

博士論文

遮水性盛土の品質管理の合理化・高度化に関する研究

坂本 博紀

目次

第1章 序論

1.1.	研究の背景と課題	1-1
1.2.	本論文の位置づけ	1-5
1.3.	本論文の構成	1-7
	参考文献	1-9

第2章 飽和度と現場の締固めエネルギーを考慮した締固め管理

2.1.	背景	2-1
2.2.	飽和度管理の導入	2-8
2.3.	室内試験での検討	2-12
2.4.	現場の締固めエネルギーレベルの推定	2-17
2.5.	締固め状態の管理領域の設定法	2-23
2.6.	実施工への適用結果	2-33
2.7.	まとめ	2-43
	参考文献	2-45

第3章 地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法

3.1.	背景	3-1
3.2.	室内試験による検討	3-10
3.3.	現場盛立試験による検討	3-17
3.4.	地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法.....	3-34
3.5.	実施工への適用結果	3-41
3.6.	まとめ	3-44
	参考文献	3-46

第4章 遮水性盛土の定量的かつ連続的な締固め管理法

4.1.	背景	4-1
4.2.	主要な RMV	4-3
4.3.	CCC を適用した管理事例	4-5
4.4.	本研究で採用した RMV	4-11
4.5.	現場盛立試験による検討	4-15

4.6.	実施工での運用方法の検討	4-21
4.7.	実施工への適用結果	4-29
4.8.	現状の課題に関する考察	4-38
4.9.	まとめ	4-42
	参考文献	4-44

第5章 遮水性盛土の総合的な品質管理法

5.1.	基本的な考え方	5-1
5.2.	搬出時の全量管理（粒度・含水比）	5-3
5.3.	締固めエネルギーの全量管理	5-10
5.4.	地盤剛性の全量管理	5-11
5.5.	締固め状態（含水比・締固め度・飽和度）の管理範囲の改善.....	5-13
5.6.	クラウド管理によるリアルタイム監視	5-15
5.7.	開発技術の拡張性	5-16
5.8.	まとめ	5-17
	参考文献	5-18

第6章 実務における留意事項

6.1.	はじめに	6-1
6.2.	材料採取・製造時の管理	6-3
6.3.	搬出時の管理	6-10
6.4.	盛立面における管理	6-13
6.5.	「飽和度と現場の締固めエネルギーに着目した締固め管理」の留意事項.....	6-22
6.6.	「SSIによる遮水性能管理法」の留意事項	6-25
6.7.	CCC適用時の留意事項.....	6-31
6.8.	まとめ	6-32
	参考文献	6-33

第7章 結論

7.1	結論	7-2
7.2	今後の課題	7-3

第 1 章

第 1 章	序論	1-1
1.1.	研究の背景と課題	1-1
1.1.1.	社会的背景	1-1
1.1.2.	盛土の品質管理に関する近年の動向	1-1
1.1.3.	遮水性盛土の締固め管理の課題	1-3
1.2.	本論文の位置づけ	1-5
1.3.	本論文の構成	1-7
第 1 章	参考文献	1-9

第1章 序論

1.1. 研究の背景と課題

1.1.1. 社会的背景

我が国では、少子高齢化や、国家の財政難への対応として 2000 年代に建設予算を急減する舵取りが行われた影響を受け、建設業界では「就労者の高齢化・熟練者の減少」が進んでいる¹⁾。このため、将来にわたり社会資本の継続的供給と適切な機能維持を図るために、品質確保・向上とともに一層の施工性・生産性の向上が求められている。このような中、建設業界では ICT (Information and Communications Technology) を利用した生産性の向上を推進すべく i-Construction 推進委員会が設立され、2016 年に日本国政府が運営する「未来投資会議」において国土交通省は 2025 年までに「i-Construction の推進により公共工事の生産性の 2 割向上を目標とする」ことを提言し²⁾、取組が続けられている。

1.1.2. 遮水性盛土の品質管理に関する近年の動向

前述した i-Construction 推進委員会の報告書において、土工はそのトップランナーの一つと位置づけられており、調査測量、設計、施工、検査の各段階で全面的に ICT を導入し生産性向上を推進することが提言されている³⁾。具体には測量段階ではドローンによる 3 次元測量、設計段階では得られた 3 次元データを用いた設計・施工計画の策定、施工段階では ICT 建機による施工管理、検査段階ではドローン測量等による出来高管理、を行うことが想定されている。これらを実現すべく、ICT 土工を実施するための企業の設備投資支援、ICT 土工に対応できる技術者の育成、ICT 土工に対応した施工管理・出来高管理・品質管理・工事積算等に関する基準の整備、などの施策が進められている。

このような土工の ICT 化の流れを踏まえたうえで、近代以降の我が国のフィルダム建設の品質管理についての動向を時系列で列記する。

- ① 盛土に求められる強度、剛性、遮水性能 (或いは透水性能)、築堤後の圧密沈下特性、などの工学的特性は盛土の締固め条件である「盛土材料の粒度・粒子特性等の土質 (以後、「土質」)」、「締固め時の含水比」、「締固めエネルギーレベル (Compaction Energy Level, CEL)」により概ね規定される。これらの特性を具体的に管理する手法として Proctor の提唱⁴⁾を基礎とした米国型の施工管理法 (含水比管理、施工機械及び施工仕様の規定) が、1950 年代に世界銀行の経済支援の下に実施された御母衣ダム・愛知用水・東名・名神高速等の大規模な国家プロジェクトにおいて導入された。
- ② 1960 年代以降には、盛土構造物ごとの要求性能や日本の国土で得られる土質条件等を勘案した諸検討を踏まえた、締固め度を基本とした各種の品質管理基準が整備さ

れ、我が国における盛土の施工管理と品質管理の基礎が構築された⁵⁾。フィルダム建設では、①に記した御母衣ダムのほか、牧尾ダム、岩屋ダム、寺内ダムといった日本国内でそれ以前は建設されてこなかった堤高の高いロックフィルダム建設が計画・建設された。これらのダム建設を通じて材料設計・品質管理に関する多数の検討研究がなされ、現在の品質管理体系の基礎が構築された^{5),6)}。

- ③ これらの施工管理・品質管理では、前述の3つの締固め条件（土質，含水比，CEL）を規定するため、粒度・含水比については抜取検査型の品質管理試験により管理し、CEL については施工仕様規定により管理する。さらに、締固め後の盛立面において現場試験を行い、締固め度，含水比，透水係数等の品質を直接確認する。
- ④ 1980年代～1990年代では、RI 密度試験の導入，施工層厚の厚層化の検討，レンジ法やフライパン法等の導入により，品質管理や施工管理の合理化が進んだ⁷⁻⁹⁾。
- ⑤ 1990年代後半から，ICT 導入についての機運が高まる。日本道路公団では早くからGPS(Global Positioning System)を利用した盛土の転圧回数管理に取り組み，1990年代後半には実施工への試行導入を行っている¹⁰⁾。
- ⑥ 2003年に国土交通省より「TS・GPS を用いた盛土の締固め情報施工管理要領（案）」¹¹⁾が制定され，その後，2012年に「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領」¹²⁾と「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理の監督・検査要領」¹³⁾が制定された。これらの整備により，一般土工では全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) による締固め管理法は従来の締固め度と含水比状態の管理試験の代替手法としての採用が可能となった。
- ⑦ また，Roller Measurement Value (RMV)¹⁴⁾ や Intelligent Compaction Measurement Value (ICMV)¹⁵⁾ と呼ばれる振動ローラの加速度記録を解析して得られる地盤剛性指標と GNSS 記録を関連付けによる，定量的かつ連続的な締固め管理法 (Continuous Compaction Control, CCC¹⁴⁾) が欧米を中心に検討が行われ，管理法として基準化されつつある¹⁴⁾⁻²¹⁾。
- ⑧ フィルダム建設現場でも 2000 年代以降に GNSS 管理や CCC の適用検討は行われたが，過去の工事の中では補助的な管理法の位置づけに留まっており，従来の品質管理試験の代替には位置づけられていない（詳細は後述）。なお，フィルダムの品質管理の基本的な考え方（試験項目，管理基準，試験時期，試験頻度，評価方法，等）は 1980 年代以降ほとんど変化していない。この理由に 1980 年代までに建設された多数の大規模ロックフィルダムにおいて重大な問題が発生した事例がなかったことが挙げられる。

1.1.3. 遮水性盛土の締固め管理の課題

(1) 品質管理基準の設定についての課題

フィルダムのコアゾーンの建設では、要求性能となる所要の三軸圧縮強度、透水係数の値を確保するために、従前より、施工仕様規定による CEL 管理と[1]材料の採取・製造時、[2]材料の搬出時、[3]施工後、の各段階において品質管理試験を行い、品質確保に努めている。[3]施工後の品質管理試験では透水係数、乾燥密度、含水比を確認するが、現場透水試験は試験に要する時間と労力が非常に大きいため 1~2 回/月程度の頻度の定期管理試験として実施される。そのため、日常管理試験として含水比 w 、乾燥密度 ρ_d (或は締固め度 D_c) を確認し、 $w\sim\rho_d$ 平面 (或は $w\sim D_c$ 平面) での分布が各現場で設定する管理範囲に入ることを確認することで間接的に遮水性能を管理している²²⁾。

この際、 $w\sim\rho_d$ 平面 (或は $w\sim D_c$ 平面) における管理範囲は、一般的には以下のように決めている。横軸となる施工時の含水比 w の管理範囲は「締固め土の透水係数は最適含水比 w_{opt} よりも乾燥側において急増する」という特性があることから標準プロクターの 1Ec での室内締固め試験に基づく最適含水比(w_{opt})_{1Ec} を管理下限値に設定する場合が多い^{22), 23)}。このため、比較的高い含水比で施工管理される傾向にあった。

近年では転圧機械の性能向上に伴い現場の CEL は 1Ec より高い条件を確保することは容易となってきたと考えられる。しかし、多くの施工現場では CEL=1Ec での室内締固め試験に基づく含水比管理 (以後、1Ec 基準の含水比管理) が行われる場合が多い。筆者は 20 を超える既設ダムの事例調査をしたが、CEL>1Ec での室内締固め試験に基づき含水比管理を実施したロックフィルダムの事例は僅か 1 例 (アースダムを含めると 2 例) であった。これらの調査対象ダムの中には「高い CEL で締め固めることで含水比が低めでも飽和度と締固め度は十分に高く物性が改善される締固め状態」を無理なく実現できる現場条件にも関わらず 1Ec 基準の含水比管理が適用されている事例も確認された。

一方、龍岡により飽和度管理の有用性が示され²⁴⁾⁻²⁶⁾、2011 年の東日本大震災で決壊した藤沼ダムの復旧事業において、飽和度管理を重視した新たな盛土の品質管理の在り方についての議論がなされた。具体的には、「締固め度」「含水比」「飽和度」の関係を明らかにすることで、従来の締固め度の下限值管理と含水比の上下限值管理に加えて飽和度の上下限值を定めたフィルダムの品質管理基準が提案され、実施工へ導入された^{27), 28)}。これを機に品質管理の在り方や従来の理論体系の関連性を見直しを行う機運が高まり、本研究の実務フィールドである小石原川ダム建設事業ではより合理的な品質管理法の考え方について検討が行われた。その検討の過程において、従来の品質管理基準の考え方には、次の①~③の課題を確認した (これらの詳細については第 2 章に記す。)^{24), 25), 29)}。

- ① 既往ダムにおける締固め管理では、現場の締固めエネルギーを考慮した含水比の管理がされていない場合が多い。この結果、含水比が過剰に湿潤側の条件での施工が奨励されることになり、実現可能である高密度で低透水な締固め状態が実現されない

場合がある。

- ② 締固め度と含水比の基準値を規定することで $w - \rho_d$ 平面（或いは $w - D_c$ 平面）の管理範囲を定めると、管理基準を満足する範囲において飽和度が低く遮水性能が不十分な範囲が含まれる場合がある。具体には、締固め度と含水比がともに管理下限値付近にある領域で、遮水性能が規格値を満足しない場合がある。
- ③ 飽和度 S_r が、乾燥密度が最大値となる最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ よりも高い領域において、特に含水比が高い条件では、トラフィカビリティの低下、重度のウェービングの発生、過転圧状態の発生などの懸念があるため、可能な限り排除することが望ましいが、従来の締固め度と含水比の管理法では管理含水比範囲内では残存する場合がある。

(2) ICTによる品質管理の合理化のため課題

本論文の研究課題とした遮水性盛土の代表的な構造物として、河川堤防やフィルダムの遮水ゾーンが挙げられる。このうち、フィルダム遮水ゾーンは作用水圧が非常に大きく、浸透破壊に対抗するために、より高い品質が要求される。これは、過去に浸透破壊で破堤したフィルダムは、小規模なものを含めると多数の事例があり^{30)~32)}、大規模な破堤事例では甚大な被害が発生した事例も少なくない^{33),34)}ことによる。このため、フィルダムの施工における品質管理は管理項目、要求品質、確認頻度の全てが一般土工と比べて厳しい条件で管理され、締固めエネルギー等を規定する施工仕様についても一般土工と比べて詳細に規定される。

一方、これらの品質管理試験には一定の労務と時間が必要となるため、その実施頻度と数量は実務的に対応可能な数量とならざるを得ない。例えば透水係数を計測する現場透水試験は1~2回/月の頻度、施工層毎に実施する密度試験は数千 m^2 の施工ヤードに対して3~5点/回の頻度、が標準的である。このため、ロット内の品質のバラツキや局所異常の有無についての確認は技術者の目視監視等による判断に頼っていたのが実情であった。

筆者が就職直後に従事した徳山ダム建設事業（独立行政法人水資源機構）では、コア盛立の施工は発注者側の監督員が常時臨場する立会施工が行われており、受注者・発注者の双方の監督員が詳細なチェックシートを片手に目を光らせる中で施工が行われていた。しかし、建設業界では熟練技術者は減少傾向にあり¹⁾、従来のように多数の技術者を投入する人員体制の構築が困難になりつつある。このためフィルダムの施工管理・品質管理においても、ICTにより人員不足の影響を補完する取組の必要性がより高まっている。特に、1.1.2の⑧に記した Continues Compaction Control (CCC)と呼ばれる、定量的かつ面的な品質管理が可能になれば、品質管理の高度化・合理化が大きく推進されると考えられる。

CCCの導入による具体の効果として「施工と同時に品質管理記録の取得が可能になることによる、品質管理試験の省略や合理化」「定量的かつ面的なデータのリアルタイム確認による、監督労務を補助・軽減」「抜取検査型の品質管理では把握が困難な、局所的な弱部や異常箇所を把握」「抜取検査型の品質管理試験の試験箇所の決定補助」等が考えられる。

一方、フィルダムの施工管理・品質管理では、その施工規模の大きさから ICT 施工による合理化の効果が大きいこともあり、一般土工への GNSS 管理が普及する以前から、GNSS 管理や CCC の試行導入と検討が行われてきた^{9),35),36)}。GNSS 管理は、現場盛立試験により転圧回数と乾燥密度や沈下量等の関係を把握したうえで、現場の CEL を規定する締固め層厚、転圧回数を GNSS により管理することで間接的に締固め状態を管理するもので、一般土工では GNSS 管理記録により施工後の密度試験の代替することが認められている。

しかし、盛土の締固め状態は乾燥密度と含水比、或いは乾燥密度と飽和度のような 2 変数で定義されるため、従来の遮水性盛土の品質管理では、乾燥密度 ρ_d (或いは締固め度 D_c) と含水比 w の 2 変数を確認し、それらが $w - \rho_d$ 平面 (或いは $w \sim D_c$ 平面) の管理範囲に入ることを確認することで遮水性能を間接的に評価している。これに対して、GNSS 管理は現場の CEL を規定することで、土質が概ね一定であれば締固め曲線等の物性曲線を同定できるものの、物性曲線上の位置までは同定できない。また CCC による地盤剛性指標の管理だけでも 1 変数の管理となり締固め状態を適切に把握することはできない。

また、ローラ加速度応答法¹⁸⁾に基づく従来の CCC は、地盤剛性指標 (Soil Stiffness Index, SSI) の下限値管理法 (或いは変化率管理法) であるが、この管理法はフィルダムのコア材などの遮水性盛土の品質管理への適用は困難とされてきた^{14),16),21),37)}。この理由は、遮水性盛土に使用される粘性土は含水比が高いため、締固めに伴う剛性の変化が小さく、特に遮水性能を確保するために推奨される最適含水比よりも湿潤側の含水比ではこの傾向が顕著となるため、SSI の下限値の設定が難しいことによる。さらに、現場の土質と CEL に対応する最適含水比よりも施工含水比が低い条件では、含水比の低下とともに地盤剛性が増加する一方で透水係数も急増するため、SSI の下限値管理では透水係数の上限値を管理できない³⁸⁾、と言う本質的な問題がある。

これらの課題のため、これまでのフィルダムの遮水ゾーンの品質管理では、GNSS 管理や CCC による面的な管理記録は、施工層厚や転圧回数の管理のための補間的な施工管理記録や参考情報として取り扱われており、従来の抜取検査型の品質管理試験の代替手法としては位置づけられていなかった^{35),36),38)}

(3) まとめ

本研究で取り扱う遮水性盛土における品質管理の課題について以下にまとめる。

- 1) 従来の遮水性盛土の締固め管理は 1Ec 基準の最適含水比 ($(w_{opt})_{1Ec}$) と締固め度 ($(D_c)_{1Ec}$) で規定する場合が多い。このとき、①現場の CEL が標準プロクターの 1Ec よりも大きい場合には過剰に湿潤側の施工を推奨することになり、その結果、実現可能であった高密度・低透水な締固め状態の実現が困難になること、②許容される $w \sim D_c$ の管理領域には遮水性能が不足する可能性がある領域が存在すること、等の課題がある。
- 2) 遮水性盛土の品質管理において、品質の一様性や局所異常の有無を定量的に把握す

るには、ローラ加速度応答法を用いた定量的かつ連続的な締固め管理技術 (Continues Compaction Control, CCC) の導入が考えられる。しかし、地盤剛性指標 SSI の下限値管理に基づく従来の CCC では、①高含水比材料では締固めに応じた SSI の上昇が小さく SSI のみで締固め状態を評価できない、②SSI の下限値管理では遮水性の管理はできない、という根本的な課題がある。

- 3) 遮水性盛土の品質管理への CCC の本格的な適用実績はみあたらず、CCC による連続的かつ大量のデータを用いて盛土の遮水性を評価するための、具体的分析方法や管理フローの事例がないため、実務への適用検討時には、これらの管理法についても整理を行う必要がある。

1.2. 本論文の位置づけ

筆者は小石原川ダム建設事業において、前節で記述した遮水性盛土の締固め管理における諸課題を解決するための研究を行い、より高度で合理的な遮水性盛土の締固め管理を実現するための新たな品質管理法として次の[1]~[3]の管理法を考案した。

- [1] 現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法
- [2] 地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法
- [3] 全量検査型の遮水性盛土の締固め管理法

さらに、これらの管理法を連関させて小石原川ダムの遮水ゾーン建設の実務に適用し、その効果を確認した。その結果、小石原川ダムでは従来のロックフィルダムと比べて高い品質を確保するとともに、大規模な遮水性盛土の品質管理における CCC の本格的な導入を実現できた。これらの研究成果については、複数の論文・記事として公表してきた^{29), 38)-40)}。

本論文は、これらの検討内容と施工実績の分析結果を、他現場でも適用検討が可能な形で再整理を行い、公表することで公益に資することを目的とし、過去の公表論文では紙幅の都合で省略した内容も含めて再整理を行った。併せて、品質管理記録の追加分析の結果と研究成果を他現場へ適用する際の留意事項を加筆した。なお、本論文で提案する管理法については小石原川ダム建設事業において組織したロックフィルダム技術検討会において、各段階での議論を行い、実務への適用に至っている。

本研究で考案した「地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法」(以後、「SSI の上下限值管理法」)に関連して、龍岡は過去の研究において、過剰に乾燥側の条件での締固めでは、締固め時には高い剛性が確認されるものの浸水コラプスの危険性が高いことや、地盤剛性の下限値管理では、乾燥密度と飽和度が低い不十分な締固め状態を見逃す可能性があること、から地盤剛性管理においては上下限值管理の必要性を指摘している²⁴⁾⁻²⁶⁾。さらに、御母衣ダムと旧機械化研究所のデータ解析に基づき、盛土の遮水性管理においては、CEL を管理したうえでの剛性の上限値管理が必須になることを指摘している⁴¹⁾。

本研究で提案する「SSI の上下限值管理法」は、上記の龍岡の研究⁴¹⁾と同時期に検討を開

始したもので⁴²⁾、龍岡の研究^{24)-26),41)}との関係については次のように考えている。まず、本研究は筆者の着想をもとに、龍岡教授から指導を受けながら研究を進めており、「盛土の遮水性管理における地盤剛性の上限値管理の必要性」についての考え方に本質的な違いはない。一方、龍岡の研究が概念的、包括的な枠組の研究が主体であることに対して、本研究は龍岡の研究を参考にしつつ、遮水性盛土の品質管理の実務に落とし込むために必要な具体的な諸検討を行ったものである。

本研究の新規性・独自性は[1] 締固め土の遮水性能に着目した体系的な室内試験結果から、剛性～透水係数の関係に対する粒度と CEL の影響を初めて体系的・定量的に示したこと、[2][1]の結果に基づき、「SSI の上下限值管理法」を提案したこと、[3] 現場盛立試験により、提案する「SSI の上下限值管理法」が実務でも適用できることを確認するとともに、具体的な運用方法を検討整理し、実務へ適用したこと、[4] 実施工での管理記録の分析を行い提案する管理法の妥当性を確認したこと、である。

1.3. 本論文の構成

本論文の構成を図-1.1 に記す。

第 2 章では、乾燥密度と含水比の管理を中心にした従来の品質管理法の有する課題を整理したうえで、室内試験・現場盛立試験の結果に基づき構築した「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」について説明する。さらに、実施工での管理記録を分析し、構築した管理法の妥当性を記す。

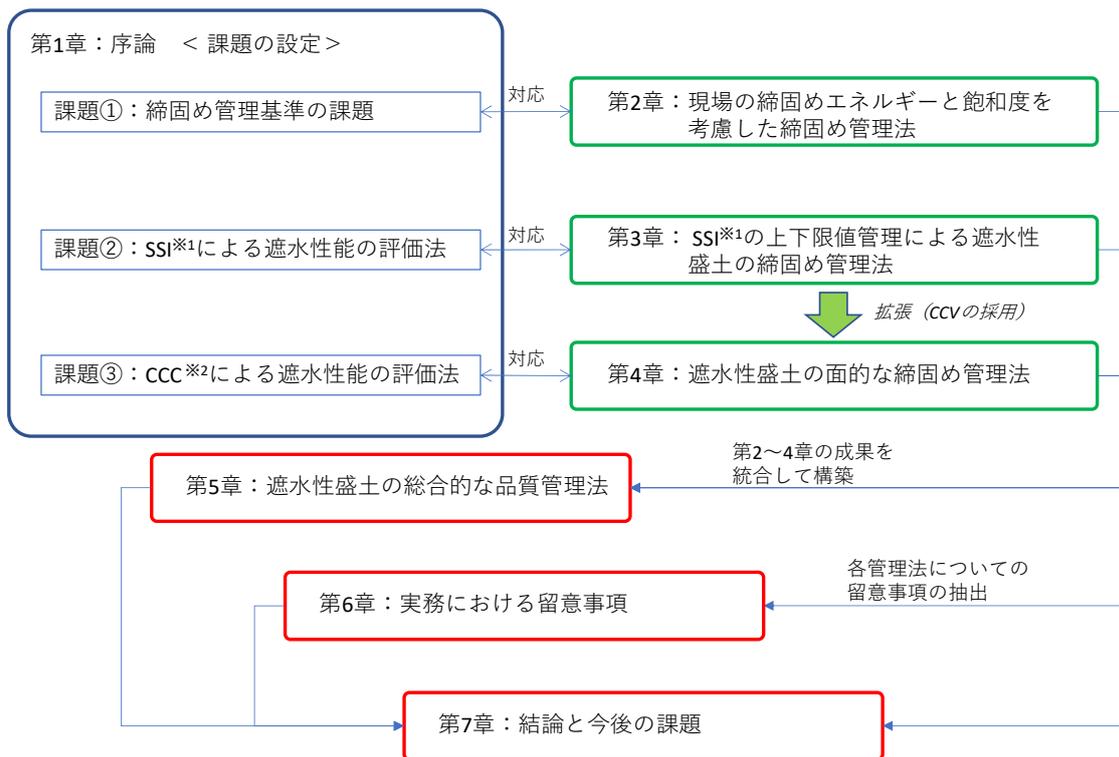
第 3 章では、地盤剛性指標 SSI と乾燥密度、透水係数の工学的特性の関係を解析し、従来の SSI の下限値管理に基づく締固め管理の持つ課題を示したうえで、室内試験・現場盛立試験の結果に基づき構築した「地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法 (SSI の上下限值管理法)」について記す。さらに、実施工での管理記録を解析し、構築した管理法の妥当性を記す。

第 4 章では、国内外の既存の CCC による管理法を総括し、課題を整理した。そのうえで、第 3 章で示した「SSI の上下限值管理法」にローラ加速度応答法による指標である **Compaction Control Value (CCV)** を採用することで実現する、遮水性盛土の面的な締固め管理を実施工に適用した際の検討事例と、実際の品質管理記録の解析結果を記した。第 4 章は実務的な内容が主であるが、今後の類似工事の参考として課題解決のプロセスを主に説明する。

第 5 章では、2～4 章に記した管理法と最新の ICT を組み合わせることで実現した「遮水性盛土の総合的な品質管理法」の事例を記す。

第 6 章では、本研究で提案する新たな締固め管理法を適用する際の留意事項を記す。

第 7 章では、本研究の成果と今後の課題を記す。



※1 SSI ... Soil Stiffness Index (地盤剛性指標)

※2 CCC...Continues Compaction Control (ローラ加速度応答法とGNSS管理を組合わせた定量的かつ連続的な締固め管理法)

図-1.1 本論文の構成

参考文献

- 1) 国土交通省：令和2年度版国土交通白書, pp.24-66, 2020.
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/pdfindex.html>
- 2) 首相官邸公表資料：未来投資会議（第9回,平成29年5月30日）配布資料, 2017.
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/dai9/index.html>
- 3) 国土交通省：I-construction 推進員会報告書（平成28年4月11日）, 2016.
<https://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>
- 4) Proctor, R. R. : Four Articles on the Design and Construction of Rolled -Earth Dams, Engineering News-Record, Vol.111, 1933.
- 5) 公益社団法人地盤工学会：アカデミックロードマップと発展史・人物史_現場密度試験, 2015.
https://www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/2-7AR.pdf,
- 6) 松本徳久：我が国フィルダムの設計・施工の変遷, 土木学会論文集F, 65 巻 4 号 p.394-413, 2009.
- 7) 建設省東宝口方建設局寒河江ダム工事事務所, 寒河江ダム工事誌, 1991.
- 8) 水資源開発公団：奈良俣ダム工事誌, 1991.
- 9) 自閑茂治, 杉尾俊治：徳山ダムの設計・施工についてー自然と共生するダム造りー, ダム日本, No.747-1, pp.57-79, 2007
- 10) 三嶋信雄, 緒方健治, 北村佳則, 益村公人：GPS を利用した土の締固め自動管理手法の導入, 土と基礎, Vol.48(4), pp.9-12, 2000.
- 11) 国土交通省：TS・GPS を用いた盛土の締固め情報施工管理要領（案）, 2003.
- 12) 国土交通省：TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領（2012.3 策定, 2020.3 最新改定）, 2020.
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/content/001336377.pdf>,
- 13) 国土交通省：TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理の監督・検査要領（2012.3 策定, 2021.3 最新改定）, 2021.
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/content/001396081.pdf>
- 14) Michael A. Mooney, Robert V. Rinehart, Norman W. Facas, Odon M. Musimbi, David J. White, and Pavana K. R. Vennapusa : Intelligent Soil Compaction Systems, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 676, 2010.
- 15) International Society for Intelligent Construction: Intelligent Compaction, 2017.
<https://www.is-ic.org/library/intelligent-compaction/>
- 16) Federal Highway Administration: Intelligent Compaction Technology for Soils , 2014.
- 17) 公益社団法人地盤工学会：土の締固め, pp.44-56, pp.103-104, 2012.
- 18) 藤山哲雄, 建山和由：振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土

- 木学会論文集, No.652/III-51, pp.115-123, 2000.
- 19) 橋本毅: ドイツにおける ICT を利用した締固め管理技術, 建設の施工企画, '10. 3, pp.29-33, 2010.
 - 20) 古屋弘, 藤山哲雄: 振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 α システム」の開発と実用化, 建設の施工計画, '10. 10, pp.42-46, 2010.
 - 21) NEXCO: 土工施工管理要領 (平成 29 年 4 月) 参考資料, pp.参 127-165, 2017.
 - 22) 建設省河川局監修, 財団法人ダム技術センター編纂: 多目的ダムの建設 昭和 61 年度版 第 5 巻施工編, pp. 333-335, 1986.
 - 23) 財団法人ダム技術センター編集・発刊: 多目的ダムの建設 平成 17 年度版 第 6 巻 施工編, pp. 250, 2005.
 - 24) 龍岡文夫: 土の締固めにおける飽和度管理の重要性, ダム技術, No.354, 3 月号, pp.3-16, 2016.
 - 25) 龍岡文夫: 盛土の締固めにおける飽和度管理の重要性, 地盤工学会誌, 技術手帳, 63-7, pp.39-40, 2016.
 - 26) Tatsuoka, F.: Compaction characteristics and physical properties of compacted soil controlled by the degree of saturation, Keynote Lecture, Deformation characteristics of geomaterials, Proc. of 6th Int. Conf. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Buenos Aires, pp.40-78, 2015.
 - 27) 三反畑勇, 永井裕之, 山岸明広, 龍岡文夫, 中山睦人, 三浦亨, 渡邊浩樹: 藤沼ダム建設工事における飽和度管理 (その 1: 工事概要と管理手法), 第 51 回地盤工学研究発表会, pp. 999-1000, 2016.
 - 28) 永井裕之, 三反畑勇, 山岸明広, 龍岡文夫, 中山睦人, 三浦亨, 渡邊浩樹: 藤沼ダム建設工事における飽和度管理 (その 2: 品質管理結果), 第 51 回地盤工学研究発表会, pp. 1001-1002, 2016.
 - 29) 坂本博紀, 龍岡文夫, 曾田英揮, 小林弘明, 小原隆志: 締固めエネルギーと飽和度を重視した遮水性盛土の締固め管理, 土木工学会論文集 C (地圏工学), 77 巻 1 号, pp.43-58, 2021.
 - 30) James L.Sherard, Richard J. Woodward, Stanley F. Gizienski and William A. Clevenger: EARTH AND EARTH-ROCK DAMS, 1963.
 - 31) Teton Dam Failure Review Group: First interim report on the Teton Dam Failure, 1976.
 - 32) Teton Dam Failure Review Group: Second interim report on the Teton Dam Failure, 1976.
 - 33) 北条紘次: フィルダムの事故例解析と漏水監視を主体とした安全管理法, 大ダム (83), p50-63, 1978.
 - 34) 大根義男: 実務者のための土質工学, 技法堂出版, pp.219-257, 2006.
 - 35) 小倉公一, 古屋弘, 疋田喜彦, 肥後桂介: 森吉山ダムにおける堤体盛土の情報化施工—リアルタイム施工管理システムの試行—, ダム工学, 18 (3), pp.156-165, 2008.
 - 36) 柴藤勝也, 日下雅史, 伊藤文夫: ICT を用いたダム施工監理のあり方について (殿ダム

- での事例), 土木学会第 66 回年次講演会, pp.643-644, 2011.
- 37) 藤山哲雄, 益村公人, 建山和由, 石黒健, 三嶋信雄: 種々の土質条件に対するローラ加
速度応答法の締固め管理への適用性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.169-179, 2002
 - 38) 坂本博紀, 小林弘明, 龍岡文夫, 曾田英揮: 遮水性盛土の地盤剛性指標に基づく締固め
管理, 土木工学会論文集 C (地圏工学), 76 巻 3 号, pp.221-234, 2020.
 - 39) 坂本博紀, 小林弘明, 龍岡文夫, 福島雅人: 盛土締固めにおける遮水性能の面的管理法の
開発と適用事例, ダム工学, 31 巻 1 号, pp.27-39, 2021.
 - 40) 坂本博紀, 小林弘明: フィルダムコアゾーンの施工における新たな締固め管理事例, 基
礎工, 48 号, pp.58-61, 2020.
 - 41) Tatsuoka, F and Gomes Correia, A.: Importance of controlling the degree of saturation in soil
compaction linked to soil structure design, *Transportation Geotechnics*, Vol. 17, pp. 3-27, 2018.
 - 42) 坂本博紀, 酒井田輝, 田中英晶, 有馬慎一郎: フィルダムコア盛立の新たな品質管理手
法の検討, 水資源機構技術研究発表会論文, 2017
https://www.water.go.jp/honsya/honsya/torikumi/gijyutu/kenkyuhappyou/pdf/h29_asakura.pdf

第 2 章

第2章	現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理	2-1
2.1.	背景	2-1
2.2.	飽和度管理の導入	2-8
2.3.	室内試験での検討	2-12
2.3.1	試験条件	2-12
2.3.2	試験結果	2-13
2.4.	現場の締固めエネルギーレベルの推定	2-17
2.4.1	試験条件	2-17
2.4.2	締固め効果の評価方法	2-18
2.4.3	試験結果	2-19
2.4.4	現場の締固めエネルギーレベル CEL_r の評価	2-21
2.5.	締固め状態の管理領域の設定法	2-23
2.5.1	現場試験条件	2-23
2.5.2	試験結果	2-24
2.5.3	品質管理領域の設定	2-30
2.6.	実施工への適用結果	2-33
2.6.1	含水比～締固め度 ($w'_{IEc} \sim (D_c)_{IEc}$ 関係)	2-33
2.6.2	飽和度	2-37
2.6.3	含水比～透水係数 ($w' \sim k$ 関係)	2-39
2.6.4	最適飽和度の分布	2-39
2.6.5	他ダムとの比較	2-41
2.6.6	その他の効果	2-41
2.7.	まとめ	2-43
	参考文献	2-45

第2章 現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理

2.1. 背景

盛土の建設では、対象となる盛土構造物に求められる性能が担保されるよう施工管理と品質管理の仕様が規定される。強度、剛性、遮水性能（或いは透水性能）、築堤後の圧密沈下特性、などの工学的性能は、「盛土材料の粒度等の土質（以後、「土質）」、「締固め時の含水比」、「締固めエネルギーレベル（Compaction Energy Level, CEL）」によって変化する。実施工では、盛土の工学的特性を管理するために、これらの要因を管理するための施工仕様や品質管理仕様が設定される。

本研究で検討対象とした遮水性盛土の代表構造物であるフィルダム遮水ゾーンの建設では、その品質管理と施工管理は Proctor の提唱¹⁾を基礎とした米国型の施工管理法（含水比管理、施工機械及び施工仕様の規定）が本格的に導入された御母衣ダム(1961年、岐阜県)^{2),3)}と牧尾ダム（1961年、長野県）⁴⁾においてその礎が築かれた⁵⁾。

フィルダムの遮水ゾーンの建設の施工管理・品質管理では、要求性能となる所要の三軸圧縮強度、透水係数を確保するため、従前より、施工仕様規定による CEL 管理のほか、[1] 盛土材の採取製造時、[2] 材料の搬出時、[3] 施工後、の各段階において品質管理試験を行い品質確保に努めている。この際、[3]の施工後の品質管理試験では透水係数、乾燥密度、含水比を確認するが、現場透水試験は要する時間と労力が非常に大きいため1~2回/月程度の頻度で定期管理試験として実施される。このため、日常管理試験では含水比 w 、乾燥密度 ρ_d （或は締固め度 D_c ）を確認し、 $w\sim\rho_d$ 平面（或は $w\sim D_c$ 平面）での分布が各現場で設定する管理領域に入ることを確認することで間接的に遮水性能を管理している⁶⁾。

この際、 $w\sim\rho_d$ 平面（或は $w\sim D_c$ 平面）における管理領域は、一般的には次のように定められている。縦軸となる乾燥密度 ρ_d （或は締固め度 D_c ）は下限値管理が一般的で、フィルダムコアゾーンでは $CEL=1.0Ec$ （標準プロクター）で現場を代表する試料を用いた締固め試験によって求めた最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$ に対する締固め度 $(D_c)_{1Ec}=95\%$ を管理下限値とする場合が多い。横軸となる施工時の含水比 w については「締固め土の透水係数は最適含水比 w_{opt} よりも乾燥側において急増する」という特性があることから、 w_{opt} を管理下限値に $w_{opt}+3\%$ 程度を管理上限値に設定する場合が多く⁵⁾、比較的高い含水比で施工管理される傾向にあった。著者は小石原川ダムの施工仕様の検討にあたり22の既往ダムの事例調査^{4),7)-25)}（非公表資料は参考文献には記載していない）を実施したが現場の $CEL>1Ec$ の条件でCEL管理を実施したダムは僅か2例（山口調整池、高見ダム）であり、大規模ロックフィルダムに限定すると高見ダムの1例のみであった。

図-2.1に $w-\rho_d$ 平面に上述した従来の品質管理領域[1]を示す。一方、図-2.2に従来の品質管理領域[1]と本研究で提案する新たな品質管理領域[2]等を模式的に示す。従来の締固めの品質管理には諸問題があるが、図-2.2を参照して4つの課題を以下に議論する。

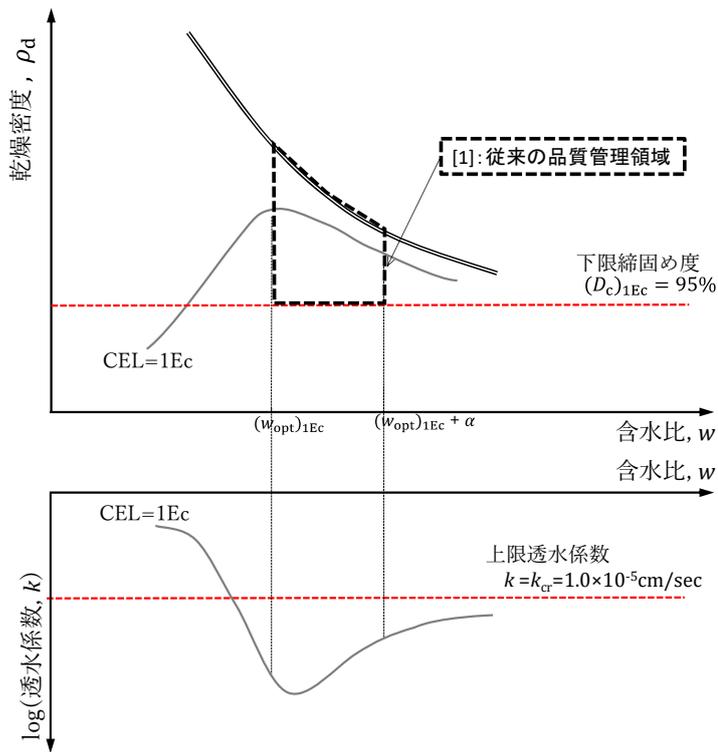


図-2.1 従来の遮水性盛土の品質管理領域（概念図）

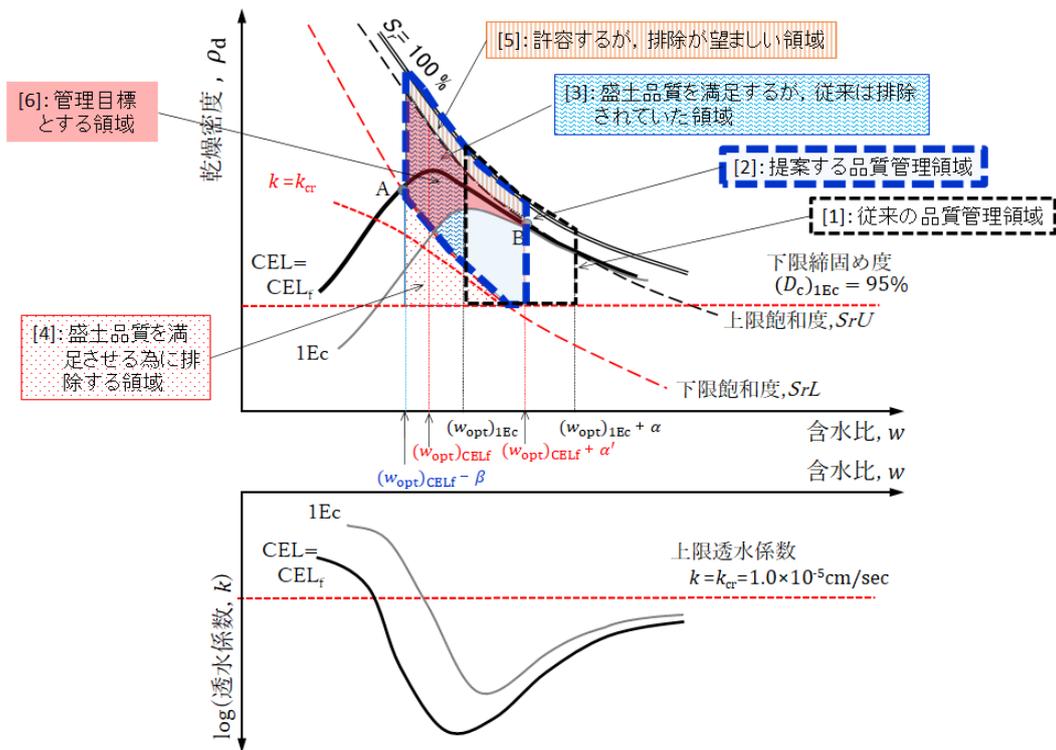


図-2.2 提案する遮水性盛土の品質管理領域（概念図）

(1) 含水比の管理範囲の設定法

第一の課題は、含水比の管理範囲の設定法に関する課題である。室内締固め試験での CEL 及び試験試料の土質に対して、現場の締固めエネルギーレベル CEL_f と土質のそれぞれは必ずしも合致せず、また現場では CEL_f と土質は不可避免に変動する。

前述したとおり、室内締固め試験での CEL は慣用的に $1.0Ec$ (標準プロクター) とする場合が多いが、近年では転圧機械の性能向上に伴い、現場の CEL_f は $1.0Ec$ を上回る場合が多い。図-2.3 に小石原川ダム的一般コア材を用いて締固めエネルギーを変化させた場合の締固め試験と透水試験の結果の一例を示す。

図-2.3 より、含水比 w と乾燥密度 ρ_d の関係を示す曲線 (以後、「締固め曲線」) は締固めエネルギーが大きくなると左上方にシフトし、含水比 w と透水係数 k の関係を示す曲線 (以後、「透水曲線」) は締固めエネルギーが大きくなると左下方にシフトする。 $w \sim \rho_d$ 関係において、ある含水比における乾燥密度の理論上限状態はゼロ空気間隙曲線に一致するため、締固め曲線群はゼロ空気間隙曲線に沿う形で分布し、より高い締固めエネルギーの締固め曲線であっても最適含水比より湿潤側ではエネルギーの小さい締固め曲線に漸近していく。同様に透水曲線も締固めエネルギーが高くて湿潤側では締固めエネルギーの小さな透水曲線に漸近していく。この事実を参照し、 CEL_f が $1Ec$ より大きな場合で、品質管理の含水比管理の基準となる最適含水比を求める締固めエネルギーを $1Ec$ のまま運用した場合の問題を以下に指摘する。

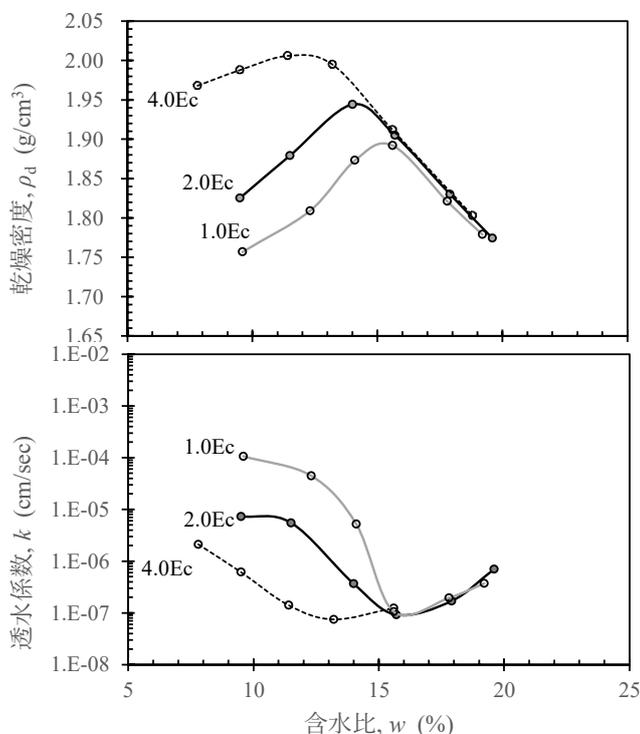


図-2.3 締固めエネルギーを変化に伴う $w \sim \rho_d$ 関係, $w \sim k$ 関係の変化の事例²⁶⁾
(参考文献 26)_図-5 より一部引用)

図-2.4 に現場の CEL_f が $1Ec$ より大きな場合の品質管理のイメージを示す。図-2.4 に示すように CEL_f が $1Ec$ より大きい場合には、含水比管理は CEL_f 応じた最適含水比を基準にした②の範囲で管理することが適切であるが、慣用的に最適含水比を求める CEL を $1.0Ec$ とすると①の範囲で含水比を管理することになる。このとき、締固め後の乾燥密度と遮水性能は②よりも劣るため、このような管理は合理性に欠ける。よって、 CEL_f を適切に評価して、 CEL_f に応じて含水比の管理範囲を設定することが望ましい（例えば、管理含水比の下限値を図-2.2 での $(w_{opt})_{1Ec}$ から $(w_{opt})_{CEL_f}$ への変更、図-2.4 での①から②への変更）。

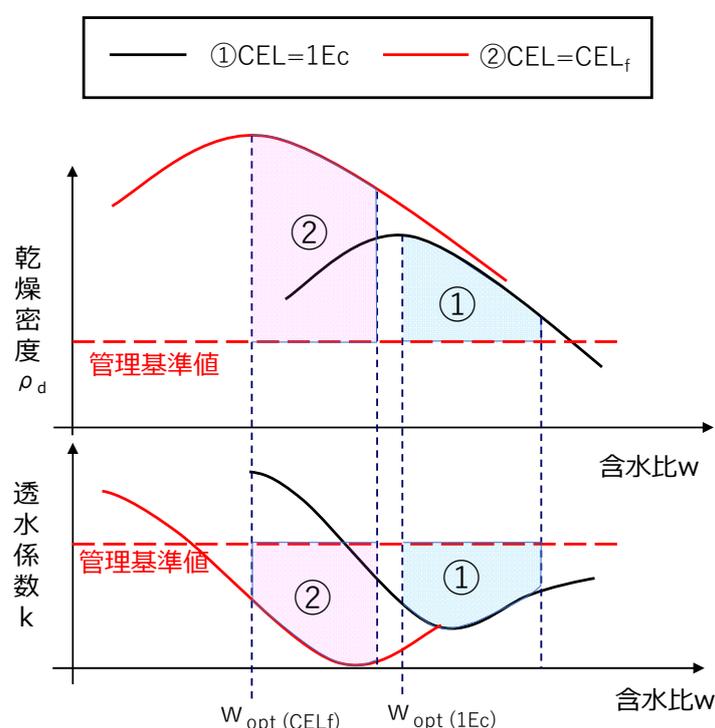


図-2.4 締固めエネルギーを変化に伴う品質管理範囲の変化（イメージ）

前述したとおり、近年の国内のロックフィルダムの遮水ゾーンの新設でも慣用的に $CEL=1Ec$ とした場合の含水比管理（以後、「 $1Ec$ 基準の含水比管理」）が採用されている事例が多い。

国内のロックフィルダム建設では崖錐堆積物や強風化岩由来の粘性土材料と礫質材料を混合した礫交じり粘性土とする場合が多いが、日本国内では母材となる粘性土の自然含水比が高く²⁷⁾ ブレンド後の製造材料の含水比が $1Ec$ の最適含水比よりも高い場合が多い²⁷⁾。この時、より高い締固めエネルギーを基準にした含水比管理を実施するには、曝気乾燥等による強制的な材料の脱水処理が必要となり工事費を増工する要因となることや、強度等の設計物性値を $CEL=1Ec$ の試験から定めており $1Ec$ 基準の含水比管

理でも必要な力学的特性は得られることなどから、1Ec 基準の含水比管理を採用する事例が多いものと考えられる。

しかし、マサ土由来の材料のように自然含水比が低く、無理なくより高い CEL を基準にした含水比管理を適用でき、それによって性能の高い盛土が築堤できる場合でも 1Ec 基準の含水比管理が慣用的に適用されている事例も見受けられる。この様な場合は、含水比管理の基準 CEL は施工仕様に応じて見直すことが合理的である。

また、高い CEL で締固めを行った場合には、**図-2.3** に示すように、同一材料を使用した場合の遮水性能が向上することから、1Ec 基準の含水比管理では遮水性能が確保できない細粒分含有率のやや少なめの材料でも遮水性能を確保できる場合がある。このような材料が使用できると施工含水比は相対的に低下し過剰間隙水圧の抑制や築堤後の沈下量の低減につながると考えられる。なお、**図-2.3** に関する試験条件や詳細な分析については次節以降に記す。

(2) 高密度な締固めの実現性の低下

従来の締固め管理の第二の課題は、**図-2.2** の領域[3]での施工が無理なく実施できる場合でも排除されてしまうことである。 w が 1Ec での室内試験で得た最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも低い乾燥側でも、**図-2.2** の領域[3]のように ρ_d と S_r が十分に高い状態にすれば、遮水性や強度・剛性などの所要の性能が十分確保できる。**図-2.3** の室内試験結果も併せて参照すれば、領域[3]は従来の品質管理領域となる領域[1]よりも、乾燥密度だけでなく遮水性能も高いことが分かる。

このため、現場の CEL が高く、かつ、母材の自然含水比が高くない場合や、粗粒材との混合により製造材料の含水比を無理なく低下することが出来る場合などでは、積極的に領域[3]での施工を目指すことが合理的である。

(3) 遮水性能が不十分な領域が含まれる可能性

第三の課題は、**図-2.2** のように、従来の品質管理領域内に遮水性能の規格を満足しない領域が含まれる可能性があることである。乾燥密度 ρ_d は管理基準 ($(D_c)_{1Ec} \geq 95\%$) を満足するが飽和度 S_r が十分に高くない領域 (**図-2.2** の領域[4]) では、遮水性が不十分になる可能性が高く、浸水時の変形も大きくなる傾向にある。

図-2.5 に遮水性盛土を用いた締固め特性の一例として小石原川ダムの室内試験結果に基づく $w \sim \rho_d$ 曲線群及び透水係数コンターと CEL に応じたの品質管理における許容領域の関係を示す。**図-2.5** に関する試験条件や詳細な分析については 2.3 節に記す。**図-2.5** より、最適含水比より湿潤側の範囲にあっても、含水比が最適含水比付近にあり、かつ、乾燥密度と飽和度の低い領域 (**図-2.5** の赤色でハッチングした領域) では、透水係数が実施工での透水係数の規格値 ($=1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$) を満足しない。

実施工では施工仕様規定による CEL 管理を行うことで、CEL に応じた締固め曲線付

近の物性が確保されると考えられ、「乾燥密度と飽和度がともに低い領域」の締固め状態が発生することは考えにくい。しかし、 $w \sim \rho_d$ 平面における許容領域に遮水性能が規格値を満足しない可能性がある領域が含まれることは好ましくない。

次に、(1)に記載したように、含水比の管理下限値を現場 CEL に応じて引き下げることを考える。例えば、現場 CEL が 2Ec で管理できる場合、**図-2.5b)**に示すように CEL=2Ec の締固め曲線の最適含水比が含水比の管理下限値となり、CEL に応じた管理範囲は相対的に左にシフトする。この結果、赤色でハッチングした透水係数が規格値を満足しない領域が広がる。このため、現場 CEL を考慮した含水比管理を行う場合は、この透水係数が規格値を満足しない領域（**図-2.2**における領域[4]）を適切に排除することが重要である。

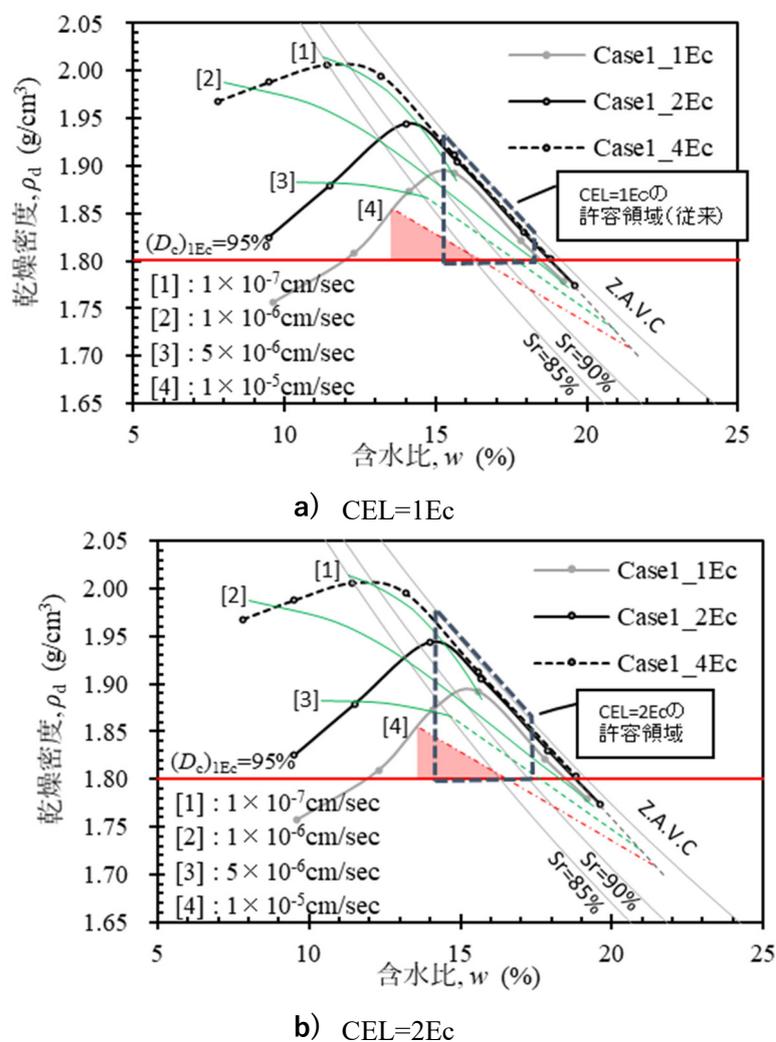


図-2.5 CEL に応じた品質管理の許容範囲と透水係数コンターの関係
(参考文献 26)_図-6 に加筆)

(4) 飽和度が過剰に高い領域の存在

第四の課題は、飽和度 S_r が、乾燥密度が最大値となる最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ よりも高い領域（図-2.2での領域[5]）を排除できない問題である。領域[5]は、特に含水比が高い条件では、トラフィカビリティの低下、重度のウェーピングの発生、過転圧状態の発生などの懸念があるため、可能な限り排除することが望ましい。

(1)に記載したように、管理含水比の上下限値を現場 CEL に応じて変更すれば、現場 CEL が $1E_c$ より高い場合には含水比の管理範囲が相対的に乾燥側によるため、含水比が高く、含水比と飽和度の両方が必要以上に高い領域は概ね排除される。

なお、従来の管理法で、 $1E_c$ での締固め曲線を現場締固め状態の管理上限とする場合がある。その場合は、領域[5]を有効に排除できるが、出来るだけ乾燥密度を高めようとする施工、特に w が $(w_{opt})_{1E_c}$ に近い状態の下で $1E_c$ での締固め曲線を越えて図-2.2の領域[6]に到達しようとする施工を妨げることになる、という問題が生じる。

本研究では、小石原川ダム（独立行政法人水資源機構、2020年概成）の建設にあたって、(1)~(4)に記した従来の締固め状態の管理に関する諸課題を解決するため、図-2.2に模式的に示した新しい締固め管理法を具体的に検討・設定し、実施工に適用した。

新しい締固め管理法の内容は、現場 CEL を考慮して含水比の管理下限値の引き下げを行うとともに、従来の含水比の上下限値管理と締固め度の下限値管理に加えて、飽和度の下限値管理を導入したものである。

第2章の構成を記す。2.2節では、既往の研究事例^{28)・34)}も参照して、飽和度管理の特性を示す。2.3節から2.6節では、2.2節で示した整理・検討の結果を実施工に適用するため、室内試験および実機を用いた現場盛立試験の記録を解析し、その結果に基づいて本ダムのコアゾーン的设计・施工条件に適合した管理範囲を具体的な設定法を示す。2.7節では、実施工における品質管理試験結果を解析し、他ダムとの比較を行うことで、本研究で提案する管理法の有効性を示す。2.8節では本章のまとめを記す。

2.2. 飽和度管理の導入

本節では既往の研究²⁸⁾⁻³⁴⁾を参照して、締固め管理に導入することが有効と考えられる飽和度の工学的特性を整理する。

(1) 飽和度を用いた CEL_f の推定

龍岡^{28),29)}は土質と CEL が広範囲に異なる様々な締固め試験の結果から得られた締固め曲線 ($w \sim \rho_d$ 曲線) を図-2.6 に示すように $S_r' (= S_r - (S_r)_{opt})$ と $(D_c)_t (= \rho_d / [(\rho_d)_{max}]_{CEL})$ の関係に正規化している。ここで、 $(S_r)_{opt}$ は「 $(\rho_d)_{max}$ が得られる飽和度 (以後、最適飽和度)」を示し、 $(D_c)_t$ は「 CEL と土質に応じた最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{CEL}$ に対する ρ_d の比である真の締固め度」を示している。

この正規化された曲線群は土質と CEL の変化に対して鈍感であるが、非常に広範囲の条件で得られたデータであるため、ばらつきは小さくない。しかし、現場毎の締固め管理試験で得られた締固め曲線群では、土質と CEL のばらつきが限定的になるため、正規化した曲線群のばらつきは小さくなる。三浦ら³¹⁾は藤沼ダムの盛立における品質管理記録を取り纏め、土質と CEL が工事期間中に管理された幅の中で不可避免的に変化しても、最適飽和度と正規化曲線はほとんど変化しなかったことを報告している。

本研究では、この『土質と CEL のばらつきが限定的な場合、飽和度を用いて正規化した突き固め曲線が殆ど変化しない』という特性に基づいて現場の締固めエネルギー CEL_f の推定を行い、2.1節で示した課題(1)を改善することを試みた。これらの詳細は次節以降に記す。

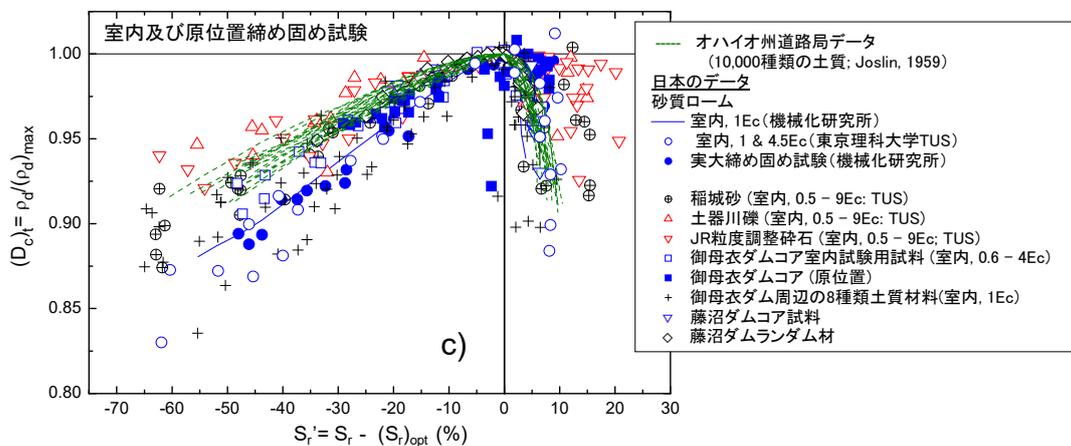


図-2.6 土質・ CEL が異なる様々な締固め曲線を正規化した $S_r' \sim (D_c)_t$ の曲線群³⁾
(参考文献 3)_図-5 c)より引用)

(2) 遮水性能を確保するための飽和度管理

締固め土の飽和化後の透水係数は、土質の他に乾燥密度 ρ_d と締固め時の飽和度 S_r の関数であることが報告されている^{28),29),30)}。 $w \sim \rho_d$ 平面 (或は $w \sim D_c$ 平面) に締固め曲線、飽和度コンター、この関数に基づいた透水係数コンターを重ねて描くことで、所要の透水係数を確保

するための飽和度の下限値を設定できる (図-2.2).

含水比が 1Ec 基準の最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ より低い所謂乾燥側であっても ρ_d と S_r が十分に高く透水係数も十分に低い領域 (図-2.2 の領域[3]) を許容する場合、 D_c と w の管理だけでは透水係数が高めの領域 (図-2.2 の領域[4]) を排除できない。しかし、図-2.2 に示すように、 S_r の下限値を設けることで、領域[3]を許容するとともに領域[4]を確実に排除できる。

また、飽和度の上限値を設定することで含水量が過剰になることで品質や施工性が悪化する懸念のある領域 (図-2.2 の領域[5]) を排除する提案もある^{28), 29), 30)}。

三反畑ら^{32), 33)}は、藤沼ダム復旧工事において上記の飽和度を考慮した品質管理を適用し、含水比の管理下限値を $(w_{opt})_{1Ec} - 1.0\%$ まで引き下げたことを報告している。また、後年、渡邊ら³⁴⁾は、藤沼ダム復旧工事の品質管理記録を取り纏め、上記の管理基準を導入することで従来よりも効率的な締固め管理を実現できたことを報告している。

(3) 現場 CEL と飽和度を考慮した締固め管理領域の設定

図-2.7 を参照して現場の締固めエネルギーレベル CEL_f と飽和度を考慮した締固め管理領域の設定する手順を以下に記す。

従来の 1Ec 基準の含水比管理による締固め管理領域を図-2.7a) に示す。ここで、 CEL_f が 1Ec より高い場合には図-2.7b) に示すように含水比の管理下限値を $CEL=CEL_f$ の最適含水比となるよう乾燥側にシフトさせる。これにより従来の管理では実現できなかった、より高い乾燥密度と遮水性能を実現できる領域を管理領域に取り込むことが可能になる。

一方、従来の締固め管理領域に潜在的に存在していた、透水係数の規格 ($k \leq k_{cr}$) を満足しない領域④が、 CEL_f を考慮して含水比の管理下限値を見直すことで、その範囲が拡大する (図-2.7b))。そこで、領域④を確実に排除するため、品質管理基準として飽和度の下限値を定めた (図-2.7c))。ここで飽和度の下限値のコンターと $CEL=CEL_f$ の締固め曲線の交点を A としたとき、A は $CEL=CEL_f$ の最適含水比よりも乾燥側に存在するが、透水係数の規格を十分に満足することから、管理含水比の下限値は点 A における含水比まで拡張することが出来る (図-2.7d))。

図-2.8 に以上の提案する「現場の締固めエネルギーレベルと飽和度を考慮した新たな締固め管理領域」を記す。図-2.8 の「①従来の品質管理領域」は、1Ec の最適含水比を下限値にした含水比の上下限値管理と、1Ec の最大乾燥密度に対する 95% の締固め度を下限値とした下限値管理である。これに対して新たに提案する品質管理領域では、含水比の管理下限値を CEL_f に基づく最適含水比 $(w_{opt})_{CEL_f}$ を基本とし、飽和度の下限値を導入することで、透水係数が規格値を満足しない領域④を確実に排除しつつ、 $(w_{opt})_{CEL_f}$ よりも乾燥側の領域も乾燥側の領域③まで拡張することを可能とした。ただし、実施工では盛立試験においてピンポイントで点 A の含水比を推定して設定することは困難であるため、実務では点 A よりも若干湿潤側の含水比の管理下限値を設定することになる。

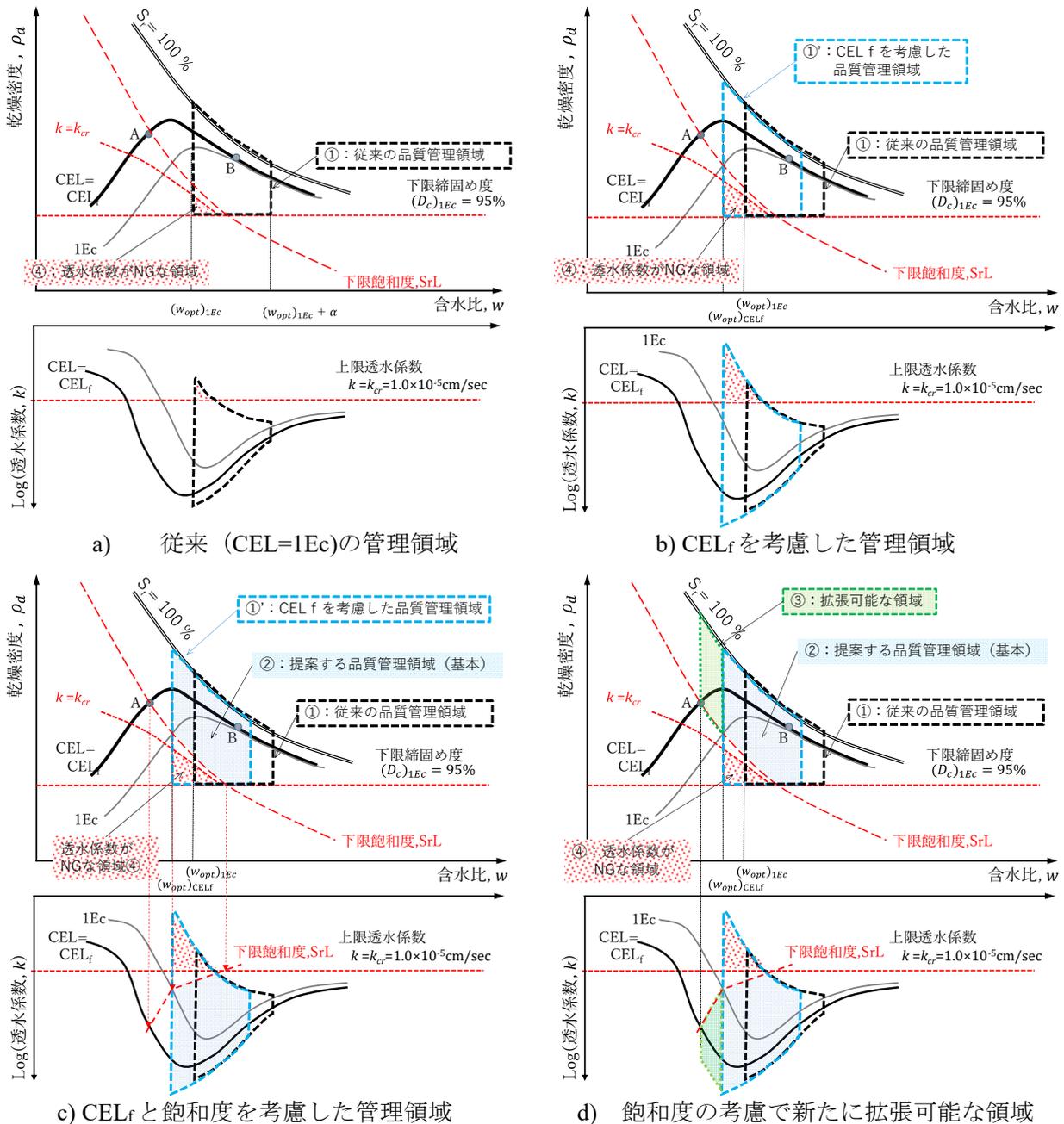


図-2.7 現場の締固めエネルギーレベルと飽和度を考慮した締固め管理領域の設定

なお締固め度の管理下限値は①と同様に $(D_c)_{1Ec} = 95\%$ を下限値としている。これは変更後の含水比の管理範囲においても1Ecの最適含水比より湿潤側を含んでおり、この範囲では締固めエネルギーが1Ecより高い場合でも乾燥密度の差が生じないためである。

以上より、(1)に記した飽和度の特性を利用した CEL_f の推定結果に基づき含水比の管理範囲を変更するとともに、(2)に記した飽和度の上下限管理を導入して、(3)に記した手順で締固め管理領域を設定することで、2.1.(1)~(4)に示した従来の締固め管理における諸課題を解決できると考え、次節以降に詳述する実材料を用いた具体の検討を行い、小石原川ダムの品質管理へ導入した。

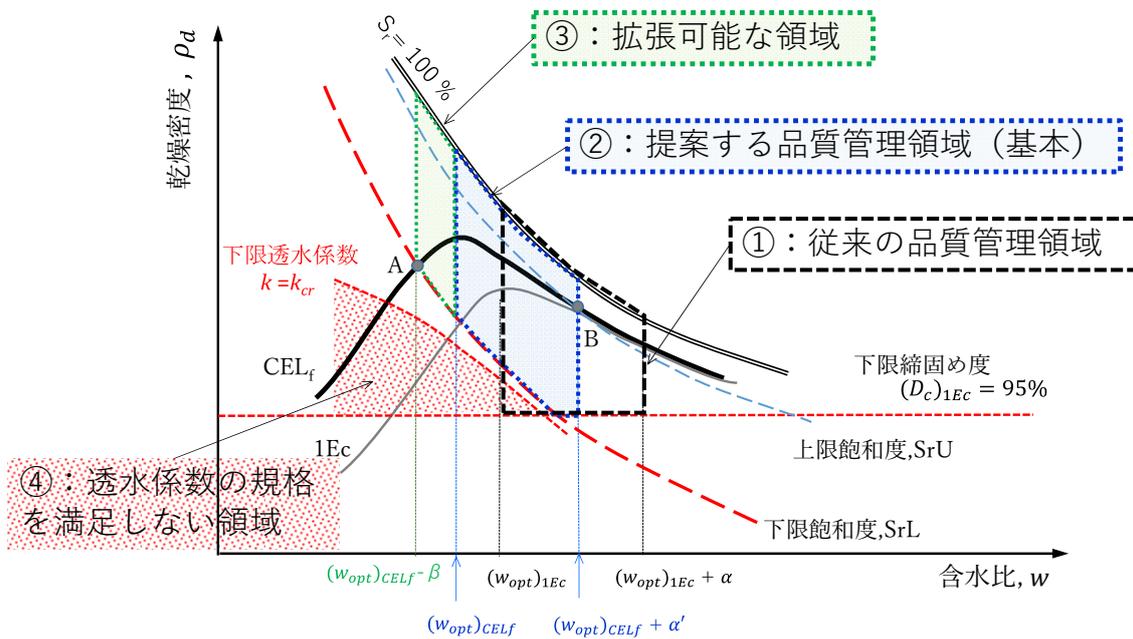


図-2.8 現場の締固めエネルギーレベルと飽和度を考慮した締固め管理領域 (イメージ)

2.3. 室内試験での検討

土質と CEL を変化させた室内締固め試験 (JIS A 1210) と室内透水試験 (JIS A 1218) を実施し、これらの変化が本ダムの一般コア材の締固め特性と透水特性に与える影響を確認した。また、試験結果に基づき $w - \rho_d$ 平面に締固め曲線、飽和度コンター、透水係数コンターを描き、この結果に基づき室内透水係数の規格値を満足するための飽和度の下限值を確認した。

2.3.1 試験条件

室内試験のケース一覧を表-2.1 に示す。

各試験の供試体は JIS A 1210 (B 法) の突き固め方法 (表-2.2) により作成する。表-2.2 に示す 1 層あたりの突固め回数は CEL を標準プロクターの $1E_c$ ($\approx 550\text{kJ/m}^3$) の回数であるため、各ケースの CEL に応じて 1 層あたりの突固め回数を修正して供試体を作製した。室内透水試験 (JIS A 1218) は変水位試験であり、供試体は締固め試験と同じ方法で作製した。透水試験の通水距離 ΔL は供試体高さ 12.5cm で、水頭差 Δh は最大でも 100cm のスタンドパイプの長さなので、動水勾配は 8 程度となる。

室内試験に用いた二つの試料の粒度分布を図-2.9 示す。本ダムの一般コア材は強風化岩由来の礫混じり粘性土であり、粒径が 0.075mm 以下の細粒分の含有率 F_c が 30~50% 程度の細粒材と F_c が 5~15% 程度の粗粒材を混合した材料 (コア材 A) と、コア材 A を基本に細粒材の一部を直径 20~50mm の風化岩を破砕機で粉砕して製造した人工細粒材で置換した材料 (コア材 B) である。

室内試験試料のコア材は、2.4. 節、2.5. 節で示す盛立試験での使用材料を基に製造しており、 F_c が 22~25% 程度、4.75mm 以下の材料の含有率 (以後、 $<4.75\text{mm}$ 含有率) が 50~55% 程度を目標に製造した全粒度試料 (最大粒径 $D_{\max} = 150\text{mm}$) を、 $D_{\max} = 37.5\text{mm}$ のせん頭粒度で調整した試料 (以後、 $D_{\max} = 37.5\text{mm}$ 試料) である。ケース 1 では現場盛立試験で用いた A 材を基に、ケース 2 では現場盛立試験で用いた B 材を基に調整した試料を使用した。 $D_{\max} = 37.5\text{mm}$ とした理由は、礫率補正時の礫率を平均で 10% 程度に抑えることができ、現場密度試験結果との比較を行う際の礫率の影響誤差が小さくなるためである。

表-2.1 土質試験ケース一覧

Case	材料	D_{\max} (mm)	CEL (E_c)				備考
			0.4	1.0	2.0	4.0	
Case1	A材	37.5	○	◎	◎	◎	
Case2	B材	37.5	-	◎	◎	-	

○...室内締固め試験 (JIS A 1210) を実施

◎...室内締固め試験 (JIS A 1210)、室内透水試験 (JIS A 1218) を実施

表-2.2 供試体作製に関する諸元³⁵⁾
(参考文献 35) p.373 表-1 に加筆)

突固め方法の呼び名	ランマー質量 (kg)	モールド内径 (cm)	突固め層数	1層あたりの突固め回数	許容最大粒径 (mm)
A	2.5	10	3	25	19
B	2.5	15	3	55	37.5
C	4.5	10	5	25	19
D	4.5	15	5	55	19
E	4.5	15	3	92	37.5

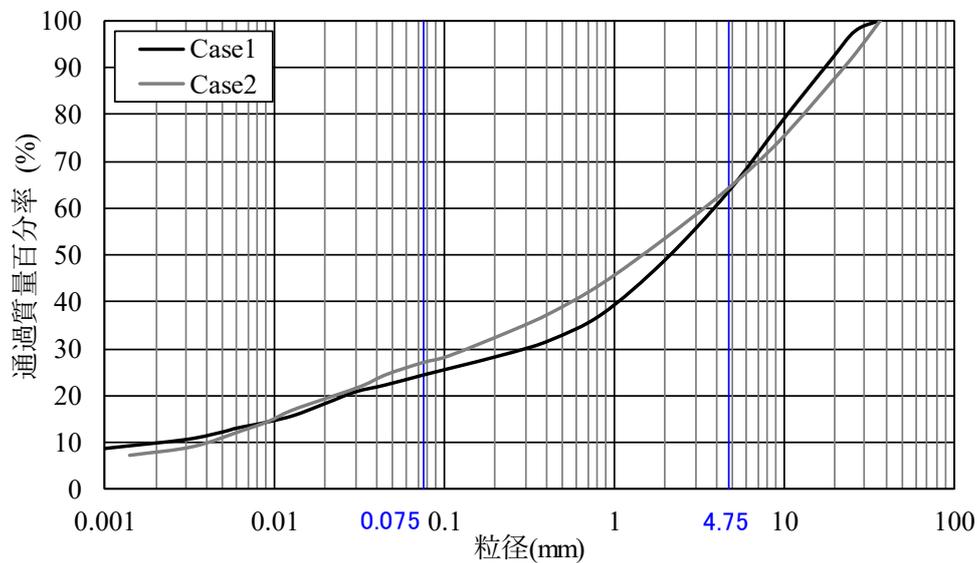


図-2.9 室内試験材料の粒度²⁶⁾

2.3.2 試験結果

図-2.10 に室内試験によって得られた締固め曲線 ($w \sim \rho_d$ 曲線) と透水曲線 ($w \sim k$ 曲線) を示す. 透水係数 k の単位は [m/sec] が標準であるが, 国内のダム建設事業では慣例的に [cm/sec] が使用されているため, 本研究でも [cm/sec] を使用する.

図-2.10 に示すとおり, 各ケースで, CEL の増加に伴って締固め曲線は左上に透水曲線は左下にシフトする. これらの傾向は, 他ダムで得られた類似の室内試験^{36),37)} と同じである.

図-2.10a),b) の含水比 w が $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも大きい湿潤側での締固め特性に注目すると, コア材 A, B とともに CEL が 1Ec から上昇しても ρ_d はほとんど増加しない. このため, 1章で述べた図-2.10 とおり, CEL_r が 1Ec より大きい場合, 各盛土材において含水比の管理下限値を CEL_r に応じて $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも減じることで, より効果的な締固めが実現出来る.

図-2.11 に、図-2.12a),b)に示す締固め曲線群と飽和度コンターに図-2.10c),d)から得られる透水係数コンターを重ねて示す。透水係数コンターのうち、図-2.10c),d)において外挿して求めた点を用いて描いた線は破線で示している。例えば、図-2.11a)の[3]コンターの外挿部分を求めるために、図-2.10c)において $w=15\sim 19.5\%$ での $k \sim w$ の関係は締固め CEL によらずに同一であると仮定して $w > 19.5\%$ の範囲でも継続すると仮定して平均の関係を延伸し、延伸部分で $k=5 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ となる含水比 w_{exA} を求めた。また、異なる CEL での締固め曲線が湿潤側でほぼ同一になる部分は CEL に依らないと仮定して平均の関係を延伸し、その延伸部分で $w = w_{\text{exA}}$ となる点を[3]透水係数コンターの外挿点とした。

この透水係数コンターの傾向は龍岡が ρ_d と S_r の関数として定式化した御母衣ダムのコア材の室内試験による透水係数 k のコンターの傾向²⁸⁾と基本的に一致している。

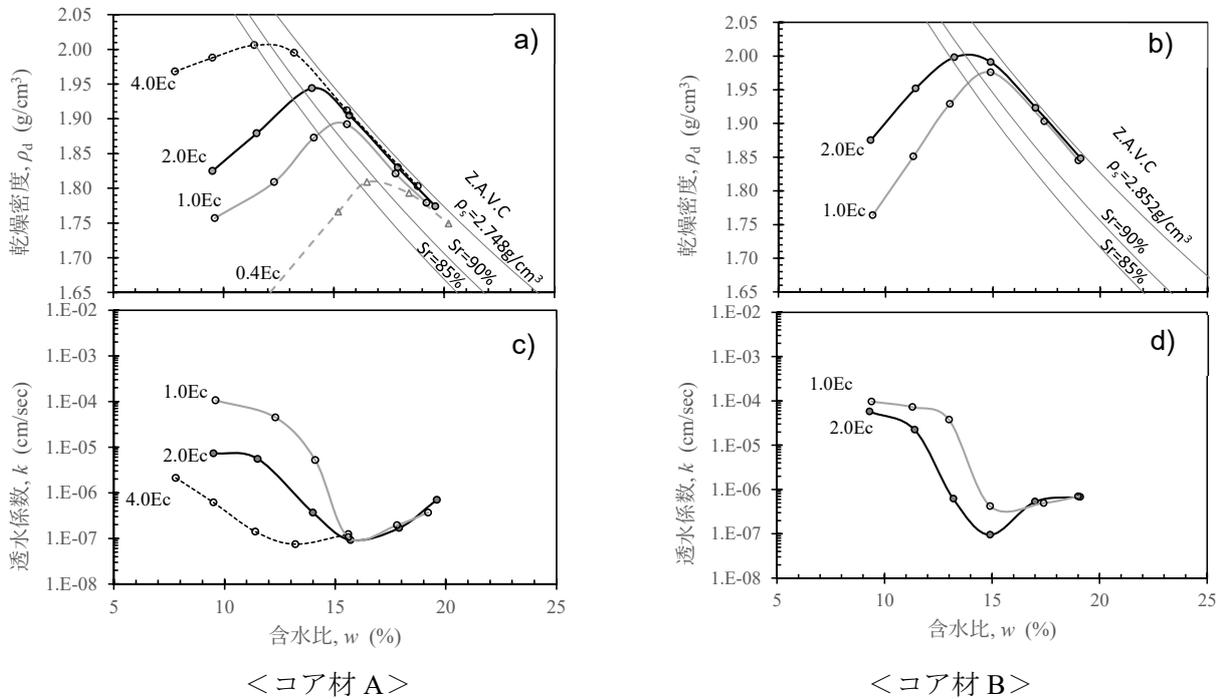


図-2.10 CEL を変化させた場合の締固め状態の変化 ($w \sim \rho_d, k$ 関係)²⁶⁾

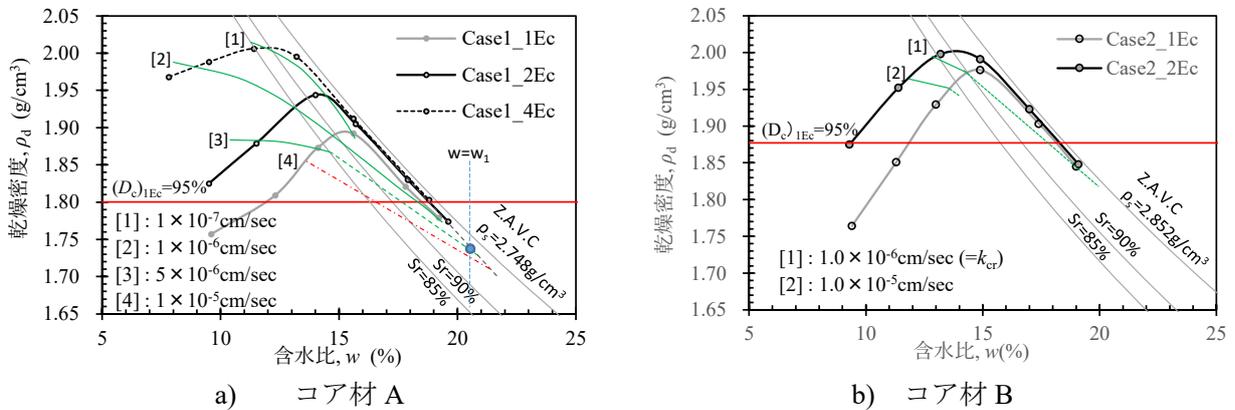


図-2.11 締固め状態 (w, ρ_d, k) と飽和度 S_r の関係²⁶⁾

龍岡²⁸⁾は、遮水性能が求められる場合においては、飽和度の下限値 $S_r L$ を透水係数が管理上限値よりも確実に小さくなるように決定することを提案している。図-2.11 を参照すると、室内試験の透水係数が管理上限値である $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ を確実に満足させる飽和度の下限値 $S_r L$ は、コア材 A, B ともに、 $\text{CEL} = 2\text{Ec}$ では 85%程度、 $\text{CEL} = 1\text{Ec}$ では 90%程度とすれば良いことが分かる。

また、 $k = k_{cr}$ のコンターと CEL に応じた締固め曲線群との交点は、それぞれの締固め曲線の最適含水比よりも乾燥側に位置している。このため、飽和度の下限値を設定することで、含水比の管理下限値を CEL_f での締固め曲線の最適含水比 $(w_{\text{opt}})_{\text{CEL}_f}$ よりもさらに引き下げることができる。すなわち図-2.8 に示すように管理領域は $w < (w_{\text{opt}})_{\text{CEL}_f}$ の領域を含んで設定できることを示している。

次に、Case1, 2 の現場での締固めエネルギーレベル CEL_f を包含していると想定される $\text{CEL} = 0.4 \sim 2\text{Ec}$ の範囲における室内締固め試験の $S_r \sim \rho_d$ 関係を $S'_r = (S_r - (S_r)_{\text{opt}}) \sim (D_c)_t = \rho_d / [(\rho_d)_{\text{max}}]_{\text{CEL}}$ の関係に正規化した結果を図-2.12 に示す。

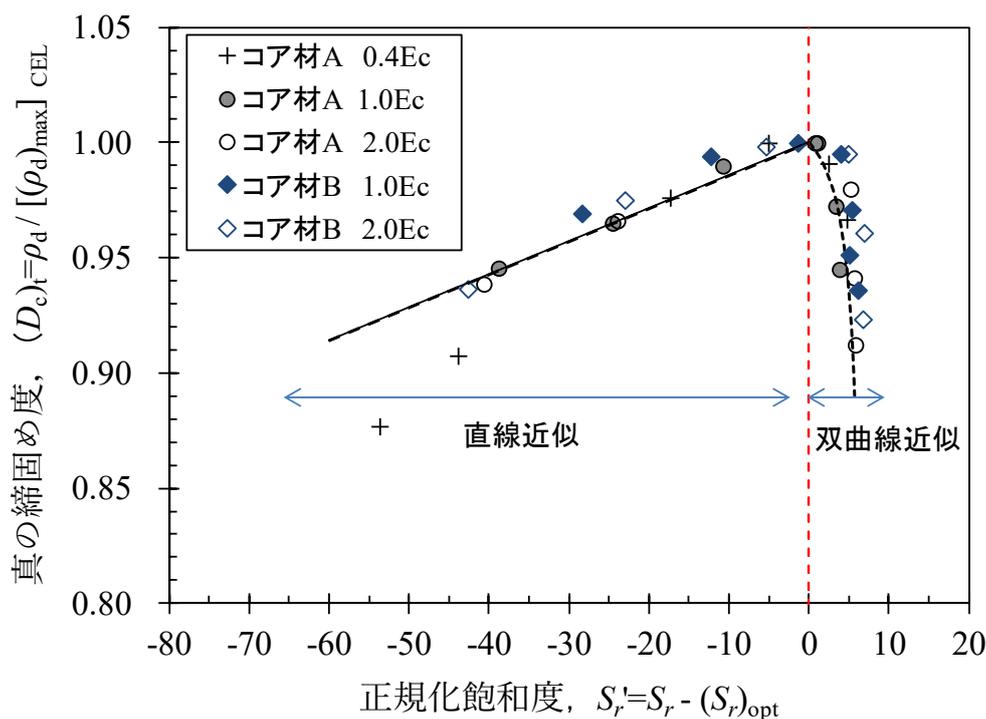


図-2.12 正規化した締固め曲線 (室内試験)²⁶⁾

$\text{CEL} = 0.4\text{Ec}$ で S_r が最も低い 2 点を除いて、正規化した締固め曲線は土質と CEL によらないほぼ一義的な関係となっている。正規化締固め曲線は、 $S_r \leq (S_r)_{\text{opt}}$ の範囲では直線で、 $S_r \geq (S_r)_{\text{opt}}$ の範囲では双曲線で近似できる。

図-2.12 に示す近似線に現場密度試験等により得られる現場の ρ_d , S_r を代入すると、 CEL_f

での最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{\max}]_{\text{CELf}}$ を得ることができる。さらに、このように得られた $[(\rho_d)_{\max}]_{\text{CELf}}$ を室内試験で得られる $[(\rho_d)_{\max}]_{\text{CEL}} \sim \text{CEL}$ の関係(図-2.13)に代入することで現場試験結果に対応する CEL_f を推定できる。

図-2.13 に示すとおり、複数の方法で近似式の相関を確認したが、どの方法でも高い相関が確保されている。曾田ら³⁸⁾は締固めエネルギーと密度の間には片対数の線形関係があることを示しており、これらの研究結果を参考にするならば d)の指数関数近似に基づき推定することが良いと考えられる。

この方法で推定した現場の締固めエネルギーについては次節 2.4 で示す。なお、小石原川ダムの実務において CEL を推定した時点では、上記の考えには至っておらず、多項式による近似式の相関を確認することなく図-2.13 a)の線形補完による評価を行っている²⁶⁾。このため、2.4 では推定時に参照した近似式の違いによる影響も含めて考察する。

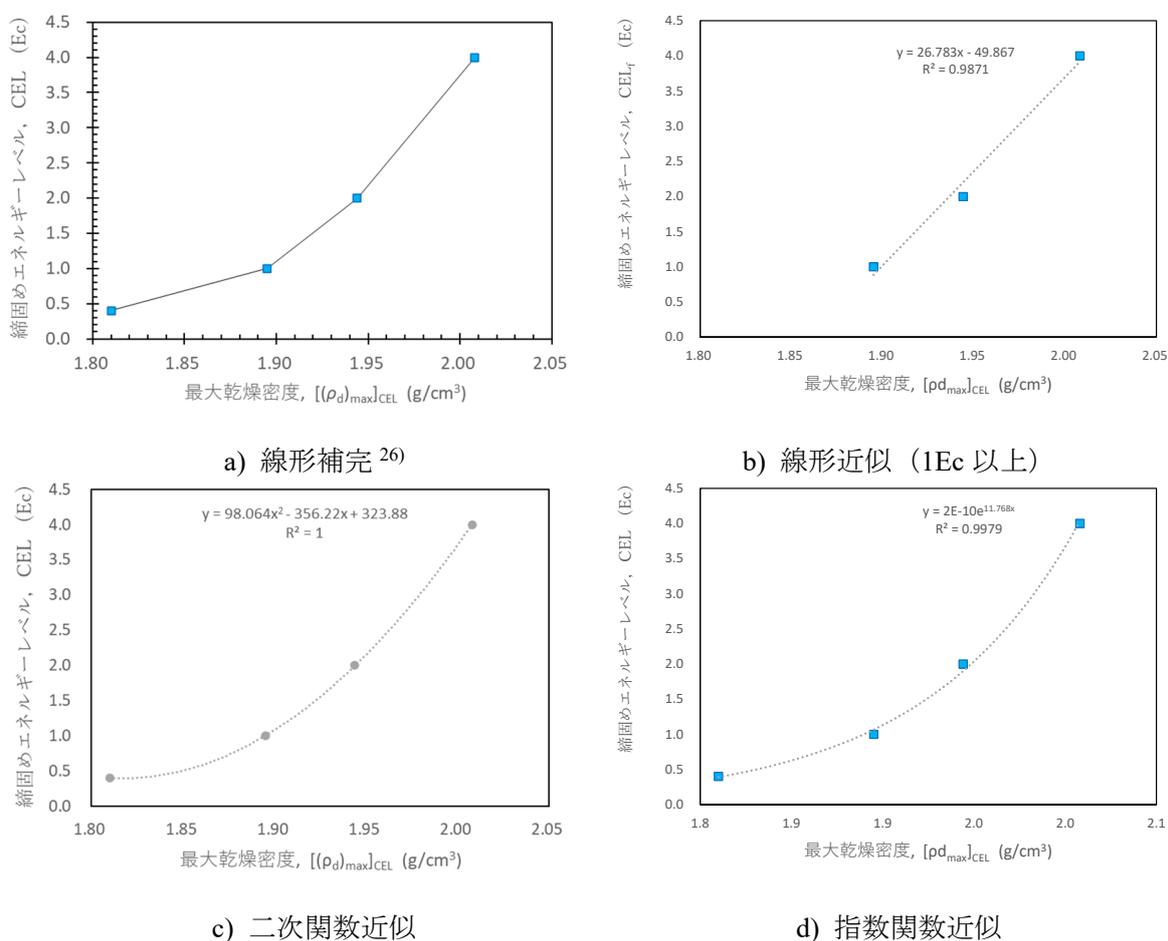


図-2.13 $[(\rho_d)_{\max}]_{\text{CEL}} \sim \text{CEL}$ の関係 (室内試験)

2.4. 現場の締固めエネルギーレベルの推定

現場の締固めエネルギーレベルは、現場盛立試験の結果を用いて、2.3節に示した手順にもとづき推定した。

盛立試験のケース一覧を表-2.2に示す。表-2.2に示すとおり小石原川ダムでは、2段階の盛立試験を実施した。盛立試験1では、2種類の転圧機種を用いて、締固めエネルギーレベルの規定条件となる施工仕様（転圧機種、転圧回数、施工厚）を変化させて試験を行い、確認された各条件における締固めエネルギーを参考に施工仕様を決定した。盛立試験2では、盛立試験1で決定した施工仕様で施工含水比を変化させることによって、実施工における含水比、飽和度の管理範囲を検討し、決定した。

本節では盛立試験1の結果に基づく締固めエネルギーレベルの推定結果を示す。

なお、盛立試験では表-2.3に示す試験項目の他、鉛直方向の密度分布に関する試験³⁹⁾、地盤剛性に関する試験⁴⁰⁾を実施しているが、以降に記す検討ではこれらの試験結果は用いていないため、表-2.3への記載は割愛した。地盤剛性に関する検討結果については第3章以降に、鉛直方向の密度分布に関する検討については付録Aに記す。

2.4.1 試験条件

試験ヤードは実施工と同じ仕上がり厚30cmで3層分を造成し、各種の現場試験は下層地盤の影響を受けないよう3層目で実施した。盛立試験ヤードの造成例と試験孔の基本配置を図-2.14に示す。盛立試験で用いた材料の粒度分布を図-2.15に示す。

表-2.3 現場盛立試験 ケース一覧

区分	Case	転圧機種	転圧回数 N	含水比 ($D_{max}=37.5\text{mm}$ 試料)		備考	試験項目 (共通)
				w ※1	$w'_{1E_c}=w-(w_{op})_{1E_c}$ ※1		
盛立試験1	Case1-1	10t級平滑振動ローラ	0,2,4,6,8,10,16	14.3%	-0.8%	乾燥側	現場密度試験 (JGS 1611)
	Case1-2	19t級振動タンピングローラ	0,4,6,8,10,16	14.3%	-0.8%	乾燥側	現場透水試験※2 (JGS 1316)
盛立試験2	Case2-1	10t級平滑振動ローラ	6,8	17.3%	2.2%	湿潤側	含水比試験※3 (JIS A 1203)
	Case2-2	10t級平滑振動ローラ	6,8	15.6%	0.6%	中間含水比	粒度試験※3 (JIS A 1204)
	Case2-3	10t級平滑振動ローラ	6,8	13.4%	-1.6%	極端に乾燥した状態	締固め試験※4 (JIS A 1210)

※1 w …自然含水比, $(w_{op})_{1E_c}$ …1Ecの最適含水比(≒15.1%) ※2 現場透水試験はN=4,6,8で実施
 ※3 現場密度試験孔より採取した試料で実施 ※4 各ケースで代表試料により実施

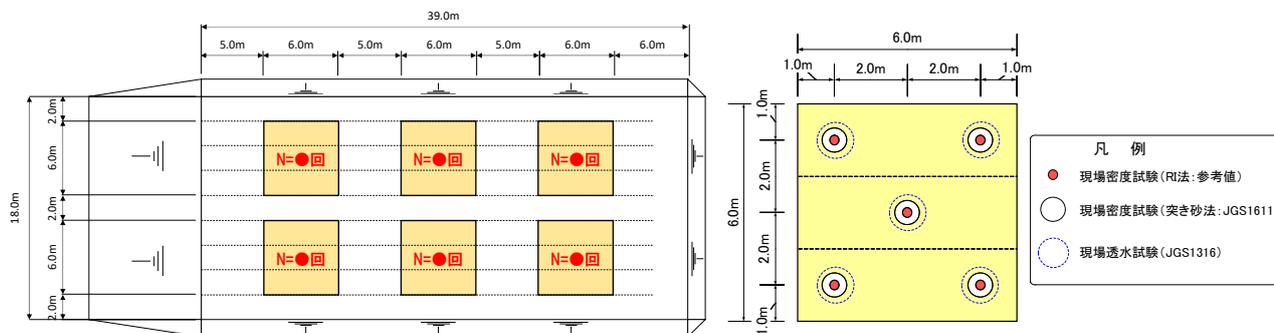


図 2.14 盛立試験ヤード造成例と原位置試験孔の基本配置

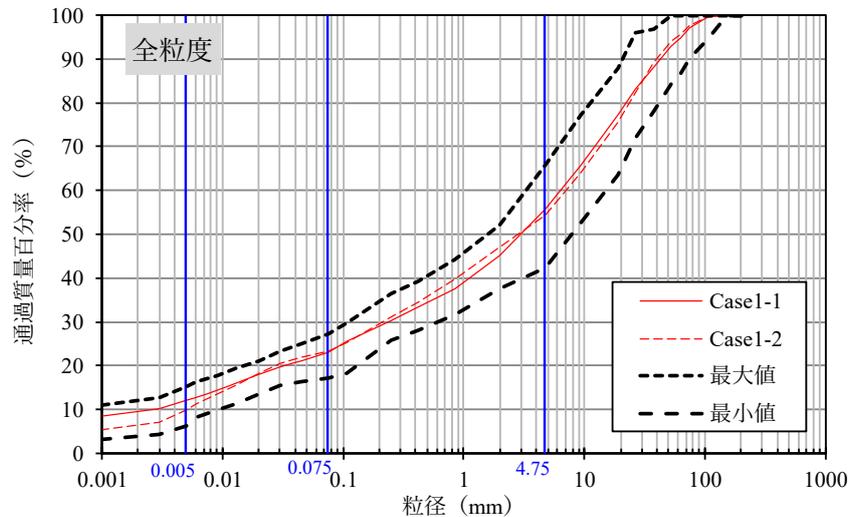


図-2.15 粒度分布（盛立試験試料）²⁶⁾

次に盛立試験 1 における試験含水比の設定(=14.3%)の考え方を説明する。2.3.節に記した室内試験で確認されたように、含水比が $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも湿潤側となる条件では、現場の締固めエネルギーレベル CEL_f を増大しても ρ_d はほとんど増加しないことが想定された。このため CEL_f の影響をより明確に評価できるように、盛立試験 1 は実施工で再現可能な範囲で、できるだけ乾燥側の含水比で実施することとした。そこで、含水比低下が困難な冬期の材料製造時でも曝気処理等により実現可能な含水比で実施することとし、「盛立試験での現場全粒度試料を最大粒径 $D_{max} = 37.5\text{mm}$ で尖頭粒度調整した部分」の含水比として $w = (w_{opt})_{1Ec} - 0.8\%$ となる14.3%とした。

2.4.2 締固め効果の評価方法

本研究では「最大粒径 $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分」の締固め状態に着目した評価を行うため、以下の手順でデータの計測・換算を行い、データ解析を行った。

乾燥密度の評価では、原位置試験で測定した全粒度試料の ρ_d の値から Walker-Holtz の礫率補正式⁴¹⁾によって $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分の値に換算し、 $D_{max} = 37.5\text{mm}$ 試料を用いた室内締固め試験(1Ec)で得た最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$ で除すことによって「 $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分の1Ec 基準の締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ 」を求めた。

含水比の評価では、原位置全粒度試料の内部の $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分の含水比 w を、現場採取した全粒度試料を $D_{max} = 37.5\text{mm}$ のせん頭粒度で調整して測定した。

なお、試験孔毎の礫率のバラツキの影響を排除して比較・分析を行うため、現場密度試験孔からの採取試料を用いて、試験孔毎に粒度試験、含水比試験、締固め試験を実施することで試験孔毎に礫率・最適含水比・最大乾燥密度を確認して解析に用いた。

本研究で、「最大粒径 $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分」の締固め状態に着目したのは、以下の2つの理由による。

理由1：室内試験材料の最大粒径が37.5mmであること

第一の理由は、本ダムのコアゾーンでも、現場全粒度試料は $D_{\max}=150\text{mm}$ と大きすぎて室内締固め試験が実施できないが、「現場の $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分」の $(D_c)_{1Ec} = \rho_d / [(\rho_d)_{\max}]_{1Ec}$ の算出に必要な $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の室内試験は実施できることである。

また、**図-2.15**より小石原川ダムのコア材の37.5mm以上の礫率は10%程度と比較的小さいことから、現場全粒度試料の透水性は「その内部の $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分」の透水性によって支配されると考えられた。

以上より、現場全粒度試料の透水係数を「 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分」の $(D_c)_{1Ec}$ を管理することによって管理するのは合理的である、と判断した。

理由2：安全側の評価となること

第二の理由は、設計では、[1]現場では全粒度試料と「 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分」の $(D_c)_{1Ec}$ の値が同一と仮定し、[2]同一の $(D_c)_{1Ec}$ での両者の強度・剛性は同一と仮定して、全粒度試料の強度・剛性として「 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分」の算定された現場 $(D_c)_{1Ec}$ の値に対応する値を用いたが、この二つの仮定は安全側となると判断したからである。

仮定[1]に関して、三国の礫率を変化させた室内試験の結果³⁶⁾に基づくと、現場で「 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分」に加わるCELは、エネルギーの一部が粒径37.5mm以上の粒子の粒子破碎等に消費され、全粒度試料に加わるCELよりも小さくなる。この傾向は、本ダムのコア材で最大粒径 D_{\max} を順次減少させた複数のせん頭粒度試料を用いた室内締固め試験によっても確認されている⁴²⁾。これらの結果から、仮定[1]は安全側と判断できる。

仮定[2]に関しては、一般に均等係数が小さいほど同一の $(D_c)_{1Ec}$ での強度・剛性は小さくなる傾向にある⁴³⁾。一般的にせん頭粒度調整を行うと均等係数は低下し、今回の試験材料でもその傾向は当てはまる（例えば盛立試験Case1-1では、「 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分」の均等係数は1,768であり、現場全粒度試料の均等係数2,340と比較すると小さい）ことから、仮に $(D_c)_{1Ec}$ が同一でも設計値で用いた強度・剛性は実施工でえられる強度・剛性よりも小さくなり、仮定[2]も安全側の仮定と判断できる。

2.4.3 試験結果

突き砂法による現場密度試験（JGS1611）と現場透水試験（JGS1316）の結果を**図-2.16**に示す。**図-2.14**に示すように現場密度試験は各転圧回数で5か所で実施しており、**図-2.16**には締固め状態 (w, ρ_d) の5点平均値をプロットしている。

図-2.16より、Case1-1（平滑振動ローラ）では転圧回数 $N \geq 6$ での現場における「現場全粒度試料（ $D_{\max}=150\text{mm}$ ）の内部の $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の部分」の締固め状態は1Ec～2Ecの室内締固め曲線の間に、Case1-2（振動ダンピングローラ）では $N \geq 6$ で1Ecの室内締固め曲線付近に位置していることが分かる。

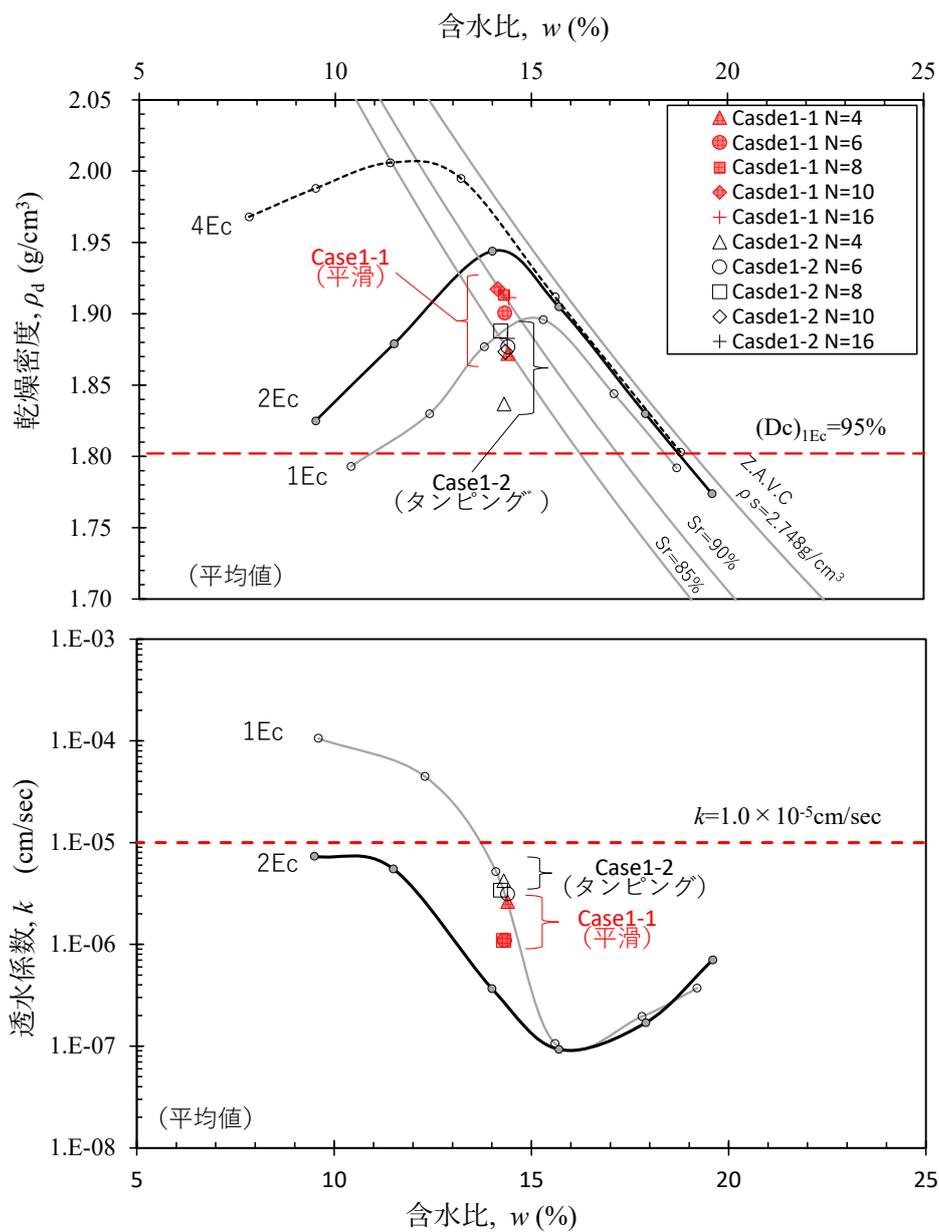


図-2.16 盛立試験 1 の結果 ($w \sim \rho_d, k$)²⁶⁾

2.4.4 現場の締固めエネルギーレベル CEL_f の評価

本項では、現場の締固めエネルギーレベル CEL_f の評価方法を記す。 CEL_f は次の手順で算定を行った。

- ① 締固め条件（転圧機種、転圧回数）に応じた「現場の $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分」の締固め状態（含水比、飽和度、乾燥密度）を確認する。
- ② 盛立試験での「現場の $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分」の正規化締固め曲線 $S_r' \sim (D_c)_t$ の関係が **図-2.12** に示すものと同じと仮定し、①で確認した (ρ_d, S_r) と盛立試験時の採取試料を用いた室内締固め試験から得られる $(S_r)_{opt}$ を、**図-2.12** に示す正規化締固め曲線の近似式に代入して、現場の締固めエネルギーレベル CEL_f による最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{CEL_f}$ を得る。
- ③ ②で得られた $[(\rho_d)_{max}]_{CEL_f}$ を室内試験から得られる $[(\rho_d)_{max}]_{CEL_f} \sim CEL$ の関係 (**図-2.13**) に代入し、「現場の $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分」の締固め状態を再現する室内締固め試験での CEL の値を求める。
- ④ ①～③を繰り返して、各現場試験条件（転圧機種、転圧回数）に応じた CEL_f を求め、転圧回数 N との関係に整理する (**図-2.17**)。

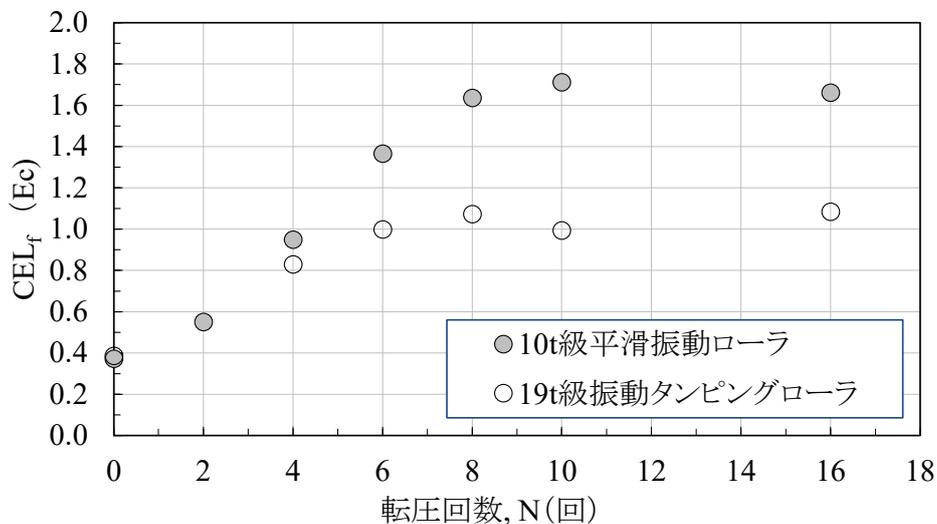


図-2.17 CEL_f の推定結果²⁶⁾
(**図-2.13a**) を用いて算定)

図-2.17 のとおり、この CEL_f の値は、19t 級振動タンピングローラでは $1Ec$ 付近に収束したが、10t 級平滑振動ローラでは $N=8$ で $1.6Ec$ 付近まで上昇して収束した。実工事で用いる機種の選定のために、**図-2.14** に示す現場締固め状態 ($w \sim \rho_d, w \sim k$) とそれに対応する $N \sim CEL_f$ 関係 (**図-2.17**) に加えて、鉛直方向の密度分布、現場透水係数の値 (**図-2.16b**)、施工性を比較検討し、総合的に見て 10t 級平滑ローラが有利であると判断した³⁹⁾。鉛直方向の

密度分布に関する測定結果については付録 A を参照されたい。施工仕様として転圧回数は $N=8$ とし、設計で想定する CEL_f の値は $N=8$ での CEL_f の実測値に若干の余裕を考慮して $1.5Ec$ とした。

【補足】

③のプロセスにおいて「室内試験から得られる $[(\rho_d)_{max}]_{CEL_f} \sim CEL$ の関係」に採用する近似式によって、推定される $N \sim CEL_f$ 関係は若干変化する。採用する近似式ごとの $N \sim CEL_f$ 関係を図-2.18 に示し、その影響を考察する。

図-2.18 より、b)線形近似式は $1Ec \sim 4Ec$ 試験値に、c)二次関数近似、d)指数関数近似は $0.4Ec \sim 4Ec$ の試験値に対応した ρ_d の範囲で近似式を作成しているため、この範囲から外れる範囲の信頼性は低いと考えられる。また図-2.13 の b)~d)の図中の相関係数より、b)直線近似の信頼性は他のケースより劣る。

近似式の違いにより、評価値の絶対値は若干異なるが a),c),d)の評価結果から、19t 級振動タンピングローラでは $1Ec$ 付近で、10t 級平滑振動ローラでは $1.5Ec$ 前後で収束しており、前述の評価結果に変更は生じないものと考えられる。

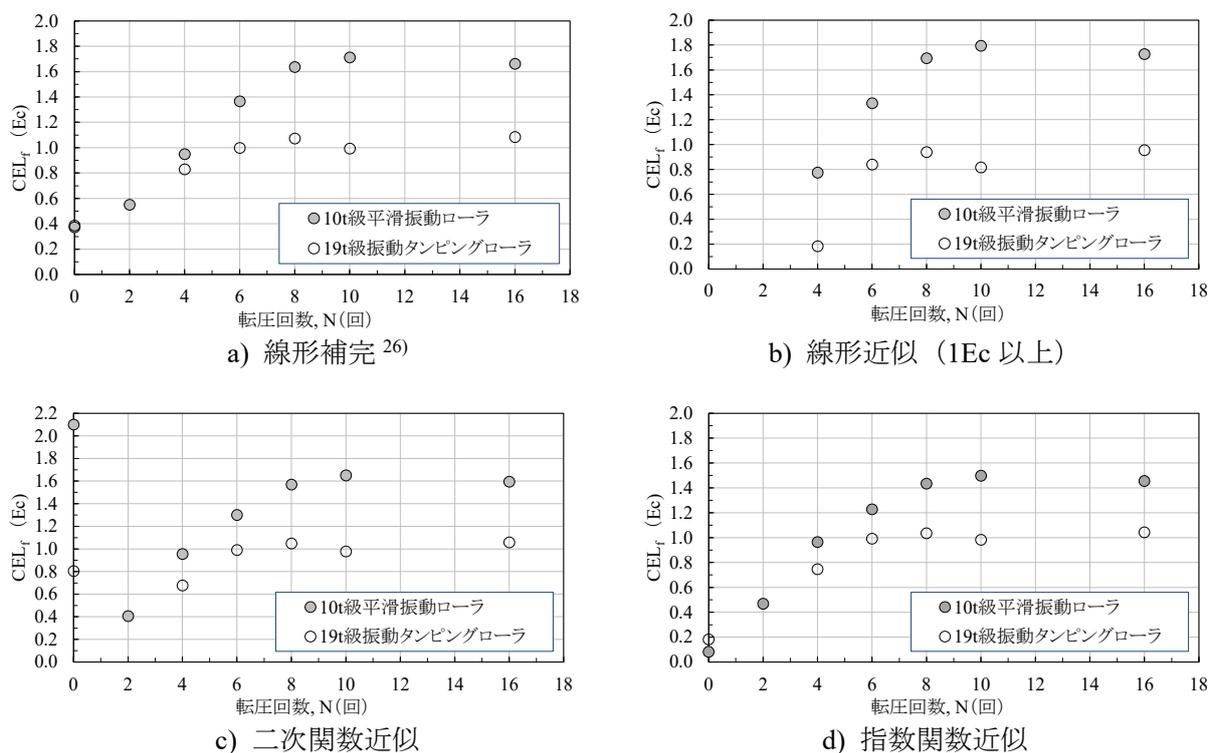


図-2.18 近似式による $N \sim CEL_f$ 関係の違い

2.5. 締固め状態の管理領域の設定法

盛立試験2では、盛立試験1で選定した転圧機種（10t級平滑ローラ）を用いて、コア材Aを対象にして含水比 w と飽和度 S_r の変化が乾燥密度 ρ_d と透水係数 k に与える影響を確認し、実施工で設定すべき w と S_r の管理範囲を検討した。

なお、コア材Bでも同様の盛立試験を実施して、コア材Aで設定した管理領域で品質が確保出来ることを確認している。しかし、その結果は管理領域決定のプロセスでは参照していないことから、その報告は本論文では省略する。

2.5.1 現場試験条件

試験ケースと試験項目の一覧を表-2.3に示す。ここに示す含水比は、 $D_{max}=37.5\text{mm}$ の部分の値であり、標準プロクター1Ecでの最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ を基準にして $w' = w - (w_{opt})_{1Ec} = -1.6\% \sim 2.2\%$ の範囲で複数設定した。できるだけ全体的な傾向を把握するために、現場試験を行う w の範囲には現場透水係数が品質管理基準を満足しないことが予測された w の値も含んでいる。

各ケースでの原位置全粒度試験材の平均粒度分布を図-2.19に示す。使用材料は全て小石原川ダム的一般コア材であり、その標準粒度試料として製造したコア材Aを使用した。なお、Case2-3は、追加試験であり、試験材料は追加試験時にパイルから新たに製造したため、粒度分布が粒径 0.075mm 以上の範囲でCase1-1, 2-1, 2-2とは若干異なる。

表-2.3 現場盛立試験 _ ケース一覧 【再掲】

区分	Case	転圧機種	転圧回数 N	含水比 ($D_{max}=37.5\text{mm}$ 試料)		備考	試験項目 (共通)
				w ※1	$w'_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ ※1		
盛立試験1	Case1-1	10t級平滑振動ローラ	0,2,4,6,8,10,16	14.3%	-0.8%	乾燥側	現場密度試験 (JGS 1611)
	Case1-2	19t級振動タンピングローラ	0,4,6,8,10,16	14.3%	-0.8%	乾燥側	現場透水試験※2 (JGS 1316)
盛立試験2	Case2-1	10t級平滑振動ローラ	6,8	17.3%	2.2%	湿潤側	含水比試験※3 (JIS A 1203)
	Case2-2	10t級平滑振動ローラ	6,8	15.6%	0.6%	中間含水比	粒度試験※3 (JIS A 1204)
	Case2-3	10t級平滑振動ローラ	6,8	13.4%	-1.6%	極端に乾燥した状態	締固め試験※4 (JIS A 1210)

※1 w …自然含水比, $(w_{opt})_{1Ec}$ …1Ecの最適含水比 (≒15.1%) ※2 現場透水試験はN=4,6,8で実施

※3 現場密度試験孔より採取した試料で実施 ※4 各ケースで代表試料により実施

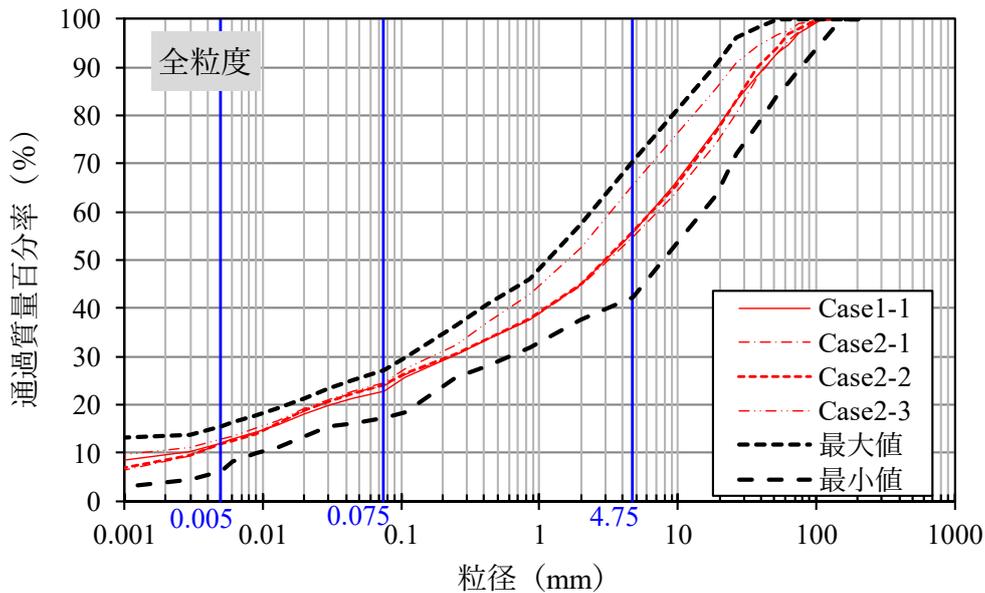


図-2.19 粒度分布（盛立試験 2）²⁶⁾

2.5.2 試験結果

図-2.20 に、盛立試験 1 (Case1-1)と盛立試験 2 (Case2-1～2-3)の結果を併せて示す。同一の CEL_f で比較するため、施工仕様とした転圧回数である $N=8$ の結果だけを示す。図-2.16 と同様に、現場試験で得た全粒度試料の ρ_d と w の値から Walker-Holtz の礫率補正式⁴⁰⁾得た $D_{max}=37.5\text{mm}$ の部分の値を、室内試験の結果と比較している。図-2.20a)には各ケースで実施した 5 か所での個別の試験値を、図-2.20b)には平均値を示す。また、図-2.20 には参考として、図-2.12 に示した正規化締固め曲線に基づいて推定した 1.5Ec の締固め曲線を併せて示す。

図-2.20 より、 ρ_d に関しては、すべてのケースで品質管理基準を十分に満足しており、その平均の (ρ_d, w) 状態は推定した 1.5Ec の締固め曲線付近にプロットされていることが分かる。これら複数の含水比が異なる盛立試験結果からも、設定した施工仕様における現場 CEL_f は 1.5Ec 程度であることが再確認された。

現場透水係数 k の分布をみると、最も乾燥側で含水比 w が 13.4% である Case2-3 では乾燥密度 ρ_d は（すなわち締固め度 $(D_c)_{1.5Ec}$ ）は規格値を満足しているが、透水係数は規格値 ($k \leq 1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$) を満足していない。透水係数 k は、 ρ_d と S_r の関数であるが、この場合のように ρ_d が一定の範囲内に収まる場合は、図-2.11 を見て分かるように S_r が主要な影響パラメータとなり、土質と CEL_f が一定の範囲で変動しても S_r を管理することによって k を効果的に管理できる。

そこで、 S_r に注目すると、Case2-3 では S_r の値は最も低く、その平均値は 82% 程度であり、 S_r が 80% を下回る個別値もある。一方、全ての透水係数の個別値が規格値を満足している Case1-1, 2-1, 2-2 では、 S_r の個別値は全て 85% 以上である。

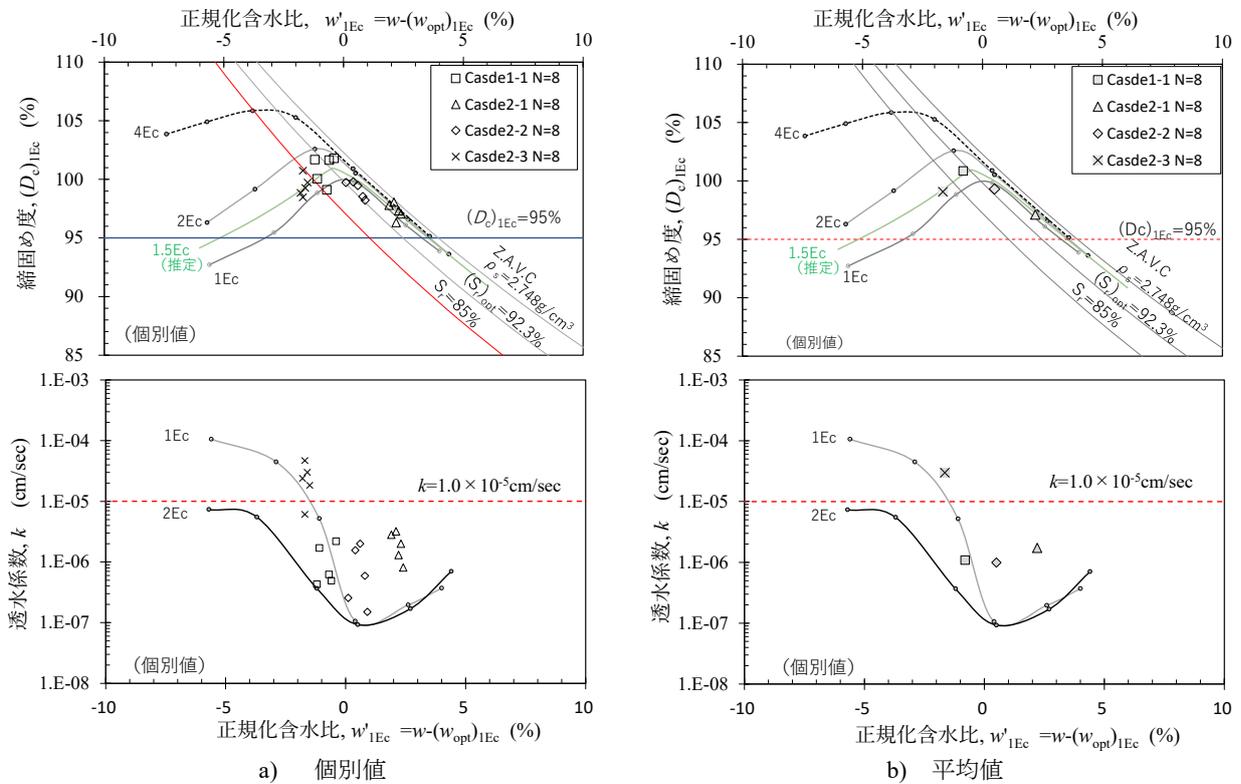


図-2.20 盛立試験結果 ($w \sim \rho_d, k$) 26)

次に各ケースの施工状況写真を写真-2.1～2.4 に示す。施工時に目視・触診で確認される特徴を表-2.4 に示す。ここでは、ともに施工含水比が 1Ec の最適含水比よりも低い条件であるものの、透水係数が規格値を満足した Case1-1 と透水係数が規格値を満足しなかった Case2-3 の違いに着目して考察する。

透水係数が規格値を満足した Case1-1 では 1Ec の最適含水比よりも低い条件であるものの、締固め後の盛立面の表面は軽く湿潤している状態で、触診時に指先を盛立面に押さえつけると僅かに凹む。その他の特徴として、Case1-1 では「長靴の足跡が残る」、「転圧時にローラの沈み込みが確認できる」「ローラの轍が確認できる」などがある。

一方、透水係数が規格値を満足しない Case2-3 では、写真から盛立面の乾燥が著しいことが分かる。試験結果としての飽和度の差は、数値で見ると極端な差はないように見えるが、現場の見た目の違いは一目瞭然であった。触診においても盛立面は乾燥しており、転圧面に指を押し付けても跡がつかない。その他に目視確認できる特徴として、「施工中に強風で粉塵が舞う」「長靴の足跡がつかない」「振動ローラの沈み込みが確認できない（むしろ跳ねる）」「ローラの轍がほとんど残らない」などが挙げられる。

このように、所要の透水係数を満足する状況では土中の含水量が一定程度あり、飽和度も

高くなっているため、目視で確認される転圧面の状態も湿潤しており、転圧後も剛性が極端に高くなることはない。

これらのことより、実際の施工管理にあたっては、目視監視によってこのような材料乾燥を避けることが最も重要であることがわかる。

また、現場盛立試験において目視確認された前述の特性を複数の計測方法による地盤剛性指標のデータからも確認できたことで、次章で説明する剛性指標を用いた遮水性能評価の考え方の着想を得た。これは「材料が施工途中に極端に乾燥して、転圧後の剛性が大きく上がっている状況では遮水性能を満足していない状態になっている。このため、剛性指標の上限値管理を行うことで透水係数の上限値を間接的に管理する」という考え方である。これらの詳細は第3章に記す。



a) 盛立面状況 (全景)



b) 盛立面状況 (接写)

写真-2.1 試験施工時の写真 (Case1-1, $w=(w_{opt})_{1Ec}-0.8\%$, 管理下限値; 乾燥側)



a) 盛立面状況 (全景)



b) 盛立面状況 (接写)

写真-2.2 試験施工時の写真 (Case2-1, $w=(w_{opt})_{1Ec}+2.2\%$, 管理上限値: 湿潤側)



a) 盛立面状況 (全景)



b) 盛立面状況 (接写)

写真-2.3 試験施工時の写真 ($w=(w_{opt})_{IEc}+0.5\%$, 中間含水比)



a) 盛立面状況 (全景)



b) 盛立面状況 (接写)

写真-2.4 試験施工時の写真 ($w=(w_{opt})_{IEc}-1.7\%$, 下限値より乾燥側)

表-2.4 試験施工時の盛立面の状況の比較

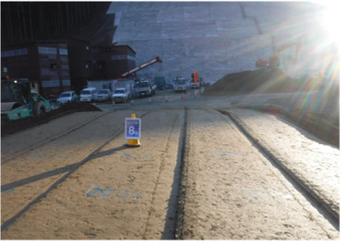
(a) 撒き出し後

Case	Case1-1	Case2-1	Case2-2	Case2-3
含水比	w = 14.3% ($w'_{1Ec} = -0.8\%$)	w = 17.3% ($w'_{1Ec} = 2.2\%$)	w = 15.6% ($w'_{1Ec} = 0.6\%$)	w = 13.4% ($w'_{1Ec} = -1.6\%$)
盛立面状況 (全景)				
盛立面状況 (近景)				
所見	<ul style="list-style-type: none"> ・若干乾燥気味であるが、手で握り団子を作ることが可能で、団子は崩れない。 ・握った手に薄く細粒分が残る。 ・指先で細粒分を紐状にすることが出来る。 ・BDの踏み跡を観察すると、細粒分がやや湿潤した状況が確認できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・手で握り団子を作ることが可能で、団子は崩れない。 ・握った手に薄く細粒分が残る。 ・触感で湿潤している感覚が残る。 ・指先で細粒分を紐状にすることが出来る。 ・BDの踏み跡を観察すると、細粒分が湿潤した状況が確認できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・手で握り団子を作ることが可能で、団子は崩れない。 ・握った手に細粒分が残る。 ・触感で湿潤している感覚が残る。 ・指先で細粒分を紐状にすることが出来る。 ・BDの踏み跡を観察すると、細粒分がやや湿潤した状況が確認できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥気味で、手で握り団子を作ることが可能であるが、容易に崩れる。 ・握った手に細粒分は殆ど残らない。 ・指先で細粒分を紐状にすることが出来ない場合がある。 ・BDの踏み跡に湿潤状態は殆ど見られない。(晴天で風も吹いていたので、表面が乾燥し易い条件だったことも起因する。ただし、転圧面を掘り起こすと2cm程度下部では湿った状態であった。)

$w'_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ 、 $(w_{opt})_{1Ec} = 15.1\%$

BD…ブルドザ

(b) 転圧後

Case	Case1-1	Case2-1	Case2-2	Case2-3
含水比	w=14.3% (w' _{1Ec} =-0.8%)	w=17.3% (w' _{1Ec} =2.2%)	w=15.6% (w' _{1Ec} =0.6%)	w=13.4% (w' _{1Ec} =-1.6%)
盛立面状況 (N=4)				
盛立面状況 (N=6)				
盛立面状況 (N=8)				
所見	<ul style="list-style-type: none"> ・ N=2→4→6→8→…と転圧回数の増加とともに、転圧面が湿潤していく。 ・ N=6程度で概ね飽和度は最適状態になり、ローラが転圧面にめり込む音が聞こえる ・ 転圧面がローラの荷重で沈み込んだ後、元に戻る挙動が目視で確認できる。 ・ 轍が若干生じる ・ ウェーピング状態は確認できない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ N=2→4→6→8→…と転圧回数の増加とともに、転圧面が湿潤していく。 ・ N=4～6程度でローラが転圧面にめり込む音が聞こえる ・ 転圧面がローラの荷重で沈み込んだ後、元に戻る挙動が目視で確認できる。 ・ 轍がCase1-1,2より大きい。 ・ 軽度のウェーピングが確認されるが、施工性に問題が生じるほどではない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ N=4～6程度で概ね飽和度は最適状態になり、ローラが転圧面にめり込む音が聞こえる ・ 転圧面がローラの荷重で沈み込んだ後、元に戻る挙動が目視で確認できる。 ・ 轍がCase1-1より大きい。 ・ ウェーピング状態は確認できない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ N=2→4→6→8→…と転圧回数の増加しても転圧面の湿潤化はほとんど進まない。(晴れで風もあったため、表面はすぐに乾燥する) ・ 転圧面がローラの荷重で沈み込む挙動は殆どみられない。 ・ 転圧面では乾燥した礫が振動する様子が観察される ・ 轍はほとんど生じない。

$W'_{1Ec} = W - (W_{opt})_{1Ec}$, $(W_{opt})_{1Ec} = 15.1\%$

2.5.3 品質管理領域の設定

2.5.2 で説明した現場盛立試験の結果の解析に基づいて、 k が規格値に対して若干の余裕をもって満足するよう飽和度 S_r の管理下限値 S_rL を85%とした。また、 CEL_f が1.5Ec程度であることを前提にして上記の条件を満足するための含水比 w の管理範囲は、現場透水係数が規格値を満足するCase1-1の含水比を下限値とし、既設ダムで一般的に設定される3%の幅で管理するものとして、 $(w_{opt})_{1Ec} - 0.8\% \leq w \leq (w_{opt})_{1Ec} + 2.2\%$ とした。

以上のように設定した乾燥密度、含水比、飽和度の管理領域を図-2.21に示す。

実施工では、土質と CEL_f を一定の範囲に収まるよう管理をするが、管理の幅の中で不可避免的にばらつきが発生するため、計測地点毎に締固め特性は変化し、それに影響を受けて現場の w と ρ_d の値は変動する。すなわち、図-2.22に模式的に示すように、 $w \sim \rho_d$ 平面における締固め状態 (w, ρ_d) は同一の点であっても、締固め曲線との相対的な位置関係によって、その点が意味する締固め状態は異なる。

そこで、土質と CEL のばらつきの影響を極小化するために、管理図の横軸を $w'_{1Ec} (= w - (w_{opt})_{1Ec})$ で、縦軸を $(D_c)_{1Ec} (= \rho_d / [(\rho_d)_{max}]_{1Ec})$ で正規化した。すなわち、横軸を $w'_{1Ec} (= w - (w_{opt})_{1Ec})$ でプロットすることによって、現場での土質と CEL_f の変動による変動を受けないで管理図を規定することができる。

なお、今回の場合のように乾燥密度 ρ_d の変化幅が限定的な場合は、 $(w')_{1Ec} (= w - (w_{opt})_{1Ec})$ は湿潤状態の指標として上記の点で $S_r (= S_r - (S_r)_{opt})$ とほぼ同義である。 S_r を求めるためには土粒子密度が必要であり、図-2.32で後述するようにこの現場では土粒子密度のばらつきが大きく S_r の値がかなりばらついた。したがって、 w' を現場湿潤状態の指標として管理法を規定した。

S_r の管理下限値 $S_rL=85\%$ を設定することによって、 CEL_f が1Ecよりも高いことを反映して w の管理下限値を $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも低い乾燥側に設定できた。その結果、 w の管理範囲を全体的に乾燥側に移動したことにより、 CEL_f の想定値の向上に対応して ρ_d が増加できるようになった。これらの結果、品質管理領域の重心は左上にシフトした。このように管理領域を設定したことによって従来よりも強度・遮水性の性能向上が期待できると判断した。

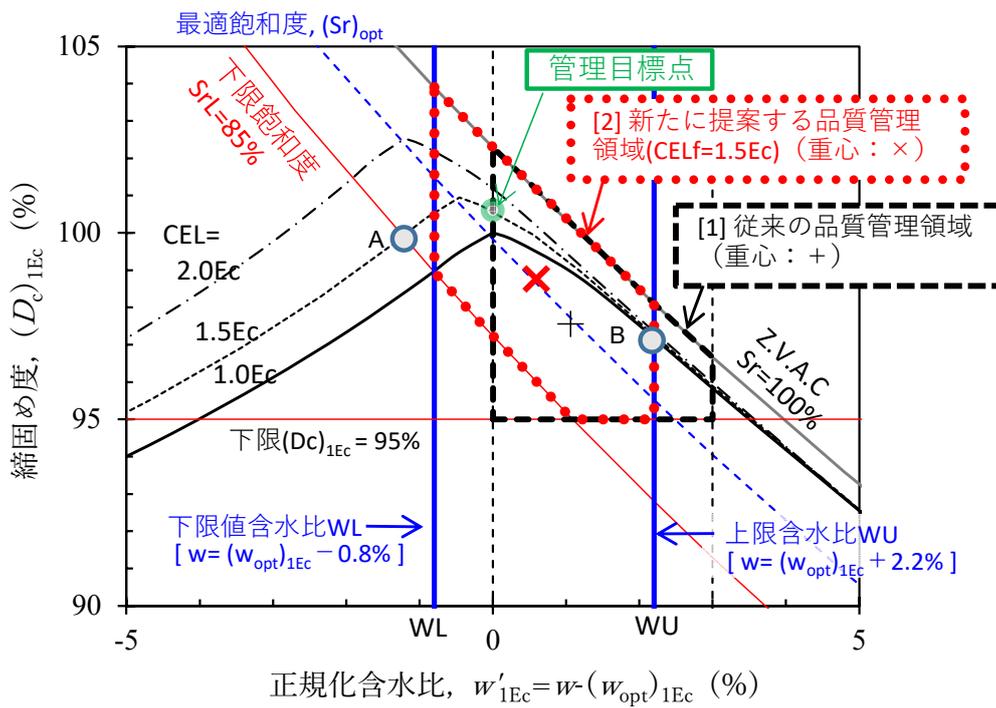


図-2.21 $w' \sim (D_c)_{1Ec}$ 平面での管理領域²⁶⁾

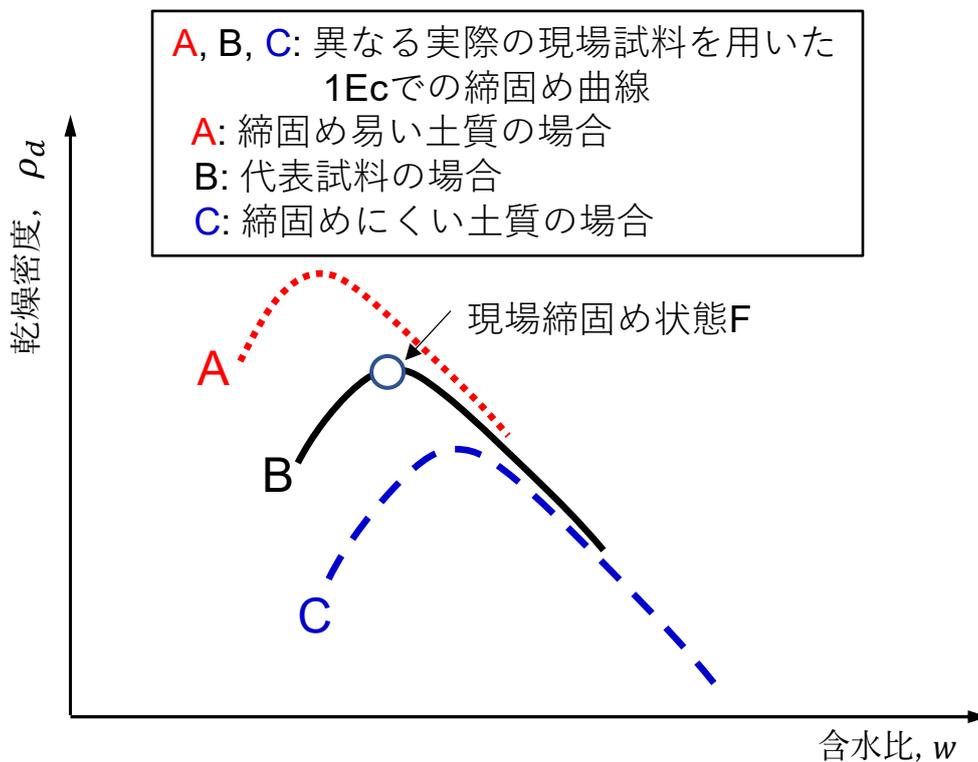


図-2.22 締固め曲線の変化に応じた締固め状態の意味の相違

飽和度の管理上限値 S_rU は、例えば含水比の管理上限値 $WU(= (w_{opt})_{1Ec} + 2.2\%)$ と CEL_f の締固め曲線との交点（**図-2.21** の点 B）における飽和度（盛立試験 1 では 97%）で設定することが考えられた。しかし、盛立試験での個別孔の試験値では $S_r > 97\%$ となる点は複数点存在するが、これらでは ρ_d と k は規格値を満足しており、また試験施工時の現場状況も重度のウェービング等の問題となる事象は生じてなかった。これらのことから、小石原川ダムでは S_rU は規格値としての上限值ではなく努力目標値として取り扱うものとした。

また、本ダムでは、**図-2.21** に示すように、管理基準値とは別に管理目標点を設定した。これは、本来目標とすべき締固め状態を明示することより、その状態が実現する努力を奨励することができる、と考えたからである。すなわち、締固め状態が全て含水比の管理範囲内の場合でも、全体として湿潤側に寄りすぎると、**図-2.10**、**図-2.20** に示すように、 CEL_f が $1Ec$ よりも上昇しても ρ_d の上昇と k の低下は殆どなくなり、向上した CEL_f が有効に活用されないためである。これを避けること、加えて過度に乾燥側になり遮水性能が低下することを確実に回避するために、 w の目標値を $(w_{opt})_{1Ec}$ と設定して $w = (w_{opt})_{1Ec}$ の鉛直線と CEL_f ($\doteq 1.5Ec$) の締固め曲線の交点を管理目標点として設定した。この結果、締固め目標状態での飽和度 S_r は、最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ よりもやや大きくなる。

2.6. 実施工への適用結果

2.6.1 含水比～締固め度 ($w'_{1Ec} \sim (D_c)_{1Ec}$ 関係)

(1) 突き砂法 (定期管理)

図-2.23 に本ダムでの定期管理試験のフローを示す。図-2.24 に定期管理試験 (突き砂法) の試験結果を示す。図-2.24 では 2.4.2 で説明したとおり、現場における土質と CEL_f の変動の影響を排除するために、図-2.20 と同様に横軸を含水比と $CEL=1Ec$ における最適含水比との差分 $w'_{1Ec} (= w - (w_{opt})_{1Ec})$ に、縦軸を $CEL=1Ec$ の締固め度 $(D_c)_{1Ec} (= \rho_d / [(\rho_d)_{max}]_{1Ec})$ に正規化して整理した。

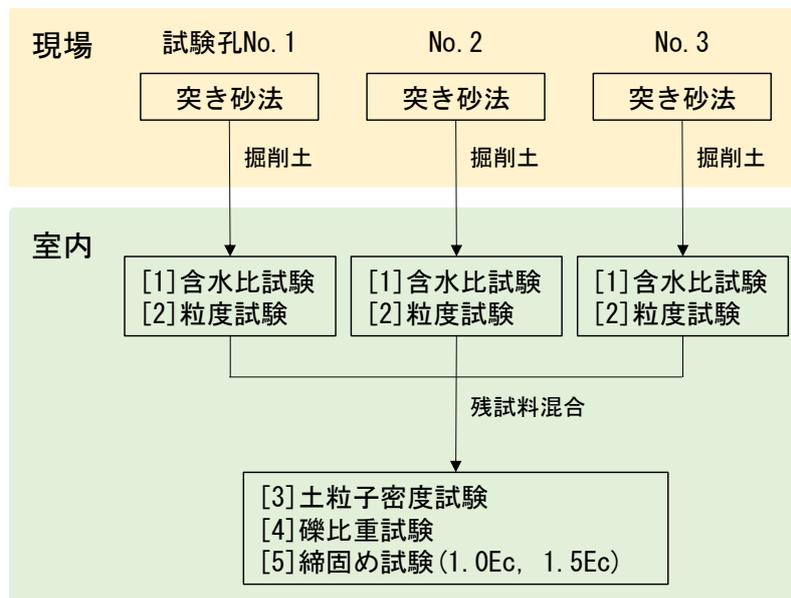


図-2.23 定期管理試験の試験フロー

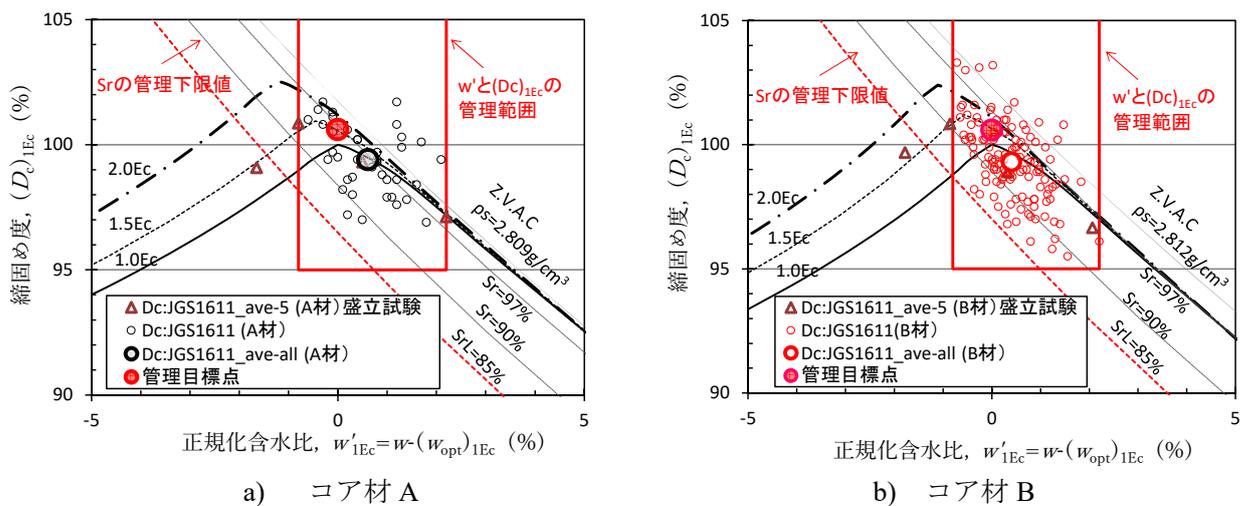


図-2.24 $w' \sim (D_c)_{1Ec}$ 関係の施工実績 (突き砂法) ²⁶⁾

図-2.23 に示すように、定期管理試験では、各回の試験において三つの試験孔から採取し

た試料を用いて、[1]含水比試験、[2]粒度試験、[3]土粒子密度試験、[4]礫比重試験、[5]締固め試験（1.0Ec と 1.5Ec）を実施した。[1]、[2]は試験孔毎に実施し、[3]～[5]は3孔に対して1回実施して各回の試験での代表値を得ている。このため、礫率補正は試験孔別の礫率を用いて実施できたが、飽和度 $S_r = w/(\rho_w/\rho_d - \rho_w/\rho_s)$ の算定に必要な土粒子密度 ρ_s 、礫比重 G_b は三つの試験孔の間でのバラツキの影響を受ける。また、 $[(\rho_d)_{\max}]_{1Ec}$ と $(w_{opt})_{1Ec}$ の値も、同様に三つの試験孔の間でのバラツキの影響を受ける。

また、**図-2.24**における S_r のコンターは、 S_r の算定に必要な最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{\max}]_{1Ec}$ 、最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ 、土粒子密度 ρ_s が不可避免的にばらつくため、各材料を用いた工事期間中の平均値を代表値として用いて作図した。このため、個別点の評価は、 $[(\rho_d)_{\max}]_{1Ec}$ 、 $(w_{opt})_{1Ec}$ のばらつきの影響は正規化により排除できるが ρ_s のばらつきの影響が排除できない。例えばA材ではコンターに作成した ρ_s の代表値は $2.809[\text{g}/\text{cm}^3]$ であるが、実施工でのばらつきは $2.748\sim 2.852[\text{g}/\text{cm}^3]$ でばらついている。このため、 ρ_s が異なるデータ群を代表値で定めた S_r のコンターと比較することになるため、個別点とコンターとの相対的な位置関係は、個別点と代表値の差に応じた誤差を有している。

以上のようなばらつきがあるものの、**図-2.24**より、A材、B材ともに締固め状態は管理目標点付近で管理されており、 $w'_{1Ec}(=w - (w_{opt})_{1Ec})$ の平均値は0.4%であり、 $(D_c)_{1Ec}$ の平均値は管理基準値である95%に対して99.4%であり、両者ともに規格値を十分に満足している。これは後述するとおり、近年のロックフィルダムの実績と比べて高い水準にある。

なお、個別の試験孔での飽和度 S_r はゼロ空気間隙曲線（ $S_r = 100\%$ ）を超過するデータが一部であるが複数存在する。これは前述したとおり、この図において個別点のデータポイントと S_r のコンターとの相対位置は、コンター作成に用いた ρ_s の代表値と個別点の ρ_s との差、および三つの試験孔/回の間における ρ_s のばらつきの影響を受けていることが原因の一つと考えられる。したがって、この図の場合では、個別データと飽和度 S_r のコンターとの関係は、 S_r 管理での目安として参照することにした。なお、後に示すように、個別の試験孔で測定された含水比、乾燥密度と土粒子密度 ρ_s に基づき算定された S_r の値は、全て規格値85%以上であることを確認している。

次に図-2.25 に、一般的な盛土工の管理図で利用される $w \sim \rho_d$ 平面上に、定期管理試験の個別点における締固め状態を以下の手順で統合化してプロットした結果を示す。

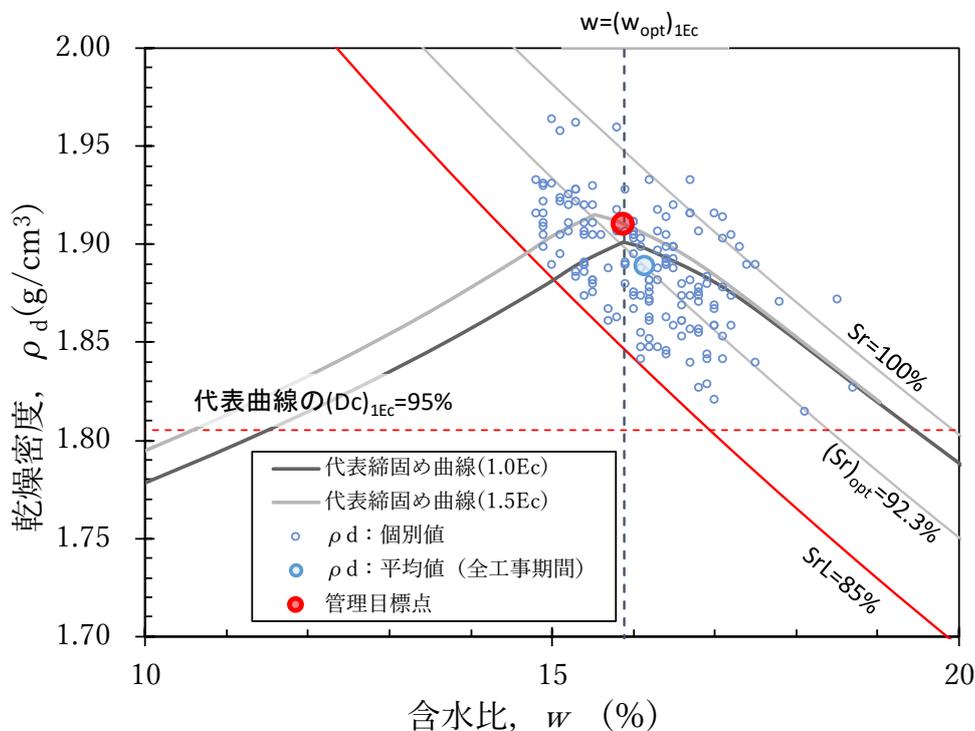


図-2.25 $w \sim \rho_d$ 平面の施工実績 (突き砂法) ²⁶⁾

- ① 品質管理試験で実施した締固め試験，土粒子密度試験の全データより $[(\rho_d)_{\max}]_{1Ec}$ の平均値 A， $(w_{\text{opt}})_{1Ec}$ の平均値 B，土粒子密度 ρ_s の平均値 C を求める。
- ② A を図-2.12 に示した正規化曲線に代入して得た $(S_r)_{1Ec} \sim (\rho_d)_{1Ec}$ 関係に B, C を代入し $(S_r)_{\text{opt}} = 92.3\%$ を用いて $w_{1Ec} \sim (\rho_d)_{1Ec}$ 関係に変換し， $CEL=1Ec$ の代表締固め曲線を描く。同様に， $CEL=1.5Ec$ に対する代表締固め曲線を描く。
- ③ C と $S_r=100\%$, $S_r=(S_r)_{\text{opt}} (= 92.3\%)$, $S_r=S_rL (=85\%)$ を $w = S_r \cdot e_b / G_s = S_r \cdot (\rho_s / \rho_d - 1) / (\rho_s / \rho_w)$ の関係に代入し， $S_r=100\%$, $(S_r)_{\text{opt}}$, S_rL に対応する飽和度コンター ($w \sim \rho_d$ 曲線) を描く。
- ④ 定期管理試験の個別点における $(D_c)_{1Ec}$ の値 D， S_r の値 E を得る。これらの値は以下の変換でも不変とする。個別点の乾燥密度 ρ_d と含水比 w を，代表締固め曲線に対応する値として， $\rho_d = D \cdot A$ と $w = S_r \cdot e_b / G_s = E \cdot (C / \rho_d - 1) / (C / \rho_w)$ に換算する。個別点の換算乾燥密度と換算含水比による締固め状態 (w, ρ_d) を $w \sim \rho_d$ 平面にプロットし，②で求めた代表締固め曲線，③で求めた S_r コンターと比較する。

図-2.25 より， $w \sim \rho_d$ 平面で整理した場合でも，図-2.24 と同様に，定期管理試験の全データの平均値は代表曲線 ($CEL=1Ec$) の最大乾燥密度付近に位置していることが確認できる。

(2) RI 法 (日常管理)

小石原川ダムでは、当初は施工ロットが完了するごとに、日常管理試験として[1]含水比試験, [2]現場密度試験 (RI 法) を実施した。その後、第 3 章で示す地盤剛性指標を用いた品質管理によって現場密度試験はその大部分を代替することとなったが、最低でも 1 日 1 回は実施しており、実施回数・試験点数は 489 回・7315 点である。これは a) で示した突き砂法による現場密度試験の実施回数・試験数 (51 回・153 点) と比べるとはるかに多い。このため、定期管理試験 (突き砂法) の試験精度は高いが、工事期間中の全体傾向を把握することを目的とした場合には日常管理試験の結果を評価する方が妥当であると考える。

図-2.26 に日常管理試験 ([1]含水比試験, [2]現場密度試験 (RI 法)) の結果を示す。図-2.26 でも定期管理試験 (突き砂法) と同様に、横軸を $w'_{1Ec}(=w-(w_{opt})_{1Ec})$ に縦軸を $(D_c)_{1Ec}(=\rho_d/[(\rho_d)_{max}]_{1Ec})$ に正規化して示す。RI 試験では全粒度材料の乾燥密度 ρ_d が測定されるため、搬出時の全粒度試料の粒度試験から得られる礫率を用いて、Walker-Holtz の礫率補正式³⁸⁾で「 $D_{max}=37.5\text{mm}$ の部分」の ρ_d を求め、1 回/日実施する締固め試験から求まる $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$ で除して締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ を算出し、締固め試験から求まる $(w_{opt})_{1Ec}$ を用いて w'_{1Ec} を算出して、図-2.26 にプロットした。図-2.26 では、RI は各施工ロットで 15 点の試験を実施しており、15 点の平均値をプロットしている。

施工現場では、RI 法による全粒度材の ρ_d が施工前に算出した規格値以上であること確認する。規格値は、「 $D_{max}=37.5\text{mm}$ の試料」を用いた室内試験で求めた $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$ の値を Walker-Holtz の礫率補正式⁴⁰⁾で全粒度材の値に換算した値の 95% 値である。この様に算定した全粒度材の $(D_c)_{1Ec}$ は、図-2.26 に示す「 $D_{max}=37.5\text{mm}$ の部分」の $(D_c)_{1Ec}$ とは算出過程が異なるが、同じ礫率、補正式、「 $D_{max}=37.5\text{mm}$ の試料の $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$ 」を用いて算出しているので同様な値となり、この施工現場での RI 計測による締固め状態の評価は、図-2.26 に基づく評価と同様になる。

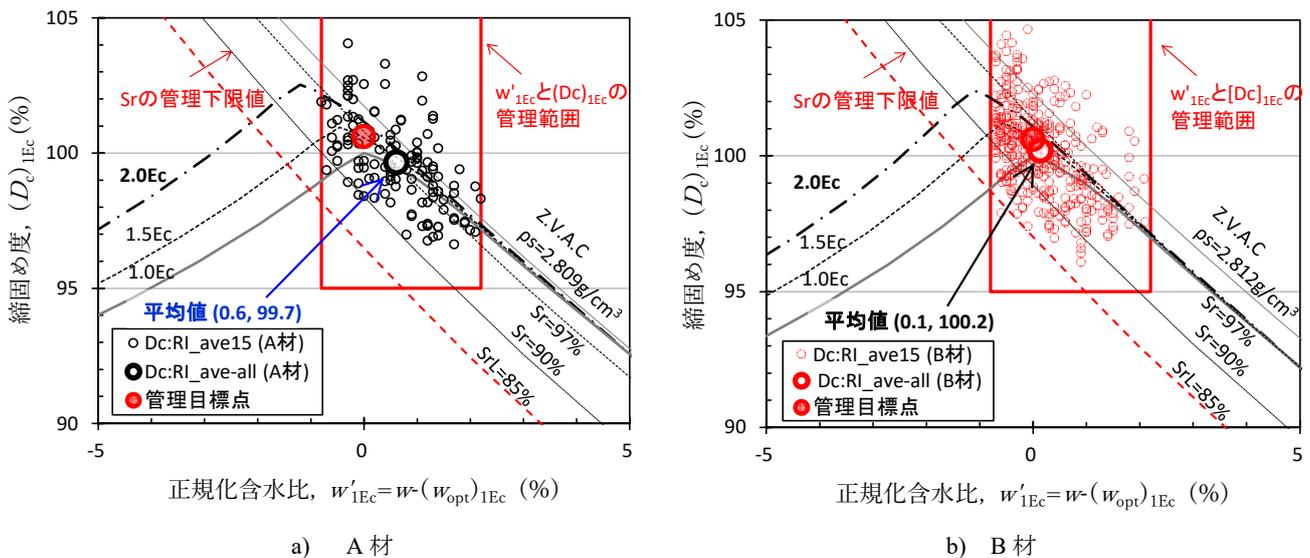


図-2.26 $w' \sim (D_c)_{1Ec}$ 関係の施工実績 (RI 法)²⁶⁾

図-2.26より、日常管理試験（RI法）でも、全測定点でA材、B材ともに含水比と締固め度は規格値を満足していることが分かる。すなわち、 w'_{1Ec} の平均値はA材で0.6%、B材で0.1%、全期間での平均値は0.26%であり、管理目標値である0%に非常に近く、含水比は概ね目標通り管理できたと考えている。

図-2.27に搬出時と盛立面の含水比の推移を示す。搬出時の含水比は概ね1%以下の範囲で管理されている。盛立面での含水比が搬出時の値よりも大きくなった時期があるが、工事初期や日射が強く乾燥しやすい夏期には乾燥側の施工に対する懸念から行った散水による影響があったものと考えられる。

遮水性盛土の施工において、施工中に含水比が管理下限値以下に低下することは、遮水性の低下に直結するため最も避けるべき状態であるため、夏季において散水に伴い散発的に高含水比条件での施工が発生することは、施工管理上ある程度は容認する必要があり、また結果として特に問題が生じたとは判断していない。

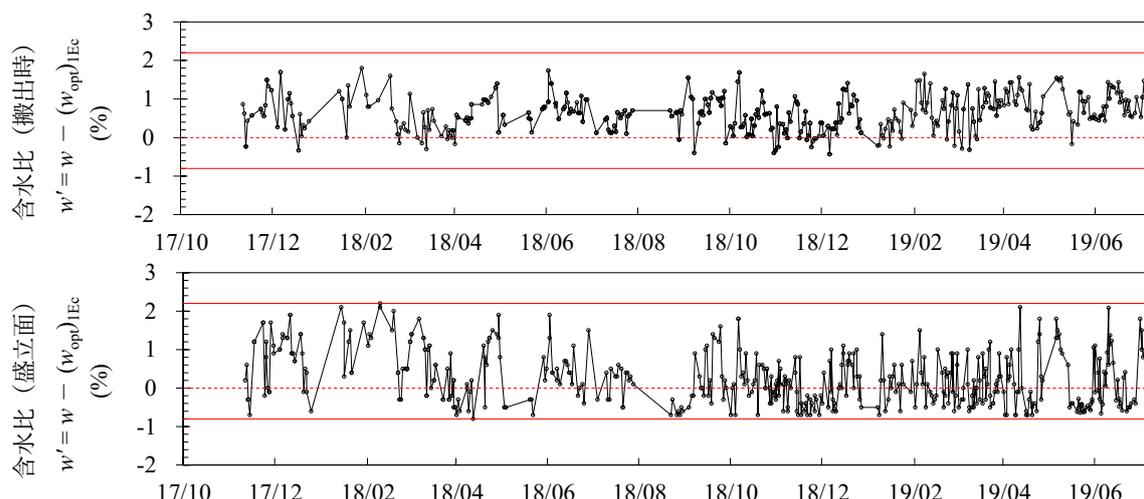


図-2.27 含水比の推移（実績）²⁶⁾

図-2.26を見ると、「 $D_{max}=37.5mm$ の部分」の締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ の平均値は、A材で99.7%、B材で100.2%となっており、極めて高水準な締固め管理がなされたことを示している。また、プロット群はA材よりB材の方が若干左上にシフトしている。これは、含水比を管理目標点に近づけるように意識的に材料調整を行った成果であると考えられる。

2.6.2 飽和度

図-2.28に、A材とB材での、定期管理試験で測定された飽和度 S_r の推移を示す。

(1)に記述した通り個別点の S_r は全点で規格値である $S_r \geq 85\%$ を満足している。工事全体を通じて定期管理試験時の $(S_r)_{opt}$ は(4)で示すように概ね88~96%の範囲で変動し、その平均値は92.6%であり、盛立試験時の平均値と概ね一致した。

S_r の分布は上記の $(S_r)_{opt}$ の平均値を中心に分布しており、工事全体としては最適飽和度

付近の締固めができたことを示している。

なお、飽和度は定期管理試験時のみ評価対象とし、日常管理試験での計測記録は参考値として取り扱っている。これらの経緯については付録 B に記載した。

常管理試験から得られた飽和度（参考値）の度数分布を図-2.29 に示す。図より、概ね正規分布に近い分布となっており、平均値は最適飽和度（図-2.28 より 90%~95%程度）より、若干湿潤側の値とであり、工事全体としては良好な管理が行われている。一方、図-2.29 a) では規格値（85%以上）を下回る値、100%を超える値が少ないながらも存在するが、日常管理試験での飽和度計算時は密度・含水比を計測した試料の土粒子密度は確認しておらず、直近の代表値を用いて換算していること等の影響と推定される。

なお、日常管理試験では [1]室内試験粒度に礫率補正に起因する誤差（礫率の代表値と現

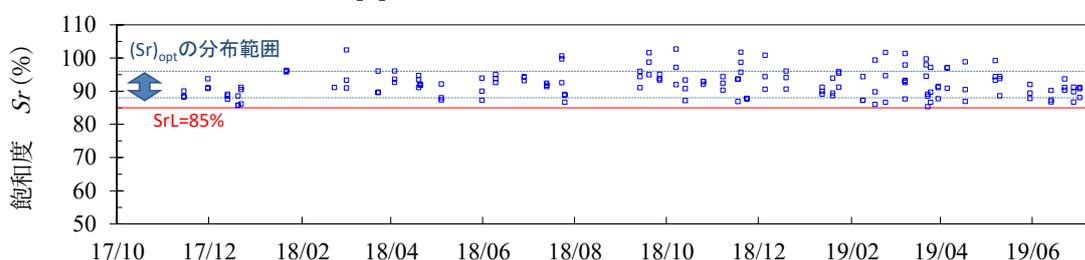
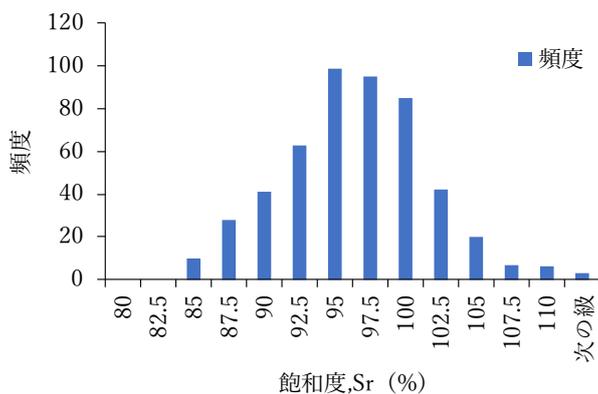
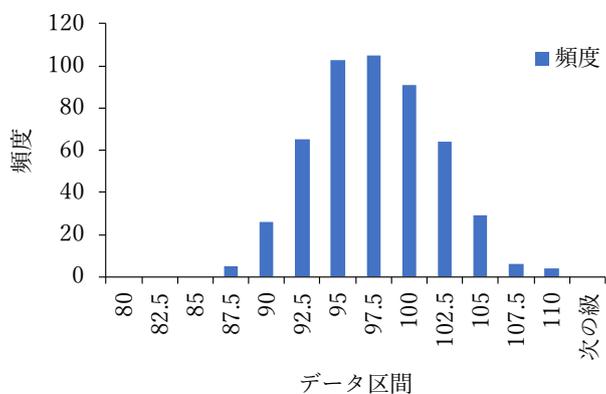


図-2.28 定期管理試験における飽和度の推移（実績）²⁶⁾



平均	95.3
標準誤差	0.23
中央値（メジアン）	95.2
標準偏差	5.2
最小	83.8
最大	116.4
データの個数	498

a) 室内試験粒度に換算した値



平均	96.3
標準誤差	0.19
中央値（メジアン）	96.3
標準偏差	4.3
最小	85.7
最大	108.1
データの個数	498

b) 全粒度に換算した値

図-2.29 日常管理試験における飽和度（参考値）のヒストグラム

地個別点との誤差), [2]RI 計測における含水量計測の誤差 (密度に影響), [3]含水比の代表値と現地個別点との誤差, などの誤差が含まれる。

2.6.3 含水比～透水係数 ($w' \sim k$ 関係)

図-2.30 に正規化含水比 w'_{1Ec} と透水係数 k の関係を示す。図-2.30 に示す○印のデータポイントは、定期管理試験で行った現場透水試験で得た現場透水係数である。

全ての測定値は規格値 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ を満足しており、その算術平均値は A 材で $6.7 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$, B 材で $1.2 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ であり、規格値よりも 1 オーダー程度低いことが確認できる。なお、B 材の方がやや透水係数は高めなのは、コア材の母材となる細粒材の賦存量の状況も考慮し、2018 年度以降に製造した B 材では製造時の目標粒度を若干粗めに修正したためであり、この結果は事前想定通りである。

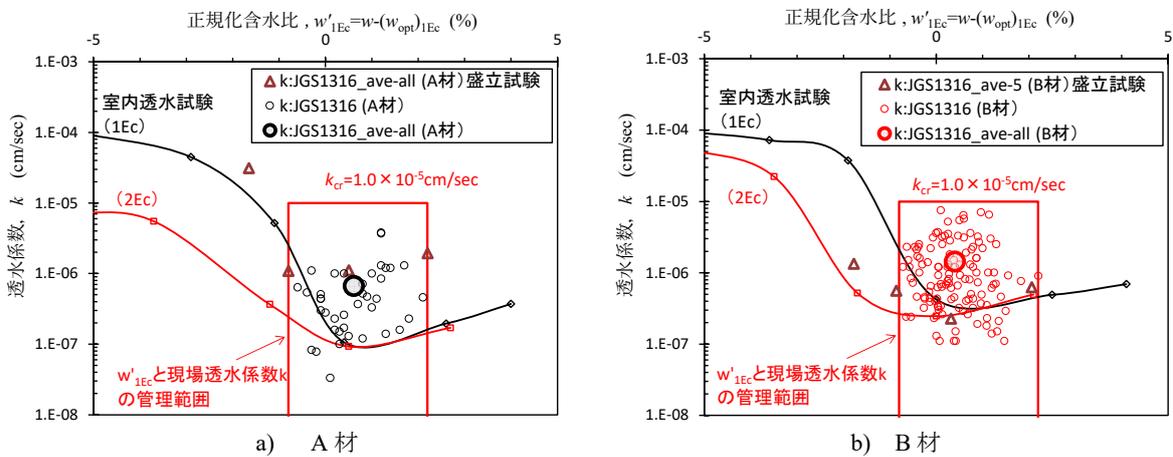


図-2.30 含水比と透水係数の関係 ($w' \sim k$ 関係) ²⁶⁾

2.6.4 最適飽和度の分布

図-2.31 に「 $D_{\max} = 37.5 \text{mm}$ の部分」のそれぞれの締固め試験で得られた最適飽和度 (S_r)_{opt} と最大乾燥密度 $[\rho_d]_{\max}$ _{1Ec} の関係を示す。後述するとおり土粒子密度 ρ_s による変動が大きいため、定期管理試験時に同じ試料を用いて行った締固め試験と土粒子密度試験の結果を用いることによって上記の変動の影響が少ない (S_r)_{opt} の値を求めて、図-2.31 にプロットした。

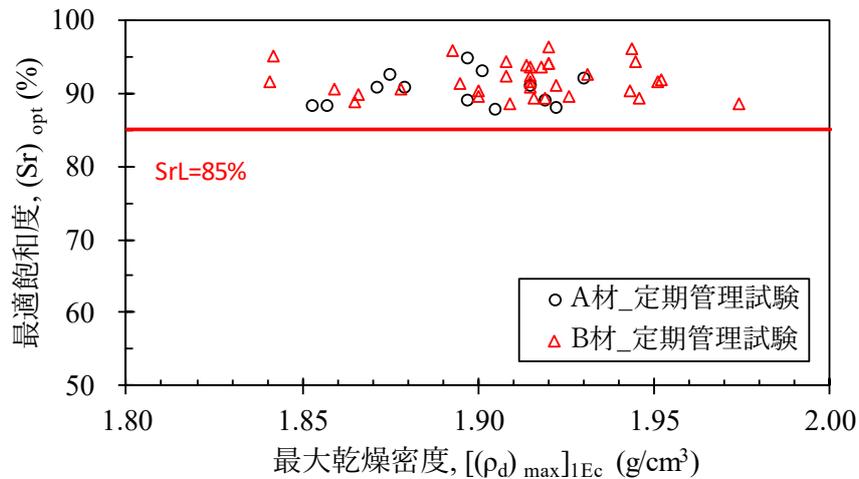


図-2.31 最大乾燥密度と最適飽和度の関係²⁶⁾

三浦らは藤沼ダム再建設工事において、築堤期間中を通じて測定した遮水材料の $(S_r)_{opt}$ の値がほとんど変化しなかったことを報告している⁶⁾。一方、本ダムでは各材料で6~7%の幅で変動しており、藤沼ダムの場合よりも変動幅が大きい。これは、本ダムのコア材の母材では以下に示すように土粒子密度の変動が大きいいため、算定された飽和度の値の安定性が低下したためと考えられる。

図-2.32に本ダムのコア細粒材の母材[1]と[2]の土粒子密度 ρ_s の度数分布と度数分布を参考に推定した分布曲線(模式図)を示す。本ダムのコア細粒材および粗粒材は、[1]砂質片岩および泥質片岩を中心にした堆積岩由来の風化体積物、[2]凝灰岩由来の風化体積物の2種類が主となっている。図-2.32に示す通り土粒子密度 ρ_s には2つのピークがあり、これは母材[1]と母材[2]では風化前の岩の比重 G_s の分布範囲が異なり、結果的に図-2.32に示す ρ_s のばらつき、ひいては S_r のばらつきにつながったものと考えられる。

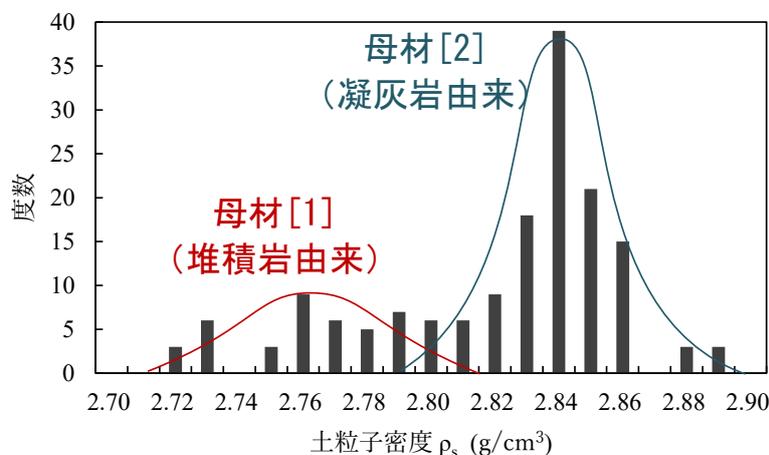


図-2.32 土粒子密度の度数分布²⁶⁾

本ダムでは前述の理由から飽和度の測定値の安定性がやや低くなった。それでも、**図-2.12**を見て分かるように、 $S_r - S_r = 0$ で $(D_c)_t = 1.0$ (100%)の状態の付近では、 $S_r - (S_r)_{opt}$ に**図-2.28**で見られるような6~7%程度の変動に対する $(D_c)_t$ の変動は、**図-2.12**における $S_r - (S_r)_{opt} < 0$ の範囲、すなわち現場締固めで CEL_f が増加して行く過程では0.02(2%)程度よりも小さい。また、**図-2.12**における $S_r - (S_r)_{opt} > 0$ の状態では $(D_c)_t$ の変動は0.05(5%)程度になるが、この状態では $(D_c)_t$ が1.0よりも低い値に若干変動しても S_r と ρ_d が低すぎて透水係数が高すぎることになる虞は少ない。したがって、下限値管理によって S_r が $(S_r)_{opt}$ よりも過度に小さい状態に留まらないように管理し、また必要に応じて上限値管理によって S_r が $(S_r)_{opt}$ を過剰に超えないように管理すれば、 S_r が $(S_r)_{opt}$ よりも僅かに大きい締固め目標状態(**図-2.21**)の実現を目指せる、と判断した。

なお、母材の土粒子密度のバラツキが小さい現場であれば、本ダムよりもバラツキが小さい状態で飽和度を管理することが可能であると思われる。

2.6.5 他ダムとの比較

表-2.5に水資源機構が管理する既設ダムの遮水ゾーンの締固め状態を整理した。

表-2.5 他ダムとの比較

ダム名	小石原川	阿木川	奈良俣	味噌川	徳山
ダム高	139 m	102 m	158 m	140 m	161 m
$(D_c)_{IEc}$ (全粒度)	100.1%	99.1%	98.7%	98.4%	97.6%
現場透水係数k	1.1×10^{-6} cm/sec	4.4×10^{-6} cm/sec	1.4×10^{-6} cm/sec	7.7×10^{-7} cm/sec	2.2×10^{-6} cm/sec
$w - (w_{opt})_{IEc}$ (全粒度)	0.5%	1.0%	0.9%	—	1.2%
$w - (w_{opt})_{IEc}$ (室内粒度)	0.3%	—	—	1.1%	—
室内試験の D_{max}	37.5 mm	15.9 mm	15.9 mm	15.9 mm	37.5 mm
礫率	10%	17%	22%	24%	15%
含水比試験法	炉乾燥法	迅速法	RI法	迅速法	迅速法
現場密度試験法	RI法	RI法	RI法	併用 (RI法,突き砂法)	RI法

締固め度について、RI法による $(D_c)_{IEc}$ の全データの平均値はほぼ100%であり、他ダムは97.6~99.1%であり単純平均すると98.5%であることから、他ダムと比較して確実に高い水準での締固め品質を実現できたと考えられる。

現場透水係数に注目すると、本ダムでは多くの既設ダムでは許容していない $(w_{opt})_{IEc}$ より乾燥側の含水比を許容して施工管理をしたが、他ダムと同等以上の遮水性能が確保されていることがわかる。

2.6.6 その他の効果

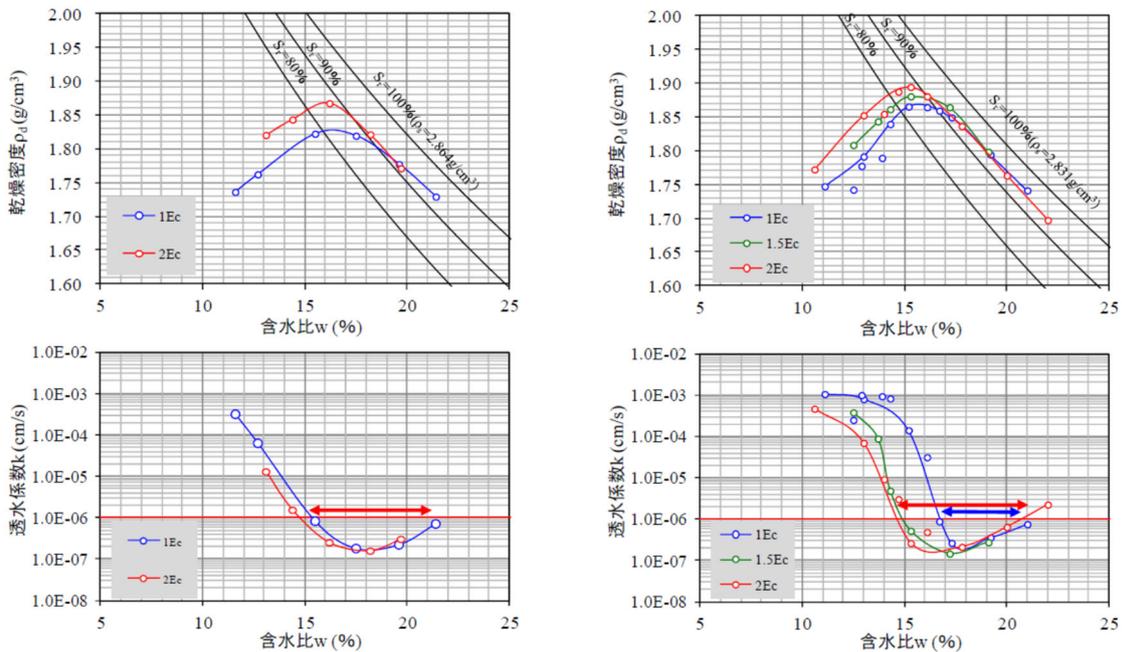
ここまでに第2章で提案する締固め管理領域を適用した小石原川ダムでは、品質管理試験結果の締固め度が既設ダムと比して高いことを示した。これは締固め管理領域を改善することで、同一の材料を使用した場合に、従来と比して相対的に高い品質が得られることを意味している。この効果により、従来の締固め管理では所要の品質が確保できない材料でも、

本節で提案した締固め管理を行えば所要の品質が得られる場合がある。

図-2.33 に小石原川ダムのコア材のブレンド比率の検討段階の室内試験結果の一例を示す。図-2.33 は細粒材と粗粒材の混合比率を変化させた場合に締固めエネルギーCEL の影響を示すものである。なお、前節までに記している室内試験とは使用している細粒材、粗粒材が異なる材料である。

図-2.33 の(a), (b)を比較すると、粗粒材の比率が高くなっている(b)ではCELが1Ecでは乾燥側の透水係数の上昇傾向が大きく、1Ecの最適含水比において室内試験の透水係数の規格値 ($1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$) を満足しないため、遮水材料としては不適当な材料となる。しかし締固めエネルギーが1.5Ec以上であれば透水係数が規格値を満足する範囲が大幅に広がり、CEL=1.5Ec, CEL=2.0Ecの最適含水比における透水係数は規格値を満足するため、CEL=1.5Ec以上の現場管理が出来るならば遮水材料としての適用が可能となる。

細粒材の賦存量が少なく必要量の確保が困難な現場では、本節で記した締固め管理領域を適用することで、細粒材の使用量を抑えたブレンドの適用が可能になる場合があるので、このような現場条件では、材料確保の面からも本節で記した締固め管理方法の採用価値が高まると考えらえる。



(a) 細粒：粗粒=1：2.5

(b) 細粒：粗粒=1：3.4

図-2.33 細粒材使用量の抑制について検討した事例

2.7. まとめ

遮水性盛土の品質管理の高度化・合理化を目指して、室内試験と現場盛立試験の結果に基づき、盛土材の土質と締固めエネルギーレベル(CEL)に加えて飽和度の影響を考慮した管理領域の設定方法を構築するとともに、実施工に適用し、その効果を確認した。以下に本章で得られた結果を示す。

- 1) 実施工での現場締固めエネルギーレベル CEL_f が $1Ec$ (標準プロクター) より高くなることを想定し、従来はほとんど実施されていない、 $1Ec$ の最適含水比よりも乾燥側の条件を含めた盛立試験を、小石原川ダムの遮水材料を用いて実施した。
- 2) 盛立試験の砂置換孔から採取された材料を用いて、個別孔の粒度・乾燥密度・含水比・飽和度・土粒子密度・礫比重を把握することで、 CEL_f の値を出来るだけ正確に推定した。その結果、盛立試験の使用材料と施工仕様においては、現場全粒度試料の内部の最大粒径 $D_{max} = 37.5 \text{ mm}$ の部分に加わる CEL_f は $1.5Ec$ となり、現場全粒度試料に加わる CEL_f は $1.5Ec$ を超えると推定されることを示した。
- 3) 盛立試験結果に基づき、透水係数の規格値を満足するための下限となる飽和度を設定し、この下限飽和度を参照して締固め土の含水比の管理範囲を設定した。飽和度の下限値管理を導入することで、透水係数が規定値を満足しない状態を排除しつつ、 $1.5Ec$ での最適含水比よりもさらに乾燥側の含水比の範囲を許容できることを確認した。
- 4) $CEL_f = 1.5Ec$ の施工においては、 $1Ec$ の最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも乾燥側の領域において、乾燥密度が高く飽和度が最適飽和度により近い締め固め状態が実現できることを確認した。これにより、 CEL_f が $1Ec$ よりも高い場合には、 $(w_{opt})_{1Ec}$ より乾燥側の含水比での施工を許容することで、 $(w_{opt})_{1Ec}$ を含水比の管理上限とする従来の管理法よりも、遮水性能と強度・剛性が優れた締固めの実現を期待できることを示した。
- 5) 1)~ 4) の検討結果に基づき、 CEL_f と飽和度の管理を前提として、 $(w')_{1Ec} \sim (D_c)_{1Ec}$ 平面における実施工における締固め状態の管理目標点と管理領域を定めた。
ここに $CEL = 1Ec$ の締固め試験における最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ により正規化した含水比を $(w')_{1Ec} (= w - (w_{opt})_{1Ec})$ 、最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{1Ec}$ に基づく締固め度を $(D_c)_{1Ec}$ として、これらのパラメータを測定・評価して締固め管理を行った。
- 6) 小石原川ダム本体建設工事における遮水ゾーンの品質管理記録を整理分析した結果、全ての測定値は 5) で定めた管理領域内に収まり、平均締固め状態は 5) で定めた管理目

標点付近にあること、すなわち、現場での $D_{\max}=37.5 \text{ mm}$ の部分における 1Ec 基準の締固め度は平均値でほぼ 100%であることを確認した。また、現場透水係数も十分に低く、既往のダムと比して、総合的に高い品質を確保できていることを確認した。

- 7) 6)に記した成果は、1)~5)に記したとおり、現場の締固めエネルギーレベルを考慮し飽和度の下限値を設定することで、従来は多くのフィルダムで許容していなかった $(w_{\text{opt}})_{1\text{Ec}}$ を下回る範囲での含水比を許容した結果であることを、各種の現場測定値に基づいて確認し、本章で示した品質管理法の合理性を示すことができた。

参考文献

- 1) Proctor, R. R. : Four Articles on the Design and Construction of Rolled -Earth Dams, Engineering News-Record, Vol.111, 1933.
- 2) 伊藤令二：御母衣ロックフィルダム-I，発電水力，No.36，pp.1-10，1958.
- 3) 伊藤令二：御母衣ロックフィルダム-II，発電水力，No.37，pp.11-23，1958.
- 4) 愛知用水公団：愛知用水技術誌 ダム編（牧尾ダム、三好ダム、東郷ダム、松野ダム），1963.
- 5) 松本徳久：我が国フィルダムの設計・施工の変遷，土木学会論文集 F, Vol.65 No.4, pp.394-413, 2009.
- 6) 建設省河川局監修，財団法人ダム技術センター編纂：多目的ダムの建設 昭和 61 年度版 第 5 巻 施工編，pp. 333-335, 1986.
- 7) 水資源開発公団，中部電力株式会社：岩屋ダム工事誌，1977.
- 8) 水資源開発公団：寺内ダム工事誌，1980.
- 9) 水資源開発公団阿木川ダム建設所：1991.3
- 10) 水資源開発公団味噌川ダム建設所：1996.
- 11) 水資源開発公団：奈良俣ダム工事誌，1991.
- 12) 水資源機構：徳山ダム工事誌，2010.
- 13) 北海道開発局：大雪ダム工事記録，1977
- 14) 北海道開発局帯広開発建設部：十勝ダム工事誌，1987.
- 15) 東京電力（株）：高瀬川電源開発工事報告，1981.
- 16) 北海道，北海道電力株式会社：高見ダム工事誌，1984.
- 17) 東北地方建設局御所ダム工事事務所：御所ダム工事誌，1982.
- 18) 東北地方建設局七ヶ宿ダム工事事務所：七ヶ宿ダム工事誌，1992.
- 19) 東北地方建設局三国川ダム工事事務所：三国川ダム工事誌，1998.
- 20) 東北地方建設局摺上川ダム工事事務所：摺上川ダム工事誌，2006.
- 21) 飯田学，小山内慶：胆沢ダムの設計と施工，ダム日本 平成 26 年 12 月号，pp.11-38, 2014.
- 22) 上高克弘：森吉山ダムの施工について，ダム日本 平成 25 年 3 月号，pp.11-31, 2013.
- 23) 坂田寛司：殿ダムの設計と施工，ダム日本 平成 24 年 5 月号，pp.11-29, 2012.
- 24) 水資源開発公団福岡導水建設所：福岡導水工事誌 調整池編，2001.
- 25) 水資源機構香川用水総合事業所：香川用水調整池工事誌，2009.
- 26) 坂本 博紀，龍岡 文夫，曾田 英揮，小林 弘明，小原 隆志：締固めエネルギーと飽和度を重視した遮水性盛土の締固め管理，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 77, No. 1, pp.43~58, 2021.
- 27) 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，pp.-88-

- 92, 2005.
- 28) 龍岡文夫：盛土の締固めにおける飽和度管理の重要性（技術手帳），地盤工学会誌, Vol. 63, No. 7, pp. 39-40, 2015.
 - 29) 龍岡文夫：土の締固めにおける飽和度管理の重要性，ダム技術, No.354, 3月号, pp.3-16, 2016
 - 30) 龍岡文夫：飽和度と剛性の管理に基づく締固め管理の合理化について，地盤工学会誌, 報告, Vol. 67, No. 11/12, pp. 30-33, 2019.
 - 31) 三浦亨，龍岡文夫，田中忠次，毛利栄征，石本敏樹，三反畑勇：フィルダムでの飽和度管理を重視した締固め実施例，第54回地盤工学研究発表会，pp. 931-932, 2019.
 - 32) 三反畑勇，永井裕之，山岸明広，龍岡文夫，中山睦人，三浦亨，渡邊浩樹：藤沼ダム建設工事における飽和度管理（その1：工事概要と管理手法），第51回地盤工学研究発表会，pp. 999-1000, 2016.
 - 33) 永井裕之，三反畑勇，山岸明広，龍岡文夫，中山睦人，三浦亨，渡邊浩樹：藤沼ダム建設工事における飽和度管理（その2：品質管理結果），第51回地盤工学研究発表会，pp. 1001-1002, 2016.
 - 34) 渡邊浩樹，田中忠次，龍岡文夫，毛利栄征，山岸明広，三反畑勇，三浦亨，矢崎澄雄：福島県藤沼ダムの強化復旧における新堤体の施工，基礎工, Vol. 46, pp. 85-91, 2018.
 - 35) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（第1回改訂版），p.373,2020.
 - 36) 三国英四郎：フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究(その1)，土と基礎, Vol. 10, No. 1, pp. 4-12, 1962.
 - 37) 財団法人ダム技術センター編集・発刊：多目的ダムの建設 平成17年度版 第5巻 設計II編，pp. 95-99, 2005.
 - 38) 曾田英揮，龍岡文夫，吉田輝：土の締固め乾燥密度に対する層厚と転圧回数の影響の予測，第54回地盤工学研究発表会，No.463, 2019.
 - 39) 坂本博紀，福島雅人，日野浩二：小石原川ダムにおけるコア盛立の高度化・合理化の検討，ダム技術, No. 390, pp. 52-65, 2019.
 - 40) 坂本博紀，小林弘明，龍岡文夫，曾田英揮：遮水性盛土の地盤剛性指標に基づく締固め管理，土木工学会論文集C（地圏工学），Vol. 76, No. 3, pp. 221-234, 2020.
 - 41) Walker, F. C. and Holtz, W. C.: Control of embankment material by laboratory testing, Proc. ASCE, Vol. 77, No. 108, pp. 1-25, 1951.
 - 42) 曾田英揮，斉藤哲夫，龍岡文夫：礫率を変化させた場合の締固め密度に与える影響，第53回地盤工学研究発表会，pp. 795-796, 2018.
 - 43) 龍岡文夫：連載地盤工学・技術ノート，第2回盛土の締固め[2]，基礎工，8月号，pp. 103-105, 2013.

第 3 章

第3章	地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法.....	3-1
3.1.	背景	3-1
3.1.1.	社会的背景	3-1
3.1.2.	理論的背景	3-4
3.2.	室内試験による検討	3-10
3.2.1.	試験条件	3-10
3.2.2.	試験結果	3-12
3.3.	現場盛立試験による検討	3-17
3.3.1.	試験条件	3-18
3.3.2.	試験結果	3-20
3.3.3.	締固め状態と地盤剛性指標.....	3-27
3.4.	地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法.....	3-34
3.4.1.	管理法の考え方	3-34
3.4.2.	管理基準値の設定事例.....	3-36
3.4.3.	品質管理における位置づけ.....	3-38
3.4.4.	適用条件	3-39
3.5.	実施工への適用結果	3-41
3.5.1.	品質管理試験結果	3-41
3.5.2.	試験時間の短縮	3-43
3.6.	まとめ	3-44
	参考文献	3-46

第3章 地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法

3.1. 背景

3.1.1. 社会的背景

フィルダムのコアゾーンに代表される遮水性盛土の建設では、所要の乾燥密度と透水係数を確保するため、粒度・粒子特性等の土質（以後、土質）、含水比、締固めエネルギーレベル（以後、Compaction Energy Level, CEL）を適切に管理するとともに、締固め後の盛立面において現場密度試験を、或いは現場透水試験も行い、その品質を確認している。これらの現場試験の実施には一定の試験時間と労力が必要で、特に現場透水係数には概ね1日を要する。このため、日常管理における遮水性能確認は、搬出材の代表粒度と各層の施工後に乾燥密度と含水比を測定し、それらが管理範囲にあることを確認するという間接的な手法で実施されるのが一般的である¹⁾。

これらの管理試験は、いずれも比較的少数の抜取検査であるために多くを実施できず、その頻度から盛土全体の品質の一様性の確認が難しいという課題がある。このため、実施工における盛土全体の品質の確認や局所異常の有無については熟練技術者の目視監視による技術的判断に頼って管理してきたのが実情であった。

しかし、近年では少子高齢化や国家予算における建設予算の縮減、基幹産業の変化などの影響を受け、建設業界では熟練技術者の減少が続いており²⁾、従来のような多数の技術者を投入する管理体制の構築は困難な状況になりつつある。

このような課題を解決するために、ICT(Information and Communications Technology)により人員不足の影響を補完することが建設業界全体の流れとなっている³⁾。一般土工ではGNSS (Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム) を用いた ICT を活用した面的な盛土の施工管理が進んでおり、事前の盛立試験により転圧回数と乾燥密度等の関係を確認したうえで、GNSS を用いた転圧回数管理により転圧後の密度試験を代替する品質管理法（以後、「GNSS 管理」）も導入されている⁴⁾。しかし、フィルダムコアゾーンの施工に代表される遮水性盛土の締固め管理では、以下に記すとおり GNSS 管理では遮水性能が担保できないため、前述した抜取検査型の品質管理から脱却できていない。

GNSS 管理は、現場盛立試験により転圧回数と乾燥密度や沈下量等の関係を把握したうえで、現場の CEL を規定する締固め層厚、転圧回数を GNSS により管理することで間接的に締固め状態を管理するものである。しかし、盛土の締固め状態は「乾燥密度と含水比」などのように2つの指標から決まるが、GNSS 管理では締固め状態を示す定量的な指標の計測は行わないため、GNSS 管理のみでは締固め状態を担保することが出来ない。別の言い方をすると、GNSS 管理は CEL の管理であり、材料が適切に管理されていることを前提に密度曲線 ($w - \rho_d$ 曲線) や透水曲線 ($w - k$ 曲線) を特定することが出来るが、曲線上のどの位置に締固め状態が位置するかについては特定できない。このため、遮水性能の担保には至らな

い、のである。

一方、RMV (Roller Measurement Value)⁵⁾ 或いは ICMV (Intelligent Compaction Measurement Value)⁶⁾ と呼ばれる転圧機に設置された加速度計の計測記録等を解析して得られる種々の指標と GNSS 記録を関連付けた定量的かつ面的な管理方法も普及しつつある^{5)・11)}。なお、これらの手法は Continuous Compaction Control (CCC)⁵⁾、或いは Intelligent Compaction Data Management (ICDM)^{6),7)} などの名称で呼ばれるが、本章では CCC で統一する。

既存の CCC は、地盤剛性指標の下限値管理法（或いは変化率管理法）であるが、下記の二つの問題がある。まず、遮水性盛土に利用される高含水比材料では、締固めに伴う剛性の変化が小さく、特に遮水性能を確保するために推奨される最適含水比よりも湿潤側の含水比ではこの傾向が顕著となり、地盤剛性指標の許容下限値の設定が難しい。このため、従前より CCC は高含水材料を用いた盛土の品質管理への適用が困難とされている^{8),9),12)}。また、後述するように、現場の土質と CEL に対応する最適含水比よりも含水比が低い条件では、地盤剛性が増加する一方で透水性も高くなるため、地盤剛性指標の下限値管理では透水係数の上限値管理ができない、という本質的な問題がある。

以上をまとめると、既存の面的な管理法には次の①～③のような課題があるため、フィルダムのコアゾーンの品質管理では、GNSS 等の ICT を利用した面的な管理記録は、施工層厚管理や転圧回数管理を行うための補間的な施工管理記録や参考情報として取り扱われており、従来の管理手法の代替手法としては位置づけられていない^{13),14)}。

既存の面的管理法の課題

- ① GNSS 管理は CEL の管理法であり、GNSS 管理だけでは遮水性能を担保することにはならない、
- ② 既存の CCC では地盤剛性指標の下限値管理を行うが、遮水性盛土において、湿潤側では CEL と w の変化に伴う地盤剛性指標の変化が小さく適用が難しい、
- ③ ③地盤剛性指標の下限値管理法では遮水性能は管理できない。

このため、遮水性盛土において定量的かつ面的な品質管理が可能になれば、品質管理の高度化・合理化が大きく推進され、フィルダム等の大規模工事ではその恩恵も大きい。

CCC の導入による具体の効果として「施工と同時時に品質管理記録の取得が可能になることによる、品質管理試験の省略や合理化」「定量的かつ面的なデータのリアルタイム確認による、監督労務を補助・軽減」「抜取検査型の品質管理では把握が困難な、局所的な弱部や異常箇所を把握」「抜取検査型の品質管理試験の試験箇所の決定補助」等が考えられる。

このような背景から、本研究では、締固め土の地盤剛性指標の上限値管理に基づいた遮水性能の管理法を、各種の室内試験と現場試験の結果に基づき詳細に検討した。具体には、室内試験と現場盛立試験から得られた含水比の変化に伴う、透水係数 k 、乾燥密度 ρ_d と地盤剛

性指標の関係とそれに対する土質と CEL の影響を整理し、地盤剛性指標の上限値管理に基づいた透水係数の間接的であるが迅速な評価法を構築し、実施工の品質管理に適用した¹⁵⁾。実施工への適用は、①落球探査法による変形係数、②ローラ加速度応答法による地盤剛性指標、の2種類の地盤剛性指標を用いて段階的に適用しており、②の適用により、遮水性盛土における CCC を実現した。第3章では室内試験と現場盛立試験の結果に基づく①の適用検討のプロセスと適用実績について記し、②の適用検討のプロセスと適用実績については第4章にて記す。

第3章の構成を記す。次項 3.1.2. に上記の新たな評価法の構築に至る理論的背景を記す。3.2.節と 3.3.節に室内および実機を用いた現場盛立試験の結果を記す。3.4.節では得られた知見に基づく品質管理への適用検討のプロセスを記す。3.5.節では実施工における品質管理試験結果を整理し、新たな評価法の妥当性を確認した。3.6.節では本章のまとめを記す。

なお、本研究では、締固めた地盤における非水浸 CBR、平板載荷試験や落球探査法¹⁶⁾等による変形係数、加速度応答スペクトル指標等の「地盤剛性を反映した測定値」を包括して地盤剛性指標 (Soil Stiffness Index, SSI) と称し、以後、SSI と略記する。

3.1.2. 理論的背景

ここでは遮水材料として使用される土の締固め特性を述べ、締固め状態と各種物性の関係を論じる。そのうえで地盤剛性指標 SSI を用いた締固め土の遮水性能管理に必要な条件と、締固め土が所要の遮水性を確保されるために必要な SSI の管理範囲を論じる。

締固め土の乾燥密度 ρ_d ，透水係数 k ，地盤剛性指標 SSI と含水比 w には、通常、**図-3.1** に示す関係がある。

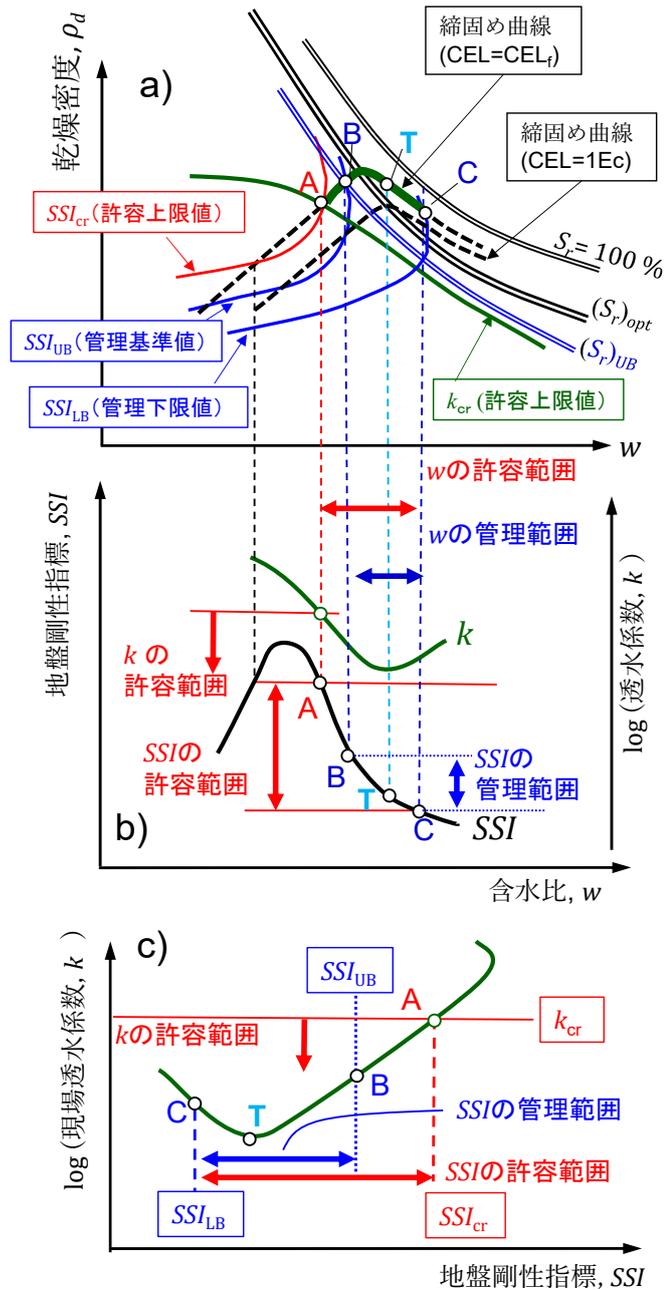


図-3.1 所定の土質と CEL における締固め土の工学的性質と本研究で提案する各物性値の管理範囲の概念図
(文献¹⁷⁾の図を**図-3.2, 3.3**を参考に拡張)

図-3.1a)に示す SSI の等高線と図-3.1b)に示す SSI~w関係は、図-3.2a)および後述する図-3.15、図-3.16 に基づいている。図-3.2a)は、シルト質砂の多様な転圧機を用いた実大締固め試験で得た膨大なデータ¹⁸⁾の解析によるものである¹⁹⁻²²⁾。▲、●等の印のデータは、実大締固め試験の代表例である。図-3.2a)の締固め曲線 A-A は、室内締固め試験(標準プロクター、1Ec)によるものである。最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ は、 ρ_d が最大になる飽和度 S_r であり、粒度等の土質と締固めエネルギーレベル CEL の変化に対する一定性が高い¹⁹⁻²²⁾。式 3-1 は、データ解析¹⁹⁻²²⁾で得た締固め土の非水浸 CBR の S_r と ρ_d を変数とした経験式(ρ_w は水の密度)である。

$$CBR = f_{CBR}(S_r) \cdot g_{CBR}(\rho_d) \quad (3-1a)$$

$$g_{CBR}(\rho_d) = (\rho_d/\rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (3-1b)$$

$f_{CBR}(S_r)$ は S_r の単調減少関数であり、図-3.2b)にデータフィッティングの結果を示す。

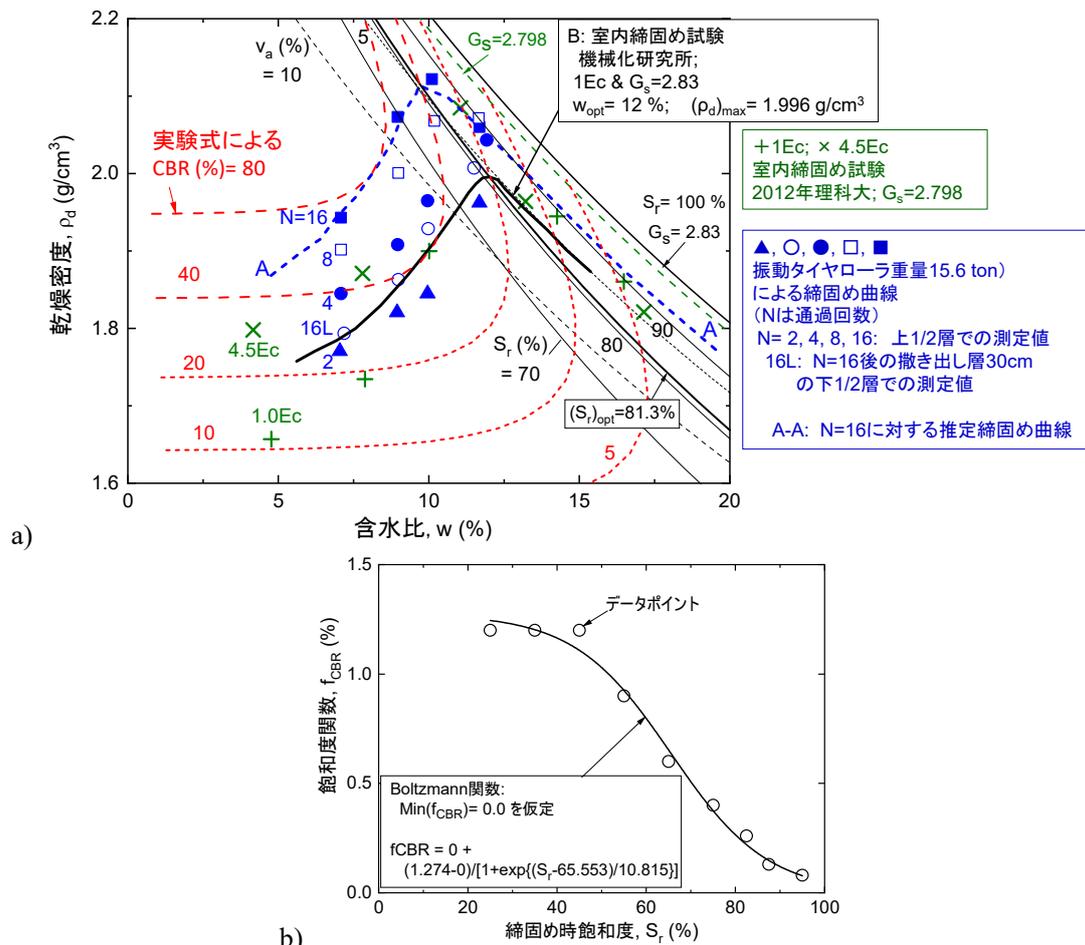


図-3.2 建設機械化研究所での実大締固め試験(原データ¹⁸⁾, データ解析¹⁹⁻²²⁾):
a) 締固め状態の例, 非水浸 CBR の等高線と締固め曲線
b) 飽和度影響関数 $f_{CBR}(S_r) \sim S_r$ 関係

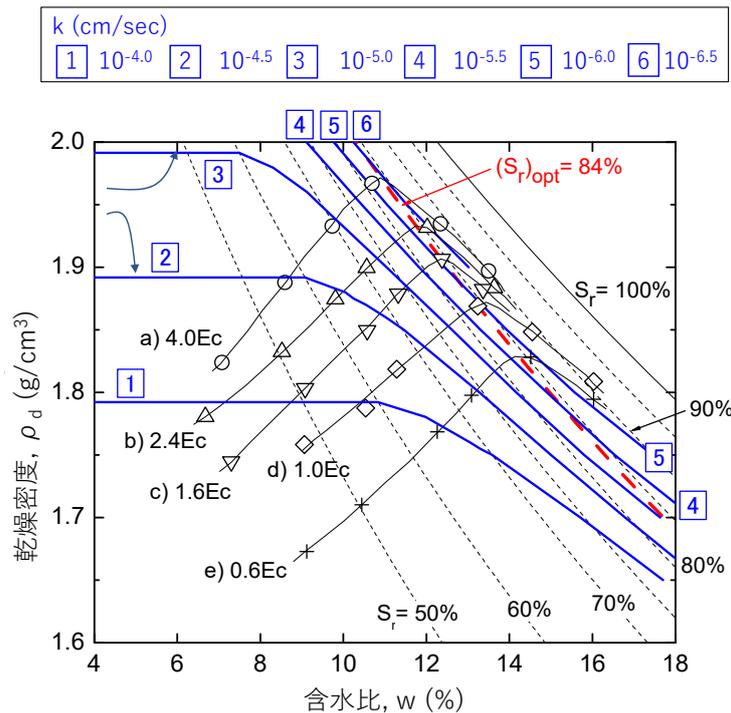


図-3.3 御母衣ダムコア試料室内試験による異なる CEL での締固め曲線と飽和透水係数 k の等高線 (原データ¹⁸⁾, データ解析¹⁹⁻²²⁾)

また、図-3.1 a)に示す k の等高線と図-3.1 b)に示す $k \sim w$ 関係は、図-3.3 に示す御母衣ダムのコア材の室内試験²³⁾の解析結果¹⁹⁻²²⁾と第2章の図-2.5 に示した小石原川ダムの室内試験結果によるものである。図-3.2a), 図-3.3 に示すような形状の SSI と k の等高線は他のデータでも得られている^{19-22),24)}。

SSI と k の等高線がこのような形状になるのは、 ρ_d が増加すると SSI は増加し k は減少する一方、飽和度 S_r が高くなると [1] サクシオンが低下して、骨格構造の概形を形成する粗粒子の接点に凝集していた細粒子が分散することで骨格構造が弱くなり SSI が低下するとともに、[2] サクシオンが低下すると骨格粒子間の空隙内で細かい粒子が空隙内に分散するため、ミクロな空隙が平均的に小さくなり k が減少するからである。これらは、文献¹⁹⁻²²⁾で詳細に説明されている。

図-3.2 a)の CBR の等高線を見ると、各締固め曲線の最適含水比から湿潤側では、締固め曲線に応じた CEL よりもかなり低い条件での密度から CBR 性が変化していない。これは前述した①乾燥密度の増加に伴う剛性の増加、②飽和度の増加に伴う剛性の減少、の影響が釣り合うことで締固めエネルギーの変化に伴う剛性の変化が生じていないものと理解される。以上より、遮水性盛土のように所定の締固めエネルギーCEL の最適含水比(w_{opt})CELよりも湿潤側の含水比で締固め管理を行う場合、SSI からは締固めエネルギーの大小は判断できないため、SSI の評価にあたっては CEL を別途管理する必要があると考えられる。

図-3.1に示す関係に基づく、粒度等の土質と現場の締固めエネルギーレベルCEL_rを一定に管理し、管理法の妥当性を現場透水係数 k の測定によって適宜検証する場合は、前述した

乾燥密度と含水比を用いた遮水性能の管理法と同様に、以下で説明するSSIに基づく管理法が成り立つと考えられる。

すなわち、 k を許容上限値 k_{cr} 以下の状態にするためには、**図-3.1 a)**で締固めた盛土の (ρ_d, w) 状態が k_{cr} の等高線よりも右上方に位置する必要がある。 k_{cr} の等高線と $CEL=CEL_f$ の締固め曲線との交点をAとし、この締固め曲線に沿って w が増加して点Aから右側に移動すると、**図-3.1b), c)**に示すように k とSSIはともに減少する。この際SSIは単調減少し、 k は極小値を経て増加に転じるが、遮水材料では後述する含水比の管理上限値(**図-3.1**の点C)で $k < k_{cr}$ を満足する材料を使用する。従って、透水係数を許容値 k_{cr} 以下とするには点Aよりも右側に位置する必要があることから、点Aでの w は許容下限値となり、点AでのSSIは許容上限値 SSI_{cr} となる。ここで、点Aよりもやや湿潤側の点BでのSSIを管理上限値 SSI_{UB} とすれば、 $SSI \leq SSI_{UB} (< SSI_{cr})$ となるように管理することができる。なお、点Bは透水係数の許容上限値 k_{cr} のコンターよりも右側に位置する飽和度の管理下限値 $(S_r)_{UB}$ と締固め曲線との交点により設定する。このように、締固めた盛土のSSIの上限値管理によって間接的であるが k の上限値管理ができる。

含水比管理を考える場合には、 CEL_f に対する最適含水比 $(w_{opt})_{CEL_f}$ に対してやや湿潤側に一定の管理範囲を設定して含水比 w を管理するのが合理的である²⁵⁾。上記の点Bは $(w_{opt})_{CEL_f}$ よりも若干乾燥側に位置するが、 k_{cr} を満足する飽和度の下限値 $(S_r)_{UB}$ との交点よりも湿潤側にあるため、B~Cの範囲で含水比管理をすることで、所要の透水係数を満足することが出来る。

以上、遮水性盛土の品質管理にはSSIの上限値管理が有効であることを述べた。一方、**図-3.1**に示すように、湿潤側の含水比でSSIの低下が進むと、土中間隙が増大により乾燥密度の低下と透水係数の上昇に転じる。また、CELが過大な場合は過転圧やウェービング等を引き起こすこととなる。このような状態を排除するため、 w の管理上限値を規定し、この際の点DにおけるSSIをSSIの管理下限値 SSI_{LB} として規定することが考えられる。この場合においても、**図-3.1 a)**で $SSI > SSI_{LB}$ の領域内には締固めが不十分な領域も含まれているので、前述のようにCELの管理が別途必要となる。

また、締固め状態は ρ_d と w など2変数で定義されるので、SSIの値だけでは締固め状態を同定できない。これに対して、現場の土質と CEL_f を一定に管理した場合は、それに対応する現場締固め曲線とSSIの等高線の交点から締固め状態が同定される(**図-3.1 a)**)。その場合は、落球探査試験、ローラ加速度応答法等から得たSSIの上限値管理によって締固め土の透水係数 k の上限値管理を迅速に実施できると考えられる。

上記のSSIの上限値管理の考え方を整理する過程において、「透水係数が飽和度と乾燥密度の関数として説明できるのであれば、ダム等の遮水性盛土では築堤後において、湛水に伴う飽和と自重沈下により、乾燥側での締固めを行っても経年的に透水係数は小さくなる可能性があり、そのような状態に至るのであればさらに乾燥側の施工も許容できる可能性がないか？」といった議論があった。

これらの疑問のうち前半部分（乾燥側の施工後における飽和圧密後の透水係数の低下）については、乾燥側での締め固めた後、築堤後に貯水の影響で飽和し、さらに自重圧密が進めば、サクションが消失して間隙も小さな状態に土の状態が変化することで、飽和圧密後の透水係数は低減することも考えられる。ただし、実際にこのような現象が生じるかどうかの確認については実験等による確認が必要となり、今後の課題となる。

疑問の後半部分（含水比の管理下限値の拡大の可能性）について、実ダムにおいて乾燥側で締め固めた後に飽和圧密が進む状況を想定すると、圧密が進行するまでの間は規格値を上回る透水係数が発現することになり、高い貯水圧下では飽和化と圧密の進行による透水係数の低減がおこる前に細粒分の流出により初期の間隙が広がることで高透水の「みずみち」が拡大し浸透破壊につながる可能性が懸念される。また、築堤後の遮水ゾーンの圧密沈下が大きいと、隣接するフィルタゾーンとの沈下量との差により、フィルタへの偏荷重が作用することが確認されており、コアの沈下は可能な限り小さくすることが望ましい。以上より、「初期湛水における浸透破壊の可能性の排除」、「コアの沈下量の低減」という二つの視点から、フィルダム遮水ゾーンの施工においては、極端な乾燥側の施工を避けるための地盤剛性の上限値の設定は必要と考えられる。

次節以降に、本章で記した理論的背景に基づき整理・分析した室内試験・現場盛立試験の結果を記す。

【参考】飽和度と乾燥密度を用いた地盤剛性の定式化について

龍岡の既往の研究^{19)~22)}において、剛性が飽和度と乾燥密度の関数として定義が可能で、粒度等の土質（以後、「土質」と剛性指標に応じた実験式を定めることが出来ることが示されている。また、剛性以外の土の締固め状態に起因する強度や透水係数といった指標についても、同様の定式化が可能であることが既往の研究の中で示されている。

龍岡は既往の研究の中で、土の締固め状態を規定する与条件は土質、CEL、含水比であるが、締固め状態については、土質が規定されていれば乾燥密度と含水比、乾燥密度と飽和度の2軸で表現が可能になり、特に飽和度を用いた場合には、CELに独立した関数として規定されることを示した。これは、剛性、強度、透水係数といった締固め土の工学的特性は土質と締固め状態に起因することを示していることに他ならない。

龍岡が示した剛性の定式化の手法では乾燥密度と飽和度を締固め状態を表現する要素として採用しているが、CELやサクションなど、その他の要素を考慮していない。しかし、これらの要因を考慮する必要性についての議論があることから、これについての包括的な考え方を以下に整理する。なお、以下の整理における「剛性」は「強度」「透水係数」といった乾燥密度と飽和度による同様の定式化が可能で他の工学的特性と置き換えても成立すると考えられる。

締固め後の剛性は締固めエネルギーレベルの影響を受けるが、その影響は剛性に対する乾燥密度と飽和度の影響に含まれる。つまり、乾燥密度・飽和度状態とCELは独立ではないため（つまり、締固め過程において、同じ締固め状態では一つのCELが定まるため、つまり乾燥密度と飽和度とは独立にCELを変化させることができないこと）、龍岡の実験式には独立変数としての乾燥密度と飽和度に加えてCELを独立変数として付け加えるは必要ないこと（付け加えられないこと）ことが分かっている。

同様に、CELを徐々に大きくしていく締固めの過程では粒子破碎が必ず生じて、粒子破碎量はCELの影響を受けるが、粒子破碎量と乾燥密度/飽和度の締固め状態とは独立ではなく（つまり、同じ締固め状態では一つの粒子破碎量が定まるため）、剛性の経験式には、独立変数として乾燥密度と飽和度の外に粒子破碎量を独立変数として付け加える必要はない（付け加えられない）、と考えられる。なお、CELに応じた粒子破碎の特性は、CELに応じた締固め特性と同様に土質よって変化するため、土質ごとに異なる実験式となる。

全く同様に、剛性はサクションの影響を受けるが、サクションは締固め状態の関数であり乾燥密度と飽和度の関数として表現できる²⁶⁾。

従って、締固め過程において同じ締固め状態では一つのサクションの値が定まるため、剛性の経験式には、独立変数として乾燥密度と飽和度に加えてサクションを独立変数として付け加える必要はない（付け加えられない）と考えられる。

3.2. 室内試験による検討

3.2.1. 試験条件

図-3.1 に概念的に示した諸関係が小石原川ダムのコア材でも成立するか確認するために、地盤剛性指標 SSI として非水浸 CBR（以後、CBRと略記）を採用し粒度・CEL を変化させた室内試験として、突き固めによる土の締固め試験（JIS A 1210,B 法）,土の透水試験(JIS A 1218),非水浸 CBR 試験を実施した。表-3.1 に粒度・CEL の組み合わせによる試験ケースの一覧を示す。

各試験の供試体は、突き固めによる土の締固め試験 JIS A 1210 (B 法)の突き固め方法（表-2.2, 再掲）により作成する。ただし、表-2.2 に示す A~C 法は 1 層あたりの突き固め回数は CEL を標準プロクターの $1E_c$ ($\approx 550\text{kJ/m}^3$) の回数であるため、各ケースの CEL に応じて 1 層あたりの突き固め回数を補正して供試体を作製した。

非水浸 CBR 試験について、通常の CBR 試験(JIS A 1218)では供試体を湿潤させた後に試験を実施するが、今回の試験では施工時に確認される地盤剛性と他の締固め特性の関係を把握することが目的であるため、含水比調整後に作成した供試体をそのまま用いて CBR 試験を実施した。

使用材料の粒度分布を図-3.4 に示す。Case 1~3 では、後述する盛立試験で使用した一般コア材（コア材 B）を最大粒径 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ のせん頭粒度に調整した試料を用いた。母材である盛立試験材は最大粒径 $D_{\max}=150\text{mm}$ の全粒度での目標 $F_c=22\%$ で混合製造した材料である。Case 1~3 の試料を標準粒度とし、 F_c の値を既往ダムの実績²⁷⁾を参考に設定した本ダムにおける F_c の管理目標範囲（15~25%）の上下限值付近となるように製造した材料を $D_{\max}=37.5\text{mm}$ のせん頭粒度に調整し、それぞれ粗粒粒度（Case 4, $F_c=18.3\%$ ）と細粒粒度(Case 5, $F_c=29.3\%$)の試料を作製し、使用した。

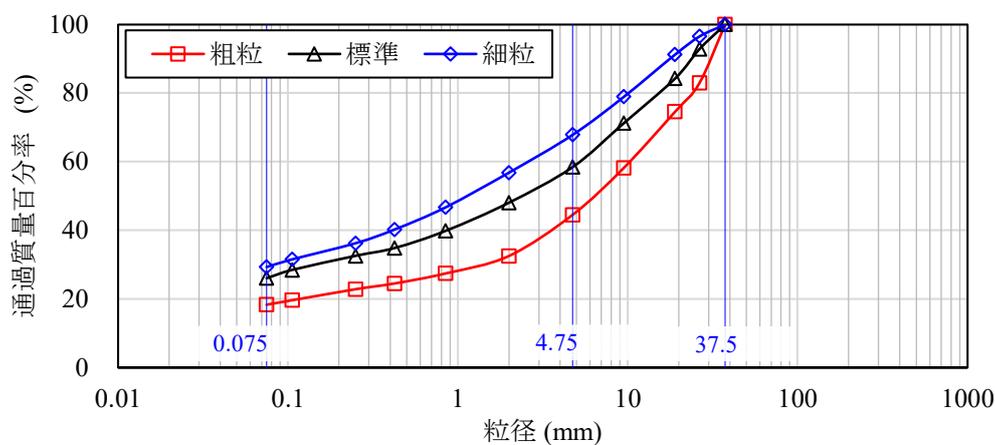
小石原川ダムの一般コア材は強風化岩由来の礫混じり粘性土であり、粒径が 0.075mm 以下の細粒分の含有率 F_c が 30~50%程度の細粒材と F_c が 5~15%程度の粗粒材を混合した材料（コア材 A）と、コア材 A を基本に細粒材の一部を、直径 20~50mm の風化岩を破砕機で粉砕して製造した人工細粒材で置換した材料（コア材 B）である。

表-3.1 室内試験ケース一覧（試験粒度及び CEL）

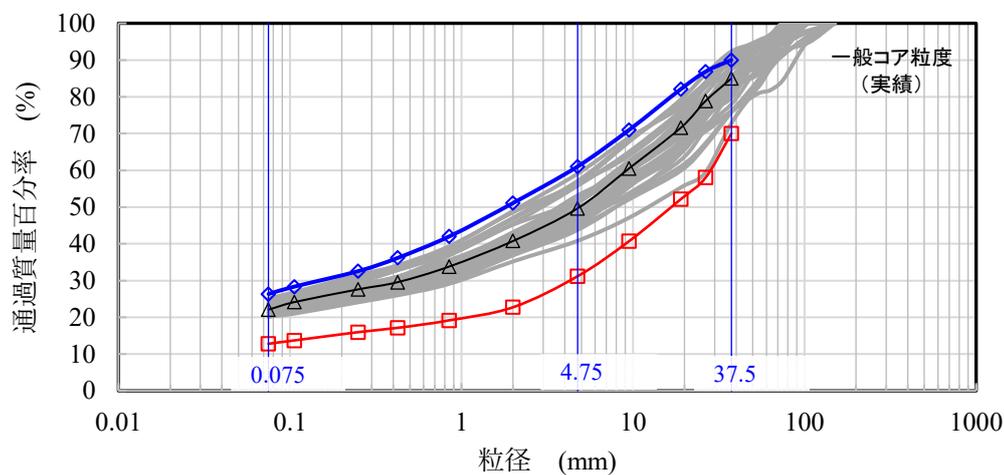
Case	粒度 ($D_{\max}=37.5\text{mm}$)			
	粒度区分	<0.075mm 含有率(%)	<4.75mm 含有率(%)	CEL
Case 1	標準	26.0	58.4	0.5Ec
Case 2	標準	26.0	58.4	1.0Ec
Case 3	標準	26.0	58.4	2.0Ec
Case 4	粗粒	18.3	44.5	1.0Ec
Case 5	細粒	29.3	67.8	1.0Ec

表-2.2 供試体作製に関する諸元 【再掲】

突固め方法の呼び名	ランマー質量 (kg)	モールド内径 (cm)	突固め層数	1層あたりの突固め回数	許容最大粒径 (mm)
A	2.5	10	3	25	19
B	2.5	15	3	55	37.5
C	4.5	10	5	25	19
D	4.5	15	5	55	19
E	4.5	15	3	92	37.5



a) 室内試験粒度¹⁵⁾



b) 全粒度 (頭粒度への調整前)

図-3.4 粒度分布

3.2.2. 試験結果

図-3.5 に Case 1~3 の試験結果に基づく、標準粒度において CEL に応じた含水比-乾燥密度、透水係数、剛性の関係を示す。

図中の k_{cr-1} は室内透水試験の許容上限値である。フィルダムの遮水材料では許容上限値に、室内透水試験では $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ を、現場透水試験では $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ を採用するのが一般的である²⁸⁾。 k_{cr-1} は k_{cr} の 1/10 に設定される理由は、現場盛土の不均質性と異方性等の影響により現場透水係数は室内透水係数よりも大きくなる傾向があるため、安全側の余裕も加味して経験的に設定されたものである²⁸⁾。

室内試験と現場試験で上限値が異なるため、本章では室内試験による透水係数の許容上限値を k_{cr-1} 、原位置試験による現場透水係数の許容上限値を k_{cr} と区別して略記する。なお、透水係数の単位は $[\text{m/sec}]$ が標準であるが、国内のダム建設事業では慣例的に $[\text{cm/sec}]$ が使用されているため、本研究でも $[\text{cm/sec}]$ を使用している。

図-3.5 a) の横軸は含水比 w の計測値であり、図-3.5 b) の横軸は各ケースの土質と CEL に応じた最適含水比 $(w_{opt})_{CEL}$ との差により正規化した、正規化含水比 $w'_{CEL} = w - (w_{opt})_{CEL}$ である。図-3.5 b) より、概ね $w'_{CEL} = -2 \sim 3\%$ の範囲では w' が減少すると（すなわち飽和度 S_r が減少すると）CBR は増加し、図-3.1 に示す概念図での傾向と良く一致している。

図-3.5 より、CEL が高いほど最大乾燥密度 $(\rho_d)_{max}$ が増加し、透水係数 k の最小値 k_{min} は低下し、最適含水比 $(w_{opt})_{CEL}$ が減少するという一般的な傾向が見られる。また CEL が高い程、

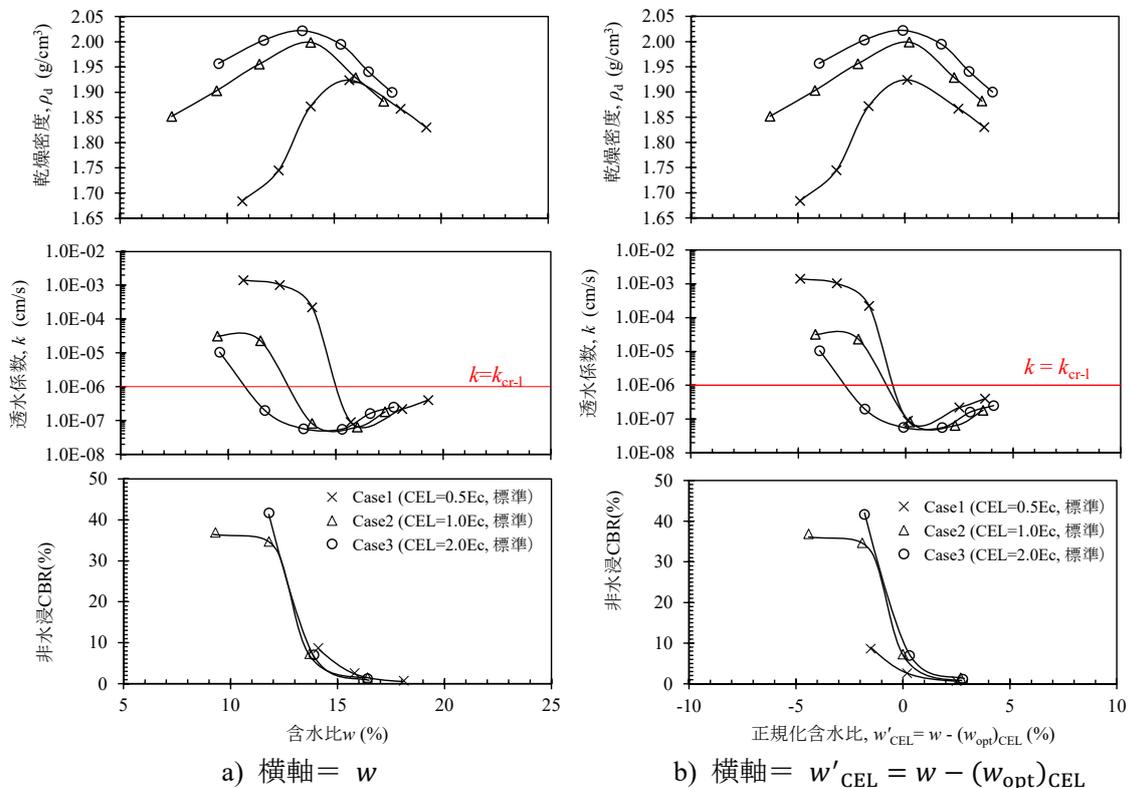


図-3.5 含水比～乾燥密度、透水係数、剛性の関係に対する CEL の影響 (Case 1~3)¹⁵⁾

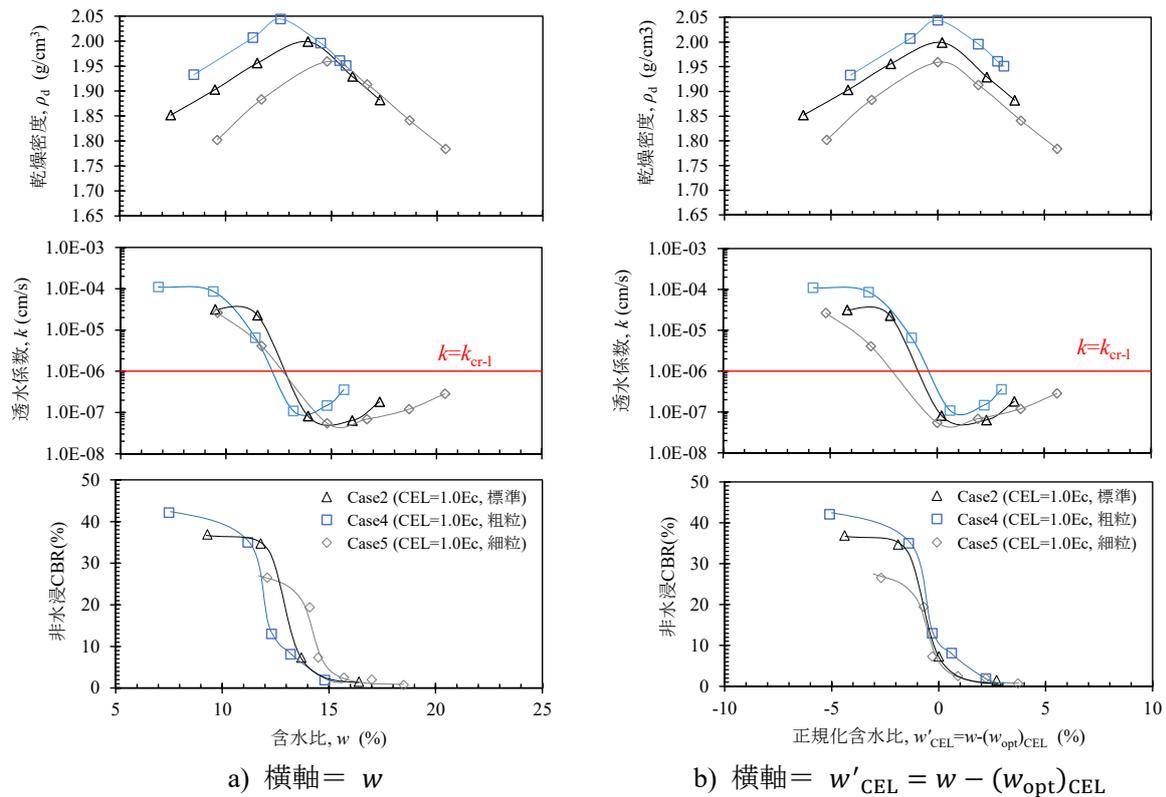


図-3.6 含水比～乾燥密度，透水係数，剛性の関係に対する粒度の影響（Case 2, 4, 5）¹⁵⁾

乾燥側で w の減少に伴う CBR の増加は大きく，その上昇量は $1.0Ec$ 以上の CEL でより大きい．これらは， $1.0Ec$ 以上の CEL で締固めを行えば， $w < (w_{opt})_{CEL}$ の乾燥側では地盤剛性指標 SSI によって鋭敏に含水状態を判別できることを意味している．なお，後述する盛立試験の結果からも， $1Ec$ 以上の CEL_f が確保できれば $(w_{opt})_{CEL}$ よりも乾燥側での SSI の上昇がより鋭敏になることを確認している．

以上より，同一の材料では CEL が高いほど ρ_d ， k ， SSI の物性は向上し，また含水比の変化による ρ_d と k の変化は鈍くなる一方， SSI の変化は大きくなる．特に SSI の変化傾向に注目すると，含水比 w が小さいほど SSI が上昇する左肩上がりの分布となり，特に $(w_{opt})_{CEL}$ より乾燥側における剛性の増加傾向が大きく，その傾向は $CEL \geq 1Ec$ 以上で顕著である．これらのことから，性能向上と品質管理の容易さの両面から，より高い CEL で施工管理を行うことが有利といえる．

次に粒度の影響を，図-3.6を参照して検討する．前述の通り，試験粒度は実施工で想定されるばらつきの範囲内で設定したが，この範囲内で粒度が変化しても， w の変化による ρ_d ， k ， CBR の変化傾向は変わらない．しかし，粒度が粗いほど，標準粒度に対して $(\rho_d)_{max}$ は若干大きく w_{opt} は若干小さくなり， k_{min} は若干大きくなる．また図-3.6 b)を見ると，粒度が粗いほど，同一の $w'_{CEL}(= w - (w_{opt})_{CEL})$ における CBR は若干大きくなる．特に， w'_{CEL} が実施工で想定される管理許容下限値よりも小さくなり $k > k_{cr-1}$ となる $w'_{CEL} < -1\%$ の範囲では，この傾向が顕著になる．

図-3.7 に、図-3.5, 3.6 に示すデータの $CBR \sim k$ 関係を示す。図-3.7 a) はエネルギーを変化させた場合、図-3.7 b) は粒度を変化させた場合である。いずれのケースでも $CBR < 5\%$ の範囲で k は極小値を示し、図-3.1 c) に示す概念図の傾向と一致している。図-3.7 a) は龍岡が御母衣ダムのコア材の室内試験結果を用いた分析により示した $CEL=1Ec$ と $CEL=4Ec$ の $CBR \sim k$ 関係の推定結果²²⁾と類似する傾向を示している。

表-3.2 に、各ケースでの $\rho_d = [(\rho_d)_{max}]_{CEL}$ となる時の含水比の値 $(w_{opt})_{CEL}$ および CBR の値 $(CBR_{opt})_{CEL}$ と、 $k = k_{cr-1} (= 1.0 \times 10^6 \text{ cm/s})$ となる時の含水比 w_{cr} および CBR の値 CBR_{cr} を示す。図-3.7 a) と表-3.2 から、同一粒度で CEL が $2.0Ec$ から $0.5Ec$ に低下すると $k \leq k_{cr-1}$ を満足する CBR の範囲は大きく減少し $k = k_{cr-1}$ となる CBR_{cr} は 60% から 5% と大きく低下する。これは CEL が低下すると ρ_d が低下して、 CBR が低下するとともに k は増加するためである。この結果は、SSI の上限値管理によって遮水性能を管理する場合に、現場条件として定めた CEL_f の値に対して施工時の CEL_f の値が不足した場合は、SSI の管理上限値を満足していても遮水性能を満足しない可能性があることを意味しており、 CEL_f 管理の重要性を裏付けるものである。

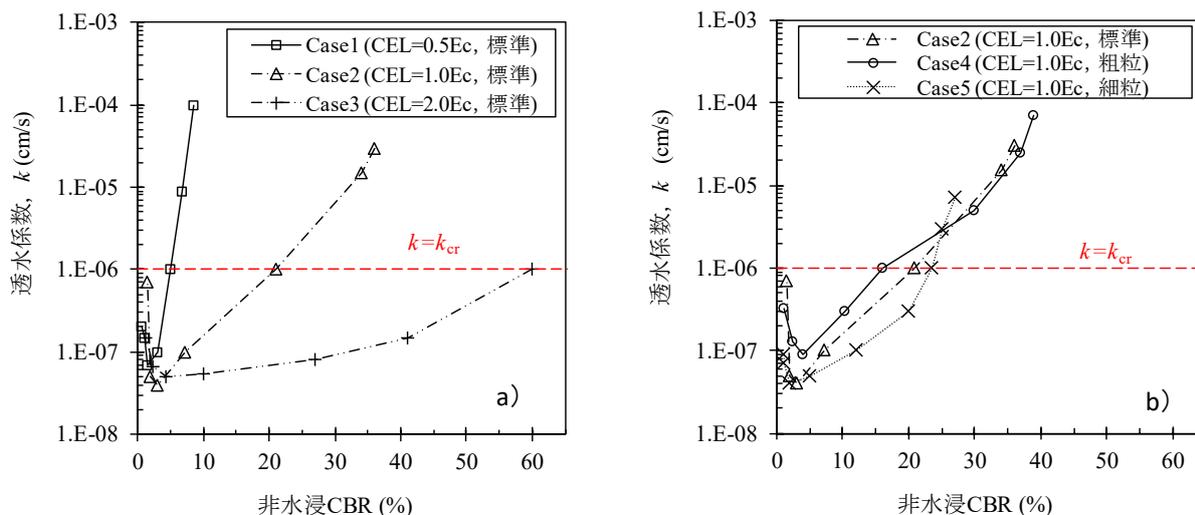


図-3.7 図-3.5, 3.6 に示す室内試験データより求めた $CBR \sim k$ 関係¹⁵⁾

表-3.2 室内試験での各種特性点における CBR と含水比の値

Case	粒度区分	CEL	$(CBR_{opt})_{CEL}$ (%)	CBR_{cr} (%)	$(w_{opt})_{CEL}$ (%)	w_{cr} (%)
Case1	標準	0.5Ec	3.0	5	15.6	15.0
Case2	標準	1.0Ec	7.3	21	13.7	12.9
Case3	標準	2.0Ec	10.0	60 ^{**}	13.6	10.8
Case4	粗粒	1.0Ec	10.3	16	12.6	12.2
Case5	細粒	1.0Ec	5.0	24	14.8	13.3

※ 外挿値

図-3.7 b)と表-3.2 から、同一の CEL で粒度が粗になると、 $k < k_{cr-1}$ を満足するための CBR の上限値 CBR_{cr} が低下し、遮水性能を満足する CBR の範囲が狭くなることが分かる。ただし、実施工で想定された F_c の変動 (18%~30%) によって CBR_{cr} は 15~25% 変化するが、CEL の変動 (0.5Ec ~2.0Ec) による変化に比べればその変化は小さい。

いずれのケースでも、 CBR_{cr} の値は、 $S_r = (S_r)_{opt}$ 状態での CBR である $(CBR_{opt})_{CEL}$ の値よりも大きい。この傾向は、今回の室内試験の範囲では CEL と粒度に関わらず、 $k = k_{cr}$ となる時の含水比 w_{cr} はそれぞれのケースでの $S_r = (S_r)_{opt}$ となる最適含水比 $(w_{opt})_{CEL}$ よりも若干小さく、図-3.1a), b) において点 C は点 T よりも左側に位置していることを意味している。これは、 S_r を $(S_r)_{opt}$ 付近の値に維持することによって k_{cr} よりも小さい k を保証できて、点 C を越えない範囲でやや乾燥側の施工を許容できることを示している。

以上示したように、小石原川ダム的一般コア材の実施工で想定される遮水性能の確保が可能な w の範囲内 $(w_{opt})_{CEL} \leq w \leq (w_{opt})_{CEL} + 3\sim 4\%$ において、 w が減少すると地盤剛性指標 SSI は増加することが確認できた。

また、実施工で SSI を用いた遮水性能管理を実施する場合、必要な遮水性能を確保するためには、「現場の全粒度試料の内部の最大粒径 $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分」に作用する締固めエネルギーレベル CEL_f は 1.0Ec 以上確保することが望ましいこと、SSI の許容上限値に対する管理基準値 SSI_{UB} の値は管理粒度の範囲内で最粗粒での値に基づいて決定する必要があること、実施工での粒度等の土質と CEL_f の条件は SSI_{UB} の値を決定した盛立試験での条件と同等以上に保つ必要があることが分かった。

なお、土質と CEL_f を一定の幅で管理する必要性については、従来型の ρ_d と w による遮水性能の間接管理でも同様である。重要構造物であるフィルダムコアゾーンの施工においては、土質と CEL_f の管理は一般土工と比較して、高頻度かつ多数の品質管理試験とより詳細な施工仕様規定により管理されてきた。これらに加え、著者が携わった小石原川ダムでは土質と CEL_f の管理は従来型の抜取試験型の品質管理と施工仕様規定による管理に加えて、ICT を利用することでより高頻度な確認を行うことで品質保証を高めてきた。参考としてこれらの取組の概要を記す。

粒度等土質については、通常は、細粒材と粗粒材と呼ばれる粒度の異なる 2 種類の母材を互層にパイリングして、搬出時にバックホウで切り崩してブレンドすることで材料製造される。製造過程において、パイリングの際には代表粒度とブレンド比率に応じた層厚でパイリングすることを基本とし、パイル造成完了時と搬出時に粒度試験を行い、適切な幅の中に納まっていることを確認する。

小石原川ダムでは、搬出時の粒度確認試験は品質管理規定に則り 1 回/日の粒度試験を行うとともに、画像粒度解析法 A) による ICT を併用して、1 回/30 分に搬出粒度の傾向確認を実施することで、施工ロット内の粒度のばらつきの幅を確認しながら施工を行うことで品質保証を高めている。

現場の締固めエネルギーレベル CEL_f の管理については、従来は、試験施工で所要の性能

が確保できる施工仕様（撒き出し厚，転圧機種，転圧回数）を定めて，この仕様どおり施工する施工仕様規定型の管理が行われてきた。仕様通りの施工が行われているかの確認は，発注者と受注者の双方の監督員が目視により確認を行い，チェックシート等の紙媒体に記録を残して保管するという方法が一般的であった。小石原川ダムでは，CEL_fの確認は ICT 施工記録による管理を行った。以上に概説した土質と CEL_fの ICT 施工管理については，第 5 章で詳述する。

3.3. 現場盛立試験による検討

3.2.節で説明した室内試験で得られた含水比 w と乾燥密度 ρ_d ，透水係数 k ，地盤剛性指標SSIの相関性が現場に適用できるか，実施工に先立ち盛立試験を実施して確認した．この盛立試験は第2章で説明した現場盛立試験である．

盛立試験では，SSIとして落球探査法¹⁶⁾による変形係数 E と加速度応答スペクトル指標の一つであるCCV（Compaction Control Value）^{5),6),29)}の2種類を採用した．第3章では，前者の変形係数を解析した結果を報告する．

図-3.8に落球探査法の機器構成¹⁶⁾を示す．落球探査法はHertzが提案した弾性球体の接触理論に基づいており，重錘の着地を，半径無限大の球体とみなされる地球（地盤）と，もう1つの球体である重錘との接触現象ととらえ，その挙動から地盤の変形係数 E を推定する試験法である^{16),30)}．重錘の着地時加速度センサーで捉えた衝撃波の継続時間（接触時間）は地盤が柔らかい（ E が小さい）ほど長く，硬いほど短くなるため（図-3.9），接触時間から E が推定できる．このとき経験的な相関式を用いることなくHertz理論式に接触時間と重錘の諸元を代入して変形係数 E を算出する．

落球探査法による変形係数 E は平板載荷試験による地盤反力係数 K_{30} （1.25mm沈下時の荷重沈下曲線の割線）に相当する変形係数と概ね1：1の良好な相関が得られることが確認されており^{16),30)}，平板載荷試験と同等のひずみレベルによる変形係数を計測していると考えられる．変形係数から理論的に換算した地盤反力係数 K 値と経験式を用いて現場CBRへの換算も可能である³⁰⁾．これら落球探査法の試験方法や原理等の詳細については参考文献^{16),30)}を参照されたい．

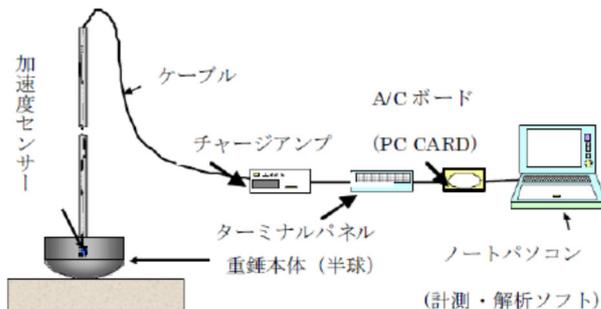


図-3.8 落球探査法の機器構成¹⁶⁾
（参考文献16）の図-1より引用）

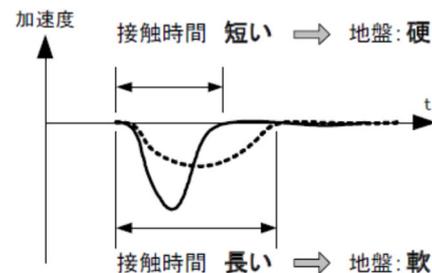


図-3.9 地盤の硬軟と接触時間の関係¹⁶⁾
（参考文献16）の図-2より引用）

3.3.1. 試験条件

表-3.3 に、試験ケースと試験項目の一覧を示す。

小石原川ダムでは施工の途中段階でブレンド比率を変更したため、後述するとおり 2 種類のコア材を使用している。このため、材料ごとに盛立試験を行い、その品質と適用性を確認している。この 2 種類のコア材は盛立試験に使用した材料の粒度分布の傾向が若干異なり、その影響が地盤剛性指標 SSI の計測結果にも反映されていた。このため、第 3 章と第 4 章では各コア材料の傾向に特徴に注目した比較・考察を行うため、試験ケース名を第 2 章と異なる形でリネームしている。

地盤剛性指標 SSI の計測については、落球探査法による変形係数 E とローラ加速度応答法による計測指標の一つである CCV (Compaction Control Value) の 2 種類の SSI を計測した。以後、本論文では、特に注釈のない限り「変形係数」とは「落球探査法による変形係数」のことを示す。

表-3.3 に示す含水比は、「盛立試験での現場全粒度試料の内部の最大粒径 $D_{max}=37.5\text{mm}$ の部分」の施工時の含水比であり、標準プロクター1Ec での最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ を基準にして $(w')_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec} = -1.9\% \sim 2.2\%$ の範囲で複数設定した。本節では w の変化に伴う、締固めた土の地盤剛性指標、現場透水係数、及び両者の相関の変化を分析した。第 2 章 2.5.1. で記したとおり、盛立試験を行う含水比の範囲は現場透水係数が品質管理基準を満足しないことが予測された乾燥側の値まで含んでいる。なお、表-3.3 には記載していないが、乾燥密度、含水比については Walker-Holtz の礫率補正式³¹⁾によって全粒度試料の現場締固め状態から $D_{max}=37.5\text{mm}$ 材料の締固め状態を算定するため、各試験孔から採取した材料を用いて粒度試験 (JIS A 1204) と土粒子密度試験 (JIS A 1202)、礫の比重・吸水率試験 (JIS A 1110) を実施している。

盛立試験は、10t 級平滑振動ローラを用いて、実施工と同じ仕上がり厚 30cm で 3 層の試験ヤードを造成し、下層地盤の影響を受けないよう 3 層目で各種の現場試験を実施した。第 2 章の図-2.14 に示した盛立試験ヤードの造成例と試験孔の基本配置を再掲する。

表-3.3 盛立試験ケース一覧

Case	正規化含水比 (1Ec基準) $w'_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ (-37.5mm 粒度)	試験項目				備考
		現場密度試験 (JGS1611)	現場透水試験 (JGS1316)	地盤剛性指標1 変形係数 E	地盤剛性指標2 CCV	
Case1-1	-1.70%	○	○	○	— ^{※1}	コア材A, w:管理下限値より乾燥側
Case1-2	-0.8%	○	○	○	○	コア材A, w:管理下限値
Case1-3	0.50%	○	○	○	○	コア材A, w:中間含水比
Case1-4	2.20%	○	○	○	○	コア材A, w:管理上限値
Case2-1	-1.90%	○	○	○	— ^{※2}	コア材B, w:管理下限値より乾燥側
Case2-2	-1.00%	○	○	○	○	コア材B, w:管理下限値
Case2-3	0.20%	○	○	○	○	コア材B, w:中間含水比
Case2-4	2.20%	○	○	○	○	コア材B, w:管理上限値

※1 計測機器の故障により未実施

※2 施工層のみの含水比調整であったため参考値扱い

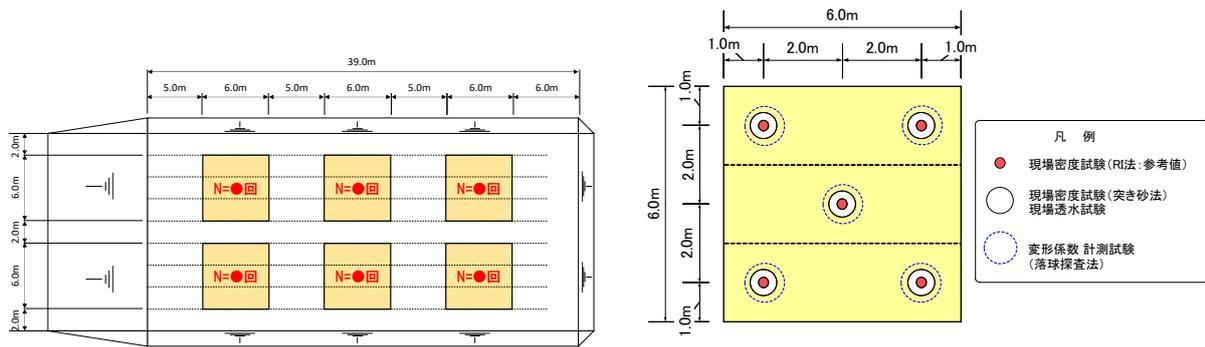


図-2.14 盛立試験ヤード造成例と原位置試験孔の基本配置 【再掲】

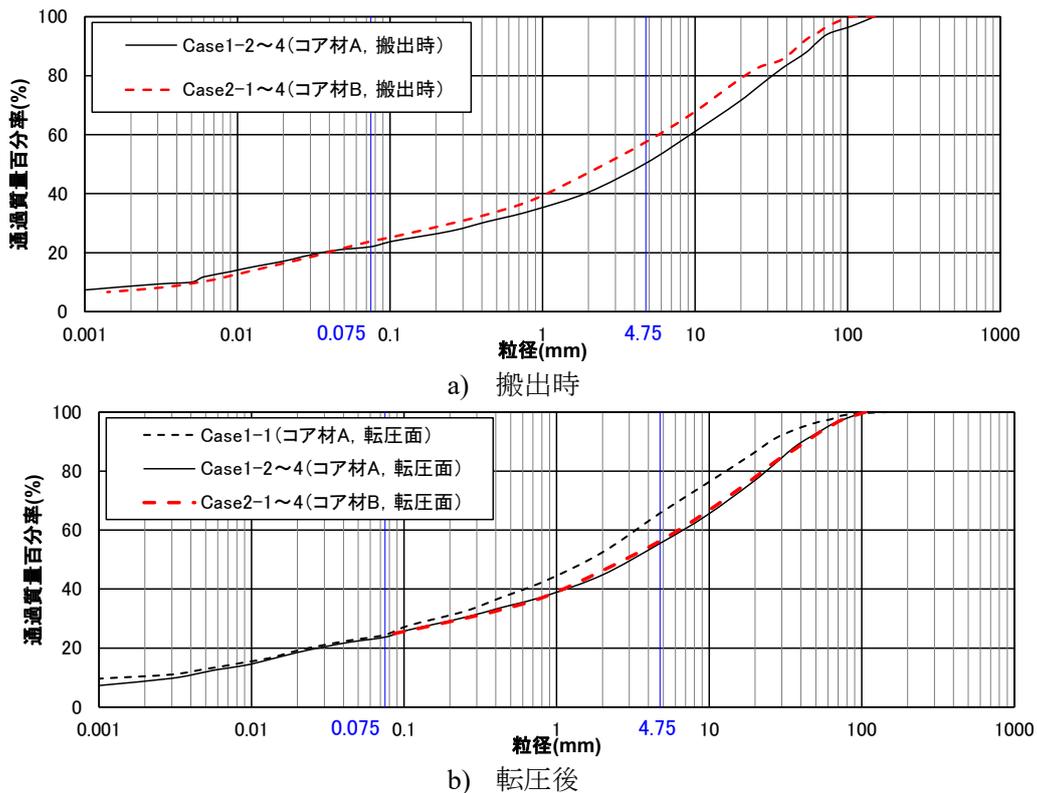


図-3.10 盛立試験での原位置全粒度材料の平均粒度分布¹⁵⁾

図-3.10 に各ケースでの原位置全粒度試験材の平均粒度分布を示す。粒度分布は転圧後に実施した現場密度試験孔から採取した試料を用いた試験値であり、転圧破碎の影響が考慮されている。使用材料は全て小石原川ダムの一般コア材であり、Case 1 では、一般コア材の標準粒度として製造したコア材 A を使用した。Case 2 では、製造時に使用する細粒材の一部を直径 20~50mm の風化岩を破碎機で粉碎して製造した人工細粒材で置換したコア材 B を使用した。図-3.10a) のとおり製造時はコア材 B の方では 4.75mm 以下含有率を若干高めに製造しているが、図-3.10b) より転圧面での粒度は転圧破碎の影響により、粒度分布はコア材 A, B で同等となっている。ただし、追加試験として実施した Case 1-1 は試験材料を別に製造したため、Case 1-2~4 より粒径 0.075mm~4.75mm の含有量が若干多い。

3.3.2. 試験結果

図-3.11 に、現場試験により得られた含水比 w の変化に伴う、乾燥密度 ρ_d 、締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ 、現場透水係数 k 、変形係数 E の変化を示す。図-3.11には、実施工の施工仕様である転圧回数(N=8)での測定結果を示しており、各ケースで実施した5点の個別試験値と、その平均値をプロットした。コア材A (Case 1)とコア材B (Case 2)では締固め特性が異なり $(w_{opt})_{1Ec}$ の値が異なる。このため、各ケースの原位置密度試験孔群の近傍で採取した代表試料を $D_{max}=37.5\text{ mm}$ のせん頭粒度で調整した試料(以後 $<37.5\text{ mm}$ 試料)を用いた室内締固め試験(1Ec)によって得た $(w_{opt})_{1Ec}$ を用いて、横軸の座標を1Ec基準の正規化含水比 $(w')_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ としてデータ整理した。図-3.11a)に示す $(D_c)_{1Ec}$ は原位置全粒度試料の内部の $D_{max}=37.5\text{ mm}$ の部分の締固め度であり、その算出方法と採用経緯については「第2章_2.4.2 締固め効果の評価方法」を参照されたい。図-3.10a)を見ると、コア材A,Bのいずれでも、 $(w')_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ が -0.8% 程度の時に $(D_c)_{1Ec}$ はピーク値を示している。これは、現場での全粒度試料の内部の $<37.5\text{ mm}$ の部分が受けた締固めエネルギーレベルは1Ecを超えていることを示している。なお、「2.4.2. 締固め効果の評価方法」に記したとおり、現場全粒度試料が受けた締固めエネルギーレベルは、それよりも高い。

図-3.11 に示すように、粒度等の土質および CEL_f が一定とみなせる現場条件下で実施し

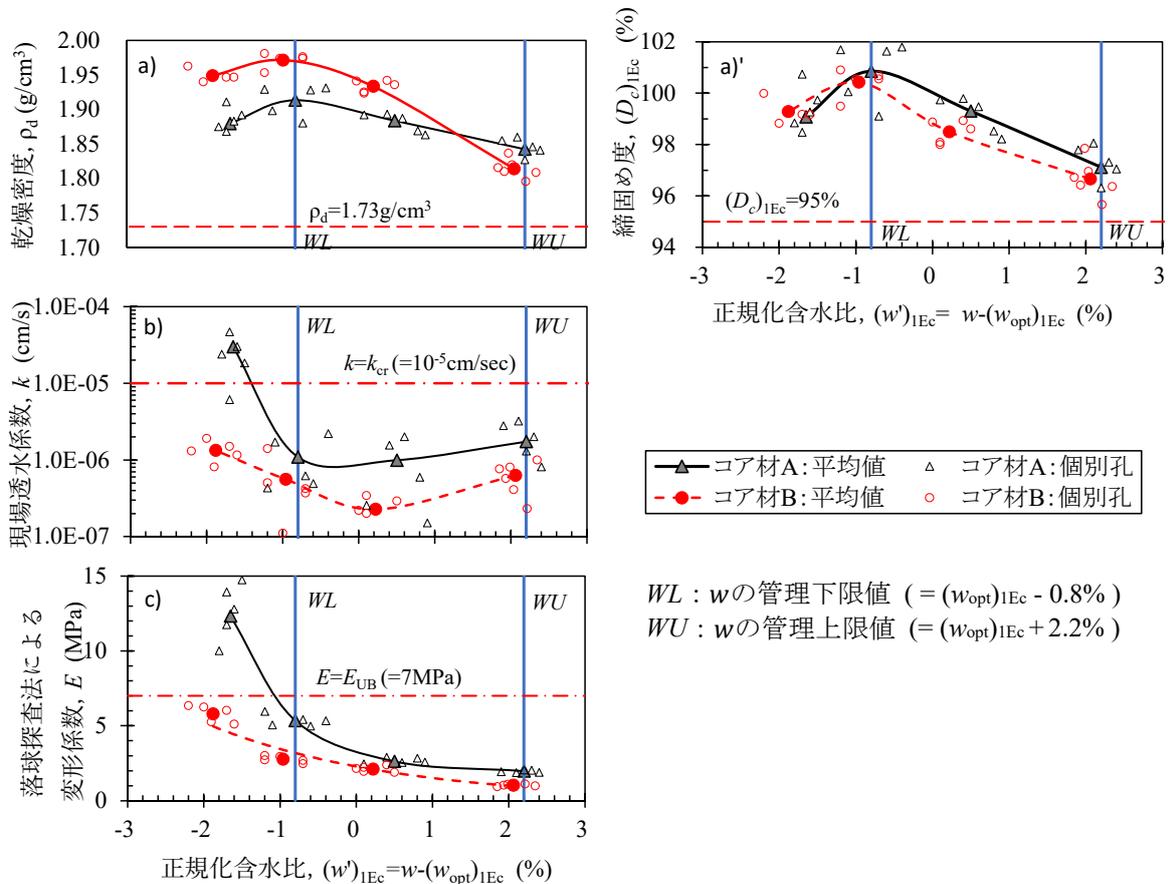


図-3.11 盛立試験の結果 (N=8) ¹⁵⁾

た遮水性材料の盛立試験で得られた含水比と乾燥密度・透水係数・変形係数の関係の傾向は、**図-3.1** の概念図、および**図-3.5**、**図-3.6** に示す室内試験結果の傾向と良く一致している。

粒度等の土質の影響を確認するためにコア材 A, B の挙動を比較すると、コア材 B の方が、同一の $(w')_{1Ec}$ における k と E が低めにシフトしている。特に、 $(w')_{1Ec} < 0$ の範囲では、コア材 A と比して E の値の低下が著しい。一方、乾燥密度については最も湿潤側のケースを除き材料 B の方が材料 A よりも相対的に高い結果が得られている。**図-3.12** に示すように、盛立試験前に実施した室内試験でも同様の傾向が得られている。乾燥密度が増加した理由として土粒子密度がコア材 A では 2.75g/cm^3 であったのに対し、コア材 B は 2.88g/cm^3 と増加していることが挙げられる。

また、現場試験においては、コア材 B では透水係数も小さくなっていることから、単純な土粒子密度の増加だけでなく、締固めによる間隙が減少しているものと推定される。**図-3.10 b)**のとおり転圧面におけるコア材 A,B の粒度分布は同等であることから、人工細粒材の置換による粒子特性の変化の影響を受けている、と考えられる。

人工細粒材は $20\sim 50\text{mm}$ の風化岩を破砕機で粉砕して製造しているが、使用された破砕機はセメントや石灰の微粒分の粒形改善※に使用される機械であった。このため、人工細粒材の製造過程において、粗粒子と細粒子の粒形改善※も行われていると推定される。既往の研究³²⁾より、土粒子の粒形が球形に近づくことで、コア材 A と比べて粗粒子を主体に形成さ

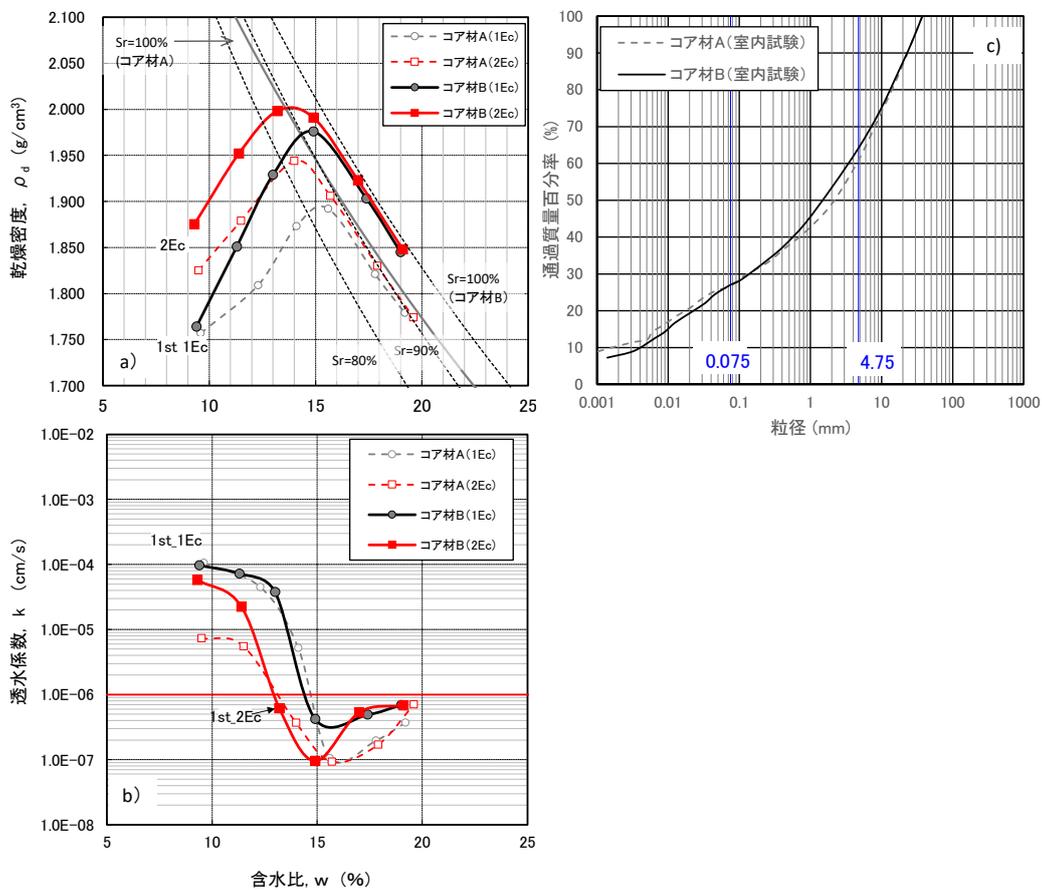


図-3.12 室内試験結果

れる骨格構造による間隙が小さくなるとともに、細粒子による間隙の充填が容易になり、また細粒子による保水性の向上が改善すると考えられる。この結果、締固め後に形成される間隙が相対的に小さくなり、乾燥密度と遮水性は向上する一方で、保水性の向上によって粒子移動が容易になることで剛性が低下しているものと推定される。

※ 本論文では、コア材細粒分の隙間への充填性の観点から、粒子形状が球形に近く凹凸が小さい状態を「粒子形状が良い」とし、粒形改善とは「粒子形状が良い」状態に近づくことを指すものとする。なお、材料の用途によって「粒子形状の良否」の定義は異なることに注意されたい。

コア材 B の k はコア材 A と比較して全体的に 1 オーダー程度低く、 $-2\% < (w')_{1Ec} < 2\%$ の範囲全体で、現場透水係数 k は許容上限値 k_{cr} ($=1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$) よりもかなり低い。また、後述のように、コア材 B では、含水比が管理下限値 WL より低い条件にあっても、 E が設定した管理上限値以下であれば k は許容上限値 k_{cr} 以下となる。

図-3.13 に、盛立試験で得られた変形係数 E と現場透水係数 k の関係を示す。現場試験であるため個別値は不可避免的にばらついたが、平均値は E の減少とともに k が減少し、 E がある値以下になると k は若干増加している。これらの傾向は図-3.1 c) の模式図と図-3.7 に示す室内実験の結果と同様である。図-3.13 より、Case 1 (コア材 A) と Case 2 (コア材 B) のいずれも、 E が概ね 10MPa 以下であれば k は管理基準値 k_{cr} 以下となると判断できる。

w の管理範囲は、 $(w_{opt})_{1Ec} - 0.8\% \sim (w_{opt})_{1Ec} + 2.2\%$ (即ち、 $(w')_{1Ec} = -0.8\% \sim 2.2\%$) である。図-3.11 を見ても、この $(w')_{1Ec}$ の管理範囲内では、 E は 6.0MPa 程度以下となり、 k は許容上限値 k_{cr} よりも十分小さい範囲で管理される。

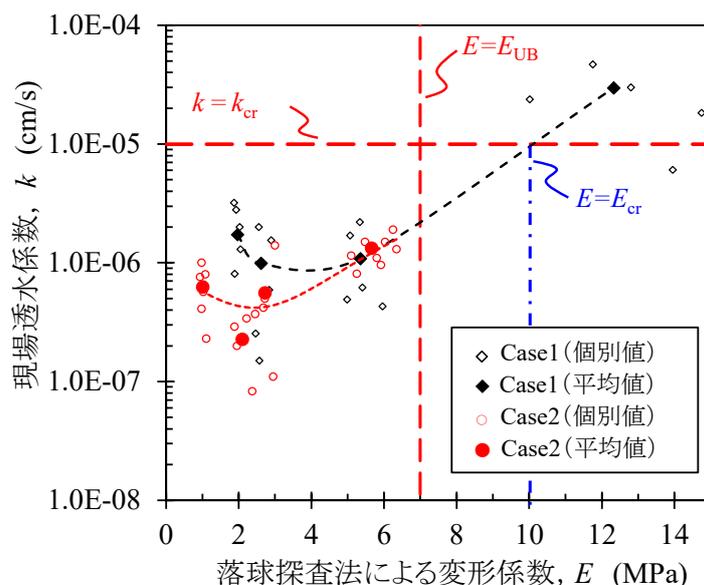


図-3.13 盛立試験における透水係数と変形係数の関係¹⁵⁾

【参考】走査電子顕微鏡 (SEM)による粒子形状分析

3.3.2 に記した、「人工細粒材の製造過程で粒子形状が改善された」という推論を確認するために、走査電子顕微鏡 (SEM)にてコア材 A,B の骨格構造の観察と粒子形状分析を実施した。ただし、これらは本研究の主要な検討事項ではないため、ここでは結果の概要のみを記し、詳細については付録 C に記す。

緑川・丸山は高流動コンクリートの研究の一環として微粒分の形状係数と保水能力に関する研究³²⁾を行っており、長短比と凸凹係数を用いた形状係数は粒子形状を表わす有効な手段となること、粉体の充填性は粒子形状と粒度分布に関係し、粒子形状が球に近いほど、かつ、粒子全体にわたり粒子間の隙間を埋める別な粒子が存在するような粒度分布ほど充填性が良いこと、粉体の保水性能のうち粒子形状は粒子表面への吸着水に、粒度分布は粒子間保有水に関係することを言及している。これらの特長は土質材料にも一定程度当てはまるとの考えから、上記の推察に至っている。

写真-3.1 に小石原川ダムコア材 A,B および T ダムのコア材 C, A ダムのコア材 D の SEM による 2 次電子写真 (倍率=500 倍) を示す。コア材 A,B ともに扁平な粗粒子が骨格構造の中に存在していることが確認できる。

コア材 A,B は三郡変成岩に類する堆積岩と凝灰岩がホルンフェルス化した変成岩が風化して粘土化した材料が母材である。風化前の母岩は扁平形状に破碎される性質があり、風化後のコア材の粒子構造も粗粒子については同様の構造を有した粒子が存在するようである。コア材 A,B を比較した場合に、人工細粒材を含むコア材 B では扁平な板状の粒子が若干少なくなっているように見える。

T ダムのコア材料である試料 3 では、試料 1,2 に見られる板状の粗粒子がほとんど存在しない。A ダムのコア材料である試料 4 では、板状の粗粒子が確認できるが、試料 1,2 と比べるとその数は少ない。

小石原川ダムのコア材の粒度分布は細粒分含有率を $F_c=20\%$ 程度と既往のダムと比べて高めに設定している。既往のダムでは $F_c=15\%$ 程度の事例が多いが、小石原川ダムでは $F_c=15\%$ 程度とした場合には、透水係数が規格値に対して十分な余裕が確保できなかったことによる。これは、上記のような粒子形状の影響を受けていたものと思われる。

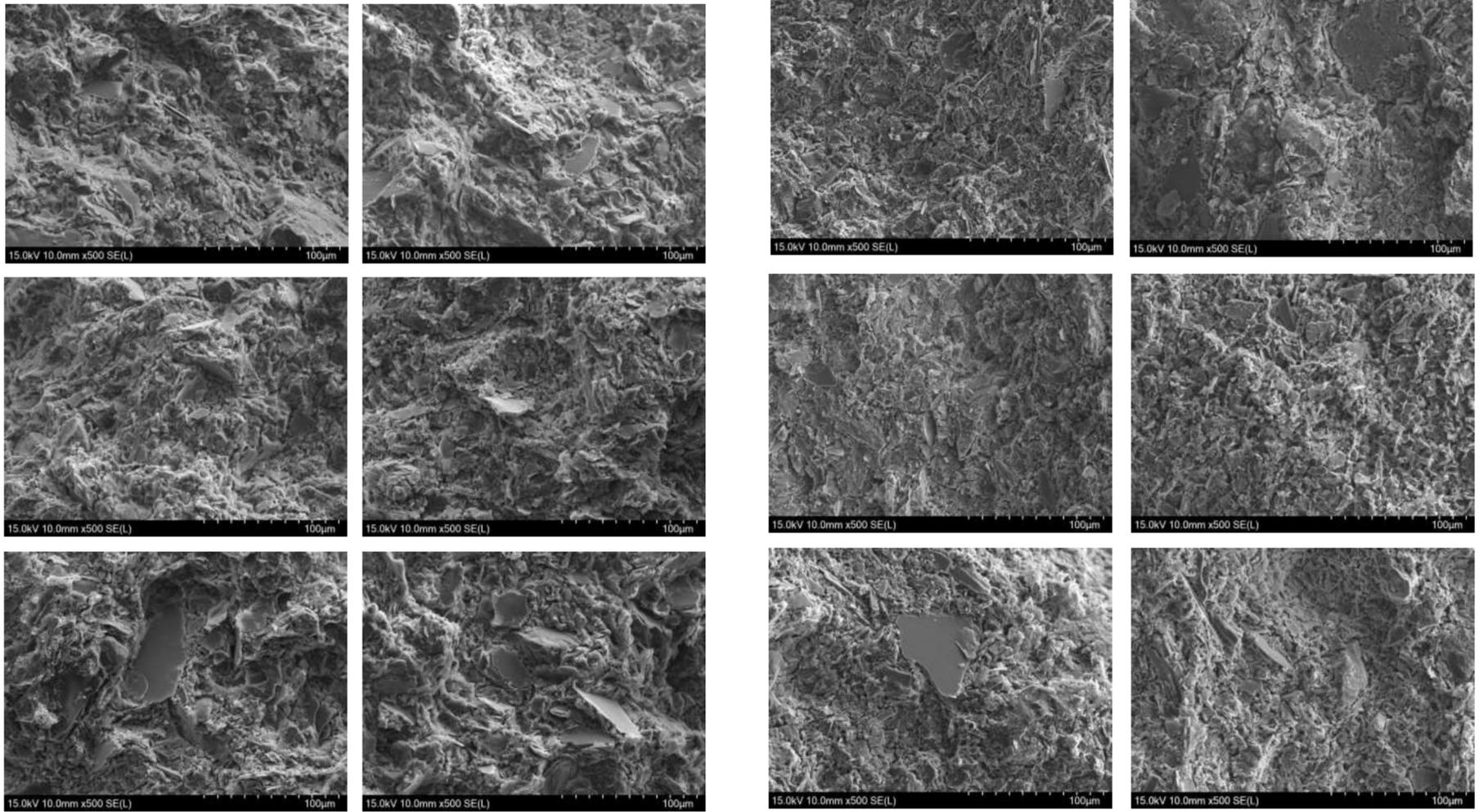
表-3.4 に人工細粒材の母材と破碎材の画像解析に基づく形状係数の統計処理結果の概要

表-3.4 破碎前後の形状係数の比較

形状係数		母材	破碎材
凹凸係数	平均値	1.587	1.547
	標準偏差	0.917	0.560
長短比	平均値	1.466	1.506
	標準偏差	0.398	0.392

を示す。表-3.4 より破碎材は長短比の統計値には大きな変化はないが、凹凸係数が改善されていることがわかる（凹凸係数は小さいほど球体に近い）。

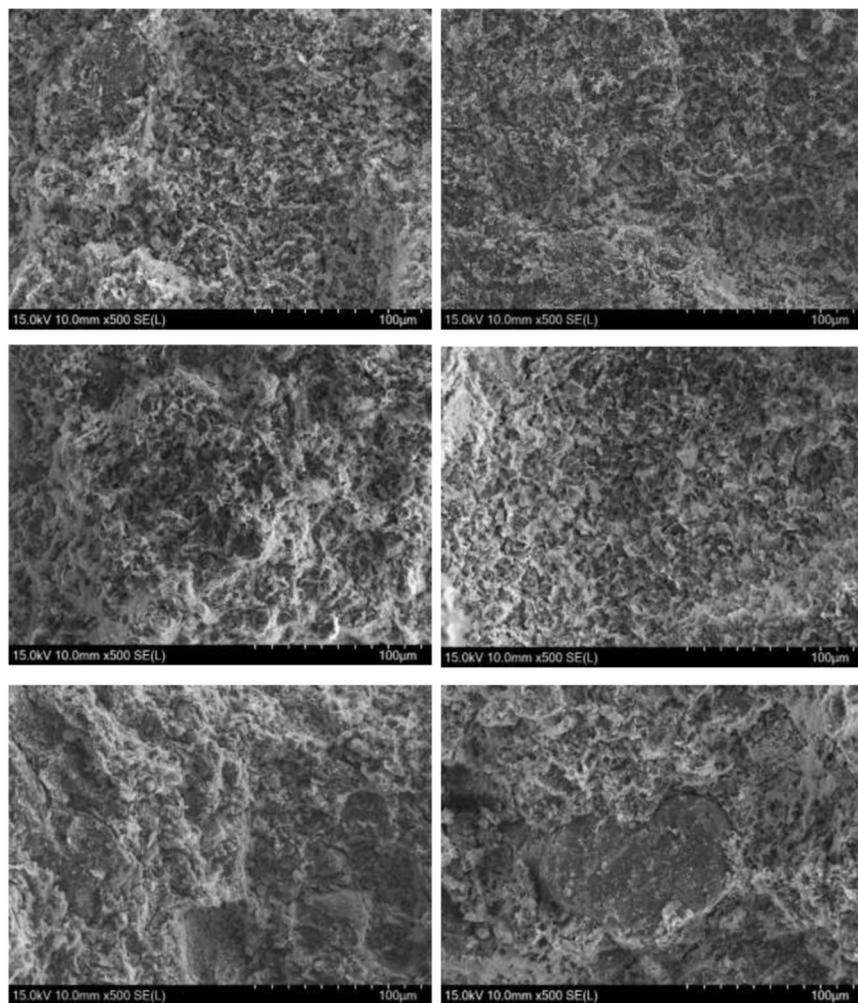
ただし、これらの分析結果については、①使用した材料が各ダムの物性を真に代表しているかどうかは不明である、②各試料の統計分析に用いた母数が大きく異なる、といった課題がある。このため、ここまでに記した形状係数に関する分析結果は十分な信頼性があるとは言い難く、参考資料としての位置づけと考える。



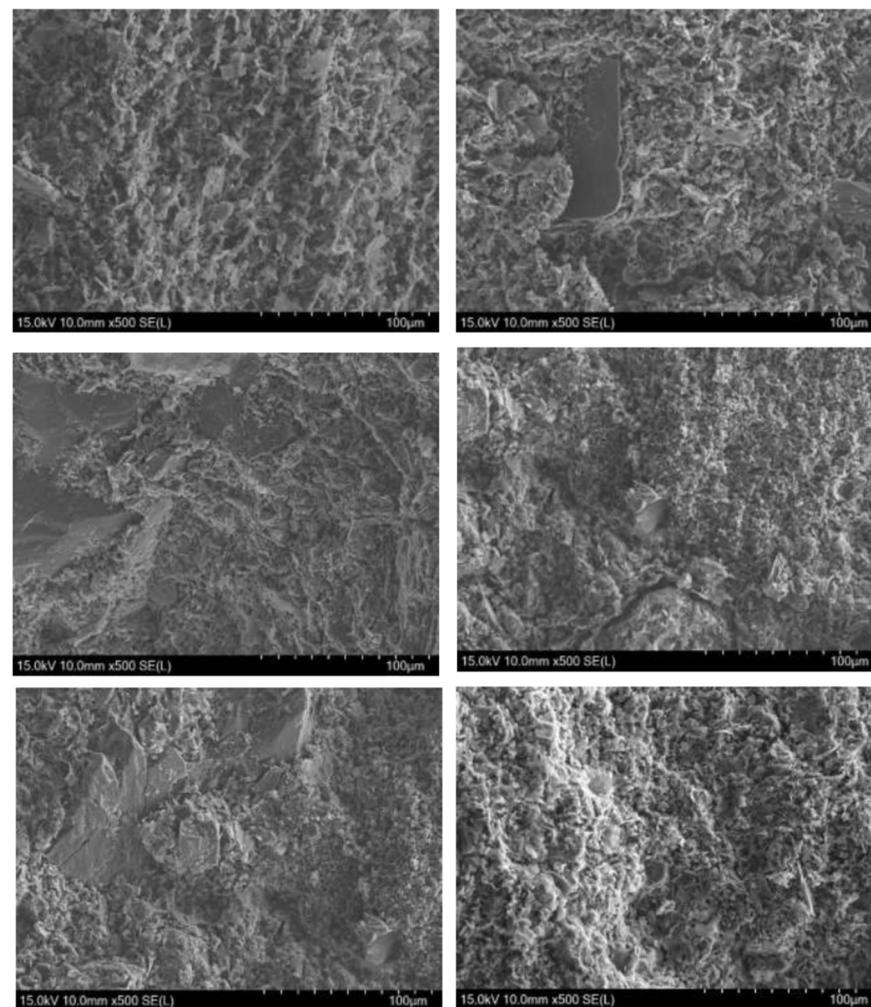
(a) コア材 A

(b) コア材 B

写真-3.1 SEMによる骨格構造観察 (2次電子写真,倍率=500倍)



(c) コア材 C



(d) コア材 D

写真-3.1 SEMによる骨格構造観察 (2次電子写真,倍率=500倍)

3.3.3. 締固め状態と地盤剛性指標

図-3.14 に、コア材 A の締固め状態の管理範囲と地盤剛性指標としての変形係数 E の等高線を示す。図-3.14 は、図-3.1 a) の模式図と整合している。なお、図-3.14 に示す異なる転圧回数 N での現場締固め曲線の推定法³³⁾は、第 2 章を参照されたい。

本ダムでの締固め状態の管理範囲は、第 2 章で詳述したとおり、 $(D_c)_{IEc}$ 、 w 、 S_r のそれぞれの管理範囲の組み合わせによって構成されており、設計で要求される透水係数、強度等の物性を保証するように設定した。締固め管理範囲についての詳細は第 2 章を参照されたい。

強度と締固め度の関係について補足すると、小石原川ダムのコア材では断面設計のすべり計算に使用する c, ϕ の設定根拠となる三軸試験の供試体作製時の締固め状態を参考に、密度の管理下限値を設定しており、実施工時の締固め度の下限値 95% における乾燥密度は乾燥密度の管理下限値に対して余裕をもって満足するような関係ある。このことから締固め度の下限値を満足すれば設計上の内部摩擦角は確実に確保されると考えられる。

第 1 章で述べたとおり、土の締固め状態は (ρ_d, w) などの 2 変数によって決まるため、地盤剛性指標 SSI だけでは締固め状態を推定することはできない。一方で、既往の SSI の下限値管理では常に SSI と ρ_d に正の相関がある前提での管理がなされているが、図-3.14 のとおり、遮水性盛土では SSI (ここでは変形係数 E) の計測結果からは ρ_d の概略値すら推定できず、むしろ遮水性盛土の SSI は含水比 w の影響が支配的である。

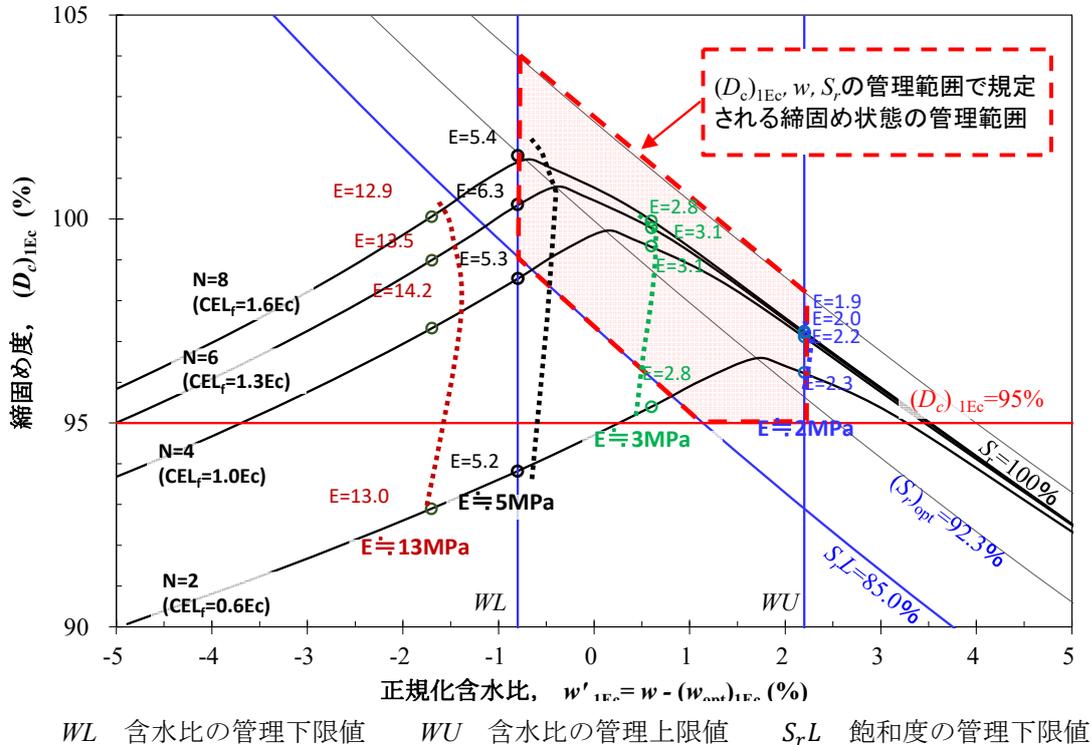


図-3.14 締固め状態の管理範囲と変形係数 E の等高線の比較¹⁵⁾
(コア材 A の $D_{max} = 37.5\text{mm}$ 試料)

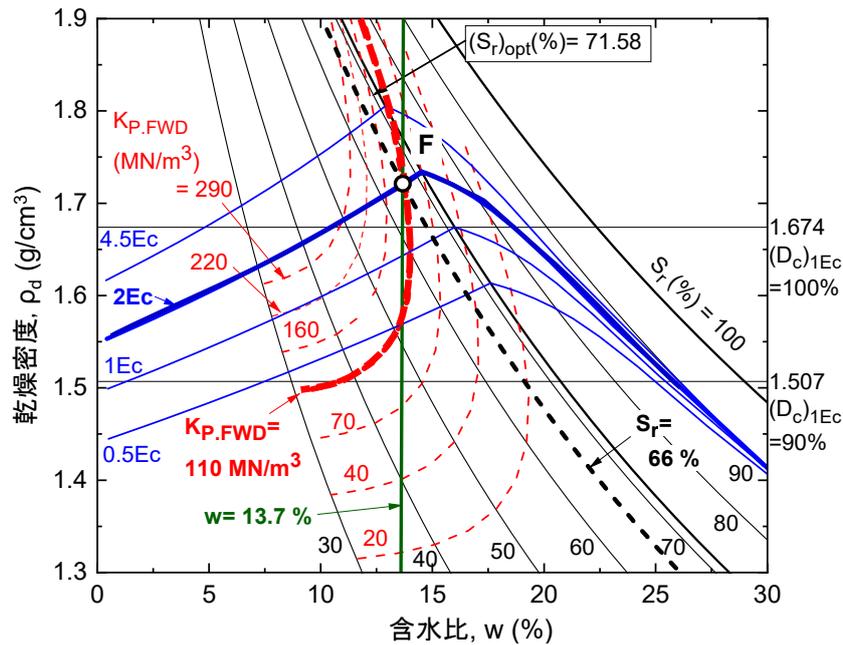


図-3.15 実大締固め試験^{34),35)}結果に基づく CEL が異なる締固め曲線群と地盤剛性指標・飽和度の等高線の関係^{36),37)} (参考文献^{36),37)}より引用)

図-3.15 に龍岡が、土木研究所での共同研究^{34),35)}として実施された実大締固め実験の結果に基づき整理した、異なる現場締固め曲線と、SSI(K_{pFWD})コンター、 S_r コンターの関係^{36),37)}を示す。共同研究^{34),35)}では10種類の重・軽量締固め機械を用いて複数の w で山砂($D_{max}=9.5\text{mm}$; $D_{50}=0.18\text{mm}$, $U_c=6.7$, $F_c=15.3\%$)の実大締固め試験が行われた。図-3.15からも、 $S_r = (S_r)_{opt}$ の状態の近傍では SSI の等高線と w 一定線はほぼ鉛直で平行であり、SSI と w が既知でも ρ_d を精度良く推定できない。つまり、通常は「SSI は ρ_d の指標」と考えられているが、むしろ「SSI は w の指標」となっている。

以上より、遮水性盛土や山砂のような細粒分含有率が15%程度より高く、CEL=1Ecにおける最適含水比が15%前後より高い材料では、「SSI は ρ_d の指標とはならず、 w の指標と考えられる」ことが分かった。SSI (ここでは変形係数 E) を管理することで $\rho_d \sim w$ 平面における横軸の位置が同定できるため、材料の粒度等の土質と CEL_f を一定に管理することにより現場締固め曲線を確定できる場合は、SSI (ここでは変形係数 E) の等高線と現場締固め曲線の交点から締固め状態 (ρ_d, w) を同定できる。以上より、SSI の上限値管理によって透水係数の上限値管理ができる。この締固め状態の管理方法は、 E 以外の SSI でも適用可能であるとえられる。

図-3.16 は吉田ら³⁸⁾による小石原川ダムのコア材の試験材料を用いて実施した中型三軸圧縮試験で測定された変形係数 E_{50} とせん断強度 (最大軸差応力) q_{max} の実験式に基づく E_{50} と q_{max} 等高線である。剛性指標である E_{50} のコンターは、同一含水比における密度上昇過程に着目すると、図-3.16 に示すコア材の E_{50} の傾向は、図-3.15 と類似の傾向を示すものの、高飽和度状態における剛性低下の傾向がやや強い。図-3.14 に示した現場での剛性の傾向に

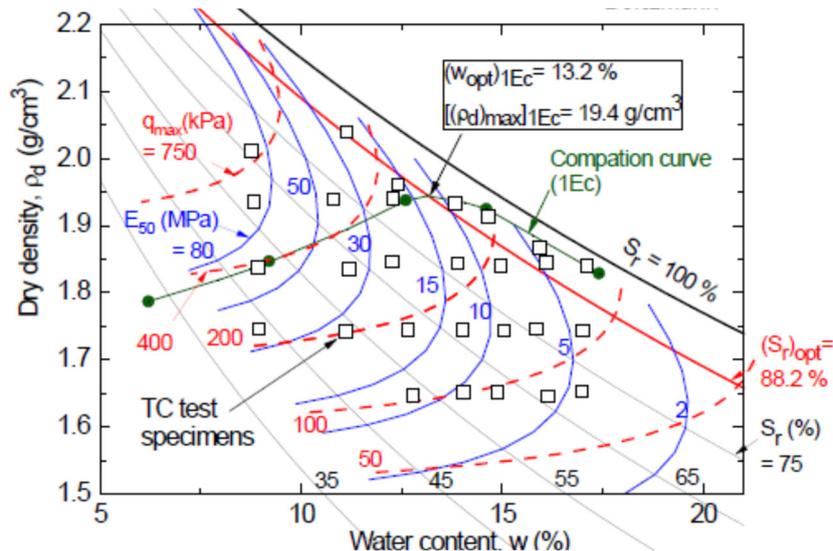
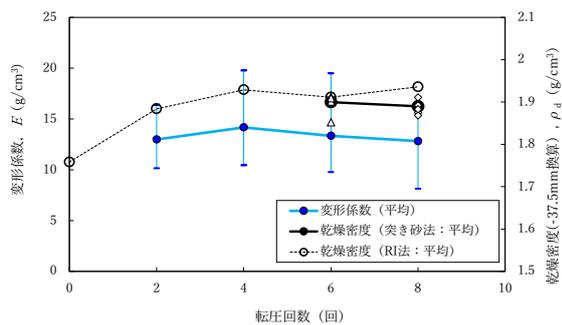


図-3.16 小石原川ダムのコア材の締めめ曲線，UU三軸試験による E_{50} 及び q_{max} のコンターと供試体の締めめ状態（参考文献38）をの図-2転載）

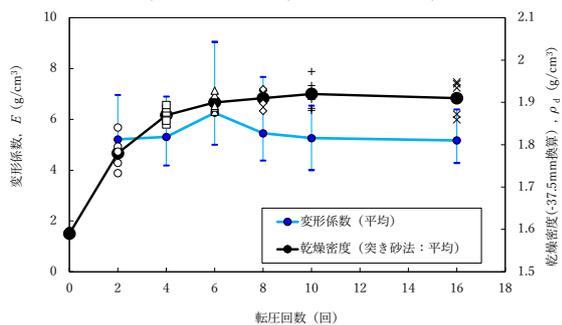
方が、図-3.15の傾向により近い。このように図-3.14に示した現場での剛性の傾向図-3.16に示す E_{50} の傾向とかなり異なることの要因の一つとして、土質の違いの影響が考えられる。すなわち、図-3.16は最大粒径19mmの試料を用いた室内試験結果であり、供試体には19mm以上の粒形の骨格構造が存在しないため、骨格構造が相対的に不安定な構造になることで、同一含水比における密度・飽和度の上昇時には飽和度上昇による剛性低下の影響が強く現れている、ことが考えられる。

また図-3.16に示す最大軸差応力 q_{max} のコンターは変形係数 E_{50} のコンターと傾向が異なり、飽和度コンターが最適飽和度 $((S_r)_{opt} = 88.2\%)$ 付近までは密度の上昇に応じた増加傾向が顕著である。これは最大軸差応力が発生する際の供試体のひずみレベルの影響を受けているものと考えられる。すなわち最大軸差応力発現時のひずみレベルが大きいことで、締めめ時の土粒子配列に飽和度が与える影響が減じられるためと考えられる。このような効果はサクションの影響が大きい低飽和度側で大きく、飽和度上昇の剛性低下、強度低下にはひずみレベルの大きさに関わらず影響を受けると推定される。

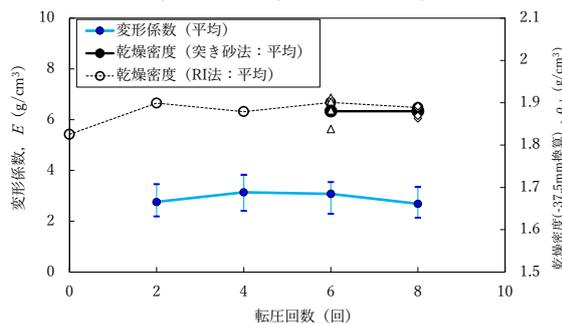
図-3.17、図-3.18にCase1におけるコア材転圧回数に応じた変形係数、乾燥密度、飽和度の変化を示す（図-3.14と整合するデータ）。図-3.17、図-3.18には計測項目ごとに転圧回数ごとの平均値をプロットした。突き砂法と変形係数の計測結果については個別値の計測幅も併せて記載している。図-3.14の考察でも記したとおり、転圧回数の増に伴う変形係数 E の変化はごくわずかであり、変形係数は締めめ時の含水比の影響を強く受けている。また、全てのケースで転圧回数の増にともない、 E は一時的に増加したのち減少に転じていることがわかる。これは、[1]乾燥密度の上昇に伴う剛性の増加、と[2]飽和度の上昇に伴う剛性の減少、のバランスによるもので、転圧が進むほど[1]<[2]となることを意味する。



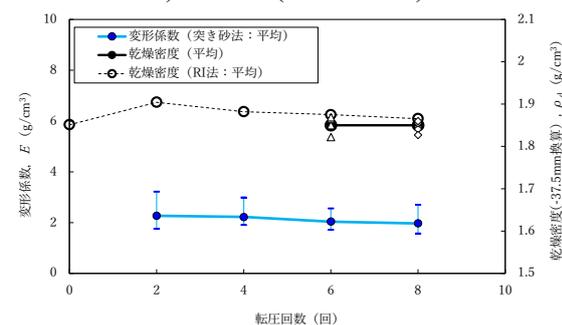
a) Case1-1($w'_{1Ec}=-1.7\%$)



b) Case1-2($w'_{1Ec}=-0.8\%$)

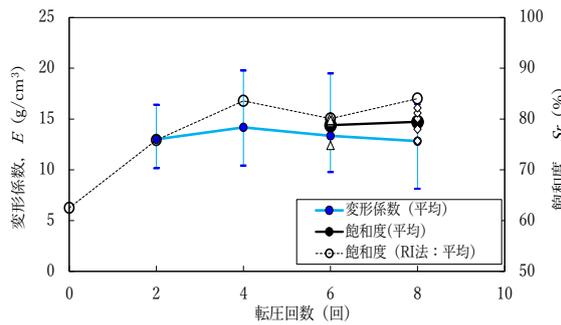


c) Case1-3($w'_{1Ec}=0.5\%$)

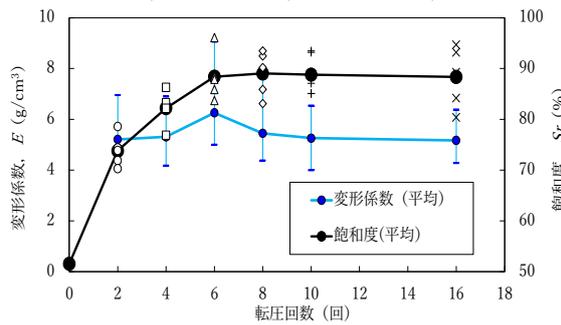


d) Case1-4($w'_{1Ec}=2.2\%$)

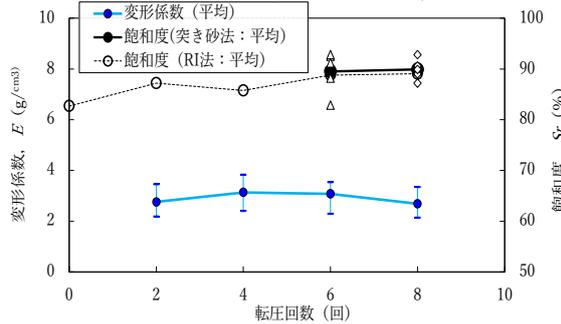
図-3.17 転圧回数 $\sim E, \rho_d$ の関係



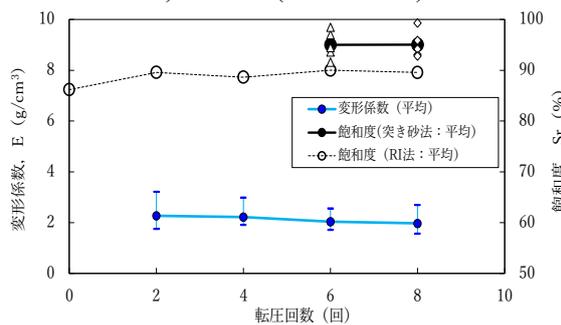
a) Case1-1($w'_{1Ec}=-1.7\%$)



b) Case1-2($w'_{1Ec}=-0.8\%$)



c) Case1-3($w'_{1Ec}=0.5\%$)



d) Case1-4($w'_{1Ec}=2.2\%$)

図-3.18 転圧回数 $\sim E, S_r$ の関係

表-3.5 に、第 2 章で記したコア材 A の試験施工 (Case1-1~1-4) における盛立面の状況観察結果を再掲し、再度考察する。

Case1-2 では 1Ec の最適含水比よりも低い条件であるものの、透水係数が規格値を満足しており、締固め後の盛立面の表面は軽く湿潤している状態で、触診時に指先を盛立面に押さえつけると僅かに凹む。その他に目視確認できる特徴として、Case1-2 では「長靴の足跡が残る」、「転圧時にローラの沈み込みが確認できる」「ローラの轍が確認できる」といった特徴がある。一方、透水係数が規格値を満足しない Case1-1 では、写真から盛立面の乾燥が著しいことが分かる。触診においても盛立面は乾燥しており、転圧面に指を押し付けても跡がつかない。その他に目視確認できる特徴として、「施工中に強風で粉塵が舞う」「長靴の足跡がつかない」「振動ローラの沈み込みが確認できない (むしろ跳ねる)」「ローラの轍がほとんど残らない」などが挙げられる。

このように、所要の透水係数を満足する状況では土中の含水量が一定程度あり、飽和度も高くなっているため、目視で確認される転圧面の状態も湿潤しており、転圧後の地盤剛性が極端に高くなることはない、という現場で目視確認された特性が、図-3.11, 図-3.14, 図-3.17, 図-3.18 に示した盛立試験における地盤剛性指標のデータからも確認できる。

表-3.5 試験施工時の盛立面の状況の比較※

(a) 撒き出し後

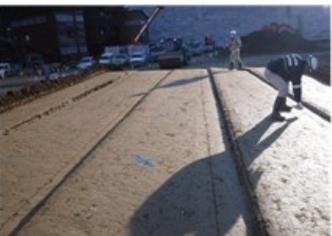
Case	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4
含水比	w=13.4% (w' _{IEc} =-1.7%)	w=14.3% (w' _{IEc} =-0.8%)	w=15.6% (w' _{IEc} =0.6%)	w=17.3% (w' _{IEc} =2.2%)
盛立面状況 (全景)				
盛立面状況 (近景)				
所見	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥気味で、手で握り団子を作ることが可能であるが、容易に崩れる。 ・握った手に細粒分は殆ど残らない。 ・指先で細粒分を紐状にすることが出来ない場合がある。 ・BDの踏み跡に湿潤状態は殆ど見られない。(晴天で風も吹いていたので、表面が乾燥し易い条件だったことも起因する。ただし、転圧面を掘り起こすと2cm程度下部では湿った状態であった。) 	<ul style="list-style-type: none"> ・若干乾燥気味であるが、手で握り団子を作ることが可能で、団子は崩れない。 ・握った手に薄く細粒分が残る。 ・指先で細粒分を紐状にすることが出来る。 ・BDの踏み跡を観察すると、細粒分がやや湿潤した状況が確認できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・手で握り団子を作ることが可能で、団子は崩れない。 ・握った手に細粒分が残る。 ・触感で湿潤している感覚が残る。 ・指先で細粒分を紐状にすることが出来る。 ・BDの踏み跡を観察すると、細粒分がやや湿潤した状況が確認できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・手で握り団子を作ることが可能で、団子は崩れない。 ・握った手に薄く細粒分が残る。 ・触感で湿潤している感覚が残る。 ・指先で細粒分を紐状にすることが出来る。 ・BDの踏み跡を観察すると、細粒分が湿潤した状況が確認できる。

$w'_{IEc} = w - (w_{opt})_{IEc} \cdot (w_{opt})_{IEc} = 15.1\%$

BD…ブタ-サ

※表-2.3 を元に Case 名を表-3.3 に合わせてリネーム

(b) 転圧後

Case	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4
含水比	w=13.4% (w _{1Ee} =-1.7%)	w=14.3% (w _{1Ee} =-0.8%)	w=15.6% (w _{1Ee} =0.6%)	w=17.3% (w _{1Ee} =2.2%)
盛立面状況 (N=4)				
盛立面状況 (N=6)				
盛立面状況 (N=8)				
所見	<ul style="list-style-type: none"> ・N=2→4→6→8→…と転圧回数の増加しても転圧面の湿潤化はほとんど進まない。(晴れで風もあったため、表面はすぐに乾燥する) ・転圧面がローラの荷重で沈み込む挙動は殆どみられない。 ・転圧面では乾燥した砂が振動する様子が観察される ・轍はほとんど生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・N=2→4→6→8→…と転圧回数の増加とともに、転圧面が湿潤していく。 ・N=6程度で概ね飽和度は最適状態になり、ローラが転圧面にめり込む音が聞こえる ・転圧面がローラの荷重で沈み込んだ後、元に戻る挙動が目視で確認できる。 ・轍が若干生じる ・ウェービング状態は確認できない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・N=4～6程度で概ね飽和度は最適状態になり、ローラが転圧面にめり込む音が聞こえる ・転圧面がローラの荷重で沈み込んだ後、元に戻る挙動が目視で確認できる。 ・轍がCase1-1より大きい。 ・ウェービング状態は確認できない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・N=2→4→6→8→…と転圧回数の増加とともに、転圧面が湿潤していく。 ・N=4～6程度でローラが転圧面にめり込む音が聞こえる ・転圧面がローラの荷重で沈み込んだ後、元に戻る挙動が目視で確認できる。 ・轍がCase1-1,2-2より大きい。 ・軽度のウェービングが確認されるが、施工性に問題が生じるほどではない。

$w_{1Ee} = w - (w_{opt})_{1Ee}$, $(w_{opt})_{1Ee} = 15.1\%$

3.4. 地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法

本節では、「地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法」（以後、「SSIの上下限值管理法」）の考え方を示し、具体の事例として小石原川ダムにおけるSSIとして採用した変形係数 E の管理上限値 E_{UB} の設定手順を示す。そのうえで提案する管理法の適用条件等を示す。

なお、面的な品質管理を実現するために、SSIとしてローラ加速度応答法による指標を採用した場合の、「SSIの上下限值管理法」については、第4章にて記す。

3.4.1. 管理法の考え方

(1) 基本思想

3.2および3.3.に示した室内試験および盛立試験の結果より、地盤剛性～透水係数の関係（SSI-k関係）の大きな特徴は次のとおりである。遮水性盛土のSSI-k関係は締固めにおけるCELと材料の粒度等の土質（以後、「土質」）によって変化し、一義的に定まるものではないが、基本的な分布傾向は図-3.7や図-3.13のとおり、V字型の分布となる。このV字型分布の形状は、透水係数が極小値となる点よりも右側の剛性上昇局面において透水係数の上昇が大きい。

このため剛性の上限値管理を行うことで、透水係数の上限値管理が可能になり、特にSSI-k関係に影響を与えるCELと土質の条件を一定に保てば、SSI-k関係は一義的となり、kの上限値管理をSSIの上限値の特定が可能になる。

図-3.19に盛立試験Case1の結果を用いて、「SSIの上下限值管理法」のイメージを示す。「SSIの上下限值管理法」では、土質を概ね一定で管理することを前提に、締固めエネルギー（転圧回数、施工厚等）についてもICT施工により施工仕様を確実に満足するよう管理した場合には、密度曲線が固定されることで含水比～密度、透水、剛性の関係が一つに定まる。

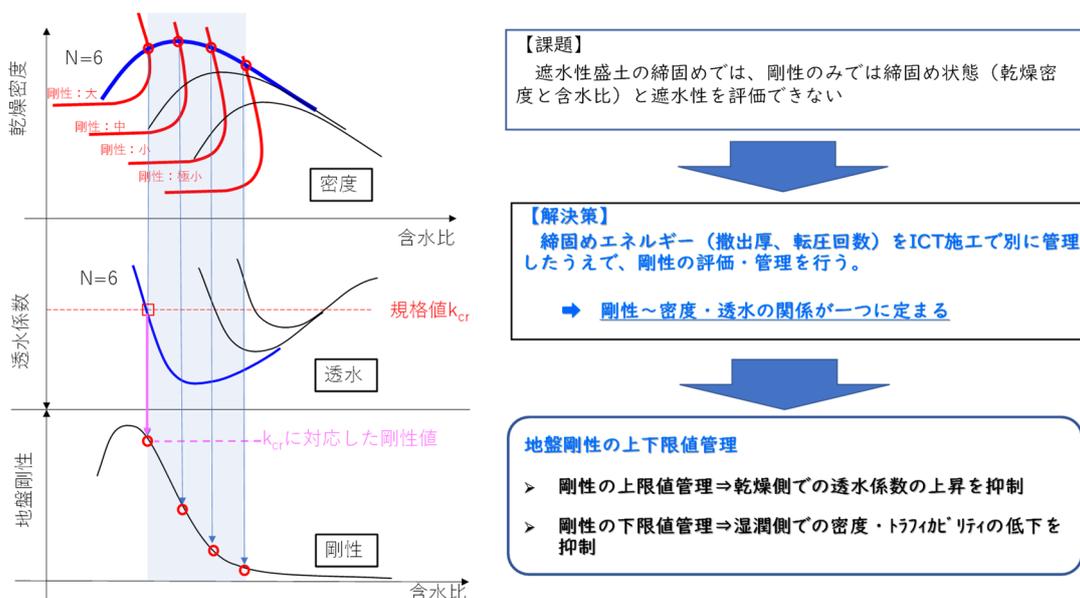


図-3.19 「SSIの上下限值管理法」の基本思想（イメージ）

この時、①SSI の上限値を管理することで乾燥側における透水係数の上昇を抑制するとともに、②SSI の下限値を管理することで湿潤側における密度とトラフィカビリティの低下を抑制することが可能になる。

(2) 既往の SSI を用いた管理法との違い

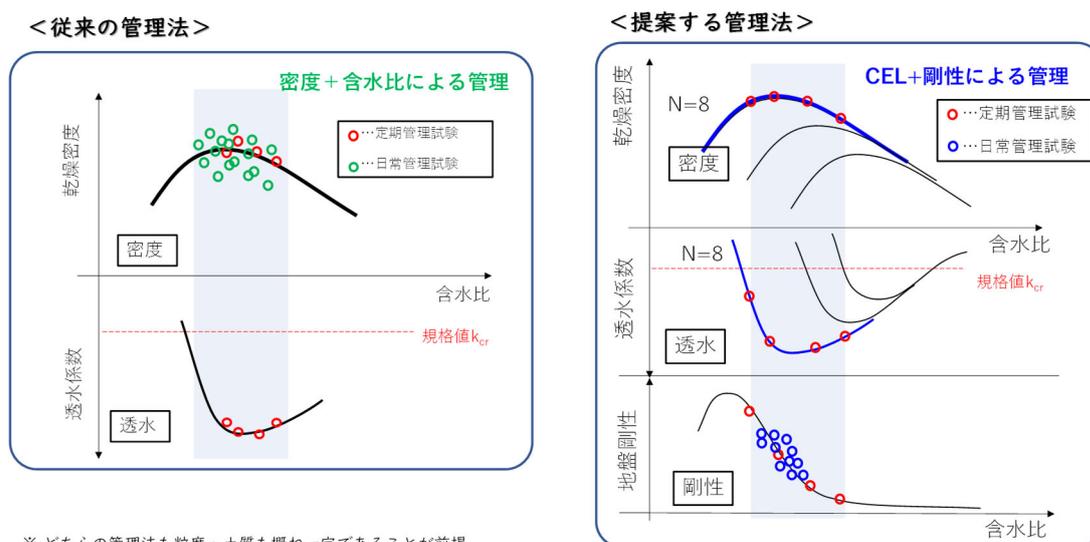
既往の SSI を用いた締固め管理法（以後「既往の管理法」は、乾燥密度と SSI の間に正の相関があることを前提に、SSI の下限値を管理することで、所定の乾燥密度或いは間隙比の規格を満足することを目指したものである。

既往の管理法について、龍岡は①極端に乾燥側の締固めでは浸水コラプスの危険性を排除できない、②乾燥密度と飽和度が不十分な締固め状態でも乾燥側では高い剛性が発現する場合があります、不適切な施工を許容する可能性がある、という課題を指摘している^{19),22)}。

本研究で提案する「SSI の上下限值管理法」では、前節までの試験結果より、SSI の上限値の管理を行うことで①②の課題を排除するとともに、盛土の遮水性能の管理も可能としている。また、遮水性盛土等の高含水比材料のように SSI と乾燥密度に正の相関がみられないことから、CEL の管理を別途行い物性曲線を固定することで、SSI による締固め状態の管理を可能にしている。

(3) 密度～含水比を用いた締固め管理法との違い

図-3.20 に従来型の「密度，含水比による管理法」と「SSI の上下限值管理法」の比較をイメージで示す。従来の管理法は w - pd 平面上の分布が規定する範囲内に収まるによって締固め状態を管理する方法で、含水比と乾燥密度の2変数による締固め管理法である。本研究で提案する「SSI の上下限值管理法」は、密度の代わりに CEL を、含水比の代わりに SSI を管理するものである。このように本研究で提案する SSI の上下限值管理法の基本思想は密度，含水比の延長線上にあるが、管理指標を変更することにより ICT 施工管理への切替を目指したものである。



※ どちらの管理法も粒度・土質も概ね一定であることが前提

図-3.20 従来型の品質管理との違い（イメージ）

3.4.2. 管理基準値の設定事例

ここでは小石原川ダムの実務における変形係数 E の管理値の設定手順を示す。

図-3.14 に示す変形係数 E の値は、図-3.11、図-3.13 に示すデータの平均値である。一方、実施工では、 ρ_d 、 k などの他の管理項目と同様に、 E の個別の計測値に基づいて締固め状態を評価する。そこで、管理基準値 E_{UB} は E と k の計測値のばらつきを考慮して以下のように設定した。

ばらつきの原因には、(a)施工ロット間の盛土材の土質のばらつき、(b)施工ロット内の盛土材の土質、CEL、 w のばらつき、(c)計測精度に起因するばらつき、が考えられる。この内(b)、(c)のばらつきは、図-3.13 に示す個別データのばらつきの幅を管理基準に反映することで考慮できる。(a)のばらつきは、室内試験結果を参考に次のように考慮した。

図-3.6 の室内試験結果を見ると、粗粒粒度における k は、 $w'_{1Ec} = (w - (w_{opt})_{1Ec}) = 0\%$ 付近で、標準粒度における k の約 3 倍である。一方、図-3.11 の現場試験結果を見ると、 w が許容下限値である $w'_{1Ec} = -0.8\%$ 付近における k の平均値は、 k が相対的に大きいコア材 A でも管理基準値 $k_{cr} (=1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec})$ よりも概ね 1 オーダー低い。これらから、 k の計測値が上記の粒度のばらつきの影響を受けても E の上限値管理によって $k < k_{cr}$ の条件を満足できると判断した。

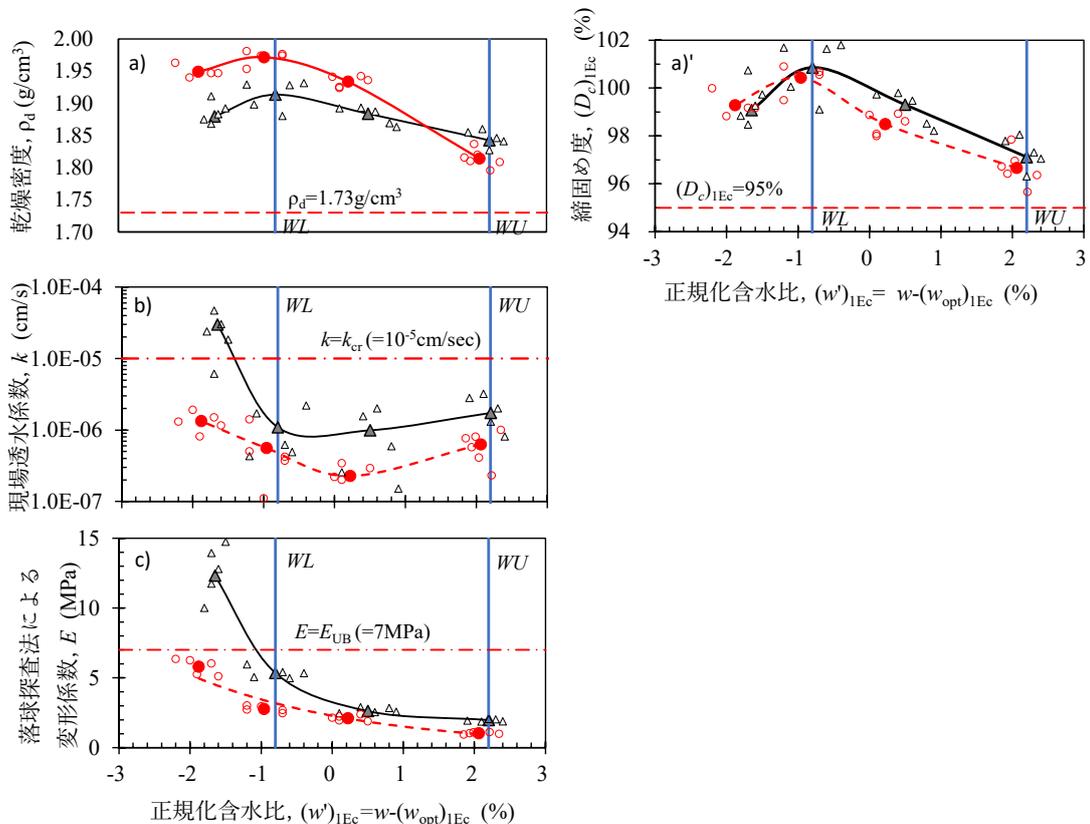


図-3.11 盛立試験の結果 (N=8) ¹⁵⁾ 【再掲】

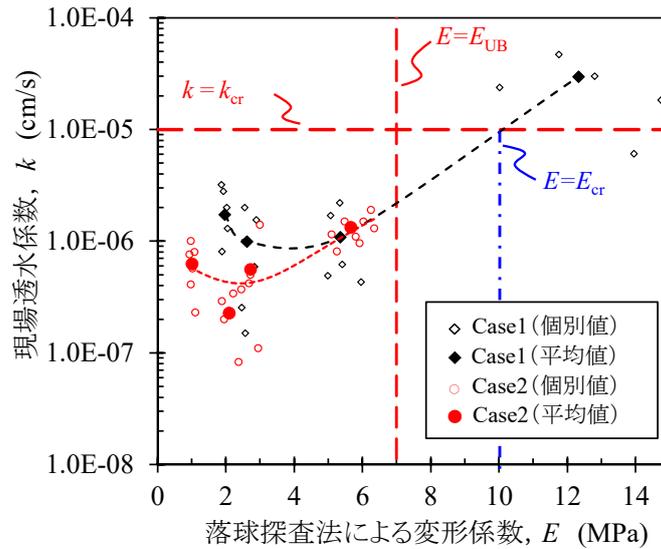


図-3.13 盛立試験における透水係数と変形係数の関係¹⁵⁾【再掲】

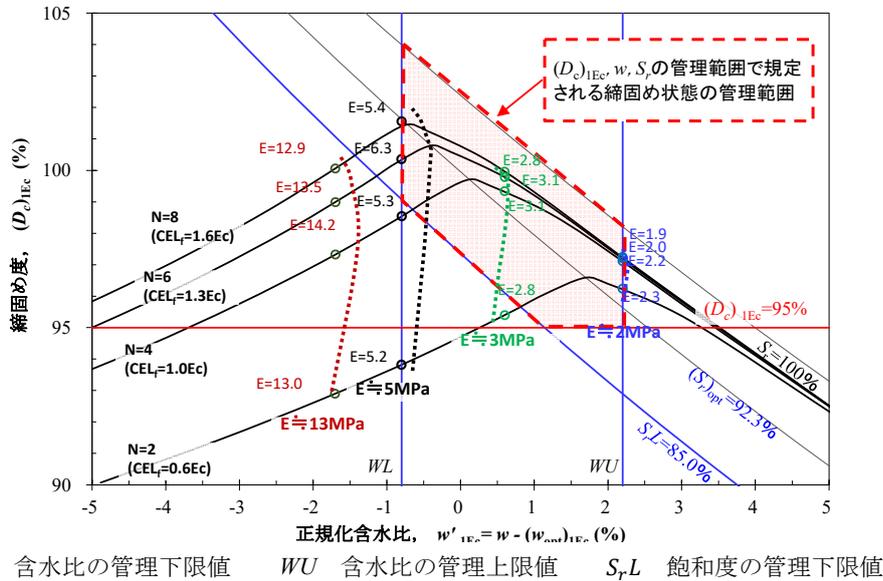


図-3.14 締固め状態の管理範囲と変形係数 E の等高線の比較¹⁵⁾
(コア材 A の $D_{max} = 37.5\text{mm}$ 試料)【再掲】

また、図-3.6 の室内試験結果を見ると、 $w'_{IEc} = 0\%$ 付近では、粗粒粒度試料の剛性は標準粒度試料の値よりも 40%程度高い。そこで、図-3.13 に示す盛立試験結果における $w'_{IEc} = 0.8\%$ でのコア材 A の E の計測値の上限値 6.0MPa に、この粒度のばらつきの影響 40%の 1/2 程度の影響を見込み、管理基準値 E_{UB} を 7.0MPa とした。

図-3.13 に示す盛立試験で得られた平均的な $E \sim k$ 関係に $E = 7.0\text{MPa}$ を代入すると、 k_{cr} の 1/4 程度の k の値が得られる。この差によって、ばらつきの要因(a), (b), (c)の影響に備えつつ無用に安全過ぎる管理とならない、と判断した。また図-3.14 を見ると、締固め状態の許容範囲の左端の境界線 ($w =$ 許容下限値 WL) に沿って 7.0MPa 弱である。したがって、 $E_{UB} = 7.0\text{MPa}$ は妥当な値であると判断した。

3.4.3. 品質管理における位置づけ

遮水性盛土の場合を含め一般の盛土の場合で、締固め状態が図-3.14に示すような許容領域の内部に位置するか否かを確認する方法は、次の(1)~(3)の組み合わせが現実的である。

- (1) 迅速で多点計測や面的計測が可能な間接管理法として、現場の土質と CEL_r を管理した上で、土構造物の要求性能に応じた SSI の上限値管理、あるいは下限値管理、あるいは両者。
- (2) 限定された箇所ではしか実施できないが、より確実な間接管理法として、転圧後の盛立面の代表箇所での ρ_d と w の計測による間接管理法。
- (3) 遮水性盛土では、さらに限定された箇所での原位置透水試験による直接管理法。

小石原川ダムのコアゾーンの遮水性能管理は、表-3.6に示すように、当初は1回/層の頻度の日常管理試験では上記(2)の ρ_d と w の計測によって k を間接的に管理し、1回/月程度の頻度の定期管理試験では、上記(3)の現場透水試験による直接管理を行っていた。

小石原川ダムでは(2)の ρ_d と w による日常管理の大部分を、(1)の「SSIの上下限値管理法」で代替することで、品質管理項目と頻度を一部変更した。また、(1)の「SSIの上下限値管理法」の前提条件である CEL_r 管理として、施工層厚と転圧回数のGNSS管理についても品質管理項目に位置づけた。

表-3.6 小石原川ダムコア盛立に関する品質管理項目および頻度（抜粋）

	試験項目	試験方法	試験数量	試験頻度	
				当初	変更
定期管理	現場透水係数	JGS1316	3点/回	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³
	乾燥密度	JGS1611	3点/回	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³
	粒度	JIS A 1204	3点/回	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³
日常管理	乾燥密度 (締固め状態)	RI法	15点/回	1回/1層	1回/4層
		GNSS	—	—	1回/1層
	含水比	簡便法	3点/回	1回/1層	1回/1層
	変形係数	落球探査法	15点/回	—	1回/1層

3.4.4. 適用条件

a) 適用可能な材料

本論文で提案する「SSIの上下限值管理法」が適用可能な土質材料は、**図-3.1~3.3**（或いは**図-3.19**）に示すような工学的性質の傾向を有する遮水材料である。このような傾向の工学的性質を有する遮水材料は、かなり一般性があると考えられる。

しかし、個々のプロジェクトへの適用にあたっては、使用材料が**図-3.1~3.3**に示すような工学的性質の傾向を有することを確認する必要がある。同時に、低含水比側における地盤剛性指標の管理上限値は、粒度等の土質と現場の CEL_f によって変化することを留意して、室内試験と現場盛立試験の結果に基づいて設定する必要がある。

b) 適用条件（ CEL_f と土質の管理）

乾燥密度 ρ_d と含水比 w の現場測定に基づく従来型の遮水性能の間接管理では、 (ρ_d, w) 状態を確認することで CEL_f を確認していると思なせる。しかし、粒度等の土質（以後、「土質」）の変化に伴う透水性の変化は締固め状態 (ρ_d, w) の変化よりもかなり鋭敏であるため、従来型の管理においても土質が適切に管理されていることが前提となっている。

一方、**図-3.14**を見ると、 w 一定で CEL_f を増加させて行く現場での締固めの過程では、 ρ_d が増加し飽和度 S_r が増加する。これに伴って k は低下して行くが、変形係数 E の変化（すなわち地盤剛性指標 SSI の変化）は非常に小さい。したがって、仮に CEL_f を管理しないで E の値（すなわち SSI の値）だけで締固め状態と遮水性能管理をしようとする、 CEL_f が不足して締固めが悪く k が高い状態を感知できないこととなる。同様に、粗粒化した場合、許容含水状態でも k が上昇して許容上限値 k_{cr} 以上になっても、 E が管理基準値 E_{UB} 以下となっても許容されてしまう可能性がある。

図-3.21に、**図-3.7**、**図-3.11**に示した実験結果を参考にして、 $E \sim k$ 曲線に対する CEL_f と粒度の変化の影響を模式的に描いた。**図-3.21**に示すとおり、 $k = k_{cr}$ となる E の値 E_{cr} とそれに対応した管理基準値 E_{UB} の値は、 CEL_f の減少と粗粒化によって低下する。このため、 E の管理基準値 E_{UB} はそれぞれの現場毎に設定する必要がある、また実施工では従来と同様に CEL_f と使用材料の土質の適切な管理が不可欠となる。

以上より、「SSIの上下限值管理法」では、「土質」、「 CEL_f 」を、 SSI の管理基準値を定めたとときの試験条件と比して現場条件を同等もしくは好条件に保つ必要がある、「土質」、「 CEL_f 」の確認頻度と精度が高いほど、 SSI に基づく評価結果の信頼性が向上する。

「土質」と「 CEL_f 」の重要性は従来の「密度試験による締固め管理」でも同様であるが、同一含水比において CEL と乾燥密度には対数近似に近い相関があるため、密度の下限値管理をしていれば「 CEL が不十分な施工」についてはある程度排除できる。一方、同一含水比において CEL の変化に対して SSI はほとんど変化しない。このため、「 SSI による締固め管理」では CEL の管理がこれまで以上に重要になる。

以上のように、締固め土の地盤剛性指標 SSI は締固め時の「土質」、「含水比」、「 CEL 」に

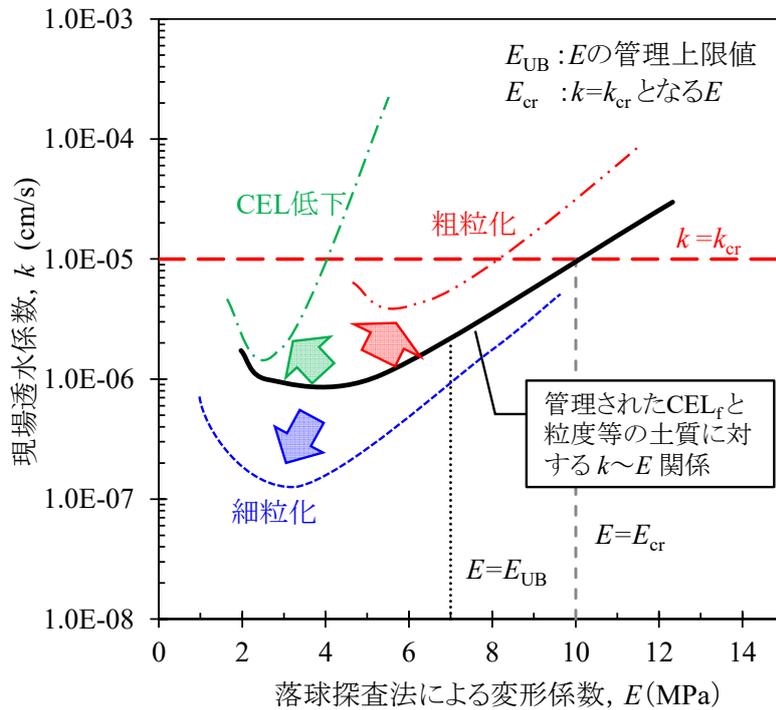


図-3.21 盛立試験における現場透水係数と変形係数の関係（模式図）

応じて変動する。提案する「SSIの上下限值管理法」は SSIの3つ変動要因のうち2つを固定し、残る1つの変動要因によるSSIへの影響と締固め状態の関連性を明らかにして管理するものといえる。

小石原川ダムのコア盛立では、より高いCELを活用した効果的な締固めを目指すため、 $(w_{opt})_{1Ec}$ より乾燥側の含水比を許容しており、 $(w_{opt})_{1Ec}$ より乾燥側では含水比の変化によるSSIの変化が大きい。一方、「土質」、「CEL」については厳格な管理をおこなう。小石原川ダムのコア盛立では「土質」、「CEL」を一定の幅で管理することでSSIを「含水比」の間接的な指標とし、さらに、密度・透水係数といった締固め状態との関連性を把握して管理値を設定することで「透水係数」の間接的な指標とすることを可能とした。

3.5. 実施工への適用結果

3.5.1. 品質管理試験結果

小石原川ダムのコアゾーンにおける全盛立期間の品質管理記録を整理し実施工における w , ρ_d , k_f , E の関係を得て、「SSI の上下限值管理法」の妥当性を確認した。図-3.22 に、盛立試験から得られた変形係数 E と w の関係（図-3.11 c）に本ダムでの品質管理試験で得られた値を重ねて示す。

図中の二つの破線は、盛立試験で得られた Case 1（コア材 A）と Case 2（コア材 B）での平均関係である。実施工でのコア材 A, B のデータは、盛立試験でのコア材 A, B の平均曲線の周囲にプロットされていて、また全ての計測値は $w' = (w - (w_{opt})_{1Ec})$ の管理範囲内に分布している。小石原川ダムでの $1Ec$ 基準の正規化含水比 w'_{1Ec} の平均値は、コア材 A で $w'_{1Ec} = 0.62\%$ 、コア材 B で $w'_{1Ec} = 0.14\%$ 、全期間で $w'_{1Ec} = 0.26\%$ である。 w' の個別値の分布状況に注目すると、従来の管理では許容範囲を外れる $w' < 0$ ($\because w < (w_{opt})_{1Ec}$) の状態のデータがかなり多いことが、特徴的である。

なお、小石原川ダムでは、含水比の上限値付近における乾燥密度については管理基準値に対して十分高く、 CEL_f 管理によって締固め度 95% は確保できると考えられた。また、図-3.14、図-3.22 から分かるように、含水比が管理上限値に接近すると E の変化率が非常に小さくなり、 E の値からの締固め状態の推定精度が著しく悪くなる。これらの理由によって、 E の下限値管理は行わなかった。

図-3.23 に、盛立試験から得られた $k \sim E$ 関係（図-3.13）に本ダムでの品質管理で測定された値を重ねた。図中の曲線は盛立試験から得られた Case 1（コア材 A）と Case 2（コア材 B）

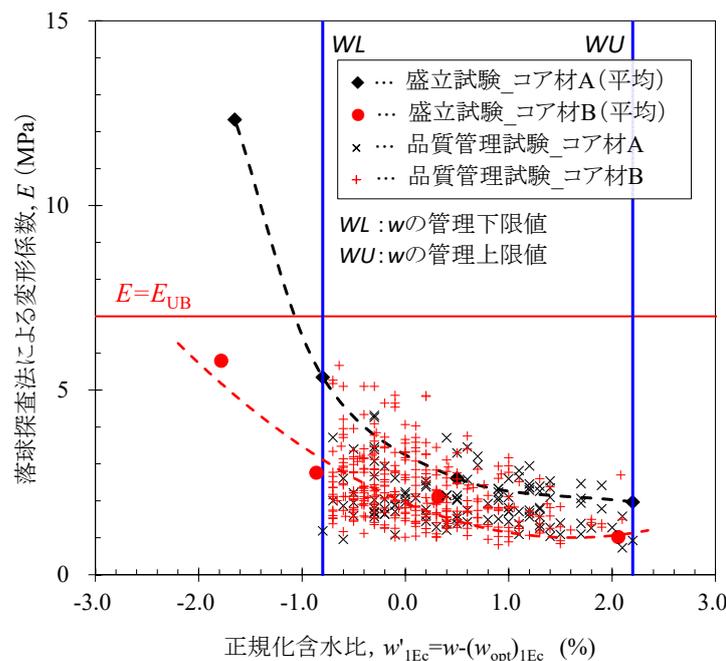


図-3.22 $E \sim w$ 関係のまとめ（盛立試験と実施工）

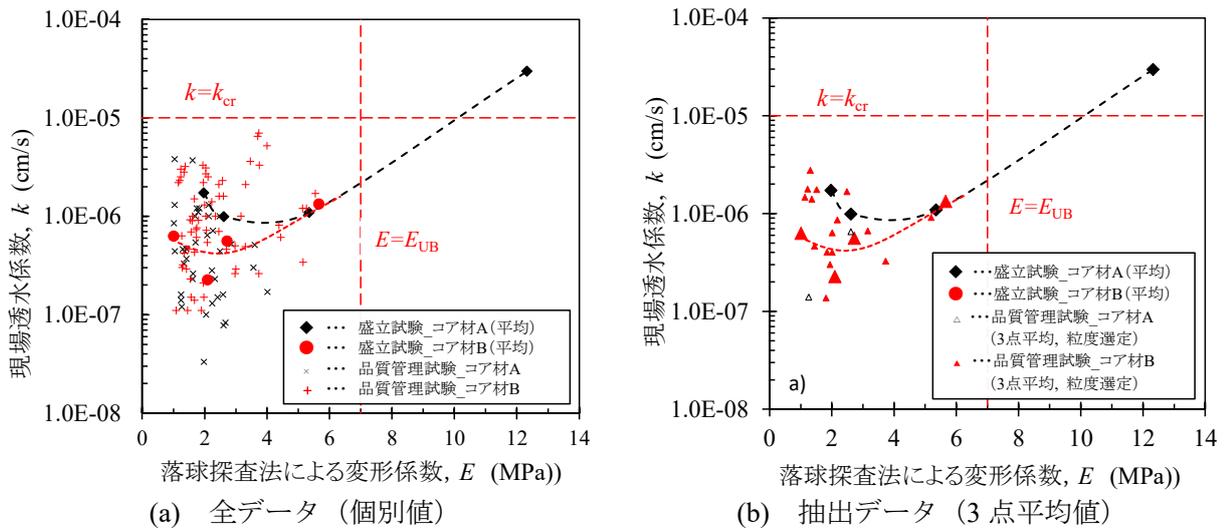


図-3.23 原位置透水係数 k_f ~ 落球探査法による変形係数 E 関係のまとめ (盛立試験と実施工)

表-3.7 盛立試験と実施工の粒度特性値 (平均値)

区分	粒度 ($D_{max} = 150\text{mm}$)		
	<0.075mm 含有率(%)	<4.75mm 含有率(%)	37.5mm 超過率 ^{*1} (%)
コア材A (盛立試験)	22.0	50.3	17.4
コア材B (盛立試験)	23.9	57.5	14.4
コア材A (実施工 ^{*2})	25.6	55.5	11.6
コア材B (実施工 ^{*2})	23.8	52.3	16.3

※1 37.5mm 以上粒径の含有率

※2 砂置換試験孔からの採取試料による粒度試験結果の平均値

での平均関係である。図-3.23 a)より、解析対象とした全てのデータで $E < E_{UB}$ ($= 7\text{MPa}$)、 $k < k_{cr}$ ($= 10^{-5}\text{cm/s}$)であり、管理基準を満足していることがわかる。ただし、コア材 B の数点で、 k が k_{cr} に近い。これらの地点で現場透水試験を行った孔から採取した試料を用いて粒度を確認したところ、管理基準値内ではあるが、粒度分布が粗めであった。この結果で、粒度管理の重要性が再確認された。

図-3.23 a)では、個別孔毎のデータをプロットしており、粒度等の土質が管理範囲の中でばらついているため、データポイントのばらつきが大きい。そこで粒度等の土質のばらつきの影響を排除した場合の傾向を確認するため、試験孔から採取した試料の粒度が盛立試験時の粒度に近い条件のもの (<0.075mm 含有率 22%前後、<4.75mm 含有率 55%前後) を抽出し、1 回の試験で計測する 3 点分のデータの平均値をプロットしたのが図-3.23 b)である。図-3.23 b)から、粒度等の土質が想定値に近い条件ならば、実施工データにおける $E \sim k$ 関係も盛立試験と同様の分布傾向を示すことがわかる。

盛立試験と実施工のコア材 A, B の関係を表-3.7 に示す。表-3.7 より、実施工時の粒度は、コア材 A では盛立試験時よりも細粒側で、コア材 B ではコア材盛立試験時よりやや粗粒側

(コア材 A の盛立試験よりは細粒側) で管理されていたことがわかる。図-3.23 a)に示すように、同一の E における k の値はコア材 A の盛立試験の代表曲線より低目のデータが多い。これは、実施工において一般コアの製造粒度がコア材 A の盛立試験時よりやや細粒側になっていたためと思われ、この結果は図-3.7b の室内試験結果や図-3.21 に示した模式図とも整合する。

以上に示した実施工のデータから、粒度等の土質と現場締固めエネルギーレベル CEL_f が適切に管理された条件の下では、地盤剛性指標の管理による遮水性能の間接管理が可能なが確認できる。

3.5.2. 試験時間の短縮

SSI として採用した落球探査法による変形係数 E の測定では 1 点あたりの試験時間が 30 秒程度であり、RI 計測と比較しても試験時間を大幅に短縮できる。小石原川ダムでは RI 計測を 15 点/層実施していた (これは、既往のダムと比較するとかなり多い。事前試験における RI 試験値のばらつきを考慮して設定された.)。SSI 計測に基づく管理を導入した結果、各層の日常管理に要する試験時間は、75 分~90 分程度から 10 分程度に短縮された。日常管理試験を RI 法から落球探査法に変更した施工ロット数は、全工事期間で約 900 層であるため、概算で約 900 時間の試験時間が縮減された (第 4 章に記載するローラ加速度応答法を用いた管理では更に縮減される)。実施工では、休憩時間中に品質管理試験を行う等により待機時間を縮減する工夫をするため、単純にこの時間数だけ工期が短縮された訳ではないが、工事全期間を通じて一定の施工効率の向上に寄与したと考えている。

3.6. まとめ

遮水性盛土材料を用いた各種の室内試験と現場盛立試験を実施して、含水比の変化に伴う乾燥密度、透水係数、地盤剛性についての基本的な法則性を確認し、「地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法（SSI の上下限值管理法）」を構築した。以下に本章のまとめを示す。

- 1) 既往の研究を参照して締固め土の工学的性質の概念的全体像を把握し、それに基づいて、粒度・粒子特性等の土質（以後、「土質」と締固めエネルギーレベル（Compaction Energy Level, CEL）が既知の場合には、地盤剛性指標（Soil Stiffness Index, SSI）の上限値管理による遮水性材料の透水係数 k の上限値管理が可能になることを推察できた。
- 2) 小石原川ダム的一般コア材について、CEL 粒度を変化させた複数の材料を用いて、室内室内（非水浸 CBR 試験、締固め試験、透水試験）を実施した。さらに2種類の材料で複数の含水比条件での現場盛立試験を実施した。これらの試験結果に基づいて、小石原川ダム的一般コア材でも1)の概念的全体像の傾向を具体的に確認でき、1)の管理手法が適用可能であることを確認した。
- 3) 室内試験の結果に基づいて、1)の管理手法を適用する場合、必要な遮水性能を確保するためには、現場全粒度試料の内部の最大粒径 $D_{\max} = 37.5\text{mm}$ の部分に対して $1E_c$ 以上の現場締固めエネルギーレベル CEL_f を確保することが望ましいことを確認した。
- 4) 室内試験および現場盛立試験の結果に基づいて、SSI の管理上の許容上限値（管理基準値） SSI_{UB} の値は管理粒度の範囲内で最粗粒の材料での値に基づき決定する必要がある。実施工での粒度・粒子特性等の土質と CEL_f は SSI_{UB} の値を決定した盛立試験での値と同等以上の条件を確保する必要がある。なお、土質に関する「同等以上」とは、細粒分含有率が高く遮水性が高い材料であることを指す。
- 5) 締固め土の SSI、ひいては土の締固め状態は、締固め時の「土質」、「含水比」、「CEL」に応じて変動する。このため、SSI の3つ変動要因のうち2つを固定し、残る1つの変動要因による SSI の変化と締固め状態の関連性を明らかにすることで、「SSI による締固め管理」が可能になる。
- 6) 室内試験と盛立試験の結果から、①遮水性盛土のような高含水比材料の場合、「土質」の条件を一定にした状態でも、締固めに伴う SSI の上昇が小さく、特に $(w_{opt})_{1E_c}$ よりも湿潤側の含水比ではこの傾向が顕著となり、 $(w')_{1E_c} \sim (D_c)_{1E_c}$ の縦軸の位置は SSI の計

測結果から推定ができないことを示し、②遮水性盛土に SSI 管理を適用する場合には、「土質」と「CEL」の管理を確実に行う必要があること、を明らかにした。

- 7) 1)~6)の知見に基づき、以下の[1]~[3]による「地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法（SSI の上下限值管理法）」を提案した。
 - [1]盛土材料の土質が概ね一定に管理されている条件で、ICT 施工等により CEL（撒き出し厚、転圧回数、転圧速度等）を一定に管理することで、密度曲線、透水曲線を固定する。この結果、SSI と乾燥密度、透水係数の関係は一義的になる。
 - [2][1]の条件下での SSI の上限値管理により、乾燥側での透水係数の上昇を抑制する。
 - [3][1]の条件下での SSI の下限値管理により、湿潤側での密度とトラフィカビリティの低下を抑制する。
- 8) 提案する「SSI の上下限值管理法」について、室内試験および盛立試験の結果に基づき、SSI として落球探査法による変形係数を用いた場合の管理基準値を定め、実施工の品質管理に適用した。
- 9) 実施工の品質管理記録を解析した結果、「SSI の上下限值管理法」の妥当性を確認できた。

小石原川ダムでは、本章で記した「SSI の上下限值管理法」について、SSI としてローラ加速度応答法による指標を採用することで、遮水性盛土における定量的かつ連続的なデータを用いた締固め管理（Continues Compaction Control）を実現した。これらの実務導入のための検討内容と実務での品質管理記録の分析結果については、第 4 章に記す。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修, 財団法人ダム技術センター編纂: 多目的ダムの建設 昭和 61 年度版 第 5 巻施工編, pp. 333-335, 1986.
- 2) 国土交通省: 令和 2 年度版国土交通白書, pp.24-66,
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/pdfindex.html>, 2020.
- 3) 国土交通省: i-Construction 推進員会報告書 (平成 28 年 4 月 11 日),
<https://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>, 2016.
- 4) 国土交通省: TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領, 2019.3.
- 5) Michael A. Mooney, Robert V. Rinehart, Norman W. Facas, Odon M. Musimbi, David J. White, and Pavana K. R. Vennapusa: Intelligent Soil Compaction Systems, *National Cooperative Highway Research Program*, NCHRP Report 676, 2010.
- 6) Federal Highway Administration: Accelerated Implementation Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials Final Report, 2010
- 7) Federal Highway Administration: Intelligent Compaction Technology for Soils, 2014
- 8) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.115-123, 2000
- 9) 橋本毅: ドイツにおける ICT を利用した締固め管理技術, 建設の施工企画, '10. 3, pp.29-33, 2010
- 10) 古屋弘, 藤山哲雄: 振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 α システム」の開発と実用化, 建設の施工計画, '10. 10, pp.42-46, 2010
- 11) NEXCO: 土工施工管理要領 (平成 29 年 4 月) 参考資料, pp.参 127-165, 2017
- 12) 藤山哲雄, 益村公人, 建山和由, 石黒健, 三嶋信雄: 種々の土質条件に対するローラ加速度応答法の締固め管理への適用性, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 169-179, 2002.
- 13) 小倉公一, 古屋弘, 疋田喜彦, 肥後桂介: 森吉山ダムにおける堤体盛土の情報化施工—リアルタイム施工管理システムの試行—, ダム工学, Vol. 18, No. 3, pp. 156-165, 2008.
- 14) 柴藤勝也, 日下雅史, 伊藤文夫: ICT を用いたダム施工監理のあり方について (殿ダムでの事例), 土木学会第 66 回年次講演会, pp. 643-644, 2011.
- 15) 坂本博紀, 小林弘明, 龍岡文夫, 曾田英揮: 遮水性盛土の地盤剛性指標に基づく締固め管理, 土木工学会論文集 C (地圏工学), 76 巻 3 号, pp.221-234, 2020
- 16) 吉田輝, 北本幸義, 川野健一, 池尻健: 落球探査による地盤の諸物性の評価, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp. 113-114, 2011.
- 17) 公益社団法人地盤工学会: 土の締固め, pp. 10-15, 2012.
- 18) 根本忠, 佐々木隆男: 土の締固め特性, 創立 303 周年論文集, 建設機械化研究所, pp. 45-58, 1994.

- 19) 龍岡文夫：土の締固めにおける飽和度管理の重要性，ダム技術，No. 354, 3月号，pp. 3-16, 2016.
- 20) 龍岡文夫：盛土の締固めにおける飽和度管理の重要性，技術手帳，地盤工学会誌，Vol. 63, No. 7, pp. 39-40, 2016.
- 21) Tatsuoka, F.: Compaction characteristics and physical properties of compacted soil controlled by the degree of saturation, Keynote Lecture, Deformation characteristics of geomaterials, *Proc. of 6th Int. Conf. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Buenos Aires*, pp. 40-78, 2015.
- 22) Tatsuoka, F and Gomes Correia, A.: Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction linked to soil structure design, *Transportation Geotechnics*, Vol. 17, pp. 3-27, 2018.
- 23) 三国英四郎：フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究(その1)，土と基礎，Vol. 10, No. 1, pp. 4-12, 1962.
- 24) 辻良祐，吉田輝，藤崎勝利，小林弘明，小原隆志，曾田英揮，坂本博紀，龍岡文夫：締固め土の乾燥密度，飽和度と変形係数（剛性）の関係，第53回地盤工学研究発表会，p. 1039-1040, 2018.
- 25) 坂本博紀，福島雅人，日野浩二：小石原川ダムにおけるコア盛立の高度化・合理化の検討，ダム技術，No. 390, pp. 52-65, 2019.
- 26) 龍岡文夫，平川大貴：盛土締固めの新たな展開と展望，基礎工，48(11)，pp.2-9, 2020.
- 27) 財団法人ダム技術センター編集・発行：多目的ダムの建設 平成17年度版 第5巻 設計II編，pp. 88-101, 2005.
- 28) 建設省土木研究所フィルダム研究室：Q&A フィルダム遮水材料の透水係数の規格値，ダム技術，No. 101, pp. 59-61, 1995.
- 29) 北村佳則，西尾貴至，内山恵一：ローラ加速度応答を用いた盛土品質評価，第25回日本道路会議論文，CD-ROM, 07P04, 2003.
- 30) 北本幸義，吉田輝，川野健一，池尻健，鈴木明夫，Jiaye WU：球体衝突理論に基づく岩質及び土質物性の迅速評価手法，土木学会論文集F3（土木情報学），Vol.75, No.1, pp.21-35, 2019.
- 31) Walker, F. C. and Holtz, W. C.: Control of embankment material by laboratory testing, *Proc. ASCE*, Vol. 77, No. 108, pp. 1-25, 1951.
- 32) 緑川猛彦，丸山久一：保水能力に関する各種粉体の粒子形状や粒度分布の評価，土木学会論文集 No.463/III-22，pp.95-103, 1996.
- 33) 坂本博紀，曾田英揮，小林弘明，龍岡文夫：フィルダムのコアゾーンにおける締固め状態の評価事例，土木学会第72回年次講演会，2017.
- 34) 土木研究所：盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する共同研究報告書，第461号，2014.
- 35) 橋本毅：各種の締固め機械による締固め能力に関する室内実験，基礎工，48(11)，pp.72-75, 2020.

- 36) 龍岡文夫, 橋本毅: 実大締固め実験による地盤剛性の法則性と土の締固め管理での活用, 特集「盛土の締固めの新たな展開と展望」, 基礎工, Vol.48, No.11, pp.76-79, 2020.
- 37) 龍岡文夫, 橋本毅, 坂本博紀: 地盤剛性の迅速測定による土の締固め管理の効率化, 第56回地盤工学研究発表会, 2021.
- 38) 吉田 輝, 辻 良祐, 藤崎勝利, 小林弘明, 小原隆志, 龍岡文夫, 坂本博紀, 曾田英揮: 土の締固め過程における変形・強度特性の変化の定式化, 第55回地盤工学研究発表会, p.1039-1040, 2020

第 4 章

第4章	遮水性盛土の定量的かつ連続的な締固め管理法	4-1
4.1.	はじめに	4-1
4.2.	主要なRMV	4-3
4.3.	CCCを適用した管理事例	4-5
4.4.	本研究で採用したRMV	4-11
4.4.1.	採用した指標	4-11
4.4.2.	異常値の取扱い	4-11
4.5.	現場盛立試験による検討	4-15
4.5.1.	試験条件	4-15
4.5.2.	試験結果	4-16
4.6.	実施工での運用方法の検討	4-21
4.6.2.	CCVマップを用いた管理	4-22
4.6.3.	品質管理における位置づけ	4-27
4.7.	実施工への適用結果	4-29
4.7.1.	整理対象外としたロット	4-29
4.7.2.	品質管理記録の解析	4-30
4.8.	現状の課題に関する考察	4-38
4.9.	まとめ	4-42
	参考文献	4-44

第4章 遮水性盛土の定量的かつ連続的な締固め管理法

4.1. はじめに

3章で記した地盤剛性指標 (Soil Stiffness Index ; SSI) の上下限值管理に基づく遮水性盛土の締固め管理法¹⁾における管理指標に, Roller Measurement Value (RMV)²⁾, 或いは Intelligent Compaction Measurement Value (ICMV)^{3),4),5)}と呼ばれる, 転圧機に設置された加速度計の計測記録等を解析して得られる種々の指標を適用し, GNSS (Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム) による位置情報と関連づけることで, 遮水性盛土における定量的かつ連続的な締固め管理 (Continues Compaction Control, CCC²⁾) が可能となると考えられた.

近年の建設業界では, 我が国の人口減少等による技術者の減少傾向への対策として Construction の推進による生産性の向上が図られている. 本研究では, 従来は困難とされてきた遮水性盛土における CCC を実現することで品質管理と施工管理に掛かる労務を軽減し, 生産性の向上に寄与するとともに, 抜取検査では得られない膨大なデータを用いた品質管理そのものの高度化, それらのデータを CIM/BIM と連携して管理へ引き継ぐことで将来にわたって品質のトレーサビリティ向上, を図ることを目的としている.

本研究では小石原川ダムにて遮水性盛土における CCC を実務導入するための具体的な技術的な検討を行い, 遮水性盛土における CCC を実施工へ導入した⁶⁾.

本章では, 既存の CCC に関する基準等についての課題を整理したうえで, 小石原川ダムのコアゾーン建設において CCC を実務導入するために実施した各種の技術的検討と, 実施工で得られた品質管理記録の解析の結果をとりまとめる. とりまとめにあたっては公表済みの論文⁶⁾では紙幅の都合で割愛した内容も含めて再整理する.

なお、『RMV と GNSS 記録の関連付けによる, 定量的かつ面的な締固め管理』は Intelligent Compaction (IC)^{3),4),5)}, Intelligent Compaction Data Management (ICDM)^{3),4),5)}, Continues Compaction Control (CCC)²⁾, などの名称で呼ばれるが, NCHRP Report 676 -Intelligent Soil Compaction Systems-²⁾において, IC と CCC は次のように定義されている.

The term intelligent soil compaction systems was defined (in the NCHRP Project 21-09 request for proposals) to include (1) continuous assessment of mechanistic soil properties (e.g., stiffness, modulus) through roller vibration monitoring;(2) automatic feedback control of vibration amplitude and frequency; and (3) an integrated global positioning system to provide a complete geographic information system-based record of the earthwork site.

An equally important term is roller-integrated continuous compaction control—defined by IC components (1) and (3).

—参考文献 2)より引用—

この定義によると、IC は上記(2)に記載される振動・振幅の自動制御機能を有する場合の転圧を指しており、(2)の要件を満たさない場合には CCC に該当する。これらを参考に、本研究では『RMV と GNSS 記録の関連付けによる、定量的かつ面的な締固め管理』を Continuous Compaction Control (CCC) と呼称する。

また、参考文献 4), 5) では参考文献 2) で検討対象とされた 6 社のメーカーで使用される 5 種の RMV(k_s , E_{VIB} , MDV, CMV, CCV) を Intelligent Compaction Measurement Value (ICMV) と呼称し、これらの ICDM を用いた品質管理を Intelligent Compaction Data Management (ICDM) と呼称している (表-4.1)。表-4.1 に記載される通り、各指標のうち MDP, CCV, CMV については自動制御機能を有しておらず、参考文献 2) で定義されるところの IC を実現するものではないため、参考文献 3), 4), 5) における ICMV, ICDM という呼称は便宜的な側面がある。よっ

表-4.1 参考文献 4) で検討対象とされている RCV (=ICMV) の主要機能
(参考文献 4) の Table3 に加筆)

Feature	Ammann/ Case	Bomag	Caterpillar	Dynapac	Sakai	Trimble
ICMV Value	k_s (MN/m)	EVIB (MPa)	MDP40 (shown as CCV in the output) and CMV	CMV	CCV	CMV
Single Drum Configuration	Padfoot, Smooth Drum	Smooth Drum	Padfoot and Smooth Drum	Padfoot and Smooth Drum	Smooth Drum	(Retrofit) Smooth Drum
Display Software	ACE-Plus®	BCM05®	AccuGrade®	DCA®	Aithon MT®	AccuGrade®
Output Documentation	Date/Time, Location (Latitude/Longitude/Elevation), Machine length/width, Direction (forward/backward), Vibration (On/Off), Stiffness (k_s), Amplitude (actual), Speed, Frequency	Date/Time, Location (Northing/Easting/Elevation at center of the roller drum), EVIB, Frequency, Amplitude (actual), Speed, Jump	Date/Time, Location (Northing/Easting/Elevation of left and right ends of the roller drum), Speed, CCV, CMV, ICMV, Frequency, Amplitude, Direction (forward/backward), Vibration (On/Off)	Location (Latitude/Longitude/Elevation), Direction (forward/backward), CMV, Bouncing, Frequency, Speed, Amplitude	Date/Time, Location (Northing/Easting/Elevation), CCV, Temperature, Frequency, Direction (forward/backward), Vibration (On/Off), GPS Quality	Date/Time, Location (Northing/Easting/Elevation of left and right ends of the roller drum), Speed, CCV, CMV, ICMV, Frequency, Amplitude, Direction (forward/backward), Vibration (On/Off)
Output Export File	*.txt	*.csv	*.csv	*.txt	*.csv	*.csv
Automatic Feedback Control (AFC)	Yes	Yes	No	Yes	No	No

て、本研究では、転圧機に設置された加速度計の計測記録等を解析して得らえる指標の総称は Roller Measurement Value (RMV) で統一する。

本章の構成を以下に記す。4.2.節では現在使用される主要な RMV について、4.3.節では既往の CCC における品質管理事例とそれらの課題について記す。4.4.節では小石原川ダムの実施工において採用した RMV と、実施工で確認された計測異常値の取扱いについて記す。4.5.節と 4.6.節では現場盛立試験結果の解析に基づく CCC を適用するための検討と具体的な品質管理方法を記す。4.7.節では実施工から得られた品質管理記録とその解析結果を記す。4.8.節では現状の課題に関する考察を記し、最後に 4.9.節に本章のまとめを記す。

4.2. 主要な RMV

本節では 4.1 節で紹介した既往の Continues Compaction Control (CCC) の研究等に使用されている主要な Roller Measurement Value (RMV) についての紹介する。表-4.2 に本節で紹介する RMV の一覧を示す。各指標の算定方法の詳細については各メーカーの公表資料や個別の参考文献の他、参考文献^{2),3),7)}にも表-4.2 に示された指標の概要がまとめられている。特に土木学会建設用ロボット委員会 振動締固めに関する研究 WG の活動報告書⁷⁾では和文で詳細な説明がなされている。各指標の詳細についてはこれらを参照すると良い。

CCC に関する研究は 1970 年代のスウェーデン高速道路局のハインツ・サーナー博士の現地試験に遡る。この調査により、転圧機の基本周波数の振幅と基本周波数の整数倍の周波数における振幅の比率が、転圧によって土の締固め状態に応じた剛性と層間を持つ可能性が示された。サーナー博士は Geodynamik を設立し、Dyapac との共同開発により Compaction Meter Value (CMV) を開発された^{8),9)} (Thurner&Sandström1980, Forssblad 1980)。この新たな測定技術とその応用に関する技術記事は 1980 年に開催された the First International Conference on Compaction にて公表された^{8),9),10)} (ThurnerandSandström1980, Forssblad 1980, および Machet 1980)。

2004 年に酒井重工業は CMV と同じく転圧機に設置した加速度計から得られる地盤の応答加速度記録の周波数解析に基づく CCV を開発・導入した¹¹⁾ (Scheroocman et al.2007)。これらの転圧機械に設置した加速度計から得られる、地盤の応答加速度記録をスペクトル解析から得られる指標のことを、本研究では、「加速度スペクトル指標」と呼称する。

2003 年にアイオワ運輸局、連邦高速道路局 (FHWA)、Caterpillar 社によって、粒状で粘着性のある土質材料の締固めに適用するための RMV として、Machine Drive Power (MDP) システムの共同研究プロジェクトが開始された。MDP システムは、ドラムの沈下による転がり抵抗の原理に基づいており、このアプローチは振動モードと静的モードの両方で機能するという特徴がある。この測定システムは、2003 年から現場試験に基づく調査が行われ^{12),13),14)} (White et al., 2004, White and Thompson, 2008, Thompson and White, 2008)、その後、ミネソタ州の本格的な盛土プロジェクトで使用された。^{15),16)} (White et al., 2008a, b)

1982 年に Bomag 社は Ω 値を開発・導入した。 Ω 値は加速度計データを使用して土壤に伝達さ

れる転圧エネルギーの継続的な計測を可能にしたもので、当時はCMVの唯一の代替指標であった。さらに1990年代後半、Bomag社は加速度データを使用してドラム変位、推定適用力、および動的ローラ地盤モデルを決定する振動係数 E_{VIB} を開発・導入し¹⁷⁾(例：Kröber et al, 2001)、それ以降は Ω 値の採用機種は製造されていない。

1999年にAmmann社は地盤剛性指標 k_s (k_B とも呼ばれる)を開発・導入した¹⁸⁾(Andregg & Kaufmann, 2004)。これは、測定されたドラム変位、推定圧縮力、ローラと地盤の相互作用を表すバネ-ダッシュポットモデルを使用して準静的剛性の測定値を提供するものである。

E_{VIB} と k_s はCMV,CCV,MDVのような地盤剛性との相関性を確認することによる疑似的な地盤剛性指標とは異なり、締固め土のひずみ量と剛性値を直接計算するもので、この点で加速度スペクトル指標に対する優位点がある。

表-4.2 既存の加速度応答スペクトル指標 (参考文献^{3),4)}を参考に作表)

指標名	定義式*	メーカー等	備考
k_b Roller-Integrated Stiffness	$k_b = 4\pi^2 f^2 \left(+ \frac{m_r \gamma_t \cos(\varphi)}{A} \right)$	Ammann	f:励起振動数 m _r :ドラム質量 m _r γ _t :偏心モーメント φ:移送角 A:振動振幅
E_{VIB} Vibration modulus	$Z_a = \frac{(1 - \nu^2)}{E_{VIB}} \cdot \frac{f}{L} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(1.8864 + \ln \frac{L}{B} \right)$ where, $B = \sqrt{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{R(1-\nu^2)}{E_{VIB}} \cdot \frac{f}{L}}$	Bomag,	Z _a :変位 f:ドラムの力 ν:材料のポアソン比 L:ドラムの長さ B:ドラムの接触幅 R:ドラムの半径
MDP Machine Drive Power	$MDP = P_g - WV \left(\sin \alpha + \frac{a}{g} \right) - (mV + b)$	Caterpillar	P _g :必要電力 W:ローラ重量 V:ローラ速度 a:機械加速度 g:重力加速度 α:傾斜角 m,b:機械固有の内部損失係数
Bouncing Value	$C \frac{S_{1/2}}{S_1}$	Dynapac,	C:定数
CMV (Compaction Meter Value)	$C \frac{S_2}{S_1}$	Dynapac Caterpillar	C:定数
CCV (Compaction Control Value)	$\frac{S_{1/2} + S_{3/2} + S_2 + S_{5/2} + S_3}{S_{1/2} + S_1} \times 100$	SAKAI	
乱れ率	$\frac{\sum_{n=2}^{\infty} S_n + \sum_{n=2}^{\infty} S_{(2n-1)/2}}{\frac{S_1 + S_{1/2}}{F_0 / (m_1 + m_2) g}}$	αシステム ⁸⁾	m ₁ :フレームの質量 m ₂ :振動輪の質量 F ₀ :起振力

* S_n:基本振動数をf₀としたときの、1/2・f₀の整数倍の振動数に対応するスペクトル値

4.3. CCC を適用した管理事例

本節では、国内外で適用された CCC の管理事例を紹介し、その特徴と課題を論じる。

CCC を実施工への適用は、欧州が先行しており、オーストリア（1990 年, 1993 年と 1999 年に改訂）、ドイツ（1994 年, 1997 年に改訂）、スウェーデン（1994 年, 2004 年に改訂）で導入されている。International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering（ISSMGE）では、オーストリアの仕様に基づいて推奨仕様を規定している（Adam2007）。米国では、ミネソタ州が 2007 年から 2008 年に CCC のパイロット仕様を実装し、2009 年の改訂仕様を作成している。これらの既往の管理事例については NCHRP Report 676 -Intelligent Soil Compaction Systems-²⁾において、とりまとめがなされている。また、国内では平成 29 年に NEXCO の土工施工管理要領（平成 29 年 7 月）の中に参考資料として、「ローラ加速度応答法を用いた盛土の品質管理(案)」として整理がされている¹⁹⁾。これらの参考文献を参考に、既往の CCC による管理事例の概要を表-4.3, 表-4.4 に整理した。

表-4.3 既往の CCC による管理事例 (その1)

国家等	ドイツ		ISSMGE		スウェーデン	米国 (ミネソタ州運輸省)	
基準・規格	ZTVE-StB		Adam2007		ATB Vag 2005	暫定仕様 (2007-2008)	
基準・規格	Method2	Method3	管理法1	管理法2	ATB Vag 2005	暫定仕様1	暫定仕様2
含水比に関する規定	特になし	特になし	特になし	特になし	特になし	最適含水比の65%~95%	最適含水比の65%~95%
高含水比材料の取扱い	一部適用不可 (シルト、粘土)	一部適用不可 (シルト、粘土)	細粒分 (<0.06mm) が15%を超える場合は含水比に特別な注意を払う必要がある	細粒分 (<0.06mm) が15%を超える場合は含水比に特別な注意を払う必要がある	対象外 (Fc≦7%の材料のみ使用可能)	規定はない	規定はない
RMVの校正作業	RMVと抜取検査のSSI (平板載荷試験、LWD試験)、乾燥密度との相関を確認	不要	RMVと抜取検査型のSSI (平板載荷試験、LWD試験) との相関確認を実施	不要	不要	含水比補正を行う	含水比補正を行う
適用条件	・ 基盤条件と材料の土質は一定 ・ 校正時の相関係数が $r \geq 0.7$ or $R^2 \geq 0.5$	・ 小規模土工でRMVの校正が困難な場合 ・ Method2の適用条件を満足しない場合	校正時の相関係数が $r \geq 0.7$ or $R^2 \geq 0.5$	特になし	-	・ 基盤の剛性が均一 ・ 施工リフト厚は事業計画と同一	-
評価方法	<p>・ 変形係数、乾燥密度の目標値と一致するRMVの目標値 Measurement Value - Target Value (MV-TV) を設定</p> <p>・ RMV-TVを定めるためのEv2、乾燥密度の最小値が定めており、粘土またはシルト質土の場合は45MPa以上、粒状材料 (砂質土・礫質土) の場合は80~100MPa以上、乾燥密度については標準プロクターに対する98%以上</p> <p>・ 品質管理における施工ロットの締め固めに關する合否判定は、同一施工ロットのRMVの90%がMV-TVを超過しているか否かで判定</p>	<p>・ 抜取検査の試験箇所をCCCで決定し、抜取検査結果で評価</p> <p>・ 転圧重機の周波数や振幅を可変制御しない条件でRMVの計測を行い、施工エリア内の弱部を推定して抜取検査をする。</p>	<p>・ キャリブレーションは三段階の締め固め条件に対して実施し、各ケースでPLTの場合は3点以上 (計9点以上)、LWDの場合は4点平均を3地点以上 (計36点以上) の現場試験を実施し回帰分析を行う</p> <p>・ 品質確認は以下の(A)~(F)を満足する場合に合格判定となる。</p> <p>(A) 転圧回数に応じたRMVの平均値の上昇が5%以下</p> <p>(B) (A) を満足したRMVの平均値が基準値以上</p> <p>(C) RMVの最小値RMVminは0.8MIN以上</p> <p>(D) RMVの累計10%値がMIN以上</p> <p>(E) RMVの最小値RMVminがMIN以上の場合、領域全体のRMVの変動係数が20%以下</p> <p>(F) $0.8MIN \leq RMVmin \leq MIN$ の場合、RMVの最大値が$\leq MAX = 1.5MIN$</p>	<p>・ 抜取検査の試験箇所をCCCで決定し、抜取検査結果で評価</p> <p>・ RMVが最も低い領域におけるPLT若しくはLWDが基準値を満足することを確認する。</p>	<p>・ 抜取検査の試験箇所をCCCで決定し、抜取検査結果で評価</p> <p>・ 試験箇所はRMVマップを用いて最もSSIが小さいと推定される箇所を実施する。</p> <p>・ 通常抜取検査の試験数は8点/5000m³であるが、CCCの適用により2点に減ずることが可能。さらに過去にNGとなる値がなく、標準偏差が小さい場合は1点まで減ずることが可能。</p>	<p>・ 試験施工でRMVの平均値が大きく上昇しない場合に最適な転圧回数 (= 規定転圧回数) に達したと判断</p> <p>・ IC-TV (Target Value) を試験施工で定めた規定転圧回数におけるRMVの全計測データに対して、その計測値の90%以上がIC-TVの90%値よりも大きくなるように設定 (= 下限値管理のみ)</p> <p>・ 試験施工から得られたIC-TVと含水比の線形関係を用いて、IC-TVの含水比補正線を作成する。標準プロクターのW_{opt}の65%及び95%付近の含水比で実施した試験施工におけるIC-TV値を用いて水分補正トレンドラインを作成</p> <p>・ 施工層の締め固めの合否は、RMVの90%以上が、含水比補正されたIC-TVに対して90%~120%に収まるか否か、さらに全てのRMVが含水比補正されたIC-TVの80%を満足するか否か、で判定</p> <p>・ 上記の判定基準を満足しない場合は、基準を満足するまで再転圧及び材料の含水比調整を実施</p> <p>・ 計測ロットのRMVの大部分が、含水比補正済みのIC-TVの120%を超過する場合、IC-TVを再評価する必要があり、不適切であった場合は、締め固め特性の変化を反映した新たなIC-TVと含水比補正を構築</p>	試験施工時にLWDも計測し、LWD-TV (Target Value) を設定
地盤剛性指標またはRMVの管理方法	RMVの下限値管理	抜取検査 (平板載荷試験、LWD試験) による 剛性の下限値管理	RMVの変動率・下限値の管理	抜取検査 (平板載荷試験、LWD試験) による 剛性の下限値管理	抜取検査 (平板載荷試験、LWD試験) による 剛性の下限値管理	RMVの上下限値管理	抜取検査 (LWD試験) による 剛性の下限値管理
備考	<p>・ 路床にのみ適用可 (路盤には適用しない)</p> <p>・ MV-TVを満足しない10%の領域についてはヤード内に分散されている必要があるが、この分布状態の妥当性についての判断は現場技術者の判断に任されている</p> <p>・ 盛立試験及び品質管理試験では転圧重機の周波数や振幅を可変制御することは許可されていない (= 転圧機の締め固めエネルギーを一定に保った条件でのRMVで評価する)</p>	<p>・ 路床にのみ適用可 (路盤には適用しない)</p> <p>・ ロット全体のRMVの平均値が5%以下になった状態で試験箇所を決定</p>	<p>・ RMVと現場密度試験との相関確認は推奨されていないが、代替手法として認められている</p>	<p>ロット全体のRMVの平均値が5%以下になった状態で試験箇所を決定</p>	<p>・ 路盤 (300mm~700mm) にのみ適用。</p> <p>・ 上層路盤と下層路盤で許容される細粒分 (0.06mm未満の粒子) の最大含有率は7%以下であるため、CCCは主に粘着性のない材料に対して実行される。</p>	<p>・ Mn / DOT仕様では使用材料の土質と採取場所ごとに、インテリジェントコンパクションにおける目標値 (Intelligent Compaction - Target Value, IC-TV) ※を決定するための試験施工 (control strip) を設定する。(前後の文脈からcontrol tripとは下記の管理含水比の上下限値に対応したRMVを計測するための試験施工と同義であるとされる。)</p> <p>・ Mn / DOTによる「インテリジェントコンパクション」という用語の使用は、測定中に振動ローラ挙動についての自動フィードバック制御が許可されていないため、実質的にはCCCと同等となる。</p>	

表-4.4 既往の CCC による管理事例 (その2)

国家等	米国 (NCHRP Report676)						日本 (NEXCO)
基準・規格	NCHRP Report676 推奨仕様						土工施工管理要領 (平成29年7月)
基準・規格	option1	option2a	option2b	option3a	option3b	option3c	土工施工管理要領 (平成29年7月)
含水比に関する規定	規定はない	規定はない	規定はない	規定はない	規定はない	規定はない	規定はない
高含水比材料の取扱い	粘性土には適用不可	粘性土には適用不可	粘性土には適用不可	粘性土には適用不可	粘性土には適用不可	粘性土には適用不可	塑性指数(IP)≧10以上かつ75μmふるい通過率≧25%以上の場合は原則として使用不可
RMVの校正作業	不要	不要	不要	RMVと抜取検査に用いる現場試験(剛性、密度等)との相関を確認	不要	室内試験で確認される工学的特性との相関に基づきMV-TVを設定	必要
適用条件	RMVと土の締固め状態を示す現場試験結果に正の相関があること	—	—	校正時の相関係数がR2≧0.5	—	—	CCV, 乱れ率α, Evib以外のRMVの適用にあたっては試験施工による性能確認試験が必要
評価方法	<p>・抜取検査の試験箇所をCCCで決定し、抜取検査結果で評価</p> <p>・相関の確認については盛立試験で低、中、高のRMVに対する現場試験を行い、それらの相関を確認する</p>	<p>・転圧回数iに応じたRMVの施工ヤード全体の平均値の変化率が5%以下となるか否かで判定</p> $\% \Delta \mu_{MV_i} = \left(\frac{\mu_{MV_i} - \mu_{MV_{i-1}}}{\mu_{MV_{i-1}}} \right) \times 100$	<p>転圧回数iに応じた、個別座標点におけるRMVの変化率がΔMVについて、施工ロットの累積発生率曲線を作成し、ΔMV-TVにおける累積値が所定の閾値(80-95%を推奨)を超過するか否かで判定</p> $\% \Delta MV_i = \frac{MV_i - MV_{i-1}}{MV_{i-1}} \times 100$	<p><RMVと抜取検査に用いる現場試験との回帰分析に基づく相関関係によりMV-TVを設定></p> <p>・RMVが設定したMV-TVを満足する割合が所要の規格値(80-95%を推奨)を満足するか否かで判定</p> <p>・キャリブレーションは低、中、高の締固め状態において実施</p> <p>・RMVマップから、抜取試験箇所を設定する。この際、ロット内の局所的な変動箇所は避けて試験箇所を選択、選択箇所でも3~5点の現場試験を行い、その平均値を1つの回帰点とする</p> <p>・RMVの目標値MV-TVについては既存の品質管理基準値(例えば締固め度95%以上等)に基づき回帰式から設定される</p> <p>Figure 7.10. Illustration of use of prediction limits when selecting an MV-TV.</p>	<p><MV-TVをMVの変化率で設定></p> <p>・RMVが設定したMV-TVを満足する割合が所要の規格値(80-95%を推奨)を満足するか否かで判定</p> <p>・試験施工にて転圧回数iに応じたRMVを記録する。試験施工の施工ヤード全体の90%以上の範囲で、ΔMVi ≦ 5%の条件が満足するとき、施工ヤード全体のRMVの平均値μMViがMV-TVとして設定される</p> <p>・この校正手順は原則としてOption2と同じである。</p>	<p><RMVを室内試験による物性値に関連付></p> <p>・RMVが設定したMV-TVを満足する割合が所要の規格値(80-95%を推奨)を満足するか否かで判定</p> <p>・事前に選択された含水比~乾燥密度の組合せによる締固め状態において、室内試験で確認される工学的特性との相関に基づきMV-TVを設定</p> <p>・室内試験は含水比はwopt-4%からwopt+4%まで変化し、乾燥密度は標準プロクター若しくは修正プロクターに対してDc=90~110%まで変化させる</p> <p>・室内試験と現場試験からの重回帰関係から、室内試験の物性特性をRMVに関連付け、MV-TVは線形回帰式から目標とする室内試験のQATVに対応する値で決定</p> <p>・含水比を変化させた条件で(wopt-4%からwopt+4%など)試験施工を実施し、複数の転圧回数における現場含水比、現場乾燥密度の測定とRMVを取得する。現場試験の測定データと対応するRMVデータを使用して、重回帰関係を作成し、RMVを水分と乾燥単位重量の関数として予測する(オプション3aと同様)</p>	<p>・RMVの管理基準値は、平板載荷試験から得られる変形係数の管理基準値に相当するRMVとし、変形係数とRMVの線形近似式から算定する。変形係数の管理基準値は(株)路床で20MPa以上、上部路床で40MPa以上、盛土地盤で42MPa以上である。</p> <p>・施工の合否は、施工ロットのRMVについて上位10%を排除(ハイカット)したうえで、残データの低位10%値となるμ-1.28σ値がRMVの管理基準値を満足するか否か(=ハイカット後の90%以上が基準値を満足するか否か)で判定する。</p>
地盤剛性指標またはRMVの管理方法	抜取検査の基準については記載はない	RMVの変化率管理	RMVの変化率管理	RMVの下限値管理	RMVの下限値管理	RMVの下限値管理(実質上下限値管理)	RMVの下限値管理
備考	<p>・抜取検査位置はRMVの最小値の計測位置</p> <p>・盛立試験で低、中、高のRMVに対する現場試験を行い相関を確認</p> <p>・オーストリアの管理法2やドイツのMethod3と基本的な考え方は同じ</p>			<p>・RMVを地盤剛性指標(PLT,LWD等)と相関をとる場合には、単一変数の回帰分析で可。</p> <p>・RMVを密度と相関させる場合には、水分の影響を受けるため、多変量回帰が必要となる場合がある</p>	—	<p>・上下限値を管理することは具体的に示されていないが、上記のような締固め管理範囲に応じてRMVを管理するのであれば、上下限値管理になると推定される。</p>	<p>・路床や盛土地盤に土質安定処理工法を採用した場合には転圧時の剛性が低いためローラ加速度法では適切な計測が困難なことから、土質安定処理をした場合には、ローラ加速度応答法は適用できない</p> <p>・締固めエネルギーはGNSS管理により、別途確認する</p> <p>・試験施工により、現場密度試験、平板載荷試験、たわみ試験等から得られる物性値とRMVとの相関を確認するが、相関係数の基準についての記述はない</p>

表-4.3, 表-4.4 に示す既往の管理方法は、以下の2種類の方法に大別される。

管理法①：CCCにより計測されるRMVに基づき判定する管理法
管理法②：施工ロットの合否は従来通り抜取検査型の現場試験に基づき判定するが、その試験位置をCCCにより設定する管理法

これらの管理法の特徴と課題について以下に記す

(1) 管理法①

- 管理法①に分類される管理法では、RMVの校正（キャリブレーション）が必要となる。
- キャリブレーションは平板載荷試験やLWD試験のような他の現場試験で計測される剛性指標との相関をとることが基本とされており、乾燥密度との相関を評価する場合は2変数以上の重回帰分析が必要となる場合があるため、推奨されない（若しくは適用されない）。
- 転圧回数に応じたRMVの施工ロット全体の平均値の変化が一定の幅以下に収束した後に、計測値の評価がなされる。（変化率が一定値以下に収束することで施工完了と判断する管理法もある；NCHRP Report676 推奨仕様_option3b）
- RMVは地盤剛性と相関がある指標であるため、第3章でも述べたとおり高含水比材料では締固めエネルギーの上昇に対するRMVの変化率は小さくなるため、変化率の収束によって転圧完了の判断はできない。
- 多くの管理指標ではRMVの管理基準値であるTV(Target Value)を定め、施工ロットのRMVの90%以上がMV-TVを満足することを確認することで、施工の合否判定を行っている。
- ミネソタ州運輸局の暫定仕様、NCHRP Report676の推奨仕様_option3c以外の手法ではRMVの下限值管理であり、含水比・飽和度の影響を考慮していない。
- ミネソタ州運輸局の暫定仕様では標準プロクターの最適含水比 w_{opt} に対して65~95%の含水比に対応した含水比補正を行うものとしており、RMVをTVの80~120%の幅で管理するため上限値を考慮している。ただし、含水比の許容下限値が w_{opt} の65%とかなり低い。これは締固めエネルギーが標準プロクターに対してかなり大きく、使用材料も自然含水比が低い砂質～礫質材料での施工に限定された仕様であるならば、水浸コラプスの影響を受けない程度の範囲に収まると推定される。ただし、使用材料と使用重機の選定によっては過剰に乾燥側の施工を許容する可能性がある。また、遮水性盛土等の高含水比材料への適用は想定していないものと考えられる。（ミネソタ州には氷河期の名残で無数の湖沼が存在し、路床土には粘性土が多く地下水位も高いとされており、そういった自然条件とは合致しない部分がある、と考える。）

- NCHRP Report676 推奨仕様_option3 では施工ロットの RMV が規格値となる MV-TV を満足する割合が所要の規格値 (80~95%を推奨) を満足するか否かで施工の可否を判定するもので、MV-TV の設定方法の違いにより a,b,c の 3 種類の管理方法を提案している。特に option3c では含水比と締固め度の変化に応じた RMV の範囲を設定しており、本節で紹介した管理法の中では、RMV の管理範囲の設定方法の合理性は最も高いと思われる。
- NCHRP Report676 の推奨仕様は、基本思想として RMV の下限値管理を想定していると考えられるが、option3c では含水比の管理範囲と締固め度の上下限値を設定して、その管理範囲に対応して RMV を管理するため、結果的に RMV の上下限値管理を行う必要が生じると考えられる。ただし、RMV の上下限値管理の必要性についてはレポートの中では触れられてはいない。

(2) 管理法②

- 管理法②に分類される管理法は、RMV マップにより抜取検査の試験位置を決定するためのものである。このため、相対的な RMV 変化が確認できればよいため、他の指標との校正 (キャリブレーション) を必要としない。
- ドイツやオーストリアでは、盛立試験を実施しない小規模土工や、盛立試験における RMV と他の指標との相関が基準値を満足しなかった場合に採用する。
- 抜取検査位置を RMV の低い地点で実施する。RMV が低い箇所は弱部であるという剛性指標の下限値管理の思想に基づいている。

(3) 既往の CCC による管理法の課題と改善方法

- a) 既往の CCC による管理法は、ミネソタ州運輸局の暫定仕様を除く全ての管理法が剛性指標となる RMV の下限値管理若しくは変化率管理である。このため、本研究の第 1 章、第 3 章で述べたとおり、乾燥側の含水比での施工が奨励されやすくなり、締固め後の湿潤による材料の強度・剛性の低下を引き起こすリスクがある。特に、遮水性盛土では過度に乾燥側の施工をすることで所要の遮水性能が確保されない可能性がある。これらのリスクを回避するには地盤剛性に基づく締固め管理を行う場合には、下限値管理のみではなく、上限値管理の考え方を導入する必要がある。
- b) NEXCO の要領を除く全ての管理法は、剛性指標のみで締固め状態を評価することを想定している。しかし、土の締固め状態は含水比と乾燥密度、あるいは飽和度と乾燥密度などの 2 種類の独立な物性によって規定されるため、剛性のみで評価はできない。
- c) 締固めた地盤の剛性は乾燥密度と含水比の関数であるが、締固めエネルギーと粒度等の土質を固定した条件の下では、乾燥密度と含水比の関係は 1 本の締固め曲

線上で推移する。この条件下では、1つの地盤剛性には1つの乾燥密度と含水比で表現される締固め状態が対応することになり、地盤剛性の計測を行うことで締固め状態を監視していることになる。

- d) a),b),c)より、剛性指標である RMV を用いた CCC を適用するためには、3章で述べたとおり、土質と締固めエネルギーを一定の幅で管理したうえで RMV の上下限値を管理する必要がある。

次節以降では、上記の課題とその改善方法を踏まえた、小石原川ダムでの CCC の実務適用のための諸検討と適用結果を記す。

4.4. 本研究で採用した RMV

4.4.1. 採用した指標

本研究では SSI 管理の指標とする RMV に Compaction Control Value (CCV) を採用した。CCV は 4.2.節でも紹介したとおり、振動ローラに設置した加速度計の計測データを周波数分析して得られる応答加速度スペクトル指標であり、式(4.1)によって定義される²⁾⁻⁵⁾。

$$\frac{S_{1/2} + S_{3/2} + S_2 + S_{5/2} + S_3}{S_{1/2} + S_1} \times 100 \quad \dots (4.1)$$

S_n :振動ローラの基本振動数を f_0 としたときの $1/2 \cdot f_0$ の整数倍の振動数に対応する応答加速度のスペクトル値

(1) 分解能

CCV の計測値はローラ幅 (約 2.3m)、GPS 位置情報のサンプリング頻度 (1 回/sec)、ローラの転圧速度 (約 3km/sec) の関係により記録される。

(2) 面的データの処理

面的データは、「TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領 (R2 年 3 月最終改訂, 国土交通省)」²⁰⁾に記載される 50cm×50cm グリッド毎に(1)で計測されたデータが出力される。

各グリッドのデータは、ローラの軌跡が僅かでもグリッドに重なれば、そのグリッドのデータは上書きされる。このため、ラップ転圧される範囲が含まれるグリッドについては規定の転圧回数の倍のデータが計測されることになる。よってデータ整理は各グリッドの最終上書き値を基本としてデータ分析を行っている。

なお、ローラ軌跡は GNSS 記録、ローラ形状、GNSS アンテナ位置、に基づき算定される。

4.4.2. 異常値の取扱い

盛立試験および試行運用時の計測記録を分析した結果、特定の場所で異常に高い CCV の値が発生する場合があることが確認された。従来の RMV の下限値管理の場合は、「高い RMV は高い品質を意味する」と仮定しているため、仮に異常と思われる高い値が測定された場合にはハイカット処理をすれば安全側の管理となる。このため品質管理上の課題と認識されにくく、異常に高い RMV の測定値に関連した問題は、殆ど研究されていない。

しかし、本研究では RMV の上限値管理に基づく管理を行うため、実際には遮水性は高い状態にもかかわらず非常に高い CCV 値が観測された場合には、その計測値を異常値として

適切に排除しないと、信頼できる遮水性管理とはならない。例えば、4.3.節で紹介した NEXCO の事例では、計測された RVM データの上側 10%を棄却して残データの統計処理値で評価を行う¹⁹⁾。これは下限値管理を行う場合は安全側の評価となるが、上限値管理を行う場合には、仮に上側 10%が異常値でなければ危険側の評価ともなりえる。

そこで、異常値の発生要因の分析と異常データの棄却法の検討を次のとおり実施した。

(1) 基本振動数の変動による影響

式(4.1)のとおり CCV は振動ローラの基本振動数 f_0 に基づき算定する指標であるため、 f_0 の変動の影響を受ける可能性がある。これは、CMV や乱れ率などの他の加速度応答スペクトル指標でも同様である (表-4.2 参照)。

図-4.1 に盛立試験で計測された CCV と f_0 の経時変化の例を示す。図-4.1 より、 f_0 が急変するタイミングで CCV が一時的に急変している。より正確には、 f_0 が急減・急増するタイミングで CCV が一時的に急増・急減している。コアゾーンの施工において f_0 が急変する要因の多くは、①振動スイッチの ON/OFF 時、②前後進の切替時、である。このため、本研究では①と②の影響を受ける計測値はデータ整理の対象から除外した。

(2) コア・フィルタ境界の影響

図-4.2 は、CCV マップの例である。上記の要因①、②による異常値のほか、③コア・フィルタ境界において高い計測値を示している。小石原ダムではコア→フィルタの順で施工を行い、コア・フィルタ境界では、フィルタの敷均し後にラップ転圧を行った。このため、剛性の高いフィルタゾーンの影響を受けた計測値が最終の CCV の記録として上書きされる。そこで、異種材料との境界施工の影響を受けているデータは棄却してデータ分析を行うこととし、その影響範囲を検討した。

図-4.3 に、各種の要因による異常に高い CCV の測定値を段階的に排除した後の CCV の面的分布と、CCV の累積発生確率曲線の変化の例を示す。コア・フィルタ境界近傍のデータは境界施工の影響を受けているため、c)~f)ではこれらを段階的に棄却している。

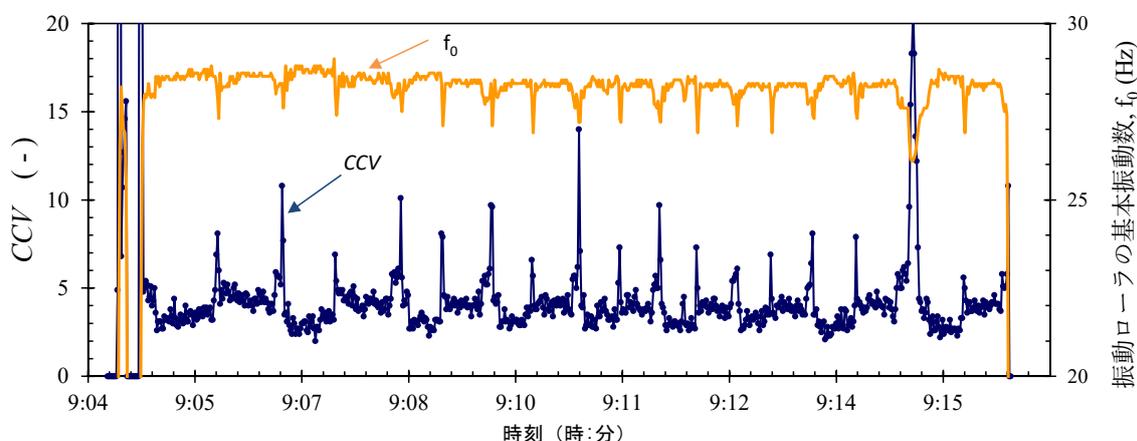


図-4.1 CCV と f_0 の経時変化の測定例 (盛立試験)⁶⁾

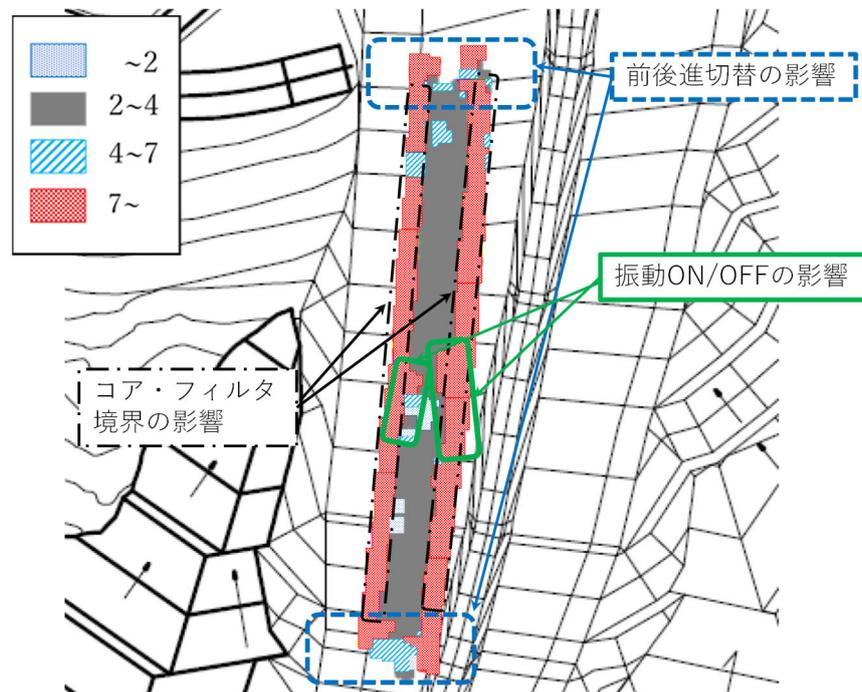


図-4.2 CCV 異常値の発生個所 (例)

コア・フィルタ境界から7つのメッシュ (1メッシュ 50cm 四方) のデータを棄却した段階 f)では、異常値が若干残存するが僅かである。棄却範囲を9メッシュ以上に広げると異常値はほぼ消滅するが、高標高部ではコアゾーンの幅が狭まるため、フィルタからの影響範囲を全て棄却すると施工ロットにおける評価範囲が狭くなりすぎる。そこで、前節でレビューした既存のCCCの評価方法を参考に、残存するコア・フィルタ境界付近の異常値のデータ数が施工ロット全体の概ね 10%以下になるようにコア・フィルタ境界を中心とした7メッシュのデータをデータ整理対象から除外した。

4.5.節以降に記すの盛立試験ならびに実施工でのデータ分析では、①振動スイッチのON/OFFの影響を受けたデータ、②前後進の切替の影響を受けたデータ、③コア・フィルタ境界の影響を受けたデータ (境界から5メッシュまで)、については棄却したデータを用いて分析をしている。

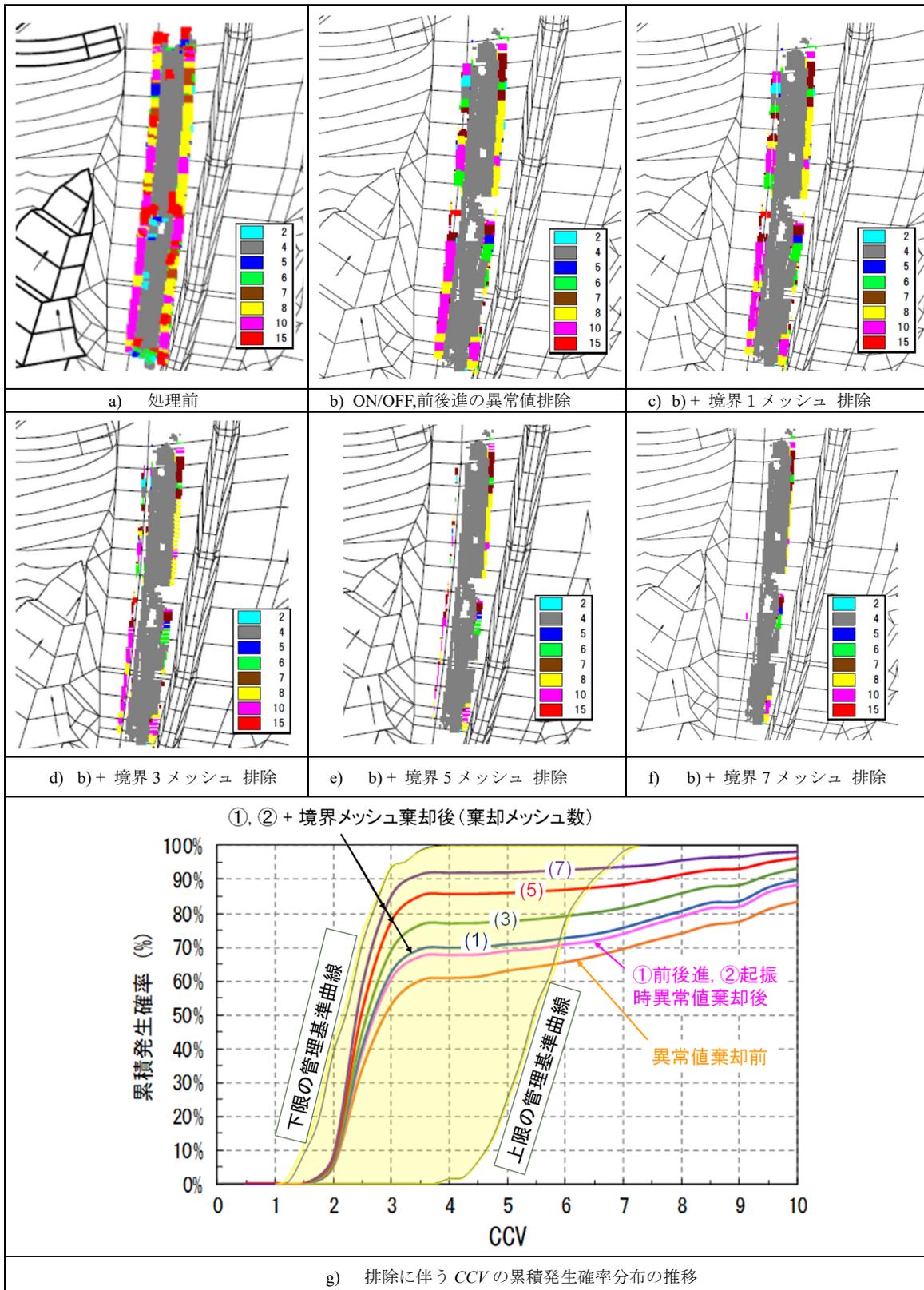


図-4.3 各種要因による異常値棄却後の CCV の分布の例

4.5. 現場盛立試験による検討

現場盛立試験では，地盤剛性指標 SSI として落球探査法による変形係数（以後，「変形係数」） E と CCV を計測した．SSI に変形係数 E を適用した場合の SSI の上限値管理に基づく透水係数の管理法については，第 3 章で詳細に記した．本節以降では，SSI に CCV を適用した場合の管理法について説明する．

4.5.1. 試験条件

表-4.5 に，試験ケースと試験項目を示す．盛立試験では，含水比の変化に伴う乾燥密度，透水係数，剛性指標の変化を確認した．透水係数が品質管理基準値を満足しない Case1-1 では，計測機器の故障により CCV の計測が実施できず，遮水性能が不十分な状態での CCV の計測結果が確認できなかつた．そこで，場透水係数が管理基準値を満足しないよう，粒度を粗粒化させ含水比を乾燥側に調整した材料を用いた Case3 を追加試験として実施した．

表-4.5 に示す含水比 w は「現場全粒度試料の内部の最大粒径 $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分」の値である．表-4.5 に示すように，盛立試験では $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分の最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ を基準にした正規化含水比 $(w')_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ を， -1.9% ～ 2.2% の範囲で複数設定した．含水比設定の考え方の詳細については第 2 章の 2.4.1. を参照されたい．

第 2 章の図-2.14 に示した試験ヤード形状と試験孔の基本配置を再掲する．試験ヤードは，

表-4.5 盛立試験ケース一覧

Case	含水比 $w' = w - (w_{opt})_{1Ec}$ (-37.5mm 粒度)	試験項目				備考
		現場密度試験 (JGS1611)	現場透水試験 (JGS1316)	地盤剛性指標1 変形係数 E	地盤剛性指標2 CCV	
Case1-1	-1.7%	○	○	○	—※1	コア材A, w : 管理下限値より乾燥側
Case1-2	-0.8%	○	○	○	○	コア材A, w : 管理下限値
Case1-3	0.5%	○	○	○	○	コア材A, w : 中間含水比
Case1-4	2.2%	○	○	○	○	コア材A, w : 管理上限値
Case2-1	-1.9%	○	○	○	—※2	コア材B, w : 管理下限値より乾燥側
Case2-2	-1.0%	○	○	○	○	コア材B, w : 管理下限値
Case2-3	0.2%	○	○	○	○	コア材B, w : 中間含水比
Case2-4	2.2%	○	○	○	○	コア材B, w : 管理上限値
Case3	-1.0%	○	○	○	○	粗粒化材1, 含水比は管理下限値付近

※1…計測機器の故障により未実施 ※2…施工層のみの含水比調整であったため参考値扱い

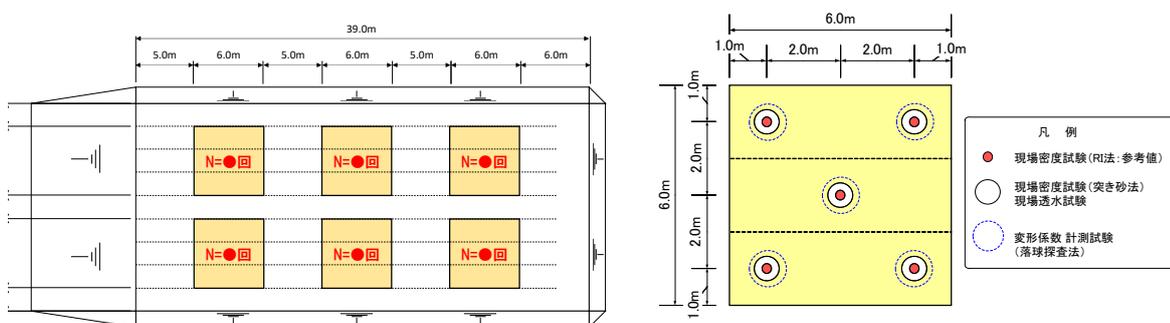


図-2.14 盛立試験ヤード造成例と原位置試験孔の基本配置 【再掲】

第2章、第3章で説明したとおり、実施工と同じ転圧機種である10t級平滑振動ローラを用いて、実施工と同じ仕上がり厚30cmで3層の試験ヤードを造成し、下層地盤の影響を受けないよう3層目の最上層で各種の現場試験を実施した。

盛立試験材料には小石原川ダムの一般コア材を用いた。図-4.5に、各ケースで転圧後に原位置採取した全粒度試験材の平均粒度分布を示す。Case1では一般コア材の標準粒度として製造したコア材Aを使用し、Case2では細粒材の一部を、粒径20~50mmの風化岩を破砕機で粉砕して製造した人工細粒材で置換したコア材Bを使用した。

Case1-1は追加試験として実施しており、他ケースとは別に盛立試験材料を製造したため、0.075mm~4.75mmの範囲の含有率がCase1-2~4と比べてやや多い。

Case3は一般コア材とフィルタ材の混合材であり、粒度分布は品質管理基準を僅かに下回るよう調整し、含水比は許容下限値をやや下回るよう調整した。

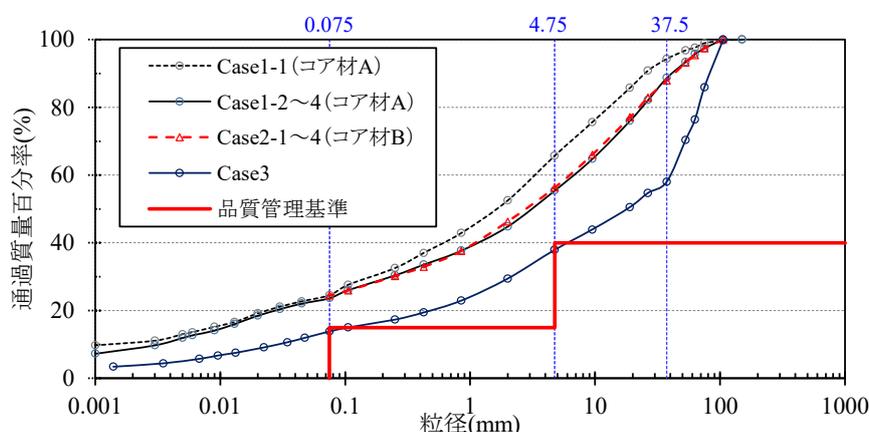


図-4.5 盛立試験の平均粒度分布（原位置試料）

4.5.2. 試験結果

(1) $(D_c)_{1Ec}$, k , E , CCV と含水比 w の関係

図-4.6に、施工仕様の転圧回数 ($N=8$) における、締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ 、現場透水係数 k 、変形係数 E 、 CCV と含水比の関係を示す。各ケースで $(w_{opt})_{1Ec}$ の値が若干異なったため、横軸に正規化含水比 $(w')_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ を用いて整理した。図-4.6では、Case1,2については、ケースごとに個別の試験値の算術平均値をプロットしている。

図-4.6 a) に示す締固め度は、 $D_{max}=37.5$ mm の部分の $(D_c)_{1Ec}$ である。ただし、Case3については、37.5mm以上の礫率が40%以上と大きく乾燥密度の礫率補正を適切に行うことが困難であったため、図-4.6 a) にはCase3の値をプロットしていない。

図-4.6 d) の CCV について、▲と●印のデータは、各ケースの全データから4.4節で述べた異常値を排除して平均した CCV 値を $(w')_{1Ec}$ の平均値に対してプロットした。また、Case1-1では CCV が計測できなかったため、 E の平均値を図-4.7に示すCase1での平均的な E - CCV 関係に代入して推定した。図-4.6 d) に示す△と○印のデータは、この CCV の推定値を $(w')_{1Ec}$ の平均値に対してプロットしたものである。

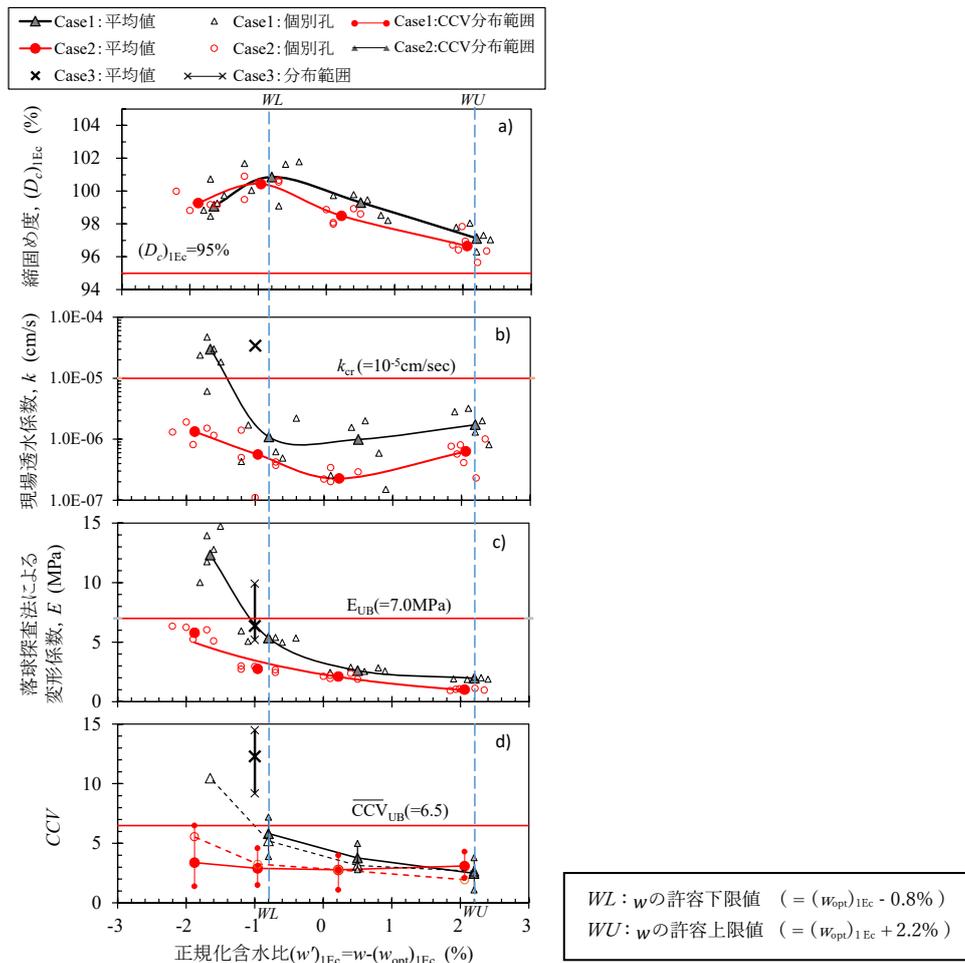


図-4.6 盛立試験の結果 (N=8) : $(D_c)_{IEc}$ と $(w')_{IEc}$ は $D_{max} = 37.5\text{mm}$ の部分の値⁶⁾

図-4.6 に示す土質と CEL_f が一定とみなせる現場条件で実施した遮水材料の盛立試験での結果は、第3章の図-3.1 の概念図と整合している。

図-4.6 c), d) より、変形係数 E と CCV の計測感度を比較する。Case1 (コア材 A) では、含水比の変化に伴う E と CCV の変化傾向は同程度といえる。Case2 (コア材 B) では、含水比の変化に対する剛性の変化が E , CCV とともに鈍くなるが、 CCV の方がその傾向が強い (Case2 で相対的に剛性が低下している理由については第3章の考察を参照されたい)。一方、Case3 の粗粒化に伴う剛性上昇は、 CCV の方が E よりも感度よく計測されている。

このように落球探査法による E と CCV の関係には明確ではない点があるが、この理由として、二つの計測法の①計測深度、②計測面積、が異なることの影響が考えられる。

図-4.7 E - CCV の関係^{6)①}について、本ダムのコアの締固めでは施工層と前層のレーキングにより一時緩んだ範囲も含めて 50~60cm 程度の深度まで密度が均質に締め固められていることを確認しており²⁰⁾、 CCV は少なくとも転圧面から 50~60cm の深度の締固め範囲全体の物性を反映する。一方、落球探査法は調査点付近の深度 20cm 程度²¹⁾の範囲の物性を反映する。このため、落球探査法による E は相対的に表層付近の物性の影響が大きく、試験中

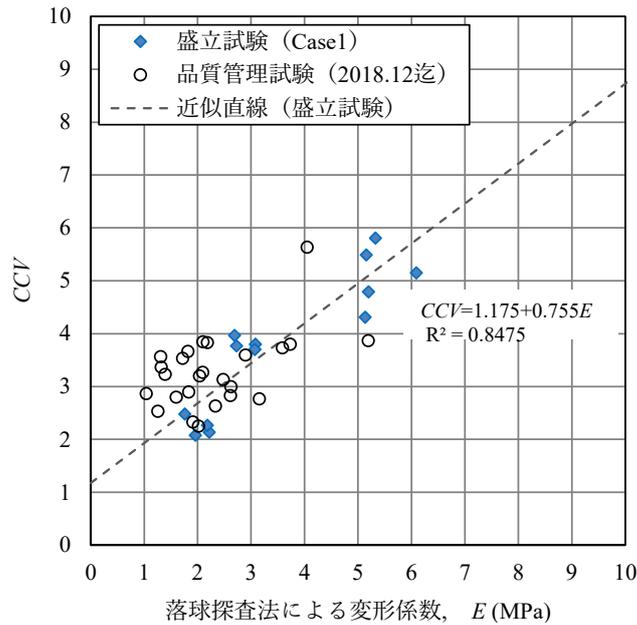


図-4.7 落球探査法による E と CCV の相関⁶⁾

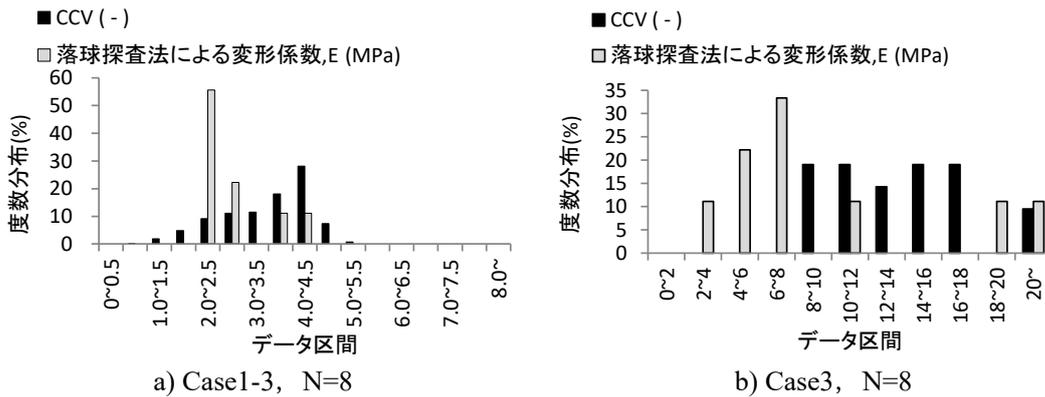


図-4.8 E, CCV のヒストグラム⁶⁾

の材料の乾燥の影響を受けやすい。その結果、Case2 では、落球探査法による E の方が CCV と比して乾燥側の剛性の上昇傾向をより鋭敏に感知した可能性がある。

②について、落球探査法では試験を実施した点での評価になるのに対して、CCV ではローラ幅（小石原川ダムの転圧機種；SAKAI_SV512D では 2130mm）と走行速度・出力周波数に応じた面積を評価するため、評価対象となる面積は落球探査法と比べるとかなり広い。このため、盛立面における剛性のバラツキが大きい条件では落球探査法と CCV で計測結果の傾向が異なる可能性がある。

図-4.8 に典型的な E と CCV のヒストグラムを示す。図-4.8 a) (Case1-2, N=8) では、37.5mm 以下の含有率が 90%弱で礫分が比較的少ない一般コア材 A を用いている。計測エリア内における粒度のバラツキの影響は小さいと思われ、実際に E のバラツキは小さい。一方、図-4.8 b) (Case3, N=8) では、Case1 とは異なり、E の値の範囲は 3.4~29.5 MPa と非常に広く、またその分布は連続的ではない。

Case3 は一般コアにフィルタを混合した礫分が多い材料を用いたが、落球探査法では計測位置 (= 落球を落とした位置) の表面に大礫がある場合と粘性土のみの場合があった。計測位置の状態と計測結果の関係を現地で比較すると、 E が 10 MPa を超えるデータは表層の礫分の多い箇所での計測値であり、 $E \approx 3 \sim 6$ MPa のデータは表層に礫分がない箇所での計測値であった。これらを勘案すると、Case3 のいずれの計測値も、礫分を含む全粒度試料の E の値を代表していないものと考えられた。

一方、CCV の分布は平均値を中心に連続的に分布している。CCV に代表される RMV では幅 2m 程度のローラが接触したエリアの平均的な地盤剛性を連続的に検出する。このため、ロット内の地盤剛性のバラツキが大きい場合は、落球探査法よりも平均的な地盤剛性を適切に評価できると考えられる。

以上より、小石原川ダムの事例では、CCV は遮水性に問題が発生する状態を確認するための感度と精度を有した剛性指標であり、その結果に基づいて、粒度分布の影響を考慮しつつ、CCV による透水性の面的管理法が開発できると判断した。

なお、**図-4.6** では、Case3 の現場透水係数が許容上限値を超えているが、落球探査法でも管理基準値を超える E が確認されている。 E による品質管理では全点で規格を満足する必要があるため、 E による管理でも遮水性能不足となる Case3 のロットは排除できる。

また、**図-4.6** より、粒度分布特性が異なる材料で同程度の剛性が測定される場合、粒度が細かいコア材 B (Case2) の透水係数が低い傾向がある。第 3 章の**図-3.5** 示した一定の CEL で粒度を変化させた室内試験でも、同様の傾向が確認されている。これらの結果より、地盤剛性の上限值は、粒度が粗いコア材 A (Case1) を用いた試験結果に基づいて設定することが透水性 (遮水性) の安全側の管理になる。

(2) CCV の平均値

図-4.6 を見ると、土質と CEL_f が Case1 (コア材 A) と同等か、より好条件 (※) で管理されている場合、透水係数 k が許容上限値 k_{cr} (1.0×10^{-5} cm/sec) 以下の範囲では E は概ね 10 MPa 以下の範囲で推移し、CCV の平均値は**図-4.7** に示す平均関係を参考にすると概ね 8.7 以下で推移すると想定できる。

小石原川ダムでは、土質と CEL_f を管理し飽和度を評価・管理することを前提に、 $(w')_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ の許容範囲を -0.8%~2.2% と設定すれば、各ロットでの CCV の平均値は 6.5 程度以下、変形係数 E の平均値が 7.0 MPa 以下となり、 k は規格値に対して 1 オーダー程度の余裕をもって満足する、と判断した。

しかし、平均値での評価ではローラ加速度応答法による RMV の大量のデータを十分に活用しているとは言い難いため、具体的な管理方法は別に検討する必要があると考えられた。そこで 4.6.にて詳述する RMV データを活用した評価方法を検討することとした。

- ※ 「好条件」とは、遮水性能確保の観点から、土質については細粒分含有率が Case1 の使用材料より多いこと、 CEL_f については Case1 の施工仕様よりエネルギーが大きい (= 施工層が薄い or 転圧回数が多い) こと、を意味する。

4.5.3. CCV が上限値を超える場合の考え方

SSI は CEL, 粒度, 含水比の影響を受けて変動する。施工仕様規定と GNSS 管理により, CEL を確実に担保して施工している場合, SSI は粒度と含水比の変動の影響を受ける。フィルダムの施工では粒度, 含水比を所要の性能が得られるよう管理しており, その施工管理・品質管理は一般土工と比べると非常に丁寧に管理されている。

しかし, 含水比は施工中にも変動するため, 搬出時の含水比のまま締固めが行われることは稀である。粒度についても, 粒度の局所的な異常が発生する可能性は否定できない。実施工では採取材料ばらつきや切崩し・ダンプアップ・撒き出し等の作業中の自然分級, などの影響を受けるためである。

以上より, SSI に CCV を適用した場合, CCV が上昇する要因は以下の通りとなる。

- ① 粒度が適正で含水比が乾燥した場合 (Case1-1)
- ② 含水比が適正で粒度が粗粒化した場合 (Case3)
- ③ 含水比が乾燥し, 粒度も粗粒化した場合
- ④ その他の計測異常※

※ 「その他の計測異常」とは, 4.4 で述べた, 加速度応答スペクトル指標を用いた場合に何らかの原因で転圧機の基本振動数 f_0 が変動した場合に生じる計測値の異常, 異種材料の境界部の施工による計測値の異常, を指す。

これらの CCV の上昇要因は計測値からは判断できないが, ①~③のように本当に材料に異常が生じている場合には目視や触診により異常状態は確認できる。このため, 施工後に CCV マップで確認される異常箇所については, 目視等での状況確認を行い, 必要な処置を行う。以下に, CCV による計測値の考え方を整理する。

- A) CCV を用いた遮水性盛土の SSI 管理では, CEL, 搬出含水比, 搬出粒度を管理した上で, CCV の計測結果から施工中の含水比の変動と粒度の局所異常を監視することを基本とする。
- B) 転圧機の基本振動数 f_0 が変動した場合にも CCV の異常値が確認される場合がある。その場合は目視で問題なければ, 密度や遮水性には問題はない。
- C) CCV の異常値の要因は計測値からは判断できない。このため, 異常値の発生箇所は目視と触診で現場状況を確認し, 含水比, 粒度に異常がある場合は適切な処理 (①レーキ & 加水 & 再転圧, ②材料撤去⇒再施工, のいずれか) を行う。

4.6. 実施工での運用方法の検討

4.5より、CCVは含水比の低下および材料の粗粒化による地盤剛性の増加の感知は可能と判断できた。

また、材料が細粒化した場合には、含水比変化に伴う剛性変化の計測感度が鈍化するが、透水係数 k が $k < k_{cr}$ ($1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$) を満足する $(w')_{1Ec}$ の範囲が広がり、同一の CCV における透水係数が低くなる傾向があるが、ことがわかった。これらより、材料の細粒化により CCV の感度が低下した場合でも CCV の上限値管理による遮水性能管理に支障が生じること（すなわち、遮水性能が満足しない状態を見逃すこと）はない、と判断した。

以下では、小石原川ダムでの事例に基づき、CCV の管理範囲の設定法を記す。

4.6.1. CCV の管理範囲の設定

CCV を含む RMV により品質を評価する場合、計測値の平均値や中央値だけにに基づく管理では、定量的かつ連続的な計測値が得られるという RMV の特長を十分に活用しているとは言いがたい。そこで、本ダムでは CCV 記録の度数分布の累積発生率と CCV 記録のマップデータを用いて管理することとした。

図-4.9 に含水比と透水係数、地盤剛性の関係と、含水比の下限値である Case1-2 (コア材 A, $(w')_{1Ec} = -0.8\%$)、上限値である Case1-4 (コア材 A, $(w')_{1Ec} = +2.2\%$) における CCV の区間発生率と累積発生率を示す。図-4.9 では、4.4節で説明した異常値のデータを排除したデータで分析を行った。

Case1-2 では、正規化含水比 $(w')_{1Ec} = w - (w_{opt})_{1Ec}$ が管理下限値の -0.8% であり、 $(w')_{1Ec}$ がこれ以上減少すれば透水係数 k が急増するが、この段階では品質管理基準の $k \leq 1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ を余裕をもって満足している (図-4.9b)。このことから、Case1-2 での CCV 累積率曲線を上限の管理基準曲線として CCV 累積発生率曲線の管理を行うことで、透水係数が品

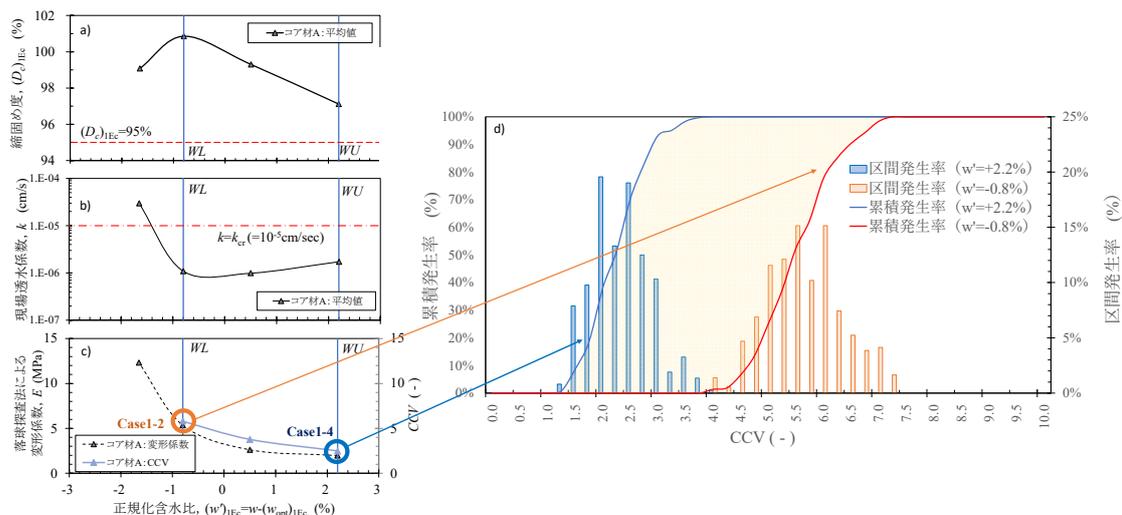


図-4.9 CCV の区間発生率及び累積発生率⁶⁾
(参考文献 6) の図-9 に加筆)

質管理基準を満足することを間接的に確認できる。

次に Case1-4 では、正規化含水比 $(w')_{1Ec}$ が管理上限値の+2.2%であり、 $(w')_{1Ec}$ の許容範囲内では締固め度が最も低い状態である。しかし、**図-4.9 a)**に示すように、この状態でも $(D_c)_{1Ec}$ は品質管理基準の 95%に対して余裕をもって満足している。このことから、Case1-4 の *CCV* 累積率曲線を下限の管理基準曲線として *CCV* 累積発生率曲線の管理を行うことで、締固め度が品質管理基準を満足することを間接的に確認できる。

以上より、各施工ロットで計測された *CCV* 累積発生率曲線が Case1-2 と Case1-4 の *CCV* 累積発生率曲線で囲まれる範囲 (**図-4.9 d)**のハッチング範囲) に収まっていれば、透水係数と締固め度の両方について、計測ロット全体が所要の品質を満足していることを間接的に確認できると判断した。

4.3.節に記したとおり、既存の CCC の管理手法では、ロット全体の 90%程度以上が規格値を満足することを確認する事例が多い。これらの事例を参考にして、本ダムの実施工における *CCV* データの評価にあたっては、*CCV* の累積発生率=90%となるとき *CCV* の値 (以後、*CCV* 90%累積値) 以下の範囲で *CCV* 累積発生率曲線が上限の管理基準曲線を超過しないことを確認することとした。

また、含水比が管理上限値に接近すると地盤剛性の変化率が非常に小さくなり推定精度が低下することと、材料の粒度等土質が適切に管理されている条件下では GNSS 管理での CEL 管理と含水比管理が適切に行われていれば乾燥密度については間接的に管理されること、下限の管理基準曲線での現場透水係数 k と $(D_c)_{1Ec}$ の値は品質管理基準値に対して、それぞれ十分に低く十分大きいことから、下限の管理基準曲線は締固め管理における目標曲線として取り扱うものとした。

4.6.2. *CCV* マップを用いた管理

4.4.節で示した「原因を特定できる異常値」を排除することによって、計測ロットの *CCV* 累積発生率曲線が**図-4.9** で示す上下限の管理基準曲線に挟まれた範囲に収まるかどうかを確認することで確実な盛土品質管理が可能になる。

しかし、試行期間中の施工において、頻度は低いものの、4.4.節に記した①振動スイッチの ON/OFF、②前後進の切替、③コア・フィルタ境界、以外の原因による *CCV* の異常値が発生することが確認された。このため、*CCV* の測定値には一定数の異常値が含まれる前提で、以下のように転圧直後の計測ロット毎の管理を行った。

図-4.10、**図-4.11** に、小石原川ダムにおける *CCV* を用いた盛立面での品質管理のフローを示す。*CCV* マップで異常箇所の有無を確認し、異常箇所が発見された場合には目視確認と必要により現場試験を行うことによって品質確認したうえで施工ロットの可否を判定するものである。**図-4.10** は異常値排除プログラムコードの作成前の試行段階のフローで、**図-4.11** が異常値排除プログラムコードの作成後におけるフローである。**図-4.11** では、累積発生率曲線の確認が加わっている。

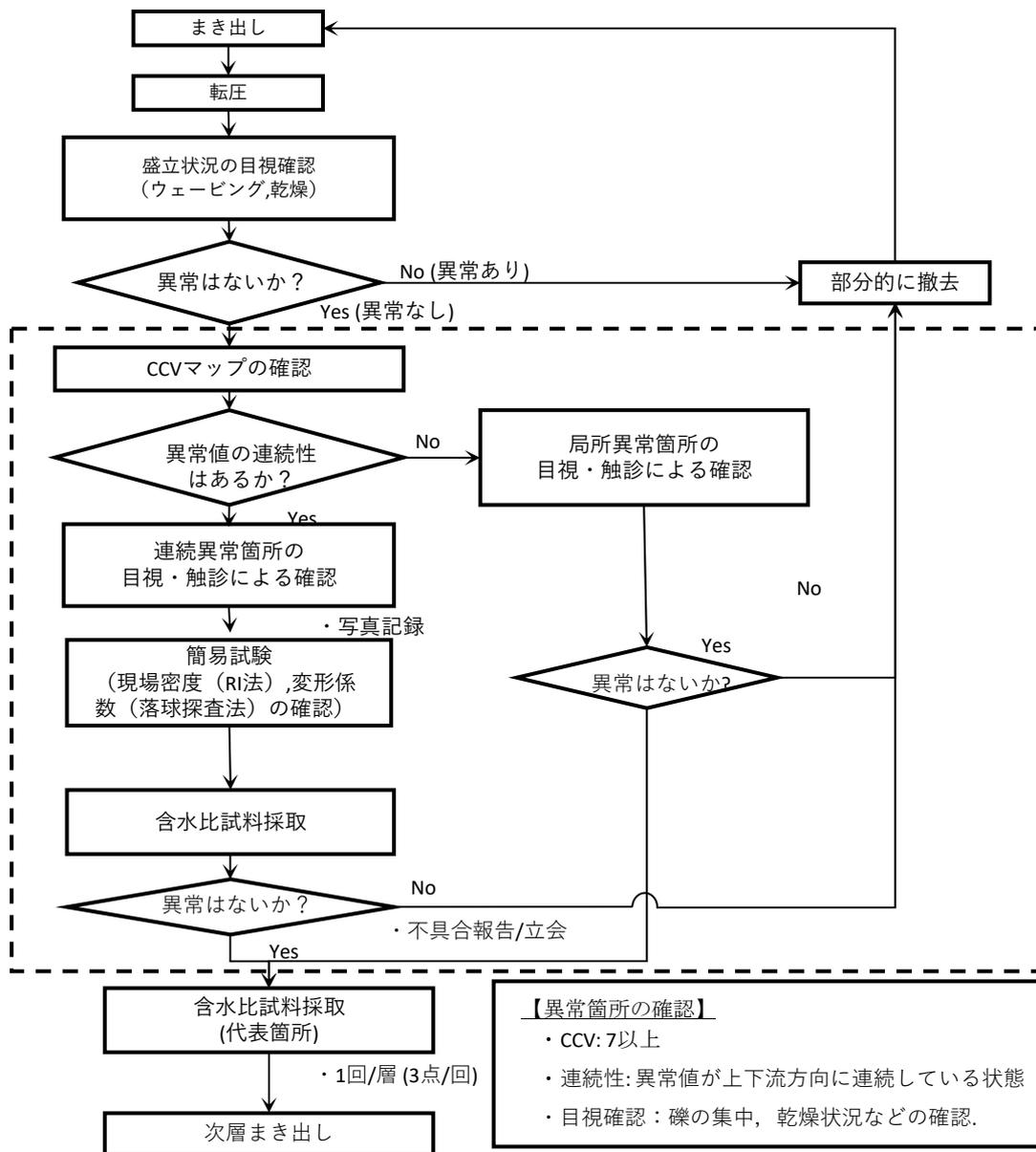


図-4.10 小石原川ダムにおける CCV を用いた盛立面での品質管理フロー (試行時)

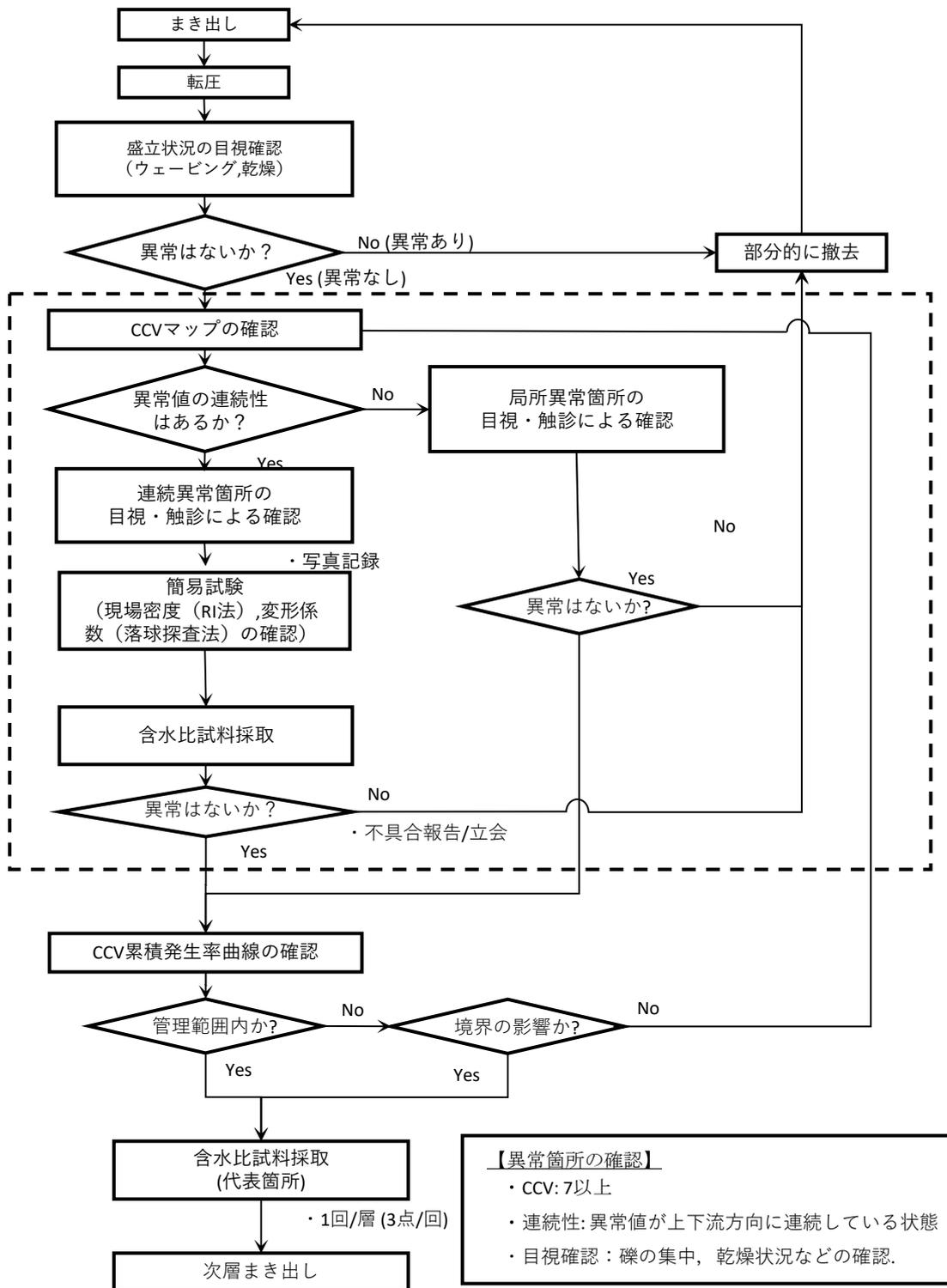


図-4.11 小石原川ダムにおける CCV を用いた盛立面での品質管理フロー (本運用時)

図-4.10 および図-4.11 では、CCVマップで確認された異常値が局所異常である場合は、目視と触診により問題がなければ施工を継続できるものとしている。

管理フローを作成するにあたって、①振動スイッチのON/OFF、②前後進の切替、③コア・フィルタ境界、以外の要因で発生していると考えられるCCVの異常値発生箇所における品質確認試験を複数回実施し、「局所的なCCVの異常発生箇所において、目視・触診により異常を確認されない状態では、品質管理試験の結果に問題ない」ことを確認した。表-4.6にこれらの品質確認試験結果を、図-4.12に品質確認試験を実施した施工ロットのCCVマップ（異常値処理前）を、写真-4.1に確認試験の現場状況を示す。

表-4.6 CCVの局所異常箇所における品質確認試験結果

施工日	施工標高 (EL m)	$(w')_{1Ec}$ ^{※1} (%)	No.	CCV (-)	変形係数 (MPa)	乾燥密度 (g/cm ³)	D値 (%)	透水係数 (cm/s)
2018/9/24	280.6	1.17	No.1	8.4	1.27	2.051	100.6	6.3×10^{-7}
			No.2	9	1.16	2.093	100.3	2.2×10^{-6}
			No.3	11.7	1.24	2.04	99.7	2.5×10^{-6}
2018/9/27	273.4	1.03	No.1	7.2	1.54	2.076	100	9.2×10^{-7}
			No.2	8	1.24	1.947	98.4	3.0×10^{-6}
			No.3	5.6	1.29	2.033	100.3	3.0×10^{-7}
基準値				≤ 6.5 ^{※2}	≤ 7 MPa	≥ 1.73	$\geq 95\%$	$\leq 1.0 \times 10^{-5}$

※1 含水比は搬出時の品質管理試験結果

※2 CCV累積90%値の管理上限値 (=6.5) を参考値として記載

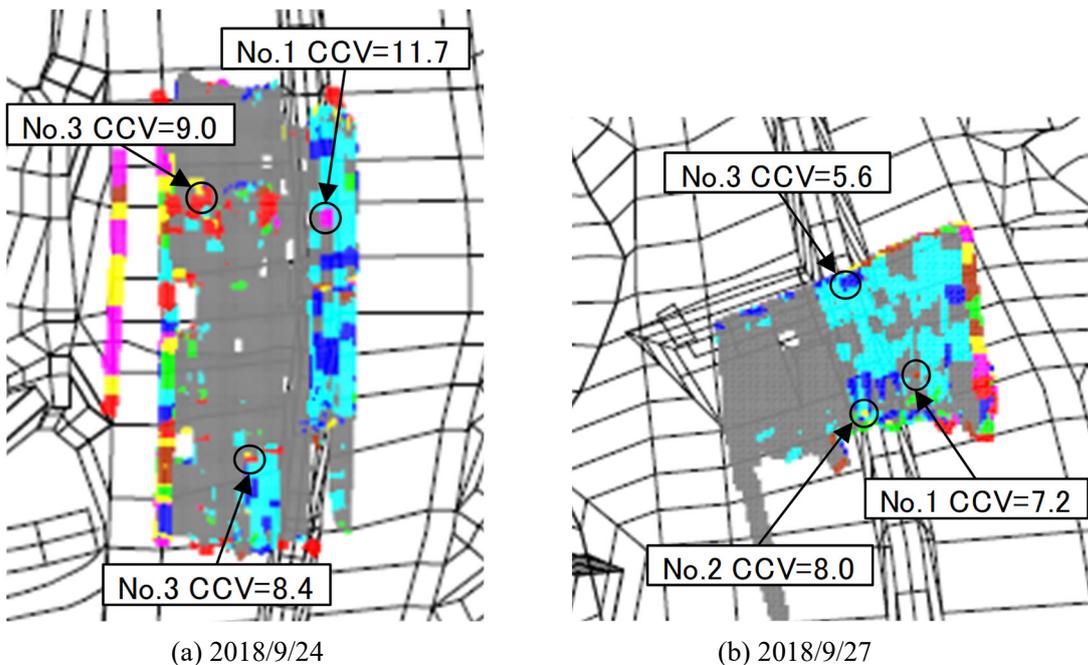
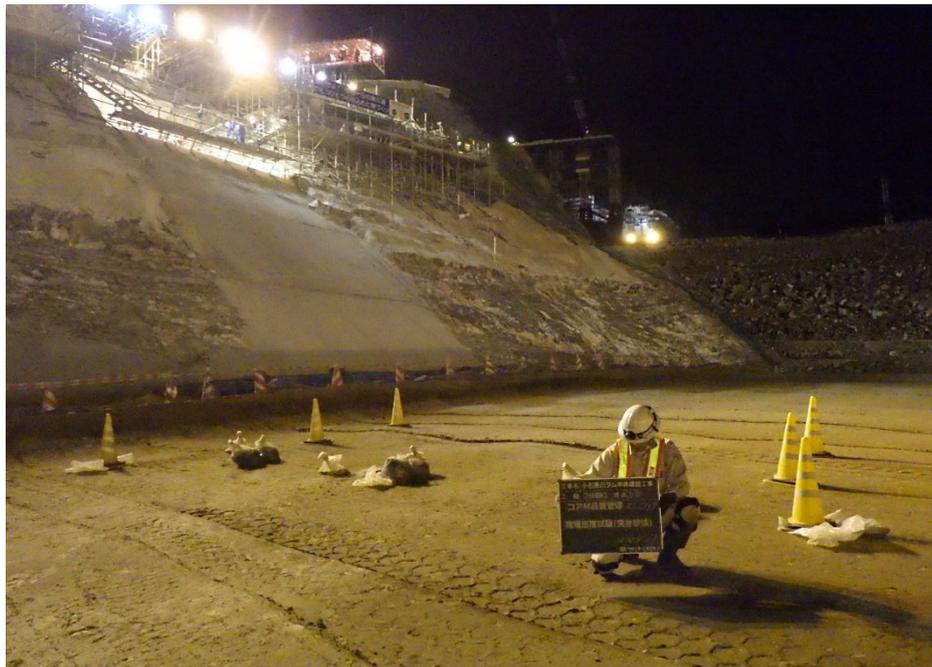


図-4.12 品質確認試験を実施した施工ロットのCCVマップ（異常値処理前）



(a) 2018/9/24



(b) 2018/9/27

写真-4.1 CCV局所異常箇所における品質確認試験の状況

図-4.12 のとおり，CCV が周辺のデータと比べて高い箇所を CCV の局所異常箇所として選定して品質確認試験を実施した（各ロット 3 か所）．これらのエリアは ICT データより，①振動スイッチの ON/OFF，②前後進の切替，③コア・フィルタ境界の影響，は受けていな

いことを確認している。写真-4.1 のとおり、試験を実施した CCV の局所異常箇所は周囲の状況と目視では CCV が参考規格値を満足する箇所(≤ 6.5)との違いを確認できない。このような箇所を 6 点選定し、突き砂法による現場密度試験、現場透水試験、落球探査法による変形係数試験、を実施した。

品質確認試験の結果は表-4.6 のとおりであり、異常は確認されなかった。このため、このような局所異常箇所では前述①～③以外の何らかの理由で、重機の基本振動数に変動する事象が生じ、その結果、CCV の局所異常値が観測されたものと推定された。

これら①～③以外の要因による局所異常値の原因分析とその排除は、小石原川ダム of 施工期間中に実現することは困難と考えられたが、これらの異常箇所の発生は多くはないことから、前述のとおり、一定程度の異常値が発生する前提で、これらの異常箇所については目視・触診により材料の粗粒化や乾燥のような局所異常が発生していないかを確認し、目視・触診で異常がなければ、問題ないものとして処理することとした(図-4.10 および図-4.11)。

4.6.3. 品質管理における位置づけ

本研究では、1 回/日以上 of 頻度で実施する試験を日常管理試験、1~2 回/月程度の頻度で実施する試験を定期管理試験と呼称する。

従来のフィルダムのコアゾーンの品質管理における日常管理試験では、材料の粒度と締固めエネルギーが適切に管理されているという前提のもと、 ρ_d と w の値を確認することで遮水性能を間接的に管理する。

小石原川ダムでは、工事中盤以降、日常管理試験において ρ_d と w に基づく遮水性能の管理の大半を地盤剛性指標 SSI に基づく管理で代替して、品質管理項目と頻度を一部変更した。表-4.7 に変更前後の盛立面での品質管理項目と頻度(抜粋)を示す。表-4.7 に示すとおり、SSI による管理は遮水性能を管理するための日常管理試験の合理化・高度化を図るものであって、定期管理試験の頻度・項目を変更するものではない。

表-4.8 に小石原川ダムにおいて、SSI 管理によって減ずることができた現場密度試験(RI 法)の試験回数と、その結果、減じることができた試験時間を推定した。表-4.8 に示すとおり、小石原川ダムでは日常管理試験の合理化により概算で 1300 時間超の日常管理試験時間が縮減されたと考えられる。

表-4.7 品質管理項目および頻度の変更（抜粋）

	試験項目	試験方法	試験頻度		
			当初	変更1	変更2
定期管理	現場透水係数	JGS1316	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³
	乾燥密度	JGS1611	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³
	粒度	JIS A 1204	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³	1回/月 or 45,000m ³
日常管理	乾燥密度 (締固め状態)	RI法	1回/1層	1回/4層	1回/4層
		GNSS	参考値	1回/1層	1回/1層
	含水比	簡便法	1回/1層	1回/1層	1回/1層
	変形係数	落球探査法	参考値	1回/1層	—
	CCV	ローラ加速度応答法	参考値	参考値	1回/1層

※ 定期管理試験は1回/月，1回/45,000m³を比較して頻度が高くなる方を選択

表-4.8 盛立面での品質管理試験（RI密度試験）の省略まとめ

	RI法 実施ロット数	落球探査法 実施ロット数	CCV 実施ロット数	RI法 省略ロット数	RI法 省略試験点数	省略時間 (hr)
変更1 2018.4~2019.5.16	326	997	997 (参考扱)	671	10,065	894.7
変更2 2019.5.16~	60	-	329	269	4,035	425.9
小計				940	14,100	1,321

※ RI法⇒落球探査法による省略時間：5分/点×15分+データ確認5分

※ 落球探査法⇒CCVによる省略時間：1分/点×15分

4.7. 実施工への適用結果

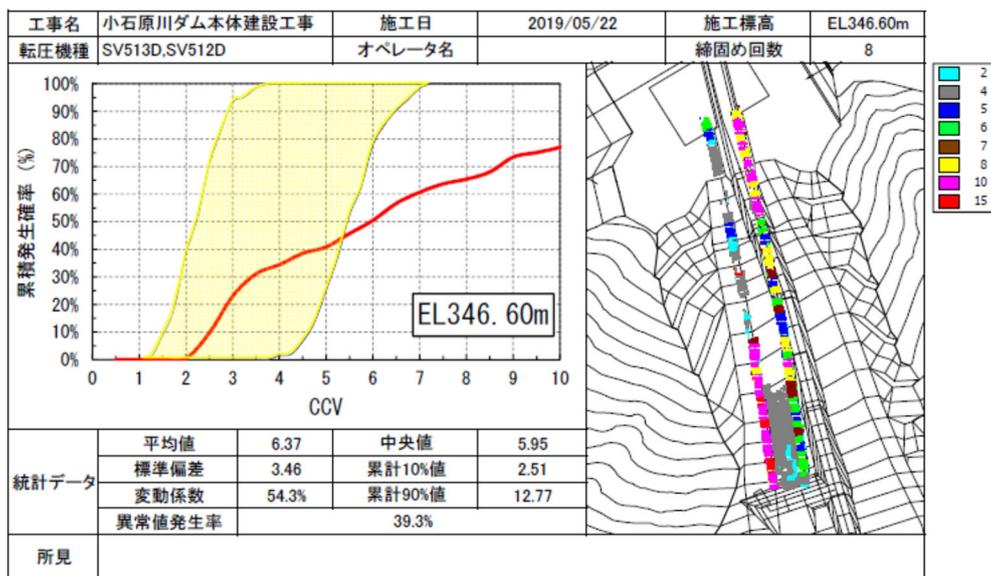
本節では、小石原川ダムにおいて *CCV* による品質管理を適用した 2019 年 5 月から盛立完了までの約 3 カ月間に施工した 305 ロットの面的データを整理・分析した結果を記す。

4.7.1. 整理対象外としたロット

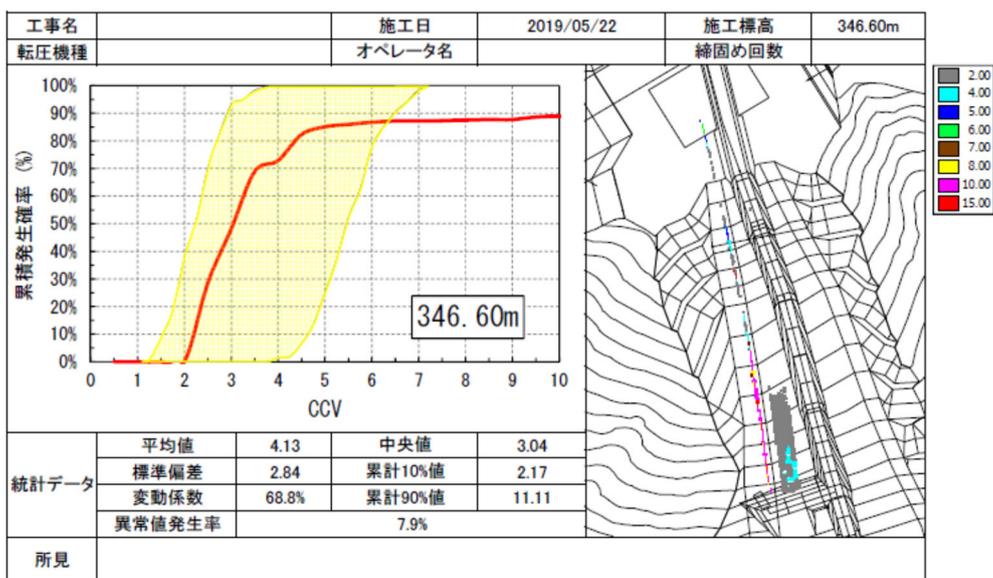
4.4.節に記した棄却範囲の設定ではコア・フィルタ境界での異常値は完全に排除できず、異常値のデータが一部残存する。このため、全ての施工ロットの *CCV* マップを確認し、前述の棄却範囲（コア・フィルタ境界を中心として除外した 7 メッシュ）の外側でも異常値が残存し、その影響で累積発生率=90%において上限の管理基準線を超過していると判断されるロットは整理対象から除外し、残った 252 ロットのデータを整理・解析した。

参考として、**図-4.13(a)**にデータ整理対象外とした施工ロットの *CCV* マップと *CCV* 累積発生率曲線の例を示す。**図-4.13(a)**に示す施工ロットでは、コアの施工範囲は**図-4.13(a)**の着色のある範囲で、施工後にコア・フィルタ境界のみをマップ上部の範囲まで施工しているため、ロットの全施工面積に対する境界の影響範囲が大きいロットである。このため、**図-4.13(a)**の異常値棄却処理前の状態では *CCV* が 7 を超過する異常値の割合が 4 割近い状態であった。4.4.節に記した各種異常値の棄却処理を行った**図-4.13 (b)**においても境界付近の高い *CCV* データが残存しているが、残存する高 *CCV* の範囲はフィルタゾーンであること、その他の範囲には異常がないことから、90%累積値が上限管理曲線を満足しない原因は境界の影響と判断される。このため当該ロットは評価対象から除外するものとした。

評価対象から除外された施工ロットは、いずれも**図-4.13** の例と同様に異常値の棄却処理後も境界の影響が残存しているロットである。なお、実施工では**図-4.10** のフローのとおり、盛立面においてマップデータに基づく目視確認等を行い施工に問題はないことは確認したうえで次層の施工に着手している。



(a) 異常データ棄却前



(b) 異常データ棄却後

図-4.13 データ整理対象外とした施工ロットにおける
CCVマップとCCV累積発生率曲線(例)

4.7.2. 品質管理記録の解析

(1) CCV累積発生率曲線

実施工におけるCCV累積発生率曲線を図-4.14に示す。図-4.14より、整理対象とした全ロットで、累積発生率が90%の時のCCV値は上限の管理基準曲線の左側に収まっている。全ロットの平均曲線は上限の管理基準曲線よりも十分低い範囲に位置しており、遮水性についての全体の品質は問題ないと判断できる。

上限の管理基準曲線を超える CCV の割合が相対的に高いロットでは、個別に CCV マップを確認した。その結果、その多くは高標高部でコア幅が狭くなりコア・フィルタ境界付近の影響が相対的に大きくなっているロットであり、境界付近以外で広範囲に異常値が存在するなどの本質的に問題のあるロットはなかった。

参考として、**図-4.15** に上限の管理基準曲線を超える CCV の割合が相対的に高い施工ロットの CCV マップと CCV 累積発生率曲線の例を示す。

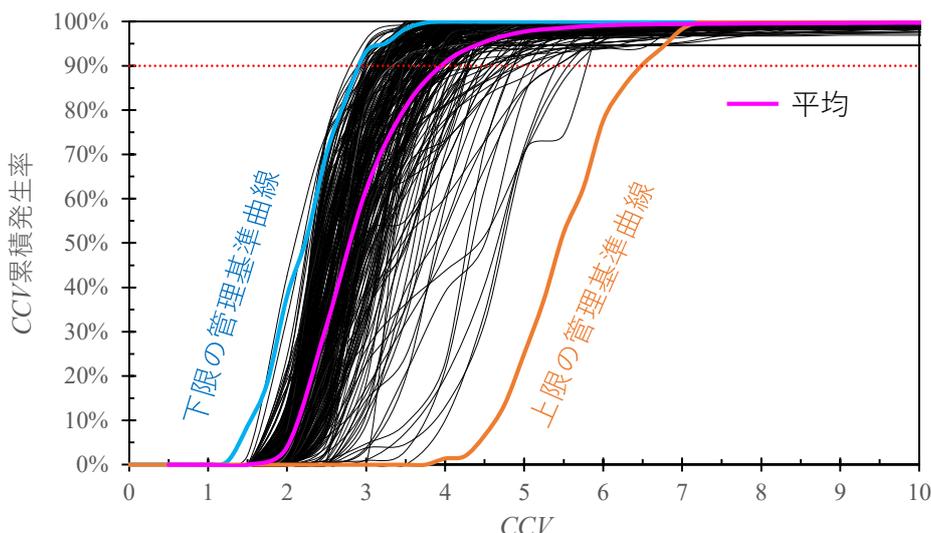


図-4.14 品質管理での CCV 累積発生率曲線 (2019.5~2019.7) ⁶⁾

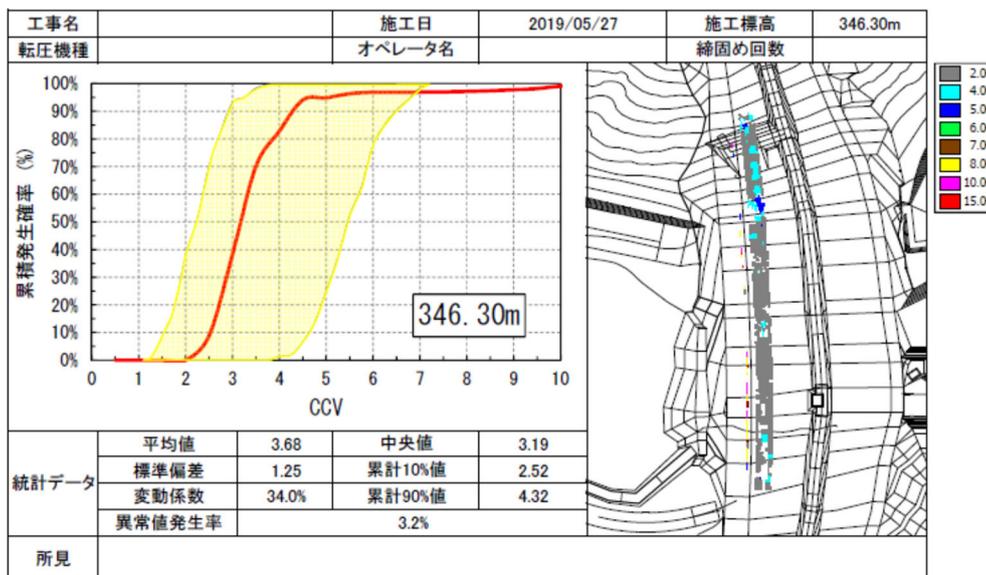


図-4.15 上限の管理基準曲線を超える CCV 計測値の割合が相対的に高い施工ロットにおける CCV マップと CCV 累積発生率曲線 (例)

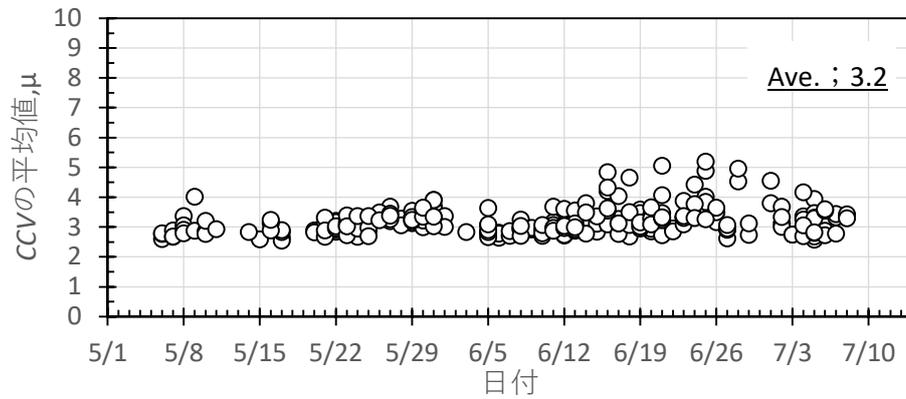
図-4.15 の施工ロットでは下流側のコア・フィルタ境界の影響を受けたデータが異常値棄却後も残存しており、この影響部分によって CCV 累積発生率曲線が累積率が90%を超えた

のちに大きくギャップを作る形で高い *CCV* が発生していることが分かる。このようなケースでは *CCV* マップから「コア・フィルタ境界付近の影響が残存している」ことの影響であることが確認され、施工結果には問題ないものと判断できる。

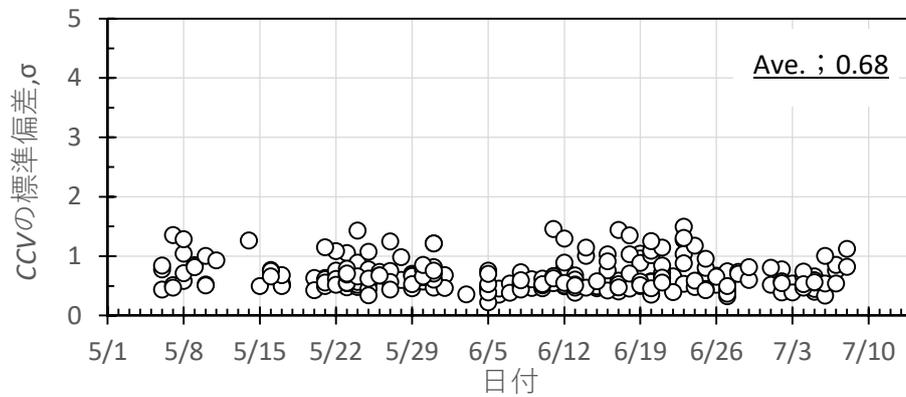
(2) *CCV* 統計処理値

施工ロット毎の *CCV* の統計処理値の推移を図-4.16 に示す。各ロットの *CCV* の平均値 μ は 2~4 を中心に分布しており、*CCV* による管理を実施した期間中の平均値は 3.2 である。各ロットの *CCV* の標準偏差 σ はその多くは 0.3~1.0 に分布しており、平均値は 0.68 である。各ロットの標準偏差はコア・フィルタ境界の影響を受けたデータも含めて算定しているため、境界の影響が極めて小さいと考えられる 138 ロットを抽出すると、標準偏差は 0.2~0.8 となり、その平均値は 0.53 となった。

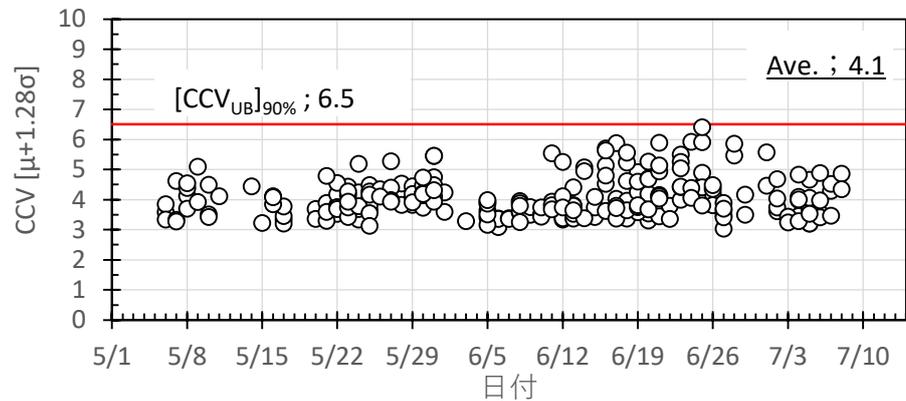
参考として正規分布を仮定した場合の *CCV* 90% 累積値の期待値 ($\mu+1.28\sigma$) の推移も確認したが (図-4.16 c)), 全データで上限の管理基準曲線での *CCV* 90% 累積値 (≈ 6.5) を下回った。また、図-4.7 の変形係数と *CCV* の線形近似式より推定した変形係数 E の管理上限値に対応する *CCV* の値として設定した $CCV=7.0$ に対しはかなり余裕がある。



a) 平均値 μ



b) 標準偏差 σ



c) 90%累積値の期待値 ($\mu + 1.28\sigma$)

図-4.16 品質管理記録_CCV 統計処理値 (ロット毎) の推移⁶⁾

(3) 他の物性値との関係

(3-1) $CCV \sim k$ 関係

実施工での CCV と透水係数 k の関係を図-4.17 に示す (●印). 図-4.17 には, 試行中におけるデータも含めてプロットしており, 盛立試験でのコア材 A(Case1)の結果も併せて示した (◆, ◇印). 図-4.17 のプロットは透水係数の値は1回の試験で実施する3点の試験結果の平均値とし, CCV の値は現場透水試験を実施した3点の位置座標の CCV の平均値をプロットしている.

図-4.17 a) に示す通り, 透水試験実施個所における CCV は全て, 上限管理曲線の 90% 累積値 $[CCV_{UB}]_{90\%}$ ($=6.5$) よりも小さく, 透水係数 k も規格値 k_{cr} より確実に小さい. しかし, 実施工での $CCV \sim k$ 関係は全体的にバラツキが大きく, 盛立試験で確認された相関関係との関係を確認することは出来なかった. そこで, 試験箇所における盛土材の粒度分布が盛立試験と同等であると判断した※施工ロットのデータを抽出し $CCV \sim k$ 関係を再整理した (図-4.17 b)). この結果より, 実施工での使用材料の粒度が盛立試験でのそれと同等の条件であれば, $CCV \sim k$ のプロットは盛立試験の分布範囲に近づくことが分かる. 第3章で記した変形係数 E と透水係数の関係ではこの傾向がより顕著に確認されている (図-3.19). これらの分析は透水試験時には砂置換による現場密度試験と密度試験孔から採取した試料を用いた粒度試験も実施しているために確認できたもので, 小石原川ダムをはじめとした厳しい品質管理基準があるハイダムにおける施工であったため確認できたデータであり, 非常に貴重なデータであると思われる.

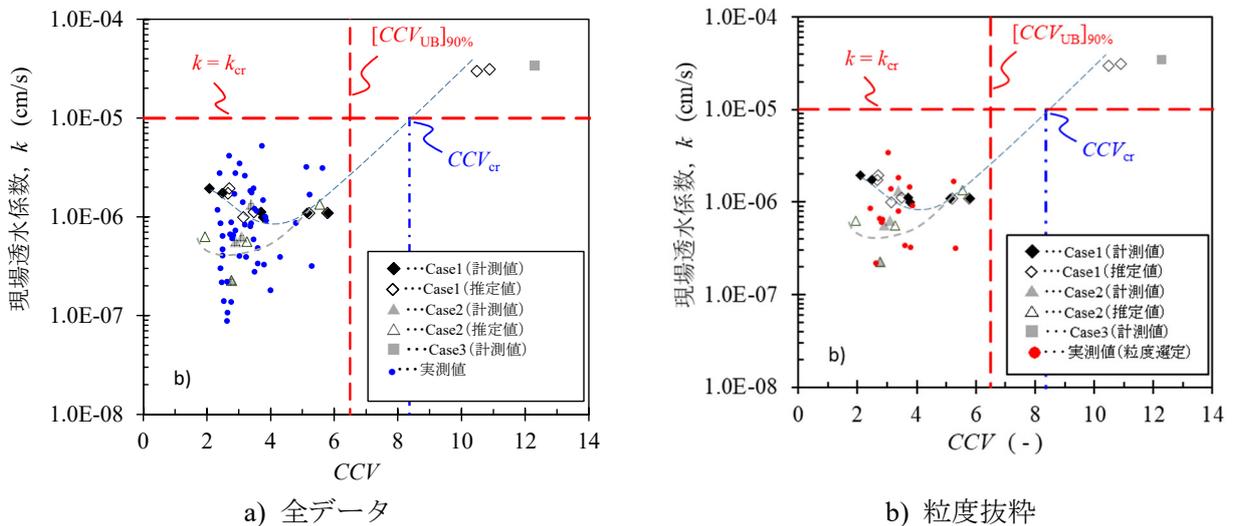


図-4.17 盛立試験と実施工での $CCV \sim k$ 関係の比較⁶⁾

※ 以下の判定式を満足するロットを『粒度分布が試験施工時と同等』と判断した.

※ 判定式は「細粒分含有率,マトリクス分含有率がコアの透水係数への影響度が大きい」という経験的な知見に基づき独自に設定した.

粒度判定指標 $X \leq 2.0$

粒度判定指標 $X = |F_{c_0} - F_c + M_0 - M|$

F_{c_0} : 試験施工時の細粒分含有率 (-0.075mm 含有率, 25%)

F_c : 密度試験孔試料の細粒分含有率 (-0.075mm 含有率)

M_0 : 試験施工時のマトリクス分含有率 (-4.75mm 含有率, 54%)

M : 密度試験孔試料の細粒分含有率 (-4.75mm 含有率)

(3-2) $CCV \sim \rho_d$ 関係

実施工での CCV と乾燥密度 ρ_d の関係を図-4.18 に示す (○印). データプロットは, 乾燥密度は, 透水試験時に実施した突き砂試験に基づく乾燥密度 (-37.5mm 粒度に換算した値) について, 1 回の品質管理試験で実施する 3 点の試験結果の平均値をプロットし, CCV の値は現場密度試験を実施した 3 点の位置座標の CCV の平均値をプロットしている.

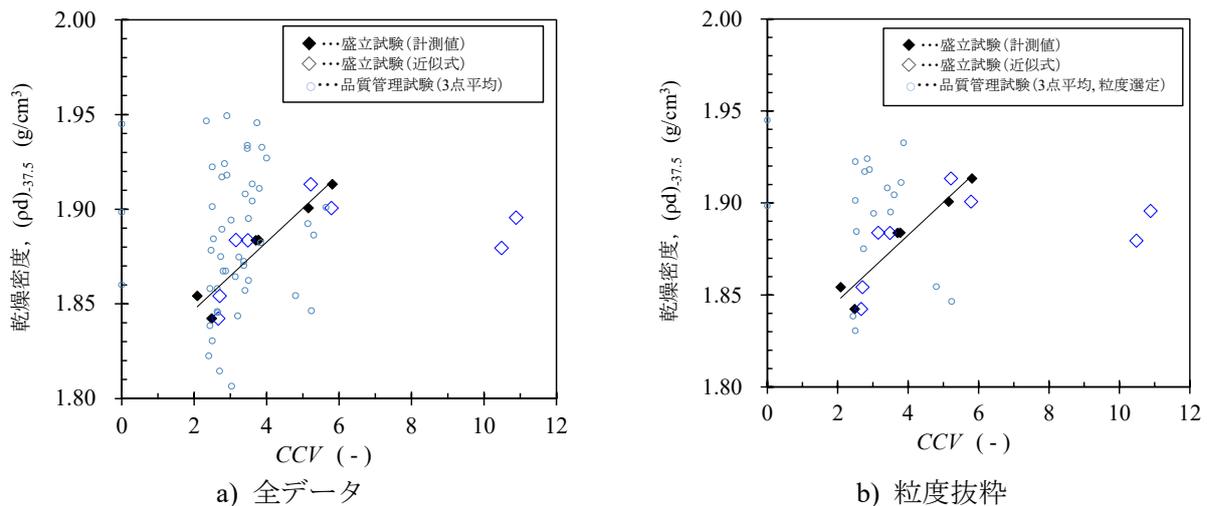


図-4.18 盛立試験と実施工での $CCV \sim \rho_d$ 関係の比較

図-4.18 a) に示す通り, 実施工での $CCV \sim \rho_d$ 関係は全体的にバラツキが大きく, 盛立試験で確認された相関関係との関係を確認することができない. そこで, 試験箇所における盛土材の粒度分布が盛立試験と同等であると確認できた施工ロットのデータを抽出し $CCV \sim \rho_d$ 関係を再整理した (図-4.18 b)).

$CCV \sim \rho_d$ 関係は試験施工と類似の粒度を選定してもそのバラツキの状況は大きく改善しなかった. 図より, 相対的に CCV が低い施工ロットにおいて, 高い密度が確認されている. この傾向は感覚的に違和感がある.

図-4.19 に, $w \sim \rho_d$ 平面, $SSI \sim \rho_d$ 平面における w, ρ_d , SSI の関係のイメージと, 盛立試験の結果を記す. 図-4.19 a), b) は, 図-3.12 及び図-3.13 に示した実際の室内試験と盛立試験に基づく

グラフを参照に作成したイメージ図である。同図は最適含水比よりも湿潤側（若しくは乾燥側）のみにデータを制限した場合には、SSI と ρ_d の相関は見られるが、最適含水比付近では、相関がなくなることを示している。

実施工での含水比は、大部分の施工ロット(w_{opt})_{CELf} よりも湿潤側で管理されているため、**図-4.18 b)**のデータは想定よりもバラツキが大きい印象を受ける (**図-4.18 c)**。この要因として、管理剛性コンターと密度評価においては、今回の使用材料では礫率補正を行うことから、粒度判定指数 X が同等であっても礫率が大きく異なると礫補正の影響が大きく表れる可能性が考えられた。

また、A材とB材では、ブレンド前の母材が異なるため、B材の方が締固め後の乾燥密度が高い傾向がある (**図-2.10**)。そこで、A材を使用していた期間のデータを対象に、Case1における平均礫率は90%であるため90±2%のデータを抽出した (**図-4.20**)。ここまで材料を選定すると、データのバラツキは盛立試験の結果にかなり近づく (**図-4.20 b)**)。

しかし、実施工ではここまで厳密な粒度管理を行うことは現実的ではないことから、剛性指標で乾燥密度を管理することは困難と考えられる。

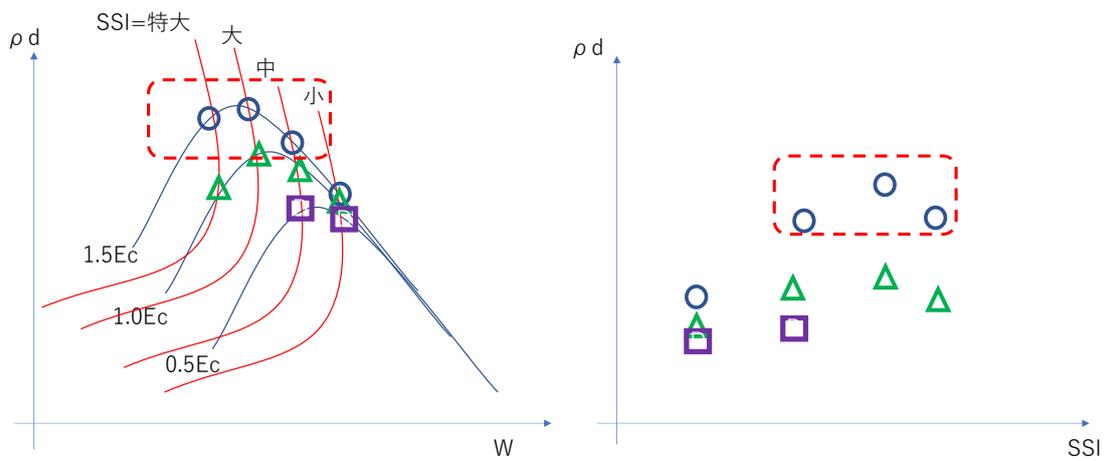
一般土工よりも厳しい管理基準で材料管理を行うフィルダムの施工でもこのような結果となっており、現地発生材の使用を基本とする道路盛土等の一般土工では（特に発生材の土質が高含水比材料であった場合）、SSI と乾燥密度の相関はさらに低くなると思われる。

また、より良い締固め状態を実現することを追求すると、最適含水比付近での締固めを目指すことになり、このような場合では**図-4.19 c)**に示すSSI と ρ_d の相関が低い領域(A)にプロットされるデータが相対的に増えるため、CCVをはじめとするSSIによる密度管理は困難になると想定される。

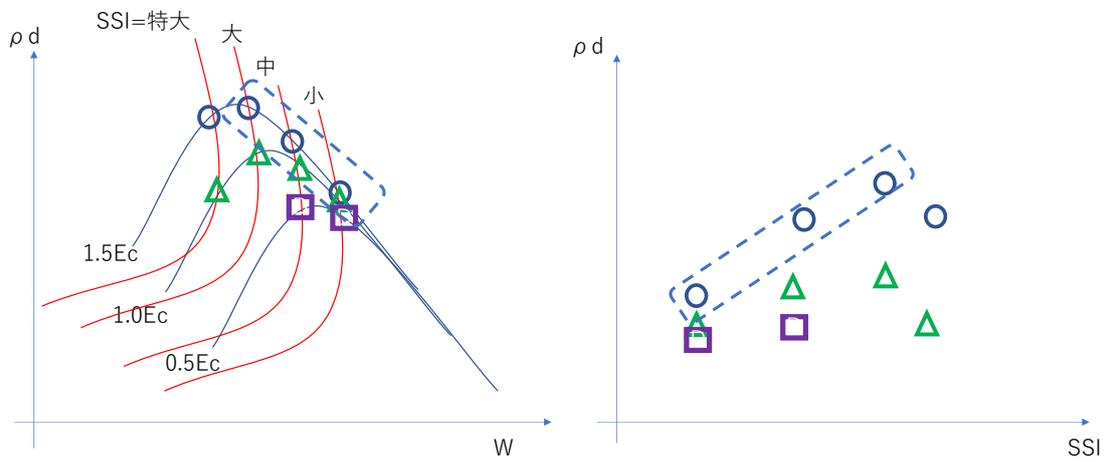
以上より、密度管理にあたっては、CCV の下限値で管理するのではなく、通常の一般土工と同様に締固めエネルギーを管理することで担保することが妥当と考える。

また、**図-4.18~20**に示す試験施工のデータプロットは密度変化が概ね収束するN=6, 8のデータをプロットしていてCELは概ね固定されており、CCVの変化は含水比の変化を示している。すなわち、CELが固定された条件の下ではCCVは乾燥密度 ρ_d の指標ではなく、含水比 w の指標となっていると言える。透水係数は、一定のCELの下では乾燥密度よりも飽和度の強い関数であり、含水比の強い関数となっている。したがって、本プロジェクトでは、CCVは透水係数の指標となっている。

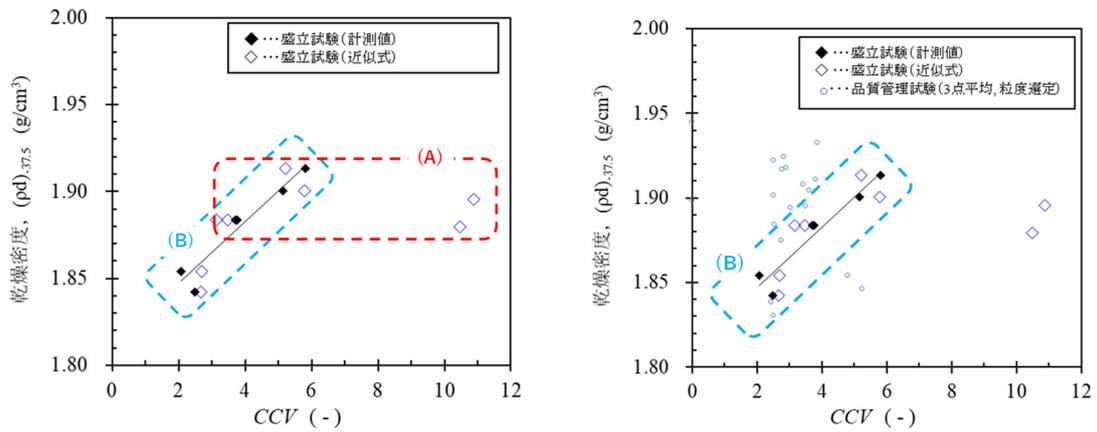
なお、米国では『所要のSSIに応じて起振力を自動調整する』計測結果から施工へのフィードバックの検討も行われ、これらが可能となる施工管理をIntelligent Compactionとして位置づけている。しかし、施工過程で締固めエネルギーが変化すると、現場締固め曲線は変化しその位置を正確に把握し続けることは困難である。すなわち、計測したSSIの等高線と現場締固め曲線の交点である現場締固め状態の位置を求めることは難しくなる。このようにSSIの計測値の評価が複雑化するため、実施工に反映するには慎重な検討が必要ではないかと考える。



a) SSI と ρ_d の相関が不明瞭な領域 (イメージ)

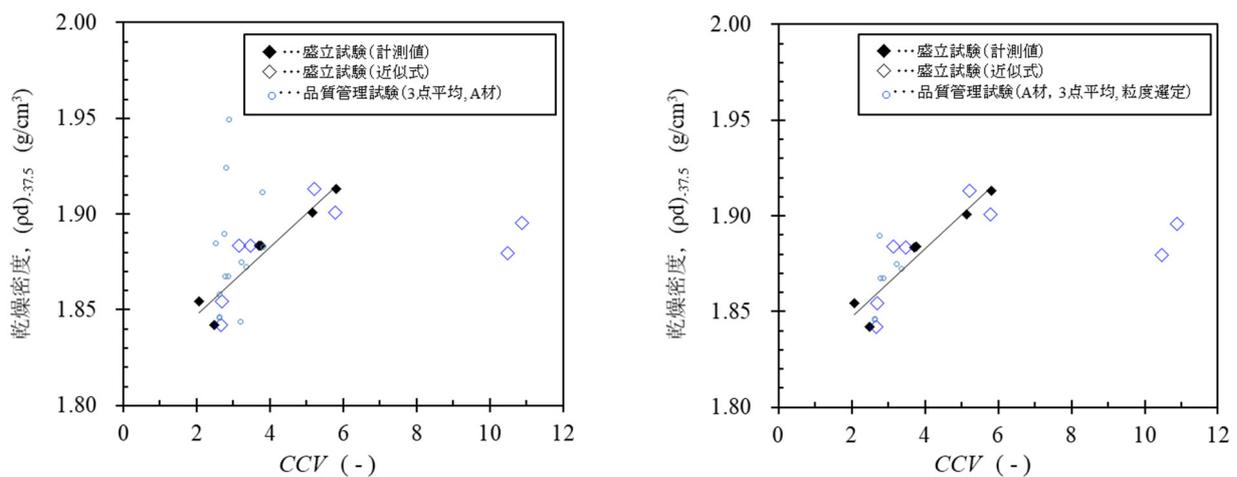


b) SSI と ρ_d の相関が比較的明瞭な領域 (イメージ)



c) 盛立試験 (A 材) 及び実施工 (粒度抜粋) の CCV $\sim\rho_d$ 関係

図-4.19 SSI $\sim\rho_d$ の一般的な関係のイメージと実務でのバラツキ



(a) A 材全データ (3 点平均)

(b) A 材粒度抜粋 (3 点平均)

図-4.20 盛立試験と実施工での $CCV \sim p_d$ 関係の比較 (粒度抜粋 2)

4.8. 現状の課題に関する考察

4.7.にて、小石原川ダム本体建設工事のコアゾーンの实施工における、 CCV データを解析した結果、各ロットの CCV 累積発生率曲線の 90%累積値は全て上限の管理基準値を満足し、現場透水係数 k も全点で管理基準値より小さいことを確認した。しかし、小石原川ダムで適用した CCV に基づく遮水性の面的管理法は、以下に記す改善の余地がある。

- ① 異常値のより客観的な棄却法
- ② 異常値棄却のデータの減少による品質評価に活用できるデータの増加
- ③ 盛土材が細粒化した場合での計測感度の低下への対応
- ④ 締固め層より下層の剛性の影響の評価
- ⑤ 適用条件と拡張性

今後のプロジェクトにおいて、上記の①～⑤の課題解決のために取り得る対応について以下に、考察する。

課題①②については、基本振動数の変動の影響を受ける加速度応答スペクトル指標ではどの指標でも影響を受けるものと想定される。このため、この点で加速度応答スペクトル指標は不利になる。RMV には、 CCV などの加速度応答スペクトル指標の他にも、Amman 社の k_b や Bomag 社の E_{VIB} など計測された加速度から地盤反力と変位量を解析して剛性値や振動係数を算出する手法⁴⁾や材料特性に応じた機械出力を示す MDP (Caterpillar 社)、無振ローラの走行時のひずみ計測結果の解析により剛性値を算出するローラたわみ法²⁶⁾などがある。これらの指標では基本振動数の変動の影響は受けにくいものと考えられ、①②の課題を低減できる可能性がある。

課題③については、地盤剛性指標 SSI の小さい材料に対する計測精度・感度の課題であり、複数の指標で比較が必要になる。遮水性材料のように含水比が高く剛性が比較的低い状態での評価が重要となる盛土管理においては、特定の指標にとらわれず、より正確な評価が可能な指標を比較検討することも必要である。

参考文献 2)からは加速度応答スペクトル指標よりも、 k_b , E_{vib} , MDP といった指標の方が、SSI が低い盛土材に対しては適用性が高いと思われ、特に MDP は粘性材料への適用を想定して開発された指標であるとされている²⁾。このため、今後、フィルダム遮水ゾーンへ CCC の適用を検討する際には、MDP は優先して適用検討をすべき指標と考えられる。

課題④についてはローラ加速度応答法によるすべての指標の有する課題であるが、小石原川ダムの施工仕様と転圧重機の組み合わせにおいては、大きな問題はなかったと考えている。以下にその理由を記す。

フィルダムの遮水ゾーンでは施工層と施工層の境界部の馴染みをよくするために、撒き出し作業前にはレーキング処理を行う。このレーキングにより下層に若干の緩みが生じるため、CCV はその影響も含めて評価されることになる。これに対して、小石原川ダムでは盛立試験の結果から、適用した締固め仕様（採用重機、転圧回数、仕上がり厚）に応じて定まる締固め範囲が適切であり、下層に緩み層が残存しなかったと判断している。図-4.21 は小石原川ダムではコア盛立試験において、2 孔式 RI 試験機により深度方向の締固め状態の計測結果²⁰⁾である。遮水性盛土で実施するレーキングは、3~5cm 程度の深さを目標に実施するが、図-4.21 より、3 層目の施工前は計測用ケーシングの設置の影響により 2 層目の表面から 10cm~20cm 程度の範囲で密度低下が生じている。実施工でもレーキングにより同様のゆるみが生じると想定されるが、3 層目の転圧後には、この密度低下が生じた範囲を含む表層から 40~50cm の範囲で概ね均一な密度に締固めが行われている。この事実より、計測した CCV は施工層の直下層の再施工範囲も含めた締固め状態を評価しているが、レーキング時のゆるみは改善された状態での評価となっていると判断した。

一方、4.5.に記したとおり、本研究で粗粒化と材料乾燥の影響を受けた条件 (Case3) での盛立試験を実施している。この試験施工場所は、実際のコアゾーンを基盤として試験施工を行っており、直下層は通常のコアゾーンである。このような「下層の材料の粒度と含水比に問題がない条件」においても、材料の粒度と含水比が不適切な条件での施工で計測された CCV は、図-4.6 に示すとおり、規格を満足しない結果が得られているため、小石原川ダムでの CCV 管理の実務適用においては、「計測値が下層の影響を受けるという課題はありつつも、遮水性の異常を判断する指標として使用することは可能」と判断した。

以上をまとめると、課題①~③については MDP をはじめとした応答スペクトル指標以外の RMV の適用検討を行うこと、課題④については試験施工時に鉛直方向の密度分布を確認することで、下層の影響をある程度払拭できるものと考えられる。

なお、鉛直方向の密度分布に関する計測結果については、他の試験法による計測結果も含めて付録 A に取りまとめた。詳細はこちらを参照されたい。

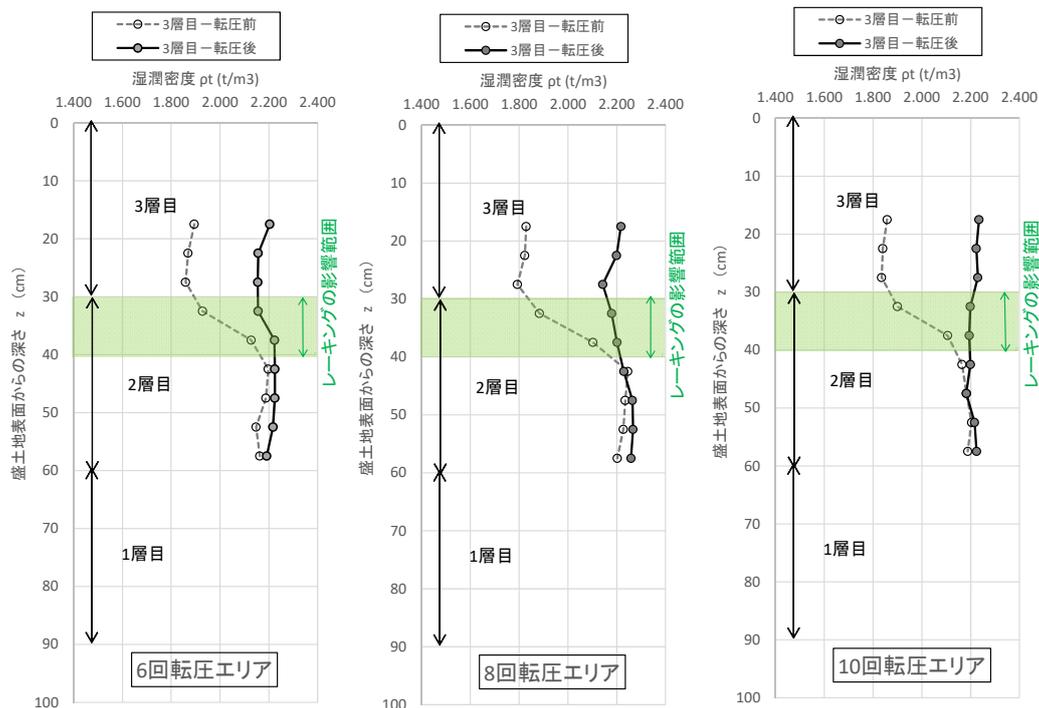


図-4.21 コア内の密度分布（2孔式RI試験結果）²⁰⁾

なお、一般土工などで、施工層の境界においてレーキングを実施しない場合には、先に紹介した「ローラたわみ法」の優位性が高いと思われる。ローラたわみ法は無振ローラでの計測となるため、下層の影響を受けにくい計測方法であるといえる。ローラたわみ法の計測値に影響を与える深度が施工仕様の仕上り厚とのバランスが適切であればより、転圧と同時の剛性計測できないという欠点はあるものの課題④に対しては優位な指標（計測法）になる可能性がある。

課題⑤について、締固め土の工学的性質は地盤剛性の計測結果が同一でも土質とCELの影響で大きく変化するため、土質とCELが適切に管理された条件下でなければ本研究で提案する「地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法」（以後、「SSIの上下限值管理法」）は適用できない。

このため、「SSIの上下限值管理法」は盛土材料の土質を厳密に管理するフィルダムコアゾーンの施工との親和性が高いといえる。一方、道路や鉄道のような一般土工では、ICT施工によるCEL管理については一般的になりつつあるものの、材料については現地発生材をそのまま利用することが基本であるため、含水比と土質の均一性を確保することが難しく、「土質の均一性」の適用条件を満足しない。

一方で、散乱型RI計測のような含水比を面的に計測する新技術の開発が進められており、含水比の面的な計測が可能になれば、本管理法では剛性を含水比の指標としていたが、粒度の指標として置き換えられる可能性がある。これらの評価は今後の課題といえる。

【参考】剛性指標を用いた転圧回数管理の可能性について

本研究に関する拡張性に関連して、「定量的なデータの特徴を生かして転圧回数を弾力的に調整するといった施工管理の合理化に繋げることはできないか？」といった議論があった。この問いに対しては「剛性値に応じた転圧完了判断（転圧回数の調整）」は盛土材、盛土構造物に応じた目標締固め範囲によっては実現できる可能性がある、と考えている。

本研究の対象である遮水性盛土の場合、目標締固め範囲が最適飽和度付近を目標としており、締固めエネルギーが比較的小さい範囲から剛性が変化しないため、剛性値だけで締固め状態を把握することは難しい。このため、CEL（撤出厚・転圧回数等）をICTで管理することで物性曲線を固定したうえで剛性を評価するという管理法を考案しており「剛性値に応じた転圧完了判断」は不可能である。

これに対して、現場CELの最適含水比よりも乾燥側の施工では、一定のCEL以下では従来型の剛性管理の前提であるCELと剛性の正の相関が認められる傾向がある。このような場合は、剛性指標に応じた転圧完了判断が可能になる。ただし乾燥側の締固めでは、材料によっては浸水コラプスの可能性があり総合的な判断が必要である。

『粒度が一定幅で管理できる現場条件で、4Ec等の非常に高いCELを基本とする場合』には、材料が高含水比状態の場合には過転圧状態になる可能性が高く、含水比に応じてCELを調整することが望まれる。このような場合、粒度が一定に近ければ剛性は含水比の指標となるので、剛性の計測結果（＝含水比の間接的な計測結果）に応じて転圧回数を調整する（或いは含水状態が不適切として撤去・再施工する）という管理も可能と考えられる。ただし、含水比変化に応じた剛性の変化が明確に確認できる土質であること、剛性の計測精度が高いこと、を現場盛立試験で確認する必要がある。

締固め状態ならびに地盤剛性指標SSIは締固め時の「土質」、「含水比」、「CEL」に応じて変動する。提案する「SSIの上下限值管理法」はSSIの3つ変動要因のうち2つを固定し、残る1つの変動要因によるSSIへの影響と締固め状態の関連性を明らかにして管理するものといえる。ここで粒度がバラつくのであれば、「含水比は一定である」か「含水比は別に管理している」ことでSSIを粒度と関連付けることが可能になる。前者の場合であれば、3～5ケース程度の盛立試験により関係性の把握は可能と考えられる。後者の場合（＝含水比の面的管理がなされている場合）、各含水比に応じた粒度～剛性の関係を把握する必要があり、一つのプロジェクトの中で評価を行うのは困難で、多数の現場のデータから体系的な整理を行うような整理が必要になると思われる。

4.9. まとめ

第4章では、第3章で記した「地盤剛性指標の上下限值管理による盛土の締固め状態の管理手法」において地盤剛性指標に Roller Measurement Value (RMV) と呼ばれる転圧機に設置された加速度計記録を解析することで得られる指標を採用することで、遮水性盛土における Continues Compaction Control (CCC)を実現するための検討を行った。また、検討結果に基づき CCCによる遮水性盛土の管理法を構築し、実施工に適用した、さらに、実施工での品質管理記録の分析結果、実務適用を経て得られた課題等、について取り纏めた。以下、得られた技術的知見をまとめる。

- 1) ローラ加速度応答法による計測記録 (Roller Measurement Value, RMV) を用いた連続的な盛土の品質管理法 (Continues Compaction Control, CCC)に関する国内外の事例を調査し、とりまとめた。この結果、既存の CCC は①地盤剛性指標(Soil Stiffness Index, SSI)の下限値管理或いは変化率管理であること、②地盤剛性に与える含水比や締固めエネルギーの評価が不十分であり①の管理法の適用にあたって諸課題が未解決である、ことを確認した。
- 2) 小石原川ダムの遮水ゾーンの建設において RMV に CCV(Compaction Control Value; SAKAI)を採用して CCC の適用検討を行った。盛立試験および実施工 (試行期間中) の CCV データには局所的に異常に高い計測値が認められた。データの詳細な分析により、これらの異常値の発生原因の多くは、①振動スイッチの ON/OFF, ②前後進の切替,③異種ゾーンとの境界部分の施工,であることを明らかにし、それらの棄却ルールを定めた。
- 3) 2)で定めたルールに則った異常値棄却後のデータ群を用いた遮水性の評価法と、その評価法に基づく現場管理を行うための管理フローを作成することで、遮水性盛土における CCC 型の管理法を構築した。
- 4) 3)の管理法を、小石原川ダム本体建設工事のコアゾーンの品質管理法として適用した。適用期間は 2019 年 5 月～7 月の 3 カ月間である。その品質管理記録を解析した結果、1) の管理手法によって現場透水係数 k を適切に管理ができることを確認した。
- 5) 3)の管理法によって基本的な品質は問題なく確認できたが、異常に高い計測値の客観的棄却法、棄却に伴う評価データの減少、盛土材の細粒化時の計測感度の低下、粘性材料の締固めに対して感度のよい RMV の研究、などの課題が残されていることを確認した。
- 6) 本論文で提案する地盤剛性指標に基づく遮水性盛土の面的管理は、従来の下限值管理ではなく上下限值管理を基本としている。特に透水性管理は上限値管理に基づいているこ

とが特徴であり，盛土材料の土質と現場の締固めエネルギーレベル CEL_f が適切に管理されることが前提である．

- 7) 6)の前提条件があるため，現地発生材をそのまま盛土材として使用する一般土工へは適用できない．剛性以外の物性を定量的に評価する技術が開発されれば，本技術との組み合わせにより，地盤剛性指標を用いた管理法の適用範囲は更に広がる可能性がある．
- 8) 本論文で提案する地盤剛性指標に基づく遮水性盛土の面的管理法は，遮水性盛土だけではなく，築堤後の浸水によるコラップス変形の可能性を排除し湿潤化・飽和化後の変形と安定性を確保する必要がある盛土構造物にも適用することが望ましい．

参考文献

- 1) 坂本博紀, 小林弘明, 龍岡文夫, 曾田英揮: 遮水性盛土の地盤剛性指標に基づく締固め管理, 土木工学会論文集 C (地圏工学), 76 卷 3 号, pp.221-234, 2020
- 2) Michael A. Mooney, Robert V. Rinehart, Norman W. Facas, Odon M. Musimbi, David J. White, and Pavana K. R. Vennapusa : Intelligent Soil Compaction Systems, *National Cooperative Highway Research Program*, NCHRP Report 676, 2010.
- 3) International Society for Intelligent Construction: Intelligent Compaction, <https://www.is-ic.org/library/intelligent-compaction/>, 2017.
- 4) Federal Highway Administration: Accelerated Implementation Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials Final Report, 2010
- 5) Federal Highway Administration: Intelligent Compaction Technology for Soils , 2014
- 6) 坂本 博紀, 小林 弘明, 龍岡 文夫, 福島 雅人 : 盛土締固めにおける遮水性能の面的管理法の開発と適用事例, *ダム工学*, 31 卷 1 号 pp. 27-39, 2021.
- 7) 土木学会 建設用ロボット委員会 振動ローラの振動計測による締固め施工管理手法の確立に向けた研究ワーキンググループー振動締固めに関する研究 WGー : WG 活動報告書 (令和 3 年 9 月) , 2021.
- 8) Thurner, H, and Å. Sandström : A New Device for Instant Compaction Control, *Proceedings of the International Conference on Compaction*, Vol. II, Paris, 1980
- 9) Foessblad, L: Compaction Meter on Vibrating Rollers for Improved Compaction Control, *Proceedings of the International Conference on Compaction*, Vol. II, Paris, pp. 541–546, 1980
- 10) Machet, J.M : Compactor-Mounted Control Devices, *Proceedings, International Conference on Compaction*, Vol. II, Paris, pp.577–581, 1980
- 11) Scherocman, J, S. Rakowski, and K. Uchiyama: Intelligent Compaction, Does It Exist? , *Proceedings of the Annual Conference - Canadian Technical Asphalt Association*, No. 52, pp. 373–398. 2007
- 12) White, D.J, T. Rupnow, and H. Ceylan : Influence of Subgrade/Subbase Nonuniformity on Pavement Performance, *Proceedings, Geo-Trans 2004 - Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, Geotechnical Special Publication No. 126, ASCE, pp.1058–1065, 2004
- 13) White, D, and M. Thompson : Relationships Between In Situ and Roller-Integrated Compaction Measurements for Granular Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 134, No. 12, pp.1763-1770, 2008
- 14) Thompson, M, and D. White: Estimating Compaction of Cohesive Soils from Machine Drive Power, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 134, No.12, pp. 1771–1777, 2008

- 15) White, D, M. Thompson, and P. Vennapusa : Field Validation of Intelligent Compaction Monitoring Technology for Unbound Material. *Minnesota Department of Transportation*, St. Paul, pp. 123–164, 2008
- 16) White, D, M. Thompson, P. Vennapusa, and J. Siekmeier : Implementing Intelligent Compaction Specifications on Minnesota TH64: Synopsis of Measurement Values, Data Management and Geostatistical Analysis, *Transportation Research Record 2045*, pp.1-9, 2008
- 17) Kröber, W, R. Floss, and W. Wallrath : Dynamic Soil Stiffness as Quality Criterion for Soil Compaction, *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures*, A.A. Balkema Publishers, Lisse/Abingdon/Exton (Pa)/Tokyo,2001
- 18) Anderegg, R, and K. Kaufmann : Intelligent Compaction with Vibratory Rollers, *Transportation Research Record 1868*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 124–134, 2004
- 19) NEXCO : 土工施工管理要領（平成 29 年 4 月）参考資料, pp.参 127-165, 2017
- 20) 坂本博紀, 福島雅人, 日野浩二 : 小石原川ダムにおけるコア盛立の高度化・合理化の検討, *ダム技術*, No. 390, pp. 52-65, 2019.

第 5 章

第5章 遮水性盛土の総合的な品質管理法.....	5-1
5.1. 基本的な考え方	5-1
5.2. 搬出時の全量管理（粒度・含水比）	5-3
5.2.1. 粒度の全量管理	5-3
5.2.2. 含水比の全量管理	5-6
5.3. 締固めエネルギーの全量管理	5-10
5.4. 地盤剛性の全量管理	5-11
5.5. 締固め状態（含水比・締固め度・飽和度）の管理範囲の改善.....	5-13
5.6. クラウド管理によるリアルタイム監視.....	5-15
5.7. 開発技術の拡張性	5-16
5.8. まとめ	5-17
参考文献	5-18

第5章 遮水性盛土の総合的な品質管理法

第1章から第4章において、著者らが小石原川ダムの本体建設工事で実施した検討や実施工での品質管理記録の解析結果を記した。本章ではこれらの検討結果を踏まえて小石原川ダムで導入した総合的な品質管理法について紹介する。

5.1. 基本的な考え方

盛土に求められる強度、剛性、遮水性能（或いは透水性能）、築堤後の圧密沈下特性、などの工学的特性は、盛土の締固め条件である「土質」、「含水比」、「CEL」により概ね規定される。実施工での品質管理・施工管理では大きく以下の4つの段階での確認が行われる。なお、確認する項目、方法、頻度については盛土構造物によって異なる。

- [1] 材料採取時、材料製造時における品質確認（主に粒度、含水比）
- [2] 材料搬出時における品質確認（主に粒度、含水比）
- [3] 現場施工時の施工仕様規定の履行確認（CEL）
- [4] 締固め後の品質確認試験（乾燥密度、含水比、SSI、透水係数、...etc）

[1]～[3]の締固め条件の管理については、実施頻度は現実的に実施可能な頻度で設定されるため、従来は抜取検査と仕様規定で対応していた。これに対して、[2],[3]について全量管理が可能になれば、全ての盛土箇所での締固め条件が把握されていることとなり、[4]の締固め後の確認試験は大幅に省略することが可能になると考えた。

ICTの進歩により、GNSS管理によりCELの全量管理は既の実現可能であり、小石原川ダムでは土質と含水比についても後述するICT施工の技術提案があり、[2],[3]の全量管理は実現可能な状況であった。しかし、含水比は搬出時点での値が確認されたとしても、その後の運搬～撤出～転圧の過程において含水比は変化する。特に夏季は材料が乾燥し易く、搬出時に確認された含水比で締固めが行われることは保証されない。一般土工であれば、締固め度による管理が基本となるため、GNSS管理によるCEL管理（転圧機種、仕上り厚、転圧回数）を行うことで可としているが、遮水性盛土では含水比が施工過程で乾燥側になると、最も重要な要求性能である遮水性能が担保されない場合がある。このため、[[2], [3]を全量管理しても[4]の締固め後の品質管理試験は従前どおりに実施する、との結論に至った。

一方、本研究により「土質」「CEL」が一定の幅で管理されている条件下では地盤剛性指標(Soil Stiffness Index, SSI)が「含水比」の代替指標となりえることが確認された（第3章）。また、「土質」（ここでは粒度）の局所異常に対してもローラ加速度応答法により高いSSIの計測値で把握できることが確認された（第4章）。これらのことから、ローラ加速度応答法とGNSS管理を関連付けた連続的な締固め管理（Continues Compaction Control, CCC）により[3]と同時にSSIを全量把握できれば、施工中の含水比変化の影響や粒度の局所異常をSSIによって把握できていることになる。

なお、「SSIの上下限值管理法」は、CEL管理で物性曲線を固定したうえで、SSI管理を

行うことで締固め状態を把握するもので、粒度と CEL が一様に管理されていることを前提としている。このため、[2],[3]の全量管理を行うことは「SSI の上下限值管理法」の信頼性向上に寄与しており、[2],[3]の全量管理と「SSI の上下限值管理」は、双方の管理法で管理しきれない範囲を補完し合う関係にあるといえる。

以上より、[2],[3]について全量管理に加えて、CCC による SSI の全量管理を行うことで、3つの締固め条件が全量把握できた状態になるため(図-5.1)、[4]の締固め後の確認試験(主に現場密度試験)を大幅に省略することが可能になると考えられる。

また、上記の管理における管理基準値の設定において、第2章で記した「現場 CEL と飽和度を勘案した締固め管理範囲」に対応して設定することで、品質向上が期待できる。

以上に記した「遮水性盛土の総合的な品質管理法」について、次節以降に具体的な取組事例として小石原川ダムで導入した管理法の概要を紹介する。

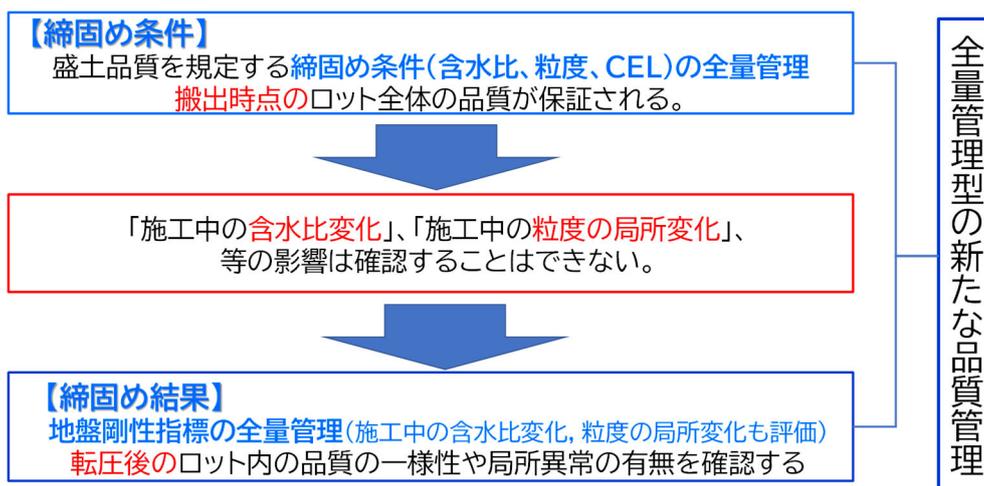


図-5.1 全量管理型の品質管理の概要

5.2. 搬出時の全量管理（粒度・含水比）

5.2.1. 粒度の全量管理

フィルダム遮水材料の搬出時の粒度試験は、1回/日の頻度で、当日の朝に採取した代表試験料を用いて JIS 法（JIS A 1204）か、含水比確認にフライパン法等を併用する簡便法にて確認するのが一般的である。

粒度試験はフィルダムの遮水ゾーンで使用する材料は含水比が高く、最大粒径 150mm 程度の礫を含むため、人力作業が多く試験時間が長いため、試験数量は上記の頻度が現実的には最大の頻度と考えられる。一方で施工数量は数千 m³/日以上であり、上記の頻度は施工数量に対して十分な頻度かは判断が分かれるところである。このため、より簡易な手法により補助的な粒度確認が可能になるならば、5.1 [2] に記載した「材料搬出時における品質確認」の頻度と精度が向上する。

小石原川ダムでは、受注者の技術提案により、デジタル写真を用いた画像粒度解析システム¹⁾による簡易的な粒度確認を 1回/30分の頻度で補助的に使用した²⁾。画像粒度解析システムでは 1回の撮影では粒径 9.5mm 以上の粒度分布までしか確認ができない。このため遮水性能に大きく影響する 4.75mm 以下含有率、0.075mm 以下含有率については確認することが出来なかったが、9.5mm 以上の範囲が、材料規格を満足するための粒度分布の管理範囲（4.75mm 以下含有率、0.075mm 以下含有率についての材料規格を満足する製造材料の粒度曲線群の最大包絡線と最小包絡線により作成）の中に入っているかを確認することで、傾向把握のためのツールとして活用した（図-5.2）。

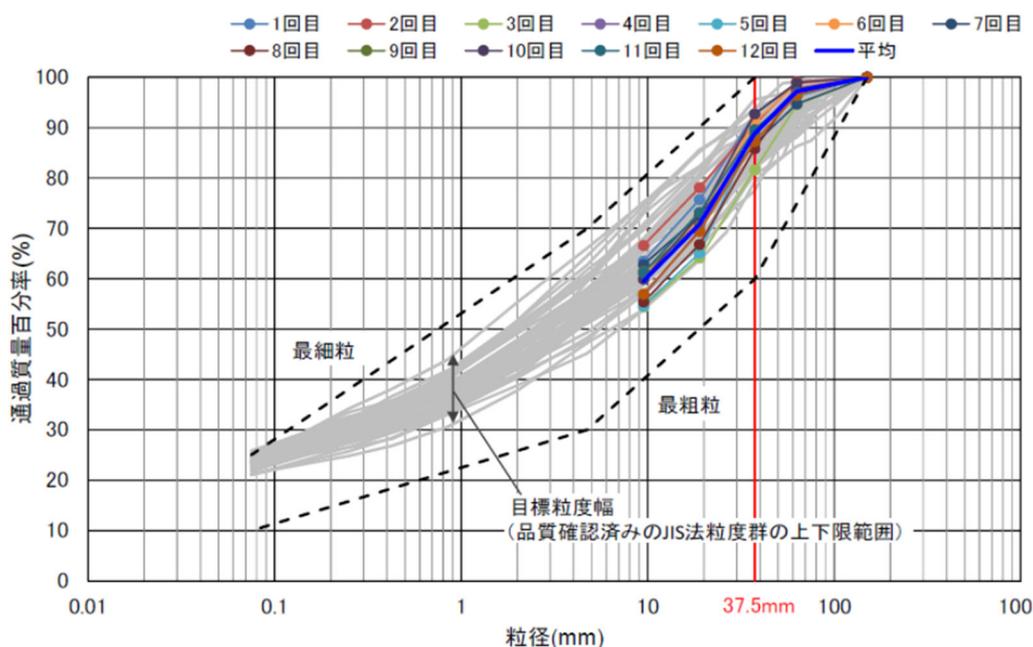


図-5.2 画像粒度解析による遮水性盛土材の評価例

図-5.2 の太破線は既往ダムで使用された遮水材料の粒度分布の実績を参考に定めた管理上下限值で、灰色の粒度曲線群が JIS 法で確認された当ダムの遮水材料の粒度曲線群である。実施工では画像粒度解析結果が管理範囲に収まらない場合は搬出を一時中断し、目視・触診と再試験を行い、必要に応じて材料搬出パイプの変更と材料調整を行った。

この ICT を利用した補助試験の導入により搬出時の粒度確認の頻度が向上し[4]締固め後の品質確認試験の信頼性が向上したと考えられる。

画像粒度解析システムを用いた粒度管理の概要を記す。画像粒度解析システムは、デジタルカメラで撮影した土質材料の二次元画像から粒子輪郭を識別し、各粒子の面積割合と質量加積率の相関式から粒度分布を推定する簡易粒度測定法である¹⁾。

図-5.3 は 2 種類の異なる粒度に調整したコア材を対象に画像粒度測定を各 11 回試行した結果(左側の撮影画像と粒子識別画像はそのうちの 1 回分)であり、解析対象粒径(63mm, 37.5mm, 19mm, 9.5mm)において測定毎の再現性や JIS 法による粒度試験結果との整合性を確認している。材料敷き均し後、撮影・解析に要する時間は十数秒程度と短時間で結果が得られる利点があり、(3)に示す混合設備の一部に同システムを組み込むことによってコア

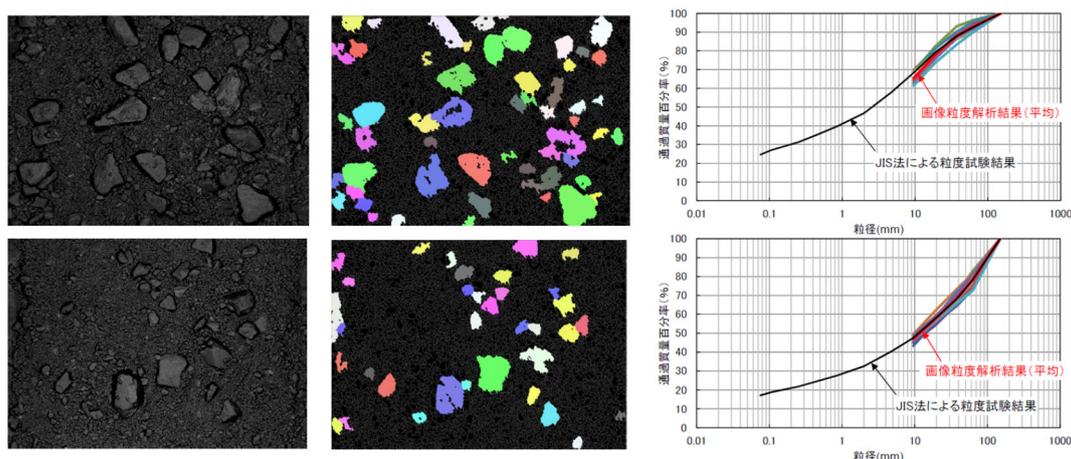


図-5.3 画像粒度解析システムによるコア材料の粒度分布評価結果
(上段：粗粒側粒度 下段：細粒側粒度)



写真-5.2 画像粒度解析システムによる計測状況

材製造中の高頻度かつリアルタイムな粒度確認を可能にした。

写真-5.2 に測定状況を示す。コア材混合設備から排出されたコア材(写真-5.2(a))をサンプリングし、専用の材料ホッパに投入してベルトコンベアで運搬し(写真-5.2(b))、画像撮影室内で薄層に敷均したベルトコンベア上の材料を撮影する。撮影画像は設備管理室のPCに転送され、即時に解析し粒度分布を出力できる。結果はWEBサーバに自動転送され、スマートフォンなどの携帯端末からも閲覧できるシステムを構築し運用した。

図-5.4 に当システムによる粒度管理フローを示す。粒度測定は30分に1回の頻度で行い、コア材製造中の粒度変動を監視する。目標粒度の上下限値を逸脱する傾向が認められた場合は、ふるい分け試験により実際の粒度を確認し、必要に応じて粒度調整を行う。当システムを用いることによって、目標粒度を満足しない材料の検出と粒度の変動に対する早期の判断が可能になった。

図-5.2 は実際のコア材製造時の画像粒度解析結果の一例である。図 5.2 に示すように製造中の測定結果が目標とするコア材の粒度範囲内にあり、適切な粒度が得られていることを

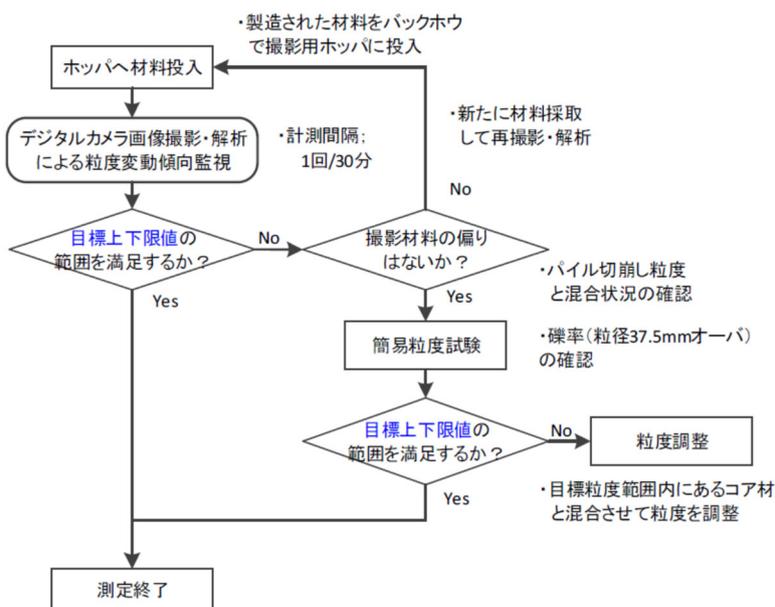


図-5.4 搬出時の粒度の管理フロー (画像粒度解析システム)

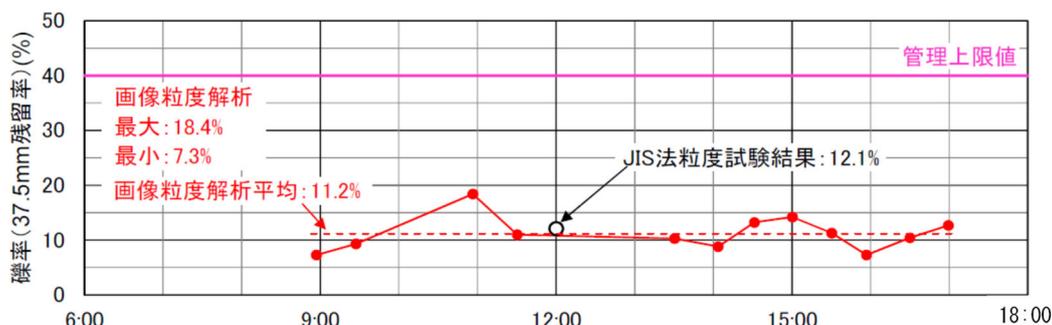


図-5.5 画像粒度解析システムによる礫率の確認状況の例



写真-5.3 含水状態による団粒化の影響（同一粒度）

常時確認した。また、図-5.5 に示すように、特に粒径 37.5mm 以上の割合（礫率）について着目し、礫率の日平均値をコア材盛立後（転圧後）の日々の締固め度(Dc 値)管理における室内締固め試験結果の礫率補正に用いた。

なお、小石原川ダムの工事着手時点では、画像粒度解析はフィルダムのロック材やフィルタ材への適用事例はあるが、コア材への適用事例はなかった。これは、コア材のような粘性材料は、同一粒度でも含水状態によって団粒化の程度が異なるためである。写真-5.3 に示すように、低含水比では団粒化は生じないが、高含水比では、細粒分の団粒化、粒子同士の付着、大礫への細粒分のへばりつきなどが視認される。したがって、相関式設定時の含水比と、実運用時の含水比が異なると、推定される粒度分布に誤差が生じるため、団粒化の影響を補正することが課題となっていた。

既往事例では、粒度インデックス I_i と加積通過率の相関式を求めるキャリブレーションにおいて、試験材料の含水状態は任意に設定されていた。そこで、コア材を対象する本検討では、細粒～粗粒の 5 パターンの粒度分布に対して、最適含水比 $w_{opt}-1\% \sim +2.5\%$ 程度の範囲で含水調整しながら、 I_i の変化を確認し、含水比に応じて推定式を補正するようシステム改良を行うことで粒度分布の推定精度を向上させた³⁾。

5.2.2. 含水比の全量管理

フィルダム遮水材料の搬出時の含水比試験はフライパン法⁴⁾、電子レンジ法⁴⁾など短時間で確認可能な手法を採用し、昼夜施工の場合は日 3 回（朝、昼、夕）実施するが多い。夜間施工時の確認が 1 回となるのは、夜間は日射がないために、施工中の含水比変化が小さいためである。このように、搬出時粒度は代表値として把握はされるが、日射の強い夏場などでは短時間でも含水比は変化する状況にあり、実施工では盛立面で材料の状況を確認しつつ散水などで含水比調整を行いながら施工を行うのが一般的である。

この搬出時の含水比管理についても粒度管理と同様に、簡易な手法により連続的な確認が可能になるならば、5.1 [2] に記載した「材料搬出時における品質確認」の頻度と精度が向上する。小石原川ダムでは、受注者の技術提案により、近赤外線水分計による搬出時含水比の全量計測と計測結果に基づく含水比調整を実施した⁵⁾。搬出含水比の調整は季節に応じて

搬出場～盛立面への運搬～敷均しの施工中の含水比低下を考慮した調整を行った。このため、散水による調整は主に前施工層のレーキング面の加水調整と、撒き出し時間（約 2 時間）中の変化に対応する加水調整が主となり、監視の強弱がつけ易い環境での施工管理が可能となった。

以下に、小石原川ダムで実施した近赤外線水分計を用いた含水比管理の概要を記す。

小石原川ダムでは、細粒分の自然含水比が高く、コア材の均質性が懸念されたことから、盛立場への搬出前に CSG やフィルタ材製造で実績のある SP ミキサによる混合設備を導入した。ミキサは内部に羽根を設けた複数の混合筒が交互に正転と逆転する構造であり、通過する材料を強制攪拌することで細粒材と粗粒材の混合を促進する。さらに、ミキサの前後には近赤外線水分計を設置しており、ベルトコンベアで運搬される材料の含水比の変動傾向を全量測定し監視した。

含水比管理フローを図-5.6 に示す。含水比が事前に設定した下限値より乾燥側に変化した場合には、ベルトコンベアの保護カバーに設置した散水ノズルより材料に加水し、最適含水比(w_{opt}) $_{IEc}+0\sim 1.0\%$ を目標として調整した。逆に投入ホッパへの供給材料が上限値より湿潤側に変化した場合は、ミキサ最下端部からジェットファンにより温風を送り、混合中の材料の乾燥促進を図った。最後に、前項に記したとおり、排出されたコア材は 1 回/30 分の頻度でサンプリングして画像粒度解析による粒度測定を行う。

図-5.7 にコア材製造フローを示す。コア材の含水比を近赤外線水分計による測定結果と JIS 法（炉乾燥法 JIS A 1203）による測定結果を比較したものを図-5.8 に示す。近赤外線水分計は近赤外線照射位置における材料表面の局所的な水分量を測定するため、照射位置に

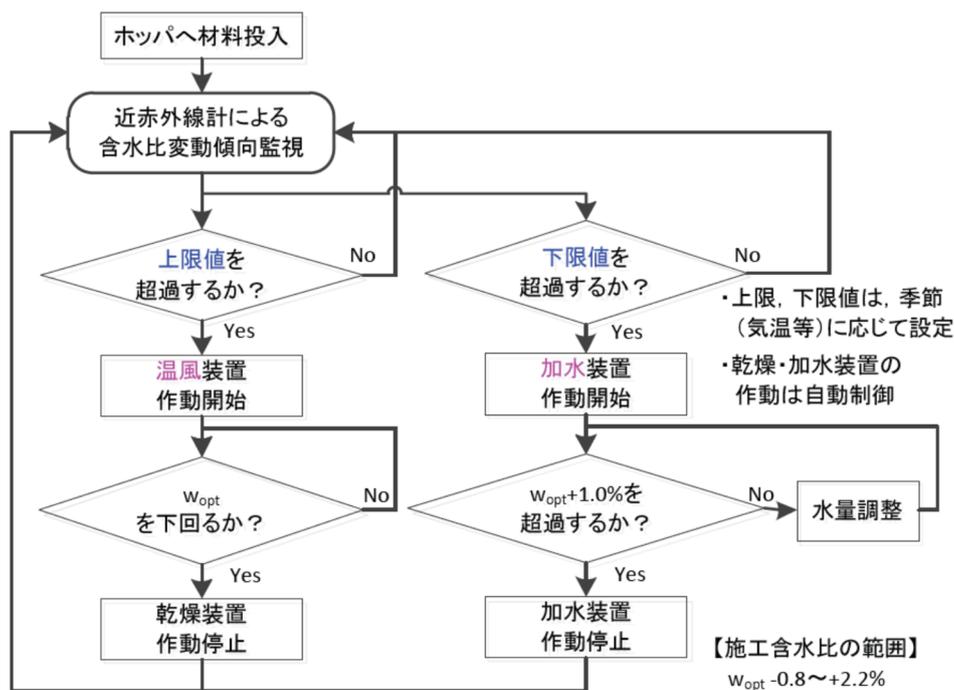


図-5.6 搬出時の含水比の管理フロー（近赤外線水分計）

ある材料の礫分の偏り等によって測定される含水比が変化するが、平均でみると JIS 法の含水比と概ね一致する。コア材製造時にベルトコンベア上で測定する材料の含水比は、上記要因を考慮して移動平均値で評価し管理している。

コア材製造時の含水比の連続測定記録例を図-5.9 に示す。測定は 1 回/秒でサンプリング

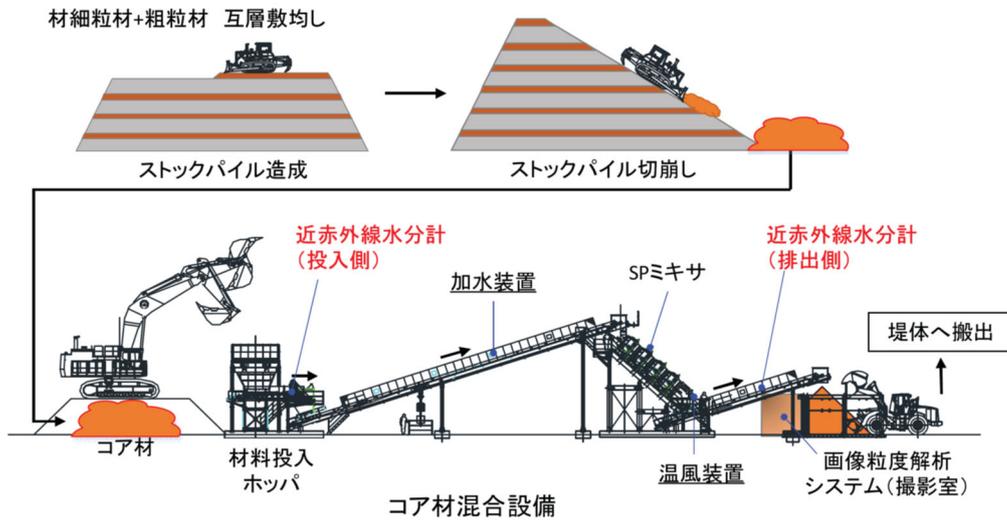


図-5.7 コア材の製造・搬出フロー

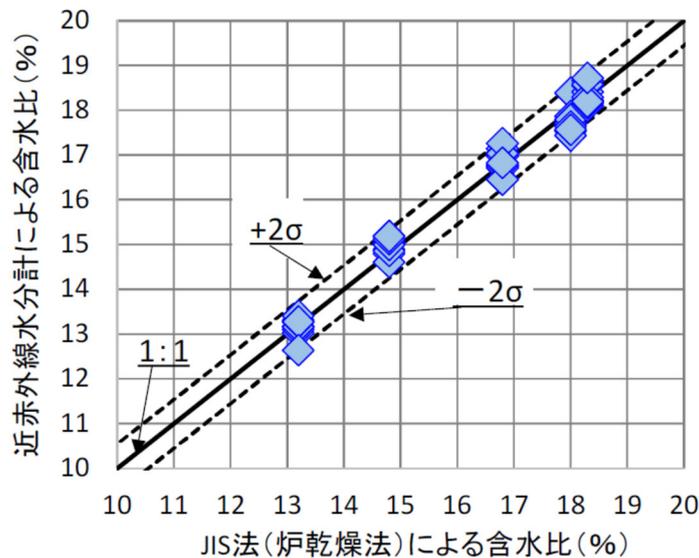


図-5.8 搬近赤外線と JIS 法（炉乾燥法）の比較

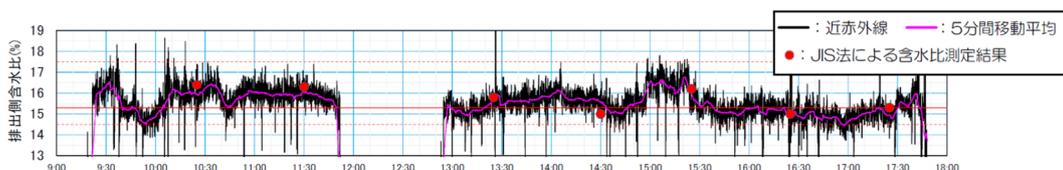


図-5.9 近赤外線水分計による含水比の連続計測例

し、5 分間の移動平均値で含水比を評価した。製造中のベルトコンベア上の材料の近赤外線水分計による含水比測定結果は、JIS 法の含水比測定結果と概ね一致しており、含水比の変動傾向を適切に捉えている。

図-5.10 に製造中に供給材料の含水比が徐々に低下し、加水装置が作動したときの測定記録例を示す。投入側の含水比が管理下限値を下回ると同時に加水が始まり、供給材料の含水比が上昇して加水が停止するまでの間に排出側の含水比は規格範囲内 ($(w_{opt})_{IEc} - 0.8 \sim +2.2\%$) に収まっていることが分かる。

図-5.11 に供給材料の含水比が管理上限付近で温風装置が作動したときの測定記録例を示す。温風開始後、排出側の含水比が平均で 0.2%程度低下しており、温風による乾燥促進効果が確認できる。

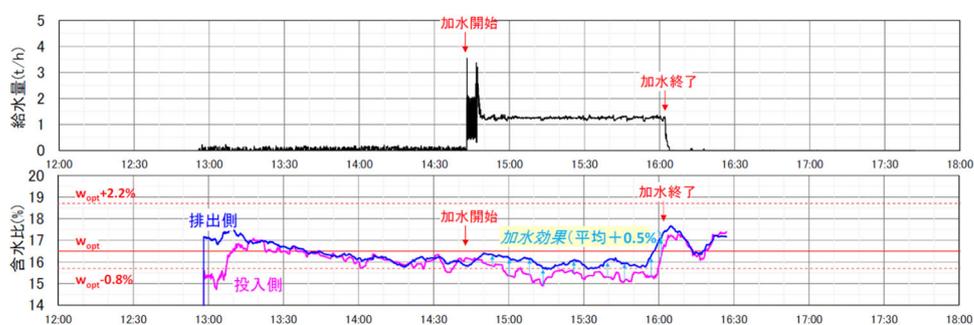


図-5.10 加水による含水比調整の記録例

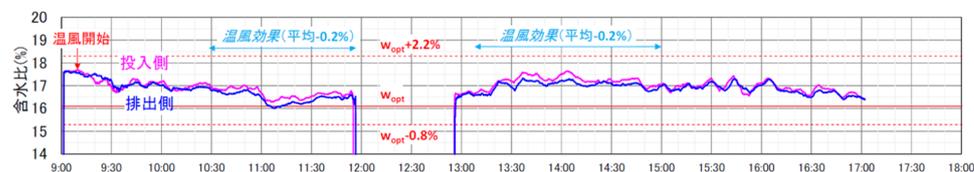


図-5.11 温風乾燥による含水比調整の記録例

5.3. 締固めエネルギーの全量管理

締固めエネルギーは転圧仕様（転圧機械、転圧回数、施工層厚）と下層の剛性（=盛立材料に依存）により規定される。このため、試験施工により定められた転圧仕様に基づき、踏み残し箇所がないよう確実に施工を行うことで、期待する締固めエネルギーが担保される。施工仕様に基づく施工の履行確認は、以前はチェックシートと目視確認により実施されていたが、近年では GNSS 技術の向上により、施工仕様に基づく施工履歴が自動で計測保存できる状況になっている。図-5.12 に小石原川ダムにおける GNSS 転圧管理の事例を示す。小石原川ダムでは CEL 管理については特記仕様書による施工仕様規定の他、品質管理基準で ICT による管理記録の提出を義務付けた。これらの GNSS 施工の導入に関する技術的確認事項については、技術基準⁶⁾に則り実施することでよい。

GNSS 管理の導入により、現場では撤出厚管理の為のトンボ（目印看板）が不要となったが、これにより、監督職員が現場を見たときに撤出厚が妥当性や盛土の形状がイメージしにくいこと、作成された管理用データの妥当性を確認する仕組みは工事によって異なる、などの不具合も発生する。特に後者については、発注者の監督員が入力データを現場の重機のディスプレイで確認をしても、それが妥当かどうか判断することは難しい。最終的には出来形確認を行うため、異常があれば再施工となるが、そのような事態に陥らないよう受注者のセルフチェック体制を充実してもらうことが重要と考える。

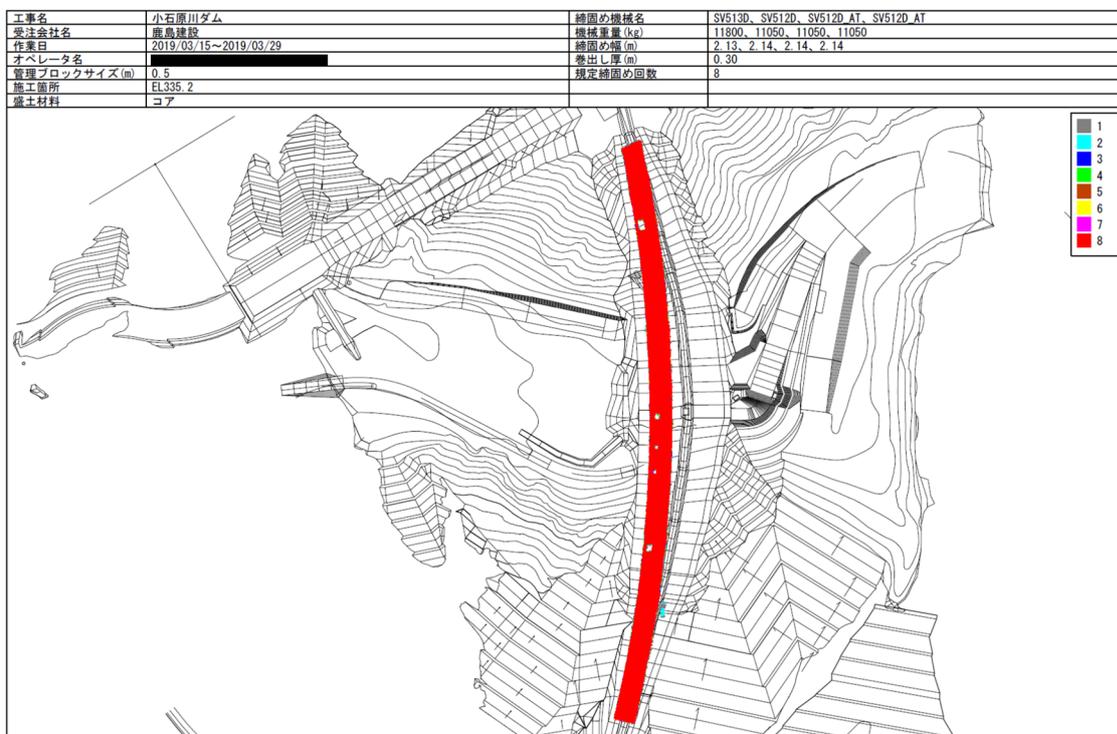


図-5.12 GNSS による転圧管理記録（例）

5.4. 地盤剛性の全量管理

ローラ加速度応答法と GNSS 技術による定量的かつ連続的な締固め管理（Continues Compaction Control, CCC）により，締固め後の地盤剛性の全量管理を行う．CCC 自体は既存技術の転用することにより，SSI は 3 章，4 章で述べてきたとおり，「土質」「CEL」「含水比」の影響を受けて変動するが，搬出時点での品質管理が厳格であれば「施工中の含水比の変化」「施工中の粒度の局所異常」の影響を把握するための指標になりえる．

図-5.13 に小石原川ダムにおける CCC による転圧管理記録の事例を示す．小石原川ダムでは試験施工結果に基づき CCV 管理値を図-4.9 のように設定した．乾燥側での透水係数の上昇，水浸コラプスのリスクを確実に排除するために，施工含水比の管理下限値（乾燥側）における剛性値を参考に，CCV の管理上限曲線を設定した．湿潤側での密度低下，ウェービングを抑制するため，施工含水比の管理上限値（湿潤側）における剛性値を参考に CCV の管理下限曲線を設定した．これらの詳細については第 4 章を参照されたい．

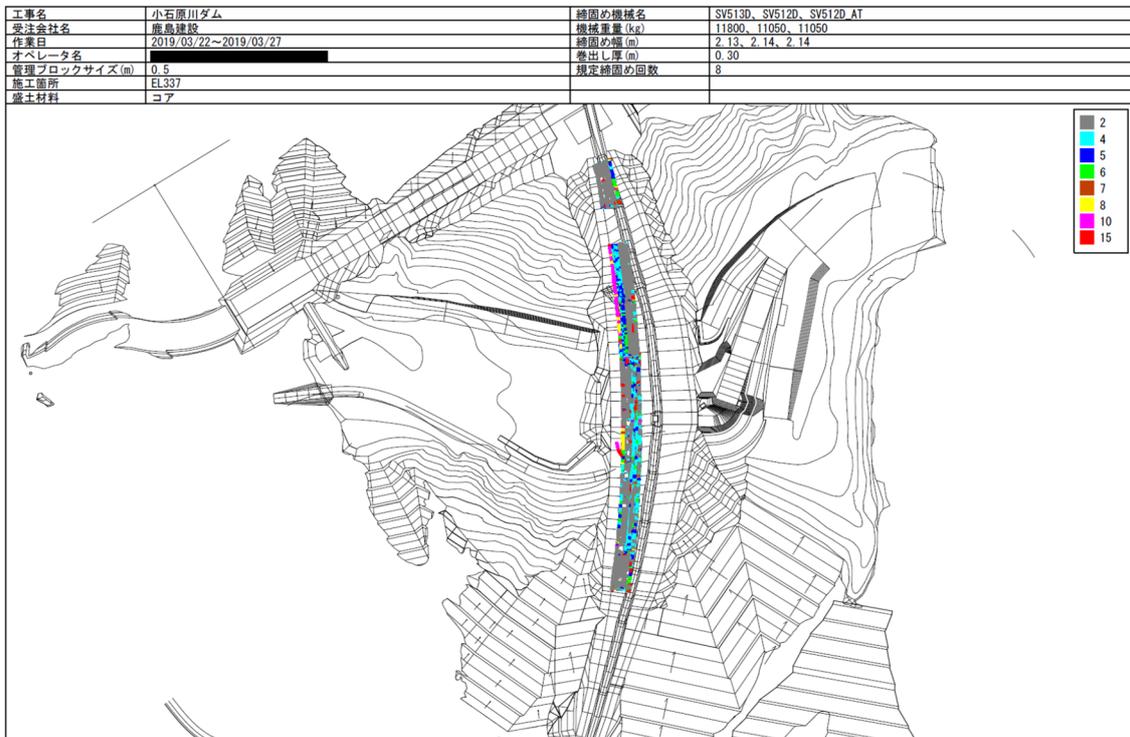


図-5.13 CCC による転圧管理記録（例）

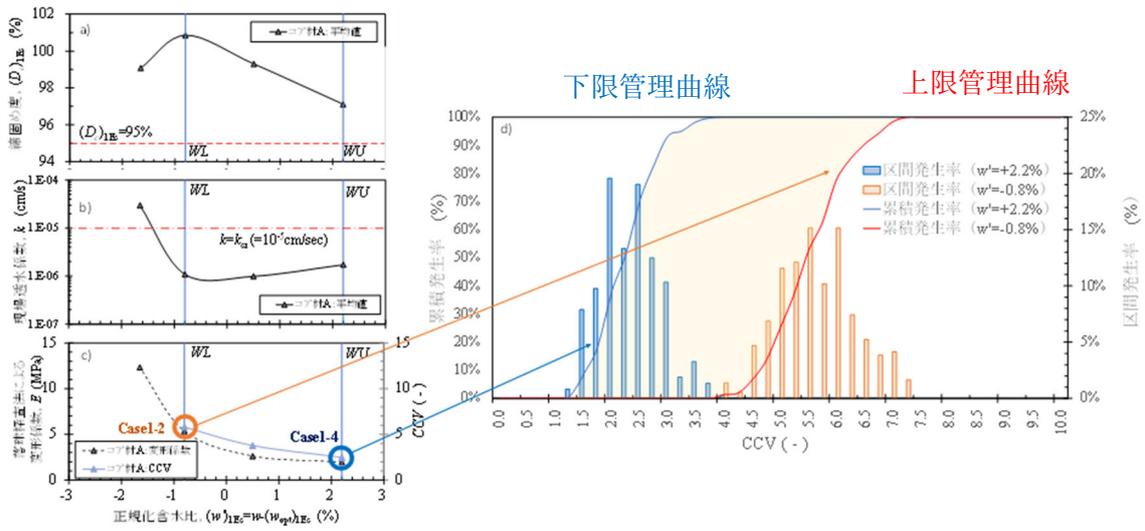


図-4.9 CCVの区間発生率及び累積発生率⁶⁾【再掲】

5.5. 締固め状態（含水比・締固め度・飽和度）の管理範囲の改善

室内試験と盛立試験の結果に基づき、表-5.1 のとおり締固めの管理範囲を改善し、管理目標を規定した。特に、飽和度の許容下限値を導入することにより含水比の管理下限値を現場 CEL (CEL_f) における最適含水比(w_{opt})_{CELf} 乾燥側まで引き下げている。この結果、管理範囲は表-5.1 の右欄「改善後」に示す通り左上にシフトし、密度・強度・遮水性の向上が期待できるようになった。

また、図-5.14 に示すように、新たな管理下限値付近の含水比での地盤剛性の値は、含水比が従来下限値の(w_{opt})_{IEc} よりも高い湿潤側での値よりも明確に高くなるため、地盤剛性の値の管理上限値の設定が容易になる。

さらに、剛性の管理範囲も、改善後の締固め管理範囲と整合しているため、剛性指標を用いた全量管理であっても得られる品質は変わらない。小石原川ダムでは既存のロックフィルダムと比較して、締固め度が高く、十分な遮水性能が得られることが確認されている。これらの詳細については第2章を参照されたい。

表-5.1 締固め管理範囲の改善

	改善前（従来法による管理）	改善後
概要図		
管理方法	<ul style="list-style-type: none"> 含水比は標準⁷ポクター1Ecでの最適含水比(w_{opt})_{IEc}を下限値として管理するのが一般的。 フィルダムでは、締固め度D値は施工含水比の範囲でD値≥95%で管理するのが一般的。 	<ul style="list-style-type: none"> 締固め状態の管理目標を明確化した。 含水比は(w_{opt})_{CELf}を下限値とすることを基本とし、飽和度の許容下限値を導入した管理範囲を設定。 <p>※ 本ダムでは現場CEL (CEL_f)を1.5Ecと評価。</p>
懸念・改善事項	<ul style="list-style-type: none"> 低飽和度領域を許容しており、遮水性能不足や水浸沈下（コラプス）の懸念がある。 含水比の許容下限値である(w_{opt})_{IEc}よりも湿潤側で施工されるため、剛性の変化が小さく剛性指標の上・下限管理値の規定が難しい。 	<ul style="list-style-type: none"> 飽和度の許容下限値を導入した上で、含水比の管理下限値を従来の値よりも乾燥側に設定することによって、高密度・低透水係数が実現できる。 含水比の管理下限値(w_{opt})_{CELf}よりも乾燥側では剛性が顕著に上昇するので、剛性の許容上限値の設定が容易。

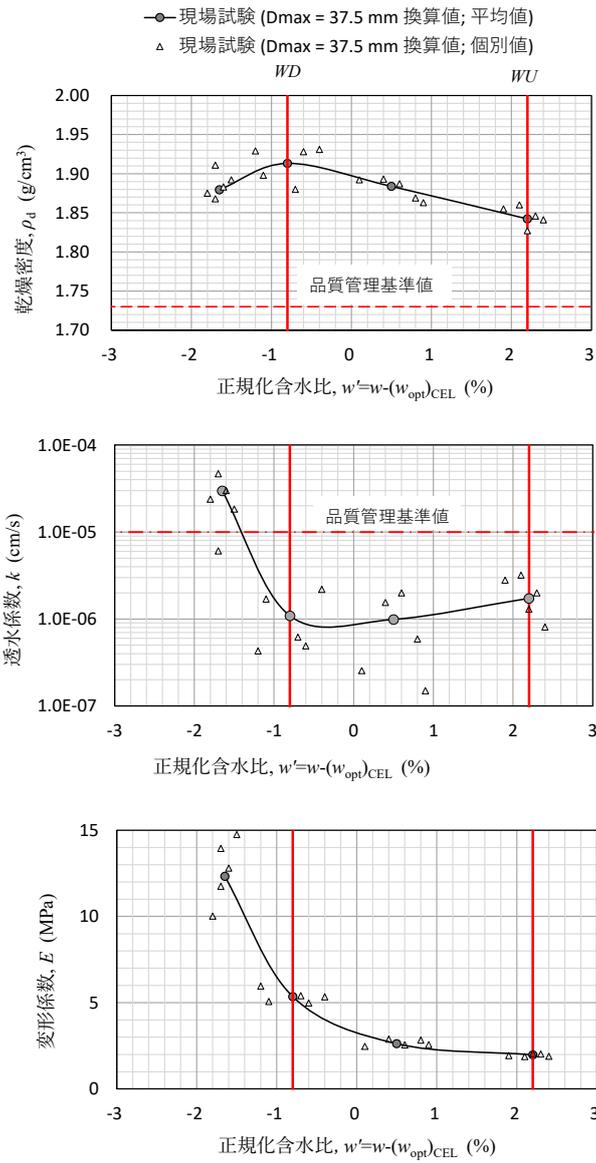


図-5.14 現場盛立試験結果 ($w \sim \rho_d, k, E$ 関係)
 (第2章 図-3.11 より A 材のデータのみ抽出)

5.6. クラウド管理によるリアルタイム監視

5.2～5.4 に記した、ICT 施工のデータと現場状況動画を、インターネットサーバに保存してクラウド管理することで、関係者にリアルタイムで共有することが出来るシステムを構築した (図-5.15) ⁷⁾。これにより、従来は現地確認が必要であった事項や、事後確認となっていた事項について、遠方での確認が可能となった。特に施工状況について、施工仕様に基づく施工の履行確認は、以前はチェックシートと目視確認により実施していたが、クラウド上でデータ確認がリアルタイムに可能となり、その記録も全て保存される状況となった。更に施工時の搬出粒度・含水比やそれらの経時変化が反映される SSI についてのデータ確認・保存が可能となった。以上に記した締固め条件 (土質, CEL, 含水比) について全量管理型のリアルタイム監視の体制が構築されたことと、技術者の減少傾向を受け、水資源機構は、遮水ゾーン施工時における発注者監督職員の常駐施工を小石原川ダムでは廃止した。

近年では Web カメラの性能向上とコスト低下の傾向は著しく、通信環境さえ整えれば従前より大幅に安価に現場監視カメラの設置が可能になった。2002 年～2006 年頃に筆者が初めて配置されたダム現場で配備していた現場カメラと比べると設備費は 1/10 程度となっている。これらの映像ツールや通信コストは今後、ますます利便性とコストパフォーマンスが向上するものと思われ、現段階では遠方監視では角度や解像度の問題で確認しづらい事項についても、数年で解決されるであろう。

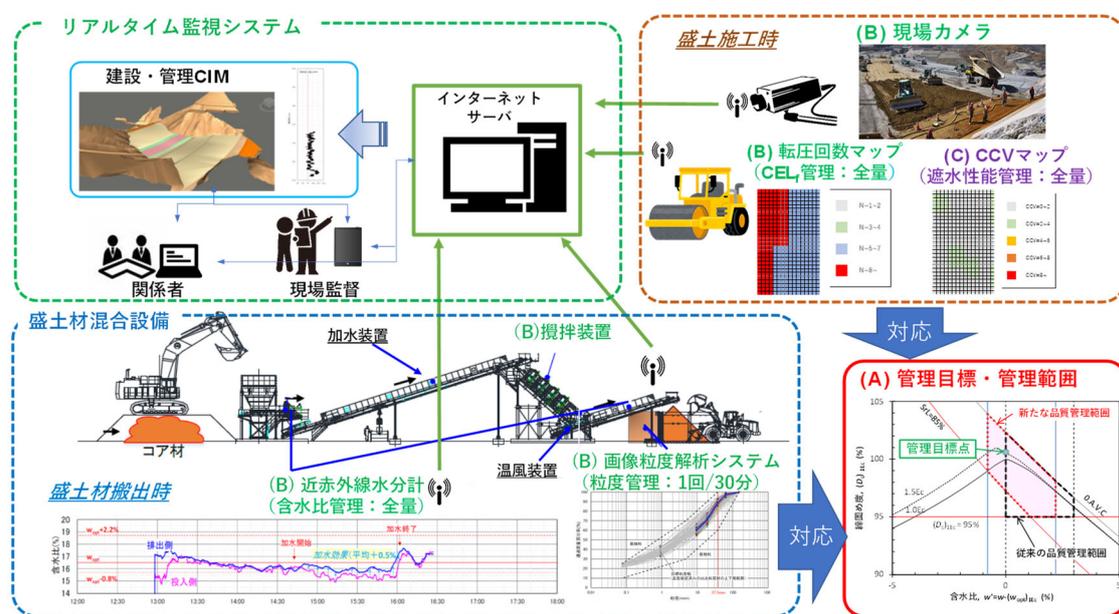


図-5.15 遮水性盛土の総合的な品質管理法の概要 (イメージ)

5.7. 開発技術の拡張性

遮水性盛土の総合的な品質管理法（以後、「本管理法」）は、適用した小石原川ダムに限定された管理法ではなく、他の現場等にも拡張できる内容がある。

まず、「現場 CEL と飽和度を勘案した締固め管理範囲の設定法」については、遮水性盛土以外の一般盛土にも適用可能なものである。近年では締固め重機の性能向上により 1Ec を大きく超える現場 CEL が実現可能で、その効果は遮水性盛土に限定されず、寧ろ砂質土やマサ土のように自然含水比の低い材料を使用する場合にはその効果は大きい。特に遮水性盛土材としてマサ土を使用する場合は、強制的な曝気乾燥等を要することなく高い現場 CEL を用いた締固めの適用が期待できる。過去には 1Ec 管理をするために加水調整を行っている事例もあり、そのような場合には含水比調整のコストと労力を減じつつ高い現場 CEL を用いた締固めを実現できる。

次に粒度と含水比の全量管理であるが、こちらは適用可能な現場条件は限定される。特に含水比の全量管理については、ベルトコンベアで含水比を確認・調整する過程と材料の積替が必要になるため、このコストをかけるリターンを見出すには、フィルダムのような高い要求性能と施工規模がなければ難しい。一般土工では、高速道路のような大規模土工であっても基本的には現地発生材を使用して築造され、その材料の適用範囲も広い。特に、基本的には目視確認による評価で十分対応ができていることから、これらの盛土構造物ではコストを上げてまで導入が必要となる場合は多くはないと考えられる。しかし、小石原川ダムと同様に材料の均一性についての課題を有するダムでは適用を検討する価値はあると考える。

次に、SSI の上下限值管理法については、フィルダム以外の遮水性盛土の管理においても、従来の日常管理の代替試験として位置づけることは可能であり、その効果は大きいと考える。ただし、密度試験と比して CEL の変動に対する感度が鈍いため、CEL 管理は別途適切に行われることが前提となることを強調しておく。

また、一般土工の盛土管理では従来の SSI 管理は下限値管理であるが、浸水コラプスの影響を排除するためには上限値管理が必要であり、一般土工であっても遮水性盛土と同様に上限値管理を導入すべきと考える。CCC を用いた SSI 管理では遮水性盛土のような高含水比材料への適用が困難とされてきたが、土質と CEL の管理を適切に行う前提で、適用が可能となった。今後は、第 4 章にも記載したとおり、高含水比材料に適性の高い指標の検討により計測精度が向上されることが期待される。

また、一般土工では、「土質」「含水比」の管理がほとんどなされないため、SSI に影響を与える 3 つの要素のうち、2 つが変動することを前提にした管理が必要となる。このため、本研究で提案する SSI の上下限值管理法をそのまま適用することはできない。今後、SSI に対する粒度等の土質の影響の評価についての改善を行うことで、適用範囲を拡大できる可能性がある。

5.8. まとめ

第5章では、第2章から第4章で紹介した本研究による技術的知見を踏まえて小石原川ダムで導入した品質管理法（以後、「新たな管理法」）について紹介し、その課題と拡張性についても記した。以下、新たな管理法の概要等について記す。

- 1) 盛土に求められる強度、剛性、遮水性能（或いは透水性能）、築堤後の圧密沈下特性、などの工学的特性は、盛土の締固め条件である「土質」、「含水比」、「CEL」により概ね規定される。小石原川ダムの遮水ゾーンの建設では、これらの締固め条件について ICT 施工により全量管理することで、施工ロットにおける品質確認範囲を拡大し、後述する SSI 管理の信頼性を向上させた。
- 2) SSI の上限値管理による透水係数を間接的な管理を適用することで、日常管理として実施していた現場密度試験の大部分を SSI の管理で代替することができた。さらに SSI にローラ加速度応答法による指標（本研究では CCV）を採用することで、遮水性盛土における CCC が可能となった。
- 3) 土質（主に粒度）、含水比、CEL、SSI の管理値を、2章で述べた「現場 CEL と飽和度を考慮した締固め管理範囲・管理目標」に基づき設定することで、管理の合理化を図りつつ品質の向上も実現できた。
- 4) この新たな管理法は、他のプロジェクトや一般土工に適用するには、使用材料の適性やコスト等の課題はあるものの、一般性をもつ部分も多く、部分的な適用も可能である。

参考文献

- 1) 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, 23 巻 1 号 pp. 19~26, 2013.
- 2) 小原隆志, 小林弘明, 増村浩一, 中川和歩, 坂本博紀, 坂井田輝: ロックフィルダム盛立におけるコア材製造時の新しい品質管理(その2) -画像粒度解析システムによる粒度管理-, 第 72 回土木学会年次学術講演会, 2018.
- 3) 福島雅人, 坂本博紀, 奈良洋幸: ロックフィルダムの盛立工における挑戦 -ICT 施工の全面展開-, 令和元年度国土交通省国土技術研究会, 2019.
- 4) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, pp.104~114, 2013
- 5) 小林弘明, 小原隆志, 増村浩一, 内場謙二, 畑中昭人, 坂本博紀, 坂井田輝: ロックフィルダム盛立におけるコア材製造時の新しい品質管理(その1) -近赤外線水分計による含水比の全量管理-, 第 72 回土木学会年次学術講演会, 2018.
- 6) 国土交通省: TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領, 2020
- 7) 坂本博紀, 福島雅人, 日野浩二: 小石原川ダムにおけるコア盛立の高度化・合理化の検討, ダム技術, No. 390, pp. 52-65, 2019.
- 8) 辻良祐, 照井秀幸, 小林弘明, 小原隆志, 坂本博紀, 坂井田輝: 近赤外線水分計を用いた盛土材料の室内迅速含水比測定装置, 第 72 回土木学会年次学術講演会, 2018.

第 6 章

第6章	実務における留意事項	1
6.1.	はじめに	1
6.2.	材料採取・製造時の管理	3
6.3.	搬出時の管理	10
6.4.	盛立面における管理	13
6.5.	「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」の留意事項	22
6.6.	「SSIの上下限值管理法」の留意事項	25
6.7.	CCC適用時の留意事項	31
6.8.	まとめ	32
	参考文献	33

第6章 実務における留意事項

6.1. はじめに

本章では本研究を通じて得られた知見について、実務で活用していくうえでの留意事項について記す。本研究の主たる成果である「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」「地盤剛性指標（Soil Stiffness Index, SSI）の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法」（以後、「SSIの上下限值管理法」）に関わる留意事項の他、フィルダム施工に関する細部技術（主に遮水ゾーンの施工に関連する事項に限る）も交えつつ解説する。

図-6.1 にフィルダム遮水ゾーン建設における施工フローの事例を示す。フィルダム遮水ゾーン建設では図-6.1 の①～⑦が「材料採取・製造時」、⑧⑨⑩が「材料搬出時」、⑪が「盛立面施工時」の各段階で品質管理が行われる。6.2.～6.4.節に「材料採取・製造時」「材料搬出時」「盛立面施工時」での各段階での基本的な留意事項を記す。

6.5.節に「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」を適用する際の留意事項を記す。

6.6.節に「SSIの上下限值管理法」を適用する際の留意事項を、6.7.節にCCCを適用する際の留意事項を記す。

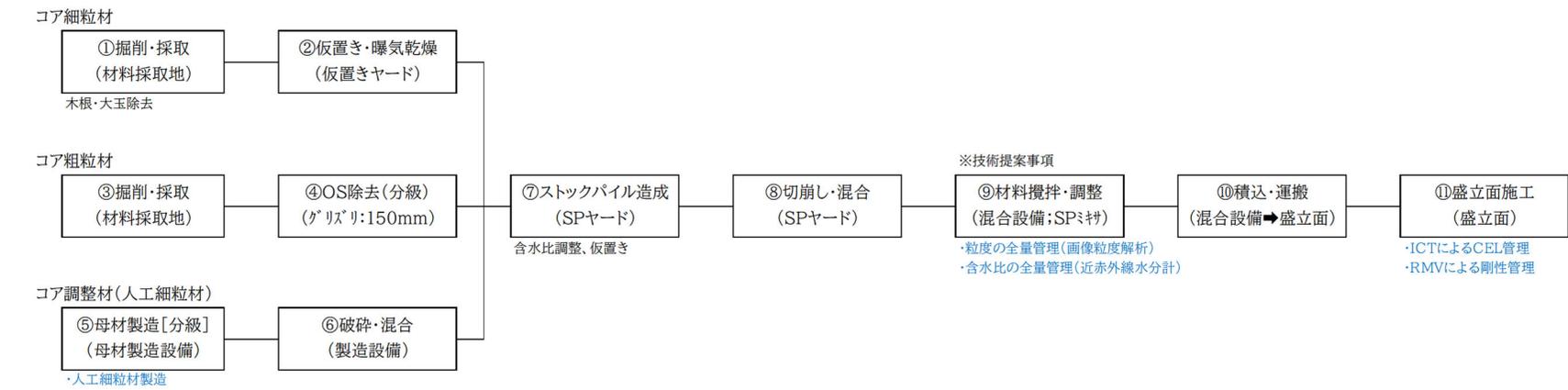


図-6.1 フィルダム遮水ゾーン建設の施工フロー (小石原川ダムの事例)

6.2. 材料採取・製造時の管理

フィルダム等の遮水性盛土の場合、自然発生材がそのまま使用できることは稀であり、細粒分の多い粘性材料と礫質土中心の粗粒材料をブレンドして製造される。「SSI の上下限值管理法」では粒度管理と CEL 管理が適切でなければ遮水性能の間接的な管理はできないことは前章迄に述べたが、従来の密度管理型の品質管理でもそれは同様である。

極めて大規模な盛土構造物であるロックフィルダムでは、長期間にわたって大量の盛立材料で築堤工事が行われる。このため、使用材料の時空間的な変化についての管理が重要で、材料採取エリアや仮置き期間、季節変動などの影響を極力抑えるような管理が望まれる。使用材料の変動の平準化を促すため、盛立材料はストックパイルに製造・仮置して品質管理された状況下で使用されるが、このパイリング計画が品質の平準化の精度を左右する極めて重要な事項となる。ストックパイルの容量・配置・仮置き期間の設定は非常に重要で、ブレンド比率設定、目標含水比設定といった基本事項の他、混合材料の含水比の馴染みのために必要な調整期間（＝仮置き期間）、全体施工計画におけるヤード配置（工事の進捗により使用可能なエリアが変化する）、各パイルの容量、使用順序などを考慮して綿密な計画を作ることが肝要である。

粒度管理は製造時、搬出時、施工後の各段階での品質管理試験において確認されるが、搬出時、施工後で異常が確認されても搬出停止、撤去再施工となるだけで本質的な改善にはならないことから、製造時の粒度管理が最も重要である。また、本研究で提案した CEL を考慮した含水比管理を行う場合には、採取材料の地山含水比に応じて目標とする含水比を実現できるようなブレンド比率を設定することや、含水比調整期間の設定を見直すことも必要となる。このため、フィルダムの施工品質の良否は材料製造の段階で概ね決まるといっても過言ではなく、製造段階で粒度と含水比のバラツキが小さいストックパイルを作るために注力することは、遮水ゾーンの品質確保に極めて重要である。

以下にパイル造成時の留意点を列記する。

(1) 粒度管理

材料製造時の材料の粒度試験の例を表-6.1 に示す。

表-6.1 材料製造時の品質管理試験の事例

場所	試験(測定)種目	管理基準			備考
		試験(測定)方法	品質規格	試験(測定)頻度	
コア採取場 (細粒)	含水量試験	簡便法	-	1回/採取場 又は 1回/材料変化時	
	粒度試験	簡便法	-		
コア採取場 (粗粒)	含水量試験	簡便法	-	1回/採取場 又は 1回/材料変化時	
	粒度試験	簡便法	-		
ストックパイル (造成時)	含水量試験	簡便法	-	1日1回 又は 1層1回	3点/回
	粒度試験	簡便法	-		1点/回

品質管理上の規定は最低限の頻度として、**表-6.1**のように設定されるが、ストックパイル（造成時）の試験回数については、現場によっては3点程度に数を増やして実施する場合がある。これは、採取エリアが2カ所以上である場合、或いは材料変化が見られた場合の対応である。

ストックパイルの造成時は、試験施工等に基づき設定した目標粒度を再現できるよう粗粒材・細粒材の基準粒度に基づいて各材料の施工層厚を設定し、粗粒材料⇒細粒材料⇒粗粒材料⇒...と2種類の材料を交互に配置してパイルを造成する。この時、基本的な施工層厚は定めているが、実務では造成時に使用している粒度分布は徐々に変化していくため、施工層厚を一定にしたまま施工を続けると目標粒度から徐々にずれていく場合がある。このため、品質管理試験で確認される各層の材料粒度と施工層厚を用いてパイルの想定粒度を確認する。この結果、製造パイルの粒度が目標粒度から外れる場合は、合成粒度が目標粒度に近づくと次層の施工層厚を調整することが望ましい。

図-6.2に小石原川ダムにおけるストックパイル製造時の粒度管理の事例を示す。各層の施工後に**図-6.2**のように混合後の推定粒度の F_c 値を推定し、次層の粗粒材の施工層厚を調整する。このような調整を行おうとすると層ごと仕上り厚の管理が変動するためオペレータの目感が働きにくいという課題があるが、近年はマシンガイダンス機能を有するICT建機が導入されたため、このような弾力的な管理も行い易い状況となっている。

なお、調整にあたっては粒度分布のどの管理値を重視するかは現場によって異なる。また、ストックパイルの高さが高いほど、パイリングによる均一化の効果が大きい。パイリングを重ねるごとに、各層の粒度変化が合成粒度へ与える影響は小さくなるため、パイル高は10m以上の高さは確保したいところである。粗粒材、細粒材での施工量については上記のとおり日々、調整を行いながらパイリングを行うが、施工層厚の設定の基礎になる混合比率は乾燥重量比で決定であるため、自然含水比を考慮した補正が必要となる。また、敷き均し時にブルドーザの加重による締固めがなされ、この傾向も材料の含水比によって異なるものと考えられる。このため実施工での管理では、材料採取地で確認した自然含水比を用いて地山での自然含水比における重量に換算し、その重量に応じたダンプ台数で概数を管理する場合がある。このあたりの管理方法は現場毎に異なる。

サイクル	層	材種	層厚 m	盛土高 m	下部面積 m ²	上部面積 m ²	平均面積 m ²	各層体積 m ³	乾燥密度 t/m ³	含水比 (全粒度)%	水比(-37 %)	Fc値 %	乾燥重量 t	湿潤重量 t	各材料 体積比	各材料 乾燥 重量比	
6	12	細粒材	0.20	3.45	454.6	428.7	441.6	88.3	1.500	30.0	35.0	38.0	132.5	172.2	0.35	0.31	
	11	粗粒材	0.35	3.25	499.8	454.6	477.2	167.0	1.800	7.0	8.0	8.0	300.6	321.7	0.65	0.69	
5	10	細粒材	0.20	2.90	525.7	499.8	512.8	102.6	1.500	30.0	35.0	38.0	153.8	200.0	0.32	0.28	
	9	粗粒材	0.40	2.70	577.5	525.7	551.6	220.6	1.800	7.0	8.0	8.0	397.2	425.0	0.68	0.72	
4	8	細粒材	0.20	2.30	603.3	577.5	590.4	118.1	1.500	30.0	35.0	38.0	177.1	230.3	0.35	0.31	
	7	粗粒材	0.35	2.10	648.6	603.3	626.0	219.1	各層の土質試験結果				394.4	422.0	0.65	0.69	
3	6	細粒材	0.20	1.75	674.5	648.6	661.6	132.3	1.500	30.0	35.0	38.0	198.5	258.0	0.32	0.28	
	5	粗粒材	0.40	1.55	726.2	674.5	700.4	280.2	1.800	7.0	8.0	8.0	504.3	539.6	0.68	0.72	
2	4	細粒材	0.20	1.15	752.1	726.2	739.2	147.8	1.500	30.0	35.0	38.0	221.8	288.3	0.35	0.31	
	3	粗粒材	0.35	0.95	797.4	752.1	774.8	271.2	1.800	7.0	8.0	8.0	488.1	522.3	0.65	0.69	
1	2	細粒材	0.20	0.60	823.3	797.4	810.4	162.1	1.500	30.0	35.0	38.0	243.1	316.1	0.32	0.28	
	1	粗粒材	0.40	0.40	875.0	823.3	849.2	339.7	1.800	7.0	8.0	8.0	611.4	654.2	0.68	0.72	
造成中の Fc 値を確認し、 次層の層厚を設定								粗粒材	1,497.8	1.800	7.0	8.0	8.0	2,696.0	2,884.7	0.67	0.71
								細粒材	751.2	1.500	30.0	35.0	38.0	1,126.8	1,464.8	0.33	0.29
合計/平均								2,249.0	1.700	13.8	16.0	16.8	3,822.8	4,349.6			

試験結果から算定した切崩し時の細粒分含有率

図-6.2 ストックパイル造成時の粒度管理 (例)

次に材料採取地における留意事項であるが、材料採取地では常時、発注者や元請の監督職員が材料の状況を監視する状況ではなく、基本的には採取担当する重機オペレータが最も材料採取地の材料変化の状況を把握しているのが実情である。このため日常の施工中に材料変化が生じた場合に重機オペレータが違いを判断して、元請職員へ通知確認をする仕組みと、目視で判定可能なわかり易い判断基準を作成することが重要である。

判断基準は現場によって異なるが、切羽の色や湿潤具合の状態、掘削面の爪痕の状態、積込材料の見た目、礫混入の状態、などを組合せて現場の材料区分に応じて調整していくとよい。小石原川ダムでは、材料判定の段階確認時には受注者からの技術提案の一環として、目視・触診以外に画像解析による評価も実施していた。これらの ICT によりオペレータの技量経験に依存しない判定が可能なシステムを構築することも今後の生産性向上には必要なことと考えられる。ただし、同時に元請けの技術者や事業者側の技術者には、それらの ICT による判定根拠の設定に至る技術的事項が理解されていることが前提である。

(2) 材料判定に関する補助ツール

前述のとおり材料区分判定は技術者の五感に頼る部分が多いが、近年ではこれらの感覚を定量化するための様々な研究が行われている。小石原川ダムではロック材の材料判定の人為的ばらつきを低減するため、岩種判別に帯磁率計 (写真-6.1) を、硬さ判別に打球探查法¹⁾ (写真-6.2) を判定の補助ツールとして試験的に導入した^{2),3)}。



写真-6.1 帯磁率計

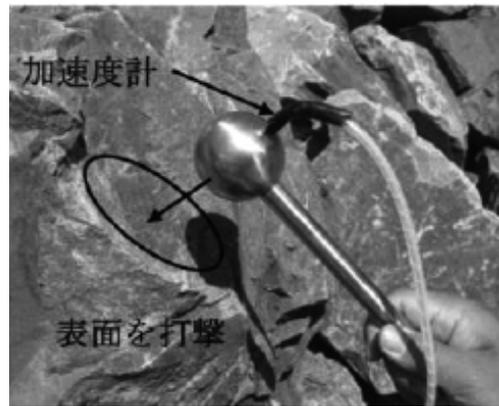


写真-6.2 打球探査法

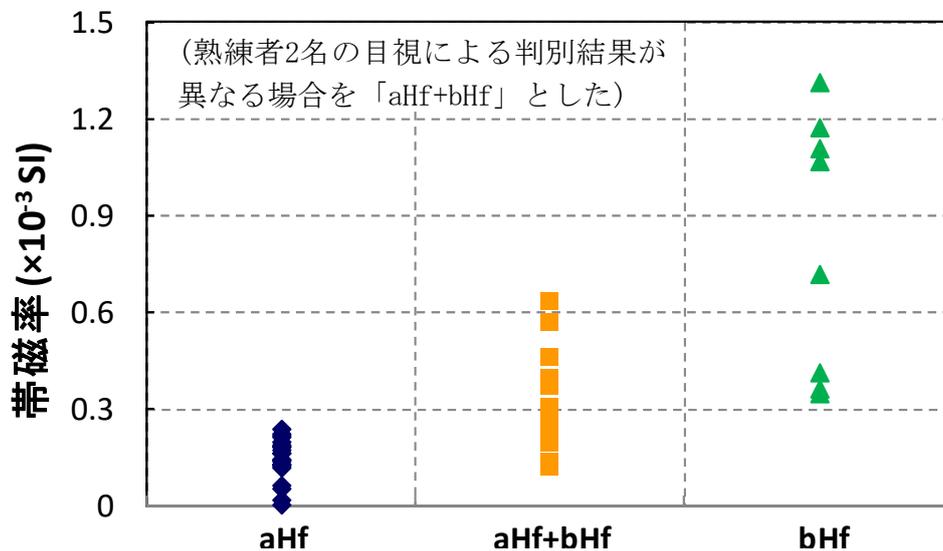


図-6.3 目視による岩種判別結果と帯磁率の関係³⁾

ロック材料をはじめとする使用材料の廃棄判断は、工事における採取歩留り（ロス率）に直結しており、特に数百万 m³ を超える大規模工事であるロックフィルダムにおいては廃棄材の処分費は全体工事費にも大きく影響する。特にロック材の採取においては一回の判定で数千～数万 m³ の材料の判定をすることも珍しくない。このため、材料の廃棄判断は極めて重要な甲乙協議事項である。

帯磁率計とは、磁場と誘導磁気との比で定義される物理量であり、主に岩石に含まれる磁性鉱物の量と種類により定まる。帯磁率計は、①非破壊測定である、②軽量小型で持ち運びが楽、③リアルタイムで結果が得られるなど、非常に簡便な計測機器である。打球探査法は、加速度計を取り付けた金属製の球形ハンマーで対象物を直角に打撃した時の応答加速度波形から Hertz の理論式を用いて変形係数を算出する原位置迅速試験法である¹⁾。計測原理等の詳細については、参考文献を参照されたい。

図-6.3 に、熟練者 2 名の目視による岩種判別結果と帯磁率計による計測結果の関係を示

す。岩種毎に帯磁率の値域が異なっているため、 0.3×10^{-3} (SI)程度を目安として、帯磁率に基づく岩種判別の定量化が可能となった³⁾。

図-6.4に全岩種の変形係数と吸水率の関係を示す。変形係数の範囲は岩種毎に明確に分かれなかったが、aHfの場合、変形係数が概ね10GPa未満で吸水率が急増（内部ロックの品質規格値である3%を超過）するケースがあることが分かった。そこで、10GPaを廃棄岩判定の目安とし、変形係数をハンマー打検の参考値として活用することとした。図-6.5は絶乾密度・吸水率の試験結果と帯磁率、打球探査法の結果に品質規格値（赤線）を示したものである。絶乾密度と吸水率は、岩種の違いにより2つの分布範囲に分かれており、帯磁率による区分と整合していることから、帯磁率によって岩種を判別できていると考えられる。また、変形係数によって品質規格を逸脱する岩を一定の精度で判別できていることから、変形係数が廃棄岩の判定指標になり得る。

最終的な岩種の判断は監督員の目視によるが、これらの補助計測ツールの導入により、監督員の習熟度の違いによって生じる岩種判別結果の差を低減し、品質管理の高度化を図ることができた³⁾。

また、これらのICTによる補助ツールは有効ではあるものの、「計測する岩塊や計測面により計測結果が変動する」「発破範囲全体の評価はしてくれない」といふ欠点もあり、このような全体を包括的にとらえて、適切な技術的判断をおこなうための補助であるという認識が良いと考える。

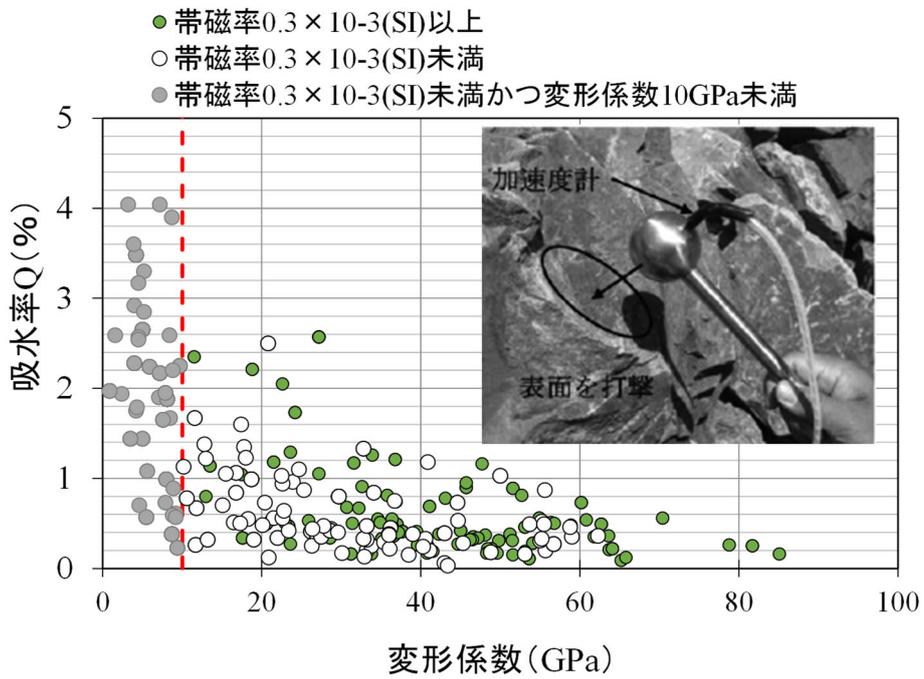


図-6.3 変形係数と吸水率の関係（帯磁率の計測レンジ別）²⁾

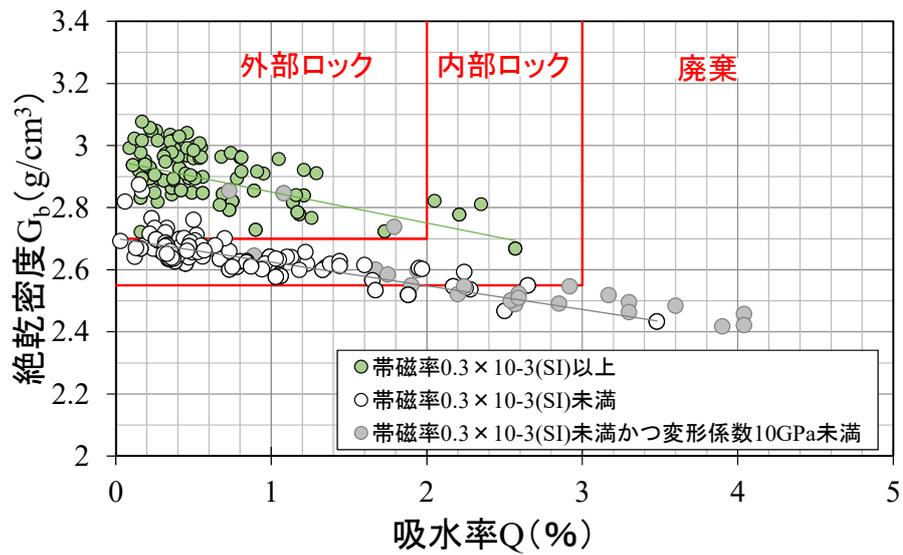


図-6.5 吸水率と絶乾密度の関係（帯磁率の計測レンジ別）²⁾

(3) 含水比管理

材料採取地における含水比管理としては地山の自然含水比の確認が挙げられるが、ここで自然含水比が高い場合は、曝気処理を行うことで含水比を低下させたのち、ストックパイルへ搬出する場合がある(写真-6.3)。曝気処理では、スケルトンバケットによる篩処理を行うものが多い。特に含水比の高い材料を使用せざるを得ないような場合にはスタビライザーによる強制混合と曝気処理を行う場合もある⁴⁾。また、曝気作業からストックパイルへの搬出に時間差が発生する場合には、曝気材料を土羽打ちして仕上げたのちブルーシート等で養生しておくことが望ましい。

材料製造時の含水比管理の方法としては、ストックパイル造成時の敷厚についての調整が挙げられる。敷厚は薄いほど、各層の馴染みが早くなるが、その分管理が難しく、施工誤差の影響が大きくなる。このため一層の施工厚は最小値を20~30cm程度にして管理するのが一般的である。近年ではICT施工によるマシンガイダンス機能付の重機が導入されており層厚の管理も従前よりは行いやすい状況にある。

また、ストックパイルでは降雨対策として、造成面に1%程度の排水勾配をとり、日々の施工完了後は無振のフラットローラで表面を平滑化し、施工後の降雨水の侵入による含水比が生じないようにする。含水比調整のため、次層の施工前には浅くレーキングを掛けたのち、材料を撒き出す。季節によっては施工途中の降雨中断の可能性があるため、各層の施工量の管理は施工厚だけではなく、重量管理に基づくダンプ台数管理も併用すると良い。



写真-6.3 材料の曝気処理状況

6.3. 搬出時の管理

ストックパイルで製造・調整した材料は切り崩し混合したうえで搬出される。遮水性盛土の施工では搬出時にも品質確認がなされるが、その際の留意事項について以下に記す。製造段階で適切に施工がなされていれば、基本的には問題のない材料が搬出できるのであるが、搬出時点で発生する可能性のある材料の変動を極力抑えるための工夫などを記す。

(1) 室内試験に関する留意事項

搬出時の品質確認試験の例を表-6.2に記す。搬出時は含水比と粒度が所要の規格を満足するかを確認するとともに、現場密度試験時の評価を行うために必要な最大乾燥密度を得るための突き固め試験が実施される。

表-6.2 材料搬出時の品質管理試験の事例

場所	試験(測定)種目	管理基準			備考
		試験(測定)方法	品質規格	試験(測定)頻度	
ストックパイル (搬出時)	含水比試験	簡便法	Wopt~Wopt+3% Wopt:最適含水比	午前・午後・夜各1回	37.5mm以下の材料について3点/回 深夜施工する場合は、午前・午後・夜・深夜の各1回を実施する。
	締固め試験 φ150	JIS A 1210:2009		1回/日	
	粒度試験	簡便法	Dmax150mm 4.75mmふるい通過率30%以上 0.075mmふるい通過率10%以上		1点/回

室内試験に使用する材料の最大粒径は19mm若しくは37.5mmで実施する 경우가多い。前者は室内試験の試験値自体のばらつきが小さく、後者は礫率補正⁵⁾の影響が小さくなる。一般的に適用されるWalker-Holtzの礫率補正式は、室内試験試料の中に室内試験の最大粒径を超える礫の周辺には一切の空隙がないように存在するという条件で補正を行っているため、室内試験値から現場試験値に換算時には過大に評価し易い。礫率が高くなるほど実際の試験結果との乖離が大きくなるため、補正式が適用できる礫率は30~40%程度とされている⁶⁾。

室内試験試料の最大粒径の設定については、前述した通り、それぞれの長所短所があるため、意見が分かるところではあるが、著者は37.5mmで実施した方が良いと考える。これは堤高の高いロックフィルダムでは、最大粒径は100~150mm程度として、礫分を加えることで施工時のトラフィカビリティを向上させることが多いため、室内試験での最大粒度は可能な限り大きくとる方が、現場密度換算時の乖離が小さくなるためである。

次に突き固め試験について述べる。突き固め試験では、同一材料で試験を行っても、その結果には若干の変動を生じる。このため、試験結果に基づき定める最大乾燥密度、最適含水比については移動平均を採用する場合がある。代表値の取り方については明確な定めはないため、使用材料の特性も加味して現場毎で判断することで良い。移動平均を使用する場合

の注意点として、パイルの切替の際には、材料特性が変化するため、異なるパイルのデータを含めて評価しないよう注意が必要である。

(2) 現場管理における留意事項

次に現場での留意点を記載する。材料の粒度はストックパイル全体では、平均的に目標とする粒度・含水比となるよう製造されるが、施工過程において不可避免的なばらつきが発生する。特に施工過程での分級作用により大玉の集中が生じ、それらが放置されると局所的ながらも遮水性に影響が発生するため、大玉の分離対策は最も基本的な留意事項といえる。以下では施工時に意識的に排除できる事項を記載する。

ストックパイルの造成時には盛りこぼれた材料については、パイルの裾に向かって自然分級されて蓄積するため、下部には粗礫が蓄積している場合がある（写真-6.3）。パイルの切崩時には裾部の粗礫は撤去することを忘れず行わなければならない。

パイリング期間は長いほど細粒材と粗粒材の馴染みが良くなるが、不十分だった場合には、切り崩し時に細粒材の層が板状の塊になり、押土距離が十分確保できなかった場合などでは、粗粒材と上手く馴染まない場合がある。このような場合は、切り崩し材をブルドーザで踏み砕いたのち再度ブル押しすると上手く混合される。なお、パイリング期間は長いほど含水比の均一化が進むが、ヤードの制限や冬期休工の有無などによりある程度制約される。自然含水比が高い材料を扱う場合には半年以上パイリングをした事例もある⁷⁾。小石原川ダムではパイリングする期間は3カ月以上を基本としたが、製造されたコアの品質には問題はなかった。



写真-6.3 パイル裾部の粗粒化と撤去例

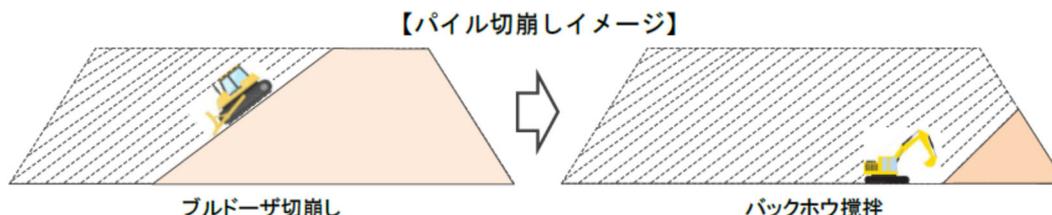


図-6.6 スtockパイルの混合範囲の変化（模式図）

その他、ストックパイルの切り崩しが後半になると、**図-6.6**のイメージのように切崩し混合できる範囲が狭くなるため、切崩し混合による粒度調整が不十分となる場合がある。また、それまでの施工時にパイルの裾にたまった粗粒材が残存している場合があり、パイル終盤は丁寧な混合処理と粗礫撤去を行う必要がある(**写真-6.3**)。参考として小石原川ダムの搬出時粒度の推移とストックパイルに切替のタイミングとの関係を**図-6.7**示す。**図-6.7**に示すとおり、パイルの切替後半において粒度が粗くなるなどの変動が生じていることが分かる。これは先に述べた、パイル後半で混合範囲が狭くなること、パイル裾の粗粒化の影響が大きくなること、による。この傾向に気づいたのはパイルの後半の混合にバックホウを併用して丁寧に作業するよう施工方法に工夫を加えた。

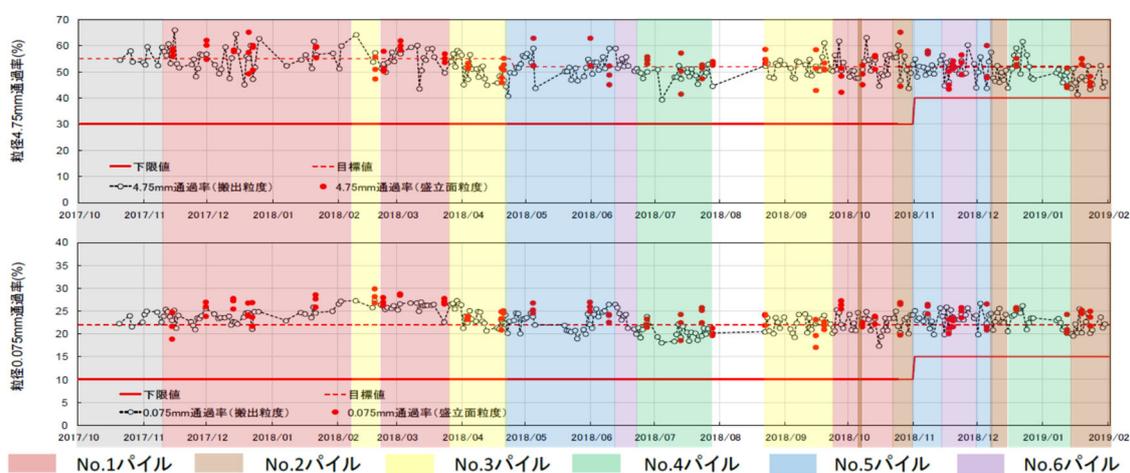


図-6.7 搬出時粒度の推移とパイルの切り替わり

6.4. 盛立面における管理

盛立面における施工管理では、施工仕様の遵守状況、材料について含水比変化や局所異常の確認、接合部や境界部の処理などの確認、などを行う。これらの確認は、ICT が導入される以前の管理では、以下の例に示す項目等について技術者が目視で確認し、チェックシート等に記録・保存されるのが一般的である。

現場での確認項目の例

- (1) 盛立面の状態…湧水処理状況，盛立面含水比，計器周辺の先行施工
- (2) 材料の品質…含水比，粒度（大玉集中，細粒分集中の有無），木根の混入，オーバーサイズの混入
- (3) 材料搬入，撒出の状況…ダンプトラックの搬入口の分散，撒き出し方向，誘導員配置，トンボ設置高，木根・オーバーサイズ除去，余盛，レーキング状況
- (4) 転圧状況…締固め時の含水比変化，転圧方向，転圧回数，転圧速度，ラップ転圧，境界付近の施工状況，未転圧部の有無，仕上がり厚，締固め密度の適否

これらのうち、太字下線で記した事項は、小石原川ダムでは ICT 施工により、全量検査が可能な状況が実現された。また、波下線で記した事項は、Web カメラ等による遠方監視によっても概ねの状況確認が可能である。

このように ICT 施工により、日常的な作業の大部分はデータベースに記録されていくため、現場において臨場監督で注目する部分は ICT 施工の導入前と比べると限定的になってきており、強弱をつけた監督が可能になってきている。個人的な感覚としては、日常の施工管理の中で特に注目すべきは施工境界の処理（レーキング、散水）、材料の局所異常（木根等の異物や大礫の混入、局所的な礫分の集中等）、施工中の含水比変化、の3点と考える。

以下、細部技術の話題となるが工事監督時の注意事項を記述する。

(1) 盛立面の状態

A) 湧水処理

湧水処理については着岩部（河床部，アバット部）の地下水位以下の範囲で施工する際の処理である。これらは湧水の規模や発生箇所に応じて処理方法が異なり、著者の経験の範囲外のものも含まれるため、ここでは考え方の重要な部分を中心に記載し、具体の処理作業の詳細な説明は割愛する。処理作業の詳細については参考文献⁸⁾を参照されたい。

湧水は地下水位以下の範囲における水理的弱部で発生するため、強制的に閉じても別の弱部から新たに発生するため無理に抑え込まないことが重要である。このた

め、小規模な湧水であれば無収縮モルタルによるスラッシュ処理などで、湧水を抑えて着岩コアの施工に移る場合も多いが、無理に抑えると施工済みの箇所が膿む場合もあり、基本的には技術書⁸⁾に記載されるとおり塩ビ管やヒューム管などを立てて排水あるいは水位のバランスが取れる高さまで引き上げて施工するのが良い。参考に湧水量が少ない場合の処理方法である塩ビパイプを用いた処理と、湧水量が多い場合の処理方法であるヒューム管を用いた処理の事例を模式図で写真を記す。

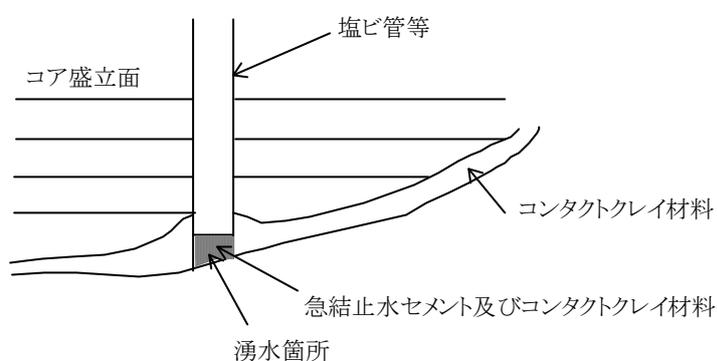


図-6.8 湧水処理の事例（塩ビパイプ）



写真-6.4 湧水処理（塩ビパイプ）

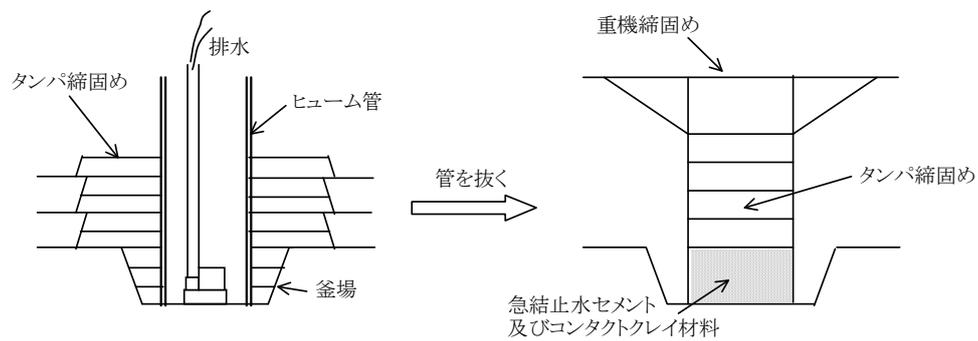


図-6.9 湧水処理の事例（ヒューム管）



写真-6.5 湧水処理（ヒューム管）

B) 盛立面含水比

締固め土の工学的特性は CEL，土質，含水比によって概ね規定され，特に含水比が不足すると急激に透水係数が上昇するため，締固め材料の含水比管理はフィルダムの施工管理・品質管理においても最重要管理項目の一つである。

含水比管理を行うときに見落とされがちなのが，盛立面（＝前層）の含水比である．フィルダムの施工では締固めは層厚 30cm 程度を上限として，薄層での締固めを行うが，施工層の馴染みを良くするために，レーキング処理が行われる．レーキングによって緩む範囲は概ね 10cm 程度であり，この範囲の締固め性能が確定するのは，レーキング後に再転圧を行った時になるためである。

通常の品質管理では搬出材料の含水比や転圧終了後の含水比を確認することとされているが，施工時の下層の含水比を確認するプロセスは通常含まれない．特に，夏季のような表層が乾燥し易い時期の施工や，左右岸の切替施工等により長期間放置された施工面上に撒き出しを行う場合には，撒き出し前の盛立面の含水状態は良く確認し，必要に応じて散水を行うことが重要である（シート養生を適切に実施



写真-6.6 盛立面の散水状況



写真-6.7 計器周辺の先行施工の状況

していれば、問題になることは少ない.)。

盛立面が乾燥してひび割れが入っているような場合でも、表層から 5cm 程度めくると内部は湿潤しているのが普通であるが、表層が乾燥しているようであれば適切に散水が必要である。特にレーキングをしてしまうと内部の材料が露出することで、レーキング前が乾燥している状態であったとしてもそのように見えなくなってしまうので、レーキング前の確認が重要である。

C) 計器周辺の先行施工

著者の所属する水資源機構の建設するフィルダムでは、埋設計器（層別沈下計・P S 検層管）周りは、コア材撒き出し前に先行施工を実施している。これは埋設計器周辺の施工には、大礫を含まない尖頭粒度調整された材料で施工を行う必要があり、締固め作業も人力で実施するためである。

(2) 盛立材の品質（含水比，粒度，木根の混入，オーバーサイズの混入等）

盛立面での材料の品質確認としては含水比，粒度が基本となる。含水比については、搬出時の品質確認を行っているが、通常は日 3 回程度の頻度で、代表材料を用いた確認試験を実施するが、空間的，時間的な変動は分からない。

また搬出場から盛立面への輸送中の乾燥，施工時のトラブルによる待機や撒き出し作業中の乾燥（撒き出し作業は通常 2 時間程度）などが発生する場合がある。特に夏季は施工中の乾燥が著しいため，散水車を施工エリアの近傍に待機させ，適宜散水を行う。また，レーキング後の施工境界が乾燥した場合にそのまま撒き出しを行うと，撒き出し後にはその状態が分からなくなるため，材料を撒き出す前の施工境界が乾燥していないかどうか特に注目して散水作業を行う必要がある。

撒き出してブル転まですると表層付近の含水比は大きく変化することはなく，また次層施工時に再転圧を掛けるのでこの段階で適切な含水比になっていけば問題ない。よって前施工層をレーキングした箇所の含水比に最も注意を払わなければならない。



写真-6.8 大玉・異物の除去状況

次に粒度監視についての留意点を記す。前節の搬出時の留意点にも記載したとおり、ストックパイルの切替時等で、パイルの裾に自然分級でたまった大玉を混合した材料が搬出される場合があり、これらがダンプアップによる自然分級で更に集中してしまうという状況で、「大礫の局所的な集中」の発生は発生する。この為、オーバーサイズ除去を適切に行うとともに、ブルワークはダンプアップされた山を全て押し切ることで混合させることが重要で、ダンプアップされたままの材料が残存しないような作業手順を指導することが必要である。また、ブルワークの先端には大玉が残り易く、施工エリアのダム軸方向の端部ではダム軸直交方向に大玉が集まり易いので、こういった箇所に注目して現場監視をするのが良い。

搬入材料には木根や最大粒径（100mm~150mm とするダムが多い）を超えるオーバーサイズの大礫が混入している場合がある。これらについては、撒き出し後に作業員らによって除去する。これらの作業を行う作業員は基本的に着岩部処理を行う人員が実施するが、高標高部となり着岩部と盛立エリアが離れている場合などに効率が悪くなるため、極力材料製造の段階でこれらを排除できるような工夫ができると、工事全体のクリティカルである盛立面での作業時間が減じられ、施工効率が向上すると考えられる。

(3) 材料搬入・撒き出しの状態

（ダンプトラックの搬入口の分散、撒き出し方向、誘導員配置、レーキング状況、余盛、トンボ設置高）

これらは締固めエネルギー管理、工事の安全管理、出来高管理に関する確認事項である。ここでは、締固め土の品質に影響が大きい「レーキング」、「トンボ設置高」についての留意事項を示す。

レーキングは前層の表面をかき乱しておくことで、施工層との境界を消失させて馴染みを良くするために、撒き出しの直前に実施される。通常はブルドーザに取付けたアタッチメントを用いて実施するが、盛立試験など範囲が狭い場合にはバックホウで実施する場合もある（写真-6.9）。レーキングの監督時に注意するのは、レーキング前の盛立面



写真-6.9 レーキングの状況

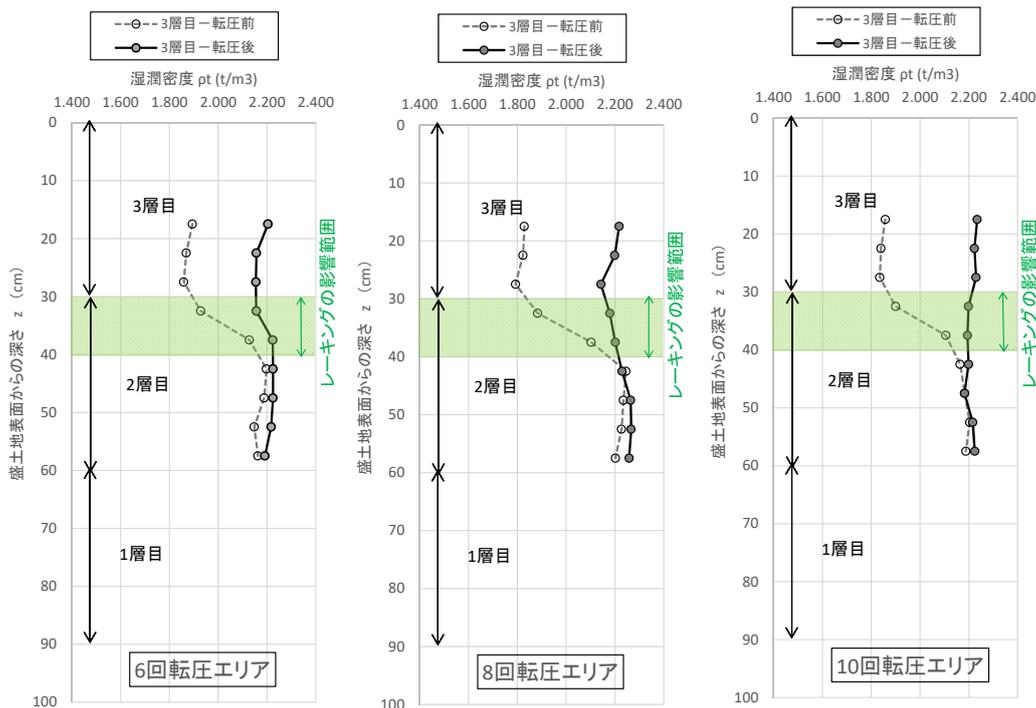


図-4.20 コア内の密度分布（2孔式RI試験結果）【再掲】

の含水状態，レーキングの範囲・深さ，である。含水状態については(2)で述べたとおりである。レーキングの深さは表面が僅かにかき乱せればよいため，5cm程度に設定するのが良いと思われる。このときのレーキングの影響範囲は概ね10cm程度と考えられ，このゆるみの範囲も含めた締固め厚は40cm程度となるが(図-4.20)，この範囲までは鉛直方向の密度分布は概ね均一に仕上がることが確認されている。なお，図-4.20の転圧前のデータで密度低下が発生している範囲については，レーキングではなく計測用ケーシングの設置時に密度低下が生じたものであるが，レーキングによる緩みと類似の状態を再現していると考えている。

トンゴ設置高は撒き出し厚を管理するための項目で，これは締固めエネルギーに影響する。施工層厚が厚くなるほど単位厚あたりの材料に作用するエネルギーは減少するため，盛立試験で設定した施工仕様どおりの撒出厚を確保することが，機械施工による締固めの基本事項である。近年ではGNSS管理の導入が推進されているため，現場でトンゴによる撒き出し厚の指示を見る機会は減少すると思われる。今後はGNSSに基づくマシンガイダンス(MG)による座標管理データがトンゴによる施工管理を代替することになる。これらのGNSS管理データの妥当性については施工業者の施工管理の一環の中で管理される。このため，GNSSデータの妥当性を担保するためのチェック体制が適切に構築されることが望まれる。

また発注者はこれらのGNSS管理を行うための基本ルール等については，着手段階で積極的に関わることを望ましい。具体には，排水勾配の設定ルール，ダム軸方向の勾配

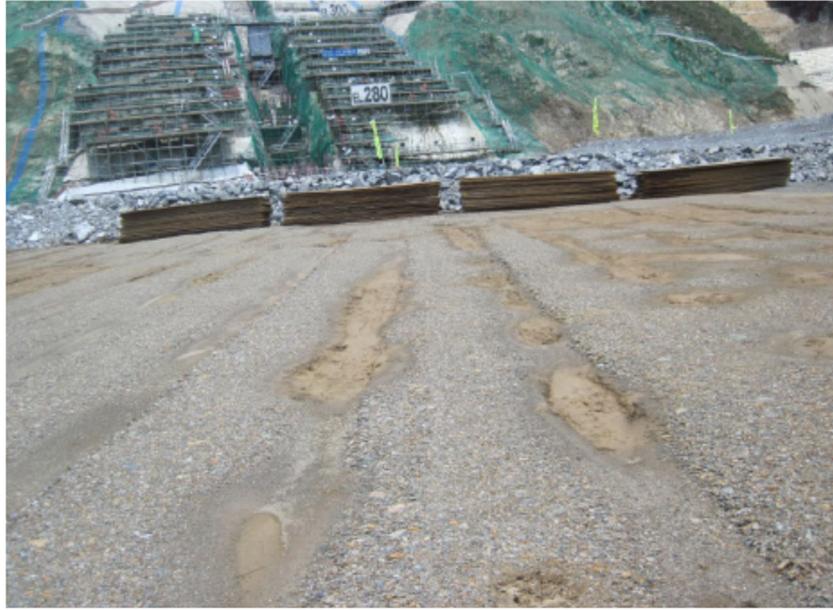


写真-6.10 降雨により粗粒化したコアゾーンの斜路（撤去が必要）

の設定ルール，レーキング深さの設定，出来高管理の側線設定，設計余盛と施工余盛の確認，GNSS データのチェック体制，等については詳細施工計画の検討段階で発注者も確認を行うべき事項であると考える。

その他，撒き出し前後のチェックとして，左右岸の施工範囲の切替時に発生する斜路や上下流横断路で使用されていた範囲について記述する。フィルダムコアゾーンの建設では，高標高部になるに従いV字が広がる，下流ロックゾーンへの運搬路を確保する必要がある，といった理由により左右岸を交互に施工する。このときダム軸方向に勾配10%以内の斜路が形成される。施工中に豪雨が発生すると斜路に水が走るため，シート養生を実施していないと，表面が粗粒化する場合がある（写真-6.10）。このような場合は表層を鋤取り，次撒き出しを行わなければならない。

上下流横断路については，施工済みのコアゾーンにロック材で厚さ1m程度の運搬路を造成されるものである。左右岸の施工範囲が切替時に横断路の撤去を行うが，その際には下層のコアゾーンについては密度試験，含水比試験を行い，異常の有無を確認する。

(4) 転圧状況

（締固め時の含水比変化，転圧方向，転圧回数，転圧速度，ラップ転圧，境界付近の施工状況，未転圧部の有無，仕上がり厚，締固め密度の適否）

締固め時の確認事項は上記のような項目があり，現場技術者が主に目視で監視して必要な措置を行う。これらのうち，転圧方向，転圧回数，転圧速度，ラップ転圧，未転圧部の有無，仕上がり厚といった項目は，前述のとおりGNSS管理等のICT施工により記録が残り，重機オペレータは管理図を見ながら施工状況を確認しているため，不具合が

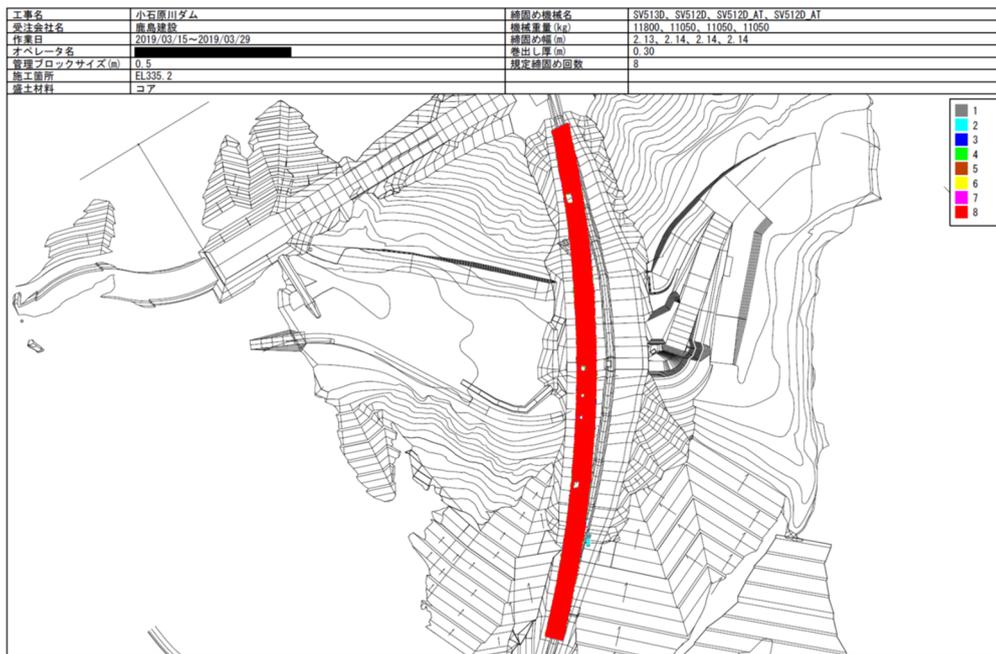


図-5.12 GNSS による転圧管理記録 (例) 【再掲】

生じる可能性はほとんどなくなっていると考えられる。参考として図-5.12 の GNSS 管理による転圧回数管理システムの出力図を再掲する。

締固め時の含水比変化については、材料の撒き出しは2時間程度かかるため、夏季では最初に撒き出した範囲が乾燥する場合があるため、適宜散水する必要があり、これは現場管理する技術者が適宜対応する必要がある。ただし、撒き出し時の転圧効果により、表層付近以外の含水比はほぼ変化しない状況になることと、表層については次層施工前の含水比調整によりリカバリーが可能であるため、撒き出し前の盛立面・盛立材料の含水比確認よりは優先度は下がると考える。

密度については、一般土工と同様に GNSS 管理 (転圧回数管理) が基本となり、頻度を下げて RI 試験等による確認を行う。RI 試験値を現場で確認する際には、D 値が 100% を超過する場合が少なくない頻度で発生する。これは、現場 CEL は 1Ec よりも高いこと、代表粒度を設定する室内試験では大玉の混入した材料は選定されにくいいため現場の計測範囲に大玉が混じると高めの D 値が出やすいこと、などが原因で、不自然な事象ではない。特に施工含水比を低めに管理している場合は普通の事象である。

現場での目視監督の際に注目したいのは、中間材との境界部の処理と、転圧時の含水状態である。中間材との境界は上下流方向に連続するため、この部分の処理に一貫した不具合があると上下流方向に連続した不適合箇所を残すことになるため、着岩部の施工に並んで監督時に注目すべき箇所である。中間材は一般コアに対して 1~2 層先行して施工が行われる。このため表層の含水比が低下している場合があり、散水とレーキング処理を適切に行ったうえで素早く撒き出しを行うこと、撒き出し時には大礫の集中の有無を確認すること、などに留意するとよい。

6.5. 「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」の留意事項

第2章に記した「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」を他のプロジェクトに適用する場合の留意点を記す。

(1) 使用材料による適用性

「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」では、施工含水比を従来よりも乾燥側の範囲も許容することで、従来よりも高密度、低透水、低圧密な遮水性盛土を実現するものである。このため真砂土のような自然含水比が低い材料を用いる場合は、本稿で説明した手法は無理なく導入できる。

一方、材料の自然含水比が高すぎる場合は、エネルギーを高めて締固め効率を上げようとしても、そのエネルギーに対応した含水比に調整するための労力・時間・コストが必要になる。このため、各現場の材料特性と要求性能に応じて目標とする締固めエネルギーレベルを設定する必要がある。ただし、その場合でも、本稿で示した締固め効率と締固めエネルギーレベルおよび飽和度との関係は参考になると思われる。

(2) 盛立試験の必要性

第2章では「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」を行うための、締固め管理範囲と管理目標を設定するプロセスとその効果を示した。管理範囲と管理目標を適切に規定するためには、盛土材料の特性と現場の締固め仕様（＝締固めエネルギーレベル）の影響を正しく把握するために盛立試験を省略することはできない。これは、次の理由による。

① 現場 CEL の評価

転圧仕様と乾燥密度との関係は、材料の土質・粒度と含水比によって大きく影響を受けるため、転圧仕様が同じでも材料が異なると現場 CEL（本研究では室内試験の最大粒径以下の締固め状態に礫率補正換算した場合に、換算値の乾燥密度を再現するために必要な室内締固め試験の CEL）が変化するため、現場盛立試験での評価がなしに現場 CEL の評価が出来ない。

② 遮水性能の確認

室内透水試験と現場透水試験では最大粒径の違いや透水性の異方性から、試験結果が異なることが知られている⁹⁾。このため、重要構造物であるダムの遮水ゾーンの施工では現場盛立試験で必要な規格値を確実に満足することを確認する必要がある。

ただし、本研究で得られた知見を参考にして機種選定や含水比の管理範囲の検討プロセスを簡略化・効率化できると考える。

(3) 管理目標点の設定

小石原川ダムでは $(w_{opt})_{1Ec}$ を目標施工含水比に設定して管理を行い、その結果、既設ダムと比しても高い締固め品質を得ることができた。この目標値を設定しなければ、施工は湿潤側に寄った含水比管理となり、今回のような高い品質管理結果を得ることはできなかった可能性がある。その理由は、遮水性盛土を施工する際に、自然含水比から乾燥側に調整させることは過大な調整をした場合に遮水性能が低下するため、慎重な管理が必要となり、施工者としては品質が向上するとわかっているにもかかわらず、管理の手間やリスクを考慮すると湿潤側の施工を選択し易くなるためである。

実施工では $(w_{opt})_{1Ec}$ 付近で施工を行うために、搬出～撒き出し～転圧までの過程で生じる施工中の材料の乾燥を加味して搬出時の含水比調整を行った。搬出時の含水比調整は各現場の材料特性、季節、日中施工か夜間施工か、などの影響を受けるため、どこの現場でも適用できる共通のルールを設定することは難しく、各現場で最適な調整方法を模索する過程が不可欠である。小石原川ダムでは $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも乾燥側の施工を許容するため、従来施工よりも乾燥側の管理下限値を下回った場合でのリスクが大きい。このため、搬出時の含水比調整は+2%程度から徐々に下げていく調整を行った。

また、管理目標点の設定する一方で、過剰に乾燥側の管理とならないよう注意した。散水車を常時配備し必要に応じて散水を実施することを徹底した。また、撒き出し前の前層の表層は昼休憩や昼夜勤の切替時間によって表層の含水比低下が生じ、レーキングを行うとその影響は著しくなるため、休憩・切替前のレーキングは禁止した。また、レーキング後に材料を撒き出しが完了してしまうと乾燥している部分が分からなくなるため被せる前の状況を監視し必要に応じた散水を徹底するよう指導した。

(4) CEL の管理

CEL 管理は撤出厚、転圧回数については ICT 施工により担保することとしたが、撤出高さは一様ではなく上下流方向に排水勾配も確保して設定するためコア・フィルタ境界はやや低くなる。従前はこれらの計算については、従前より施工者で実施し、その結果が目印看板（トンボ）の表示に落とし込まれ、現場ではこれらが正しいかを目視確認していた。ICT 施工では現場にトンボを設置しなくなるため、目視で現状の撤出厚が正しいかを判断するのが従前より難しくなる。小石原川ダムでは、ICT 施工データの妥当性の確認のため各重機に設定される 3D データのチェック体制の整備を受注者に要請した。

これらのデータ確認については発注者でも導入当初にプロセス確認を行った。なお、これらの CEL 管理のための ICT 施工管理データは、工事中盤以降の剛性指標管理を導入したタイミングで、正式な管理データとして提出を義務付けた。

(5) 使用材料の土粒子密度

$w \sim \rho_d$ 平面（或いは $w' \sim (D_c)_{1Ec}$ 平面）において飽和度管理を行う際の、重要な仮定として

土粒子密度が概ね一定であることが挙げられる。

$w \sim \rho_d$ 平面（或いは $w' \sim (D_c)_{1Ec}$ 平面）に飽和度コンターを描く場合、土粒子密度を一定と仮定して計算を行うが、実際には土粒子密度は変動するため、個別点と飽和度コンターの位置関係には、土粒子密度の誤差の影響が含まれる。 $w \sim \rho_d$ 平面におけるデータ分析の際には、これらについて理解したうえでデータを分析する必要がある。

(6) 標準化について

本研究で取り組んだ「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」は、小石原川ダム施工においては非常に有効であったが、標準化してすべての盛土施工に拡張する必要はないと考えている。これは、現場条件によっては、当該管理法が最適ではない場合があるためである。

(1)にも記載したが、使用する材料の含水比が高い場合、材料を乾燥させるための労力・時間・コストが必要となる。このため、高いCELで得られる工学的性能がオーバースペックとなるような場合には、標準的な1Ec基準の含水比管理で施工していた方がコスト、労力、性能のバランスを考慮した場合には全体最適になるという場合もありえる。

小石原川ダムではダムサイト近傍に質の高い遮水材料の賦存量が少なかったため、製造材料の品質をやや下げる一方で、より高いCELで締固めて機能を高めてやることで高品質材料と同等の性能を確保した。この過程において、材料調整段階での手間（曝気等）をかけてでも、新規の材料山の開発や材料購入などの対応を取り入れるよりはコストを下げることが可能であった。このため、小石原川ダムにおいてはこの選択が全体最適であったと考えている。

一方、マサ土のような自然含水比が低い材料を使用する場合（例：奈良俣ダムの遮水ゾーン）、1Ec管理では加水が必要な場合があるので、これらの手間を省略しつつ、より高い締固め性能を得られるという意味で、本研究の知見を無理なく導入できると考える。

飽和度の下限値管理については、所要の遮水性能を確実に担保するという意味で遮水性盛土では標準的な管理として位置づけることが望ましいと考える。飽和度は材料の土質や締固めエネルギーのバラつきに影響を受けにくいいため、一つの現場で最初に飽和度を軸とした検討を行うことで性能設計や仕様設定をし易くなるという利点もある。

6.6. 「SSIの上下限值管理法」の留意事項

地盤剛性(Soil Stiffness Index, SSI)の上限値管理によって遮水性能を管理する場合の留意事項を記す。第3章でも述べた通り、締固め土のSSIは含水比が低く、締固めエネルギーレベル(Compaction Energy Level, CEL)が高く、粒度が粗いほど高くなる。また、SSIと透水係数の関係も、粒度等土質(以後、土質)とCELが変化すると変動するため、土質とCELを適切な幅で管理する前提でしかSSIによる締固め管理は適用できないことを記した。

実施工においてCELについては、不可避的なバラツキはあるものの、施工仕様を遵守することで目標とするCELを施工ロット全体で再現することは可能であり、ICT施工によりその記録も担保できる。そこで、土の締固め特性を規定する「①土質」「②含水比」「③CEL」のうち、③が確実に担保され、仮に①②が適切に管理できなかった場合に想定される事象を整理し、その対応策を記す。

(1) SSIの下限値評価で排除できない異常状態

図-6.10に含水比とSSI(変形係数)の関係図においてSSIの下限値管理のみで排除できない異常状を示す。図には変形係数の規格値7MPa以下の範囲において、所要の品質を満足しない領域[1],[2]を記載している。[1]は材料の粗粒化により遮水性能が満足しないが、含水比が高いために変形係数が規格値を満足している、というケースである。[2]は材料が基準値を超えて乾燥しているが、過度に細粒化した材料が使用されることで変形係数が規格値を満足している、というケースである。[2]のケースでは遮水性能自体は満足する場合もあるが、湛水時の湿潤による水浸コラプスの発生が懸念される。

以下に、[1],[2]の状況について詳述するとともに、実施工においてこれらを排除する対応策を記す。

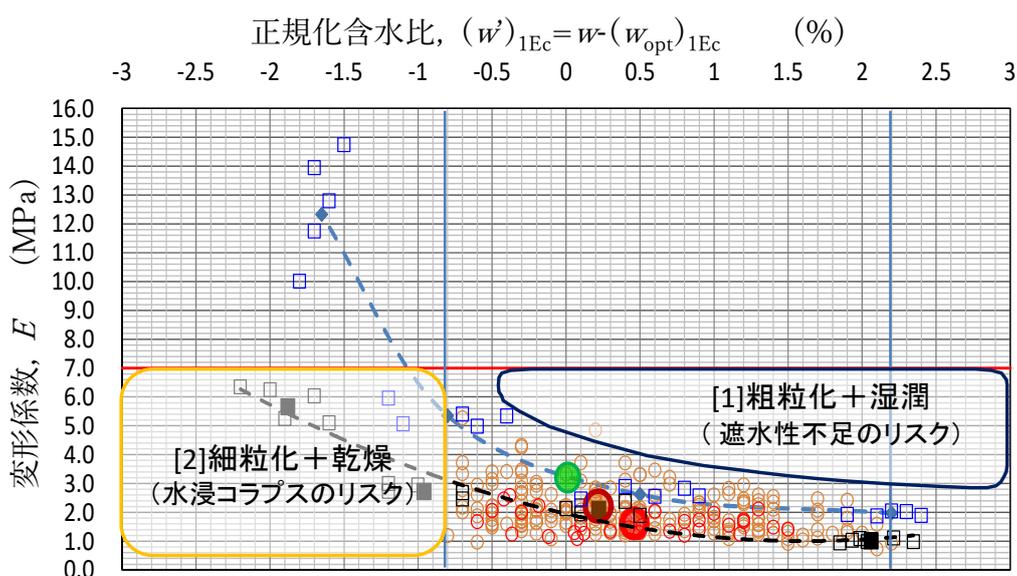


図-6.10 SSIの下限値評価で排除できない異常状態

(2) 遮水性能不足が発生するリスク（粗粒化+湿潤）への対応

図-6.11 に粒度が極端に粗粒側に変化した場合を含む粒度変化に応じた $w \sim \rho_d$, $w \sim k$, $w \sim SSI$ を模式的に示す。図-6.11 は第3章の図-3.6 に示した粒度変化に伴う $w \sim \rho_d$, $w \sim k$, $w \sim SSI$ の関係を参照して作成した。参考として図-3.6 を再掲する。

図-6.11 および図-3.6 のとおり、粗粒化すると SSI, ρ_d , k は全て上昇するが、含水比が高くなると、SSI は相対的に低くなるため、SSI の上限値を満足するというケースが発生する可能性がある。このようなケースでは SSI が上限値を満足していても、透水係数が規格値を満足しない場合があるため適切に排除する必要がある。具体には、-0.075mm 含有率, -4.75mm 含有率の下限値を引き上げ、粒度管理を徹底することが考えられる。小石原川ダムで CCV 管理の導入時に、図-6.12 のとおりコア材の粒度管理の基準を変更している。

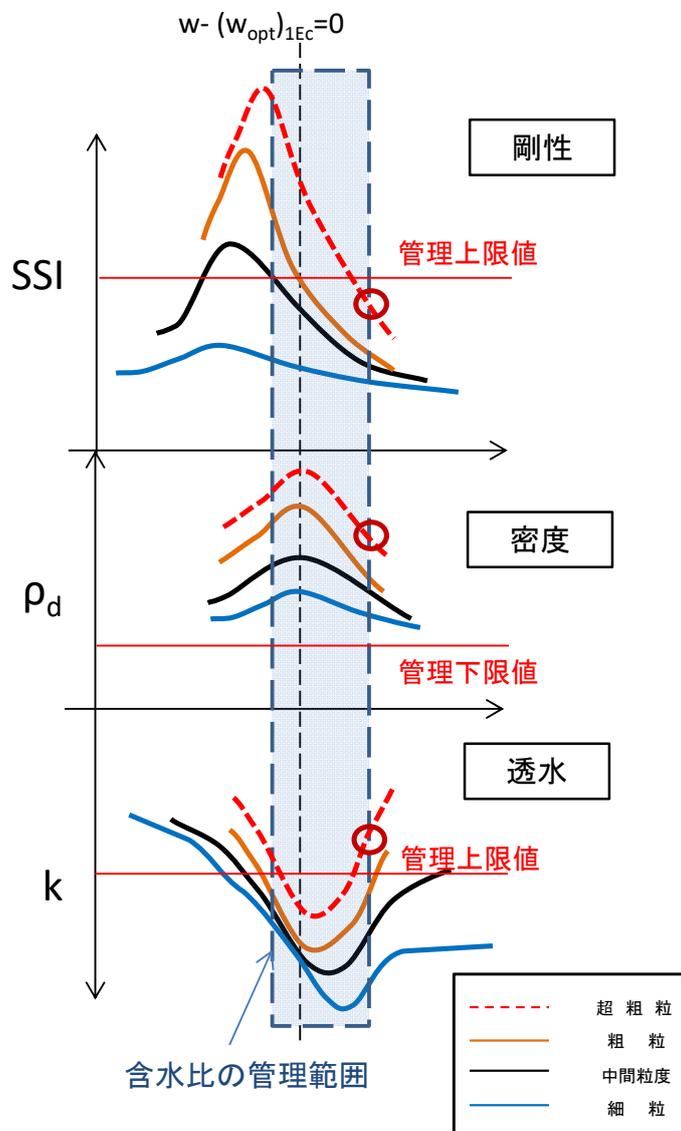


図-6.11 SSI の上限値管理で排除できない異常状態[1]（粗粒化+湿潤）

(3) 水浸コラプスが発生するリスク（細粒化+乾燥）への対応

図-6.13 に粒度が細粒側に変化した場合の w - ρ_d , w - k , w -SSI, CCV 分布のイメージを示す。図-6.13 は図-3.6 を参照して作成した。

図-6.13 および図-3.6 のとおり，材料が細粒化すると SSI, ρ_d , k は全て低下するが，含水比が管理下限値よりも低下した状態でも，粒度が細粒化していると SSI は相対的に低くなるため，SSI の上限値は満足するというケースが発生する可能性がある。このようなケースでは細粒化しているため遮水性能は満足する可能性はあるが，湿潤時の浸水コラプスが

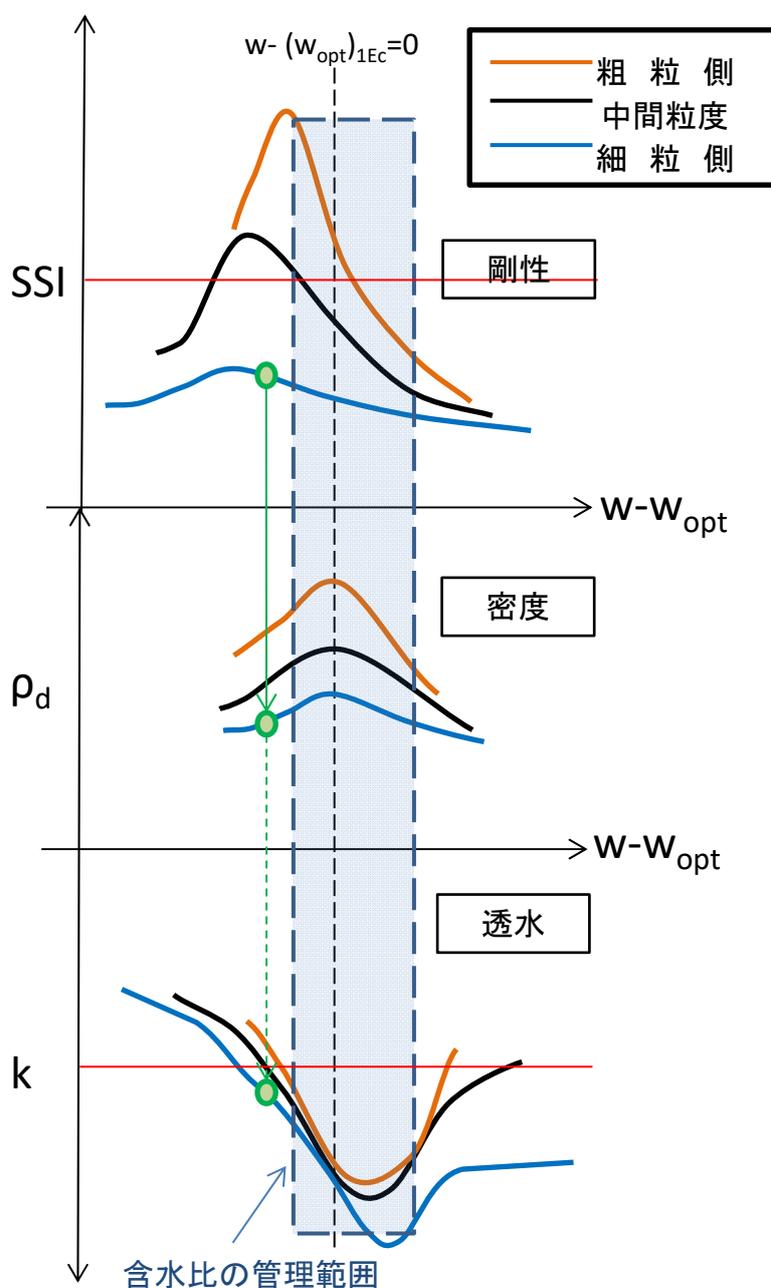


図-6.13 SSI の上限値管理で排除できない異常状態[2] (細粒化+乾燥)

発生するため、適切に排除する必要がある。

[1]同様に粒度管理において上限値を定めて厳しく管理することで排除は可能であるが、遮水性能を満足させる材料を確実に製造しようとする実施工での管理スタンスに立つと、細粒分含有率とマトリクス分の上下限値を規定して製造することはやや難易度が高い。

そこで、施工時の含水比管理に注目する。3章に記した盛立試験結果と含水比の管理下限値を下回っているA点の施工状況を図-6.14に、A点の施工状況を図-6.15に記す。図-6.14、図-6.15より、A点とB点のように施工含水比が $(w_{opt})_{CELf}$ よりも乾燥側にある状況下では転圧面の状態は目視で確認可能な程度にコア材料の乾燥が顕在化する。特に遮水性能を満足しない点Aの施工状況は乾燥状態が著しい。

粒度分布が細かく相対的に遮水性能が高いB材を用いている点Bでは転圧後の転圧面は湿潤箇所と乾燥箇所が斑になっているが、全体的に湿潤面が多い。いずれのケースも撤出の段階で材料は乾燥していることは目視で明確に確認できるため、盛立面状態を見ながら、最低限度の散水等を行ってれば確実に回避することが出来る。

そこで撤出時、転圧後の盛立面の状況を施工時チェックリスト・写真により記録を残すことで、乾燥側の施工ではないことを担保することとし、判断に迷う場合は転圧後に代表地点

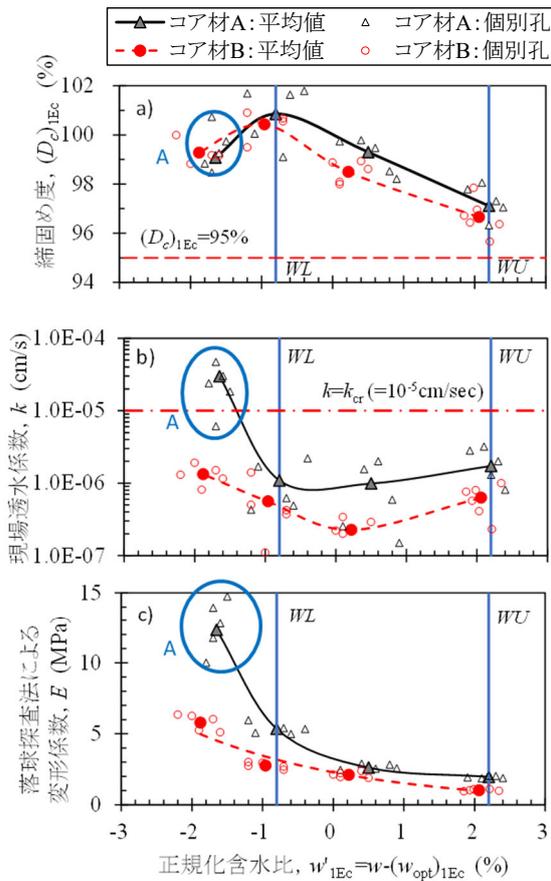


図-6.14 盛立試験の結果 (N=8) 【図-3.10 再掲＋一部加筆】

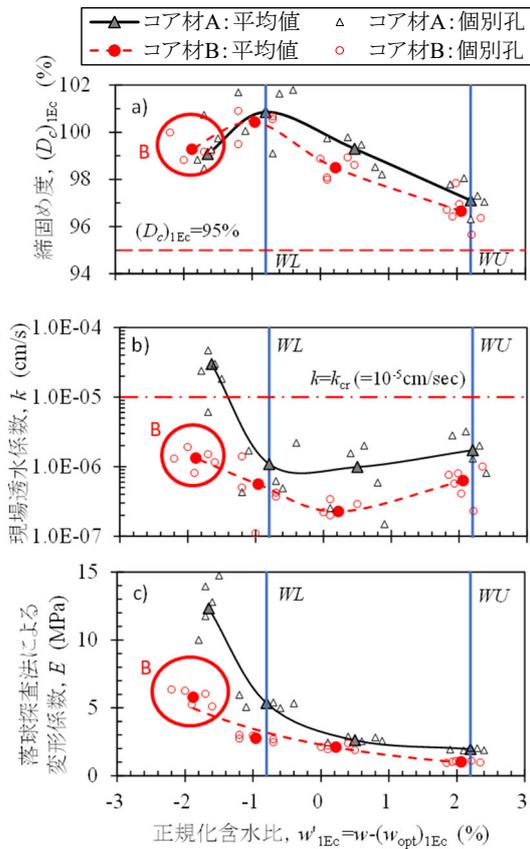


図-6.15 盛立試験の結果 (N=8) 【図-3.10 再掲＋一部加筆】

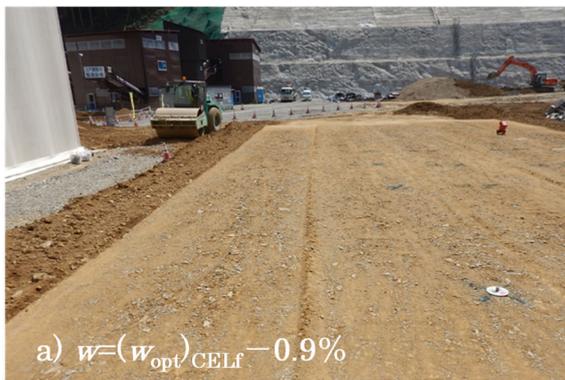


写真-6.11 施工含水比ごとの盛立面の含水状態

で含水比試験を行う。(迷うことがないように、適切に散水等の処理をするのが基本である)。

参考に写真-6.11 に施工含水比ごとの盛立面の含水状態を示す。写真-6.11 の b) は管理含水比の下限值付近の状態であるが、下限値付近でも転圧後の盛立面は湿潤状態になる。施工時は撤出後、転圧後の盛立面の湿潤状態に留意して施工を行うことが重要である。これらの知見を参考に、小石原川ダムでは剛性指標管理の導入にあたっては、代表点の含水比試験は継続し、さらに転圧面の写真を品質管理記録に追加した。

6.7. CCC 適用時の留意事項

ローラ加速度応答法¹⁰⁾を用いた連続的な締固め管理技術 (Continues Compaction Control, CCC)¹¹⁾の実施工への適用が進めば、CCC によって現場技術者の数を大幅に縮減できるという議論が増えると思われる。このとき、CCC の機械的な適用によって、本質的な細部技術が喪失しないように留意した運用がなされる必要がある。この理由の一つとして、フィルダムなど遮水性盛土の実施工では、監督時に特に注意するのは、品質管理試験が実施される一般部ではなく境界部であることが挙げられる。

ここでいう「境界部」とは、異種盛立材料のゾーン境界のみならず、先行施工部との境界、地山勾配の変化断面、埋設計器やケーブルの施工箇所、着岩部、越冬面、降雨再開 (イベント境界)、ストックパイルの切替時などのあらゆる境界部を包含している。

フィルダムに代表される重要盛土構造物での従来の品質管理は現場試験に基づくが、現場試験は物理的な制約から抜取検査型であり施工全体の品質の均一性や局所異常の有無については監督員の目視監視に委ねられる一面があった。しかし、それ故に技術者が施工エリアに常時臨場して、上記の境界部に代表される施工上の注意箇所を目視・触診等によって状態を確認すると言う入念な監視体制の下で施工がなされていた。

これに対して、第4章で紹介したCCV管理では、「前後進の切替箇所 (一般コアと中間コアの境界を含む)」「コア・フィルタ境界」を評価対象から除外しており、前述した境界付近での品質の確認はされないことに留意する必要がある。すなわち、CCV管理で盛立面の品質は「全て担保される」という誤った認識を持つてしまうことで、最も注意が必要な境界部での施工監視が疎かになることを確実に避ける必要がある。

小石原川ダムでは、CCCの導入にあたっては、「CCCにより一般部の施工では品質担保がなされるが、境界部等の品質評価はできないため、これらは従前どおり適切に目視で監督する (※重点監視箇所を定めて強弱をつけて監督)」、「CCVマップを参考に、点検箇所の抽出や抜取試験箇所を選定する」という運用をした¹²⁾。

ICT技術が進んでも、現場に立つ人間の目で確認し、必要に応じて適切に管理・対応することで構造物の品質が保たれるという本質は変わらない、と筆者は考える。本研究で提案する「SSIの上下限值管理法」を適用した新たなCCCについて、今後ほかの現場で使用される場合には、「品質管理試験は事後確認であり、構造物の品質は施工時に決まっている」ことを留意したうえで、現場管理の高度化・合理化に活用するための補助的な使用方法として利用され、改善が進められていくことが望まれる。

6.8. まとめ

第 6 章では本研究を通じて得られた知見について，実務で活用していく上での留意事項を整理した．以下に本章のまとめを記す．

- 1) 材料採取・製造，材料搬出，盛立面の各段階における品質管理・施工管理の留意点について，実務技術者向けの細部技術を中心に整理した．
- 2) 「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」を他のプロジェクトに適用するにあたっての留意事項を整理した．同管理法は地山含水比が低い材料に対しては適用性が非常に高い管理法である．ただし，地山含水比が高い材料に適用する場合には，含水比を低下するための工程が新たに必要となるため，使用材料の土質と要求性能によっては労力・時間・コストの面から全体最適とはならない場合があることに留意し，プロジェクトごとに適用の検討を行う必要がある．
- 3) 「SSI の上下限值管理法」を他のプロジェクトに適用するにあたっての留意事項を整理した．第一に，SSI が粒度等の土質と現場の締固めエネルギーレベル (Compaction Energy Level, CEL)，含水比により変動する指標である*こと．第二に，SSI と透水係数の関係は，粒度等土質 (以後，土質) と CEL が変化すると変動するため，土質と CEL を適切な幅で管理する前提でしか SSI による透水性管理を適用できないこと．第三に，SSI の測定値に異常が発生した場合，含水比の異常，粒度の異常，両方の異常，その他の異常，のいずれの要因かを計測値からは判断できないため，現場 CEL と粒度の管理を徹底したうえで，SSI の異常測定値に対しては現場で締固め状態を目視で判定するという対応が必要となる．
- 4) ローラ加速度応答法を用いた連続的な締固め管理技術 (Continues Compaction Control, CCC) の実施工への適用がなされれば，これまで目視確認していた範囲の多くが品質管理データとして可視化される．その一方で，CCC の管理記録では確認できない重要監督項目があり，現場の課題のそのような箇所が発生することが多い．これらに留意したうえで，CCC 導入後の現場監視の運用については検討を行う必要がある．

参考文献

- 1) 白鷺卓, 川野健一, 池尻健, 北本義幸:打球探査法による岩の変形特性評価と岩級および原石品質の判定への適用, ダム工学, 25 巻 2 号 pp. 79~88, 2015.
- 2) 小原隆志, 小林弘明, 福島雅人, 坂本博紀 :小石原川ダムにおけるロック材に対する品質判定の定量化, 土木学会第 74 回年次学術講演会, 2019.
- 3) 福島雅人, 坂本博紀, 奈良洋幸 : ロックフィルダムの盛立工における挑戦—ICT 施工の全面展開—, 令和元年度国土交通省国土技術研究会, 2019.
- 4) 永井裕之, 三反畑勇, 山岸明広 : 藤沼ダム建設工事におけるコア材の飽和度管理, 安藤ハザマ研究年報 Vol.4, pp.1~6, 2016
- 5) Walker, F. C. and Holtz, W. C.: Control of embankment material by laboratory testing, Proc. ASCE, Vol. 77, No. 108, pp. 1-25, 1951.
- 6) 曾田英揮, 佐藤信光, 中安智洋, 大森晃治, 太田秀樹: 粗粒材料の締固め密度補正に関する実験的考察, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003.
- 7) 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), pp.234-235, 2005.
- 8) 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), pp.224-226, 2005.
- 9) 建設省土木研究所フィルダム研究室 : Q&A フィルダム遮水材料の透水係数の規格値, ダム技術 No.101,pp59-61, 1995
- 10) 藤山哲雄, 建山和由 : 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.115-123, 2000
- 11) Michael A. Mooney, Robert V. Rinehart, Norman W. Facas, Odon M. Musimbi, David J. White, and Pavana K. R. Vennapusa : Intelligent Soil Compaction Systems, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 676, 2010.
- 12) 坂本 博紀, 小林 弘明, 龍岡 文夫, 福島 雅人 : 盛土締固めにおける遮水性能の面的管理法の開発と適用事例, ダム工学, 31 巻 1 号 pp. 27~39, 2021.

第 7 章

第7章 結論

本研究は、序論に示した以下の課題に対して取り組んだものである。

(1) 含水比と乾燥密度による締固め管理に関する課題

従来の遮水性盛土の締固め管理は 1Ec 基準の最適含水比(w_{opt})_{1Ec} と締固め度(D_c)_{1Ec} で規定する場合が多い。このとき、①現場の CEL が標準プロクターの 1Ec よりも大きい場合には過剰に湿潤側の施工を推奨することになり、その結果、実現可能であった高密度・低透水な締固め状態の実現が困難になること、②許容される $w \sim D_c$ の管理領域には遮水性能が不足する可能性がある領域が存在すること、等の課題がある。

(2) 地盤剛性による盛土の遮水性管理に関する課題

遮水性盛土の品質管理において、品質の一様性や局所異常の有無を定量的に把握するには、ローラ加速度応答法を用いた定量的かつ連続的な締固め管理技術 (Continues Compaction Control, CCC) の導入が考えられる。しかし、地盤剛性指標 SSI の下限値管理に基づく従来の CCC では、①高飽和度状態では締固めエネルギーの上昇に伴う SSI の変化が小さくなり、盛土含水比が高い程その傾向が顕著になる、②最適含水比よりも乾燥側では SSI と透水係数がともに急増するため、SSI の下限値管理では遮水性能の管理はできない、③SSI・密度・透水係数・含水比の関係に対する土質と CEL の影響が不明確である、といった根本的な課題があり、従来の CCC は遮水性盛土のような粘性土の締固めへの適用は困難とされてきた。

(3) 遮水性盛土の CCC の具体的手法に関する課題

遮水性盛土の品質管理への CCC の本格的な適用実績はみあたらず、CCC による連続的かつ大量のデータを用いて盛土の遮水性能を評価するための、具体的分析方法や管理フローの事例がないため、実務への適用検討時には、これらの管理法についても整理を行う必要がある。

以下に、本研究で得られた結論と今後の課題を記す。

7.1 結論

本研究で得られた結論を記す。

- 1) 「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」を考案した。考案した締固め管理法では飽和度の下限値を定めることで、従来の管理基準の許容範囲に含まれる可能性のあった締固めエネルギー不足により遮水性能が不足する状態を明確に排除した。また、飽和度の下限値と現場の締固めエネルギー(Compaction Energy Level, CEL)を考慮して含水比管理範囲定めることで、従来は慣用的に管理範囲から外されていた1Ecの最適含水比よりも乾燥側の含水比での施工を許容した。考案した締固め管理法をロックフィルダムの遮水ゾーン建設に適用し、その品質管理記録を解析した。この結果、小石原川ダムでは従来の管理基準に基づき建設されたダム群と比べ高い品質が得られており、その要因は新たに許容した1Ecの最適含水比よりも乾燥側における品質が高い(締固め度が高く、透水係数が低い)ことにあること、を示した。
- 2) 室内試験および現場盛立試験に基づき、「地盤剛性指標 (Soil Stiffness Index, SSI) の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法」(以後、「SSIの上下限值管理法」)を考案した。従来の定量的かつ連続的な締固め管理(Continues Compaction Control, CCC)はローラ加速度応答法によるSSIの下限値管理を行うものが主体であり、遮水性盛土への適用が困難とされてきたが、考案した管理法により、締固めエネルギーと盛土材の粒度等の土質が適切に管理することで遮水性盛土への適用を可能にし、SSIの上下限值管理により盛土の乾燥密度のみならず遮水性能も管理できることを示した。
- 3) 「SSIの上下限值管理法」をロックフィルダムの遮水ゾーン建設の実務に適用するための具体の検討プロセス(異常データの排除法、管理値の設定、管理フローの整理、等)を、①SSIに変形係数を用いた抜取検査型の多点管理、②SSIにローラ加速度応答法の指標を用いた全量検査型の面的管理、の各段階で示した。特に②では、従来のSSIの下限値管理では問題となりにくかった極端に高いSSI異常値の要因分析を行い、特定の条件下でローラの基本振動数が変動する場合にローラ加速度応答法による計測結果に異常値が発生していることを確認し、評価対象から除外できることを示した。
- 4) 「SSIの上下限值管理法」を適用した実ダムの品質管理記録を解析し、「SSIの上下限值管理法」によって現場透水係数が適切に管理できることを示した。

※適用期間は下記のとおり。

- ① 現場試験(落球探査法)による多点管理: 2018年4月~2019年4月(13カ月間)
- ② ローラ加速度法による面的管理: 2019年5月~2019年7月(3カ月間)

7.2. 今後の課題

本研究での成果を踏まえた今後の課題を示す。

(1) 「現場の締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理法」の適用に関する課題

本論文で示した「現場締固めエネルギーと飽和度を考慮した締固め管理補」は地山含水比が低い材料に対しては適用性が非常に高いが、地山含水比が高い材料に適用する場合には、含水比を低下させるための設備や作業が新たに必要になる場合がある。使用材料の土質と要求性能によっては労力・時間・コスト・効果を総合的に考えた場合に、全体最適とならない場合があることに留意し、プロジェクトごとに適用検討をする必要がある。

(2) 「SSI の上下限值管理法」に関する課題

「SSI の上下限值管理法」の適用条件は、盛土材の粒度等の土質と締固めエネルギーが概ね一定に管理されていることである。このため、材料管理が厳密に行われるフィルダムの施工では無理なく導入できる。一方、道路土工等の一般土工では締固めエネルギーの管理は可能であるが、盛土材の土質の管理は容易ではない場合が多く、「SSI の上下限值管理法」をそのまま適用することは出来ない。SSI に対する土質の影響の評価法を改善することで、一般土工にも適用範囲が広がる可能性があり、これらは今後の課題である。

(3) 遮水性盛土における CCC に関する課題

(3-1) 異常に高い計測値の客観的棄却法

現場盛立試験の計測記録より、振動ローラの基本振動数 f_0 が変動する際に CCV が急増する場合があることが確認された。本研究では f_0 が変動する要因分析を行い、①振動の ON/OFF 時、②前後進の切替時、の影響を受けたデータを排除したが、全ての異常値の排除には至っていない。 f_0 の変動に起因する計測異常値は CCV 以外の指標でも発生する可能性があり、その客観的な棄却方法については検討の余地が残されている。

また、異種材料の境界付近の計測記録についても、適切な物性を反映していないため評価対象から排除する必要があり、この排除方法についても検討の余地が残されている。

(3-2) 高含水比材料の締固めに適用性の高い指標の選定

本研究で使用したローラ加速度応答法の指標は CCV のみであり、CMV 等の他の指標の適用性についての確認はしていない。このため、他の指標の中に、高含水比材料の締固めにおける計測感度が高い指標が存在していた可能性があり、より計測分解能の高い指標を明らかにすることで、遮水性盛土の CCC の管理精度が向上すると考えられる。

以上

謝辞

本論文は、筆者が小石原川ダム建設事業に携わった平成 27 年 2 月～平成 31 年 3 月までの 4 年間にわたって行った、フィルダムの遮水ゾーン建設に関する品質管理の合理化・高度化に関する取組についてとりまとめたものです。

今回、本論文を作成する機会を与えて頂いた東京大学・東京理科大学名誉教授の龍岡文夫博士に深く感謝致します。龍岡先生には小石原川ダムでのコア盛立に関する技術委員会にて委員長としてご指導を頂いておりました。その中で、「委員会での検討成果は博士論文として残す価値のある内容である」と言ってくれたのが、この本論文に着手するきっかけでした。本論文の執筆にあたってのご指導はもとより、委員会を通じての議論、公表論文の執筆、学会賞への申請、など多くの場面で尋常ならざるご指導、ご支援を頂きました。改めて厚く御礼申し上げます。

本論文の主査として審査いただきました東京大学大学院教授 古関潤一博士には、計画段階からとりまとめまで 3 年間にわたりご指導、ご支援を頂きました。学術的かつ公平な視点での鋭いご指摘や貴重なご助言を多数賜りました。また審査に掛かる諸々の調整を含むあらゆる面でご支援を頂きました。厚く御礼申し上げます。

本論文の副査として審査いただきました立命館大学工学部教授 建山和由博士、東京大学生産技術研究所教授 桑野玲子博士、同准教授 清田隆博士、東京大学大学院准教授 渡邊健治博士には、本論文に対する貴重なご助言やご指導を賜りました。現場で検討に取り組んでいた頃とは異なる視点からのご指導とご助言を多数賜り、現象への理解がより深まり、論文内容も改善することが出来ました。皆様に厚く御礼申し上げます。

小石原川ダムにおける技術委員会の委員としてご指導を頂いた水野光章様、松本徳久博士、山口嘉一博士に感謝申し上げます。検討会では、現在の品質管理の考え方についての歴史的な経緯を踏まえた貴重なご指摘、ご助言を数多く頂き、それらに一つ一つ向き合うことで本論文の基礎が構築されたと考えております。技術検討会では 2018 年に当時の水資源機構理事の自閑茂治様の助言により面的管理法についての審議着手を 1 年近く前倒しました。この新たな技術についての審議には時間を要し、この助言がなければ実務適用に間に合わなかったと思われまふ。加えて自閑様にはご多忙の中、本論文の査読もして頂きました。皆様に深く感謝の意を申し上げます。

委員の山口嘉一博士とは、私が土木研究所に出向していた間に直属の上司としてご指導頂いた間柄で、私が人生の岐路で思い悩んでいた時にもご相談に乗って頂き助けて頂きました。今の私がダム技術者として誇りをもって仕事ができるのも山口様なしにはなかったと考えており、重ねて感謝申し上げます。土木研究所では当時の山口上席研究員（現ダム技術センター理事）をはじめ、佐々木隆上席研究員（現 国土技術政策総合研究所 研究総務官）、金銅将史総括主任研究員（現 国土技術政策総合研究所 大規模河川構造物研究室室長）、佐藤弘行主任研究員（現 国土技術政策総合研究所 主任研究官）、小堀俊秀研究員（現 国土技術政策総合研究所 主任研究官）をはじめとした多くの皆様にご指導、ご支援いただきながら過ごさせて頂いたのは貴重な経験でした。特に年の近かった小堀様には出向時代から折々で助けて頂き、また小堀様が学位を取得されたのを伺ったことで学位取得を思い立つきっかけを頂きました。皆様に厚く御礼申し上げます。

水資源機構では入社以降、多くの先輩方にご指導を頂きながら、技術者として育てて頂きました。特に旧試験研究所を母体とした総合技術センターに勤務していたおりに直属の上司であった

佐藤信光博士にはダムの耐震性能照査やフィルダムの挙動解析等について多くの指導をして頂くとともに学位取得を考えるきっかけも与えて頂きました。曾田英揮様には徳山ダム時代からフィルダムの材料設計から施工管理について多くのご指導を頂きました。私が総合技術センターにて耐震照査を担当している傍らで、曾田様が小石原川ダムの材料設計や導入する新たな締固め管理の検討をされており、深夜にその内容をご指導して頂いておりました。私が現場に異動してからは、曾田様のご検討を引き継ぎ、現場の実務への落とし込みを担当させて頂きました。実務を進めていく上では本研究の内容以外にも、現場の諸課題への対応を両氏には度々相談させて頂き、その都度、貴重なお時間を割いてご指導をして頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

小石原川ダム建設所での4年半の間、日野浩二所長（現水資源機構理事）、染谷健司所長（現関西・吉野川支社淀川本部長）、杉尾俊治副所長（現筑後川上流総合管理所長）、高橋健一副所長（現（株）アクアテルス）、松岡義幸副所長（現総合技術センターマネージャー）、田中英晶工事課長（現関西・吉野川支社吉野川本部企画調整課長）、奈良洋幸工事課長（現本社技術管理室技術調査課長）、永井伸一工事課長（現利根川下流総合管理所管理課長）、有馬慎一郎設計課長（現本社経営企画部企画課参事役）、林幹男設計課長（現池田総合管理所早明浦ダム・高地分水管理所所長）の下で実務にあたらせて頂きました。多くの裁量を与えて頂くとともに、現場管理に集中できる環境の中で仕事に打ち込ませて頂きました。特に日野様には所長として多忙を極めている中でありながら、所長室にて数時間にわたって、本研究での取組以外にも技術的な議論を幾度となくして頂き、工事以外の悩みにも相談にのって頂きました。また、小石への異動には当時の柳川晃技師長から機会を頂き、理事に就任されてからも様々な場面で叱咤激励を頂きました。皆様のおかげで小石原川ダムでは入社後20年の中で最も濃密に技術的課題に向き合うことができました。皆様に深く感謝の意を申し上げます。

本研究課題であるフィルダム遮水ゾーン建設の品質管理については、鹿島建設の小林弘明様、松本孝矢様、小原隆志様、藤崎勝利博士、吉田輝博士、大野進太郎博士、ダム工事課の坂井田輝君、福島雅人君、現場技術員の鳴石亨様、小松広和様らとも数多くの議論をさせて頂きました。特に小林様とは二人三脚で盛立材料に関する諸課題に対応して頂いたと感じており、私からの高めの依頼にいつも丁寧に対応して頂きました。本当にありがとうございました。他にもここに記載しきれなかった多くの方々からも様々なご支援を頂きました。実に多くの方々を支えられ、学ばせて頂いたことを実感する次第です。改めて関係者の皆様に深く感謝の意を申し上げます。

このように、本研究は、多くの関係者の皆様のご支援、ご協力によってまとめることができました。しかしながら、土の締固め管理は奥深く、今なお多くの課題が残されています。本論文のとりまとめの過程でも、新たな課題が幾つも確認されました。今後もこれらの課題への取組や研究成果の発信等を通じて、地盤工学の発展に資するべく微力ながら努力していく所存です。

最後に、私を育て、道に迷った時にはいつも背中を押してくれた両親、そして、支えてくれた妻の真理子、子供達（陽菜、結菜）に心から感謝します。小石原川ダムに携わった甘木での生活では、平日は深夜まで帰らず時には休日でも仕事という家庭を顧みない働き方を許し、支えてくれた妻には感謝しきれません。本当にありがとう。そして、これからもよろしくお願いします。

2022年3月

坂本 博紀

付録 A

フィルダムコアゾーンの鉛直方向の密度分布の計測事例

1. はじめに

本資料は小石原川ダムのコアゾーン建設に関する盛立試験において確認した、鉛直方向の密度分布に関する計測事例を整理したものである。

フィルダムコアゾーンの締固めでは所要の密度と透水係数を確保するため、粒度、含水比、締固めエネルギーレベル（Compaction Energy Level, CEL）を適切に管理して施工を行う。コアゾーンにおける現場密度は施工層厚の範囲内で大きな密度変化がないことを前提に 1 層ごとの平均密度を計測し管理される。

小石原川ダムではコアの施工層厚は仕上がり 30cm で計画され、これは調査した先行ダムの事例における最大値と同値であった。施工層が厚いことで、施工層内に鉛直方向の密度分布があり下部での密度が低下していると、その範囲が水理的弱部となりえる。そこで、転圧後のコアの締固め状態が鉛直方向に大きな変化がないことを確認するため、(a)水置換法、(b) 2 孔式 RI 計測、(c) 採取コアの X 線 CT 分析、の 3 種類の手法で密度の鉛直分布を計測した¹⁾。

2. 試験条件

試験ケースの一覧を表-A.1 に示す。盛立試験ヤードの断面と各現場密度試験の計測範囲の模式図を図-A.1 に示す。水置換法、2 孔式 RI 試験は層境の密度変化の有無を確認するため 2,3 層目の施工層厚の範囲で試験した。X 線 CT 分析を実施する試料は、突き砂法による現場密度試験 (JGS1611) で各ケースともに乾燥密度 ρ_d が最大値の 99% 付近に達した転圧回数 $N=6$ のヤードで、試料を採取して分析を行った。

表-A.1 試験ケースおよび計測項目

	転圧機械	仕上り厚	転圧回数 N	水置換法 ^{※1}	2孔式RI法	採取コアの X線CT分析 ^{※2}
Case1	10t平滑振動ローラ	30cm	4,6,8	○	○	○
Case2	19t振動タビソグローラ	30cm	4,6,8	○	-	○

※1 各ケース、転圧回数 $N=6,8,10$ のヤードで3孔ずつ実施した。

※2 各ケース、転圧回数 $N=6$ のヤードで2本 ($L=90\text{cm}$:3層分) のコアを採取し分析を実施した。

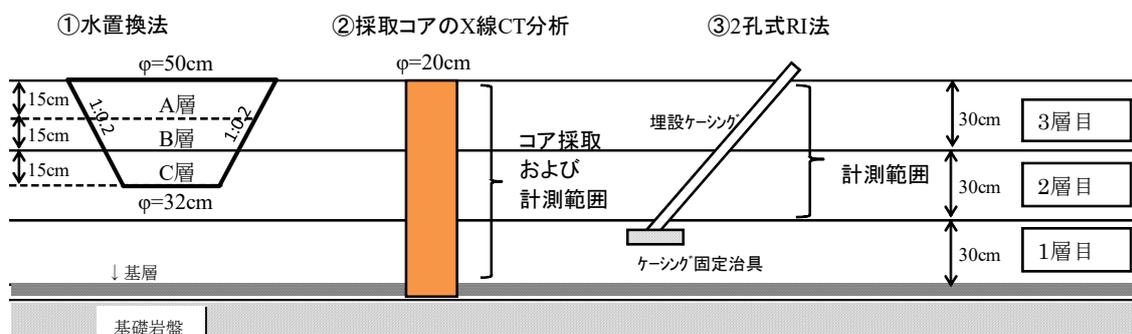


図-A.1 各密度試験の計測範囲

3. 試験概要および試験結果

(1) 水置換法

水置換法（JGS1612 に準拠）による現場密度試験計測は、**図-A.1** に示すように 15cm ごとに削孔と水置換法による現場密度試験を繰り返し計測し、A 層、B 層、C 層の平均乾燥密度を算定した。試験孔の形状は C 層の底部において、最大粒径 $D_{max}=150\text{mm}$ の現場条件で突き砂法(JGS1611)を行う場合の標準的な試験孔径である 300mm が確保できるように設定した。

「地盤調査の方法と解説」²⁾p.565 表-1 に示される砂置換法における調査対象とする土の最大粒径と試験孔の最小体積の関係から推定される最大粒径 150mm の場合の必要体積を 3700cm^3 であった。標準カラー（直径 30cm）を用いた場合に孔体積が 3700cm^3 を確保するの深さは 6cm であり、施工性と最大粒径も考慮して試験孔の深さは 15cm とした。

水置換法による現場密度測定として理由は図-1 のとおり同一の試験孔を繰り返し利用して体積測定をするため、充填剤の撤去時に孔壁を痛める可能性が砂置換法の場合よりも低いと判断したためである。

乾燥密度の平均値の分布を**図-A.2** に示す。**図-A.2** にプロットした点は各ケースごとに 3 孔の計測結果の平均値をプロットしている。同一の転圧回数で比較すると、乾燥密度は全ての層で Case1（10t 級平滑振動ローラ）の方が高い。また、Case1 では A 層に対して B 層の平均密度は同程度であるが、Case2（19t 級振動タンピングローラ）では B 層の密度はやや低下している。ただし、Case2 においても A 層に対する B 層の締固め度は 98.5%以上を確保されており、密度分布は生じているもののその差は小さいといえる。

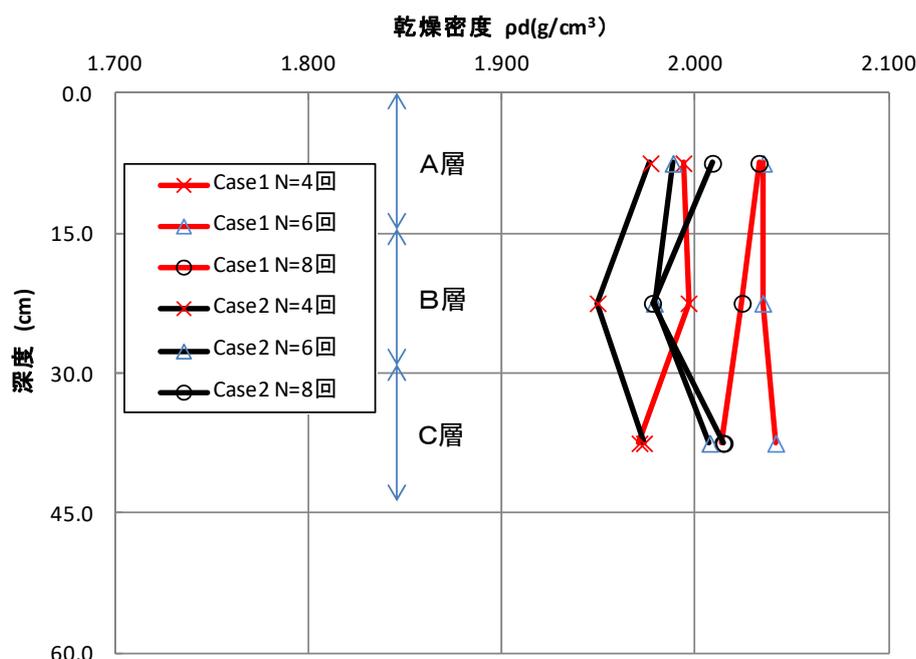


図-A.2 水置換法による密度試験結果¹⁾



a) 削孔状況



b) 削孔完了 (表層)



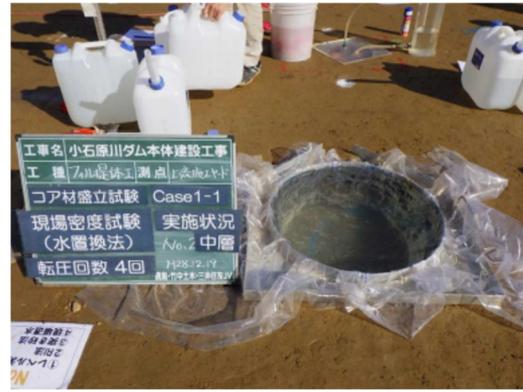
c) 削孔完了 (中層)



d) 削孔完了 (深層)



e) シート養生状況



f) 注水完了 (中層)

写真-A.1 水置換法の試験状況

(2) 2孔式 RI 試験

2孔式 RI 計測はソイルアンドロックエンジニアリング社製の 2孔式 RI 密度計 (<http://www.soilandrock.co.jp/products1/frid>)を用いて計測した。

2孔式 RI 密度計は予め地盤に埋設した2本の平行な導管の一方にガンマ線源を、もう一方に検出器を挿入し同時に引き上げながら地盤内の湿潤密度の鉛直分布を計測するものである。図-A.3 に計器配置の概要を示す。

2孔式 RI 密度計は地表から 10cm の範囲は計測できず、地表から 10~20cm 程度の範囲はデータの信頼性が下がるため、図-A.1 における 2~3 層目に計測用のガイド管を配置し、2層目の密度分布を計測することで1層分の密度分布を評価した。層境界を含む3層目の下層側(表層から 15~30cm の範囲)も評価対象とした。なお、Case2 ではタンピングローラの突起部における集中荷重によりガイド管が破損する危険があったため実施していない。

計測結果による湿潤密度の鉛直分布図を図-A.4 に示す。全ての転圧回数エリアで湿潤密度は2層目の下層の密度が大きく低下している状況はみられない。また、3層目の転圧前後の密度分布を比較すると全てのケースで2層目全層において、転圧前より転圧後の密度が上昇しており、3層目の転圧効果が2層目まで到達していることが分かる。なお、3層目の転圧前の分布では、2層目の上層(深度 30~40cm)は密度が低下している。これは3層目のガイド管を敷設した際に接続部の下側まで再掘削した際の影響であり、実施工でもレーキングにより同様の密度低下が発生すると考えられる。しかし、図-4 より、3層目の転圧後に、2,3層目の境界部を含めて密度は下層と同程度の湿潤密度となっており、レーキングによる密度低下する範囲も含めて、一様な密度で締固めが行われると判断した。

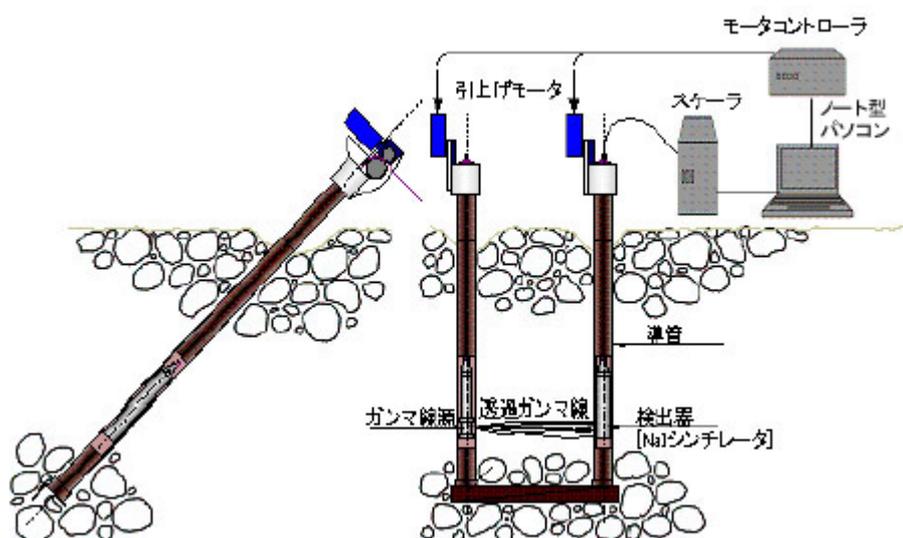


図-A.3 2孔式RI計測器の配置

(S&R社ホームページ (<http://www.soilandrock.co.jp/products1/frid>) より転載)

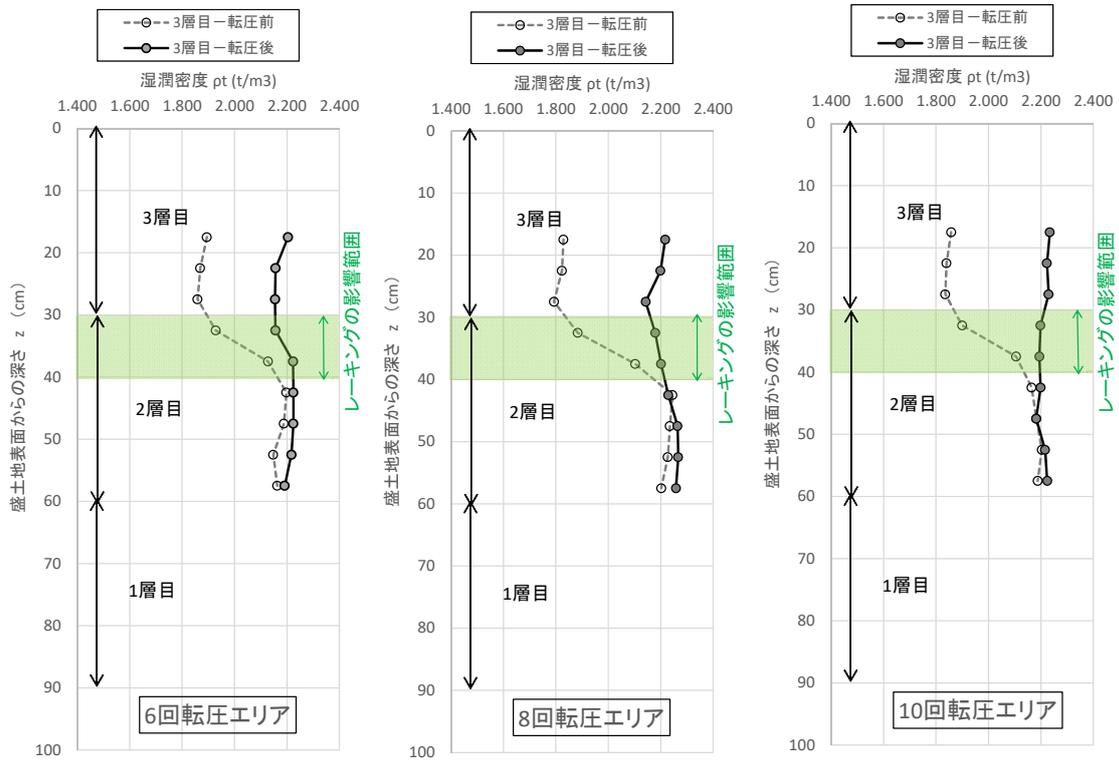


図-A.4 2孔式RI計測による湿潤密度の鉛直分布¹⁾



a) 材料検収



b) 設置状況



c) 設置状況



d) 設置完了



e) 転圧状況（設置箇所）



f) 計測状況

写真-A.2 水置換法の試験状況

(3) X線 CT 分析

X線 CT 分析とは被検体に全周方向から X 線を照射し、投影データを逆解析して被検体内部の X 線吸収係数の分布を 2 次元画像化し、X 線吸収係数から式(1)より得られる CT 値を用いた分析を行うものである。写真-A.3 に計測状況を示す。被検体の CT 値と密度の間には式(2)の関係があるとされており、地質ボーリングコアの非破壊評価等に利用された事例がある³⁾。

【CT 値の定義】³⁾

$$N_{CT} = (\mu_T - \mu_W) / \mu_W \times 1000 \quad \dots(1)$$

N_{CT} : CT 値 μ_T : 各部位の X 線吸収係数 μ_W : 水の X 線吸収係数

【CT 値と密度の関係】³⁾

$$\rho_T = A (N_{CT} / 1000 + 1) \quad \dots(2)$$

$A = \rho_W \cdot \sigma_W / \sigma_T$ ρ_T : 各部位の密度

ρ_W : 水の密度 σ_T : 各部位の質量吸収係数 σ_W : 水の質量吸収係数

本稿では盛立面から $\phi 200\text{mm}$, $L=900\text{mm}$ の大孔径コアを採取し、X 線 CT 画像は 0.5mm 間隔で撮影し、各断面で得られた CT 値の平均値の鉛直分布を比較分析することで密度の鉛直分布の傾向をより詳細に把握することを試みた。



X 線 CT 装置

・東芝メディカルシステムズ社製
Aquilion ONE

CT 撮影条件

・電圧：120 kV ・電流：150mA

・撮影スライス厚：0.5mm

・画像再構成間隔：0.5mm

・画像解析

BHC 処理：コントラスト強調関数を用いた画像補正

※ BHC:Beam Hardening Correction

写真-A.3 X線 CT スキャナによる計測状況

コアサンプリングは CSG 用の大口径サンプリングにも用いられる KCG サンプラー (φ 200 用) により実施した。サンプリング状況を写真-A.4 に示す。写真-A.4 c),f) のとおり採取されたコアの表面および孔壁の状態は、平滑で礫の周辺は細粒分の多い材料でよく充填されており、サンプリングによる削孔面付近の乱れは小さいと考えられ、転圧層の境界が視認できない程によく密着していた。



a) コアサンプリング状況



b) 削孔完了 (表層)



c) サンプリングコア



d) 養生 (ラップ+保護管)



e) 搬送用梱包・養生



f) 孔壁状態 (洗浄後)

写真-A.4 大口径サンプリング等の状況

各ケースの CT 値の鉛直分布を **図-A.5** に示す. 全ケースで CT 値は鉛直方向に概ね一定であることから, 式(2)の関係より, 層内の密度分布も概ね一定と考えられる. 表層から 300mm, 600mm 付近は施工層の境界付近であるが, これらの範囲でも CT 値の急変はなく, 境界施工の密度に及ぼす影響はないと考えられる. これは 2 孔式 RI の計測結果とも整合する.

各ケースの CT 値と換算密度の平均値を比較すると, Case1 (10t 級平滑振動ローラ) では Case2 (19t 級タンピング振動ローラ) に対して CT 値で 1.8%, 湿潤密度で 1.2% 高い値を示した. 各試験ヤードで実施した突き砂法による現場密度試験でも乾燥密度は Case1 が約 2% 高い値を示しており, 転圧機種の違いによる密度変化の傾向は一致している.

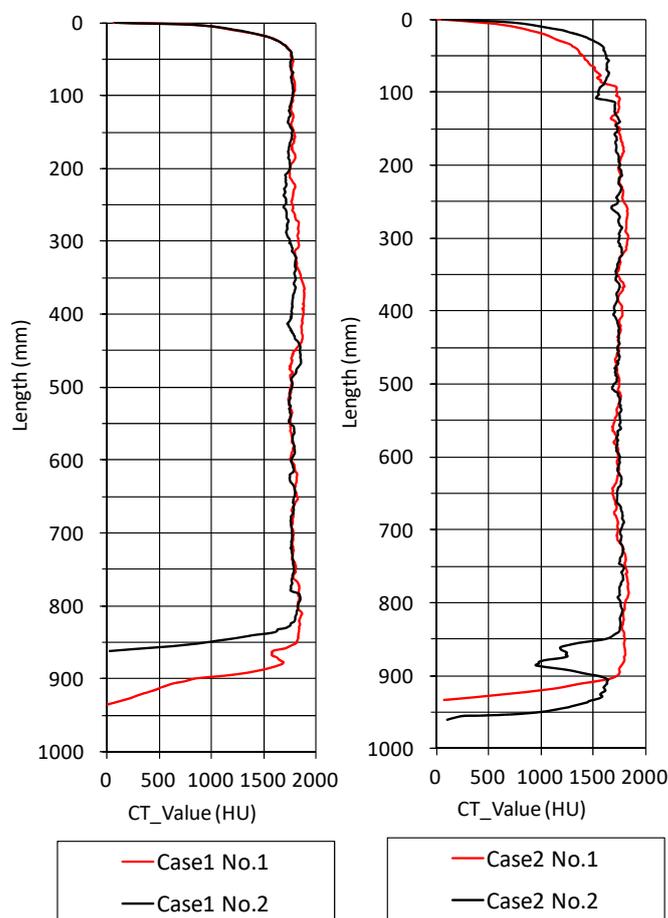


図-A.5 各密度試験の計測範囲¹⁾

4. まとめ

小石原川ダムのコアゾーンの盛立試験では、施工層内の密度の鉛直分布を把握するために複数の手法で計測を行った。これらの計測結果を以下にまとめる。

- 1) 今回選択した転圧機種（10t 級平滑振動ローラ，19t 級タンピング振動ローラ）はともに転圧回数が 6 回以上であれば，全ての計測方法で密度の鉛直分布に偏りは生じていないことを確認した。
- 2) 2 孔式 RI 試験の計測結果より，撒き出し前のレーキングにより，前施工層の締め固め範囲に緩みが生じることが認められたが，次層の転圧時にレーキングの緩み範囲も含めて鉛直方向の密度分布は概ね一様になる状態に再度締め固めが行われることを確認した。この結果から，本ダムの施工仕様では施工面の表層から 50cm 程度の範囲は一様に締め固められることが確認された。また，施工層の境界付近での計測値に異常は生じていないことを確認した。
- 3) 2)の結果から，遮水性盛土においてレーキングを行う場合は，施工厚はレーキングによるゆるみの影響も考慮して設定する必要があると考えられる。
- 4) $\phi 200\text{mm}$ の大型サンプリングによるサンプリングコアを用いた X 線 CT 解析により，小石原川ダムでサンプリングを行った盛立試験の施工仕様では，密度と線形の相関があると考えられる CT 値の分布は鉛直方向に一様であることを確認された。また，施工層の境界付近での計測値に異常は生じていないことを確認した。
- 5) サンプリングコアと孔壁の観察結果から，コアの表面および孔壁の状態は，平滑で礫の周辺は細粒分の多い材料でよく充填されており，サンプリングによる削孔面付近の乱れは小さいと考えられた。またコアおよび孔壁は転圧層の境界が視認できない程によく密着していた。

参考文献

- 1) 坂本博紀, 有馬慎一郎, 小林弘明, 小原隆: フィルダムコアゾーンにおける密度鉛直分布の計測事例, 第 72 回土木学会年次学術講演会, 2017.
- 2) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, p.535, 1999.
- 3) 稲崎富士, 井内美朗, 中野司: 湖沼底質試料の非破壊・密度構造分析への医療用 X 線 CT スキャナの利用, 地質調査月報, 第 46 巻第 11 号, pp.629-642, 1995

付録 B

飽和度データの取扱いについて

1. はじめに

本資料は博士論文で取り扱う小石原川ダムのコアゾーン建設における飽和度データの取扱いについて記したものである。

博士論文の第2章で記載したとおり、小石原川ダムでは、現場の締固めエネルギーレベル（Compaction Energy Level, CEL）と飽和度の下限値を設定することにより、含水比の管理下限値を慣用的に使用されてきた1Ecの最適含水比よりも引き下げている。この際、転圧後の品質管理は表-B.1に基づき実施した。

転圧後の品質管理は、定期管理試験と日常管理試験に分類され、現場透水係数は定期管理試験でのみ確認される。1ロットの施工毎に確認される日常管理試験における遮水性の確認方法は、当初はRI法による現場乾燥密度 ρ_d と簡便法（フライパン法）により把握した含水比 w により確認される締固め状態から、変更後は締固めエネルギー管理と地盤剛性から、透水係数を間接的に管理している。

飽和度については、定期管理試験の結果に基づいて算定した結果を用いて評価している。一方、RI法では湿潤密度と含水比を計測することで、乾燥密度を算出しているため、別途計測した土粒子密度を代入することで、盛立面においても飽和度を算定することは出来る。小石原川ダムでは透水係数が規格値を満足するよう飽和度の下限値を定めており盛立面においても飽和度による評価を行うことが望ましいと考えられたが、日常管理では飽和度の評価はしていない。付録Bでは、これらの理由と経緯について記す。

表-B.1 転圧面での品質管理試験項目と頻度（小石原川ダムの事例）

種別	場所	試験区分	試験(測定)項目	試験(測定)方法	試験(測定)頻度	
					当初	変更(最終)
コア材	盛立面 (転圧後)	日常管理試験	現場密度	RI法	1回/層	1回/4層
			含水比	簡便法	1回/層 および 降雨後の施工再開前に1回	1回/層 および 降雨後の施工再開前に1回
			変形係数	落球探査法	1回/層(参考値)	1回/層
			地盤剛性	ローラ加速度応答法	1回/層(参考値)	1回/層
			締固めエネルギー	GNSS管理 MG管理	1回/層(参考値)	1回/層
		定期管理試験	現場密度	突き砂法 JGS1611	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回
			現場透水係数	定水位法 JGS1316	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回
			含水比	JIS A 1203 :2009	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回
			粒度	JIS A 1204 :2009	2回/月 又はコア盛立時に1回/25,000m ³	2回/月 又はコア盛立時に1回/25,000m ³
			液塑性指数	JIS A 1205 :2009	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回
			締固め試験 φ150	JIS A 1210 :2009	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回	1回/月 又は コア盛立時45,000m ³ 毎に1回

2. 現場盛立試験結果

小石原川ダムでの施工仕様と品質管理基準を定めるための現場盛立試験については、論文編の第2章に記載した。以下に表-2.3に記した現場盛立試験のケース一覧を再掲する。

現場盛立試験では、表-2.3に記載した試験項目の他、RI法による現場密度等も参考値として計測を行っており、RI法に基づく飽和度と透水係数の関係についても整理している。なお、これらの結果については第2章で実施しているデータ解析には使用していないため、第2章での記述は割愛した。

図-B.1にRI法と突き砂法の試験結果に基づく、飽和度と透水係数の関係を示す。突き砂法における含水量計測はJIS法（JIS A 1203）による。

図-B.1(a)より、RI法の試験結果では飽和度のバラツキが大きいため、飽和度と透水係数の間には相関関係は見られない。一方、図-B.1(b),(c)より、突き砂法の試験結果では飽和度のバラツキは小さく、Walker-Holtzの礫率補正式により最大粒径 $D_{max}=37.5\text{mm}$ 粒度換算した場合には、飽和度85%以下で透水係数が規格値を満足する。

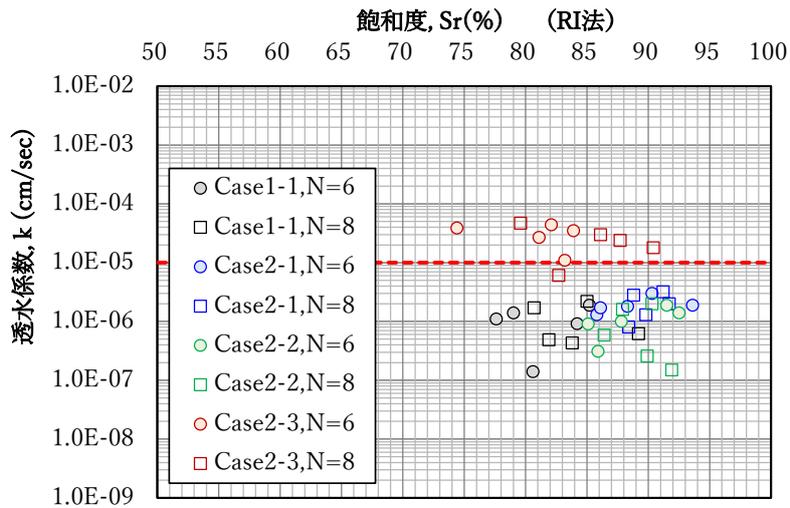
図-B.2にRI法と突き砂法の試験結果に基づく、含水比と透水係数の関係を示す。図-B.2により、RI法は含水比の計測値のバラツキが大きい。これらのことから、飽和度の評価値のバラツキは水分量計測結果の影響が大きいものと思われる。

表-2.3 現場盛立試験_ケース一覧（再掲）

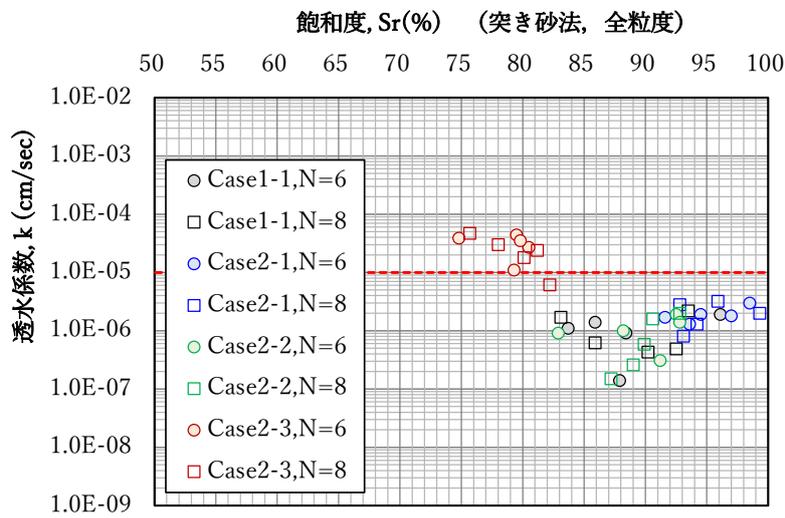
区分	Case	転圧機種	転圧回数 N	含水比 ($D_{max}=37.5\text{mm}$ 試料)		備考	試験項目（共通）
				w^{*1}	$w^{*1}Ec = w_{opt} - (w_{opt} - 1Ec)^{*1}$		
盛立試験1	Case1-1	10t級平滑振動ローラ	0,2,4,6,8,10,16	14.3%	-0.8%	乾燥側	現場密度試験 (JGS 1611)
	Case1-2	19t級振動タンピングローラ	0,4,6,8,10,16	14.3%	-0.8%	乾燥側	現場透水試験 ^{※2} (JGS 1316)
盛立試験2	Case2-1	10t級平滑振動ローラ	6,8	17.3%	2.2%	湿潤側	含水比試験 ^{※3} (JIS A 1203)
	Case2-2	10t級平滑振動ローラ	6,8	15.6%	0.6%	中間含水比	粒度試験 ^{※3} (JIS A 1204)
	Case2-3	10t級平滑振動ローラ	6,8	13.4%	-1.6%	極端に乾燥した状態	締固め試験 ^{※4} (JIS A 1210)

※1 w …自然含水比、 $(w_{opt} - 1Ec)$ …1Ecの最適含水比 (=15.1%) ※2 現場透水試験はN=4,6,8で実施

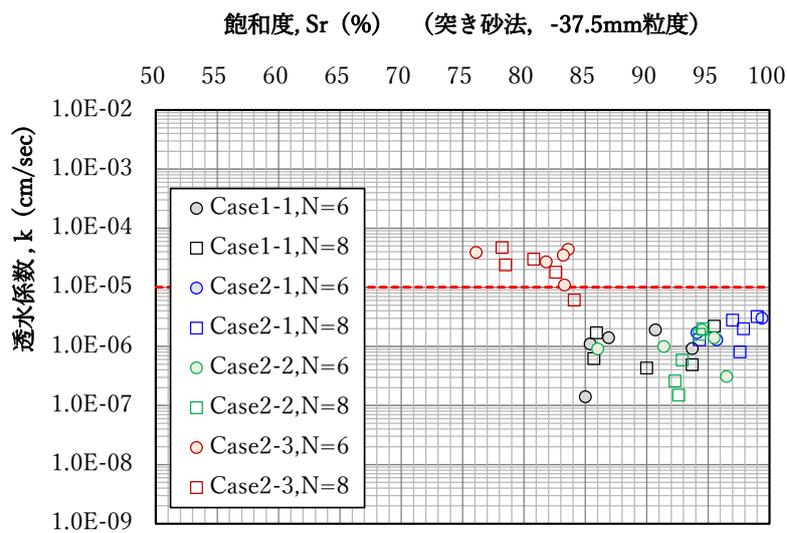
※3 現場密度試験孔より採取した試料で実施 ※4 各ケースで代表試料により実施



(a) RI 法



(b) 突き砂法



(c) 突き砂法 (Dmax=37.5mm 粒度換算値)

図-B.1 飽和度と透水係数の関係

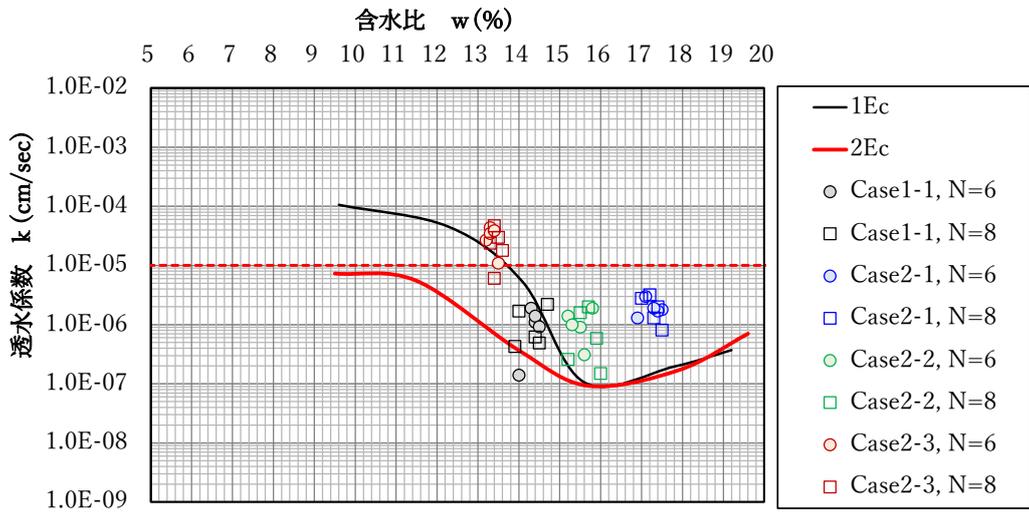
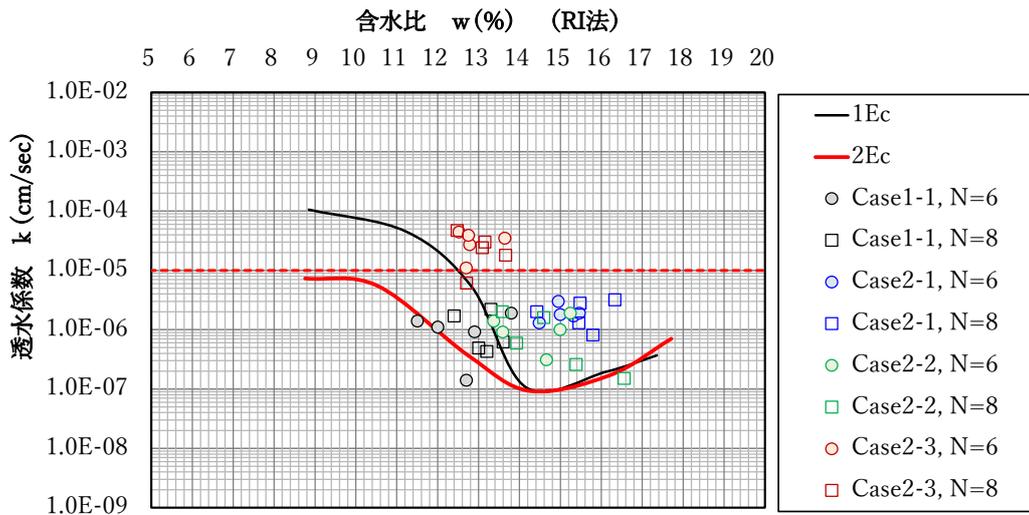


図-B.2 含水比と透水係数の関係

3. 飽和度の評価

2. に示した盛立試験結果のとおり、小石原川ダムでは RI 法に基づく飽和度の計測値（換算値）は透水係数の管理に使用するにはバラツキが大きく、管理指標としての適用は困難と判断した。

一方、突き砂法により算定した飽和度と透水係数の間には明瞭な相関があり、評価指標として適用可能と判断した。これらの結果により、飽和度は定期管理試験で実施する突き砂法の試験結果に基づき算定した値を正として評価するものとした。

なお、論文第 2 章でも述べたが、小石原川ダムの材料は土粒子密度のばらつきが比較的大きいため、飽和度の評価値もその影響を受ける。定期管理試験（突き砂法）でも土粒子密度の代表値との差分の影響を受けるが、日常管理試験では土粒子密度は計測しておらず、その影響は定期管理試験時より大きくなる。この点でも実施工での RI 計測時の飽和度は真値に対して異なる評価をする要因が大きいと推定される。

転圧面での RI 計測とは別に、代表試料による含水比計測を別途行うことで、RI 計測による乾燥密度と含水比計測結果に基づき飽和度を換算することが可能となる。RI 計測による飽和度の精度が悪かった原因は含水量の計測と考えられたため、工事途中から RI 法の計測ロットを対象に、簡便法（フライパン法）による盛立面での含水比計測を品質管理項に追加している。

RI 法と簡便法（フライパン法）の計測結果に基づき算定した締固め度と飽和度の関係を **図-B.3 a)** に、突き砂法による締固め度と飽和度の関係を **図-B.3 b)** に示す。RI 法による計測結果はデータ数が多く、分布範囲が相対的に広い。参考値ではあるものの、飽和度の規格値（85%以上）を満足しないデータ、飽和度が 100%を超過するデータ数が相対的に多い。この要因として、土粒子密度を計測していないことの影響と考えられる。

以上

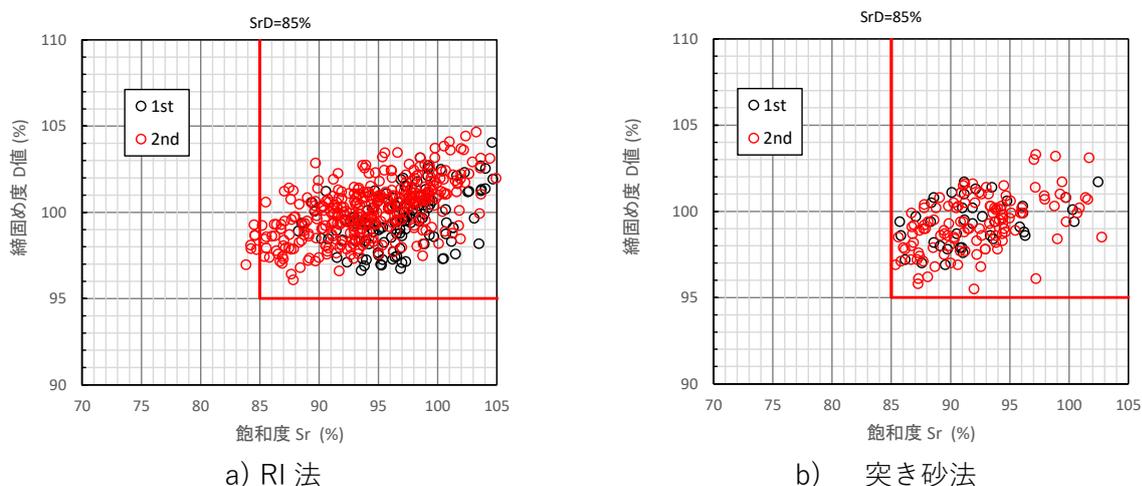


図-B.3 飽和度と締固め度の関係 (RI 法)

付録C

走査電子顕微鏡によるコア材の粒子形状分析

1. はじめに

本資料は博士論文で取り扱う小石原川ダムのコア細粒材を対象に実施した、粒子形状に関する走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) による観察および分析の結果を整理したものである。

博士論文の第 3 章で記載したとおり、小石原川ダムでは、工事中盤から当初使用していた材料 (コア材 A) の細粒材の一部を人工細粒材で置換した材料 (コア材 B) を使用しており、コア材 B はコア材 A と概ね同一の粒度分布であっても乾燥密度が高く、透水係数と地盤剛性指標 (Soil Stiffness Index, SSI) が低い。この理由について、人工細粒材は 20~50mm の風化岩を破砕機で粉砕して製造しているが、細粒分の製造過程における粉砕作業が粗粒子と細粒子の粒形改善^{*}にも寄与していると想定され、この粒子形状の改善により締固め特性が向上したと推定した。

この推定の妥当性を確認するため、小石原川ダムでは走査電子顕微鏡 (SEM) にてコア材 A, B の締固め時の骨格構造の観察を行うとともに、コア材 B については、破砕前後の粒子形状分析を実施している。付録 C では、これらの観察及び分析の結果をとりまとめ、考察を行った。

※ 本資料では、コア材細粒分の隙間への充填性の観点から、粒子形状が球形に近く凹凸が小さい状態を「粒子形状が良い」とし粒形改善とは「粒子形状が良い」状態に近づくことを指すものとする。材料の用途によって「粒子形状の良否」の定義は異なることに注意されたい。

2. 試験方法

2.1 試験項目

SEM 分析を行った試験項目と試料についての一覧を表-C.1 に示す。

骨格構造については、小石原川ダムのコア材 A, B の比較により人工細粒材の有無の影響を確認した。また、参考として他ダム (A ダム, T ダム) の材料の締固め状態も確認した。

粒子形状観察は、小石原川ダムの自然由来のコア細粒材と人工細粒材、他ダム (A ダム, T ダム) のコア材を対象とした。

表-C.1 試験項目一覧 (SEM 分析)

試料番号	試料の種類	試験項目	備考
1	円柱状ブロック	骨格構造観察	小石原川ダム_コア材A
2			小石原川ダム_コア材B
3			Tダム_コア材
4			Aダム_コア材
5	土質材料	粒子形状観察 ・凹凸係数 ・長短比 ・長短比'	小石原川ダム_細粒材
6			小石原川ダム_人工細粒材
7			Tダム_コア材
8			Aダム_コア材

2.2 骨格構造観察

円柱状のブロック状の試料 (図-C.1 (a)) を、手で解すように割り (図 C.1(b)), 断面の中央付近から 2cm 角程度の小片を取り出した (図 C.1(b),(c): 青色立方体). その小片を、液体窒素に浸漬し、完全に凍結したところで、真空乾燥させ、たがねを用いて縦方向に破断した (図 C.1(d)). この破断面を観察面とした. 試料台にのせ、導電性を与えるために白金-パラジウムを蒸着した. 観察は走査電子顕微鏡 (SEM: 日立ハイテクノロジーズ社製 SU5000) を用い、加速電圧は 15kV, 観察倍率は 500 倍とした. これらの観察方法は、港湾空港技術研究所ホームページ¹⁾を参考にした.

2.3 粒子形状観察

(1) 走査電子顕微鏡観察

土質試料を葉さじですくい取り、エタノール中で脱水、攪拌を行った. 攪拌は、スターラーで 2~4 時間程度行った. スターラーで攪拌した懸濁液を、10 μ L 測り取り、試料台にのせ乾燥させ、導電性を与えるために白金-パラジウムを蒸着した. 観察は SEM (日立ハイテクノロジーズ SU5000) を用いた. 観察時の加速電圧は 15kV, 観察倍率は 500 倍とした. 画像は、2 値化画像を得やすい、反射電子像とした. 各試料 10 視野撮影した.

(2) 画像解析

SEM により撮影した反射電子像を用いて画像解析を行った. 反射電子像における明るさ (グレイレベル) は、観察対象物の平均原子番号に依存しており、Ca (カルシウム) や Fe (鉄) などの比較的重い元素を含むものは明るく、C (炭素) のような軽元素は暗く表示される. この輝度の差を利用し、画像解析ソフト: Nano Hunter NS2K-pro (ナノシステム株) を用い、土壌試料を構成する粒子の抽出・2 値化を行った. 2 値化した画像につき、投影断面の面積、投影断面の周囲長、投影断面の絶対最大長、幅、投影断面のフィレ径 (横方向、縦方向) を計測し、凸凹係数および長短比を算出した. 算出方法は、緑川・丸山²⁾, 吉村・小川³⁾を参考に行った.

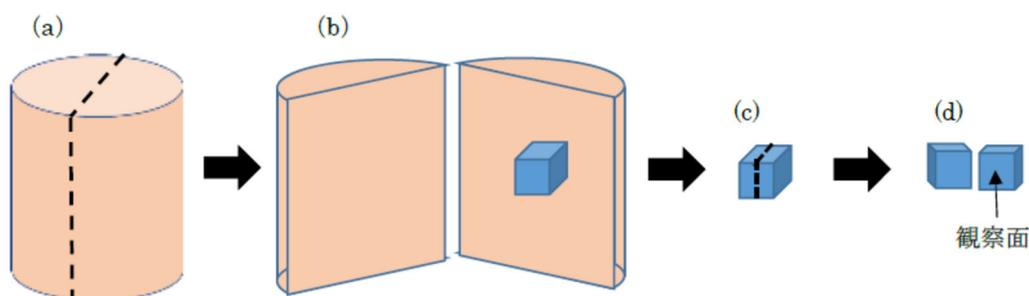


図-C.1 試料調整

3. 結果

3.1 骨格構造観察

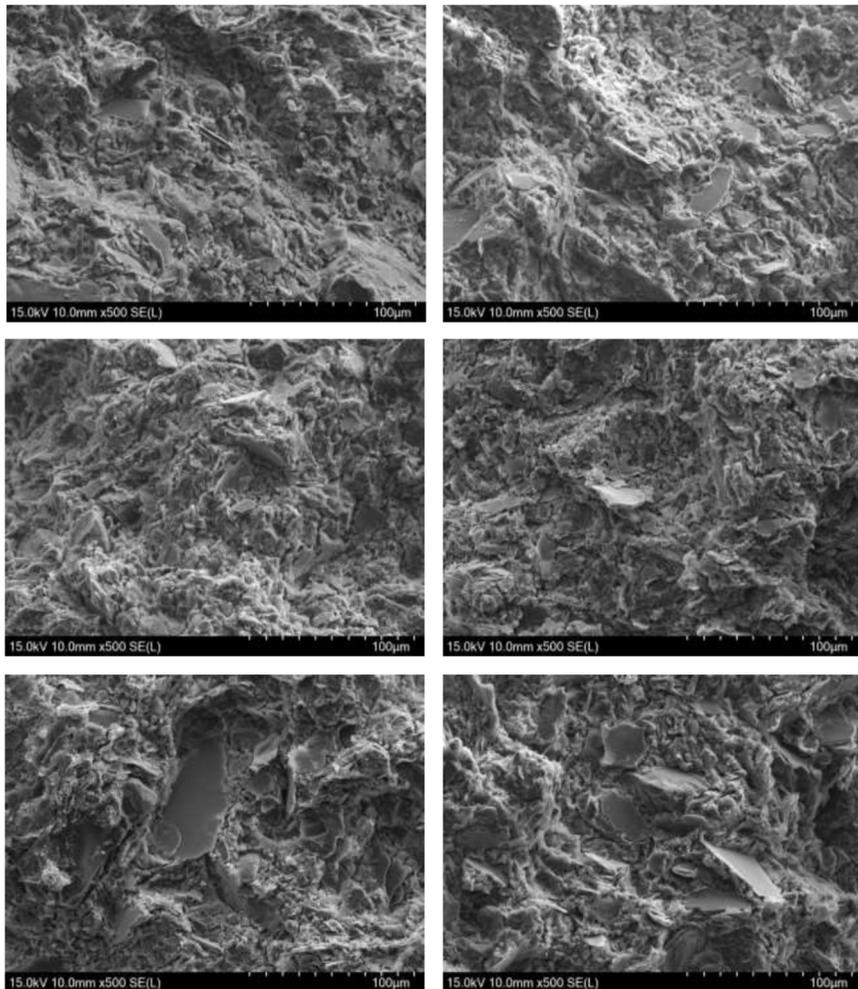
写真-C.1 に小石原川ダムのコア材 A,B および T ダムのコア材, A ダムのコア材の SEM による 2 次電子写真 (倍率=500 倍) を示す.

試料 1,2 (小石原川ダムのコア材 A,B) はともに扁平な粗粒子が骨格構造の中に存在していることが確認できる. 試料 1,2 は三郡変成岩に類する堆積岩と凝灰岩がホルンフェルス化した変成岩が風化して粘土化した材料が母材である. 風化前の母岩も扁平形状に破碎される性質があり, 風化後のコア材の粒子構造も粗粒子については同様の構造を有した粒子が存在するようである. コア材 A,B を比較した場合に, 人工細粒材を含むコア材 B では扁平な板状の粒子が若干少ないように見える.

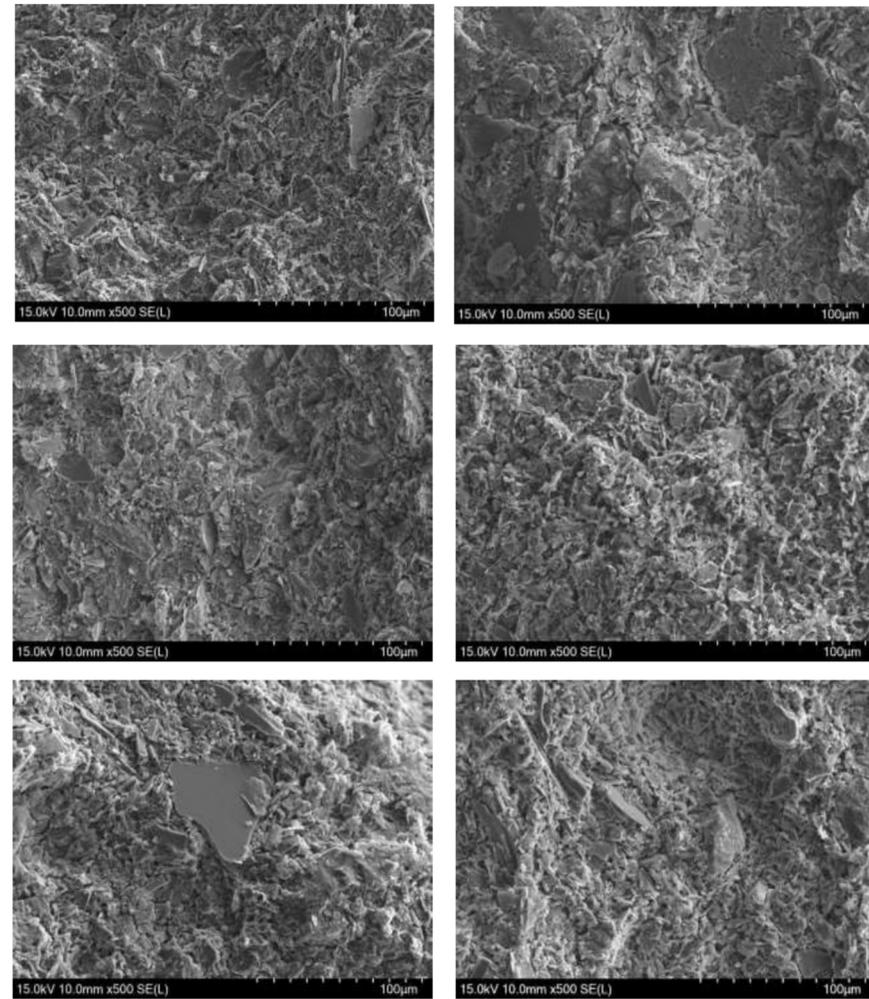
T ダムのコア材料である試料 3 では, 試料 1,2 に見られる板状の粗粒子がほとんど存在しない. A ダムのコア材料である試料 4 では, 板状の粗粒子が確認できるが, 試料 1,2 と比べるとその数は少ない.

緑川・丸山は高流動コンクリートの研究の一環として微粒分の形状係数と保水能力に関する研究²⁾を行っており, 長短比と凸凹係数を用いた形状係数は粒子形状を表わす有効な手段となること, 粉体の充填性は粒子形状と粒度分布に関係し, 粒子形状が球に近いほど, かつ, 粒子全体にわたり粒子間の隙間を埋める別な粒子が存在するような粒度分布ほど充填性が良いこと, 粉体の保水性能のうち粒子形状は粒子表面への吸着水に, 粒度分布は粒子間保有水に関係することを言及している. これらの特徴は土質材料にも一定程度当てはまると考えられ, 板状の粗粒子を含む場合には締固め時の充填性が悪くなり, 同一の粒度分布であっても締固め難くなると思われる.

小石原川ダムのコア材の粒度分布は細粒分含有率を $F_c=20\%$ 程度と既往のダムと比べて高めに設定している. 既往のダムでは $F_c=15\%$ 程度の事例が多いが, 小石原川ダムでは $F_c=15\%$ 程度とした場合には, 透水係数が規格値に対して十分な余裕が確保できなかったことによる. これは, 上記のような粒子形状の影響を受けていたものと思われる.

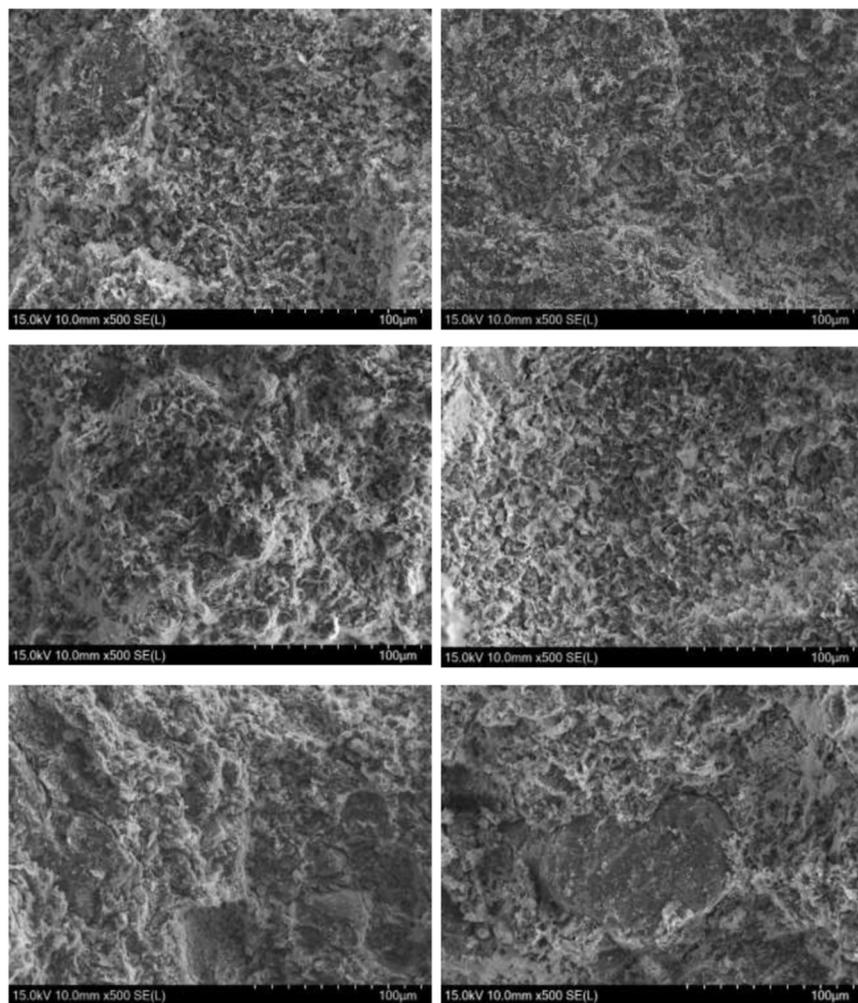


(a) 試料 1 (コア材 A)

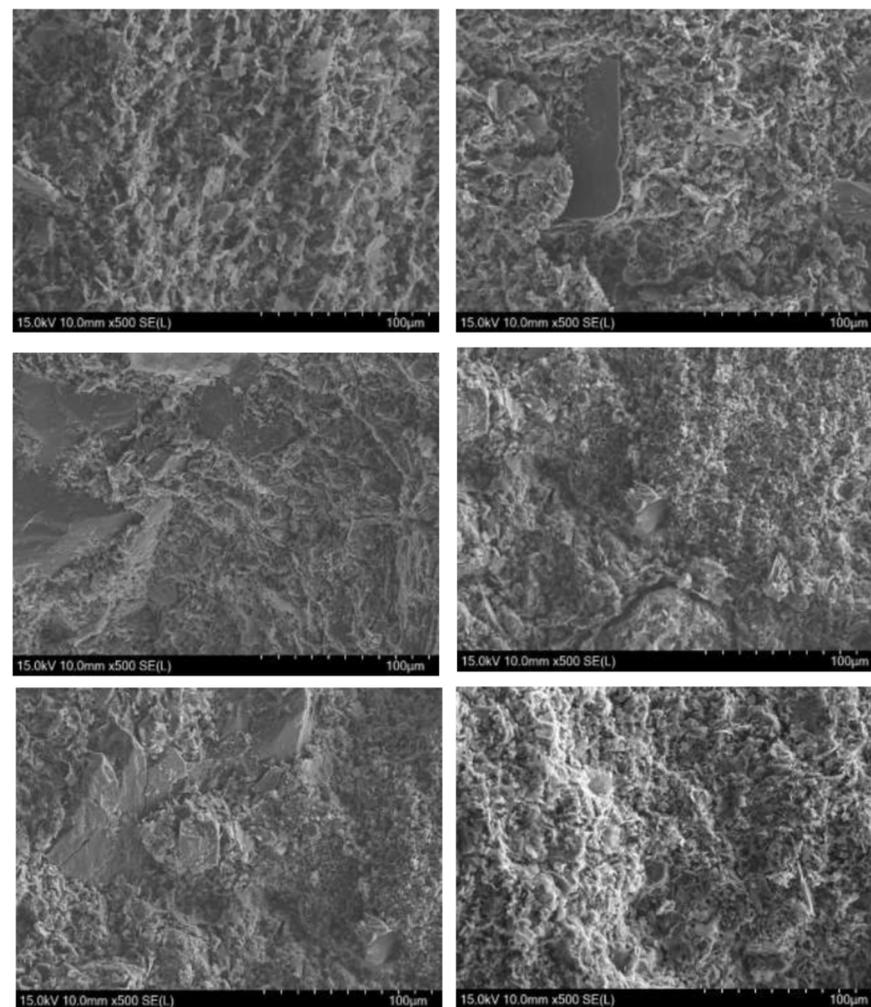


(b) 試料 2 (コア材 B)

写真-C.1 SEM による骨格構造観察 (2次電子写真,倍率=500倍)



(c) 試料 3 (T ダム コア材)



(d) 試料 4 (A ダム コア材)

写真-C.1 SEM による骨格構造観察 (2次電子写真, 倍率=500倍)

3.2 粒子形状観察

表-C.2 に試料 5~8 の画像解析に基づく形状係数の統計処理結果を示す。

試料 5,6 を比較すると表-C.2(a)より全データでは、試料 6 は試料 5 よりも全ての形状係数が平均値と標準偏差がともに大きくなっており、形状が悪いことが示唆されるが、表-C.2(b)より $5\mu\text{m}$ 以下の材料に注目すると、凹凸係数の平均値と標準偏差が低下しており、粒形がより球体に近づくよう改善されている。

図-C.2 に試料 5~8 の各形状係数の度数分布を示す。全データと $5\mu\text{m}$ 以下のデータで、主要な分布形状は変わっていないことから、 $5\mu\text{m}$ を超える粒形材料の形状にバラツキによって全データの平均値と標準偏差が引き上げられているものと考えられる。このため、各試料の形状係数の比較は $5\mu\text{m}$ 以下のデータに注目して評価することとした。

分析結果に基づく考察は以下の 2 点である。

- 試料 5,6 の比較により、人工細粒材の方が微粒分の凹凸形状の平均値と標準偏差が小さいことから、粒子形状が改善されている。
- 試料 5,7,8 の比較より、凹凸形状はいずれの試料も大きく変わらないが、長短比、長短比'については平均値と標準偏差ともに試料 5 が大きく相対的に粒子形状は悪い。

ただし、今回の分析結果については、①使用した材料が各ダムの物性を真に代表しているかどうかは不明である、②各試料の統計分析に用いた母数が大きく異なる、といった課題がある。このため、本資料に記した形状係数に関する分析結果は十分な信頼性があるとは言い難く、参考資料としての位置づけであると考えられる。

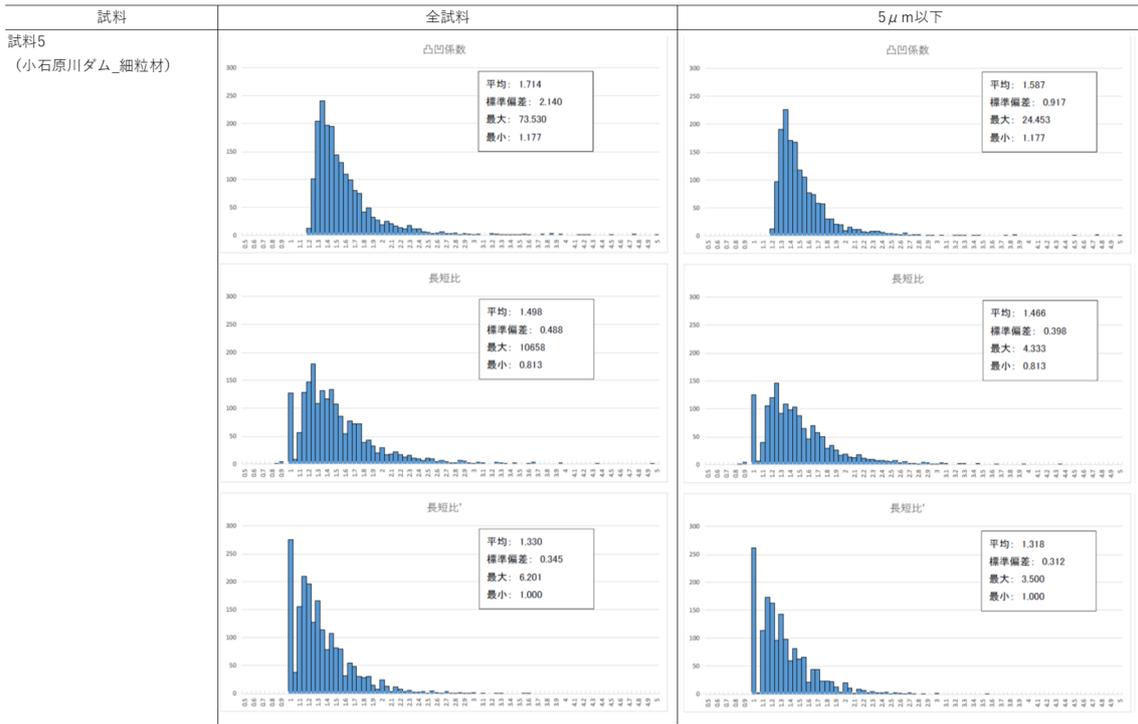
形状係数		試料5	試料6	試料7	試料8
		全データ	全データ	全データ	全データ
凹凸係数	平均値	1.714	1.968	1.731	1.697
	標準偏差	2.14	6.315	2.651	1.471
長短比	平均値	1.498	1.617	1.437	1.454
	標準偏差	0.488	0.587	0.358	0.377
長短比'	平均値	1.33	1.381	1.302	1.298
	標準偏差	0.345	0.41	0.286	0.297

(a)全データ

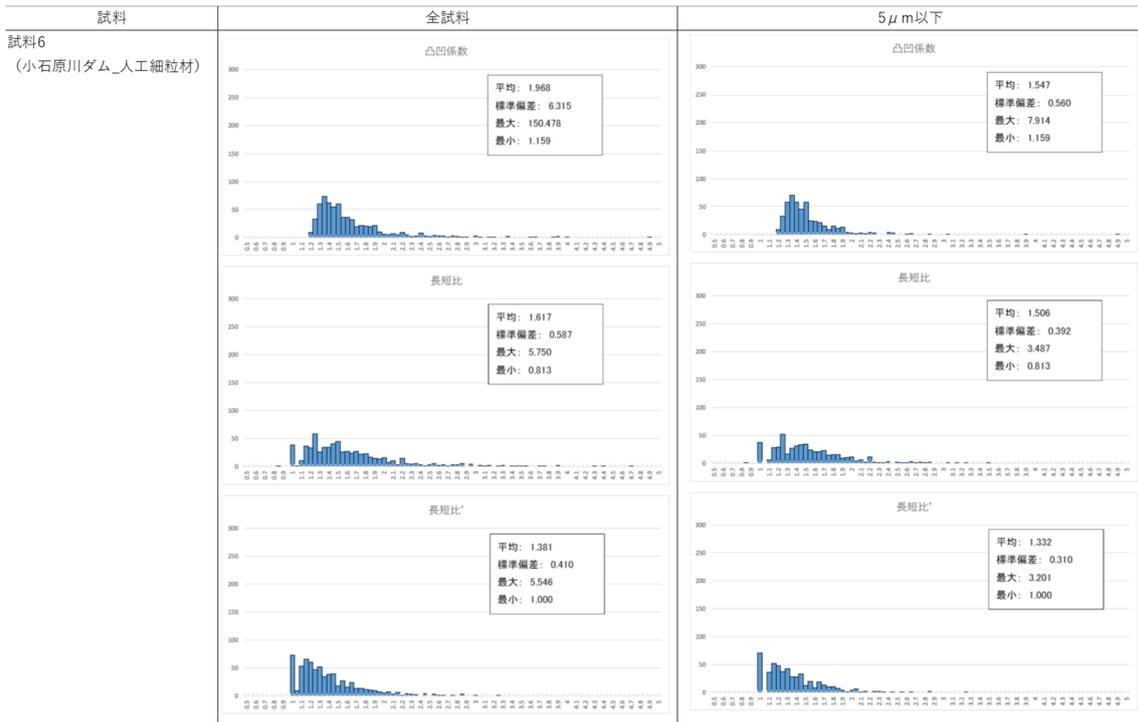
形状係数		試料5	試料6	試料7	試料8
		$5\mu\text{m}$ 以下	$5\mu\text{m}$ 以下	$5\mu\text{m}$ 以下	$5\mu\text{m}$ 以下
凹凸係数	平均値	1.587	1.547	1.58	1.582
	標準偏差	0.917	0.56	1.146	1.102
長短比	平均値	1.466	1.506	1.413	1.424
	標準偏差	0.398	0.392	0.339	0.335
長短比'	平均値	1.318	1.322	1.296	1.291
	標準偏差	0.312	0.31	0.289	0.288

(b) $5\mu\text{m}$ 以下

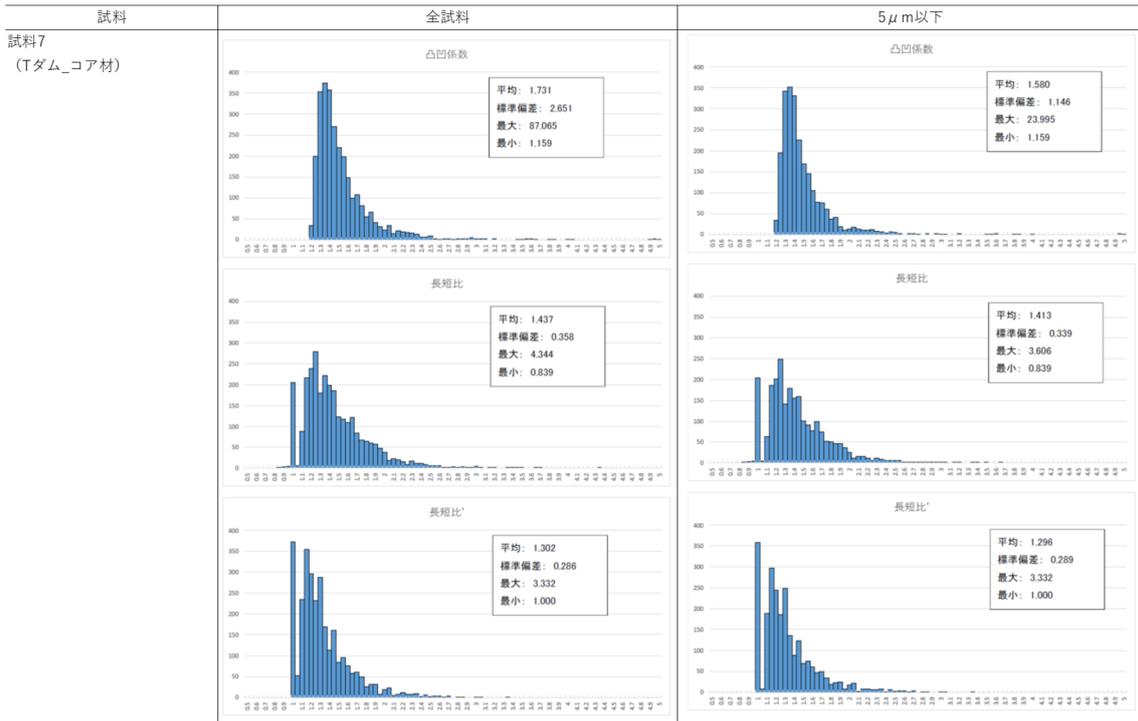
表-C.2 形状係数の統計処理結果



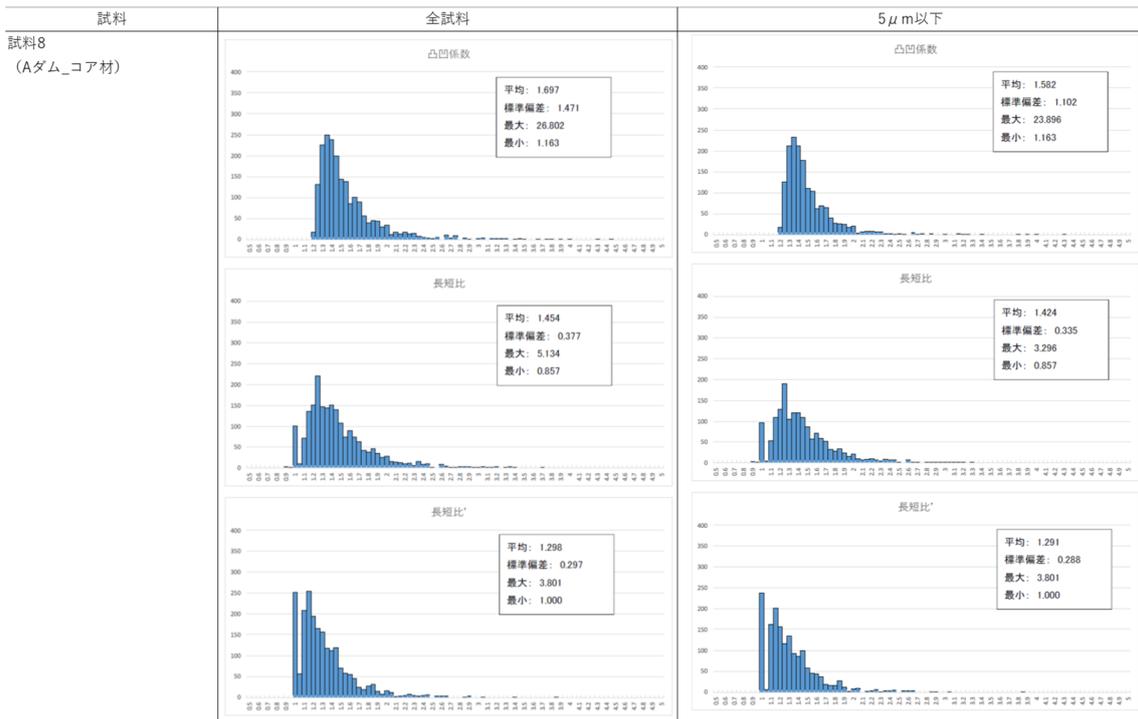
(a) 試料 5



(b) 試料 6



(c) 試料7



(d)

図-C.2 形状係数分析結果の度数分布

参考文献

- 1) 港湾空港技術研究所ホームページ：
https://www.pari.go.jp/unit/dosit/research/frame/jpn_sem.html
- 2) 緑川猛彦，丸山久一：保水能力に関する各種粉体の粒子形状や粒度分布の評価，土木学会論文集No.463/Ⅲ-22，pp.95-103, 1996.
- 3) 吉村優治，小川正二：砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法，土木学会論文集No.544/V-32，pp.121-130, 1993.

付録 D

現場盛立試験に関する写真集



曝気試験ヤード



曝気試験ヤード造成完了



曝気攪拌状況



曝気攪拌状況



曝気攪拌状況（立会）



曝気試験材料採取状況



土羽打ち状況（曝気後）



土羽打ち完了

写真-C.1 材料調整（曝気乾燥）



細粒材採取状況



細粒材採取箇所法面視察状況



粗粒材採取状況



ストックパイルヤード基面造成



細粒材敷均し状況（2層目）



粗粒材敷均し状況（13層目）



盛立試験用ストックパイル完成



養生（降雨対策）

写真-C.2 材料採取・ストックパイル造成（盛立試験材）



切崩し混合



ブルドーザ横引き



ブルドーザ横引き



混合状況確認



スケルトンバケットによる再混合



材料近影



降雨対策及び含水比の強制低下



ジェットヒーター曝気

写真-C.3 ストックパイル切崩し及び含水比調整（盛立試験材）



試験ヤード全景



材料搬出状況



撒き出し状況 (1層目)



撒き出し状況 (近影)



木根除去 (人力作業)



転圧状況 (1層目)



レーキング (1層目)



レーキング完了 (1層目)

写真-C.3 盛立試験ヤード造成 (Case1-1) その1



撒き出し状況 (2層目)



木根除去 (2層目)



転圧状況 (2層目)



転圧状況 (2層目)



レーキング状況 (2層目)



レーキング完了 (2層目)



撒き出し状況 (3層目)



転圧状況 (3層目)

写真-C.4 盛立試験ヤード造成 (Case1-1) その2



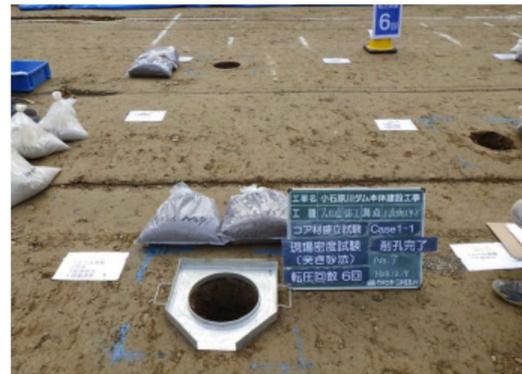
RI 密度試験（視察状況）



RI 密度試験



現場密度試験（突き砂法）削孔状況



削孔完了



削孔（近影）



校正砂投入



突き砂状況



突き砂完了

写真-C.5 現場密度試験（RI 試験、砂置換法）



現場透水試験（孔壁保護石充填）



注水状況



注水完了



アクリル板設置



透水試験状況



透水試験状況（全景）



試験孔（完了後）



落球探査試験

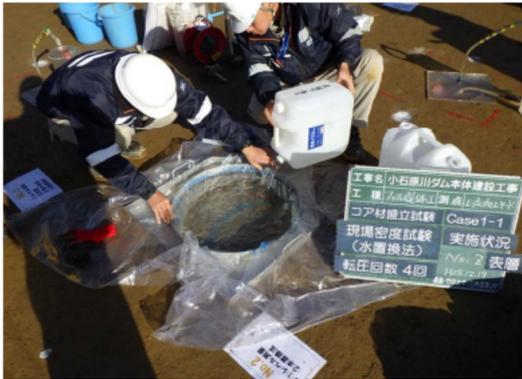
写真-C.6 現場透水試験、落球探査試験



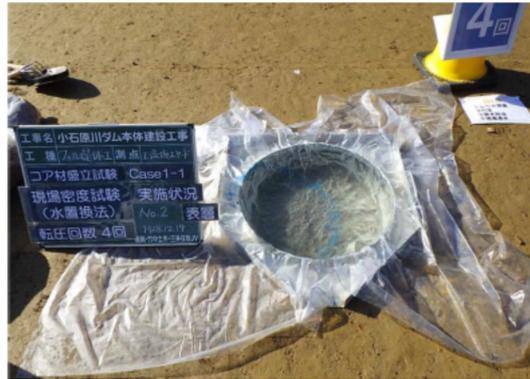
水置換法_削孔状況



水置換法_削孔完了 (表層)



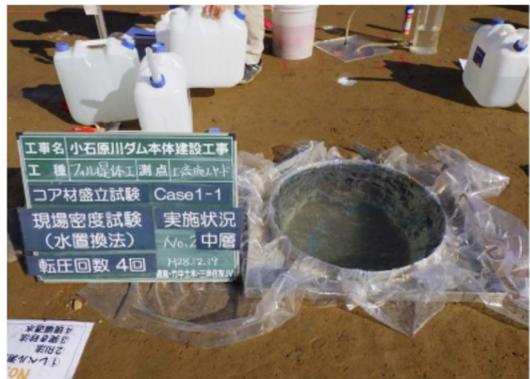
水置換法_注水状況



水置換法_注水完了 (表層)



水置換法_削孔完了 (中層)



水置換法_注水完了 (中層)



水置換法_削孔完了 (深層)



水置換法_注水完了 (深層)

写真-C.7 現場密度試験 (水置換法)



大口径コア採取状況



採取コア押し抜き



コア全景



ラップ養生



コア養生（塩ビ半割管+ラップ）



輸送時養生



孔壁状態（洗浄前）



孔壁状態（洗浄後）

写真-C.8 大口径コアサンプリング



敷き均し状況



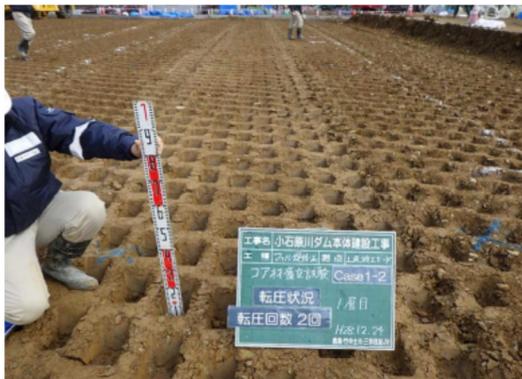
木根除去



タンピングローラ転圧状況



タンピングローラ転圧状況 (近影)



タンピングの深さ



レーキング



タンピングローラ転圧状況 (3層目)



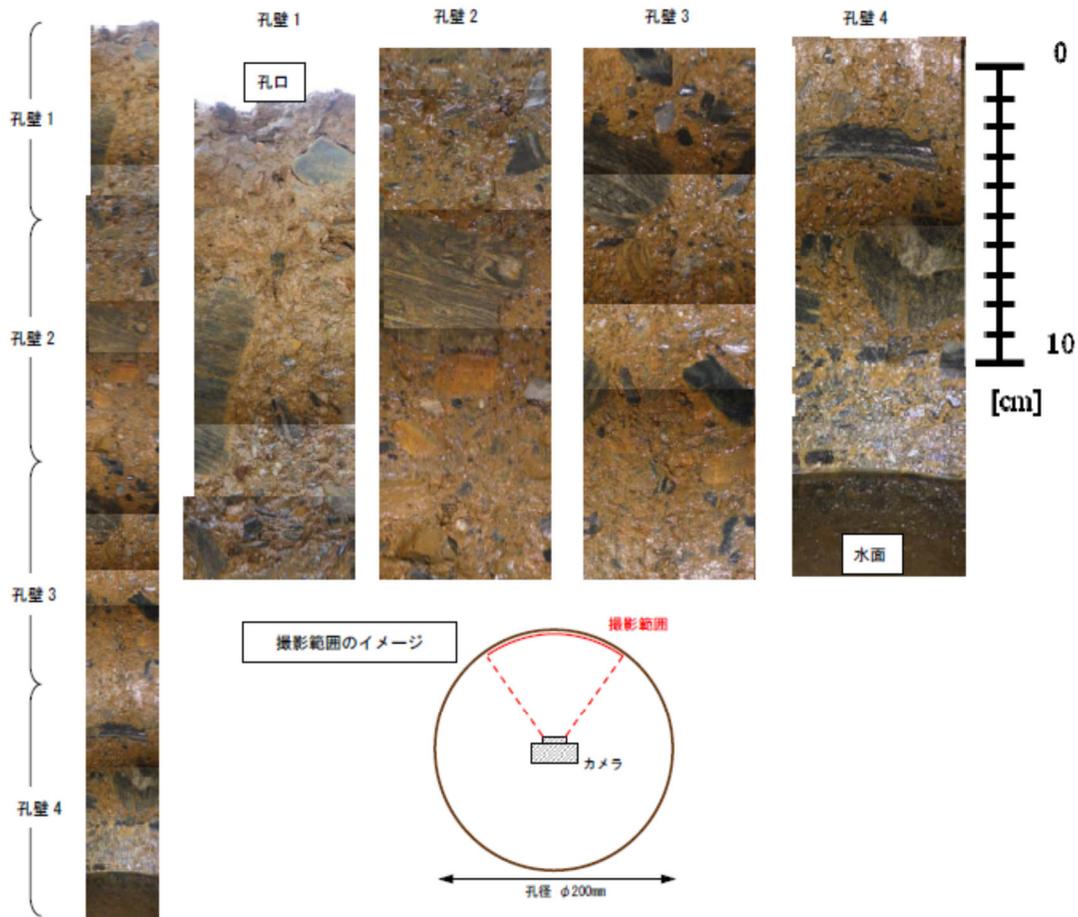
試験箇所平滑処理

写真-C.9 盛立試験ヤード造成 (Case1-2)

大型コアサンプリング時の孔壁写真

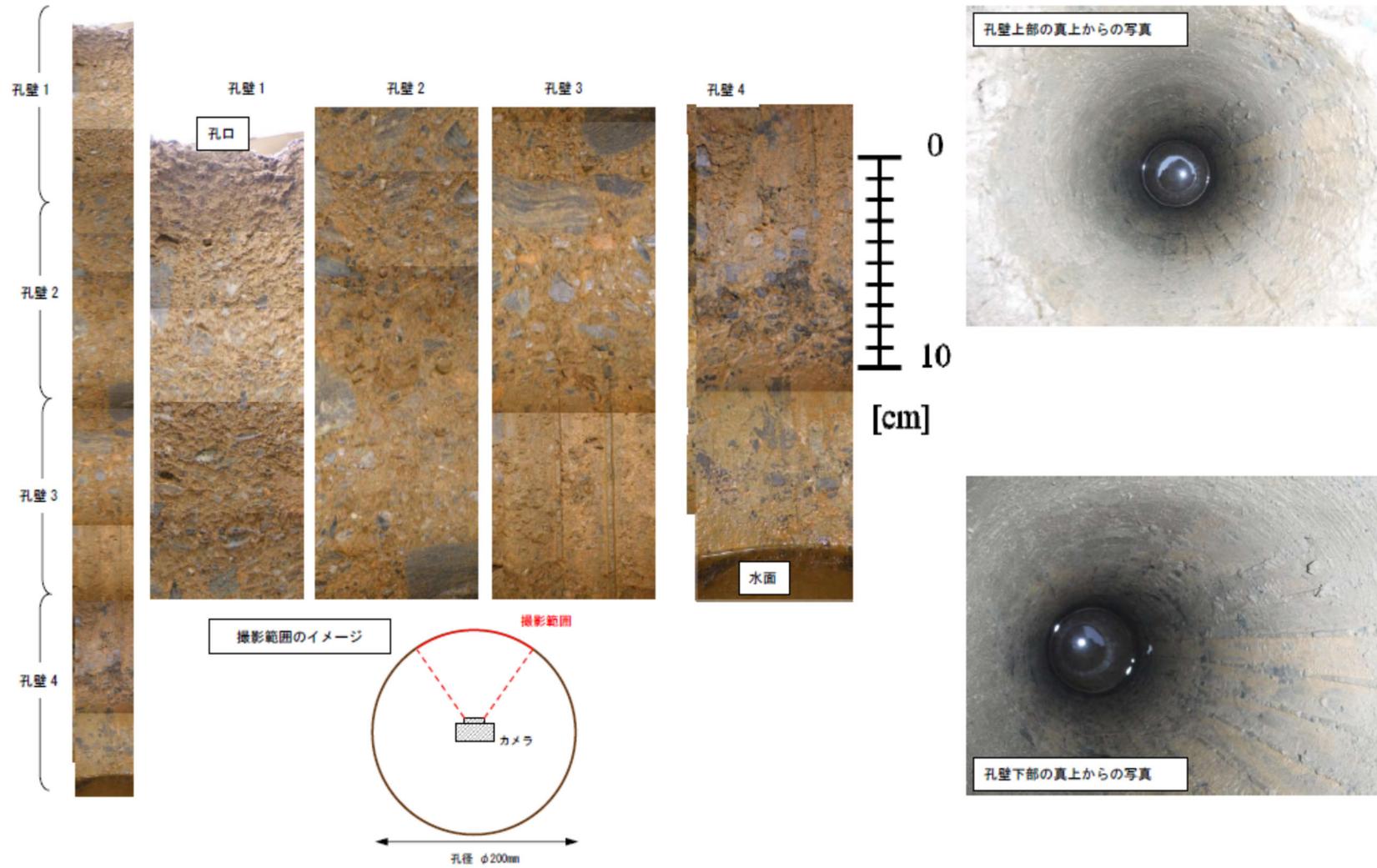
(1) 平滑振動ローラ

Case1-1 No.1



大型コアサンプリング時の孔壁写真

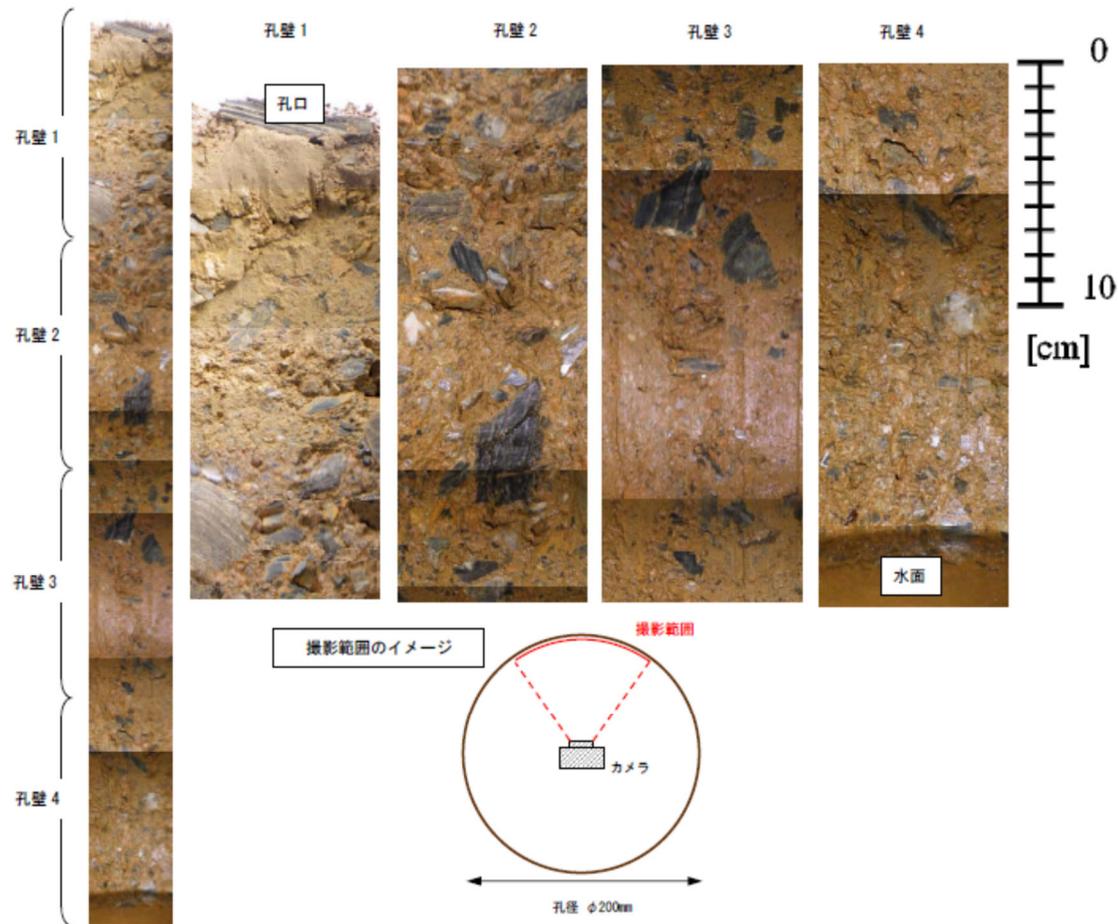
Case1-1 No.2



大型コアサンプリング時の孔壁写真

(2) 振動タンピングローラ

Case1-2 No. 1



大型コアサンプリング時の孔壁写真

Case1-2 No.2

