.0110	0.00
②	セメントを- $20\text{kg}/\text{m}^3$	50.0	24.9	100	200	519	424	393	354	447	0.0	0.0	0.00
③	セメントを- $10\text{kg}/\text{m}^3$ 流動性改善剤添加	45.2	24.0	95	210	501	430	399	359	453	2.200	0.0055	0.05
④	セメントを- $20\text{kg}/\text{m}^3$ 流動性改善剤添加	45.0	24.0	90	200	506	435	403	362	457	2.200	0.0	0.10

実験結果を表－2.5.5 および図－2.5.2 に示す<sup>2)</sup>。図表に示すように、単純に単位セメント量だけを低減したコンクリートは、材料分離傾向があり、また材齢 91 日圧縮強度も大幅に低減した。

これに対して、単位セメント量を低減し、混和剤を添加することで水セメント比を一定としたケースは、10kg/m<sup>3</sup> 減、20kg/m<sup>3</sup> 減ともに、ワーカビリティは現行配合のコンクリートと同等で良好であり、また、材齢 91 日圧縮強度は同等以上であった<sup>3)</sup>。

表－2.5.5 実験結果

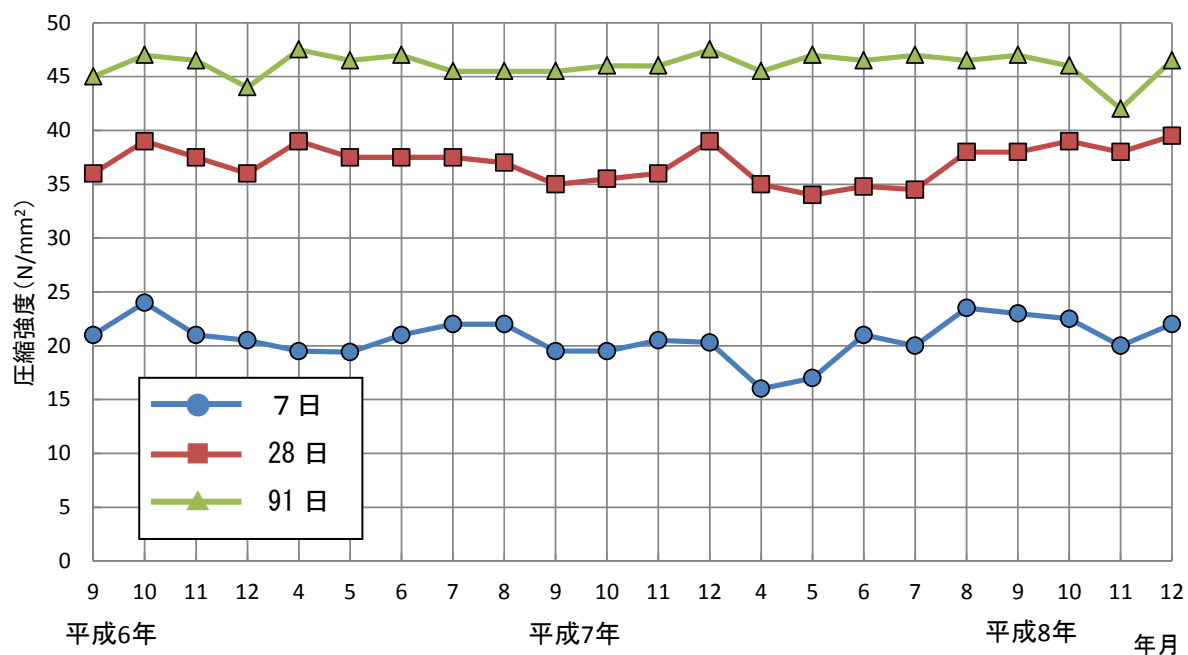
No.	内 容	スランブ° (cm)	空気量 (%)	単 重 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリート 温度 (°C)	目視に よるワー カビリティ	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )					
							材齢 7 日		材齢 28 日		材齢 91 日	
①	現行配合	3.0	3.7	2.450	13.5	○	215	217	421	419	473	504
							210		408		528	
							226		428		511	
②	セメントを-20kg/m <sup>3</sup>	3.5	3.1	2.450	14.0	×	119	122	302	290	369	411
							122		284		417	
							126		283		448	
③	セメントを-10kg/m <sup>3</sup> 流動性改善剤添加	3.5	3.3	2.478	12.0	○	215	217	445	436	600	586
							217		444		593	
							219		419		564	
④	セメントを-20kg/m <sup>3</sup> 流動性改善剤添加	3.0	3.1	2.492	12.0	○	185	192	450	424	512	549
							202		409		534	
							190		413		602	



図－2.5.2 圧縮強度の発現

実工事においては、安全を見て、単位セメント量  $10\text{kg/m}^3$  低減し、混和剤を用いる方法を採用し、**図－2.5.3** に示すように、配合切替え前とほぼ同じ圧縮強度を得ることができ、また有害な温度ひび割れの発生を抑制することができた。

なお、コストにおいても、使用した混和剤が、 $1\text{m}^3$  当り  $50\text{g}$  と極めて少ないため、現行配合よりも安価となった。



図－2.5.3 月別の圧縮強度

## (2) ダム放流管周りへの高流動コンクリートの適用

当ダムのダムサイトは地形が極めて急峻狭隘で、放流管から流出した水流を落下させることが可能な減勢池の幅が狭いことから、一般的な常用洪水吐のように円型の放流管を複数本入れることができなかった。そのため、当ダムでは、これまでに例のない大断面放流管1本がダム本体中央部に配置されることとなった。放流管は、矩形断面でかつ底面には幅5mの整流板を設置し、さらにその補強のため周囲にD41の鉄筋が20cmピッチで4段配置されていた。

具体的には、計画段階において図-2.5.4に示すように堤体放流管周りが高密度配筋となるとともに、図-2.5.5に示すように整流板が設置されるため、その下の部分への打込みは、通常のダムコンクリートでは構造物周りのコンクリートであっても極めて困難であると考えられた。また、従来ではこのような部位の施工は、通常のコンクリートを打設し、打設したコンクリートが硬化後、整流板に設けたグラウト孔からモルタルを注入していたが、本工事では放流管の耐久性を考慮して、整流板に孔を開けることが許されていなかった。そこで、自己充填性を有する高流動コンクリートの適用を机上および実験によって検討し、実施工に適用した<sup>4) 5)</sup>。高流動コンクリートと通常のコンクリートの対比を表-2.5.6に示す。

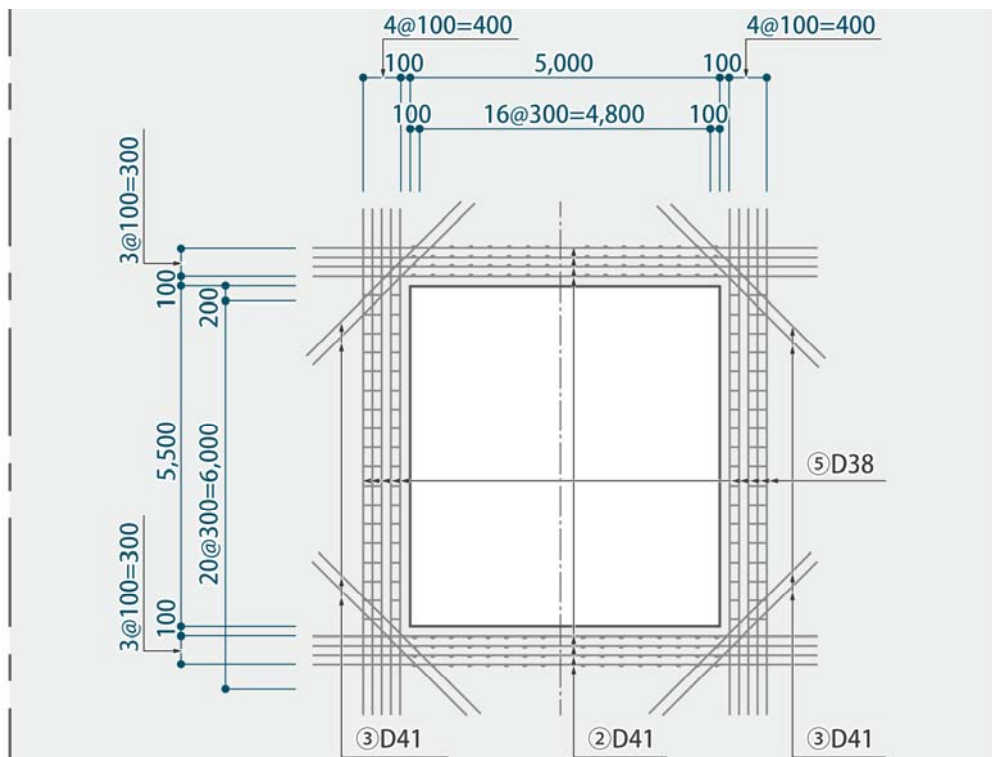


図-2.5.4 当初の常用洪水吐周りの配筋

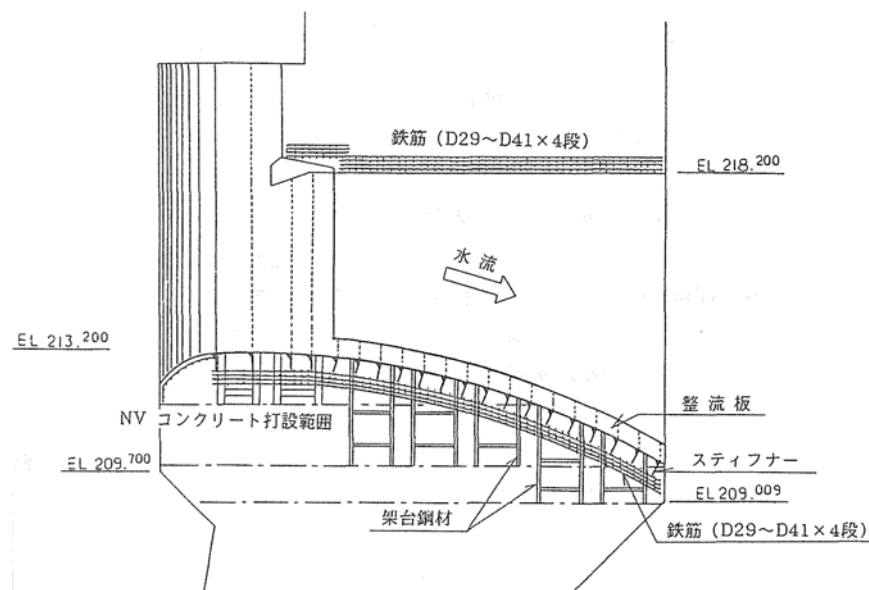


図-2.5.5 整流板下のコンクリート打設部位

表-2.5.6 高流動コンクリートと通常のコンクリートの対比

	施工性 (品質)	工期	安全性	コスト	総合
高流動コンクリート	◎	○	○	△	◎
普通コンクリート	×	△	△	○	×

#### 1) 施工実験による確認

整流板の下部を模擬し、図-2.5.6 に示すモデルを作製して施工実験を実施した。実験ではこのモデルの片側からコンクリートを打設し、高さ 0.3m、長さ 5.0m の狭所に締固めを行わずに流動させて、反対側までコンクリートが充填することを確認した。鉄筋は、D22 を鉛直筋として流動方向に 0.5m 間隔、流動直角方向 0.3m 間隔に配置した。使用したコンクリートは、充填性が高く、かつ流動性のばらつきが少ない高流動コンクリートとして、増粘剤ウェランガムを添加した併用系高流動コンクリートとし、その配合は事前の試験練りで選定した。表-2.5.7 にコンクリート配合を示す。なお、セメントには、流動性の確保および温度応力の低減の観点から、低熱ポルトランドセメントとした<sup>6)</sup>。

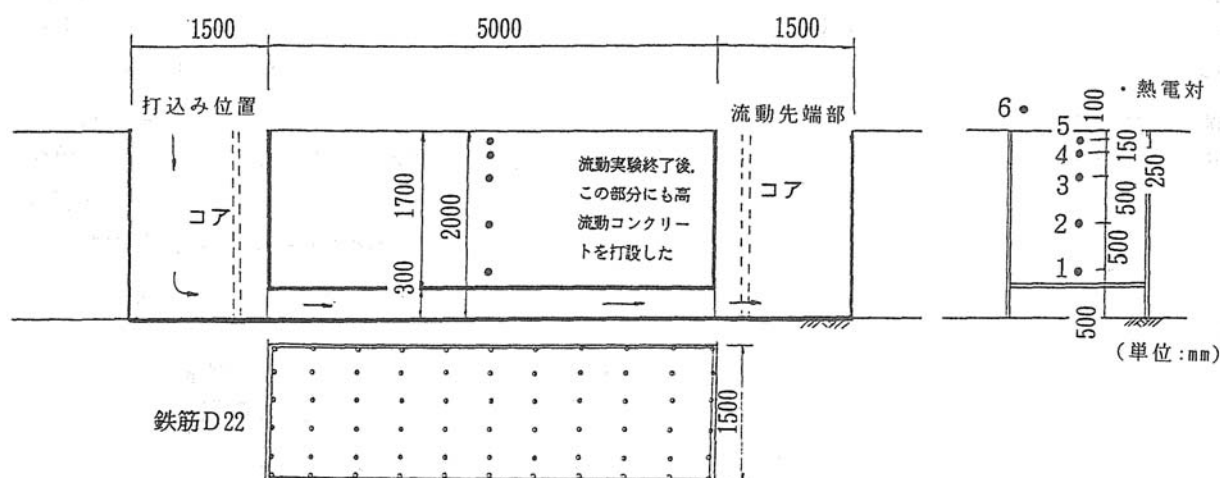


図-2.5.6 施工実験のモデル

表-2.5.7 高流動コンクリートの配合

目標スランプ フロー (cm)	目標 空気量 (%)	水セメント 比 (%)	粗骨材 率(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	SP1	増粘剤
65±5	4.5±1.5	30.0	47.5	160	533	773	871	12.0	0.16

施工実験において、打設位置で採取したコンクリートと流動先端部で採取したコンクリートの圧縮強度を図-2.5.7に示す。図に示すように、材齢91日の圧縮強度は、打設位置で67.2N/mm<sup>2</sup>、流動先端部で68.7N/mm<sup>2</sup>であり、打設位置と流動先端部で強度等の品質の差はほとんど認められなかった。写真-2.5.2に打設位置および流動先端部からそれぞれ採取したコアの外観を示す。写真に示すように、打設位置および流動先端部ともに上下方向の粗骨材のばらつきは少ないことを確認した。コア供試体の圧縮強度(材齢91日)は、図-2.5.8に示すように打設位置で61.9～64.6N/mm<sup>2</sup>、流動先端部で60.5～67.3N/mm<sup>2</sup>であり、ほぼ均一な品質が得られた。

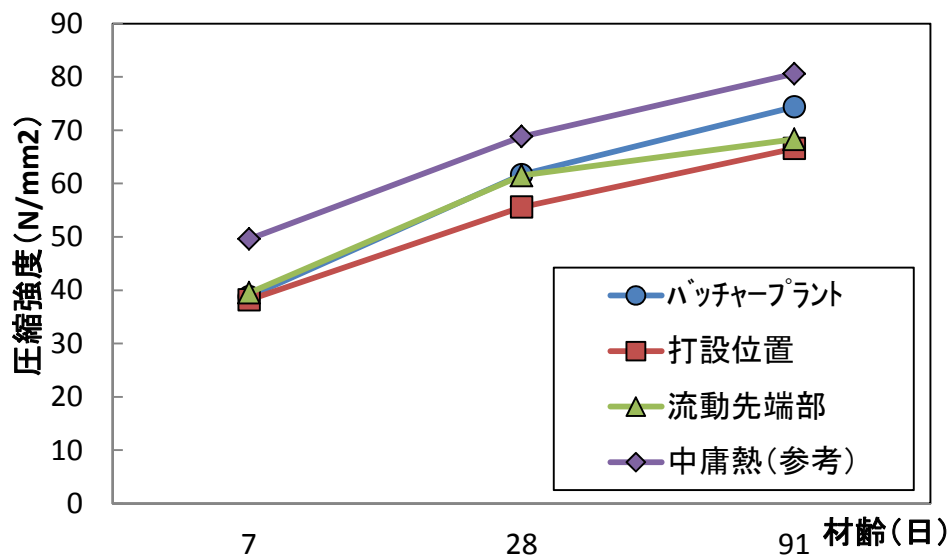


図-2.5.7 各部分で採取したコンクリートの圧縮強度

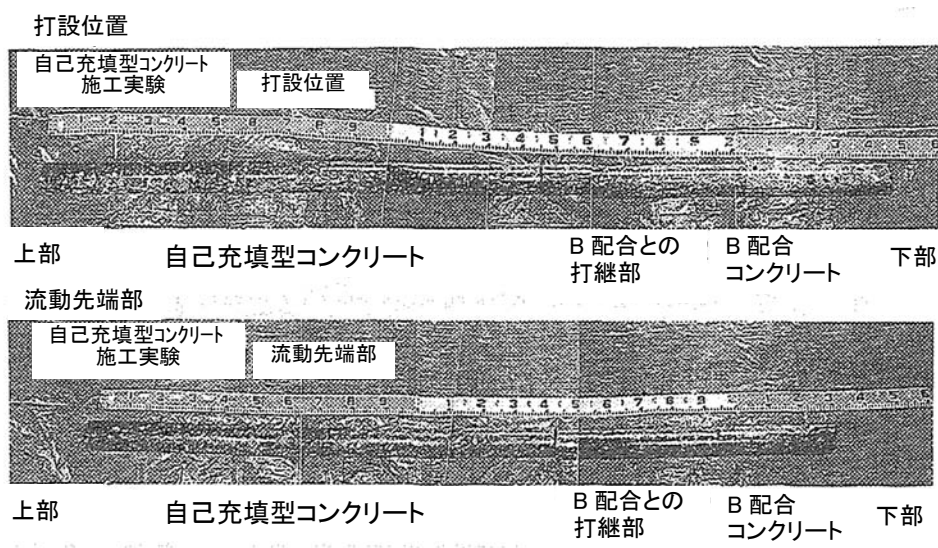


写真-2.5.2 コア供試体の表面状況

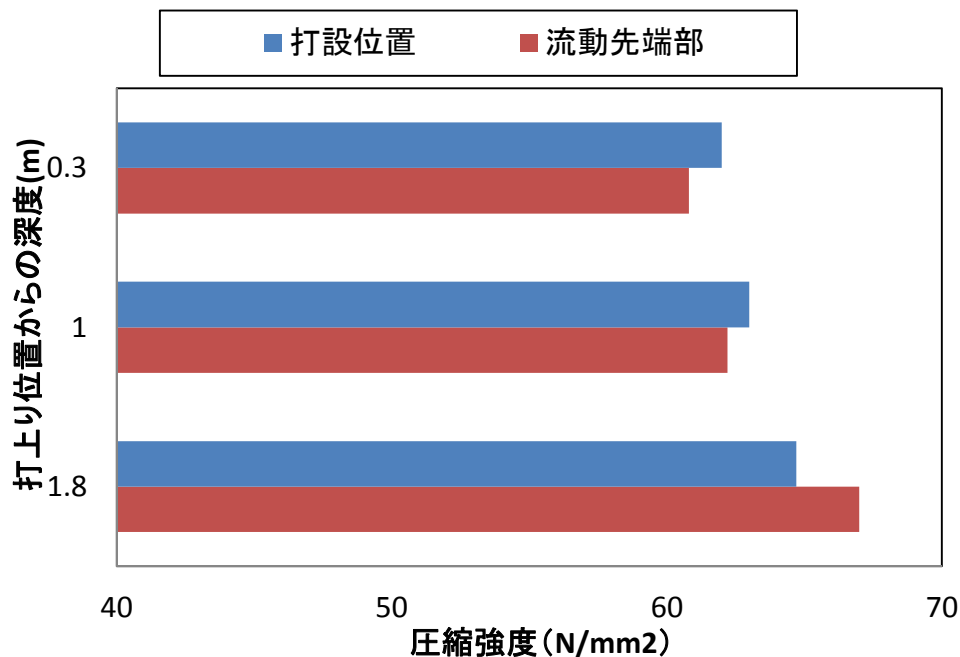


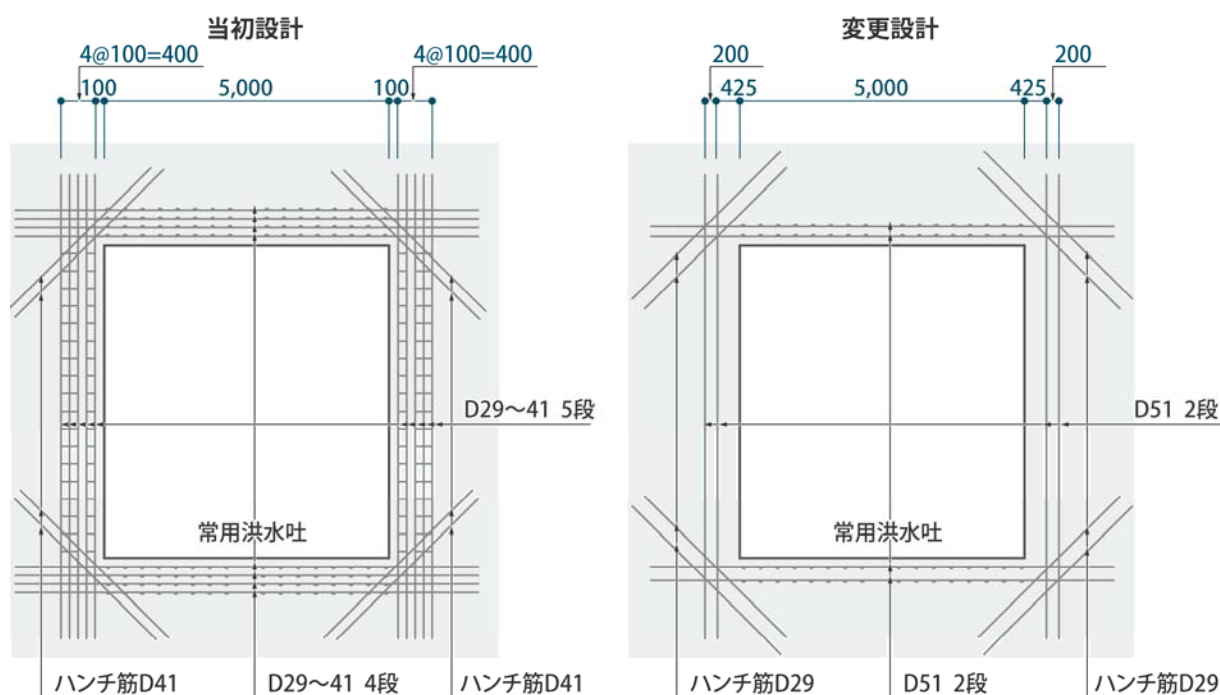
図-2.5.8 コア供試体の圧縮強度(材齢 91 日)

## 2) 高流動コンクリートの施工実績

高流動コンクリートは通常配合と比較すると単位セメント量が大きく、温度応力によるひび割れの発生が懸念されたことから、発熱量を低く抑えるための配合実験および液体窒素（LN<sub>2</sub>）によるプレクーリングの検討を事前に行い、実施工に供した。

常用洪水吐周辺の補強鉄筋については、図-2.5.9に示すように当初設計では D29～D41 が 4～5 段配置されていたが、段数が多いため施工性が極めて悪く、ハンチ筋の設置は実際には不可能なものと考えられた。

そこで、企業者と協議の上、設計検証断面の細分化、鉄筋径ランクアップ、配筋ピッチ調整等の検討を行い、D51 が 2 段の配筋に設計変更した。また、ハンチ筋についても D41 から D29 に設計変更することにより施工性の向上を図った。なお、長尺もの（ $l = 8.0 \sim 9.0\text{m}$ ）となる鉛直筋の継手については、機械式継手（グラウト工法）を採用することとなり、継手位置はリフト高さ、継手の施工性を考慮した高さに変更した。



図－2.5.9 常用洪水吐周辺の補強鉄筋

その結果、整流板の設置工事を含んだ放流管周りの施工は、9月5日から11月29日までの約3ヶ月間で、頂版スラブのコンクリート打設まで全6リフトを完了した。コンクリート材料を表－2.5.8に示すが、セメントには温度応力の抑制を考慮して低熱ポルトランドセメント（比重3.22、珪酸カルシウム  $C_2S$  ( $2CaO \cdot SiO_2$ ) = 58%、アルミン酸三カルシウム  $C_3A$  ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) = 3%）<sup>6)</sup>を、粗骨材に砕石（ $G_{max}=20mm$ 、40mm）を、高性能AE減水剤にポリカルボン酸塩系、増粘剤にウェランガムをそれぞれ使用した。

表－2.5.8 使用材料

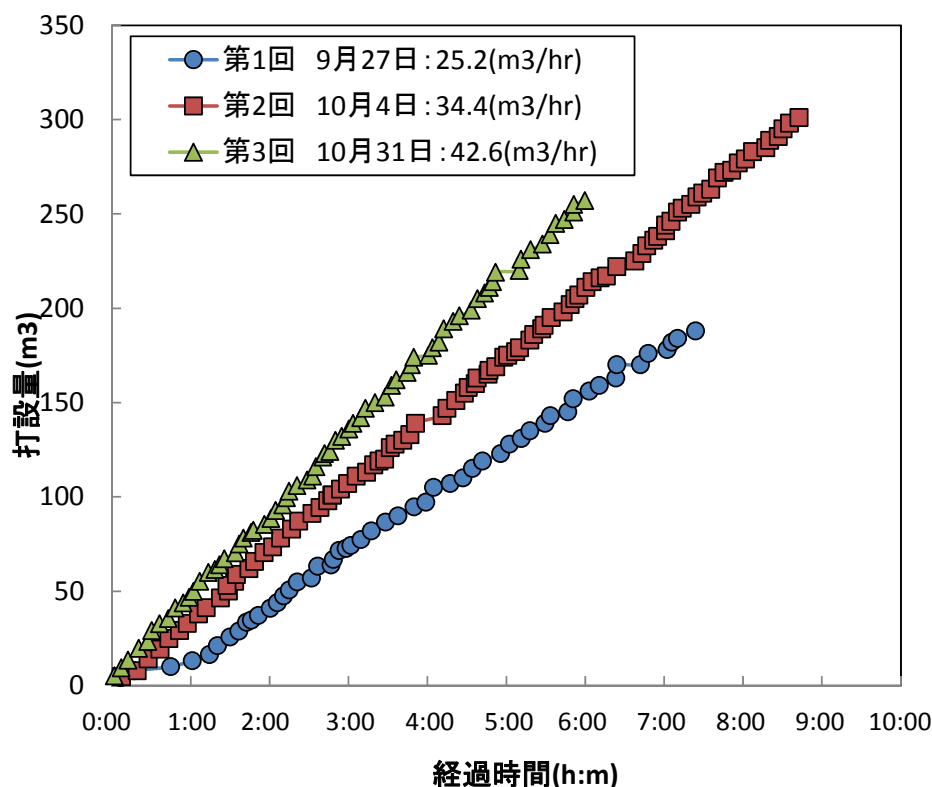
	適用
セメント	低熱ポルトランドセメント（JIS規格品） （比重3.22）
細骨材	川砂を用いて破碎製造した骨材 （比重2.59、吸水率1.75、粗粒率2.74）
粗骨材	G3 川砂利を用いて破碎製造した骨材 （比重2.65、吸水率1.39、粗粒率7.88） G4 川砂利を用いて破碎製造した骨材 （比重2.64、吸水率1.60、粗粒率6.54）
水	三面河川水
混和剤	高性能AE減水剤    マイティ 2000WHZ 増粘剤                ビスコン 200

コンクリート配合を表－2.5.9 に示す。配合区分については整流板下、配筋部については Gmax20mm 配合を打設することとし、ブロック外周無筋部については Gmax40mm 配合打設を基本とした。コンクリートはダム左岸天端に設置したバッチャープラントミキサ(強制二軸型、2.5m<sup>3</sup>)で練り混ぜ、2 バッチ分 4.0～4.5m<sup>3</sup>をアジテータ車に投入、運搬した。

図－2.5.10 に打設速度を示すが、第1回目の打設では1 バッチ 2.0m<sup>3</sup>を3 分間ミキサで練り混ぜ、アジテータ車2 台で運搬し、第2回目は1 バッチの練混ぜ量および練混ぜ時間とも第1回目と同じとし、アジテータ車のみ4 台に変更した。第3回目の打設においては、練混ぜ時間を短縮しても問題ないことが判明したため、2.25m<sup>3</sup>を2 分30 秒間練り混ぜ、4 台のアジテータ車で運搬した<sup>7)</sup>。

表－2.5.9 コンクリート配合

case	スランプ° フ ロ ー (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
			W	C	S	G1	G2	G3	G4	SP	VA
Gmax 20mm	65±5	4.5±1.5	160	533	767	0	0	Gvol=330 0	871	12.0	0.16
Gmax 40mm	60±5	4.5±1.5	140	466	826	0	0	Gvol=348 461	459	10.0	0.14



図－2.5.10 高流動コンクリートの打設速度

また、温度応力抑制の目的からコンクリート打込み温度を極力低くするため、液体窒素（LN<sub>2</sub>）をアジテータ車の投入口から3～4分間噴射しコンクリートを冷却した<sup>8)</sup>。LN<sub>2</sub>噴射中はアジテータ車を高速攪拌した（図-2.5.11）。冷却終了後、冷却したコンクリートをアジテータ車からバンカー一線のバケットに投入し、ケーブルクレーンにて打設ブロックまで運搬した。

打設ブロックにおける打設手順を図-2.5.12に示すが、整流板下部に空気溜まりが発生することを防ぐために、高流動コンクリートは基本的に一方向から流動させ、整流板下部に充填させる方法をとった。

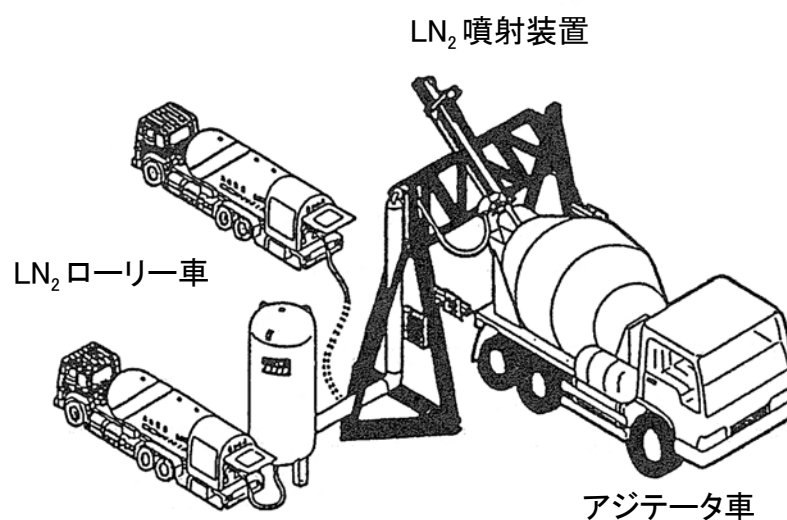


図-2.5.11 LN<sub>2</sub>によるプレクーリング

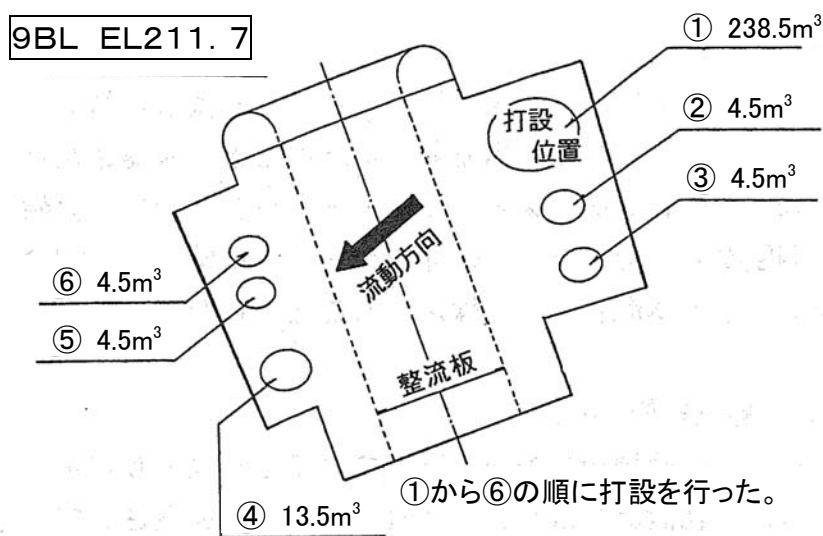


図-2.5.12 高流動コンクリートの打設手順

コンクリートの充填確認方法としては、図-2.5.13 に示す位置に充填センサを設置するとともに、整流板下部に未充填部分が発生した場合にセメントミルクを注入するための配管およびアウトレットを整流板下面に設置しコンクリート打設を行った。結果としては、3回の打設とともに全ての充填確認センサが充填を示す状態（ランプ点灯）となり、放流管底面の整流板下の隅々までコンクリートが充填したことを確認し、打設を終了した。

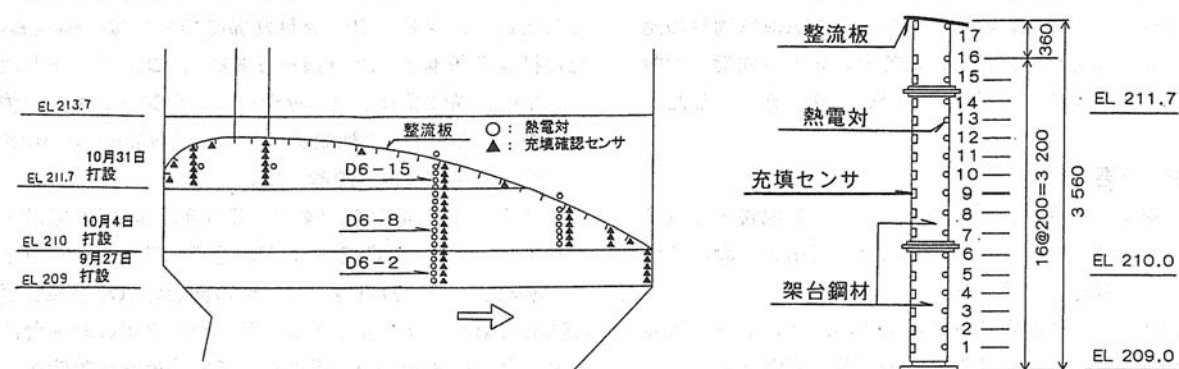


図-2.5.13 熱電対およびコンクリート充填センサの設置位置

施工前の予備試験によって、図-2.5.14 に示すようにコンクリート温度低減に必要な  $\text{LN}_2$  量と冷却前のコンクリート温度の間には反比例関係があり、コンクリート温度低減に必要な  $\text{LN}_2$  量は冷却前のコンクリート温度  $20^\circ\text{C}$  で  $20\text{kg}^\circ\text{C}/\text{m}^3$ 、コンクリート温度  $15^\circ\text{C}$  で  $30\text{kg}^\circ\text{C}/\text{m}^3$  であることを確認した。実施工ではこのことを参考にコンクリートの練上がり温度に応じて、その都度噴射時間を調整した。

第1回目施工におけるコンクリート温度は、図-2.5.15 に示すように練上がり直後  $18.7\sim 19.7^\circ\text{C}$  に対し  $\text{LN}_2$  冷却後  $10.7\sim 15.2^\circ\text{C}$  となった。同様に、第2回目施工では練上がり直後  $18.6\sim 20.6^\circ\text{C}$  が  $\text{LN}_2$  冷却後  $10.5\sim 16.0^\circ\text{C}$ 、第3回目施工では練上がり直後  $11.6\sim 14.4^\circ\text{C}$  が  $\text{LN}_2$  冷却後  $6.9\sim 9.8^\circ\text{C}$  となった<sup>9)</sup>。

第1回目施工におけるスランプフローは、図-2.5.16 に示すように冷却前よりも冷却後に増大する傾向が見られた。これは、 $\text{LN}_2$  による冷却の影響ではなく、使用した高性能 AE 減水剤の特性によるものである。すなわち、今回使用した高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸塩系であり、この混和剤による分散性が完全に発揮するのに要する時間がコンクリート練上がり後 15 分程度であることが主な原因であると考えられる。

冷却後のコンクリートのスランプフローは、配合 ( $G_{\text{max}}=20\text{mm}$ ) で  $62.0\sim 66.0\text{cm}$ 、C 配合 ( $G_{\text{max}}=40\text{mm}$ ) で  $65.0\text{cm}$  であり、すべて所定の値を満足した。第2回、第3回ともに第1回目と同様の傾向を示し、冷却後のコンクリートのスランプフローはすべて所定の値を満足した<sup>9)</sup>。

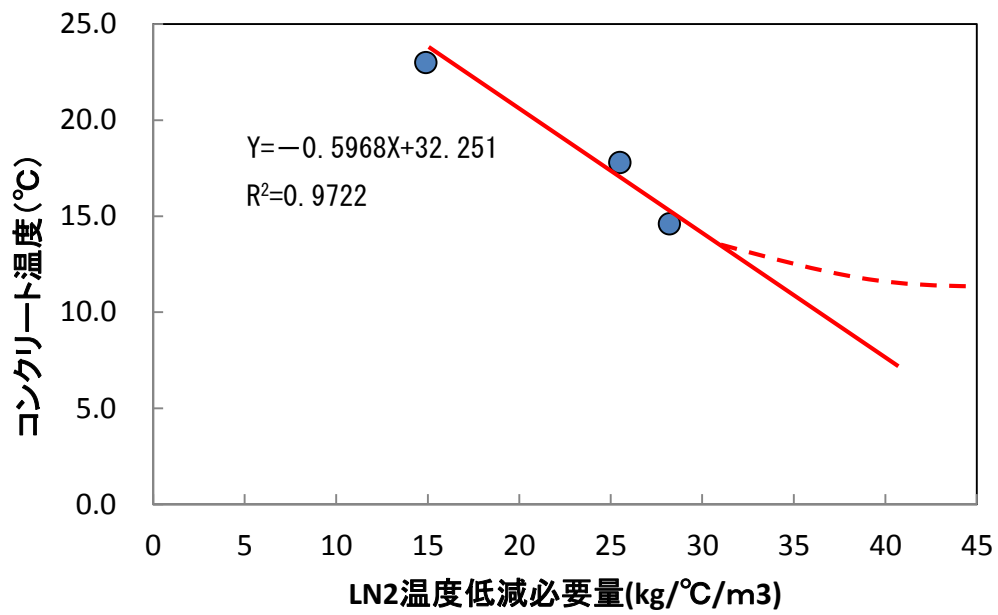


図-2.5.14 コンクリート温度低減に必要なLN<sub>2</sub>量

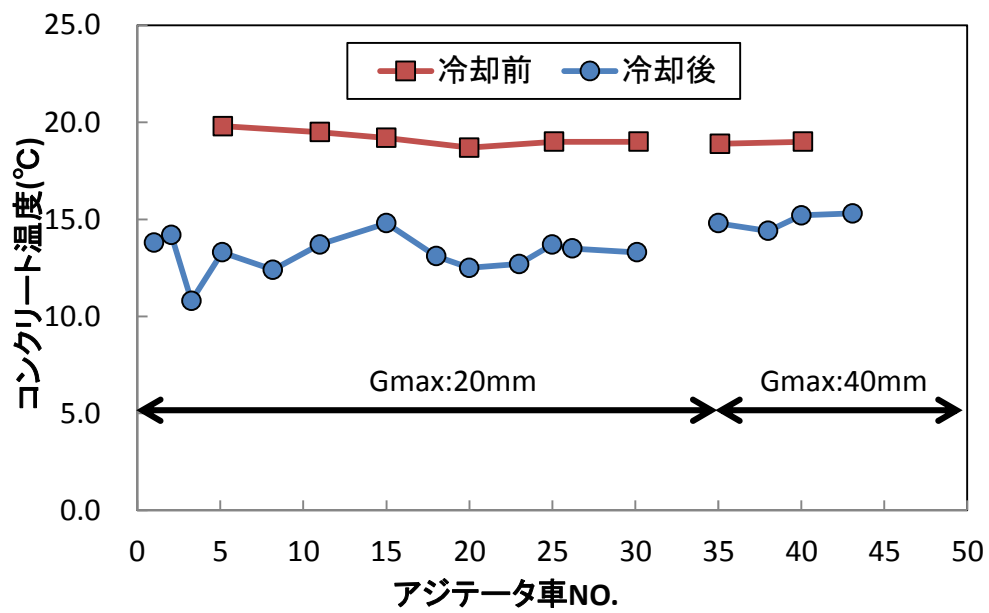


図-2.5.15 コンクリート温度

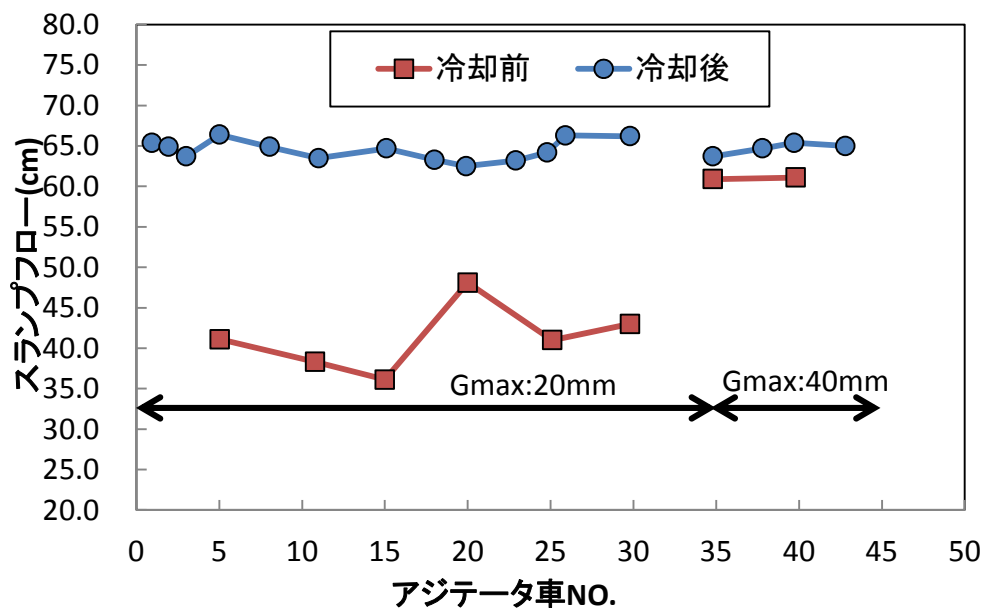


図-2.5.16 スランプフロー

また、第1回目施工における空気量は図-2.5.17に示すように、冷却前よりも冷却後に若干増大する傾向が見られたがすべて所定の値を満足した。また、第2回、第3回ともに第1回目と同様の傾向が見られた。空気量増大の理由としては冷却の際にアジテータ車を高速攪拌することによる空気の巻き込みが考えられる。

また、図-2.5.13に示す位置に設置した熱電対によるコンクリート温度の履歴を図-2.5.18に示すが、各層中心部のコンクリート最高温度は、1層目で38℃、2層目で51℃、3層目で30℃程度であり、LN<sub>2</sub>による冷却および低熱セメントの使用の効果が顕著に現れた結果となった。

圧縮強度試験結果を図-2.5.19に示すが、材齢91日で65～75N/mm<sup>2</sup>に達している<sup>9)</sup>。

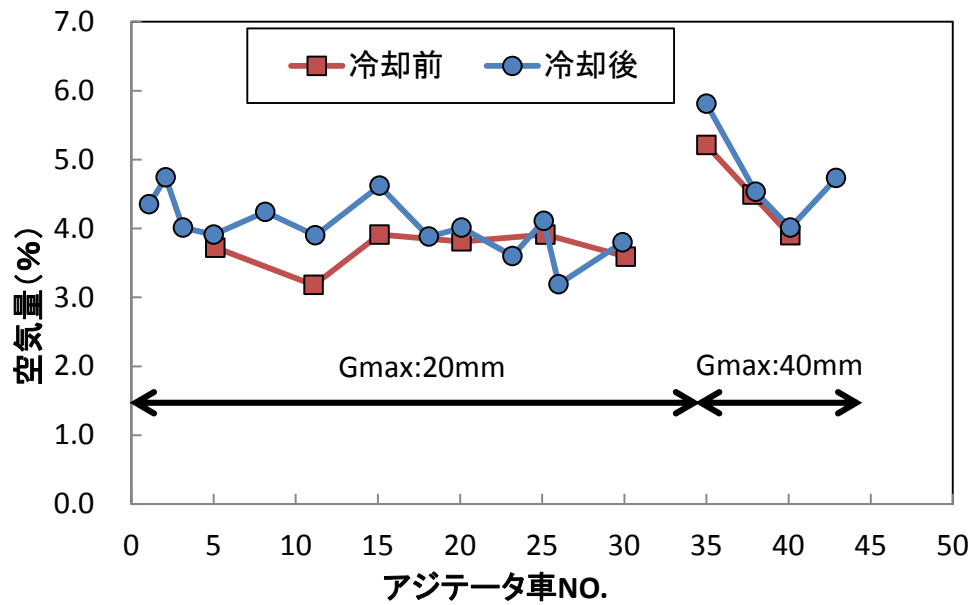


図-2.5.17 コンクリート空気量

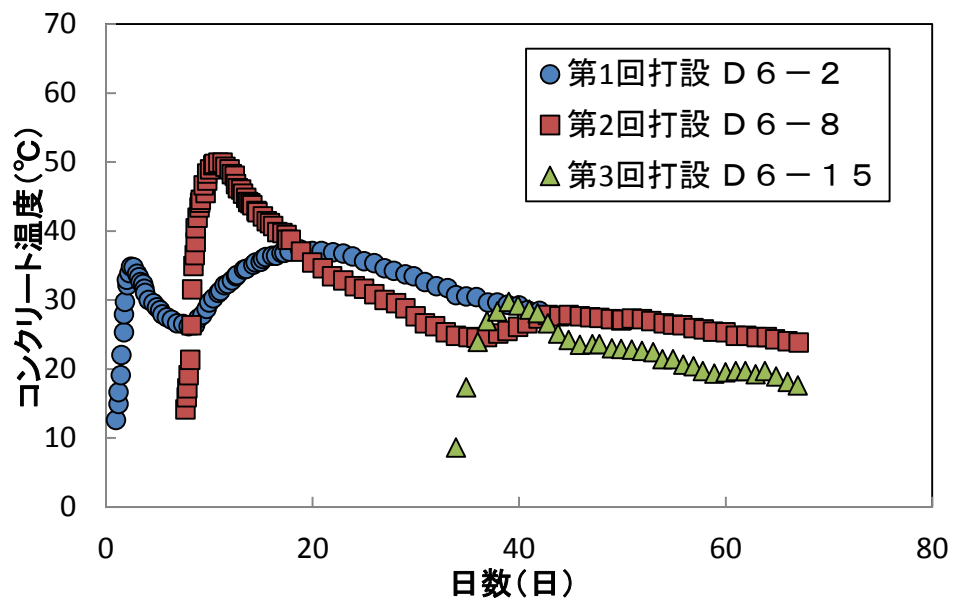
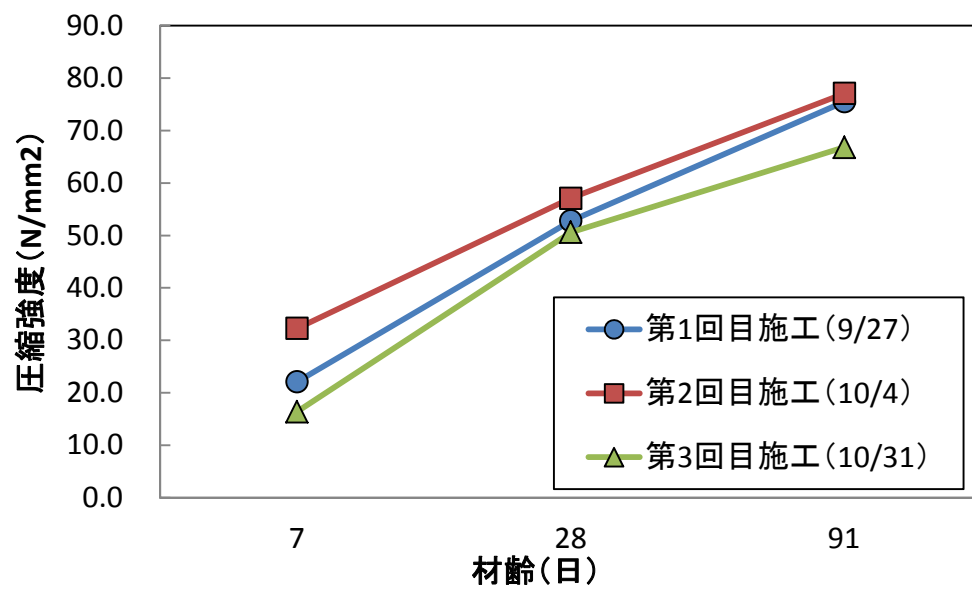


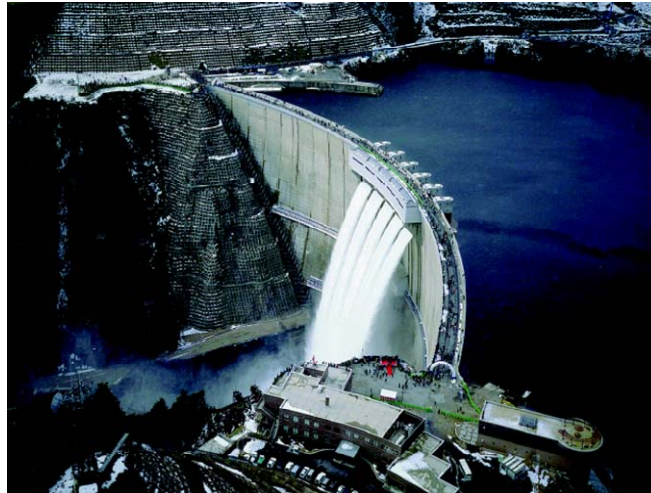
図-2.5.18 コンクリート温度履歴



図－2. 5. 19 圧縮強度試験

## 2.6 温井ダム

### 2.6.1 概要



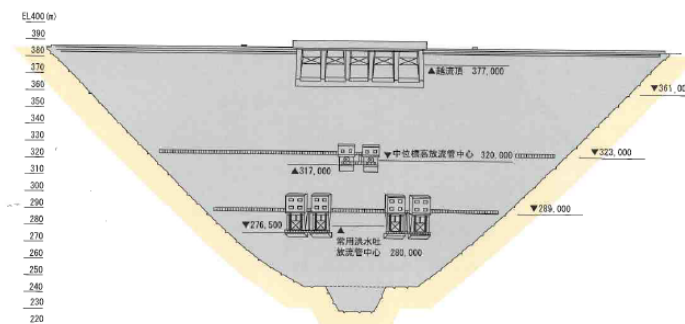
写真－2.6.1 温井ダム全景

- ダム事業者 : 中国地方整備局
- 所在地 : 広島県山県郡加計町
- 工事名称 : 温井ダム本体工事
- 施工者 : 鹿島・西松・五洋特定建設工事共同企業体
- 工期 : 1991年7月1日～2002年3月1日
- ダム形式 : アーチ式コンクリートダム
- 諸元 : 太田川水系滝山川

有効貯水量 79,000 千 m<sup>3</sup>

堤高 156m、堤頂長 382m、堤体積 810 千 m<sup>3</sup>

- 筆者の指導業務 : 黒部ダムに次ぐ規模のアーチダムに対して、川治ダムや奥三面ダムの経験を活かし、特殊工法である岩盤 PS 工法などの技術を指導した。また、基礎掘削材の全量コンクリート骨材への利用、粒形改善による温度ひび割れ対策、プレキャストコンクリートの採用など、技術的課題の解決に対して指導した。さらに、複雑な堤体のアーチ線形に対して3次元 CAD システムを現場導入して施工管理の合理化を図った。



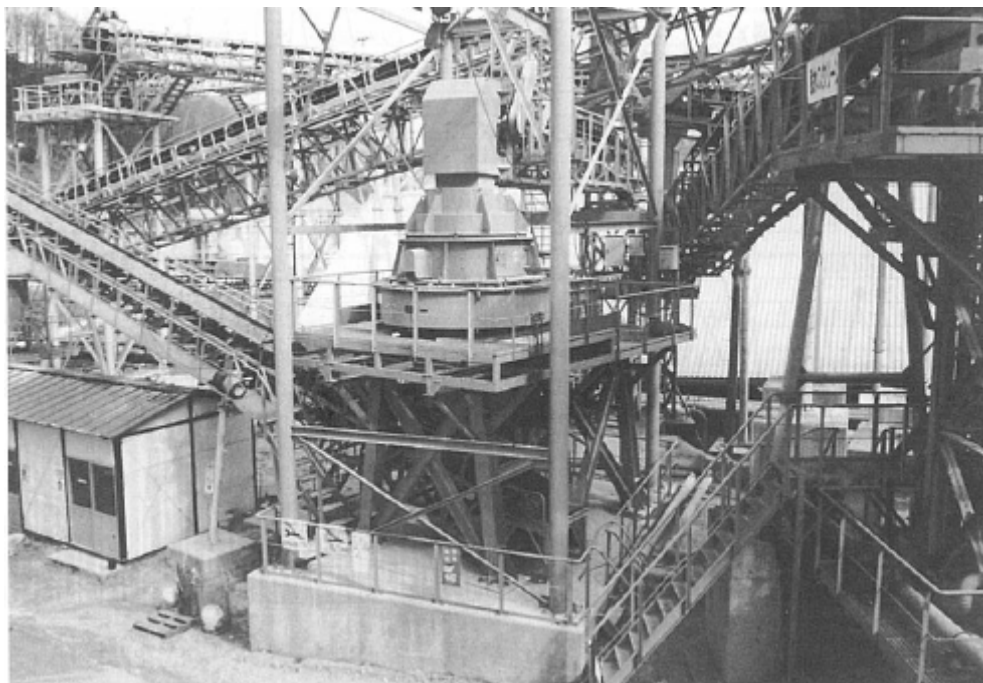
図－2.6.1 温井ダム下流面図

## 2.6.2 技術的に工夫した主な内容

### (1) 堤体コンクリート骨材の粒形改善

当ダムで使用する骨材用原石は花崗岩である。花崗岩は破碎された際の扁平度合いが大きく、棒状や板状になるものがほとんどである。骨材が扁平である場合、骨材の実積率が小さくなり、所定のスランプを得るための単位水量が増加する傾向にある。

そこで、他ダムで実績のある縦型回転式遠心碎塊装置（バーマックインパクト）を導入し、従来細骨材に適用してきた同装置を、骨材最大寸法 40mm 以下の粗骨材まで適用することとし、骨材粒形の改善を試みた <sup>1),2)</sup>。



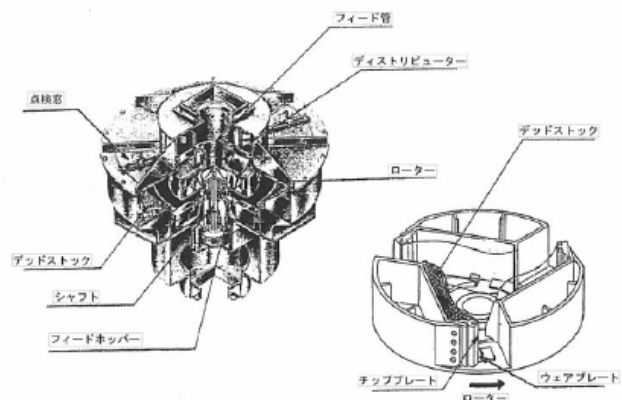
写真－2.6.2 縦型回転式遠心碎塊装置（バーマックインパクト）の全景

粒形改善の原理は、図－2.6.2 および図－2.6.3 に示す装置のフィード管から超高速回転するロータ部に原料を投入し、ロータ部から高速で外壁に骨材を放出する。放出された骨材は、外壁のデッドストックにある骨材と衝突し、その衝突エネルギーによって破碎・整粒される。本方式では、骨材同士の衝突によって破碎・整粒することから、機器自体の消耗が少なく、破碎能力も回転速度を変えることで調整が可能である。

当ダムでは、細骨材および粗骨材用に各 1 台の装置を導入した。その諸元を表－2.6.1 に示す。



図－2. 6. 2 設備本体姿図



図－2. 6. 3 設備内部構造図

表－2. 6. 1 堅型回転式遠心砕塊装置の諸元

対 象 骨 材	細骨材	粗骨材
型 式	BM-100N	BM-150N
最大投入原料径(mm)	55	60
ロータ径(inch)	39	39
ロータ周速(m/秒)	45～75	45～65
主軸回転数(rpm)	1,030～1,670	1,030～1,490
標準所要動力(kw)	110～150×4P	150～190×4/6P
駆動方式	V ベルト	V ベルト

骨材の粒形改善は、骨材製造において原石が2次・3次破碎されたもの（骨材最大寸法 60mm 以下）のすべてについて行われるが、サージからのふるい分けで振り分けられた 40mm 以下の粗骨材については粒形改善されないことになる。当初計画では、粗骨材の粒形改善率を 70%程度と想定していたが、粒径改善することでどの程度破碎・整粒されるかを Zingg の方法による骨材偏平率の分布調査で把握した。

Zingg の方法は、図-2.6.4 に示すように骨材の長軸（a）、中間軸（b）および短軸（c）を測り、 $b/a$  および  $c/b$  の値から、塊状、棒状、板状、葉状の4つ形状に分類するものである。

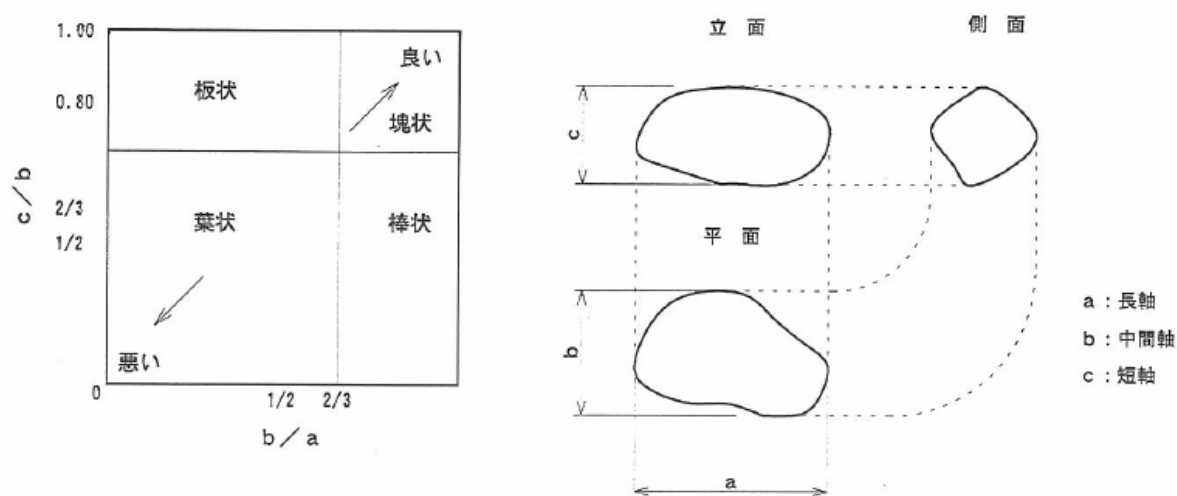


図-2.6.4 Zingg の分類

調査で測定した検体数を表-2.6.2 に、Zingg の方法による測定結果を表-2.6.3 に示す。

測定の結果から、粒形改善前（改善率 0%）においては、塊状の割合が骨材寸法 40～20mm（G3）で 16%、20～5mm（G4）で 9%であり、偏平度の高い葉状の割合が G3 で 20%、G4 で 39%であった。これに対して、70%粒形改善されることによって、塊状の骨材の割合は 1.4～2.4 倍に増加し、葉状の骨材が 0.5～0.7 倍に低下する結果であった。また、骨材をすべて粒形改善した場合には、塊状の骨材の割合は 2 倍以上、葉状の骨材が 1/2 以下となり、縦型回転式遠心碎塊装置による粒形改善の効果が確認された。なお、参考として、粒形改善効果の事例を図-2.6.5 に示す。

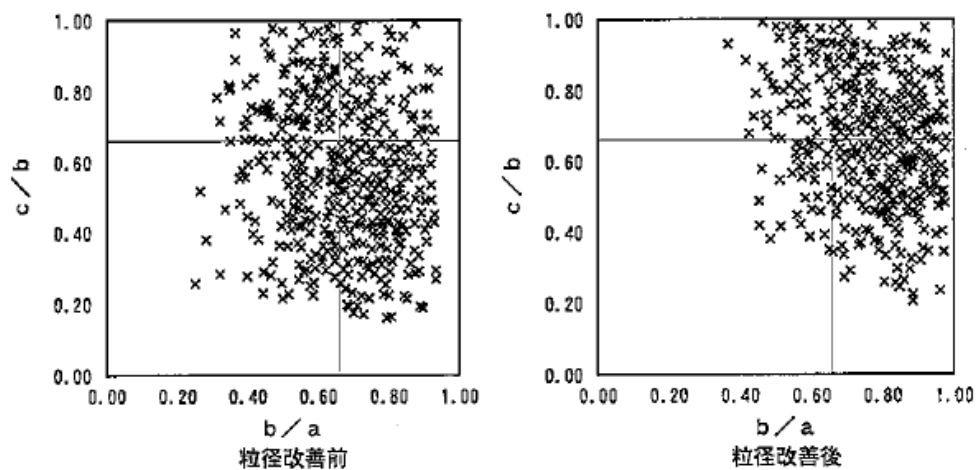
表-2.6.2 骨材偏平率の分布調査

粒径改善率 (%)	骨 材 区 分 別 の 検 体 数		
	G3(40-20mm)	G4(20-5mm)	計
0	600	600	1,200
70	600	600	1,200
100	600	600	1,200

表-2.6.3 骨材偏平率の分布調査結果

骨材 区分	粒径改善率 (%)	骨材形状分布(%)			
		塊状	棒状	板状	葉状
G3	0	16	50	14	20
	70	23	48	15	14
	100	32	41	18	9
G4	0	9	32	20	39
	70	22	32	18	18
	100	22	44	19	15

粗骨材 G 3 (40mm~20mm)



粗骨材 G 4 (20mm~5mm)

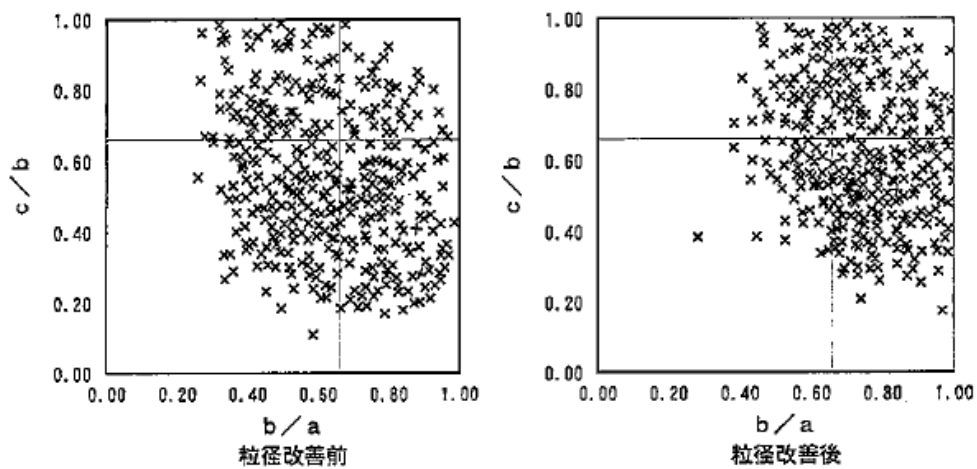


図-2.6.5 粒形改善効果

粒形改善率がコンクリートの性状に及ぼす影響について、フレッシュおよび硬化コンクリートに関する室内試験を実施して確認した。

粒形改善率が低くなるとスランプは小さくなる傾向を示した。また、所定のスランプを満足するためには粒形改善率を 65% 以上にする必要があることが判明し、実際の施工管理上は、ばらつきを考慮して 70% 以上を目標とした。

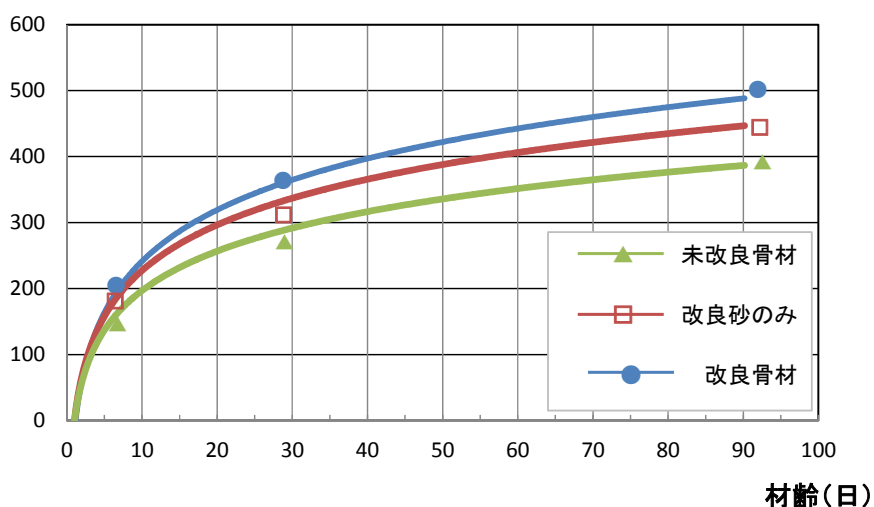
同一のスランプを得るための単位水量については、表－2.6.4 に示すように未使用の場合は 96 kg/m<sup>3</sup> であるのに対して、粒形改善骨材を用いた場合には 88 kg/m<sup>3</sup> であり、8 kg/m<sup>3</sup> の低減ができた。

一方、圧縮強度については、図－2.6.6 に示すように改良骨材（粒形改善率 100% の細骨材＋粒形改善率 70% の粗骨材）の場合、材齢 91 日における強度が未改良骨材の 30% 増（117kgf/cm<sup>2</sup> 増）であり、配合強度 430kgf/cm<sup>2</sup> を大きく上回る結果であった。

表－2.6.4 配合表（粒形改善効果の比較）

骨材の種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C+FA (%)	混和材料比 F/C+FA (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)										
					水 W	セメント 中庸熟	混和剤 FA	細骨材 S	粗骨材 G					混和剤	
									G1 150-80mm	G2 80-40mm	G3 40-200mm	G4 20-5mm	合計	AE 減水剤 (%)	補助 AE 剤
未改良骨材	150	43.6	30.0	23.0	96	154	66	484	567	324	324	405	1,620	C×0.25	37A
改良砂のみ	150	40.9	30.0	22.0	90	154	66	466	579	331	331	413	1,654	C×0.25	37A
改良骨材	150	40.0	30.0	30.0	88	154	66	457	578	330	330	413	1,651	C×0.25	37A

圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

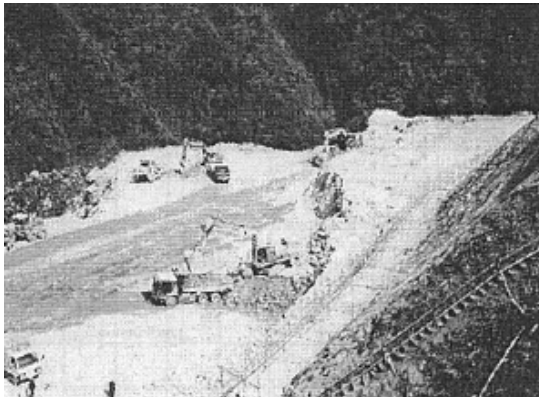


図－2.6.6 圧縮強度試験結果（粒形改善効果の比較）

## (2) 堤体コンクリート骨材への基礎掘削ブリの利用

当ダムでは、堤体基礎掘削岩からコンクリート用骨材を採取するという、初めての試みを実施された<sup>3)</sup>。アーチ式ダムでは、堅固な基礎岩盤を有するサイトが選定されるうえに、基礎掘削に際し、アーチスラストを支持する基礎岩盤形状を確保するために堅固な岩盤が露出しても設計予定線まで掘削する必要がある。このことが、基礎掘削岩の全量骨材の利用に対する必要量確保を可能にした理由と考えられる。以下に、検討の経緯および結果について述べる。

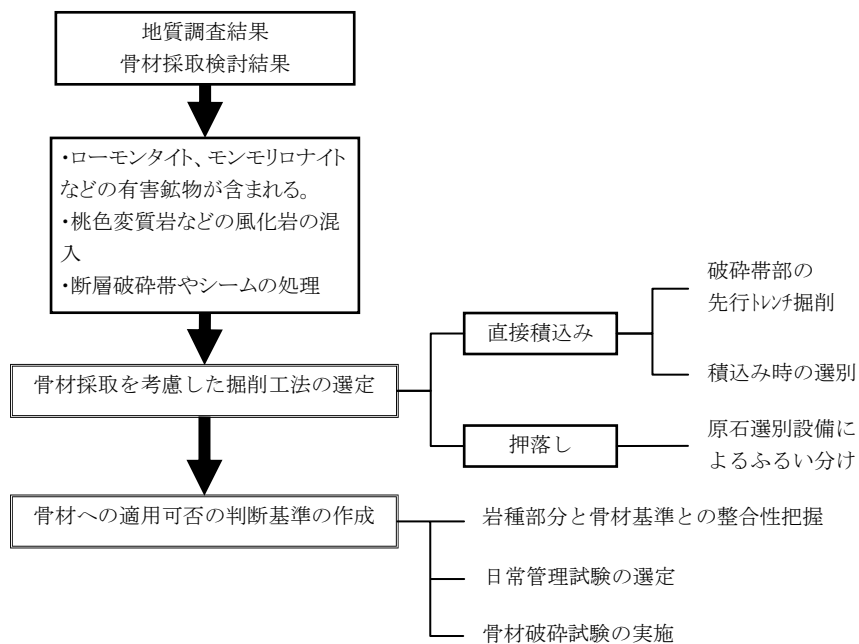
設計上の掘削方法は、①直接積込み（ベンチカット掘削およびダンプトラックによる運搬、写真－2.6.3）と②押落し（ベンチカット掘削およびブルドーザ押土、河床積込み・運搬、写真－2.6.4）の2方法により施工するが、原石採取をより確実に行うために、図－2.6.7 に示すフローにより検討を行った。



写真－2.6.3 直接積込み状況



写真－2.6.4 河床積込み状況



図－2.6.7 掘削岩の骨材利用の検討フロー

原石の品質確保のためには、極力直接積込みで施工する方が有利であるが、さらにベンチ形状や使用機械などを考慮して掘削方法を検討すると、表－2.6.5 に示すような結果となった。この結果から、直接積込みと押落しのエリアを設定し、原石の賦存量から実際に採取可能な量を把握した。その際に岩級は軟岩Ⅱ～硬岩として原石賦存量を算定した。

表－2.6.5 掘削工法の検討結果

	進入路+ ベンチカット工法	その他の工法			
		通常ベンチカット工法	2段ベンチカット工法	シュート+ ベンチカット工法	自然シュート+ ベンチカット工法
利点	上流側に進入路を設けて施工するため、施工性は通常工法とほとんど大差ない。廃棄土岩との確実な選別採取ができ、品質上問題がない	通常工法であるため、施工性に優れている。安全性、工程、工費の面でも問題はない。	表層部の廃棄土岩を先行除去するため、確実な原石採取ができる。	廃棄土岩と原石を分離できるため、十分な原石量が確保できる。	地形を有効利用したもので、十分な原石量が確保できる。
欠点	ダムサイトの地形から進入路の取付標高が限定されているため、岩石採取が他案に対し少ない。	河床への押し落としを伴うため、原石に廃棄岩が混入する恐れがある。また、木根等の混入も考えられ、品質上の問題が多い。	ベンチ幅が狭く、作業効率が低下し、工期の面で問題がある。表層部除去後の落石防護のための法面保護が必要となる。	シュート部の先行施工を行う必要があり、この時の施工性が非常に悪く、安全面、工期面でも問題がある。また、シュート部に廃棄土岩が混入	事前に人力施工を伴うことから安全性。労働力確保に難がある。廃棄土岩、木根の完全除去は難しいため、原石にこれらが混入する恐れがある。
評価	原石採取率	○	△	◎	◎
	原石の品質 (土砂・木根の混入)	◎	×	◎	○
	施工性	◎	◎	△	×
	安全性	◎	◎	△	×
	工期	◎	◎	×	×
	工費	○	◎	△	○
	総合評価	◎	—	—	—

原石採取の数量把握は、地質調査結果から岩種区分に基づき算出した。また、通常の施工管理も岩級を基準とすることが一般的である。そのため、岩種と岩級区分および骨材用原石採取基準との適合性を把握する必要がある。

一方、コンクリート配合面からアーチ式ダムのコングリートとして、高強度（配合強度  $\sigma_{91}=430 \text{ kgf/cm}^2$ ）や密実性や耐久性が要求される。そのため、骨材は以下の項目を満足するものでなければならない。

- ① 所要の強度と重量を有していること、つまり比重と圧縮強度が骨材としての基準値を満足すること
- ② 品質のばらつきが少ないこと

特に当ダムでは長石が熱水変質を受けた強桃色変色岩が出現し、これが低強度かつ吸水率が大きいために混入を防止する必要がある。また、ローモンタイト等の有害鉱物の分布状況を的確に把握し除去する方法を決定する必要がある。

上記の条件を満足する原石を採取仮置きするために、図－2.6.8 に示した項目について事前に試

験を行い、さらに骨材の破碎試験やコンクリートの試験練りを実施して骨材の適否を判定した。

また、採取のための各岩級毎の基準を作成するとともに、有害鉱物については図-2.6.9 に示すようにX線回折を主体とした調査を行った。その結果、有害鉱物は岩塊部には含まれず、節理や破碎帯のみに含まれていることを確認した。特にローモンタイトについては、図-2.6.10 に示すように、その含有量を岩塊径毎に把握し、径 100mm 以上の岩塊については 98.6%の部分で付着がないことを確認し、後工程である骨材洗浄などで除去できるものと判断した。

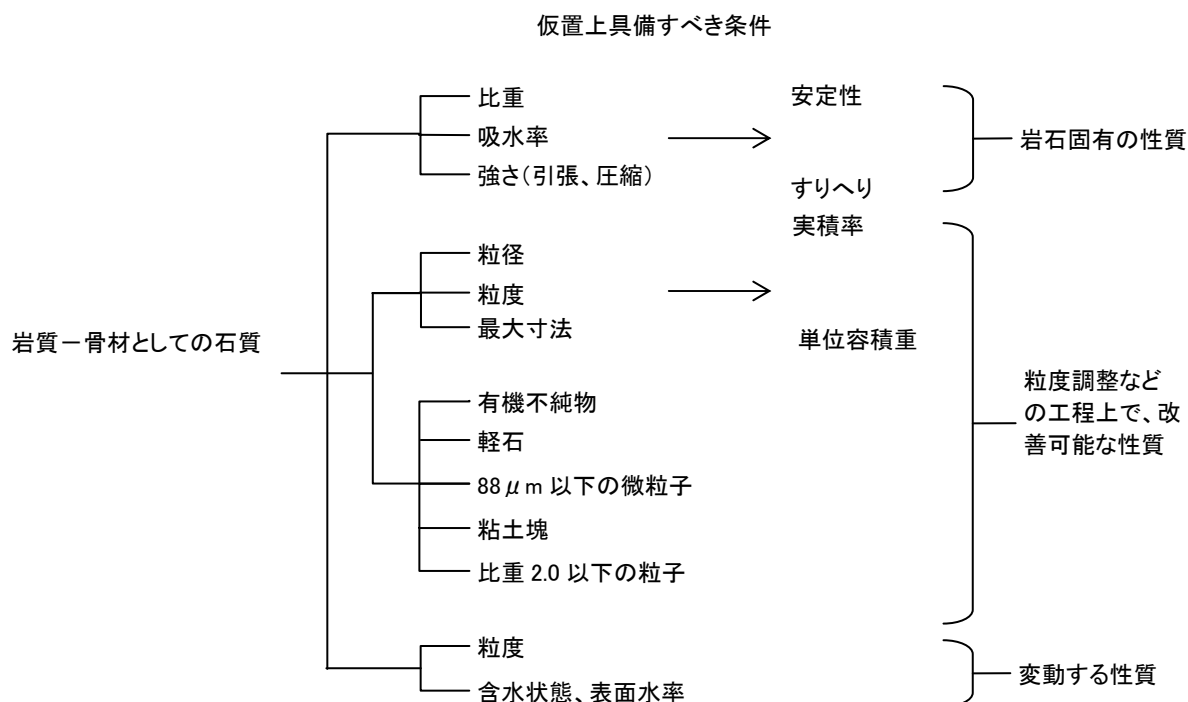


図-2.6.8 骨材としての適否を判定するための試験項目

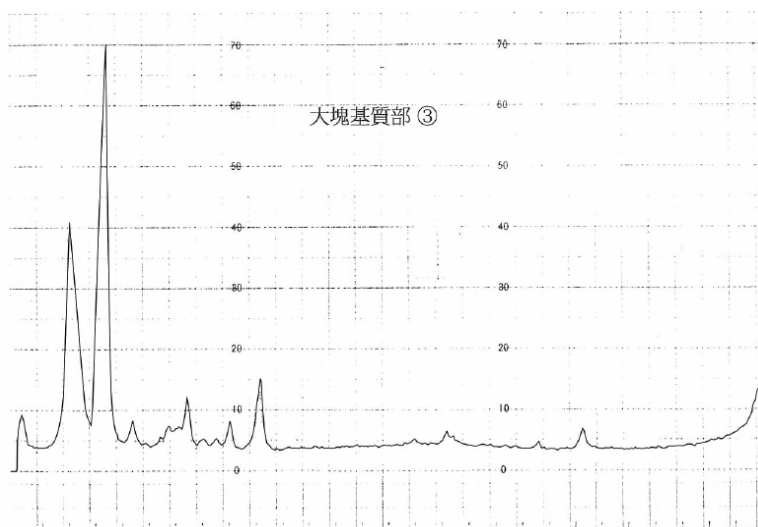
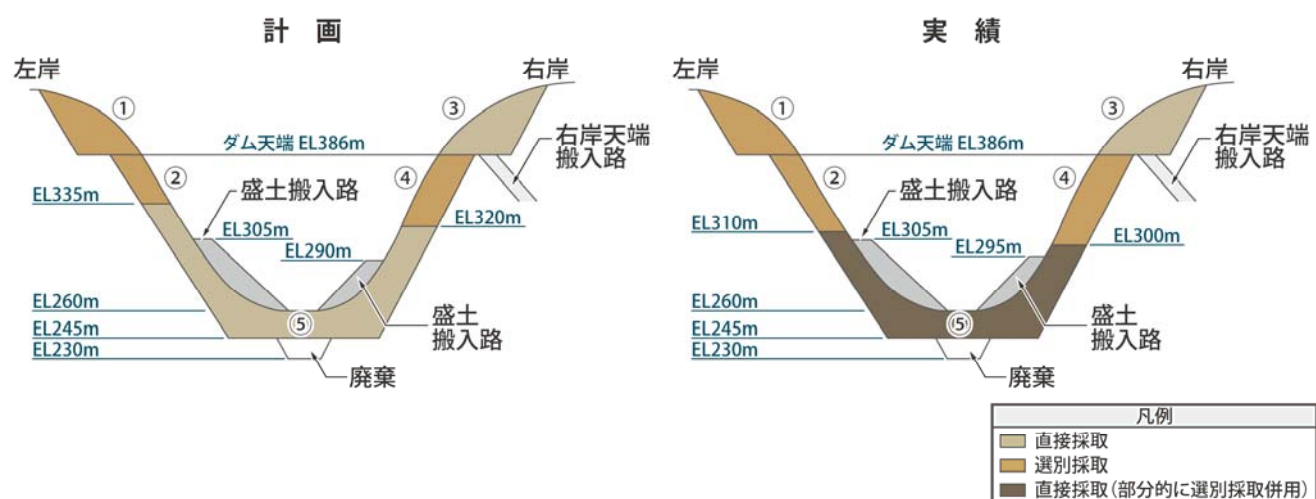


図-2.6.9 X線回折による分析結果の例

細片 (φ 3cm以下)	ローモンタイトを付着しない 粒子の占める割合	75.60%	ローモンタイトを 付着する粒子
小塊 (φ 3～5cm)		75.60%	
中塊 (φ 5～10cm)		78%	
大塊 (φ 10cm以上)			98.6%

図－2. 6. 10 ローモンタイトを含む割合

実施工においては、5 m 毎の平面スライスで発注者による岩判定を行い、骨材転用範囲を決定した。また、仮置き原石の管理として①比重（2.5 以上）②吸水率（3 %以下）③圧縮強度（点載荷試験により得られた圧裂強度からの換算一軸圧縮強度；430 kgf/cm<sup>2</sup> 以上）の項目について、1 回／週の日常管理を行いながら採取を完了した。図－2. 6. 11 および表－2. 6. 6 に原石採取の実績を示す。



表－2. 6. 6 原石採取数量の実績

	当初設計量(m³)			実績計量(m³)		
	骨材賦存量	直接採取量	選別採取量	骨材賦存量	直接採取量	選別採取量
①左岸上部	226,000	0	59,000	259,000	0	163,000
②左岸部	370,000	222,000	37,000	408,000	138,000	127,000
③右岸上部	267,000	165,000	0	315,000	118,000	0
④右岸部	269,000	137,000	34,000	297,000	104,000	110,000
⑤河床部	96,000	96,000	0	96,000	40,000	50,000
合計	1,228,000	620,000	130,000	1,375,000	400,000	450,000

### (3) プレキャストコンクリートの採用

当ダムのリフトスケジュールは非常に厳しく、これをクリアするためには、放流管設置部や堤頂部の各種張出構造物における施工工程の短縮と、堤頂部付近におけるプラムライン観測室・連絡通廊等の堤体内構造物およびピア上流面開口部の施工合理化が課題であった。そこで当ダムではこれらの課題に対し、プレキャストコンクリートの採用により解決を図った<sup>4)</sup>。以下にプレキャストコンクリートを採用した背景と理由を示す。

当ダムには、堤体下流側に常用洪水吐・中位標高および非常用の各種放流設備が、堤体上流側にはその放流設備に関連した予備ゲートが配置され、常用洪水吐・中位標高の放流設備と予備ゲートは「張出構造物上」に設けられる。また、これらの各予備ゲートは、堤頂部の下流側における操作室に配置された開閉器と転向シーブによって操作されるが、当ダムがアーチ式構造のダムであるがゆえに、これらの機器は堤体からの複雑な張出構造物上に配置されることとなる。

さらに、当ダムではアーチダムの挙動を把握するため、堤体内部にはプラムライン観測設備と、その設備への連絡通廊（立坑・水平通廊）が配置される。またピア上流面には、予備ゲート開閉のためのワイヤーロープが貫通する開口部がある。

このように、当ダムにおいては張出構造物および堤体内構造物の施工法が計画工程確保のための重要なポイントとなる。

一方で、当ダムは柱状ブロック工法で施工されるため、堤体コンクリートの品質を考慮すれば、張出部・通廊部付近での長期放置や隣接ブロックの過大なリフト差を回避すべきである。

また、張出施工における、従来の一般的な施工方法としての「ブラケット足場＋外部支保工」では、架設および撤去に安全面での課題が残る。特に堤頂部下流側操作室は張出長が約 12m で支保工が大規模なものとなり、天端橋梁架設後の撤去作業は危険性が大きい。

該当する工種の工事数量を表－2.6.7 に、堤体断面形状図を図－2.6.12 にそれぞれ示す。

表－2.6.7 該当工種数量一覧

項 目	数 量
張出部プレキャストコンクリート型枠	2,643m <sup>3</sup>
張出部支保工用鋼材	1,092t
プラムライン室・連絡用通廊用 ボックスカルバート	185m <sup>3</sup> (22 基)
ピア開口部打込み型枠用 アーチカルバート	326m <sup>3</sup> (48 基)

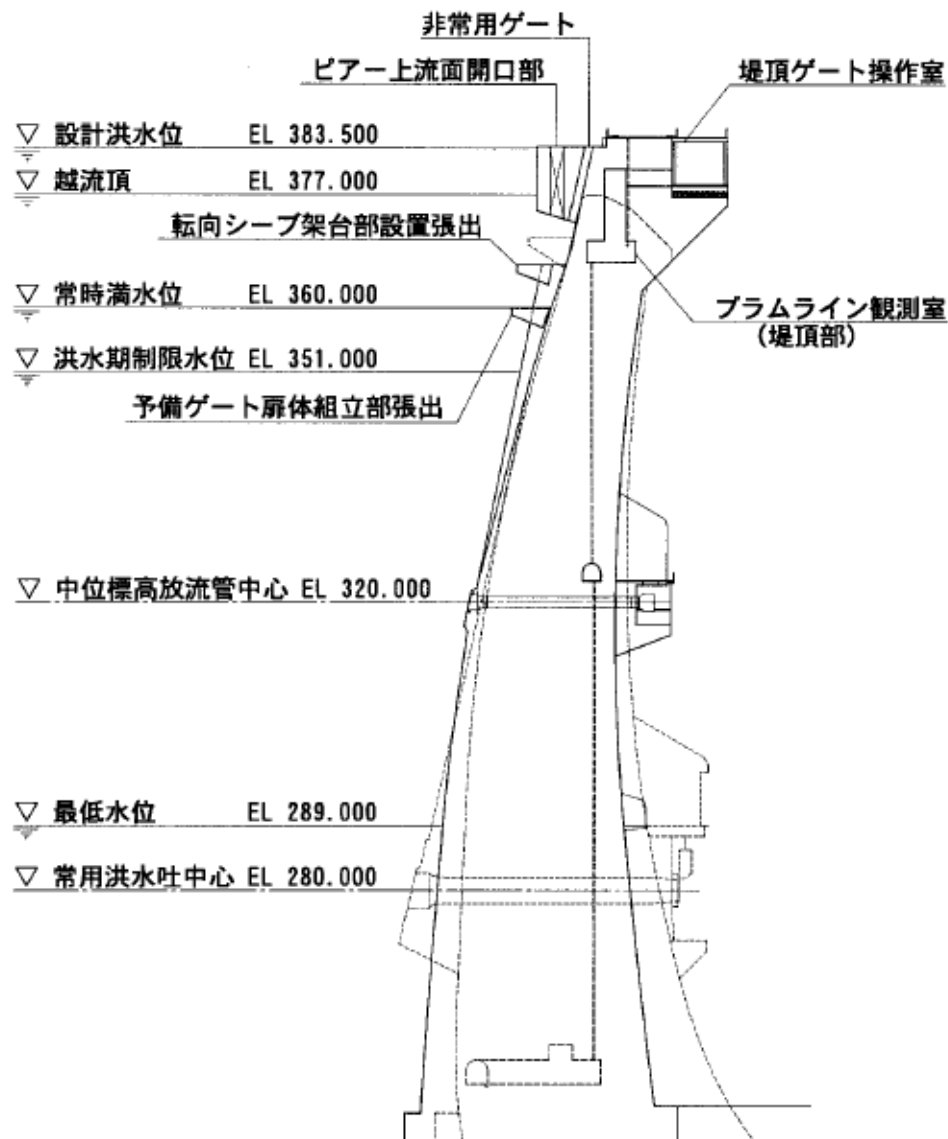


図-2.6.12 堤体断面形状図

張出部の施工においては、主要材料（プレキャストコンクリート型枠、内部鋼製支保工）を予め工場で製作し、現地施工をその架設のみとする施工法で工程を確保する方針とした。本施工法は従来の施工法と比較して、架設、撤去に係る安全性にも優れている。また堤頂部下流面の張出においては、昇降設備を予め先付けして架設することで仮設階段設置作業の省力化を図ることとした。

堤頂部における張出施工の場合、図-2.6.13 に示すように EL365m 付近から上下流側で支保工の架設が行われるため、非常に狭隘なエリアでの作業が予想された。張出規模の関係から、上流側予備ゲート張出部の架設は堤体ブロック内で 16t ラフタークレーンにて実施することとし、また、下流側の堤頂ゲート操作室張出の施工は、PC 型枠の幅を 3m の大型パネルとし、別ヤードで地組み後に 20t ケーブルクレーンで架設するものとした。

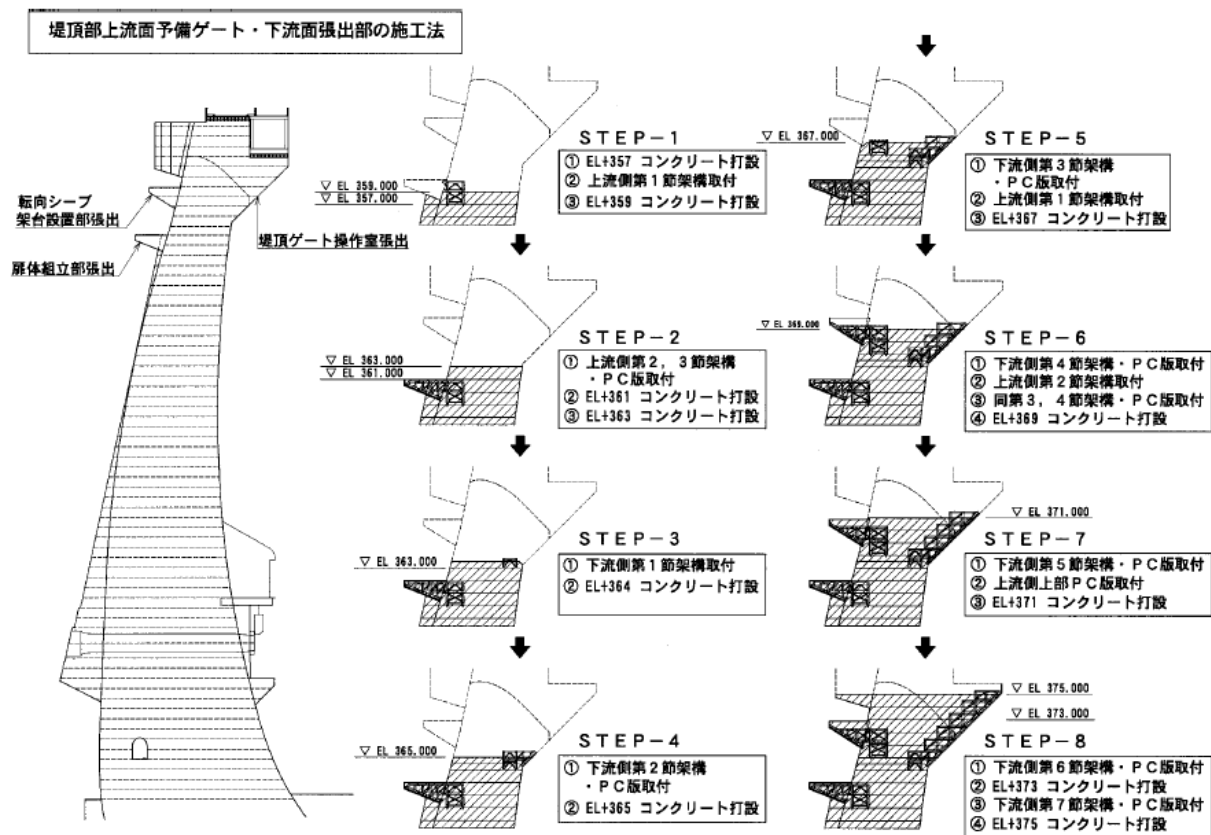


図-2.6.13 堤頂部の施工ステップ図

一方、堤体内部に計画された各種プラムライン観測設備のうち、最上部は堤頂ゲート操作室へ通じる計画であった。そこで、プラムライン室・連絡用通廊部材をプレキャストコンクリートで製作・設置し、昇降設備は鋼製の折返し階段とする案を発注者に提示し採用に至った。

プラムライン室は図-2.6.14に示すように EL367～370m 付近に計画されており、従来の型枠による施工では計画工程をクリアできないおそれがあった。このため、プレキャスト化したボックスカルバートにより現地施工を据付け・横締めのための作業とし、堤体コンクリートの進捗と併せて個々の設置を実施した。立坑据付け完了時には、埋設したインサートにより鋼製の折返し階段を設置した。

プラムライン室の中間部および立坑の最上部には立坑連絡用の開口があるため、設置時およびコンクリート打設時には鋼製のストラットで頂版部を補強した。なお、水平通廊はピア内に配置されているため、クレスト頂部に作業構台を設け、10t ラフタークレーンで設置することとした。そのため、水平通廊は揚重能力でピース割を決定している。

プラムライン諸設備の施工概要を表-2.6.8に示す。

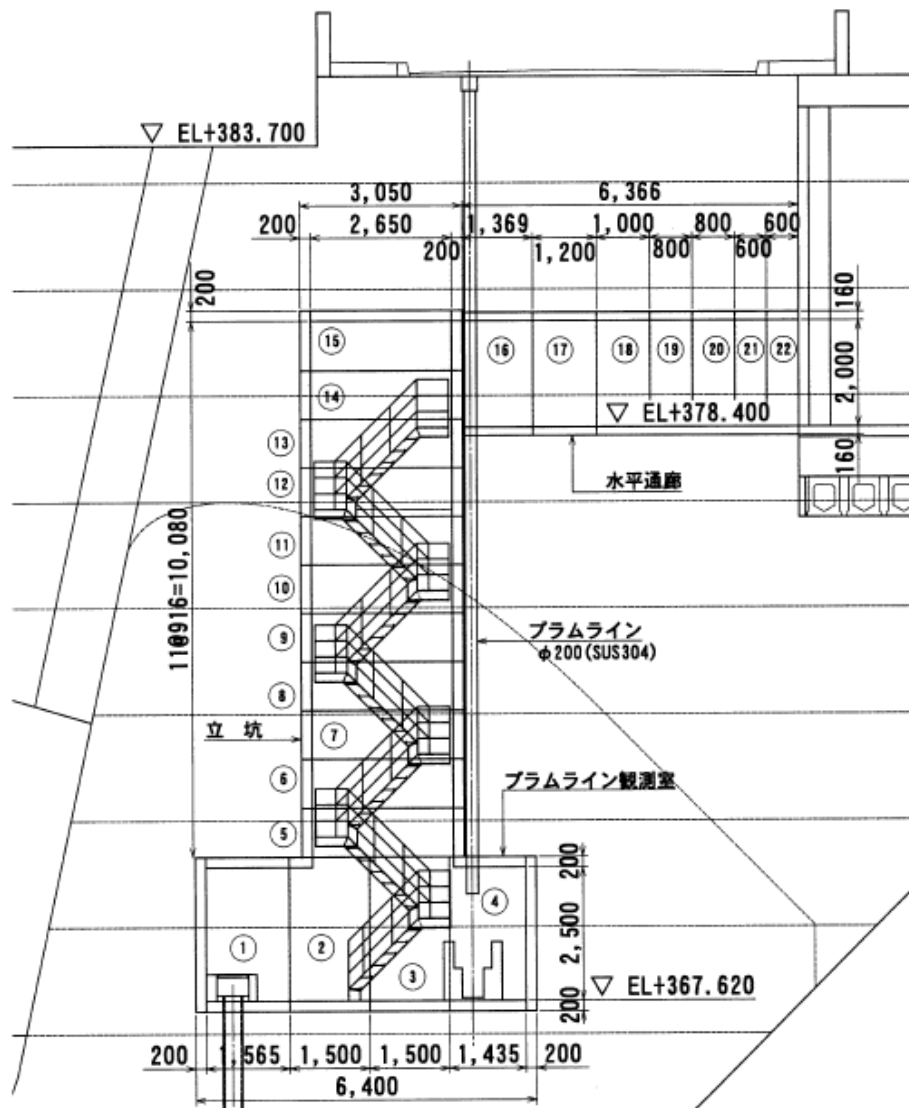


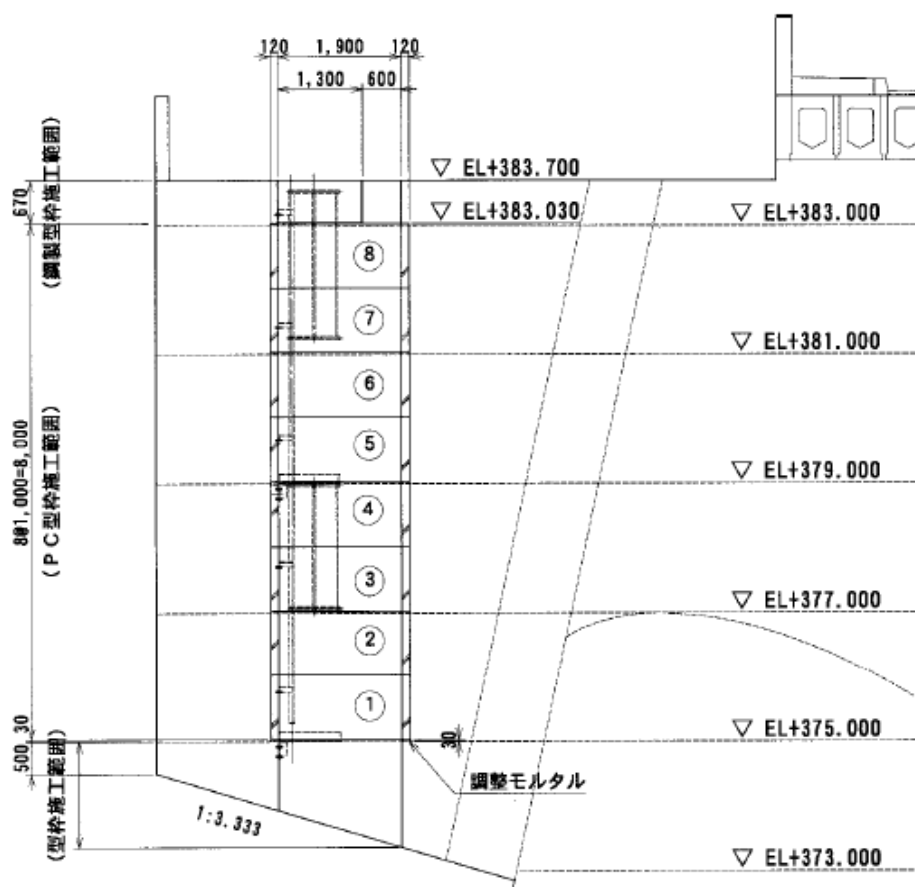
図-2.6.14 堤頂部プラムライン設備構造図

表-2.6.8 プラムライン諸設備の施工概要

区分	内空寸法(mm)	基数	架設機械
プラムライン室	2,000×2,500	4 基	16t R/C
立 坑	1,450×2,650	11 基	20t R/C
水平通廊	1,000×2,000	7 基	10t R/C

また、ピア上流面開口部については、打込み型枠としてプレキャストコンクリート製のアーチカルバートを採用し、現場での特殊型枠の組立・解体作業を軽減することとした。

越流ブロック（11～16BL）においては、下流側の主放流設備に関連した予備ゲートが6門設置されるため、ピア上流部にワイヤーロープの貫通と昇降設備設置のための開口が計画されていた。本工事では狭隘なピア部での型枠組立作業の省力化、脱型時の安全性確保の観点から、堤体コンクリートの打設に応じてプレキャスト製品によるアーチカルバートを設置（2基／リフト）した。また、開口最上部については機器レイアウトにより開口形状が変化するため、鋼製埋設型枠を製作して頂部コンクリートを打設した。なお、設置にあたってはすべて20t ケーブルクレーンを使用した。図－2.6.15 にピア開口部のプレキャスト型枠の割付け図を示す。



図－2.6.15 ピア開口部のプレキャスト割付け図

常用洪水吐・中位標高放流管および予備ゲート、堤頂ゲート操作室の各張出部の施工実績を表－2.6.9に示す。当該張出部の施工については、20tトラッククレーンやジブクレーンの現地組立・解体作業が含まれるため、他の工種と比較して歩掛りが大きい。また、堤頂ゲート操作室張出については、大型パネルのために地組み作業人員を増員したことと、妻面については従来のスライド型枠で施工したため、工数歩掛りは割高な結果となった。

表－2.6.9 各種堤体張出工の施工編成と所要日数

区 分		対象ブロック	標準編成		所要日数
			世話役	蔭工	
常用洪水吐放流管張出		11,12,15,16BL	1	4	124
中位標高放流管張出		13,14BL	1	5	35
中位標高	扉体組立部	13,14BL	1	4	8
予備ゲート張出	転向シーブ架台部	13,14BL	1	4	7
常用洪水吐	扉体組立部	11,12,15,16BL	1	4	15
予備ゲート張出	転向シーブ架台部	11,12,15,16BL	1	4	31
堤頂ゲート操作室張出		11～16BL	1	8	27

注) 1. 常用・中位放流管張出には架設重機の現地組立・解体を含む

2. 所要日数は対象ブロックすべての合計を示す

一方、堤体内に計画された上記構造物に関する施工歩掛りは表－2.6.10 に示すとおりである。プラムライン設備の立坑部およびピア開口部については 20t ケーブルクレーンで設置し、金物で連結固定する方法をとったが、歩掛りでみる限り非常に良好な結果であった。

表－2.6.10 プラムライン設備・ピア開口部の施工編成と所要日数

区 分		対象ブロック	標準編成		所要日数
			世話役	蔭工	
プラムライン設備	観測室	13BL	1	4	2
	立坑		1	4	0.7
	水平通廊		1	4	1
ピア開口部		11～16BL	1	4	3

注) 所要日数は対象ブロックすべての合計を示す

当ダムでは越流部における堤頂部の各種張出部および堤体内部構造物について、今回報告したプレキャストコンクリートを用いた施工法により、従来工法と比較して工期を短縮し、計画工程をほぼクリアすることができた。

#### (4) 3次元 CAD システムの現場での適用

ダム工事の基礎掘削から堤体工に至る膨大な業務の合理化を目指し、1990 年代初頭から宮ヶ瀬ダムをターゲットに本格的な「ダム堤体掘削・打設情報化設計施工システム」の開発に取り組み、システムの開発・改良を重ねてきたが、当ダムにおいてもこの 3 次元 CAD システムを積極的に展開し、活用した<sup>5)</sup>。図-2.6.16 に 3 次元 CAD による温井ダムの全体図を示す。また、図-2.6.17 に 3 次元 CAD システム図を示す。以下に 3 次元 CAD システムの特徴と適用内容を述べる。

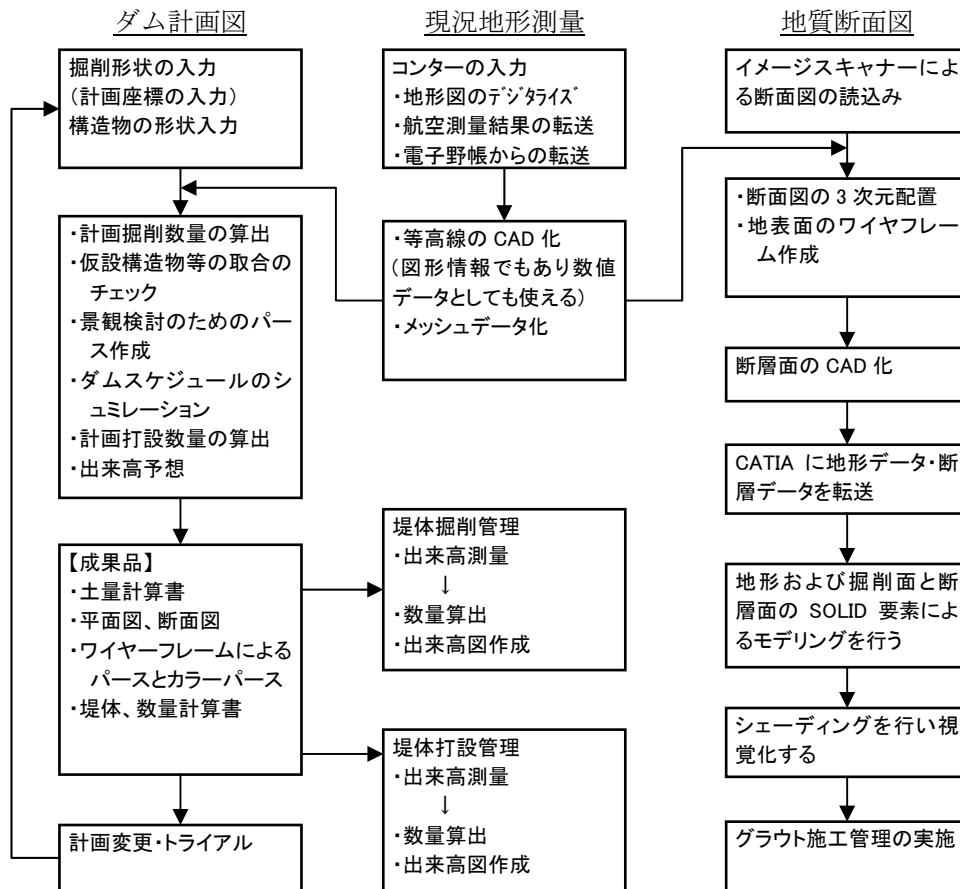
システムの機器構成としては、主体機器を SUN 社 EWS SPARC シリーズ (UNIX)、CAD ソフトは COMPUTERVERSIO 社 CADD3 (3 次元) をベースにダム CAD 工事用に開発・追加したものである。モデルの入力方法は、航空写真測量、イメージスキャナ、メモリーカード、タブレットおよびキーボードと多彩であり、出力もレーザープリンタ、静電プロッタおよびモデムから選択できる。また、現場の CAD システムを本社設計部のシステムから遠隔にて保守・管理できるものとなっていた。

当ダムはアーチ式であり、この 3 次元 CAD システムをより有効に活用した。その主な理由を以下に示す。

- ① アーチ式ダムの場合、掘削および堤体形状が曲線を呈することから 3 次元座標で管理する必要がある。
- ② 特に、堤体は水平面で双曲線かつ鉛直面でオーバーハング形状であるにも関わらず、施工管理としてはスライス断面が基本となる。そのため型枠や埋設物の設置について、測量システムを組み込み、現場で再現する必要がある。
- ③ 打設後の基礎処理工ボーリング時に、打設面上のクーリングパイプや計測機器のケーブル切断が無いように施工管理する必要がある。
- ④ 工事全体で図面に表示されている仮設備の位置や本体との整合性を確認し、施工時期などを決定する必要があると同時に、詳細設計が成されていない部位について景観設計を考慮して、ビジュアルに表現できる手法が必要である。



図-2.6.16 3次元 CAD による温井ダムの全体図

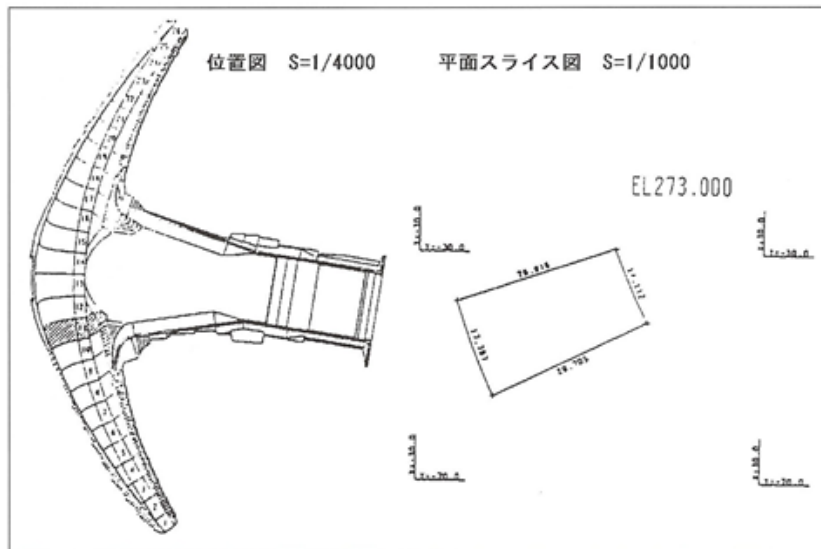


図－2. 6. 17 3次元 CAD のシステム図

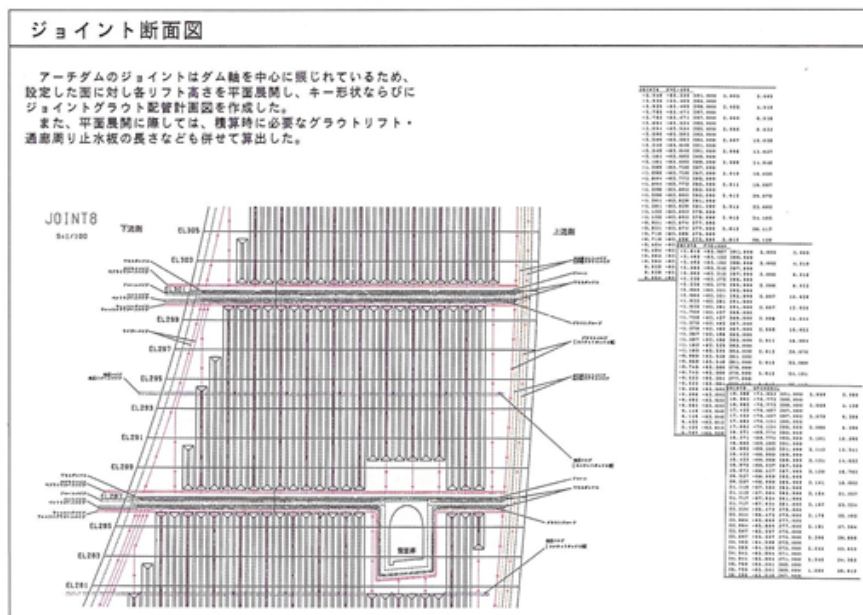
上記の理由に対して、具体的な施工管理に利用した項目は次のとおりである。

- ① ダムサイト全体の地表面および掘削形状の入力
- ② 堤体本体の3次元座標への復元
- ③ 各打設面の埋設物や型枠などの出来高管理（図－2. 6. 18、図－2. 6. 19）
- ④ 基礎処理時のボーリング位置のチェックおよび位置変更（図－2. 6. 20）
- ⑤ 常用洪水吐および中位標高放流設備のパース図の作成
- ⑥ 管理用通路などの岩盤内構造物の透視図の作成
- ⑦ 毎月の進捗状況を表した3次元パースの作成など
- ⑧ その他、打合せや見学会資料の作成

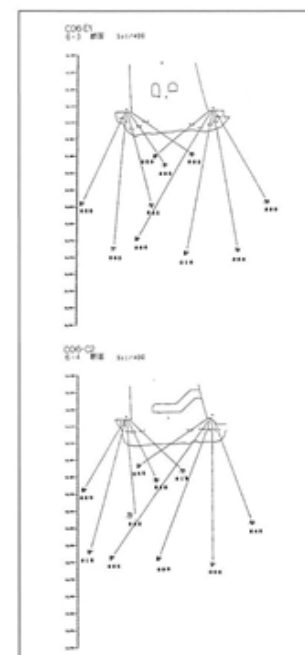
このように、3次元 CAD システムは、本来目視できない個所を可視化できる、正確な工事数量を算出できるという長所があり、より施工の合理化が求められているダム工事にとって不可欠なものである。



図ー2.6.18 数量算出および出来形図作成例



図ー2.6.19 堤体ジョイント部詳細図の例



図ー2.6.20 基礎処理の孔配置検討の例

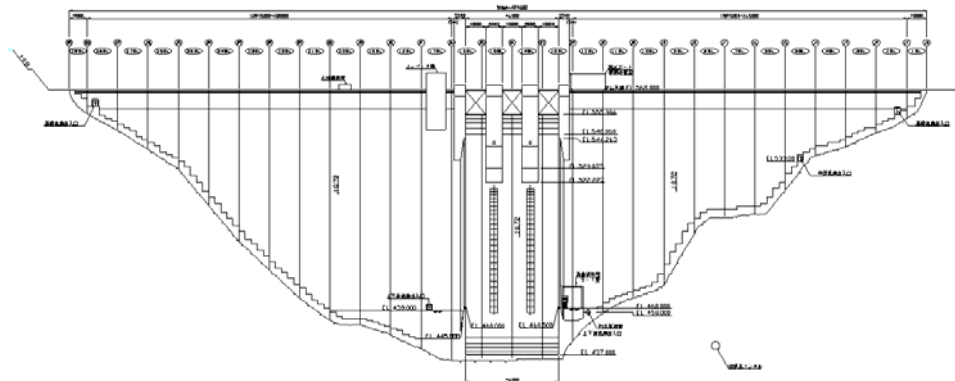
## 2.7 滝沢ダム

### 2.7.1 概要



写真－2.7.1 滝沢ダム全景

- ダム事業者 : 水資源機構
- 所在地 : 埼玉県秩父市大滝
- 工事名称 : 滝沢ダム本体建設工事
- 施工者 : 鹿島・熊谷・銭高特定共同企業体
- 工期 : 1999年3月2日～2008年1月30日
- ダム形式 : 重力式コンクリートダム
- 諸元 : 荒川水系中津川  
有効貯水量 63,000 千 m<sup>3</sup>  
堤高 132m、堤頂長 424m、堤体積 1,670 千 m<sup>3</sup>
- 筆者の指導業務: 堤高 132m、堤体積 1,670 千 m<sup>3</sup> の大型重力式コンクリートダム施工にあたり、コンクリート運搬仮設備の合理化を進め高速施工を実施するとともに、フライアッシュ混合率の変更を行うなど温度応力対策を実施し、品質確保面での指導を行った。



図－2.7.1 滝沢ダム下流面図

## 2.7.2 技術的に工夫した主な内容

### (1) 低品質骨材の使用に対する取組み<sup>1)2)</sup>

滝沢ダムの原石山はCM級の岩盤が主として賦存する当初の想定と異なり、CL級の岩盤が相当分布することが確認された。ダムコンクリート骨材としてCM級以上の岩盤を使用する実績は多数あるが、CL級の岩盤はCM級とD級の間に位置して物理性状の範囲が広く使用実績は少ない。そこで、歩留りの低下を防止するために、CL級岩盤を細別化し、試験室レベルでの骨材試験やコンクリート試験を実施して、骨材として使用可能な範囲を定めて採取した。低品質骨材を使用するにあたっての問題点としては、吸水率が高く骨材の品質変動が大きいこと、コンクリートのフレッシュ性状と耐久性への影響が主として挙げられた。フレッシュ性状への影響に対しては、当初、コンシステンシーの経時変化が激しかったため、その主要因となっている細骨材を減らして、その分結合材で置き換えて骨材変動に対して鈍感な配合に変更した。また、経時変化に対する対策としては、少量のモンモリロナイトが認められたことから、凝結遅延剤を採用する対策を講じた。

その後、施工を進めていく中で、品質管理の見直しを図り、重点管理項目を練上がり時から施工時におけるコンシステンシーに移行させ、その管理目標をRCD用コンクリートでは4時間後におけるVC値を50秒以下、有スランプコンクリートでは2時間後（RCDとの境界部では4時間）のスランプ値を1cm以上に設定し、凝結遅延剤を季節変動・骨材変動に連動して適切に添加することに対応することにした。また、練上がり時のフレッシュ性状については上限側（RCDでは下限側）であるほど、経時変化が緩やかであることから、目標値を品質管理値の中心から上限側で管理した。

さらに、骨材製造時に比べコンクリート練混ぜ時の骨材粒度が小さくなるとともに、そのばらつきが大きくなっていったことから、骨材運搬時に再破碎が起きていると考えられた。このため、ベルトコンベヤ乗継ぎ部に緩衝ゴムを設けるなどの対策を実施するとともに、適宜バッチャープラント直前での粒度分布を把握し、現場配合を組直しながら施工を行った。

その再破碎は、コンクリート練混ぜ時や運搬時、締固め時にも起きていると想定され、再破碎が起きることによる骨材の吸水が特に問題となる。このことから、強度等を確認のうえ、単位セメントペースト量が増えるように単位水量の増加を図って現場に適合した配合に変更した。一方、耐久性に対しては、懸念されていた凍結融解試験やすりへり抵抗試験を実施し、問題ないことを確認した。

上記以外に、低品質骨材使用に対する取組みとして、滝沢ダムでは以下の対策を講じた。

- ① G1の採取率が悪いこと、ある範囲で配合粒度比率を見直し、細骨材率・単位水量・混和剤による調整を行った（G1カット配合）。
- ② 細骨材の表面水率が全般的に高いこと、貯蔵ビンでの水抜きパイプの増設等により5～7%程度で安定させることができた。
- ③ 骨材プラントにて微粒分（0.075mm以下）が洗い出され、濁水処理設備が圧迫されたため、ハイメッシュセパレータと呼ばれる分級機にて細粒分を回収し、細骨材に添加して使用した。なお、低品質骨材を使用した結果、原石山における原石採取率は68%と報告されている。

(2) フライアッシュ置換率の夏期 40%への変更による温度応力抑制対策の実施<sup>3)</sup>

表-2.7.1 に滝沢ダムコンクリートの配合を示す。特筆すべき事項としては、季節、材料変動に応じて配合を細かく変更する対策を行うとともに、温度応力抑制のためにフライアッシュ置換率を 40%に引き上げていることである。なお、品質管理の結果では、B-1(40)配合（フライアッシュ置換率 40%）の硬化コンクリートは、 $12.0 \sim 28.0 \text{ N/mm}^2$ 、平均  $20.1 \text{ N/mm}^2$  であり、B-1(30)配合（フライアッシュ置換率 30%）が  $12.0 \sim 39.0 \text{ N/mm}^2$ 、平均  $22.6 \text{ N/mm}^2$  に対してやや小さくなるが、設計基準強度  $10 \text{ N/mm}^2$  を十分満足しており、安定した品質であった。

表-2.7.1 滝沢ダムのコンクリート配合

使用年月	配合種類	名称	細骨材の最大寸法 (mm)	スランピング値 (cm・秒)	空気量 (%)	水結合材比 W/C +F (%)	フライアッシュ置換率 F/C+F (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )												単位量		備考	
									水	結合材				細骨材 150 ~ 80 mm G1	細骨材 90 ~ 40 mm G2	細骨材 40 ~ 20 mm G3	細骨材 20 ~ 5 mm G4	AE減水剤 (g/ m <sup>3</sup> )	AE剤 (g/ m <sup>3</sup> )	凝結遅延剤 (%)				
										セメント	フライアッシュ	F	F											
粗骨材混合比																								
示方配合																						30:25:25:20		
H13 7/30 - H14 7/6																						20:30:25:25		
H14 7/8 - H15 6/29																						20:30:25:25		
H15 6/30 -																						20:30:25:25		
示方配合																						30:25:25:20		
H13 7/30-H14 7/6																						20:30:25:25		
H14 7/8 - H15 6/29																						20:30:25:25		
H15 6/30 -																						20:30:25:25		
H14 2/21-H14 4/24																						Gmax80mm 配合の追加		
示方配合																						40:30:30		
H13 9/5-H13 10/30																						40:30:30		
H13 10/31-H13 11/29																						40:30:30		
H13 11/30-H13 12/27																						40:30:30		
H14 3/13- H14 3/22																						40:30:30		
H14 3/25-H14 4/22																						40:30:30		
H14 4/23-H14 5/22																						30:30:40		
H14 5/22-H14 6/11																						32:32:35		
H14 8/12-H14 7/6																						35:30:35		
H14 7/8-H14 9/27																						35:30:35		
H14 9/30-H14 10/14																						35:30:35		
H14 10/15-H14 5/11																						35:30:35		
示方配合																						30:25:25:20		
H13 9/3-H14 7/6																						20:30:25:25		
H14 7/8-H14 7/16																						20:30:25:25		
H14 7/17-H14 9/26																						20:30:25:25		
H14 9/27-H14 11/27																						20:30:25:25		
H14 11/28- H14 12/10																						10:35:30:25		
H14 12/10-H15 3/9																						10:35:30:25		
H15 3/10-H15 5/11																						20:30:25:25		
H15 5/12-H15 8/13																						10:35:30:25		
H15 6/12-H15 6/29																						10:35:30:25		
H15 6/30-H15 7/1																						10:35:30:25		
H15 7/2-H15 9/30																						15:30:30:25		
H15 10/1-																						20:30:25:25		
示方配合																						40:30:30		
H13 7/11-H13 8/1																						40:30:30		
H13 8/2-H14 7/6																						40:30:30		
H14 7/8-H15 6/28																						40:30:30		
H15 6/30-																						40:30:30		
示方配合																						50:50		
H14 8/1-H15 6/28																						50:50		
H15 6/30-																						50:50		
H13 12/4-H14 7/2																						50:50		
H14 7/13-H15 6/28																						50:50		
H15 6/30-																						50:50		
示方配合																						自己充てん性のランク:2 高性能 AE 減水剤(マイティ 3000)=1.5% AE 減水剤(マイクロア 785D)=428g 増粘剤(ビスコン 200)=74g		
H15 9/16-H15 10/14																						自己充てん性のランク:2 高性能 AE 減水剤(マイティ 3000)=1.4% AE 減水剤(マイクロア 785D)=96g 増粘剤(ビスコン 200)=185g		

(3) コンクリート製造・運搬設備の自動運転システムの開発・導入<sup>4)</sup>

RCD工法を適用するにあたり、図-1.1.4 に示すとおりコンクリートの平均打設量を設備の最大打設能力に近づけることは非常に重要なことである。滝沢ダムにおいては4基のコンクリートミキサ、5基の循環バケット、3基のケーブルクレーンと複雑なコンクリート打設設備における出荷から運搬、打込みまでの一連の作業を連携して管理し、自動制御・自動運転するシステムを開発し実用化することで、高速施工を可能とした。全体構成を図-2.7.2 に示す。

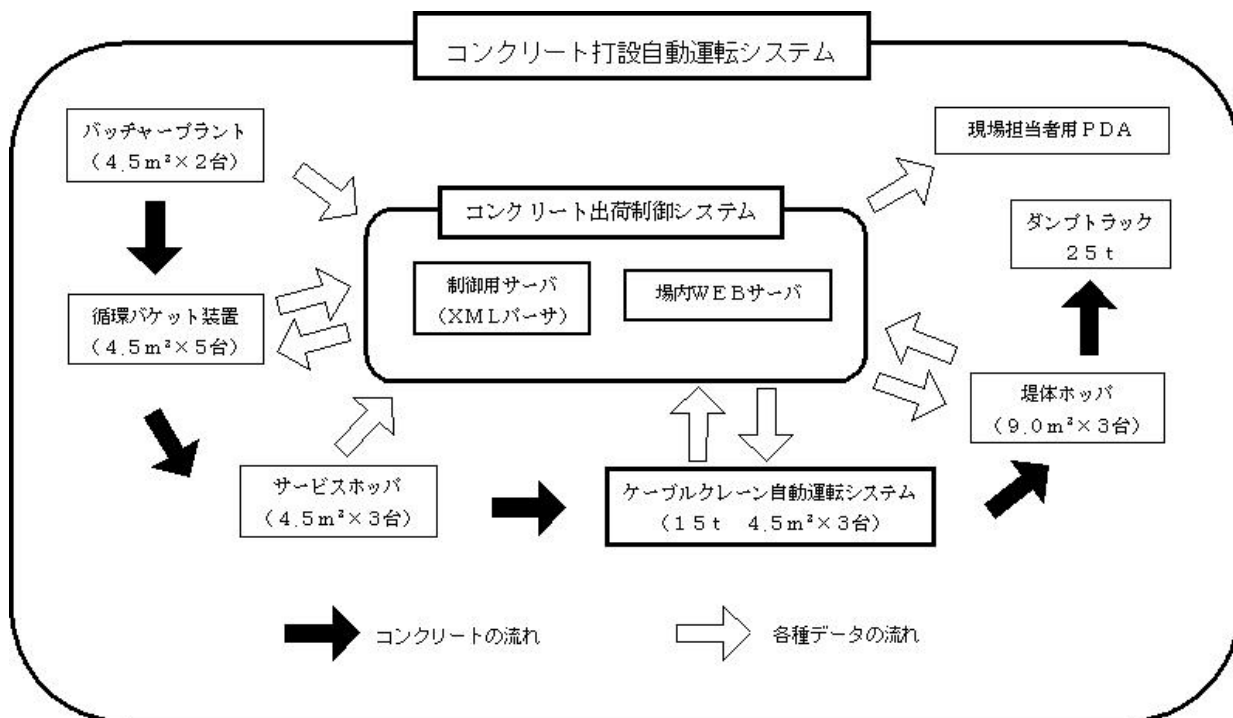
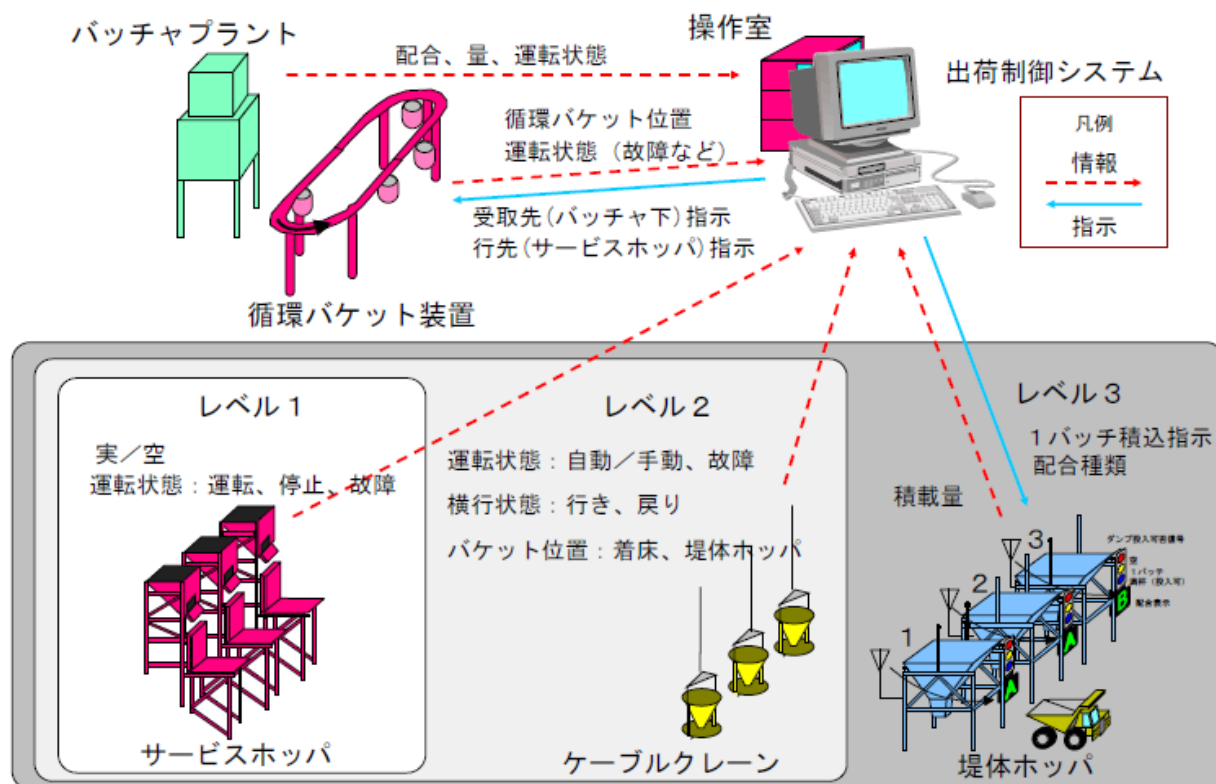


図-2.7.2 コンクリート打設自動運転システムの構成

本システムを中心となる部分がコンクリート出荷制御システムであり、サービスホップからコンクリートの荷受け、堤体ホップ上までの運搬、堤体ホップへのコンクリート放出、バンカー線への戻り、着床までの反復動作を自動運転する。制御においては、それぞれの設備におけるコンクリート配合や量、各ケーブルクレーンの状態などを考慮して、循環バケットへ最適な行き先を指示するものである。システムの概要を図-2.7.3 に示す。これらをさらに高度化することにより、作業の効率化のみならず、安全性の向上に寄与できるものとする。



図ー2.7.3 出荷制御システム概要図

#### (4) 冬期打設、降雨時打設、気象悪条件下での打設<sup>5)</sup>

事業費削減のため企業者から3.5ヵ月の打設工程短縮を要請されたため、実際の打設可能な条件を考慮したリフトスケジュールを検討した。その結果、以下のように打設稼働日を増やす対策が効果的であると判断された。

- ① 降雨時は大屋根 (30m×20m) を使用するものとして降雨制限日を年間RCD部で36日を9日へ27日、拡張レーヤ一部で18日を9日へ9日削減。
- ② 冬期打設対策をして打設時間を9時間限定にすることとし気温制限日を年間27日から0日へ削減する条件に変更してリフトスケジュールを計算すると打設工程41.5ヵ月となり約4.5ヵ月の短縮が可能であると分かった。

具体的な対策を以下に示す。

##### 1) 降雨対策

###### ① 大屋根の開発

連続して強い雨が降りつづけることは稀であり、一時的な強い雨をしのげれば打設を継続することは可能である。降雨予想時の打設可否の判断をする際、数時間雨がしのげる降雨対策用大屋根があれば、従来では打設中止になるような日でも打設可能日とすることができる。

当現場で開発した大屋根は30m×20mの広さがあり1 BL (幅15m) を覆って雨をしのげる。移動方法としては、左右岸方向は15t固定式ケーブルクレーンで行い、上下流方向はレールを敷き人力移

動とした。

## ② 拡張レヤー工法への変更

拡張レヤー工法の降雨制限はRCD工法の2倍であるため、少雨の場合は途中でも拡張レヤー工法へ切り替えて打設を継続した。また、拡張レヤー工法は打設エリアが限定されても対応できるため、降雨日でも打設ブロック数を少なくして大屋根で覆いながら打設が可能となった。

## 2) 気温対策

埼玉県奥秩父地方は12月から3月初旬の3ヵ月間で日平均気温が0℃を下回る日が過去10年平均で43日もある。そのうちの1/2が気温規制での打設休止日となるが、実際の現場においては打設前にその日の日平均気温を予想することは難しく、冬期打設休止にするか冬期対策をして毎日打設するかどちらかとなる。

当現場では、初年度は河床部コンソリデーショングラウチング施工のため1月、2月を打設休止としたが、2年目、3年目は冬期対策をして毎日打設を行った。

## ① 冬期対策

冬期打設のための対策の一覧を表-2.7.2に示す。打設は最も気温の下がる深夜から明け方を避けないといけないため、朝10時には打設開始できる状態にしておく必要がある。2002年度は前日から大屋根と小型テントで打設ブロックを覆い温風で養生した。2003年度は温水での湛水養生を行った結果、養生解除後すぐに打設が可能になった。

また、冬期においてはRCDより単位セメント量が多い拡張レヤー工法に切り替えて打設した。拡張レヤー工法にすることによって機械が少なく打設エリアが限定できるため狭いブロックでも打設可能であり、さらに締固め完了後にすぐに打設面養生ができる。

表-2.7.2 冬期対策一覧

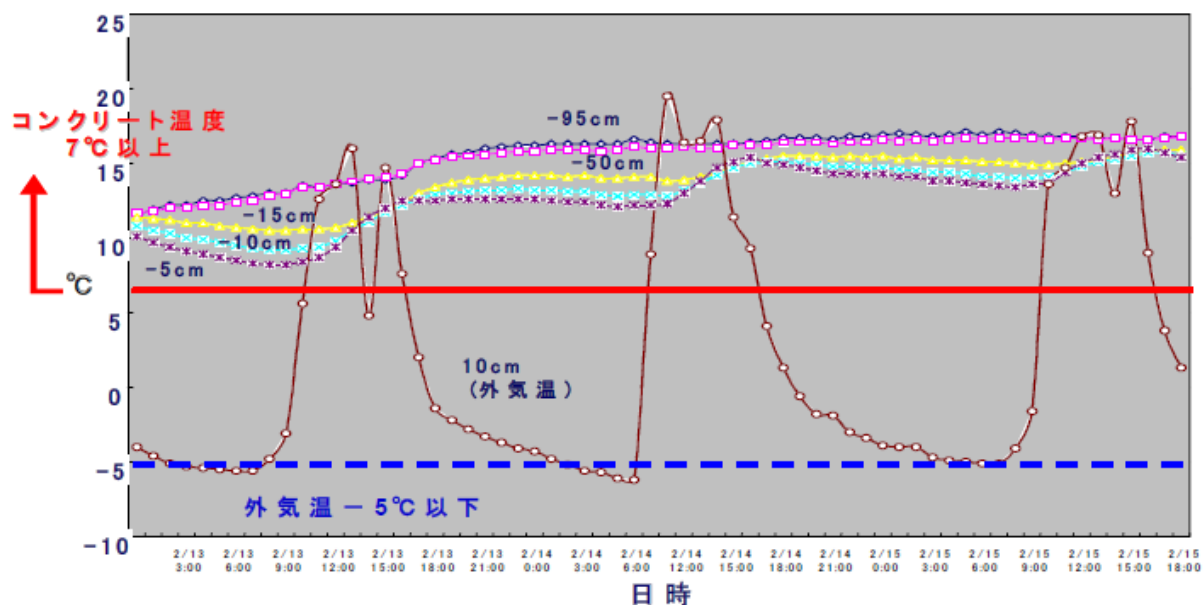
項目	具体策	目的
大屋根・テントの活用	降雨用大屋根と小型テントで打設予定ブロックを覆い温風で養生する	打設前の打設面凍結防止対策
冷加熱設備の温水利用	コンクリート混練用温水を打設面まで配管し利用	打設面の解氷作業
冬期養生用設備増設	冷加熱設備を除く熱源設備を増設	凍結防止・解氷・型枠養生・岩盤養生対策
打設面特殊養生	高発泡ポリエチレンシート（ミラマット t=10mm）＋ブルーシートによる打設面養生	打設コンクリートの温度確保
養生班増員	凍結防止・解氷作業の養生班10～12名増員	凍結防止・解氷・型枠養生・岩盤養生対策

## ② 冬期対策の効果

図-2.7.4に外気温度と養生中コンクリート温度の変化を示す。これによると、外気温が-5℃程

度まで下がってもコンクリート温度が7℃以上確保できていることが分かる。

この結果、外気温が-5℃になる午前0時程度まで打設可能時間が伸ばすことができ、冬期における日打設時間として、午前10時～午前0時までの14時間を確保できた。



図ー2.7.4 外気温度と養生中のコンクリート温度変化

以上の対策以外にもプレキャストの活用や打設設備の自動化などにより、実績としては、打設稼働日でみると、通常期は月2回の土曜日と祝日および降雨日を打設できたことにより30～35%の増、冬期は冬期対策を行ったことによりほぼ倍の打設日を確保できた。

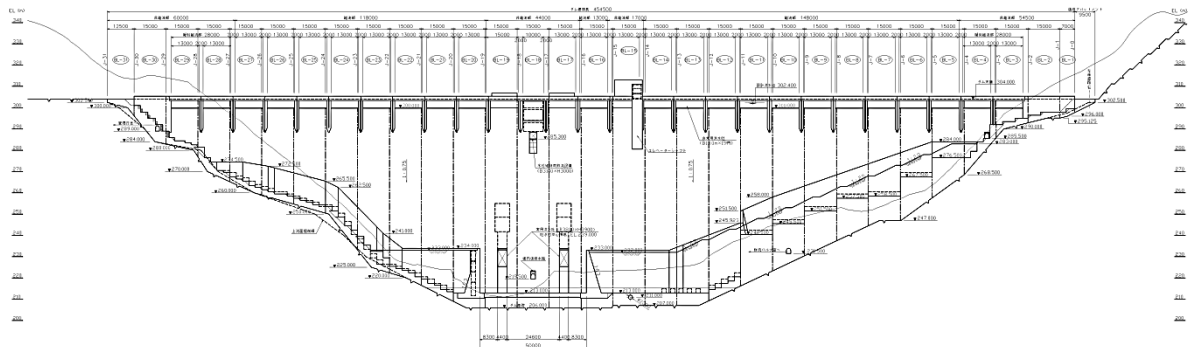
## 2.8 嘉瀬川ダム

### 2.8.1 概要



写真－2.8.1 嘉瀬川ダム全景

- ダム事業者 : 九州地方整備局
- 所在地 : 佐賀県佐賀市富士町小副川字詰谷
- 工事名称 : 嘉瀬川ダム堤体建設工事
- 施工者 : 鹿島・青木あすなろ・松尾特定共同企業体
- 工期 : 2005年2月3日～2011年3月31日
- ダム形式 : 重力式コンクリートダム
- 諸元 : 嘉瀬川水系嘉瀬川  
有効貯水量 68,000 千 m<sup>3</sup>  
堤高 97m、堤頂長 454.5m、堤体積 941 千 m<sup>3</sup>
- 筆者の指導業務 : 宮ヶ瀬ダムの経験を活かし、RCD 工法の技術指導を行った。また堤体コンクリート運搬設備として SP-TOM の初採用、RCD 工法のさらなる合理化を可能にした最新の RCD 工法(巡航 RCD 工法)の開発に対して指導した。



図－2.8.1 嘉瀬川ダム下流面図

## 2.8.2 技術的に工夫した主な内容

### (1) 堤体コンクリート運搬設備として SP-TOM の初採用<sup>1)</sup>

SP-TOM (Spiral Pipe-Transportation Method) は、内面に数枚の硬質ゴム製羽根をらせん状に取付けた鋼製管を回転させることにより、コンクリートを安定した品質のまま、連続的、かつ大量に斜面下方へ搬送する工法である。一般的な特徴として

- ① 搬送管勾配として20°～45°まで適用できるとされており、嘉瀬川ダムでは43°の勾配である。
- ② コンパクトな設備であり、かつ急勾配まで対応できるため、設置工事による自然改変が小さい。
- ③ 工事費、機械費とも低廉な設備である。

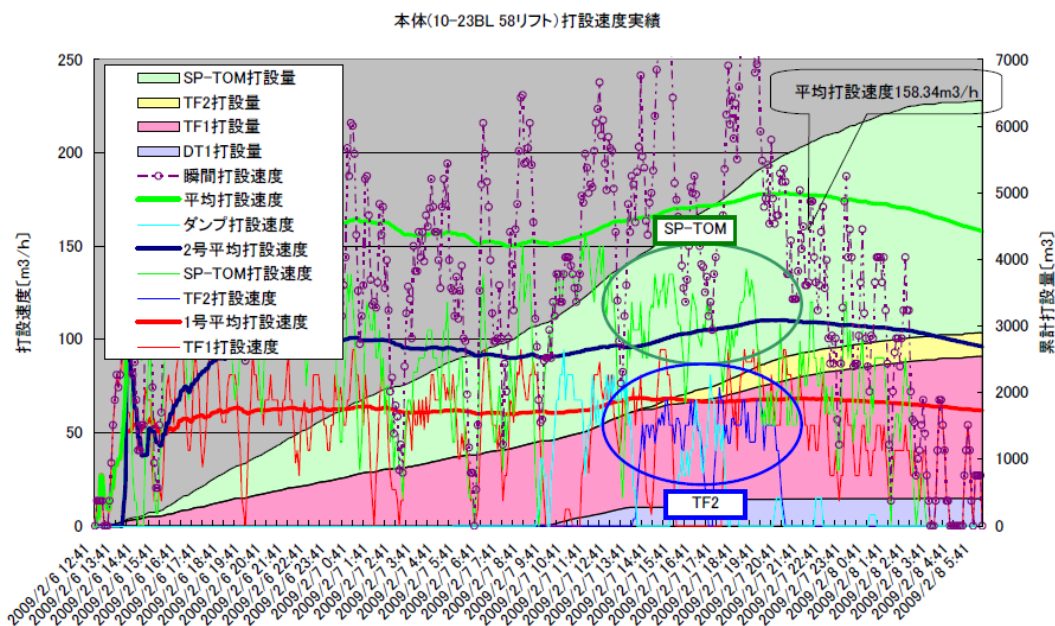
などの効果が認められている。また、滝沢ダムでは減勢工において使用実績があり、そのデータをもとに嘉瀬川ダムにて高度化・洗練化を図った。

#### 1) SP-TOMの運転実績

SP-TOMにて搬送したコンクリートはA-1 (外部)、A-2 (岩着)、B-1 (内部RCD)、B-2 (内部有スランプ)、C-1 (構造物) の5配合である。

EL247.5m盤から本格使用を開始してからの搬送実績は、荷受機械として10tダンプトラックを使用した場合8,500m<sup>3</sup>/月 (月製造量の15%前後)、25tダンプトラックを使用した場合約13,500m<sup>3</sup>/月 (月製造量の25%前後) となっている。時間当りの搬送量は、25tダンプトラックの方が倍以上となっている。これは25tダンプトラックの方が積載量が多いため、ダンプトラックの総入替え時間が減少することに起因している。また、総運搬台数も減ることから、ブルワーク中での待機時間、離合待ち時間などの短縮効果もある。

次に、58 リフト、EL260.5～261.5m、10～23BL打設時の打設速度記録を図-2.8.2 に示す。2号バッチャープラントの最大製造能力は190.5m<sup>3</sup>/hである。ピーク時を見ると搬送設備であるSP-TOMは130m<sup>3</sup>/h前後、2号トランスファーカは60m<sup>3</sup>/h前後となっており、2号バッチャープラントの製造能力=搬送能力 (SP-TOM+2号トランスファーカ)=打設能力の関係が成立している。このことから、SP-TOMはバッチャープラントの製造能力を最大限に発揮させる搬送設備として非常に有効であることが実証された。



図－2.8.2 打設速度実績

## 2) コンクリート性状への影響

表－2.8.1に当ダムにおいて実施したSP-TOM搬送前後におけるコンクリート試験結果を示す。滝沢ダムではSP-TOM搬送管が与えるフレッシュコンクリートへの影響として、空気量ロス、スランプロスが生じることが確認された。しかしながら、当現場ではSP-TOMの最大延長が70mと短かったものの、4章で示すように羽根の形状などを適切に改良した。その結果、搬送管による運搬の影響はほとんどなく、各配合とも僅かに空気量ロスが生じている程度であった。また、圧縮強度についてもほとんど差異は生じない結果であった。

表－2.8.1 コンクリート試験結果（SP-TOM搬送前後）

配合	SP-TOM 搬送前後	スランプ (cm)	VC 値 (秒)	空気量 (%)	CT (℃)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		
						$\sigma$ 7d	$\sigma$ 28d	$\sigma$ 91d
A-1	前	3.0	-	3.8	25.4	6.28	18.0	36.8
	後	3.0	-	3.4	25.5	6.19	17.8	38.7
B-1	前	-	10.9	1.6	27.4	3.62	7.39	16.3
	後	-	10.3	1.5	27.2	3.58	7.43	16.6
B-2	前	3.0	-	3.5	25.1	2.41	6.36	16.7
	後	2.5	-	3.1	25.3	2.41	6.92	17.5

## （２）最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の開発<sup>2)</sup>

嘉瀬川ダムでは、従来の RCD 工法をより合理化し、内部コンクリート（RCD 用コンクリート）を外部コンクリートに先立って打設することによって打設速度を高いレベルで一定に保つ高速施工法を実現するための検討を積み重ねた。検討結果は、一般財団法人ダム技術センター発行の「巡航 RCD 工法施工技術資料」<sup>2)</sup>に取りまとめられている。ここでは、以下の 6 つの個別技術を開発し最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の実現に資するための検討を実施した。

- ① 早期型枠移動：上下流面の型枠は 1 リフト 3 分割または 2 分割の連続性が維持できるようにプレートアンカーを用いて早期に脱型・移動を実施する。そのためコンクリートの強度発現、早期脱型の可能性、養生方法、アンカー引抜耐力の検討を行った。
- ② 外部コンクリートの打継処理：外部コンクリートの打継面は、圧力水でレイトンス処理する。そのため、レイトンス処理方法（時間、圧力）の検討を行った。
- ③ RCD 用コンクリートの打継処理（ソフトトリートメント）：RCD 用コンクリートの打継面処理は、表面の振動ローラの転圧により生じる滑面層（ノロ）を、洗浄水を用いて確実に除去する。そのために、短い養生時間のコンクリートに対して確実に実施できる滑面層（ノロ）の除去方法の検討を行った。
- ④ RCD 用コンクリートの端部法面締固め技術：先行打設する RCD 用コンクリートの端部法面は、専用機械を用いて、確実に締め固める。そのために専用機械を開発するとともに端部締固め方法や事後処理方法の検討を行った。
- ⑤ RCD 用コンクリートと外部コンクリートとの一体化：外部コンクリートは、締め固められた端部法面と上下流面型枠の間に打設し、RCD 用コンクリートと確実に一体化させる。そのために打継材齢や敷きモルタルの有無などの検討を行った。
- ⑥ RCD 用コンクリートの傾斜打止め：RCD 用コンクリートは傾斜部を造成して打ち止める。そのためにエッジ処理方法などの実証試験を行った。

## （３）乾式製造骨材の使用<sup>3)</sup>

当ダムの骨材製造は本体工事と分離発注されており、乾式で製造された粗骨材が供給された。これまでダム工事での乾式製造骨材使用の実績はほとんどないものの、乾式プラントは水処理設備が不要であること、消費電力が湿式の半分程度となることから、生産コストが低く環境負荷も低減されることで注目され始めている。当ダムでは乾式骨材をコンクリートに使用するにあたって、大きく分けて以下の 2 つの問題に対応した。

- ① 当初は粗骨材の供給が気乾状態（絶乾状態に近い）であった。
- ② 各分級ともアンダーサイズおよび 5 mm 以下の砂や微粒分が相当量付着・混入している。

図-2.8.3はその骨材を水中に浸漬し、骨材の吸水率と浸漬時間に対する吸水率の比の関係を示したものである。図に示すとおり、粗骨材は最初の 1 時間程度で急激に吸水し以降は緩慢となる。このような状態の骨材を使用してコンクリートを製造した場合、例えば当ダムの外部コンクリート（スランプ規格：3 ± 1 cm）では製造から 10 分程度でゼロスランプコンクリートとなる。このことは事

前に予想されていたため、直ちに貯蔵ビン、調整ビンからの粗骨材引出し時に散水・吸水させる協議・実施を図った。また、別途骨材JVからも貯蔵ビン投入前の散水実施の協力を得た。

散水実施以降のバッチャープラントから採取した粗骨材の浸漬時間と吸水率の関係を図-2.8.4に示す。図に示すとおり、各分級とも当初から80%以上の吸水状態を確保できることとなり、製造から4時間後（異種配合部の最遅締固め時間）の吸水に起因したスランプロスを1cm相当分に抑制することができた。このため、コンクリートの製造管理への影響を最小限に抑制することができた。なお、夏場ではこのスランプロスに加え、気温、コンクリート温度に起因したスランプロスの影響により超遅延剤の使用が不可欠となった。

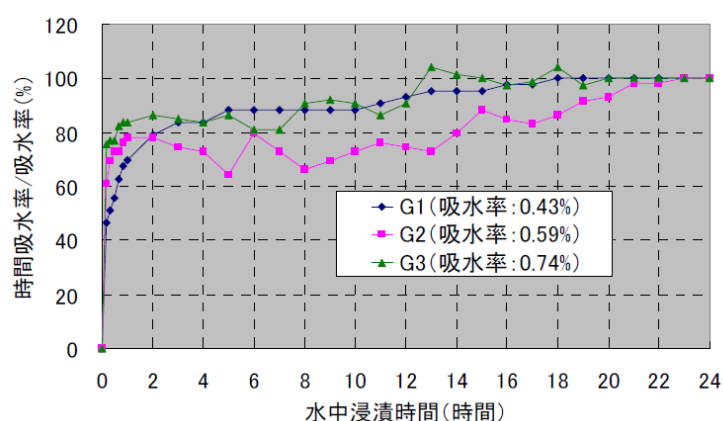


図-2.8.3 粗骨材の浸漬時間と吸水率の関係（気乾状態）

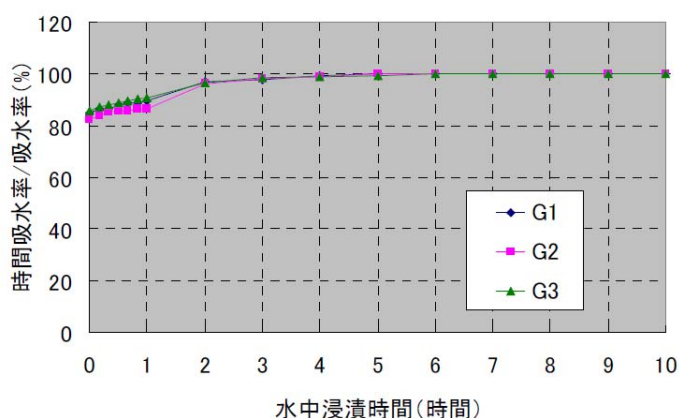


図-2.8.4 粗骨材の浸漬時間と吸水率の関係（散水後）

本体打設開始当初の製品骨材の物理試験結果を表-2.8.2に示す。表に示すとおり、密度、吸水率は特に問題はなかった。微粒分量は比較的高い結果であるが、これは乾式製造のためと思われる。

安定性損失量、すりへり抵抗性試験では、いずれの分級もコンクリート標準示方書ダム編の規格上限値に近い結果となり、過去のダム実績と比較しても非常に悪い結果であった。この結果を受け、実施した点載荷試験を行った結果、標本数50個のうち10個（全体の20%）が圧裂破壊し破壊荷重が0 MPaであり、まったく強度が無いものが存在した。このことから、施工中でも骨材の品質に応じながら実機試験を行い、細骨材率を最大±3%まで現場修正配合として変更した。

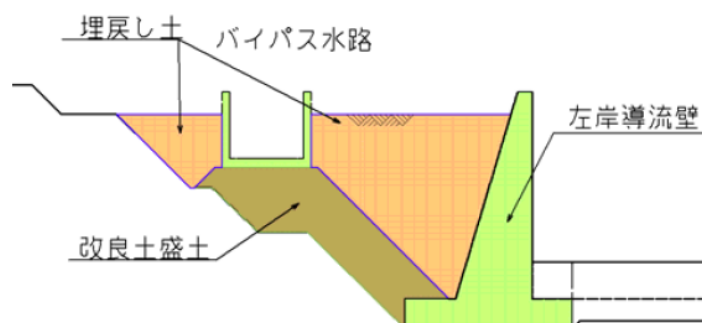
表－2.8.2 粗骨材の物理的試験結果

		骨材物理試験結果						
		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)	安定性 損失量 (%)	すりへり 減量 (%)	実積率 (%)
粗骨材	G1 80-40mm	2.67	0.44	8.84	0.59	9.1	35.2	59.7
	G2 40-20mm	2.66	0.72	8.03	0.51	8.5	44.2	57.6
	G3 20-5mm	2.65	0.91	6.51	0.60	10.5	37.7	57.2
細骨材	S 5-0mm	2.63	1.01	2.63	1.89	2.0	-	64.6

#### （４）減勢工導流壁への CSG 工法の適用<sup>3)</sup>

CSG（Cemented Sand and Gravel）工法は、現地にある河床砂礫や発生した掘削残土、廃棄岩などにセメントを混ぜた材料を使って構造物を築造するものである。ダム堤体にこの工法を適用して大臣特認制度で認定された「台形CSGダム」が現在全国各地で計画・建設中である。北海道においてこの形式のダムである当別ダムを筆者が携わって施工している。

嘉瀬川ダムにおいても上流副ダムで「台形CSGダム」を施工しており、このCSG工法を減勢工導流壁とその背面の水路の施工に適用できないかと考え契約後VE提案を行い、採用された。当初計画とVE提案後の断面図を図－2.8.5、図－2.8.6に示す。CSG施工実績としては、8,600m<sup>3</sup>であり、工程短縮、コスト縮減に寄与できた。



図－2.8.5 当初計画

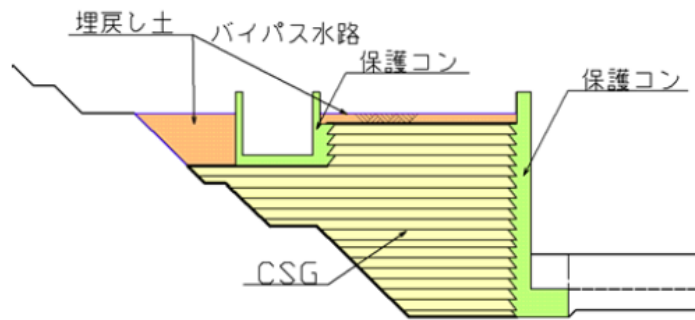


図-2.8.6 VE提案 (CSG)

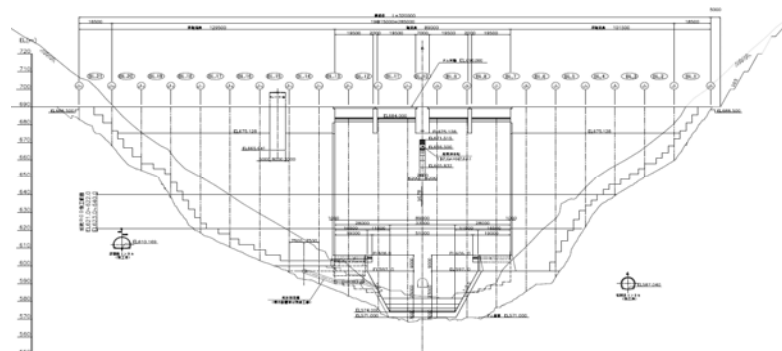
## 2.9 湯西川ダム

### 2.9.1 概要



写真－2.9.1 湯西川ダム全景

- ダム事業者 : 国土交通省関東地方整備局
- 所在地 : 栃木県日光市西川
- 工事名称 : 湯西川ダム本体建設工事
- 施工者 : 鹿島・清水特定共同企業体
- 工期 : 2008年7月29日～2012年9月30日
- ダム形式 : 重力式コンクリートダム
- 諸元 : 利根川水系湯西川  
有効貯水量 75,000 千 m<sup>3</sup>  
堤高 119m、堤頂長 320m、堤体積 1,060 千 m<sup>3</sup>
- 筆者の指導業務 : 宮ヶ瀬ダム、滝沢ダム、嘉瀬川ダムと続く、堤高 100m、堤体積 1,000 千 m<sup>3</sup>級の重力式コンクリートダム高速施工の集大成として、コンクリート運搬設備としての SP・TOM・ケーブルクレーンの自動化による効率的運用、18 リフトにわたる堤体への最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の適用にあたり技術的指導を行った。



図－2.9.1 湯西川ダム下流面図

## 2.9.2 技術的に工夫した主な内容

### (1) 複数骨材の有効利用と品質確保対策<sup>1)</sup>

一般的なコンクリートダムにおける原石採取は、大規模な原石山を開発し、適切な管理基準の下で必要な量の原石を採取する計画となっている。これに対して、近年では、環境面やコスト面への配慮から、原石山開発による大規模な地山・地形改変は難しくなっている。さらに、良質な骨材となる原石も少なくなっているのが現状である。そのため、骨材の採取・使用計画およびその骨材を用いたコンクリートの品質に対する配慮が重要な管理項目となってきた。

当ダムにおける骨材使用計画では、当初から約 96 万 m<sup>3</sup>が必要と試算されていた。原石採取方法としては、現場が日光国立公園内に位置すること、上述したような近年の骨材採取を取り巻く状況等に配慮し、新たな地山改変を極力少なくするために、ダムサイト近傍の河川内に堆積した河床砂礫と、ダム本体基礎掘削時に発生する基礎掘削ずりのうち良質材を有効活用する計画となっていた。

当ダムでは、骨材を複数種類（河床砂礫、掘削ずり等）使用することになったことから、各種骨材の使用時期、使用量、骨材品質を考慮した骨材製造、コンクリート品質確保対策等を実施した。

#### 1) 骨材使用計画

当ダムでは、以下の 4 種類の骨材を使用した。

- ① 川治河床砂礫：湯西川ダム建設位置から約 13km にある川治ダムの上流に堆積した河床砂礫
  - ② 基礎掘削ずり：堤体基礎掘削時に発生したずりのうち、強度、吸水率等の品質を満足するもの
  - ③ 湯西河床砂礫：湯西川ダム建設位置の上流に堆積した河床砂礫
  - ④ 原石山骨材：堤体上流（将来的な貯水池内）で開発した小規模な原石山から採取した骨材
- 上記骨材のうち、当初は①～③のみで必要骨材量を賄える計画であったが、以下に示す理由から、不足が生じ、④を追加採取した。

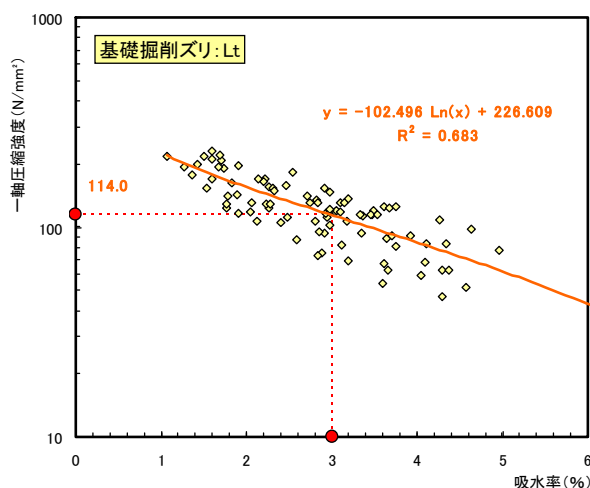
- ・ 基礎掘削ずりにおいて、骨材として使用可能な品質を満足するものの比率が想定より少なかった
- ・ ダムコンクリート用骨材の粒度構成に対して、河床砂礫は細粒分が多くなっており、砂利の歩留まりが悪く、余剰原砂が多く発生した
- ・ 堤体基礎掘削の掘削増量に伴い、コンクリート量も増大した

#### 2) 骨材品質確保対策

基礎掘削ずり・原石山骨材採取時に良質材を確実に採取する対策として、切羽における採取材判定方法を立案し、実施した。具体的には、事前に点載荷試験を実施して一軸圧縮強度を測定するとともに、その試験を実施した骨材の吸水率を測定して両者の相関関係を把握しておく。切羽において点載荷試験を実施し、上記関係を用いて簡便かつ迅速に給水率、骨材採取可否を判定した。

吸水率と点載荷試験による一軸圧縮強度の関係（最終結果）を図-2.9.2 に示す。この図から、吸水率と一軸圧縮強度の間には比較的高い相関関係があることが分かる。点載荷試験の場合、試料採取から結果判明まで最短で 1 時間程度で結果が得られるため、この関係を用いることで、原石採

取の管理を迅速に行うことが可能となり、掘削・原石採取工程を確保することができた。実際には、一軸圧縮強度だけでなく、吸水率も測定して随時この関係の見直しを図った。さらに、目視での全量確認も実施し、品質不良のものが採取岩に混入するのを防止した。



図－2.9.2 各骨材における吸水率と一軸圧縮強度の関係（基礎掘削ずり）

骨材の品質を確保するための対策として、前述した骨材採取時の対策に加えて、骨材製造時にも下記に示す対策を実施した。

【骨材粒度のばらつき抑制対策】粗骨材は、ベルトコンベヤの乗継部や、貯蔵ビンおよび調整ビンへの投入時などの運搬過程時に落下等の衝撃を受けて細粒化することが懸念される。骨材の細粒化は、コンクリートのコンシステンシーの変化や強度低下などの品質のばらつきの大きな要因となる。これを防止する目的で、ベルトコンベヤの乗継部シュートに衝撃緩衝用のラバーを設置した。さらに、粗骨材貯蔵ビンおよび調整ビンにはロックラダーを設置した。これらの対策を実施することにより、骨材が落下することによって受ける衝撃を緩和し、細粒化を抑制することができた。

【骨材表面水率の低減と安定化】骨材表面水率の安定化は、フレッシュコンクリートの性状、硬化コンクリートの性状を問わず、コンクリート品質確保における重要な課題である。これに対して、コンクリート製造設備では、骨材の表面水率を練混ぜバッチごとに補正できるシステムを採用している。ただし、ダムコンクリートのように単位水量が少ない場合には、コンクリート製造段階での調整に限界がある。また、表面水率が高い状態にある骨材ほど、そのばらつきも大きくなるため、表面水率の安定化を図るためには、骨材の製造段階での対策が必要となる。

上記対策として、以下に示す事項を実施した。

- ・ 細骨材については、貯蔵ビンを5基設置し、ビンでの存置期間を72時間以上確保した
- ・ 骨材貯蔵ビンおよび調整ビンの底版をコンクリート舗装し、排水勾配を確保して表面水率を低減した

上記対策を実施することで、細骨材の表面水率は概ね5%以下となり、安定した表面水率の骨材

を使用することができた。

【骨材混入防止対策】当ダムでは4種類の骨材を使用した。骨材種類ごとに品質が異なるため、骨材製造段階においても原石骨材の切替えが必要となる。骨材切替え時において、通常の方法（ベルトコンベヤによる引出し）では排出することができない材料（デッドストック）が残留するため、異種材料の混入が懸念された。

これに対して、当ダムでは以下の対策を実施した。

- ・ 細骨材貯蔵ビンの材料引出し用にベルトコンベヤを2条設置
- ・ 貯蔵ビン下部の構造として内部を充填した内張りコルゲート構造を採用（デッドストック軽減）
- ・ 骨材調整ビンの材料引出し方法として内張りホップ構造を採用（デッドストック軽減）

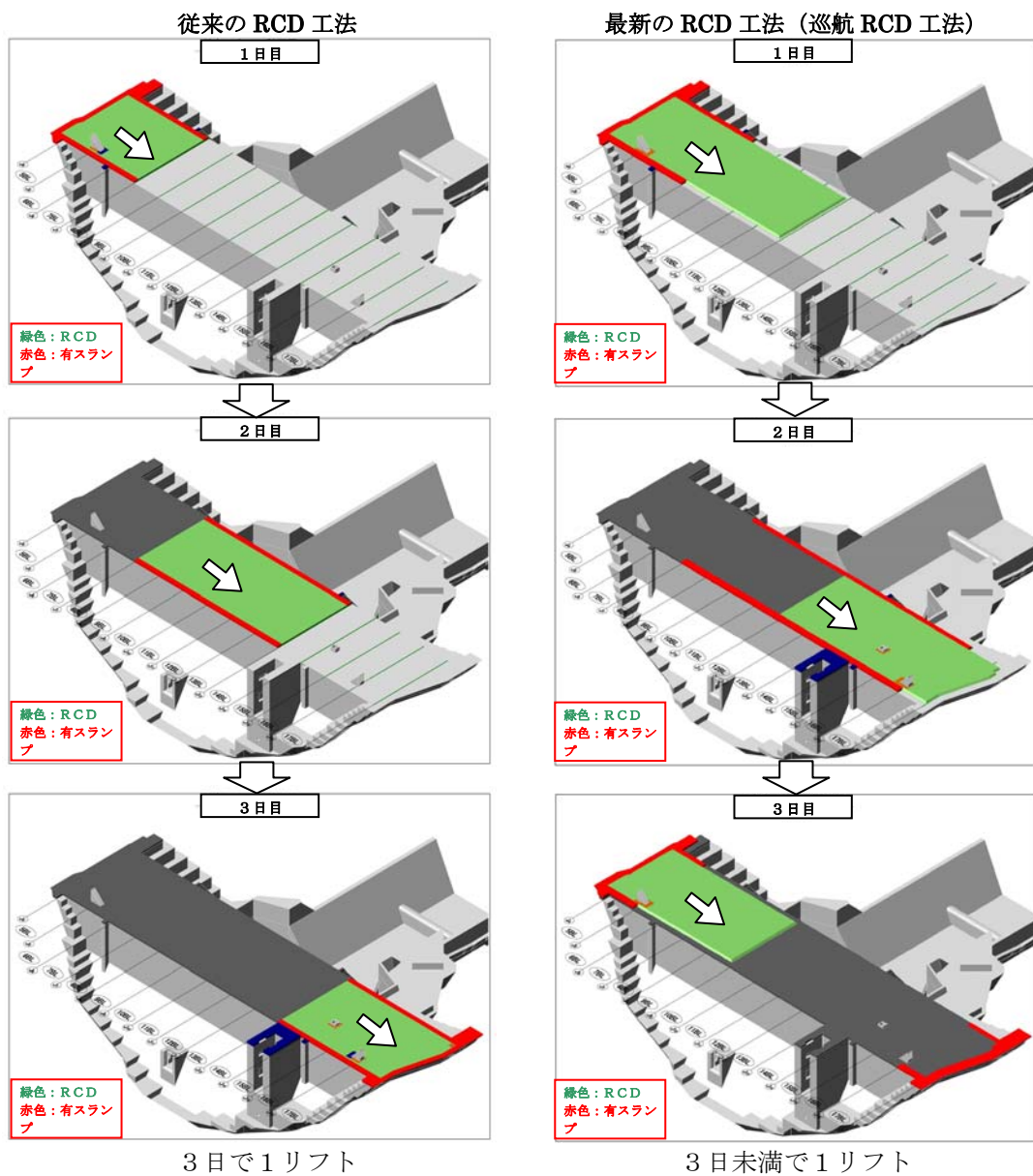
上記対策を実施することで、骨材切替え時のスムーズな材料引出しが可能となり、異種材料の混入防止を図ることができた。なお、骨材切替えに要した日数は、平均で1.5日程度であり、工程への影響はほとんどなかった。

## （2）リフト全面への最新のRCD工法（巡航RCD工法）世界初の採用<sup>2)</sup>

### 1) 従来のRCD工法と最新のRCD工法（巡航RCD工法）の違い

従来のRCD工法は、打設区画毎に外部コンクリートと内部コンクリート（RCD用コンクリート）を交互に打設し、相互の一体化を確保しながら進める工法である。

最新のRCD工法（巡航RCD工法）は、内部コンクリート（RCD用コンクリート）を先行打設し、外部コンクリートはRCD用コンクリートと分離・独立した施工が可能となるため、打設開始直後から設備能力が最大限活用された高い打設速度が維持されるとともに、打設効率の向上が図れる工法である。図-2.9.3に従来のRCD工法と最新のRCD工法（巡航RCD工法）のイメージを示す。



図ー2.9.3 従来 RCD 工法と最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の比較

## 2) 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）導入の課題

従来の RCD 工法における課題を以下に示す。

- ① 外部コンクリートと内部コンクリート（RCD 用コンクリート）、および各々同士の打継ぎ時間規制があり、その制約を守りながらの施工となる。そのため、手間にかかる外部コンクリートの施工速度に影響を受け、設備能力を最大限利用できないことが多い。特に打設開始直後、終了直前には顕著である。
- ② 分割打設では、横継目に打止め型枠を設置する必要がある。打止め型枠設置やその周辺部への

有スランプコンクリート打設が、打設終盤の打設効率低下の一因となっている。

③ 1 リフト 3 分割での施工が最短である。

上記を考慮したうえで、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）適用における目標を以下に示す。

#### ■最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の目標

① RCD 打継部端部処理方法を効率化し、打設中断時間の短縮、打設可能時間の向上を図る。

② 設備稼働率を向上させて 1 日の打設可能量を増大させる。

③ 連続性を確保し、3 日未満で次リフトへ移行する。

#### 3) 適用するための対応策

##### ① RCD 打継ぎ方法

試験施工により、1 : 0.8 端部処理においても、打継面にモルタルを塗布することによって、問題なく RCD の打継面が一体化されることが確認された。

打設可能時間をできるだけ長く、有効に利用するために打継ぎ処理の効率化（スピードアップ）が必要である。これに対して、「技術資料」で提唱されている 1 : 4.0 傾斜打止め方法では、造成に 4 時間、硬化待ち 4 時間、さらにエッジ処理や打設面清掃といった作業が加わり、降雨や休日による打設中断時には、10 時間以上（降雨時間除く）打設できない時間が生じることになる。

今回採用した 1 : 0.8 端部処理の方法では、上下流方向の法面延長が 40~50m の場合で、造成を約 2 時間で完了させることに成功している。また、打設再開時には特別な打設面清掃は行わず、モルタルを塗布することのみで打設開始ができるため、打設中断時間を約 3 時間と大幅に短縮することができた。本打止め手法は嘉瀬川ダムにおける打継（1 : 4.0 傾斜打止め）をさらに効率化させた手法で、以降の最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）における標準打止め手法として確立され、さらなる打設可能時間の増大に貢献した。

##### ② 外部コンクリートの打設

外部コンクリートの打設開始時期は、打設面走行可能時間が 6 時間であることから、転圧完了後 6 時間後とした。ただし、外部コンクリート（有スランプコンクリート）の打設速度と内部コンクリート（RCD 用コンクリート）の打設速度のバランスを考慮しないと、有スランプコンクリートの打設が RCD 用コンクリートの打設に追いついてしまい、全体としての打設速度が低下するため、有スランプコンクリートの打設開始時間は、RCD 用コンクリートと有スランプコンクリートの打設量を考慮して決定する必要がある。

##### ③ 連続打設時の資機材移動方法

左岸側から連続して右岸側へ打設を進めていくと、打設面にある資機材を適切な時期に、打設中のエリアを通過して右岸から左岸に移動させる必要が生じる。資機材を右岸側から左岸側への移動させる時は、ブルドーザで RCD 用コンクリートの敷均しレーンの中に重機類が通行できる斜路を造成し、移動完了後に再度敷均し作業を行うようにすることで、作業効率の確保と品質の確保を両立させた。

##### ④ 機械・設備の点検方法

連続打設の場合、1 リフトの打設終了まで機械を点検・整備するような時間を設けることができ

ないことから、その方法や実施時期を工夫する必要がある。湯西川ダムではバッチャープラントのミキサが3m<sup>3</sup>強制二軸4基、15t ケーブルクレーン（5m<sup>3</sup>バケット）2基、φ700SP-TOM 1基が配置されている。複数の設備を備えていることから、ミキサを1基ずつ（4基中3基稼動）点検・整備を行い、SP-TOM 出荷中にケーブルクレーンを1基ずつ点検・整備することで、出荷能力の低減量を極力抑える工夫をした。

#### ⑤ 着岩部の施工

「巡航 RCD 工法施工技術資料」<sup>2)</sup>では、岩盤面近くへのコンクリート運搬方法として、RCD 用コンクリート部に1:4.0以上の傾斜部分を設けてダンプ走路とし、岩盤面に直接荷卸しする方法を提唱している。しかし、有スランプコンクリートの打設量が多くなると、傾斜部の処理に時間が掛ることから効率的でないと判断し、RCD 用コンクリート部から有スランプコンクリートをダンピングし、それを足場にバックホウとバイバックを進入させる方法とした。その結果、有スランプコンクリートの打設量は設計量以上に増加せず、傾斜打止めの作業も不要となり、比較的効率的な打設が可能となった。

#### ⑥ SP-TOM 乗継ぎベルトコンベヤ設置・撤去方法

SP-TOM の搬送能力は150m<sup>3</sup>/h以上であり、これらを有効に利用するためには、使用可能時間をできるだけ多く取る必要がある。SP-TOM からダンプに積み込む方法として乗継ぎベルトコンベヤを使用しているが、その下部をRCD 用コンクリートとするか有スランプコンクリートとするかによって打設速度やダンプ乗入れ可能時間に大きく影響する。まずは、下部をRCD 用コンクリートとし、ベルトコンベヤの設置撤去時間を短縮するために架台埋込式から自走式に変更することによって、使用不可能時間が14.5時間から7時間に短縮された。

#### ⑦ RCD 用コンクリートの打継面処理

走路部および資機材仮置部はポリッシャ+消防ホースを使用し、打設完了後12時間～20時間から実施する。それ以外の部分は試験施工で確認したソフトトリートメントを打設完了後1.5時間～2.0時間から実施することで、清掃作業の効率化が図られた。

### 4) 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の導入効果

#### ① 降雨時および週末休止時における施工性向上

「無降雨時間を有効活用したコンクリート打設」が可能となった。また、週末休止時においても、「最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）」では、横継目位置とは無関係に任意の位置で打止めが可能になったため、休止前予定終了時刻までできる限りの打設が可能となり、休日前後についても打設可能時間を最大限有効活用できるようになった。

#### ② レーン割の自由度向上

外部コンクリートは「上下流面型枠」・「先行打設された RCD 用コンクリート」とは独立しており、打継ぎ時間の規制がない。そのため、堤体打設の「レーン割り」に外部コンクリートは無関係で、RCD 用コンクリートだけに着目できることとなって自由度が向上した。このことが、全体的な施工速度向上にも寄与した。なお、外部コンクリートは小規模ブロック打設となることから、準備が整いしだい任意時刻に任意箇所の打設が可能となり、外部コンクリートの打設自由度も向上した。

### ③ 品質の向上

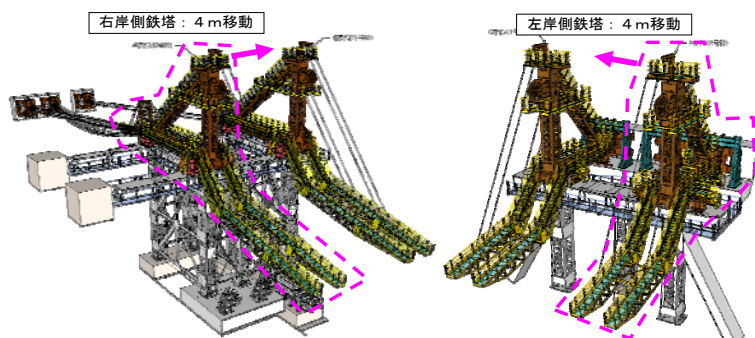
「RCD 用コンクリート同士の打継ぎ」について、その部分のコアを採取して付着状況の確認も行った。外観上の異常は確認されなかった。さらに採取したコアの強度試験も実施し、強度的に問題がなかったことも確認している。また、強度試験時のコアの破壊状況としては、いずれのコアにおいても、打継部以外で破壊する結果となっていたため、打継部は構造的に弱部となっていないと考えられる。

### ④ 施工安全性の向上

RCD 用コンクリートと有スランブコンクリートの打設箇所が完全に分離される。そのため、別チーム混在現象は解消され、施工安全性は格段に向上した。

## (3) 打設期間中におけるケーブルクレーン鉄塔移動による上位標高までの有効活用<sup>3)</sup>

当ダムでは、堤体高標高部 (EL.665～EL.690) において堤体幅が狭くなる (一般部11.6m) ため、ケーブルクレーン 2 号機は、堤体下流面より外れてしまい、堤体内へのコンクリート供給、荷降ろし作業等は不可能となる。そこで、堤体高標高部まで効率的なコンクリート打設を可能とするため、2 号機の鉄塔を施工途中で 4 m 上流に移動可能なトレススル構造とした (移動イメージは図-2.9.4 参照)。湯西川ダム主打設設備であるケーブルクレーンの鉄塔移動作業は、コンクリート打設を中断して行うための作業間調整が困難ではあったが、当初計画から検討・改善を十分に行った結果、設備の大きなトラブルもなく計画どおり実施でき、打設工程確保の面で大きく貢献できた。また、今後の固定式ダム用ケーブルクレーンの移動実績を作れたことは大きな成果である。



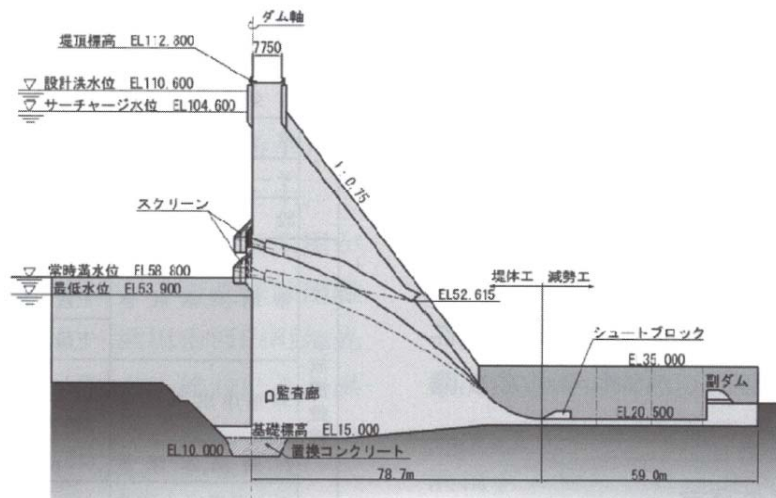
## 2.10 第二浜田ダム

### 2.10.1 概要



写真－2.10.1 第二浜田ダム全景

- ダム事業者 : 島根県
- 所在地 : 島根県浜田市河内町、三階町
- 工事名称 : 浜田川総合開発事業 第二浜田ダム本体建設工事
- 施工者 : 鹿島・五洋・今井特定共同企業体
- 工期 : 2009年3月12日～2016年3月18日
- ダム形式 : 重力式コンクリートダム
- 諸元 : 浜田川水系浜田川、有効貯水量 14,220 千 m<sup>3</sup>  
本体ダム : 堤高 97.8m、堤頂長 218m、堤体積 328 千 m<sup>3</sup>  
鞍部ダム : 堤高 27.8m、堤頂長 202.5m、堤体積 35 千 m<sup>3</sup>
- 筆者の指導業務 : 島根県で随一の高さとなる重力式コンクリートダムにおいて、高品質および短工期を実現するためにコンクリート搬送設備 SP-TOM の有スランブコンクリートへの適用、暑中コンクリートの各種対策などを指導した。



図－2.10.1 第二浜田ダム標準断面図（常用洪水吐部）<sup>1)</sup>

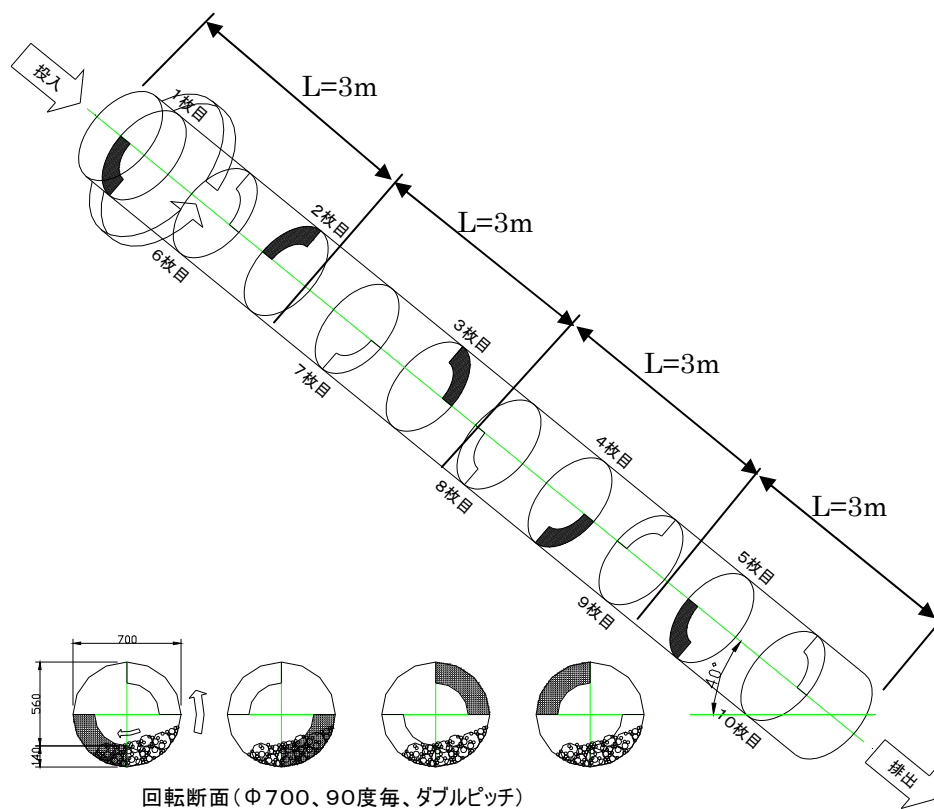
## 2.10.2 技術的に工夫した主な内容

当ダムは、島根県浜田市の市街地を貫流して日本海に注ぐ二級河川浜田川の河口から 6 km に位置し、既設浜田ダムの再開発と合わせて、洪水調節を主たる目的として建設された重力式コンクリートダムである。

当工事は堤高 97.8m の本体ダムと右岸側鞍部に堤高 27.8m の鞍部ダムを建設するものである。

### (1) 有スランプコンクリートへの SP-TOM の初適用<sup>2)</sup>

SP-TOM (Special Pipe Transportation Method) とは、パイプを用いてコンクリートや土石類を高所から低所へ運搬する設備である。内側に羽根が取り付けられた搬送管を回転させることによって、搬送材料を分離させることなく連続的かつ大量に運搬することができる。図-2.10.2 に SP-TOM の模式図を示す。



第二浜田ダムのダムコンクリートは有スランプコンクリートであり、これを拡張レーヤ工法 (ELCM)、リフト高 1.5m で打設した。ダムコンクリートの打設時間は 7 : 00 ~ 21 : 00 に規制されており、工程を遵守するためにはコンクリート運搬能力を向上させる必要があった。このため、

コンクリート運搬設備として 18t 固定式ケーブルクレーンに加えて、RCD 用コンクリートなどに適用してきた SP-TOM（ $\phi 700\text{mm}$ ）を有スランプコンクリートに適用することとした。第二浜田ダム本体ダムにおけるコンクリート打設設備を表-2.10.1 に、SP-TOM の全景を写真-2.10.2 に示す。

なお、ダムサイトの左右岸斜面の勾配は約  $40\sim 50^\circ$  と急勾配であり、それまでの SP-TOM の設置勾配を超える条件であった。このため、事前に実規模試験を行い、SP-TOM の急勾配化や SP-TOM 内の有スランプコンクリートの挙動などを検討した。その結果、 $55^\circ$  の勾配にすると、SP-TOM 内を材料が流下してしまうことなどが明らかとなり、SP-TOM の計画ならびに設置にこれらの知見を反映させた。

表-2.10.1 コンクリート打設設備

設備名称		数量
バッチャープラント	強制二軸 $3.0\text{m}^3 \times \text{II}$ 型	1 基
トランスファーク	$6.0\text{m}^3$ サイドシュート	1 台
運搬設備	固定式ケーブルクレーン 18.0t	1 基
	SP-TOM $\phi 700$	延長 96m
	グラントホッパ $9.0\text{m}^3$	1 基
運搬機械	不整地運搬車 11t 級	2 台

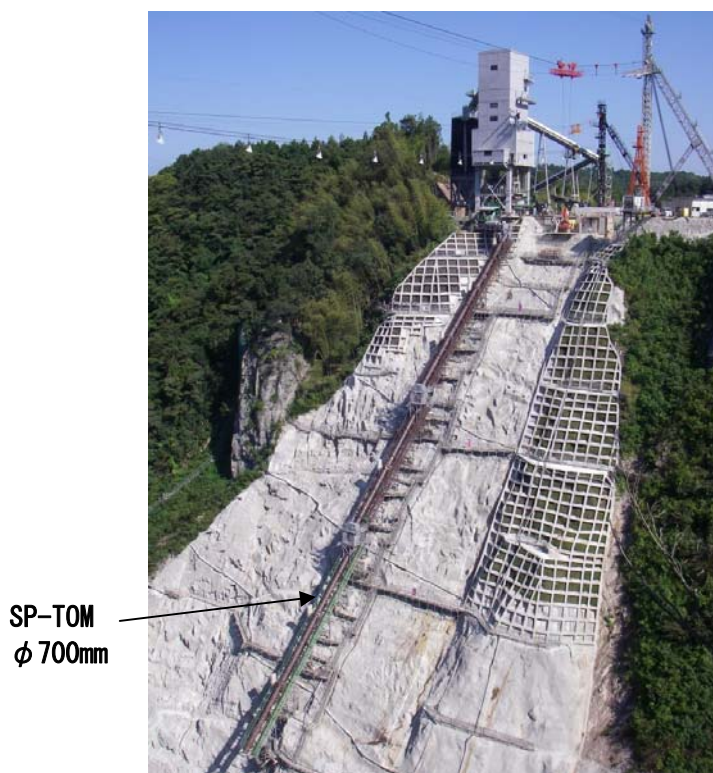


写真-2.10.2 第二浜田ダム SP-TOM 全景

第二浜田ダム本体ダムのコンクリート打設実績を図-2.10.3に示す。月最大打設量は19,600m<sup>3</sup>、日最大打設量は1,600m<sup>3</sup>となり、総打設量320,000m<sup>3</sup>を約25ヶ月で完了した。

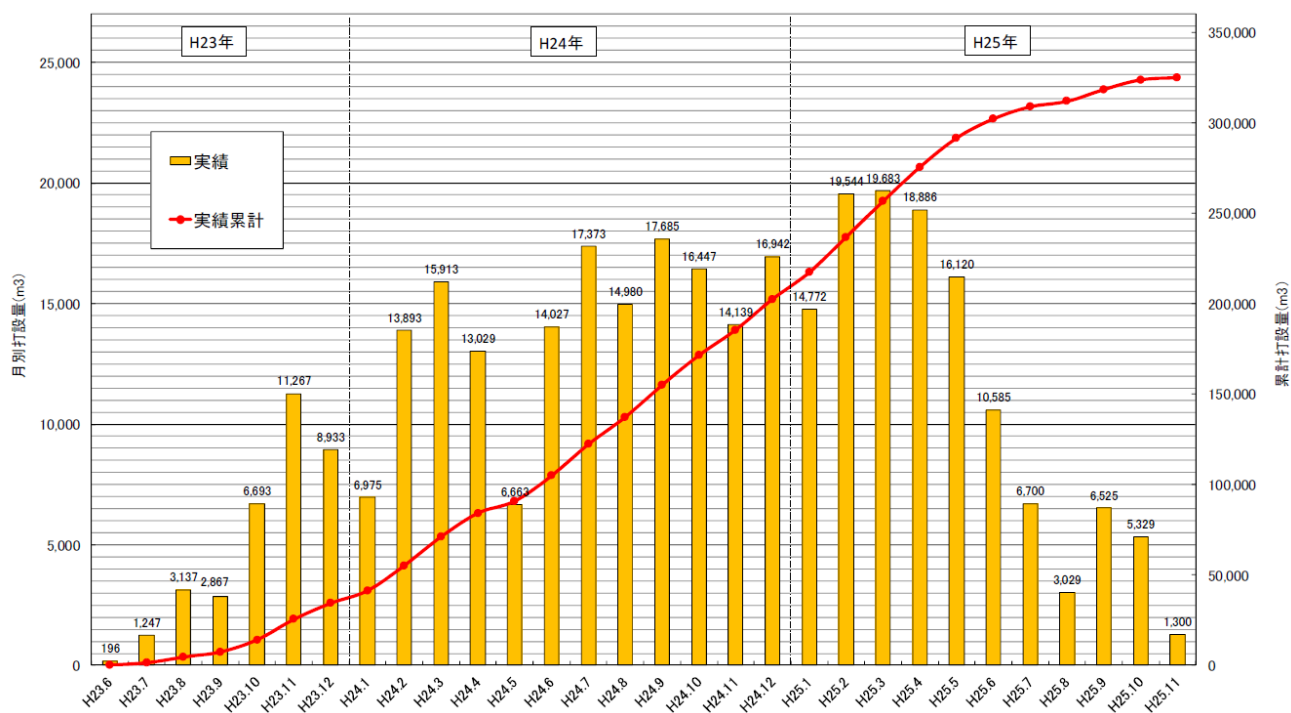


図-2.10.3 第二浜田ダム本体ダムのコンクリート打設実績

## (2) 暑中コンクリート対策<sup>3)</sup>

第二浜田ダムのコンクリートの打設時間は7:00～21:00に規制されているため、夏期においても昼間打設を避けることができなかった。さらに、コンクリート打込み温度の上限値は25℃と定められていたため、以下に示すコンクリートの温度低減対策を講じた。

- ① 冷風ミストによる粗骨材の冷却
- ② チラーを用いたコンクリート練混ぜ水の冷却
- ③ 骨材貯蔵ビンへの散水および寒冷紗の設置、ツタ系植物の植生
- ④ 骨材輸送用ベルトコンベヤへのカバーの設置
- ⑤ セメント搬入時の温度低減
- ⑥ セメントサイロへの寒冷紗の設置

第二浜田ダムのコンクリート製造設備全景を写真-2.10.3に、骨材貯蔵ビン全景を写真-2.10.4に示す。



写真-2.10.3 コンクリート製造設備全景



写真-2.10.4 骨材貯蔵ビン全景

なお、ここでは上記の諸対策のうち、コンクリート練上がり温度の抑制に対して、最も効果的であった冷水ミストによる粗骨材の冷却について紹介する。

当ダムのコンクリート骨材は、砕石工場4ヶ所から購入しており、粗骨材 G1～G4、細骨材 S の全5種類となっている。コンクリートの打込み温度 $25^{\circ}\text{C}$ を遵守するために目標練上がり温度を $24^{\circ}\text{C}$ に設定し、表-2.10.2に示す単位セメント量の多い外部コンクリート配合（A 配合、計画配合）についてヒートバランス計算<sup>4)</sup>を行った。この結果、目標練上がり温度（ $24^{\circ}\text{C}$ ）以下にするためには、粗骨材の温度を $21.5^{\circ}\text{C}$ 以下にする必要があることが明らかとなった。

表-2.10.2 外部コンクリート（A 配合）の計画配合

W/C (%)	s/a (%)	SL (cm)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							混和剤 (計量値：kg/m <sup>3</sup> )		
				粗骨材				細骨 材 S	セメ ント C	水 W	AE AD (C ×%)	SP AD2 (C ×%)	Ad AD4 (A)
				G1 150~180	G2 80~40	G3 40~20	G4 20~5						
47.6	25.0	3.0 ± 1.0	3+1 , -0.5	353	402	374	503	522	210	100	0.38 %	0.01 %	32A

※凍結融解抵抗性向上のため、空気量の下限値を 3.0-0.5%にて管理(技術提案)

※水結合材比低減(単位水量の低減)により耐久性向上を図るため、高性能 AE 減水剤を使用（技術提案）

粗骨材の冷却は、冷風設備からのダクトを通じてコンクリート製造設備内になる粗骨材受材ビンへ冷風を送ることで行った。これに加えて、送風口にミストリングを設置しミスト水を骨材に散布することで、気化熱による冷却効果の向上を図った。冷風設備による粗骨材冷却状況を写真-2.10.5に、送風口ミストリングを写真-2.10.6に示す。冷却後の各粗骨材温度は、2012 年（H24 年）夏季において平均 $20^{\circ}\text{C}$ 程度、約 $-5^{\circ}\text{C}$ の冷却効果が得られ、目標とする $21.5^{\circ}\text{C}$ 以下を満足することができた。このような諸対策を講じることで、外気温が $25\sim 35^{\circ}\text{C}$ 程度に達する夏期においても、コン

クリート練上がり温度はすべての配合で 24℃以下となり、図-2.10.4 に示すように打込み温度 25℃以下を実現した。



写真-2.10.5 冷風設備による粗骨材冷却状況



写真-2.10.6 送風口ミストリング

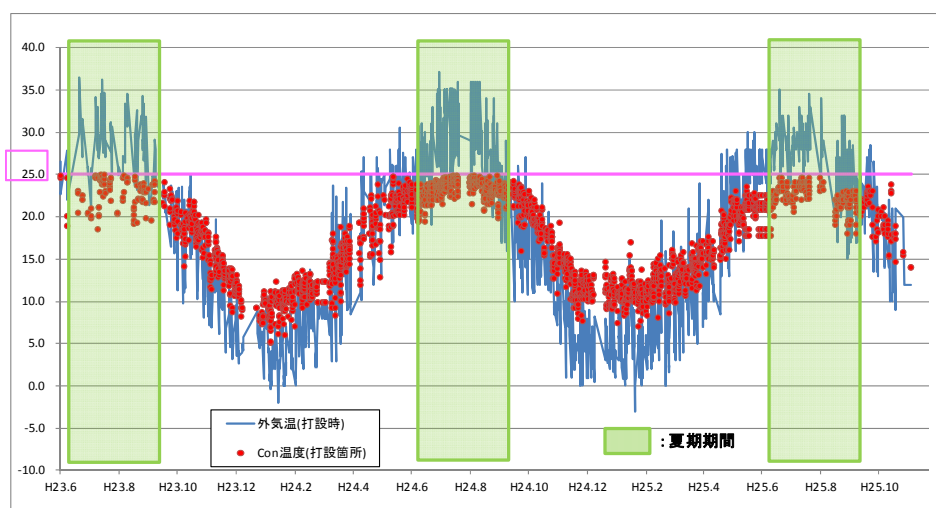


図-2.10.4 外気温とコンクリート打込み温度の実績

### (3) グリーンカットずりの再生利用<sup>3)</sup>

コンクリートダムの施工では、各リフトの打継面レイタンス処理として、グリーンカット工を実施している。この際に発生するグリーンカットずりから土壌汚染対策法で規定される溶出試験基準を超える六価クロムなどの重金属類を含有しており、一般には産業廃棄物として処分されてきた。そこで、第二浜田ダムでは環境負荷低減を図るために、グリーンカットずりの再生利用技術の開発を推進した。グリーンカットずりはコンクリート骨材およびセメント水和物で構成されており、レイタンス物質を除去する洗浄・分級を行うことで、コンクリート骨材（細骨材）として再利用した。

打設面グリーンカット処理状況を写真-2.10.7 に、グリーンカットずり仮置状況を写真-2.10.8 に、ハイメッシュセパレータを利用したグリーンカットずり洗浄・分級フローを図-2.10.5 に示す。



写真-2.10.7 打設面グリーンカット処理状況



写真-2.10.8 グリーンカットずり仮置状況

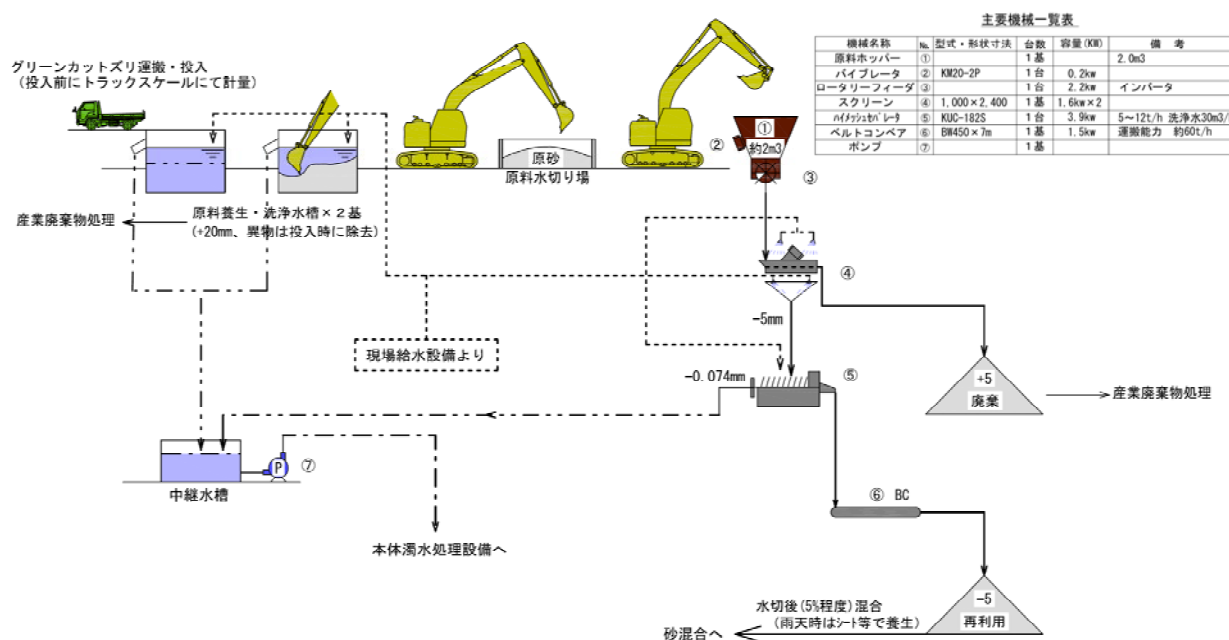


図-2.10.5 グリーンカットずり処理フロー<sup>3)</sup>

グリーンカットずりの処理は、以下のような手順で行った。

- ① 洗浄水槽のスクリーン（#20mm）で大径粒子および異物の除去
- ② 洗浄水槽内で攪拌してずり表面のセメント粒子や微粒分などの除去
- ③ 水切り槽で水切り後、粒径 5mm 以上の粒子を除去
- ④ ハイメッシュセパレータで粒径 5mm 未満の粒子を洗浄、分級
- ⑤ 水切り後、粒度を確認したうえで、細骨材貯蔵ビンに投入

このような手順で処理した再生細骨材を写真-2.10.9 に示す。品質管理基準には土木学会編「コンクリート標準示方書（ダム編）」のダム用コンクリート細骨材の基準および JIS A 5021「コンク

リート用再生骨材 H」を適用した。再生骨材の粒度試験の結果、表－2. 10. 3 に示すように上記管理基準を満足し、粒度分布も購入骨材ほど同一かつ安定した状態となった。

また、再生細骨材を使用した内部配合コンクリートの圧縮強度は、材齢 28 日で  $8.2\text{N/mm}^2$ 、材齢 70 日（通常は材齢 91 日であるが早期の確認が必要であったため材齢 70 日で実施）で  $16.3\text{N/mm}^2$  となり、製品砂で製造したコンクリートとほぼ同等な値を示すとともに、設計基準強度  $10.8\text{N/mm}^2$  を十分に満足している。

なお、図－2. 10. 5 に示したフローで再生される細骨材の量は、グリーンカットずり発生量の 80% に相当する量となった。

ダム建設工事は大規模であり、発生する産業廃棄物量が多いが、当ダムでのグリーンカットずりの再利用で環境負荷低減に資することができた。



写真－2. 10. 9 再生細骨材

表－2.10.3 再生細骨材の品質

試験項目	ダムコンクリート用 細骨材	H24.7~H25.3 平均・代表試験値
	判定基準	
粒度(ふるい分け FM)	標準粒度の規定有り 2.65±0.15	2.71
絶乾密度	2.50g/cm <sup>3</sup> 以上	2.55
吸水率	3.0%以下	2.11
単位容積質量	—	1.63
実積率	53%以上	64.21
有機不純物	標準色より淡い	淡い
粘土塊量	1.0%以下	0.52
微粒分量	3.0%以下	2.28
塩化物含有量	0.04%以下	0.002
安定性損失質量	10%以下	1.67
アルカリシリカ反応性 (モルタルバー法)	無害	無害
不純物量	3.0%以下	0.00

## 2.11 五ヶ山ダム

### 2.11.1 概要



写真－2.11.1 五ヶ山ダム全景（建設中）

- ダム事業者 : 福岡県
- 所在地 : 福岡県筑紫郡那珂川町大字五ヶ山
- 工事名称 : 五ヶ山ダム堤体建設工事
- 施工者 : 鹿島・飛島・松本特定建設工事共同企業体
- 工期 : 2012年6月27日～2018年3月15日（建設中）
- ダム形式 : 重力式コンクリートダム
- 諸元 : 那珂川水系那珂川  
有効貯水量 39,700 千 m<sup>3</sup>  
堤高 102.5m、堤頂長 556m、堤体積 935 千 m<sup>3</sup>
- 筆者の指導業務 : 福岡県で最大規模を誇る重力式コンクリートダムであり、RCD 工法の高速施工方法である、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）を初めて全面採用した。宮ヶ瀬ダムをはじめとして著者が携わった RCD 工法によるコンクリートダムの施工経験を活かし、SP-TOM 用ベルトコンベヤ式ディストリビュータの採用によるさらなる高速施工の推進、端部法面締固め機の改良など、高品質な RCD 用コンクリートの施工方法ならびに高速施工推進のための指導を行った。

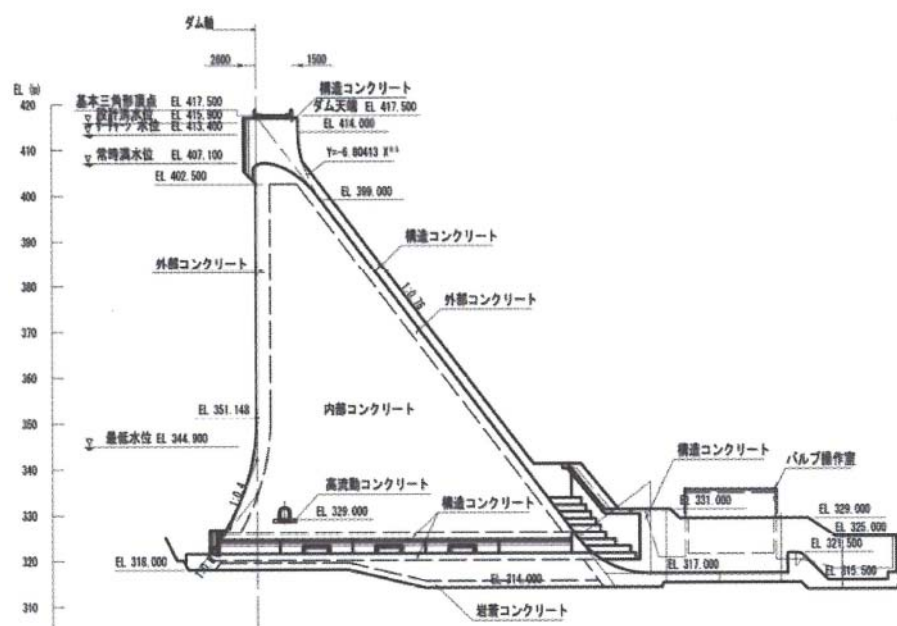


図-2.11.1 五ヶ山ダム標準断面図（常用洪水吐部）<sup>1)</sup>

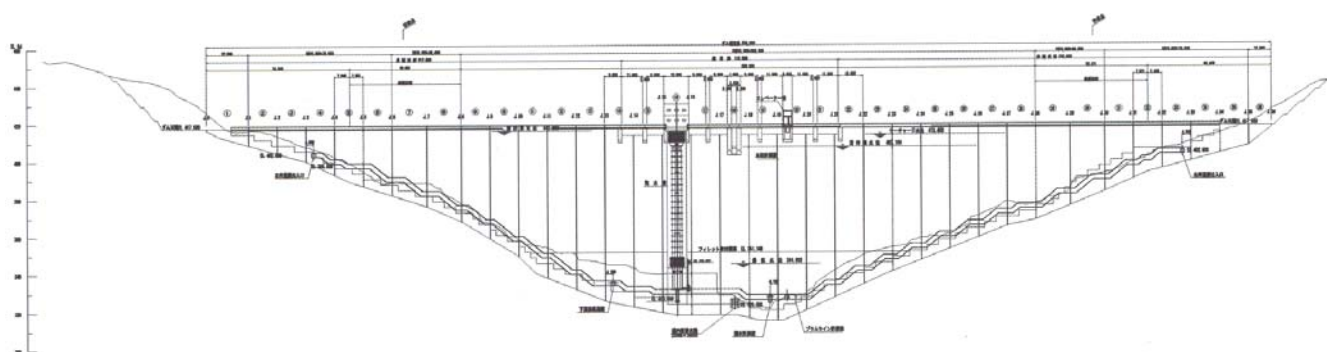


図-2.11.2 五ヶ山ダム上流面図<sup>1)</sup>

## 2.11.2 技術的に工夫した主要内容

五ヶ山ダムは、福岡県と佐賀県の県境を源流として博多湾に注ぐ二級河川那珂川に福岡県が建設を進めている堤高 102.5m の重力式コンクリートダムである。ダムの目的は、那珂川の洪水調節、流水の性状な機能の維持、水道用水および異常渇水時の緊急補給である。

五ヶ山ダム建設工事では、従来の RCD 工法に比べてコンクリートの打込みを効率化・高速化できる、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）を全面的に採用している。最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）はこれまでに嘉瀬川ダム（佐賀県、国土交通省九州地方整備局）、湯西川ダム（栃木県、国土交通省関東地方整備局）、津軽ダム（青森県、国土交通省東北地方整備局）で採用されており、本工事が 4 例目である。なお、補助ダムにおける最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の適用は国内初と

なる。

五ヶ山ダムの堤体リフト面積分布は図-2.11.3に示すとおりであり、次のような特長を有する。

- ① 最大リフト面積は EL.369.5m の 11,482m<sup>2</sup> である。
- ② RCD 工法による施工区間の平均リフト面積は約 8,000m<sup>2</sup> である。
- ③ EL.340m～370m の 30m 区間では RCD コンクリートの面積が約 9,000m<sup>2</sup> のリフトが連続する。
- ④ EL 370 m から上部はリフト面積がダム天端に向かって直線的に減少する。

このように EL.330m～EL.380m の 50m 区間はリフト面積が 10,000m<sup>2</sup> 以上のリフトが連続しており、かつ堤内構造物が少ないことから、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の採用による大幅な施工速度向上が期待できる。

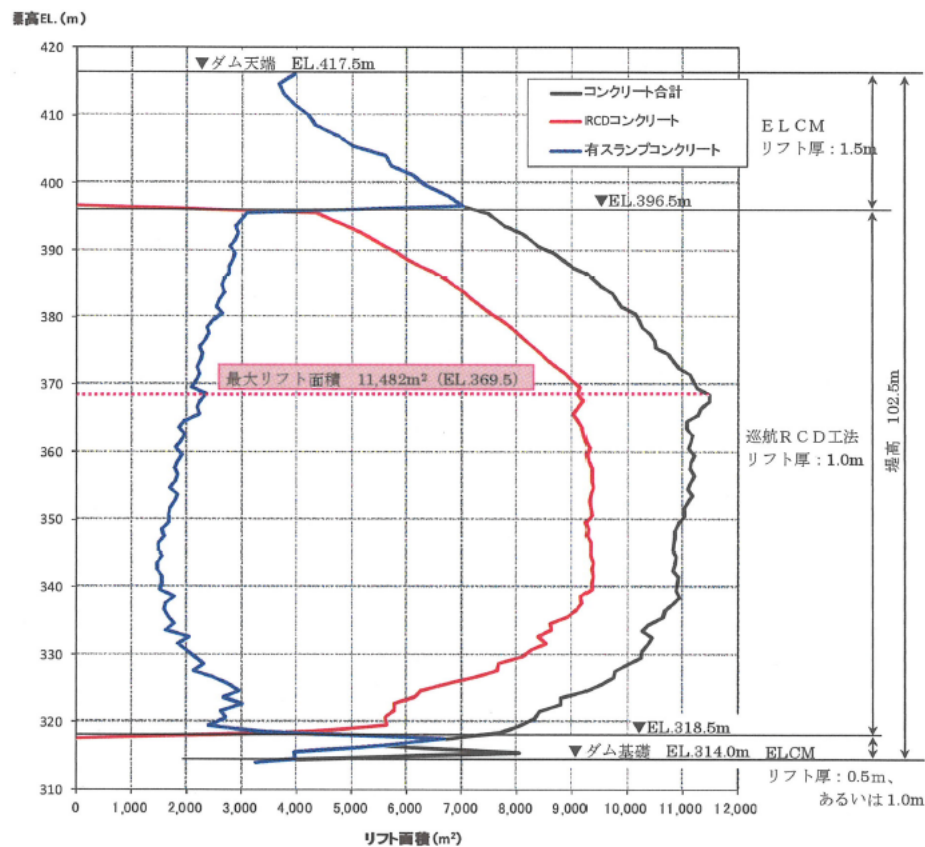


図-2.11.3 五ヶ山ダム堤体リフト面積分布図<sup>2)</sup>

(1) SP-TOM ならびに SP-TOM 用ベルトコンベヤ式ディストリビュータの採用

五ヶ山ダムでは最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の施工速度を十分に発揮させるために、表-2.11.1 に示すようなコンクリート設備一覧を設けた。このうち、コンクリートの主運搬設備には、嘉瀬川ダム (2.8 参照)、湯西川ダム (2.9 参照)、第二浜田ダム (2.10 参照) で実績を挙げた SP-TOM

を採用した。SP-TOM は堤体左岸側に設置し、コンクリート運搬能力 180m<sup>3</sup>/h を目標とし、搬送管径はφ700mm、設置勾配 34° とした。五ヶ山ダムの SP-TOM を写真-2.11.2 に示す。SP-TOM と 18t 固定式ケーブルクレーン（運搬能力 70m<sup>3</sup>/h）で最大 250m<sup>3</sup>/h 程度のコンクリート運搬が可能となる。

表-2.11.1 コンクリート打設設備

設備		設備諸元
打設準備	コンクリート製造設備	2 軸強制練り 3.0m <sup>3</sup> ×2 台×1 基 (低層型パッチャープラント)
	セメント貯蔵設備	1000t (フライアッシュ置換率 20%) × 1 基 600t (フライアッシュ置換率 30%) × 1 基
	コンクリート運搬設備	18t 固定式ケーブルクレーン×1 基(5.5m <sup>3</sup> ) 6.5t 固定式ケーブルクレーン×1 基(2.5m <sup>3</sup> ) SP-TOM×1 条 (φ700)
	場内コンクリート運搬設備	40t ダンプトラック (RCD コンクリート運搬用) ×3 台 10t クローラダンプ (有スラブコンクリート用) ×4 台 9.0m <sup>3</sup> グランドホッパ×1 基



写真-2.11.2 五ヶ山ダム SP-TOM 全景

しかし、SP-TOM からのコンクリート荷受け位置を搬送管出口に固定すると、搬送管出口の足元を施工している時間は RCD 用コンクリートの出荷が中断することになる。そこで、SP-TOM の下端に図-2.11.4 に示す新たに開発した SP-TOM 用ベルトコンベヤ式ディストリビュータ（以下、ディストリビュータと称す）を増設し、岩着部施工範囲（有スランプコンクリートの施工範囲）を超えて、RCD 用コンクリート上で連続的に荷受けが可能となるようにした。このことによって、写真-2.11.3 に示すように左岸側の岩着部コンクリートを施工中にも、RCD 用コンクリートの出荷が可能となった。さらに、水平打継面の清掃によるコンクリートの荷受け中断が生じないように、ディストリビュータを旋回（左右約 30°）できる構造とした。

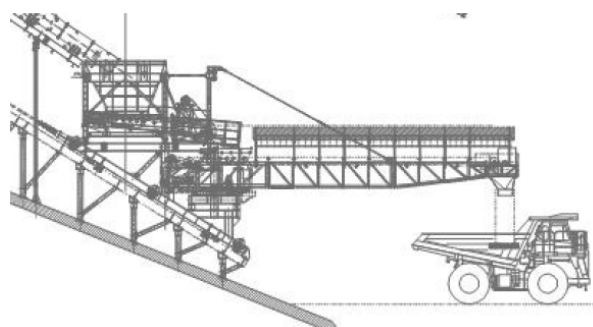


図-2.11.4 ディストリビュータ模式図

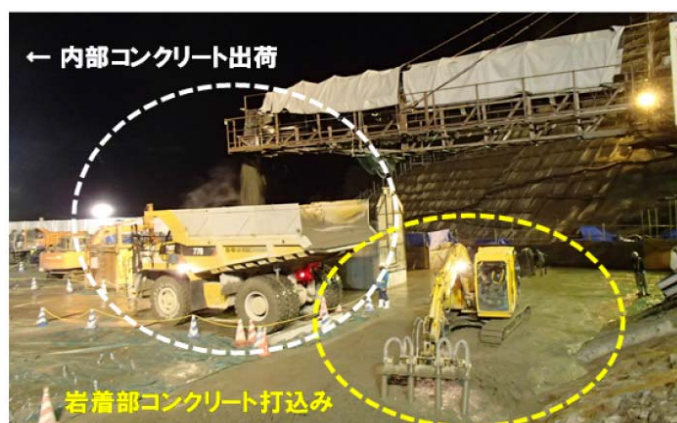


写真-2.11.3 ディストリビュータ直下の施工状況

## （２）２リフト連続打設

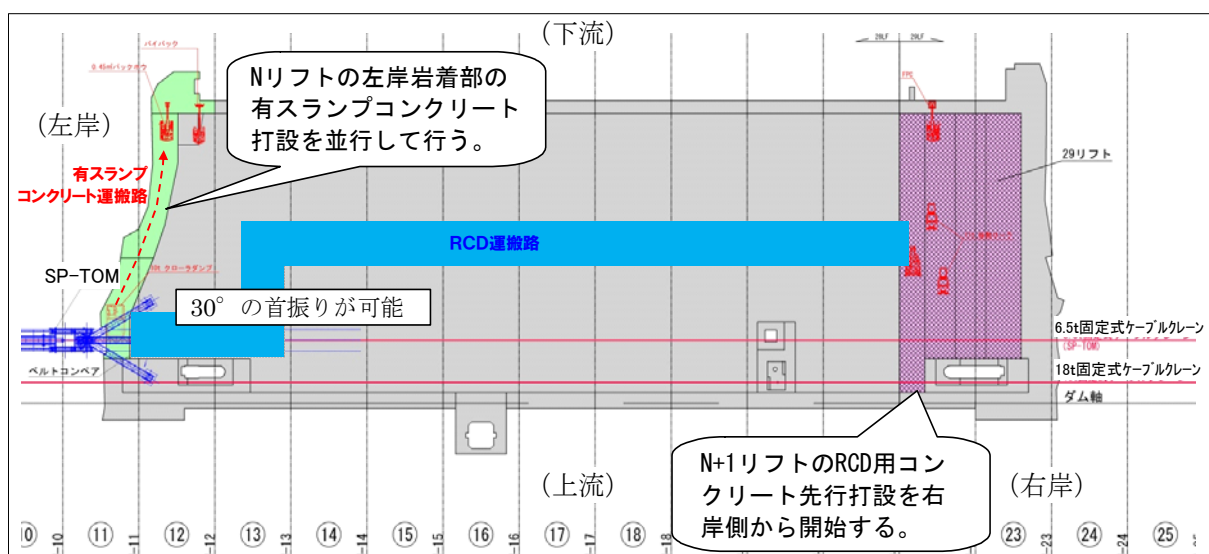
従来の RCD 工法は、施工区画ごとに上下流面の外部コンクリートを先行して打ち込んでから内部の RCD 用コンクリートを交互に打ち込む工法である。これに対して、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）は写真-2.11.4 に示すように、RCD 用コンクリートを先行して打ち込み、型枠と RCD 用コンクリートの端部法面とのスペースに外部コンクリートを後行打設する工法である。RCD 用コンクリートを先行させることで、連続的に RCD 用コンクリートを打ち込むことができ、施工機械

能力が最大限活用され、打設速度が大きく向上する。なお、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の各種施工仕様は、（財）ダム技術センター編「改訂版巡航 RCD 工法施工技术資料」<sup>3)</sup>に示されている各種確認試験を実施して設定した。



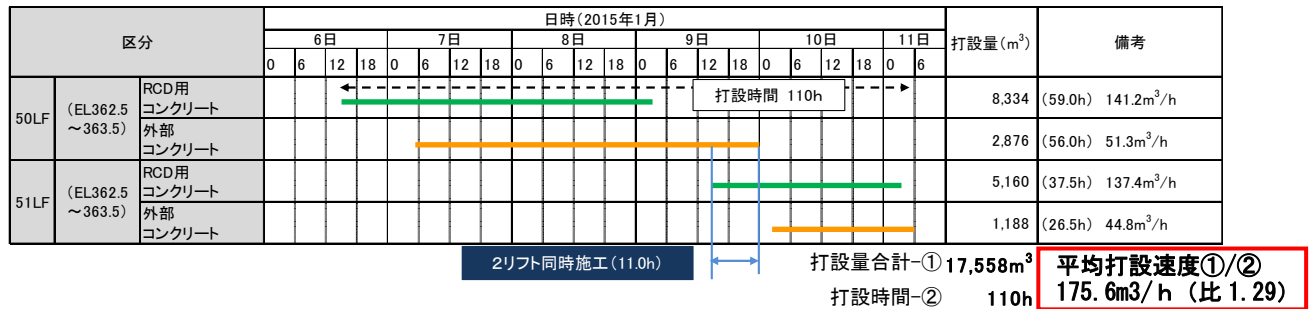
写真－2.11.4 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）によるコンクリート打込み状況

この最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の本格導入に加えて、既述したディストリビュータの採用によって、図－2.11.5 に示すような左岸側の岩着コンクリートを施工しながら、次リフトの RCD 用コンクリートを右岸側から開始する 2 リフト連続打設を実現した。

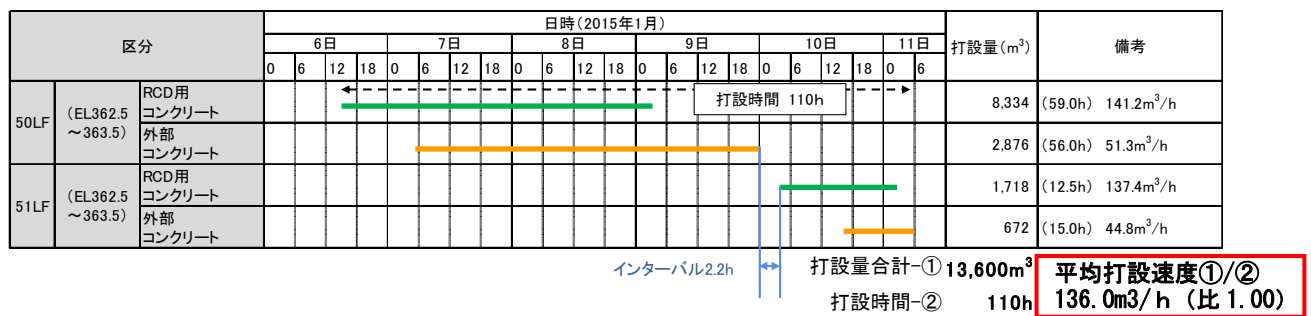


図－2.11.5 ディストリビュータ導入による 2 リフト連続打設模式図

2 リフト連続打設の施工実績（図－2. 11. 6 参照）から求めた打設速度は、従来の自走式ベルトコンベヤを使用した場合の打設速度（図－2. 11. 7 参照）<sup>4)</sup>よりも約 29%向上した。



図－2. 11. 6 2 リフト連続打設の実績施工スケジュール



図－2. 11. 7 自走式ベルトコンベヤを使用した従来のスケジュール

### （3）プレート型端部法面締固め機（FPC）の開発

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の基本技術である RCD コンクリートの端部法面締固め方法は、写真－2. 11. 5 に示す端部法面締固め専用機（以降、「二面拘束型専用機」と称する）を用いて RCD 用コンクリートを勾配 1 : 0.8 で締め固めるものである。この二面拘束型専用機を用いた端部法面締固め方法には次の 3 点の留意事項があった。

#### ① 締固め機の特徴から事前法面整形が必要

二面拘束型専用機の転圧板は天端の水平部と端部法面部（勾配 1 : 0.8）の 2 面が固定されており、この 2 面を同時に締め固める機構である。しかし、RCD 用コンクリートの撤出し完了時点での法面勾配は 1 : 1.0 程度である、端部法面には凹凸がある、法尻部には大粒径骨材がこぼれ落ちているために、事前に法面勾配を 1 : 0.8 に整形する必要があった。

#### ② 法面整形時に使用するバックホウのブームと下流面型枠の干渉

二面拘束型専用機は、端部法面の事前整形に使用するバックホウのブームと下流面型枠が接

触するため、汎用機械の  $0.25\text{m}^3$  バックホウを使用しても型枠からの水平距離を  $3.5\text{m}$  確保する必要があり、外部コンクリートの厚さ  $2.5\text{m}$  に対して  $1\text{m}$  程度外部コンクリートを厚くする必要があった。

### ③ オペレータの技量

二面拘束型専用機は、締固め板 2 面を端部法面の天端と法面に密着させる必要があり、オペレータの高度な技量が必要であった。また、転圧板の微調整などを行う補助作業員が 1 名以上必要であった。



写真－2.11.5 二面拘束型専用機による端部法面締固め状況

以上のような二面拘束型専用機の留意点を改善するために、写真－2.11.6 に示す一面拘束のプレート型端部法面締固め機（Flat Plate Compactor、以降 FPC）を開発した。FPC では、1 台の重機で法面整形と法面の任意形状での締固めを可能にした。FPC の適用によって、RCD 用コンクリートの打止め処理の形状を自由に整形できるようになり、施工の自由度が向上した。



写真－2.11.6 FPC（プレート型端部法面締固め機）

なお、既述したように従来の二面拘束型専用機では、法面整形の油圧ショベル 1 台（オペレータ

付き）と補助作業員 1 名、二面拘束型専用機（オペレータ付き）と補助作業員 1 名の計 4 名が必要であったが、FPC は法面整形と締固めを 1 台で賄うことが可能であり、人員はオペレータと補助作業員 1 名の計 2 名となり、端部締固めに必要な作業人員を 50%に削減できた。

## 2.12 当別ダム

### 2.12.1 概要

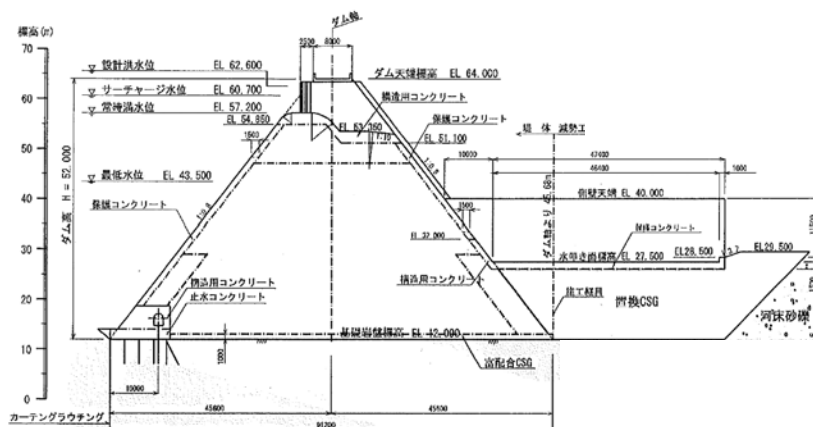


写真－2.12.1 当別ダム全景

- ダム事業者 : 北海道空知総合振興局
- 所在地 : 北海道石狩郡当別町
- 工事名称 : 当別ダム建設事業本体工工事
- 施工者 : 鹿島・竹中土木・岩倉特定建設工事共同企業体
- 工期 : 2008年10月8日～2012年12月20日
- ダム形式 : 台形CSGダム
- 諸元 : 石狩川水系当別川

堤高 52m、堤頂長 432m、堤体積 813 千 m<sup>3</sup>、有効貯水量 66,500 千 m<sup>3</sup>

- 筆者の指導業務 : 世界初の本格的適用第一号である台形 CSG ダム建設に対して、大量高速連続施工を可能にする CSG 製造設備φ1,200mmSP ミキサの開発、CSG 施工の合理化、CSG 製造時の品質管理方法の合理化など、技術的課題の解決に対して指導した。



図－2.12.1 当別ダム標準断面図（常用洪水吐部）<sup>1)</sup>

## 2.12.2 技術的に工夫した主な内容

台形 CSG (Cemented Sand and Gravel) ダムは、我が国初の新しいダム形式として、従来のダム建設より一層のコスト縮減と環境保全に配慮して、かつ材料の合理化を図ったものであり、併せて設計の合理化、施工の合理化にも資するとされている<sup>2)</sup>。

当ダムは石狩川水系当別川における当別川総合開発事業の一環として、北海道石狩郡当別町に建設された多目的ダムである。ダムの目的は、当別川の洪水調節、農地に対する灌漑用水の確保、札幌圏各地域への水道用水の供給、および河川流量の安定化などである。

### (1) CSG 製造設備 $\phi 1,200\text{mm}$ SP ミキサの開発、実用化

CSG とは、ダム建設現場周辺で手近に得られる材料を、基本的に分級や粒度調整、洗浄を行うことなく、必要に応じてオーバーサイズの除去や破砕を行う程度の材料に、セメントならびに水を添加し、簡易な設備で混合したものである。施工の合理化のために高速大量連続施工を前提としており、連続的に材料を供給して CSG を製造することを基本としている。このため、連続混合が可能な混合機が使用されることが多い<sup>3), 4), 5), 6)</sup>。

当ダムでは堤体 (CSG 約 67 万  $\text{m}^3$  (堤体部および減勢工部)、コンクリート約 14 万  $\text{m}^3$ ) を 13 ヶ月で建設する必要があり、この計画を実現するには  $450\text{m}^3/\text{h}$  以上の CSG 製造能力が必要であった。このため、 $\phi 1,200\text{mm}$  の 5 連の回転筒で構成される SP ミキサを開発し、実用化した。図-2.12.2 に SP ミキサによる攪拌・混合模式図を示す。SP ミキサはそれぞれ反転する 5 連の回転筒から構成されている。回転筒内部には攪拌羽根が配置されており、上部から投入された材料は各回転筒で重力による攪拌と回転筒内部の攪拌羽根により強制攪拌される。また、上部 2 連の回転筒は給水せず材料を攪拌混合(ドライミックス)し、下部 3 連の回転筒は給水して攪拌・混合 (ウェットミックス) することで、投入された材料とセメント、水を十分に攪拌・混合することができる。

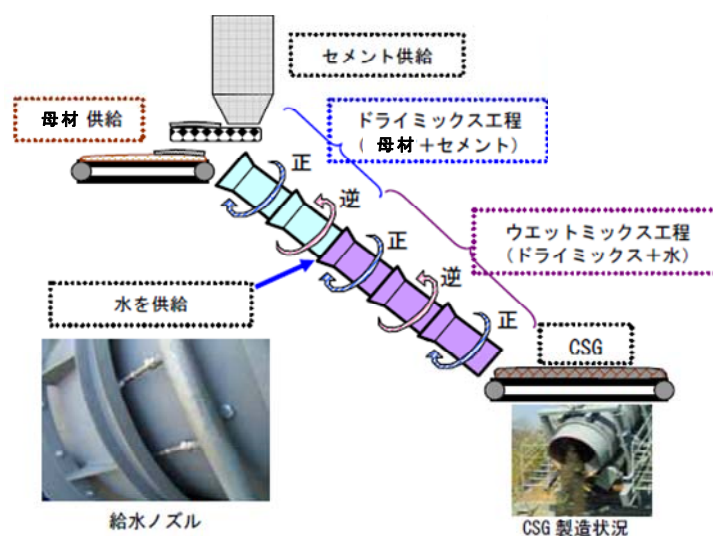


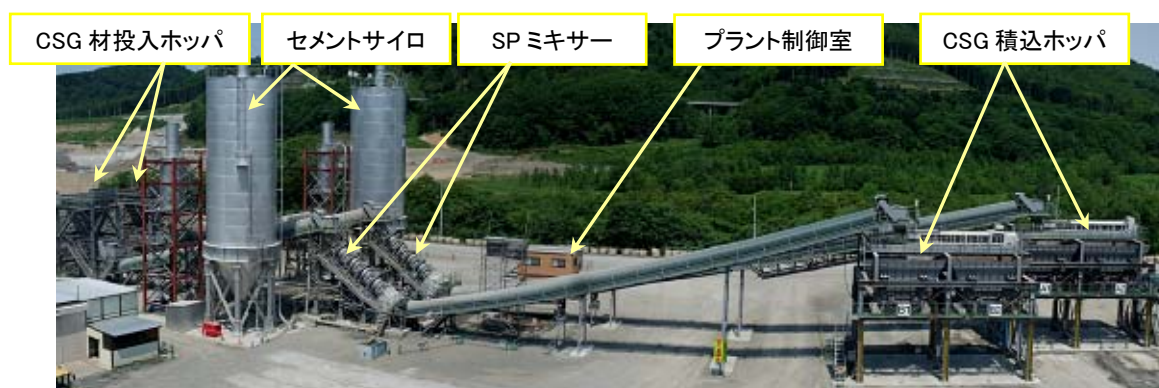
図-2.12.2 SP ミキサの攪拌・混合模式図

表－2. 12. 1 に  $\phi 1,200\text{mmSP}$  ミキサの仕様を、写真－2. 12. 2 に当ダムの CSG 製造設備全景を、写真－2. 12. 3 に  $\phi 1,200\text{mmSP}$  ミキサを示す。当ダムでは  $450\text{m}^3/\text{h}$  以上の CSG 製造能力を確保するために、 $\phi 1,200\text{mmSP}$  ミキサを 2 系列設置した。これまでの実績によると、1 系列当り最大  $350\text{m}^3/\text{h}$  の製造能力を有することが確認されている。

現在では、SP ミキサは（財）日本ダム協会「CSG 工法用混合設備小委員会」で「DK 系ミキサ」として承認されており、「重力・動力併用型で形状がパイプ系」の混合装置に分類されている<sup>6)</sup>。また、当別ダム以降、大滝地区地滑り対策工事(奈良県)<sup>7)</sup>などで実績を挙げている。

表－2. 12. 1  $\phi 1, 200\text{mmSP}$  ミキサ仕様

製造能力(1 系列)	最大 $350\text{m}^3/\text{h}$
混合方式	重力混合/動力混合 併用
回転筒内径 $\phi$ (mm)	$\phi 1, 200$
回転筒長さ L (mm)	$L=1, 600$ (回転筒 1 基あたり)
回転筒個数	5 連
攪拌羽根	4～2 枚/筒



写真－2. 12. 2 当別ダムの CSG 製造設備全景（2009 年）



写真－2. 12. 3 当別ダムで使⽤した  $\phi 1, 200\text{mmSP}$  ミキサ（2009 年）

## (2) CSG 施工の合理化

CSG 工法とは、CSG をブルドーザで敷き均し、振動ローラで転圧することによって構造物を造成する工法である。CSG 工法は、国土交通省中部地方整備局長島ダム（静岡県、G、2001 年）の上流仮締切堤築造に初めて適用されて以来、多くの仮締切堤や押え盛土工などに採用され、現在では当別ダムなどの本格的ダムにも適用されている。

図-2.12.3 に当ダムにおける本体 CSG の施工フローを示す。当ダムでは既述したように堤体を 13 ヶ月で建設する必要がある、これを実現するには以下の 2 点が施工技術的な課題であった。

- ① 高い CSG 打設能力を確保し、かつこれを維持すること
- ② CSG 打設、保護コンクリート打設、プレキャスト型枠（以下、PC 型枠と称する）、打設面処理などの一連の作業を円滑化すること

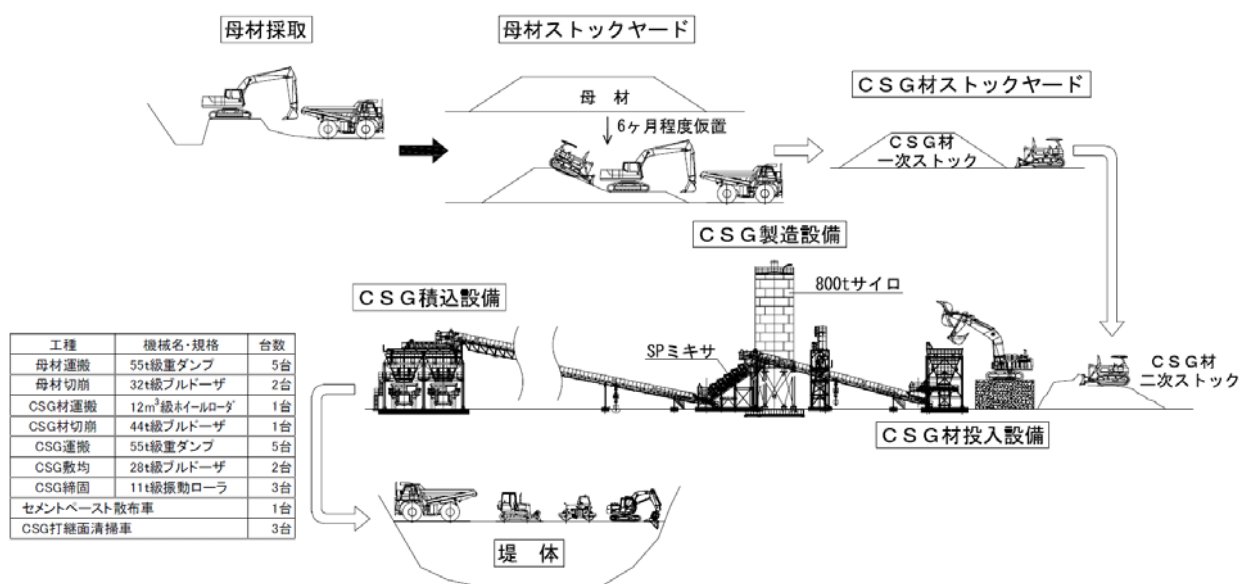


図-2.12.3 当別ダム本体 CSG の施工フロー

この施工技術的な課題の解決方法として、以下に示す 3 項目を講じた。

- ① CSG 運搬能力の確保：堤体直接乗入方式による運搬

CSG 施工において製造した CSG 運搬能力の確保が重要である。そこで、図-2.12.3 に示すように、CSG 運搬に 55t 級重ダンプトラックを使用して、堤体上の CSG 打設面に乗り入れて直送することとした。

- ② CSG 運搬効率の向上策：CSG 積み込み方法の工夫

CSG 運搬能力を確保するために 55t 級重ダンプトラックを使用するが、ベッセル（荷台）に一山で積み込むと CSG 積載量は約 40t となり、運搬効率が低下する。このため、写真-2.12.4 に示すような二山積み可能な積み込みホップを開発、導入することで、運搬効率を向上させた。



写真-2.12.4 55t 級重ダンプトラックへのCSG積荷状況

### ③ 施工の円滑化対策：CSG 二層連続打設法の開発

CSG 工法は本来高い打設能力を有するが、上位標高部になると人力施工を伴う PC 型枠工や保護コンクリート工の施工速度に制約をされることになり、堤体打上がり速度が低下する可能性があった。そこで、CSG 施工と関連作業を円滑化させ、かつ堤体打上がり速度を維持するために図-2.12.4 に示す「CSG 二層連続打設法」を開発した。これは、堤体打上がり高さ 1.5m (CSG 打設 2 リフト分) を左右岸方向に 4 分割して、分割した 1 つの区画を図-2.12.4 に示すように CSG 2 リフトを連続して打ち上げるものである。本方法によって、以下のような効果が得られた。

- ・ 3 種類の作業量の平準化
- ・ PC 型枠工や保護コンクリート打設に対して CSG 運搬ダンプトラックの走行ルートが錯綜する頻度の低減による作業の安全性向上

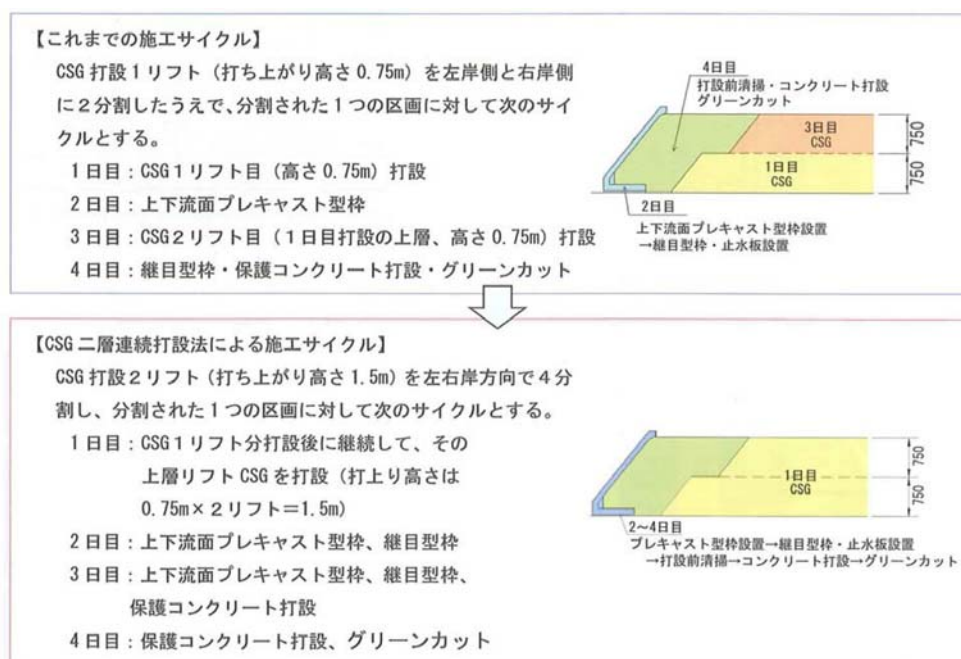


図-2.12.4 CSG 二層連続打設法の施工サイクル<sup>8)</sup>

以上のような施工上の工夫を施すことで、CSG 打設工程は当初計画（13 ヶ月）を満足し、約 67 万 m<sup>3</sup> の CSG を 11 ヶ月で施工した。堤体の打上がり速度は低～中位標高部で 0.22m/日、中～高位標高部では 0.31m/日を達成した。当ダムにおける CSG 打設実績を図-2.12.5 に、堤体打上がり速度を図-2.12.6 に示す。

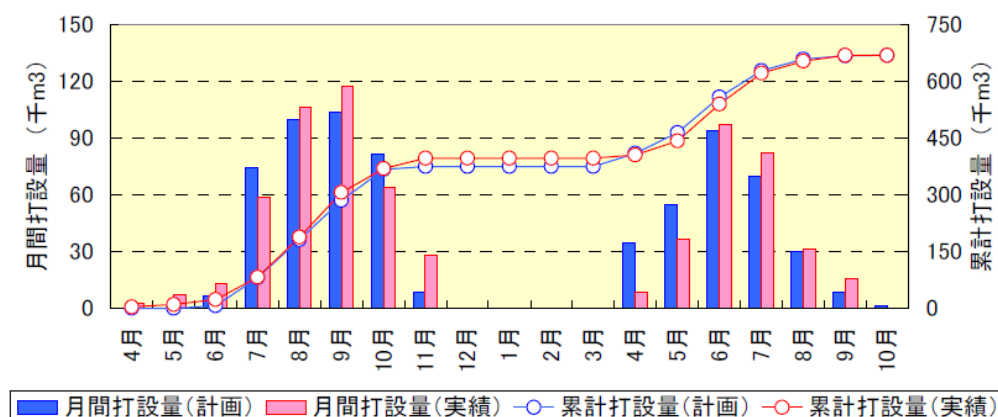


図-2.12.5 当別ダムの CSG 打設実績

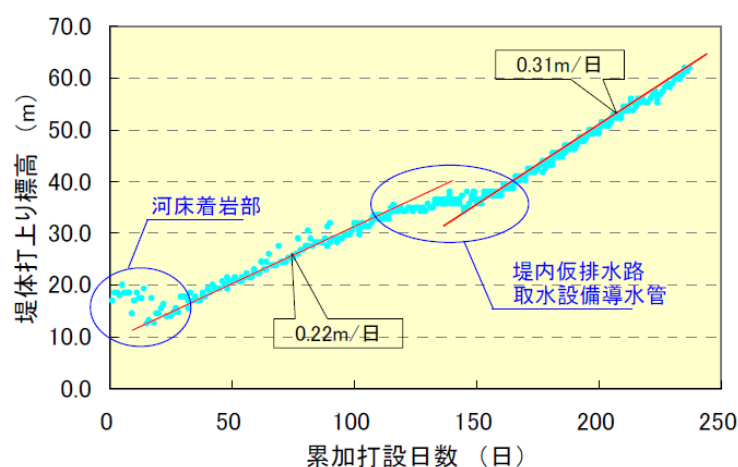


図-2.12.6 当別ダム堤体打上がり速度

### (3) CSG 材の品質管理の合理化

CSG 工法では、“ひし形理論”に従って事前に定められた CSG 材（所定の最大粒径以下に調整した CSG の材料）の粒度分布と単位水量の幅で品質（強度）が規程される<sup>2)</sup>。このため、CSG 製造時の品質管理では使用する CSG 材の粒度分布が所定の粒度範囲内にあることを確認する必要があるが、CSG 工法は高速大量連続施工を前提にしているため、従来よりも迅速かつ連続的な品質管理方法が必要とされている。そこで、近年飛躍的な発展を遂げている画像解析技術に着目し、デジ

タルカメラで撮影した CSG 材の画像を解析して、粒度分布の変動傾向を迅速に監視するシステム（画像粒度モニタリングシステム）を開発した。そして、本システムを当ダムに導入し、CSG 施工当日における品質管理の合理化を図った。

本システムは、主に市販のデジタルカメラ（1220 万画素程度）とコンピュータ（以下、PC と称する）で構成され、特殊な機器を必要としない。測定手順は図-2.12.7 に示すように測定対象材料を水平かつ薄く敷き均してデジタルカメラで撮影（STEP 1）し、画像を PC に取り込む（STEP 2）。この画像を解析して各粒子の輪郭を識別し、複数の監視粒径（例えば、40mm、20mm、10mm など）毎に粒子を抽出（STEP 3）後、監視粒径毎に粒度インデックス  $I_i$  を算出する（STEP 4）。粒度インデックス  $I_i$  とは、二次元の画像情報を定量化した独自の指標である。一連の画像解析（図-2.12.7 中、STEP 2～STEP 4）は専用プログラムによって十数秒で処理が完了する<sup>9)</sup>。

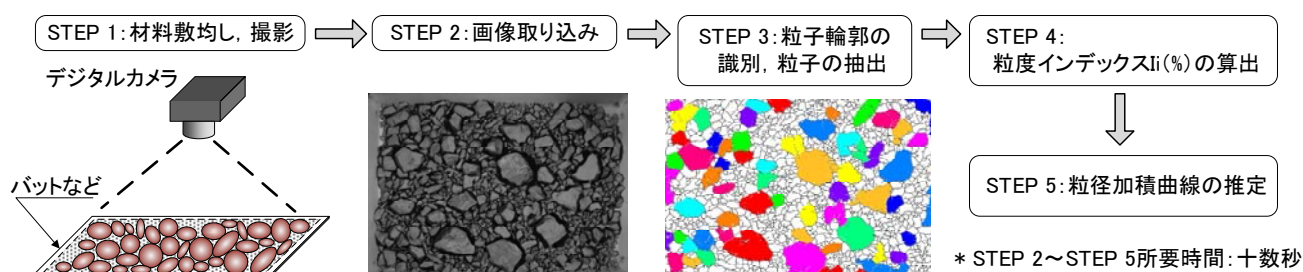


図-2.12.7 画像粒度モニタリングの手順

本システムで推定した CSG 材（最大粒径 80mm）の粒径加積曲線である図-2.12.8 に示すように、本システムで推定した粒径加積曲線と湿潤・水洗い簡易法<sup>2)</sup>による粒径加積曲線はよく一致している。なお、CSG 材の場合、試料採取（湿潤質量 30kg 程度）から粒径加積曲線を得るまでに要する時間は 15 分以内である。

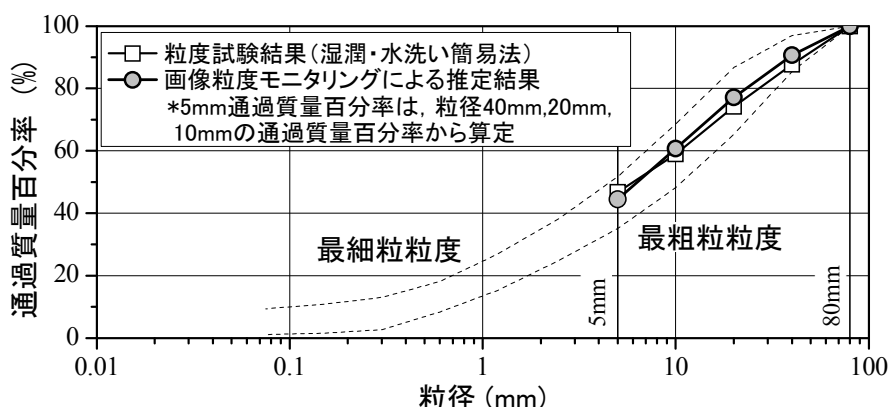


図-2.12.8 CSG 材の粒径加積曲線の比較

当ダムでは CSG 施工当日の品質管理に、画像粒度モニタリングと RI 測定機器による含水比モニ

タリング<sup>8)</sup>を導入して、施工当日の CSG 材品質管理の合理化を図った。本システムの 1 回の撮影試料は約 30kg（湿潤質量）とし、1 回/15 分の頻度で粒度変動傾向を監視した。品質管理の合理化後は、図-2.12.9 に示すように CSG 材の品質が安定している場合は簡易法試験（フライパン法による含水比試験、湿潤・水洗い法による粒度試験）<sup>2)</sup>の頻度を 1 回/4 時間とし、CSG 材の粒度または表面水量に変動が生じたと判断した場合は簡易法試験頻度を 1 回/2 時間に切り替えることとした。このことによって、CSG 材の品質変動の大小に応じた品質管理を実現し、品質管理試験回数を合理的に低減（導入前に比べて試験回数を約 40%低減）することができた。

両システムのようなリアルタイム品質変動監視技術を導入した効果は、単なる管理試験頻度の低減ではなく、CSG 材の品質変動の有無を考慮した新しい品質管理が実現できたことと考えている。また、従来の定時または定量間隔で行う品質管理に比べて、CSG 材の急激な品質変動を捉えることも可能となり、CSG の品質確保に資することができたと考えている。

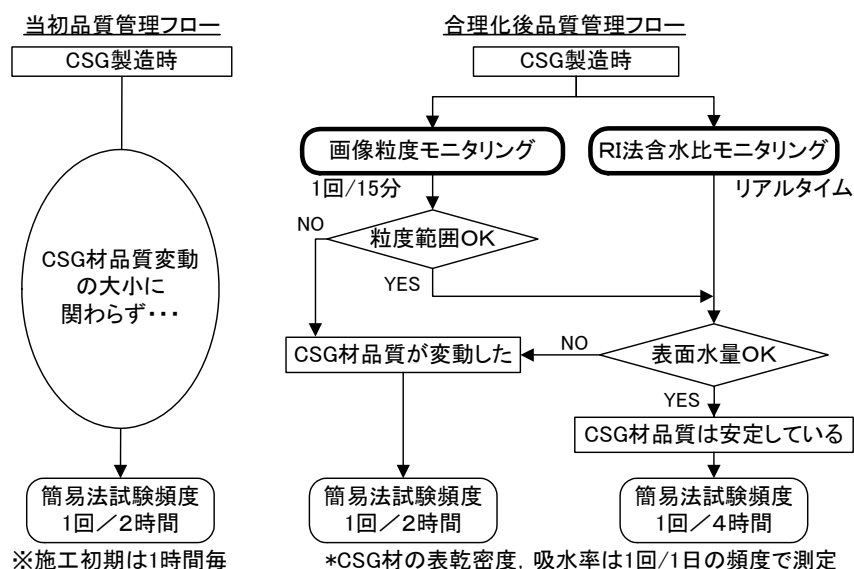


図-2.12.9 CSG 材の粒径加積曲線の比較

## 2.13 第2章の結論

第2章では、筆者が直接携わったコンクリートダム4ダムと技術指導したコンクリートダム8ダムを対象に、ダムの概要と技術的な内容について整理した。

第2章の内容を以下および表-2.13.1にまとめる。

- 1) 川治ダムでは、主にアーチダムとして品質上留意すべき基礎岩盤を痛めないように、基礎掘削工法としてプレスブリット工法を採用し、品質の向上とともに工程短縮・コスト低減・安全性確保についても効果が得られた。
- 2) 巖木ダムでは、主に熟練した技能と多大な労力を必要としていた岩盤面処理に対する機械化による省力化と、基礎処理工に対するコンピューター管理システムによるIT化を推進した。
- 3) 宮ヶ瀬ダムでは、主に合理化施工方法として開発されたRCD工法の集大成として、各種機械化・プレキャスト化に努めるとともに、粘土鉱物が含有している骨材に対して凝結遅延剤を混和剤とすることによってコンシステンシーと強度の確保に寄与した。
- 4) 奥三面ダムでは、主にダム初適用となる高流動コンクリートの配合面・施工面・温度応力対策などの技術的課題に対して指導した。
- 5) 温井ダムでは、主に基礎掘削ずりのコンクリート骨材へ全量利用や3次元CADシステムの導入などの合理化を図った。
- 6) 滝沢ダムでは、主にコンクリート運搬設備などの合理化と高速施工に伴う温度応力対策について指導した。
- 7) 嘉瀬川ダムでは、主にSP-TOMと呼ばれるコンクリート運搬設備の初適用、最新のRCD工法（巡航RCD工法）の開発を指導した。
- 8) 湯西川ダムでは、主にコンクリートダム高速施工法の集大成として、コンクリート運搬設備の効率的運用、最新のRCD工法（巡航RCD工法）の発展に対して技術的指導をした。
- 9) 第二浜田ダムでは、主にSP-TOMによる有スランプコンクリートの搬送、各種暑中コンクリート対策などを指導した。
- 10) 五ヶ山ダムでは、主に高速施工方法である最新のRCD工法（巡航RCD工法）の全面採用、合理的な端部締固め機（FPC）の改良などを指導した。
- 11) 当別ダムでは、主に世界初のダム形式である台形CSGダムに対して、施工方法の合理化やCSG製造時の品質管理などを指導した。

表-2.13.1 携わったダムにおける工夫・指導内容一覧

No.	ダム名称	形式*	工夫・指導した点
1	川治 (カワジ)	A	・堤体基礎掘削工において、重要なアーチダムの基礎の緩み防止対策として、プレスプリット工法を採用した ・基礎処理工において、注入データの整理および日報、出来形資料の作成に関する電算化を推進した
2	敵木 (キウウラギ)	G	・岩盤面処理工において、機械化による省人化を推進した ・基礎処理工において、全自動プラントの導入と練混ぜ・注入・解析をコンピュータ管理するシステムを導入した ・仮設備として、トンネル式トランスファーカーを採用し、工程短縮に寄与した
3	宮ヶ瀬 (ミヤガセ)	G	・堤体コンクリート工において、粘土鉱物を含む骨材対策として凝結遅延剤を採用し、品質確保に寄与した ・堤体工において、機械化・プレキャスト化・省力化を含む施工の合理化を推進した ・減勢工において、PCD工法を採用し、Gmax80mmスランプ5mmに対応可能な各種機械を開発した
4	奥三面 (オクミオモテ)	A	・堤体コンクリート工において、温度応力を緩和するために、混和剤を選定しセメント量の低減を実施した ・堤体工において、整流板や高密度配筋がある放流管周りに高流動コンクリートを採用し、各種課題を解決した
5	温井 (ヌクイ)	A	・堤体コンクリート工において、骨材粒径改善装置を導入することで、単位水量の低減を達成した ・堤体コンクリート工において、基礎掘削で発生したずりを有効活用するために、全量骨材に利用した ・堤体工において、各種構造物に対してプレキャスト化することによって合理化した ・施工管理において、3次元CADシステムを全面的に導入し、出来高管理や施工図・構造物の可視化などに利用した
6	滝沢 (タキザワ)	G	・堤体コンクリート工において、原石山の低品質骨材を利用に関する各種課題を解決し、有効活用を達成した ・堤体コンクリート工において、フライアッシュを現地混合とすることで夏期の置換率を変更し、温度応力抑制を実施した ・堤体工において、コンクリート製造から運搬までを自動制御・自動運転するシステムを開発・導入した ・堤体工において、冬期打設・降雨時打設を可能とする各種課題を解決し、工程短縮を達成した
7	嘉瀬川 (カセガワ)	G	・堤体工において、SP-TOMと呼ばれる非常に効率的なコンクリート搬送設備を開発・導入した ・堤体工において、RCD工法を発展させた巡航RCD工法の実証実験・一部現場適用を実施した ・堤体コンクリート工において、乾式製造骨材の供給を受け、各種課題を解決した ・減勢工において、導流壁の背面に現地にある材料を有効に活用することのできるCSG工法を適用した
8	湯西川 (ユニシガワ)	G	・堤体コンクリート工において、河床砂礫を含む4種類の骨材を有効活用し、各種課題を解決した ・堤体工において、巡航RCD工法をさらに発展させた。1リフト連続巡航RCD工法を開発・採用した ・堤体工において、鉄塔移動によるケーブルクレーンの移設により、高位標高まで有効活用した
9	(施工中) 第二浜田 (ダイニハマダ)	G	・堤体工において、SP-TOM(コンクリート搬送設備)を有スランプコンクリートに初適用した ・堤体工において、各種暑中コンクリート対策により温度応力対策を実施した ・堤体工において、打継面処理で発生するグリーンカットズリを骨材として有効活用し、各種課題を解決した
10	(施工中) 五ヶ山 (ゴカヤマ)	G	・堤体工において、SP-TOM並びにSP-TOM用ベルトコンベヤ式ディストリビュータを採用し、完全連続搬送を可能とした ・堤体工において、巡航RCD工法を堤体全面に採用し、さらに効率的な2リフト連続打設を採用した ・堤体工において、巡航RCD工法の合理化として、プレート型端部締固め機を開発・適用した ・堤体工において、通常有スランプで施工される岩着コンクリート部に適用可能なRCD配合の開発及び採用をした
11	当別 (トウベツ)	CSG	・CSG製造工において、SPミキサと呼ばれる高速大量連続練混ぜ設備を開発・実用化した ・CSG堤体工において、世界初の台形CSGダムを発展させるため、一連の技術的課題を解決した ・CSG製造工において、CSG母材の粒度管理として連続監視可能な画像粒度モニタリングシステムを開発した

ダム形式 A:アーチダム, G:重力式ダム, CSG:台形CSGダム

表中 赤字は「施工の高速化」に関する項目

○:従来のRCD工法 ○:最新のRCD工法(巡航RCD工法)一部採用 ●:最新のRCD工法(巡航RCD工法)本格採用

## 第2章の参考文献

### 2.2 川治ダム

- 33) 関口祐亨、平位静夫、市村平、田代民治：川治ダム工事を顧みてー川治ダム工事の諸問題の対策その15ー、鹿島建設 第31回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.351-360、1982.5.
- 34) 荒木康雄、田代民治、景山耕平、佐久雄司、五十嵐正秋、森本英二郎、仲島紀之：ボーリンググラウト工の日報処理及び注入分析の電算化ー川治ダム工事の諸問題の対策その14ー、鹿島建設 第30回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.281-288、1981.5.
- 35) 内田清一、梅田貞夫、金井治雄：油圧バイプロリーチの開発ー川治ダム本体建設工事ー、鹿島建設 土木技術ニュース、No.464、1979.2.

### 2.3 厳木ダム

- 1) 平川淳一郎、小林寛範、川橋清秀：ダム工事における岩盤清掃の省力化についてー九地建・厳木ダム建設工事・第3報ー、鹿島建設 土木技術ニュース、No.936、1984.4.
- 2) 小林寛範、富田倫也、三橋清己：ダムグラウト工事に全自動化コンピュータシステムを導入ー厳木ダム建設（三期）工事・第6報ー、鹿島建設 土木技術ニュース、No.999、1984.11.
- 3) 平川淳一郎、小林寛範、川橋清秀：トランスファーカ用の堤体トンネル施工についてー厳木ダム建設工事・第9報ー、鹿島建設 土木技術ニュース、No.1186、1986.9.
- 4) 建設省関九州地方建設局、厳木ダム工事事務所、厳木ダム工事誌

### 2.4 宮ヶ瀬ダム

- 1) 田代民治、高田悦久、熊谷憲二、木村英幸：RCD用コンクリートの品質管理実績についてー宮ヶ瀬ダム建設工事報告（その8）ー、鹿島建設 第43回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.1-8、1994.5.
- 2) 米山義春、高田悦久、並松成美、滝口紀夫：RCD工法における省力化機械の開発についてー宮ヶ瀬ダム建設工事報告（その6）ー、鹿島建設 第41回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.25-32、1992.5.
- 3) 高田悦久、熊谷憲二、木村英幸、増輪一彦、福井直之：RCD工法における合理化施工の諸対策ー宮ヶ瀬ダム建設工事報告（その10）ー、鹿島建設 第44回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.33-40、1995.5.
- 4) 田代民治、塚本克美、滝口紀夫、並松成美、渡辺 洋：減勢工導流壁におけるPCD工法の施工実績についてー宮ヶ瀬ダム建設工事報告（その7）ー、鹿島建設 第42回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.17-24、1993.5.

### 2.5 奥三面ダム

- 1) 齋藤天、田島尚樹、坂田昇：ダムコンクリートのセメント量低減に関する一実験ー奥三面ダム本体

工事一、土木学会第 50 回年次学術講演会、1995.7.

- 2) 峰村修、佐藤賢弥、田島尚樹、坂田昇、齋藤天：ダムコンクリートのセメント量低減に関する実験的検討ー奥三面ダム本体工事一、土木学会第 52 回年次学術講演会、1997.9.
- 3) 峰村修、坂田昇、丸山幸雄、山本佳秀：ダムコンクリートの配合に関する実験的検討、コンクリート工学論文報告集第 19 巻、1997.6.
- 4) 比嘉邦光、峰村修、丸山久一、竹迫淳、坂田昇：アーチダムにおける高流動コンクリートの施工実験ー奥三面ダム本体工事一、土木学会第 52 回年次学術講演会、1997.9.
- 5) 竹迫淳、丸山久一、峰村修、坂田昇：高流動コンクリートの施工性に関する実験的研究、コンクリート工学論文報告集第 19 巻、1997.6.
- 6) 木村淳二、溝渕利明、坂田昇、佐藤賢弥、峰村修：ダム放流管周り的高流動コンクリートの温度ひび割れ抑制対策に関する検討ー奥三面ダム本体工事一、土木学会第 52 回年次学術講演会、1997.9.
- 7) 阿部隆英、峰村修、大内斉、坂田昇、柳井修司：ダム放流管周りへ的高流動コンクリートの施工実績ー奥三面ダム本体工事一、土木学会第 53 回年次学術講演会、1998.10.
- 8) 木村淳二、峰村修、坂田昇、瀬戸謙一郎、村松直人：液体窒素による高流動コンクリートの冷却効果に関する試験施工ー奥三面ダム本体工事一、土木学会第 53 回年次学術講演会、1998.10.
- 9) 阿部高、坂田昇、峰村修、宇尾野雄司、大沼一夫：ダム放流管周りに適用した高流動コンクリートの品質管理試験結果ー奥三面ダム本体工事一、土木学会第 53 回年次学術講演会、1998.10.

## 2.6 温井ダム

- 1) 鹿島・西松・五洋特定建設工事共同企業体：温井ダム工事誌、2004.12.
- 2) 渡辺成夫、溝渕利明：ダムコンクリートの配合改善ー温井ダム建設工事報告（その 5）一、鹿島建設第 44 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.1-8、1995.5.
- 3) 渡辺成夫、石田次夫、村川浩一：ダム堤体掘削の施工実績ー温井ダム建設工事報告（その 3）一、鹿島建設 第 43 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.35-43、1994.5.
- 4) 武田節造、上田幸夫、武井 昭、山根正樹、神田耕治：プレキャストコンクリートを用いたアーチダムの合理化施工ー温井ダム建設工事報告（その 10）一、鹿島建設 第 48 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.1-8、1999.6.
- 5) 渡辺成夫、石田次夫、武田節造、海老剛行、五味篤暁、中尾俊司：三次元 CAD システムの現場利用ー温井ダム建設工事報告（その 2）一、鹿島建設 第 43 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.27-33、1994.5.

## 2.7 滝沢ダム

- 1) 熊谷憲二、大内斉、林健二、後閑淳司、武井昭、松本孝矢、中村元郎、寺内健二：コンクリートダムの合理化施工に関する新しい試みー滝沢ダム本体建設工事報告（その 2）一、鹿島建設第 51 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.1-6、2002.6.
- 2) 熊谷憲二、大内斉、太田裕士、松本孝矢、青木恒、大木洋和：コンクリートダムの合理化に向けた

- 取組みと施工実績－滝沢ダム本体建設工事報告（その５）－、鹿島建設第 54 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.1-9、2005.6.
- 3) 独立行政法人水資源機構荒川ダム総合事業所、財団法人水資源協会：第 7 回滝沢ダムコンクリート調査委員会資料、2005.3.
  - 4) 徳田憲治、高田悦久、鶴岡松生、太田裕士：コンクリート打設自動運転システムの開発、ダム工学、Vol.13、No.3、pp.163-171、2003.7.
  - 5) 熊谷憲二、大内斉、林健二、武井昭、岡山誠、松本孝矢、青木恒、大木洋和：コンクリートダムの工期短縮へ向けた取組みと施工実績－滝沢ダム本体建設工事報告（その４）－、鹿島建設第 53 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.1-7、2004.6.

## 2.8 嘉瀬川ダム

- 1) 林健二、奈須野恭伸、松本信也、大木洋和、東原秀明：コンクリートダムの施工実績と合理化への取組み－嘉瀬川ダム本体建設工事報告（その３）－、鹿島建設第 58 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.1-10、2009.6.
- 2) （一財）ダム技術センター：巡航 RCD 工法施工技術資料、2010.3.
- 3) 林健二、奈須野恭伸、松本信也、藤野賢一、上田翔：減勢工導流壁への C S G 工法の適用に関する契約後 V E 提案－嘉瀬川ダム本体建設工事報告（その４）－、鹿島建設第 59 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、pp.1-8、2010.6.

## 2.9 湯西川ダム

- 1) 安田和弘、飯原征敏、穴原一幸、大内斉：複数種類の骨材を使用するダムコンクリートの配合選定－湯西川ダム本体建設工事－、土木学会第 52 回年次学術講演会、2013.9.
- 2) 大内斉、後閑淳司、長谷川敬寿、岡山誠、松本孝矢、藤澤敦、田村和久、金戸崇史：巡航 R C D 工法の適用－湯西川ダム本体建設工事報告（その３）－、鹿島建設第 60 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、2011.6.
- 3) 戸澤清裕、大内斉、飯原征敏、穴原一幸：ダムコンクリート品質確保、周辺環境配慮の観点からの施工設備計画・運転上の工夫－湯西川ダム本体建設工事－、土木学会第 68 回年次学術講演会、2013.9.

## 2.10 第二浜田ダム

- 1) 高野昌弘：第二浜田ダムの設計と施工について、ダム日本、No.848、pp.13-36、2015.6.
- 2) 近藤正芳、奈須野恭伸、沼本仁志、人見志郎、大木洋和、藤田祐作：本体ダムの打設実績と堤頂部のプレハブ化－第二浜田ダム本体建設工事報告（その４）－、鹿島建設第 63 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、2014.6.
- 3) 近藤正芳、奈須野恭伸、沼本仁志、人見志郎、大木洋和、藤田祐作：本体打設実績と品質向上への取組み及び施工の合理化－第二浜田ダム本体建設工事報告（その３）－、鹿島建設第 62 回施工技

術並びに経営の合理化研究会報文集、2013.6.

- 4) 近藤正芳、奈須野恭伸、人見志郎：コンクリートダムにおけるグリーンカットブリの有効利用、ダム工学、Vol.25、No.1、pp.38-41.2015.1.

## 2.11 五ヶ山ダム

- 1) 鴨打章、住吉正浩、竹内康秀、田中元輝、四元秀哲、林健二、取違剛：五ヶ山ダム本体工事における巡航 RCD 工法の適用（その 1）、ダム技術、No.340、pp.80-106、2015.1.
- 2) 鴨打章、住吉正浩、竹内康秀、田中元輝、四元秀哲、林健二、取違剛、山口嘉義一：五ヶ山ダム本体工事における巡航 RCD 工法の適用（その 2）、ダム技術、No.342、pp.83-119、2015.3.
- 3) （一財）ダム技術センター：改訂版 巡航 RCD 工法 施工技術資料、2012.2.
- 4) 鹿島社内報文：第 60 回施工技術並びに経営の合理化研究会報文集、巡航 RCD の適用 湯西川ダム本体建設工事報告（その 3）、2012.

## 2.12 当別ダム

- 1) 上野信二、中瀬弓人、佐藤裕之、藤澤侃彦：当別ダムの設計・施工（その 2）－発注前試験施工と発注後確認試験－、ダム技術、No.286、pp.83-107、2010.7.
- 2) （一財）ダム技術センター：台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料、2012.6.
- 3) 藤田司：CSG 工法混合設備について（その 1）、ダム日本、No.810、pp.31-48、2012.4.
- 4) 藤田司：CSG 工法混合設備について（その 2）、ダム日本、No.811、pp.31-45、2012.5.
- 5) 藤田司：CSG 工法混合設備について（その 3）、ダム日本、No.812、pp.28-46、2012.6.
- 6) 藤田司：CSG 工法混合設備について（その 4）、ダム日本、No.813、pp.27-43、2012.7.
- 7) 牟禮輝久、若林常次、芦田哲也、森田真幸：地滑り対策工事における CSG 地すべり対策工の適用、ダム技術、No.322、pp.46～56、2013.7.
- 8) 上野信二、中瀬弓人、佐藤裕之、藤澤侃彦：当別ダムの設計・施工（その 6）－当別ダムにおいて工夫した施工技術－、ダム技術、No.298、pp.59-85、2011.7.
- 9) 藤崎勝利、黒沼出、川野健一、武井昭：デジタルカメラ画像を用いた CSG 材の粒度変動監視システム、ダム工学、Vol.23、No.1、pp.19-26、2013.1.

# 第3章

## コンクリートダム の 施工方法の発展経緯



## 第3章 コンクリートダムの施工方法の発展経緯

### 3.1 概要

我が国における近代的コンクリートダムの建設は、今からおよそ1世紀前から始まった。我が国最初のコンクリートダムは布引五本松ダム（兵庫県神戸市、堤高 33.3m）であり、英国人技師バルトンの支援のもと 1900 年に完成した（工期 1897 年～1900 年）。この時期は、欧米からのダム技術の導入や新しい材料であるコンクリートのダムへの適用が始まり、各地でコンクリートダムが建設されるようになったが、いずれも堤高 30m 程度であり、堤体材料は粗石コンクリートであった。

20 世紀に入ると、海外では欧米を中心とするコンクリートダム技術の急速な進歩によって、大規模な重力式ダムやアーチ式ダムが数多く建設された。特に米国では 1910 年代には堤高 100m 級のダムが建設されるようになり、設計、施工、材料ともに著しく発展した。この頃から堤体材料は粗石コンクリートから現在に近いコンクリートへと変わっている。

日本でも 20 世紀初頭からコンクリートダムの建設が始まり、中頃からは堤高 90m 程度の大規模な重力式コンクリートダムが数多く建設されるようになった。そして、コンクリートダムの大規模化とともにセメントの水和熱による温度ひび割れ問題が顕在化し、施工方法を始めとした種々の対策が講じられたのもこの頃からである。

本章では、まず、コンクリートダムの型式と施工方法を分類して示す。型式による分類は大きく重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダムに分けられるが、それぞれをさらに細分化する。施工方法は、大きく柱状工法と面状工法に分類されるが、柱状工法から面状工法へとトレンドが移ってきており、その背景にある工期、コスト、品質などの観点で施工方法の変遷を整理する。さらに、面状工法は使用するコンクリートの種類によって RCD 工法<sup>1)</sup>と拡張レヤー工法に分類できる。最後に、現在の主流工法である RCD 工法について、従来の RCD 工法から、最新の RCD 工法について技術的特徴を紹介し、最新の RCD 工法によるコンクリートダム施工の高速化・工期短縮に向けた技術的課題を整理する。

### 3.2 コンクリートダムの型式と施工方法による分類

コンクリートダムは、ダム型式およびコンクリート打設工法によって図-3.2.1 に示すように分類される。

本論文では、図-3.2.1 において赤字で示した「重力式コンクリートダム」および「RCD 工法」を対象とした。

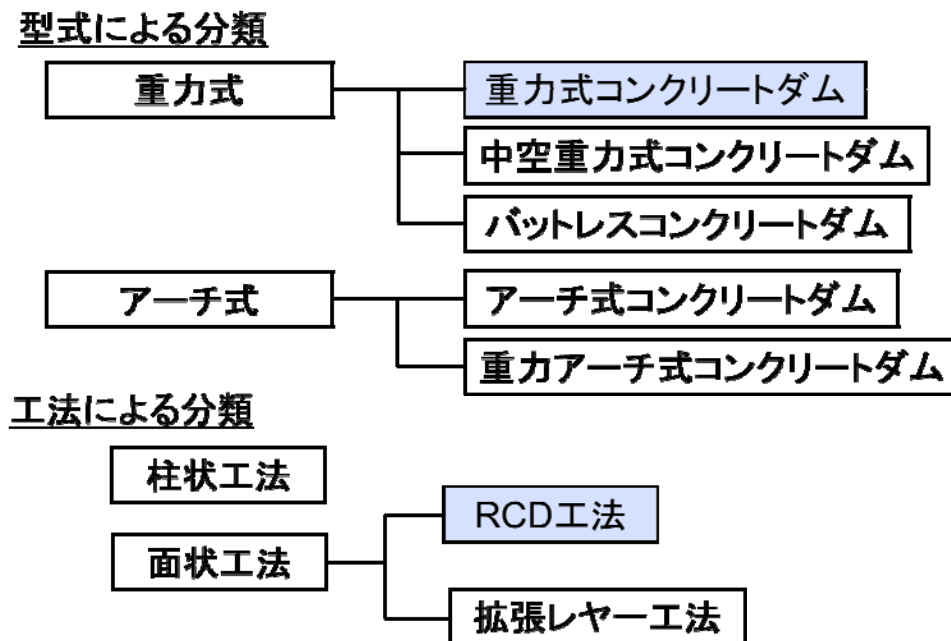


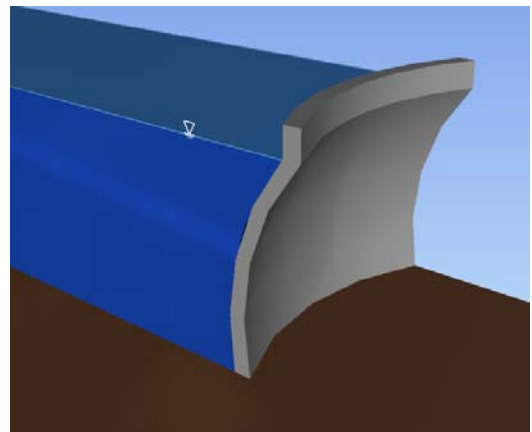
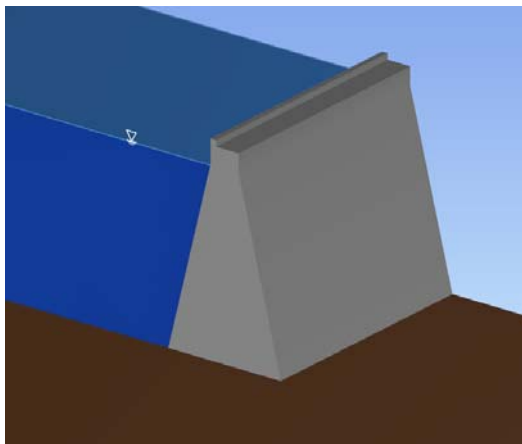
図-3.2.1 コンクリートダムの分類

#### 3.2.1 重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダム

ダムの型式は、堤体を構成する材料やダムの力学的な特性によって分類される。

まず堤体材料からコンクリートダムとフィルダムに大別される。コンクリートダムは弾性理論に基づいた設計方法が用いられ、フィルダムは材料の塑性的性質を考慮した設計方法が用いられる。このように、両者は異なった力学的体系の基に成り立つ構造物である。

コンクリートダムは、図-3.2.2 に示すように力学的な特性から重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダムに分類される。



図－3.2.2 ダム型式（左図；重力式コンクリートダム、右図；アーチ式コンクリートダム）

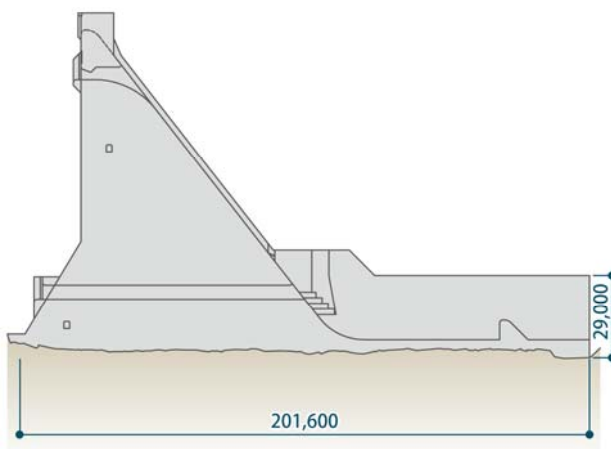
#### （１）重力式コンクリートダム

重力式コンクリートダムは、その構造によって重力式コンクリートダム、中空重力式コンクリートダム、バットレスダムに分類される。

##### ① 重力式コンクリートダム

重力式コンクリートダムは、貯水池の水圧荷重に対して堤体の自重によって抵抗し、これを基礎岩盤に伝達する構造物である（図－3.2.3、写真－3.2.1 参照）。このため、重力式コンクリートダム堤体は、三角形の大断面を有する構造物となる。

重力式コンクリートダムは、ダムの滑りや転倒に対して高い抵抗性を有するため、地震や降水量が多い我が国では最も適したダム型式とされ、地形などの制約の少ない型式であることなどから、現在最も多く建設されている。

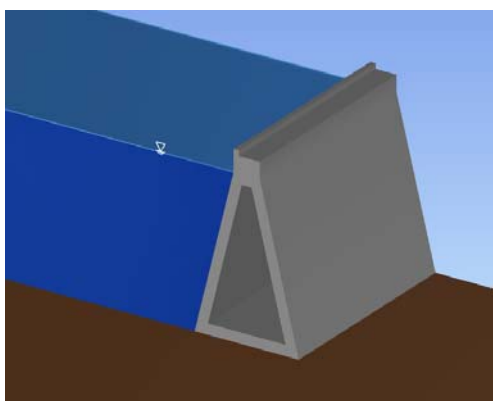


図－3.2.3 重力式コンクリートダムの断面例 写真－3.2.1 重力式コンクリートダム（湯西川ダム）

## ② 中空重力式コンクリートダム

中空重力式コンクリートダムは、重力式コンクリートダムと同様に貯水池の水圧荷重に対して堤体の自重によって抵抗し、これを基礎岩盤に伝達する構造物である（図－3.2.4、写真－3.2.2 参照）。外観も同様であるが、ダム堤体内部を中空にすることによってコンクリート量を節減する構造となっている。このため、重力式コンクリートダムに比べて耐荷力が小さく、大規模ダムへの適用は困難とされている。

我が国ではコンクリートが高価であった 1950～1960 年代にかけて建設されたが、現在ではコンクリートの価格が低下したこと、および構造が複雑化することによる型枠作業などの人件費が高いことなどの理由によって、1972 年に完成した内の倉ダム（新潟県、堤高 82.5m）を最後に建設されていない<sup>1)</sup>。

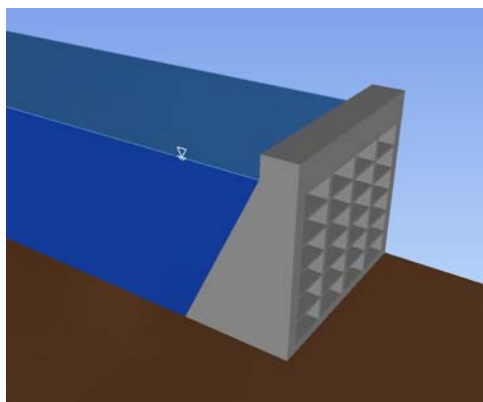


図－3.2.4 中空重力式コンクリートダムの概要 写真－3.2.2 中空重力式コンクリートダム  
（内の倉ダム）<sup>2)</sup>

## ③ バットレスダム

バットレスダムは、上流面の遮水壁に作用する貯水池の水圧荷重を、扶壁で支える構造物である（図－3.2.5、写真－3.2.3 参照）。河床に対して垂直の扶壁に加えて、垂直扶壁を保持する扶壁を水平に設置するため、堤体下流側の外観は格子状となる。

我が国では 1923 年に完成した笹流ダム（北海道、堤高 25.3m）に初めて適用された。当時はコンクリートが極めて高価であったため、コンクリート量を大幅に節減でき、工事費削減が期待できるバットレスダムは続々と建設されたが、時代とともにコンクリートの価格が低下したこと、扶壁のメンテナンスが必要であり長期的スパンでのコストパフォーマンスに劣ること、堤体の耐震性などの地震時挙動を考慮すると大規模なダムに適用できないことなどによって、1937 年に完成した三滝ダム（鳥取県、堤高 23.8m）を最後に建設されていない<sup>3)</sup>。



図－3.2.5 バットレスダムの構造概要

写真－3.2.3 バットレスダム（三滝ダム）<sup>4)</sup>

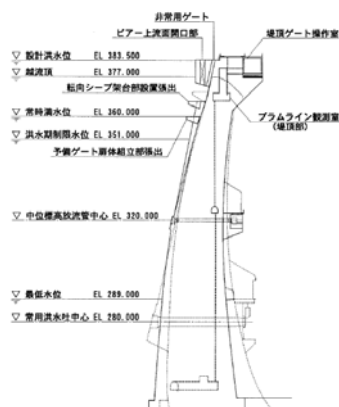
## (2) アーチ式コンクリートダム

アーチ式コンクリートダムは、その構造によってさらに、アーチ式コンクリートダムと重力式アーチダムに分類される。

### ① アーチ式コンクリートダム

アーチ式コンクリートダムは、図－3.2.6、写真－3.2.4に示すように、ダム堤体が上流側に湾曲したアーチ形状を成していることが特徴である。貯水池の水圧荷重をダム堤体のアーチ作用を利用して兩岸の基礎岩盤へ伝達し、基礎岩盤のせん断抵抗によって水圧荷重に抵抗する構造物である。このため、重力式コンクリートダムに比べて堤体の厚さが薄くなっている。

アーチ式コンクリートダムは堤体積を節減でき、重力式コンクリートダムに比べて経済性に優れることから、1950～1960年代には黒部ダム（富山県、堤高 186m）に代表されるような堤高 100m を超す大規模ダムが数多く建設された。なお、黒部ダムは現在でも我が国最大の堤高を誇っている。



図－3.2.6 アーチ式コンクリートダムの断面例



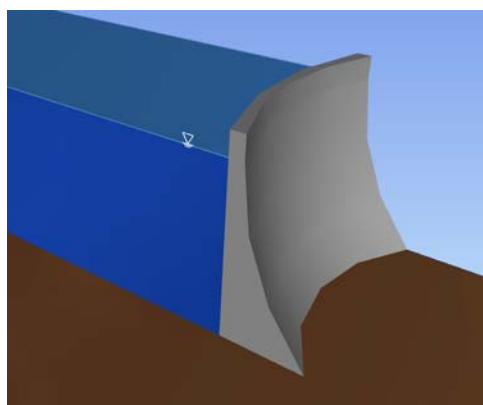
写真－3.2.4 アーチ式コンクリートダム  
（温井ダム）

しかしながら、現在はアーチ式コンクリートダムに適した堅硬な岩盤で構成される V 字型の峡谷のダムサイトが少ないこと、重力式コンクリートダムと比べて施工性が劣ることなどの理由によって、ほとんど建設されなくなっており、2001 年に完成した奥三面ダム（新潟県、堤高 116m）を最後に建設されていない<sup>5)</sup>。

## ② 重力式アーチダム

アーチ式コンクリートダムの堤体断面厚を大きくし、堤体自重による基礎岩盤との摩擦抵抗の増加および基礎岩盤へ作用する単位面積当りの荷重の低減を図った構造物である（図－3.2.7、写真－3.2.5 参照）。すなわち、重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダムの両方の特徴を備えたダムであり、アーチ式コンクリートダムに比べて基礎岩盤に要求される強度などを小さくでき、かつ重力式コンクリートダムよりも堤体積を節減することができる。

しかしながら、重力式アーチダムもアーチ式コンクリートダムと同様な理由（ダムサイトが少ない、施工性が劣ること）に加えて、堤体積の節減による経済性の効果が薄れたため、1974 年に完成した阿武川ダム（山口県、堤高 95m）を最後に建設されていない<sup>1)</sup>。



図－3.2.7 重力式アーチ式ダムの構造概要



写真－3.2.5 重力式アーチダム（阿武川ダム）<sup>6)</sup>

### 3.2.2 柱状工法と面状工法

コンクリートダム施工方法は、柱状工法と面状工法に大別される。

柱状工法は隣接する打設ブロック間に高低差を設け、1ブロックごとにコンクリートを打ち込み、くし状に打ち上げていく工法である。

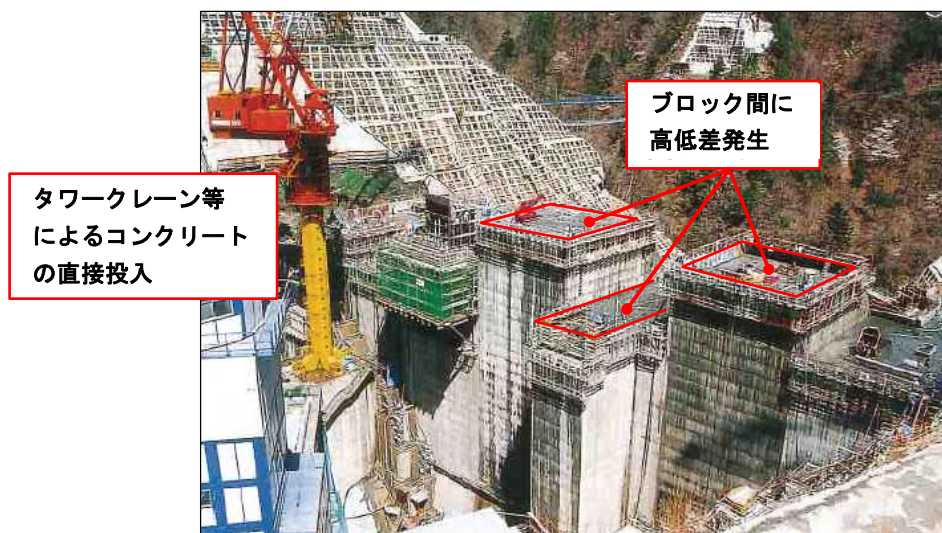
面状工法は隣接する複数のブロックにコンクリートを打ち込み、施工ブロック間に大きな高低差を付けることなく、概ね平面状に打ち上げていく工法である<sup>7)</sup>。

#### (1) 柱状工法

柱状工法は、コンクリートの温度応力によって発生するひび割れを抑制するために、収縮継目としてダム軸に平行方向の縦継目と直角方向の横継目を設けて幾つかのブロックに分割し、このブロックごとにスランプ3～5cmの有スランプコンクリートを打ち込む工法である。

ブロックの大きさはダム軸方向には15m、上下流方向には30～50m程度とするのが一般的である。また、施工途中は各ブロックが柱状に立ち上がり、型枠などの施工制限からブロック間で5～12m程度の段差ができる（写真－3.2.6参照）。

なお、柱状工法では、ブロックごとにパイプクーリングによる温度制御が行われ、ブロックが収縮した段階で各ブロックの一体化を図るために、縦継目に対してジョイントグラウチングが施工される。



写真－3.2.6 柱状工法による施工状況（深城ダム）

柱状工法は、施工の機械化・大型化や施工方法の改善が大きく図られる以前の1960年代までは、一般的に採用されてきた。これは、コンクリートダムの建設が一般のコンクリート工事と比較して、以下の制約条件を有していることが挙げられる。

- ・施工量が膨大であること（数十万  $\text{m}^3$ ～百万  $\text{m}^3$ を超える）

- ・施工範囲が三次元的な広がりを持ち、広範囲に及ぶこと
- ・マスコンクリートであるため、温度応力の観点から施工制約が生じること
- ・ダム各部毎にコンクリートの要求品質が異なるため、多種類の配合区分が設けられること
- ・堤体内に種々の構造物が設置され、施工上の制約が生じること

また、当時は空中から打設現場までクレーンなどによってコンクリートを運搬し、打設する施工が一般的であった。このため、施工エリアをカバーできるように堤体の規模や形状に応じた設備（ケーブルクレーンなど）が開発された。

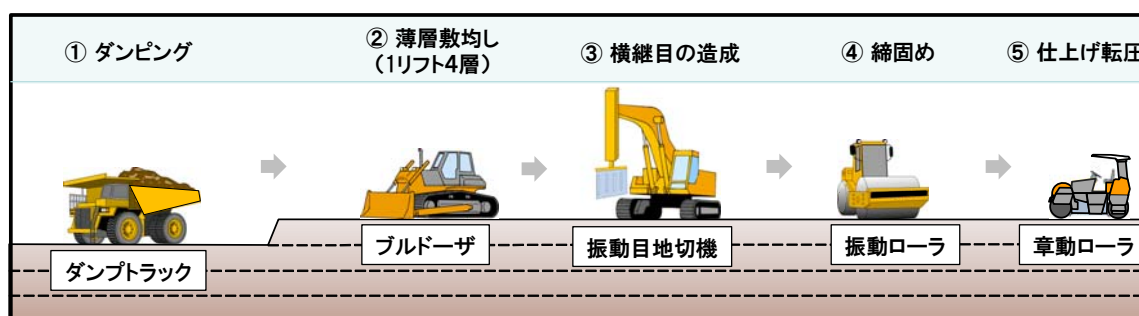
## （２）面状工法

面状工法は、使用するコンクリートによって、RCD（Roller Compacted Dam Concrete）工法と拡張レイヤー工法（ELCM、Extended Layer Construction Method）とに分類される。

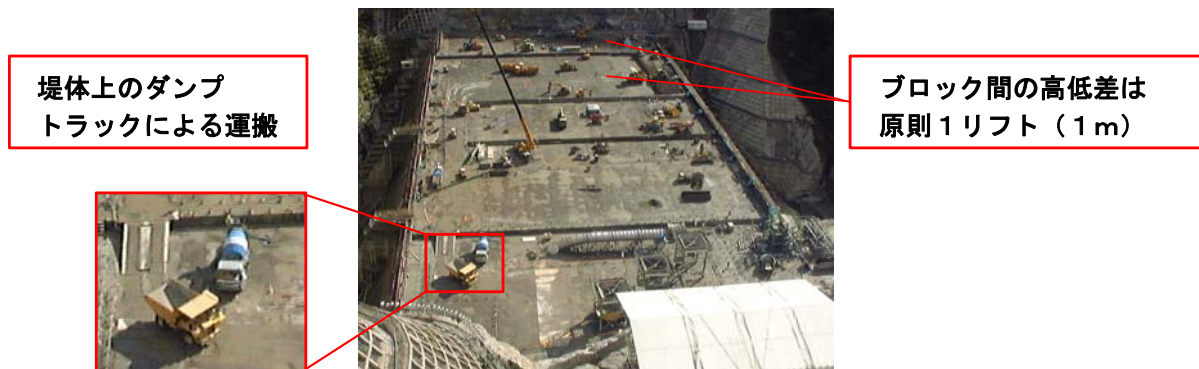
RCD 工法は超硬練り（ゼロスランプ）の貧配合コンクリートを、拡張レイヤー工法はスランプ 3 cm 程度の有スランプコンクリートを使用する。また、面状工法はブロック間に極力リフト差を設けず、面状に打ち上げるため、堤体上でのコンクリートの運搬にダンプトラックなどを使用することが可能である。このため、バッチャープラントから堤体までの主なコンクリート運搬設備は、堤体上でのダンプトラック運搬と組合せが前提となり、重力式コンクリートダムの施工方法を一変させることとなった<sup>8)</sup>。

### ① RCD 工法

RCD 工法は図－3.2.8 および写真－3.2.7 に示すように、ダンプトラックなどで打設箇所まで運搬された超硬練りの貧配合コンクリートをブルドーザで敷き均し、振動目地切機などで横継目を設けた後、振動ローラで締固めを行う工法である。一連の作業は汎用機械を用いて連続して行うことが可能であり、大量打設とこれによる工期の短縮および工事費の低減などを図ることができる。



図－3.2.8 RCD 工法（100cm/1 リフト）における打設順序の例<sup>4)</sup>



写真－3.2.7 RCD 工法による施工状況（滝沢ダム）

RCD 工法の開発が始まった 1970 年代半ばには、世界各地で大規模ダムの建設が盛んに行われていた。この時代の世界のコンクリートダムにおける技術開発目標は、施工の合理化による経済性の向上に焦点が当てられた。すなわち、いかに省力化、高速化して本体打設費の低廉化を図るか、そして建設コストの縮減を図ることが求められた。また、セメントなどの材料費の低廉化の一方で、高騰しつつあった労務費の縮減が重要視されるようになり、コンクリートの硬練り化、および施工の機械化などの技術開発が急速に進んだ。

このような世界の技術開発競争の中で、我が国で開発された工法が RCD 工法であり、1978 年 10 月に島地川ダム（山口県、堤高 89m）の本体打設に初めて適用された<sup>9)</sup>。

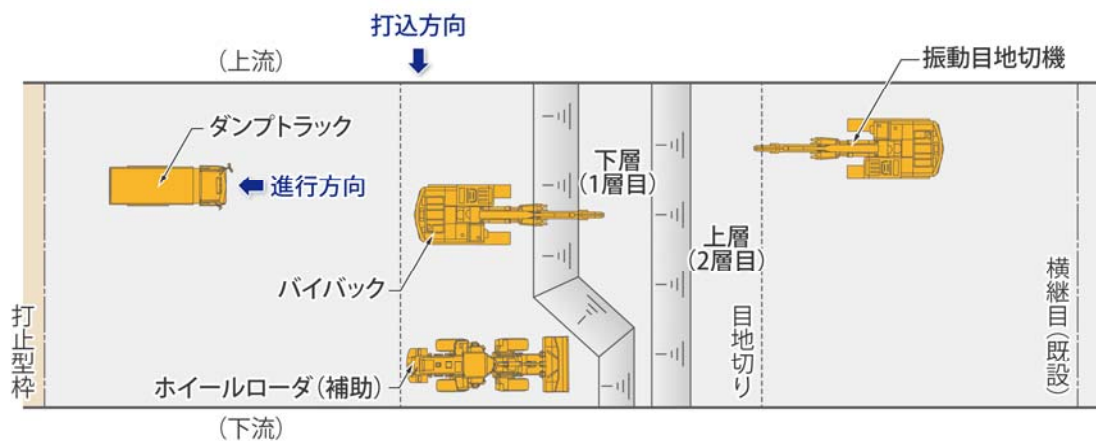
その後、1983 年には大規模ダムである玉川ダム（秋田県、堤高 100m）本体打設に適用されるなど、1980 年代は国内十数ダムの施工を通して一層の合理化と技術開発が進められ、RCD 工法は中～大規模重力式コンクリートダムの主流の施工方法となった。

## ② 拡張レイヤー工法（ELCM）

拡張レイヤー工法は、Extended Layer Construction Method の頭文字をとって ELCM とも呼ばれる。RCD 工法と同様に従来の重力式コンクリートダムの要求性能を変えずに、施工方法の合理化を目的としたものである。この工法は、隣接する複数ブロックに有スランブコンクリートを打設し、振動目地切機などで打設ブロック内に横継目を設置して堤体を面状に打ち上げる工法であり、安全性に優れた連続施工が実現できる。拡張レイヤー工法は、ブルドーザによる敷均しを必要としないため、RCD 工法に比べて比較的狭いヤードで施工可能である一方で、打設速度は低くなる。

この工法は 1991 年に完成した布目ダム（奈良県、堤高 72m）において初めて採用され、以降、堤体積が 10 万～30 万 m<sup>3</sup> 程度の多くのダムにおいて本体施工に採用されている<sup>10)</sup>。現在では内部コンクリート量が少なく RCD 工法に適さない中～小規模の重力式コンクリートダムや、狭いヤー

ドで施工可能という特徴を活かし、RCD 工法で施工されるダムの高標高部（施工ヤードが狭く RCD 工法が適用できない）における施工方法となっている。



図－3. 2. 9 拡張レヤー工法における打設順序の例<sup>5)</sup>



写真－3. 2. 8 拡張レヤー工法による施工中の滝沢ダム

### 3.3 RCD 工法の特徴

前節に記述したとおり、従来の重力式コンクリートダムは、施工能力や温度ひび割れ制御の観点から、主に「柱状工法」によって構築されてきた。その後、従来のダムコンクリートと比べて単位セメント量、単位水量を大幅に低減した超硬練りの貧配合コンクリートを用いることで、水和熱抑制による温度ひび割れを制御するとともに、ブルドーザ敷均し、振動ローラ締固めなどの施工の合理化を図った工法としてとして「RCD 工法」<sup>1)</sup>が開発された。

RCD 工法は、ダンプトラックなどによるコンクリート運搬、ブルドーザによる敷均し、振動目地切機による横継目の設置および振動ローラによる締固めの各工程で行われるものであり、それぞれの作業を汎用機械で行うことによって、大量施工を可能としている。

本節では、まず、RCD 工法に用いられる内部コンクリートについて概説し、続けて、各工程の方法および特徴について示す。

### 3.3.1 RCD 用コンクリート配合

RCD 工法の内部コンクリートには、RCD 用コンクリートと呼ばれる超硬練りの貧配合コンクリートが使用される。RCD 用コンクリートには、施工上の観点などから以下の条件が要求される。

- ① 単位セメント量が少ないセメントペーストで細骨材の空隙を満たすこと、ならびに単位セメント量が少ないモルタルで粗骨材の空隙を満たすこと
- ② 従来のコンクリートと同様に内部応力、せん断力、引張力などに耐えうる強度、密度を有すること
- ③ 締固め前のコンクリート上のダンプトラックなど重機械の走行を可能にするトラフィカビリティと、振動ローラの締固めに適したコンシステンシーを有すること
- ④ 材料分離が少なく締固めが容易であること
- ⑤ 従来のコンクリートに比べて、敷均しから締固めまでの時間を要するため、凝結時間が長いこと
- ⑥ パイプクーリングなどの煩雑な作業を必要とせずに温度ひび割れを抑制するために、単位セメント量が少なく、かつ水和による発熱が少ないこと

以上の条件を満足する一般的な RCD 用コンクリートの配合上の特徴を以下に示す<sup>2)</sup>。

- ① 中庸熟ポルトランドセメントにフライアッシュを 20～30wt% 添加した混合セメントが用いられ、単位セメント量は 120～130kg/m<sup>3</sup> である
- ② 良好な施工が可能な範囲で強度が最大となるように単位水量が設定される
- ③ 上記の結果として VC 値が 15～20 秒程度となることが多い
- ④ 粗骨材の最大寸法は 80～150mm である
- ⑤ 細骨材率は最小の単位セメント量と単位水量において所要のコンシステンシーが確保されるように定められるが、その際  $\alpha$  値 (1.1～1.3 程度) と  $\beta$  値 (1.3～1.5) も指標とされる ( $\alpha$  値：細骨材空隙に対するペースト容積、 $\beta$  値：粗骨材空隙に対するモルタル容積)

表－3.3.1 RCD 用コンクリートの配合

ダム名称	玉川ダム	宮ヶ瀬ダム	滝沢ダム	嘉瀬川ダム	湯西川ダム	五ヶ山ダム
単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) W:水 C:セメント F:フライアッシュ	W=95 C+F=130	W=90 C+F=130	W=84～85 C+F=120	W=92～99 C+F=120 ～140	W=83～92 C+F=130	W=101 C+F=130
F/C+F (%)	30	30	30～40	30	30	20
粗骨材の最大寸法 (mm)	150	150	80	80	80	80
s/a(細骨材率) (%)	30	30	32	26～29	29～31.5	34
VC 値(秒)	10～30	10～25	10～30	10～30	10～30	10～30

### 3.3.2 製造方法

ダムコンクリートの製造設備は、重量計量でバッチ処理されるバッチャープラントが一般的に使用され、そのミキサ型式には以下の3種類がある。

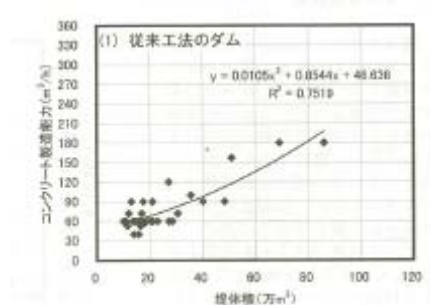
- ① 重力式（傾胴式ミキサ）
- ② 2軸強制式（パグミル形ミキサ）
- ③ 強制攪拌式（パン形ミキサ）

従来のダムコンクリートの製造設備には、粗骨材最大寸法が 150mm 程度の大粒径の骨材を含むコンクリートの練混ぜが容易で、所要電力が小さく、保守管理も容易な重力式ミキサが多く採用されてきた。しかし、RCD 工法では超硬練りの貧配合コンクリートを短時間で大量に製造する必要があるため、写真-3.3.1 に示すような2軸強制式ミキサを採用するのが一般的である。このミキサは、摩耗による部品の損耗および所要電力が大きいことなどの不利な面もあるが、粗骨材の分離が少なく、短時間で良質かつ均一なコンクリートが得られるという大きな利点がある。

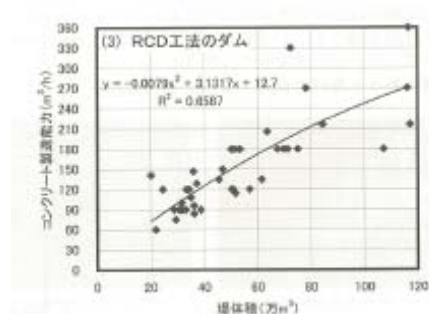


写真-3.3.1 2軸強制式ミキサの例

従来工法と RCD 工法を対象に、ダム堤体積とコンクリート製造能力の関係を整理した例を図-3.3.1 に示す。これによると、RCD 工法の場合、同規模の従来工法によるダムコンクリート製造設備よりも大きな製造能力を有する製造設備が設置されている。



(a) 従来工法



(b) RCD 工法

図-3.3.1 従来工法と RCD 工法における堤体積とコンクリート製造能力の関係例<sup>3)</sup>

### 3.3.3 運搬方法

柱状工法で建設される重力式コンクリートダムは、堤体を横継目や縦継目によって分割して柱状式に打設する。このため、コンクリートの運搬においては、各ブロック間に高低差が生じ、隣接ブロックへの平面的な移動が不可能であるため、クレーン設備とバケットを用い、直接、打設ブロックにコンクリートを投入する方法が用いられる。コンクリートの主な運搬設備としては、軌索式ケーブルクレーン、走行式ケーブルクレーン、走行式ジブクレーン、タワークレーンおよびクロールクレーンなどが挙げられる<sup>4)</sup>。

一方、「RCD 工法」や「拡張レヤー工法」などの面状工法は、堤体施工面に段差を極力設けずに面状に施工するため、広い打設面上をダンプトラックなどの施工機械が自由に走行できるようになり、堤外・内でのコンクリートの運搬方法の自由度が広がった。例えば、面状工法の場合、堤外から堤体施工面への運搬路が容易に確保できれば、バッチャープラントで製造されたコンクリートを直接ダンプトラックに積み込んで運搬することができる。ここで、堤外運搬設備とはバッチャープラントから堤体までの運搬設備を指し、堤内運搬設備とは堤体施工面内のホッパーステーションからコンクリート打設箇所、あるいは堤体乗込み設備から打設箇所までの運搬設備を指す。

堤外運搬設備については、従来から用いられるクレーン設備のほかに、上記のダンプトラック運搬やインクライン、ベルトコンベヤなどが採用されてきた。最近では、河床付近の低標高部からコンクリートを運搬する設備として、テルハ型クレーンやライジングタワー、タワーベルトコンベヤなどの新機械も導入されている。

また、堤内運搬設備については主としてダンプトラックが用いられている<sup>5)</sup>。

これらの運搬状況の例を写真－3.3.2に示す。



宮ヶ瀬ダムにおける  
ダンプ搭載型インクライン（２機）



滝沢ダムにおける循環バケット（写真 上）と  
ケーブルクレーン（３機、写真 下）



徳富ダムにおけるダンプトラック直送方式

写真－3.3.2 RCD 工法におけるコンクリート運搬状況の例 <sup>6) 7) 8)</sup>

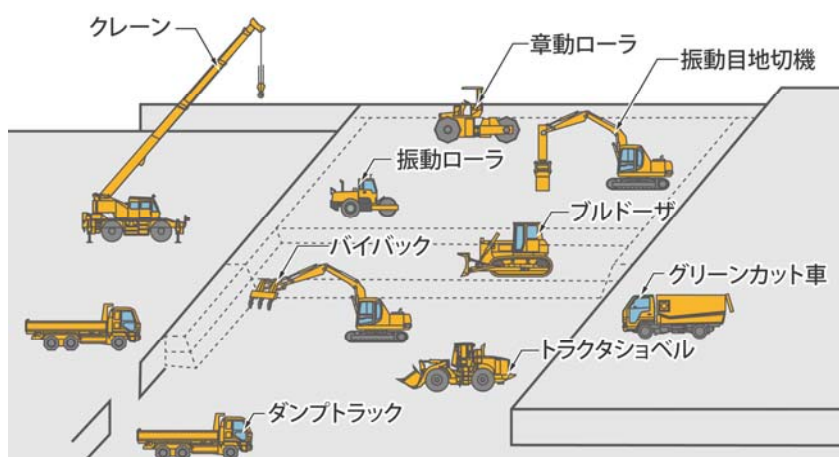
### 3.3.4 打込み方法

#### (1) RCD 工法の特徴

RCD 工法におけるコンクリート打込み方法の特徴を以下に示す。

- ① 超硬練りの貧配合コンクリート（RCD 用コンクリート）をブルドーザで敷き均し、振動ローラで締め固める
- ② 岩着部、外部および打止め型枠用コンクリートには、通常の有スランブコンクリートを用いる
- ③ 打設は層厚 0.75～1.0m／1 リフトの面状工法とし、同一水平面を同時に打設する
- ④ 横継目はコンクリートの打込み（敷均し）後、振動目地切機を用いて設ける
- ⑤ コンクリートの堤外運搬設備はダムサイトの特性を考慮した運搬設備を採用し、堤内運搬設備には一般にダンプトラックを採用する

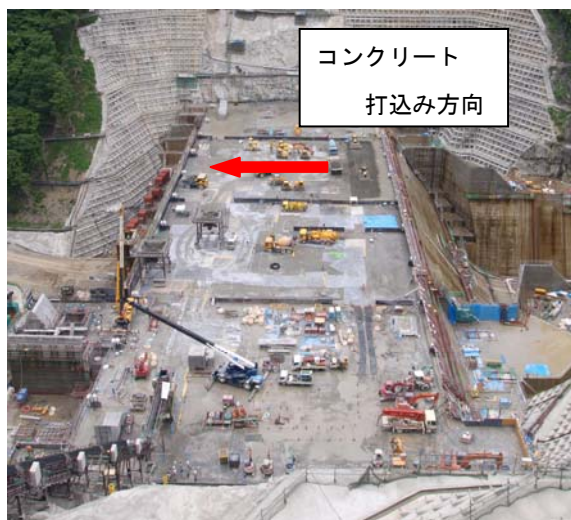
RCD 工法におけるコンクリートの打込み状況の例を図－3.3.2 に示す。



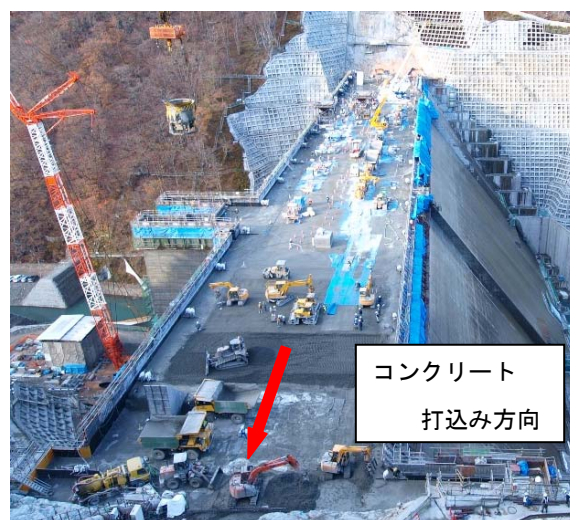
図－3.3.2 RCD 工法におけるコンクリートの打込み状況の例 <sup>9)</sup>

RCD 工法では、超硬練りの貧配合コンクリート（RCD 用コンクリート）を面状に広範囲に敷き均しながら打ち込んでいくため、コンクリートの練混ぜから締固めまでに長時間を要する。長時間経過したコンクリートはコンシステンシーが増大して締固めが困難な状態になるが、これを防ぐために一般的には3～4時間の規制時間を設け、この時間内に締固めを行うこととしている。このような条件において、効率のかつ品質に配慮した打込みを行うために、打設能力や堤体の平面形状などを勘案して打込み方向や打設レーンの長さ、レーン幅が計画される。

コンクリートの打込み方向は、写真－3.3.3 に示すように、低位標高部では上下流方向、中位・高位標高部ではダム軸方向とするのが一般的である。



(a) 低位標高部における打込み状況



(b) 高位標高部における打込み状況

写真－3.3.3 コンクリートの打込み状況

## (2) コンクリートの打込み（敷均し）・締固め

コンクリートの敷均しには、11～18t 級湿地ブルドーザを使用する例が多い。なお、湿地ブルドーザとは、湿地でも対応できるように、履帯幅を広くしたブルドーザである。RCD 用コンクリートは粉体量（セメント量）が少なく、かつゼロスランプコンクリートであるため、ダンピング時（荷降ろし時）に粗骨材が分離しやすい。特に敷均し厚を大きくすると、ブルドーザによって敷均しを行った後も大粒径の粗骨材が集中した箇所が部分的に残り、振動ローラによって転圧しても骨材の間にモルタルが十分に満たされないことがある。これを防止するため、RCD 工法では一般に 1 リフト（0.75m～1.0m）を 3～4 層（0.25m/層）に分けて敷均しを行う薄層敷均し工法を用いる。薄層敷均し工法は、粗骨材などの分離を極力防止するだけでなく、ブルドーザの走行によって敷均し時にも転圧効果が得られるという利点もある。敷均し層数は、リフト厚に応じて表－3.3.2 に示すように設定される。

近年では、振動ローラに締固め効果が大きい 11t 級振動ローラ（酒井重工業(株)製 SD-451 型）が使用されるようになり、リフト厚 1 m、4 層敷き均しが採用される事例が多い<sup>10)</sup>。

写真－3.3.4 に RCD 用コンクリートの敷均し・締固めの状況を示す。

表－3.3.2 リフト層と敷均し層数

リフト厚	層数
50cm	2～3
75cm	3～4
100cm	4



写真－3.3.4 RCD 用コンクリートの敷均し・締固めの状況（湯西川ダム）

### （3）横継目の造成

堤体内部に発生する温度ひび割れの防止を目的とする横継目は、15m 程度の間隔で設ける必要がある。しかし、RCD 工法の場合、複数ブロックに渡ってコンクリートを連続的に打設するため、従来工法のように型枠で横継目を設けることができない。

このため、ブルドーザによる敷均し後に、振動目地切機を使って横継目を造成する。振動目地切機（写真－3.3.5）は 0.4～0.6m<sup>3</sup> 級の油圧ショベルをベースマシンとし、ブレード上部に振動機を取り付け、ブレードをコンクリートに振動圧入する構造である。振動機は起振力 16t 程度のものが一般的に使用されている。また、形成された横継目が再び閉じてしまうことを防止するため、厚さ 0.27mm×幅 91.4cm の垂鉛引鉄板を 10cm 程度の空間隔で挿入するのが一般的となっている<sup>10)</sup>（写真－3.3.6 および写真－3.3.7）。



写真－3.3.5 振動目地切機（五ヶ山ダム）



写真－3.3.6 亜鉛引鉄板（湯西川ダム）



写真－3.3.7 目地切機で横継目の造成・亜鉛鉄板挿入状況（湯西川ダム）

#### (4) コンクリートの締固め

##### a) 振動ローラ転圧

RCD 用コンクリートの締固めには振動ローラを用いる。RCD 工法開発当初は、7t 級振動ローラ（ボマーク社製、BW200）が使用されたが、その後 RCD 工法専用機として 10t 級振動ローラ（酒井重工業(株)製、SD450）が開発され、リフト高さ 1.0m が可能となった。現在では、11t 級振動ローラ（酒井重工業(株)製、SD451）が主力となっている<sup>10)</sup>。

RCD 用コンクリートの練混ぜから締固め開始までの時間は早いほどよく、長時間放置すると十分な締固めが困難となる。RCD 用コンクリートを練り混ぜてから締固め開始までの許容時間は、コンクリートの配合や気象条件などによって差があるため試験施工による確認から決定されるが、一般的には 3～4 時間の範囲内で締固めを行うこととしている。

振動ローラの転圧回数についても、現場ごとに試験施工を実施して設定するが、これまでの実績では以下のように設定されることが多い。

##### ➤ 7t 振動ローラの場合

1 リフト厚 50cm：無振動転圧 1 往復＋振動転圧 3 往復

1 リフト厚 75cm：無振動転圧 1 往復＋振動転圧 6 往復

##### ➤ 11t 振動ローラの場合

1 リフト厚 75cm：無振動転圧 1 往復＋振動転圧 5 往復

1 リフト厚 100cm：無振動転圧 1 往復＋振動転圧 6 往復

なお、振動ローラの転圧では、未転圧部分を発生させないように隣接する締固めレーンを 20cm 程度重ねて（ラップさせて）走行する。

写真－3.3.8 に振動ローラによる転圧状況を、写真－3.3.9 に振動ローラ転圧後の転圧面の状況を、また写真－3.3.10 に振動ローラの転圧のラップ検測状況をそれぞれ示す。



写真－3.3.8 振動ローラによる転圧状況（湯西川ダム）



写真－3.3.9 振動ローラ転圧後の転圧面（五ヶ山ダム）



写真－3. 3. 10 振動ローラの転圧のラップ検測（五ヶ山ダム）

#### b) 仕上げ転圧

振動ローラによる転圧面は、やや荒々しい状態となっており、このままグリーンカットを行うと、カット量が増加し、かつ小粒径の骨材も緩みやすくなる。

このため、振動ローラによる転圧完了後、仕上げ転圧が実施される。仕上げ転圧は章動ローラ（4t 級）を使用して、ローラ表面に少量の水を散布しながら転圧を行い、転圧面を平滑に仕上げるのが一般的である（写真－3. 3. 11 および写真－3. 3. 12）。

一方、転圧面に若干の加水することになり、弱層を形成する可能性があるが、影響範囲は表面数 mm 程度であり、グリーンカットでその弱層は剥ぎ取られるため、コンクリートリフト間の付着性能には問題は無いとされている。

なお、章動ローラとは水平振動ローラのことであり、遠心力が前後方向と左右方向に発生する。上下方向の打撃は無く、路面をこすりながら転圧する機械であり、骨材の破壊や過転圧の心配がないことが特徴とされている<sup>11)</sup>。



写真－3.3.11 章動ローラによる転圧状況（滝沢ダム）



写真－3.3.12 仕上転圧後の転圧面の写真（五ヶ山ダム）

#### （５）異種配合境界部の施工

RCD 工法を採用しても、以下に示す箇所には有スランプコンクリートを打ち込む必要がある。

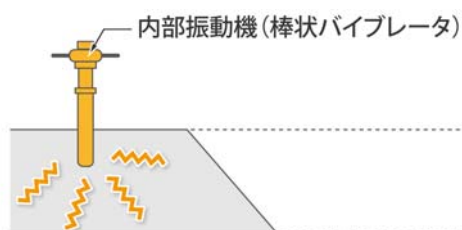
- ・ 上下流の外部コンクリート
- ・ 左右アバット部岩着コンクリート
- ・ 構造物周りのコンクリート
- ・ 打止め型枠際の内部コンクリート

これらの箇所は先行して有スランブコンクリートを打ち込み、その後 RCD 用コンクリートを打ち込むのが一般的である。また、有スランブコンクリートと RCD 用コンクリートとの境界部を確実に施工するために、**図－3.3.3**に示す順序で締め固めを行う。

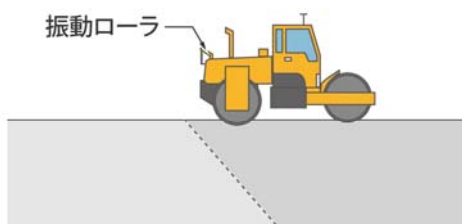
なお、異種配合境界部は不陸が生じやすく、グリーンカットや清掃が不足することが予想されるため、できるだけ平坦に仕上げる必要がある。また、境界部の施工品質を確保するために、先行して打設する有スランブコンクリートの練混ぜから境界部の締め固め完了までの時間は4時間以内とするのが一般的である。

これらの箇所の打込みは、打設速度が遅い有スランブコンクリートが、RCD 用コンクリートの打設を一定時間拘束してしまう。これが全体打設効率の低下の大きな要因となっており、RCD 工法の更なる合理化に対する課題となっている。

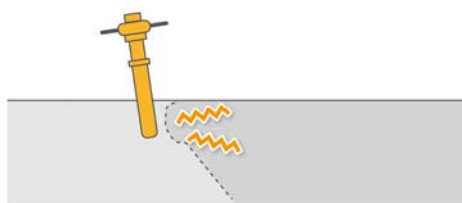
- ①外部コンクリートである有スランブコンクリートを先行して打ち込み、内部振動機（棒状バイブレータ）で締め固める。



- ②内部コンクリートである RCD 用コンクリートを打ち込む。その際に、有スランブコンクリートとの境界面を丁寧に敷き均し振動ローラで締め固める（写真－3.3.13）。



- ③境界部を内部振動機（棒状バイブレータ）で有スランブコンクリート側から境界線に沿って締め固める（写真－3.3.14）。



図－3.3.3 異種配合コンクリートの境界部の施工手順<sup>12)</sup>



写真－3.3.13 境界部の振動ローラによる締固め状況（湯西川ダム）



写真－3.3.14 境界部の内部振動機（バイバック）による締固め状況（湯西川ダム）

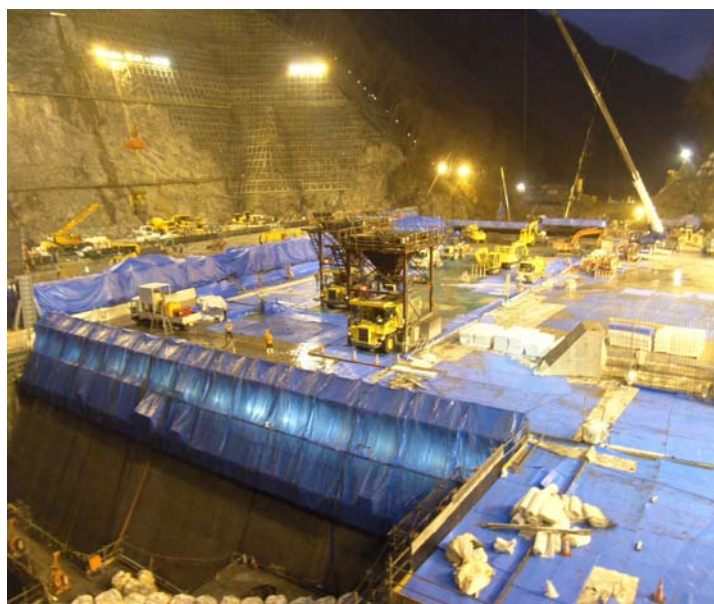
### 3.3.5 養生方法

#### (1) 上下流面の養生

コンクリートダムの上下流面の養生として、一般に湿潤養生と保温養生が行われる。

湿潤養生はコンクリート表面が凍結する冬期を除き、連続的に実施されており、上下流面に設置されるスライドフォームなどの型枠を利用し、型枠足場の下端に取り付けた有孔管からコンクリート表面に散水する。

一方、保温養生は主に冬期に行われる。保温養生の方法としては、**写真－3.3.15**に示すように型枠足場外側を覆うシート内側に投光器を設置したり、型枠メタルフォームの外側に断熱材を設置する。また、RCD工法や拡張レヤー工法などの面状工法では寒中の施工部において、上下流面に水平方向のひび割れが発生する事例があることから、上下流面の型枠スライド後も、スライド型枠下部に発泡ポリエチレンマットを設置するなどの保温養生が行われ、コンクリート表面の保温養生期間を確保する事例がある。



写真－3.3.15 冬期の保温養生状況の一例（湯西川ダム）

#### (2) 打設面の養生

従来工法である「柱状工法」では、コンクリート打設面の湿潤養生として、打設終了後に打設面に湛水する湛水養生（湛水約10cm）が標準的であった。

一方、「面状工法」の場合は、コンクリート打設後も隣接ブロックの打設などに伴う作業（例えば、ダンプトラック走行など）が必要になるため、湛水養生を実施することができない。このため、**写真－3.3.16**に示すようなスプリンクラーやホースなどを使った散水養生が行われる。

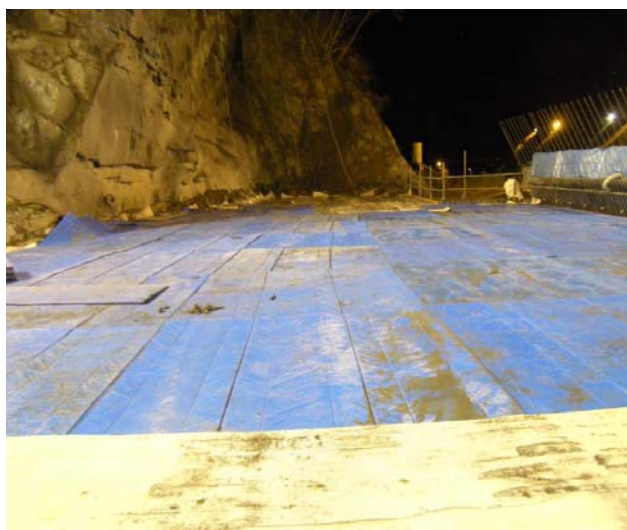
このほか、打設時期あるいは打設箇所に応じて、以下のような養生が行われる。

- ① 冬期において外気温の低下に伴う凍結が考えられる場合には、写真－3.3.17に示すように断熱シートやブルーシートで打設面を覆うなどの保温養生を兼ねた養生が実施されている。
- ② 監査廊出入り口、エレベータシャフトなどの開口部では、冷風が侵入し、コンクリート表面が急冷されてひび割れが発生することがあるため、打込み直後だけでなく、常時シートで覆うことや、門扉の設置を行う。また、内部に温風器を設置するなど、温度降下を防ぐ対策を実施することもある。
- ③ 冬期休止、年末年始休止のように中長期間放置する場合は、面状工法も含めて湛水養生をする、砂・断熱材などを敷設するなどの保温養生を実施する。

最近では、後述する「最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）」の特徴を利用し、写真－3.3.18 に示すように、外部コンクリートを内部コンクリートよりも 10cm 程度低く打設して、上下流外部コンクリートの湛水養生を実施する例もある。



写真－3.3.16 スプリンクラーによる湿潤養生の一例（湯西川ダム）



写真－3. 3. 17 断熱シートによる保温および湿潤養生



写真－3. 3. 18 外部コンクリート打継面の湛水養生の例（湯西川ダム）

### 3.4 最新の RCD 工法

#### 3.4.1 最新の RCD 工法の概要

最新の RCD 工法として、巡航 RCD 工法（Cruising RCD construction method）が開発され、重力式コンクリートダム建設に適用されている。

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）は 2006 年度から技術開発が進められ、嘉瀬川ダム（国土交通省九州地方整備局、佐賀県、2011 年、2.8 参照）、湯西川ダム（国土交通省関東地方整備局、栃木県、2012 年、2.9 参照）、津軽ダム（国土交通省東北地方整備局、青森県、建設中）でのダム本体工事への適用を経て、現在は五ヶ山ダム（福岡県、建設中、2.11 参照）でより一層の合理化を図りながら適用されている<sup>1)</sup>。

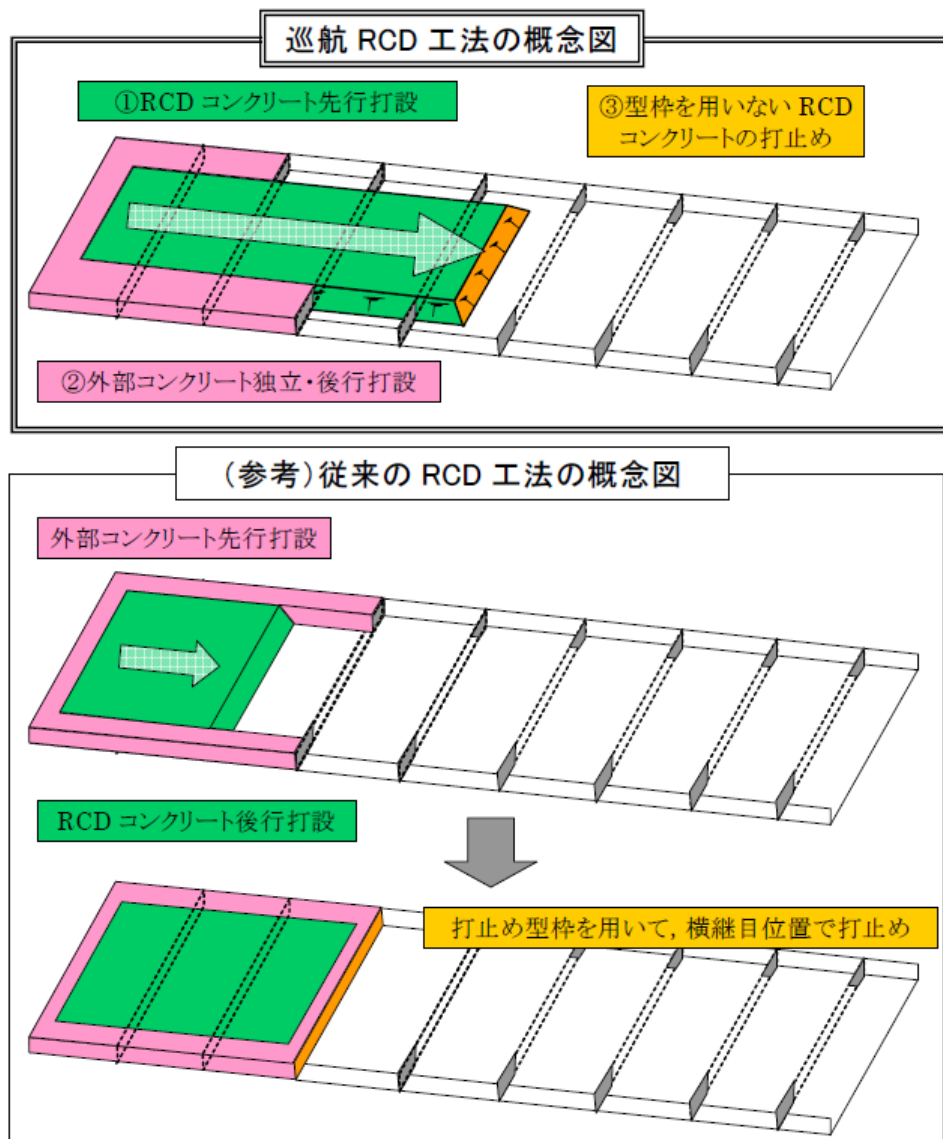
巡航 RCD 工法が適用された重力式コンクリートダムの諸元を表-3.4.1 に示す。

表-3.4.1 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）が適用されたダムの諸元（2015 年現在）

名称		嘉瀬川ダム	湯西川ダム	津軽ダム	五ヶ山ダム
		カセガワ	ユニシガワ	ツガル	ゴカヤマ
ダム事業者		国土交通省 九州地方整備局	国土交通省 関東地方整備局	国土交通省 東北地方整備局	福岡県
所在地		佐賀県佐賀市	栃木県日光市	青森県中津軽郡西目屋村	福岡県筑紫郡那珂川町
河川名		嘉瀬川水系嘉瀬川	利根川水系湯西川	岩木川水系岩木川	那珂川水系那珂川
完成		2011年	2012年	建設中	建設中
本体施工者		鹿島建設・青木あすなろ建設・松尾建設	鹿島建設・清水建設	安藤ハザマ・西松建設	鹿島建設・飛島建設・松本組
目的		洪水調節，河川維持用水，灌漑用水，上水道用水，工業用水，発電	洪水調節，河川維持用水，灌漑用水，上水道用水，工業用水	洪水調節，河川維持用水，灌漑用水，上水道用水，工業用水，発電	洪水調節，河川維持用水，上水道用水
ダム堤体	堤高	97 m	119 m	97.2 m	102.5 m
	堤頂長	454.5 m	320 m	342 m	556 m
	堤体積	941,000 m <sup>3</sup>	1,060,000 m <sup>3</sup>	759,000 m <sup>3</sup>	935,000 m <sup>3</sup>
貯水池	集水面積	128.4 km <sup>2</sup>	102 km <sup>2</sup>	172 km <sup>2</sup>	18.9 km <sup>2</sup>
	湛水面積	2.7 km <sup>2</sup>	2.0 km <sup>2</sup>	5.1 km <sup>2</sup>	1.3 km <sup>2</sup>
	総貯水容量	7,100万 m <sup>3</sup>	7,500万 m <sup>3</sup>	14,090万 m <sup>3</sup>	4,020万 m <sup>3</sup>
	有効貯水容量	6,800万 m <sup>3</sup>	7,200万 m <sup>3</sup>	12,720万 m <sup>3</sup>	3,970万 m <sup>3</sup>
備考					

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）とは、従来の RCD 工法をより効率化・高速化し、高い打設速度を達成した施工方法であり、以下の 3 つの施工上の特徴を有している（図-3.4.1 参照）。

- ① 内部コンクリートである RCD 用コンクリートの先行打設
- ② 外部コンクリートである有スランブコンクリートの独立・後行打設
- ③ 型枠を用いない RCD 用コンクリートの打止め



図－3.4.1 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の概念図<sup>1)</sup>

この 3 つの特徴は従来の RCD 工法の課題を解決したものであり、これにより以下の 5 つの効果がもたらされている。

- ① 1 リフトの打設速度の向上
- ② 1 リフトの打上がり速度の向上（工期短縮）
- ③ 施工性の向上
- ④ 施工安全性の向上
- ⑤ 外部コンクリートの品質向上

本項では、最新の RCD 工法である巡航 RCD 工法の開発経緯や施工方法の特徴、ならびに得られた効果などについて記述する。

### 3.4.2 最新の RCD 工法の開発経緯

#### (1) 従来の RCD 工法の課題

従来の RCD 工法の課題は主に以下の 3 つが挙げられる。

- ① 打継面処理・型枠スライド開始の時間制約による打設設備の稼働率の低下
- ② 外部コンクリート先行打設における打継時間規制などによる打設効率の低下
- ③ 打止め型枠を用いた打止めに要する時間による打設効率の低下

#### ① 打継面処理・型枠スライド開始の時間制約による打設設備の稼働率の低下

従来の RCD 工法は、図-3.4.2 に示すように「打設」、「養生」、「打継面処理・型枠スライド」の作業を 1 日単位で順番に実施することから、1 リフト当り 3 分割 3 日間での施工が最短となっている。しかし、気温が低い時期にはコンクリートの強度発現が遅くなるため、打継面処理・型枠スライドが開始できるまでの時間が長くなり、結果として 3 分割打設を打設休止日無しで連続して実施することはできない。また、上記 3 作業を打設 1 サイクルとするため、1 リフト 2 分割を連続して実施することは気温条件に関わらず不可能である。

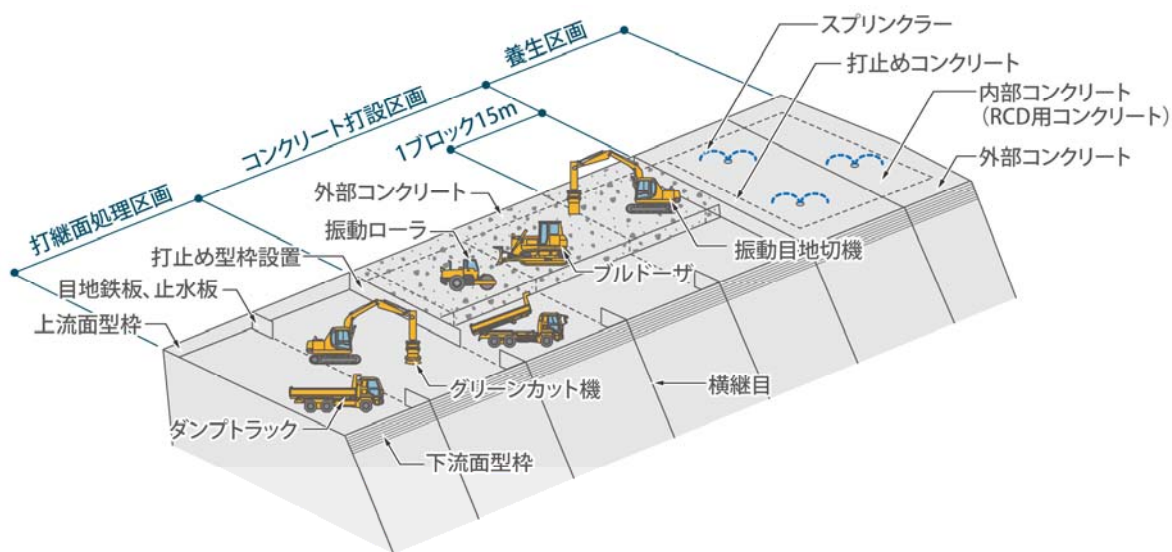


図-3.4.2 従来の RCD 工法による 3 分割施工の概念図<sup>2)</sup>

#### ② 外部コンクリート先行打設における打継時間規制などによる打設効率の低下

従来の RCD 工法は、外部コンクリートや構造用コンクリートなどの有スランプコンクリートと内部コンクリートの RCD 用コンクリートとの一体化を図るために、打継時間規制や配合切替え、打込み切替えなどによって打設区画の広さが制限される。また、有スランプコンクリート打設量は締固め能力によって制約を受ける。これらは全体の打設設備の稼働率の低下をもたらす要因となる。特に、施工開始時は有スランプコンクリートのみを打設する必要がある、これによる稼働率の低下が顕著となる（図-3.4.3）。

③ 打止め型枠による打止めに要する時間による打設効率の低下

従来の RCD 工法では、図-3.4.4 に示すように分割打設の打設部端部には打止め型枠を設置する。この打止め型枠の極近傍にまで振動ローラが接近できないため、有スランプコンクリートを別途打設する必要がある。また、コンクリート運搬用ダンプトラックを走行させるため、打止め型枠の一部は未設置のまま開けておく必要があり、この未設置部分の近傍は打設できない。そのため、最後に打止めを行う際、残った未施工部分のコンクリート打設のために、新たに型枠の設置が必要となり、その設置手間のためにコンクリートの打設を中断することになる(図-3.4.4)。これらによって、打設設備の稼働率低下を招くことになる(図-3.4.3)。

昨今の社会および経済情勢から一層の合理化が求められ、以上のような従来の RCD 工法における課題を解決し、さらなる高速化ならびに効率化を図った最新の RCD 工法が開発された。

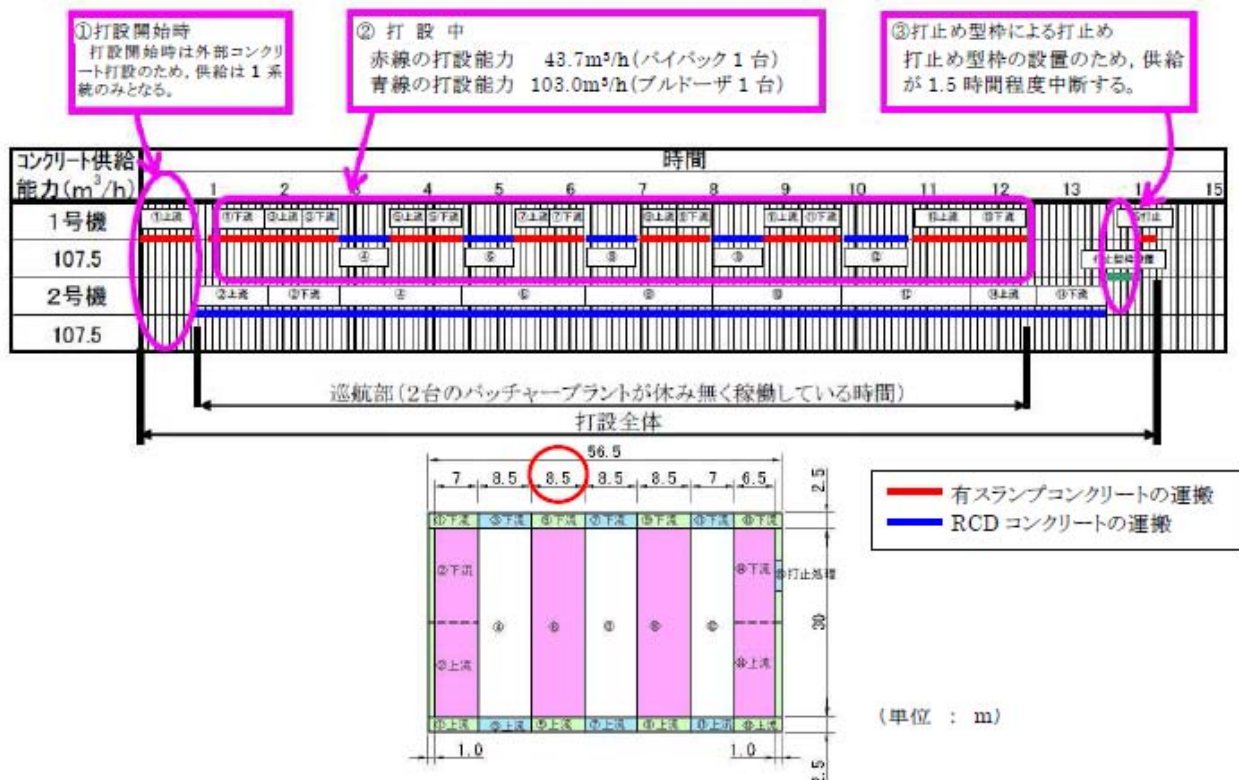
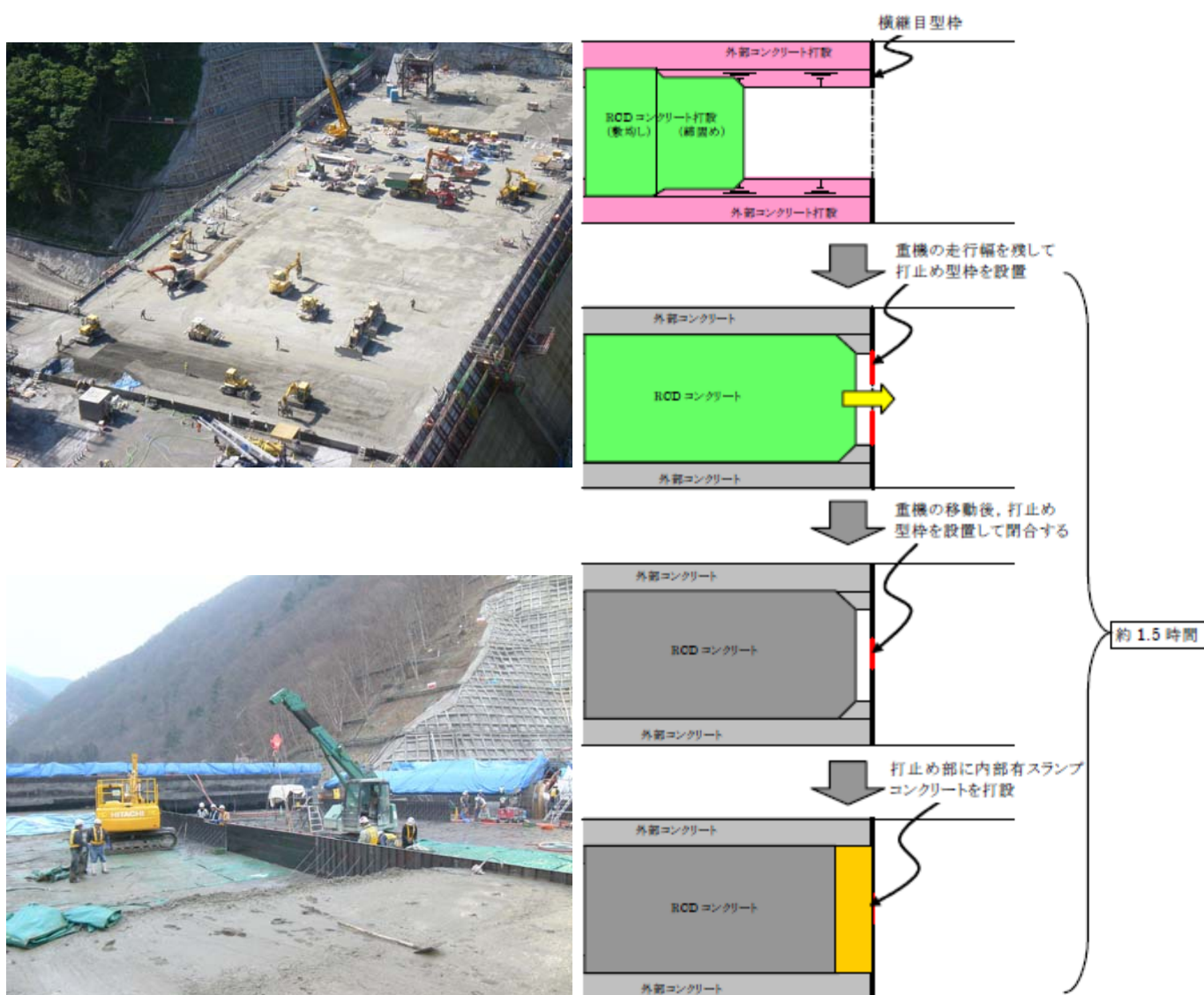


図-3.4.3 従来の RCD 工法による打設シミュレーション例<sup>1)</sup>



図ー3.4.4 従来のRCD工法による打止め方式<sup>1)</sup>

## (2) 最新のRCD工法（巡航RCD工法）の開発経緯<sup>1)</sup>

最新のRCD工法（巡航RCD工法）は、2006年度から嘉瀬川ダム（国土交通省九州地方整備局、2.8 参照）において技術開発検討が進められ、室内試験ならびに減勢工水叩き部における現地確認試験などの実証試験を経て、初めてダム本体高位標高部の一部区間の施工に適用された。

その後、2010年度以降、湯西川ダム（国土交通省関東地方整備局、2.9 参照）において、最新のRCD工法（巡航RCD工法）の更なる合理化のために1リフト全面連続施工を可能とする技術開発がなされ、その成果がダム本体施工に適用されることにより、施工の一層の高速化と施工性・安全性の向上が確認された。

さらに、現在も建設中であり2014年度からコンクリート打設を開始した五ヶ山ダム（福岡県、2.11 参照）では、低位標高部から高位標高部までの最新のRCD工法（巡航RCD工法）の全面採

用に加えて、1 リフト連続施工を発展させた2 リフト同時施工による更なる打設速度・打上がり速度の向上を図っている<sup>3)</sup>。

このように、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）は現在もより一層の合理化を進め、発展している工法である。

### 3.4.3 最新の RCD 工法の特徴および基本的な施工方法

#### (1) 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の特徴

##### 1) 内部コンクリート（RCD 用コンクリート）の先行打設

従来の RCD 工法では、外部コンクリート（有スランプコンクリート）と内部コンクリート（RCD 用コンクリート）の打継時間規制を守り、相互の一体化を確保しながら打設を進めることを基本としたため、外部コンクリートと内部コンクリートの打設を交互に繰り返していた。このため、全体の打設速度は打設速度が小さい外部コンクリートの影響を受けていた。

これに対して、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）は、内部コンクリートを先行して打設し、外部コンクリートは先行打設された内部コンクリートと型枠の間に後行独立して打設する。そのため、打設開始直後から内部コンクリートを連続打設することが可能となる。これによって、従来の RCD 工法で施工上の制約となっていた外部コンクリートと内部コンクリートを交互に打設する必要がなくなり、打設速度が低い外部コンクリートの影響を受けずに、内部コンクリートは高い打設速度を維持することが可能となる（図－3.4.5）。最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の施工状況を写真－3.4.1 に示す。



写真－3.4.1 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の施工状況<sup>1)</sup>

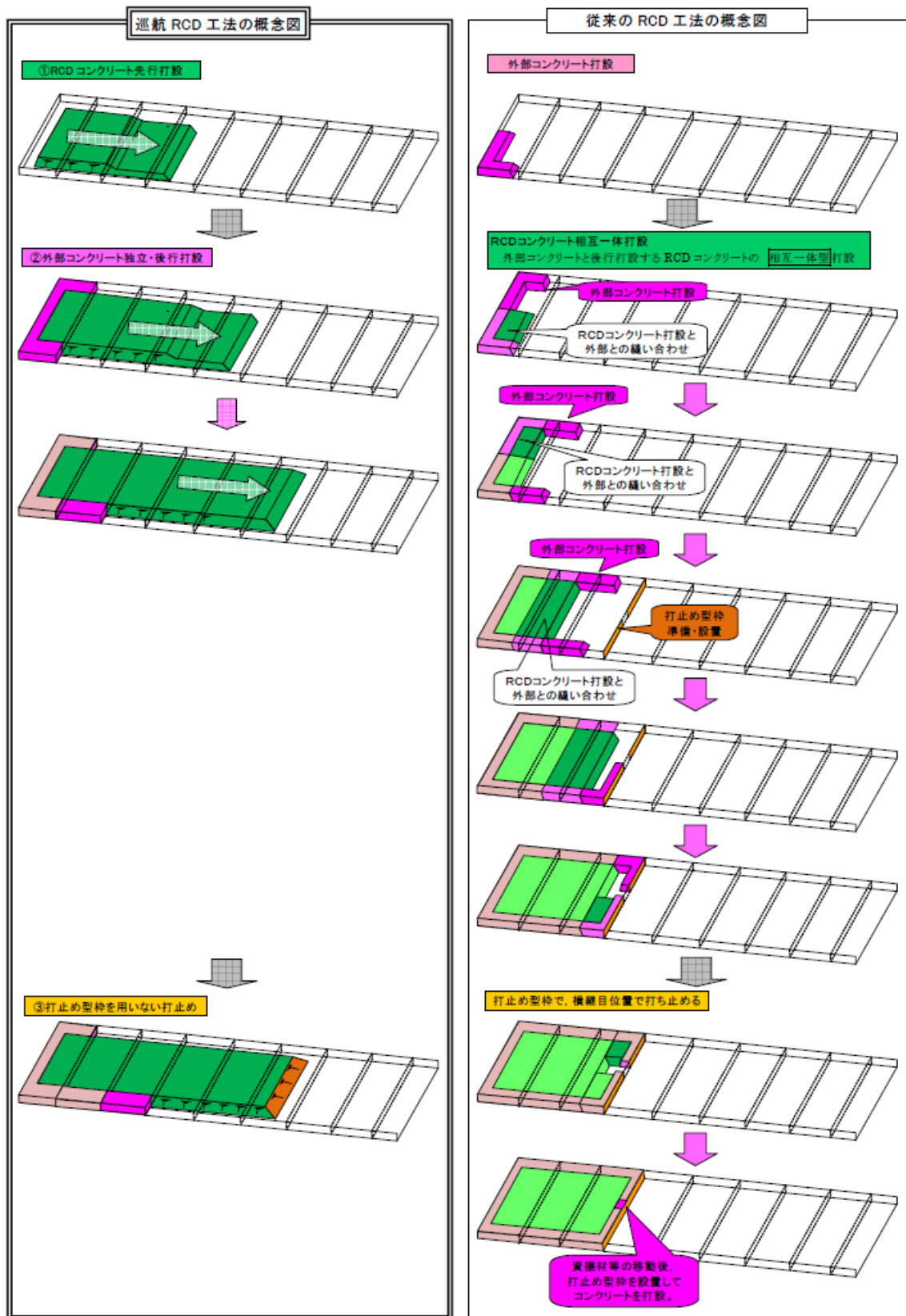


図-3.4.5 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の施工模式図<sup>1)</sup>

## 2) 外部コンクリート（有スランプコンクリート）の独立・後行打設

従来のRCD工法と最新のRCD工法（巡航RCD工法）の堤体コンクリート施工模式図を図-3.4.5に示す。

従来のRCD工法は、先行する外部コンクリートである有スランプコンクリートと内部コンクリートであるRCD用コンクリートを打継時間規制内に打ち継ぎ、打設を交互に繰り返していた。つまり、外部コンクリートと内部コンクリートは、外部→内部（RCD）→外部→内部（RCD）という順番での打設となり、結果として内部コンクリートは外部コンクリートに追随した打設となる。このように、従来のRCD工法は、外部コンクリートと内部コンクリートがフレッシュな内に打継ぎ、一体化を図る打設となることから、内部コンクリートと比較して打設速度が低い外部コンクリートの打設時には全体の打設速度が一時的に低下していた。図-3.4.3に示すように、この状態が概ね2時間間隔で繰り返されるため、打設効率が上がらない要因となっていた。

一方、最新のRCD工法（巡航RCD工法）における外部コンクリートの打設は、先行する内部コンクリートに対して、独立・後行して打設を行うため、従来のRCD工法のような打継時間規制を受けることなく打設することができる。また、外部コンクリートは、写真-3.4.2に示すように内部コンクリート、上下流面型枠、横継目に囲まれた小規模ブロック単位での打設となり、内部コンクリートの打設に関係なく、任意の時刻に任意の位置（ブロック）を打設できる。このことによって、打設速度が低い外部コンクリートの影響を受けず、内部コンクリート打設の最大速度を維持できる。



写真-3.4.2 最新のRCD工法（巡航RCD工法）における  
外部コンクリート打設ブロック<sup>1)</sup>

## 3) 打止め型枠の省略

従来のRCD工法と最新のRCD工法（巡航RCD工法）の打止め方法を図-3.4.6に示す。

従来のRCD工法は、外部コンクリートの打設を先行し、後行する内部コンクリートと一体化を図るために図-3.4.6に示すように横継目位置で打止め型枠を設置して打ち止める。

これに対して、最新のRCD工法（巡航RCD工法）では内部コンクリートを先行打設するため、

内部コンクリートの打止めは1:1程度の勾配の端部法面、または状況に応じて1:4以上の緩勾配での傾斜打止めとなるため、打止め型枠を用いずに任意の位置で打ち止めることができる。このことによって、従来のRCD工法で生じていた打止め型枠設置による内部コンクリートの打設中断が無くなり、内部コンクリートの最大速度を維持できる。

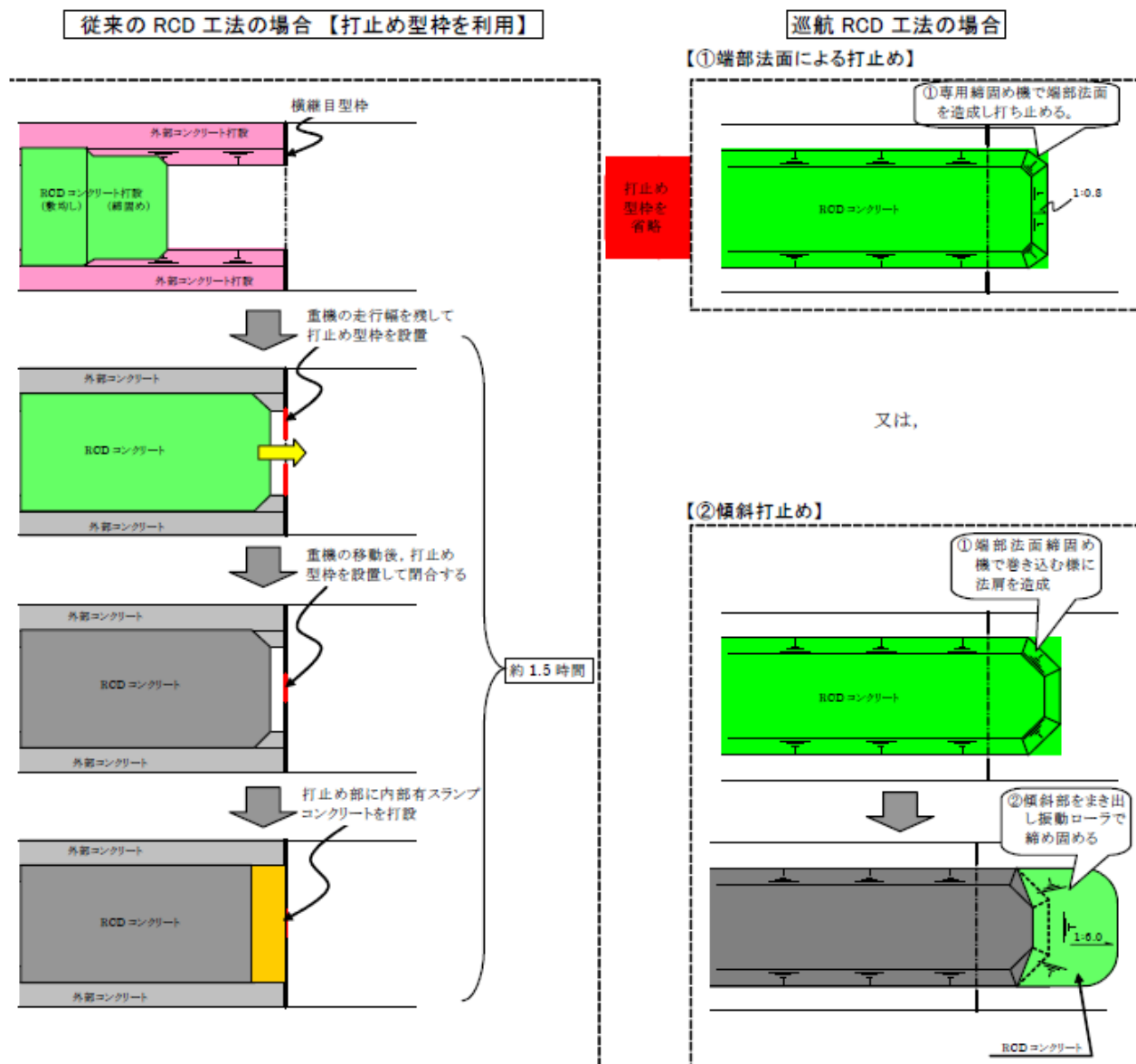


図-3.4.6 従来のRCD工法と最新のRCD工法（巡航RCD工法）のRCD用コンクリート打止め方法の比較<sup>1)</sup>

#### 4) 分割なしの連続打設、および2リフト同時連続打設

従来の RCD 工法での打止めは、横継目位置において打止め型枠を用いて行うため、1リフトを分割打設する必要がある。このときの施工方法は、外部→内部 (RCD) →外部→内部 (RCD) に交互にかつ、コールドジョイントとならないように連続的なコンクリートの打設を、打設開始から終了まで維持する必要がある。一方、この方法の場合、施工中に生じる突発的な中断 (予想されない降雨等) に柔軟に対応することが難しく、確実な打設を行って品質を確保するためには、レーンスケジュール (打設順序) を定めておく必要がある。このため、レーンの分割はリスクを避けて最大1日単位とし、打止めを計画的に決めておく必要がある。

これに対して、最新の RCD 工法 (巡航 RCD 工法) では内部コンクリートを先行打設し、内部コンクリートと外部コンクリートを分離して打設する施工方法であり、内部コンクリートは任意の位置において、型枠を用いずに打止めを行う。このため、打止め (打設中断) を考慮することなく、内部コンクリートの打設を進めることができる (図-3.4.5 参照)。

また、最新の RCD 工法 (巡航 RCD 工法) を初めて適用した嘉瀬川ダムでは、「確実に3分割打設の連続性を確保する」ことを目標に掲げ、1リフトを2または3分割で打設することを想定していた。さらに、湯西川ダムでは内部コンクリートの1:0.8端部法面 (後の五ヶ山ダムにおいて1:1.0の勾配に変更) による打止め・打継ぎ手法、アバットメント着岩部の施工方法、施工機械の移動手法の実用化などの新たに開発・工夫された施工技術の統合によって、図-3.4.7 に示すように分割打設を排した1リフト連続打設を実現した。

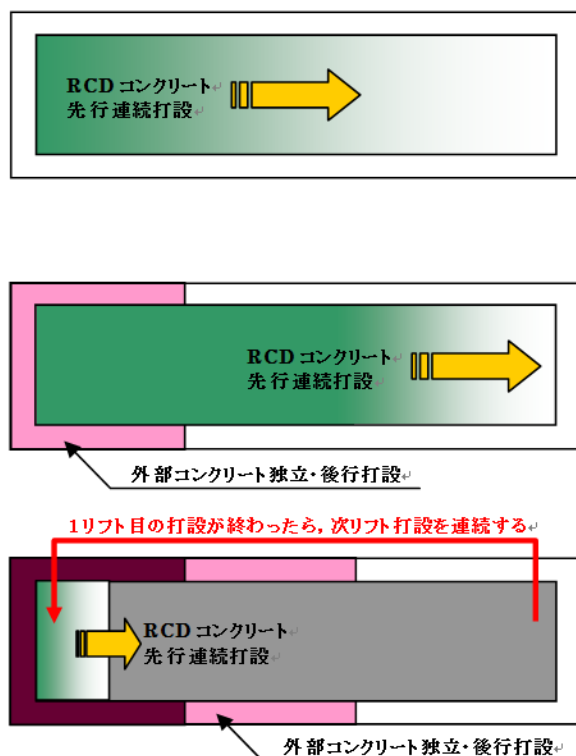


図-3.4.7 1リフト連続打設の模式図<sup>1)</sup>

現在施工中の五ヶ山ダムでは、1リフト連続打設をさらに発展させて、現在リフト（Nリフト）の内部コンクリートの打設完了後、速やかに次リフト（N+1リフト）の内部コンクリートの打設を開始しながら、現在リフト（Nリフト）の最終段階の外部コンクリートを同時に打設する、2リフト同時連続打設を実現している（図-3.4.8 参照）。図-3.4.8 と図-3.4.9 に2リフト同時連続打設の模式図とレーンスケジュール例を示す。

なお、ダムコンクリートの高速化施工に関する取組みの詳細は、第4章、第5章にて記述する。

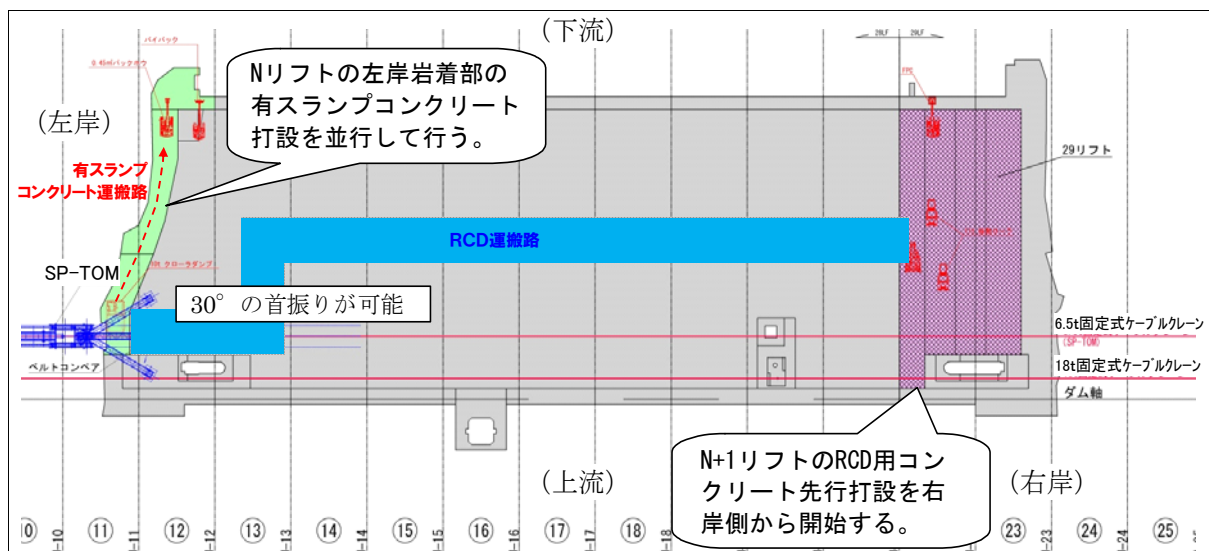


図-3.4.8 2リフト同時連続打設の模式図

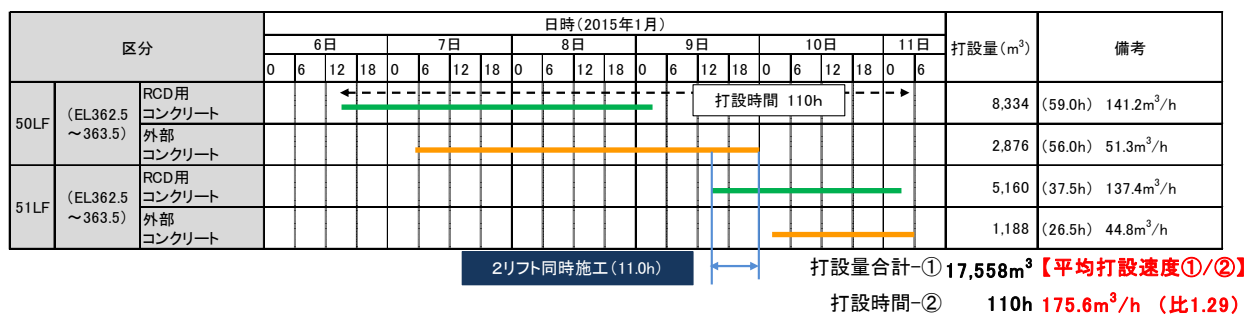


図-3.4.9 2リフト同時連続打設時のレーンスケジュール例

## （２）最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の基本的な施工手法

### １）内部コンクリートの端部法面締固め

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、内部コンクリートを外部コンクリートに先行して打設するため、内部コンクリートの外縁に端部法面ができる。この端部法面は、一般部と同様に確実な締固めが必要であり、端部法面締固め機を用いて 1 : 1 程度の勾配の端部法面を形成する。

内部コンクリート一般部の締固めは、11t 級振動ローラを使用して端部法面を締め固めた後に行う。このとき、振動ローラの振動が端部法面に悪影響を及ぼさないように配慮するとともに、振動ローラの走行安全性を確保するために、場外試験施工により品質を確認したうえで、端部法面から 50cm の離隔をとることとした。

なお、五ヶ山ダムでは、従来使用されていた二面拘束型の端部締固め機の改良を行い、写真－3.4.3 に示す一面拘束型の端部締固め機（Flat Plate Compactor 以下、FPC と称する）を開発・適用している。これにより、主に以下の効果が確認できた。

- ① 端部締固め機に新たに法面整形バケットを搭載できるようになったため、事前に実施する法面整形用のバックホウが不要となった。
- ② 二面拘束型の端部締固め機を使用する場合、事前の法面整形に正確性が要求されるとともに、転圧板の二面とも法面・法肩に隙間なく接地させる必要があるなど、オペレータに高度な技量が要求されていた。これに対して一面拘束型を採用することで、法面整形の高い精度が要求されなくなり、オペレータへの負荷の低減、および施工品質に対するリスクが減少した。



写真－3.4.3 二面拘束型および一面拘束型端部締固め機（FPC）

## 2) 内部コンクリートと後行打設する外部コンクリートの一体化

外部コンクリートは、**写真－3.4.4** に示すように先行打設した内部コンクリート端部法面、上下流面型枠、横継目金物に囲まれたブロック単位で打設し、内部コンクリートと確実に一体化させる<sup>1)</sup>。既述した FPC で締め固めた RCD 用コンクリートの端部法面には、滑面層は発生しないので、グリーンカットなどの打継面処理は不要であり、外部コンクリート打継時にモルタルを敷設して確実な一体化を図る。

従来の RCD 工法では、外部コンクリートを先行打設した後、4 時間以内に内部コンクリートを後行打設し、両者の接合部を一体化させることとしている。これに対して最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、先行打設時に締め固めされた内部コンクリートの端部法面と型枠の間に、外部コンクリートを後行打設する。このことによって、外部コンクリートの締め固めを十分に行うことが可能となり、密実で高い品質が確保できる。



**写真－3.4.4 外部コンクリートの施工状況<sup>1)</sup>**

## 3) 内部コンクリートの打止め・打継ぎ・一体化

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）における内部コンクリート同士の打継ぎは、以下に示す方法で行う。また、打継ぎの方法を**表－3.4.2**に示す。

### ① 1 : 1.0 端部法面による方法



- ・内部コンクリートの打止めは、端部法面で実施する
- ・打継ぎ時には旧コンクリート端部締め固め法面にモルタルを入念に敷設する

### ② 傾斜打止めによる方法

- ・横継目位置を避けた適切な位置で、1 : 4.0 以上の勾配で打ち止める
- ・傾斜打止めの端部はエッジ処理を行い弱部を取り除いたうえで、打継面処理を行う
- ・打継ぎ時には旧コンクリート傾斜面にモルタルを入念に敷設する

両者の方法による打止め状況を**写真－3.4.5**に示す。

表-3.4.2 RCD 用コンクリート打継方法の対比<sup>1)</sup>

項 目		1:1.0 端部法面による方法	傾斜打止めによる方法
概 要		<ul style="list-style-type: none"> <li>端部法面締め固め技術を利用した打止め方法である。</li> <li>端部法面にモルタル敷設後 RCD コンクリートを打ち継ぐ。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RCD コンクリートを 1:4.0 以上の勾配で締め固める。</li> <li>打設後適切な時間に端部のエッジ処理と打継面処理を実施し、隣接リフトを打ち継ぐ。</li> </ul>
			
施 工 方 法	締め固め方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>専用の端部法面締め固め機で、1:1.0 に締め固める。</li> <li>締め固め速度は、約 30m/h(専用機 1 台)である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>振動ローラで 1:4.0 以上の傾斜面で締め固める。</li> </ul>
	打継ぎ前処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>必要としない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>端部のエッジ処理を行う。</li> <li>湯西川ダムの現地確認試験では、締め固め後 4 時間での処理が適当であった。</li> <li>処理時間は約 1m/1 分(60m/h, 0.4m<sup>3</sup>バックホウ 1 台)である。</li> </ul>
	打継面処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>滑面層(ノロ)が発生しないため、表面の清掃、湿潤化のみ実施する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水平打継面と同様に打継面処理を行う。</li> </ul>
	打継ぎ方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>モルタル敷設後、RCD コンクリートを打ち継ぐ。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>同左</li> </ul>

【1 : 1.0 端部法面を利用した打止め】



【1 : 4.0 以上の勾配での傾斜打止め】



写真-3.4.5 RCD 用コンクリートの打止め状況<sup>1)</sup>

#### 4) 積算温度による施工管理

内部コンクリートを連続的に打設する最新の RCD 工法(巡航 RCD 工法)では、打設の連続性と打設速度の高速化を阻害しないように、上下流面型枠の脱型(スライド)時期や打継面処理の開始時期、ダンプ走行路の保護方法などを管理する必要があり、この管理のためには内部コンクリートの初期強度発現を正確に把握することが重要となる。そこで、ダムごとに事前試験により得られたコンクリートの積算温度と圧縮強度の関係を把握して、施工管理を行っている。

#### 5) 水平打継面処理の合理化

コンクリート打設速度の向上に伴い、水平打継面処理も合理化する必要がある。このため、以下に示すように外部コンクリート（有スランプコンクリート）ならびに内部コンクリート（RCD 用コンクリート）ともに水平打継面処理の合理化技術が開発されている<sup>1)</sup>。水平打継面処理はブリーディング発生の有無から、外部コンクリート、内部コンクリートで処理方法が異なる。なお、水平打継面の適切な処理開始時間は季節によって変わることに留意する必要がある。

##### a) 外部コンクリートの水平打継面処理

外部コンクリートの場合、コンクリート締固め後にブリーディングが発生するため、これを確実に除去できる方法で打継面処理をする必要がある。従来の RCD 工法では、外部コンクリート表面が硬化した後にグリーンカットを実施していた。これに対して 1 リフト 3 日未満で施工する最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の場合、外部コンクリート打設から 48 時間後には上部リフトを打設するために、従来よりも短い養生時間で確実かつ施工性の良い打継面処理が必要となる。そこで、適切な打継面処理開始時刻を厳密に選定することで、2MPa 程度の圧力水を用いて、狭隘部も含めて十分な打継面処理ができることを確認した。この時の平均気温は約 24℃、積算温度で 402℃・h（402℃・h は 24 時間で平均 7℃相当になる）であった。この結果に基づいて、外部コンクリートの水平打継面処理は、写真-3.4.6 に示すような圧力水を用いる方法を基本としている。



写真-3.4.6 外部コンクリートの打継面処理状況

##### b) 内部コンクリートの水平打継面処理

内部コンクリートの端部締固め法面には振動ローラで締め固める水平打継面とは異なり、滑面層（レイタンス）が発生しないため水平打継面で実施される洗浄等の処理は不要となる。

また、水平打継面に発生する滑面層はコンクリート硬化以前に適切な圧力水による表面洗浄で除去（以降、「ソフトトリートメント」という）でき、十分な打継面処理が可能であることが確認されている（写真-3.4.7 参照）。

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）が初めて一部のリフトに採用された嘉瀬川ダムでは、水圧 0.7MPa、流量 50～100ℓ/分程度の射水によってソフトトリートメントを実施した。平均気温 20℃ の場合、表面の滑面層（レイタンス）が十分に除去でき、良好な打継面処理ができた。また、平均気温が 10℃ の場合は内部コンクリート締固め完了から 12 時間後でも良好な打継面処理ができた。

また、湯西川ダムでは、水圧 0.4MPa、流量 50～100ℓ/分程度の射水によってソフトトリートメントを実施したが、早期に打継面処理ができないダンプ走行路や資機材仮置き場などは、内部コンクリート締固め完了から 12 時間以上の硬化養生後、「ポリッシャ+圧力水」による処理が実施されている。



写真－3.4.7 内部コンクリートの打継面処理状況<sup>1)</sup>

### （3）最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）で得られる効果

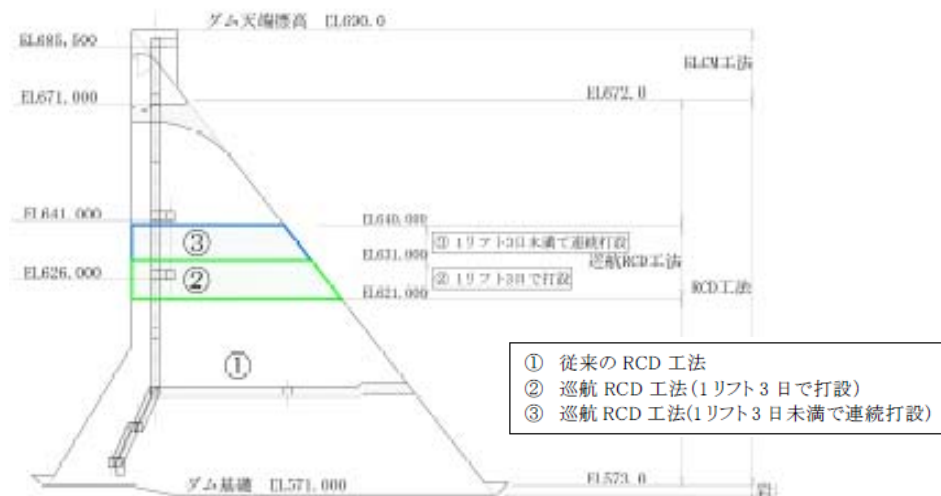
最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）で得られる効果について、施工実績に基づいて以下に挙げる。

#### 1）打設速度の向上

湯西川ダム（2.9 参照）の施工実績に基づいて、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の打設速度の向上効果を以下に示す。

湯西川ダムでは、図－3.4.10 に示す EL.621m～EL.640m（高さ 19m）の体積約 18 万 m<sup>3</sup>を対象に最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）を適用し、EL.621m～EL.631m は 1 リフト 3 日（図－3.4.10 中の②範囲）で、EL.631m～EL.640（図－3.4.10 中の③範囲）は 1 リフト 3 日未満で打設した。

1 リフト当りの打設速度実績である表－3.4.3 に示すように、1 リフト 3 日で施工した最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）による平均打設速度は、従来の RCD 工法（図－3.4.10 中の③範囲）による打設の平均打設速度よりも 7%程度向上している。



図－3. 4. 10 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の施工範囲（湯西川ダム）<sup>4)</sup>

表－3. 4. 3 1 リフト当りのコンクリート打設速度の実績<sup>1)</sup>

（堤内構造物が少ないリフトを対象に比較）

区 分	リフト	1リフト 打設量 (m <sup>3</sup> )	1リフト 打設時間 (h)	平均打設 速度 (m <sup>3</sup> /h)	備 考
①の範囲 「従来のRCD工法」	EL.618m～EL.619m	11,127	73.9	150.5	
	EL.619m～EL.620m	10,307	70.3	146.6	
	EL.620m～EL.621m	10,569	71.4	148.0	
	EL.622m～EL.623m	9,881	77.8	127.0	
		41,884	平均	142.7	(1.00)
②の範囲 「巡航RCD工法」 1リフト3日で打設	EL.621m～EL.622m	10,860	73.7	147.2	
	EL.623m～EL.624m	10,887	68.1	159.6	
	EL.630m～EL.631m	10,313	66.7	154.7	
		32,060	平均	153.8	(1.07)
③の範囲 「巡航RCD工法」 1リフト3日未満 で連続打設	EL.631m～EL.632m	10,081	67.2	150.0	
	EL.632m～EL.633m	9,425	61.5	153.3	
	EL.633m～EL.634m	9,343	57.4	162.7	
	EL.634m～EL.635m	9,582	60.6	158.2	
	EL.635m～EL.636m	9,418	59.5	158.2	
	EL.636m～EL.637m	9,446	63.3	149.1	
	EL.637m～EL.638m	9,320	60.8	153.3	
	EL.638m～EL.639m	9,141	56.2	162.7	
		75,756	平均	155.7	(1.09)

注1) 「平均打設速度」＝「1リフト打設量」÷「1リフト打設時間」

注2) 「1リフト打設時間」はパッチャーのコンクリート供給開始から、コンクリート締固め完了までの時間を示す。なお、従来のRCD工法で施工した①の範囲は1リフト3分割施工のため、1リフト内での打止めから翌日の打設開始までのインターバルは含まない。

a) 従来の RCD 工法による打設

従来の RCD 工法で打設したリフトと隣接したリフト（EL.620m～EL.621m）で実施された 1 リフト 3 分割による従来の RCD 工法のタイムテーブルを図－3. 4. 11 に、コンクリート打設レーン割りを図－3. 4. 12 に示す。

図-3.4.11 に示すようにリフト中央部（2日目）の打設速度に比べて、左右岸部（1日目および3日目、着岩部を含む）の打設速度が低い結果となっている。これは、左右岸部では着岩部コンクリートを含む有スランブコンクリートの占める割合が大きく、内部コンクリートとの交互打設を行う必要があるためである。また、分割打設による打止め時にインターバルが生じている。この従来の RCD 工法による 1 リフトの平均打設速度は  $148\text{m}^3/\text{h}$  であった。

従来の RCD 工法打設実績 (EL.620m~EL.621m)

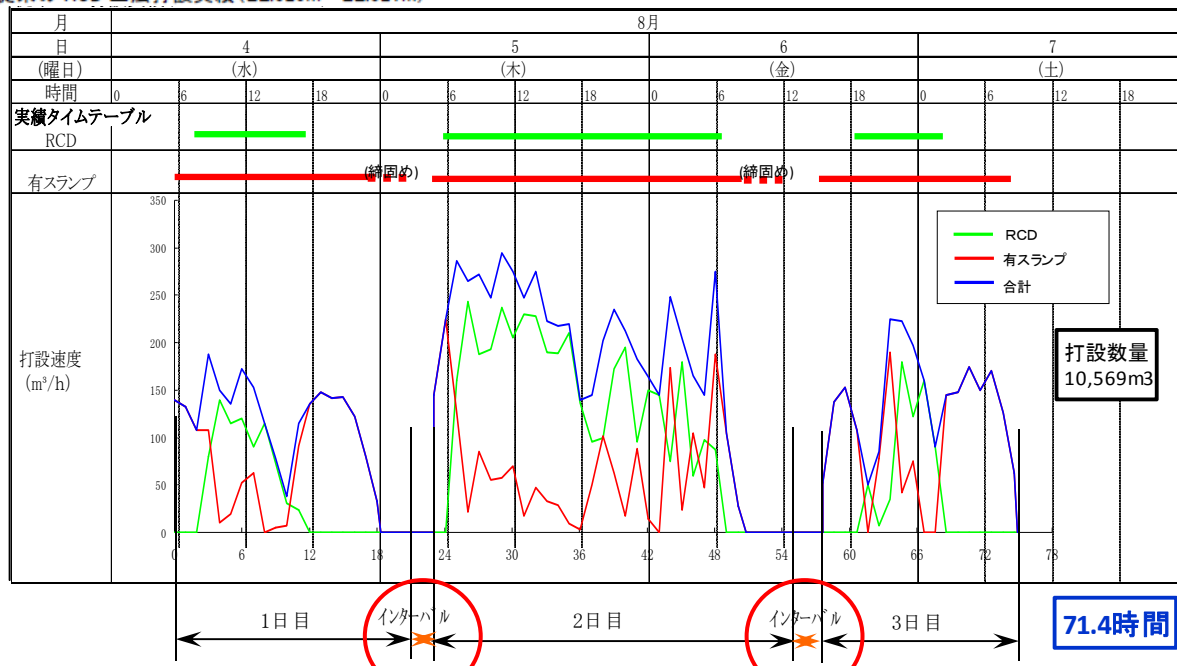


図-3.4.11 1 リフト 3 分割、3 日施工の場合の従来の RCD 工法のタイムテーブルと打設速度<sup>1)</sup>

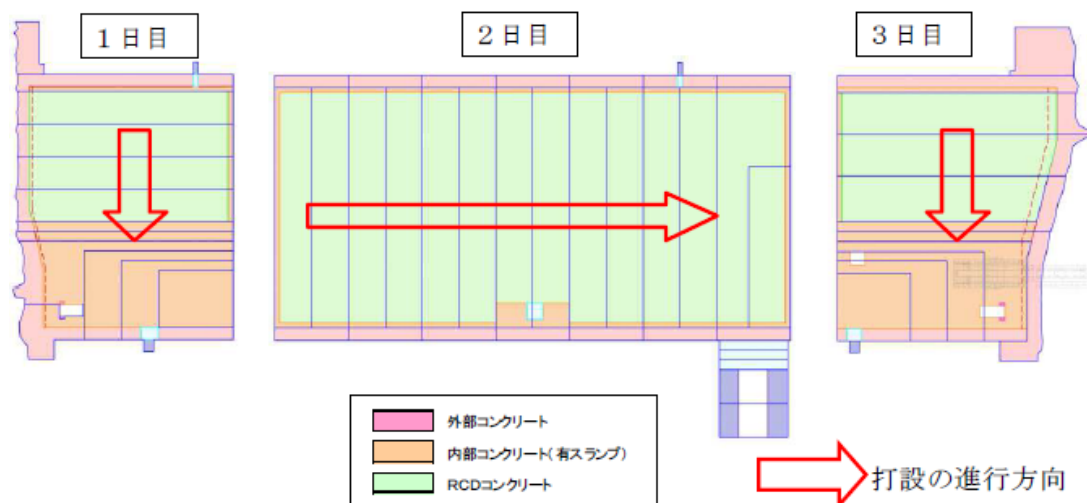


図-3.4.12 1 リフト 3 分割、3 日施工の場合の従来の RCD 工法のレーン割り<sup>1)</sup>

b) 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）による打設

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）で 1 リフトを 3 日未満で連続施工（9 リフト）したうち、EL.633m～EL.634m のタイムテーブルを図-3.4.13 に、コンクリート打設レーン割りを図-3.4.14 に示す。

なお、内部コンクリートの打設は、図-3.4.13 に示す打設実績の 2 日目前半で終了しており、2 日目後半（打設開始 36 時間以降）から 3 日目は有スランプコンクリートのみの打設であったため、コンクリート打設能力に余力を残している。これは、打設設備の配置と施工安全性の確保の点から、打設能力に余裕はあったが、次リフトの内部コンクリート打設を行わなかったためである。

該当リフトの平均打設速度は  $163\text{m}^3/\text{h}$  となっており、従来の RCD 工法による平均打設速度を上回っている。仮に 2 日目後半（打設開始 36 時間）以降にも、連続して次リフトの内部コンクリートを打設した場合、図-3.4.13 中に点線で示すように 1 リフト目の打設速度が維持でき、平均打設速度は  $200\text{m}^3/\text{h}$  以上に達したと推測できる。

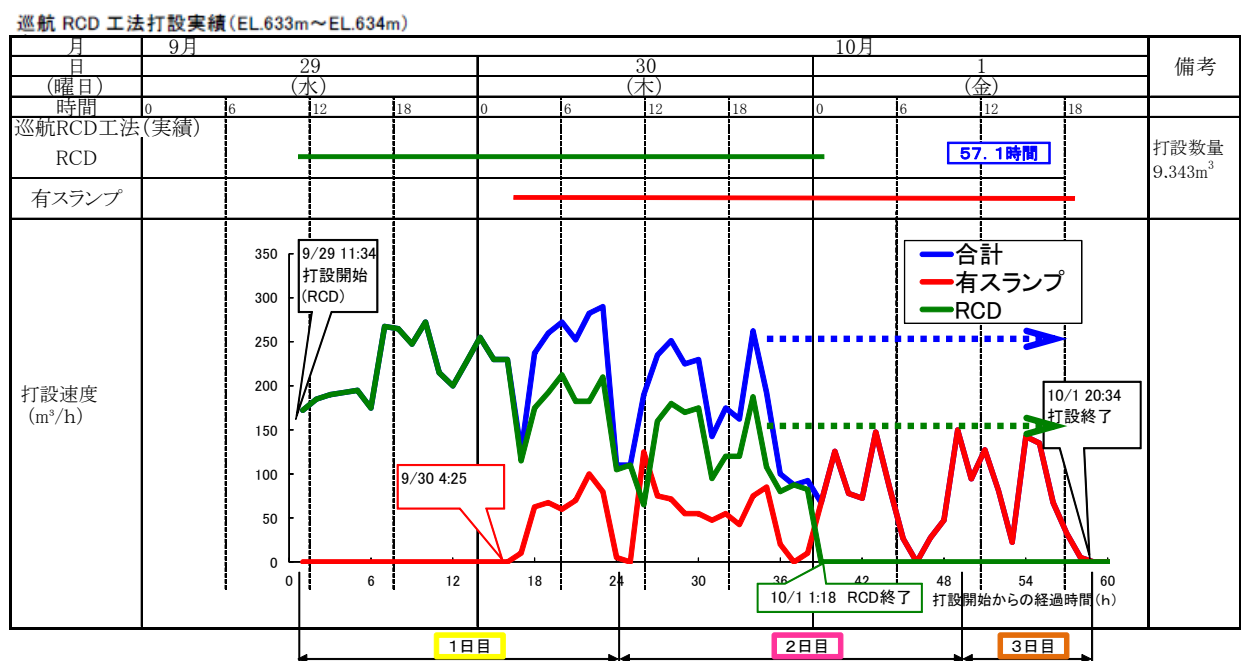


図-3.4.13 1 リフト 3 日未満で施工した最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の  
タイムテーブルと打設速度<sup>1)</sup>

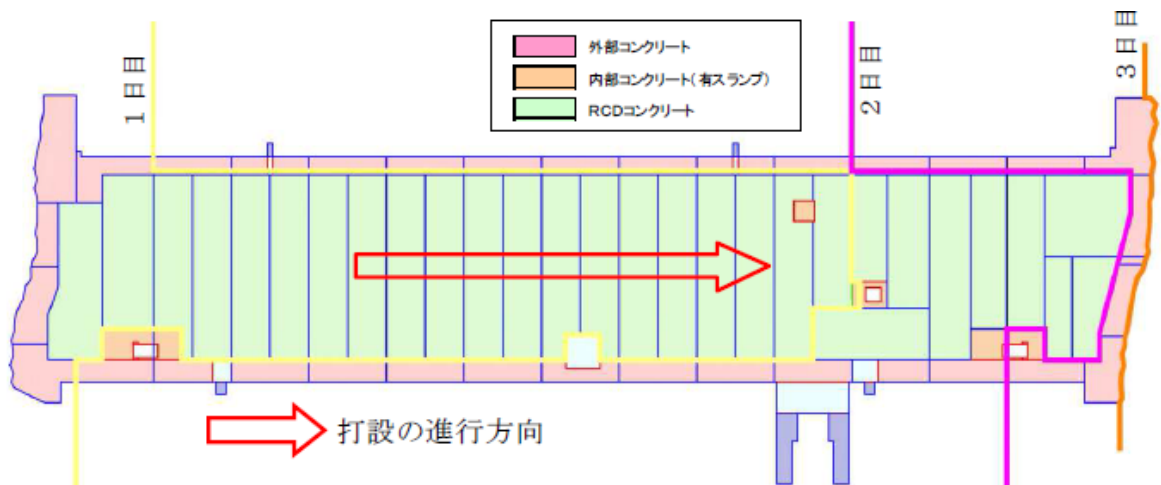


図-3.4.14 1リフト3日未満で施工した最新のRCD工法（巡航RCD工法）の  
レーン割り<sup>1)</sup>

## 2) 打上がり速度の向上

最新のRCD工法（巡航RCD工法）で複数リフトを連続して打設した湯西川ダムの実績に基づいて、打上がり速度の向上の要因については以下の通りである<sup>1)</sup>。

### a) リフト打上がり速度向上の要因

最新のRCD工法（巡航RCD工法）を適用し、1リフト3日未満で連続施工した9リフト（EL.631m～EL.640m）の打上がり速度が向上した要因としては、次の事項が挙げられる。

- ① コンクリート打設速度の向上による1リフト打設時間の短縮
- ② インターバル時間の短縮（1リフト当りのインターバル回数減と所要時間の短縮）

従来のRCD工法で打設した時のインターバル時間では、1リフト3区画に分割打設した場合、1つの区画の打設完了から次の区画の打設開始までに資機材移動などによる1回当たり2～3時間程度のインターバル時間が必要であり、1リフトで3回のインターバル（計6～9時間に相当）が発生する。湯西川ダムの従来のRCD施工時の実績によれば、1リフトあたりのインターバル時間は3回で合計6時間程度が平均であった。

図-3.4.15に従来のRCD工法と最新のRCD工法（巡航RCD工法）のインターバルを含むタイムテーブルの比較を示す。最新のRCD工法（巡航RCD工法）では、1リフトを連続的に打設し、資機材移動なども内部コンクリート打設と並行して実施するため、インターバルは不要となる。したがって、インターバルは打設が次リフトに移る際に1回のみとなり、インターバル時間が大幅に短縮される。湯西川ダムの実績によると、1リフト当りのインターバル時間は、表-3.4.4に示すように平均2.2時間となり、約37%に短縮できた。

①については、**3.4.3 (1)** で既述したように 1 区画当りの打設速度が、従来の RCD 工法の平均速度に対し 9%程度 の速度向上が図られている。これを 1 リフト全体で考えると、②のインターバルの回数減少や時間の短縮も含め 15%程度 の向上に相当する。

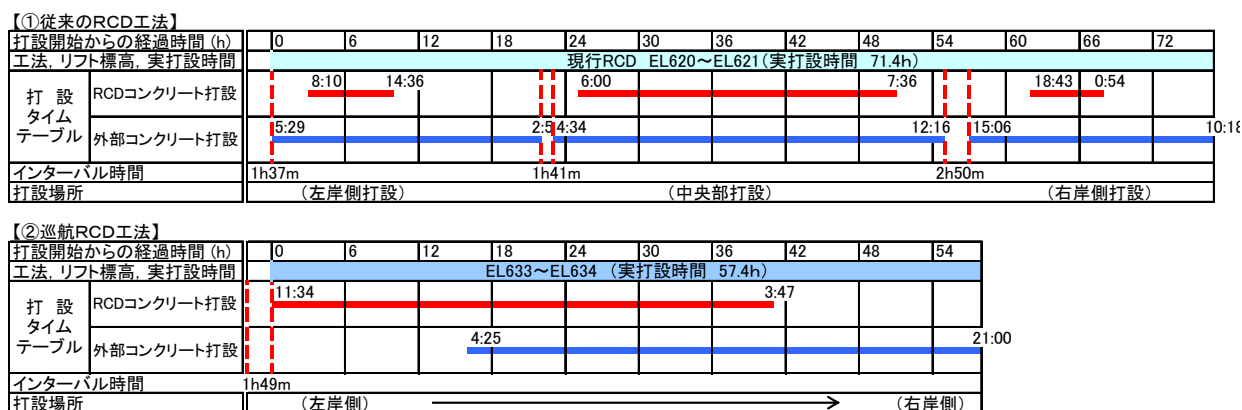


図-3.4.15 湯西川ダムでの 1 リフト打設実績の比較<sup>1)</sup>

表-3.4.4 湯西川ダムでの最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の  
インターバル時間の実績<sup>1)</sup>

実施位置 (リフト上面標高)	インターバル 時間実績 (h)	備 考
EL.632m→EL.633m 間	2.90	
EL.633m→EL.634m 間	1.82	
EL.634m→EL.635m 間	0.82	型枠移動等の待ちがなく、理想的な状態。
EL.635m→EL.636m 間	2.38	
EL.637m→EL.638m 間	3.07	
EL.638m→EL.639m 間	2.05	
EL.639m→EL.640m 間	2.40	
平 均	2.2	

#### b) 打上がり速度向上が工期短縮に及ぼす効果

従来の RCD 工法による計画リフトスケジュールと、1 リフト 3 日未満で連続施工した最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）による実績リフトスケジュールの比較を図-3.4.16 に示す。

従来の RCD 工法での打設による EL.631~EL.640（9 リフト）の計画上のリフトスケジュールは暦日 40 日となるが、1 リフト 3 日未満で連続施工する最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）を採用した実際の打設日数は暦日 31 日となり、暦日 9 日間の短縮効果があることがわかる。

【従来の RCD 工法での計画リフトスケジュール】 【巡航 RCD 工法での実績リフトスケジュール】

開始標高	～	到達標高	BL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	BL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21			
EL640	～	EL641						10/25						10/26					10/27											10/25					10/26					10/27									
EL639	～	EL640						10/16						10/18					10/19																10/19～10/22														
EL638	～	EL639						10/13						10/14					10/15																10/16～10/19														
EL637	～	EL638						10/7						10/8					10/12																10/13～10/15														
EL636	～	EL637						10/2						10/5					10/6																10/8～10/12														
EL635	～	EL636						9/29						9/30					10/1															9/10～10/19															
EL634	～	EL635						9/24						9/27					9/28															9/22～10/22															
EL633	～	EL634						9/18						9/21					9/22															暦日 :40日															
EL632	～	EL633						9/15						9/16					9/17															実打設日数:27日															
EL631	～	EL632						9/10						9/13					9/14																														
																							</																										

図-3.4.16 従来の RCD 工法と最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の  
リフトスケジュールの比較<sup>1)</sup>

RCD 工法で施工したダムの RCD 部体積と RCD 部月平均打設量の関係を図-3.4.17 に、RCD 部高と RCD 部打上がり速度の関係を図-3.4.18 に示す。

これらの図から、湯西川ダムの RCD 工法による月平均・月最大打設量、平均打上がり速度が、他ダムに比べて大きいこと、さらに最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）連続施工の効果は極めて大きいことが分かる。

図-3.4.18 で示すとおり、湯西川ダムで実施した最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の平均打上がり速度は 9.0m/月となり、他ダムに対して 1.5~2.0 倍の打上がり速度になっている。

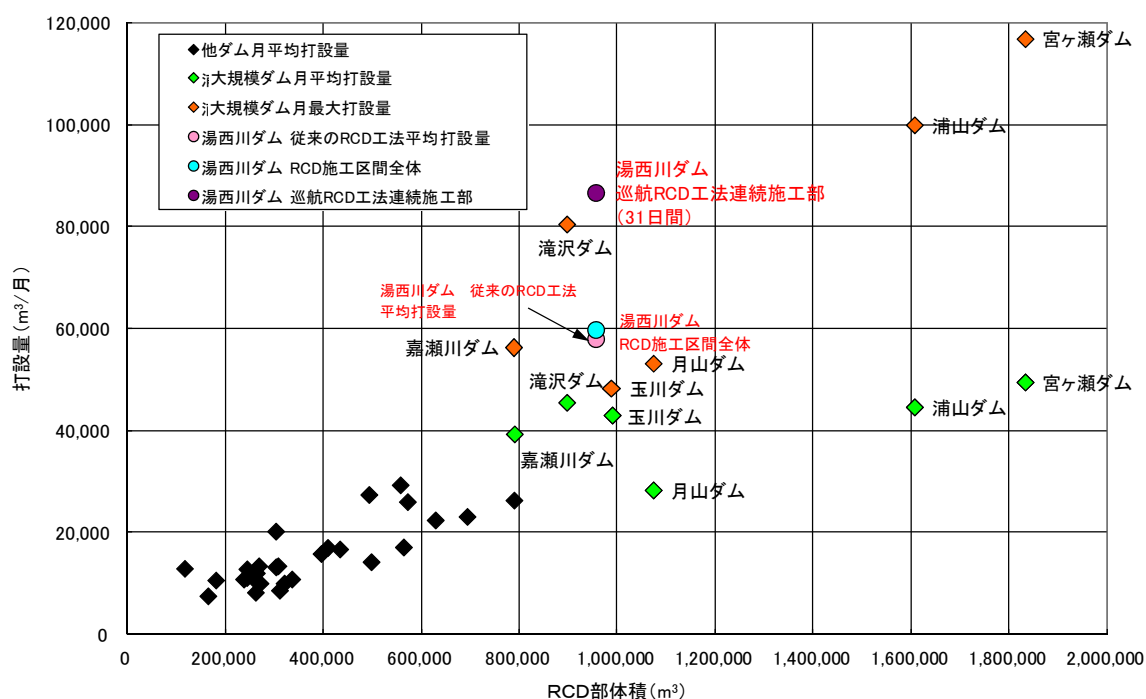
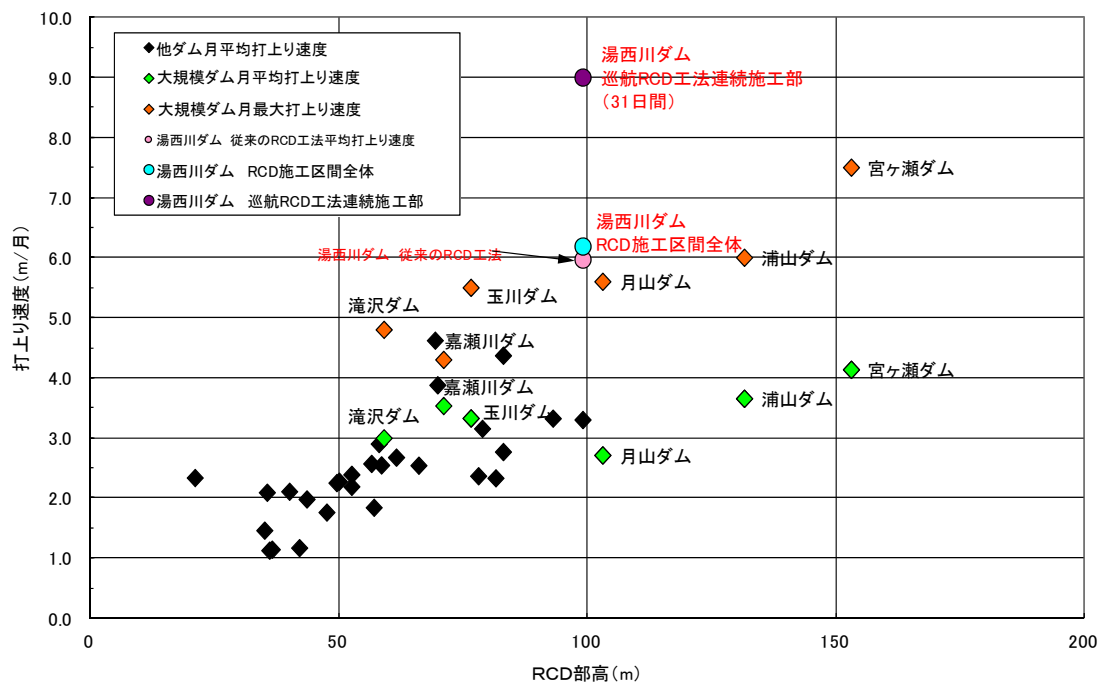


図-3.4.17 RCD 工法を適用した体積と RCD による月平均打設量の関係<sup>5)</sup>



図－3.4.18 RCD 工法を適用した標高と打上がり速度の関係<sup>5)</sup>

### 3) 施工性の向上

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）を適用し、施工性を向上した要因としては、次に示す事項が挙げられる。

- ① 打設中断・再開の施工性向上
- ② 外部コンクリート打設の自由度の向上
- ③ レーン割りの自由度の向上
- ④ 着岩部打設の施工性向上
- ⑤ 安全性の向上

#### ① 打設中断および再開時の施工性向上

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、様々な現場状況に合わせて、限られた打設時間を有効に活用した打設が可能となり、全体的な施工速度が向上する。

##### i) 降雨への対応

打設開始後に降雨が予測される場合、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では以下の手順で、降雨のない時間を有効活用したコンクリート打設が可能である。

- ・ 端部打止処理に要する時間は湯西川ダムの実績によると、約 2 時間であったが、予想される降雨発生時刻の 2 時間前までは RCD 用コンクリートの打設を継続する。
- ・ 予測された降雨発生時刻前に、横継目位置と重ならない位置で RCD 用コンクリートは 1:

1 勾配の端部法面による打止め処理を完了する。

- ・ 降雨後の打設再開時は、端部法面にモルタルを敷設して RCD 用コンクリートを打ち重ねる。

図－3.4.19 に湯西川ダムにおける最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の打設中に降雨中断が発生した場合のタイムテーブルを示す。既述したように、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、打設中断・再開に対して時間単位で現場判断ができ、降雨のない時間帯の打設中断時間を極力減らすことが可能となり、打設可能時間を有効に活用できる。一方、従来の RCD 工法は、降雨に対して横継目を設置して打ち止める必要があるため、降雨直前までの RCD 用コンクリートの打設は不可能である。また、打止位置は横継目位置に限定されブロック単位となり、特に下位標高部においては1ブロックのボリュームが大きいため、品質確保の観点から安全側の判断となり早めの打止がなされ、打設可能時間の有効活用が困難である。さらに、降雨終了後も打止め型枠撤去、清掃およびレーン割計画の見直しなどに時間を要するため、速やかな打設再開は困難である。

打設開始からの経過時間 (h)		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
工法、リフト標高、実打設時間		EL631～EL632（実打設時間 67.2h）											
打設 タイム テーブル	RCDコンクリート打設	5:17				6:15						16:05	
	外部コンクリート打設			16:26		8:40	13:32						5:00
備 考		3h37m 降雨中断 2h54m											

図－3.4.19 途中降雨による打設中断と再開の実績例（湯西川ダム）<sup>1)</sup>

## ii) 休日前日の対応

休日前日の施工では、不測の事態による作業時間延長にも配慮した打設計画が必要となる。この場合、基本的な考えは降雨時と同様であるが、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、打止め作業時間を考慮したうえで、予定終了時刻ぎりぎりまでのコンクリート打設が可能となる。一方、従来の RCD 工法では、施工ブロック単位での打設に限定されることや、予期せぬトラブルを考慮して、予定終了時刻に対して時間的な余裕を十分に持ったレーン計画とする必要があるため、結果的に施工数量が縮小される傾向がある。

## iii) 短い施工時間への対応

ダム堤体のコンクリート打設では、様々な要因によって打設可能時間が短くなる日も発生する。例えば、厳寒期の温度規制により打設可能時間が昼間に限られるような地域のダムにおいては、従来の RCD 工法では当該日の打設を中止にせざるを得ない場合でも、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では既述したように打設可能時間を有効に活用できる。

## ② 外部コンクリート打設の自由度の向上

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の場合、外部コンクリートは図－3.4.20 に示すように先

行打設された RCD 用コンクリート、上下流面型枠、横継目部型枠に囲まれた小ブロック単位での独立・後行打設となる。該当箇所の打設は仮設備能力等により現場ごとに異なるが、おおむね一時間以内の打設で完結する。このため、従来の RCD 工法のような次ブロックコンクリートとの打継時間規制の影響を受けることなく、打設可能なブロックから適宜打設することができ、施工の自由度が向上する。

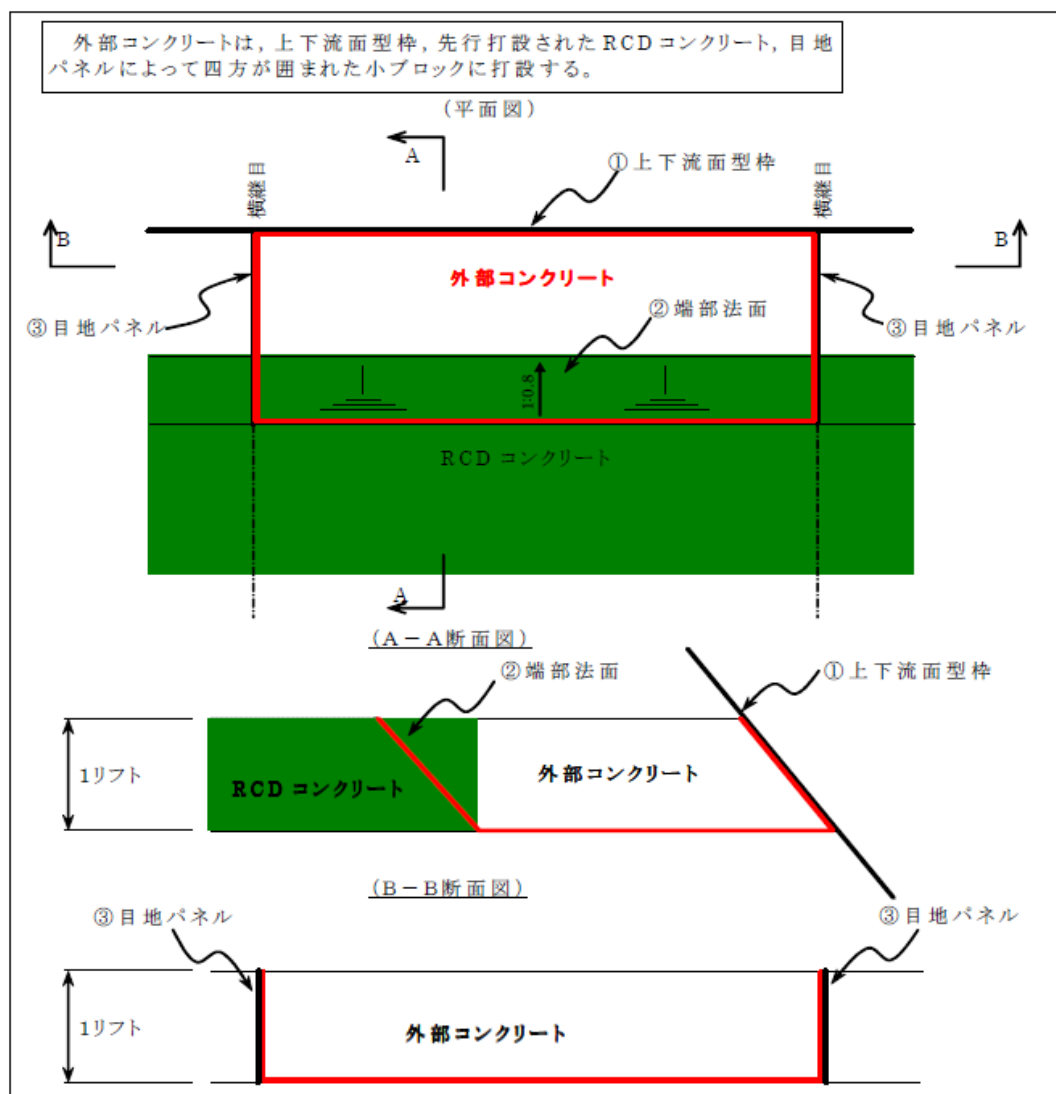


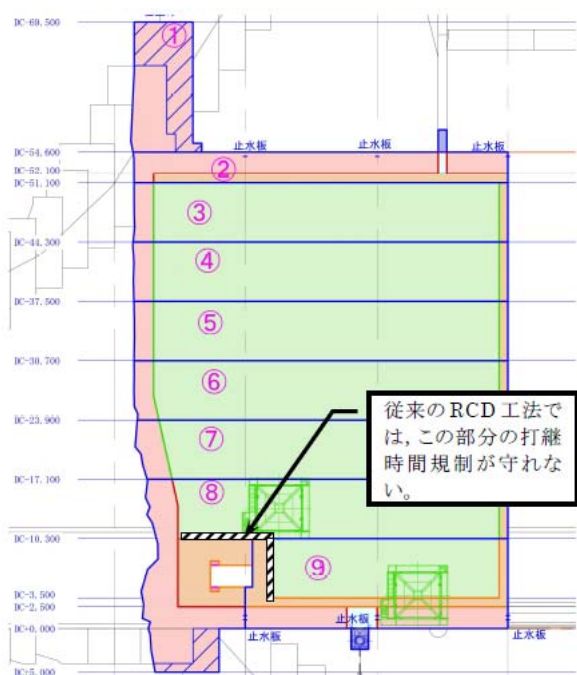
図-3.4.20 最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の外部コンクリート打設<sup>1)</sup>

### ③ レーン割りの自由度の向上

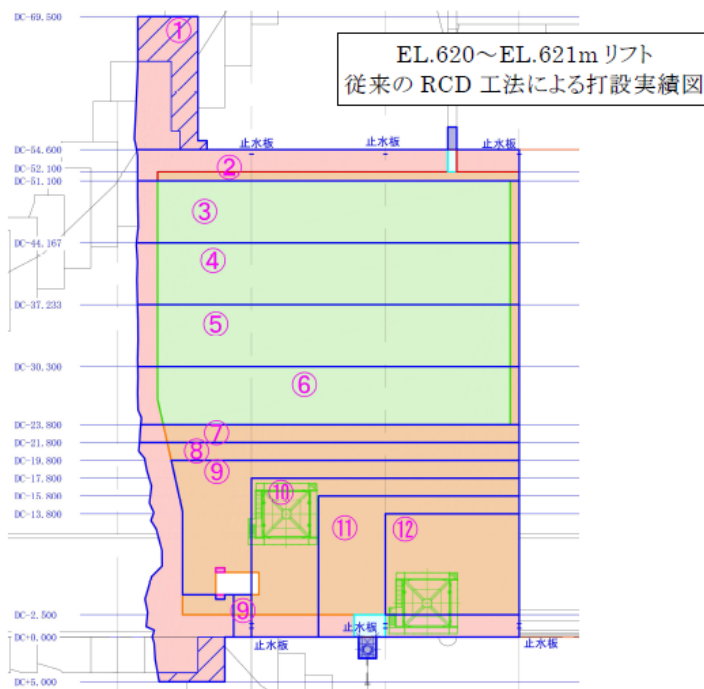
従来の RCD 工法では、隣接する有スランブコンクリートと RCD 用コンクリートの間には、(各ダムにより異なるが) 概ね4時間以内の打継時間制約がある。このため、図-3.4.21 に示すように堤体内構造などの関係で、凸状に外部コンクリートを配置した場合には打継面が2面出現し、有スランブコンクリートと RCD 用コンクリートの打継時間制約から打設が行えなくなる場合も

発生する。図－3.4.21 に示す例では、⑧レーン打設前に左岸上流コーナー部に大量の有スランブコンクリートを打設するため、このコーナー部の有スランブコンクリートと⑧レーンおよび⑨レーンの RCD 用コンクリートとの間で打継時間規制が守れなくなるものである。

この場合、実施工では図－3.4.22 に示すように、有スランブコンクリートを増やして、順次打継ぎをしながら対処し、コールドジョイントを回避することとなる。これに対して、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では異種コンクリート間の打継時間規制が存在しないため、図－3.4.21 に示す配合区分での施工が可能である。このため、施工速度が低い有スランブコンクリート数量を大幅に縮減することが可能となり、全体的な施工速度が向上する。



図－3.4.21 従来の RCD 工法での  
レーン計画図<sup>1)</sup>



図－3.4.22 従来の RCD 工法での  
レーン割りの実績図<sup>1)</sup>

#### ④ 着岩部コンクリート打設の施工性向上

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、着岩部を含めた有スランブコンクリートの打設は先行する RCD 用コンクリートの打設後であれば打設時期について制約がない<sup>1)</sup>。このため、着岩部コンクリートは、打設済みの RCD 用コンクリート上から打設することが可能である。また、基礎掘削勾配が緩い場合で RCD 用コンクリート上から直接有スランブコンクリートを打設できない場合は、着岩部の有スランブコンクリート打設を写真－3.4.8 に示すように、以下の方法で実施することが可能である。

- ・ 着岩部コンクリートを RCD コンクリート上からダンピングする。

- ・ ダンピングしたコンクリートを足場に、バックホウやバイバックを導入させ打設する。



写真－3.4.8 着岩部有スランプコンクリートの打設状況<sup>1)</sup>

#### ⑤ 安全性の向上

内部コンクリートと外部コンクリートの打設は、それぞれ打設作業を分担し異なる作業班で行う。

従来の RCD 工法では、内部コンクリートと外部コンクリートを交互に打設するため、隣接場所で施工することとなり、それぞれの作業を近接した場所、または同一場所で実施する時間帯が発生する。このため、打設作業員と施工機械が輻輳（例えば、外部コンクリート打設作業員と、内部コンクリート敷均しブルドーザの近接など）が生じ、安全上の問題が懸念されていた。

これに対して最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、内部コンクリートと外部コンクリートの打設場所を完全に分離することが可能であり、施工安全性が格段に向上することとなった。

### 3.5 第3章の結論

第3章では、コンクリートダムの施工方法を分類し、施工方法の変遷を整理した。

また、高速施工方法である RCD 工法について、従来の RCD 工法から最新の RCD 工法についての技術的特徴をまとめた。

- 1) 堤体材料からダムの型式は大きく「コンクリートダム」と「フィルダム」に分類されるが、コンクリートダムは力学的特性から「重力式コンクリートダム」と「アーチ式コンクリートダム」に分類される。
- 2) 重力式コンクリートダムはさらに構造により、「重力式コンクリートダム」「中空重力式コンクリートダム」「バットレスダム」に分類されるが、岩盤状況、地形等の制約の少ない「重力式コンクリートダム」が現在最も多く建設されている。
- 3) 重力式コンクリートダムの施工方法は大きく「柱状工法」と「面状工法」に分類される。
- 4) 柱状工法はブロック間の高低差が生じること、温度制御のためのパイプクーリングが必要なこと、ブロック間の一体化のためのジョイントグラウチングが必要なこと等により近年の採用例が減少している。
- 5) 面状工法は縦継目を設けず上下流方向を一体に、高低差を設けることなく層状に打設する工法で、温度応力や、安全性の面で有利な工法である。
- 6) 面状工法はさらに、「RCD 工法」と「拡張レヤー工法」に分類される。
- 7) RCD 工法は超硬練りの貧配合コンクリートを汎用機械であるブルドーザにより敷き均し、振動ローラで締固めを行う工法で、高速施工を可能とした。
- 8) 拡張レヤー工法は RCD 工法と同様にブロック間に高低差を設けずに面状に打設を行う工法であり、使用するコンクリートはスランプ 3 cm 程度の有スランプコンクリートで、施工機械は RCD 工法より若干少ないが、打設速度が RCD ほど高くない。
- 9) RCD 工法に用いられるコンクリートは一般に中庸熱ポルトランドセメントにフライアッシュを 30%程度混合させたセメントを用い、単位結合材料は  $120\sim 130\text{kg/m}^3$  である。
- 10) コンシステンシーを示す VC 値は  $20\pm 10$  秒程度のコンクリートを使用する。
- 11) RCD 工法におけるコンクリート運搬方法は、柱状工法と違い、施工が高低差の小さい面状であるため、その選択の自由度が格段に上がった。
- 12) RCD 打設方法は、1 リフト 1 m を基本とし、25cm の薄層を 4 層にて敷き均し、1 m 敷均し後に振動ローラにて転圧を行う。
- 13) 従来の RCD 工法においては、外部コンクリートである有スランプコンクリートと、内部コンクリートである RCD 用コンクリートを所定の時間内に打ち重ね、打設を進めるため、打設速度の低い有スランプコンクリートに全体打設速度が拘束される傾向にあった。
- 14) 全体の打設速度を向上させるために、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）が開発された。
- 15) 最新の RCD 工法は、内部コンクリートを先行して打設し、内部コンクリートとしての RCD

部分は端部締固め機により転圧を行うことで、外部コンクリートとの打継規制を撤廃したもので、内部コンクリートの打設速度が拘束を受けることが無くなり、全体の打設速度向上を可能とした。

## 第3章の参考文献

### 3.1 概要

- 1) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.51、2010.7

### 3.2 コンクリートダムの形式と施工方法による分類

- 1) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.45-46、2010.7
- 2) 内の倉ダム技術誌：農林省加治川農業水利事業所、1975
- 3) 水野光章：我が国コンクリートダムの設計、施工の変遷（一）、ダム日本、No.806、pp.11-28  
2011.1
- 4) 安河内孝：ダム温故知新第17回 三滝ダムを訪ねて、ダム日本、No.815、pp.20、2012.9.
- 5) 水野光章：我が国コンクリートダムの設計、施工の変遷（二）、ダム日本、No.807、pp.33-52  
2012.1
- 6) 古賀邦雄：ダムの書誌あれこれ（22） 山口県のダム、ダム日本、No.730、pp.58、2005.8
- 7) 上坂恒雄、塩入淑史：締固め工法における進歩、コンクリート工学、Vol.23、pp.74-81、1985.7
- 8) (一財)ダム技術センター：多目的ダムの建設、pp.156-168、2005.6
- 9) (一財)ダム技術センター：RCD 工法技術の進歩、pp.2-2、2005.12
- 10) 水野光章：我が国コンクリートダムの設計、施工の変遷（四）、ダム日本、No.809、pp.29-40  
2012.3

### 3.3 RCD 工法の特徴

- 1) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.51、2010.7
- 2) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.91-94、2010.7
- 3) (一財) 日本ダム協会：コンクリートダムの施工、pp.61、2008.9
- 4) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.138-157、2010.7
- 5) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.158-172、2010.7
- 6) 宮ヶ瀬ダム 水を湛える：鹿島・大林・戸田建設工事共同企業体、pp.51、1998.11.
- 7) 滝沢ダム本体建設工事 工事誌：鹿島・熊谷・銭高特定建設工事共同企業体、2009.8.
- 8) 真崎義則、鈴木富雄：徳富ダムの設計と施工について、ダム日本、No.749、pp.23、2007.3.
- 9) (一財) 日本ダム協会：コンクリートダムの施工、pp.138、2008.9
- 10) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.194-199、2010.7
- 11) (一財) 日本ダム協会：コンクリートダムの施工、pp.147、2008.9
- 12) (一財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術、pp.200-201、2010.7

### 3.4 最新の RCD 工法

- 1) (一財) ダム技術センター：改訂版 巡航 RCD 工法施工技術資料、2012.2.

- 2) 梅田貞夫：RCD 工法ダム的高速施工に関する研究、京都大学学位論文、pp.34、2000.12
- 3) 田代民治、林健二：巡航 RCD 工法の本格適用による工程短縮と技術開発、土木施工、Vol.56、pp.132-135、2015.11
- 4) 高橋政則、渡邊正美、飯原征敏、須田健一：湯西川ダム本体工事における「巡航 RCD 工法」の適用－その 1－、ダム技術、No.297、pp.56-76、2011.6
- 5) 藤澤侃彦：RCD 工法の真の実力と巡航 RCD 工法、ダム技術、No.331、pp.3-20、2014.4



## 第4章

# 高速施工に対応する 運搬方法とその有効性



## 第4章 高速施工に対応する運搬方法とその有効性

### 4.1 概要

コンクリートダムの施工設備計画は、安全性・環境保全効果・経済性・工期短縮・ダムの早期供用などの効果などを十分に考慮して行う必要があり、常に新しい工夫が取り入れられ、幾多の新しい機械設備等が開発・適用されている。

コンクリートダム建設当初は、ブロック間に高低差が生じる柱状工法で施工されていたため、コンクリートの運搬は、打設箇所へ直接投入が可能なケーブルクレーン、タワークレーン、クローラークレーン等に代表されるクレーンによる方法に限定されていた。その後、施工方法が面状工法に移行するに伴い、堤体上でのダンプトラック等による運搬が可能となり、特に RCD 工法においては大量のコンクリートを迅速に運搬する要求からクレーン工法に加えてインクライン方式やベルトコンベヤ方式、ダンプ直送方式などの様々な運搬方法が総合して用いられるようになった。

本章では、まず高速施工に対応したダンプ搭載型インクラインの計画・導入・稼働状況と、ケーブルクレーンの運搬・打設効率の向上を目指して、新たに導入した自動運転システムの開発内容とその成果を示す。

次に、更なる高速施工に対応したコンクリートの運搬方法として、新たに考案したパイプを用いてコンクリートを高所から低所へ運搬する SP-TOM (Special Pipe TranspOrtation Method) の大量搬送機構と材料分離抑制機構について述べる。

## 4.2 コンクリートダムの施工設備

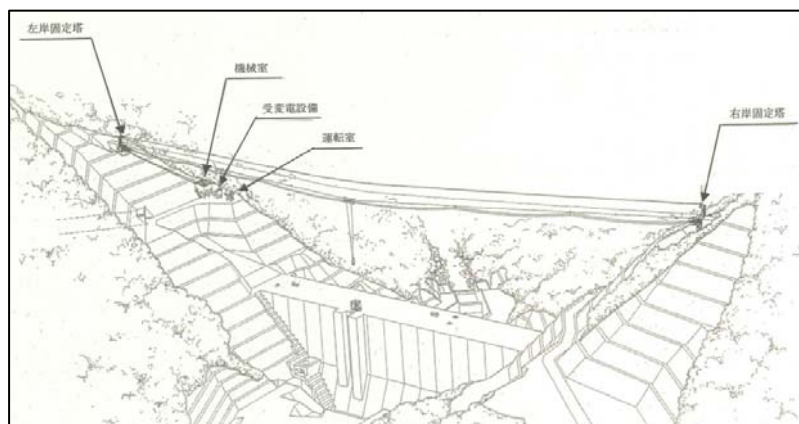
コンクリートダムの施工設備は表－4.2.1に示すように分類するのが一般であり、ダムサイトの地形条件・周辺環境に適応した機種を選定と配置計画をする必要がある。特にコンクリート運搬・打設設備は堤体施工の基本を左右し、その他の設備能力を決定する際の基準となるため、他の設備との整合性・合理性・経済性を十分考慮して計画する必要がある。

表－4.2.1 コンクリートダムの施工設備

	施工設備	設備概要
1	コンクリート運搬・打設設備	ダンプトラック、トランスファーカ、インクライン、ケーブルクレーンなどのコンクリートを運搬、打設する設備の総称
2	コンクリート製造設備	骨材・セメント・水等の材料を混合し、コンクリートを製造する設備
3	セメント輸送および貯蔵設備	セメントをコンクリート製造設備まで輸送する設備 セメントサイロなどのセメントを貯蔵する設備
4	骨材製造、貯蔵及び骨材輸送設備	原石を製品骨材に破碎、製造する設備と製品骨材を貯蔵する設備 コンクリート製造設備まで骨材を輸送する設備
5	その他設備	コンクリート冷却および加熱設備、濁水処理設備、給気設備、給水設備、電力設備など

### (1) コンクリート運搬・打設設備

代表的なコンクリート運搬・打設設備を図－4.2.1～図－4.2.3に示す。これらの設備には、ダンプトラック、トランスファーカ、インクライン、ケーブルクレーン（固定式・軌索式・走行式）、タワークレーン、自走式ジブクレーン、クローラクレーン、ベルトコンベヤなどがある。



図－4.2.1 ケーブルクレーンの設備例<sup>1)</sup>

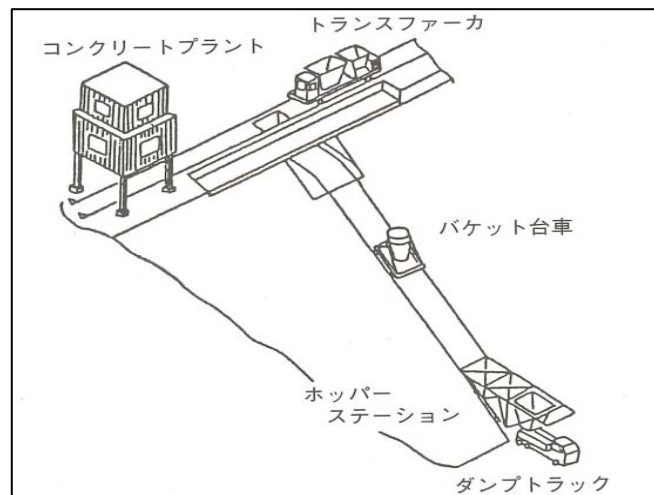


図-4.2.2 バケット台車式インクラインの設備例<sup>2)</sup>

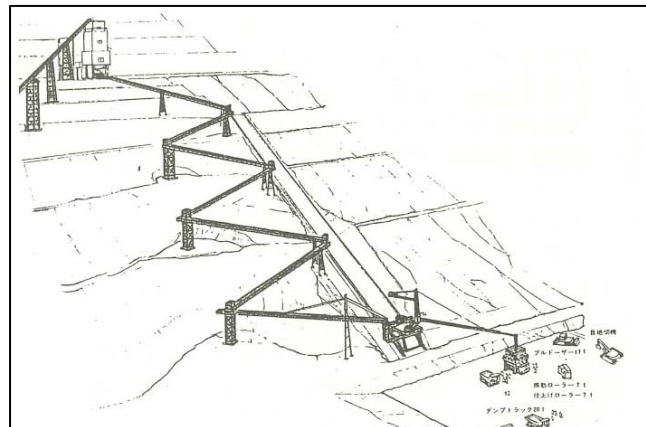


図-4.2.3 ベルトコンベヤ方式の設備例<sup>3)</sup>

## (2) コンクリート製造設備

骨材・セメント・水などの材料を混合し、コンクリートを製造する設備である。ミキサ内側に複数の羽根が固定されたドラムが回転し材料を混合攪拌し、傾胴してコンクリートを放出する傾胴式ミキサ（重力式）や、混合槽（ミキサドラム）内に2軸の混練羽根を設置したアームが回転することで、強制的に材料を混合攪拌する2軸強制練り式ミキサがある。

## (3) セメント輸送および貯蔵設備

セメントを貯蔵する一般的な設備はサイロであり、セメントをコンクリート製造設備まで輸送する設備にはスクリーコンベヤやバケットエレベータおよび加圧送風機と配管を用いたセメント圧送設備がある。

#### (4) 骨材製造、貯蔵および骨材輸送設備

原石を粗骨材と細骨材の製品骨材に破碎、選別して製造する設備と、製造した製品骨材を貯蔵するストックパイルやコルゲートパイプを用いた貯蔵設備がある。コンクリート製造設備まで輸送する設備はダンプトラックやベルトコンベヤがある。代表的な骨材製造設備と貯蔵、輸送設備例を図-4.2.4に示す。

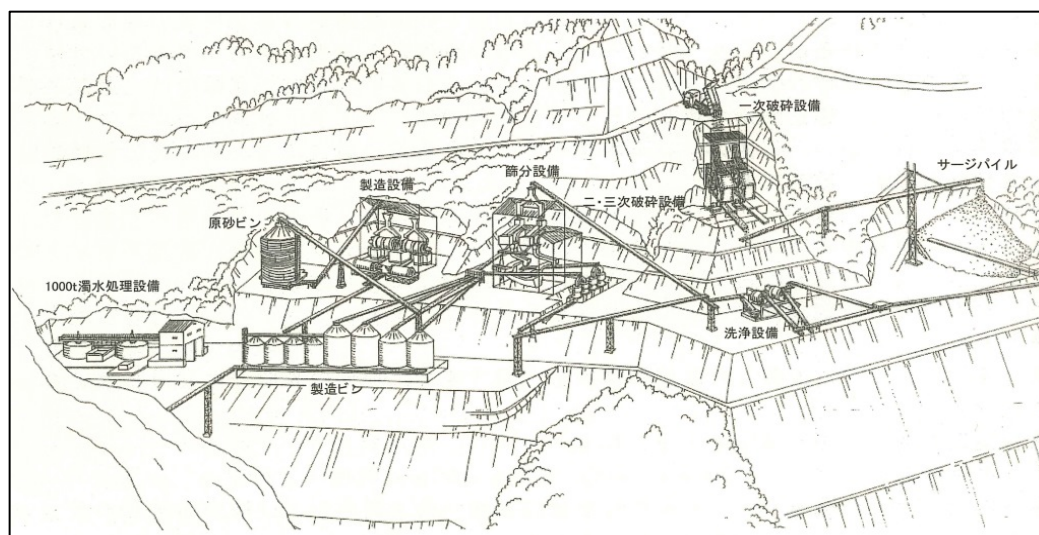


図-4.2.4 骨材製造設備、貯蔵及び骨材輸送設備例<sup>4)</sup>

#### (5) その他設備

コンクリート冷却および加熱設備、濁水処理設備、給気設備、給水設備、電力設備などがその他設備として分類される。

## 4.3 コンクリート運搬・打設設備の変遷

### 4.3.1 概要

重力式コンクリートダム施工に RCD 工法を採用する場合、従来の分割された区画（ブロック）ごとにコンクリートを打設する柱状打設工法とは異なり、面状施工となることから、土工に近い汎用機械を使用し、コンクリートを大量に打設することができる。この RCD 工法の特長である高い打設能力を活かすためには、コンクリートを大量運搬することが求められる。従来、コンクリートの運搬はケーブルクレーンやタワークレーンが主流であったが、面状工法である RCD 工法の登場によって堤体上でのダンプトラック運搬が可能となったため、インクライン、ベルトコンベヤ、ダンプトラック直送といった方式も選択肢として広がり、コンクリート運搬方法の自由度が大きくなった。

一方、RCD 工法は打設区画が広い場合コンクリートの凝結時間を考慮すると、一定時間内にコンクリートを打ち重ねる制約がある。このため、従来の柱状打設工法よりも打設能力を更に大きくした「大量のコンクリートを一度に打設することが可能な高速施工に対応したコンクリートの運搬・打設設備」の開発・展開が重要である。

上述した、RCD 工法によるコンクリート打設の高速施工の技術的課題のひとつである運搬能力の確保策として、堤体積 200 万  $\text{m}^3$  の宮ヶ瀬ダム（神奈川県、建設省関東地方建設局：当時）では、コンクリート運搬・打設設備にインクラインを採用した。

また、堤体積 165 万  $\text{m}^3$  の滝沢ダム（埼玉県、水資源開発公団：当時）では、オペレータの技量に依存していたケーブルクレーンによる運搬速度の向上を目的として、ケーブルクレーン自動運転システムを開発した。このシステムをケーブルクレーン 3 基に導入することで、常に最大搬送速度を維持しながらコンクリートを運搬することが可能となり、大きな効果を得ることができた。

しかし、インクラインやケーブルクレーンの設置には、ダムサイトの地形的制約が多く、すべてのダムへの適用が可能となるわけではなかった。また、従来の RCD 工法よりもさらに打設速度が高い最新の RCD 工法に適応したコンクリートの運搬方法も求められた。そこで、コンクリート運搬・打設設備のさらなる高速施工に対応し、コンクリートの連続大量輸送ができる SP-TOM (Special Pipe Transportation Method) を考案・開発し、その工法を嘉瀬川ダム（発注者：国土交通省九州地方整備局）、湯西川ダム（発注者：国土交通省関東地方整備局）、第二浜田ダム（発注者：島根県）、五ヶ山ダム（発注者：福岡県）に適用して高速かつ安定した品質でコンクリートを運搬・打設した。

筆者が携わった代表的なダムのコンクリート運搬・打設設備一覧を表 4.3.1 に示す。

表－4.3.1 筆者が携わった代表的なダムのコングリート運搬設備一覧

項目 \ ダム名		宮ヶ瀬ダム	早池峰ダム	滝沢ダム	嘉瀬川ダム	湯西川ダム	第二浜田ダム	五ヶ山ダム
堤体積 (m³)		2,000,000	334,000	1,657,600	965,000	1,030,000	320,790	936,000
主な運搬設備※	系 統 1※※	インクライン 2 基 (ダンプ搭載)	ダンプ直送	固定式ケーブル クレーン 3 基	固定式ケーブル クレーン 2 基	固定式ケーブルク レーン 2 基	固定式ケーブル クレーン 1 基	固定式ケーブル クレーン 1 基
	能 力 1	積載荷重 20t ダン プトラック搭載	11t ダンプトラ ック	定格荷重 15t	定格荷重 18t	定格荷重 18t	定格荷重 18t	定格荷重 18t
	系 統 2	軌索式ケーブルク レーン 1 基	軌索式ケーブル クレーン 1 基	SP-TOM (φ500mm) 1 条	SP-TOM (φ700mm) 1 条	SP-TOM (φ700mm) 1 条	SP-TOM (φ700mm) 1 条	SP-TOM (φ700mm) 1 条
	能 力 2	定格荷重 9.5 t	定格荷重 9.5 t	70m³/h	200m³/h	200m³/h	200m³/h	200m³/h
	ケーブルクレーン 自動運転システム	無	無	有	有	有	有	有
バン カー 線 設 備	方 式	3m³ タイヤ式トラ ンスファーカ	ダンプトラック	4.5m³ 循環バケツ	6m³ レール式ト ランスファーカ	6m³ レール式トラ ンスファーカ	5.5m³ レール式ト ランスファーカ	5.5m³ レール式ト ランスファーカ
	ランスファーカ 自動運転システム	無	無	有	有	有	有	有
備 考						固定式ケーブルク レーンの 1 基は鉄 塔移動可能タイプ		

※：減勢工運搬打設用設備は除く ※※：各ダム、2つの系統で運搬を行った

#### 4.3.2 インクラインによるダンプトラック運搬<sup>1)2)</sup>

インクラインは、ダム の 左右岸斜面の一方に設置するものであり、以下に示す設備で構成される。

- ・ 軌道
- ・ 軌道を移動する台車
- ・ 台車を牽引するワイヤ
- ・ ワイヤ巻上装置およびカウンターウエイト

インクラインによるコンクリート運搬は、コンクリートを積載したホッパやダンプトラックを台車に搭載し、高所から打設標高まで台車を移動して行う。設備としては大掛かりとなるが、台車の搭載可能質量を大きくすることで、一度に大量のコンクリートを運搬することが可能である。

宮ヶ瀬ダムで採用したダンプトラック直載型インクラインは、台車に積載荷重 20t のダンプトラック（以下、20t ダンプトラック）を直接乗り入れる方式を採用しており、以下の手順でコンクリートを運搬する。

- ① 20t ダンプトラックに、コンクリート製造設備で製造された RCD 用コンクリートを積み込む。
- ② ダム天端付近に停止している台車に 20t ダンプトラックが直接、乗り入れる。
- ③ 20t ダンプトラックを搭載した台車が打設標高まで移動する。
- ④ 打設標高に到達した台車からダンプトラックが降車し、打設面上の未打設エリアを自走し、打設エリアまで RCD 用コンクリートを運搬する。

ダンプトラック直載型インクラインの採用によって、20t ダンプトラックに積載されたコンクリートを積み替えることなく、打設エリアまでコンクリートを直接運搬することが可能であり、品質と高い運搬能力の確保を両立できる。このことから、柱状工法よりも高い打設速度が要求される面状工法、特に大規模ダムにおける RCD 工法においては、コンクリートをクレーンで運搬するのに加えて、インクラインによるダンプトラックで運搬することが有効である。

(1) 設備の概要

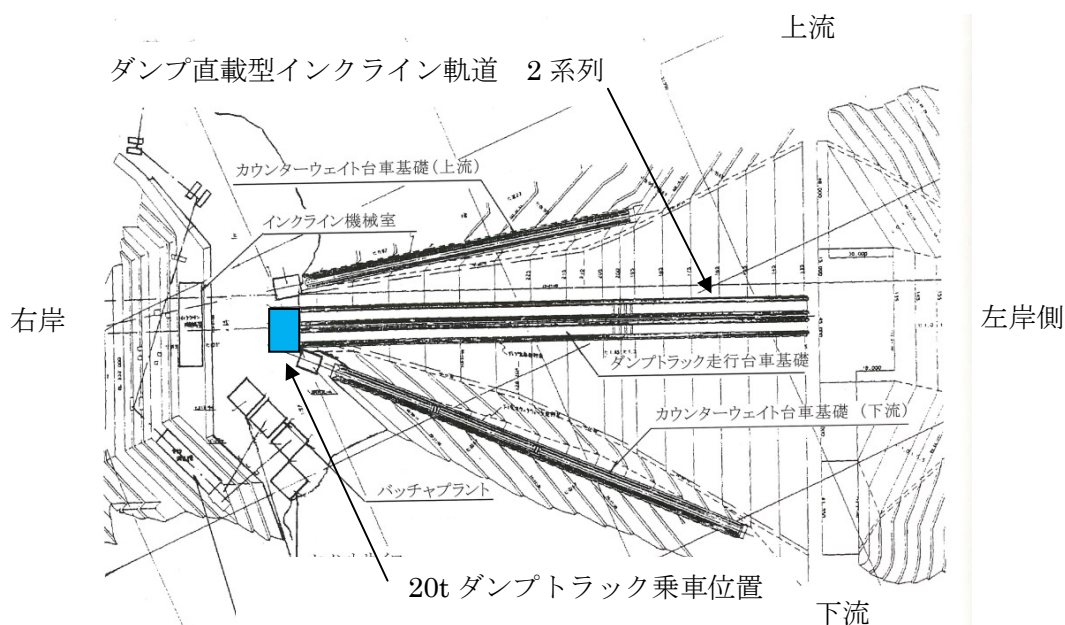
ダンプトラック直載型インクラインと固定式ケーブルクレーンの比較を表－4.3.2 に示す。

表－4.3.2 コンクリート運搬設備の比較

方 式	ダンプ直載型インクライン	固定式ケーブルクレーン
地 形 (基礎)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基礎は堤敷内に収まり土地改変が少ない</li> <li>・基礎は堤体の一部として先行打設可能で撤去不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄塔・バックステー・サイドステー用基礎が大規模となり、土地改変が伴う</li> <li>・基礎撤去が必要</li> </ul>
施工面	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業効率が高い</li> <li>・一度に大量のコンクリート打設可能</li> <li>・2系列とすることで安全性に優れる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地形制約により複数台の設置不可</li> <li>・堤高がありサイクルタイムが落ち作業効率が劣る</li> </ul>
品質面	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ケーブルクレーンよりも積替え回数が少ないため、材料分離、VC 値、スランプ低減を更に抑制可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・積替え回数が少ないため、材料分離、VC 値、スランプ低減を抑制可能</li> </ul>

宮ヶ瀬ダム のダンプトラック直載型インクラインは、ダム右岸に2系列の軌道を設け、電動機出力・設備費・電力量の軽減を考慮してカウンターウェイト方式を採用した。また、コンクリート運搬のほか、ラフタークレーン、ブルドーザ、振動ローラなどの施工機械や資機材の運搬にも使用できるため、専任の運転手を配置して運転した。

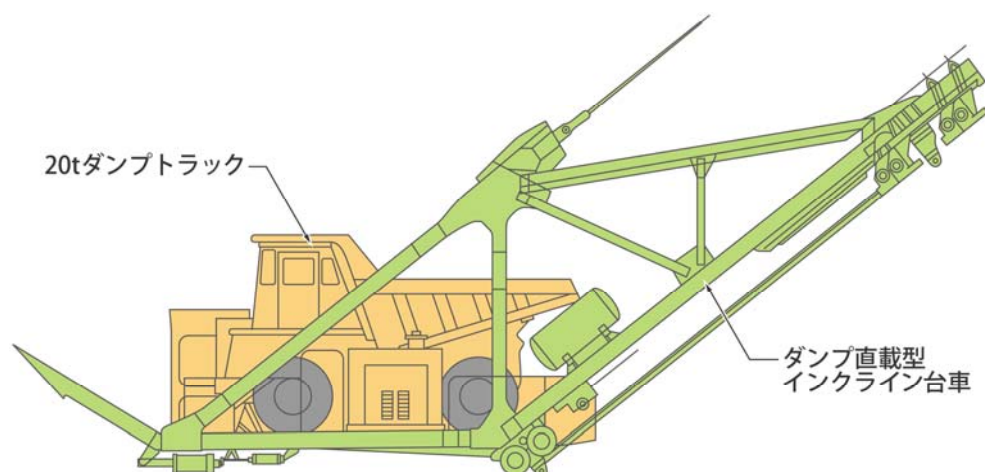
ダンプ直載型インクライン設備全体配置を図－4.3.1 に示す。



図－4.3.1 ダンプ直載型インクライン設備全体配置

## （２）設備仕様

20t ダンプトラックの搭載を可能としたインクライン台車を図－4.3.2 に、インクラインの設備仕様を表－4.3.3 に示す。



図－4.3.2 20t ダンプトラック搭載可能なインクライン台車

表－4.3.3 インクライン設備仕様

最大積載量	42.0 t
搭載限界寸法	L10.0m×W4.5m×H4.0m
ウインチ	単胴巻上機：DC400V，450kW
牽引ワイヤロープ	タフスーパーロープ T IWRC 6×WS(36)
ウエイト	上流側設備：119.3t，下流側設備：115.6 t
軌道設備	軌道長：293m，軌道間隔：6m，軌条：H 鋼＋37kg レール
運搬速度	180m/min
コンクリート運搬能	1 系列あたり 105m³/h (ダム重心標高における理論値)

## （３）使用状況

宮ヶ瀬ダムの右岸部斜面は均一な勾配でなく、インクラインの軌道に屈曲点が発生するため、勾配変化点ではダンプ台車フレームの角度変更が可能な方式を採用した。また、使用中には大小様々な故障が発生したが、修理・改造は工事工程に影響を及ぼさないように夏季休暇などの休工時に実施した。

インクライン設備の稼働状況を写真－4.3.1、写真－4.3.2 に示す。



写真－4.3.1 インクライン設備全景



写真－4.3.2 インクライン台車設備

#### (4) 稼働実績

宮ヶ瀬ダムにおけるダンプトラック直載型インクラインの打設効率を図-4.3.3に、時間当りの打設実績を図-4.3.4に示す。これらのデータはEL137.25m～EL270.0mまでのコンクリート打設を対象に取得したものである。

図-4.3.3に示すように、固定式ケーブルクレーンに加えてダンプトラック直載型インクラインを適用することによって、打設効率は低標高部において50～70%、高標高部で60～80%を確保している。従来のクレーンだけでコンクリートを運搬した場合の一般的な打設効率は50～60%であり、これを上回っていることから、大規模ダムにおけるRCD工法においてダンプトラック直載型インクラインを併用することは有効である。

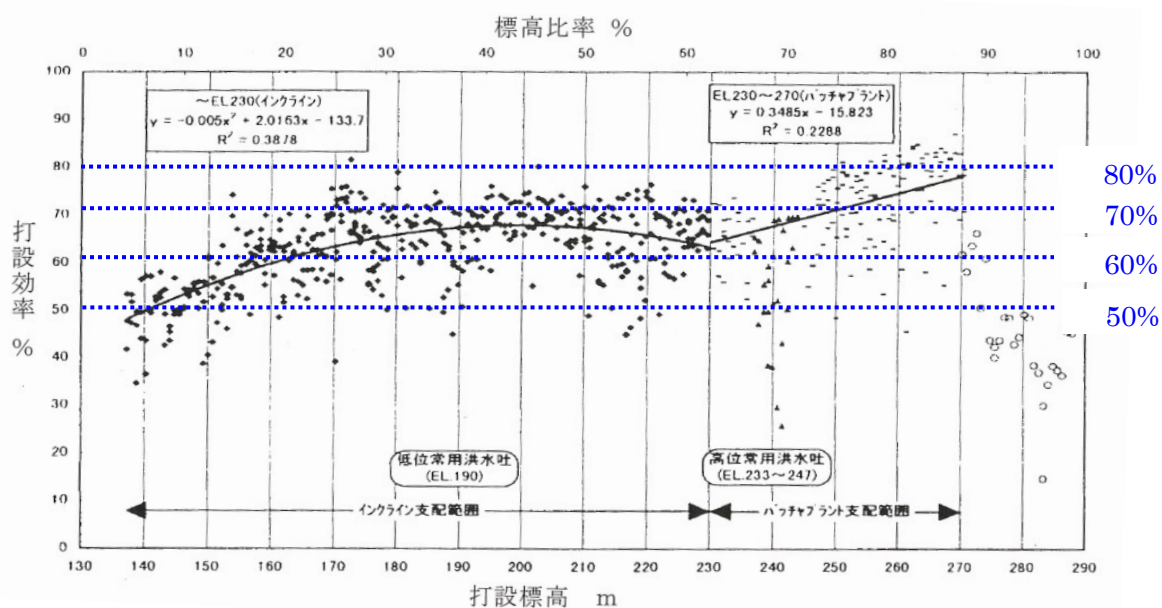


図-4.3.3 打設標高と打設効率の関係（実績）

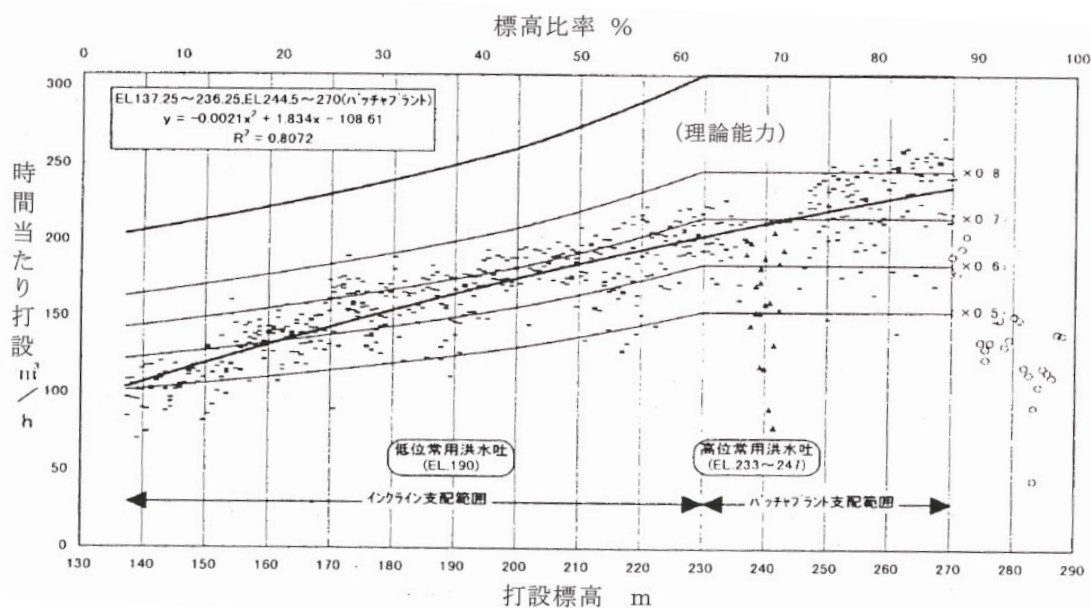


図-4.3.4 打設標高と時間当りの打設量の関係（実績）

### 4.3.3 ケーブルクレーン

ケーブルクレーンは、ワイヤロープを用いてダム堤体上空を左右岸方向に移動できる設備であり、従来からコンクリート運搬・打設設備として広く採用されている。ケーブルクレーンが運搬可能なコンクリート量は、ケーブルクレーンの吊上げ能力に制約されるため、必要なコンクリート運搬能力に適したケーブルクレーンを選択する必要がある。

RCD 工法の技術的課題のひとつにコンクリート打設の高速化があるが、コンクリート運搬にケーブルクレーンを使用する場合、吊上げ能力を大きくする、または運搬能力を向上する必要がある。このうち、吊上げ能力を大きくすると経済面や設備設置時のダム周辺の土地改変量が大きくなるなどの問題点が発生する。また、ケーブルクレーンの運転は、熟練オペレータが合図を頼りに操作するため、夜間作業時やオペレータの技量差によるコンクリート運搬能力の低下が課題であった。

RCD 工法に前述したインクラインの採用が困難で、かつケーブルクレーンにて施工する場合、ケーブルクレーンによるコンクリート運搬・打設能力の向上が必要である。このため、ケーブルクレーンをコンピュータで自動運転可能なシステムを開発し、複数のダム工事に導入し成果を得た。

#### (1) ケーブルクレーンの仕組み

ケーブルクレーン<sup>3)4)5)</sup>は、ダム左岸および右岸それぞれに主索（ワイヤロープ）を支持する鉄塔などを設置し、コンクリートバケットを吊り下げた横行トロリがこの主索上を移動してダム堤体上にコンクリートを運搬・打設する設備である。

横行トロリは複数の車輪で構成され、横行トロリの前後にそれぞれ接続した横行ワイヤロープの巻取り、引出しによって主索上を移動させる。また、横行トロリ下部に配置した滑車と巻上げワイヤロープでコンクリートバケットを吊り下げておき、目的地に到達するとコンクリートバケットを上下する仕組みとなっている（図-4.3.5 参照）。

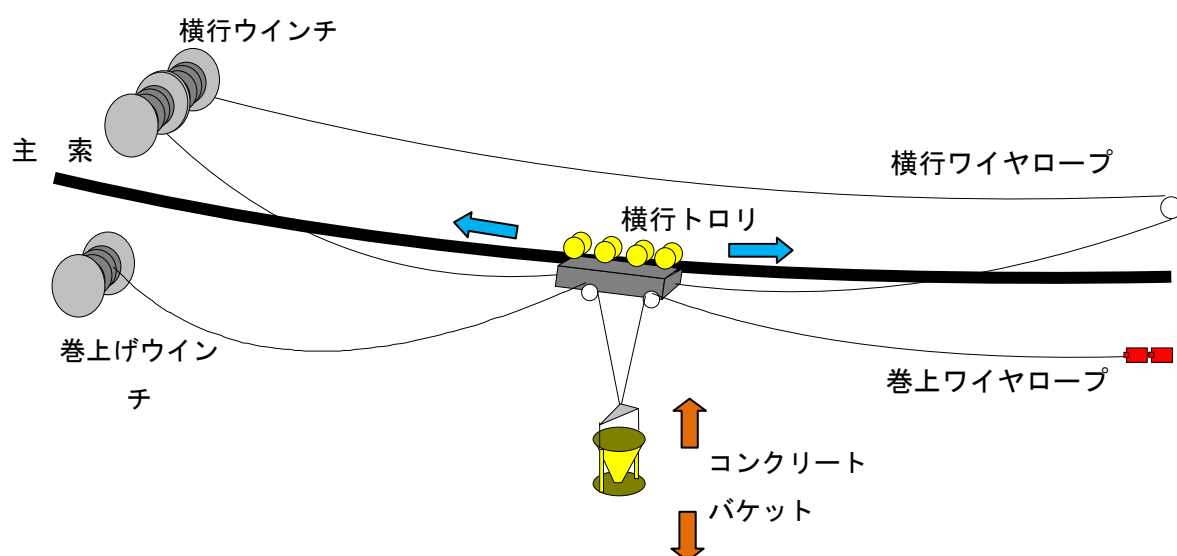


図-4.3.5 ケーブルクレーンの構成

## (2) ケーブルクレーン採用時の問題点

ケーブルクレーンは従来から主要な運搬・打設設備であるが、ケーブルクレーンの運転はオペレータが自身の目と打設地点にいる信号員の合図だけを頼りに運転している。このため、コンクリート運搬・打設設備能力は、夜間作業では能力が低下したり、オペレータ・信号員の技量に左右されるといった問題点があった。また、近年ではケーブルクレーンオペレータの高年齢化が進んでおり、技量が優れた熟練オペレータを複数人確保することは困難な状況にある。

ケーブルクレーンで RCD 工法に対応するためには、オペレータに依存しないコンクリート運搬・打設能力の向上が必要である。このため、各種センサとコンピュータを組み合わせることで、ケーブルクレーンの自動運転可能なシステムを開発した。

## (3) ケーブルクレーン自動運転システム

ケーブルクレーン自動運転システム(図-4.3.6 参照)は、1998 年に開発し、奥三面ダム(発注者：新潟県)においてシステムの実証を行い、2000 年にダム建設技術・技術審査証明を取得した。滝沢ダム(発注者：水資源開発公団(当時))では両端固定式ケーブルクレーン 3 基に本システムを採用し、その後、砂子沢ダム、嘉瀬川ダム、湯西川ダム、第二浜田ダム、五ヶ山ダムにも本システムを導入し、安定したコンクリート運搬・打設を実現している。

ケーブルクレーン自動運転システムの詳細を以下に示す。

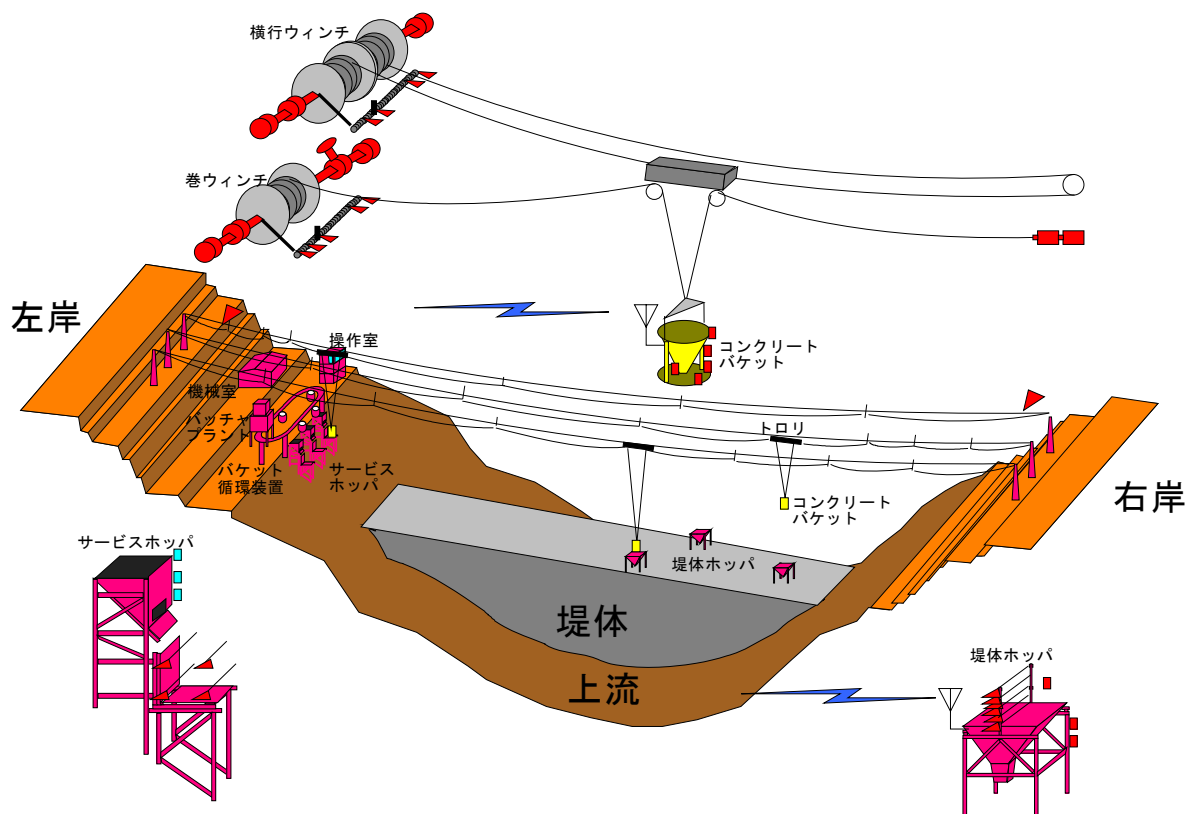


図-4.3.6 ケーブルクレーン自動運転の全体システム

a) ケーブルクレーン自動運転システムの具体的な動作

ケーブルクレーン自動運転システムの具体的な動作とその順序について以下に示す。

①自動運転準備

自動運転準備として、堤体上のコンクリート位置（堤体ホッパ位置）やトロリの原点位置を設定し、コンクリートバケットをバンカー線に着床させる。

②コンクリートバケット離床

コンクリートバケットはコンクリートの積込みを完了すると、ケーブルクレーンは自動で運転開始しコンクリートバケットをバンカー線から離床する。

③堤体ホッパへ向けた運転

巻上げウインチ、横行ウインチの巻上げ、横行などの動作を自動で行い、コンクリートバケットは最適ルートを振止め制御を行いながら移動する。

④コンクリート放出

- ・堤体ホッパがコンクリートバケットを確認すると確認信号が伝送され、堤体ホッパはコンクリートバケットへ「ゲート開信号」を発信する。
- ・コンクリートバケットは「ゲート開信号」を受信するとゲートを開きコンクリートを堤体ホッパへ放出する。

⑤バンカー線への戻り運転

コンクリート放出完了後、コンクリートバケットのゲートが閉じると、最適ルートを振止め制御を行いながらバンカー線へ戻り運転をする。

⑥自動運転待機

- ・コンクリートバケットはバンカー線へ自動的に着床し、次のコンクリート積込みまで待機する。

b) ケーブルクレーン自動運転システムの特長

ケーブルクレーン自動運転システムの特長を以下に示す。

①効率的・経済的なコンクリート運搬

ケーブルクレーンが理論上、サイクルタイムが最も短縮されかつ安全なルートを自動で選択して運転するため、無駄のない効率的なコンクリート運搬が可能である。

②安定した品質のコンクリート打設

本システムはオペレータの技量差によることなく、安定したコンクリート打設が可能である。

③施工の省力化

通常必要なコンクリートバケットからの放出作業員および周辺施設（トランスファーガやバンカー線設備）の特殊作業員数を縮減できる。

④安定した横行とサイクルタイムの向上

加減速時のケーブルクレーンの振れを止める操作は、従来、信号員からの指示と、クレー

ンオペレータの目視と経験によって行っていたが、２段階振止め制御をコンピュータが自動で行うため、サイクルタイムの遅延がなく、正確かつ安全な運転が可能である。

#### ⑤安全性の向上

各種センサを搭載したコンクリートバケットは、運搬中のゲート誤作動を防止するための安全機能を備えている

#### c) ケーブルクレーン自動運転パターン

本システムでは打設位置によって最適な制御を行うため、自動運転パターンは変化するが、バンカー線付近は一定パターンの運転として制御する。通常、オペレータによる運転速度は１～５速の５段階であるが、自動運転時の速度は無段階で制御することができるため、サイクルタイムの短縮を図ることが可能となる。

なお、バンカー線付近以外は、投入位置に応じた自動運転パターンに基づいて運転している。

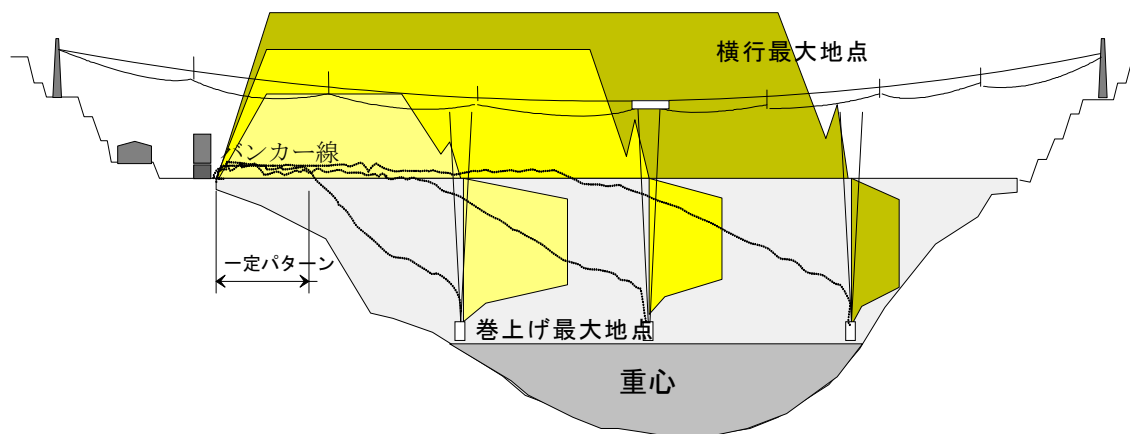
図－４.３.７に示す自動運転パターンを示し、具体的な手順を以下に示す。

##### ①投入座標（X，Y，Z）

- ・打設開始前に堤体ホッパ上のコンクリートバケット位置を投入座標として入力する。

##### ②投入位置が異なる場合の運搬パターン

- ・投入位置が異なる場所であっても、運転パターンの基本は横行トロリが目的地上空に到達するまでに、コンクリートバケットの巻下げを終え、最適な振れ止め制御を行って、振幅が最小になるように運転する。



図－４.３.７ 自動運転制御方式による運転パターン例

#### d) 振止め制御

振止め原理のイメージを図－４.３.８に示し、具体的な手順を以下に示す。

- ①コンクリートバケットの振止めは、２段階加速(減速)振止め法を用いる。２段階加速(減速)振止め法は、加速（または減速）を２段階に分けて行い、１段目の加速で発生する振れを２段目の加速で打ち消して制振する方法である。

- ② 2段階加速(減速)振止め制御ではトロリに図-4.3.9 に示すような速度パターンを与え、そのときの加速度パターンは図-4.3.10 のような矩形波となる。
- ③ 横行トロリの加速によってバケットに力が伝わりバケットは振れるが、これを図-4.3.11 に示すように1番目の矩形波を2番目の矩形波で打ち消す。この制御をポジカスト制御<sup>6)</sup>といい、振止め制御として効果を発揮している。

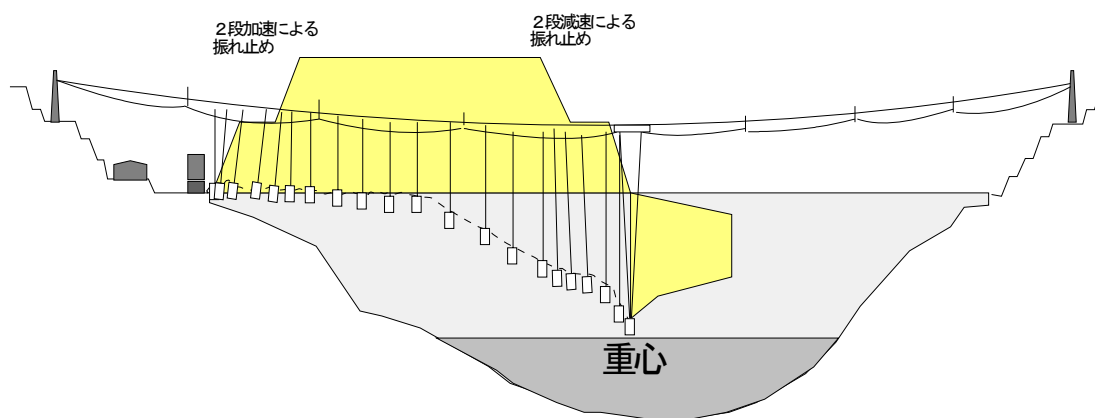


図-4.3.8 振止め原理

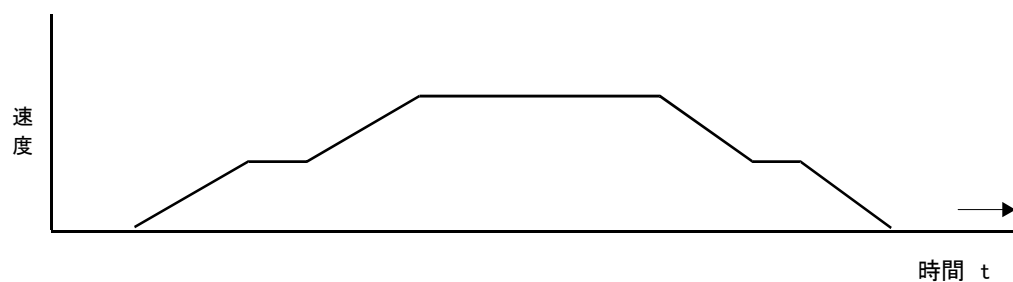


図-4.3.9 横行トロリの速度パターン

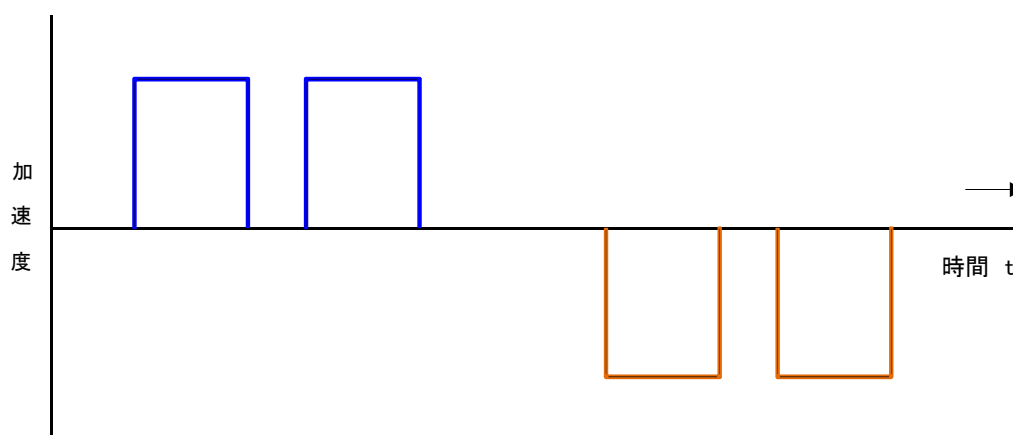


図-4.3.10 横行トロリの加速度パターン

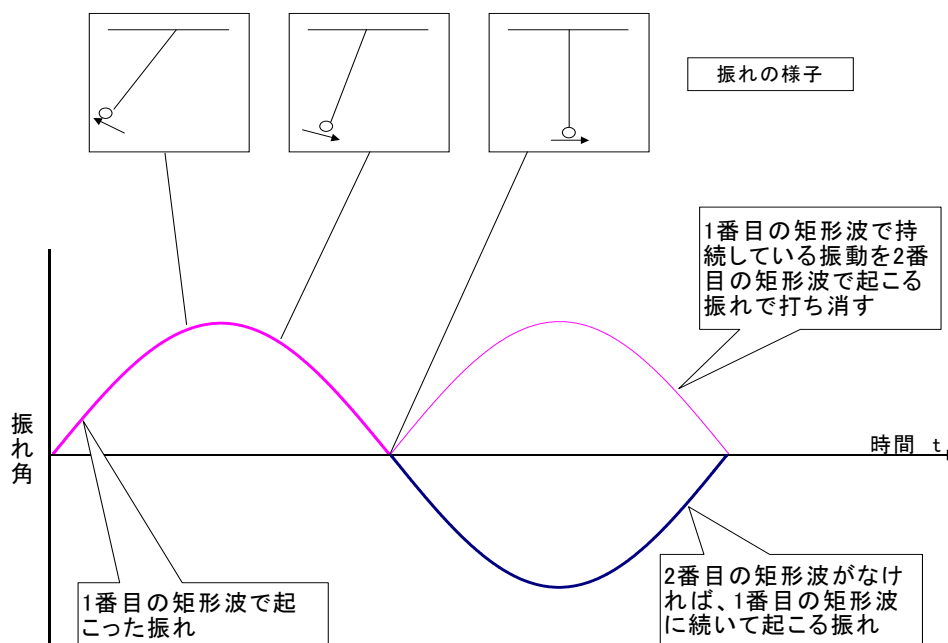


図-4.3.11 ポジカスト制御方式の振止め原理

#### (4) 固定式ケーブルクレーン自動運転システムの導入実績

##### a) 滝沢ダム

滝沢ダムのケーブルクレーン3基の仕様と能力を表-4.3.4に示す。

自動運転システムを導入した3基のケーブルクレーン（定格荷重 15t）は、1基当り 4.5m<sup>3</sup>のコンクリート運搬・打設が可能で、5台のコンクリート供給装置からコンクリートを自動で供給されるコンクリート供給および運搬の完全自動化を実現した。コンクリートダム建設において複数のケーブルクレーンの自動運転制御を行うのは初めての試みであったが、効率的で安定した品質のコンクリート運搬を実現した。3基のケーブルクレーンの運転は、コントロールルーム内で集中管理（管理作業員1名）した。

さらに、「出荷制御システム」も導入することで、堤体ホッパからダンプトラックの積替え作業時の配合の異なるコンクリートの混載防止やダンプトラックへの積替え許可も行うとともに、堤体の作業員は携帯端末機（PDA）を用いてコンクリートの出荷状況や配合種類の確認を行うことができるようにした。

ケーブルクレーン付帯設備を写真-4.3.3に示す。

表－4.3.4 ケーブルクレーン仕様と能力

項 目		1 号機	2 号機	3 号機
型 式		両端固定	両端固定	両端固定
定格荷重		15t	15t	15t
スパン		527.8m	524.55m	521.8m
揚 程		150m	150m	150m
横行電動機出力		430kw	300kw×1 台	150kw×2 台
実荷速度	上	125m／min	100m／min	113m／min
	下	128m／min	140m／min	130m／min
空荷速度	上	200m／min	170m／min	165m／min
	下	160m／min	140m／min	150m／min
巻上電動機出力		353kw×1 台	350kw×1 台	300kw×1 台
実荷速度		400m／min	400m／min	400m／min
空荷速度		400m／min	400m／min	400m／min



打設状況



ケーブルクレーン



循環バケット、サービスホッパ  
コンクリートバケット



堤体ホッパ

写真－4.3.3 固定式ケーブルクレーン 3 基と付帯設備

自動運転システムの導入の定量的な評価として、「ダム工事積算の解説：編纂 財団法人ダム技術センター」<sup>7)</sup>に従って算出したサイクルタイムと打設能力を、実績データ（ケーブルクレーン1基）と比較した。比較結果を表－4.3.5に示す。表に示すように、実績サイクルタイムおよび打設能力は「ダム工事積算の解説：編纂 財団法人ダム技術センター」<sup>7)</sup>で積算した基準値よりもサイクルタイムで約24秒短縮、打設能力で約14%向上しており、本システムの有効性が確認できた。

表－4.3.5 サイクルタイムおよび打設能力の算出値と実績値の比較

打設日	打設箇所		サイクルタイム(sec)		有利差 (sec)	打設能力(m³/h)	
	横行 距離	巻距離	ダム積算か ら算出値 <sup>7)</sup>	打設 実績値		ダム積算から 算出値 <sup>7)</sup>	打設 実績値
7/22	209.7m	85.8m	191.8	168.7	23.1	84.5	96.0
7/23	209.0m	86.0m	191.8	168.6	23.2	85.5	96.1
7/25	175.8m	86.2m	186.9	164.9	22.0	86.7	98.3
7/27	175.1m	85.7m	186.8	164.3	22.5	86.7	98.6
7/30	176.2m	84.7m	186.7	162.8	23.9	86.6	99.5
7/31	209.0m	84.8m	191.2	170.3	20.9	84.7	95.1
8/1	209.2m	85.3m	191.3	167.7	23.6	84.7	96.6
8/3	209.0m	84.5m	191.5	168.7	22.8	84.6	96.0
平均					23.8	85.2	97.1

## b) 湯西川ダム

湯西川ダムでは、自動運転式トランスファーカ 2 台からケーブルクレーン 2 基にコンクリートを供給する方式を導入し、良好な結果を得た。

湯西川ダムの固定式ケーブルクレーン 2 基と付帯設備を写真－4.3.4 に示す。

湯西川ダムでは、ケーブルクレーン自動運転システムの更なるサイクルタイム向上を図るために以下に示すいくつかの改善を行った。その結果、本システムの信頼性・安定性・高速化が更に向上した。

### ①データ・信号の LAN 化

自動運転システムのデータ・信号の送受信速度、信頼性を飛躍的に向上させることを目的として、コンピュータと制御運転基幹装置の PLC (Programmable Logic Conyroller) 間に専用の LAN 網を構築し、高速かつ安定した自動運転制御を可能とした。

### ②ABS (絶対位置検出) 型センサの採用

従来、ケーブルクレーン横行索長の検出に用いていた Incremental (相対位置検出) 型センサは、定期的なゼロ点リセットを必要であったが、ゼロ点リセットが不要な ABS (絶対位置検出) 型センサを採用し、繰返し行うゼロ点リセットによる累積誤差を無くすことで、ケーブルクレーン横行索長計測精度が向上し、正確かつ安全な自動運転制御を実現した。

### ③制御指令プログラムの高速化

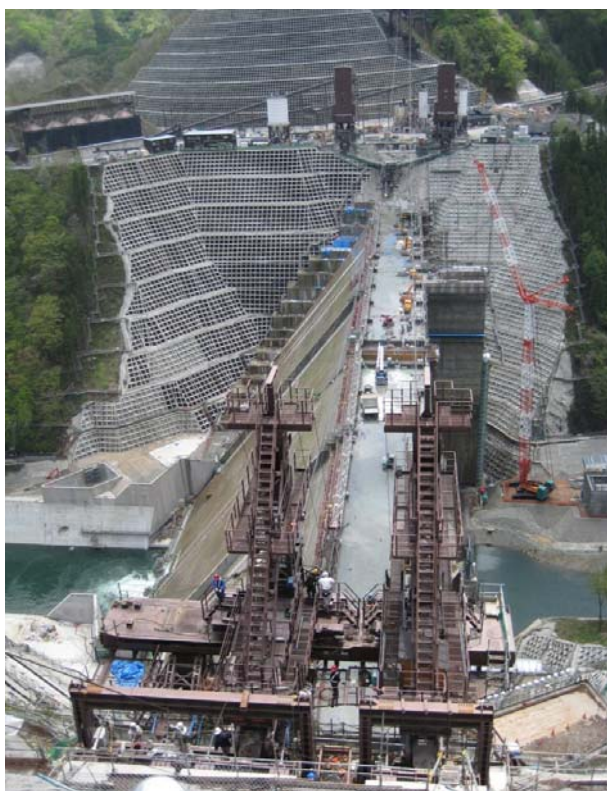
コンピュータ機能向上に併せて、制御指令プログラムをパラレルかつリアルタイム (Intime OS) 上で実行できる方式に更新し、制御指令プログラムの実行速度を高速化した。

### ④振止め精度の向上化

制御指令プログラムの高速化によって 25msec 間隔の制御が可能となり、従来よりきめ細かい振止め制御ができ振止め精度が向上した。

### ⑤コンクリート放出時のバケット跳上がり抑制

コンクリート放出時に合わせて、コンクリートバケットを自動で巻上げる制御プログラムを追加し、バケットの蹴上がり (上下動) 抑制が可能となった。また、高所からのコンクリート放出を防ぐことでコンクリートの材料分離抑制効果が得られた。



ケーブルクレーンと堤体全景



トランスファーカとコンクリートバケット



打設状況

写真－4.3.4 固定式ケーブルクレーン２基と付帯設備

湯西川ダムでのケーブルクレーンのサイクルタイム短縮結果を、「ダム工事積算の解説：編纂財団法人ダム技術センター」<sup>7)</sup>に従って算出したサイクルタイムと打設能力を、実績データ（ケーブルクレーン1基）と比較した。

比較結果である表－4.3.6 に示すように、実績サイクルタイムおよび打設能力は、ダム積算基準値よりもサイクルタイムで約 29 秒短縮、打設能力で約 17%向上しており、システムの改善効果が確認できた。

表－4.3.6 サイクルタイムおよび打設能力の算出値と実績値の比較

打設日	打設箇所		サイクルタイム(sec)		有利差 (sec)	打設能力(m³/h)		自動システム
	横行距離	巻距離	ダム積算から算出値 <sup>7)</sup>	打設実績値		ダム積算から算出値 <sup>7)</sup>	打設実績値	
9/2	181m	118m	210.3	184.6	25.7	85.6	97.5	旧システム
9/7	181m	117m	209.9	185.0	24.9	85.8	97.3	旧システム
9/12	181m	117m	209.5	191.0	18.5	85.9	94.2	旧システム
9/16	181m	116m	208.6	187.0	21.6	86.3	96.3	旧システム
平均			209.6	186.9	22.7	85.9	96.3	
10/27	196m	109m	202.7	173.0	29.7	88.8	104.0	新システム
11/10	182m	106m	200.1	170.0	30.1	90.0	105.9	新システム
11/16	178m	105m	199.3	171.0	28.3	90.3	105.3	新システム
平均			200.7	171.3	29.4	89.7	105.1	

## 4.4 SP-TOM による運搬とその効果

最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、従来の RCD 工法に比べさらにコンクリートの打設速度が上がり、1.5～2.0 倍程度となることから、従来の運搬方法を併用して運搬能力を上げてても十分な運搬能力を確保できない場合があり、運搬能力からコンクリート打設速度が制約されることが考えられた。

そこで、運搬能力がさらに向上するコンクリートの運搬方法の開発を目的として、SP-TOM を考案し、実施工に適用した。考案した SP-TOM は、高所にあるバッチャープラントから低所にある堤体等の打設位置へ、法面に設置したパイプ（搬送管）の中にコンクリートを通して運搬するものである。一般に高所から低所にコンクリートを移動させると、斜めシュート等に見られるようにコンクリートは著しく材料分離する。特に、ダムコンクリートでは、最大粗骨材寸法 150mm～80mm の大きな粗骨材が入っているため通常のコンクリートよりも材料分離しやすい。そこで、この搬送管の内部に羽根を付け、かつ回転させるものとした。搬送管の中に羽根などを付けずにコンクリートを通した場合、大量のコンクリートを短時間に運搬できるが、コンクリートは材料分離する。一方で羽根などを多く付けた場合、材料分離は抑制できるが運搬能力が低下したり、コンクリートによる管内閉塞が発生する。そこで、十分な運搬能力を確保して、かつ材料分離を抑制できるように、法面の勾配やコンクリートの種類を考慮し、最適な羽根の形状、大きさ、間隔などを検証し、各ダムサイトの地形、堤体形状等に応じた配置、構造を選定採用した。

### 4.4.1 SP-TOM の概要

SP-TOM (Special Pipe TranspOrtation Method) とは、パイプを用いてコンクリートや土石類を高所から低所へ運搬する工法で、内側に羽根が取り付けられた搬送管を回転させることにより、搬送材料を分離させることなく連続的かつ大量に運搬することができる搬送設備である。1998 年度より実証実験を重ね、その実用性についてのデータを蓄積してきた。実工事への適用事例として、滝沢ダム（発注者：水資源開発公団（当時））の減勢工では、搬送管径  $\phi 500\text{mm}$ 、延長 211m を設置し、有スランプコンクリートおよび CSG (Cemented Sand and Gravel) の搬送実績がある。<sup>1)</sup> その後、嘉瀬川ダム（発注者：国土交通省九州地方整備局）では、搬送管径  $\phi 700\text{mm}$ 、延長 66m の SP-TOM が入手時の VE 提案として採用され、初めて RCD ダム本体コンクリート打設に使用した。さらに、湯西川ダム（発注者：国土交通省関東地方整備局）では、最新の RCD 工法を用いた急速施工の主打設設備として、搬送管径  $\phi 700\text{mm}$ 、延長 138.7m の SP-TOM を本格的に適用し、RCD 工法における連続大量のコンクリート運搬・打設設備として採用した。その後も拡張レヤー工法の第二浜田ダム（発注者：島根県）および最新の RCD 工法を低標高部から高標高部まで採用した五ヶ山ダム（発注者：福岡県）でも導入展開し、コンクリートの材料分離を抑制して大量に搬送できることを確認した。

考案した SP-TOM の特長は以下のとおりである。

- ① 連続大量搬送の実現で施工高速化を獲得
  - ・連続的に搬送するため、大量輸送が可能である。
- ② 急斜面で搬送可能
  - ・25～42度の急勾配斜面での運搬が可能である。  
(急勾配斜面への設備配置が可能であるため、運搬距離を短くすることが可能となる。)
- ③ 省エネルギー
  - ・重力を利用した運搬方法でエネルギー効率が良い。
- ④ 環境に良好
  - ・基礎工事が小規模であり、自然環境の改変が少ない。  
(ケーブルクレーンのような大規模な基礎工事が不要で、設置工期も短縮可能である。)
  - ・搬送管内で運搬を行うため粉じんが発生しない。
- ⑤ 低コスト
  - ・他の搬送設備と比較して、小規模となり安価である。
  - ・搬送距離に応じ搬送管を任意本数で連結可能であるため、設備の汎用性および転用性が高い。
- ⑥ 安定した品質で搬送可能
  - ・搬送管内で運搬を行うため、降雨の影響を受けない。
- ⑦ コンクリートの材料分離が生じにくい
  - ・長距離運搬においても分離が起こりにくく、コンクリート品質を確保できる。
- ⑧ コンクリート製造設備から打設場所まで最短距離で運搬
  - ・堤体打設の進捗に伴い、打設標高に合わせて SP-TOM を3mピッチで順次撤去できるため、堤体打設面との離隔を最小限にすることが可能。

SP-TOM は図-4.4.1に示すように、現在、長さ3m、管径700mmのパイプを4管接続したものを搬送管1本としており、1本当りの基本長は12mとしている。これらの寸法は、後述する実験結果に基づき、コンクリートの材料分離を抑制し、かつ大量搬送できるものとした。

パイプ内部には、搬送管自体の耐久性向上を目的として、脱着可能なゴムと鉄板の2層で曲げ加工を施された耐摩耗ゴムライナを貼りあわせている(写真-4.4.1～写真-4.4.4参照)。また、SP-TOMの据付角度に応じて、枚数や硬さおよび幅の変更可能なコンクリート材料分離防止・先走り抑制用の羽根を設置可能な構造となっている(図-4.4.2参照)。

重力と回転によって、高所から下方へ搬送する仕組みである SP-TOM の駆動モータは基本長12m 当り15kW と小型であることと、打設標高が高所になるにつれて、徐々に撤去されることから必要な動力源が減少するため、運搬のエネルギー効率が非常に高い。

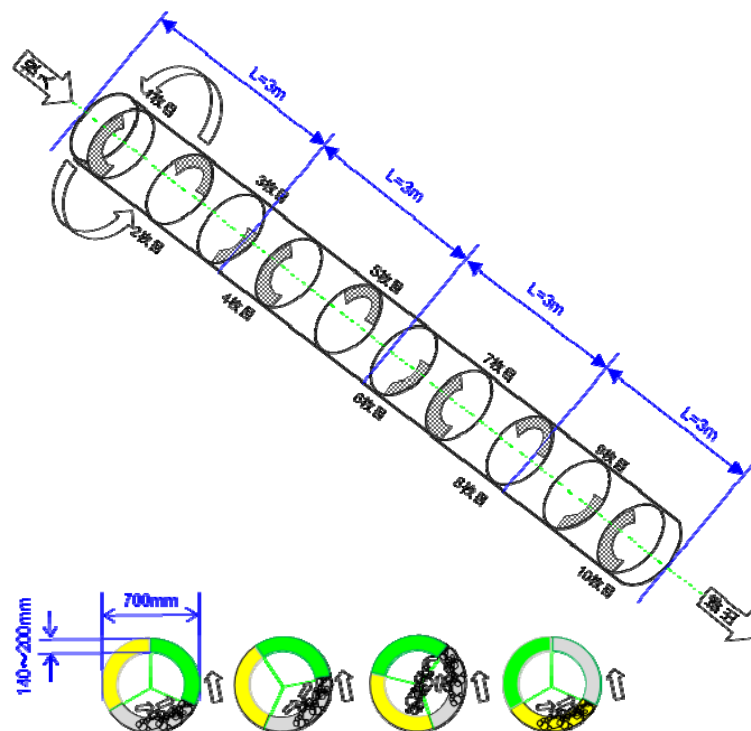


図-4.4.1 SP-TOM の搬送管の模式図



写真-4.4.1 SP-TOM : 1 本 (12m)



写真-4.4.2 内部羽根



写真-4.4.3 SP-TOM 3m 管



写真-4.4.4 耐摩耗ゴムライナ

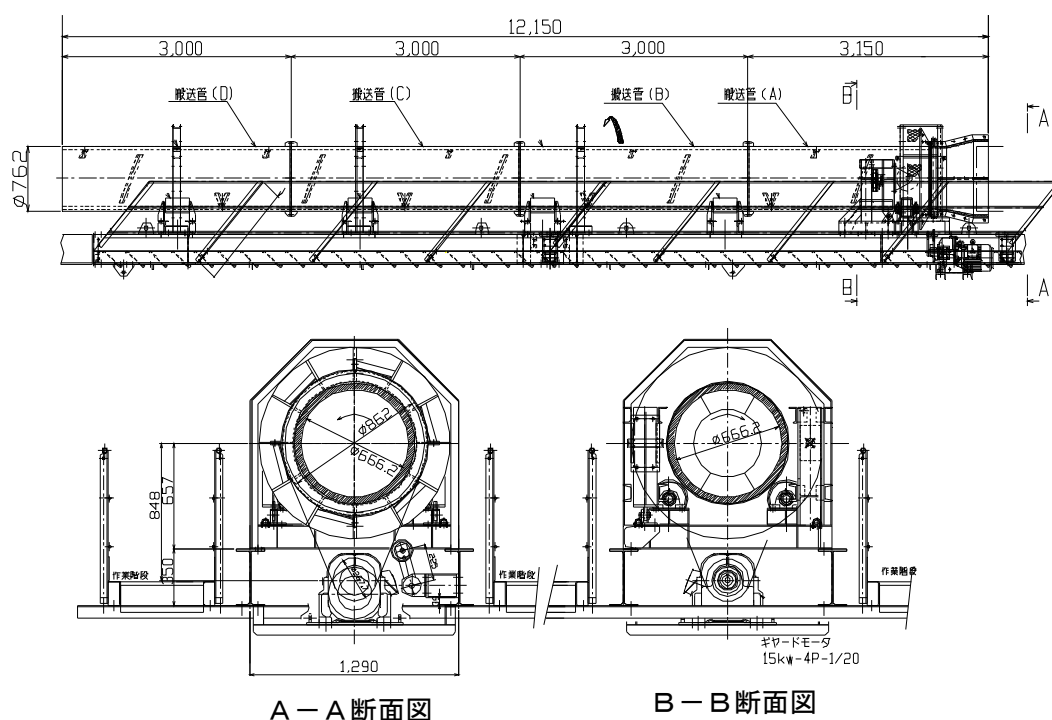


図-4.4.2 SP-TOMの搬送管の組立図

一般的なSP-TOMによるコンクリートの運搬方法は、図-4.4.3に示すシステム構成としている。

- ①コンクリート製造設備で製造されたコンクリートは、放出口直下に設置したホッパに一時貯留する。
- ②コンクリートはベルトフィーダにより供給量を調整し、SP-TOMへ投入する。
- ③投入されたコンクリートは、内部に取り付けられた羽根の回転と重力の力により、材料分離が生じることなく堤体上に設置された堤体ホッパまで運搬され、堤体ホッパまで運搬する。
- ④堤体ホッパ内のコンクリートは、ダンプトラックに積み替えて、コンクリート打設現場まで運搬する。

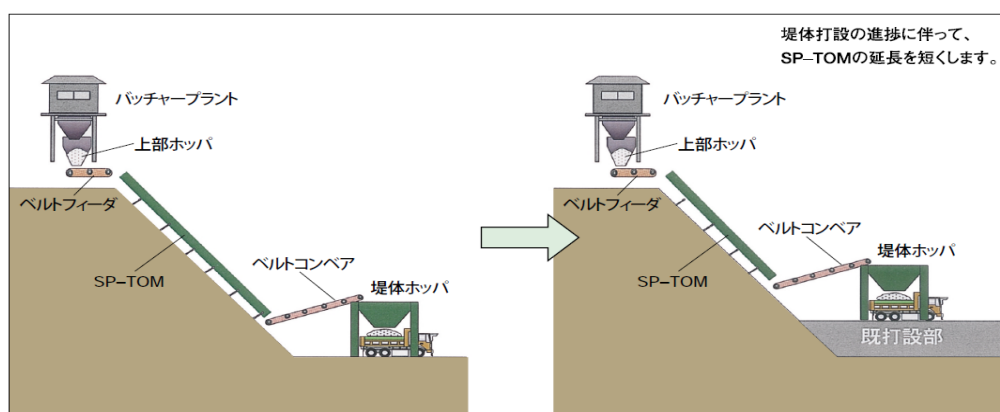


図-4.4.3 SP-TOMのシステム構成

#### 4.4.2 SP-TOM による大量搬送機構

SP-TOM によって大量搬送するためには、コンクリートの材料分離を抑制したうえで搬送能力を最大限に発揮できる搬送管の形状とする必要がある。また、SP-TOM を停止させずに搬送するためには SP-TOM の下方でのコンクリートの受入れを連続的にできるようにする必要がある。そこで、本節では、大量搬送の観点から次の 2 点について検討し、それらの効果を施工実績およびシミュレーションにより検証した。

- ① コンクリートの材料分離を抑制したうえで大量に搬送できることを目的に、搬送管の設置角度や羽根の形状、大きさ、設置間隔を変更して搬送能力確認の実験を行い、大量搬送に最適な SP-TOM の諸元を決定した。
- ② SP-TOM の下方で継続してコンクリートを受け取り、40t ダンプトラックへ供給可能な設備を開発した。

##### (1) SP-TOM による RCD 用コンクリートの搬送能力の確認

###### 1) 緩勾配における搬送能力

搬送口径  $\phi 500\text{mm}$  と  $\phi 700\text{mm}$  の SP-TOM は、滝沢ダム（発注者：水資源開発公団（当時））において搬送試験（RCD、 $G_{\text{max}}150\text{mm}$ ）を実施しており、搬送角度（緩勾配）と管径に応じた基礎的な搬送能力を把握することができた<sup>2) 3)</sup>。しかし、基礎実験時の搬送角度は緩勾配であったため、RCD ダム本体コンクリート打設に SP-TOM を採用できる搬送能力でなかった。

主たる原因として、SP-TOM は重力と回転によって RCD 用コンクリートを高所から低所へ搬送する仕組みのため、回転力より重力落下エネルギーが搬送能力に影響していることと推察できた。したがって、RCD ダム本体コンクリート打設に SP-TOM を採用するためには、搬送管の設置角度や羽根の形状、大きさ、設置間隔を変更して搬送能力を確認する必要性があった。

###### 2) 急勾配における搬送能力

搬送角度を急勾配にすると重力エネルギーが増大し、搬送能力も向上すると推測できたが、搬送角度と搬送能力の関係は不明であった。一方、嘉瀬川ダムでは RCD ダム本体コンクリート打設に、入手時の VE 提案として搬送口径  $\phi 700\text{mm}$  の SP-TOM が採用されたことから、嘉瀬川ダムにおける SP-TOM 搬送角度（ダム堤敷の法面に添って設置するため、法面勾配の 40 度を採用）において搬送能力確認実験を行うこととした。なお、嘉瀬川ダムでは従来の RCD 工法における SP-TOM の必要搬送能力を  $180\text{m}^3/\text{h}$  と設定し、RCD 用コンクリートの材料分離を抑制したうえで、 $180\text{m}^3/\text{h}$  の搬送能力を確立できる SP-TOM の諸元を把握することとした。なお、試験は模擬 RCD 用コンクリート配合（ $G_{\text{max}}80\text{mm}$ ）を用いて、羽根の形状を変更し、搬送角度 40 度の状態で行った<sup>4) 5)</sup>。

###### ① 試験設備

写真－4.4.5 に示す試験設備を用いて嘉瀬川ダムの現場敷地内で実施した。

###### ② 試験項目

試験項目は、事前調整後に「搬送能力確認試験」、「材料分離状況確認試験」の順で行い、各試験の条件・設定項目と測定・確認項目を表－4.4.1に示す。



写真－4.4.5 試験設備

表－4.4.1 試験項目

	条件・設定項目					測定・確認項目							
	本体	羽根		搬送材料		測定項目					確認項目		
	回転数	高さ	間隔	材料	供給量	電流	ひずみ	荷重	ベルトスケール	篩分試験	目視	写真撮影	ビデオ記録
	rpm	mm	mm		m <sup>3</sup> /h	A			t/h				
1.事前調整	25	140	1,200	骨材のみ	40,80 120,180	△	△	△	◎	－	○	○	△
2.搬送能力確認試験	25	①140/1,200		骨材+ 石粉+ 水	180	○	○	○	◎	－	◎	◎	◎
	20	②140/2,000											
	15	③200/2,000											
3.分離状況確認試験	選択	選択	選択	骨材+ 石粉+ 水	40,80 120,180	○	○	○	○	◎	◎	◎	◎

③ 実験時の共通仕様

- ・ SP-TOM 本体：管径φ700mm、搬送角度 40 度
- ・ 羽根：(円周長さ:90 度、対管角度:90 度、材質:耐摩耗性ゴム)
- ・ 搬送材料の骨材：80～40mm、40～20 mm、20～5 mm、5 mm 以下(砂)の 4 種
- ・ 石粉：セメントの代替品

④ 搬送能力確認試験結果

a) 試験内容

- ・ 搬送能力確認試験は、搬送材料に模擬 RCD 用コンクリート（骨材＋石粉＋水）を用い、現場目標性能の 180m<sup>3</sup>/h による搬送可否について、回転数と羽根の高さおよび取付けピッチを変更して材料分離状況と搬送能力の確認試験を実施した。
- ・ 羽根の高さおよび取付けピッチは 3 種類準備し、180m<sup>3</sup>/h の能力が確保できること、および粗骨材の先走り等による材料分離を起こさないこととし、材料分離確認は、SP-TOM 通過前後の模擬 RCD 用コンクリート粒度を計測することとした。

b) 試験結果

- ・ 試験の結果、羽根の仕様に関わらず搬送量 180m<sup>3</sup>/h を問題なく搬送可能で、搬送状況も大きな差はみられなかった（表－4.4.2 参照）。
- ・ 羽根の高さおよび取付けピッチは、3 種類ともに試験によって搬送速度が 180m<sup>3</sup>/h を確保できたことから、搬送管内に設置した羽根のメンテナンス性を考慮して、羽根の高さ 140～200 mm、取付け間隔 1,200 mm の羽根の仕様が最良と判断した。
- ・ SP-TOM の回転数を変化させることによる回転力の増加が、能力や材料分離に大きく影響すると当初予想していたが、結果に差異はなかった。ただし、回転数が低い 15rpm と 20rpm ではコンクリートが SP-TOM 内部を通過する際に断続的になるため、25rpm を標準回転数と判断した。

表－4.4.2 羽根の仕様／回転数別の 180m<sup>3</sup>/h 搬送確認試験の結果

実験種別	羽根の仕様		SP-TOM の 回転数 (rpm)			搬送試験の結果
	羽根の高さ	取付け間隔				
実験 1～3 (羽根小、間隔小、 回転数 15/20/25 変化)	140mm	1,200 mm	15	20	25	180m <sup>3</sup> /h 可
実験 4～6 (羽根小、間隔大、 回転数 15/20/25 変化)	140 mm	2,000 mm	15	20	25	180m <sup>3</sup> /h 可
実験 7～9 (羽根大、間隔大、 回転数 15/20/25 変化)	200 mm	2,000 mm	15	20	25	180m <sup>3</sup> /h 可

### 3) 搬送角度別の RCD 用コンクリートの最大能力確認試験

嘉瀬川ダムにおける現場目標性能であった搬送角度  $40^\circ$ 、搬送能力  $180\text{m}^3/\text{h}$  では、材料分離傾向もなく使用可能である確認ができたが、SP-TOM の持つ潜在的搬送能力に着目した性能把握に至っていないことから、搬送角度を変更可能な図-4.4.4 に示す試験設備を設け、追加の最大能力確認試験を行った。

#### ① 試験設備

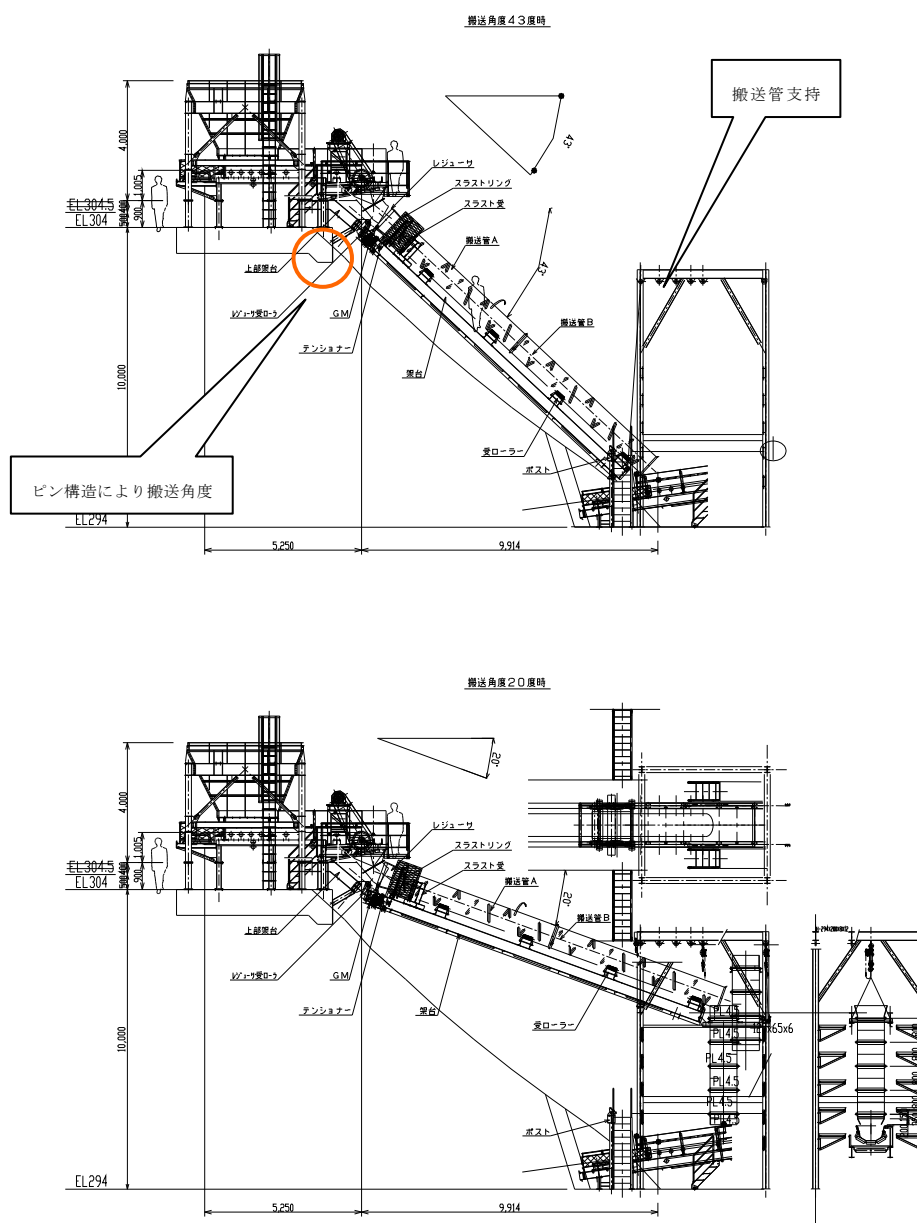


図-4.4.4 搬送角度変更機能付き試験設備

## ②使用材料

試験は表－4.4.3 に示す模擬 RCD 用コンクリートについて実験を行った。使用した模擬 RCD 用コンクリートは、RCD 用コンクリートの配合をもとにして近隣の砕石プラントおよび生コンプラントより材料を調達し、セメントおよびフライアッシュは石粉を代用品とし 0.7m<sup>3</sup> 級バックホウを用いて攪拌混合し作製した（写真－4.4.6 参照）。

表－4.4.3 模擬 RCD 用コンクリートの配合

材料	W	C+F(石粉)	S	G-80	G-40	G-20	減水剤	AE 剤
重量(kg)	97	100	647	532	531	531	－	－



写真－4.4.6 模擬 RCD 用コンクリート

## ③ 試験項目

試験は事前調整後に SP-TOM の設置角度を変更させながら最大搬送能力確認試験を行うこととし、各試験の条件・設定項目と測定・確認項目を表－4.4.4 に示す。

表－4. 4. 4 試験項目

試験項目 試験名称	番号	条件・設定項目							測定項目					確認項目			備考
		BF	羽根		本体		試験材料		電流	ひずみ	荷重	通過時間	BS	目視	写真	ビデオ	
		供給量 (m3/h)	高さ H(mm)	取付間隔 P(mm)	搬送角度 (度)	回転数 (rpm)	模擬RCDコン G+S+石粉+水	原石骨材 (OSS125)									
1.事前調整	1	100	140	1,200	43	25	○	○	○	-	-	-	◎	○	-	-	
	2	200															
	3	300															
	4	400															
	5	500															
2.最大搬送能力確認	1	◎	140	1,200	43	30～15 (35)	○	-	○	△	△	-	◎	◎	△	○	
	2					-	○										
	3				40	30～15	○	-									
	4						-	○									
	5				35	30～15	○	-									
	6						-	○									
	7				30	30～15	○	-									
	8						-	○									
	9				25	30～15 (35)	○	-									
	10						-	○									
	11				20	30～15 (35)	○	-									
	12						-	○									

### 摘要

※共通仕様: 本体(管径φ700)、羽根(円周長さ90度、対管角度90度、取付角度20度、材質:対磨耗性ゴム)

※搬送材料の模擬RCDコンクリートは80～40mm、40～20mm、20～5mm、砂、石粉(セメント代替)、水、原石骨材は一次破砕後(OSS125)相当とする。

※表中の水色枠:パラメータ設定項目、◎(黄色枠):主要測定・確認項目、○:測定・確認項目、△:任意項目、-:対象外

※測定項目は、通過時間・BS(管内搬送量)を主体とし、必要に応じてひずみ・荷重を測定する。

※確認項目は、目視による確認を主体とし、必要に応じてビデオ撮影する。

④ 試験時の共通仕様

- ・ SP・TOM：管径：φ700、据付角度：40～20° で5° 毎に変更可能（写真－4. 4. 7 参照）  
で最大角度は 43°
- ・ 羽根：高さ 140mm／取付間隔 1,200 mm（搬送角度 40 度の結果から選定した羽根仕様）
- ・ 搬送材料の骨材：80～40 mm、40～20 mm、20～5 mm、5 mm 以下(砂)の4種
- ・ 石粉：セメントの代替品として採用



43 度



30 度



40 度



25 度



35 度



20 度

写真－4.4.7 試験設備の角度変更の状況

#### ⑤ 最大搬送量確認試験結果

SP-TOM を通過した模擬 RCD 用コンクリートをベルトコンベヤ上で採取し、据付け角度、SP-TOM の回転数ごとの最大搬送重量(t/h)を図-4.4.5 に示す。最大搬送重量は SP-TOM の搬送角度が大きいほど、かつ回転数が多いほど多くなる結果であった。

- ・搬送角度 25 度（桃色）の 30 回転と 35 回転は同一の搬送量であり、30～35 回転周辺にピーク値があると推定される。
- ・搬送角度 43 度（青色）の 25 回転と 30 回転は同一の搬送量であるが、これは SP-TOM 通過後のベルトコンベヤ運搬能力上限値超過のため、SP-TOM へ供給する搬送量を増やすことができなかったためである。

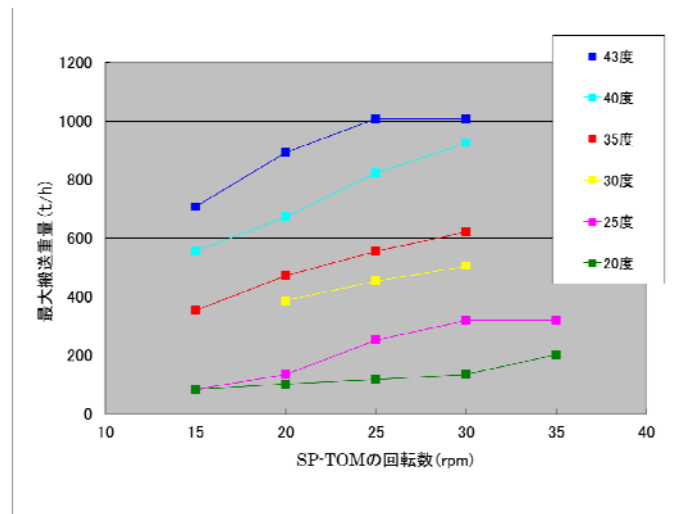


図-4.4.5 模擬 RCD 用コンクリートの最大搬送重量 (t/h)

また、締固め後のコンクリート密度は  $2.4\text{t/m}^3$  であったことから、据付け角度、SP-TOM の回転数ごとの締固め後の模擬 RCD 用コンクリートの搬送容量( $\text{m}^3/\text{h}$ )を図-4.4.6 に示す。

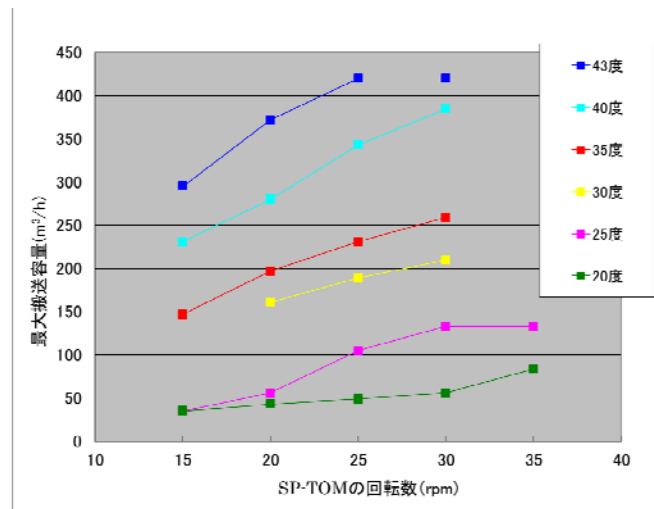


図-4.4.6 模擬 RCD 用コンクリートの最大搬送容量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

a) 回転数の影響について

SP-TOM の回転数が上がると搬送量は増えるが、図の傾きは回転数や搬送材料を変えてもほぼ一定であった。また、回転数が 30rpm を超過すると SP-TOM 搬送管の回転力によって、設備全体に大きな振動が発生することから、連続運転を行うには振動対策や付帯設備の選定見直しが必要であることが判明した。

b) 搬送角度の影響について

SP-TOM の搬送角度と最大搬送量の関係を図-4.4.7 に示す。いずれの回転数においても 25 ～43 度の範囲においては搬送角度にほぼ比例して最大搬送量は増加している。

25 度以下においては搬送角度が緩やかなため、SP-TOM 搬送管内で上方から下方へ移動する模擬 RCD 用コンクリートへ加わる重力落下エネルギーが不足し、能力が低下している。実運用では、SP-TOM の搬送管の乗継毎に能力が低下することもあると考えられるため、緩勾配での適用時には再検討が必要であると感じられた。

c) SP-TOM の運転、停止による影響について

今回、最大能力把握を主眼にしたため、試験用に準備した模擬 RCD 用コンクリートは、1 ～2 分間の短時間で SP-TOM を通過した。実運用において SP-TOM は運転、停止を繰り返すことから運転、停止を行った場合に懸念される RCD 用コンクリートの先走りによる材料分離や管内閉塞について検討する必要がある、実際の搬送能力は図-4.4.7 に示す結果より低くなると推察される。

d) SP-TOM の搬送管の長さ、乗継ぎの影響について

今回は、SP-TOM の搬送管 1 本（管長さ 12m）による試験であったが、実際には複数本設置した長距離搬送での運用や、RCD 用コンクリートが SP-TOM の搬送管毎に乗り継ぐことになることから、実際の搬送能力は図-4.4.7 に示す結果に搬送効率を加味した値であると推察される。

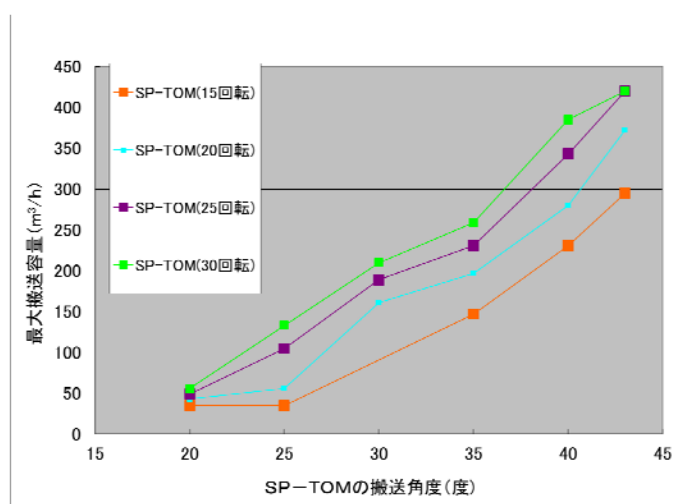


図-4.4.7 搬送角度ごとの SP-TOM 最大搬送容量 (m³/h)

## (2) SP-TOM の下方でのコンクリートの受取り、供給設備の開発 <sup>67)</sup>

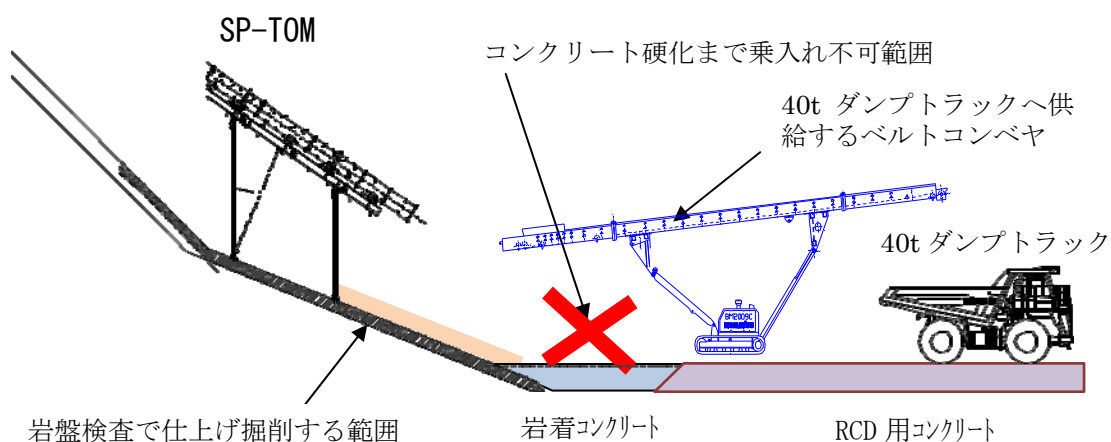
嘉瀬川ダムや湯西川ダムでの堤体建設工事では、SP-TOM による RCD 用コンクリートの搬送能力を最大限活かすことができなかった。主な原因として、SP-TOM 下部の受取方法に課題があり、RCD 用コンクリートを連続搬送できないという問題が判明した。

問題点は、SP-TOM 直下の岩着コンクリート打設直後は、40t ダンプトラックへのコンクリート供給が困難で RCD 用コンクリート搬送が中断したり、40t ダンプトラックの入替え時間中もコンクリート供給が中断することであった。SP-TOM で大量搬送するためには、SP-TOM の運転を停止することなくコンクリートを連続的に 40t ダンプトラックへ供給できる設備が必要で、2つの問題点を解決した設備を開発した。

### 1) 抽出された問題点

#### ① 問題点その1

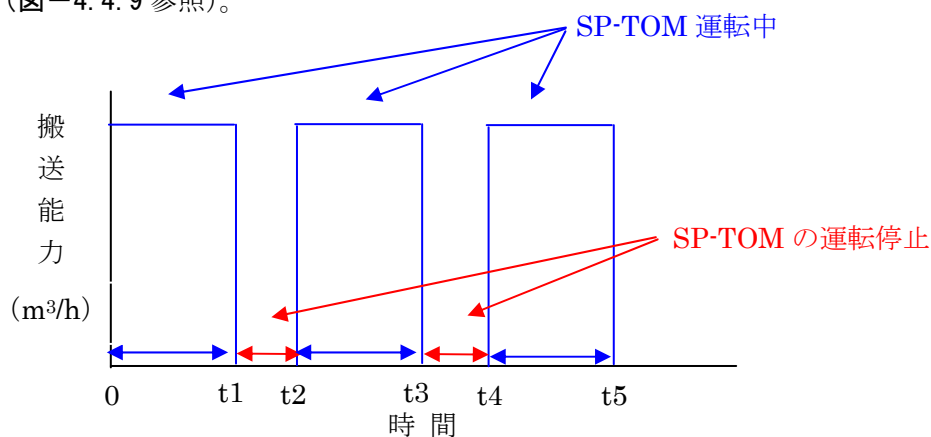
通常、岩盤検査は事前に（打設標高）＋（3 m）の標高まで行うため、SP-TOM の基礎を先行して撤去する必要がある。また、岩着部のコンクリート打設面は硬化まで 24 時間経過しないと 40t ダンプトラックへコンクリートを供給するベルトコンベヤの乗入れができず、SP-TOM から 40t ダンプトラックへのコンクリート供給が困難となり RCD 用コンクリート搬送を一時中断する必要があった（図－4. 4. 8 参照）。



図－4. 4. 8 SP-TOM から 40t ダンプトラックへの供給不可の範囲

## ② 問題点その 2

SP-TOM が 40t ダンプトラックへ供給する場合、40t ダンプトラックの入替時間中はコンクリートの供給を中断することから、その間 SP-TOM の運転を停止する必要がある。したがって、この入替時間（60～90 秒程度）が頻繁に発生することから、SP-TOM 停止によるコンクリート搬送能力低下が累積し、堤体打設速度の低下を引き起こすといった問題点があった（図－4. 4. 9 参照）。



図－4. 4. 9 SP-TOM 停止による能力低下イメージ

## 2) 問題点を解決した受取り、供給設備

### ① 問題点を解決した開発設備

問題点の解決した受取り、供給設備として SP-TOM 用ベルトコンベヤ式ディストリビュータ（以下、ディストリビュータと称す）を図－4. 4. 10 に示す。

#### a) 改善点その 1

ベルトコンベヤ脚の無い片持ち梁構造のベルトコンベヤを採用することで、岩着部の有スランプコンクリート硬化前でも内部コンクリート部に停止した 40t ダンプトラックへ積込める方式を採用して、問題点その 1 の解決を図ることとした。

#### b) 改善点その 2

40t ダンプトラックの入替時間中も SP-TOM を停止させないために、コンクリートを一時貯蔵可能なホッパとそのホッパで貯蔵したコンクリートと SP-TOM から追加供給されるコンクリートを合算した量のコンクリートを定量供給可能な搬送能力の大きなベルトコンベヤを組み合わせた受取り、供給設備を開発することで問題点その 2 を解決することとした。

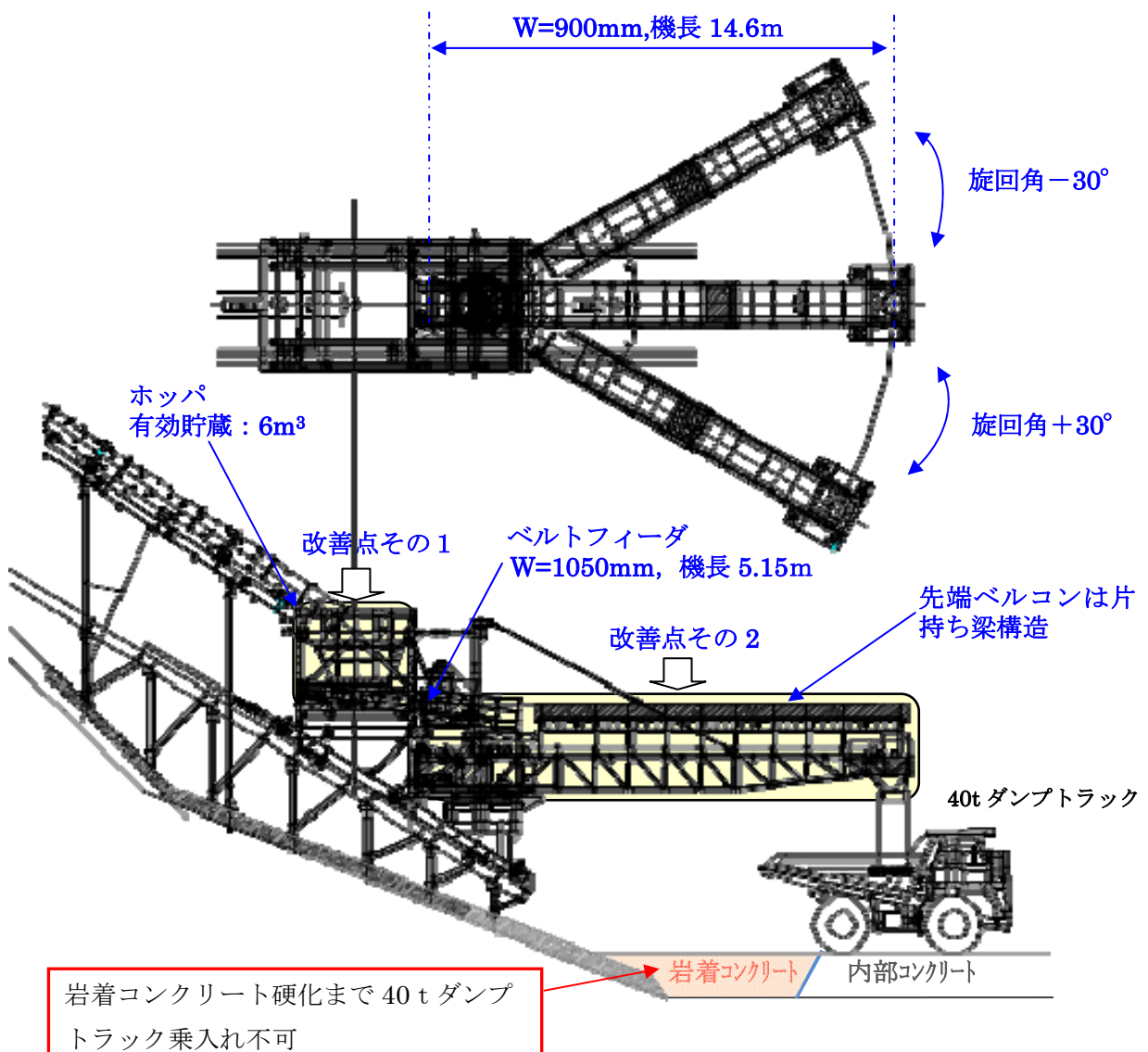


図-4.4.10 SP-TOM 用ベルトコンベヤ式ディストリビュータ

② ディストリビュータの特長

- ・40t ダンプトラック入替時間中も SP-TOM を停止することなくコンクリートを一時貯蔵可能なホッパを装備 → 「有効貯蔵 6.0m³ ホッパの採用」
- ・多量のコンクリートを定量供給可能な設備 → 「ベルトフィーダの採用」
- ・能力 (MAX : 300m³/h) の高いベルトコンベヤ設備
- ・ベルトコンベヤは左右に旋回可能な方式を採用
- ・機長 14.6m のベルトコンベヤは下部に脚の無い片持ち梁構造を採用
- ・インクライン方式の引上装置 (油圧チルホールとワイヤ) を装備

詳細仕様・性能を表－4.4.5 に示す。

表－4.4.5 ディストリビュータの仕様一覧

各設備	用 途	仕 様	性 能
1.ホッパ	40t ダンプトラック入替時間中に SP-TOM から 180m <sup>3</sup> /h で供給されるコンクリートを貯蔵	投入口寸法:3.75m×3.25m ホッパ 高さ:2.4m	有効貯蔵量:6.0m <sup>3</sup> (水切容量:14m <sup>3</sup> )
2.ベルトフィーダー	ホッパ 内のコンクリートを先端ベルトコンベヤに定量供給	ベルト幅:1050mm 機 長:5.15m 電動機:11.0kW	ベルト速度(MAX):26m/min 供給能力(MAX):300m <sup>3</sup> /h
3.先端ベルトコンベヤ	ベルトコンベヤ脚の無い片持ち梁構造のベルトコンベヤで 40t ダンプトラックへ積込が可能	ベルト幅:900mm 機 長:14.6m 電動機:11.0kW	ベルト速度(MAX):158m/min 供給能力(MAX):300m <sup>3</sup> /h
4.旋回装置	無負荷状態の先端ベルトコンベヤを左右に旋回し積込位置の変更が可能	旋回環 外環:PCD 1975mm 内環:PCD 1750mm	旋回角:±30°(コンクリート運搬中の旋回不可) 旋回モータ:減速機,ブレーキ付油圧モータ(定格圧力:27.5MPa)
5.走行台車フレーム	ホッパ、ベルトフィーダー、旋回装置、先端ベルトコンベヤのベースフレームでレール面を走行し移動	寸法:L10.0m×W4.2m×H2.8m	走行輪:6 輪 サイドローラ:4 輪(浮上り防止ガイド付き)
1.～5. ディストリビュータ総質量			32ton
4.牽引装置	ディストリビュータ本体を打設進捗に合わせて4基の油圧チルホールで牽引	油圧チルホール牽引力:1,600kgf×4 基 引上ワイヤ:φ11.7m ワイヤ巻掛数:4 基×5 本=20 本掛け	最大牽引力:32,000kgf (勾配 32 度のディストリビュータ引上げに必要な牽引力:約 17,000kgf) 牽引速度:0.2m/min

### 3) 開発したディストリビュータの導入状況

五ヶ山ダムにおいて開発したディストリビュータを SP-TOM と組み合わせて使用することで、SP-TOM を停止することなく連続的に RCD 用コンクリートを搬送することができた。利用状況を写真-4.4.8、写真-4.4.9 に示す。



写真-4.4.8 SP-TOM とディストリビュータ

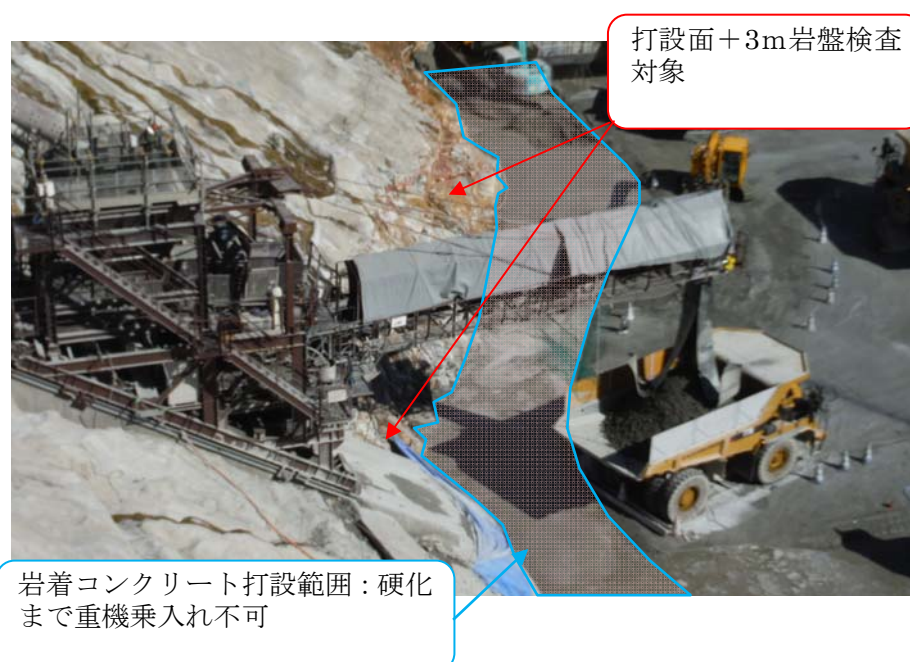


写真-4.4.9 硬化前の岩着コンクリートを避けて 40t ダンプトラックへ供給

#### 4) 開発したディストリビュータと SP-TOM の組合せによる成果

五ヶ山ダムで前述した改善点を解決した結果、SP-TOM の運転停止によるコンクリート供給中断が減少し、打設能力が向上した。改善効果を平成 26 年 4 月下旬～9 月 30 日の SP-TOM の搬送実績で示す（表－4.4.6 参照）。

最大搬送速度（15 分間移動平均）では、平成 26 年 9 月に  $264\text{m}^3/\text{h}$  を記録し、平均搬送速度も  $171.1\text{m}^3/\text{h}$  であった。今まで経験したことのない高い搬送能力を実現しており最新の RCD 工法で打設する際に必要なコンクリート搬送能力を十分確保できている。

SP-TOM が搬送した RCD 用コンクリートをディストリビュータを経由して 40t ダンプトラックへ供給している状況を写真－4.4.10 に示す。

表－4.4.6 SP-TOM およびディストリビュータの搬送実績

コンクリート配合	日付	搬送量 ( $\text{m}^3$ )	平均搬送速度 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	最大搬送速度（15 分間 移動平均値）( $\text{m}^3/\text{h}$ )
内部（B1 配合）＊	4 月	3,441	152.2	213.0
	6 月	29,191	132.9	240.0
	7 月	30,949	142.3	240.0
	9 月	49,164	171.1	264.0
計		112,745	（平均） 151.2	—

＊:B 1 配合（B 配合のうち、最新の RCD 工法で打設する RCD 用コンクリート）



写真－4.4.10 40t ダンプトラックへのコンクリート供給状況

5) 五ヶ山ダムでの SP-TOM 搬送実績による改善成果の確認

平成 26 年 6 月～9 月における RCD 用コンクリートの搬送実績の詳細を表-4.4.7 に示しており、平均搬送速度 (m<sup>3</sup>/h) は、搬送量を SP-TOM の稼働時間で除した結果である。最新の RCD 工法が軌道にのった 9 月の場合、以下に示す搬送能力であった。

- ・平均搬送速度 170m<sup>3</sup>/h 以上が 4 回
- ・平均搬送速度 180m<sup>3</sup>/h 以上が 3 回
- ・9 月の平均搬送速度 171.1m<sup>3</sup>/h

また、移動平均値の最大運搬速度はコンクリート製造能力の 240m<sup>3</sup>/h を超過しているケースもあるため、一時的に「コンクリート製造能力 (100%) の 240m<sup>3</sup>/h ≒ SP-TOM コンクリート搬送能力」であった時間帯もある。

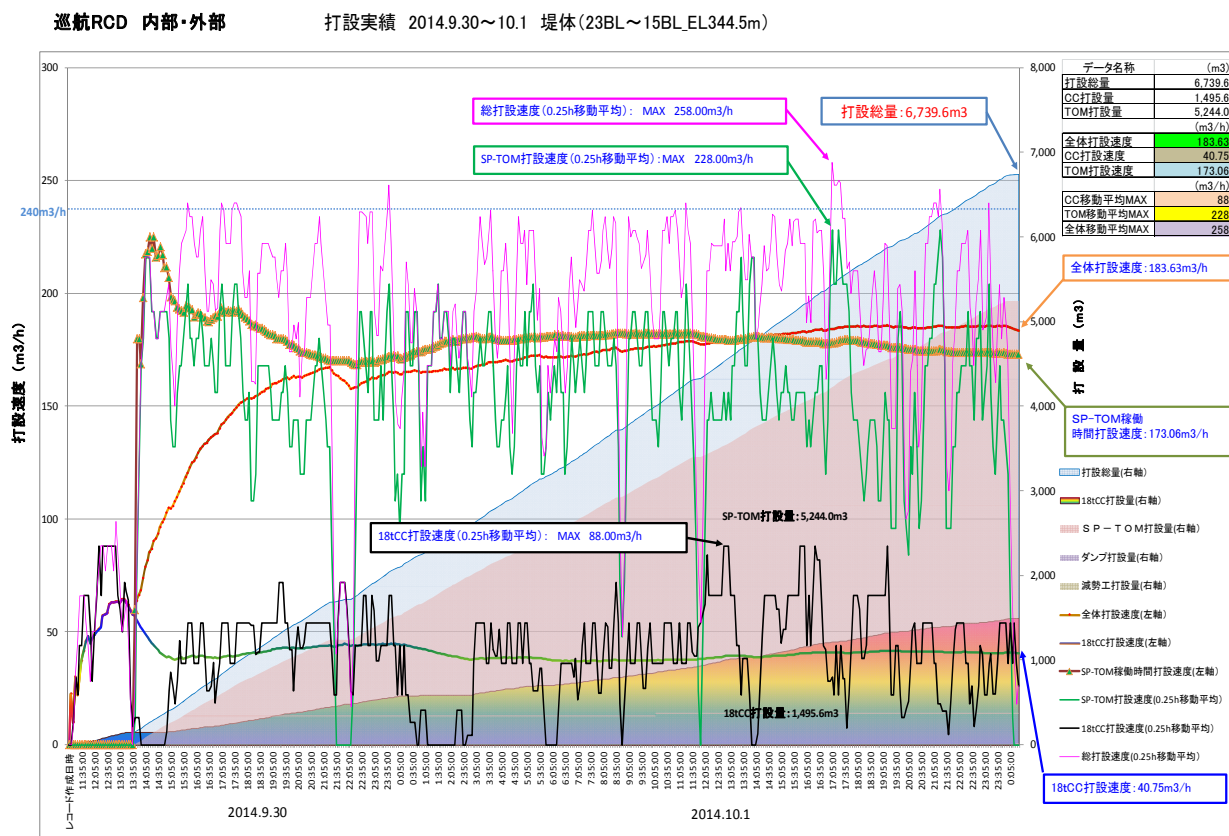
表-4.4.7 RCD コンクリートの搬送実績 (詳細)

日付	搬送量 (m <sup>3</sup> )	平均搬送速度 (m <sup>3</sup> /h)	最大搬送速度 (m <sup>3</sup> /h)	日付	搬送量 (m <sup>3</sup> )	平均搬送速度 (m <sup>3</sup> /h)	最大搬送速度 (m <sup>3</sup> /h)
6 月	3,198	147.1	170.5	7 月	1,851	158.9	204.0
	1,011	80.9	90.0		2,457	195.0	228.0
	2,065	133.2	210.0		1,940	107.3	140.0
	6,290	136.2	216.0	9 月	6,942	173.8	240.0
	7,376	133.2	228.0		974	172.4	228.0
	2,985	154.1	240.0		4,859	163.3	228.0
	4,156	145.5	240.0		3,045	181.3	228.0
7 月	2,631	152.8	240.0		5,384	148.6	228.0
	3,165	165.0	240.0		2,226	192.4	252.0
	936	99.2	192.0		6,995	158.9	240.0
	3,201	161.0	228.0		1,569	160.4	240.0
	915	93.4	220.0		4,248	164.7	240.0
	4,086	171.6	228.0		3,855	170.7	240.0
	2,389	198.3	228.0		6,657	167.3	264.0
	963	95.9	154.0		1,332	196.8	228.0
	2,478	179.3	228.0		5,244	173.1	228.0

\*8 月は暑中コンクリートのため最新の RCD 工法でハーフリフト打設実施で除外

9月30日～10月1日に実施した EL344.4m～344.5m, 23BL～15BL の最新の RCD 工法によるコンクリート打設実績を図-4.4.11 に示す。

平均打設速度：173.06m<sup>3</sup>/h、最大搬送速度（15 分当りの移動平均値の）：228.0m<sup>3</sup>/h であり、平均打設速度はオレンジ色、最大搬送速度はピンク色の折れ線で示した。



18tCC : 18t ケーブルクレーン

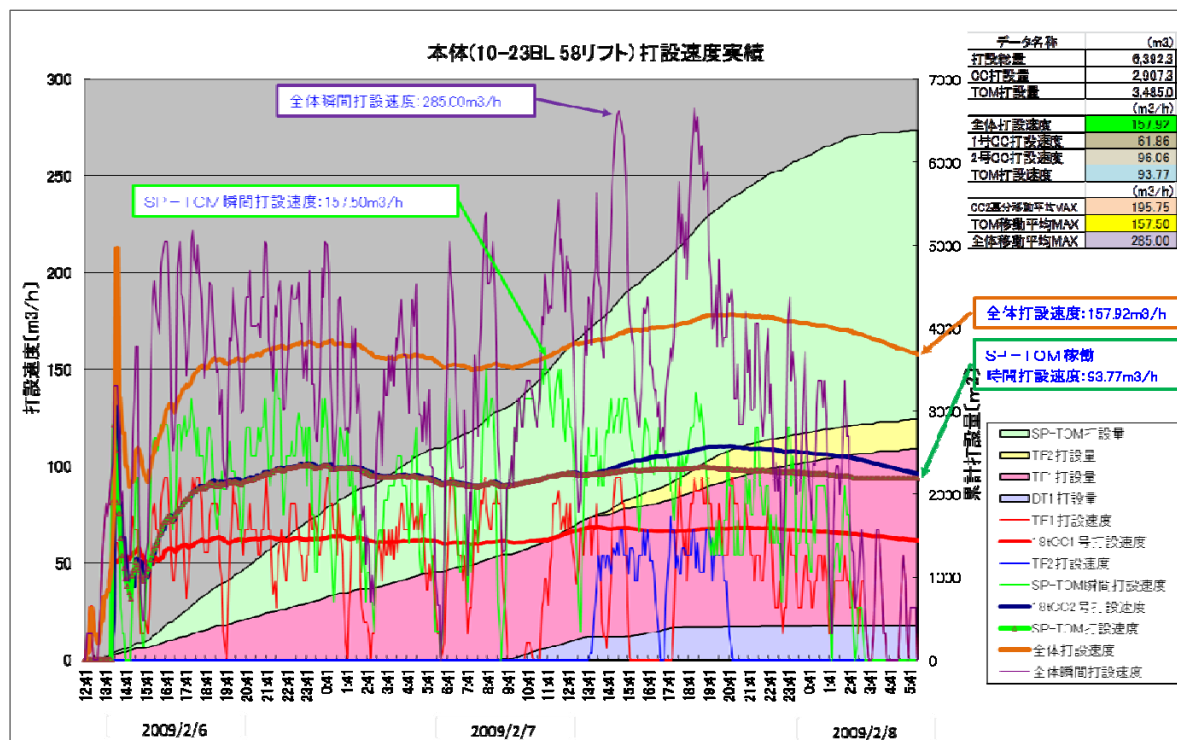
図-4.4.11 最新の RCD 工法コンクリート打設実績（9月30日～10月1日）

#### 6) 改善前と改善後における効果の比較結果

改善前の現場実績の代表例として打設量、打設時間も同程度であった嘉瀬川ダム（コンクリート製造設備（180m<sup>3</sup>/h）× 2 基、18t 級固定式ケーブルクレーン(以下 18t ケーブルクレーン)× 2 基、SP-TOM× 1 条で打設したコンクリート搬送実績を図-4.4.12 に示す。

改善後の搬送設備を導入した五ヶ山ダムの図-4.4.11 に示す実績値と嘉瀬川ダム施工実績の能力比較を表-4.4.8 に示すが、五ヶ山ダムでは、18t ケーブルクレーンが 1 基しかないにもかかわらず、嘉瀬川ダム以上の打設速度であった。

改善後の SP-TOM とディストリビュータの組合せによるコンクリート搬送能力は、改善後の SP-TOM（1 条）＝ 改善前の SP-TOM（1 条）＋18t ケーブルクレーン（1 基）である。



18tCC 1 : 18t ケーブルクレーン 1 号      TF 1 : トランスファーク 1 号  
 18tCC 2 : 18t ケーブルクレーン 2 号      TF 2 : トランスファーク 2 号

図-4.4.12 嘉瀬川ダム 最新のRCD コンクリート打設実績 (2月6日~2月8日)

表-4.4.8 設備毎の打設速度比較一覧

設備名称	嘉瀬川ダム		五ヶ山ダム	
	打設速度	瞬間最大速度	打設速度	瞬間最大速度
1. 18t ケーブルクレーン 1 号機	61.86m³/h	195.75m³/h (2 基合計)	40.75m³/h	88.0m³/h
2. 18t ケーブルクレーン 2 号機	96.06m³/h		—	—
3. SP-TOM	93.72m³/h	157.5m³/h	173.06m³/h	228.0m³/h
全体打設速度	157.92m³/h	285.0m³/h	183.63m³/h	258.0m³/h
4.コンクリート製造設備仕様	180m³/h×2 基		240m³/h×1 基	

### (3) シミュレーションによる SP・TOM 効果の比較

五ヶ山ダムと嘉瀬川ダムの打設実績から、18t ケーブルクレーンを主打設備で施工した場合と SP・TOM を主打設備として施工した場合において、打設速度シミュレーションを行い SP・TOM の効果について検証した。

大規模ダムと中規模ダムでは、SP・TOM の高い搬送能力が寄与し大幅な工程短縮が得られる結果となった。一方、コンクリートダム建設において資機材の揚重等で 18t ケーブルクレーンは必要不可欠であることから、小規模ダムでは能力的に 18t ケーブルクレーン 1 基で十分なため、SP・TOM の選定は過大な設備となり、導入効果が得られないことが判明した。

以下にシミュレーション結果を示す。

#### 1) 大規模ダムにおける打設速度シミュレーション

以下に示す共通条件にて、主打設備を 18t ケーブルクレーンとした場合と SP・TOM としたケースについて、打設能力を比較するためシミュレーションを実施した。

- ・ダム堤体積：1,500,000m<sup>3</sup>
- ・打設可能日数：10～18 日（冬期、夏期で変化あり）
- ・打設稼働時間：14～20h（冬期、夏期で変化あり）
- ・コンクリート製造設備：強制 2 軸パッチャープラント 3 m<sup>3</sup>× I 型 3 基（製造能力 360m<sup>3</sup>/h）

#### ① 18t ケーブルクレーンを主打設備とした設備計画

18t ケーブルクレーンを主打設備とした場合のコンクリート製造、運搬、打設設備を表 4.4.9 に、各設備の配置イメージを図 4.4.13 に示す。

18t ケーブルクレーンをダム軸と平行して 3 基配置した場合、堤体の打設面標高が中標高の時点で再下流側の 18t ケーブルクレーンが使用不可となり、さらに高標高部になると最上流側の 18t ケーブルクレーンでしか打設できなくなる（図 4.4.14 参照）。このようなことから、打設標高が高くなるにつれて打設能力が低下することとなる。

表-4.4.9 18t ケーブルクレーンを主打設備とした能力

項 目	名 称	数 量	能 力	実打設能力
製 造	強制 2 軸バッチャープラント 3m <sup>3</sup> × I 型	3 基	120m <sup>3</sup> /h×3 基=360m <sup>3</sup> /h×効率 0.8 =288m <sup>3</sup> /h	—
運 搬	5.5m <sup>3</sup> 積トランスファーク	3 台	嘉瀬川ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 2 基の搬送能力： 157.94m <sup>3</sup> /h ÷158 m <sup>3</sup> /h÷2 基 1 基当たり≒79 m <sup>3</sup> /h を採用 3 基で 237m <sup>3</sup> /h	237<288 より 237m <sup>3</sup> /h
低標高～中標高部の打設（堤体の60%まで）	18t ケーブルクレーン	3 基	嘉瀬川ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 2 基の搬送能力： 157.94m <sup>3</sup> /h ÷158 m <sup>3</sup> /h を採用	158<288 より 158m <sup>3</sup> /h
中標高～高標高部の打設（堤体の90%まで）		2 基	嘉瀬川ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 2 基の搬送能力： 157.94m <sup>3</sup> /h ÷158 m <sup>3</sup> /h を採用	79<288 より 79m <sup>3</sup> /h
高標高部の打設（堤体の90%以降）		1 基	嘉瀬川ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 2 基の搬送能力： 157.94m <sup>3</sup> /h ÷158 m <sup>3</sup> /h÷2 基 1 基当たり≒79m <sup>3</sup> /h を採用	

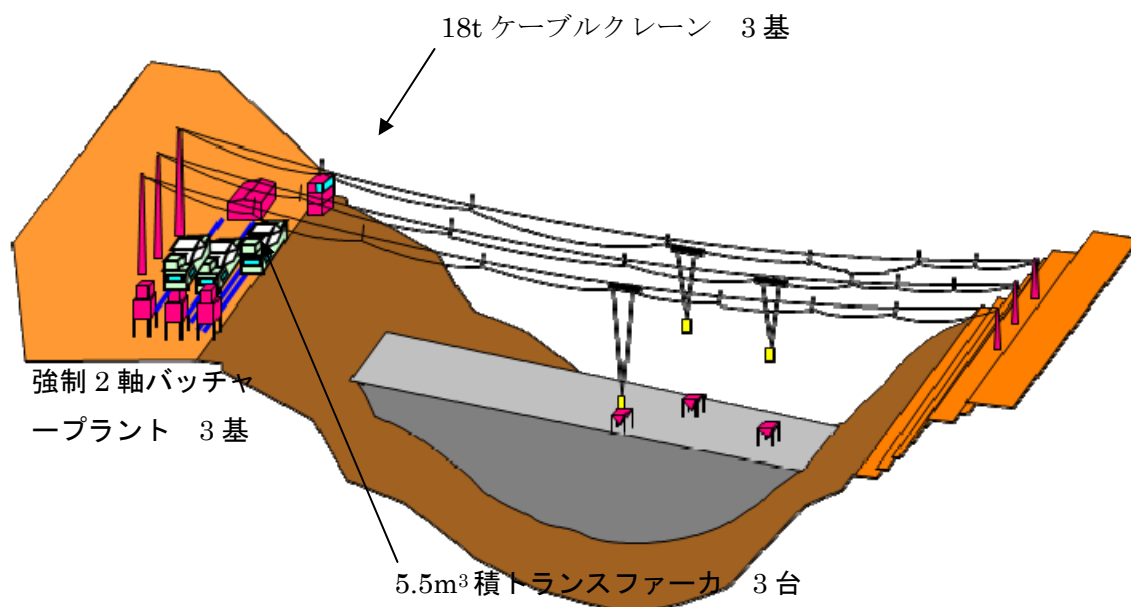


図-4.4.13 18t ケーブルクレーンを主打設備とした各設備配置のイメージ

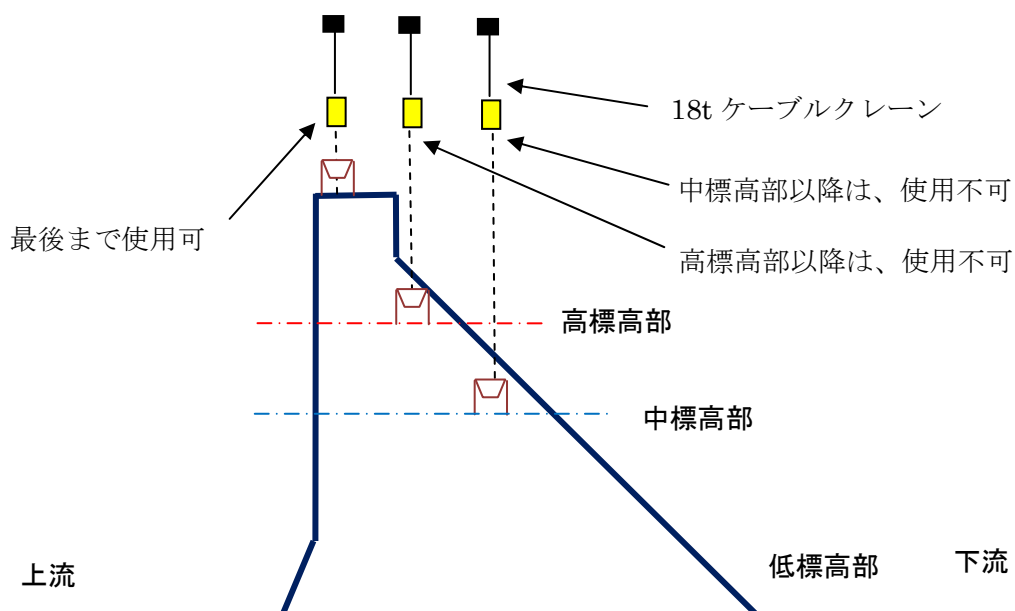


図-4.4.14 18t ケーブルクレーン使用可能な台数のイメージ

## ② SP-TOM を主打設備とした設備計画

SP-TOM を主打設備とした場合のコンクリート製造、運搬、打設設備を表-4.4.10 に、各設備の配置イメージを図-4.4.15 に示す。

18t ケーブルクレーンを2基と SP-TOM を配置した場合、図-4.4.16 で示すように、SP-TOM 1条と 18t ケーブルクレーン1基は最後まで使用可能であるため、打設標高が高くなるにつれての打設能力低下傾向は 18t ケーブルクレーンのみのケースと比較し有利である。

表-4.4.10 SP-TOM を主打設備とした能力

項 目	名 称	数 量	能 力	実打設能力
製 造	強制 2 軸バッチャープラント 3m <sup>3</sup> × I 型	3 基	120m <sup>3</sup> /h×3 基=360m <sup>3</sup> /h×効率 0.8 =288m <sup>3</sup> /h	—
運 搬	5.5m <sup>3</sup> 積トランスファーク	2 台	—	
低標高～高標高部の打設（堤体の90%まで）	18t ケーブルクレーン	2 基	五ヶ山ダムと嘉瀬川ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 2 基＋SP-TOM1 条の搬送能力： 183.6m <sup>3</sup> /h+158m <sup>3</sup> /h÷2 基から≒264m <sup>3</sup> /h を採用	264<288 より 264m <sup>3</sup> /h
	SP-TOM	1 条		
高標高部の打設（堤体の 90%以降）	18t ケーブルクレーン	1 基	五ヶ山ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 1 基＋SP-TOM1 条の搬送能力：183.6m <sup>3</sup> /h≒185m <sup>3</sup> /h を採用	185<288 より 185m <sup>3</sup> /h
	SP-TOM	1 条		

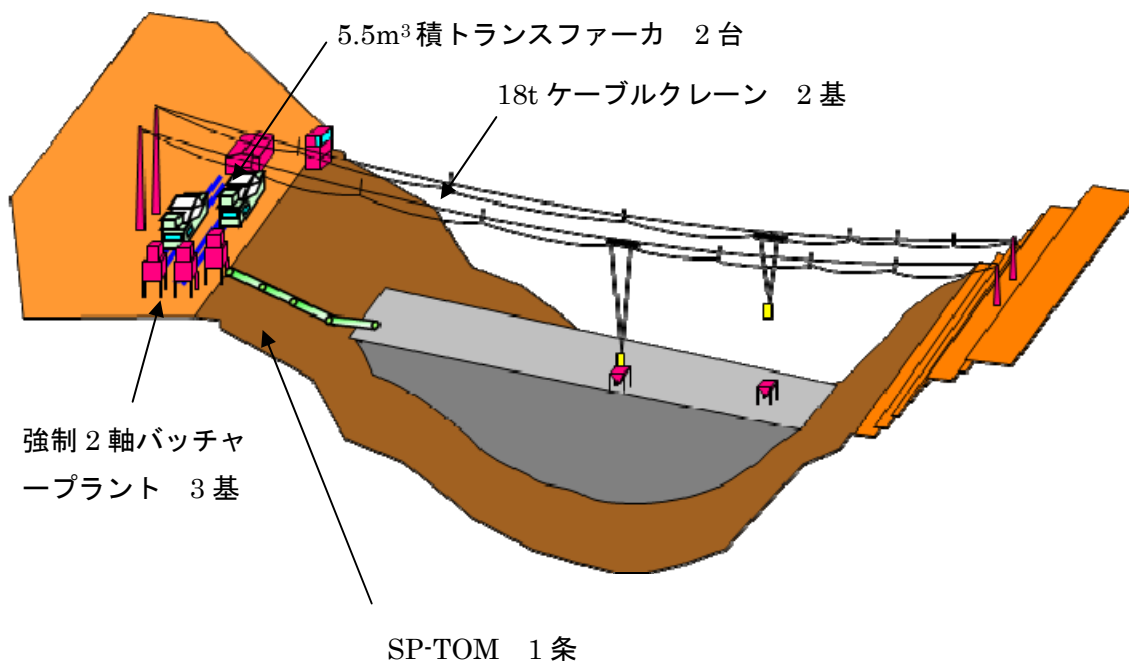
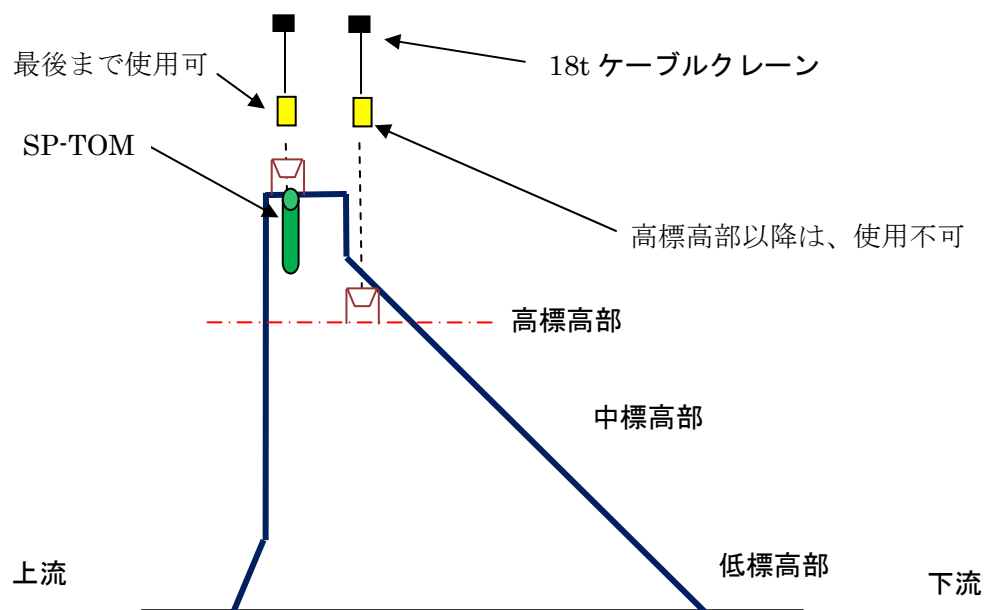


図-4.4.15 SP-TOM を主打設備とした場合の各設備配置のイメージ



図－4. 4. 16 SP-TOM、18t ケーブルクレーン使用可能な台数のイメージ

### ③ シミュレーション比較結果

各月の打設日数：10～18 日と打設時間：14～20h は双方とも同一とし、それぞれの打設設備計画で施工シミュレーションを実施した結果を表-4.4.11 に示す。18t ケーブルクレーン 3 基を主打設設備とした計画では、34 ヶ月間の打設工期であったが、SP-TOM 1 条と 18t ケーブルクレーン 2 基を主運搬打設設備とした計画では、25 ヶ月間で完了しており、約 9 ヶ月間の打設工期短縮が可能である結果となった。

18t ケーブルクレーンはダム軸と平行に配置するため 3 基配置する場合、再下流の 18t ケーブルクレーンは早い段階から堤体打設設備として使用できなくデメリットがあるが、SP-TOM は、打設の最後まで高い搬送能力を維持したまま、継続して使用できるメリットがある。したがって、堤体積の大きなダムにおいて、SP-TOM は非常に有利な設備である。

表-4.4.11 シミュレーションによる必要打設工期の比較結果

打設月	打設日数	日打設時間	18tケーブルクレーン 3基			18tケーブルクレーン 2基 + SP-TOM 1条		
			時間当り打設能力(m <sup>3</sup> /h)	1月当り打設量(m <sup>3</sup> )	累計打設量(m <sup>3</sup> )	時間当り打設能力(m <sup>3</sup> /h)	1月当り打設量(m <sup>3</sup> )	累計打設量(m <sup>3</sup> )
1	10月	15	18h	237	63,990	264	71,280	71,280
2	11月	15	18h	237	63,990	264	71,280	142,560
3	12月	15	18h	237	63,990	264	71,280	213,840
4	1月	10	12h	237	28,440	264	31,680	245,520
5	2月	10	12h	237	28,440	264	31,680	277,200
6	3月	18	18h	237	76,788	264	85,536	362,736
7	4月	18	18h	237	76,788	264	85,536	448,272
8	5月	15	18h	237	63,990	264	71,280	519,552
9	6月	15	18h	237	63,990	264	71,280	590,832
10	7月	15	12h	237	42,660	264	47,520	638,352
11	8月	10	12h	237	28,440	264	31,680	670,032
12	9月	18	18h	237	76,788	264	85,536	755,568
13	10月	18	18h	237	76,788	264	85,536	841,104
14	11月	18	18h	237	76,788	264	85,536	926,640
15	12月	15	18h	237	63,990	264	71,280	997,920
16	1月	10	12h	237	28,440	264	31,680	1,029,600
17	2月	10	12h	158	18,960	264	31,680	1,061,280
18	3月	18	18h	158	51,192	264	85,536	1,146,816
19	4月	18	18h	158	51,192	264	85,536	1,232,352
20	5月	15	18h	158	42,660	264	71,280	1,303,632
21	6月	15	18h	158	42,660	264	71,280	1,374,912
22	7月	15	12h	158	28,440	185	33,300	1,408,212
23	8月	10	12h	158	18,960	185	22,200	1,430,412
24	9月	18	18h	158	51,192	185	59,940	1,490,352
25	10月	18	18h	158	51,192	185	59,940	1,550,292
26	11月	18	18h	158	51,192			
27	12月	15	18h	158	42,660			
28	1月	10	12h	79	9,480			
29	2月	10	12h	79	9,480			
30	3月	18	18h	79	25,596			
31	4月	18	18h	79	25,596			
32	5月	18	18h	79	25,596			
33	6月	18	18h	79	25,596			
34	7月	18	12h	79	17,064			
総打設量				1,513,008			1,550,292	

工期短縮

## 2) 中規模ダムにおける打設速度シミュレーション

以下に示す共通条件にて、主打設設備を 18t ケーブルクレーンとした場合と SP-TOM としたケースについて、打設能力を比較するためシミュレーションを実施した。

- ・ダム堤体積：600,000m<sup>3</sup>
- ・打設可能日数：10～18 日（冬期、夏期で変化あり）
- ・打設稼働時間：14～20h（冬期、夏期で変化あり）
- ・コンクリート製造設備：強制 2 軸バッチャープラント 3 m<sup>3</sup>×I 型 2 基（製造能力 240m<sup>3</sup>/h）

### ① 18t ケーブルクレーンを主打設設備とした設備計画

18t ケーブルクレーンを主打設設備とした場合のコンクリート製造、運搬、打設設備を表 4.4.12 に、各設備の配置イメージを図 4.4.17 に示す。18t ケーブルクレーンをダム軸と平行して 2 基配置した場合、堤体の打設面標高が高標高部になると最上流側の 18t ケーブルクレーンでしか打設できなくなる（図 4.4.18 参照）。

表 4.4.12 18t ケーブルクレーンを主打設設備とした能力

項 目	名 称	数 量	能 力	実打設能力
製 造	強制 2 軸バッチャープラント	2 基	120m <sup>3</sup> /h×2 基=240m <sup>3</sup> /h×効率 0.8 =192m <sup>3</sup> /h	—
運 搬	5.5m <sup>3</sup> 積トランスファーク	2 台	嘉瀬川ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 2 基の搬送能力：	—
中標高～高標高部の打設（堤体の 90%まで）	18t ケーブルクレーン	2 基	157.94m <sup>3</sup> /h ≒158 m <sup>3</sup> /h を採用	158<192 より 158m <sup>3</sup> /h
高標高部の打設（堤体の 90%以降）		1 基	嘉瀬川ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 2 基の搬送能力： 157.94m <sup>3</sup> /h ≒158 m <sup>3</sup> /h÷2 基 1 基当り≒79m <sup>3</sup> /h を採用	79<192 より 79m <sup>3</sup> /h

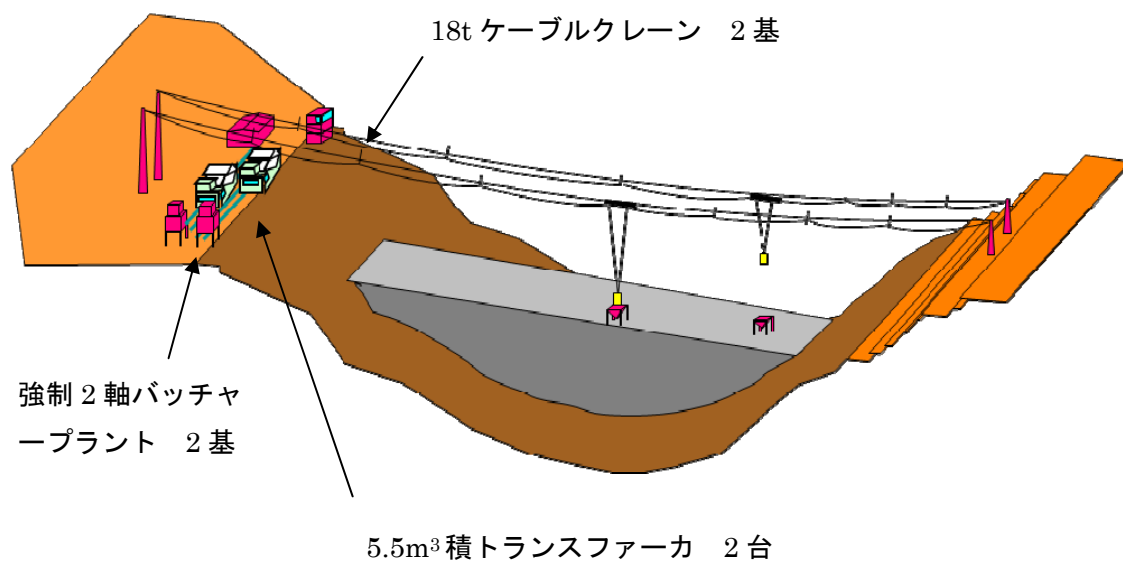
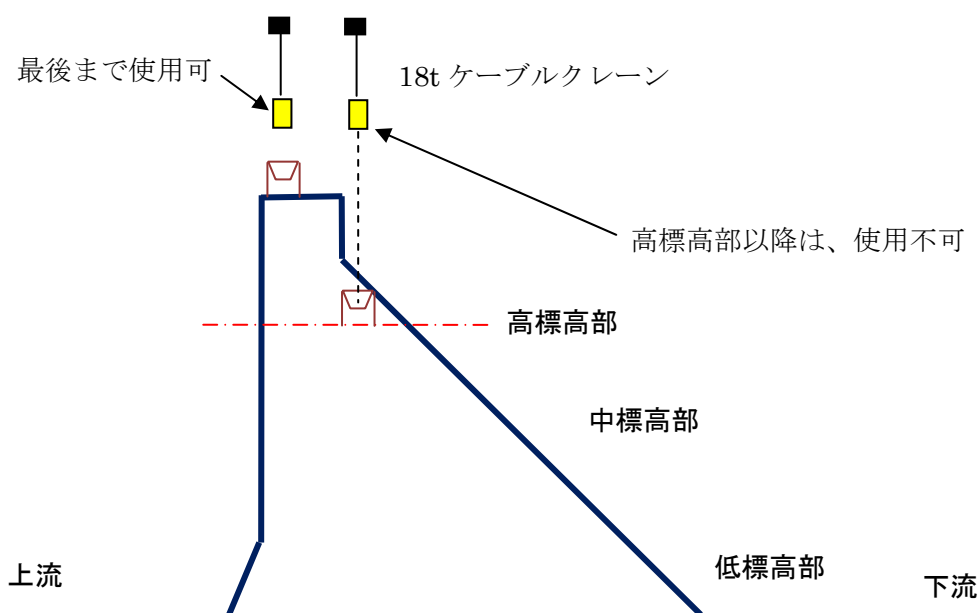


図-4.4.17 18t ケーブルクレーンを主打設備とした各設備配置のイメージ



図－4. 4. 18 18t ケーブルクレーン 2 基配置時の使用可能な台数のイメージ

② SP-TOM を主打設備としたケースの設備計画

SP-TOM を主打設備とした場合のコンクリート製造、運搬、打設設備を表－4. 4. 13 に、各設備の配置イメージを図－4. 4. 19 に示す。18t ケーブルクレーン 1 基と SP-TOM 1 条を配置した場合、図－4. 4. 20 で示すように両設備ともに最後まで使用可能であるため、大きな搬送能力を維持できる。

表－4. 4. 13 SP-TOM を主打設備とした能力

項 目	名 称	数 量	能 力	実打設能力
製 造	強制 2 軸パッチャー プラント 3m <sup>3</sup> × I 型	2 基	120m <sup>3</sup> /h×2 基=240m <sup>3</sup> /h×効率 0.8 =192m <sup>3</sup> /h	—
	運 搬	5.5m <sup>3</sup> 積トランスファーカ	1 台	
低標高～高 標高部の打 設	18t ケーブルクレ ーン	1 基	五ヶ山ダムの実績から 18t ケー ブルクレーン 1 基+SP-TOM 1 条の 搬送能力：183.6m <sup>3</sup> /h から≒ 185m <sup>3</sup> /h を採用	185<192 より 185m <sup>3</sup> /h
	SP-TOM	1 条		

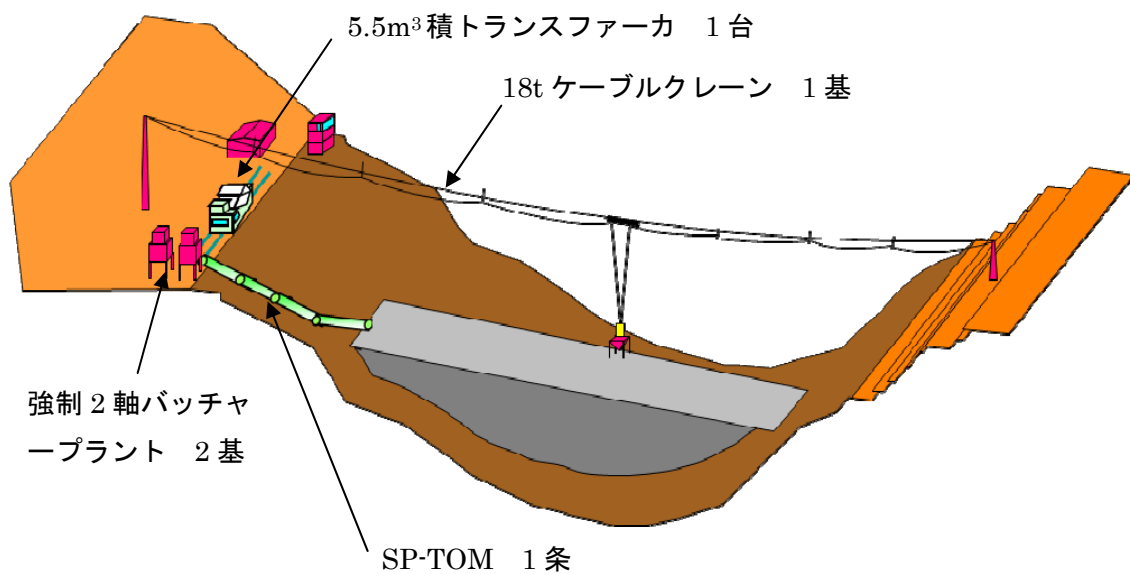


図-4.4.19 SP-TOM を主打設備とした場合の各設備配置のイメージ

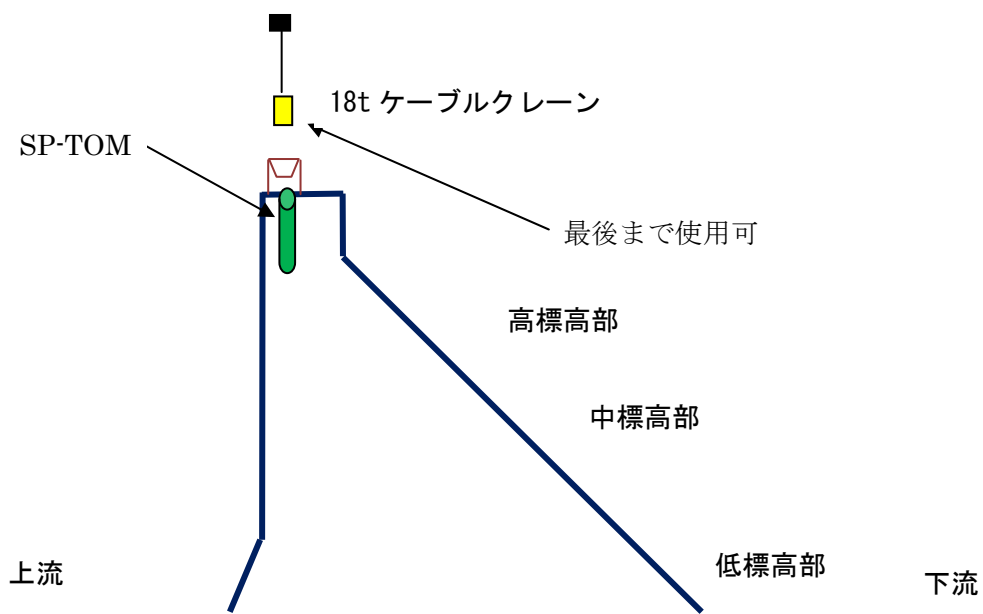


図-4.4.20 SP-TOM、18t ケーブルクレーン使用可能な台数のイメージ

### ③ シミュレーション比較結果

各月の打設日数：10～18 日と打設時間：14～20h は双方とも同一とし、それぞれの打設設備計画で施工シミュレーションを実施した結果を表－4. 4. 14 に示す。18t ケーブルクレーン 2 基を主打設設備とした計画では、13 ヶ月間の打設工期であった。150 万 m<sup>3</sup> の大規模ダムと比較すると工程短縮は若干少ないが、SP-TOM は中規模ダムにおいても非常に有利な設備である。

表－4. 4. 14 施工性シミュレーションの比較結果

	打設月	打設日数	日打設時間	18tケーブルクレーン 2基			18tケーブルクレーン 1基 + SP-TOM 1条		
				時間当り打設能力(m <sup>3</sup> /h)	1月当り打設量(m <sup>3</sup> )	累計打設量(m <sup>3</sup> )	時間当り打設能力(m <sup>3</sup> /h)	1月当り打設量(m <sup>3</sup> )	累計打設量(m <sup>3</sup> )
1	10月	15	18h	158	42,660	42,660	185	49,950	49,950
2	11月	15	18h	158	42,660	85,320	185	49,950	99,900
3	12月	15	18h	158	42,660	127,980	185	49,950	149,850
4	1月	10	12h	158	18,960	146,940	185	22,200	172,050
5	2月	10	12h	158	18,960	165,900	185	22,200	194,250
6	3月	18	18h	158	51,192	217,092	185	59,940	254,190
7	4月	18	18h	158	51,192	268,284	185	59,940	314,130
8	5月	15	18h	158	42,660	310,944	185	49,950	364,080
9	6月	15	18h	158	42,660	353,604	185	49,950	414,030
10	7月	15	12h	158	28,440	382,044	185	33,300	447,330
11	8月	10	12h	158	18,960	401,004	185	22,200	469,530
12	9月	18	18h	158	51,192	452,196	185	59,940	529,470
13	10月	18	18h	158	51,192	503,388	185	59,940	589,410
14	11月	18	18h	158	51,192	554,580			
15	12月	15	18h	79	21,330	575,910			
16	1月	10	12h	79	9,480	585,390			
17	2月	10	12h	79	9,480	594,870			
総打設量					594,870			589,410	

### 3) 小規模ダムにおける打設速度シミュレーション

以下に示す共通条件にて、主打設設備を 18t ケーブルクレーンとした場合と SP-TOM としたケースについて、打設能力を比較するためシミュレーションを実施した。

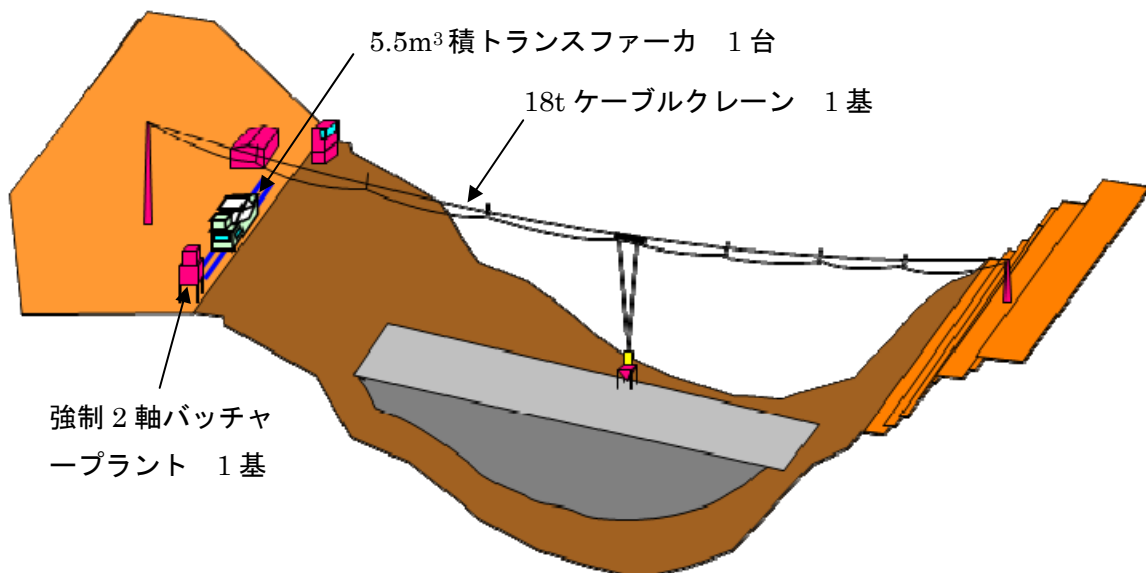
- ・ダム堤体積：200,000m<sup>3</sup>
- ・打設可能日数：10～18 日（冬期、夏期で変化あり）
- ・打設稼働時間：14～20h（冬期、夏期で変化あり）
- ・コンクリート製造設備：強制 2 軸パッチャーラント 3 m<sup>3</sup>× I 型 1 基（製造能力 120m<sup>3</sup>/h）

#### ①18t ケーブルクレーンを主打設設備としたケースの設備計画

18t ケーブルクレーンを主打設設備とした場合のコンクリート製造、運搬、打設設備を表－4. 4. 15 に、各設備の配置イメージを図－4. 4. 21 に示す。

表－4. 4. 15 18t ケーブルクレーンを主打設備とした能力

項 目	名 称	数 量	能 力	実打設能
製 造	強制 2 軸バッチャープラント 3m <sup>3</sup> × I 型	2 基	120m <sup>3</sup> /h×1 基=120m <sup>3</sup> /h×効率 0.8 =96m <sup>3</sup> /h	79<96 より 79m <sup>3</sup> /h
運 搬	5.5m <sup>3</sup> 積トランスファーク	2 台	嘉瀬川ダムの実績から 18t ケーブルクレーン 2 基の搬送能力：	
低標高～高標高部の打設	18t ケーブルクレーン	1 基	157.94m <sup>3</sup> /h ÷158 m <sup>3</sup> /h÷2 基 1 基当り÷79m <sup>3</sup> /h を採用	



図－4. 4. 21 18t ケーブルクレーンを主打設備とした各設備配置のイメージ

## ②SP-TOM を主打設備としたケースの設備計画

SP-TOM を主打設備とした場合のコンクリート製造、運搬、打設設備を表－4. 4. 16 に、各設備の配置イメージを図－4. 4. 22 に示す。

表-4.4.16 SP-TOM を主打設備とした能力

項 目	名 称	数 量	能 力	実打設能力
製 造	強制 2 軸バッチャー プラント 3m <sup>3</sup> × I 型	1 基	120m <sup>3</sup> /h×1 基=120m <sup>3</sup> /h×効率 0.8 =96m <sup>3</sup> /h	185>96 より コンクリート製造 設備能力が 打設能力 96m <sup>3</sup> /h
運 搬	5.5m <sup>3</sup> 積トランスファーカ	1 台	—	
低標高～高 標高部の打 設	18t ケーブルクレーン SP-TOM	1 基 1 条	五ヶ山ダムの実績から 18t ケーブル クレーン 1 基+SP-TOM1 条の 搬送能力：183.6m <sup>3</sup> /h から≒ 185m <sup>3</sup> /h を採用	

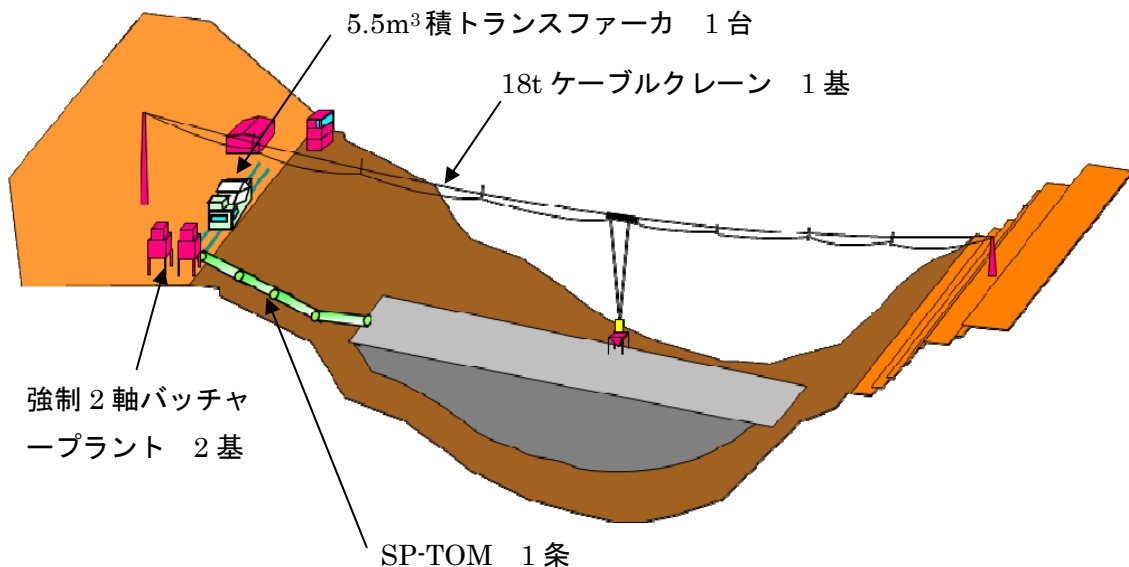


図-4.4.22 SP-TOM を主打設備とした場合の各設備配置のイメージ

### ③ シミュレーション比較結果

打設期間のシミュレーションを行う以前に問題点が判明しており、以下に示す理由で SP-TOM の採用は現実的でない。

#### a) 揚重設備としての 18t ケーブルクレーンの必要性

ダム建設においてコンクリート運搬打設以外にも、堤体上で使用する建設機械の出し入れや施工で使用する資機材の揚重作業において、18t ケーブルクレーンは必要不可欠である。したがって、SP-TOM 1 条の配置と 18t ケーブルクレーン 0 基という選択肢はあり得ない。

#### b) コンクリート製造設備の過大化

SP-TOM の採用で SP-TOM 1 条と 18t ケーブルクレーン 1 基となることから、コンクリート搬送能力が高くなり、小規模ダムにも関わらず、中規模ダムと同等のコンクリート製造設備能力が要求されることから、経済面でデメリットが発生する。

#### 4) シミュレーションによる SP-TOM 活用による経済性比較

SP-TOM 活用による経済性は、表－4.4.11、表－4.4.14 の施工シミュレーション結果を踏まえて経済性効果をシミュレーションすることとした。搬送能力の高い SP-TOM を主コンクリート運搬・打設設備とした場合、工期が短縮することから大規模ダム、中規模ダムともに、工期短縮による設備費低減と作業従事者の労務費・経費等の低減が図れ経済的効果が高いことがシミュレーションによって判明した。

経済性シミュレーションは、コンクリート製造設備、コンクリート運搬設備・打設設備、労務費、経費の1月当りの単価を同一とし、施工シミュレーション結果の使用台数と使用期間を反映した支出予額（円）を算出した。

その内容を表－4.4.17、表－4.4.18 に示す

##### ①大規模ダム

経済性効果シミュレーション時の共通条件

- ・ダム堤体積：1,500,000m<sup>3</sup>
- ・打設可能日数：10～18日（冬季、夏季で変化あり）
- ・打設稼働時間：14～20h（冬季、夏季で変化あり）
- ・コンクリート製造設備：強制2軸パッチャープラント3m<sup>3</sup>×I型 3基（製造能力360m<sup>3</sup>/h）

表－4.4.17 経済性シミュレーション結果

項 目	1月当り 支出単価(円)	数量	使用期間 (ヶ月)	支出金額(円)	数量	使用期間 (ヶ月)	支出金額(円)
コンクリート製造設備	8,500,000	3	34	867,000,000	3	25	637,500,000
トランスファーカ	1,600,000	3	34	163,200,000	2	25	80,000,000
18tケーブルクレーン	12,000,000	3	34	1,224,000,000	2	25	600,000,000
SP-TOM	8,000,000				1	25	200,000,000
労務費	100,000,000		34	3,400,000,000		25	2,500,000,000
経費等	15,000,000		34	510,000,000		25	375,000,000
合計金額				6,164,200,000			4,392,500,000
				-1,771,700,000			

経済効果（差額）⇒ 約17.7億円

SP-TOM を主運搬設備にすることで、工期の短縮と設備費低減の2とおり効果が期待できる。工期短縮による作業従事者の労務費・経費等も考慮すると、経済的な効果は約18億円あり、重力式コンクリートダムの堤体建設工事において、非常に有効な手段である。

### 経済性効果シミュレーション時の共通条件

- 表-4.4.18 経済性シミュレーション結果

經濟効果（差額）⇒ 約 7.1 億円

259

#### (4) SP-TOM の実施工における適用実績

SP-TOM によってコンクリートを大量搬送するために検討した 2 つの成果を踏まえて、実施工現場に適用し、その効果を確認した。

滝沢ダムの減勢工でコンクリートの搬送設備として  $\phi 500\text{mm}$  の SP-TOM を導入して以来、稲葉ダム（発注者：大分県）、湯西川ダム、大滝ダム地滑り対策工、第二浜田ダム、五ヶ山ダムで導入しており、SP-TOM による堤体コンクリート搬送を本格的に実施した。

現場毎に様々な創意工夫を重ねることで、運搬効率を向上させた SP-TOM と周辺設備によって、連続大量搬送を可能とした。SP-TOM 導入現場一覧を表-4.4.19 に示す。

表-4.4.19 SP-TOM 適用現場一覧

径	延長	現場名	搬送物	搬送量 (m <sup>3</sup> )
$\Phi 500\text{mm}$	211m	滝沢ダム	有スランプコンクリート	約 28,000
			CSG	約 28,000
	56m	稲葉ダム	CSG	約 36,700
$\Phi 700\text{mm}$	66m	嘉瀬川ダム	RCD コンクリート	約 110,000
	138m	湯西川ダム	RCD コンクリート	約 130,000
	144m	第二浜田ダム	有スランプコンクリート	約 5,000
	72m	大滝ダム	セメント改良土	約 150,000
	108m	五ヶ山ダム	RCD コンクリート	約 500,000

##### 1) 滝沢ダム導入事例

管径  $\phi 500\text{mm}$  の SP-TOM を全長 211m 設置し、減勢工用のコンクリート、CSG を搬送し管径  $\phi 700\text{mm}$  の SP-TOM 開発の基礎データの収集に至った（写真-4.4.11 参照）。

減勢工用の有スランプコンクリートは大量搬送する必要があるため、管径  $\phi 500\text{mm}$  の SP-TOM を適用し約 28,000m<sup>3</sup> の運搬を行うことができた。また、減勢工背面盛土用の CSG 搬送にも適用し知見を得た。



写真-4.4.11 滝沢ダム SP-TOM 全景

## 2) 稲葉ダム導入事例

管径 $\phi 500\text{mm}$ の SP-TOM を全長 56m 設置し、滝沢ダムでの実績を踏まえて CSG 搬送に使用し約 3.7 万  $\text{m}^3$  の搬送を問題なく実施することができた (写真-4.4.12 参照)。



写真-4.4.12 稲葉ダム SP-TOM 全景

## 3) 嘉瀬川ダム導入事例

RCD 用コンクリートの搬送としてダム堤体打設に本格的に導入した工事 (写真-4.4.13 参照) であり、管径 $\phi 700\text{mm}$ の SP-TOM を新たに製作し導入した。連続大量搬送を実現するためには SP-TOM 下部の受取方法として、一時貯留可能なホップ方式 (写真-4.4.14 参照) の他に自走式ベルトコンベヤ (写真-4.4.15) を初めて採用し、新たな課題と知見を得ることができた。



写真-4.4.13 嘉瀬川ダム SP-TOM 全景

SP-TOM を用いたコンクリートの搬送能力は最大搬送能力（瞬時）：約  $200\text{m}^3/\text{h}$ 、1 時間当りの平均搬送能力： $100\sim 150\text{m}^3/\text{h}$  程度であり、最大搬送能力を連続して維持し続けるために、新たな SP-TOM 下部の受取方法が必要であることが判明した。



写真－4. 4. 14 一時貯留ホッパ



写真－4. 4. 15 自走式ベルトコンベヤ

#### 4) 湯西川ダムでの導入事例

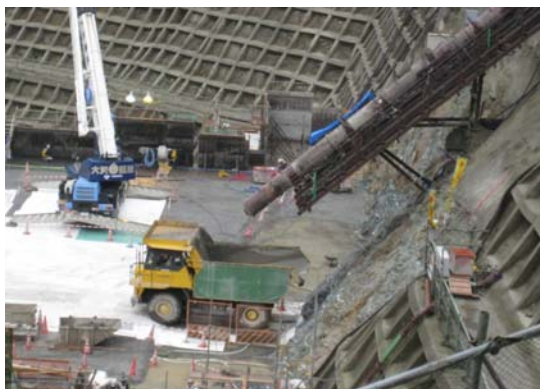
RCD コンクリート搬送として嘉瀬川ダムに引続き本格的に導入した工事（写真－4. 4. 16 参照）であり、前現場で発生した課題を克服した改良型の SP-TOM を採用した。

SP-TOM を打設標高に応じて 3 m ピッチで分解可能な改良型へ変更したり、RCD 用コンクリートの搬送で摩耗する管内部のゴムライナを脱着可能な交換方式とした、新しい SP-TOM へと進化させ導入した。



写真－4. 4. 16 湯西川ダム SP-TOM 全景

連続大量搬送を実現するための SP-TOM 下部の受取方法として、40t ダンプトラックに直接投入する方式（写真－4. 4. 17）や2基のベルトコンベヤ（写真－4. 4. 18）を採用し、新たな課題と知見を得ることができた。



写真－4. 4. 17 40t ダンプトラックへ  
直接投入



写真－4. 4. 18 2 連式ベルトコンベヤ

#### 5) 第二浜田ダム、大滝ダム地滑り対策工事での SP-TOM 実施例

RCD 用コンクリートだけでなく、スランプ 3 cm の堤体コンクリートやセメント改良土の搬送にも高所から低所への搬送設備として、その適用範囲を拡大している。両現場の据付け状況を写真－4. 4. 19、写真－4. 4. 20 に示す。



写真－4. 4. 19 第二浜田ダム  
SP-TOM の全景



写真－4. 4. 20 大滝ダム地滑り対策工  
SP-TOM の全景

#### 4.4.3 SP-TOM によるコンクリート材料分離抑制機構

SP-TOM は、高所にあるバッチャープラントから低所にある堤体等の打込み箇所へ、法面に設置したパイプ（以下、搬送管と称す）の中にコンクリートを通して運搬するものである。また、材料分離を抑制するために、搬送管の内部に攪拌羽根（以下、羽根と称す）を付け、かつ回転させるものとした。搬送管の中に羽根などを付けず、コンクリートを通した場合、大量のコンクリートを短時間に運搬できるが、コンクリートは著しく材料分離する。一方で羽根などを多く付けた場合、材料分離は抑制できるが運搬能力が低下する。そこで、十分な運搬能力を確保して、かつ材料分離を抑制できるように、法面の勾配やコンクリートの種類を考慮し、最適な羽根の形状、大きさ、間隔などを選定した。さらに、選定した羽根形状を有する SP-TOM を実際のダム建設に適用した。

ここでは、上述した SP-TOM の機構をトラックアジテータの攪拌機構と比較しながら考察するとともに、実規模試験における SP-TOM の仕様の選定、実施工における実績を踏まえて、SP-TOM によるコンクリート材料分離抑制機構について考察を加えた。

(1) コンクリート材料分離抑制機構について

一般的に広く用いられているコンクリート運搬車としてトラックアジテータの攪拌機構と SP-TOM のコンクリート材料分離抑制機構について比較したものを表-4.4.20 に示す。

表-4.4.20 アジテータと SP-TOM の機構概要 <sup>1)、8)、9)、10)</sup>

	アジテータ	SP-TOM
内部構造		
羽根(A)	2枚のらせん状の羽根が 180°の位相でドラムの内壁に取り付けてある  羽根寸法 羽根の高さ：300～425mm	羽根枚数：10枚／(1本 12m)を 120°の位相かつ取付け間隔 1200mm で搬送管内壁に取り付けてある  羽根寸法 羽根の高さ：140～200mm
ドラム半径(B)	最大 1050mm (575～1050mm)	内半径：φ343.1mm
(A/B)	約 0.40～0.52	約 0.41～0.58
回転数	0～10rpm	15～25rpm

1) トラックアジテータに代表されるアジテータ機構

攪拌中のトラックアジテータのドラム内のコンクリートには、大きく分けて表層流、越流、押し込み流れの3種類の流れがあることが明らかにされている <sup>8)、9)、10)</sup>。

①アジテータの材料分離抑制の仕組み

攪拌中のコンクリートの表面は、排出口側が奥側より低く、また左側が右側より低くなっている。アジテータの奥側では左右の勾配の方が前後の勾配よりも大きいので、表面の近くのコンクリートは、ほとんど右側から左側へ流れている。一方、排出口側では前後の勾配の方が左右の勾配よりも大きくなり、ほとんど奥側から排出口側へ流れる。これらの勾配のあるドラムが回転することによって生じる流れを表層流と称す <sup>9)</sup>。

排出口側に到達したコンクリートがブレードにせき止められて流れが止まり、その時に、ブレードが奥側へ進むにつれて、コンクリートが盛り上がり、ついにはブレードを乗り越えて排出口側へ落下する流れを示す。この流れを越流と称す <sup>9)</sup>。

ドラムの内壁の近くにあるコンクリートがブレードに押されて、ドラムの回転に付随しながら奥側へ移動し、アジテータの左側ではアジテータの回転に付随してコンクリートが下部にもぐり込む。この流を押し込み流れと称す<sup>9)</sup>。

攪拌中のアジテータ内のコンクリートが分離しにくくなっているのは、これらの流れによって攪拌されているためである。

## 2) SP-TOM の機構<sup>1)</sup>

SP-TOM は搬送管の内側にはアジテータ機構と同様に位相をずらした羽根を複数枚配置しており、搬送管を回転させることによってコンクリートを円滑に上方から下方へ、移動させる仕組みとなっている。

搬送管内に投入されたコンクリートは、セメント・砂利・砂および水を練り混ぜていることから、粘性が高いため砂利の一般的な安息角度（約  $42^{\circ}$ ）よりも急勾配（経験から  $50^{\circ}$  以上）にしないと自然落下で搬送管内を滑って移動することができない。したがって、SP-TOM は搬送管を回転させることで、粘性の高いコンクリートが緩勾配でも移動可能なエネルギーが得られる構造となっている。

### ① SP-TOM の材料分離抑制の仕組み

搬送管内の RCD 用コンクリートの挙動について、特に材料分離抑制の観点に基づいて以下に示す。

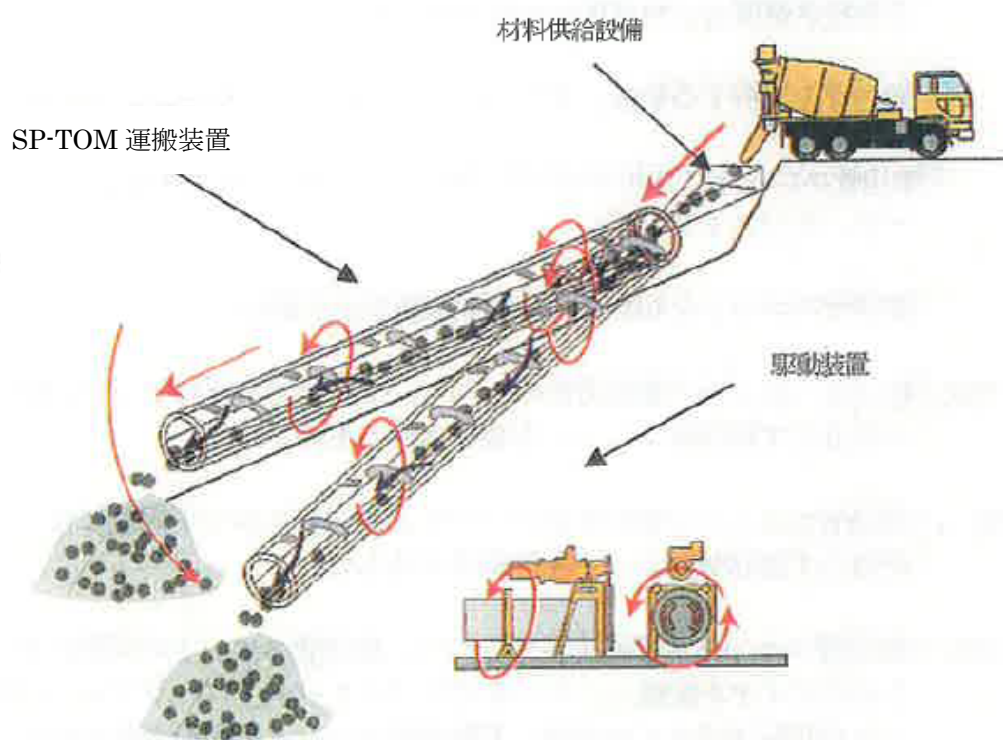
- a. 搬送管内に投入されたコンクリートは粘性が高いため、自由落下で滑り落ちることのできない角度（上述の  $50^{\circ}$  未満）では、設置勾配が緩いため搬送管内面との摩擦によって管内内壁に付着し留まる。
- b. 搬送管を回転することによって、搬送管内部の羽根より上部にあるコンクリートに遠心力が働き、コンクリートが管の天井方向へ回ろうとする力が加わる。
- c. 遠心力によってコンクリートが搬送管と付着していた摩擦が徐々に薄れ、摩擦の無くなった地点（天井部）でコンクリートは重力落下する。
- d. 重力落下したコンクリートには、落下時の重力エネルギーが加えられており搬送管内を滑って移動するが、 $120^{\circ}$  の位相差で配置された羽根で堰き止められる。
- e. 堰き止められたコンクリートは回転によって遠心力が加わっており、再度、管の天井方向へと掻き揚げられ、搬送管の内面との摩擦が無くなった地点で自由落下する。

このように、コンクリートに落下エネルギーが加えられて滑りながら移動する時に、 $120^{\circ}$  の位相を変えて配置された羽根によって粗骨材が先走りしてコンクリートが分離するのを抑制するとともに、位相差で配置された羽根で順次堰き止め・落下を繰り返すたびに、コンクリートを練り混ぜて、再び均一にさせる効果も有している。

② SP-TOM の材料分離機構の特長

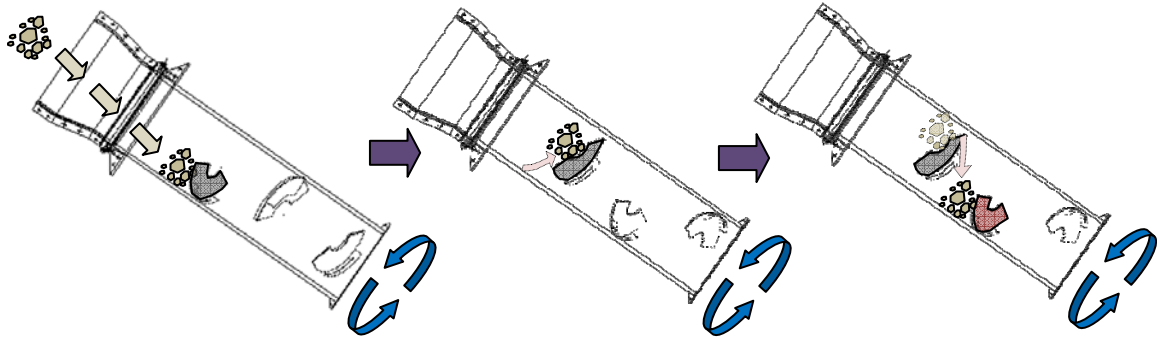
- a. 搬送管の内部の羽根により、コンクリートが搬送管の天井方向に回り、練り混ぜて材料を攪拌する効果がある。
- b. 搬送管の回転によって遠心力を発生させ、コンクリートと搬送管の内面との摩擦抵抗が低下して下方へ自由落下する仕組みを採用しており、攪拌されることで粗骨材の材料分離を抑制する。
- c.  $120^\circ$  の位相で配置した羽根は SP-TOM の回転によってコンクリートと搬送管の内面との間の摩擦抵抗が低下して下方へ自由落下し滑るのを抑制するとともに、複数枚の羽根によって順次再攪拌する効果がある。

SP-TOM の運搬イメージおよび粗骨材の材料分離の抑制機構の概念図を図－4. 4. 23 および図－4. 4. 24 に示す。



図－4. 4. 23 SP-TOM の運搬イメージ <sup>1)</sup>

【投入されたコンクリートの搬送管内の動き】



①羽根（1番目）に滞留

②搬送管の回転によっ  
て天井部へ掻き揚げ

③天井部に到達すると重  
力エネルギーにより落下

④落下したコンクリート  
は羽根（2番目）に滞留

図－4. 4. 24 SP-TOM による粗骨材の材料分離の抑制効果のイメージ

(2) SP-TOM を用いたコンクリート運搬における材料分離抑制に関する試験

本項では、4.4.2 で示した SP-TOM の運搬確認試験および実施工の際に取得したコンクリートの分離抑制効果に関して定量的な評価を加えた。

1) SP-TOM を用いた運搬確認試験方法

RCD 用コンクリートの SP-TOM を用いた大量運搬に関する各種試験について、コンクリートの材料分離の抑制効果に着目し、実規模サイズの実験および実施工での実績を対象としてデータを整理、評価した。

① 試験条件

試験条件の概要一覧を表－4.4.21 に示す。

表－4.4.21 試験条件の概要一覧

分類Ⅰ	分類Ⅱ	試験条件						コンクリート
		機長 (m)	最大 傾斜角 (°)	回転数 (rpm)	羽根形状			
					角度 (°)	高さ (mm)	間隔 (m)	
実規模 試験	A	12	40	15、20、25	120	140	1.2	模擬 RCD A
					120	140	2.0	
					120	200	2.0	
	B	6	45	15、20、25	150	350	1.4	模擬 RCD B
					360	240	1.2	
実施工	嘉瀬川	66	40	15、20、25	120	140	1.2	RCD
	湯西川	138	42		120	200	1.2	RCD
	第二浜田	96	43		120	200	1.2	有スランブ

② 試験設備

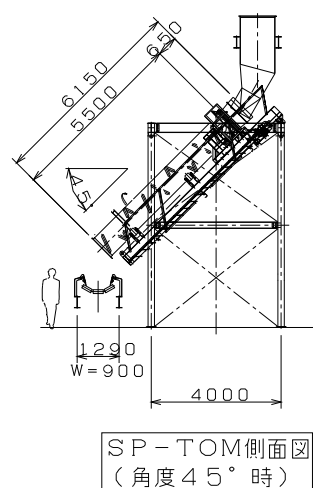
試験に用いた設備の一覧を表－4. 4. 22 に示す。また、試験、実施工に供した設備の外観を写真－4. 4. 21～写真－4. 4. 24 および図－4. 4. 25 に示す。なお、詳細は、4. 4. 2 に示すとおりである。

表－4. 4. 22 試験設備一覧

分類Ⅰ	分類Ⅱ	写真もしくは図	設備条件		
			機長 (m)	最大 傾斜角 (°)	管径 (mm)
実規模 試験	A	写真－4. 4. 21	12	40	700
	B	図－4. 4. 25	6	45	700
実施工	嘉瀬川	写真－4. 4. 22	66	40	700
	湯西川	写真－4. 4. 23	138	42	700
	第二浜田	写真－4. 4. 24	96	43	700



写真－4. 4. 21 試験設備（実規模試験 A）



図－4. 4. 25 試験設備（実規模試験 B）



写真－4. 4. 22 実施工設備（嘉瀬川ダム）



写真－4. 4. 23 実施工設備（湯西川ダム）



写真－4. 4. 24 実施工設備（第二浜田ダム）

### ③ コンクリート

試験に供したコンクリートの配合を表－4.4.23に示す。実規模試験 A、B においては、A は嘉瀬川ダム、B は湯西川ダムのそれぞれの実施工で使用するコンクリートに対し、中庸熱フライアッシュセメントを石灰石微粉末に体積換算で同量を置換し、試験に供した。また、基本的に RCD 用コンクリートを対象としているものの、参考として第二浜田ダムの有スランブコンクリートも要因の一つとした。

表－4.4.23 RCD 用コンクリートの配合

分類 I	分類 II	V C 値の 範囲 (秒)	空気 量の 範囲 (%)	水結合 材比 W/C (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m³)							
						水 W	結合材		細骨 材 S	粗骨材			Ad
							フライ ッシュ セメント C	石灰 石微 粉末		8040 G1	4020 G2	2005 G3	
実規模 試験	A	20±10	1.5±1	—	29.0	99	—	114	641	532	529	527	0.25
	B			—	31.5	83	—	124	704	540	538	461	
実施 工	嘉瀬川			82.5	29.0	99	120	—	641	532	529	527	0.25
	湯西川			63.8	31.5	83	130	—	704	540	538	461	
											1588		
											1539		

表－4.4.24 有スランブコンクリートの配合

分類 I	分類 II	スラン プの 範 囲 (cm)	空気 量の 範 囲 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m³)							
						水 W	フライッシュ セメント C	細骨 材 S	粗骨材				Ad
									15080 G1	8040 G2	4020 G3	2005 G4	
実施 工	第二 浜田	3.0±1	3.5±1	81.5	30.0	106	130	643	339	385	358	483	※
									1565				

※：(Ad+Ad2) Ad1=C×0.27%、Ad2=C×0.01%

### ④ 測定項目

測定項目は、粗骨材の分離を評価するために、コンクリートに対する 40mm 以上の粗骨材の割合（以下、 $\theta_{G40}$ と称す）を測定した。フルサイズのコンクリートからウェットスクリーニングで採取した 40mm 以上の粗骨材の重量（以下、 $W_{G40}$ と称す）をフルサイズのコンクリート重量（以下、 $W_{Con}$ と称す）で割り、SP-TOM による運搬前後における数字の変化程度を JIS A 1119「ミキサで練り混ぜたコンクリート中のモルタルの差及び粗骨材量の差の試験方法」を参考にして、式)4.4.1 および式)4.4.2 に準じて算出した。

$$\alpha = \frac{\theta_{G40} - \theta_{G40}^2}{\theta_{G40} + \theta_{G40}^2} \times 100(\%) \quad \cdots \text{式) 4.4.1}$$

$$\theta_{G40} = \frac{W_{G40}}{W_{Con}} \times 100(\%) \quad \dots \text{式) 4.4.2}$$

ここで、 $\alpha$  : 40mm 以上の粗骨材量の差 (%)。

一般に、JIS A 1119 では、ミキサの性能を評価するために使用されるため、 $\alpha$  の目標値は、5 % 以下とされている。しかし、SP-TOM は練混ぜ用ミキサではなく、運搬設備であることから、目標値として 10%以下を設定した。なお、40mm 以上の粗骨材量の差の 10%が単位水量および単位セメント量の差として換算した結果を表－4.4.25 に示す。表に示すように、配合によって異なるものの、RCD 用コンクリートの単位水量の差として概ね± 5 kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量として概ね± 7 kg/m<sup>3</sup> となり、実用上許容できる範囲であると考えられた。

表－4.4.25 RCD 用コンクリートの配合

分類Ⅰ	分類Ⅱ	スランプ の範囲 (cm)	V C 値の 範囲 (秒)	空気量 の範囲 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		40mm 以上の粗骨材量の差 の 10%が与える誤差(kg/m <sup>3</sup> )	
					水	セメント	水	セメント
実施工	嘉瀬川	—	20±10	1.5±1	99	120	-5～7	-6～8
	湯西川				83	130	-4～6	-6～9
	第二浜田	3.0±1	—	3.5±1	106	130	-8～11	-9～14

## 2) SP-TOM を用いた運搬確認試験結果

### ① コンクリートの物性

試験に供試体コンクリートのフレッシュ性状を表－4. 4. 26 に示す。さらに、写真－4. 4. 25 に模擬 RCD 用コンクリートの外観状況を示す。なお、試験に供したコンクリートはすべての項目で目標性能を満足した。

表－4. 4. 26 コンクリートのフレッシュ性状

分類Ⅰ	分類Ⅱ	種類	スランプの 範囲 (cm)	VC 値の 範囲(秒)	空気量 の範囲 (%)	試験結果				
						スランプ (cm)	VC 値 (秒)	空気量 (%)		
実規模 試験	A	模擬 RCD	—	20±10	1.5±1	—	—	—		
	B					—	—	—		
実施工	嘉瀬川	RCD				—	10.3	1.5(1.9)		
	湯西川					—	12.1	0.8(1.0)		
	第二浜田	有スランプ				3.0±1	—	3.5±1	3.5	—

空気量はフルサイズコンクリート換算値、( ) 内の数値は 40mm 以下の実測値



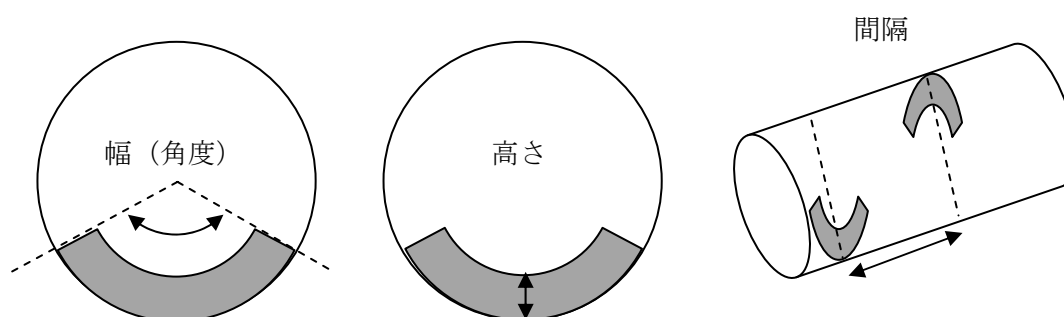
写真－4. 4. 25 模擬 RCD 用コンクリート

② 実規模試験による粗骨材の分離に関する検討

表－4. 4. 27 に試験ケースを示す。試験ケースは、SP-TOM の機長、最大傾斜角、回転数、および羽根の形状とした。なお、羽根の形状としては、図－4. 4. 26 に示す羽根の幅（角度）、高さ、間隔とした。粗骨材の分離に関しては、各試験ケースにおいて 40mm 以上の粗骨材量の差を運搬前後で比較した。

表－4. 4. 27 実規模試験の条件一覧

ケース No.	分類 I	分類 II	試験条件					
			機長 (m)	最大 傾斜角 (°)	回転数 (rpm)	羽根の形状		
						幅 (角度) (°)	高さ (mm)	間隔 (m)
A-1	実規模 試験	A	12	40	15、20、25	120	140	1.2
A-2						120	140	2.0
A-3						120	200	2.0
B-1		B	6	45	15、20、25	150	350	1.4
B-2						360	240	1.2



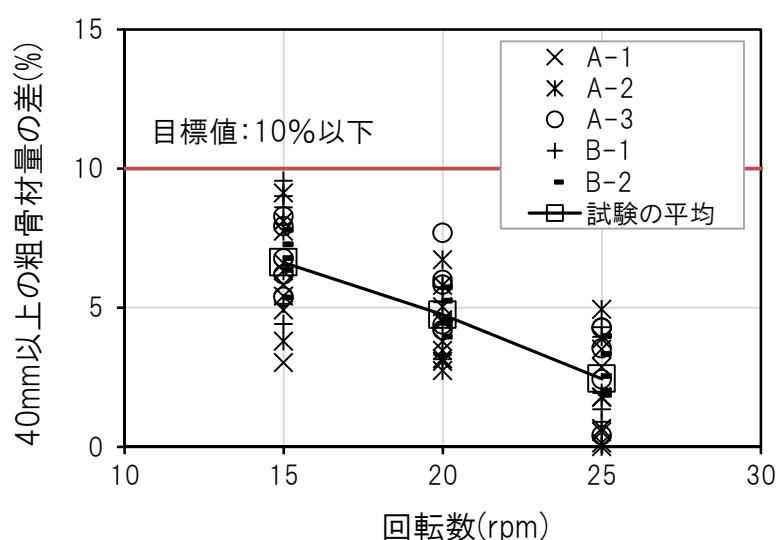
図－4. 4. 26 羽根の形状

a. 回転数が粗骨材の分離に与える影響

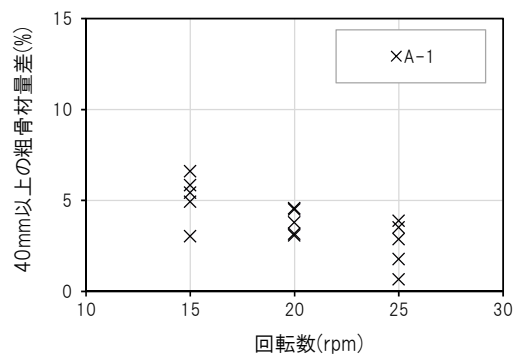
各種羽根の形状の条件において、SP-TOM の回転数を水準として、その際の 40mm 以上の粗骨材量の差を運搬前後で比較した。そのすべての結果を図－4. 4. 27、さらに条件毎に抽出した結果を図－4. 4. 28～図－4. 4. 32 に示す。羽根の形状によらず、傾向として回転数の増加は粗骨材の分離低減の効果があることが分かった。これは、図－4. 4. 24 の SP-TOM の機構で示したように、傾斜方向に斜め落下するコンクリートがドラムの回転によって持ち上げられて鉛直落下する際に再攪拌されることから、回転数の増加がコンクリートの際攪拌の頻度が増えて、結果として粗骨材の分離傾向をより抑制したものと推測した。

表－4. 4. 28 実規模試験の条件一覧

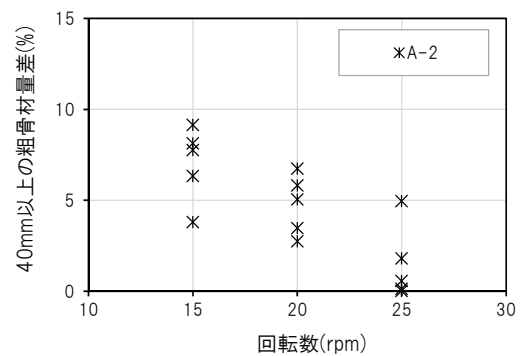
ケース No.	分類 I	分類 II	試験条件					
			機長 (m)	最大 傾斜角 (°)	回転数 (rpm)	羽根の形状		
						幅(角 度) (°)	高さ (mm)	間隔 (m)
A-1	実規模 試験	A	12	40	15、20、25	120	140	1.2
A-2						120	140	2.0
A-3						120	200	2.0
B-1		B	6	45	15、20、25	150	350	1.4
B-2						360	240	1.2



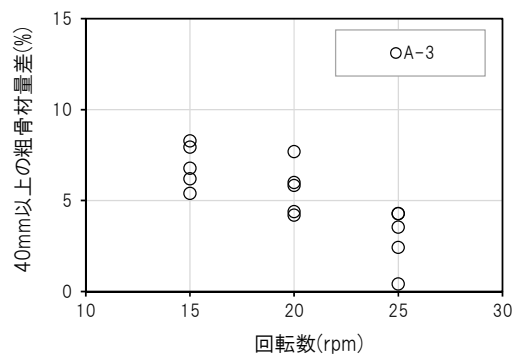
図－4. 4. 27 回転数が粗骨材の分離に与える影響【ケース A、B】



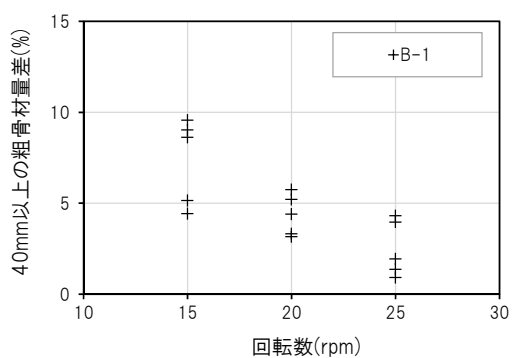
図－4. 4. 28 回転数が粗骨材の分離に与える影響【ケース A-1】



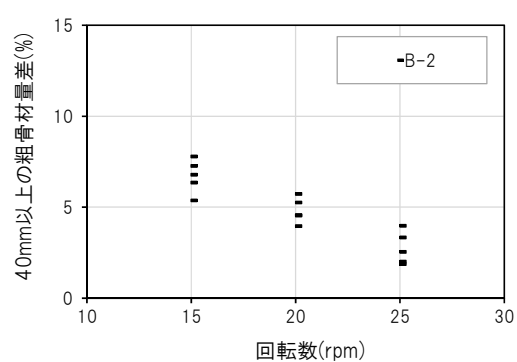
図－4. 4. 29 回転数が粗骨材の分離に与える影響【ケース A-2】



図－4. 4. 30 回転数が粗骨材の分離に与える影響【ケース A-3】



図－4. 4. 31 回転数が粗骨材の分離に与える影響【ケース B-1】



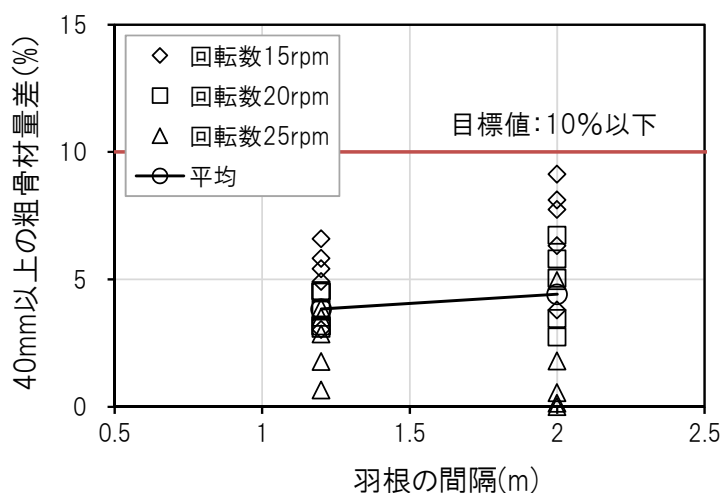
図－4. 4. 32 回転数が粗骨材の分離に与える影響【ケース B-2】

b. 羽根の形状が粗骨材の分離に与える影響（その1）

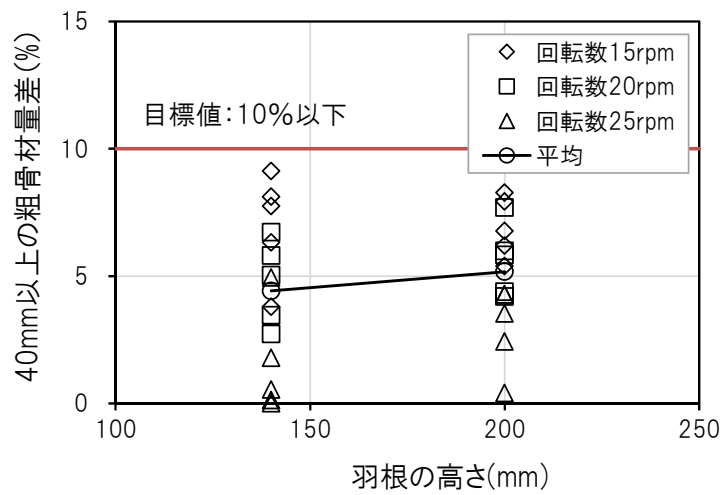
表－4. 4. 29 に試験ケースを示す。各種回転数の条件において、SP-TOM の羽根の形状を水準として、その際の 40mm 以上の粗骨材量の差を運搬前後で比較した。その結果を図－4. 4. 33 と図－4. 4. 34 に示す。さらに、これらの結果を平均した傾向を図－4. 4. 35 に示す。羽根の間隔を比較すると羽根の間隔が小さい方が粗骨材の分離を抑制できる結果となった。また、羽根の高さは低い方が粗骨材の分離を抑制できる結果となった。なお、これら羽根の形状の影響は回転数が与える影響よりも比較的小さかった。ここで、羽根の回転が大きいほど材料分離を抑制する効果が大きくなるのは、前述のとおり、コンクリートが持ち上げ落下する頻度が多くなり、再攪拌される頻度が大きくなるためと推測できた。一方、羽根の高さも大きいほど持ち上げ落下する頻度が大きくなると考えられるものの、試験結果は相反する傾向を示した。これは、さらに詳細な検討が必要となるものの、粗骨材最大寸法が 80mm であり、羽根の高さが 140mm、200mm の差異では攪拌効果に影響せず、むしろ羽根の根本などのスペースにコンクリートやモルタルの付着が影響したものと推測される。

表－4. 4. 29 実規模試験の条件一覧

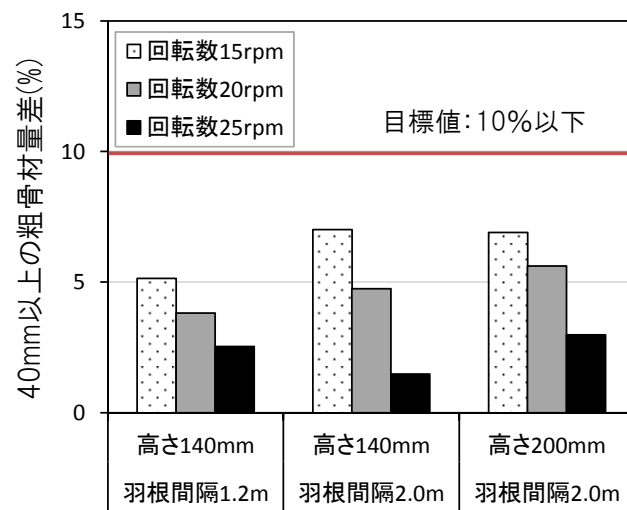
ケース No.	分類 I	分類 II	試験条件					
			機長 (m)	最大 傾斜角 (°)	回転数 (rpm)	羽根の形状		
						幅 (角度) (°)	高さ (mm)	間隔 (m)
A-1	実規模 試験	A	12	40	15、20、25	120	140	1.2
A-2						120	140	2.0
A-3						120	200	2.0



図－4. 4. 33 羽根の間隔が粗骨材の分離に与える影響【ケース A-1、A-2】



図－4. 4. 34 羽根の高さが粗骨材の分離に与える影響【ケース A-2、A-3】



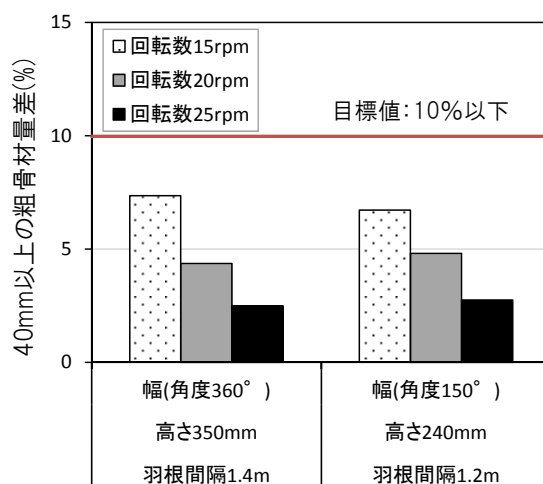
図－4. 4. 35 羽根の形状が粗骨材の分離に与える影響【ケース A-1、A-2、A-3】

c. 羽根の形状が粗骨材の分離に与える影響（その2）

表－4. 4. 30 に試験ケースを示す。各種回転数の条件において、SP-TOM の羽根の形状を水準として、その際の 40mm 以上の粗骨材量の差を運搬の前後で比較した。その結果を図－4. 4. 36 に示す。羽根の幅（角度＝） $360^{\circ}$  のいわゆる連続羽根と不連続な部分羽根を比較した場合、ほぼ同等の結果となった。以上から、粗骨材の分離以外の運搬効率やメンテナンスなどの他要因によって SP-TOM の最適化を図ることとした。

表－4. 4. 30 実規模試験の条件一覧

ケース No.	分類 I	分類 II	試験条件					
			機長 (m)	最大 傾斜角 ( $^{\circ}$ )	回転数 (rpm)	羽根の形状		
						幅 (角度) ( $^{\circ}$ )	高さ (mm)	間隔 (m)
B-1	実規模 試験	B	6	45	15、20、25	150	350	1.4
B-2						360	240	1.2



図－4. 4. 36 羽根形状が粗骨材の分離に与える影響【ケース B-1、B-2】

d. 実規模試験のまとめ

実規模試験の結果の概要を以下にまとめる。

- ・ 回転数 15～25rpm の範囲では、回転数が大きいほど粗骨材の分離は小さくなる
- ・ 羽根の間隔は 2.0m よりも 1.2m の方が粗骨材の分離は小さくなり、羽根の高さは 200mm よりも 140mm の方が、粗骨材の分離は小さくなるものの、それらの影響は回転数の影響に比べると比較的小さい
- ・ 360° 連続羽根と 150° の部分羽根では、粗骨材の分離は同程度であり、他要因を勘案して決定することが好ましい

以上から、実施工においては、羽根形状を

角度：120°

高さ：140～200mm 程度

間隔：1.2m

を基本として適用した。

③ 実施工を踏まえた粗骨材の分離に関する検討

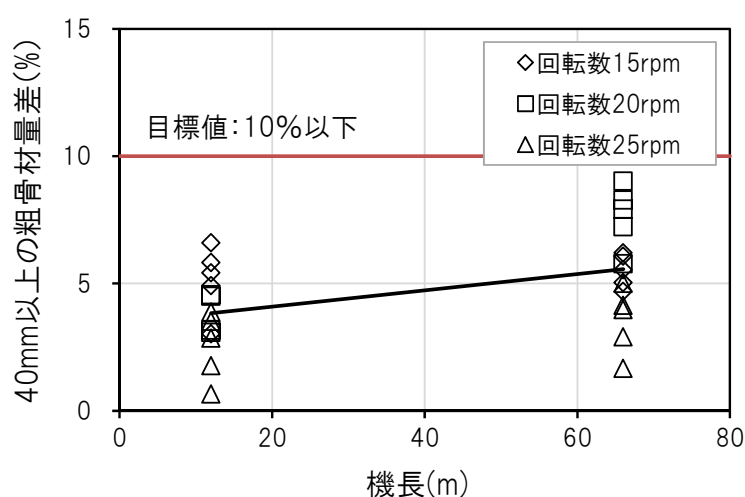
表－4. 4. 31 に実施工での実績を示す。実績においては、SP-TOM の機長、最大傾斜角、回転数および羽根の形状で整理した。

a. 機長が粗骨材の分離に与える影響

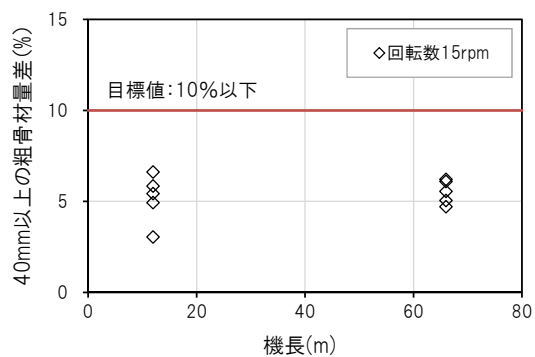
図－4. 4. 37 に機長が粗骨材の分離に及ぼす影響を示す。機長を要因としたデータは、嘉瀬川ダムにおける実機試験 12m と実施工 66m であり、各回転数毎に抽出した結果を図－4. 4. 38～図－4. 4. 40 に示す。機長の延長によって、粗骨材の分離傾向がわずかに大きくなった。これは、コンクリートの運搬距離が長くなることによる SP-TOM の練混ぜ効果と粗骨材の分離作用に対し、わずかに分離作用が大きくなったものと推測された。ただし、回転数が 25rpm のケースでは、機長に関わらず、ほぼ粗骨材の分離は同等であり、かつすべてにおいて目標値の 10%以下であった。

表－4. 4. 31 試験条件の概要一覧

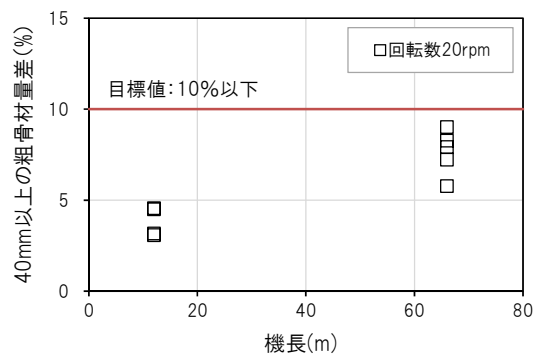
分類Ⅰ	分類Ⅱ	試験条件						コンクリート
		機長 (m)	最大 傾斜角 (°)	回転数 (rpm)	羽根の形状			
					角度 (°)	高さ (mm)	間隔 (m)	
実施工	嘉瀬川	66	40	15、20、25	120	140	1.2	RCD
	湯西川	138	42		120	200	1.2	RCD
	第二浜田	96	43		120	200	1.2	有スランプ



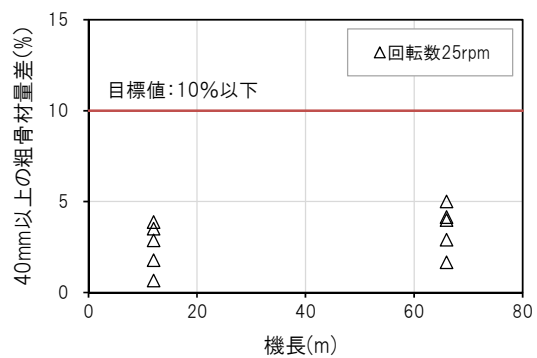
図－4. 4. 37 機長が粗骨材の分離に与える影響



図－4. 4. 38 機長が粗骨材の分離に与える影響【回転数 15rpm】



図－4. 4. 39 機長が粗骨材の分離に与える影響【回転数 20rpm】



図－4. 4. 40 機長が粗骨材の分離に与える影響【回転数 25rpm】

b. 各ダムにおける粗骨材の分離に与える影響

実施工において、SP-TOM の回転数を水準として、その際の 40mm 以上の粗骨材量の差を運搬前後で比較した。その結果を図-4.4.41 およびダムごとに抽出した結果を図-4.4.42～図-4.4.44 に示す。実施工においては、回転数が粗骨材の分離に与える影響はダムごとに傾向が異なる結果となった。図-4.4.42 に示す嘉瀬川ダムでは、回転数 20rpm において分離の傾向が大きく、25rpm まで回転数を上げると分離傾向が小さくなる結果となった。また、図-4.4.43 に示す湯西川ダムでは、回転数の増大に従い分離傾向が小さくなった。嘉瀬川ダムでは 15 から 20rpm にかけて分離傾向が増大したもの、回転数の増大に伴う分離傾向の縮小は実規模試験と同様の結果であり、SP-TOM の攪拌効果によるものと推測された。一方、図-4.4.44 に示す第二浜田ダムでは、傾向が異なり、回転数の増大に従い分離傾向が大きくなった。これは、前述の嘉瀬川ダム、湯西川ダムは RCD 用コンクリートであったのに対し、第二浜田ダムは有スランブコンクリートであり、コンクリートの粘性などが異なるために回転数の増大が羽根などへのコンクリート付着量の増大を招き、分離傾向となったものと推測した。

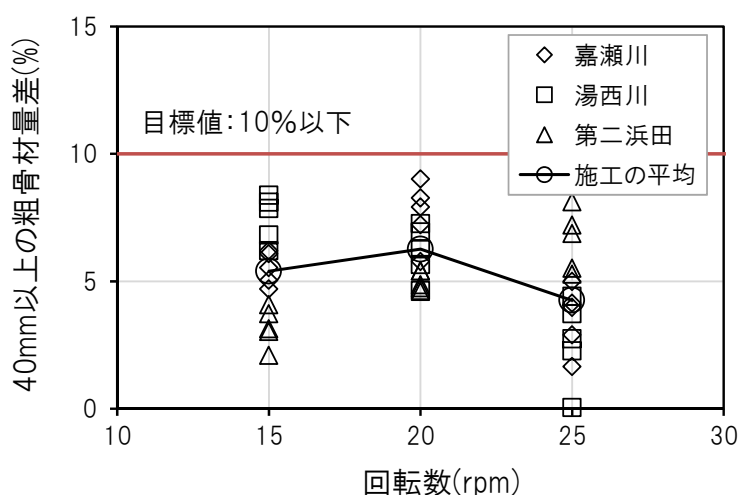
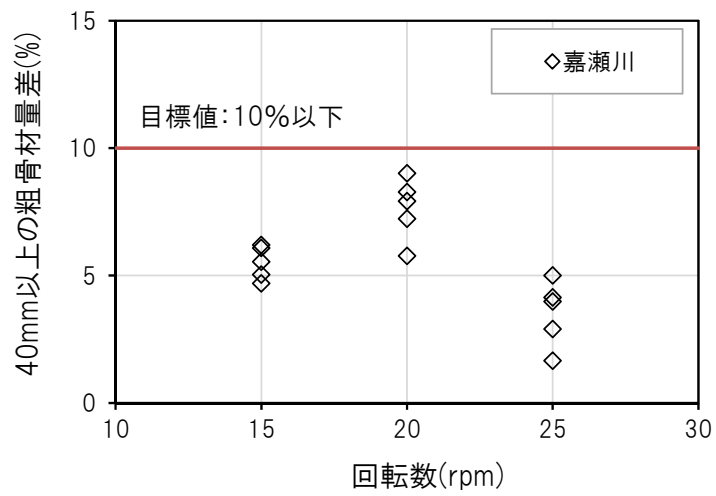
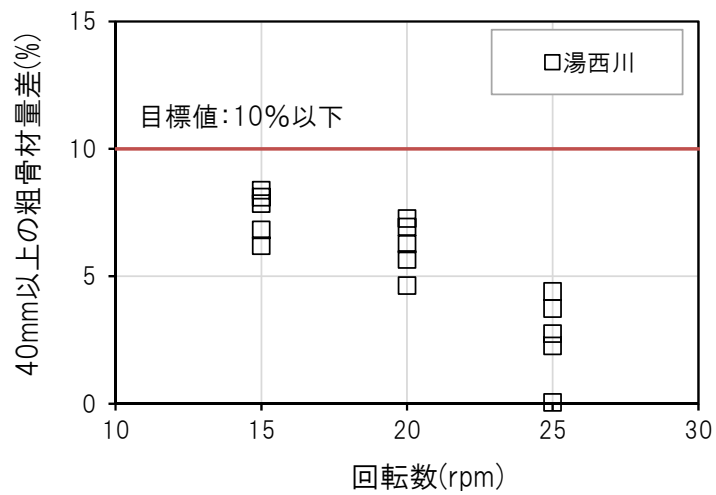


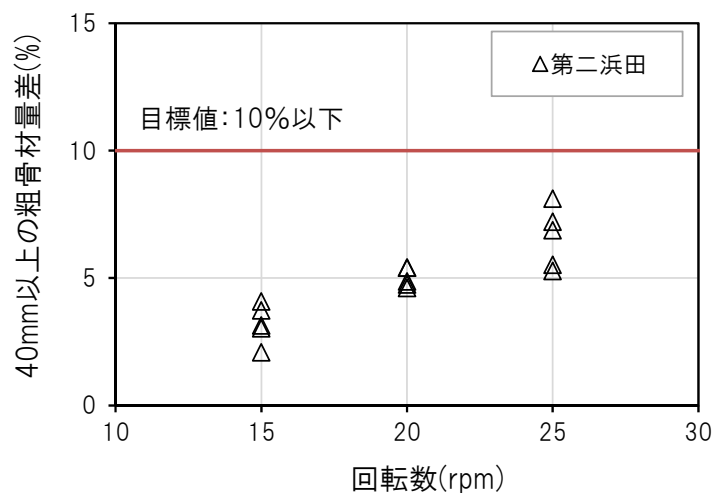
図-4.4.41 回転数が粗骨材の分離に与える影響



図一4. 4. 42 回転数が粗骨材の分離に与える影響【嘉瀬川ダム】



図一4. 4. 43 回転数が粗骨材の分離に与える影響【湯西川ダム】



図一4. 4. 44 回転数が粗骨材の分離に与える影響【第二浜田ダム】

c. 各ダムにおける粗骨材の分離に与える影響

実施工における SP-TOM の条件で粗骨材の分離程度を比較した結果を図-4.4.45 および図-4.4.46 に示す。実規模試験で選定した SP-TOM の条件で実施工での運搬を行った結果、目標値の10%をすべてのケースで下回る結果となった。以上から、粗骨材の分離を抑制し、均一な運搬方法としての確立に至ったものと考えた。

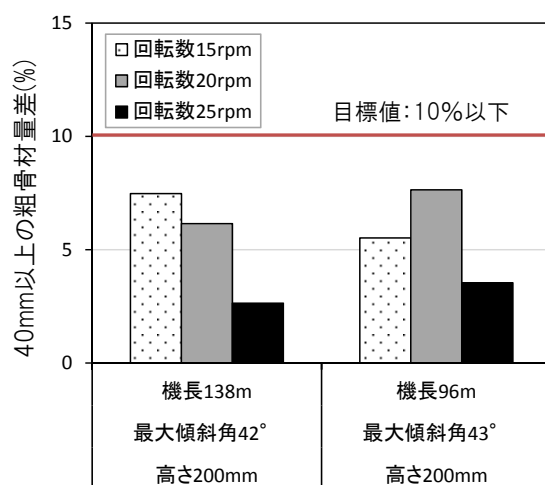


図-4.4.45 各ダムにおける粗骨材の分離に与える影響（RCD コンクリート）

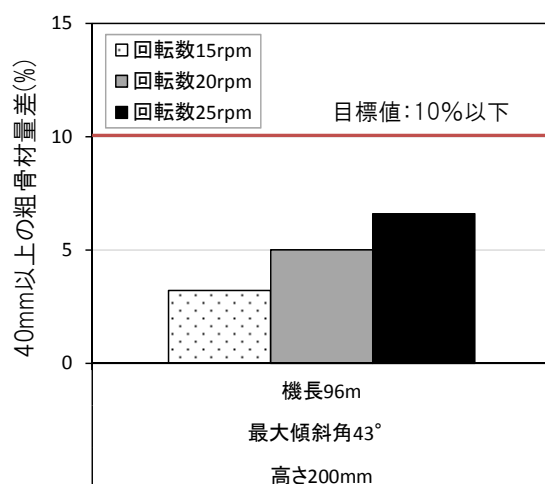


図-4.4.46 各ダムにおける粗骨材の分離に与える影響（有スランブコンクリート）

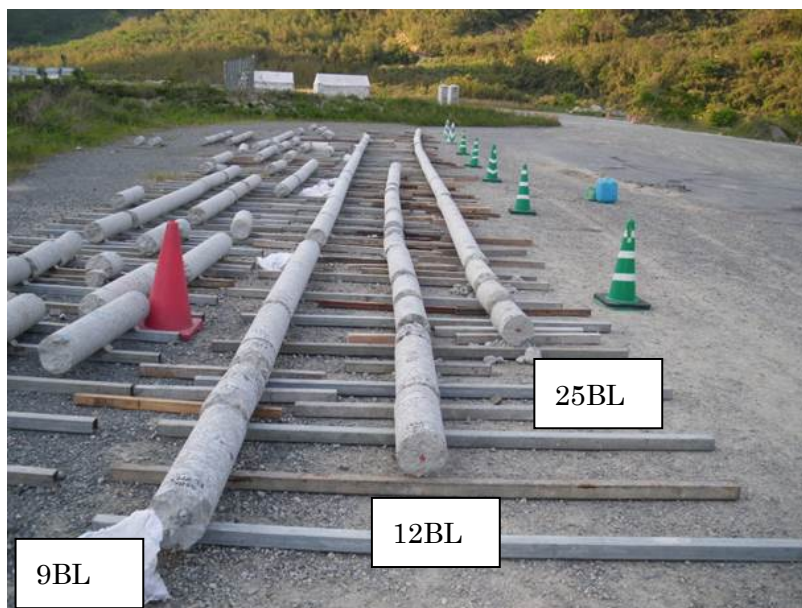
d. 打ち込んだコンクリートの均一性評価について

実施工では図－4. 4. 42、図－4. 4. 43に示すように、回転数25rpmとすることで、SP-TOMを用いた運搬によって生じる粗骨材の差を管理目標の10%を下回る5%以下で管理することができた。骨材量の差10%以下は、表－4. 4. 25に示したように、単位セメント量に換算して数 $\text{kg/m}^3$ の差異に相当し、骨材の分離が抑制されたことによって締固め性能も良好で、密実なRCD用コンクリートが構築されたものと考えられた。ここで、実際にSP-TOMで運搬し、実施工において、SP-TOMを用いて運搬したRCDコンクリートの均一性を確認するために、実構造物からコアを採取し、外観調査もしくは圧縮強度試験を行った。測定した条件を表－4. 4. 32に示す。

表－4. 4. 32 コンクリートコアの採取条件の一覧

ダム名	採取箇所		コア長さ (m)	コア直径 (mm)	本数	評価項目
	ブロック	条件				
嘉瀬川	9BL	傾斜打継部と標準部	28	200	1	外観調査
	12BL	傾斜打継部	12	200	1	
	25BL	標準部	23	200	1	
湯西川	14BL	傾斜打継部	1	200	3	外観調査 圧縮強度 単位容積質量

写真－4. 4. 26～写真－4. 4. 29 に嘉瀬川ダムの RCD 用コンクリートから採取したコアの外観を示す。なお、近景はコアの代表写真を示す。写真－4. 4. 26 の全景に示すように、採取した 3 本のコアは、コア採取の作業上不可欠な破断を除いて、ほぼ連続して採取できている。これは、コンクリート中の粗骨材が偏ることなく、均一に分散し、さらに、十分に締め固まった状態を示すものである。さらに、写真－4. 4. 27～写真－4. 4. 29 に示す拡大写真で分かるように、粗骨材、モルタルが均一に分布しており、粗骨材の分離なく健全なコンクリートであることが確認できた。



写真－4. 4. 26 採取コアの全景（嘉瀬川ダム）



写真－4. 4. 27 9BL コアの代表写真（嘉瀬川ダム）



写真－4. 4. 28 12BL コアの代表写真（嘉瀬川ダム）



写真－4. 4. 29 25BL コアの代表写真（嘉瀬川ダム）

写真－4. 4. 30 に湯西川ダムの RCD コンクリートから採取したコアの外観を示す。写真－4. 4. 30 に示すように、コンクリート中の粗骨材が偏ることなく、均一に分散し、十分に締め固まった状態であることを確認した。

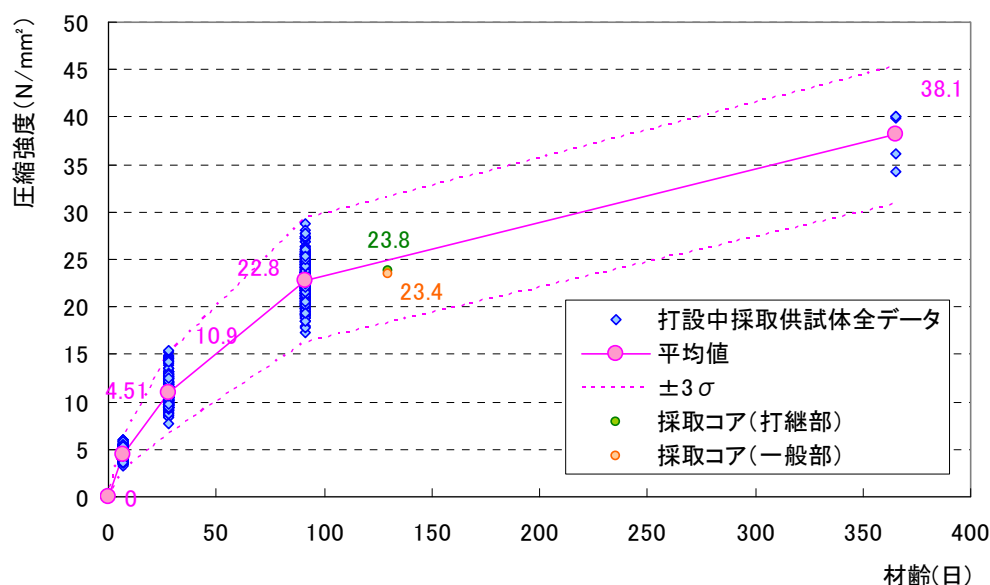


写真－4. 4. 30 採取コアの全景（湯西川ダム）

さらに、表－4. 4. 33 には、打継部および通常 RCD 施工部（以下、一般部）から採取したコアの圧縮強度試験および単位容積質量の測定結果を示し、図－4. 4. 47 には通常の圧縮強度試験結果として、品質管理として採取した材齢と圧縮強度の関係を示す。図中の青丸は当該リフトの打設中に品質管理用として採取した供試体の圧縮強度である。今回得られたコア強度を供試体の圧縮強度発現の図中にプロットすると、両者は同等の値となっていることが分かる。また、単位容積質量は若干の差異はあるものの、その差異は最大でも約 3.5%  $\left(\frac{2496-2410}{2458} \times 100(\%) \right)$  と小さいことがわかる。これらの結果から、外観でも確認したように、RCD 用コンクリートを SP-TOM で運搬して構築したコンクリートは、品質に影響を及ぼす材料分離を生じておらず、管理された供試体と同等の圧縮強度を発現していることを確認した。

表－4. 4. 33 湯西川ダムの採取コアの圧縮強度

ダム名	種別	材齢 (日)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )		備考
				平均値		平均値	
湯西川 ダム	RCD 打継部	130	24.4	23.8	2472	2455	打継部以外で 破壊
			23.3		2467		
			23.6		2426		
	RCD 一般部		23.9	23.4	2496	2458	—
			24.2		2410		—
			22.0		2467		—



図－4. 4. 47 採取コアの圧縮強度

e. 各ダムにおける SP-TOM の運搬能力

表－4. 4. 34 に各ダムの SP-TOM の運搬能力（施工実績）を示す。すべてのダムにおいて、4. 4. 2 に示した最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）を行う際の目標供給能力 180m<sup>3</sup>/h を満足する結果となった。

表－4. 4. 34 各ダムの運搬能力

分類Ⅰ	分類Ⅱ	設備条件			
		機長 (m)	最大 傾斜角 (°)	管径 (mm)	運搬能力 (m <sup>3</sup> /h)
実施工	嘉瀬川	66	40	700	250
	湯西川	138	42	700	250
	第二浜田	96	43	700	200

f. 材料分離に影響する水に関する考察

コンクリートの材料分離は、ブリーディングや骨材の分離として発生し、これらは、沈みひび割れや豆板などの施工不良の原因となることが知られている<sup>11)</sup>。そのため、土木の通常のコンクリートについては、できるだけ硬練りのコンクリートを打ち込み、横流しすることなく、密実に締め固めることが基本とされてきた<sup>12)</sup>。一方、高流動コンクリートは、高い粘性を付与することで、材料分離を抑制しつつ流動性を高めることで、いわゆる横流しを可能とした画期的なコンクリートである<sup>13)</sup>。表－4.4.35 に配合の一例を示すように、高流動コンクリートの材料分離抵抗性は、粉体もしくは増粘剤でペーストの粘性を増大させることによって得られており、フレッシュコンクリート中における自由水（余剰水膜<sup>14)</sup>）量が普通コンクリートに比べて著しく少ないと推測される。さらに、RCD コンクリートは表－4.4.35 に示すように、粉体量は高流動コンクリートの 1/4 以下であるものの、単位水量が著しく少なく、粗骨材量は約 2 倍となっている。以上から、これら一見すると性状の大きく異なる高流動コンクリートと RCD 用コンクリートであるものの、余剰水の量は近い状態となっていると推測し、既往の成果<sup>14)</sup>を参考にして余剰水膜厚を算出することとした。なお、参考として 27-12-20N の普通コンクリートの配合も示す。

表－4.4.35 各種コンクリートの配合の一例

配合	備考	スランプ <sup>°</sup> フロー (cm)	スランプ <sup>°</sup> (cm)	V C 値 の範囲 (秒)	空気量 の範囲 (%)	水結合材 比 W/C (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
								水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材			Ad
											8040 G1	4020 G2	2005 G3	
高流動	—	65±5	—	—	4.5±1.5	30.0	47.3	160	533	767	—	—	871	12.0
普通	—	—	12±2.5	—	4.5±1.5	50.0	43.0	170	340	754	—	—	1018	3.4
RCD	嘉瀬川	—	—	20±10	1.5±1	82.5	29.0	99	120	641	532	529	527	0.25
						1588								
	湯西川					63.8	31.5	83	130	704	540	538	461	0.325
											1539			

表－4. 4. 35 に示した配合から、余剰水膜厚を算定した結果を表－4. 4. 36 に示す。なお、表中には計算で使用した仮定条件も併せて示す。ここで、仮定値としたのは、Gc（セメント・細骨材・粗骨材混合物の実積率）と各材料の比表面積である。各材料の比表面積は一般的な値および文献値<sup>14)</sup>を使用しているため一定の精度があると推測される。さらに、使用材料の有する比表面積の個体差が余剰水膜厚に与える影響は比較的小さいことを確認している。一方、Gc については、既往の成果<sup>14)</sup>では、JIS A 1104 に準じて実際の材料を用いて実積率を測定している。本項では、実際の測定は困難なことから実積率を以下の方法で推定した。

高流動コンクリートの Gc は、既往の成果<sup>14)</sup>で示された細骨材と Gc の関係図に細骨材率 47.3% を代入して 82% とし、さらに、この条件から実積率 53% のセメント量が 7 vol% 増加、実積率 82% の骨材が 7 vol% 減少したことを考慮して 80% と算定した。

普通コンクリートの Gc は、既往の成果<sup>14)</sup>で示された細骨材と Gc の関係図に細骨材率 43% を代入して 81% と算定し、さらに、セメント量は 10vol% で既往の成果と一致したため、そのままの 81% と算定した。

RCD 用コンクリートは既往の成果<sup>14)</sup>で対象としたコンクリートとは大きく異なるため、上述したように既往の成果<sup>14)</sup>からの Gc の推定はできないと判断した。ここで、RCD コンクリートは細骨材の空隙に対するペーストの比率 ( $\alpha$ )、粗骨材の空隙に対するモルタルの比率 ( $\beta$ ) を考慮することで<sup>15) ~ 20)</sup>、理論密度に対する測定密度の比率である締固め率を 98~100% まで増大できるようになった<sup>15)</sup>。さらに、上述したように Gc を測定するのと同様にセメント、骨材などが締め固められたコンクリートであることから、Gc はコンクリート空気量、単位水量を除いた値と仮定した。

以下に結果および考察を示す。高流動コンクリートの余剰水膜厚は  $0.028\mu\text{m}$  と非常に小さくなり、計算上は粒子同士がほぼ接触した状態に近いことがうかがえた。また、RCD 用コンクリートは余剰水膜厚が  $0\mu\text{m}$  となり、水膜は存在せず、粒子同士が接触した状態であることがうかがえた。これは、高流動コンクリートおよび RCD 用コンクリートともに、配合で決定される  $1\text{m}^3$  に対するセメント、細骨材、粗骨材の合計の体積比に対し、それらの材料の実積率がほぼ同等であり、言い換えれば粒子同士が接触するほど、密実に配置されたコンクリートであることを意味するものである。一方、普通コンクリートは余剰水膜厚が  $0.2\mu\text{m}$  と高流動コンクリートの約 8 倍であり、余剰水によって水膜が形成されているものと推測された。

以上から、材料分離に関する抵抗性を余剰水の面から評価し、高流動コンクリート、RCD 用コンクリートおよび普通コンクリートを比較した結果、高流動コンクリートと RCD 用コンクリートの余剰水の条件は比較的近いと考えられた。これは、RCD 用コンクリートはブリーディングがほとんど出ないことから、超硬練りであることにより、普通のスランプコンクリートと比較して、少ない水がセメントや骨材で拘束されていると考えられ、そのことが高流動コンクリートと同様の粗骨材の材料分離を抑制しているものと推察された。

表－4. 4. 36 余剰水膜厚の計算結果

項目	記号	高流動	普通	RCD
余剰水膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	$\delta_w$	0.028	0.214	0.000
セメント・細骨材・粗骨材の比表面積平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	dc	26.39	40.25	132.5
セメント・細骨材・粗骨材混合物の実積率 (%)	Gc	80 <sup>※1</sup>	81 <sup>※2</sup>	88.6 <sup>※3</sup>
コンクリート中に占めるセメント・細骨材・粗骨材混合物の体積比率 (%)	Gsc	79.5	78.5	88.6
コンクリート $1\text{m}^3$ 中のセメントの表面積 ( $\text{cm}^2/\text{m}^3$ )	Sc	1.76E+09	1.12E+09	3.60E+08
コンクリート $1\text{m}^3$ 中の細骨材・粗骨材の表面積 ( $\text{cm}^2/\text{m}^3$ )	Ss	4.88E+07	4.83E+07	4.12E+07
セメントの比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) 仮定値	S'c	3300	3300	3000
細骨材の比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ) 文献値 <sup>8)</sup>	S's	158.5	158.5	158.5
粗骨材 G3 の比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) 文献値 <sup>8)</sup>	S'G3	5.7	5.7	5.7
粗骨材 G2 の比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) 仮定値	S'G2	—	—	2.9
粗骨材 G1 の比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) 仮定値	S'G1	—	—	1.4

※1：既往の成果に細骨材率 47.3%を代入して 82%と算定し、さらに、実積率 53%のセメント量が 7vol%増加、実積率 82%の骨材が 7vol%減少したことを考慮して算定 ( $82\% \times 0.93 + 53\% \times 0.07 = 80\%$ )。

※2：既往の成果に細骨材率 43%を代入して 81%と算定し、さらに、セメント量は 10vol%で既往の成果と一致したため、そのままの数値を使用。

※3：セメント、細骨材、粗骨材の実積率を測定していないものの、RCD 用コンクリートはローラ等で締め固めた配合であることから、空気量、単位水量を除いた値と仮定<sup>15) ~20)</sup>。

### (3) まとめ

十分な運搬能力を確保して、かつ材料分離を抑制できるように、法面の勾配やコンクリートの種類を考慮して、最適な羽根の形状、大きさ、間隔などを実験的に検討した。実規模試験の結果、40mm以上の粗骨材の差異を5%以下に抑制できる最適な羽根の条件を見出すことができた。また、選定した条件を実施工に適用し、十分な運搬能力を確保しつつ、材料分離を抑制できることを確認した。さらに、この効果は、SP-TOMの搬送管内をコンクリートが滑りながら移動する時に、120°の位相を変えて配置された羽根によって粗骨材が先走りしてコンクリートが分離するのを抑制するとともに、位相差で配置された羽根で順次堰き止め・落下を繰り返すたびに、コンクリートを練り混ぜて、再び均一にさせることに起因することを明らかにした。

## 4.5 第4章の結論

第4章では、高速施工に対応したダンプ搭載型インクラインの計画・導入・稼働状況と、ケーブルクレーンの運搬・打設効率の向上を目指して、新たに導入した自動運転システムの開発内容とその成果を示した。次に、更なる高速施工に対応したコンクリートの運搬方法として、新たに考案したパイプを用いてコンクリートを高所から低所へ運搬する SP-TOM (Special Pipe TranspOrtation Method) の大量搬送機構と材料分離抑制機構について示した。

第4章の内容を以下にまとめる。

- 1) ダンプトラック直載型インクラインの採用によって、ダンプトラックに積載されたコンクリートの積替えすることなく、打設エリアまでコンクリートを直接運搬することが可能であり、品質と高い運搬能力の確保を両立できる。このことから、面状工法である RCD 工法においては、その特性を活かし、クレーン運搬に加えダンプトラック直載型インクラインを併用し、堤体内ダンプトラック運搬と連続性を持たせることが有効であることをダム現場の施工において実証した。
- 2) 主な運搬設備であるクレーンによる運搬を高速化するために、各種センサやコンピュータを組み合わせることで、ケーブルクレーンを自動運転できるシステムを開発し、オペレータの技能に依存しない効率的なコンクリートの運搬を可能にした。
- 3) より高い打設速度で施工できる最新の RCD 工法において、十分なコンクリートの運搬能力を有する運搬設備として SP-TOM (Special Pipe TranspOrtation Method) を考案した。SP-TOM は、パイプを用いてコンクリートを高所から低所へ運搬する工法で、内側に羽根が取り付けられた搬送管を回転させることにより、搬送材料を分離させることなく連続的かつ大量に運搬することができる搬送設備である。
- 4) SP-TOM による搬送実験の結果から、羽根の高さ 140～200 mm、取付け間隔 1,200～2,000mm、回転数 15rpm～25rpm の範囲で、搬送速度 180m<sup>3</sup>/h を確保できることが分かった。この結果から、搬送管内に設置した羽根のメンテナンス性を考慮して、羽根高さ 140～200mm、取付け間隔 1,200 mm の羽根仕様が最良と判断した。また、回転速度が大きい方がコンクリートの通過状況がスムーズに観察されたことから、25rpm を標準回転数とした。
- 5) SP-TOM をケーブルクレーンと併用することによる効果を確認するために実施したシミュレーションの結果、大規模ダムでは大幅な工期短縮が可能となり、経済効果も大きいことが分かった。また、中規模ダムでもある程度の工期短縮および経済効果があることが分かったが、小規模ダムではむしろ非効率になることが分かった。
- 6) 十分な運搬能力を確保して、かつ材料分離を抑制できるように、法面の勾配やコンクリートの種類を考慮して、最適な羽根の形状、大きさ、間隔などを実験的に検討した。実規模試験の結果、40mm 以上の粗骨材の差異を 5 %以下に抑制できる最適な羽根の条件を見出すことができた。

た。また、選定した条件を実施工に適用し、十分な運搬能力を確保しつつ、材料分離を抑制できることを構造物から採取したコアを評価して確認した。

- 7) SP-TOM によるコンクリートの材料分離の抑制は、搬送管内をコンクリートが滑りながら移動する時に、 $120^{\circ}$  の位相を変えて配置された羽根によって粗骨材が先走りしてコンクリートが分離するのを抑制するとともに、位相差で配置された羽根で順次堰き止め・落下を繰り返すたびに、コンクリートを練り混ぜて、再び均一にさせることに起因することを明らかにした。
- 8) SP-TOM によって運搬した RCD 用コンクリートの打設後の品質を確認するため、湯西川ダムにおいて堤体からのコアを採取し、圧縮強度および単位容積質量を測定した。その結果、圧縮強度および単位容積質量ともに所定の値を満足し、ばらつきも少ないことを確認した。

## 第4章の参考文献

### 4.2 コンクリートダムの施工設備

- 1) 一般財団法人日本ダム協会：コンクリートダムの施工、pp.24、2008.
- 2) 一般財団法人ダム技術センター：ダム施工機械設備、pp.182、2005.
- 3) 一般財団法人日本ダム協会：コンクリートダムの施工、pp.43、2008.
- 4) 一般財団法人日本ダム協会：コンクリートダムの施工、pp.68、2008.

### 4.3 コンクリート運搬・打設設備の変遷

- 1) 塚本克美、高田悦久、並松成美、田代民治：宮ヶ瀬ダムの RCD 施工の概要と試験施工について、鹿島建設合理化報文、1989.
- 2) 米山義春、高田悦久、並松成美、滝口紀夫：RCD 工法における省力化機械の開発について、鹿島建設合理化報文、1992.
- 3) 岸光輝：鹿島式ケーブルクレーン自動運転システム、一般財団法人ダム技術センター、ダム技術、1999 年 8 月号
- 4) 下寺信一、斉藤博美、早崎祐治、田中秀昭：鹿島式ケーブルクレーン自動運転システム、一般社団法人クレーン協会、クレーン、2000 年 6 月号
- 5) 徳田憲治、高田悦久、鶴岡松生、太田裕士：コンクリート打設自動運転システムの開発、一般社団法人ダム工学会、ダム工学 Vol.13(3)、2003 年 6 月号
- 6) ロボットの力学と制御：編集 システム制御情報学会 pp.151～189、1990.
- 7) ダム工事積算の解説：編纂 財団法人ダム技術センターpp.100～108、2010.

### 4.4 SP-TOM による運搬とその効果

- 1) 独立行政法人水資源機構、財団法人水資源協会：SP-TOM 設計・施工マニュアル（案）、pp.1-1～1-3、2003.
- 2) 熊谷憲二、大内斉、林健二、後閑淳司：滝沢ダムのコンクリートダムの合理化施工に関する試み、鹿島建設合理化報文、2002.
- 3) 熊谷憲二、大内斉、林健二、武井昭：滝沢ダムのコンクリートダムの新しい合理加工法に対する技術的取組み、鹿島建設合理化報文、2003.
- 4) 林健二、奈須野恭伸、松本信也：嘉瀬川ダムのコンクリートダムの打設実績と合理化への取組み、鹿島建設合理化報文、2009.
- 5) 田代民治、大内斉、坂田昇、渡邊賢三：大型コンクリートダム的高速施工に対応する運搬方法、公益社団法人日本コンクリート工学会、コンクリート工学、Vol.53、No12、pp.1051～1057、2015.12
- 6) 青野隆、渡邊洋、大林信彦：五ヶ山ダムの巡航 RCD 工法におけるコンクリート運搬打設機械、鹿島建設合理化報文、2014.

- 7) 田代民治、林健二：巡航 RCD 工法の本格適用による工程短縮と技術開発、土木学会、土木施工、Vol.56、No11、2015.Nov.
- 8) 林善弘、橋本親典、辻幸和：アジテータ車のかくはん中のフレッシュコンクリートの流動に関する研究、土木学会論文集 No. 502、V-25、 pp. 123～130、1994.
- 9) 林善弘、橋本親典、辻幸和：アジテータ車のコンクリートの排出性能に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、第 5 巻、第 2 号、pp. 87～94、1994.
- 10) 安本礼持、橋本親典、丸山久一、辻幸和：可視化手法によるアジテータ内でのフレッシュコンクリートの排出過程の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.107-112、1991.
- 11) 例えば、日本コンクリート工学会：コンクリート基本技術調査委員会 不具合補修 WG 報告書、施工中に発生した不具合の対処、2012.
- 12) 例えば、土木学会：コンクリートライブラリー126、施工性能に基づくコンクリートの配合設計・施工指針（案）、2007.
- 13) 例えば、土木学会：コンクリートライブラリー136、高流動コンクリートの配合設計・施工指針[2012 年版]、2012.
- 14) 三宅淳一、松下博通、取違剛：余剰水膜によるモルタルおよびコンクリートのコンシステンシーの評価に関する研究、土木学会論文集 E、Vol.62、No.2、pp.306-319、2006.
- 15) 中原康、万木正弘：転圧コンクリート舗装の施工実績およびコンクリートの品質管理、配合修正方法に関する実験的検討、土木学会論文集、第 427 号、VI-14、pp.173-182、1991.
- 16) 中原康、横田慎一、平田重信：振動ローラ締固めコンクリート工法の開発研究（その 1）、鹿島建設技術研究所年報、Vol.25、pp.39-44、1977.
- 17) 中原康、横田慎一、平田重信：振動ローラ締固めコンクリート工法の開発研究（その 2）、鹿島建設技術研究所年報、Vol.26、pp.45-50、1978.
- 18) 中原康、重松和男、中矢喜章、平田重信、本橋賢一：振動ローラ締固めコンクリート工法の開発研究（その 3）、鹿島建設技術研究所年報、Vol.27、pp.13-18、1979.
- 19) 中原康、重松和男、平田重信、秋山完幸：振動ローラ締固めコンクリート工法の開発研究（その 4）、鹿島建設技術研究所年報、Vol.28、pp.21-26、1980.
- 20) 中原康、重松和男、平田重信：振動ローラ締固めコンクリート工法の開発研究（その 5）、鹿島建設技術研究所年報、Vol.29、pp.1-6、1981.

## 第 5 章 温度応力の抑制方法



## 第5章 温度応力の抑制方法

### 5.1 概要

大型のコンクリートダムでは、温度ひび割れの抑制が最も重要な技術的課題となる。例えば、土木学会コンクリート標準示方書〔ダムコンクリート編〕<sup>1)</sup>や多目的ダムの建設「第5巻設計Ⅱ編」<sup>2)</sup>などには、温度応力を極力発生させないように、様々な標準が示されている。その中で、堤体のコンクリートの上昇温度に大きく影響を及ぼす打設速度（打上がり速度）については、一般的に、遅くする方が温度応力の抑制に有効とされている。このような観点からは、従来の RCD 工法に比べてコンクリートの打設速度が 1.5 倍以上となる「最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）」は、不利になるものと考えられる。

一方、ダムの温度応力の発生メカニズムの特徴的な傾向の一つとして、施工期間が長期にわたるために、ダムの標高方向のコンクリート温度分布が季節の影響を受けて変動し、この堤体内部の温度の不均一による拘束応力が発生するということがある。

この特徴を踏まえると、ダム堤体のように極めてマッシブなコンクリート構造物の場合、一般的な温度応力抑制対策であるコンクリートの最高到達温度の低減に加えて、堤体全体の温度分布を平準化することが、温度応力の低減に繋がることが考えられる。

こうした考え方にに基づき、「最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）」の特長を活かしてダム堤体の温度分布の平準化を図り、従来の RCD 工法で施工するよりも温度応力を抑制することが可能な工法を考案した。

すなわち、従来の RCD 工法の堤体内部のコンクリートの温度分布では、夏期施工の標高の温度が高くなる一方で、冬期施工の標高の温度が低くなるために大きな温度差が生じてしまうのに対し、考案した工法は、夏期施工のコンクリート打設量を制限して温度上昇を抑え、そのことによる工程の遅れを、冬期に「最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）」による高速施工で打設量を増やして挽回するとともに、コンクリート温度を上昇させて堤体内部に生じる季節による温度差を小さくするものである。

本章では、最初に、コンクリートダムの堤体における温度応力のメカニズムについて概説し、その理論に基づいて、「最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）」の特長を活かした堤体内部のコンクリー

ト温度の平準化について述べる。それを踏まえて、ダム堤体の施工を想定した温度応力解析を実施し、考案した平準化施工による温度応力抑制の効果を定量的に示す。また、このような考え方に基づいて「最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）」を適用した実際のダム堤体の温度応力解析を実施し、その温度ひび割れの抑制効果を確認した例を示すとともに、その理由について考察する。さらに、本工法の特長を活かして実施工よりもさらに工期を短縮（3 ヶ月短縮）させることが、堤体の温度応力に及ぼす影響について考察した結果を示す。

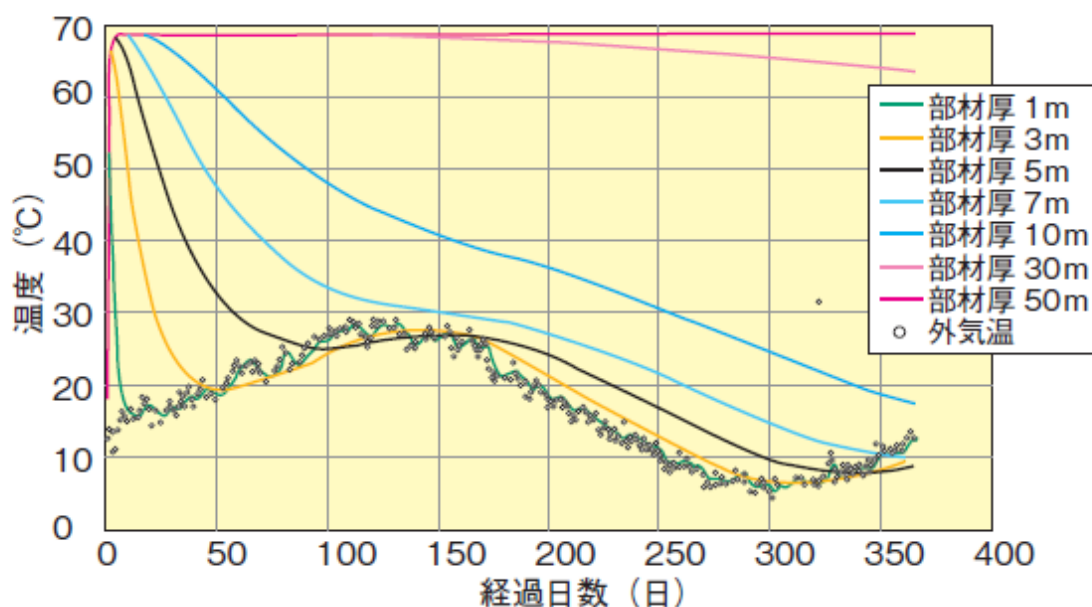
## 5.2 コンクリートダムにおける温度応力の発生機構

### 5.2.1 コンクリートダムに発生する温度応力の特徴

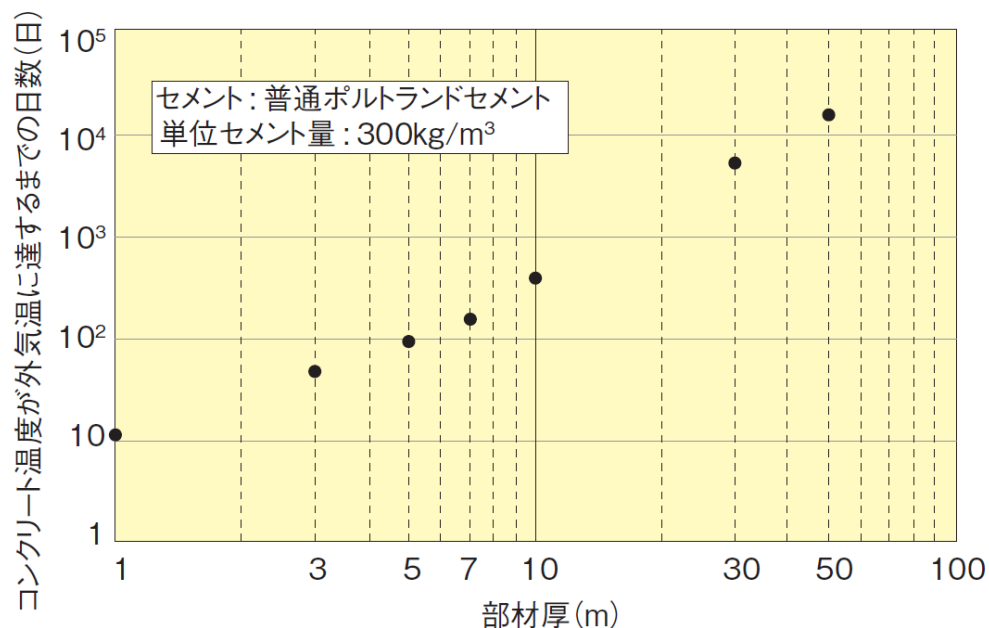
コンクリートの硬化過程では、セメントの水和反応による発熱が生じる。この発熱によってコンクリートの温度が上昇するが、その程度については、部材の形状や大きさ、セメント種類、配合（単位セメント量）、部材に接する温度の条件などによって違いが生じる。

コンクリートの部材厚が温度履歴に及ぼす影響については、例えば、図－5.2.1<sup>1)</sup>が示されている。同図の解析例によれば、同一のコンクリート配合で、部材の厚さを1 m から 50m まで変化させた場合、部材厚が大きくなるほど、外気温の影響を受けにくくなり、部材厚が 50m になると、ほとんど断熱状態になるという結果が得られている。また、コンクリート温度が、外気温に達するまでの日数を試算した例として、図－5.2.2<sup>1)</sup>が示されており、例えば、部材厚 50m では、コンクリートの打込みから約 40 年を経過しないと、外気温と同程度の温度まで低下してこないことが確認される。

これらの試算例からも分かるように、コンクリート構造物の中でも、極めてマッシブな部材であるダム堤体と壁状部材などでは、部材の大きさが異なるために、発生する温度応力の傾向や特徴が異なる。したがって、温度応力の抑制方法についても、ダム堤体に対して適切な考え方や工夫があるものと考えられる。



図－5.2.1 コンクリートの部材厚が温度履歴に及ぼす影響<sup>1)</sup>



図－5.2.2 コンクリート温度が外気温に達するまでの日数<sup>1)</sup>

一般的に、コンクリート構造物に発生する温度応力は、内部拘束応力と外部拘束応力に大別されており、これらの応力が複合して発生する。

内部拘束応力は、打ち込んだコンクリートが水和反応によって発熱し、表面が放熱する際に、断面内に温度勾配が生じることによって発生するものである。コンクリートダムにおいても、このような内部拘束応力が発生し、ひび割れが発生する場合もあるが、密実なコンクリートの場合、表面からの放熱が緩やかであるため、その深度は浅いことが多く、構造上に加え、遮水性および耐久性の観点からも問題になるようなことは少ないと考えられる。

次に、外部拘束応力については、打ち込んだコンクリートが水和反応によって発熱し、その後、部材の温度が降下する過程で、温度降下に伴う収縮が拘束される場合に発生するものである。例えば、壁状構造物の場合では、図－5.2.3 に示すように、放熱が進みやすい形状・寸法であるため、コンクリートの打込み後、おおむね数日から数週間で温度が降下し、部材に、外部拘束による引張応力が発生する。

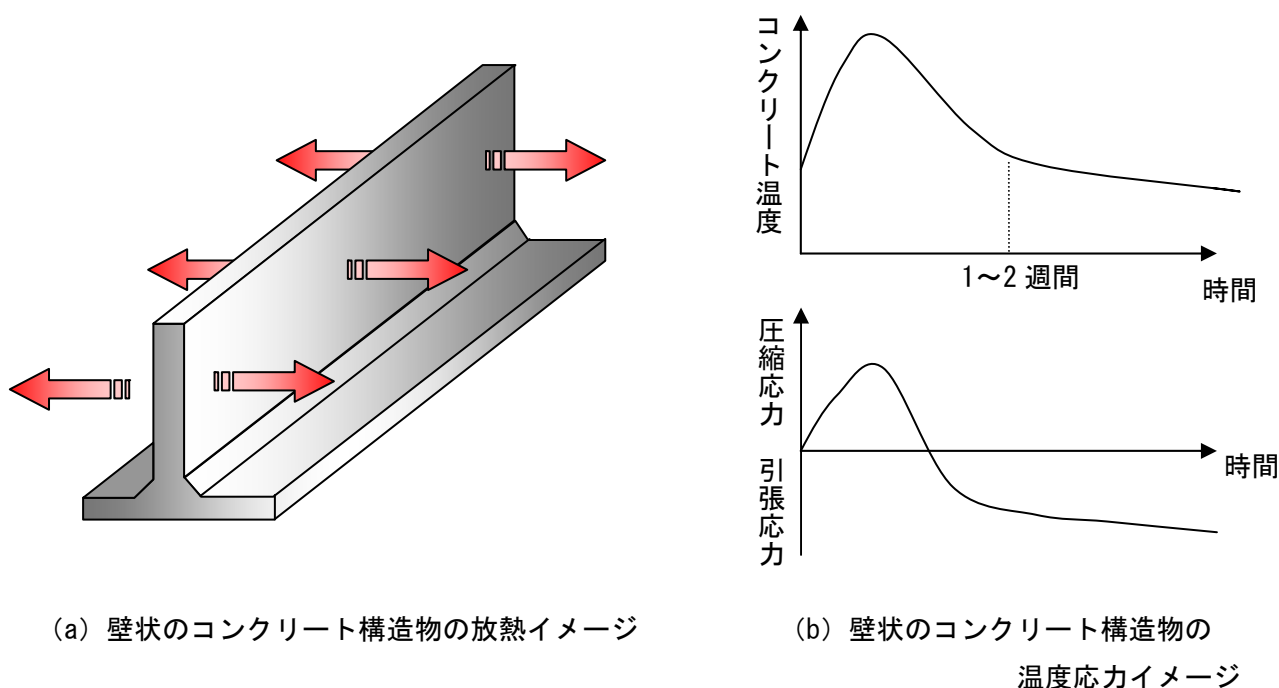


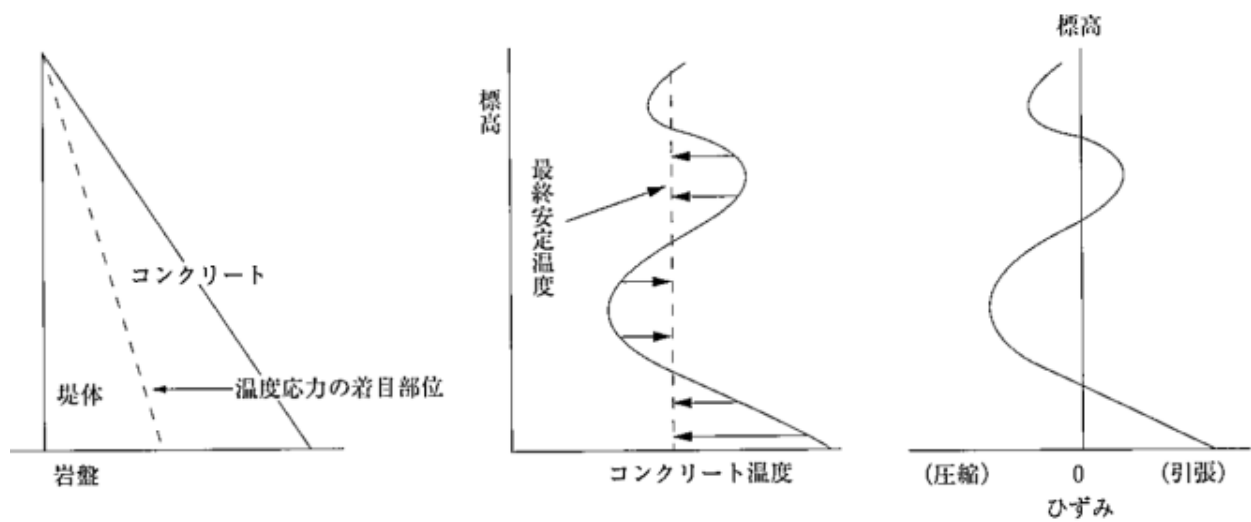
図-5.2.3 壁状のコンクリート構造物に発生する温度応力

一方、このような壁状のコンクリート構造物と、ダム堤体では、形状・寸法および施工の工程が大きく異なるため、発生する応力の傾向も異なる。ダム堤体のコンクリートは、打込み直後から、セメントの水和反応によって温度が上昇し、数日から数ヶ月をかけて最高温度に達した後、徐々に降下し、外気温や基礎岩盤温度、貯水温度などと平衡する最終安定温度に至る。ここまでの期間については、前述の試算例にもあるように、「数十年」を要し、前述の「数日から数週間」とはオーダーが異なる。この過程では、コンクリートの硬化が進み、温度の低下によって収縮が生じることとなり、この収縮が基礎岩盤などに拘束され、外部拘束応力が生じる。しかし、数十年というオーダーで温度が低下するため、壁状のコンクリート構造物等とは異なり、クリープによる応力緩和が大きいものと考えられる。

これらの応力に加え、図-5.2.4<sup>2)</sup>に示すように、ダム堤体のコンクリートは、数年オーダーの長期間にわたって施工されることから、標高方向のコンクリートの打込み温度および外気温が季節によって変動し、堤体内に温度分布が発生し、この各部の温度の不均一によって各部が相互に拘束体となる応力が発生する。この応力は、先述の内外温度差によって生じる内部拘束応力とは異なるものであり、ダムコンクリートに発生する特有の応力である。ダムコンクリートは、外部拘束応力に加えて、この応力が温度ひび割れの発生リスクに大きく影響する。

このように、ダム堤体に発生する温度応力が、一般的なコンクリート構造物と大きく異なる点としては、①極めてマスコンクリートであるため、内部がほぼ断熱状態となり、温度の降下に数十年を要すること、②長期間にわたる施工によって、堤体内部に季節による温度分布による応力が発生

することが挙げられる。



図－5.2.4 堤体に発生する季節による温度分布<sup>2)</sup>

## 5.2.2 コンクリートダムの温度応力を抑制するための施工計画

一般的な壁状のコンクリート構造物の場合には、打ち込まれたコンクリートが最高温度に達した後、それほどの期間を経過せずに降下して温度応力が発生することから、この対策として、コンクリートの打込み温度を下げて最高到達温度を下げ、結果として温度降下量を小さくすることが有効となる。しかし、コンクリートダムの場合には、コンクリート温度が最高温度に到達した後、短期間では降下せず、しかも、堤体内部において、季節による温度分布で応力が発生するため、一般的なコンクリート構造物とは有効な温度応力の抑制対策が異なってくる。すなわち、前述のとおり、ダム堤体の温度応力を抑制するためには、打込み温度を下げて最高到達温度を低下させるだけでは効果が小さく、堤体全体のコンクリート温度の平準化を行うことが重要である。コンクリートダム堤体の温度応力発生機構を踏まえた堤体全体の最高到達温度を平準化する対策として、下記の2点が考えられる。

- 1) 冬期に打ち込むコンクリートを加温し、夏期に打ち込むコンクリートを冷却する。
- 2) 数ヵ月から数年の期間で行われるコンクリート施工において、コンクリート温度が高くなる夏期の打込み量を制限する一方で、高速施工によって冬期の打込み量を多くする。

1) については、いくつかのコンクリートダム建設で実施した実績があるが、冬期の加温、夏期の冷却に多大なコストを要するという短所がある。また、コンクリートの加温、冷却には限界があり、実際にはコンクリート堤体全体の温度の平準化を十分に行えないのが実情である。

2) については、夏期の打込み量を制限することによって、全体の工期が長くなること、また、冬期の打込み量を多くするだけの打設能力（運搬能力）がなかったこと等から、今までに、このような施工計画で施工されたことは一度もなかった。

しかし、本論文で提案した最新の RCD 工法と SP-TOM による運搬方法を適用することで、自由な急速施工が可能となり、夏期の打込み量を制限しても、冬期に今まで不可能だった急速施工を行うことで、工期を遅延させることなく 2) の施工計画を実現することができる。

## 5.3 高速施工方法を利用した温度抑制方法

### 5.3.1 従来のコンクリートダムの温度抑制

前項ではコンクリートダムの発生メカニズムについて記した。本項では、コンクリートダムの温度応力抑制対策について述べる。

コンクリートダムに生じる温度ひび割れは、ダムの構造的一体性、遮水性、耐久性などを損なう温度ひび割れを対象としているが、コンクリートダムの施工においては、このような構造的な温度ひび割れを防止するために従来から様々な温度抑制の手法が講じられている。例えば、以下のような手法が考えられる。

- ① コンクリート中の単位セメント量の低減、低発熱型のセメントの使用<sup>1),2)</sup>
- ② コンクリートの打込みリフト厚、打上がり速度の制限<sup>3)</sup>
- ③ パイプクーリング、プレクーリングの実施<sup>4)</sup>
- ④ 収縮継目の設置<sup>5)</sup>

①～③はコンクリート温度の上昇を抑制することを目的としており、④は人工的に温度ひび割れの発生箇所を誘導することを目的としたものである。

柱状工法における温度抑制の考え方として、コンクリート温度の上昇を抑制することを目的として①～③を実施し、さらに④については、コンクリートの弾性体として十分な強度（剛性）を有した後に、パイプクーリング（二次クーリング）<sup>4)</sup>によって継目間隔を最大限に広げ、ジョイントグラウチングによって構造的一体性を確保する施工方法が一般的に採られている<sup>6)</sup>。

一方、1970年代後半にRCD工法に関する研究が進められ、機械化施工（省人力化施工）に伴い、ダンプトラック、振動ローラなどがコンクリート上を走行するため、パイプクーリングのためのクーリングパイプをコンクリート中に設置するのが極めて困難となり、また、施工の合理化を行う上でも、できる限りパイプクーリングを実施しないことが望ましいと考えられた。そこで、RCD工法では、縦継目の省略については、ローラ転圧可能なコンクリート（RCD用コンクリート）を採用することで単位セメント量を低減させること<sup>7)</sup>、横継目についてはコンクリートを撒き出した後に振動目地切り機で切断すること<sup>5)</sup>で対処した。また、堤高100mを超える大型ダムでは前述の対策と併せて、冷水と冷却した骨材を用いたプレクーリングによって温度ひび割れの発生を抑制した。

コンクリートダムにおける温度ひび割れの発生の有無はコンクリートのレヤー長 $L$ のみで定まるものではなく、打上がり高さ $H$ が大きく影響するといういわゆる $H/L$ 理論<sup>8)</sup>が提案された。この理論では、コンクリートの打設速度を一定かつ迅速にすることで、コンクリート内部の温度降下量をできる限り抑制し、拘束度を小さくするという発想の転換による温度抑制の考え方で、結果としてRCD工法のような長大レヤーの打設が可能であると結論付けている。以下に $H/L$ 理論の詳細について述べる。

RCD工法の温度抑制については、 $H/L$ 理論によって説明が可能となる。この理論では、岩盤の拘

束度の大きさはコンクリートのブロック長さ  $L$  のみによって定まるものではなく、その高さの  $H$  との比、つまり  $H/L$  によって定まることが示されている<sup>8)</sup>。図-5.3.1 にコンクリートと基礎岩盤の弾性係数比と外部拘束度の関係を示す。図より、 $H/L$  の値が大きいほど、つまり、高さ（堤高） $H$  が高くなるほど岩盤の拘束度が小さくなることが分かる。面状工法である RCD 用コンクリートでは、規則的かつ迅速に施工され、パイプクーリングによる冷却を実施しないことから、ダムが十分に立ち上がるまでのコンクリート内部の温度低下は生じないものとして考えられる。よって、 $H/L$  理論から RCD ダムの長大レヤーの場合、温度ひび割れを生じることなく打設できるという考え方が一般的になっている。

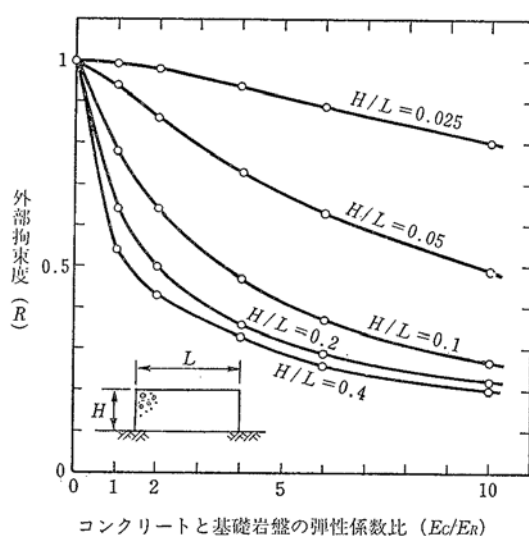


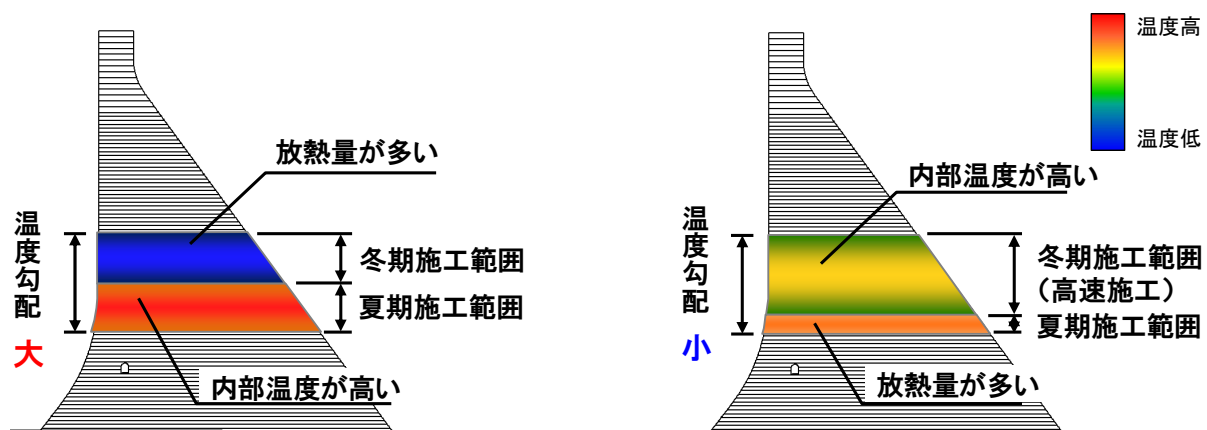
図-5.3.1 着岩面における外部拘束度の大きさ<sup>1)</sup>

大藪、永山らの研究結果<sup>1)</sup>から、拘束度マトリックス法による解析結果より打設開始時期を適正に計画すれば、大規模な RCD ダムにおいても拘束温度ひずみの大きさを RCD 用コンクリートの引張ひずみ能力  $100\mu$  以下に抑制することができ、縦継目を省略することができる。これは、RCD ダムの施工が規則的かつ迅速に行われるため、 $H$ （堤高）を高くすることができることによるものである。

### 5.3.2 高速施工における温度抑制方法

最新のRCD工法を適用した場合、従来のRCD工法と比較して打込み速度が大きくなることから、堤体の内部温度の上昇に伴い、さらに温度ひび割れの発生するリスクが大きくなることが懸念される。一般のコンクリート構造物の温度応力の抑制方法としては、コンクリート内部の最高到達温度を低減することが最も効果的である。ダムのような非常にマッシブな構造物の場合、この最高到達温度の低減に加えて堤体全体の温度分布を平準化させることが温度応力の低減につながる。そこで、最新のRCD工法が急速施工可能である特性を活かして、冬期施工時のコンクリート打設量をできる限り多くし、温度が高くなる夏期施工時のコンクリート打設量を極力少なくすることで、冬期の温度上昇量が従来のRCD工法よりも高くすることができ、一方で、夏期の温度上昇量を抑制でき、コンクリート堤体全体の温度の平準化が図れるものと考えた。

温度応力の抑制に関して、図-5.3.2に従来のRCD工法と高速施工の採用によって温度応力を抑制した堤体全体の温度分布を比較した概念図を示す。従来のRCD工法では夏期施工箇所の温度が高くなる一方、高速施工を採用したものについては、前述のとおり、冬期については高速施工を採用することで、打設量が多くなることで内部の温度上昇量が従来工法よりも高くなる。一方で、夏期施工時は打設量を制限するため内部温度の上昇が抑制される。それによって、堤体全体の温度分布を考慮したときに堤体内の標高方向の温度分布が図に示すように平準化され、コンクリート相互の拘束による温度応力が低減し、温度ひび割れを抑制することが可能となる。5.4節で実際の堤体を対象とした解析的検証について述べる。



(i) 従来のRCD工法

(ii) 最新のRCD工法を用いた温度ひび割れ抑制方法

図-5.3.2 従来のRCD工法と温度ひび割れを抑制した堤体全体の温度分布を比較概念図

## 5.4 実規模ダムでの温度応力の抑制方法の効果の検証

高速施工を活用した温度応力抑制方法について、実規模ダムを対象とした温度応力解析および拘束度マトリックス法により検証した。

本項で検証するサイクルの概要を表－5.4.1に示す。表中の「ケース2：温度応力抑制を考慮したサイクル」が検証の対象とするケースであり、「ケース1：標準サイクル」に対し、高速施工によって冬期の施工速度を早め、かつ夏期の施工速度を抑えるとともに、夏期のリフト高さをハーフリフトとする工程になっている。

表－5.4.1 検証するサイクルの概要

項目		ケース 1 (標準サイクル)	ケース 2 (温度応力抑制を考慮したサイクル)
打上り速度 (施工サイクル)	夏期	0.13m/日 (7.83 日/サイクル)	0.09m/日 (6.11 日/サイクル)
	冬期	0.13m/日 (7.83 日/サイクル)	0.15m/日 (6.75 日/サイクル)
リフト厚	夏期	1.0m	0.50m (夏期ハーフリフト)
	冬期	1.0m	1.0m
RCD の施工期間		21 ヲ月	21 ヲ月

### 5.4.1 検証対象とする実規模ダムの概要

#### (1) 工事概要およびダム諸元

コンクリート堤体の温度の平準化による温度応力の抑制効果の検証では、福岡県発注の五ヶ山ダム堤体建設工事をモデルとする。表－5.4.2 に工事概要、表－5.4.3 にダムの目的および諸元を示す。

表－5.4.2 工事概要

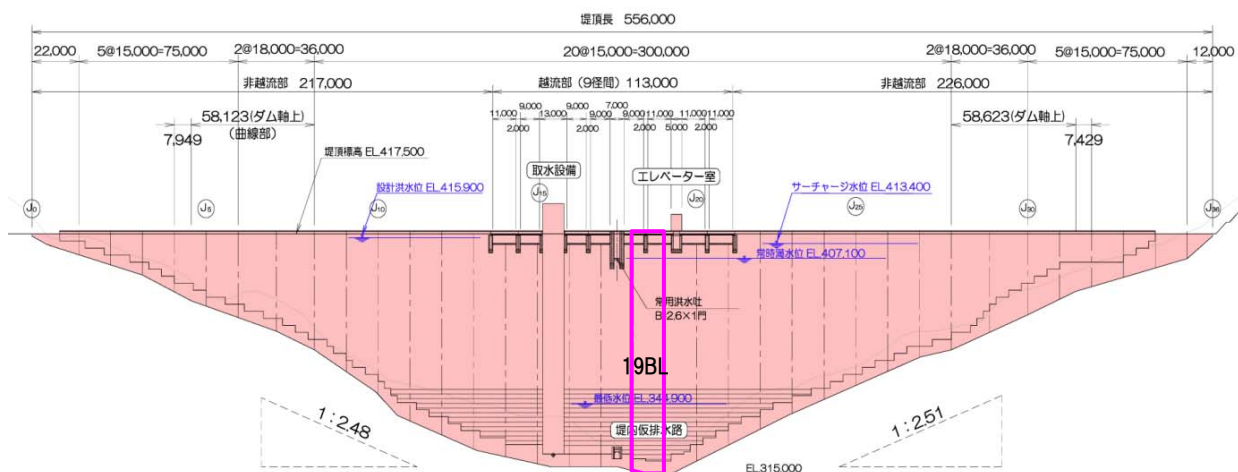
工 事 名	五ヶ山ダム堤体建設工事
河川または路線名	二級河川那珂川水系那珂川
工 事 場 所	福岡県筑紫郡那珂川町大字五ヶ山地先
工 期	平成 24 年 6 月 27 日～平成 30 年 3 月 15 日

表－5.4.3 ダムの目的および諸元

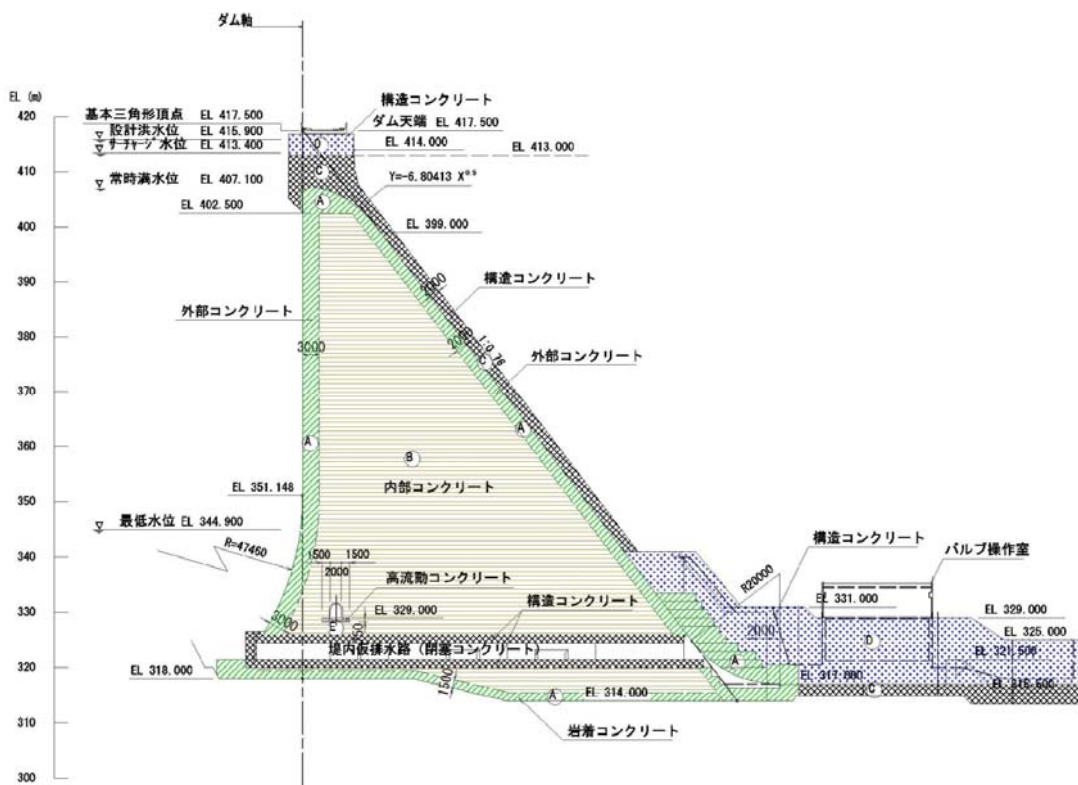
ダムの目的	洪水調節	計画高水量 440m <sup>3</sup> /s のうち 370m <sup>3</sup> /s の洪水調節
	流水の正常な機能の維持	魚類などの生息環境の保全や河川水質の保持など
	水道	最大 10,000m <sup>3</sup> /日
	渇水対策	異常渇水時における総量 1,660 万 m <sup>3</sup> の緊急水の補給
ダム諸元	ダム形式	重力式コンクリートダム
	サーチャージ水位	EL.413.4m
	総貯水量	40,200,000m <sup>3</sup>
	有効貯水量	39,700,000m <sup>3</sup>
	湛水面積	1.3km <sup>2</sup>
	堤体積	93,096m <sup>3</sup>
	堤高	102.5m
	堤頂長	556.0m
	天端標高	EL.417.5m

## (2) 対象断面

対象断面は最大断面となる 19BL を対象とした。五ヶ山ダムの上流面図および断面図を図-5.4.1 および図-5.4.2 に示す。



图—5.4.1 上流面图



図一5.4.2 標準断面図

## 5.4.2 温度応力の抑制効果の検証

### (1) 温度応力解析方法

温度応力の抑制効果の検証として、有限要素法による温度応力解析を実施した。温度応力解析には、マスコンクリートの非線形温度応力解析プログラムソフト「ASTEAMACS Ver.7 ((株) 計算力学研究センター)」を用いた。解析の条件を以下に示す。

#### ①解析対象断面の概要とモデル化

図-5.4.3 に、解析モデルを示す。解析モデルは、標準断面の二次元モデルとした。図中の堤体中心に示した線は、本検討における解析の着目位置である。

本検討で対象とするのは、図中に内部コン (RCD) と表記されている RCD 工法の適用区間である。この内部コンクリートについては、中庸熱フライアッシュセメント (フライアッシュ含有率 20% の MF20) が使用されており、単位セメント量は  $130 \text{ kg/m}^3$  である。使用材料および配合は、章末の付表-1 および付表-2 に示すとおりである。

同図に示すダム堤体の施工手順については、まず岩着部の高さ 1.5m (図中の中心線で標高 315.0m ~ 316.5m) を富配合の岩着コンクリート (単位セメント量 ;  $C+F=220\text{kg/m}^3$ ) で打設することとしている。次いで、標高 316.5m ~ 標高 396.5m までの高さ 80m については、内部コンクリートを RCD コンクリートで、外部コンクリート (単位セメント量 ;  $C+F=220\text{kg/m}^3$ ) を有スランプコンクリートで打設することとしている。さらに、標高 396.5m ~ 標高 405.5m までの高さ 9 m については、有スランプの内部コンクリート (拡張レヤー, 単位セメント量 ;  $C+F=160\text{kg/m}^3$ ) で打設するものとしている。以降、天端標高 417.5m まで外部コンクリートで打設を行うものとしている。

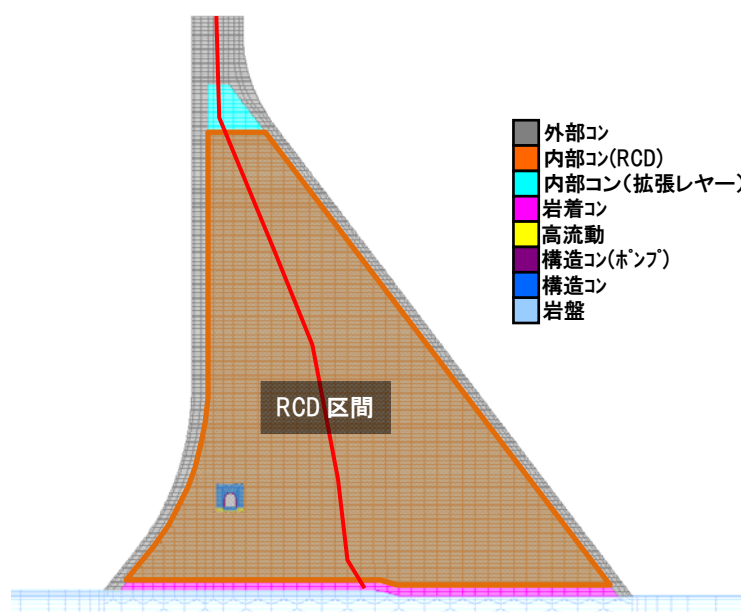
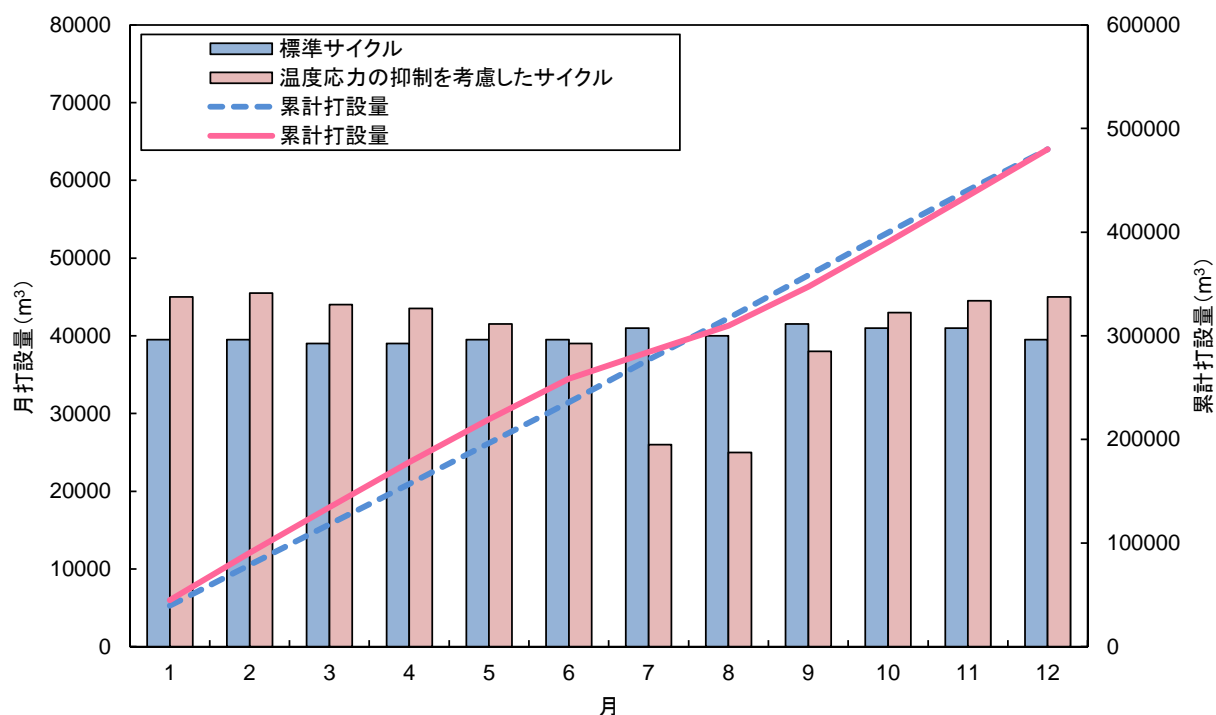


図-5.4.3 解析モデル (19BL)

## ②リフトスケジュール

図－5.4.4 に、温度応力の抑制を考慮したリフトスケジュールによる月別打設量の一例を示す。図の例では、冬期においては打設量 4 万  $\text{m}^3$  以上を確保し、夏期の打設量を 3 万  $\text{m}^3$  以下となっている。



図－5.4.4 温度応力の抑制を考慮したリフトスケジュールの一例

本検討の「ケース 1：標準サイクル」と、「ケース 2：温度応力抑制を考慮したサイクル」では、打設開始および打設完了をそれぞれ 2014 年 10 月および 2016 年 11 月に揃えている(全体 26 ヶ月・RCD 施工 21 ヶ月)。各ケースのリフトスケジュールについては、章末の付表－3 および付表－4 に示すとおりである。

ケース 2 については、7/1～8/31 までの夏期期間の打設量をできる限り少なく打設する条件としている。また、11/15～3/15 までの冬期期間は、最新の RCD 工法によってさらなる大量打設が可能であるが、RCD の施工期間をケース 1 の 21 ヶ月と同じとしたことから、結果として、打上がり速度をケース 1 の 0.13m/日に対し、ケース 2 では 0.15m/日と若干速くなる程度とした。

## ③その他の解析条件

温度応力解析に用いる外気温については、ダムサイト近傍で観測された 1999 年から 2008 年 (10 年間) の外気温の計測値を基にした回帰式とした。詳細については、付図－1 に示すとおりである。

また、その他の解析条件は、付表－5 および付図－2～付図－5 に示すとおりである <sup>1),2),3)</sup>。

## (2) 拘束度マトリックス法の概要

温度応力の抑制効果の検証として、拘束度マトリックス法により、堤体全体に生じる拘束温度ひずみを算出した。拘束度マトリックスを用いた計算においては、二次元有限要素法による温度解析から得られる最高温度上昇量  $\varphi_{\max}$  と最終安定温度  $\varphi_t$  の差である温度降下量  $\Delta\varphi_d$  を最終温度降下量として入力条件に用いた。最終温度降下量は、堤体中心位置近傍における値を採用した。最終温度降下量を抽出した解析モデルにおける着目位置を図-5.4.5に示す。また、拘束度マトリックスは、堤体を高さ方向に22層に分割したモデルとし、コンクリートの弾性係数  $E_c$  と岩盤の弾性係数  $E_R$  の比を  $E_c/E_R=6$  として定めた。拘束度マトリックスについては、付表-6に示す。

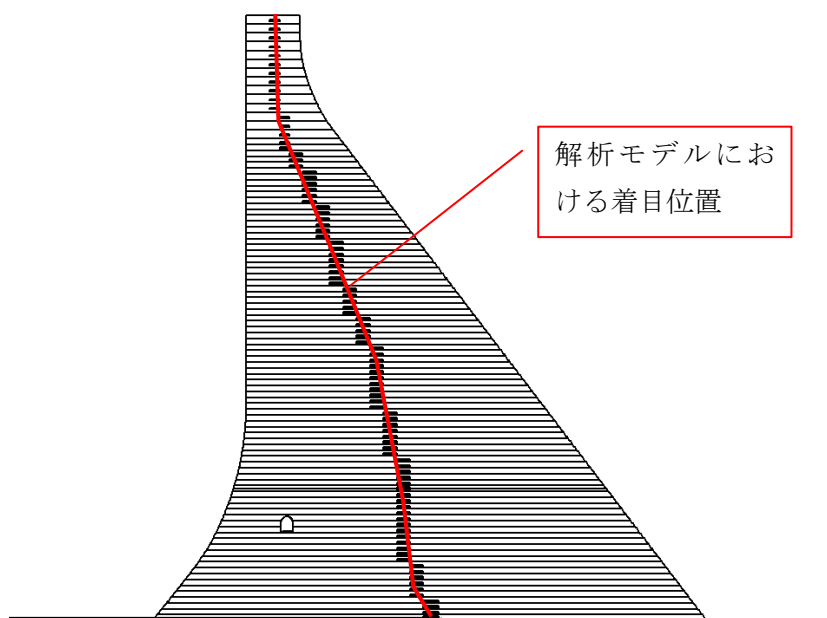


図-5.4.5 温度降下量を抽出した着目位置

### 5.4.3 温度応力の抑制効果の確認

#### (1) 温度応力解析の結果

##### ①最高温度の解析結果

最高温度の等分布図を、図-5.4.6に示す。また、解析の着目位置における最高温度と標高の関係を、図-5.4.7に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、表-5.4.3に示す。同表では、夏期打設のハーフリフトとした範囲の平均値を、最大値として示してある。

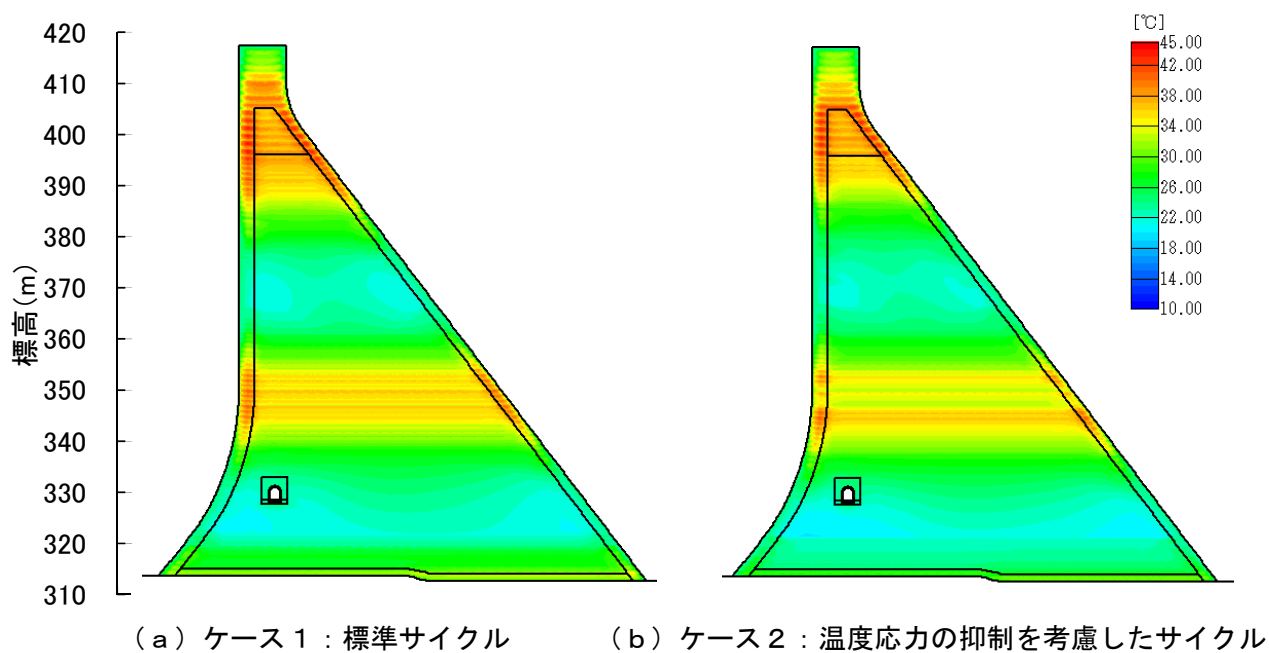


図-5.4.6 最高温度の等分布図

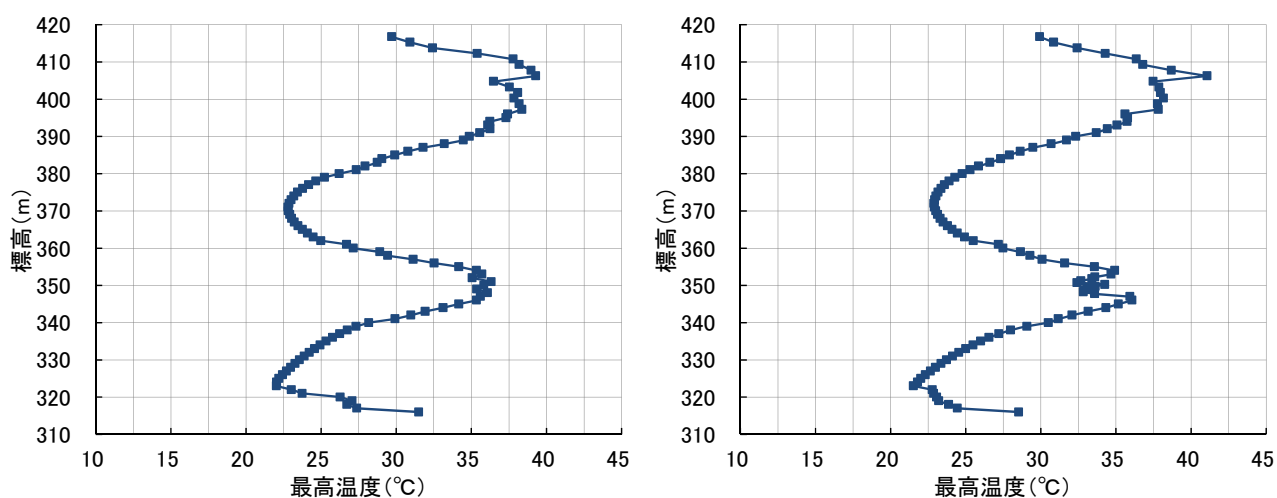


図-5.4.7 着目位置における最高温度と標高の関係

表ー5.4.3 最高温度に関する主要なデジタル値

ケース1		
	最高温度の平均値 (°C)	標高 (m)
最大値	35.5	345.5～355.5
最小値	22.8	321.5～331.5
温度差	12.7	

ケース2		
	最高温度の平均値 (°C)	標高 (m)
最大値	33.8	345.5～355.5
最小値	22.6	321.5～331.5
温度差	11.2	

これらの図より、「ケース1：標準サイクル」と、「ケース2：温度応力抑制を考慮したサイクル」の最高温度の等分布図を比較すると、いずれのケースについても、打設時期が夏期となる標高 350m 付近および標高 390m 付近において、黄から赤色で表される最高温度が高い範囲が認められる。そのうち、標高 350m 付近については、ケース1が黄から赤色であるのに対して、ケース2では最高温度が低い黄緑色の範囲があることが確認される。これは、ケース2で、夏期における打上がり速度をケース1の 0.13m/日から 0.09m/日に抑えて堤体内の最高温度の平準化を図ったことによるものであり、特に、ハーフリフトで放熱が促された範囲が黄緑色になっているものと考えられる。その他の範囲については、明確な色の違いが認められない。

解析着目位置で比較すると、最高温度が高くなっている標高 350m 付近におけるケース1およびケース2の値は、それぞれ 35.5°Cおよび 33.8°Cであり、温度応力抑制を考慮したケース2の方が、1.7°C低くなった。一方、解析着目位置の最高温度が低かったのは、いずれのケースにおいても冬期打設に該当する標高 320～330m 付近であり、ケース1とケース2で、それぞれ 22.8°Cおよび 22.6°Cと、ほとんど差が認められなかった。これは、ケース1およびケース2の RCD 施工期間を同様としたことから、ケース2の打上り速度が、ケース1の 0.13m/日に対して 0.15m/日と若干高くなる程度に設定されたためであり、この違いによる最高温度の違いはほとんど現れなかった。

以上の結果より、最高温度の最大値と最小値の差は、ケース1とケース2で、それぞれ 12.7°Cおよび 11.2°Cであり、ケース2の方が 1.5°C小さく、平準化が図られていることが確認される。

## ②最大主ひずみの解析結果

最大主ひずみの等分布図を、図-5.4.8に示す。また、解析の着目位置における最大主ひずみと標高の関係を、図-5.4.9に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、表-5.4.4に示す。

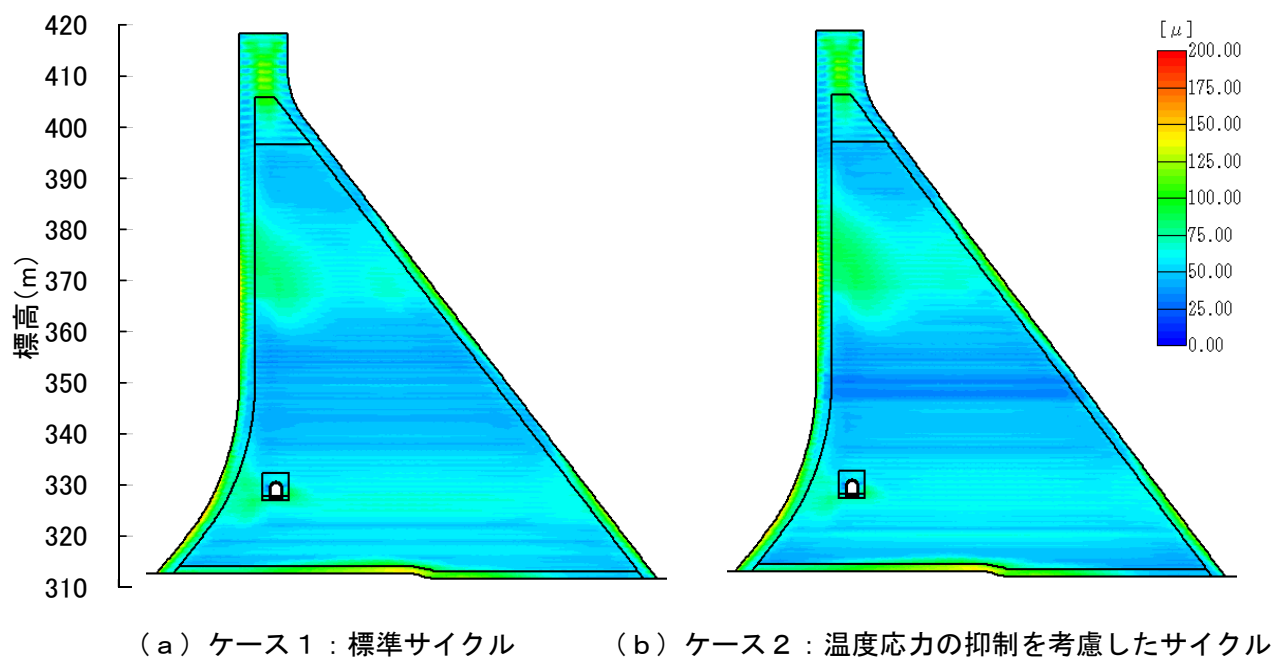


図-5.4.8 最大主ひずみの等分布図

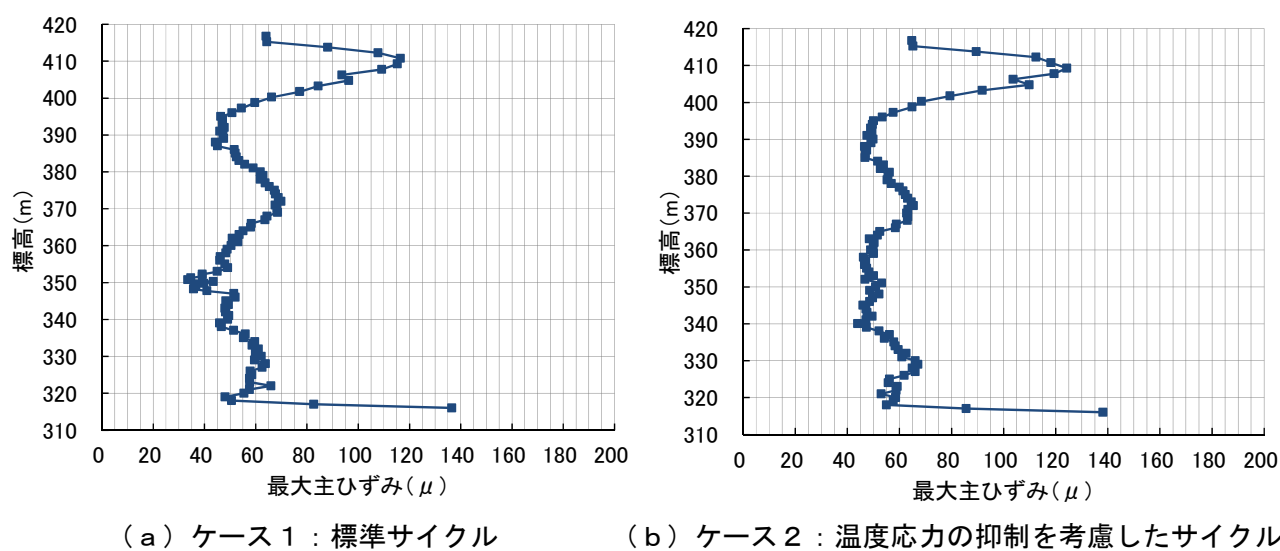


図-5.4.9 着目位置における最大主ひずみと標高の関係

表－5.4.4 最大主ひずみに関する主要なデジタル値

最大値【岩着部】		
	主ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース1	138	315.5～316.5
ケース2	137	315.5～316.5
【標高330m付近】		
	主ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース1	67	328.5～329.5
ケース2	64	327.5～328.5

これらの図より、「ケース1：標準サイクル」と「ケース2：温度応力抑制を考慮したサイクル」の最大主ひずみの等分布図を比較すると、岩着付近では、それぞれ138 $\mu$ と137 $\mu$ で、同程度の値であった。同様に、冬期打設に該当する標高330m付近における着目位置の値についても、ケース1とケース2で、それぞれ67 $\mu$ および64 $\mu$ と、同程度の値となった。ケース2では、冬期の打上がり速度を高めて最高温度の平準化を図っているが、前述のとおり、ケース2の冬期における打上がり速度は、ケース1の0.13m/日に対して0.15m/日と、それほど高くないことから、ほとんど差が生じなかったものと考えられる。

これより高い標高については、相対的に最大主ひずみが大きくなる範囲も認められるが、岩盤からの拘束の影響が小さいために温度ひび割れへの影響が小さいことと、より高い標高では、ひび割れが発生しても堤体の安定性および漏水に繋がらないことから、ダム機能への影響は小さいものと考えられる。

### ③最大主応力の解析結果

最大主応力の等分布図を、図-5.4.10に示す。また、解析の着目位置における最大主応力と標高の関係を、図-5.4.11に示す。また、これらの図-5.4.11のうち、主要なデジタル値を抽出し、表-5.4.5に示す。

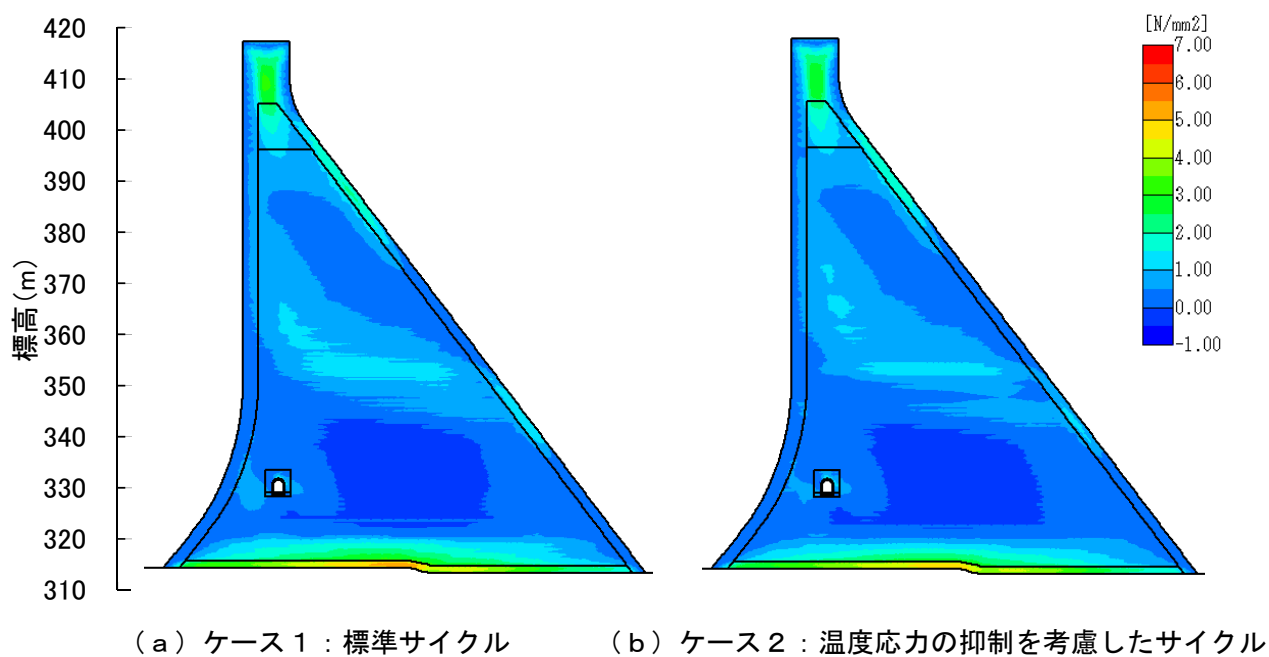


図-5.4.10 最大主応力の等分布図

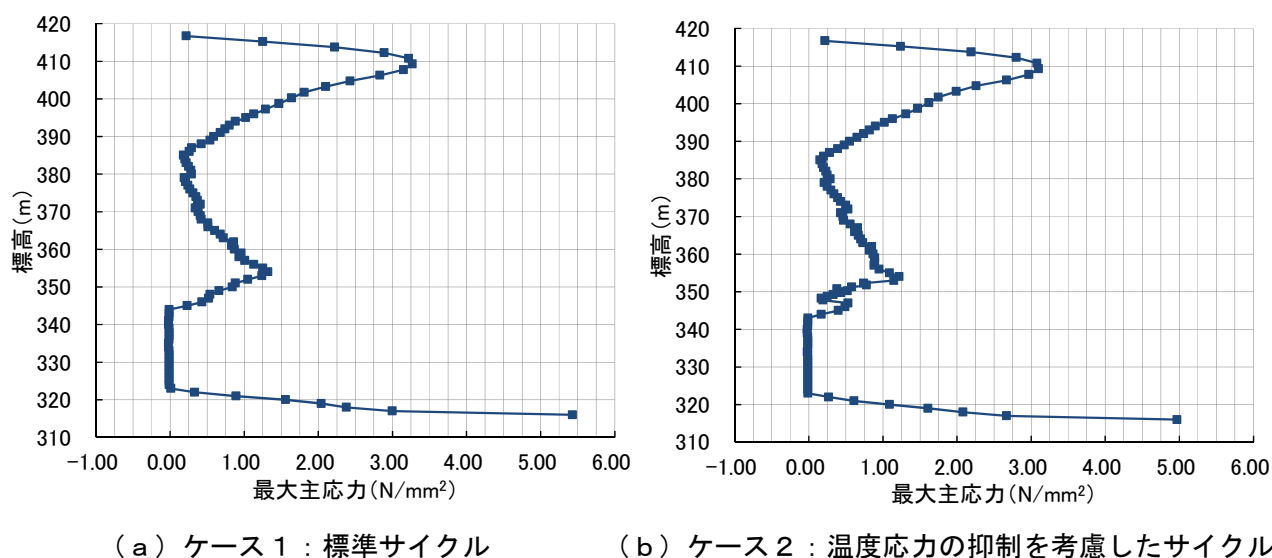


図-5.4.11 着目位置における最大応力と標高の関係

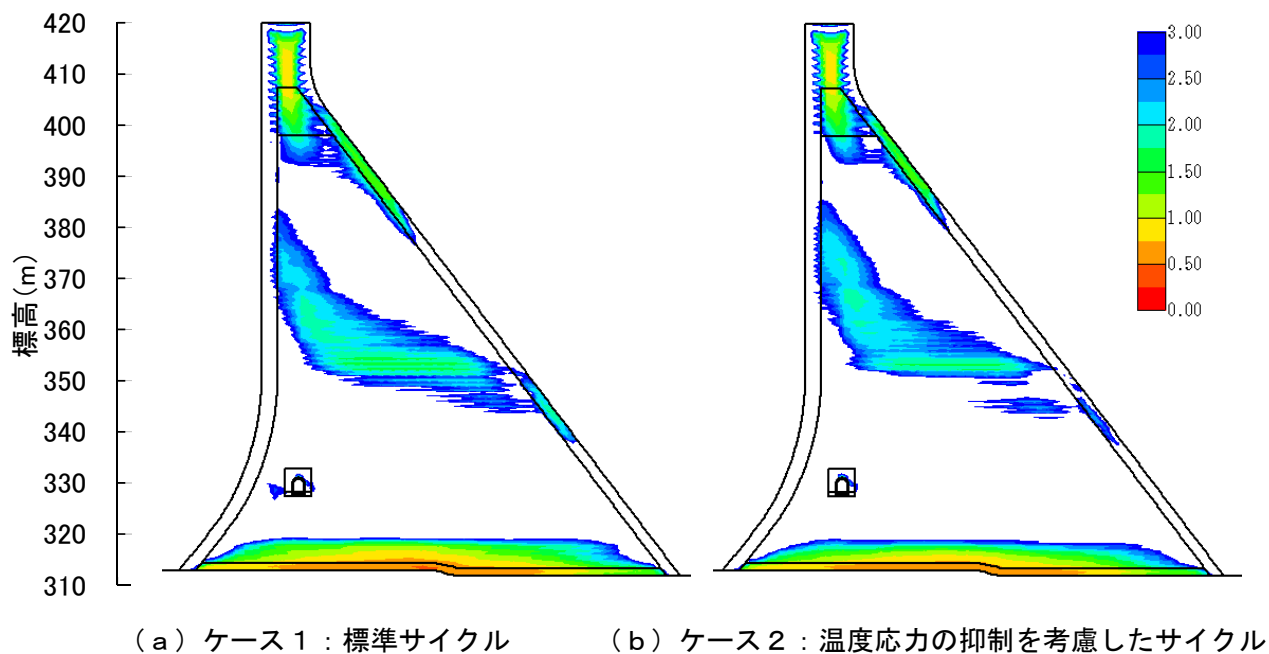
表－5.4.5 最大主応力の主要なデジタル値

最大値【岩着部】		
	主応力 (N/mm <sup>2</sup> )	標高 (m)
ケース1	5.43	315.5～316.5
ケース2	4.97	315.5～316.5
【標高350m付近】		
	主応力 (N/mm <sup>2</sup> )	標高 (m)
ケース1	1.32	353.5～354.5
ケース2	1.22	353.5～354.5

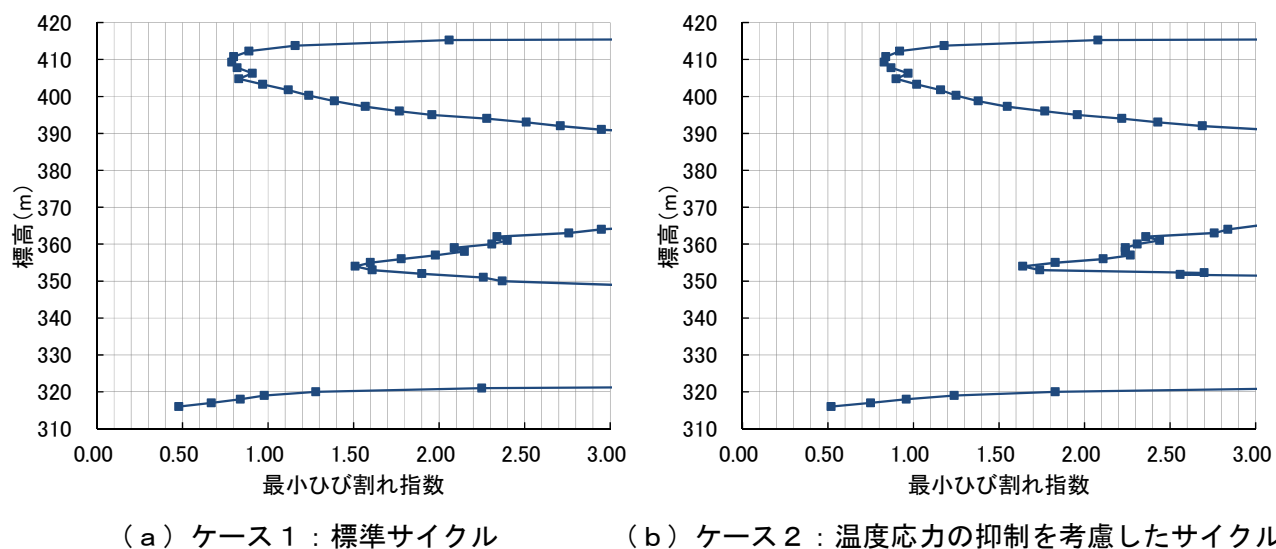
これらの図より、着目位置における最大主応力は、2つのケースともに、岩着付近と標高 350m 付近において大きくなっている。まず、岩着付近の「ケース 1：標準サイクル」と「ケース 2：温度応力抑制を考慮したサイクル」の最大主応力は、それぞれ 5.43N/mm<sup>2</sup>および 4.97N/mm<sup>2</sup>であり、ケース 2 の方が低い結果であった。また、標高 350 m 付近における値は、ケース 1 およびケース 2 で、それぞれ 1.32N/mm<sup>2</sup>および 1.22N/mm<sup>2</sup>であり、ケース 2 の方が、0.10N/mm<sup>2</sup>低い応力となっている。これは、ケース 2 において、夏期の打上り速度を、ケース 1 の 0.13m/日から 0.09m/日に抑えて最高温度の平準化を図ったことによるものと考えられる。

#### ④最小ひび割れ指数の解析結果

最小ひび割れ指数の等分布図を、図－5.4.12 に示す。また、解析の着目位置における最小ひび割れ指数と標高の関係を、図－5.4.13 に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、表－5.4.6 に示す。



図－5.4.12 最小ひび割れ指数の等分布図



図－5.4.13 着目位置における最小ひび割れ指数と標高の関係

表ー5.4.6 最小ひび割れ指数の主要なデジタル値

最小値【岩着部】		
	指数	標高 (m)
ケース1	0.48	315.5～316.5
ケース2	0.52	315.5～316.5
【標高350m付近】		
	指数	標高 (m)
ケース1	1.51	353.5～354.5
ケース2	1.64	353.5～354.5

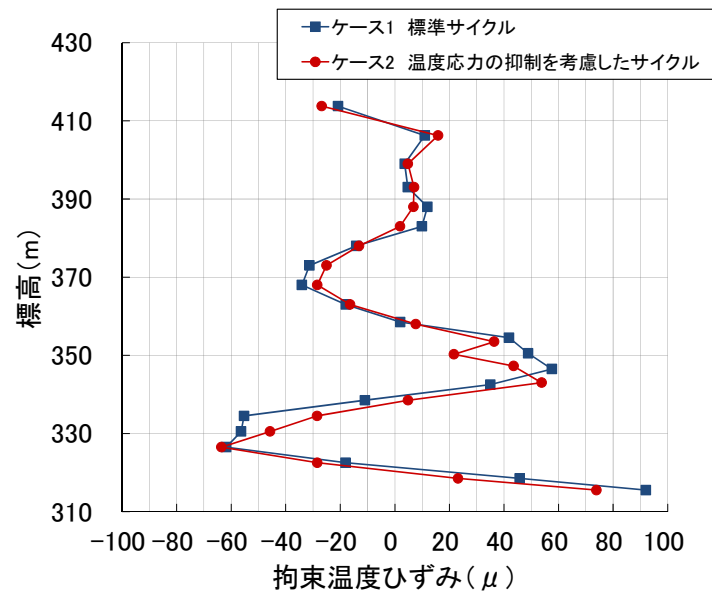
これらの図より、着目位置における最小ひび割れ指数には、最大主応力と同様の傾向が認められる。すなわち、2つのケースともに、岩着付近と標高 350m 付近に、最小ひび割れ指数が小さな範囲が認められる。まず、岩着付近の「ケース1：標準サイクル」と「ケース2：温度応力抑制を考慮したサイクル」の最小ひび割れ指数は、それぞれ 0.48 および 0.52 であり、ケース2の方がわずかに大きな値であった。また、標高 350 m 付近における値は、ケース1およびケース2で、それぞれ 1.51 および 1.64 であり、ケース2の方が、0.13 大きな値となった。これは、ケース2において、夏期の打上り速度を、ケース1の 0.13m/日から 0.09m/日に抑えて最高温度の平準化を図ったことによるものと考えられる。

以上のことより、夏期打設の打上り速度を抑え、冬期打設の打上り速度を最新の RCD 工法によって向上することは、温度応力を抑制する上で有効な工法であることが確認された。

## （２）拘束度マトリックス法の結果

各リフトにおける最高温度を基に、拘束度マトリックス法によって求めた拘束温度ひずみと標高の関係を図－5.4.14に示す。また、同図における主要なデジタル値を抽出し、表－5.4.7に示す。

同図より、本解析の範囲では、いずれのケースにおいても、許容拘束温度ひずみとされる  $100\mu$  よりも小さな値となった。標高  $310\text{m}\sim 320\text{m}$  の岩盤の拘束を受ける範囲の拘束温度ひずみは、「ケース１：標準サイクル」および「ケース２：温度応力抑制を考慮したサイクル」で、それぞれ  $92\mu$  および  $74\mu$  と、ケース２の方が、 $18\mu$  小さな値となった。また、夏期打設にあたる標高  $350\text{m}$  付近の最大値は、ケース１およびケース２で、それぞれ  $58\mu$  および  $54\mu$  と、ケース２の方が若干小さな値となった。この範囲で、最も差が大きかったのは、標高  $350\text{m}$  であり、ケース１とケース２で、それぞれ  $49\mu$  および  $22\mu$  と、ケース２の方が  $27\mu$  小さくなった。この標高については、ケース２をハーフリフトとしており、放熱が促されて温度上昇が抑制されて平準化が図られたことによって、差が生じたものと考えられる。



図－5.4.14 拘束度マトリックスによる拘束温度ひずみと標高の関係

表－5.4.7 拘束温度ひずみの主要なデジタル値

最大値		
	拘束温度ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース1	92	315.5
ケース2	74	315.5
【標高350m付近】		
	拘束温度ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース1	58	346.5
ケース2	54	343.0
【ケース2 ハーフリフト標高】		
	拘束温度ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース1	49	350.5
ケース2	22	350.3

## 5.5 実施工における温度応力の抑制方法の効果の確認

本項で検証するサイクルの概要を表－5.5.1に示す。表中の「ケース3：施工実績のサイクル」は、検証の対象とする五ヶ山ダム堤体の施工実績であり、このケース3を「ケース2：温度応力抑制を考慮したサイクル」と比較して効果の確認を行った。

五ヶ山ダムの実績では、コンクリートの打設開始日が2014年2月17日であった。また、着岩部付近の堤内構造物等による現場状況を反映して打設計画を見直し、低標高部（標高315.5m～標高328.5m）を拡張レヤー工法で施工した。夏期の打上り速度は、ケース2の0.09m/日に対し、ケース3では0.11m/日と同程度となった。一方、冬期の打上り速度については、ケース2の0.15m/日に対して、ケース3では0.19m/日と若干速められた。

ケース3のRCD施工期間は、低標高部を拡張レヤーで施工したことと、打上がり速度を高めたことにより、ケース2の21ヵ月に対して8ヵ月短い13ヵ月となった。

表－5.5.1 施工実績サイクルの概要

項目		ケース2 (温度応力抑制を考慮した サイクル)	ケース3 (施工実績のサイクル)
打上り速度 (施工サイクル)	夏期	0.09m/日 (6.11 日/サイクル)	0.11m/日 (9.40 日/サイクル)
	冬期	0.15m/日 (6.75 日/サイクル)	0.19m/日 (5.19 日/サイクル)
リフト厚	夏期	0.50m (夏期ハーフリフト)	0.50m (夏期ハーフリフト)
	冬期	1.0m	1.0m
RCD の施工期間		21 ヲ月	13 ヲ月

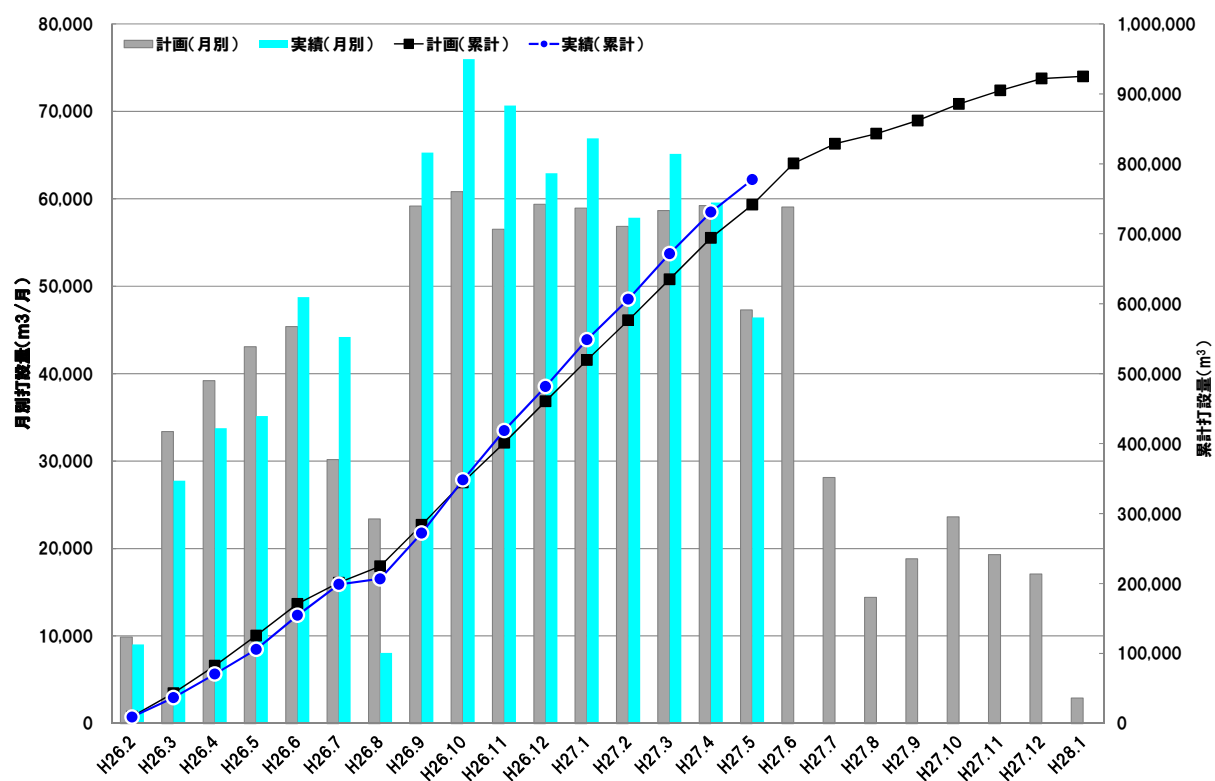
### 5.5.1 施工実績

「5.4 実規模ダムでの温度応力の抑制方法の効果の検証」の結果を踏まえ、五ヶ山ダムにおいて、「最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）」を利用したコンクリート温度の平準化を図った。

五ヶ山ダムの施工実績では、コンクリートの打設開始は 2014 年 2 月 17 日であり、前述のとおり低標高部（EL.315.5～EL.328.5）には、拡張レヤー工法を採用した。これまでの打設実績として、2014 年 3～5 月は低標高部における堤内構造物（放流管、堤内仮排水路、監査廊等）を構築して打設量が少なくなったものの、低標高部の堤内構造物を構築した 2014 年 6 月以降、計画の打設量を確保している。2014 年 8 月は定礎式（8/9）に向けた準備による打設休止があり、その後、台風および大雨によって打設休止日が多くなったため、計画工程を大幅に下回る打設量となり、9～12 月は計画を上回る打設量を確保している。以上の実績については、表－5.5.2 および図－5.5.1 に示すとおりである。

表－5.5.2 五ヶ山ダムのコンクリート打設実績

月	計画 m <sup>3</sup>	実績 m <sup>3</sup>	計画－実績 m <sup>3</sup>
2014.2	9,890	9,021	▲869
2014.3	33,377	27,760	▲5,617
2014.4	39,211	33,761	▲5,450
2014.5	43,087	35,157	▲7,930
2014.6	45,401	48,764	3,363
2014.7	30,188	44,204	14,016
2014.8	23,388	8,056	▲15,332
2014.9	59,192	65,289	6,097
2014.10	60,846	75,989	15,143
2014.11	56,522	70,682	14,160
2014.12	59,397	62,936	3,539
2015.1	58,931	66,922	7,991
2015.2	56,851	57,838	987
2015.3	58,666	65,131	6,465
2015.4	59,247	59,577	330
2015.5	47,290	46,431	2,328



図ー5.5.1 五ヶ山ダムのコングリート打設実績

## 5.5.2 実施工における温度応力の抑制効果の検証

### (1) 温度応力解析の方法

実施工における温度応力の抑制効果の検証として、前項と同様に、有限要素法による温度応力解析を実施した。温度応力解析には、マスコンクリートの非線形温度応力解析プログラムソフト「ASTEAMACS Ver.7（株）計算力学研究センター」を用いた。解析の条件を以下に示す。

#### ①解析対象断面の概要とモデル化

図-5.5.2に解析モデルを示す。解析モデルについては、前項と同様に、標準断面の二次元モデルとしており、図中には、本検討における解析の着目位置を示してある。

本検討で対象とするのは、図中に内部コン（RCD）と表記されている RCD 工法の適用区間である。この内部コンクリートについては、中庸熱フライアッシュセメント（フライアッシュ含有率 20% の MF20）が使用されており、単位セメント量は  $130 \text{ kg/m}^3$  である。使用材料および配合は、章末の付表-1 および付表-2 に示すとおりである。

同図に示すダム堤体の施工手順については、まず岩着部の高さ 1.5m（図中の中心線で標高 315.0m～316.5m）を富配合の岩着コンクリートにて打設した。次いで、標高 316.5m～標高 328.5m までの高さ 12m までを有スランプの内部コンクリート（拡張レヤー）にて打設し、標高 328.5m～標高 396.5m までの高さ 68m までの内部コンクリートを RCD コンクリートにて打設した。その間の外部コンクリートは有スランプコンクリートにて打設を行っている。さらに、標高 396.5m～標高 405.5m までの高さ 9m については、有スランプの内部コンクリート（拡張レヤー）にて打設した。以降、天端標高 417.5m まで外部コンクリートにて打設を行った。

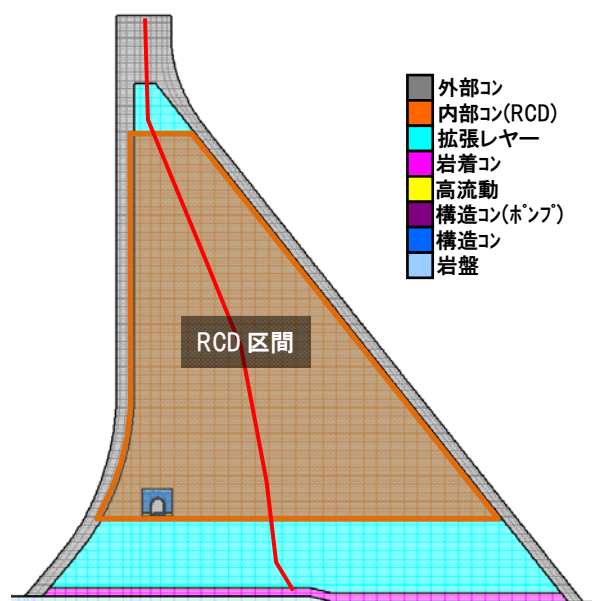


図-5.5.2 施工実績に基づいた解析モデル

## ②リフトスケジュール

図-5.5.3に、「ケース3：施工実績のサイクル」のリフト割を示す。本検討の「ケース3：施工実績のサイクル」では、7/21～7/28まで、日中の打設を控えながら1mリフトで施工し、7/30～8/31をハーフリフト（0.5m）の夜間打設とした。その結果として、8月の打設量が少なくなり、ハーフリフトは2リフトであった。このケース3のリフトスケジュールについては、付表-7に示すとおりである。

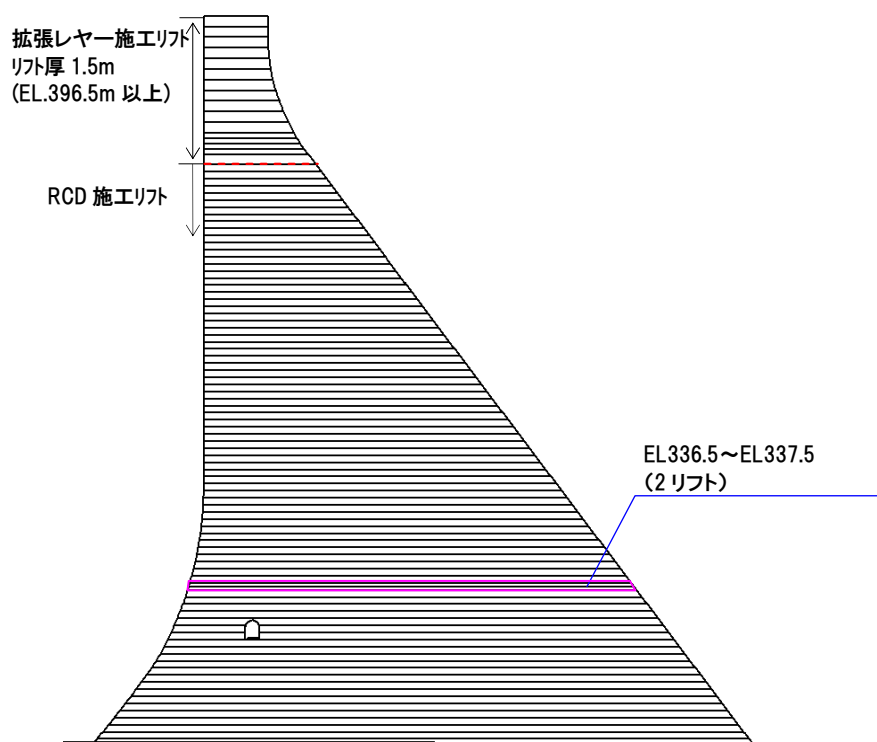


図-5.5.3 「ケース3：施工実績のサイクル」のリフト割

## ③その他の解析条件

温度応力解析に用いる外気温については、前項と同様に、ダムサイト近傍で観測された1999年から2008年（10年間）の外気温の計測値を基にした回帰式とした。詳細については、付図-1に示すとおりである。

また、その他の解析条件は、付表-5および付図-2～付図-5に示すとおりである。

## (2) 拘束度マトリックス法の概要

施工実績のサイクルによる温度応力抑制効果の確認・検証として、拘束度マトリックス法により、堤体全体に生じる拘束温度ひずみを算出した。拘束度マトリックスを用いた計算においては、二次元有限要素法による温度解析から得られた最高温度上昇量  $\varphi_{\max}$  と最終安定温度  $\varphi_t$  の差である温度降下量  $\Delta\varphi_d$  を最終温度降下量として入力条件に用いた。最終温度降下量は、堤体中心位置近傍における値を採用した。最終温度降下量を抽出した解析モデルにおける着目位置を図-5.5.4に示す。また、拘束度マトリックスは、堤体を高さ方向に22層に分割したモデルとし、コンクリートの弾性係数  $E_c$  と岩盤の弾性係数  $E_R$  の比を  $E_c/E_R=6$  として定めた。拘束度マトリックスについては、付表-6に示す。

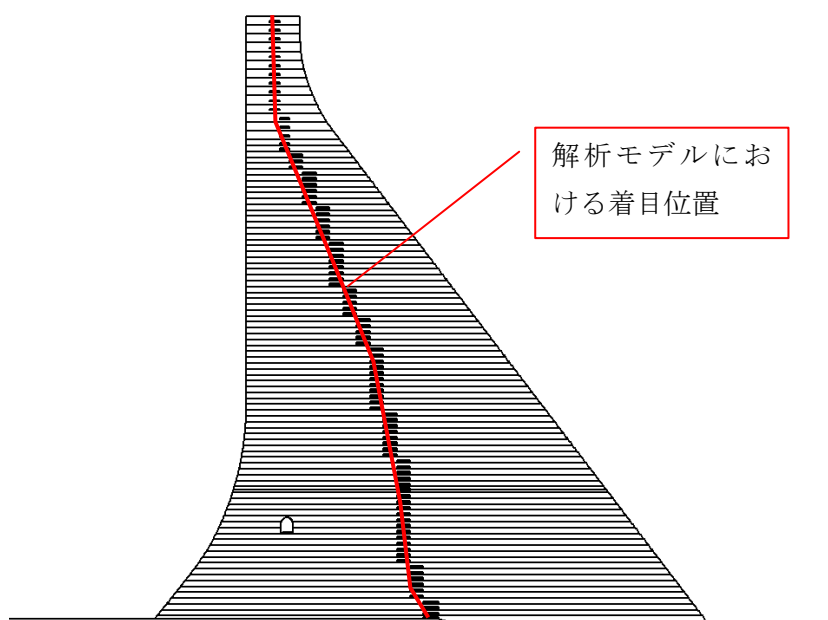


図-5.5.4 温度降下量を抽出した着目位置

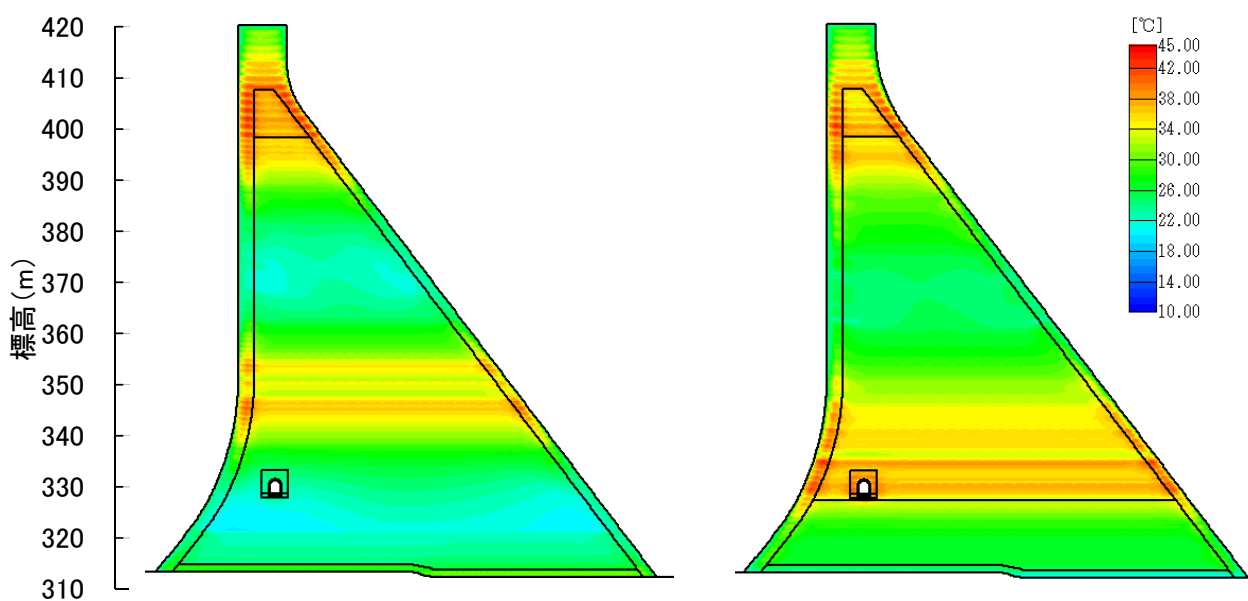
### 5.5.3 実施工における温度応力の抑制効果の検証結果

#### (1) 温度応力解析の結果

「ケース3：施工実績のサイクル」の温度応力解析結果を、「ケース2：温度応力の抑制を考慮したサイクル」と比較し、実施工における温度応力抑制効果について確認・検証した。

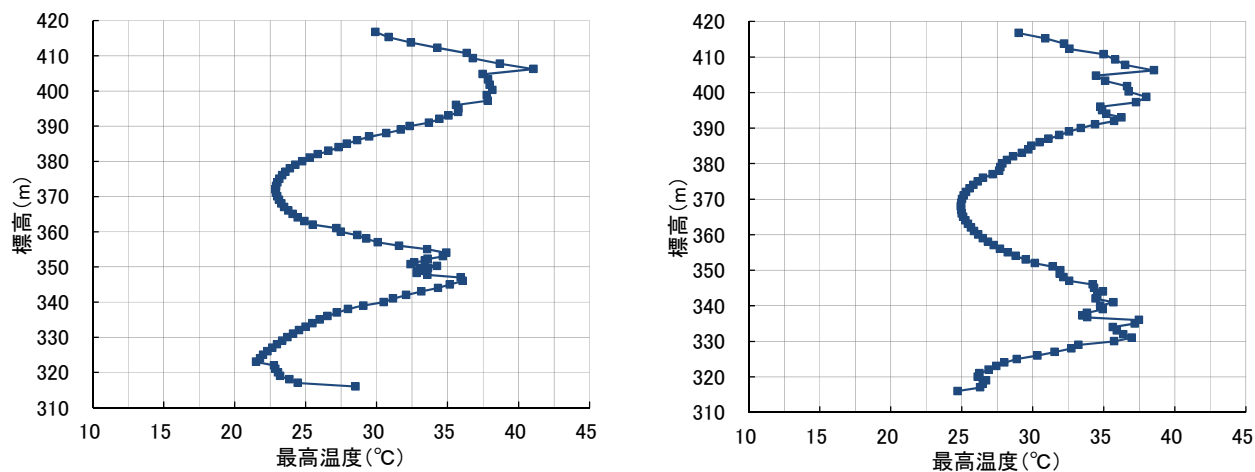
##### ① 最高温度の解析結果

最高温度の等分布図を、図-5.5.5に示す。また、解析の着目位置における最高温度と標高の関係を、図-5.5.6に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、表-5.5.3に示す。同表では、夏期打設のハーフリフトとした範囲の平均値を、最大値として示してある。



(a) ケース2：温度応力の抑制を考慮したサイクル (b) ケース3：施工実績のサイクル

図-5.5.5 最高温度の等分布図



(a) ケース2：温度応力の抑制を考慮したサイクル (b) ケース3：施工実績のサイクル

図-5.5.6 着目位置における最高温度と標高の関係

表－5.5.3 最高温度の主要なデジタル値

ケース2		
	最高温度の平均値 (°C)	標高 (m)
最大値	33.8	345.5～355.5
最小値	22.6	321.5～331.5
温度差	11.2	

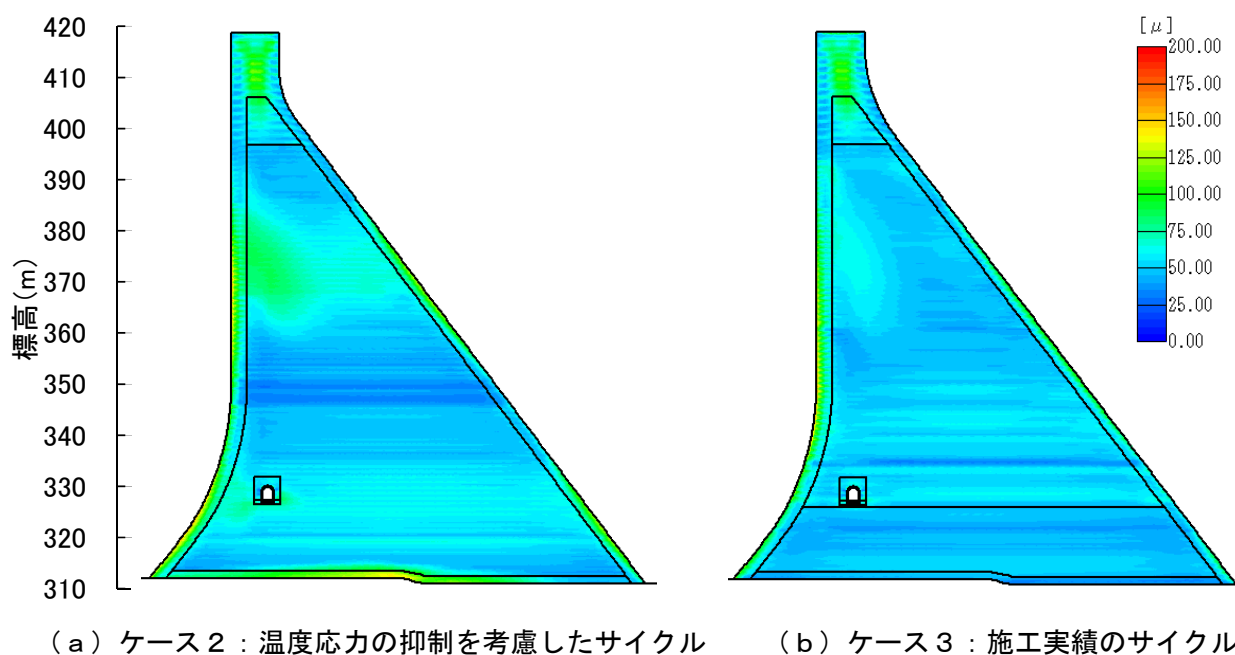
ケース3		
	最高温度の平均値 (°C)	標高 (m)
最大値	35.6	329.5～339.5
最小値	26.1	314.5～324.5
温度差	9.5	

これらの図より、「ケース2：温度応力抑制を考慮したサイクル」と、「ケース3：施工実績のサイクル」の最高温度の等分布図を比較すると、施工開始時期が異なるため、夏期打設および冬期打設の標高が異なっていることが確認される。ケース2とケース3において、最高温度が最も高くなるのは、それぞれ標高 350m 付近および標高 330m 付近であり、黄色から橙色になっていることが確認される。これらの範囲で、2つのケースの色を比較すると、ケース2よりもケース3の方が、より濃い橙色になっており、最高温度が高いことが確認される。一方、夏期打設以外の範囲については、水色から黄緑色の範囲で着色されており、ケース2では薄い水色が入っているように見えるのに対して、ケース3では、より最高温度が高い黄緑色になっていることが確認される。これらの理由として、ケース3では、ケース2よりも、夏期に夜間打設が導入されてハーフリフトの数が抑えられ、かつ、冬期の打上がり速度がケース2の 0.15m/日に対して 0.19m/日となっているために、夏期および冬期ともに、最高温度が高いことが考えられる。ケース2とケース3において、最高温度が最も高くなるのは、上述のとおり、それぞれ標高 350m 付近および標高 335m 付近であり、各標高の着目位置における値は、それぞれ 33.8°Cおよび 35.6°Cと、ケース3の方が、1.8°C高くなっている。また、最高温度が最も低くなるのは、それぞれ標高 330m 付近および標高 320m 付近であり、着目位置における値は、それぞれ 22.6°Cおよび 26.1°Cと、ケース3の方が 3.5°C高くなっている。

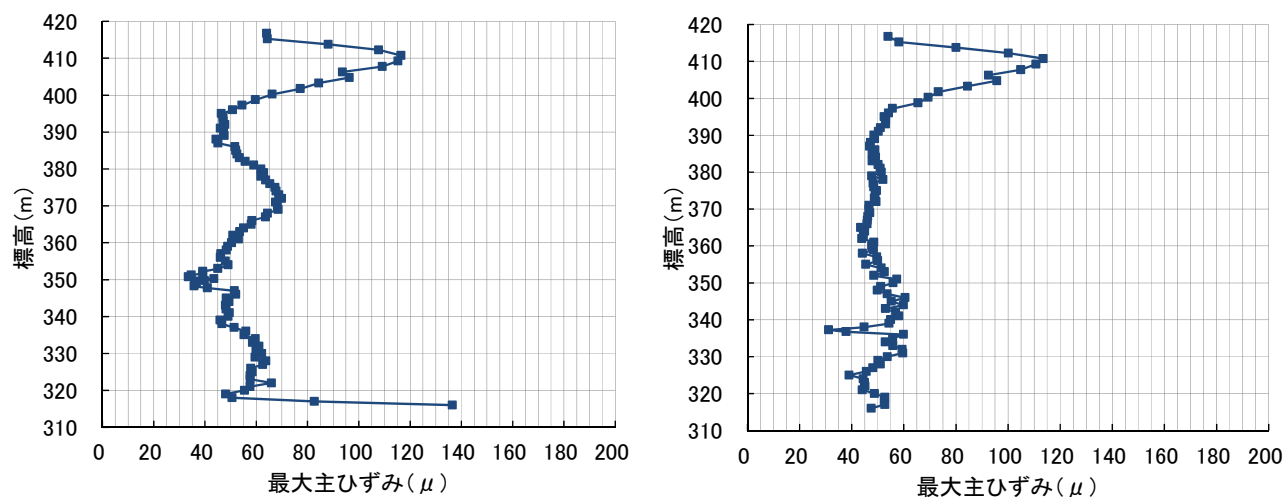
これらの最高温度の最高値および最低値の比較より、ケース2よりもケース3の方が、夏期および冬期のいずれの最高温度も高いが、夏期と冬期の差については、ケース2の 11.2°Cに対して、ケース3では 9.5°Cと、1.7°Cの差があり、ケース3の方が、堤体内の最高温度が平準化されている。

## ②最大主ひずみの解析結果

最大主ひずみの等分布図を、**図－5.5.7**に示す。また、解析の着目位置における最大主ひずみと標高の関係を、**図－5.5.8**に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、**表－5.5.4**に示す。



図－5.5.7 最大主ひずみの等分布図



図－5.5.8 着目位置における最大主ひずみと標高の関係

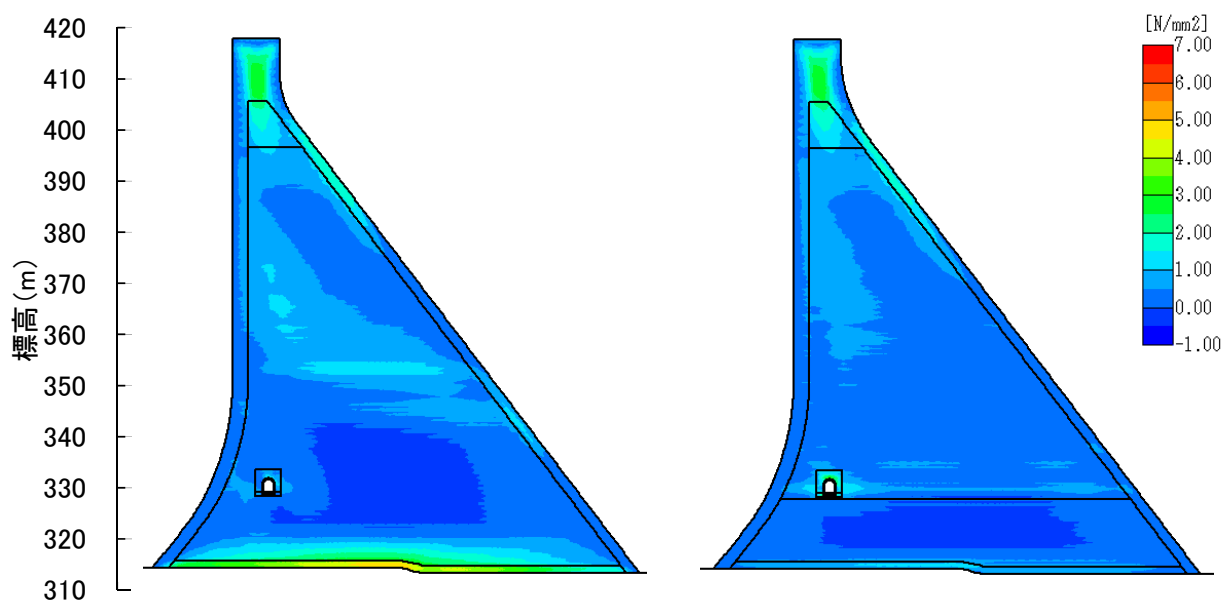
表-5.5.4 最大主ひずみの主要なデジタル値

【岩着部】		
	主ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース2	137	315.5～316.5
ケース3	53	318.5～319.5
【標高330m付近】		
	主ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース2	64	327.5～328.5
ケース3	60	330.5～331.5

これらの図より、「ケース2：温度応力抑制を考慮したサイクル」と、「ケース3：施工実績のサイクル」の最大主ひずみの等分布図を比較すると、施工開始時期が異なるため、岩着部における最大主ひずみが異なっている。すなわち、10月に打設を開始しているケース2では、その後の冬期の温度低下の際に最大主ひずみが大きくなるため、137 $\mu$ となっているのに対して、2月に打設を開始しているケース3では、その後、外気温が高くなって温度が低下しにくいため、53 $\mu$ になっている。また、これより上の標高340m程度までの岩盤の拘束の影響を受ける範囲で比較すると、ケース3の方が、全体的に青色が濃いように見え、着目位置におけるケース2およびケース3の値は、それぞれ64 $\mu$ および60 $\mu$ で、ケース3の方が小さな値となった。このような結果が得られた理由として、ケース3では、ケース2よりも、夏期、冬期ともに打上り速度が高いため、温度の絶対値は高くなったが、施工時期の違いによる温度の差が小さくなる平準化が図られているため、温度差に起因するひずみが小さくなったことが考えられる。

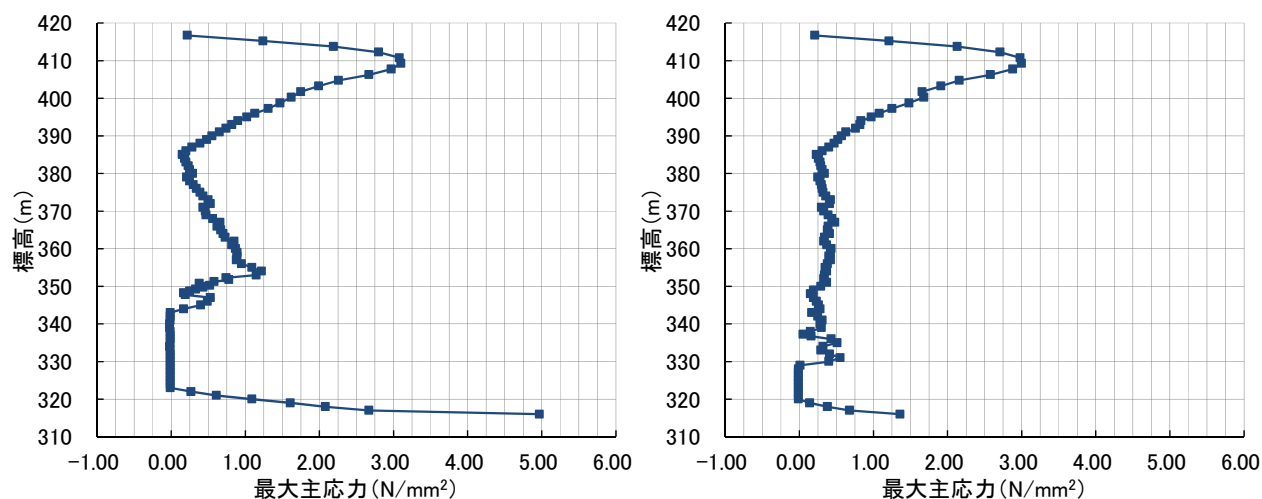
### ③最大主応力の解析結果

最大主応力の等分布図を、**図－5.5.9**に示す。また、解析の着目位置における最大主応力と標高の関係を、**図－5.5.10**に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、**表－5.5.5**に示す。



(a) ケース 2：温度応力の抑制を考慮したサイクル (b) ケース 3：施工実績のサイクル

図－5.5.9 最大主応力の等分布図



(a) ケース 2：温度応力の抑制を考慮したサイクル (b) ケース 3：施工実績のサイクル

図－5.5.10 着目位置における最大主応力と標高の関係

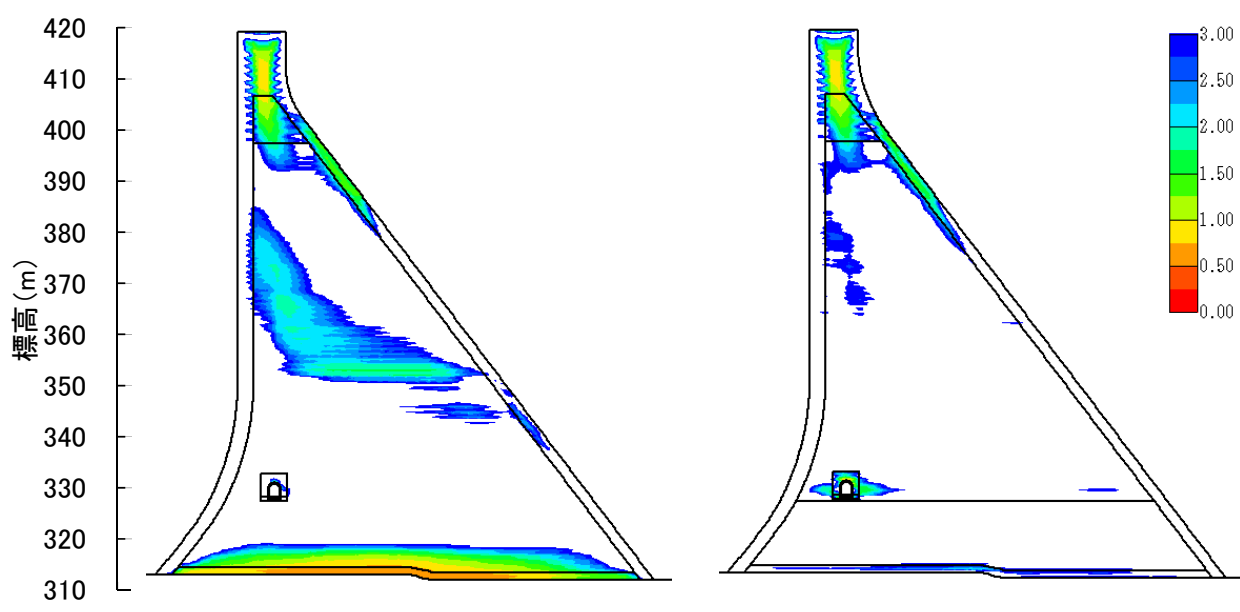
表－5.5.5 最大主応力の主要なデジタル値

最大値【岩着部】		
	主応力 (N/mm <sup>2</sup> )	標高 (m)
ケース2	4.97	315.5～316.5
ケース3	1.36	315.5～316.5
【標高330m～350m付近】		
	主応力 (N/mm <sup>2</sup> )	標高 (m)
ケース2	1.22	353.5～354.5
ケース3	0.55	330.5～331.5

これらの図より、最大主応力の解析結果は、最大主ひずみの傾向と相関があることが確認される。すなわち、「ケース2：温度応力の抑制を考慮したサイクル」と「ケース3：施工実績のサイクル」の着目位置における最大主応力を比較すると、岩着付近におけるケース2およびケース3で、それぞれ4.97N/mm<sup>2</sup>および1.36N/mm<sup>2</sup>と、ケース3の方が低くなっている。また、ケース2では、夏期打設に該当する標高350m付近の最大主応力が高くなる範囲があり、この範囲の最高値は1.22N/mm<sup>2</sup>であったのに対して、ケース3にはこのような傾向が認められず、標高330m付近の0.55N/mm<sup>2</sup>が最高値であった。ケース3の方が、ケース2よりも夏期および冬期の最高温度が高いにもかかわらず、最大主応力が低くなっていることから、堤体内の平準化の影響が大きいことが明らかとなった。

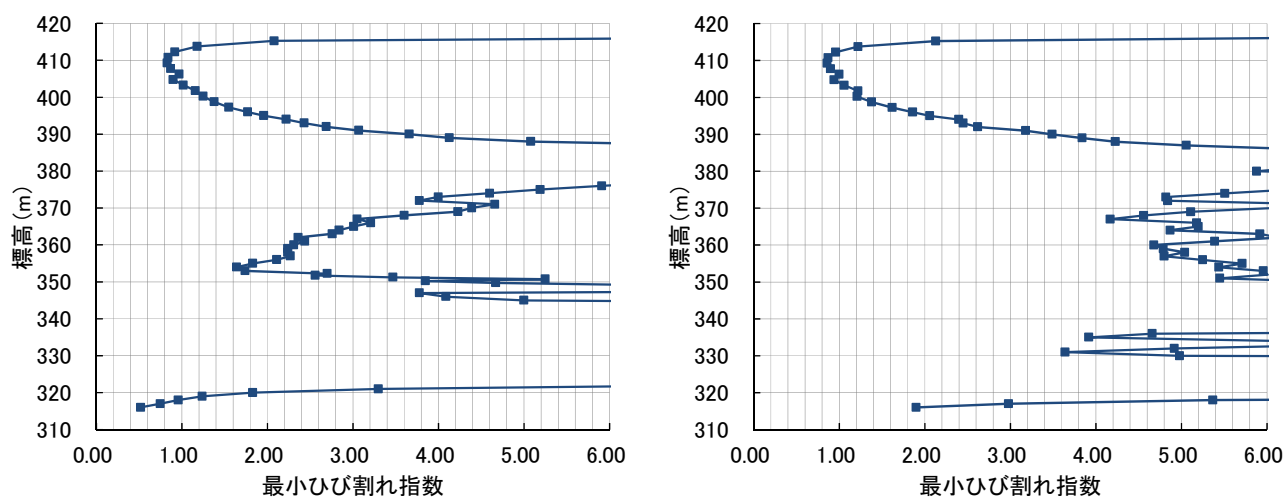
#### ④最小ひび割れ指数の解析結果

最小ひび割れ指数の等分布図を、図－5.5.11 に示す。また、解析の着目位置における最小ひび割れ指数と標高の関係を、図－5.5.12 に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、表－5.5.6 に示す。



(a) ケース 2：温度応力の抑制を考慮したサイクル (b) ケース 3：施工実績のサイクル

図－5.5.11 最小ひび割れ指数の等分布図



(a) ケース 2：温度応力の抑制を考慮したサイクル (b) ケース 3：施工実績のサイクル

図－5.5.12 着目位置における最小ひび割れ指数と標高の関係

表ー5.5.6 最小ひび割れ指数の主要なデジタル値

最小値【岩着部】		
	指数	標高 (m)
ケース2	0.52	315.5～316.5
ケース3	1.90	315.5～316.5
【標高330m～350m付近】		
	指数	標高 (m)
ケース2	1.64	353.5～354.5
ケース3	3.92	334.5～335.5

これらの図より、「ケース2：温度応力抑制を考慮したサイクル」と、「ケース3：施工実績のサイクル」のひび割れ指数の等分布図を比較すると、打設時期の影響を受ける岩着付近では、最小ひび割れ指数が、ケース2およびケース3で、それぞれ0.52および1.90であり、ケース3の方が大きな値であった。同様に、標高330～350m程度の範囲においても、着目位置の最小ひび割れ指数の最小値は、ケース2およびケース3で、それぞれ1.64および3.92となり、ケース3の方が大きな値であった。

これらの結果より、ダム堤体の温度ひび割れ抑制のためには、コンクリートの最高温度を抑制するよりも、打設時期による温度差を平準化することの方が有効であることが考えられる。

## (2) 拘束度マトリックスの結果

各リフトにおける最高温度を基に、拘束度マトリックス法によって求めた拘束温度ひずみと標高の関係を図-5.5.13に示す。また、同図における主要なデジタル値を抽出し、表-5.5.7に示す。

同図より、本解析の範囲では、いずれのケースにおいても、許容拘束温度ひずみとされる  $100\mu$  よりも小さな値となった。岩着部付近については、ケース2の拘束温度ひずみが  $74\mu$  であったが、ケース3では、 $-9\mu$  と、ほとんど拘束温度ひずみが生じない結果であった。また、2つのケースともに夏期打設の範囲の拘束温度ひずみが大きくなっており、それぞれの値は、ケース2が標高  $340\text{m} \sim 350\text{m}$  における  $54\mu$ 、ケース3が標高  $330\text{m}$  程度における  $47\mu$  となった。拘束度マトリックスによる結果においても、堤体内の最高温度の絶対値は高いが、平準化されているケース3の方が、ケース2よりも、温度ひび割れのリスクを小さく評価する結果が得られたことから、本工法の有効性が確認されたものと考えられる。

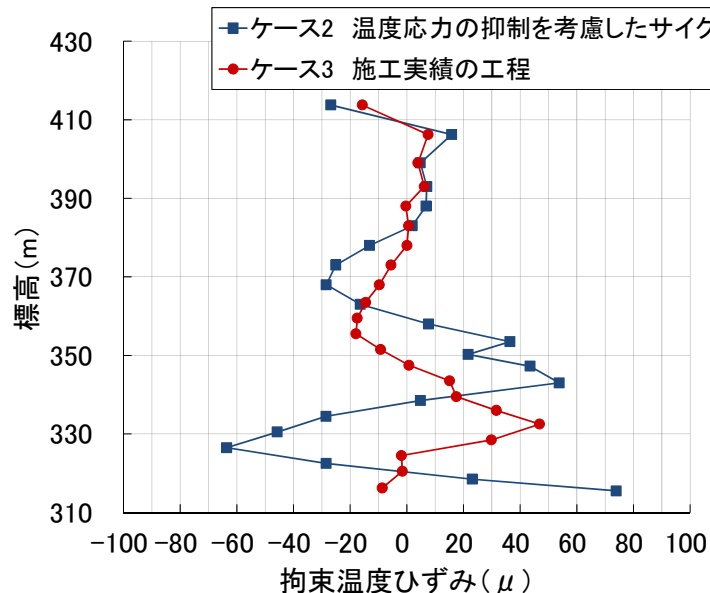


図-5.5.13 拘束度マトリックスによる拘束温度ひずみと標高の関係

表-5.5.7 拘束温度ひずみの主要なデジタル値

【岩着部】		
	拘束温度ひずみ (μ)	標高 (m)
ケース2	74	315.5
ケース3	-9	316.5
【標高330m～350m付近】		
	拘束温度ひずみ (μ)	標高 (m)
ケース2	54	343.0
ケース3	47	332.5

## 5.6 実施工よりもさらに工期短縮した際の温度応力の検証

本節では、五ヶ山ダムの施工実績よりも、さらに施工速度を高めて冬期の打設量を増やし、3ヵ月の工程短縮を図ったリフトスケジュールとすることが温度応力に及ぼす影響について、温度応力解析および拘束度マトリックスによって確認した。本節で検証するサイクルの概要を表5.6.1に示す。表中の「ケース4：3ヵ月短縮のサイクル」は最新のRCD工法（巡航RCD工法）の活用によって、「ケース3：施工実績のサイクル」よりも、さらに施工速度を速めて冬期の打設量を増やしたケースである。ケース4では、RCDの施工期間をケース3の13ヵ月に対して、3ヵ月短縮した10ヵ月とするために、冬期の打上り速度をケース3の0.19m/日に対して、0.38m/日に設定している。

表5.6.1 3ヵ月短縮のサイクルの概要

項目		ケース3 (施工実績のサイクル)	ケース4 (3ヵ月短縮のサイクル)
打上り速度 (施工サイクル)	夏期	0.11m/日 (9.40 日/サイクル)	0.06m/日 (8.62 日/サイクル)
	冬期	0.19m/日 (5.19 日/サイクル)	0.38m/日 (2.67 日/サイクル)
リフト厚	夏期	0.50m (夏期ハーフリフト)	0.50m (夏期ハーフリフト)
	冬期	1.0m	1.0m
RCDの施工期間		13ヵ月	10ヵ月

### 5.6.1 3ヵ月短縮の工程概要

ケース3の五ヶ山ダムの施工実績では、5.5で前述のとおり、コンクリートの打設開始が2014年2月17日であり、低標高部（標高315.5m～標高328.5m）には、拡張レヤー工法が採用されている。

ケース4の3ヵ月の工程短縮を図るリフトスケジュールについても同様の条件を採用し、コンクリートの打設開始を同日（2014年2月17日）として低標高部に拡張レヤー工法を適用し、RCD工法の施工開始を同日にすることとした。RCD施工期間の夏期打設についてはハーフリフト（0.5m）の対象リフトを増やして打上がり速度を低減し、冬期打設については、さらに打上がり速度を高め、さらなる平準化による温度ひび割れリスク低減を図ることを考えた。具体的には、夏期施工の打上がり速度を、ケース3の0.11m/日から0.06m/日とした。また、冬期の打上がり速度については、ケース3の0.19m/日から約2倍の0.38m/日とした。

## 5.6.2 3ヵ月の工程短縮が温度応力に及ぼす影響の確認

### (1) 温度応力解析の方法

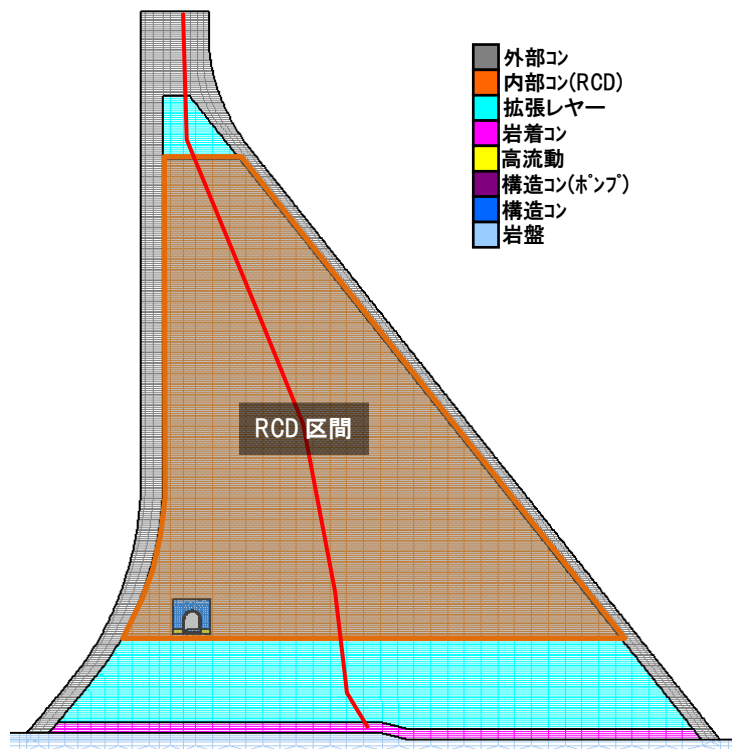
3ヵ月の工程短縮が温度応力に及ぼす影響について、前項までと同様に、有限要素法による温度応力解析を実施した。温度応力解析には、マスコンクリートの非線形温度応力解析プログラムソフト「ASTEAMACS Ver. 7 ((株) 計算力学研究センター)」を用いた。解析の条件を以下に示す。

#### ①解析対象断面の概要とモデル化

図-5.6.1に解析モデルを示す。解析モデルについては、前項と同様に、標準断面の二次元モデルとしており、図中には、本検討における解析の着目位置を示してある。

ケース4の配合区分を図-5.6.1に示す。配合区分はケース3と同様で、図中に内部コン (RCD) と表記されている箇所はRCD工法の適用区間である。この内部コンクリートについては、前節までと同様の条件として中庸熱フライアッシュセメント (フライアッシュ含有率20%のMF20) が使用されるものとし、単位セメント量を $130\text{kg/m}^3$ とした。使用材料および配合は、章末の付表-1および付表-2に示すとおりである。

ケース4のダム堤体の施工手順については、まず岩着部の高さ1.5m (図中の中心線で標高315.0m～標高316.5m) を富配合の岩着コンクリートにて打設するものとし、標高316.5m～標高328.5mまでの高さ12mまでを有スランプの内部コンクリート (拡張レヤー) にて打設するものとした。ここまでは、ケース3の五ヶ山ダムの施工実績と同様である。これ以降の標高328.5m～標高396.5mまでの高さ68mの内部コンクリートをRCDコンクリートにて打設するものとし、この範囲で堤体全体温度の平準化を目的として、夏期施工についてはハーフリフト (0.5m) の対象リフトを増やし、打上り速度を遅くすること、冬期施工では3ヵ月の工程短縮を図るために打上り速度を速くすることとしている。なお、その間の外部コンクリートは有スランプコンクリートにて打設を行うものとしており、標高396.5m～標高405.5mまでの高さ9mについては、有スランプの内部コンクリート (拡張レヤー) にて打設し、天端標高417.5mまで外部コンクリートにて打設を行うものとした。



図ー5. 6. 1 3 ヶ月短縮の解析モデルおよび配合区分

## ②リフトスケジュール

図-5.6.2に、「ケース4：3ヵ月短縮のサイクル」のリフト割を示す。ケース4について、夏期施工については、ハーフリフト（0.5m）の対象リフトをケース3の2リフトに対して、図に示す標高328.5m～標高335.5mの14リフトに増やし、打上がり速度を控えながらで夜間打設を行う条件とした。さらに、冬期施工では、打上がり速度をケース3の0.19m/日に対して、2倍の0.38m/日とした。このケース4のリフトスケジュールについては、付表-8に示すとおりである。

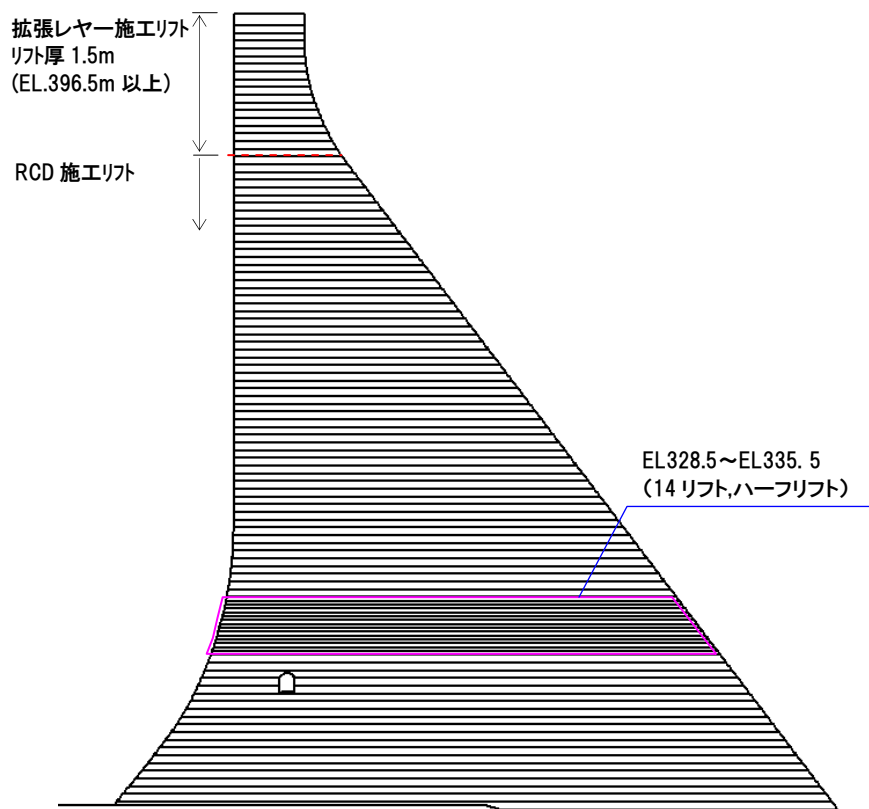


図-5.6.2 「ケース4：3ヵ月短縮のサイクル」のリフト割

## ③その他の解析条件

温度応力解析に用いる外気温については、前項と同様に、ダムサイト近傍で観測された1999年から2008年（10年間）の外気温の計測値を基にした回帰式とした。詳細については、付図-1に示すとおりである。

また、その他の解析条件は、付表-5および付図-2～付図-5に示すとおりである。

## (2) 拘束度マトリックス法の概要

ケース4では、ケース3に対してさらなる堤体全体温度の平準化を目的として、夏期施工についてはハーフリフト(0.5m)の対象リフトを増やし、打上り速度を遅くすること、冬期施工では打上り速度を速くすることとしている。ケース4における堤体全体温度の平準化が温度応力に及ぼす影響を把握するために、拘束度マトリックス法によって堤体全体に生じる拘束温度ひずみを算出して確認した。拘束度マトリックスを用いた計算においては、二次元有限要素法による温度解析から得られた最高温度上昇量  $\varphi_{\max}$  と最終安定温度  $\varphi_t$  の差である温度降下量  $\Delta\varphi_d$  を最終温度降下量として入力条件に用いた。最終温度降下量は、堤体中心位置近傍における値を採用した。最終温度降下量を抽出した解析モデルにおける着目位置を図-5.6.3に示す。また、拘束度マトリックスは、堤体を高さ方向に22層に分割したモデルとし、コンクリートの弾性係数  $E_c$  と岩盤の弾性係数  $E_R$  の比を  $E_c/E_R=6$  として定めた。拘束度マトリックスについては、付表-6に示す。

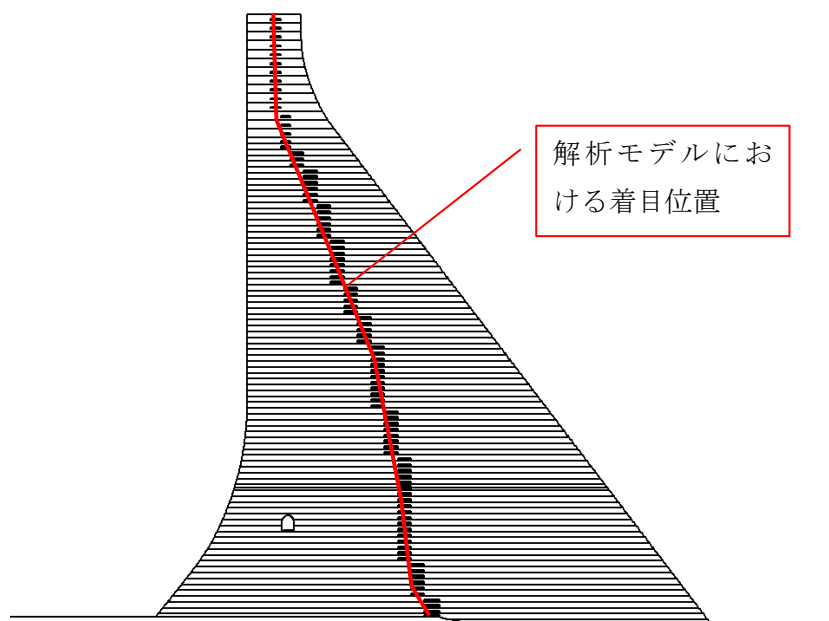


図-5.6.3 温度降下量を抽出した着目位置

### 5.6.3 3ヵ月の工程短縮が温度応力に及ぼす影響の確認結果

#### (1) 温度応力解析の結果

「ケース4：3ヵ月短縮のサイクル」の温度応力解析結果を、「ケース3：施工実績のサイクル」と比較し、工程を3ヵ月短縮することが温度応力に及ぼす影響について確認・検証した。

#### ① 高温度の解析結果

最高温度の等分布図を、図-5.6.4に示す。また、解析の着目位置における最高温度と標高の関係を、図-5.6.5に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、表-5.6.2に示す。同表では、夏期打設のハーフリフトとした範囲の平均値を、最大値として示してある。

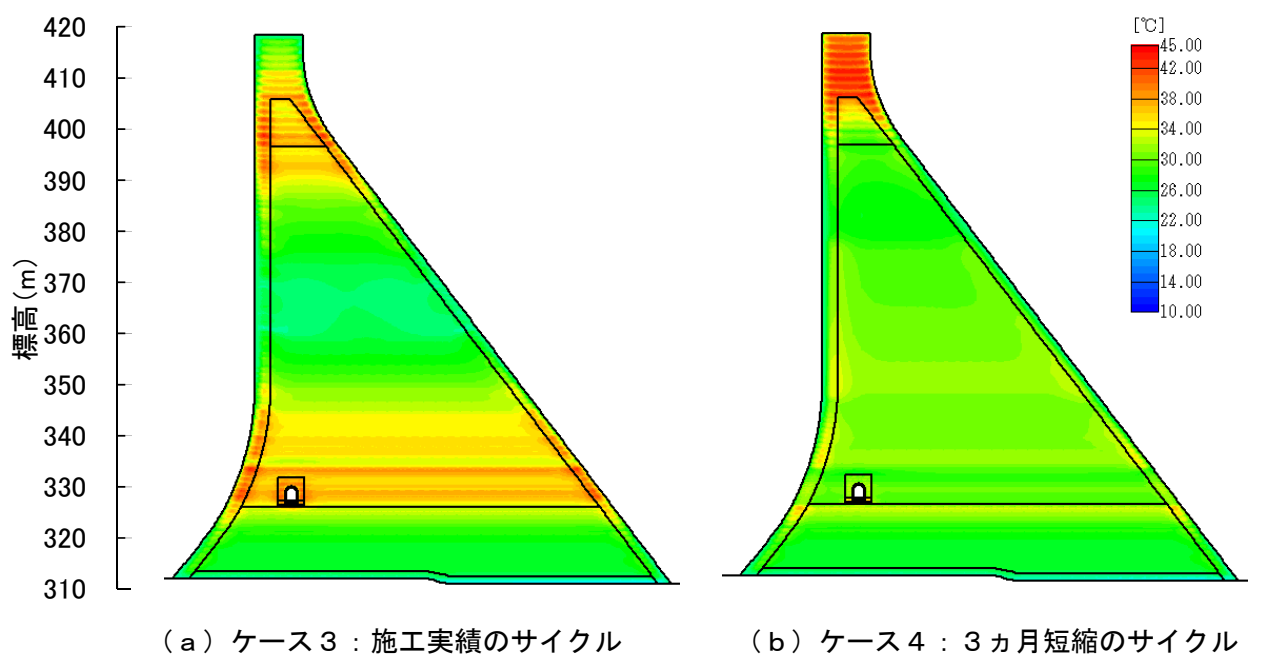


図-5.6.4 最高温度の等分布図

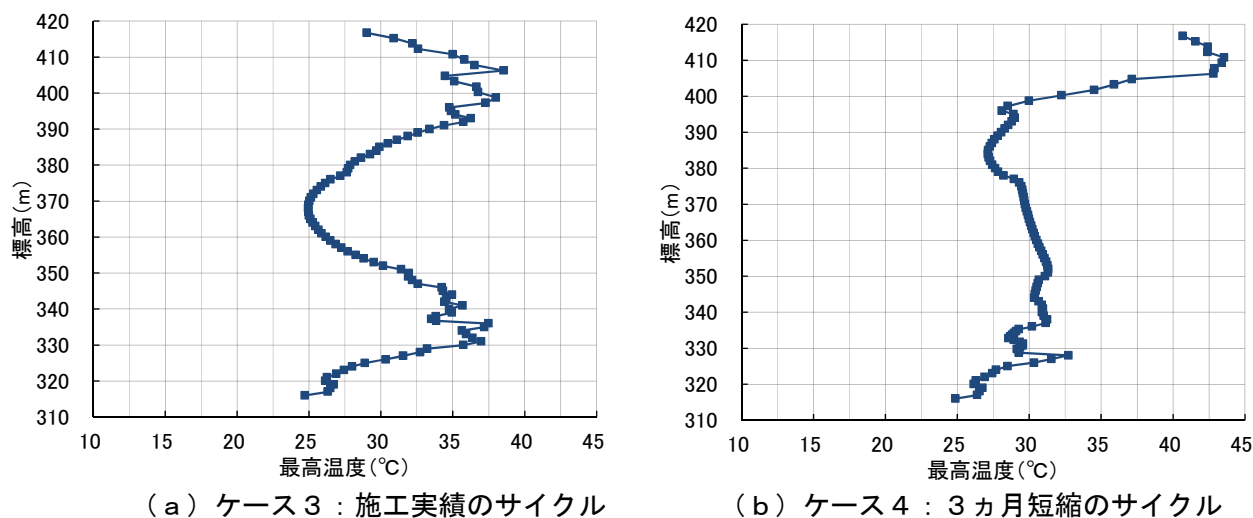


図-5.6.5 着目位置における最高温度と標高の関係

表－5.6.2 最高温度の主要なデジタル値

ケース3		
	最高温度の平均値 (°C)	標高 (m)
最大値	35.6	329.5～339.5
最小値	26.1	314.5～324.5
温度差	9.5	

ケース4		
	最高温度の平均値 (°C)	標高 (m)
最大値	29.6	329.5～339.5
最小値	26.2	314.5～324.5
温度差	3.4	

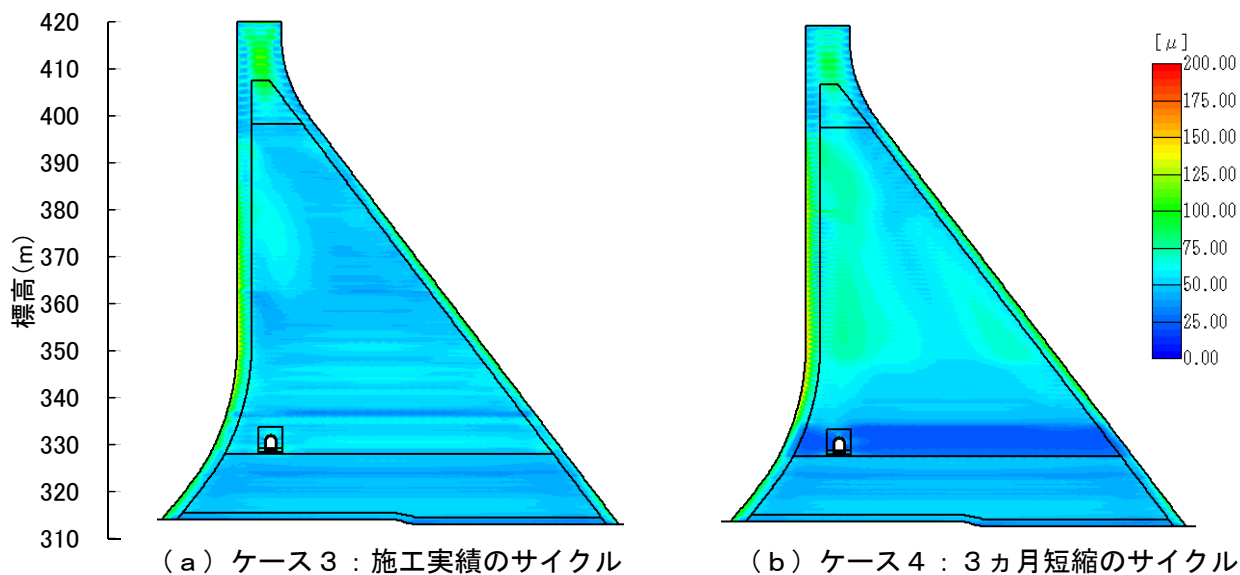
これらの図より、「ケース3：施工実績のサイクル」と、「ケース4：3ヵ月短縮のサイクル」の最高温度の等分布図を比較すると、ケース3では、夏期打設の範囲である黄緑色から橙色と、それ以外の範囲である緑色の違いが明確に確認されるのに対し、ケース4では、打設時期による色の違いが認められず、全体的に黄緑色であることが確認される。これは、ケース4では、夏期の打上がり速度を、ケース3の0.11m/日に対して0.06m/日に抑え、冬期の打上がり速度をケース3の0.19m/日に対して0.38m/日に高めることによって、最高温度の平準化を図ったことによるものである。

各標高についてみると、ケース3とケース4では、まず、標高330m～350m程度の夏期打設となる範囲に違いが認められており、着目位置における最高値が、それぞれ35.6°Cおよび29.6°Cと、ケース4の方が、ケース3よりも最高温度が6.0°C低くなっていることが確認される。この理由として、前述のとおり、ケース4では、ケース3よりも打上がり速度を抑えていることに加え、ケース3の施工実績では、夜間打設を導入してハーフリフトを2リフトとしているのに対し、ケース4では、夜間打設を導入し、かつハーフリフトを14リフトとしているために打設後の温度が上昇する期間における放熱が進みやすいことが考えられる。また、冬期打設に該当する区間については、ケース3とケース4で、同程度の温度となっており、その最低値は、それぞれ26.1°Cおよび26.2°Cであった。

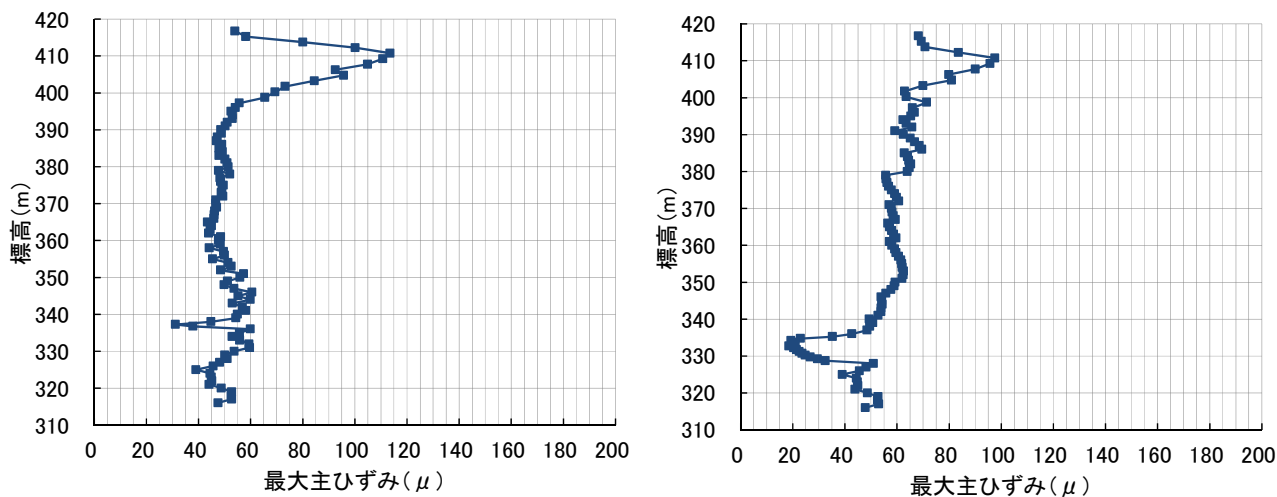
以上の結果より、最高温度の最大値と最小値の差は、ケース3とケース4で、それぞれ9.5°Cおよび3.4°Cであり、ケース4の方が6.1°C小さく、ケース4では、最高温度のさらなる平準化が図られていることが確認される。

## ②最大主ひずみの解析結果

最大主ひずみの等分布図を、**図－5.6.6**に示す。また、解析の着目位置における最大主ひずみと標高の関係を、**図－5.6.7**に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、**表－5.6.3**に示す。



図－5.6.6 最大主ひずみの等分布図



図－5.6.7 着目位置における最大主ひずみと標高の関係

表－5. 6. 3 最大主ひずみの主要なデジタル値

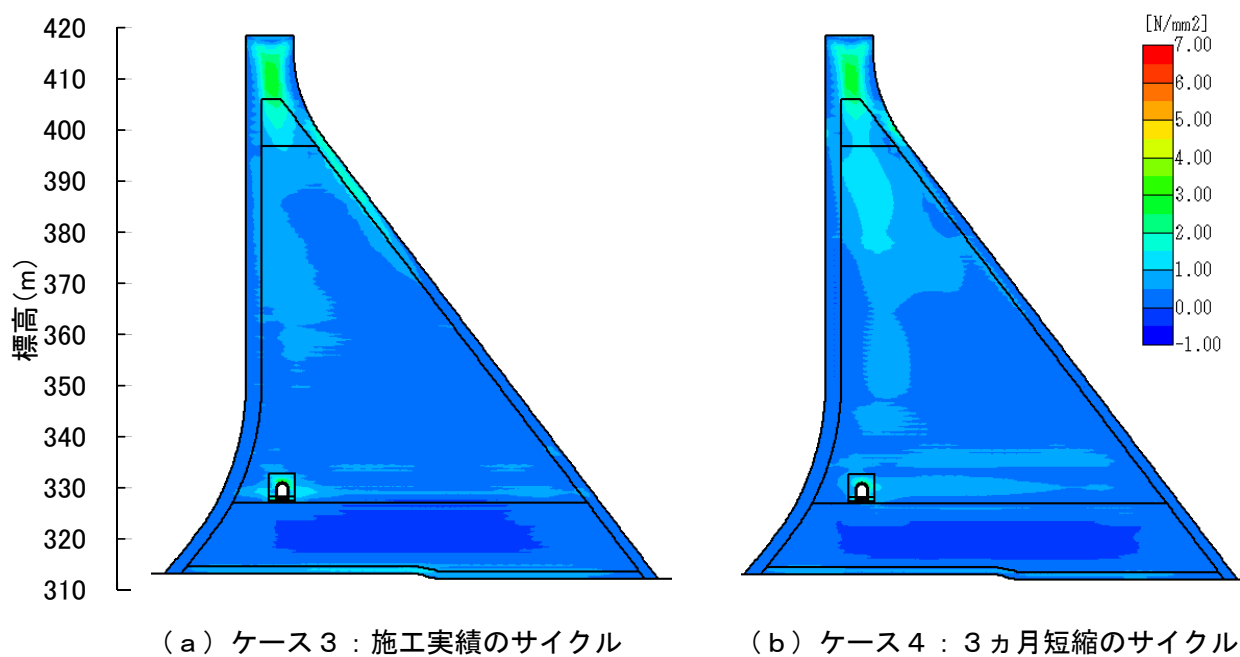
【標高310m～340m】		
	主ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース3	60	330. 5～331. 5
ケース4	53	316. 5～317. 5

最大主ひずみについては、岩盤からの拘束が大きいのが標高 340m 程度以下の範囲であるため、この範囲の値に着目する必要がある。それより高い標高では、岩盤からの拘束が小さくなることから、応力が高くないものと考えられる。

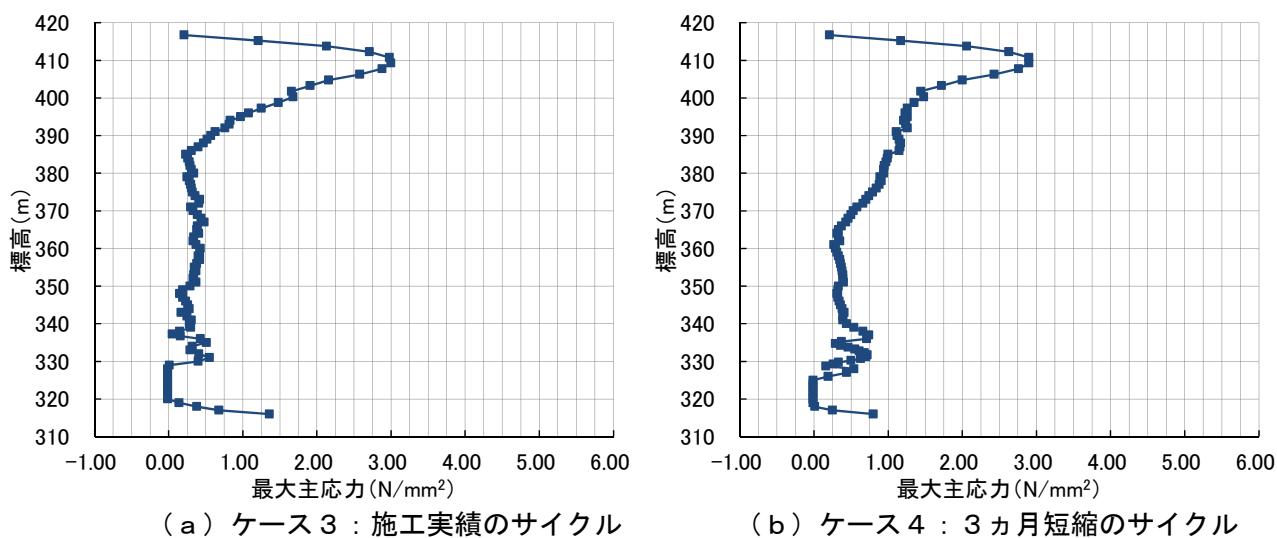
これらの図より、「ケース3：施工実績のサイクル」と、「ケース4：3ヵ月短縮のサイクル」の最大主ひずみについて、等分布図を確認すると、ケース4では、標高 330m 付近において、青色が濃い範囲があり、最大主ひずみが小さい範囲があることが確認される。着目位置における標高 340m 以下の最大値について比較すると、ケース3およびケース4で、それぞれ 60 $\mu$  および 53 $\mu$  であり、ケース4の方が低い値となった。

### ③最大主応力の解析結果

最大主応力の等分布図を、**図－5.6.8**に示す。また、解析の着目位置における最大主応力と標高の関係を、**図－5.6.9**に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、**表－5.6.4**に示す。



図－5.6.8 最大主応力の等分布図



図－5.6.9 着目位置における最大主応力と標高の関係

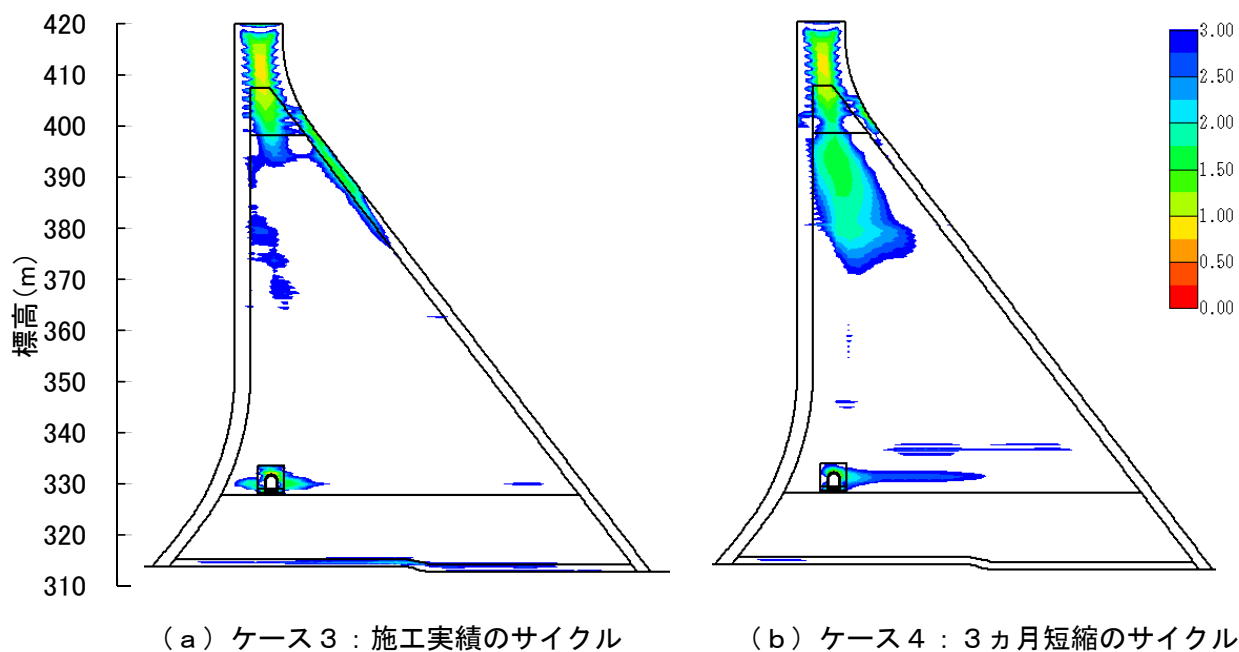
表－5.6.4 最大主応力の主要なデジタル値

最大値【岩着部】		
	主応力 (N/mm <sup>2</sup> )	標高 (m)
ケース3	1.36	315.5～316.5
ケース4	0.80	315.5～316.5
【標高330m～350m付近】		
	主応力 (N/mm <sup>2</sup> )	標高 (m)
ケース3	0.55	330.5～331.5
ケース4	0.74	336.5～337.5

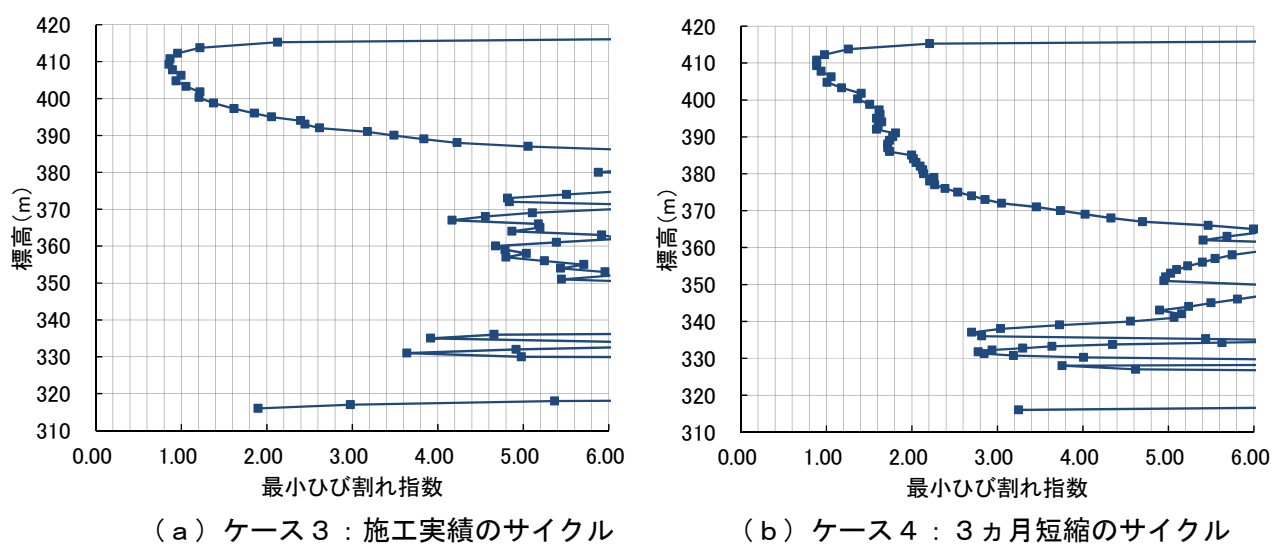
これらの図より、「ケース3：施工実績のサイクル」と「ケース4：3ヵ月短縮のサイクル」の最大主応力について、岩着付近の標高310m～320mでは、それぞれ1.36N/mm<sup>2</sup>および0.80N/mm<sup>2</sup>と、ケース4の方が、ケース3よりも低い結果となった。この範囲については、有スランブの内部コンクリートを施工するもので、2つのケースは同じリフトスケジュールとしているが、それより高い標高に打ち込まれるコンクリートの最高温度が、ケース4の方がケース3よりも低いことにより、このような結果になったものと考えられ、この範囲では平準化による効果が表れていると考えられる。一方、夏期打設となる標高330m～340m程度に着眼すると、ケース3とケース4で、それぞれ0.55N/mm<sup>2</sup>および0.74N/mm<sup>2</sup>と、ケース4の方が、ケース3よりも高い結果となったが、いずれのケースについても、最大主応力は低い範囲にあることが確認される。

#### ④最小ひび割れ指数の解析結果

最小ひび割れ指数の等分布図を、**図－5.6.10**に示す。また、解析の着目位置における最小ひび割れ指数と標高の関係を、**図－5.6.11**に示す。また、これらの図のうち、主要なデジタル値を抽出し、**表－5.6.5**に示す。



図－5.6.10 最小ひび割れ指数の等分布図



図－5.6.11 着目位置における最小ひび割れ指数と標高の関係

表ー5.6.5 最小ひび割れ指数の主要なデジタル値

【岩着部】		
	指数	標高 (m)
ケース3	1.90	315.5～316.5
ケース4	3.25	315.5～316.5
【標高330m～350m付近】		
	指数	標高 (m)
ケース3	3.92	334.5-335.5
ケース4	2.70	336.5-337.5

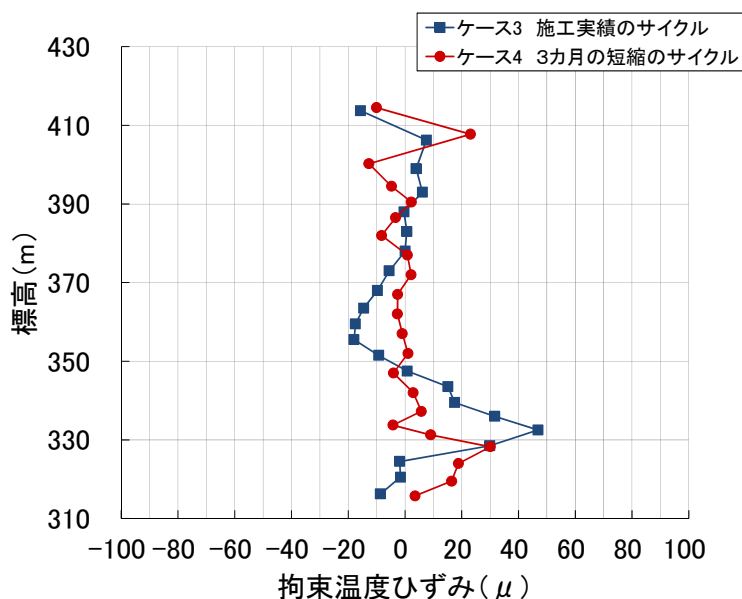
これらの図より、「ケース3：施工実績のサイクル」と、「ケース4：3ヵ月短縮のサイクル」のひび割れ指数の等分布図を比較すると、最大主応力と同様の傾向が表れていることが確認される。すなわち、岩着付近では、平準化の影響によって最大主応力が小さくなったケース4のひび割れ指数が3.23と大きくなったのに対し、ケース3は1.90であった。一方、標高330m～340m程度については、ケース3およびケース4で、それぞれ3.92および2.70となり、ケース3の方が大きくなったが、いずれのケースの最小値についても、温度ひび割れリスクに対して十分に大きな値といえる範囲にあった。

## （２）拘束度マトリックスの結果

各リフトにおける最高温度を基に、拘束度マトリックス法によって求めた拘束温度ひずみと標高の関係を図－5.6.12に示す。また、同図における主要なデジタル値を抽出し、表－5.6.6に示す。

同図より、本解析の範囲では、いずれのケースにおいても、許容拘束温度ひずみとされる  $100\mu$  よりも小さな値となった。拘束温度ひずみの最大値は、２つのケースともに標高 330m 付近に確認され、ケース 3 およびケース 4 で、それぞれ  $47\mu$  および  $30\mu$  であり、ケース 4 の方が小さな値であった。温度応力解析のひび割れ指数を確認すると、この標高における最小ひび割れ指数の最小値は、ケース 3 およびケース 4 で、それぞれ 3.92 および 2.70 であり、いずれも十分に大きな値であるものの、拘束度マトリックスの結果とは異なる傾向であった。この理由として、拘束度マトリックス法による評価では、FEM による温度応力解析よりも堤体内の温度差（平準化の程度）の影響をより大きく受けるため、ケース 3 よりも堤体内の最高温度が平準化されているケース 4 の方が、拘束温度ひずみが小さくなったものと考えられる。

このことより、高速施工のさらなる活用によって３ヵ月の工期短縮を図り、堤体内の最高温度を平準化することは、温度応力の抑制に有効であることが確認される。



図－5.6.12 拘束度マトリックスによる拘束温度ひずみと標高の関係

表－5.6.6 拘束温度ひずみの主要なデジタル値

	【標高330m付近】	
	拘束温度ひずみ ( $\mu$ )	標高 (m)
ケース3	47	332.5
ケース4	30	328.3

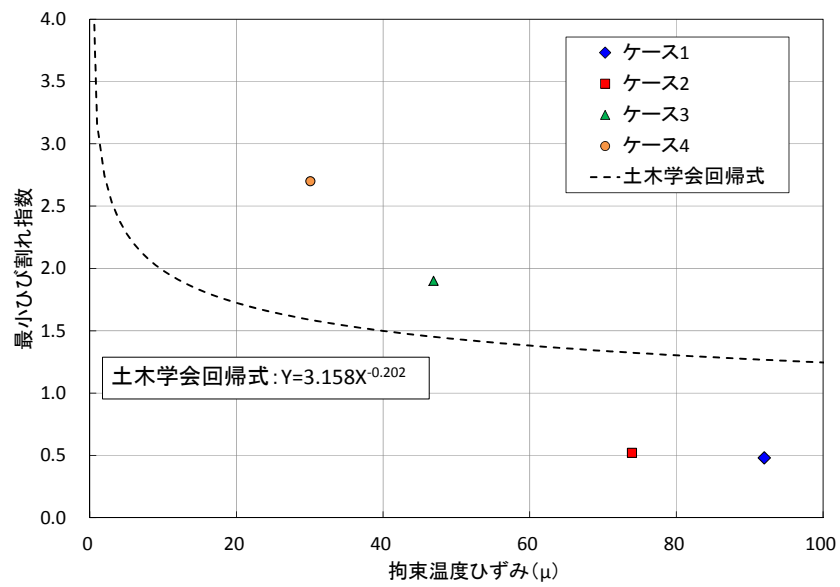
#### 5.6.4 高速施工を活用したリフトスケジュールによる温度応力抑制効果の整理

本章における検討結果を一覧にして表－5.6.7 に示す。本研究で検討している温度応力抑制工法は、従来、コンクリートの打込み温度を下げて最高温度を低減することが温度応力抑制に有効な方法とされてきたのに対し、高速施工を活用することによって堤体内における温度差を抑えて平準化を図り、温度応力を抑制しようとするものである。同表より確認されるように、「拘束温度ひずみ」および「最小ひび割れ指数」のいずれの指標においても、「最高温度の最大値」より「最大値と最小値の温度差」との相関が高くなっている。このことから、本研究で提案する堤体内温度の平準化は、ダム堤体の最高温度を低くすることよりも、温度応力の抑制に有効であることが確認される。土木学会コンクリート標準示方書[ダムコンクリート編]<sup>1)</sup>によれば、「ダムコンクリートの打上り速度が0.3m/日を大きく上回ると、温度ひび割れが発生する可能性が高くなる」と示されている。しかし、コンクリートダムのように非常にマッシブなコンクリート構造物の場合、今回のようにダム堤体全体の温度を平準化すれば、打上り速度を大きくしてもむしろ温度ひび割れの発生リスクを低減できるものと考えられる。

表－5.6.7 主要なデジタル値の一覧表

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
最高温度 最大値(℃)	35.5	33.8	35.6	29.6
最大値と最小値の温度差(℃)	12.7	11.2	9.5	3.4
拘束温度ひずみ (μ)	92	74	47	30
最小ひび割れ指数	0.48	0.52	1.90	2.70

また、同表の各ケースにおける拘束温度ひずみと最小ひび割れ指数の関係を、土木学会コンクリート標準示方書の改訂資料に示される関係式と合わせて図－5.6.13 に示す。同図より、本検討の結果は、土木学会の回帰式と、おおむね一致する傾向があることが確認される。



図ー5. 6. 13 本検討における拘束温度ひずみと最小ひび割れ指数の関係

## 5.7 第5章の結論

5章では、コンクリートダム的重要課題である温度ひび割れについて、その機構を踏まえたうえで、最新の RCD 工法による高速施工を活用した抑制方法を考案し、温度応力解析によって、その有効性を検討するとともに、実施工の実績に基づく検証を行った。

5章の検討結果を以下にまとめる。

- 1) コンクリート構造物の中でも、極めてマッシブな部材であるダム堤体は、壁状構造物に代表される他の一般的な構造物とは発生する温度応力の傾向が異なる。その特徴的な傾向は、施工が長期間に及ぶため、施工時期・季節に応じて、堤体内のコンクリートに標高方向の温度分布が発生することであり、その温度差を小さくすることによって温度応力を抑制することが可能になるものと考えられた。
- 2) 従来の温度ひび割れの抑制対策の考え方では、コンクリートの打込み速度を遅くすることが、温度ひび割れの抑制に有効とされてきたが、上記のような堤体内の標高方向の温度分布に起因する温度応力に対しては、季節による温度差を小さくする施工速度を選定することが有効と考えられる。そこで、最新の RCD 工法による高速施工を活用し、冬期施工時の打設量をできる限り多くし、温度が高くなる夏期施工時の打設量を極力少なくすることで、コンクリート堤体全体の温度の平準化を図る工法を考案した。
- 3) 最新の RCD 工法を活用して堤体温度の平準化を図る工法について、温度応力解析および拘束度マトリックス法によって検証を行った。その結果、コンクリートの打設開始および打設完了が、ほぼ同時期であるにもかかわらず、堤体内における最高温度の差を小さくすることができ、その結果として、ひび割れ指数が向上し、拘束温度ひずみが小さくなった。
- 4) 実施工において、最新の RCD 工法を活かして堤体温度の平準化を図ったダムにおける検証解析を行った。その結果、五ヶ山ダムの施工実績では、温度応力抑制を考慮した事前検討ケースに比べて、夏期打設および冬期打設のいずれの時期においても最高温度が高くなったにもかかわらず、その温度差が小さく、堤体温度の平準化が図られた。これにより温度ひび割れ発生リスクが小さくなり、拘束度マトリックス法による水平温度ひずみが、許容水平温度ひずみとして適用される  $100\mu$  に対して  $47\mu$  であることが確認された。
- 5) 五ヶ山ダムの施工実績よりも、さらに冬期の打上がり速度を高めて3ヵ月の工程短縮を図るリフトスケジュールについても解析を行った。その結果、堤体内の最高温度がさらに平準化され、拘束温度ひずみを  $30\mu$  まで低減できる結果が得られた。
- 6) 以上の結果より、最新の RCD 工法による高速施工を活用して堤体内の温度の平準化を図る工法は、コンクリートダムの温度応力抑制対策として有効であることが確認された。

## 第5章の参考文献

### 5.1 概要

- 1) 公益社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書[ダムコンクリート編]、2013.10.
- 2) 財団法人 ダム技術センター：多目的ダムの建設－平成17年版 第5巻 設計Ⅱ編、2005.6.

### 5.2 コンクリートダムにおける温度応力の発生機構

- 1) 今本啓一、閑田徹志、溝渕利明：コンクリートの初期ひび割れ対策、セメントジャーナル社、pp.37-72、2012.3.
- 2) 財団法人 ダム技術センター：多目的ダムの建設－平成17年版 第5巻 設計Ⅱ編、2005.6.

### 5.3 高速施工方法を利用した温度抑制方法

- 1) 柳川城二、永山功、河野広隆：ダム用低発熱セメントの開発(その1)、ダム技術、11-19、1996.5.
- 2) 柳川城二、永山功、梶原日出隆：ダム用低発熱セメントの開発(その2)、ダム技術、17-23、1996.10.
- 3) 山住 有巧、播田一雄、自閑茂治、谷剛：面状工法による重力式コンクリートダムの温度規制に関する解析的考察、土木学会論文集、33-42、1994.
- 4) 溝渕利明、峰村修、藤村和也、坂田昇：アーチ式ダムにおける2次クーリングが温度応力に及ぼす影響に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19(1)、pp.1513-1518、1997.6.
- 5) (財) ダム協会：コンクリートダムの施工、pp.151-153、2008.9
- 6) (財) ダム技術センター：コンクリートダムの細部技術（改訂3版）、pp.351-400、2010.7.
- 7) 中原康、横田慎一、平田重信：超かた練りコンクリートの配合の考え方とコンシステンシー、セメント・コンクリート、pp.12-18、1979.2.
- 8) 大藪勝美、永山 功、小林政登：RCD工法によるコンクリートダムの温度規制、土木技術資料、Vo1.29、No.11、1987.11.

### 5.4 実規模ダムでの温度応力抑制方法の検証

- 1) 公益社団法人 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書[設計編]、2012.
- 2) 宇部三菱セメント株式会社：技術資料 第6版
- 3) 社団法人 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008、2008.11.

### 5.6 実施工よりもさらに工期短縮した際の温度応力の検証

- 1) 公益社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書[ダムコンクリート編]、2013.10.

### 5.7 第5章の結論

- 1) 公益社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書[ダムコンクリート編]、2013.10.

付表－1 使用材料

材料名	記号	製品名	製造元	摘要
セメント	MF20	MF20 (中庸熟フライッシュセメント)	A セメント	フライッシュ混合率 20%、ﾌﾞﾚﾐｯｸｽ品 密度：2.98g/cm <sup>3</sup> 、
	MF30	MF30 (中庸熟フライッシュセメント)	U セメント	フライッシュ混合率 30%、ﾌﾞﾚﾐｯｸｽ品 密度：2.85g/cm <sup>3</sup> 、
細骨材	S	五ヶ山ｸﾞﾛﾝｸﾘｰﾄ用 砕砂	五ヶ山ダム用 骨材製造設備	表乾密度：2.61g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	五ヶ山ｸﾞﾛﾝｸﾘｰﾄ用 砕石 G8040	〃	表乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup>
	G2	五ヶ山ｸﾞﾛﾝｸﾘｰﾄ用 砕石 G4020	〃	表乾密度：2.62g/cm <sup>3</sup>
	G3	五ヶ山ｸﾞﾛﾝｸﾘｰﾄ用 砕石 G2005	〃	表乾密度：2.61g/cm <sup>3</sup>
練混ぜ水	W	五ヶ山河川水 (室内試験では水道水)	－	
AE 減水剤	AD	F-R	F 社製	遅延型ｸﾞﾛﾝｸﾞﾐﾝ酸塩とｵｷｼｶﾙｼｳﾞﾝ酸 塩の複合体
AE 剤 (空気量調整剤)	AE	F-AE-4	F 社製	樹脂酸塩

付表－2 コンクリートの配合

配合 名	G <sub>max</sub> (mm)	スランプ <sup>°</sup> の範囲 (cm)	V C 値 の範囲 (秒)	空気量 の範囲 (%)	水結合 材比 W/C (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
							水 W	結合材		細骨 材 S	粗骨材			Ad
								セメント C	フライ ツシュ F		8040 G1	4020 G2	200 5 G3	
A	80	3±1		3.5±1	53.2	28.0	117	154	66	568	588	440	440	2.20
								220			1468			
B1	80	1.5±1	20±10	1.5±1	77.7	30.0	101	104	26	664	624	466	466	1.30
								130			1556			
B2	80	3±1		3.5±1	75.0	30.0	120	112	48	623	585	437	437	1.60
								160			1459			
C1	80	6±1		3.5±1	52.1	29.0	126	169	73	571	561	421	421	2.42
								242			1403			
C2	40	8±2.5		4.0±1	52.1	42.0	163	219	94	748	—	517	517	3.13
								313			1034			
D	40	8±2.5		4.0±1	44.1	39.0	167	265	114	667	—	522	522	3.79
								379			1044			
高流 動	20	65±5		4.0±1	45.0	53.3	180	280	120	883	—	—	774	6.00*
								400			7474			

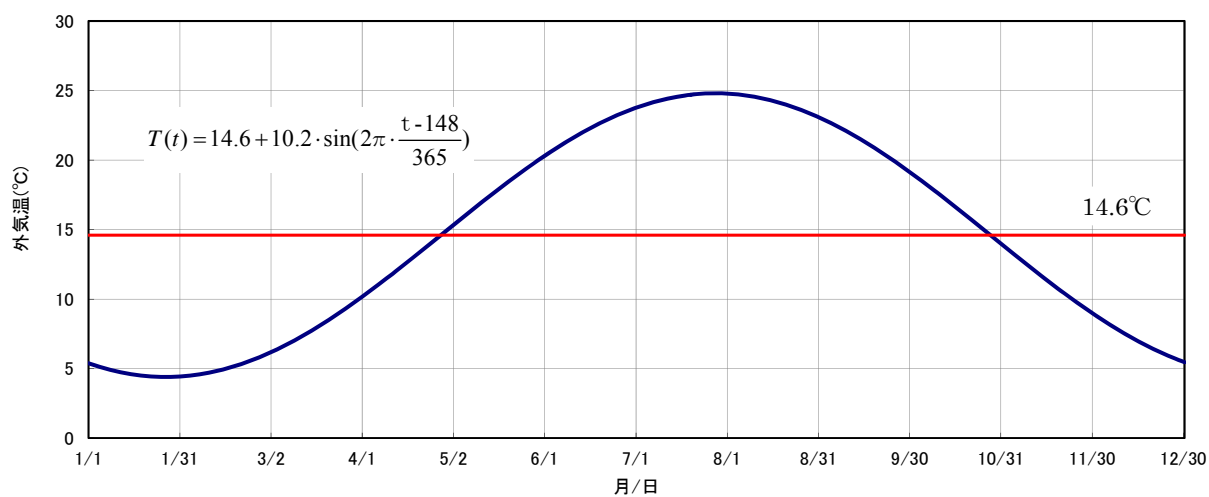
\*高性能 AE 減水剤を使用

外気温

外気温は、付式)51 に示すダムサイト近傍にて観測された 1999 年から 2008 年（10 年間）の外気温の計測値を基にした回帰式を用いた。

$$T(t) = 14.6 + 10.2 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t-148}{365}\right) \quad \cdots \text{付式)1}$$

(年平均気温：14.6℃)



付図－1 年間の外気温の推移 回帰値

付表-3 リフトスケジュール（標準サイクル）

リフト	打設日	リフト厚 (m)	開始 EL	終了 EL	リフト	打設日	リフト厚 (m)	開始 EL	終了 EL
1	2014/10/14	0.50	314.0	314.5	55	2016/1/5	1.00	367.5	368.5
2	2014/10/18	1.00	314.5	315.5	56	2016/1/14	1.00	368.5	369.5
3	2014/10/21	1.00	315.5	316.5	57	2016/1/21	1.00	369.5	370.5
4	2014/10/28	1.00	316.5	317.5	58	2016/1/29	1.00	370.5	371.5
5	2014/11/4	1.00	317.5	318.5	59	2016/2/5	1.00	371.5	372.5
6	2014/11/11	1.00	318.5	319.5	60	2016/2/15	1.00	372.5	373.5
7	2014/11/15	1.00	319.5	320.5	61	2016/2/22	1.00	373.5	374.5
8	2014/11/21	1.00	320.5	321.5	62	2016/2/29	1.00	374.5	375.5
9	2014/12/2	1.00	321.5	322.5	63	2016/3/7	1.00	375.5	376.5
10	2014/12/9	1.00	322.5	323.5	64	2016/3/15	1.00	376.5	377.5
11	2014/12/18	1.00	323.5	324.5	65	2016/3/24	1.00	377.5	378.5
12	2015/1/6	1.00	324.5	325.5	66	2016/3/31	1.00	378.5	379.5
13	2015/1/15	1.00	325.5	326.5	67	2016/4/7	1.00	379.5	380.5
14	2015/1/22	1.00	326.5	327.5	68	2016/4/14	1.00	380.5	381.5
15	2015/1/29	1.00	327.5	328.5	69	2016/4/18	1.00	381.5	382.5
16	2015/2/6	1.00	328.5	329.5	70	冬期施工期間 (11/15~3/15)			
17	2015/2/13	1.00	329.5	330.5	71				
18	2015/2/21	1.00	330.5	331.5	72	2016/5/10	1.00	384.5	385.5
19	2015/3/3	1.00	331.5	332.5	73	2016/5/17	1.00	385.5	386.5
20	2015/3/10	1.00	332.5	333.5	74	2016/5/23	1.00	386.5	387.5
21	2015/3/19	1.00	333.5	334.5	75	2016/5/30	1.00	387.5	388.5
22	2015/3/27	1.00	334.5	335.5	76	2016/6/4	1.00	388.5	389.5
23	2015/4/4	1.00	335.5	336.5	77	2016/6/9	1.00	389.5	390.5
24	2015/4/13	1.00	336.5	337.5	78	2016/6/16	1.00	390.5	391.5
25	2015/4/18	1.00	337.5	338.5	79	2016/6/21	1.00	391.5	392.5
26	2015/4/27	1.00	338.5	339.5	80	2016/6/28	1.00	392.5	393.5
27	2015/5/8	1.00	339.5	340.5	81	2016/7/5	1.00	393.5	394.5
28	2015/5/15	1.00	340.5	341.5	82	2016/7/11	1.00	394.5	395.5
29	2015/5/21	1.00	341.5	342.5	83	2016/7/15	1.50	395.5	397.0
30	2015/5/29	1.00	342.5	343.5	84	2016/7/25	1.50	397.0	398.5
31	2015/6/6	1.00	343.5	344.5	85	2016/8/6	1.50	398.5	400.0
32	2015/6/15	1.00	344.5	345.5	86	2016/8/19	1.50	400.0	401.5
33	2015/6/22	1.00	345.5	346.5	87	夏期施工期間 (7/1~8/31)			
34	2015/6/30	1.00	346.5	347.5	88				
35	2015/7/7	1.00	347.5	348.5	89	2016/9/17	1.50	404.5	406.0
36	2015/7/21	1.00	348.5	349.5	90	2016/9/28	1.50	406.0	407.5
37	2015/7/30	1.00	349.5	350.5	91	2016/10/5	1.50	407.5	409.0
38	2015/8/6	1.00	350.5	351.5	92	2016/10/13	1.50	409.0	410.5
39	2015/8/21	1.00	351.5	352.5	93	2016/10/17	1.50	410.5	412.0
40	2015/8/28	1.00	352.5	353.5	94	2016/10/25	1.50	412.0	413.5
41	2015/9/5	1.00	353.5	354.5	95	2016/11/5	1.50	413.5	415.0
42	2015/9/14	1.00	354.5	355.5	96	2016/11/14	1.50	415.0	416.5
43	2015/9/24	1.00	355.5	356.5	97	2016/11/22	1.00	416.5	417.5
44	2015/10/3	1.00	356.5	357.5					
45	2015/10/13	1.00	357.5	358.5					
46	2015/10/19	1.00	358.5	359.5					
47	2015/10/27	1.00	359.5	360.5					
48	2015/11/4	1.00	360.5	361.5					
49	2015/11/10	1.00	361.5	362.5					
50	2015/11/19	1.00	362.5	363.5					
51	2015/11/27	1.00	363.5	364.5					
52	2015/12/5	1.00	364.5	365.5					
53	2015/12/14	1.00	365.5	366.5					
54	2015/12/21	1.00	366.5	367.5					

・ RCD 施工区間 4 リフト (2014/10/28) ~ 82 リフト (2016/7/11)

付表-4 リフトスケジュール（温度応力の抑制を考慮したサイクル）

リフト	打設日	リフト厚 (m)	開始 EL	終了 EL	リフト	打設日	リフト厚 (m)	開始 EL	終了 EL
1	2014/10/14	0.50	314.0	314.5	61	2016/1/7	1.00	368.5	369.5
2	2014/10/20	1.00	314.5	315.5	62	2016/1/15	1.00	369.5	370.5
3	2014/10/28	1.00	315.5	316.5	63	2016/1/22	1.00	370.5	371.5
4	2014/11/6	1.00	316.5	317.5	64	2016/1/29	1.00	371.5	372.5
5	2014/11/14	1.00	317.5	318.5	65	2016/2/4	1.00	372.5	373.5
6	2014/11/21	1.00	318.5	319.5	66	2016/2/9	1.00	373.5	374.5
7	2014/11/29	1.00	319.5	320.5	67	2016/2/18	1.00	374.5	375.5
8	2014/12/6	1.00	320.5	321.5	68	2016/2/23	1.00	375.5	376.5
9	2014/12/15	1.00	321.5	322.5	69	2016/3/2	1.00	376.5	377.5
10	2014/12/20	1.00	322.5	323.5	70	2016/3/7	1.00	377.5	378.5
11	2015/1/8	1.00	323.5	324.5	71	2016/3/14	1.00	378.5	379.5
12	2015/1/17	1.00	324.5	325.5	72	2016/3/19	1.00	379.5	380.5
13	2015/1/27	1.00	325.5	326.5	73	2016/3/28	1.00	380.5	381.5
14	2015/2/6	1.00	326.5	327.5	74	2016/4/4	1.00	381.5	382.5
15	2015/2/13	1.00	327.5	328.5	75	2016/4/11	1.00	382.5	383.5
16	2015/2/21	1.00	328.5	329.5	76	冬期施工期間 (11/15~3/15)			
17	2015/3/3	1.00	329.5	330.5	77				
18	2015/3/9	1.00	330.5	331.5	78	2016/4/28	1.00	385.5	386.5
19	2015/3/17	1.00	331.5	332.5	79	2016/5/9	1.00	386.5	387.5
20	2015/3/24	1.00	332.5	333.5	80	2016/5/16	1.00	387.5	388.5
21	2015/4/2	1.00	333.5	334.5	81	2016/5/21	1.00	388.5	389.5
22	2015/4/7	1.00	334.5	335.5	82	2016/5/27	1.00	389.5	390.5
23	2015/4/16	1.00	335.5	336.5	83	2016/6/3	1.00	390.5	391.5
24	2015/4/21	1.00	336.5	337.5	84	2016/6/8	1.00	391.5	392.5
25	2015/4/30	1.00	337.5	338.5	85	2016/6/14	1.00	392.5	393.5
26	2015/5/11	1.00	338.5	339.5	86	2016/6/20	1.00	393.5	394.5
27	2015/5/16	1.00	339.5	340.5	87	2016/6/27	1.00	394.5	395.5
28	2015/5/22	1.00	340.5	341.5	88	2016/7/6	1.00	395.5	396.5
29	2015/5/29	1.00	341.5	342.5	89	2016/7/16	1.50	396.5	398.0
30	2015/6/5	1.00	342.5	343.5	90	2016/7/30	1.50	398.0	399.5
31	2015/6/11	1.00	343.5	344.5	91	2016/8/8	1.50	399.5	401.0
32	2015/6/18	1.00	344.5	345.5	92	2016/8/20	1.50	401.0	402.5
33	2015/6/23	1.00	345.5	346.5	93	2016/8/30	1.50	402.5	404.0
34	2015/6/30	1.00	346.5	347.5	94	夏期施工期間 (7/1~8/31)			
35	2015/7/4	0.50	347.5	348.0	95				
36	2015/7/10	0.50	348.0	348.5	96	2016/9/30	1.50	407.0	408.5
37	2015/7/18	0.50	348.5	349.0	97	2016/10/11	1.50	408.5	410.0
38	2015/7/24	0.50	349.0	349.5	98	2016/10/18	1.50	410.0	411.5
39	2015/7/30	0.50	349.5	350.0	99	2016/10/27	1.50	411.5	413.0
40	2015/8/4	0.50	350.0	350.5	100	2016/11/5	1.50	413.0	414.5
41	2015/8/7	0.50	350.5	351.0	101	2016/11/14	1.50	414.5	416.0
42	2015/8/20	0.50	351.0	351.5	102	2016/11/21	1.50	416.0	417.5
43	2015/8/25	0.50	351.5	352.0					
44	2015/8/28	0.50	352.0	352.5					
45	2015/9/5	1.00	352.5	353.5					
46	2015/9/11	1.00	353.5	354.5					
47	2015/9/19	1.00	354.5	355.5					
48	2015/9/29	1.00	355.5	356.5					
49	2015/10/8	1.00	356.5	357.5					
50	2015/10/15	1.00	357.5	358.5					
51	2015/10/22	1.00	358.5	359.5					
52	2015/10/28	1.00	359.5	360.5					
53	2015/11/5	1.00	360.5	361.5					
54	2015/11/10	1.00	361.5	362.5					
55	2015/11/19	1.00	362.5	363.5					
56	2015/11/26	1.00	363.5	364.5					
57	2015/12/4	1.00	364.5	365.5					
58	2015/12/10	1.00	365.5	366.5					
59	2015/12/18	1.00	366.5	367.5					
60	2015/12/24	1.00	367.5	368.5					

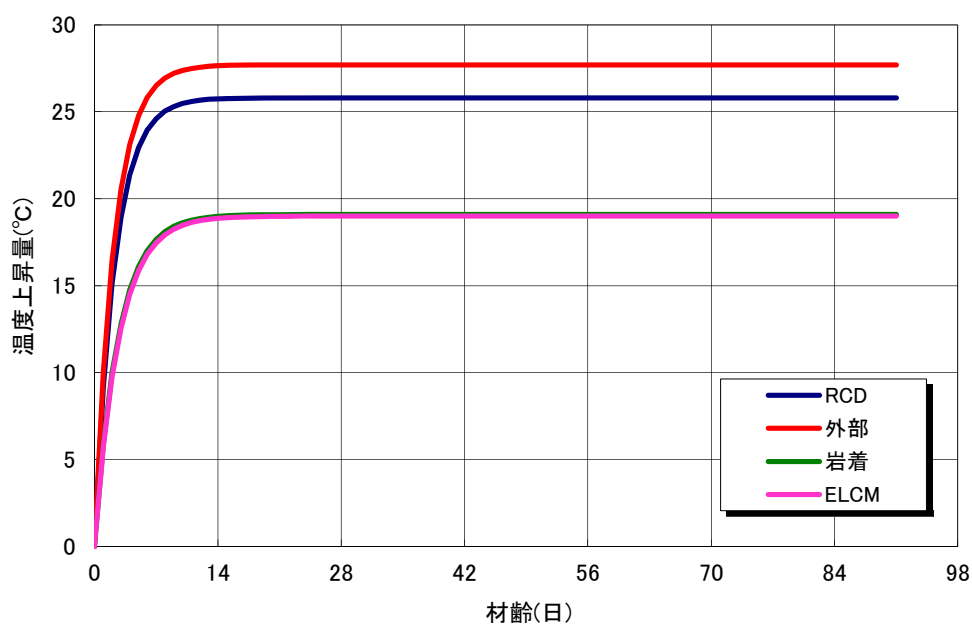
・RCD 施工区間 4 リフト（2014/11/6）～88 リフト（2016/7/6）

付表－5 解析物性値一覧

項目	コンクリート					摘 要
	A 配合 (外部・岩着部)	B1 配合(RCD)	B2 配合(拡張レバー)	C 配合(構造)	D 配合(高流動)	
セメント種類	MF30	MF20	MF30	MF30	MF30	
打込み温度(℃)	$Y=11.1 \times \sin(2\pi/365) \times (t-148) + 16.3$					(25℃以上→25℃、12℃以下→12℃)
熱膨張係数(1/℃)	$10 \times 10^{-6}$					土木学会コンクリート標準示方書 <sup>1)</sup>
表面熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> ℃)	堤体上下流側(メタルフォーム)：14 堤体上面(湛水養生)：8 監査廊内(露出面)：14					土木学会コンクリート標準示方書 <sup>1)</sup>
外気温(℃)	$Y=10.2 \times \sin(2\pi/365) \times (t-148) + 14.6$					※ <sub>1</sub>
断熱温度上昇式 (20℃)	$Q=25.8(1-e^{-0.44t})$	$Q=19.0(1-e^{-0.36t})$	$Q=19.1(1-e^{-0.37t})$	$Q=27.7(1-e^{-0.45t})$	$Q=45.7(1-e^{-0.62t})$	宇部三菱セメント技術資料(5版) <sup>2)</sup>
熱伝導率(W/m℃)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	開示資料より
比熱(J/kg℃)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	開示資料より
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2373	2451	2362	2364	2324	特記仕様書示方配合より
弾性係数( N/mm <sup>2</sup> )	$E_e(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)}$	$E_e(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)}$	$E_e(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)}$	$E_e(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)}$	$E_e(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)}$	土木学会コンクリート標準示方書 <sup>1)</sup>
ポアソン比	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	土木学会コンクリート標準示方書 <sup>1)</sup>
圧縮強度( N/mm <sup>2</sup> )	別紙参照					宇部三菱セメント技術資料(5版) <sup>2)</sup>
引張強度( N/mm <sup>2</sup> )	$f_{tk}(t) = 0.44 \times f'_c(t)^{0.5}$	$f_{tk}(t) = 0.44 \times f'_c(t)^{0.5}$	$f_{tk}(t) = 0.44 \times f'_c(t)^{0.5}$	$f_{tk}(t) = 0.44 \times f'_c(t)^{0.5}$	$f_{tk}(t) = 0.44 \times f'_c(t)^{0.5}$	土木学会コンクリート標準示方書 <sup>1)</sup>

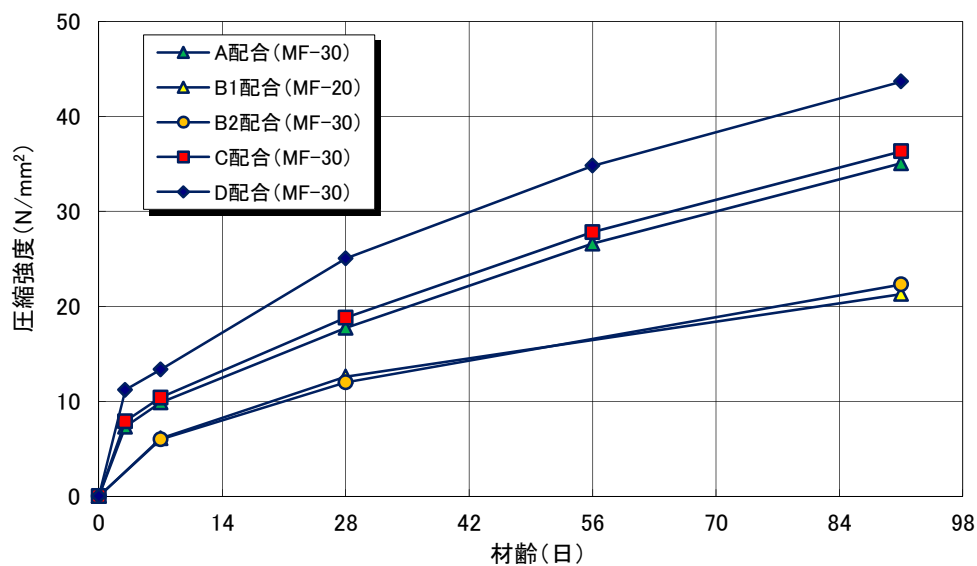
項目	岩盤	摘 要
初期温度(℃)	14.6	年平均気温
熱伝達(W/m <sup>2</sup> ℃)	3.45	開示資料より
比熱(J/kg℃)	0.8	開示資料より
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2650	開示資料より
弾性係数( N/mm <sup>2</sup> )	1900	開示資料より
ポアソン比	0.3	開示資料より
熱膨張係数(1/℃)	$10 \times 10^{-6}$	JCI ひび割れ制御指針 <sup>3)</sup>

## 断熱温度上昇特性



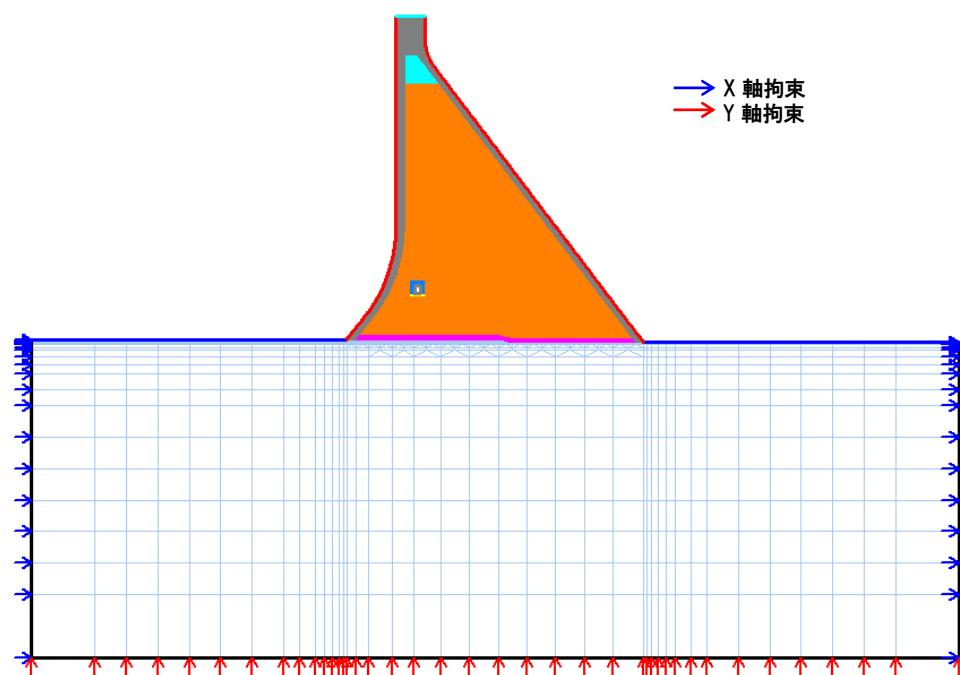
付図－2 配合別断熱温度上昇特性（参考文献 2）を基に作成）

## コンクリートの圧縮強度



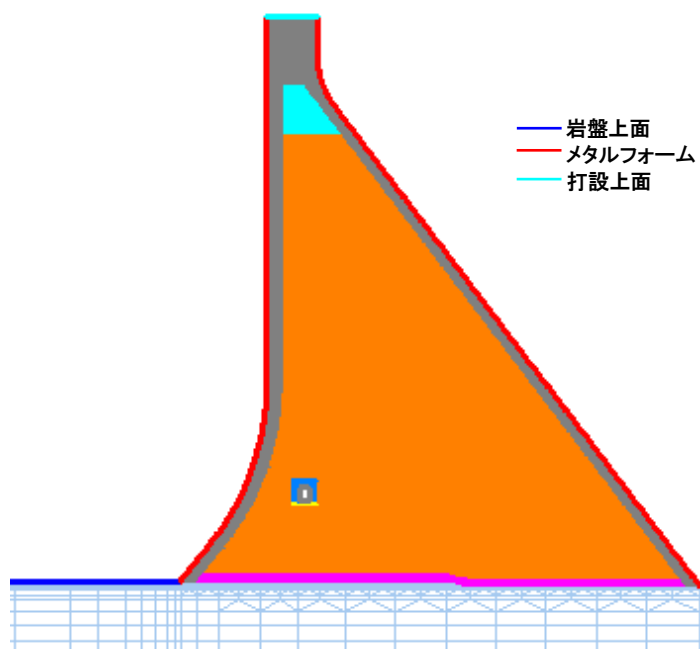
付図－3 配合別材齢と圧縮強度の関係（参考文献 2）を基に作成）

## 拘束条件



付図－4 拘束条件

## 表面熱伝達率



付図－5 表面熱伝達率

付表－6 拘束度マトリクス（22 層×22 層）

		温度変化を与える層番号																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
応力を求める層番号	1	820	-198	-178	-122	-70	-32	-7	7	14	15	12	8	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	-177	863	-149	-139	-102	-63	-33	-12	0	6	7	6	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	-156	-139	886	-124	-132	-106	-68	-36	-14	-1	4	5	4	3	1	1	0	0	0	0	0	0
	4	-118	-126	-113	887	-122	-133	-105	-64	-32	-11	0	4	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0
	5	-80	-100	-115	-107	888	-126	-136	-104	-60	-27	-7	1	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0
	6	-45	-68	-96	-115	-110	891	-133	-139	-100	-52	-20	-5	1	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	7	-19	-39	-66	-96	-118	-117	880	-144	-142	-93	-42	-15	-3	1	2	1	1	0	0	0	0	0
	8	0	-17	-33	-66	-97	-122	-126	866	-157	-140	-81	-33	-11	-2	1	1	1	0	0	0	0	0
	9	11	-2	-18	-38	-63	-96	-126	-138	846	-171	-136	-66	-24	-8	-2	1	1	0	0	0	0	0
	10	16	7	-4	-18	-36	-60	-96	-129	-153	814	-187	-115	-46	-17	-6	-1	1	0	0	0	0	0
	11	14	9	3	-4	-14	-28	-50	-83	-129	-166	808	-192	-123	-50	-16	-2	2	1	0	0	0	0
	12	10	7	4	1	-4	-11	-23	-43	-76	-129	-173	798	-199	-127	-46	-8	3	3	1	0	0	0
	13	6	5	3	2	0	-3	-8	-18	-36	-66	-125	-186	778	-211	-125	-36	1	6	2	0	0	0
	14	3	2	2	2	1	0	-1	-4	-10	-21	-47	-108	-202	740	-232	-125	-22	12	7	1	0	0
	15	2	2	2	2	2	2	2	1	0	-4	-15	-48	-115	-210	722	-244	-109	-4	11	2	0	0
	16	1	1	1	1	1	2	2	3	4	4	2	-8	-39	-114	-224	680	-257	-84	8	5	0	0
	17	0	0	0	1	1	1	2	3	4	6	8	7	0	-30	-108	-241	633	-251	-42	5	1	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	6	5	-4	-74	-256	588	-264	-26	13	-1
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	4	6	9	7	-56	-261	531	-258	11	4
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	11	19	-33	-290	520	-234	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	7	19	-272	478	-235
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	5	97	-503	405

E<sub>C</sub>/E<sub>R</sub>=6×10<sup>-3</sup>

付表-7 リフトスケジュール（Ⅰ. 施工実績の工程）

リフト	打設日	リフト厚 (m)	開始 EL	終了 EL	リフト	打設日	リフト厚 (m)	開始 EL	終了 EL
1	2014/2/17	0.5	314.0	314.5	61	2015/2/26	1.0	372.5	373.5
2	2014/3/10	1.0	314.5	315.5	62	2015/3/2	1.0	373.5	374.5
3	2014/3/13	1.0	315.5	316.5	63	2015/3/8	1.0	374.5	375.5
4	2014/3/17	1.0	316.5	317.5	64	2015/3/14	1.0	375.5	376.5
5	2014/3/21	1.0	317.5	318.5	65	2015/3/18	1.0	376.5	377.5
6	2014/3/26	1.0	318.5	319.5	66	2015/3/23	1.0	377.5	378.5
7	2014/3/31	1.0	319.5	320.5	67	2015/3/26	1.0	378.5	379.5
8	2014/4/7	1.0	320.5	321.5	68	2015/4/1	1.0	379.5	380.5
9	2014/4/15	1.0	321.5	322.5	69	2015/4/5	1.0	380.5	381.5
10	2014/4/21	1.0	322.5	323.5	70	2015/4/11	1.0	381.5	382.5
11	2014/4/28	1.0	323.5	324.5	71	2015/4/17	1.0	382.5	383.5
12	2014/5/14	1.0	324.5	325.5	72	2015/4/21	1.0	383.5	384.5
13	2014/5/21	1.0	325.5	326.5	73	2015/4/26	1.0	384.5	385.5
14	2014/5/28	1.0	326.5	327.5	74	2015/5/4	1.0	385.5	386.5
15	2014/6/3	夏期施工期間(7/1~8/31)			75	2015/5/11	1.0	386.5	387.5
16	2014/6/11				76	2015/5/16	1.0	387.5	388.5
17	2014/6/21	1.0	329.5	330.5	77	2015/5/21	1.0	388.5	389.5
18	2014/6/23	1.0	330.5	331.5	78	2015/5/27	1.0	389.5	390.5
19	2014/6/27	1.0	331.5	332.5	79	2015/6/1	1.0	390.5	391.5
20	2014/7/4	1.0	332.5	333.5	80	2015/6/6	1.0	391.5	392.5
21	2014/7/13	1.0	333.5	334.5	81	2015/6/9	1.0	392.5	393.5
22	2014/7/21	1.0	334.5	335.5	82	2015/6/13	1.0	393.5	394.5
23	2014/7/24	1.0	335.5	336.5	83	2015/6/20	1.0	394.5	395.5
24	2014/7/31	0.5	336.5	337.0	84	2015/6/30	1.0	395.5	396.5
25	2014/8/20	0.5	337.0	337.5	85	2015/7/11	1.5	396.5	398.0
26	2014/9/3	1.0	337.5	338.5	86	2015/7/20	1.5	398.0	399.5
27	2014/9/7	1.0	338.5	339.5	87	2015/8/17	1.5	399.5	401.0
28	2014/9/12	1.0	339.5	340.5	88	2015/8/30	1.5	401.0	402.5
29	2014/9/18	1.0	340.5	341.5	89	2015/9/15	1.5	402.5	404.0
30	2014/9/21	1.0	341.5	342.5	90	2015/9/26	1.5	404.0	405.5
31	2014/9/28	1.0	342.5	343.5	91	2015/10/4	1.5	405.5	407.0
32	2014/10/2	1.0	343.5	344.5	92	2015/10/17	1.5	407.0	408.5
33	2014/10/5	1.0	344.5	345.5	93	2015/10/26	1.5	408.5	410.0
34	2014/10/10	1.0	345.5	346.5	94	2015/11/3	1.5	410.0	411.5
35	2014/10/13	1.0	346.5	347.5	95	2015/11/15	1.5	411.5	413.0
36	2014/10/19	1.0	347.5	348.5	96	2015/11/23	1.5	413.0	414.5
37	2014/10/25	1.0	348.5	349.5	97	2015/12/2	1.5	414.5	416.0
38	2014/11/3	冬期施工期間(11/15~3/15)			98	2015/12/11	1.5	416.0	417.5
39	2014/11/10								
40	2014/11/5	1.0	351.5	352.5					
41	2014/11/11	1.0	352.5	353.5					
42	2014/11/15	1.0	353.5	354.5					
43	2014/11/20	1.0	354.5	355.5					
44	2014/11/26	1.0	355.5	356.5					
45	2014/11/30	1.0	356.5	357.5					
46	2014/12/5	1.0	357.5	358.5					
47	2014/12/11	1.0	358.5	359.5					
48	2014/12/15	1.0	359.5	360.5					
49	2014/12/20	1.0	360.5	361.5					
50	2014/12/25	1.0	361.5	362.5					
51	2015/1/7	1.0	362.5	363.5					
52	2015/1/10	1.0	363.5	364.5					
53	2015/1/15	1.0	364.5	365.5					
54	2015/1/21	1.0	365.5	366.5					
55	2015/1/25	1.0	366.5	367.5					
56	2015/1/30	1.0	367.5	368.5					
57	2015/2/4	1.0	368.5	369.5					
58	2015/2/9	1.0	369.5	370.5					
59	2015/2/16	1.0	370.5	371.5					
60	2015/2/22	1.0	371.5	372.5					

- ・低標高部(EL.315.5~EL.328.5)拡張レヤー施工区間:3 リフト(2014/3/13)~15 リフト(2014/6/3)
- ・RCD 施工区間:16 リフト(2014/6/11)~84 リフト(2015/6/30)

付表－8 リフトスケジュール（Ⅱ. 3ヵ月の短縮工程）

リフト	打設日	リフト厚 (m)	開始 EL	終了 EL	リフト	打設日	リフト厚 (m)	開始 EL	終了 EL
1	2014/2/17	0.5	314.0	314.5	61	2015/1/6	1.0	366.5	367.5
2	2014/3/10	1.0	314.5	315.5	62	2015/1/8	1.0	367.5	368.5
3	2014/3/13	1.0	315.5	316.5	63	2015/1/10	1.0	368.5	369.5
4	2014/3/17	1.0	316.5	317.5	64	2015/1/12	1.0	369.5	370.5
5	2014/3/21	1.0	317.5	318.5	65	2015/1/14	1.0	370.5	371.5
6	2014/3/26	1.0	318.5	319.5	66	2015/1/16	1.0	371.5	372.5
7	2014/3/31	1.0	319.5	320.5	67	2015/1/18	1.0	372.5	373.5
8	2014/4/7	1.0	320.5	321.5	68	2015/1/20	1.0	373.5	374.5
9	2014/4/15	1.0	321.5	322.5	69	2015/1/22	1.0	374.5	375.5
10	2014/4/21	1.0	322.5	323.5	70	2015/1/24	1.0	375.5	376.5
11	2014/4/28	1.0	323.5	324.5	71	2015/1/26	1.0	376.5	377.5
12	2014/5/5	1.0	324.5	325.5	72	2015/1/28	1.0	377.5	378.5
13	2014/5/21	1.0	325.5	326.5	73	2015/1/30	1.0	378.5	379.5
14	2014/5/28	1.0	326.5	327.5	74	2015/2/3	1.0	379.5	380.5
15	2014/6/3	1.0	327.5	328.5	75	2015/2/7	1.0	380.5	381.5
16	2014/6/10	0.5	328.5	329.0	76	2015/2/11	1.0	381.5	382.5
17	2014/6/17	0.5	329.0	329.5	77	2015/2/15	1.0	382.5	383.5
18	2014/6/24	0.5	329.5	330.0	78	2015/2/19	1.0	383.5	384.5
19	2014/7/4	0.5	330.0	330.5	79	2015/2/23	1.0	384.5	385.5
20	2014/7/14	0.5	330.5	331.0	80	2015/2/27	1.0	385.5	386.5
21	2014/7/24	0.5	331.0	331.5	81	2015/3/3	1.0	386.5	387.5
22	2014/8/3	0.5	331.5	332.0	82	2015/3/7	1.0	387.5	388.5
23	2014/8/13	0.5	332.0	332.5	83	2015/3/11	1.0	388.5	389.5
24	2014/8/23	0.5	332.5	333.0	84	2015/3/15	1.0	389.5	390.5
25	2014/9/2	0.5	333.0	333.5	85	2015/3/19	1.0	390.5	391.5
26	2014/9/9	0.5	333.5	334.0	86	2015/3/23	1.0	391.5	392.5
27	2014/9/16	0.5	334.0	334.5	87	2015/3/27	1.0	392.5	393.5
28	2014/9/23	0.5	334.5	335.0	88	2015/3/31	1.0	393.5	394.5
29	2014/9/30	0.5	335.0	335.5	89	2015/4/4	1.0	394.5	395.5
30	2014/10/5	1.0	335.5	336.5	90	2015/4/8	1.0	395.5	396.5
31	2014/10/10	1.0	336.5	337.5	91	2015/4/19	1.5	396.5	398.0
32	2014/10/15	1.0	337.5	338.5	92	2015/4/28	1.5	398.0	399.5
33	2014/10/20	1.0	338.5	339.5	93	2015/5/26	1.5	399.5	401.0
34	2014/10/25	1.0	339.5	340.5	94	2015/6/8	1.5	401.0	402.5
35	2014/11/3	1.0	340.5	341.5	95	2015/6/24	1.5	402.5	404.0
36	2014/11/10	1.0	341.5	342.5	96	2015/7/5	1.5	404.0	405.5
37	2014/11/17	1.0	342.5	343.5	97	2015/7/13	1.5	405.5	407.0
38	2014/11/11	1.0	343.5	344.5	98	2015/7/26	1.5	407.0	408.5
39	2014/11/15	1.0	344.5	345.5	99	2015/8/4	1.5	408.5	410.0
40	2014/11/19	1.0	345.5	346.5	100	2015/8/12	1.5	410.0	411.5
41	2014/11/23	1.0	346.5	347.5	101	2015/8/24	1.5	411.5	413.0
42	2014/11/27	1.0	347.5	348.5	102	2015/9/1	1.5	413.0	414.5
43	2014/12/1	1.0	348.5	349.5	103	2015/9/10	1.5	414.5	416.0
44	2014/12/3	1.0	349.5	350.5	104	2015/9/19	1.5	416.0	417.5
45	2014/12/5	1.0	350.5	351.5					
46	2014/12/7	1.0	351.5	352.5					
47	2014/12/9	1.0	352.5	353.5					
48	2014/12/11	1.0	353.5	354.5					
49	2014/12/13	1.0	354.5	355.5					
50	2014/12/15	1.0	355.5	356.5					
51	2014/12/17	1.0	356.5	357.5					
52	2014/12/19	1.0	357.5	358.5					
53	2014/12/21	1.0	358.5	359.5					
54	2014/12/23	1.0	359.5	360.5					
55	2014/12/25	1.0	360.5	361.5					
56	2014/12/27	1.0	361.5	362.5					
57	2014/12/29	1.0	362.5	363.5					
58	2014/12/31	1.0	363.5	364.5					
59	2015/1/2	1.0	364.5	365.5					
60	2015/1/4	1.0	365.5	366.5					

- ・低標高部(EL.315.5～EL.328.5)拡張レヤー施工区間:3 リフト(2014/3/13)～15 リフト(2014/6/3)
- ・RCD 施工区間:16 リフト(2014/6/10)～90 リフト(2015/4/8)



## 第 6 章 結 論



## 第6章 結 論

最近では、内部コンクリートとして RCD 用コンクリートを先行して打設し、その後外部コンクリートを独立して打設していく工法（巡航 RCD 工法）が開発され、今後の RCD の標準工法となっていくものと思われ、大幅な工期短縮が可能となる。最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）では、従来の RCD 工法に比べコンクリートの打設速度が上がり、1.5～2.0 倍程度となる。このことから、従来の運搬方法を併用して運搬能力を上げてても十分な運搬能力を確保できない場合があり、運搬能力からコンクリート打設速度が制約されることが考えられた。そこで、運搬能力がさらに向上するコンクリートの運搬方法の開発を目的として、パイプを用いてコンクリートを高所から低所へ運搬する SP-TOM（Special Pipe TranspOrtation Method）を考案し、実施工に適用した。

また、最新の RCD 工法を適用した場合、従来の RCD 工法と比べて打設速度が速くなることから、さらに温度ひび割れの発生が懸念された。そこで、最新の RCD 工法の特長を活かして、従来の RCD 工法で施工するよりも温度ひび割れを抑制する工法を考案した。

これらの開発にあたって、各種実験および解析を行い、ダム施工現場に適用した結果、本研究において以下の結論が得られた。

各章で得られた結論の要約を示すとともに、今後の課題と期待を述べて本論文の結論とする。

第2章では、筆者が直接携わったコンクリートダム4ダムと技術指導したコンクリートダム7ダム、計11ダムを対象に、ダムの概要と技術的な内容について整理した。

- 1) 川治ダムでは、主にアーチダムとして品質上留意すべき基礎岩盤を痛めないように、基礎掘削工法としてプレスブリット工法を採用し、品質の向上とともに工程短縮・コスト低減・安全性確保についても効果が得られた。
- 2) 巖木ダムでは、主に熟練した技能と多大な労力を必要としていた岩盤面処理に対する機械化による省力化と、基礎処理工に対するコンピュータ管理システムによる IT 化を推進した。
- 3) 宮ヶ瀬ダムでは、主に合理化施工方法として開発された RCD 工法の集大成として、各種機械化・プレキャスト化に努めるとともに、粘土鉱物が含有している骨材に対して凝結遅延剤を混和剤とすることによってコンシステンシーと強度の確保に寄与した。
- 4) 奥三面ダムでは、主にダム初適用となる高流動コンクリートの配合面・施工面・温度応力対策などの技術的課題に対して指導した。

- 5) 温井ダムでは、主に基礎掘削ずりのコンクリート骨材へ全量利用や3次元 CAD システムの導入などの合理化を図った。
- 6) 滝沢ダムでは、主にコンクリート運搬設備などの合理化と高速施工に伴う温度応力対策について指導した。
- 7) 嘉瀬川ダムでは、主に SP-TOM と呼ばれるコンクリート搬送設備の初適用、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の導入を指導した。
- 8) 湯西川ダムでは、主にコンクリートダム高速施工法の集大成として、コンクリート運搬設備の効率的運用、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の発展に対して技術的指導をした。
- 9) 第二浜田ダムでは、主に SP-TOM による有スランプコンクリートへの適用、各種暑中コンクリート対策などを指導した。
- 10) 五ヶ山ダムでは、主に高速施工方法である最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）の全面採用および、合理的な端部締固め機（FPC）の改良などを指導した。
- 11) 当別ダムでは、主に世界初のダム形式である台形 CSG ダムに対して、施工方法の合理化や CSG 製造時の品質管理などを指導した。

第3章では、コンクリートダムの施工方法を分類し、施工方法の変遷を整理した。また、高速施工方法である RCD 工法について、従来の RCD 工法から最新の RCD 工法についての技術的特徴をまとめた。

- 1) 堤体材料からダムの型式は大きく「コンクリートダム」と「フィルダム」に分類されるが、コンクリートダムは力学的特性から「重力式コンクリートダム」と「アーチ式コンクリートダム」に分類される。
- 2) 重力式コンクリートダムはさらに構造により、「重力式コンクリートダム」「中空重力式コンクリートダム」「バットレスダム」に分類されるが、岩盤状況、地形等の制約の少ない「重力式コンクリートダム」が現在最も多く建設されている。
- 3) 重力式コンクリートダムの施工方法は大きく「柱状工法」と「面状工法」に分類される。
- 4) 柱状工法はブロック間の高低差が生じること、温度制御のためのパイプクーリングが必要なこと、ブロック間の一体化のためのジョイントグラウチングが必要なこと等により近年の採用例が減少している。
- 5) 面状工法は縦継目を設けず上下流方向を一体に、高低差を設けることなく層状に打設する工法で、温度応力や、安全性の面で有利な工法である。
- 6) 面状工法はさらに、「RCD 工法」と「拡張レヤー工法」に分類される。
- 7) RCD 工法は超硬練りの貧配合コンクリートを汎用機械であるブルドーザにより敷き均し、振動ローラで締固めを行う工法で、高速施工を可能とした。
- 8) 拡張レヤー工法は RCD 工法と同様にブロック間に高低差を設けずに面状に打設を行う工法であり、使用するコンクリートはスランプ 3 cm 程度の有スランプコンクリートで、施工機械は RCD 工法より若干少ないが、打設速度が RCD ほど高くない。

- 9) RCD 工法に用いられるコンクリートは一般に中庸熱ポルトランドセメントにフライアッシュを 30%あるいは 20%混合させたセメントを用い、単位結合材量は  $120\sim130\text{kg/m}^3$  である。
- 10) コンシステンシーを示す VC 値は  $20\pm10$  秒程度のコンクリートを使用する。
- 11) RCD 工法におけるコンクリート運搬方法は、柱状工法と違い、施工が高低差の小さい面状であるため、その選択の自由度が格段に上がった。
- 12) RCD 打設方法は、1 リフト 1 m を基本とし、25cm の薄層を 4 層にて敷き均し、1 m 敷均し後に振動ローラにて転圧を行う。
- 13) 従来の RCD 工法においては、外部コンクリートである有スランブコンクリートと、内部コンクリートである RCD 用コンクリートを所定の時間内に打ち重ね、打設を進めるため、打設速度の低い有スランブコンクリートに全体打設速度が拘束される傾向にあった。
- 14) 全体の打設速度を向上させるために、最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）が開発された。
- 15) 最新の RCD 工法は、内部コンクリートを先行して打設し、内部コンクリートとしての RCD 用コンクリート部分は端部締固め機により転圧を行うことで、外部コンクリートとの打継規制を撤廃したもので、内部コンクリートの打設速度が拘束を受けることが無くなり、全体の打設速度向上を可能とした。

第 4 章では、高速施工に対応したダンプ搭載型インクラインの計画・導入・稼働状況と、ケーブルクレーンの運搬・打設効率の向上を目指して、新たに導入した自動運転システムの開発内容とその成果を示した。次に、更なる高速施工に対応したコンクリートの運搬方法として、新たに考案したパイプを用いてコンクリートを高所から低所へ運搬する SP-TOM (Special Pipe TranspOrtation Method) の大量搬送機構と材料分離抑制機構について示した。

- 1) ダンプトラック直載型インクラインの採用によって、ダンプトラックに積載されたコンクリートの積替えすることなく、打設エリアまでコンクリートを直接運搬することが可能であり、品質と高い運搬能力の確保を両立できる。このことから、面状工法である RCD 工法においては、その特性を活かし、クレーン運搬に加えダンプトラック直載型インクラインを併用し、堤体内ダンプトラック運搬と連続性を持たせることが有効であることをダム現場の施工において実証した。
- 2) 主な運搬設備であるクレーンによる運搬を高速化するために、各種センサやコンピュータを組み合わせることで、ケーブルクレーンを自動運転できるシステムを開発し、オペレータの技能に依存しない効率的なコンクリートの運搬を可能にした。
- 3) より高い打設速度で施工できる最新の RCD 工法において、十分なコンクリートの運搬能力を有する運搬設備として SP-TOM を考案した。SP-TOM は、パイプを用いてコンクリートを高所から低所へ運搬する工法で、内側に羽根が取り付けられた搬送管を回転させることにより、搬送材料を分離させることなく連続的かつ大量に運搬することができる搬送設備である。
- 4) SP-TOM による搬送実験の結果から、羽根の高さ 140~200 mm、取付け間隔 1,200 ~2,000mm、回転数 15rpm~25rpm の範囲で、搬送速度  $180\text{m}^3/\text{h}$  を確保できることが分かった。この結果

から、搬送管内に設置した羽根のメンテナンス性を考慮して、羽根高さ 140～200 mm、取付け間隔 1,200 mm の羽根仕様が最良と判断した。また、回転速度が大きい方がコンクリートの通過状況がスムーズに観察されたことから、25rpm を標準回転数とした。

- 5) SP-TOM をケーブルクレーンと併用することによる効果を確認するために実施したシミュレーションの結果、大規模ダムでは大幅な工期短縮が可能となり、経済効果も大きいことが分かった。また、中規模ダムでもある程度の工期短縮および経済効果があることが分かったが、小規模ダムではむしろ非効率になることが分かった。
- 6) 十分な運搬能力を確保して、かつ材料分離を抑制できるように、法面の勾配やコンクリートの種類を考慮して、最適な羽根の形状、大きさ、間隔などを実験的に検討した。実規模試験の結果、40mm 以上の粗骨材の差異を 5 % 以下に抑制できる最適な羽根の条件を見出すことができた。また、選定した条件を実施工に適用し、十分な運搬能力を確保しつつ、材料分離を抑制できることを確認した。
- 7) SP-TOM によるコンクリートの材料分離の抑制は、搬送管内をコンクリートが滑りながら移動する時に、120°の位相を変えて配置された羽根によって粗骨材が先走りしてコンクリートが分離するのを抑制するとともに、位相差で配置された羽根で順次堰き止め・落下を繰り返すたびに、コンクリートを練り混ぜて、再び均一にさせることに起因することを明らかにした。
- 8) SP-TOM によって運搬した RCD 用コンクリートの打設後の品質を確認するため、湯西川ダムにおいて堤体からのコアを採取し、圧縮強度および単位容積質量を測定した。その結果、圧縮強度および単位容積質量ともに所定の値を満足し、ばらつきも少ないことを確認した。

第 5 章では、コンクリートダムの重要課題である温度ひび割れについて、その機構を踏まえたうえで、最新の RCD 工法による高速施工を活用した抑制方法を考案し、温度応力解析によって、その有効性を検討するとともに、実施工の実績に基づく検証を行った。

- 1) コンクリート構造物の中でも、極めてマッシブな部材であるダム堤体は、壁状構造物に代表される他の一般的な構造物とは発生する温度応力の傾向が異なる。その特徴的な傾向は、施工が長期間に及ぶため、施工時期・季節に応じて、堤体内のコンクリートに標高方向の温度分布が発生することであり、その温度差を小さくすることによって温度応力を抑制することが可能になるものと考えられた。
- 2) 従来の温度ひび割れ抑制対策の考え方では、コンクリートの打込み速度を遅くすることが、温度ひび割れの抑制に有効とされてきたが、上記のような堤体内の標高方向の温度分布に起因する温度応力に対しては、季節による温度差を小さくする施工速度を選定することが有効と考えられる。そこで、最新の RCD 工法による高速施工を活用し、冬期施工時の打設量をできる限り多くし、温度が高くなる夏期施工時の打設量を極力少なくすることで、コンクリート堤体全体の温度の平準化を図る工法を考案した。
- 3) 最新の RCD 工法を活用して堤体温度の平準化を図る工法について、温度応力解析および拘束度マトリックス法によって検証を行った。その結果、コンクリートの打設開始および打設完了が、

ほぼ同時期であるにもかかわらず、堤体内における最高温度の差を小さくすることができ、その結果として、ひび割れ指数が向上し、拘束温度ひずみが小さくなった。

- 4) 実施工において、最新の RCD 工法を活かして堤体温度の平準化を図ったダムにおける検証解析を行った。その結果、五ヶ山ダムの施工実績では、温度応力抑制を考慮した事前検討ケースに比べて、夏期打設および冬期打設のいずれの時期においても最高温度が高くなったにもかかわらず、その温度差が小さく、堤体温度の平準化が図られた。これにより温度ひび割れ発生リスクが小さくなり、拘束度マトリックス法による水平温度ひずみが、許容水平温度ひずみとして適用される  $100\mu$  に対して  $47\mu$  であることが確認された。
- 5) 五ヶ山ダムの施工実績よりも、さらに冬期の打上がり速度を高めて3ヵ月の工程短縮を図るリフトスケジュールについても解析を行った。その結果、堤体内の最高温度がさらに平準化され、拘束温度ひずみを  $30\mu$  まで低減できる結果が得られた。
- 6) 以上の結果より、最新の RCD 工法による高速施工を活用して堤体内の温度の平準化を図る工法は、コンクリートダムの温度応力抑制対策として有効であることが確認された。

以上のように、上記の2つの課題を解決し、これらの技術を導入した上で最新の RCD 工法（巡航 RCD 工法）を適用して、湯西川ダムおよび五ヶ山ダムを建設した。図-6.1 に示すとおり、近年、従来の RCD 工法で施工した宮ヶ瀬ダムや滝沢ダムは、超大型ダムであったことに加え、施工の合理化の工夫を図ることで、過去の RCD 工法よりも打設速度が向上し、柱状工法と同程度の打設速度となった。さらに、一部の範囲で最新の RCD 工法を適用することによって、嘉瀬川ダムでも 100 万  $m^3$  クラスであったが、柱状工法と同程度の打設速度となった。それに対して、本格的に最新の RCD 工法を適用した湯西川ダムおよび五ヶ山ダムでは、大幅な打設速度の向上が図れた。

このように、本論文の成果を活かして最新の RCD 工法を適用することによって、従来の柱状工法よりも大幅に速く打設速度で施工することができ、品質を確保した上で、経済性重視の海外での急速施工と同程度以上の高速化施工を可能とした。

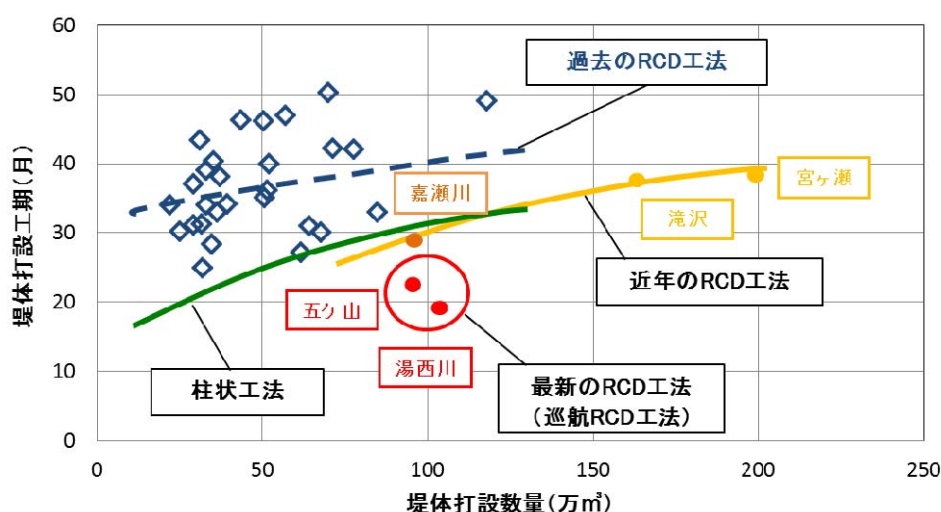


図-6.1 堤体打設数量と堤体打設工期の関係

## 今後の課題と展望

コンクリートダム施工は、従来の柱状工法から面状工法へ、さらに面状工法における従来の RCD 工法から最新の RCD 工法である巡航 RCD 工法へと変遷する中で高速化が図られてきた。本論文では、最新の RCD 工法に適応するための運搬方法として、コンクリートの材料分離を抑制し、かつ高い運搬能力を有する SP・TOM を開発し、改善し、材料分離の機構を明確にした。また、高速施工を活用した堤体温度の平準化を図る工法により、温度ひび割れが発生するリスクを従来の RCD 工法よりも低減して、かつ高速施工できることを見出した。

本研究により、コンクリートダム施工の高速化による工期の短縮のみならず、温度ひび割れを抑制できる手法を確立したものとする。コンクリートダム施工の更なる高速化に対する今後の課題としては、今回の検討の対象外である着岩部および上位標高の狭隘部での高速化技術の開発が挙げられる。