

分離低減剤を用いた超流動コンクリート
の実用化に関する研究

新 藤 竹 文

分離低減剤を用いた超流動コンクリート
の実用化に関する研究

新藤 竹文

目 次

	頁
第1章 序 論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究と本研究の意義	4
1.3 本研究の適用範囲とその構成	8
第2章 新しく開発された分離低減剤の基本的性質とその作用機構	11
2.1 はじめに	11
2.2 分離低減剤の基本組成	12
2.2.1 化学構造	12
2.2.2 製造方法	14
2.2.3 安全性	15
2.3 セメントろ液・高アルカリ溶液中での挙動	16
2.3.1 本分離低減剤の溶解性	16
2.3.2 本分離低減剤の膨潤性および吸水性	21
2.3.3 水溶液の粘度	25
2.3.4 温度依存性	27
2.3.5 高性能(AE)減水剤との相性	30
2.3.6 本分離低減剤の作用機構	35
2.4 本分離低減剤のセメント水和機構に及ぼす影響	36
2.4.1 水和発熱速度への影響	36
2.4.2 水和生成物への影響	36
2.4.3 水和率への影響	36
2.5 本分離低減剤の硬化後の形態	41
2.6 まとめ	43
第3章 本分離低減剤の自己充填性への作用効果	45
3.1 はじめに	45
3.2 本分離低減剤の添加による自己充填性の向上効果の検証	46
3.3 品質変動に対する充填可能範囲の向上効果の検証	48
3.3.1 検討配合および使用材料	48
3.3.2 評価方法	48
3.3.3 評価結果	49
3.4 まとめ	54

第4章 硬化後のコンクリートの品質	55
4.1 はじめに	55
4.2 充填後の硬化コンクリートの均質性	56
4.2.1 高さ方向の均質性	56
4.2.2 水平流動後の均質性	77
4.2.3 充填後の均質性について	83
4.3 室内試験による硬化後の品質の検証	84
4.3.1 本分離低減剤の添加が硬化後の品質に及ぼす影響	85
4.3.2 結合材の特殊性が硬化後の品質に及ぼす影響	91
4.3.3 配合の特殊性が強度特性に及ぼす影響	98
4.3.4 耐久性の検証	108
4.4 まとめ	121
第5章 実用化システムの開発	122
5.1 はじめに	122
5.2 自己充填性に関するフレッシュコンクリートの評価手法の提案	123
5.2.1 変形性の評価	124
5.2.2 分離抵抗性評価試験	127
5.2.3 自己充填性評価試験	128
5.3 簡易配合選定手法の提案	132
5.3.1 所要単位結合材量の選定	132
5.3.2 最適細骨材率の選定	135
5.3.3 配合選定および品質管理における指標値の選定	138
5.3.4 簡易配合選定手法	145
5.4 製造・運搬にともなうフレッシュコンクリートの品質安定性	149
5.4.1 練り混ぜ時間と練り混ぜ量に関する検証	149
5.4.2 運搬にともなうフレッシュコンクリートの品質安定性の検証	153
5.5 ポンプ圧送性に関する検証	162
5.5.1 管内圧送圧に関する検証	162
5.5.2 圧送による品質の変化	168
5.6 側圧に関する検証	171
5.6.1 壁部材を一気に打設した場合	172
5.6.2 層打ち打設した場合	182
5.7 流動勾配における検証	186
5.8 まとめ	190

第6章 実構造物への適用	192
6.1 はじめに	192
6.2 PC斜張橋の主塔部への適用	193
6.2.1 概要	193
6.2.2 構造物の概要	194
6.2.3 施工概要	196
6.2.4 品質管理結果	199
6.2.5 施工性と改善効果	201
6.3 充填形鋼管コンクリート柱への適用	204
6.3.1 概要	204
6.3.2 構造物の概要	205
6.3.3 施工概要	207
6.3.4 品質管理	210
6.3.5 施工管理	211
6.3.6 施工管理結果	211
6.3.7 まとめ	214
6.4 LPG貯蔵タンクPC外槽への適用	215
6.4.1 概要	215
6.4.2 工事概要	216
6.4.3 施工概要	220
6.4.4 充填状況	223
6.5 建築構造物の打放し外壁への適用	226
6.5.1 工事概要	226
6.5.2 施工概要	227
6.5.3 品質管理結果	229
6.5.4 施工上の知見	229
6.6 まとめ	231
第7章 結 論	232
謝 辞	235
参考文献一覧	236

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

コンクリートは、セメント・水・骨材などの比重の異なる種々の材料を組み合わせた複合材料である。このため、運搬・打設・締固めなどの各施工段階において本質的に材料分離を生じやすく、構造物全体として均等な品質を確保することが難しい材料といえる。

特に、締固め作業については、不十分であれば局部欠陥や空隙を生じるのは勿論のこと、逆に、過度の締固めは材料分離を助長することから、コンクリート工事に携わる技術者にとって極めて入念な施工管理と豊富な経験が要求される作業である。

本来、品質の良いコンクリートを実現するためには、「作業のできる範囲内で単位水量を極力小さくした硬練りのコンクリートを入念に締固める」ことを原則としている^[1.1]。

しかしながら、近年のコンクリート構造物の大型化・複雑化にともない、より大がかりで複雑なコンクリート工事をいかに手際良く遂行し工期短縮を図るかが施工管理の主流となっており、十分な手間と時間をかけた施工は困難な状況にあるといえる。ポンプ工法などに代表される省力化工法は施工の効率化におおいに貢献しているものの、コンクリート工事の大部分はいまだに人力に頼っており、工事のシステム全体を体系的に合理化できるような革新的な施工法の開発はなされていない。

さらに、大きな社会問題となりつつある高齢化・高学歴化による技能労働者の著しい減少は建設業界においても例外でなく、コンクリート工事の技能低下のみならず、建設工事自体の円滑な遂行をも危ぶまれている現状にある。

ここで言う超流動コンクリートとは「気中に構築されるコンクリート構造物を対象とし、高変形性と高分離抵抗性を兼ね備えることによって締固め不要の自己充填性を有するコンクリート」と定義する。すなわち、材料分離がなく粗骨材を保持した状態で、締固めを行わなくとも材料自体の高変形性により、鋼材が複雑に配置された型枠中の隅々まで独自に充填する能力を有するコンクリートである。

締固め作業を軽減さらには必要としないまでに充填性を高めた超流動コンクリートが開発できれば、コンクリート工事の施工性を飛躍的に改善することが可能であるのは勿論のこと、人為的な技能差や管理の良否に左右されることなく、部材全体として均等質のコンクリート構造物を構築することが可能となり、従来の人中心であった施工法に大きな変革をもたらすものと期待できる^[1.2]。

このような締固めを必要としない高性能コンクリートは、東京大学の岡村甫教授らによって提唱された「ハイパフォーマンスコンクリート」を起源としている。すなわち、コンクリート構造物の耐久性を高めその信頼性を回復させるためには、耐久性の良否を左右する要因の中でも特に人為的な影響を受け易い施工要因を取り除くことが必要であるという観点に立ち、フレッシュな状態においては締固め作業を必要としないでも充填する能力を

有し、硬化初期ならびに硬化後においては高品質かつ高耐久性を有するような高品質コンクリートの開発であった。

超流動コンクリートは、「ハイパフォーマンスコンクリート」という基本技術の1つと位置づけられ、また、ここに定義づけしたように、高密度配筋部材への充填性を主体とし、従来のコンクリートと同等以上の耐久性を有することを目標としている。

さて、このような超流動コンクリートのフレッシュな状態に要求される基本性能は、大きくは高変形性と高分離抵抗性と言え、「ハイパフォーマンスコンクリート」においては、結合材や細・粗骨材など各種素材の粒度や保水性あるいは混合割合などを考慮した配合設計理論によって、高変形性と高分離抵抗性の両性能が適正にバランスする配合を求めることが配合を選定する上でのポイントと考えられる。また、高変形性と高分離抵抗性は本質的には相反する性能であるため、目標とする自己充填性を確実に製造するためには骨材の表面水や粒度の変動あるいは計量誤差などを極力小さくすることが必要であり、そのため、高精度の品質管理体制の確立を目指した新しい製造システムの開発が進められている。

しかしながら、前述のとおり人的資源に頼っていたコンクリート工事の省力化への移行は急務な課題となっており、また、極めて小規模な製造プラントが全国各地に乱立する現状の供給体制を見ると、新しい製造システムがこれら末端の製造プラントまで浸透するには、まだ時間を要するものと考えられる。

このような背景の下、本研究では、現状の製造システムや品質管理のレベルでは抑制することの難しい使用材料の品質変動や計量誤差などに対して、所要の自己充填性が確保できるような超流動コンクリートを開発し、現状において、超流動コンクリートの速やかな実用化を図ることを試みた。

そこで、水溶性高分子であるメチルセルロース系あるいはアクリル系の水中不分離性湿和剤を使用し、水の洗い作用に対する材料分離抵抗性を高めるとともに高充填性やセルフレベリング性を付与する水中不分離性コンクリートの技術に着目した。水中不分離性コンクリートは、水中での分離防止を主目的とするものであり高密度配筋部材への自己充填性は有しておらず、また、これらの分離低減剤を使用したコンクリートの気中における耐久性の問題により適用対象は水中構造物に限られているが、フレッシュコンクリートに要求される基本性能は超流動コンクリートと同様に高分離抵抗性と高変形性と言え、これらの両性能を分離低減剤の力を借りて積極的に付与する点を特徴としている。

すなわち、図1-1.1に示すように、分離抵抗性と変形性の両性能を高めることによって品質変動に対する適用範囲を向上させることが可能であるとの基本概念に基づき、これを達成する一つの手段として分離低減剤を添加する手法に着目したものである。本手法によって、品質変動に対する適用範囲がさらに向上した超流動コンクリートを比較的容易に得ることができれば、現状の製造・管理体制と施工体制において、配合選定・製造・施工に至る一連の実用化システムを構築する上で極めて有効であると考えたからである。

本研究は、現状の製造・管理体制と施工体制において、超流動コンクリートの速やかな

実用化を図るべく、「ハイパフォーマンスコンクリート」の配合を基本とし、これに、基材の耐久性に悪影響を及ぼさず、取扱い易く、比較的容易に品質変動に対する適用範囲を向上させることが可能な新しい分離低減剤を添加することを特徴とする超流動コンクリートを用い、配合選定から製造と施工に至る一連の実用化システムを確立することを目的としたものである。

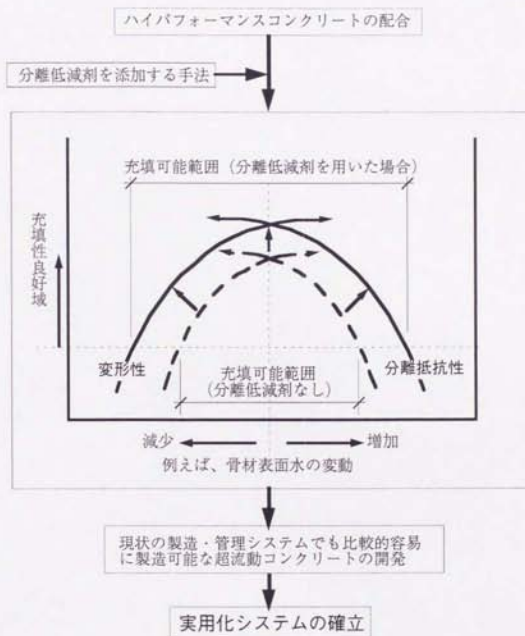


図-1.1.1 目的達成のための基本概念

1.2 既往の研究と本研究の意義

(1) ハイパフォーマンスコンクリートについて

1986年、締固めを必要としない高性能コンクリートの概念がはじめて提唱された^[1.2]。ここでは、コンクリート構造物の耐久性は、設計・施工・材料の3つの要因によって決定されるが、これらの中でも特に人為的な影響を受け易い施工過程での要因を取り除くことが必要であるとの観点から、フレッシュな状態においては締固め作業を必要としないでも充填する能力を有し、硬化初期ならびに硬化後においては高品質で高耐久性を有するコンクリートの開発の必要性を説いたものであった。また、締固め不要の自己充填性を実現するためには、高変形性と高材料分離抵抗性の両性能を適正にバランスさせることが必要であるとの提案がなされた。

この高変形性と高材料分離抵抗性のバランスについて、前川ら^[1.3]は、狭い間隙を通過するモルタルの充填性を相対的に評価するためには、モルタルの変形性と流動中の動的分離抵抗性の両者を合わせて評価する必要があることを明らかにし、その結果として、充填性は変形性と分離抵抗性の両者の複合によって構成される凸型の曲線で表されることを示した。

橋本ら^[1.4]、小沢ら^[1.5]は、可視化実験により、圧送管内を流動中に生じる骨材の閉塞は、粗骨材の凝集と粗骨材どうしのアーチングにより生じ、粗骨材の変形は一樣でなく局部的に粗骨材どうしが激しく接触・衝突している箇所が生じることを明かにし、モルタルの粘性を高めることによってこの変形の局在化が低減することを示した。

また、泉ら^[1.6]は、ポンプ圧送管内での閉塞や材料分離について、骨材どうしや骨材と圧送管の固体間の応力伝達機構に着目し、応力伝達機構は粒子接触に起因する摩擦機構と液体としてのペースト粘着機構との複合効果によって決り、水結合材比、混和剤の種類と添加量、粉体の形状によって変化する摩擦機構と粘着機構の複合効果として、伝達せん断力が最小となる配合が存在することを明かにした。そして、フライアッシュを使用することによって水結合材比の小さい領域で伝達せん断応力を小さくすることができること、増粘剤の添加は固体間の摩擦機構を低減させる効果をもち、骨材どうしが凝集する領域を回避する上で有効であると考察している。

これらの基礎研究をふまえて、小沢ら^{[1.7][1.8][1.9]}は、ハイパフォーマンスコンクリートの具現化に成功し、ここに、ハイパフォーマンスコンクリートの命名ならびにプロトタイプとして具体的な配合例が公表されるに至った。

以後、岡村ら^{[1.10][1.11]}は、ハイパフォーマンスコンクリートを実用化するための課題として、充填性に優れると同時に硬化後の耐久性を確保できる新しいセメント開発、合理的な配合設計理論の確立、および、骨材の表面水量の変動を抑制・管理する方法や練ませ

効率を改善する管理システムと製造システムの確立の必要性を唱えた。

現在、東京大学コンクリート研究室では、ハイパフォーマンスコンクリートの合理的な配合設計理論の確立が進められており、近々、これらの配合設計理論を主体とした体系化理論が公表される予定である。

(2) 超流動コンクリートの研究の現状

ハイパフォーマンスコンクリートの概念が提唱され、さらに、そのプロトタイプの公開を契機として、超流動コンクリートに関する多くの研究開発がなされるようになった。

また、学協会活動として、セメント協会において新しいセメントの開発を目的とした「ハイパフォーマンスコンクリート専門委員会（岡村 甫委員長、1990）」、日本コンクリート工学協会においてハイパフォーマンスコンクリートに代表される高級コンクリートの製造・管理システムの確立を目差した「コンクリートの製造システム研究委員会（岡村 甫委員長、1990年～1992年）」により、製造・管理システムの具体的な提案がなされている。

さらに、日本コンクリート工学協会「超流動コンクリートに関する研究委員会（魚本健人委員長、1992年～）」において、超流動コンクリートのフレッシュならびに硬化後の性状に関する現状の技術の整理が行われており、日本建築学会「高流動コンクリート小委員会（友澤史紀委員長、1992年～）」においては建築分野に対応した設計施工基準の確立に向けての研究活動が行われている。

超流動コンクリートの要求性能は基本的に変形性と分離抵抗性、および、これらの両性能のバランスによって得られる締固め不要の自己充填性と言える。しかし、超流動コンクリートは全く新しい概念のコンクリートであるため、その要求性能を定量的に評価する標準試験法はまだ確立されておらず、現状では評価方法に関する数種の報告がなされている。

変形性の評価については、土木学会「水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）」に準拠したスランプフロー試験が測定方法の簡便さと水中不分離性コンクリートにおける実績の多さから最も汎用されている手法であるが、これ以外に、L字管やL型容器の一方から試料を流し込み他方へ流動する際の流動状況を観察する方法^[1.12]が提案されている。

分離抵抗性の評価については、容器底面に設けたメッシュ状のフルイを試料を通過した際の粗骨材量を評価する方法^{[1.8][1.13]}、あるいは、振動式コンシステンシーメータ（VF試験装置）による無振動状態で障害部通過状況の評価する方法^[1.14]やロート型の容器を用いて絞り込み部の通過性と通過時間を評価する方法^[1.15]が提案されている。

高密度配筋部への自己充填性の評価については、高密度配筋を有する型枠中に試料を流し込んだ際の充填性を評価する方法^{[1.8][1.16]}、あるいは、L型容器の一部に設けた障害部の通過状況や骨材量を評価する簡易的な方法^[1.17]が提案されている。

さらに、超流動コンクリートの実構造物への適用についても、大型橋りょうのアンカレ

イジ^[1.18]への適用、あるいは、LNGタンクの防液堤壁部^[1.19]への適用や壁部開口部の逆打ちによる閉塞工^[1.20]への適用など、徐々にではあるが報告されるようになってきた。

(3) 従来の分離低減剤について

従来より分離低減剤として最も一般化しているものは、水中不分離性コンクリートに用いられるセルロース系あるいはアクリル系の水溶性高分子が挙げられ、これらは、土木学会「水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）」において、水中不分離性混和剤という名称で取り扱われている。

水中不分離性混和剤の特徴はその水溶性にあり、練り混ぜ水に速やかに溶解し、練り混ぜ水の一部を保水した状態で分子分散することによって練り混ぜ水を高粘度化し、フレッシュコンクリートにおける材料分離の抑制、ブリー징の抑制、セルフレベリング性を付与する機能を有する。

水中不分離性混和剤の作用機構はこのような増粘作用と保水作用と言え^[1.21]、セメント粒子や骨材が高粘度となった練り混ぜ水に包まれた状態に保持されることにより外部の水と接触しても分離しない性質が付与され^[1.22]、また、水がセメント粒子間隙により形成される毛细管を流動できないほどに高粘性であるためブリー징を生じることがなく、さらに、ブリー징を生じないために骨材間の潤滑液としての水が長時間保持されることによって、ブリー징の抑制およびセルフレベリング性が付与される^[1.23]と考えられている。

しかしながら、これらの分離低減剤は水に容易に溶解する性質ゆえに、直接、水に接すると粒子表面のみが速やかに溶解し粒子内部への水の浸透が妨げられ団粒状の塊となる現象いわゆるママコを生じ易いため、「水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）」においては、練り混ぜの際に十分な空練りを行う、あるいは、あらかじめ高性能減水剤や水に溶解させたスラリーとして添加するなど、取り扱いにあたっての留意事項が示されている。また、高粘性であるために、練り混ぜ時に通常のAEコンクリートに比べて大きいエントラップトエアを巻き込みやすいことが指摘されており、一般には消泡剤を併用してエントラップトエアを低減するような対応がなされている。

さらに、水中不分離性混和剤を添加したコンクリートの耐久性に関して、長合ら^[1.24]は、アルミ粉末の併用が耐凍害性の改善に有効としながらも、この発泡気泡はエントレインドエアに比較して気泡径が大きいため十分な耐凍害性を付与するためには気泡量として10%以上を混入する必要であると報告している。

また、福留ら^[1.25]は、セルロース系の水中不分離性混和剤を添加した場合、添加しないものに比べて20～30%程度、乾燥収縮が大きくなると報告している。また、アクリル系

の場合にも同様の傾向が確認されており^[1,26]、これらは、練り混ぜ水が高粘度となることによって、ブリージングが生じない分だけ練り混ぜ水の多くが硬化体中に残存するためと考えられている。

以上のように、従来の分離低減剤は基材コンクリートに高分離抵抗性と高変形性を付与する機能を有するが、取り扱う上で留意する必要がある、また、その添加量の増加にともない単位水量が多くなること、気中における耐久性について不明確な点が多いこと等の理由から、適用対象は水中不分離性コンクリートとして水中構造物に限られているのが現状である。

これまで述べてきたように、ハイパフォーマンスコンクリートにおいては、配合設計理論の確立がほぼ終焉を向かえ、現段階では、所要の自己充填性を確実に製造するための製造・管理システムの確立が進められている。

しかしながら、人的資源に頼っていたコンクリート工事の省力化への移行は急務な課題となっており、また、極めて小規模な製造プラントが全国各地に乱立する現状の供給体制を見ると、新しい製造・管理システムがこれら末端の製造プラントまで浸透するには、まだ、時間を要するものと考えられる。

さらに、超流動コンクリートに関する現状の研究開発において、要求性能の定量評価に関する研究は比較的多く報告されるようになり、また、実構造物への適用に関する報告も数件認められるようになったが、超流動コンクリートに関するこれらの要求性能と実構造物への適用性とを関連付けて評価した例は殆ど無く、数種の適用例についても製造・管理の行き届いた固有の設備の下で個別な検討を加えられているだけで、工事全体をとらえた汎用性のある実用化システムとして確立されているものはない。

このような背景の下で、超流動コンクリートの要求性能を定量的に把握し、配合の選定や実工事における製造・施工管理の指標とした上で、現状の製造・管理システムあるいは施工体制において、基材の耐久性に悪影響を及ぼさず、取り扱い易く、比較的容易に品質変動に対する適用範囲を向上させることが可能な新しい分離低減剤を用いた超流動コンクリートを開発し、その配合選定から製造、施工に至る一連の実用化システムを汎用性のある形で構築することは、現状において超流動コンクリートの速やかな適用を推進するために極めて意義のある研究であると考えられる。

1.3 本研究の適用範囲とその構成

前述のように、本研究の目的は現状の管理・製造体制および施工体制の下で、超流動コンクリートの配合選定から製造、施工に至る一連の実用化システムを確立することにある。したがって、本システムは、現状のレディーミクストコンクリート工場で製造した本超流動コンクリートを用いて現場打ちによって構築するコンクリート構造物を適用対象とする。

また、本実用化システムに使用する超流動コンクリートは、「ハイパフォーマンスコンクリート」の配合を基本とし、これに、分離低減剤を添加する手法を組み合わせたコンクリートである。

具体的には、ハイパフォーマンスコンクリートのプロトタイプ^[1,7]として提案された配合において、普通ポルトランドセメントと高炉スラグおよびフライアッシュの3成分を混合した結合材を単位結合材量として 500kg/m^3 程度使用する点と比較的多量の高性能減水剤を併用する手法を基本とし、これに、グルコース系多糖類を主成分とする天然高分子を分離低減剤として添加した超流動コンクリートである。また、水結合材比33%程度であり、最大寸法20mmの碎石を細骨材率45%程度で使用することを適用範囲とする。

以上の適用対象および適用範囲において、本研究は、ここに選定した新しい分離低減剤とこれを添加した超流動コンクリートに関する検討、および、本超流動コンクリートを用いた実用化システムに関する検討に大別され、概ね図-1.3.1に示す5項目の研究段階によって構成される。

第1段階は、本分離低減剤の基本特性とその作用機構を検証するものであり、本分離低減剤の吸水・膨潤機構を定量的に把握し、さらに、本分離低減剤を添加した場合の水和生成機構ならびに水合過程への影響と水和生成物中での本分離低減剤の硬化後の形態を調査し、混和剤として使用する上で絶対条件と言える、本分離低減剤の添加が基材の水和過程や水合生成機構に悪影響を及ぼさないことを検証した。

第2段階は、本分離低減剤を添加することによって付与される超流動コンクリートの自己充填性への作用効果の検証であり、本分離低減剤の添加による分離抵抗性への作用効果と高性能減水剤を併用した場合の変形性への作用効果の複合として得られる自己充填性の向上効果について確認し、さらに、この自己充填性の向上によってもたらされる品質変動に対する良好な自己充填性を確保する範囲の向上効果について検証したものである。

第3段階は、本分離低減剤を添加した超流動コンクリートの硬化後の品質についての検証試験であり、ほぼ実工事と同等の施工条件の下で製作した実大規模の壁状部材の高さ方向における部材の均質性を確認するとともに、実構造物の一部への試験打設により長距離流動における品質の変化を調査した。

また、本超流動コンクリートの配合上の特徴である、普通ポルトランドセメントと高炉スラグおよびフライアッシュの3成分結合材を使用する点、単位結合材量として 500kg/m^3

程度と比較的多く使用する点、および、グルコース系多糖類を主成分とする新しい天然高分子を添加する点に着目し、この配合の特殊性から予想される硬化後の品質と耐久性への影響を室内試験によって評価した。

第4段階は、本超流動コンクリートを用いた実用化システムについてまとめたものであり、本超流動コンクリートの配合選定、製造・運搬、打設に至る一連のシステムを構築するとともに、施工にあたって考慮される超流動コンクリート特有の事項について検証した。

具体的には、本超流動コンクリートのフレッシュな状態における基本性能と言える変形性と分離抵抗性および自己充填性に関する定量評価手法を提案し、本評価手法によって定量化した数種のデータを基本として配合選定における良否の判定値および実工事での品質管理目標値を導いた。

さらに、施工性に関して超流動コンクリート特有の問題として考慮される、製造・運搬に伴うフレッシュコンクリートの品質安定性とその対策、ポンプ圧送性、側圧あるいは流動勾配について検証し、本実用化システムの施工上の適用条件を明確にすることとした。

第5段階は、ここに確立した実用化システムの正当性を実証するために行った数種の適用例についてまとめたものであり、特に本超流動コンクリートの有する優れた特性に適應した施工法を組み合わせた適用工事について報告するとともに、これらの工事によって得られた施工上の知見についてまとめたものである。

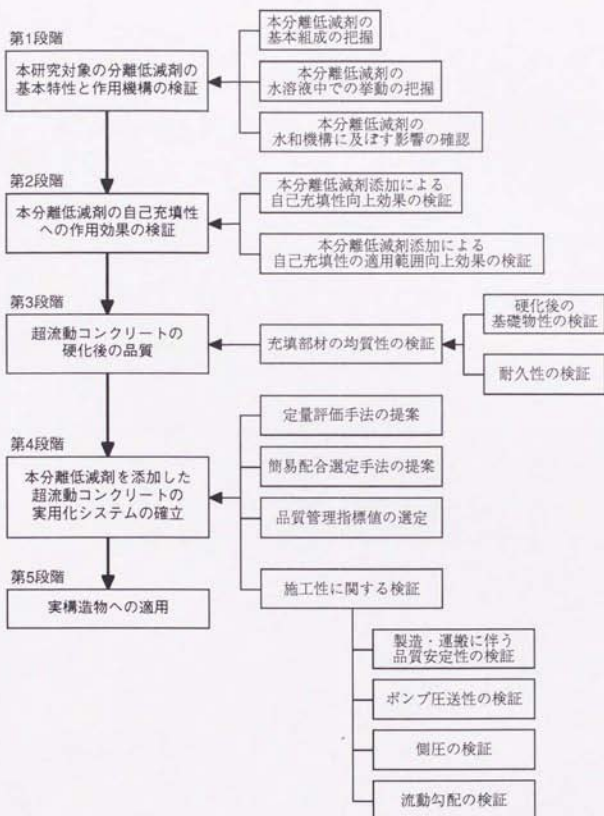


図-1.3.1 研究の構成

第2章 新しく開発された分離低減剤の基本的性質とその作用機構

2.1 はじめに

現在、コンクリート用の分離低減剤として一般化しているものに、水中不分散性コンクリートに使用されるセルロース系およびアクリル系の水中不分散性混和剤と称される有機の水溶性高分子が挙げられる。これらの水溶性高分子はその名称のとおり、コンクリートの練り混ぜ水に容易に溶解し、練り混ぜ水全体の粘性を高める性質を有する。

これらの水溶性高分子の溶解とは、水溶性高分子の分子どうしが結合した集合体が、接水により再び個々の分子に別れ、水溶液中全体に分子分散した状態になることを言う。また、各々の分子は水酸基やアミド基などの親水基を有しており、これらが図-2.1.1に示すように周囲の水を引き付けた状態で溶解し、互いに緩衝することによって、練り混ぜ水に高粘性を付与するものと言える。

これら従来の分離低減剤に対して、本研究で取り扱う分離低減剤は基本的に水への溶解性は極めて小さく、また、コンクリート練り混ぜ水中で膨潤ゲル化し、そのゲル形成時に周辺の水を吸水する性質を有する点が大きな特徴と言える。

本章では、本分離低減剤の溶解性、膨潤性、吸水性および分離低減剤存在下での水溶液の粘性を主体とした本分離低減剤の基本的な性質を把握するとともに、これらの結果をもとに、本分離低減剤の作用機構を明らかとすることとした。

また、本分離低減剤を添加した場合の結合材の水和機構への影響を調査し、混和剤として使用する場合の絶対条件と言える基材の水和機構には悪影響を及ぼさないことを確認することとした。以下、これらの検討結果について述べる。

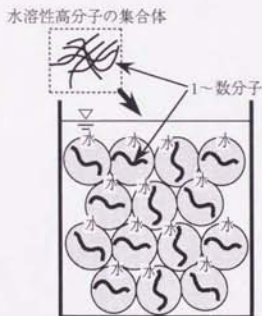


図-2.1.1 水溶性高分子の水溶液、練り混ぜ水での溶解状況

2.2 分離低減剤の基本組成

2.2.1 化学構造

本分離低減剤は、多糖類であるD-グルコース分子400～500箇が1-3位で β -グルコシド結合した分子量70,000程の β -1,3-グルカンのカードランであり、図-2.2.1に示す化学構造を有する有機の高分子である。本分離低減剤の水溶性は極めて小さいが、周囲の水の吸水あるいはCaイオンが共存する高アルカリ溶液中においてカルシウムイオンと架橋することによって、膨潤ゲルを形成する性質を有する^[2.1]。コンクリートの練り混ぜ水はCaイオンとNaイオン、Kイオンを主体とする高アルカリ液であることから、本分離低減剤は膨潤ゲルを形成することになる。

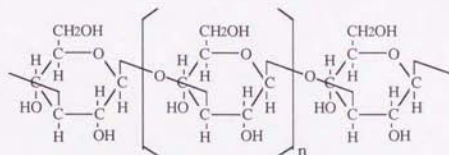


図-2.2.1 本分離低減剤（カードラン）の化学構造

比較として、同様にグルコース分子から形成される従来の分離低減剤であるセルロース系水中不分離性混和剤^[2.2]の一例を図-2.2.2に示す。

セルロース系高分子はOH基により互いの分子どうしが結合し積層に格子状構造をとっているが、図-2.2.2にR1～R3で示されたアルキル基を置換することによって、各分子どうしの結合力を弱め、さらに、1分子量を数100から数1000と比較的低分子量とすることで水中での分散性すなわち水溶性を付与していると言える。また、同記号R1～R3がHで水酸基となる場合には水素結合によって周囲の水を引き付け拘束することになる。

本分離低減剤が水への溶解性が極めて小さい理由は、各分子どうしがOH基のみの水素結合によって強固に結合している点と分子量が70,000程度と高分子であることによる。また、Caイオンと架橋した膨潤ゲルを形成し吸水する性質は、この β -1,3結合を有する点にあると言え、図-2.2.3に示すようにグルコース分子どうしが斜めに結合したラセン状の形態で高分子化した分子が水中で膨潤することによって、多量の水を蓄えることのできるポラスな膨潤粒子（ゲル）となると考えられる。



図-2.2.2 セルロース系水中不分離性混和剤の化学構造 (例)^[2.2]

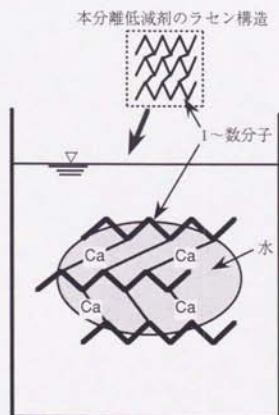


図-2.2.3 本分離低減剤（カードラン）の膨潤および吸水機構の概念

2.2.2 製造方法

本分離低減剤（カードラン）は微生物の発酵法により生産される。製造方法は図-2.2.4に示すようであり、ブドウ糖、窒素源、微量のミネラルなどを含む培養地中で生産菌（*Alcaligenes faecalis* var. *myxogenes*）を培養し、本分離低減剤の原体を生産させる。

さらに、培養地中に蓄積した原体をアルカリで溶解して、菌体と分離ならびに精製し、酸で中和することにより原体を析出させた後、乾燥工程を経て、最終的な粉末状の混和剤となる。

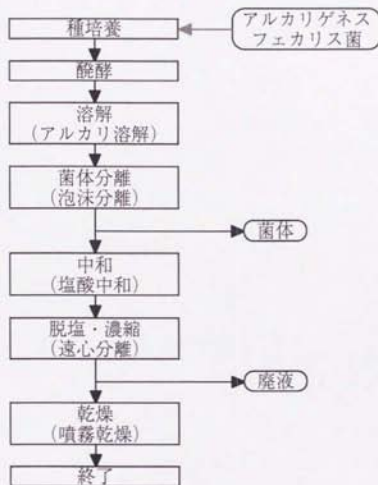


図-2.2.4 本研究対象の分離低減剤（カードラン）の製造方法

2.2.3 安全性

本分離低減剤（カードラン）は、澱粉やセルロースと同じようにD-グルコースのみからなる天然の多糖類であり、食品添加物として厚生省「第1版 化学的合成品以外の食品添加物リスト」にも掲載されており、毒性は極めて低く、人体に対する安全性は高い。

また、寒天と同様に栄養的に不活性であること、表-2.2.1に示すように98%が食物繊維であることも明かにされている[2.3]。

表-2.2.1 本分離低減剤（カードラン）の基本品質と一般分析例[2.3]

分類	項目	仕 様	
標準品質	性状	類白色	
	比重	かさ比重=0.52、真比重=1.44 ^[2,4]	
	平均粒径	80 μ m	
	重金属	(Pbとして) 20ppm以下	食品一般に関する安全基準値を満足する。
	ヒ素	(As ₂ O ₃ として) 2ppm以下	
	乾燥減量	10%以下 (60℃、減圧、5時間)	
一般分析例	ゲル強度	500g/cm2以上 (2%、100℃、10分間)	
	水分	7.7% (減圧加熱乾燥法)	
	タンパク質	0.7% (ケルダール法)	
	脂質	0.2% (ソックスレー抽出法)	
	繊維	9.8% (ヘンネベルグストーン改良法)	
	灰分	2.8% (直接灰化法)	
	糖質	78.8%	
	食物繊維	98.6% (無水物として、酸素-重量法)	

2.3 セメントろ液・高アルカリ溶液中での挙動

2.3.1 本分離低減剤の溶解性

ここでは、水、飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、0.1N- NaOH の各種水溶液、および、普通ポルトランドセメント(C)、高炉スラグ(B)、フライアッシュ(F)、3成分系結合材(混合比C:B:F=4:4:2)の各種結合材ろ液における、本分離低減剤あるいは比較としてセルロース系水中不分離性混和剤(主成分:ヒドロキシプロピルメチルセルロース)の溶解性について示す。

溶解性の測定はフェノール硫酸法により行い、(2.1)式にて糖を定量することによって求めた。なお、ここで言う溶解性とは、対象とする水溶液あるいは結合材ろ液中に分離低減剤を一定量加えた場合に溶解する量を測定するものである。したがって、分離低減剤が飽和するまでの溶解量を示すものではなく、対象とする分離低減剤の溶解の度合あるいは溶解のしやすさを相対的に評価するものである。

$$\text{溶解性} = \text{分離低減剤溶解糖量} / \text{分離低減剤添加糖量} \quad \cdots (2.1)$$

また、対象とした水溶液あるいは結合材ろ液は、図-2.3.1に示すような2種類の手順により抽出したものであり、ここでは、それぞれを溶液系およびペーストロ液系と称することとする。溶液系は、各種水溶液または各種の結合材を水結合材比45%で練り混ぜたペーストをろ紙ろ過して抽出した溶液に一定量の分離低減剤(本分離低減剤=W×1%、セルロース系水中不分離性混和剤=W×0.25%)を添加し、再度、ミリボワフィルター(0.8 μm)でろ過した場合である。

ペーストロ液系は、分離低減剤を予め添加した状態で練り混ぜたペーストを直接ミリボワフィルター(0.8 μm)でろ過して抽出した場合であり、先の溶液系が分離低減剤の基本的な溶解性を評価するものであるのに対して、ペーストロ液系はより実際の練り混ぜに近い状態での溶解性を評価するものと言える。なお、ペーストロ液系における分離低減剤の添加量は単位水量に対して溶液系と同じ比率であるが、ペーストからろ過試料を抽出しやすくするため、便宜上、水結合材比は50%とした。

図-2.3.2は、溶液系における本分離低減剤およびセルロース系水中不分離性混和剤の接水後30分経過時点での溶解性を示したものである。セルロース系水中不分離性混和剤はいずれの溶液においてもほぼ全溶解するのが分かる。これに対して、本分離低減剤は NaOH 溶液においてはほぼ全溶解するが、水や飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液あるいはフライアッシュろ液には殆ど溶解せず、普通ポルトランドセメントろ液に20%程度、高炉スラグろ液において15%程度の溶解性を示す。また、3成分系結合材ろ液における溶解性は8%程度であり、概ね3種類の結合材の混合比に応じた平均的な溶解性を示すものと言える。

図-2.3.3は、溶液系における本分離低減剤の各種結合材ろ液での溶解性の経時変化を示

したものである。本分離低減剤の溶解は接水後5分間の内には終了し、以後は溶解性の変化は殆どないことが分かる。

図-2.3.4は、ペーストロ液系における本分離低減剤の溶解性について、先の溶液系での30分経過時点での結果と比較したものである。ペーストロ液系の溶解性は、高炉スラグろ液の場合のみ溶液系と比べて小さい結果となっているが、他の結合材ろ液の場合はいずれも違いは僅かであり、ペーストロ液系と溶液系との溶解性は基本的には同等であると判断される。

図-2.3.5は、ペーストロ液系におけるセルロース系水中不分離性混和剤の溶解性について、溶液系での結果と比較したものである。いずれの結合材ろ液の場合も、ペーストロ液系の溶解性は溶液系に比べて10%~30%小さくなっていることが分かる。

ここで、中川ら^[2.5]、早川ら^{[2.6][2.7]}の既往の研究により、セルロース系水中不分離性混和剤の結合材表面への吸着現象が明らかにされており、分離低減剤添加量の25%程度が結合材への吸着量として見込まれる^[2.7]ことが示されている。本試験における結果もこれら既往の文献とはほぼ同程度の差が認められることから、ペーストロ液系の場合に溶解性が減少すると見るよりは、予め分離低減剤を添加した場合に分離低減剤の一部が結合材に吸着し、見掛け上、溶解性が小さく測定されたものと考えられる。

同様に、ペーストロ液系と溶液系との溶解性の差が吸着によるものと解釈すれば、本分離低減剤については結合材への吸着現象は殆ど生じていないものと考えられる。

いずれにせよ、本分離低減剤は結合材ろ液すなわち練り混ぜ水への溶解性は小さく、本研究の適用範囲である3成分系結合材における溶解性は僅かであると言える。

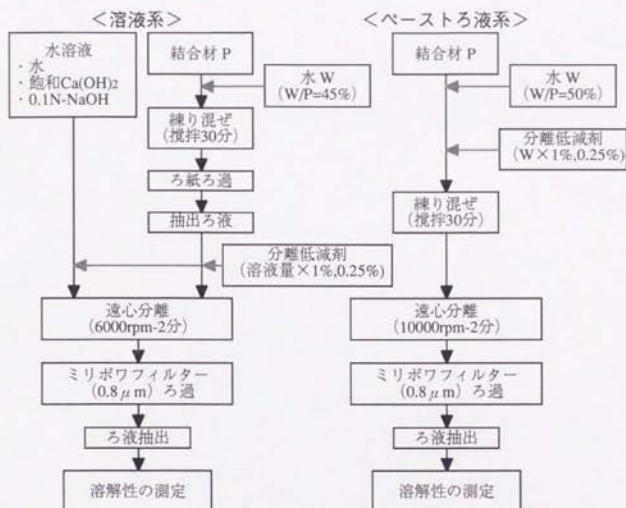


図-2.3.1 溶解性測定用試料の抽出手順

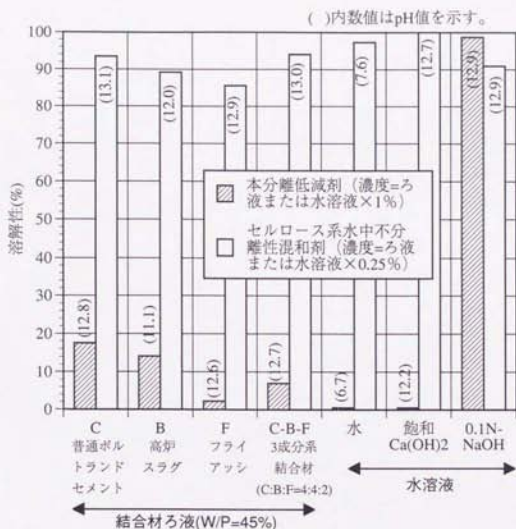


図-2.3.2 分離低減剤の各種結合材ろ液または水溶液への溶解性

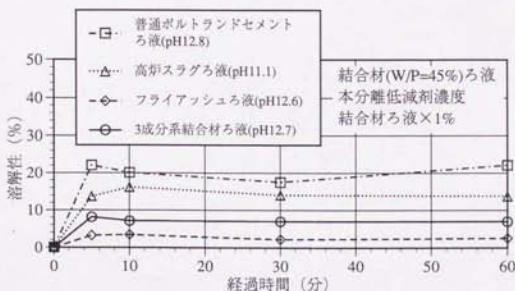


図-2.3.3 本分離低減剤の各種結合材ろ液への溶解性の経時変化

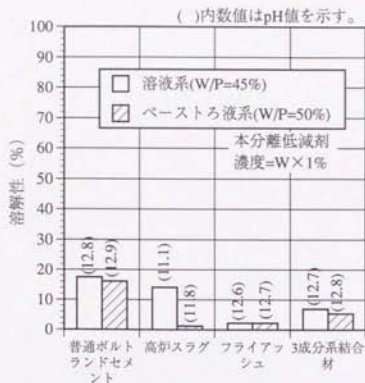


図-2.3.4 本分離低減剤の溶液系およびペーストロ液系における溶解性の比較

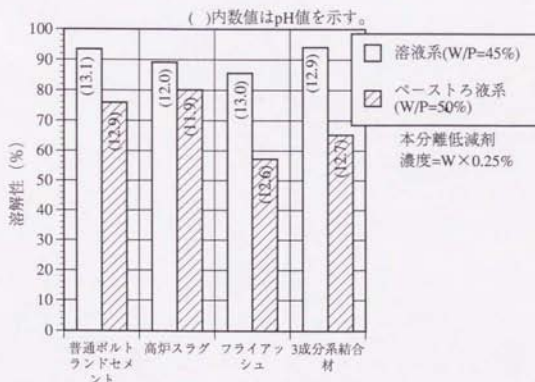


図-2.3.5 セルロース系水中不分離性混和剤の溶液系およびペーストロ液系における溶解性の比較

2.3.2 本分離低減剤の膨潤性および吸水性

本分離低減剤はCaイオンが共存する高アルカリ溶液中において、接水と同時に速やかに膨潤ゲルを形成する性質を有する。

写真-2.3.1および写真-2.3.2は、各種水溶液あるいは水結合材比45%の各種の結合材ろ液における、本分離低減剤の膨潤状況を示したものである。また、表-2.3.1は、この膨潤状況をもとに目視観察により膨潤ゲルの平均直径を測定し、膨潤前の粉末粒径との体積倍率を算出した結果を示す。

これらの膨潤状況および表に示すとおり、本分離低減剤は水あるいは飽和Ca(OH)₂水溶液中における膨潤は僅かであり、NaOH水溶液においては全て溶解することから膨潤ゲルとして存在しない。また、普通ポルトランドセメントろ液においては体積倍率として20倍程度の膨潤ゲルを形成し、フライアッシュろ液や高炉スラグろ液あるいは3成分系結合材ろ液においては体積倍率として10倍程度の膨潤を生じる。

本分離低減剤はこの膨潤ゲルの形成にともない周辺の水溶液あるいは結合材ろ液を吸水するものと言える。ここで、各種の水溶液および結合材ろ液において図-2.3.6に示すように各々の膨潤倍率に見合う量の吸水をすると仮定し、(2.2)式により算出した本分離低減剤1kg当りの吸水量を表-2.3.1に併記する。

$$\text{分離低減剤1kg当りの吸水量} = \text{分離低減剤単位体積 (1kg/1.44)} \times (\text{膨潤倍率} - 1) \cdots (2.2)$$

表に示すように、結合材ろ液において本分離低減剤は添加量1kg当り5リットルから14リットルの吸水するものと言え、本研究の超流動コンクリートの適用範囲である3成分系結合材の場合には7リットル程度の吸水があるものと推定される。

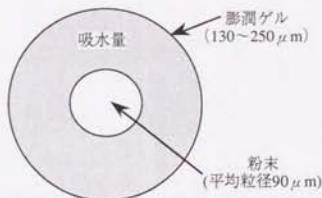
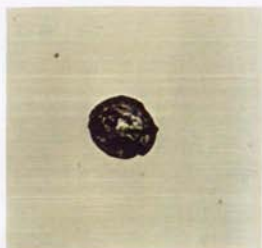


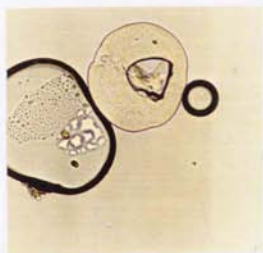
図-2.3.6 吸水量の算出要領

表-2.3.1 本分離低減剤の結合材ろ液・水溶液中での膨潤性および吸水量

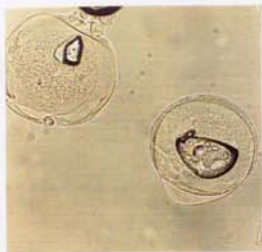
結合材ろ液・水溶液種別		水溶液、結合材ろ液のpH	膨潤ゲルの平均粒径 (μm)	膨潤倍率 (粉末体積比)	吸水量 (l/kg)
結合材ろ液系	普通ポルトランドセメント	13.0	250	21	14
	フライアッシュ	12.7	200	11	7
	高炉スラグ	12.0	190	9	5.5
	3成分系結合材 (C-B-F=4:4:2)	12.8	200	11	7
水溶液系	0.1N-NaOH	13.0	溶解	-	-
	飽和Ca(OH) ₂	12.3	130	3	1.4
	水	6.1	150	5	2.8
膨潤前 (粉末)		-	平均粒径: 90	1	-



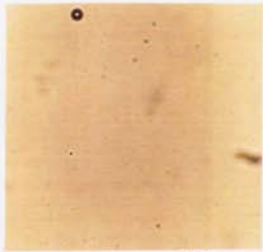
膨潤前（粉末：平均粒径 $90\mu\text{m}$ ）



水



飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液



0.1N-NaOH溶液

写真-2.3.1 各種水溶液中での膨潤状況



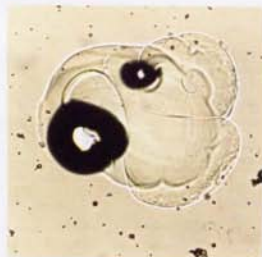
膨潤前（粉末：平均粒径 $90\mu\text{m}$ ）



高炉スラグろ液



フライアッシュろ液



普通ポルトランドセメントろ液



3成分系結合材ろ液

写真-2.3.2 各種結合材ろ液中での膨潤状況

2.3.3 水溶液の粘度

図-2.3.7は、水あるいは0.1N-NaOHの水溶液、および、普通ポルトランドセメントろ液あるいは3成分系結合材ろ液における、本分離低減剤と先の2.3.1項と同じセルロース系水中不分離性混和剤を添加した場合の分離低減剤濃度（水溶液または結合材ろ液×%）と溶液粘度の関係を示したものである。

ここで、結合材ろ液については、水結合材比45%で練り混ぜたペーストをろ紙ろ過して抽出した溶液に、所定量の本分離低減剤あるいはセルロース系水中不分離性混和剤を添加し再度攪拌した試料である。

また、粘度の測定は共軸2重円筒回転粘度計により行ったものである。なお、先の2.3.2項に述べたように本分離低減剤は結合材ろ液中において膨潤ゲルを形成することから、ここで得られた結果は膨潤ゲルの分散した状態での粘度と言える。

図-2.3.7を見ると分かるように、セルロース系水中不分離性混和剤の場合には濃度の増加にともなって急激に溶液の粘度が増大するのに対して、本分離低減剤においては濃度の増加にともなう溶液粘度の増加は比較的緩やかである。

また、本分離低減剤における溶液粘度は、全て溶解するNaOH水溶液、20%程度の溶解性を有し比較的大きな膨潤ゲルを形成する普通ポルトランドセメントろ液、8%程度の溶解性を有する3成分系結合材ろ液の順に大きく、溶解性および膨潤性が大いほど粘度も大きくなる傾向にあると言える。水の場合には、溶解性が極めて僅かであり膨潤粒子も小さいことから粘度の上昇は殆ど認められない。

図-2.3.8は、水結合材比40%の3成分系結合材ペーストにおける、本分離低減剤あるいはセルロース系水中不分離性混和剤の添加量とペーストの塑性粘度との関係を示したものである。分離低減剤の添加量の増加にともない塑性粘度も増加する傾向にあるが、先の結合材ろ液での場合と同様に、本分離低減剤の場合はセルロース系水中不分離性混和剤と比べて添加量の増加に伴う粘度の増加は緩やかである。

以上の検討は、分離低減剤の溶解性と溶液の粘度の関係について定性的な傾向を把握するものであるが、分離低減剤の溶解性が大いほど溶液の粘度増加の度合いが大きくなる傾向にあると言える。本分離低減剤においては僅かに溶解することにより、ろ液の粘度増加は認められるが、溶解性が小さいことから本分離低減剤の添加量の増加にともなう粘度増加の度合いは僅かであると言える。

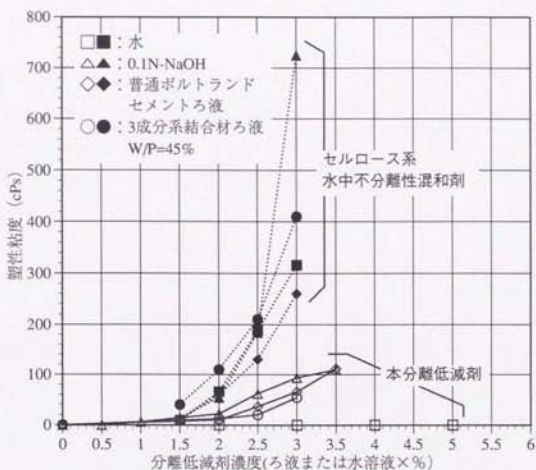


図-2.3.7 分離低減剤の濃度と塑性粘度の関係

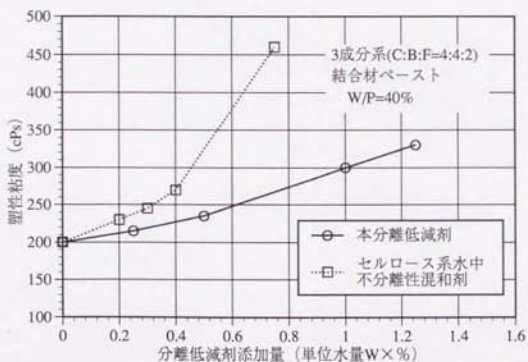


図-2.3.8 3成分系結合材ペーストにおける
分離低減剤の添加量と塑性粘度の関係

2.3.4 温度依存性

図-2.3.9は、先の2.3.1項に示した溶液系と同じ手順により抽出した3成分系結合材ろ液について、本分離低減剤の溶解性の経時変化とろ液温度の関係を示したものである。

本分離低減剤の溶解性は、ろ液の温度が高くなるにともない大きくなる傾向が認められるが、その範囲は4%～10%と小さく、また、最大でも10%程度以下であり、コンクリート練り上がり温度あるいは打込み温度として一般的な10℃から35℃の範囲において、温度の違いが溶解性に及ぼす影響は僅かであると考えられる。

図-2.3.10は、同様に3成分系結合材ろ液の粘度と温度の関係を示したものである。また、同図にはセルロース系水中不分離性混和剤の場合も併記する。

セルロース系水中不分離性混和剤の場合には、温度が高くなるほど粘度は小さくなることが知られているが〔2.2〕、本試験においても同様な結果であり、10℃の場合の粘度と比べて35℃ではほぼ半減することが分かる。これに対して、本分離低減剤を添加した場合のろ液粘度は、温度10℃から35℃の範囲においてほぼ同等であり、温度の違いが粘度に及ぼす影響は無いものと言える。

写真-2.3.3は、3成分系結合材ろ液の温度の違いにおける膨潤ゲルの形成状況を示したものである。ろ液温度が高いほど膨潤も大きくなる傾向にあるが、20℃と35℃における膨潤状況の差は僅かであるのに対して、10℃における膨潤ゲルはこれらと比べて明らかに小さくなる傾向にある。

したがって、低温の場合には、吸水量が少なくなり分離抵抗性の付与効果は減少するものと考えられ、20℃あるいは35℃の場合と同等の分離抵抗性を付与するための添加量は多くなるものと考えられる。

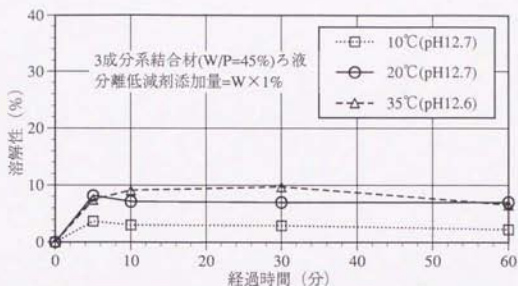


図-2.3.9 3成分系結合材ろ液における溶解性の温度依存性

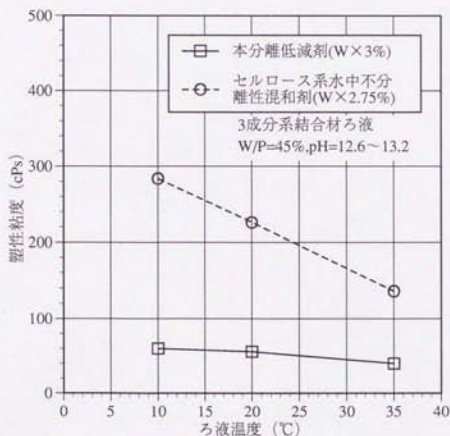


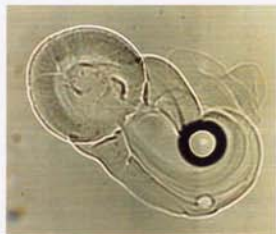
図-2.3.10 3成分系結合材ろ液における塑性粘度の温度依存性



10°C



20°C



35°C

写真-2.3.3 3成分系結合材ろ液の温度の違いと膨潤ゲル形成状況

2.3.5 高性能(AE)減水剤との相性

本研究における超流動コンクリートは、本分離低減剤を添加し、これに、比較的多量の高性能(AE)減水剤を併用する。ここで、セルロース系水中不分離性混和剤の場合には高性能(AE)減水剤との相性があり、ナフタリン系の高性能(AE)減水剤を併用した場合には、高性能(AE)減水剤の添加量の増大にともない急激に粘度が上昇する現象が生じることが知られている[2.2][2.8]。

そこで、本分離低減剤における高性能(AE)減水剤との相性の有無を調査するため、現状市販されている代表的なナフタリンスルホン酸系、メラミン樹脂スルホン酸系、ポリカルボン酸系の3種類を主成分とする高性能(AE)減水剤を対象に、これらの高性能(AE)減水剤の添加が本分離低減剤の溶解性および粘度に及ぼす影響を調査した。

図-2.3.11は、先の2.3.1項に示した溶液系と同じ手順により抽出した3成分系結合材ろ液において、ナフタリン系の高性能減水剤の添加の有無と本分離低減剤の溶解性の経時変化の関係を示したものである。

溶解性およびその経時変化において高性能減水剤の有無による差は殆どなく、高性能減水剤を添加することによる溶解性への影響は認められない。

図-2.3.12は、上記と同じ3成分系結合材ろ液に3種類の高性能(AE)減水剤を添加した場合の30分経過時点での溶解性を示したものである。いずれの高性能(AE)減水剤においても、無添加の場合と同等の溶解性を示しており、これらの高性能(AE)減水剤が本分離低減剤の溶解性へ及ぼす影響は認められない。

図-2.3.13は、水結合材比45%の3成分系結合材ペーストをろ紙ろ過した試料に本分離低減剤を添加した結合材ろ液における、高性能(AE)減水剤の濃度(ろ液×%)とろ液の塑性粘度の関係を示したものである。また、同図には比較としてセルロース系水中不分離性混和剤も併記する。

セルロース系水中不分離性混和剤では、従来より指摘されているようにナフタリン系高性能減水剤を併用した場合に、その添加量の増加にともない急激な粘度の増加が認められる。これに対して、本分離低減剤はいずれの高性能(AE)減水剤においても粘度の変化は殆ど認められず、本分離低減剤とこれら高性能(AE)減水剤との相性において、結合材ろ液の粘度に及ぼす影響はないことが分かる。

図-2.3.14は、本分離低減剤を添加した3成分系結合材ペーストにおける、高性能(AE)減水剤の添加量(結合材×%)とペースト粘度の関係を示したものである。また、比較としてセルロース系水中不分離性混和剤を添加したペーストの場合を図-2.3.15に示す。

図-2.3.14を見ると、本分離低減剤を添加した3成分系結合材ペーストにおいて、高性能(AE)減水剤の添加量が0.2%の段階で粘度の上昇が認められるが、以降は、いずれの高性能(AE)減水剤においても添加量の増加にともないペースト粘度は減少しているのが分かる。

これに対して、図-2.3.15に示すセルロース系水中不分離性混和剤においては、高性能

(AE)減水剤無添加でのペースト粘度が本分離低減剤と同程度の場合には、特にナフタリン系の高性能(AE)減水剤において、その添加量の増大にともないペースト粘度が急激に増大する傾向が認められる。また、分離低減剤の添加量を減らし高性能(AE)減水剤無添加における粘度を1/3程度と小さくした場合には、高性能(AE)減水剤の添加量の増加に伴う粘度の急激な増加は認められないが、添加量を増やしても粘度の減少の度合は僅かである。

先にも述べたように、本分離低減剤の場合は高性能(AE)減水剤の添加量が0.2%程の少量の段階で僅かに粘度の増加があるが、これは一時的であり、全体の傾向としては高性能(AE)減水剤の添加量の増加にともないペースト粘度は順調に減少し、いずれの高性能(AE)減水剤においても粘度を著しく増大させるような相性上の影響は認められない。

ここで、高性能(AE)減水剤の添加にともなうペースト粘度の減少の度合は、高性能(AE)減水剤の減水効果あるいは変形性付与効果の指標となると考えられる。この点において、本分離低減剤は、セルロース系水中不分離性混和剤と比べて、高性能(AE)減水剤の添加量の増加にともなうペースト粘度の減少の度合が大きく、高性能(AE)減水剤の有する変形性付与効果が十分に期待できるものと言える。

先の2.3.2項において、本分離低減剤は練り混ぜ水中において粒径200 μ m程度の膨潤粒子の状態で存在することを示した。そこで、高性能(AE)減水剤の添加の有無と本分離低減剤の膨潤粒子とセメント粒子において、粒子表面のゼータ電位を調査した。

対象とした試料は、ナフタレン系の高性能減水剤（結合材×1%）を添加した水結合材比45%の3成分系結合材液に、本分離低減剤（ろ液×1%）を添加し、膨潤させた試料である。

調査結果を表2.3.3に示すが、膨潤粒子表面は高性能減水剤の有無に因らずマイナスで帯電しており、この値は高性能減水剤を添加したセメント粒子とほぼ同等であることが分かる。これは、高性能減水剤の添加の有無によらず膨潤粒子自体が既に分散性を有し、さらに、高性能減水剤の添加によってセメント粒子表面もマイナス帯電の状態となった場合には、セメント粒子と本分離低減剤との電気的な反発力も生じ、ペースト中において良好に分散する状態にあることを示唆する結果である。

総括すれば、本分離低減剤と高性能(AE)減水剤との併用において、現状の代表的なナフタリン系、メラミン系、ポリカルボン酸系を主成分とする高性能(AE)減水剤のいずれも相性上の問題は認められず、さらに、これらの高性能(AE)減水剤の減水効果あるいは変形性付与効果を十分に期待できるものと言える。

また、本分離低減剤の膨潤粒子表面はゼータ電位としてマイナスで帯電しており、高性能(AE)減水剤の介在によりセメント粒子表面もマイナス帯電の状態となった場合には、セメント粒子と本分離低減剤膨潤粒子との電気的な反発力も生じることで、本分離低減剤はペースト全体にわたって良好な分散性を有するものと推定される。

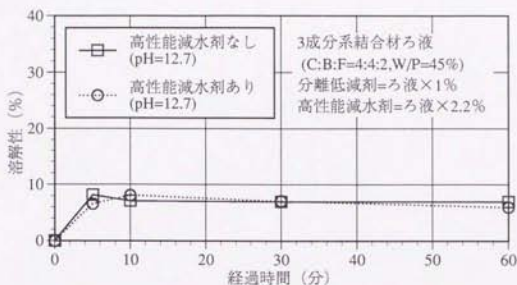


図-2.3.11 高性能減水剤（ナフタリン系）を添加した場合の結合材ろ液系での溶解性の経時変化

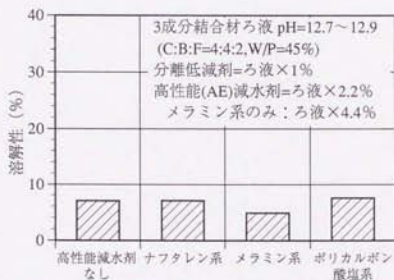


図-2.3.12 各種高性能(AE)減水剤を添加した場合の結合材ろ液系での溶解性

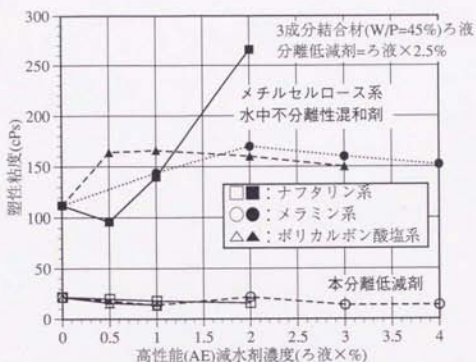


図-2.3.13 3成分系結合材ろ液における
高性能(AE)減水剤の種類が粘度に及ぼす影響

表-2.3.3 表面電荷測定結果

種別	ゼータ電位(mV)	
	高性能減水剤なし	高性能減水剤あり
セメント粒子	7.0	-18.8
本分離低減剤 膨潤粒子	-16.3	-17.5

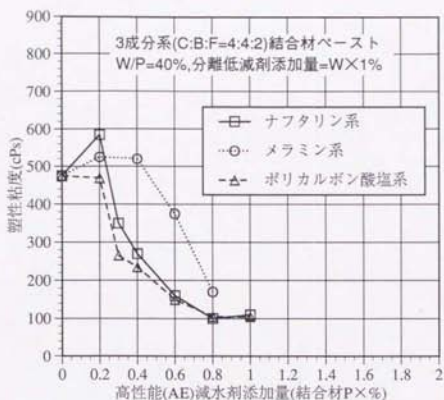


図-2.3.14 本分離低減剤添加の3成分系結合材ベーストにおける
塑性粘度と高機能(AE)減水剤添加量の関係

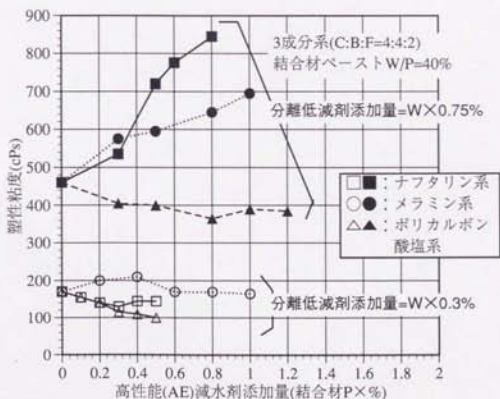


図-2.3.15 セルロース系水中不分離性混和剤添加の3成分系結合材
ベーストにおける塑性粘度と高機能(AE)減水剤添加量の関係

2.3.6 本分離低減剤の作用機構

これまで、セルロース系水中不分離性混和剤のような従来の分離低減剤が結合材ベーストろ液すなわち練り混ぜ水にほぼ完全に溶解するのに対して、本分離低減剤は練り混ぜ水への溶解性は僅かであり、練り混ぜ水のようなCaイオンが共存する高アルカリ溶液中において、Caイオンと架橋した粒径200 μ m程の球形の膨潤ゲルを形成し、この膨潤にともなう周囲の練り混ぜ水を吸水する性質を有することを述べた。

また、分離低減剤の溶解性が大きいほど、その添加量の増加にともない結合材ベーストの練り混ぜ水およびベースト自体の粘度も大きくなる傾向にあるが、ほぼ完全に溶解する従来の分離低減剤と比較して、本分離低減剤は溶解性が小さいことによって結合材ベーストの練り混ぜ水およびベースト自体の粘度増加が小さいことを示した。

さらに、本分離低減剤は現状の代表的な高性能(AE)減水剤との併用において相性上の問題は認められず、高性能(AE)減水剤の添加量の増加にともないベースト粘度も順調に小さくなり、高性能(AE)減水剤の変形性付与効果が十分に期待できることを示した。

以上のことから、本分離低減剤の作用機構は、ベーストの練り混ぜ水を吸水し膨潤ゲル内に保水することによって、見掛け上、ベースト中の自由水が少ない状態となることでベーストの分離抵抗性を高めることが主体であると言える。ただし、部分的には本分離低減剤も溶解を生じることから、セルロース系水中不分離性混和剤と同様に練り混ぜ水全体の粘度を増大させる機構も僅かながら有しているものと考えられる。

しかしながら、従来の分離低減剤が練り混ぜ水に完全に溶解し全体の粘性を大きく高めることによってベーストに高分離抵抗性を付与する機構が主体であるのに対して、本分離低減剤の場合は練り混ぜ水の粘度増加は小さく、これが、高性能(AE)減水剤の変形性付与効果を効率的に得られる理由であると考えられる。すなわち、練り混ぜ水の粘度が大きい場合には結合材どうしの凝集に対しては有利となるが、より積極的に変形性を高めようとする場合には高性能(AE)減水剤の変形性付与効果に対する抵抗として作用すると考えられ、この点において、練り混ぜ水の粘度が小さい方が高性能(AE)減水剤の変形性付与効果を効率的に期待できると考えられるからである。

以上のように、本分離低減剤の作用機構は、膨潤にともなう練り混ぜ水の吸水による高分離抵抗性の付与が主体とするものであると結論されるが、高性能(AE)減水剤の変形性付与効果を効率的に得ることが可能な状態で高分離抵抗性を付与できる特徴を有する分離低減剤であると言える。

2.4 本分離低減剤のセメント水和機構に及ぼす影響

2.4.1 水和発熱速度への影響

本分離低減剤を添加することによる結合材の初期水和反応に及ぼす影響を調査するために、表-2.4.1に示す本分離低減剤の添加の有無を要因とした配合の3成分系結合材ペーストについて、接水直後から48時間までの水和発熱速度の経時変化を伝導熱量計を用いる直接法により測定した。

なお、本研究対象の超流動コンクリートは高性能減水剤を併用することを基本とするが、ここでは、本分離低減剤の添加による水和反応への影響を明らかにすることが目的であるため、高性能減水剤は添加しない配合において評価した。

図-2.4.1に発熱速度の経時変化を示し、表-2.4.2に発熱速度のピーク値とその発生時間、および、48時間の総発熱量を示す。

発熱速度の経時曲線、発熱ピークの経過時間および48時間の累積発熱量はA配合とB配合の両者ともほぼ同等であり、本分離低減剤を添加することによる初期の水和反応への影響は殆どないことが分かる。

2.4.2 水和生成物への影響

本分離低減剤を添加した場合の水和生成物の生成状態への影響を調査するために、表-2.4.3に示す本分離低減剤の添加の有無を要因とした配合の3成分系結合材ペーストについて、材令3日および91日時点で粉末X線回折による水和生成物の同定を行った。

なお、本試験においては、水結合材比は36%は両配合とも同じであるが、実際の超流動コンクリートの配合を考慮して、本分離低減剤を添加した場合の高性能減水剤の添加量を決め、本分離低減剤を添加しない場合は高性能減水剤の添加量を少なくした配合において行った。

図-2.4.2および図-2.4.3は、それぞれ材令3日および91日でのX線回折結果である。

材令3日および91日の同時点において、本分離低減剤の添加の有無による水和生成物の生成状況には明確な差は認められず、本分離低減剤を添加することにより異質な水和生成物を生じることなく、本分離低減剤を添加することによる水和生成物相への影響はないものと言える。

2.4.3 水和率への影響

本分離低減剤において、材令2日程度の初期段階での水和発熱への影響、および、材令91日までの水和生成物への影響を調査したが、ここでは、さらに長期的な本分離低減剤の添加による水和反応への影響を検証するため、表-2.4.4に示す普通ポルトランドセメントを用いたモルタルについて、材令1年経過時点までの水和率の経時変化を測定し、本分離

低減剤の長期的な水和反応への影響を調査した。

ここで、水和率は $105 \pm 5^\circ\text{C}$ で24時間加熱し、未水和の水分を除いた後の重量 (Wod) と $1050 \pm 50^\circ\text{C}$ で2時間加熱した後の重量 (Wig) の差から算出したもので、水和率: Wnは(1)式により求める方法とした。

$$Wn = (Wod - Wig) / \text{結合材量} \quad \cdots (2.2)$$

図-2.4.4は水和率の経時変化を示したものである。本分離低減剤の添加の有無による水和率の差は認められず、1年間の長期にわたり、本分離低減剤の添加による水和反応への影響はないことが明かとなった。

表-2.4.1 検討配合（重量比）

配合種別	水 W	結合材 P			分離低減剤
		普通ポルトランド セメント C	高炉スラグ B	フライアッシュ F	
A配合	0.5	0.4	0.4	0.2	W×0.4%
B配合					なし

表-2.4.2 水和発熱量測定結果

配合種別	第1ピーク		第2ピーク		48時間の累積 発熱量 (cal/g)
	発熱速度 (cal/g/hour)	経過時間 (min)	発熱速度 (cal/g/hour)	経過時間 (min)	
A配合	5.38	4.3	1.06	702	34.0
B配合	4.95	4.0	1.05	713	34.1

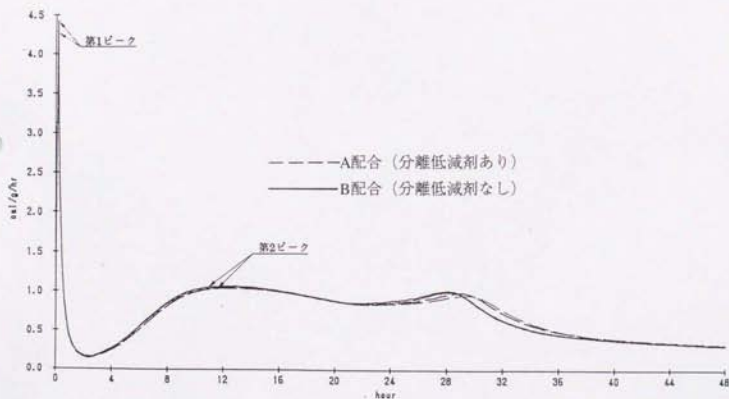


図-2.4.1 発熱速度の経時変化

表-2.4.3 検討配合 (重量比)

配合種別	水 W	結合材 P			高性能減水剤 (P×重量%)	分離低減剤 (W×重量%)
		普通ボルト ランドセメント C	高炉 スラグ B	フライ アッシュ F		
C配合	0.36	0.4	0.4	0.2	1.0	0.6
D配合					0.4	なし

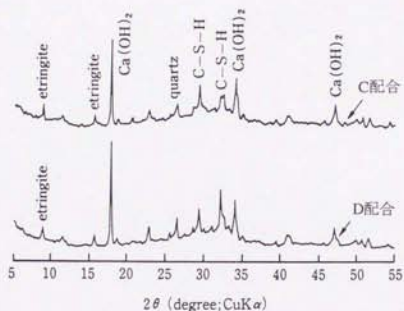


図-2.4.2 材令3日でのX線回折結果

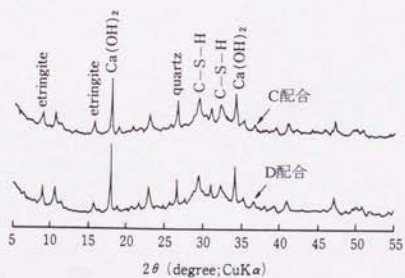


図-2.4.3 材令91日でのX線回折結果

表-2.4.4 検討配合（重量比）

配合種別	水 W	普通ポルトランド セメント C	細骨材（豊浦標準砂） S	分離低減剤
E配合	0.5	1	2	W×0.3%
F配合				なし

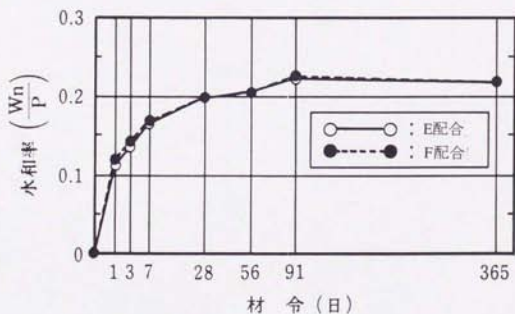


図-2.4.4 水和率の経時変化

2.5 本分離低減剤の硬化後の形態

結合材ペースト中において練り混ぜ水を吸水し膨潤ゲルとなった本分離低減剤は、結合材の硬化にともない適度な強度を有する粒子となる。

写真-2.5.1は、硬化したセメントペースト中での本分離低減剤の分布状況を示したものである。なお、試料は本分離低減剤(W×0.9%)とナフタリン系高性能減水剤(C×1.45%)を添加したW/C=33%のセメントペーストであり、材令2日時点で観察したものである。

観察を容易にするためアニリンブルー指示薬によって染色していることから青色部が本分離低減剤を示すが、平均粒径 $100\mu\text{m}$ 程度の球形粒子の形態でペースト中に均等に分散していることが分かる。このような粒子の均等な分散は、先の2.3.5項に述べた膨潤ゲル表面がゼータ電位としてマイナス帯電していることによるものと考えられ、高性能(AE)減水剤の添加によってマイナス帯電したセメント粒子と本分離低減剤の膨潤粒子とが反発し合うことによる良好な分散性を裏付ける結果と言える。

また、写真-2.5.2は、セメントペーストろ液中で膨潤させた粒子の硬化後の内部状況を示したものである。写真を見るとわかるように、粒子内部にはセメント水和生成物と考えられる結晶鉱物が認められる。

以上のように、この硬化粒子は本分離低減剤とセメント水和生成物との複合体であると考えられる。現時点では、結合材中のこれら硬化後の粒子自体の長期安定性に関するデータは無いが、本分離低減剤がD-グルコース分子の結合によって形成される化学的に安定した構造を有する繊維であることから、本分離低減剤とセメント水和生成物との複合体と言える本粒子が劣化する可能性は極めて少ないものと考えられる。

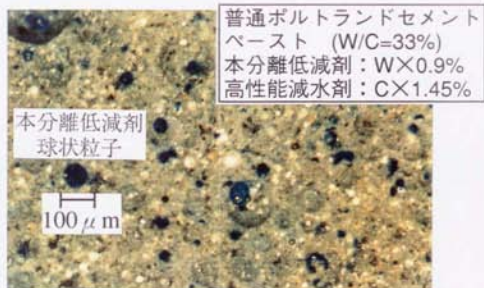


写真-2.5.1 セメントペースト中における本分離低減剤の硬化粒子の形態

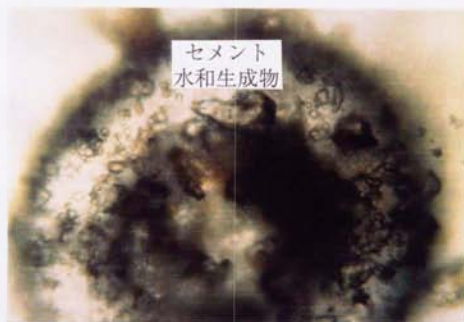


写真-2.5.2 硬化後の本分離低減剤粒子内部の結晶物

2.6 まとめ

本章では、本分離低減剤の溶解性、膨潤および吸水性、ならびに、結合材ろ液やベーストにおける粘度特性に関する基本特性を把握し、分離抵抗性と変形性に対する本分離低減剤の作用機構を明らかにした。また、本分離低減剤を添加した場合の結合材の水和機構あるいは水和過程を調査することによって、本分離低減剤の添加が基材の有する基本的な水和機構に及ぼす影響の有無を確認した。本章において得られた知見は以下のとおりである。

(1) 本分離低減剤の溶解性

本分離低減剤はNaOH液中で完全に溶解する性質を有するが、結合材ろ液における溶解性は結合材の種類によって異なり、普通ポルトランドセメントろ液において20%程度、高炉スラグろ液において15%、フライアッシュろ液において0.5%程度であり、本研究で対象とする3成分系結合材においては、3種類の結合材の混合比の平均的な溶解性として8%程度を生じる。いずれにせよ、ほぼ完全に溶解する従来のセルロース系水中不分離性混和剤と比べて、溶解性は極めて小さい。

なお、本分離低減剤は、セルロース系水中不分離性混和剤に見られる結合材表面への吸着現象は生じないものと言える。

(2) 本分離低減剤を添加した場合の溶液の粘度特性

分離低減剤を添加した結合材ろ液あるいは水溶液の粘度は、分離低減剤の溶解性が大きいほど大きくなる傾向にあるが、ほぼ完全に溶解する従来のセルロース系水中不分離性混和剤と比べて、本分離低減剤の溶解性が小さいことにより本分離低減剤の添加量の増加にともなう粘度増加の度合は小さい。

(3) 本分離低減剤の膨潤性

本分離低減剤はCaイオン共存下の高アルカリ溶液あるいは結合材ろ液において、Caイオンと架橋した球形膨潤ゲルを形成し、この膨潤にともなって周囲の溶液を吸水する。

本研究で対象とする3成分系結合材においては、初期の粉末状態に対する体積比として11倍程度の膨潤ゲルを形成し、この膨潤体積の比から換算した吸水量は本分離低減剤1kg当たり7リットル程度と言え、この比率で練り混ぜ水が吸水されるものと推定される。

(4) 本分離低減剤の温度依存性

本分離低減剤の溶解性は10℃～35℃と温度が高くなるにつれて大きくなる傾向が認められるが、その変化は4～10%の範囲であり、35℃の場合の溶解性においても10%程度以下である。また、本分離低減剤を添加した結合材ろ液の粘度においても、10℃～35℃の範囲で殆ど変化は無い。

膨潤ゲルは温度が大きくなるにともない粒径の大きいゲルを形成する傾向にあるが、20

℃と35℃との膨潤状況の差は僅かであるのに対して、10℃における膨潤ゲルは明らかに小さくなる。したがって、低温度の場合には膨潤にともなう吸水量は減少するものと言え、20℃あるいは35℃と同等の吸水を得るための添加量は多くなるものと考えられる。

(5) 高性能(AE)減水剤との相性

現状の代表的な主成分と言えるナフタリン系、メラミン系、ポリカルボン酸系の3種類の高性能(AE)減水剤の併用に対して、本分離低減剤の溶解性あるいは結合材ろ液の粘度への影響は認められず、本分離低減剤とこれらの高性能(AE)減水剤との相性上の問題はないものと言える。また、高性能(AE)減水剤の添加量の増加にともなう高変形性付与効果を十分に得ることができると考えられる。

(6) 本分離低減剤の作用機構について

本分離低減剤の作用機構は、ペースト中の練り混ぜ水を吸水し膨潤ゲル内に拘束することによって見掛け上ペースト中の自由水が少ない状態となり、ペーストの分離抵抗性を高める機構が主体である。なお、本分離低減剤の部分的な溶解により、練り混ぜ水全体の粘度を僅かに増加させる機構も有する。

(7) 本分離低減剤が基材の水和機構に及ぼす影響

本分離低減剤の添加は基材の水和過程および水和機構に影響を及ぼさない。また、硬化後においては、100 μ m程度の球状粒子の形態で結合材ペースト中に均等に分散して存在する。これらの球状粒子は本分離低減剤とセメント水和生成物との複合体と言える。

第3章 本分離低減剤の自己充填性への作用効果

3.1 はじめに

第2章において、本分離低減剤は結合材ろ液中で膨潤ゲルを形成し、膨潤の際に周囲の練り混ぜ水を吸水し膨潤ゲル内に拘束することによって、見掛け上、ペースト中の自由水を少なくする効果を有し、その結果、ペーストの分離抵抗性を高める作用機構が主体であることを示した。さらに、ほぼ完全に溶解し練り混ぜ水の粘度を大きくする従来の分離低減剤と異なり、本分離低減剤は練り混ぜ水への溶解性が小さく、添加量を増加させても練り混ぜ水自体の粘度の増加は僅かであることによって、高性能(AE)減水剤の添加による変形性付与効果を効率的に得ることが可能であることを示した。

本研究では、現状の品質・管理体制における使用材料の品質変動などに対して良好な自己充填性を確保する充填可能範囲の向上した超流動コンクリートは、図-3.1.1に示すように分離抵抗性と変形性の両性能を高めることにより達成できるという考えを基本概念としているが、本分離低減剤の有する上述の作用機構と性質は、超流動コンクリートの分離抵抗性と変形性の両性能を向上させる有効な手法であり、本分離低減剤を添加することによって比較的容易にこの基本概念を満足することが可能であると言える。

本章では、本分離低減剤の添加と高性能(AE)減水剤との併用によって付与される超流動コンクリートの分離抵抗性と変形性の向上効果、ならびに、使用材料の品質変動に対する充填可能範囲の向上効果について述べることにする。

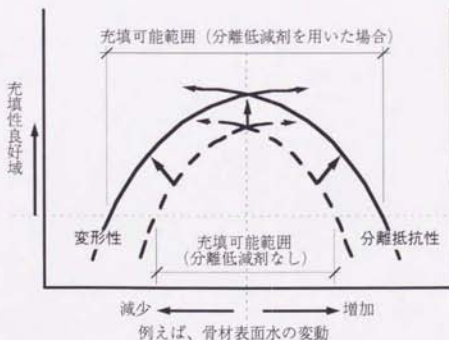


図-3.1.1 充填可能範囲の向上における基本概念

3.2 本分離低減剤の添加による自己充填性の向上効果の検証

図-3.2.1は、本分離低減剤を添加した超流動コンクリートにおける、本分離低減剤の添加量とコンクリートの変形性、分離抵抗性および自己充填性における評価結果と高性能減水剤の添加量の関係を示す。なお、ここに示すコンクリートの変形性、分離抵抗性および自己充填性の評価は、後述の第5章において提案した評価方法による評価結果である。

検討対象のコンクリートの配合は表-3.2.1に示すとおりであり、3成分系結合材と粗骨材最大寸法20mmの砕石を使用した本研究で取り扱う超流動コンクリートの適用範囲における標準的な配合のものである。

また、本分離低減剤の各添加量に対する超流動コンクリートは、それぞれ、充填性の指標である充填高さが最大となるように高性能減水剤の添加量を調整して選定したものである。したがって、図-3.2.1は本分離低減剤の各添加量に対して自己充填性が最も良好と判断された超流動コンクリートの結果をそれぞれ示したものである。

図を見ると、本分離低減剤の添加量の増加にともなって分離抵抗性の指標である見掛けの粘性が高くなり、また、高性能減水剤の増量にともなって変形性の指標であるスランプフローも大きくなり、これら両性能の複合効果として、自己充填性の指標である充填高さが向上するのが分かる。

特に、本分離低減剤の添加量として0.3%と少量の段階において、高性能減水剤の添加量は本分離低減剤無添加の場合と同程度であるが、基材の自己充填性はほぼ最大値にまで向上しているのが分かる。これは、先の第2章に示した本分離低減剤膨潤ゲル自体が負の表面電荷を帯びていることによる効果と考えられ、膨潤ゲル自体が良好な分散性を有するとともに、球形の膨潤粒子がコロのように作用することによって、ペーストの分散性および変形性の向上に寄与している可能性が考えられる。

いずれにせよ、本分離低減剤を僅かに添加した場合においても十分に自己充填性の向上効果が得られるものと言えるが、超流動コンクリートとして、変形性を極力大きい状態とし材料分離に対しても余裕を持たせるために、本分離低減剤の添加量は0.6%程度あるいはそれ以上の範囲で使用するのがよいと考えられる。

なお、同図には練り上がり時の空気量も併記するが、空気量は各々の本分離低減剤の添加量に対して4.4%から4%の範囲にあり、添加量を増加させても練り混ぜにともなう巻き込みエア等の混入は認められず、安定しているのが分かる。

以上のように、本分離低減剤の添加量の増加にともなう分離抵抗性の向上効果と高性能減水剤の添加による効率的な変形性付与効果により、比較的容易に高分離抵抗性と高変形性を付与することが可能であり、これらの複合効果によって、基材の自己充填性を向上させることが可能であると言える。

表-3.2.1 自己充填性向上効果の検証における検討配合

Gmax (mm)	水結合 材比 W/P (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤	
			水 W	結合材 P ^{注1)}			細骨材 S	粗骨材 G	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
					B	F				
20	33	45	165	200	200	100	705	911	適量	0~0.9

注1) C:普通ポルトランドセメント B:高炉スラグ F:フライアッシュ

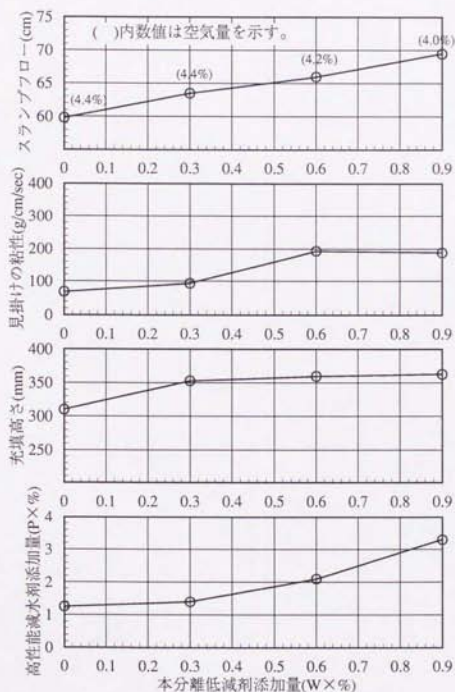


図-3.2.1 本分離低減剤の添加による充填性向上効果

3.3 品質変動に対する充填可能範囲の向上効果の検証

超流動コンクリートのフレッシュな状態に要求される性能は高変形性と高分離抵抗性と
言え、両性能を適正にバランスさせた状態で両性能ともに大きくすることによって、高密
度配筋部への自己充填性が向上し、その結果、使用材料の品質変動に対する充填可能範囲
を向上させることが可能であると考えられる。

先の3.2項において、本分離低減剤を添加することによって基材の分離抵抗性を高め、
さらに、高性能減水剤の添加によって変形性の向上効果を比較的容易に得ることが可能で
あり、これら両性能の複合効果として自己充填性が向上することを示した。

ここでは、現状の製造・管理体制における使用材料の品質変動として特に変動しやすく
変動幅も大きいと考えられる細骨材の表面水および粒度の変動に着目して、本分離低減剤
を添加することによって付与される、これらの変動に対する良好な自己充填性を確保する
充填可能範囲の向上効果についての検証を行った。

3.3.1 検討配合および使用材料

検討配合は、結合材の種類と本分離低減剤の使用の有無を要因とした表-3.3.1に示す2ケ
ース（以下、基本配合と称する）である。

表に示す基本配合は、各ケースともに後述の第5章において提案した充填性評価試験に
よって選定したものであり、超流動コンクリートとして良好な充填性を付与した配合であ
る。また、ここでは本分離低減剤を添加することによる充填可能範囲の向上効果を評価す
ることを目的とすることから、比較対象であるCASE-2は、分離低減剤を使用したCASE-1
の配合を基本として、材料分離をしない状態で充填高さが最大となるように高性能減水剤
の添加量を調整することにより選定したものである。

使用材料の品質は表-3.3.2に示すように、結合材には3成分系結合材を使用し、粗骨材は
最大寸法20mmの砕石を使用したものであり、本研究で取り扱う超流動コンクリートの適
用範囲における標準的な配合と言える。また、基本配合に使用する細骨材は粗粒度2.77の
ものであり、JIS規格を満足する標準的な粒度の細骨材である。なお、使用した高性能減
水剤はナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物系である。

3.3.2 評価方法

使用材料の品質変動として着目した変動要因は、細骨材の表面水および細骨材の粒度の
2項目であり、これらに対して以下のパラメータを設定し、基本配合の自己充填性の違い
と良好な自己充填性が確保される限界の品質変動の範囲を評価した。

細骨材の表面水の変動については、表面水を調整した細骨材を使用するのではなく、基
本配合の単位水量に対して、外割りで $\pm 15\text{kg/m}^3$ の範囲で投入水量を加減させる方法とし

た。これは、一般の製造プラントにおける細骨材表面水率の日変動が概ね $\pm 2\%$ 程度の範囲であることを考慮し、その細骨材表面水の変動に対して、そのまま計量、混練された場合を想定したものである。

細骨材粒度の変動については、「土木学会コンクリート標準示方書（施工編）」に示された標準的な粒度の範囲における上限値と下限値を考慮し、基本配合に使用する粗粒率2.77の細骨材をフルイ分けによって粒度調整し、粗粒率1.89から3.26とした細骨材について評価した。

3.3.3 評価結果

(1) 表面水変動に対する充填可能範囲の向上効果

各基本配合に対して投入水量を変化させた場合のスランブフローと空気量および充填高さを表-3.3.3に示す。また、スランブフローと投入水量の関係を図-3.3.1に示し、充填高さとの関係を図-3.3.2に示す。

図-3.3.1において、本分離低減剤を添加したCASE-1は、無添加のCASE-2と比較して基本配合（投入水量 $=0\text{kg/m}^3$ ）におけるスランブフローが大きく、投入水量の変動に対して全体的にスランブフローが大きく、変形性の向上が認められる。

また、図-3.3.2を見ると、本分離低減剤を添加したCASE-1は、無添加のCASE-2と比較して基本配合における充填高さが大きく、その自己充填性の向上にともない全体的に充填性が向上することによって、投入水量の変動に対して広い充填可能範囲を確保することが可能となるのが分かる。

(2) 骨材粒度の変動に対する充填可能範囲の付与効果

細骨材の粗粒率を変化させた場合のスランブフローと空気量および充填高さを表-3.3.4に示す。また、スランブフローと粗粒率の関係を図-3.3.3に示し、充填高さとの関係を図-3.3.4に示す。

図-3.3.4を見ると、分離低減剤を使用しないCASE-2において、粒度の変動に対する充填可能範囲は粗粒率2.5程度以上の範囲であり、粗粒率が小さくなるような品質変動に対しては特に自己充填性が大きく低下する傾向が認められる。これに対して、分離低減剤を添加したCASE-1は、図-3.3.3に示すように、この粗粒率の範囲においてスランブフローの変化は少なく全体的に高変形性を確保しており、標準的な粗粒率の下限から上限までの範囲においては全体にわたって良好な自己充填性が確保されているのが分かる。

以上のように、本分離低減剤の添加と高性能減水剤の併用により高分離抵抗性と高変形性を付与し基材の自己充填性を高めることによって、使用材料の品質変動の中でも特に変動しやすいと考えられる細骨材の表面水や粒度の変動に対して、良好な自己充填性を確保

する充填可能範囲を向上させることが可能であることが検証された。

表-3.3.1 適用範囲向上の検討における基本配合

配合 No.	水結合 材比 W/P (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤	
			水 W	結合材 P			細骨材 S	粗骨材 G	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
				C	B	F				
CASE-1	33	45	165	200	200	100	705	911	2.1	0.6
CASE-2									1.25	0

表-3.3.2 使用材料の品質

種別			比重	比表面積 (cm ² /g)	粗粒率
結合材 P	C	普通ポルトランドセメント	3.16	3280	-
	B	高炉スラグ微粉末	2.90	4270	-
	F	フライアッシュ	2.24	3150	-
細骨材 S	相模川-木更津 混合砂		2.55	-	3.26
					3.06
					2.77 (基本)
					2.47
					1.89
粗骨材 G	八王子砕石 (Gmax=20mm)		2.68	-	6.46

表-3.3.3 表面水の変動における試験結果

配合No.	単位量(kg/m ³)		評価試験結果		
	基本水量	投入水調整量 δ	空気量 (%)	スランブフロー (cm)	充填高さ (mm)
CASE-1	165	+12.5	6.6	69.0	270
		+10.0	5.5	70.0	315
		+5.0	5.1	68.5	360
		0	4.2	66.0	360
		-5.0	3.8	64.0	335
		-10.0	3.5	56.3	315
		-15.0	3.5	49.0	190
CASE-2	165	+12.5	6.2	68.5	190
		+10.0	5.2	67.0	220
		+5.0	4.7	66.5	320
		0	4.4	60.0	310
		-5.0	4.1	53.5	295
		-10.0	3.5	43.5	200
		-15.0	3.3	37.0	180

表-3.3.4 粒度の変動における評価結果

配合No.	粗粒率調整量		評価試験結果		
	基本粗粒率	粗粒率調整量	空気量 (%)	スランブフロー (cm)	充填高さ (mm)
CASE-1	2.77	3.26	6.4	66.5	325
		3.06	4.7	68.0	325
		基本粗粒率	4.2	66.0	360
		2.47	4.8	68.5	360
		1.89	4.3	59.0	365
CASE-2	2.77	3.26	4.1	64.3	310
		3.06	4.3	60.0	310
		基本粗粒率	4.4	59.8	310
		2.47	4.0	50.5	305
		1.89	4.7	21.5	200

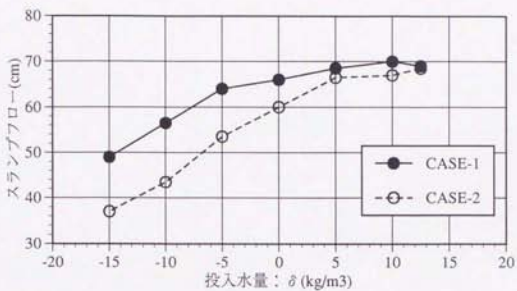


図-3.3.1 表面水の変動とスランプフローの関係

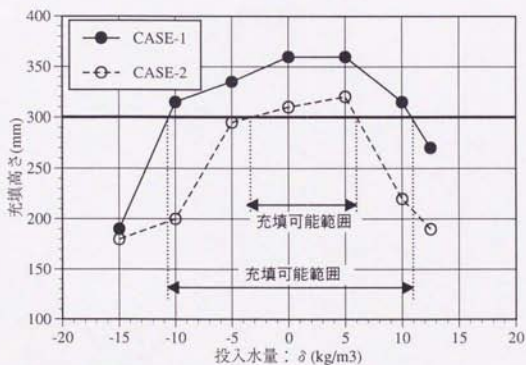


図-3.3.2 表面水の変動と充填高さの関係

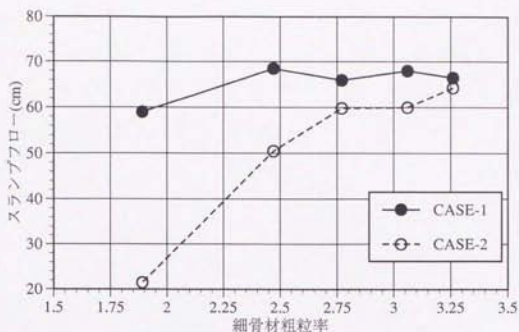


図-3.3.3 粒度の変動とスランプフローの関係

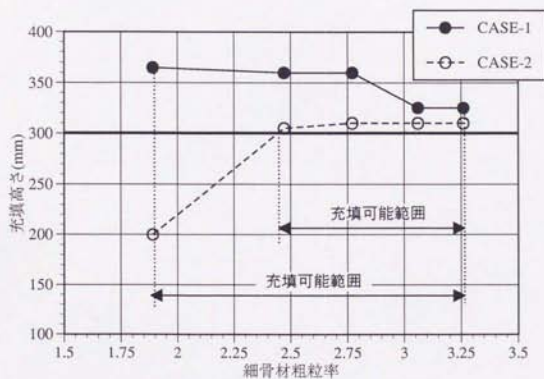


図-3.3.4 粒度の変動と充填高さの関係

3.4 まとめ

本章では、本研究で取り扱う超流動コンクリートの適用範囲において、本分離低減剤を添加した場合の超流動コンクリートへの作用効果について検証を行った。

その結果、第2章に示した本分離低減剤の膨潤と吸水によるコンクリートの高分離抵抗性の付与を主体とする作用機構と高性能減水剤の変形性付与効果が効率的に得られる性質によって、コンクリートの分離抵抗性と変形性の両性能を高めることが可能であり、これら両性能の複合効果として、基材の自己充填性を高めることを比較的容易に実現することが可能であることを明らかにした。

さらに、この自己充填性の向上効果によって基材の充填性が全体的に高まり、その結果として、使用材料の品質変動に対して良好な自己充填性を確保することが可能な変動幅の限界が広がり、現状の製造・管理体制における使用材料の品質変動に対して充填可能範囲の大きな超流動コンクリートとすることが可能であることが明らかとなった。

第4章 硬化後のコンクリートの品質

4.1 はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が大きな問題となっているが、これらの事例を見ると、部材全体の劣化が一様に進行していることは希であり、その殆どが部材の局部的な欠陥や弱点を起点として生じ、徐々に全体を蝕み、最終的に構造物全体の耐久性の低下に至っている場合が殆どである。

これら局部的な脆弱部の生じる要因は、コンクリートが比重の異なる材料を組み合わせた複合材料であることから本質的に材料分離を生じ易いこともさることながら、人為的な技能の良否に左右される施工面でのバラツキによるところが多くあり、コンクリート構造物全体としての高耐久性を実現させるためには、高品質で高耐久性を有するコンクリートを使用し、如何に均等質な部材を構築するかが重要な課題となる。

超流動コンクリートの特長は、このような人為的な技能の良否が如実に左右する締固め作業を排除した点にあり、超流動コンクリートを適用することによって部材全体としての均質性が極めて向上することは容易に予想されるところである。

なお、本研究で取り扱う超流動コンクリートは、その適用範囲において、普通ポルトランドセメント以外に高炉スラグおよびフライアッシュの水和反応の遅い結合材の混合比率が比較的大きい3成分系結合材を使用し、かつ、単位結合材量が 500kg/m^3 程度と比較的多量であること、そして、前章までに示したグルコース系多糖類を主成分とする新しい分離低減剤を使用する点において、一般に使用されるコンクリートとは異なる配合上の特殊性を有している。

本章では、本超流動コンクリートを打ち込んだ部材の硬化後の品質において、締固めを排除することによって付与される部材全体にわたっての均質性を実構造物レベルで確認した実証試験についてまとめ、さらに、本超流動コンクリートの配合上の特殊性から予想される硬化後の品質と耐久性に及ぼす影響についての確認試験について述べることにする。

4.2 充填後の硬化コンクリートの均質性

4.2.1 高さ方向の均質性

一般に、壁や柱のように鉛直高さの大きい部材は、コンクリートの自重による圧密作用および圧密にともなうブリージングなどの材料分離の影響により、高さ方向において強度特性をはじめとする品質のパラツキを生じやすく、上層部の品質は下層部に比べて低下する傾向にある。

「土木学会コンクリート標準示方書（施工編）」では、コンクリートの打ち込みにおいて、吐出口から打ち込み面までの自由落下高さの制限や締固めが確実になされるように1区画内の打ち込み高さや1回当りの打上がり速度の推奨値を示し、締固めの方法などについても詳述しているが、これらの考慮はいずれも材料分離をいかに低減し部材の均質性を確保するかを念頭においたものと言える。

水セメント比50～60%の通常のコンクリートあるいは流動化コンクリートにおいて行われた既往の研究においても、上下層部における水セメント比の品質差として最大14%の差を生じること[4.1]、あるいは、圧縮強度の差として20～40%を生じ[4.2][4.3][4.4][4.5][4.6]、特に、水平鉄筋の付着強度における上部と下部の差は顕著であり、平均的に上部の付着強度は下部の1/3程度にまで低下することが指摘されている[4.5][4.6][4.7]。また、水セメント比30～40%の範囲の高強度コンクリートの場合には上下層での差は小さくなる傾向にあるが、なお、平均的には10～20%の差が生じる傾向にある[4.4][4.8]。

総括的には、これらの品質は上層にいくにともなって徐々に低下していくが、特に、高さの1/3程度あるいは天端より50cm～1mの上層部で急激な低下を生じる傾向にあると言える。なお、これらは基本的には良好な施工管理と入念な締固めを施した部材を対象とした評価と言え、実際の構造物においては、締固めの良否の要因が大きく影響することにより上下層部の品質差はさらに大きくなっているものと考えられる。

超流動コンクリートにおいては、締固め作業を排除し、かつ、材料自体の有する高材料分離抵抗性により、部材全体としての均等性を確実に実現することが可能である。

ここでは、ほぼ実施工と同等の条件で打設した大型壁状部材を対象に行った、本超流動コンクリートの有する高分離抵抗性と締固め作業を排除することによって付与される高さ方向の均質性についての検証結果について述べる。

(1) 試験体概要

大型壁状部材の形状および配筋条件は表-4.2.1および写真-4.2.1に示すとおりであり、各部材ともに高さ4m×幅3mを共通として、壁厚さと配筋条件を変えた4ケースである。

本超流動コンクリートの配合および使用材料の品質を表-4.2.2、表-4.2.3に示す。また、打ち込み時のフレッシュコンクリートの品質は表-4.2.4に示すとおりである。

コンクリートの打設は写真-4.2.2に示すようにブーム付きコンクリートポンプ車により行い、各部材いずれも打上り速度14m/時間を一定として連続的に打上げた。

吐出口から打込み面までの自由落下高さは、「土木学会コンクリート標準示方書（施工編）」に準拠して原則として1.5mとしたが、壁厚さ20cmのCASE-1は小壁厚さのためブームを挿入できないことから、部材の天端からそのまま打ち込んだ。したがって、CASE-1のみ自由落下高さは4mである。

各部材はいずれも、コンクリート打設後2日間の散水養生を行い、材令3日で脱型し、以後屋外に放置した。

(2) 硬化後の均質性の評価

CASE-1からCASE-4の各部材において、材令28日時点における高さ方向の圧縮強度分布および水平鉄筋の付着強度分布を調査することにより、硬化後の均質性の評価を行った。

また、CASE-4部材については、さらに材令1年まで暴露を継続し、1年経過時点で再度高さ方向の圧縮強度分布を調査するとともに、中性化深さ、および、気泡間隔係数や細孔径分布などの細孔組織を調査した。

暴露材令28日時点において、図-4.2.1に示す高さ位置から水平方向に全壁厚さ $\phi 10$ cmのコアを採取し、そのコア試料について圧縮強度試験を行った。なお、採取コアは $\phi 10 \times 20$ cm程度の試験体に成形して行ったものであり、したがって、壁厚さが40cmのCASE-2およびCASE-3部材は各高さ位置で2本ずつ、壁厚さが60cmのCASE-4部材はそれぞれ3本の強度試験を行なうこととした。

また、高さ方向の鉄筋付着強度は、コアの採取と同じ高さ位置で水平方向に配したSD30-D19mm異形棒鋼について写真-4.2.3に示す引き抜き試験により行った。本試験方法は、「日本コンクリート工学協会の試験方法（案）」に準拠したものであり、自由端すべり量が0.05mm、0.10mm、0.25mmにおける平均付着応力度を評価する方法である。

さらに、CASE-4部材については暴露材令1年経過時点で、図-4.2.1に示すように材令28日時点での調査と同じ高さ位置でコアを採取し、 $\phi 10 \times 20$ cmの3本の試験体に成形し強度試験を行った。また、強度試験後、壁の両側面にあたる2本のコアの割製面においてフェノールフタレイン変色法により中性化深さの測定を行ない、中央部1本については、ASTM C 457の修正ポイントカウント法に準拠した空気量・比表面積・気泡間隔係数の測定、および、水銀圧入法による細孔径分布測定を行った。

表-4.2.1 壁部材の形状および配筋条件

部材種別	形状寸法 (mm)			配筋(mm):2段配筋	
	幅	高さ	壁厚さ	縦筋	横筋
CASE-1	3,000	4,000	200	D13ctc200	D13ctc200
CASE-2			400	D16ctc150	D16ctc150
CASE-3				D16ctc100	D16ctc100
CASE-4			600	D22ctc200	D22ctc200

表-4.2.2 超流動コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		
			水 W	結合材 P	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 (P×%)	高性能 減水剤 (P×%)	分離 低減剤 (W×%)
20	36	46	180	500	724	882	0.15	1.4	0.83

表-4.2.3 使用材料の品質

種類	区分	品質
結合材	フライアッシュ混入 低発熱型高炉セメントB種 (混合比:C:B:F=34:46:20)	比重=C:3.16、B:2.90、F:2.30 ブレン値=3640cm ² /g
細骨材	相模川・君津混合砂	比重=2.77、粗粒率=2.77
粗骨材	八戸産砕石	比重=2.70、粗粒率=6.58
AE減水剤	リゲニンスルホン酸化合物 ポリオール複合体	-
高性能減水剤	ナフタレンスルホン酸 ホルマリン高縮合物	-

表-4.2.4 フレッシュコンクリートの品質

部材種別	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	打込み温度 (℃)	単位容積重量 (kg/m ³)
CASE-1	67.5	3.9	27.5	2303
CASE-2	66	3.2	28.0	2316
CASE-3	69.5	3.9	28.0	2287
CASE-4	68.5	4.3	28.0	2289



CASE-1 (壁厚さ20cm、D13ctc200mm)



CASE-2 (壁厚さ40cm、D16ctc150mm)



CASE-3 (壁厚さ40cm、D16ctc100mm)



CASE-2 (壁厚さ60cm、D22ctc200mm)

写真-4.2.1 各部材の配筋状況



写真-4.2.2 ブーム付きコンクリートポンプ車による打設状況



写真-4.2.3 水平鉄筋引き抜き試験要領

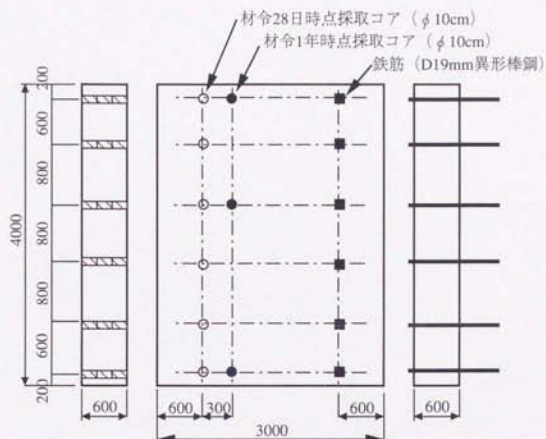


図-4.2.1 コア採取位置および水平鉄筋配置位置

(3) 高さ方向の強度試験結果および考察

図-4.2.2から図-4.2.5に、コア強度および比重の高さ方向の分布を各部材ごとに示す。材令28日時点において、いずれの部材も上下方向での強度および比重の標準偏差は小さく、その変動幅は強度において最大でも5%程度であり、比重については2%以下である。

先にも述べたように、通常のコンクリートにおいては圧縮強度の上下層部での強度差は20~40%となり変動幅として10%以上となるのに対して、本超流動コンクリートの場合には品質差が極めて小さいことが分かる。

図-4.2.2において、自由落下高さを4mとしたCASE-1は、高さ1m以下の下層部に僅かながらバラツキがあり自由落下高さが大きいことによる影響とも考えられるが、その絶対量自体小さく、基本的にはこの程度の自由落下高さの範囲であれば、均質性は確保されているものと考えられる。

図-4.2.3および図-4.2.4において、CASE-3は一般的な壁部材の配筋条件と言えるCASE-2と比べて高密度な配筋条件と言えるが、両者の標準偏差は同等であり、壁部材として、この程度の配筋量の範囲であれば、十分に均質性を確保した締固め不要打設がおこなえるものと言える。

図-4.2.5において、壁厚さ60cmのCASE-4は、他の部材と比べて強度のバラツキが大きいようであるが、その変動幅自体5%以下であり均質性において問題となるバラツキとは考えられない。また、材令1年経過時点での強度は平均で 612kgf/cm^2 であり材令28日での 466kgf/cm^2 から良好な長期強度発現性を有していることが分かる。

図-4.2.6は材令28日経過時点での全部材のコア強度と比重をまとめたものである。コア強度の平均は 464kgf/cm^2 で標準偏差は 19kgf/cm^2 であり、部材の形状や打ち込み方法による差はなく、十分に均質性が確保されていることが分かる。

また、同図には本部材の打ち込みの際に採取した標準養生供試体の材令28日における平均圧縮強度も併記する。標準養生供試体の強度は 460kgf/cm^2 （標準偏差 12.9kgf/cm^2 、サンプル数18本）であり、部材に打ち込まれた超流動コンクリートは、理想的な管理と養生がなされた状態と言える標準養生供試体と同等な強度ならびに均質性が確保されていることが分かる。

図4.2.7は、材令28日経過時点での全部材のコア強度について、同じ高さ位置ごとの平均値に対する全コアの平均値（ 464kgf/cm^2 ）との比をプロットし、 $W/C=50\sim60\%$ の通常コンクリートや流動化コンクリートあるいは $W/C=34\%$ の高強度コンクリートに関する既往の文献とを比較したものである。なお、これらの文献は各種コンクリートに関する平均的な情報と言え、また、無筋あるいは20~30cm間隔の一般的な配筋条件の部材を良好な締固めを行い打設したと判断されたデータである。

通常コンクリートおよび流動化コンクリートの場合には、上層に行くにともない1.2~

0.8の範囲で、ほぼ線型的に強度が低下して行く傾向にある。

高強度コンクリートの場合には、通常コンクリートや流動化コンクリートと比べて強度差は小さく、低水セメント比によりブリージングが少ない材料面での効果が認められるが、通常コンクリートや流動化コンクリートような上層へ向けての線型的な低下は認められず、締固め状態の違いが推察されるところである。

これらに対して、本超流動コンクリートの場合には、強度差は0.03～0.05と僅かであり、締固めの排除と高分離抵抗性を有する材料面での効果により、十分な均質性が付与されているのが分かる。

以上のように、超流動コンクリートは、締固めの排除とその高分離抵抗性と言う材料面での特性も加わり、予測したとおり、理想的な管理と養生がなされた状態と言える標準養生供試体と同等の品質を有し、かつ、部材全体にわたり良好な均質性を確保された状態にあることが実証された。

なお、本超流動コンクリートは、縦横100mm間隔の一般的な壁部材の2倍程度の密度を有する配筋条件の範囲であれば十分に均質性が確保され、さらに、自由落下高さとして4mまでの範囲であれば高所打ち込みによる材料分離の影響は殆ど無く、高さ方向の均質性を確保できることが明らかとなった。

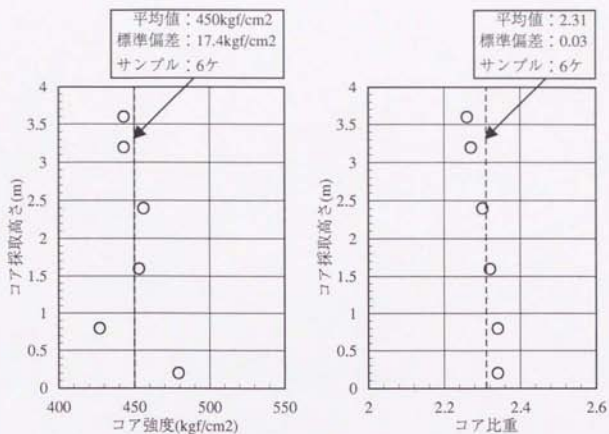


図-4.2.2 CASE-1 (壁厚20cm,D13ctc200)高さ方向強度・比重分布

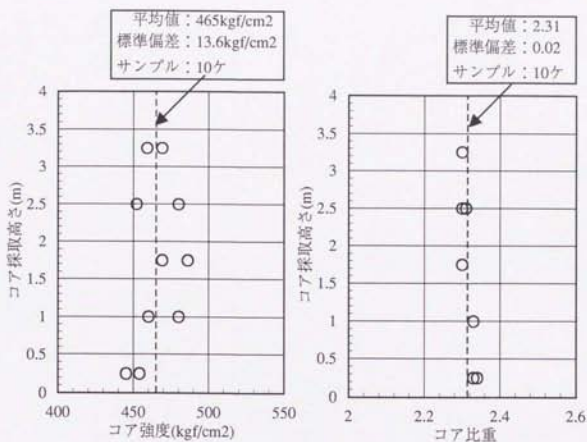


図-4.2.3 CASE-2 (壁厚さ40cm,D16ctc150)高さ方向強度・比重分布

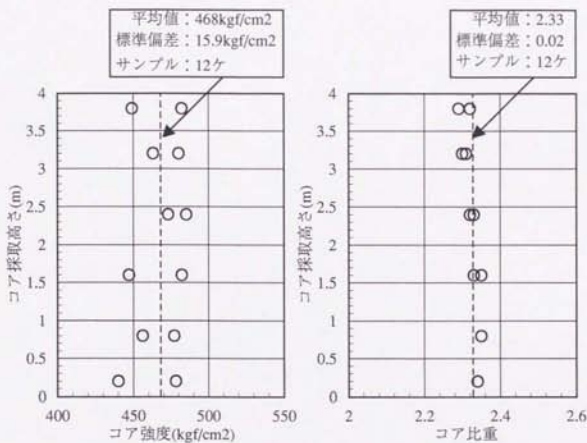


図-4.2.4 CASE-3 (壁厚さ40cm,D16ctc100)高さ方向強度・比重分布

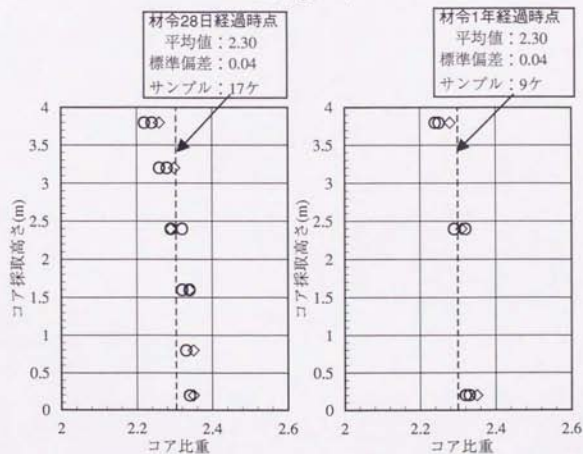
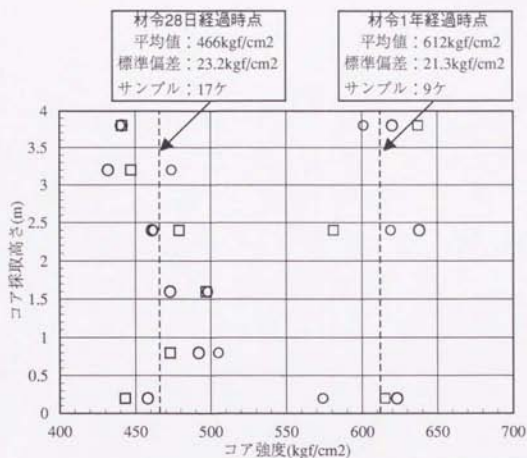


図-4.2.5 CASE-4 (壁厚さ60cm,D22ctc200)高さ方向強度・比重分布

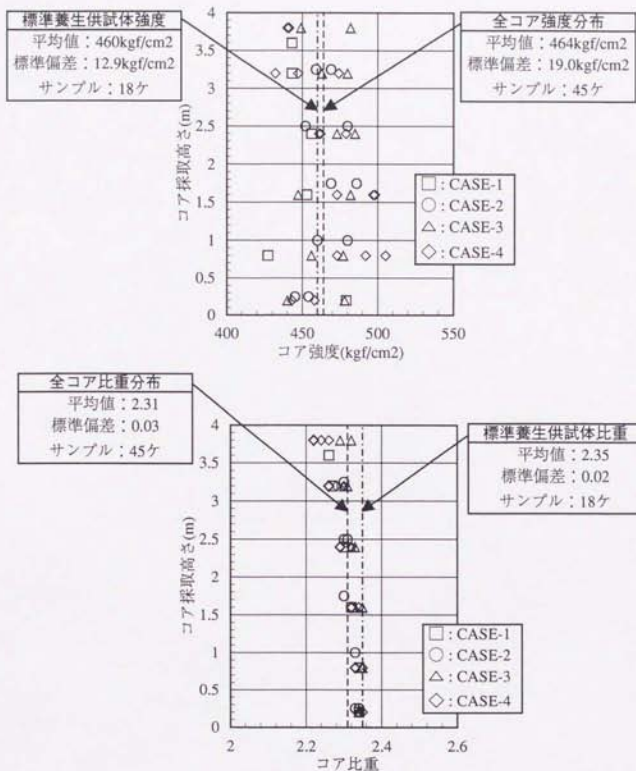


図-4.2.6 全コア高さ方向強度・比重分布

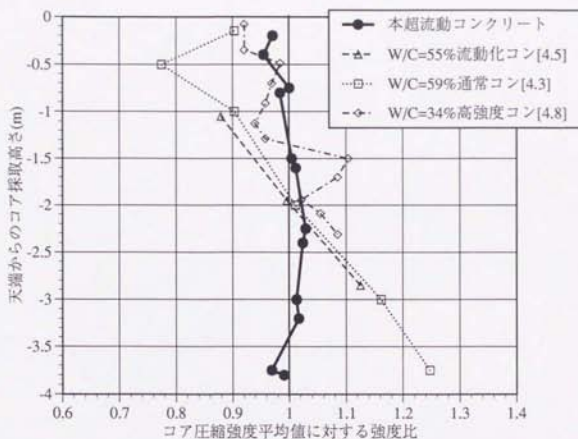


図-4.2.7 コア圧縮強度平均値に対する各高さ位置の強度比に関する既往の文献との比較

(4) 水平鉄筋の付着強度試験結果および考察

図-4.2.8から図-4.2.10に、0.05mm→0.10mm→0.25mmの各自由端すべり量時点における水平鉄筋の付着強度および付着強度/コア強度比の高さ方向分布を示す。

自由端すべり量0.05mm時の平均付着強度は145kgf/cm²であり標準偏差15.8kgf/cm²、自由端すべり量0.10mm時の平均付着強度は169kgf/cm²であり標準偏差12.9kgf/cm²、自由端すべり量0.25mm時の平均付着強度は192kgf/cm²であり標準偏差は9.3kgf/cm²であった。

先にも述べたように、通常のコンクリートの場合には上層部は下層部の1/3程度にまで低下し、その変動幅は20～30%であるのに対して、本超流動コンクリートの場合には強度低下およびバラツキが極めて小さいことが分かる。

また、付着強度とコア圧縮強度との比は、0.05mm時において0.31（標準偏差0.040）、0.10mm時において0.37（標準偏差0.033）、0.25mm時において0.42（標準偏差0.022）であり、通常のコンクリートにおける水平鉄筋の付着強度比が0.1～0.2程度^{[4.5][4.7]}であるのに比べてはるかに大きく、鉛直鉄筋における強度比^{[4.7][4.9]}と同等以上の値と言える。

図-4.2.11は、自由端すべり量0.25mm時を最大付着強度と仮定して、全部材の付着強度について同じ高さ位置ごとの平均値に対する全強度の平均値（192kgf/cm²）との比をプロットし、W/C=50～60%程度の通常コンクリートや流動化コンクリートに関する既往の文献とを比較したものである。なお、これらの文献は各種コンクリートに関する平均的な情報と言え、また、良好な締固めを行い打設したと判断されたデータである。

図-4.2.11より、通常のコンクリートにおける付着強度の品質差は、1.3～0.4と広範囲にわたり、また、上層部は下層部の1/3程度まで低下するが、この低下は、特に上層部の50cm～1mの高さ位置で急激に生じる傾向にあるのが分かる。

これに対して、本超流動コンクリートを打設した部材の付着強度は、強度比の差として±0.1以下の範囲であり、通常のコンクリートの場合に比べて極めて小さく、部材全体にわたり均等な品質を確保しているのが分かる。全体的には上層になるにともない徐々に付着強度が小さくなる傾向にあるが、これは、圧密作用による圧縮強度の違いによるものと言える。

いずれにせよ、局所的な付着強度の低下は無く、締固めの排除と本超流動コンクリートの高分離抵抗性によってブリージングを生じないことによる多大な改善効果が認められる。

以上のように、超流動コンクリートは、締固めの排除とその高分離抵抗性と言う材料面での特性によって、予測したとおり、部材全体にわたり均質で良好な鉄筋付着性能を確保していることが実証された。

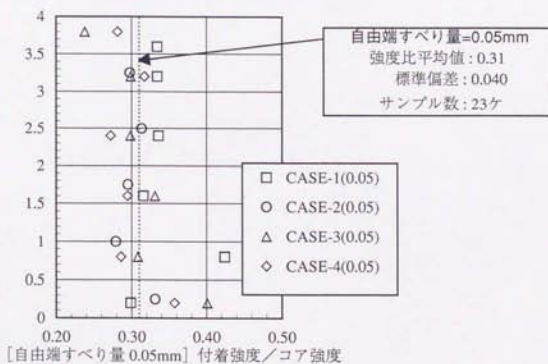
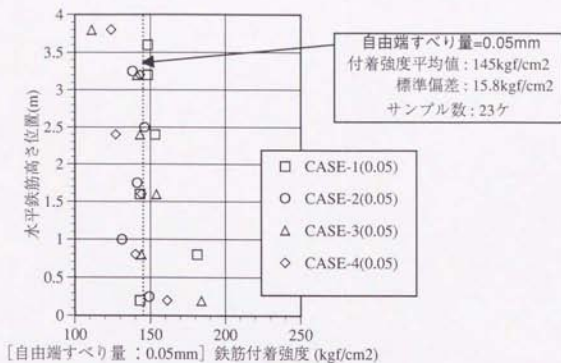


図-4.2.8 自由端すべり量 0.05mm 高さ方向鉄筋付着強度分布

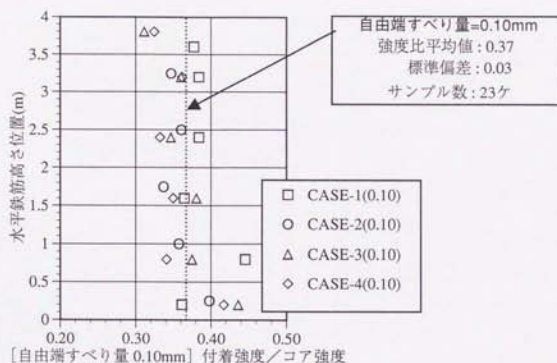
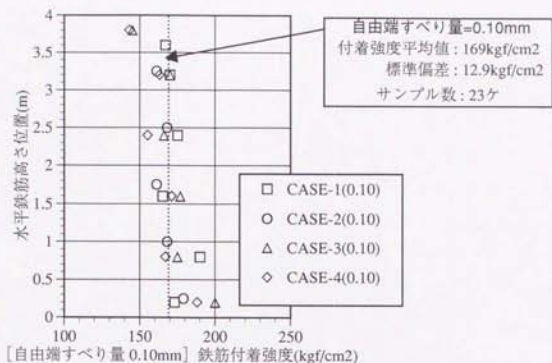


図-4.2.9 自由端すべり量 0.10mm 高さ方向鉄筋付着強度分布

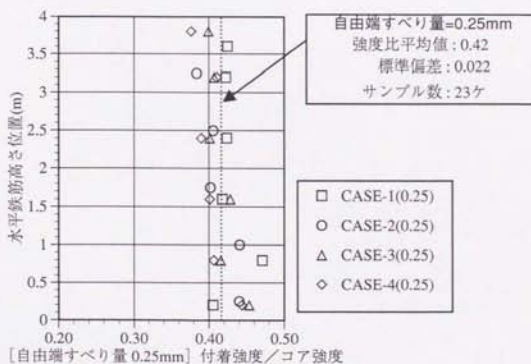
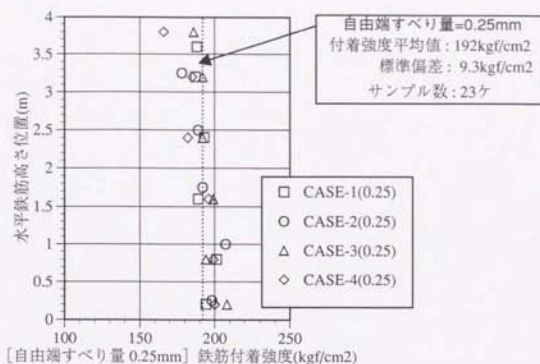


図-4.2.10 自由端すべり量 0.25mm 高さ方向鉄筋付着強度分布

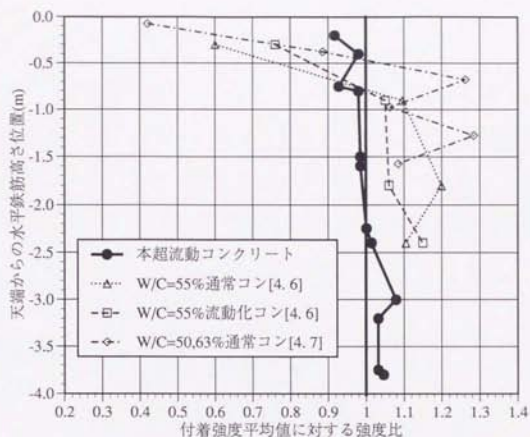


図-4.2.11 付着強度平均値に対する各高さ位置の強度比
に関する既往の文献との比較

(5) 材令1年暴露後の品質に関する評価結果および考察

CASE-4部材において行った材令1年経過時点での気泡間隔係数および細孔径分布の測定結果を表-4.2.5および図-4.2.12に示す。なお、同図には既往の文献^[4,10]に示された試験室レベルにおけるW/C=40%のAEコンクリートおよびW/C=25%のnonAEコンクリートのデータを併記する。

表-4.2.5における平均細孔径および全細孔量、あるいは、図-4.2.12に示す細孔径分布を見ると、これらは、部材の下方向に行くにともなって小さくなる傾向にあるのが分かる。これは、打設後のコンクリート自重による圧密作用により部材の下部ほどペーストの細孔が押し潰されたためと考えられる。

表-4.2.5において、換算空気量は部材の下方向に行くにともない減少しており、先と同様に圧密による影響が認められる。下部(0.2m)の空気量は上部(3.8m)に比べて半減しているが、両者の高低差分のコンクリート自重は 0.8kgf/cm^2 強であり、圧力として概ね1気圧程度の増分に相当することからも空気量の体積が半分程度となる現象は妥当な結果である。

これに対して、気泡間隔係数の値は $185\mu\text{m}\sim 258\mu\text{m}$ の範囲で部材の上下方向での相関は特に認められず、また、空気量が少ないほど気泡間隔係数は大きくなる通常の傾向とは逆に、下部において気泡間隔係数が最小値となっている。この理由としては、下部においては空気が細分化し個々の気泡径が小さい状態で分布している可能性が考えられる。

いずれにせよ、気泡間隔係数が $185\mu\text{m}\sim 258\mu\text{m}$ の範囲であることから、耐凍結融解性は確保されるものと考えられる。

一般的に、細孔径として $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度のものが骨材とペーストとの界面空隙とされているが^{[4,10][4,11]}、図-4.2.12において本超流動コンクリートにおける細孔径分布は、その大部分が $0.1\mu\text{m}$ 以下の細孔であり、本超流動コンクリートの高緻密性と骨材あるいは鋼材界面と密実に付着しているものと言える。また、W/C=40%あるいは25%のコンクリートと比較すると、全体的にはW/C=25%に近い分布を有しており、良好な管理の下で製作されたと考えられるコンクリートと同等以上の緻密な細孔構造のものが、実構造物レベルにおいて達成されているものと考えられる。

なお、中性化深さについては各高さ位置において、いずれも1mm以下であった。これは、暴露環境が穏やかな都市部であること、および、実環境暴露期間が1年と比較的短期における評価であることにもよるが、全述の細孔量に示すように基本的に本超流動コンクリートが緻密であることによるものと考えられる。

表-4.2.5 気泡組織測定結果

採取高さ (m)	硬化コンクリートの気泡組織			細孔径分布	
	空気量(%)	比表面積 (mm ² /mm ³)	気泡間隔係数 (μ m)	平均細孔径 (μ m)	全細孔量 (ml/g)
3.8	5.9	24.69	204	0.0211	0.0750
2.4	4.5	22.11	258	0.0143	0.0638
0.2	2.5	40.42	185	0.0124	0.0574

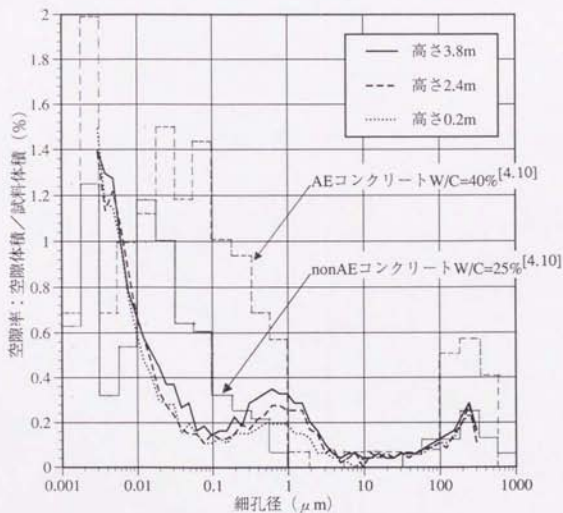


図-4.2.12 高さ方向での細孔径分布

4.2.2 水平流動後の均質性

「土木学会コンクリート標準示方書（施工編）」では、内部振動機を用いてコンクリートを横移動させることを禁止し、打ち込み部の近くにコンクリートを下ろし、内部振動機の挿入間隔は50cm以下とすること等、打ち込みの際にコンクリートの横移動を最小限にするように配慮することを明記しているが、これも先の高さ方向での打ち込みと同様に、材料分離に対する配慮にはかならない。

超流動コンクリートにおいては、締固めを行わずに充填すると言うその機能上、水平方向に比較的長距離の流動が生じることになり、この場合に、長距離流動後の品質の変化あるいは均質性を確保し得る流動距離を把握する必要がある。

ここでは、本超流動コンクリートの長距離流動後の圧縮強度、比重および空隙組織の均質性について実構造物レベルで行った検証試験について述べることにする。なお、本試験は建築建屋における厚さ3m程の比較的マッシュなスラブを対象としており、配筋条件はさほど厳しい条件ではない。

(1) 試験体概要

本構造物の形状は図-4.2.13に示すとおりであり、ここでの評価は図に示す直径約8mの円柱形の比較的マスコンクリートのスラブを対象に行った。また、本スラブは下層と外周部に異形棒鋼D16ct200mmで格子状の配筋が施されている。

超流動コンクリートの配合および使用材料は、先の4.2.1項に示す表-4.2.2および表-4.2.3と同一である。

コンクリートの打設は写真-4.2.4に示すように、ブーム付きコンクリートポンプ車により、スラブの1ヶ所に吐出口を固定して打設し、そのまま周方向に流動させることとした。

また、スラブは高さ1.85mの第1リフトおよび高さ1.0mの第2リフトの2層に分けて打設したもので、各リフト打込み時のフレッシュコンクリートの品質は表-4.2.6に示すとおりである。表-4.2.6を見ると分かるように空気量は3%弱と少ないが、これは、本構造物が重量コンクリートでもあり、AE補助剤による空気量調整を行わなかったことによる。

(2) 流動後の均質性の評価

第2リフト打設後42日（第1リフト打設後49日）経過時点において、図-4.2.13に示すスラブ周方向の各位置から鉛直に $\phi 10\text{cm}$ のコアを採取し、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ に成形した供試体の圧縮強度および比重を測定した。さらに、第2リフト中央部のコアにおいてはASTM C 457に準拠した修正ポイントカウント法により気泡間隔係数を測定した。

(3) 流動後の均質性

図-4.2.14および図-4.2.15に、各採取位置でのコア強度およびコア比重の平均値を示す。

また、図-4.2.16には第2リフトにおける各採取コアの深さ位置として中央部において行った気泡組織測定結果と流動距離との関係を示す。

図-4.2.14において、第1リフトを見ると打ち込み位置での強度は最大値であり流動により僅かに低下が認められるが、第2リフトにおいては流動距離と強度との相関は認められない。第1リフトにおいて流動による低下が生じた理由としては、流動の際に、下層に配した格子状の配筋によってコンクリートがふるわれたためと考えられる。しかしながら、流動方向での圧縮強度の標準偏差は小さく、その変動量自体が3%程度であることから、十分に均質性が確保されているものと言える。同様に、図-4.2.15において、コア比重の変動は1%以下であり、約13mの流動後も十分に均質性が確保されていると言える。

図-4.2.16において、各流動位置での気泡間隔係数は $310\mu\text{m}$ から $250\mu\text{m}$ の範囲で分布しており、流動により気泡間隔係数が小さくなる傾向が認められる。なお、気泡間隔係数は平均で $280\mu\text{m}$ 程度と比較的大きいが、この理由は先にも述べたように、空気量調整を行わなかったことから、打ち込み時での空気量がそもそも小さいことによるものと言える。

平均細孔径および全細孔量は流動にともない大きくなり、微視的には流動にともない細孔径が大きくなる傾向が認められるが、この変化量自体が $0.01\sim 0.02\mu\text{m}$ と僅かな範囲であり、水平流動にともない耐久性を低下させるような巻き込みエアーが混入されることはなく、緻密性は十分に確保された状態にあると言える。

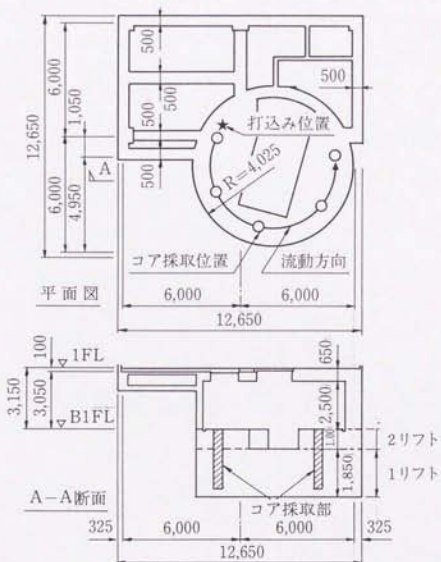


図-4.2.13 超流動コンクリート打設部材の形状
およびコア採取位置

表-4.2.6 フレッシュコンクリートの品質

適用リフト	種別	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	打ち込み温度 (℃)	単位容積重量 (t/m ³)
第1リフト	平均値	65.1	2.1	28.5	2.33
	標準偏差	3.6	0.4	1.0	0.01
	頻度	16	16	16	16
第2リフト	平均値	67.8	2.9	26.9	2.33
	標準偏差	2.5	1.1	1.5	0.03
	頻度	7	7	7	7

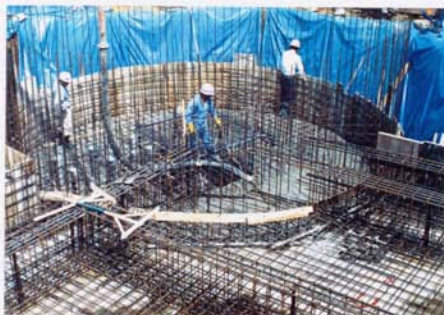


写真-4.2.4 ブーム付きコンクリートポンプ車による
固定ヶ所からの打設状況

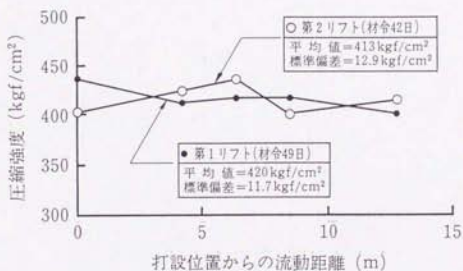


図-4.2.14 流動距離とコア強度の関係

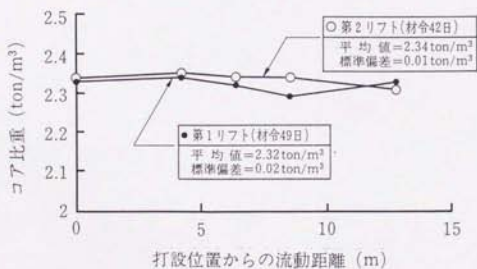


図-4.2.15 流動距離とコア比重の関係

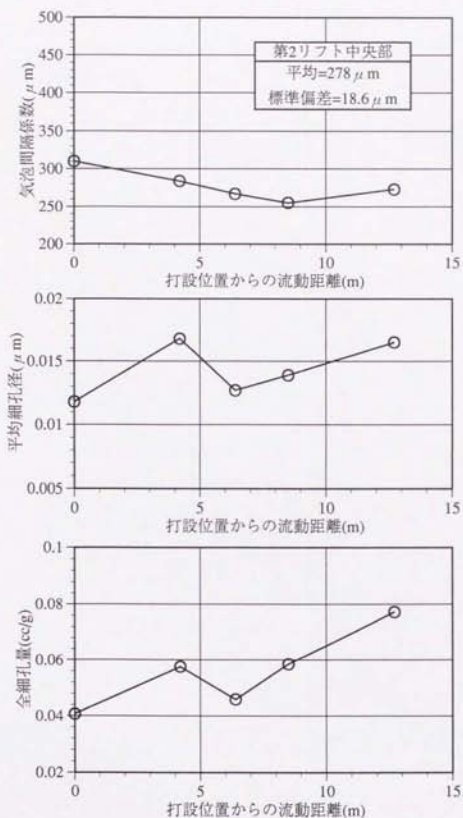


図-4.2.16 流動距離とコア気泡間隔係数・細孔径の関係
(第2リフト断面中央部)

4.2.3 充填後の均質性について

実構造物レベルで行った実証試験により、本超流動コンクリートを打ち込んだ部材は全体にわたって均質性を確保していることを確認し、予測どおりの結果を得た。また、実構造物のスラブへの打設試験によって、本コンクリートが均質性を確保し得る水平流動距離を明かとした。これらの実証試験によって得られた知見を整理し、以下に示す。

(1) 部材高さ4m、幅3mで厚さ20cmの壁状部材において、自由落下高さ4mの範囲まで、高所打ち込みによる部材高さ方向の均質性を損なうことは無い。

(2) 部材高さ4m、幅3mで厚さ40cmの壁状部材において、D16cc100mmの格子配筋が複段で配置された配筋条件では、部材高さ方向の均質性は十分に確保される。

(3) 都市部の環境において暴露期間28日時点での強度特性は、理想的な管理と養生がなされたと言える標準養生供試体の強度と同等であり、また、暴露材令1年まで順調な長期強度発現性を有する。

(4) 壁部材における水平鉄筋の付着強度は部材高さ4mにわたり同等であり、部材上層部での急激な低下はなく、付着強度は圧縮強度の40%程度と高い比率の状態で均質性を確保している。

(5) 都市部の環境において暴露期間1年時点において、部材高さ4mの全体にわたり、細孔径において $0.1\mu\text{m}$ 以上のものは少なく、良好な緻密性を有している。

(6) 都市部の環境において暴露期間1年時点において、中性化深さは1mm以下である。

(7) 比較的配筋量の少ない部材ではあるが、本超流動コンクリートは水平方向に13m程度の流動においても、圧縮強度および比重の差は小さく、また、細孔および気泡組織についての変状も僅かであり、この程度の流動距離の範囲では均質性を十分に確保できる。

4.3 室内試験による硬化後の品質の検証

先の4.2項における実構造物レベルでの検証試験によって、本超流動コンクリートを打設した部材は全体として十分に均質性を確保しており、理想的な養生条件と言える標準養生と同等の強度および緻密な細孔組織を確保した状態にあることを確認した。

また、屋外暴露期間1年ではあるが、順調な強度増進が認められ、中性化も殆ど生じていないことがわかった。

しかしながら、本超流動コンクリートは、その適用範囲において、一般のコンクリートとは異なる使用材料および配合上の特殊性を有していることから、硬化後の品質および耐久性に関して、これら配合上の特殊性から問題となると予想される要因について確認する必要がある。

ここでは、本超流動コンクリートの硬化後における基礎物性とその耐久性について、本研究で対象とする分離低減剤を添加した場合の影響、普通ポルトランドセメントとともに高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの比較的水和の遅い結合材を混合比として50%以上用いた3成分系結合材を使用することによる強度発現性と養生に関する配慮、および、単位結合材量として 500kg/m^3 程度を使用することからコンクリート中でペースト分の占める割合が多くなることによる発熱特性と力学的特性について行った室内試験の結果について述べることにする。

4.3.1 本分離低減剤の添加が硬化後の品質に及ぼす影響

(1) 凝結硬化特性への影響

従来の分離低減剤であるセルロース系およびアクリル系の水中不分離性混和剤は、その添加量の増加にともない凝結が遅延することが知られており[4.12][4.13][4.14]、特に、セルロース系の場合には凝結遅延が大きい傾向にある。これは、糖類の分子構造を有することから、遅延剤と同様にセメント表面に吸着することによって物理的に水との接触を阻害し C_3S の水和を抑制するためと考えられている[4.14]。

先の第2章にも述べたように、本分離低減剤はセメントへの吸着現象は認められないことから上記のような凝結遅延は生じないものと予想されるが、本分離低減剤も多糖類であること、および、膨潤・吸水作用が結合材の凝結に及ぼす影響を確認する必要がある。

そこで、表-4.3.1に示す本分離低減剤の添加量の異なる3種類の配合のモルタルについて、凝結硬化時間を測定し、本分離低減剤の添加による結合材の凝結硬化特性に及ぼす影響を調査した。なお、表に示す各配合において、超流動コンクリートとした場合の本分離低減剤の添加量は標準的にCASE-2に示す程度であることから、CASE-2において超流動コンクリートとなるよう高性能減水剤の添加量を選定し、CASE-1およびCASE-3の高性能減水剤の添加量はCASE-2と同じとした。

また、凝結硬化時間の測定は、ASTM C 403-77に準拠したブロッカー針貫入抵抗による硬化速度試験によるもので、500psiおよび4000psi到達時をそれぞれ凝結始発および凝結終結時間とした。

図-4.3.1に本分離低減剤の添加量と凝結始発、終結時間の関係を示す。図に示すように、本分離低減剤は添加量の増加にともない凝結硬化時間は僅かに早くなる傾向にある。

この理由は、本分離低減剤の吸水機構によるものと考えられ、添加量の増加にともないセメントペースト中からの吸水量も増加することで、基材の見掛けの水結合材比が小さくなり、一般に水結合材比が小さいほど凝結硬化時間が早くなる現象と同様の傾向を示したものと言える。

いずれにせよ、本分離低減剤を添加することによる凝結遅延の現象は認められず、また、凝結は僅かに早くなる傾向はあるが実用上問題となる変化量では無いと言える。

表-4.3.1 分離低減剤添加量とモルタル凝結時間の関係

配合 No.	水 W (kg/m ³)	結合材 P(kg/m ³)		細骨材 S (kg/m ³)	高性能減 水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
		普通ポルト ランドセメ ントC	フライアッ シュ F			
CASE-1	251	522	224	1093	1.6	1.43
CASE-2						0.72
CASE-3						0.36

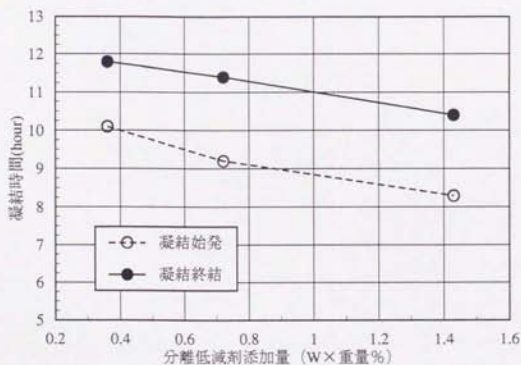


図-4.3.1 分離低減剤添加量と凝結時間の関係

(2) 各種強度発現性に及ぼす影響

表-4.3.2に示す本分離低減剤の添加の有無を要因とした配合について、圧縮強度、引張（割製）強度および弾性係数の経時変化を調査し、本分離低減剤の添加がコンクリートの各種強度発現性に及ぼす影響を評価した。ここで、両者のフレッシュコンクリートの性状は表-4.3.3に示すとおりであり、本分離低減剤を添加したA配合は超流動コンクリートとし、分離低減剤を添加しないB配合については、A配合を基本として、材料分離を生じないように高性能減水剤の添加量を減らした配合である。

各強度試験に用いた供試体の寸法は $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ であり、A配合は締固めを行わずに作製し、B配合についてはJIS A 1132に準拠し突き棒により突いて作製した。また、養生条件は標準養生である。

図-4.3.2、図-4.3.3および図-4.3.4は、それぞれ、材令1年までの圧縮強度、引張（割製）強度および弾性係数の強度発現性を示したものである。本分離低減剤を添加したA配合の強度発現性はB配合と比べて同等以上であり、本分離低減剤を添加することによる強度低下などの影響は認められない。また、圧縮強度および引張強度についてはB配合に比べて大きい値であるのが分かる。これは、本コンクリートが全体として均等質であり局部欠陥が生じないこと、および、ブリージングなどの材料分離が生じないことから骨材界面とベーストとの付着が密実であることによるものと考えられる。

なお、従来の分離低減剤であるセルロース系あるいはアクリル系水中不分散性混和剤においては、添加量の増加にともなう凝結遅延作用により材令2日程度の初期強度は低い傾向にあるが、長期的には、これらの分離低減剤の添加による強度への影響は無いことが報告されている[4.12][4.13]。

表-4.3.2 分離低減剤添加による強度発現性への影響

配合 ケース	Gmax (mm)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
				水 W	結合材 p ^{注1)}			細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (P*%)		分離 低減剤 W×%
					C	B	F			AE 減水剤	高性能 減水剤	
A配合	20	33	45	165	150	150	200	698	884	0.15	1.45	0.9
B配合											0.6	-

注1) C：普通ポルトランドセメント B：高炉スラグ微粉末 F：フライアッシュ

表-4.3.3 フレッシュコンクリートの品質

配合 ケース	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (ton/m ³)	練上がり温度 (℃)
A配合	70	3.8	2.30	19.9
B配合	19.5 (スランブ)	3.9	2.30	19.8

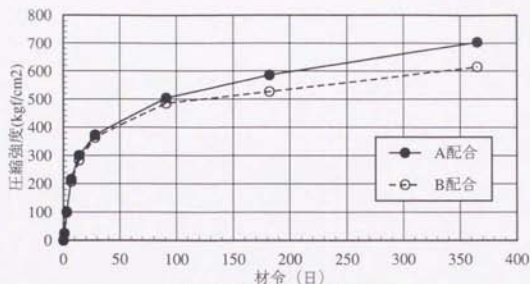


図-4.3.2 圧縮強度の経時変化

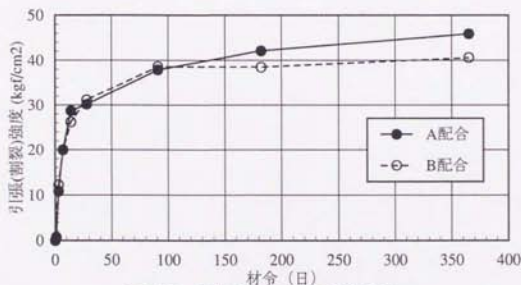


図-4.3.3 引張（割裂）強度の経時変化

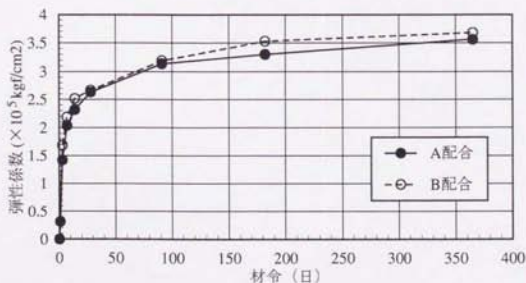


図-4.3.4 弾性係数の経時変化

(3) 分離低減剤過剰添加が強度発現性に及ぼす影響

本分離低減剤の標準的な添加量は単位水量に対して0.5～1%程度であるが、万が一、管理ミスにより過剰に添加された場合の圧縮強度に及ぼす影響を、表-4.3.4に示す4種類の配合について検討した。

ここで、各ケースの配合は標準的な分離低減剤の添加量であるCASE-2を基準として、CASE-1は材料分離を生じないよう高性能減水剤の添加量を減らし、スランブ16cmのコンクリートとした。また、CASE-4はスランブ2cmの硬いコンクリートであったが、高性能減水剤の添加量が過剰となることによる強度特性への影響を考慮し、表記の高性能減水剤の添加量にとどめた。

図-4.3.5は分離低減剤の各添加量における材令3日、7日、28日の圧縮強度の結果である。なお、同図中に示す()内数値は、分離低減剤無添加のCASE-1の強度を基準(100%)とした場合の各配合の強度比を示す。

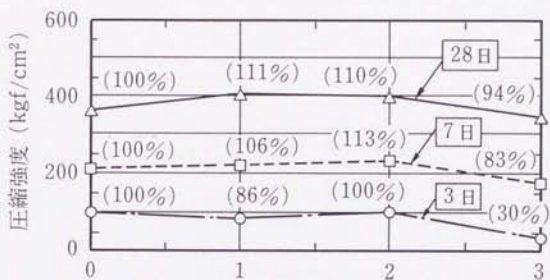
図より、本分離低減剤を標準的な添加量の2倍程度添加しても、硬化後の強度低下は認められず、材令7日以降は基準値(CASE-1)よりも大きな強度となっているのが分かる。また、分離低減剤の添加量が3倍程度となると強度発現の遅延が認められるが、これは、高性能減水剤の添加量が極めて多いことによる影響と考えられ、材令28日では基準値とほぼ同等の強度に回復しているのが分かる。

以上のことから、本分離低減剤を標準的な使用量の2倍程度添加しても強度発現性には殆ど影響しないこと、また、3倍程度の過剰添加においては初期の強度遅延が認められるが、材令28日時点ではほぼ強度は回復されることが確認された。

表-4.3.4 過剰添加に対する検討配合および品質試験結果

配合 ケース	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m3)				混和剤				備考
			水 W	結合材		P ^{注)}	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	
				C	B						
CASE-1	32	45	160	200	200	100	0.60	0	16.5	3.5	スランブ
CASE-2							1.70	1.0	68	4.1	
CASE-3							1.90	2.0	53	3.8	
CASE-4							3.00	3.0	2.0	5.1	スランブ

注1) 結合材 C:普通ポルトランドセメント B:高炉スラグ F:フライアッシュ



分離低減剤の添加量 (単位水量×重量%)

図-4.3.5 分離低減剤添加量と圧縮強度の関係

4.3.2 結合材の特殊性が硬化後の品質に及ぼす影響

(1) 結合材混合割合と圧縮強度発現性の関係

一般に、高炉スラグの混合比が大きいかほど圧縮強度は小さくなり、この傾向は材令3日あるいは7日程度の比較的初期材令において顕著であり、また、ベースのポルトランドセメントの水硬性が高いほどスラグの混合比の増加にともなう初期強度の低下する度合いが大きい傾向にあることが知られている[4.15][4.16]。

本超流動コンクリートは、その適用範囲において、普通ポルトランドセメント、高炉スラグおよびフライアッシュを混合した3成分系結合材を使用することから、先に述べたように、これらの各成分の混合比によって強度発現性を調整することが可能である。

したがって、実用的には、打設時期が冬場であったり、プレストレストコンクリート構造物の緊張工程のために特に早期強度が要求される場合などでは、早期強度発現性が高くなるような結合材の比率とする、あるいは逆に、夏期施工の場合や温度応力の低減を図るために高炉スラグあるいはフライアッシュの混合比を大きくするなど、用途や目的に応じて適度な強度発現性を有する結合材の混合比を選定することにより対応できるものと考えられる。

ここでは、結合材の混合比を変えた表-4.3.5に示す4種類の配合において、圧縮強度発現性の違いを確認し、特に所要の早期強度発現性を確保するための各結合材の混合比についての基礎データを得ることとした。なお、各配合のフレッシュコンクリートの性状は表-4.3.6に示すとおりである。

図-4.3.6は、各配合における普通ポルトランドセメントの混合比と標準養生における圧縮強度発現性の関係を示したものである。高炉スラグおよびフライアッシュの混合比が一定でないことから定量的な評価は行えないが、普通ポルトランドセメントの混合比の増加にともない早期強度発現性も大きくなる結果が得られ、本手法により早期強度への対応が可能であることが確認された。

表-4.3.5 強度発現性に関する検討配合

配合 ケース	Gmax (mm)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m3)					混和剤		
				水 W	結合材：P			細骨材 S	粗骨材 G	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
					C	B	F				
CASE-1	20	33	45	165	150	150	200	698	884	1.45	0.9
CASE-2				165	200	200	100	707	905	1.30	0.6
CASE-3				175	270	175	80	702	890	1.30	0.9
CASE-4				175	300	155	70	706	893	1.35	0.9

注1) C: 普通ポルトランドセメント B: 高炉スラグ微粉末 F: フライアッシュ

表-4.3.6 フレッシュコンクリートの品質および圧縮強度

配合 ケース	フレッシュコンクリートの品質		
	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (℃)
CASE-1	70.0	3.8	19.9
CASE-2	68.5	4.5	23.1
CASE-3	62.0	5.5	19.1
CASE-4	68.0	4.6	19.5

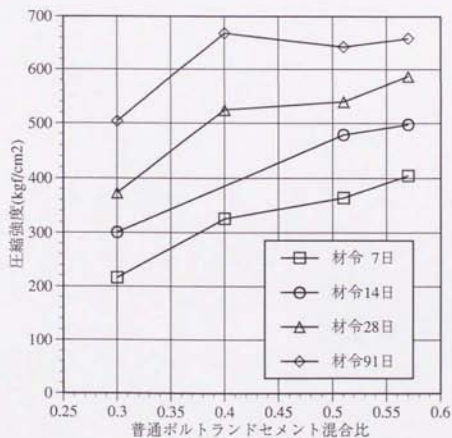


図-4.3.6 普通ポルトランドセメント混合比と強度発現性の関係

(2) 養生期間が強度発現性に及ぼす影響

一般に、高炉スラグおよびフライアッシュを結合材として使用した場合には長期強度発現性が得られるが、このような特性を十分に引き出すためには、特に初期の湿潤養生を十分に行うことが必要であることが知られており[4.15][4.17]、高炉スラグを55%置換したコンクリートでは、初期の湿潤養生を7日間行った場合には材令91日時点で標準養生28日間と同等強度となることが示されている[4.15][4.18]。

したがって、高炉スラグおよびフライアッシュを混合比として50%以上と比較的多く使用する本超流動コンクリートにおいても、初期の湿潤養生期間が不十分の場合には長期強度発現性が低下することは容易に予想されることである。

そこで、表-4.3.7に示す配合について初期の湿潤養生期間の違いが以降の強度発現性に及ぼす影響を調査し、初期の湿潤養生としての所要日数を把握することとした。

供試体は $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ であり終固めを行わずに作製した。養生条件は、湿潤養生として20℃水中養生を1日、3日、7日、14日、28日間行い、その後、20℃-60%R.H.の恒温恒湿環境に静置し、材令1年までの経時を調査した。なお、比較として標準養生(20℃水中養生)を継続した場合も行った。

各湿潤養生期間と以降の強度発現性の関係を図-4.3.7に示す。初期の水中養生期間が短いほど、以降の強度発現性が僅かであることが分かる。

図-4.3.8は、標準養生28日強度に対する各湿潤養生期間ごとの材令28日、91日、182日時点の強度比を示したものである。初期の湿潤養生1日間の場合には標準養生28日強度の50%程度で、また、湿潤養生3日間の場合には75%程度の強度発現にとどまり、さらに、両者ともに材令28日以降の長期の強度増進は殆ど得られないことが分かる。

初期の湿潤養生を7日間行った場合には、材令28日において、標準養生28日強度の90%以上の強度が得られ、また、以降の材令91日さらに182日と長期の強度増進性が認められ、従来より言われているのと同様の結果を得た。

本試験は $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 供試体を用いており、また、気中養生として20℃-60%R.H.の条件であることから、実構造物および実環境の場合に比べて乾燥の度合いが大きい過酷な条件であると考えられる。

先の4.2.1項に示した実環境下での壁部材における検証試験では、初期の湿潤養生条件としては2日間散水したのみであったが、材令28日時点でのコア強度は標準養生と同等であり、また、材令1年経過時点においても良好な強度発現性を有することが確認された。したがって、ここでの検討結果はそのまま実構造物に当てはまるとは言えないが、壁厚さが薄く乾燥しやすい場合も想定されることから、材令28日およびそれ以降の良好な強度増進を得るためには、初期の湿潤養生は7日間程度は行う必要であると考えられる。

表-4.3.7 検討配合

W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		フレッシュコンクリートの品質		
		水 W	結合材 p ^{注1)}			高性能 減水剤 P*%	分離 低減剤 W*%	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	練上り 温度 (℃)
			C	B	F					
33	45	165	200	200	100	1.5	0.6	66.0	4.2	23.5

注1) C:普通ポルトランドセメント、B:高炉スラグ、F:フライアッシュ

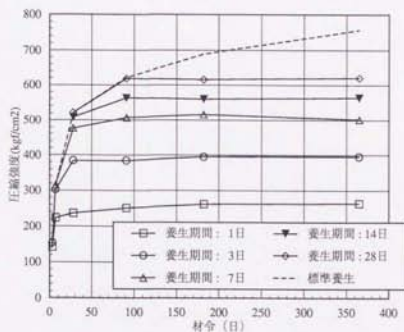


図-4.3.7 各養生期間の圧縮強度経時変化

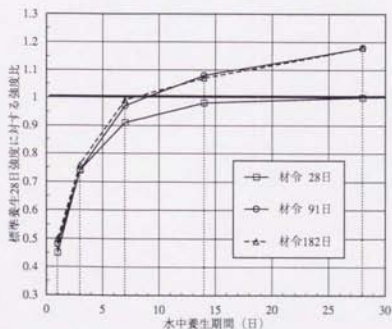


図-4.3.8 各養生期間と標準養生28日強度に対する強度比

(3) 養生温度が強度発現性に及ぼす影響

一般に、高炉スラグやフライアッシュなど低発熱の結合材を使用した場合の強度発現性は養生温度の影響を受け易く、養生温度が低いほど初期材令での強度発現性が低下し、高炉スラグの置換率が大きいのほど養生温度の影響を強く受ける傾向にある[4.15][4.16]。

特に、プレストレストコンクリート構造物の緊張工程のために早期強度が要求され、さらに、冬期の施工となるような場合には、このような低温養生による初期材令での強度発現性の低下は強度不足による緊張作業の遅れにつながり、工事の円滑な遂行を妨げることになる。

ここでは、低温養生における本超流動コンクリートの強度発現性について調査し、特に、冬期施工のプレストレストコンクリート構造物への適用を想定した場合の対策として、ボルトランドセメントの混合比を多くすることとし、目標とする早期強度を満足するような3成分の混合比を求めることとした。

検討した配合は表4.3.8に示すとおりで、普通ボルトランドセメントの混合比の違いを主要因とする3種類の配合である。なお、本研究で取り扱う超流動コンクリートの標準的な配合はCASE-1に相当し、CASE-2およびCASE-3は普通ボルトランドセメントの混合比を多くすることによって早期の強度発現性を高めた配合と言える。また、各配合におけるフレッシュコンクリートの品質は表4.3.9に示すとおりである。供試体寸法は $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ であり養生条件は 10°C -水中養生とした。

図4.3.9に、普通ボルトランドセメントの混合比と各々の 20°C 養生での強度に対する 10°C 養生強度の比の関係を示す。普通ボルトランドセメントの混合比の少ないCASE-1は他のケースに比べて低温の影響を強く受ける傾向にあり、材令7日の比較的早期材令では 20°C 養生した場合の60%程度の強度発現にとどまっているのが分かる。

図4.3.10に、 10°C 養生と 20°C 養生との強度結果をもとに、「土木学会コンクリート標準示方書（施工編）-寒中コンクリート」に準拠した積算温度と圧縮強度の関係を各ケースごとに示す。先にも述べたように、高炉スラグおよびフライアッシュの混合比の多いCASE-1の場合には、低温の影響を強く受けることにより積算温度においても養生温度の違いによる強度差が大きく相関が低い傾向が認められる。

いずれにせよ、一般的なプレストレストコンクリート構造物の1次（仮）緊張に要求される強度は材令3～7日程度で 240kgf/cm^2 であることを考慮すると、 10°C 養生の積算温度である $60 \sim 140 (^\circ\text{C} \cdot \text{日})$ において目標強度を満足するのに必要な普通ボルトランドセメントの混合比は、本超流動コンクリートの場合には概ね50%程度以上と考えられる。

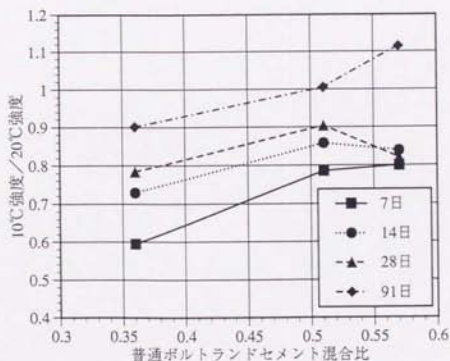
表-4.3.8 養生温度と強度発現性に関する検討配合

配合 ケース	Gmax (mm)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m3)						分離 低減剤 W×%
				水 W	結合材 P ^{注1)}			細骨材 S	粗骨材 G	
					C	B	F			
CASE-1	20	34	45	170	180	220	100	714	902	0.9
CASE-2		33		175	270	175	80	702	890	
CASE-3					300	155	70	706	893	

注1) C:普通ポルトランドセメント B:高炉スラグ F:フライアッシュ

表-4.3.9 フレッシュコンクリートの品質および圧縮強度

配合 ケース	フレッシュコンクリートの 品質			圧縮強度 (kgf/cm ²)			
	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	練上がり 温度 (℃)	材令 7日	14日	28日	91日
CASE-1	60.0	4.7	20.1	338	451	533	630
	64.5	5.6	10.5	201	329	418	568
CASE-2	62.0	5.5	19.1	364	479	540	643
	70.0	4.9	10.0	286	411	488	647
CASE-3	68.0	4.6	19.5	405	498	587	659
	70.0	5.4	11.1	324	418	482	735

図-4.3.9 普通ポルトランドセメント混合比と
10℃養生強度/20℃養生強度比の関係

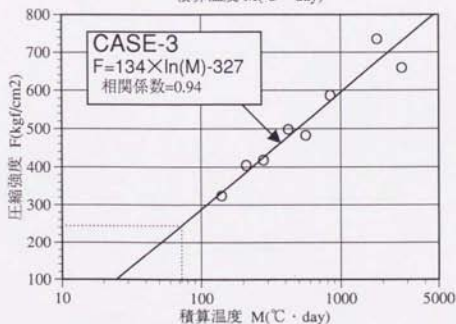
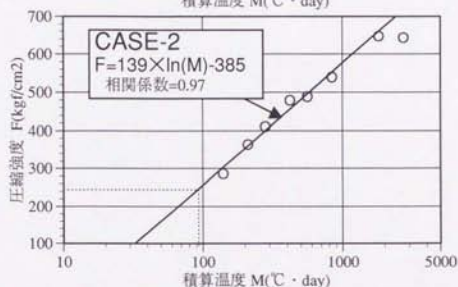
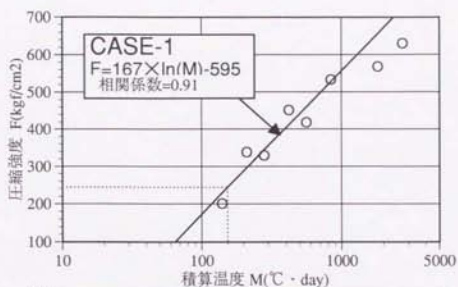


図-4.3.10 積算温度と圧縮強度の関係

4.3.3 配合の特殊性が強度特性に及ぼす影響

(1) 硬化時発熱特性

本超流動コンクリートは、普通ポルトランドセメントと高炉スラグおよびフライアッシュを混合した低発熱型の結合材を使用する反面、単位結合材量 500kg/m^3 程度と比較的結合材を多く使用することから、硬化発熱が減る要因と増える要因の両者を持ち合わせている。

そこで、表4.3.10に示す3成分結合材の混合比を変えた2種類の配合について終局断熱温度上昇量を調査した。

各ケースのフレッシュコンクリートの品質は表4.3.11に示すとおりである。ここで、CASE-1とCASE-2は各結合材の混合比および単位結合材量は同量であることから発熱特性もほぼ同等と考えられるが、CASE-2は先の4.2項における実構造物レベルでの検証試験の際にポンプの筒先から採取した試料であり、打ち込み温度が 28°C と比較的高い条件である。

また、CASE-3は早期の強度発現性を付与した配合であり、単位結合材量は 525kg/m^3 と若干多く、また、普通ポルトランドセメントの混合比も大きい。

図4.3.11に各ケースの断熱温度上昇量の測定結果を示し、図4.3.12に普通ポルトランドセメントあるいは中熱ポルトランドセメントを単身で使用した場合の終局断熱温度上昇量に関する既往の文献^[4.19]と本超流動コンクリートの結果を比較したものである。

CASE-1およびCASE-2の終局断熱温度上昇： Q_∞ は、それぞれ 42.5°C および 45°C であり、この値を既往のデータと比較すると、普通ポルトランドセメント単身で $250\text{kg/m}^3 \sim 270\text{kg/m}^3$ 程度あるいは中熱ポルトランドセメント単身で $320\text{kg/m}^3 \sim 350\text{kg/m}^3$ 程度の単位セメント量の配合に相当する。また、普通ポルトランドセメントの混合比の多いCASE-3の終局断熱温度上昇量は 55.2°C であり、これは、普通ポルトランドセメント単身で 370kg/m^3 程度の配合と言える。

図4.3.13は、CASE-1とCASE-3における普通ポルトランドセメント混合量と図4.3.12から換算した普通ポルトランドセメント単身の単位セメント量との関係を示したものである。ここで、単位結合材量が若干異なるが、CASE-1とCASE-3における普通ポルトランドセメントの混合量の差は 120kg/m^3 であり、これは、既往の文献から換算した単位セメント量の増加分とはほぼ同量に相当する。

このことから、単位結合材量 500kg/m^3 程度の内の40～60%程度を高炉スラグおよびフライアッシュが占める3成分系結合材を使用する本超流動コンクリートの適用範囲において、その終局断熱温度上昇量は普通ポルトランドセメントの混合量によって概ね決定されるものと考えられる。

表-4.3.10 断熱温度上昇量測定試験における配合

配合 ケース	Gmax (mm)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m3)								
				水 W	結合材：P注)			細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 P×%		分離 低減剤 W×%
					C	B	F			AE 減水剤	高性能 減水剤	
CASE-1	20	34	45	170	180	220	100	714	902	0.15	1.25	0.9
CASE-2		36	46	180				724	882	0.15	1.4	0.8
CASE-3		33	45	175	300	155	70	706	893	0.10	1.35	0.9

注) 結合材 C:普通ポルトランドセメント B:高炉スラグ F:フライアッシュ

表-4.3.11 練上がり時の品質

配合 ケース	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (ton/m ³)	練上がり温度 (℃)
CASE-1	68	5.0	2.279	19.3
CASE-2	67	4.4	2.292	28.0
CASE-3	72	1.5	2.389	19.2

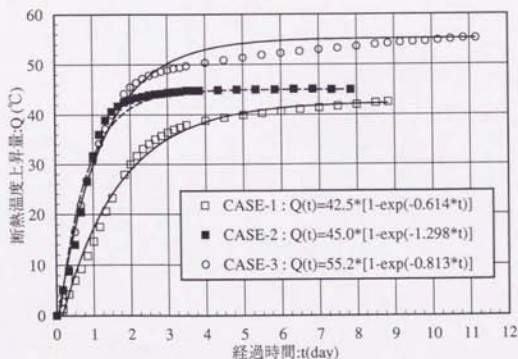


図-4.3.11 断熱温度上昇量測定結果

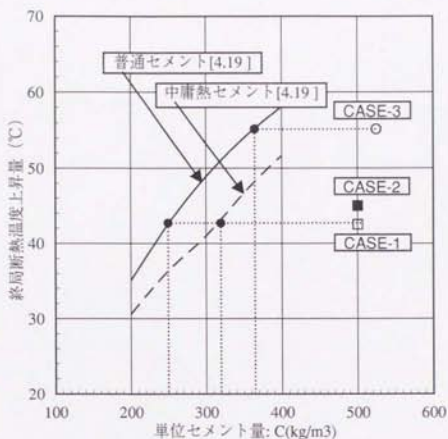


図-4.3.12 単位結合材量と終局断熱温度上昇量の関係

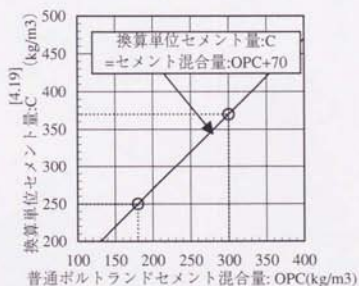


図-4.3.13 普通ポルトランドセメント混合量と換算単位セメント量の関係

(2) 圧縮強度と弾性係数の関係

一般に、比較的ペーストの占める割合の多い高強度コンクリートにおいては、建築学会のRC基準式あるいはACI318-83式などから算出した弾性係数と比較してやや小さく算出される傾向にあり、ACI363R^[4.20]式と比較的一致するとの報告が多い^{[4.21][4.22]}。

図-4.3.14は、本超流動コンクリートにおける圧縮強度と弾性係数の関係を示したものである。なお、これらのデータは本超流動コンクリートの適用範囲における材令28日から材令91日までのデータである。データ数が僅かであり明確な傾向は認められないが、本超流動コンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係においては、建築学会のRC基準式あるいはACI318-83式に近い傾向にあると考えられる。

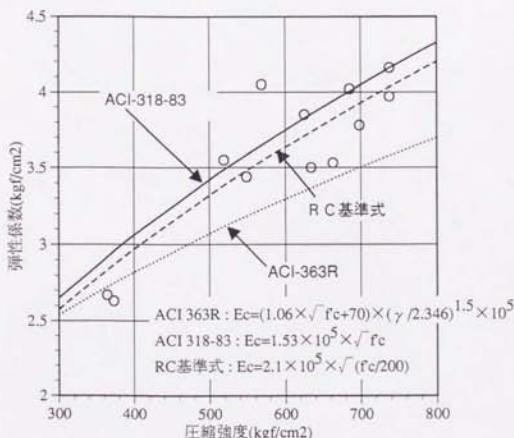


図-4.3.14 圧縮強度と弾性係数の関係

(3) クリープ特性

本超流動コンクリートは、その性能面から、高強度が要求され、しかもPC鋼材や定着具などが多数配置された高密度の配筋条件となるプレストレストコンクリート構造物への適用が有効と言える。

このようなプレストレストコンクリートへの適用を考えた場合には、緊張導入力などを算定する上で、クリープ特性を把握しておくことが重要である。

本超流動コンクリートは、水結合材比が35%程度であり単位結合材量として 500kg/m^3 程度を使用することから、一般のコンクリートと比べて単位ペースト量が多く、比較的単位粗骨材量が少ない配合上の特殊性を有する。

このように単位ペースト量が比較的多い配合のコンクリートとして高強度コンクリートが挙げられるが、高強度コンクリートは一般的な強度のコンクリートと比べてクリープが小さくなる傾向にあることが知られている[4,23]。

以上のことから、本超流動コンクリートにおいても一般的なコンクリートと比べてクリープが小さくなるものと予想される。ここでは、本超流動コンクリートのクリープ特性について確認した室内試験について述べる。

1) 検討配合

検討した配合は表-4.3.12に示す5ケースであり、CASE-2とCASE-3は超流動コンクリートであり、特に、CASE-3は普通ポルトランドセメントの混合比を多くし比較的早期強度発現性を有する配合である。CASE-1はCASE-2の配合を基本としているが本分離低減剤を添加せず、高性能減水剤の添加量を減らした配合である。また、CASE-4は水セメント比45%でスランプ7.5cmの一般的なプレストレストコンクリート用の配合と言え、CASE-5は水セメント比56%の標準的なRC構造物用の配合と言える。

各ケースの練り上り時の品質を表-4.3.13に示す。また、同表に持続荷重の載荷値およびその際の弾性歪みを併記する。

使用材料としては、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末（比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度）およびフライアッシュの3成分系結合材を使用し、細骨材には山砂（千葉県市原産、粗粒率2.57）を、粗骨材には最大寸法20mmの砕石（八戸産、粗粒率6.58）を使用した。また、高性能減水剤にはナフタリンスルホン酸系を使用した。CASE-4およびCASE-5はメラミンスルホン酸系の流動化剤を後添加した。

2) クリープ試験の方法

クリープ試験用供試体および非載荷供試体の形状は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ であり、CASE-1、CASE-4およびCASE-5はJIS A 1132に準拠して突き棒により突き固め、CASE-2とCASE-3は

締固めを行わずに製作した。

これらの供試体は28日間の標準養生を行った後、20℃-60%R.H.の恒温恒湿室にて、露出状態の下で、クリープ試験および非載荷のひずみを測定した。また、クリープ試験の方法は写真-4.3.11に示す要領により行ったもので、供試体3本を直列につなげ、油圧ジャッキにより各ケースごとに載荷開始時点（材令28日）の圧縮強度に対して30%の応力比で持続荷重を載荷した。なお、クリープ歪みおよび非載荷における長さ変化量の測定は、JIS A 1129に準拠したコンタクトゲージ方法によった。

3) クリープ試験結果

図-4.3.15に非載荷での長さ変化量の経時変化を、図-4.3.16に全クリープひずみから非載荷ひずみを差し引いて算出したクリープ係数の経時変化を示す。また、図-4.3.17および図-4.3.18には、各ケースごとに全クリープひずみを載荷応力で除したクリープひずみと、阪田式^[4.24]により算出した単位応力当りのクリープひずみとの関係を示す。

図-4.3.15の非載荷ひずみにおいて、CASE-4とCASE-5の水セメント比の違いにおける差は認められず両者はほぼ同等である。CASE-3は、単位結合材量および水結合材比が同程度のCASE-1やCASE-2と比べて70～80%程度と小さく、普通ポルトランドセメントの使用量が多く高炉スラグ微粉末が少ない場合には乾燥収縮量が小さくなるものと推定される。

図-4.3.16において、水結合材比56%のCASE-5の約1年経過時点でのクリープ係数は2.4程度であり、水結合材比45%のCASE-4については経過時間が20週程度と短い、CASE-5に漸近する傾向にあるのが分かる。

これに対して、超流動コンクリートとしたCASE-2およびCASE-3、あるいは、CASE-2と同等の配合であるCASE-1のクリープ係数は1.5～1.7であり、予想どおり、一般的なコンクリートと言えるCASE-4やCASE-5と比べて小さい結果が得られた。

図-4.3.17において、阪田式により算出した単位クリープひずみと本試験結果を比較すると、水セメント比56%の一般的な配合であるCASE-5においては阪田式と良く近似し、水結合材比45%のCASE-4についても比較的近い結果である。

図-4.3.18において、3成分系結合材を使用したCASE-1、CASE-2およびCASE-3の試験結果は阪田式と比べて倍以上の差があるが、これは、阪田式が普通ポルトランドセメント単身のコンクリートを前提とし、また、水セメント比40～60%を主体として導いた予測式であることによるものと考えられる。

なお、図-4.3.19は阪田ら^[4.23]の示した強度と終局単位クリープひずみの関係において、本試験における各ケースの約1年経過時点での単位クリープひずみをプロットしたものである。本試験結果は、高強度であるほどクリープが小さくなる既往のデータとはほぼ同様の傾向であることが分かる。

以上のように、本超流動コンクリートのクリープが一般のコンクリートに比べて小さい

理由は、細孔構造が緻密であること、さらに、前川らの弾塑性破壊理論^[4,25]によって説明されるように、骨材どうしの噛み合いが殆ど生じないことにより塑性ひずみが大きくなることで、測定される弾性ひずみが見掛け上大きくなるためと考えられ、その結果、弾性ひずみとの比で表されるクリープ係数が小さくなったものと考えられる。

表-4.3.12 クリープ試験における検討配合

配合No.	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m3)				混和剤	
			W	結合材 P ^{注1)}			高性能減水剤 P*%	分離低減剤 W*%
				C	B	F		
CASE-1	36	45	170	189	189	95	0.90	-
CASE-2							1.20	0.6
CASE-3	34			240	160	100	2.20	0.5
CASE-4	45	41.5	158	350	-	-	0.50 ^{注2)}	-
CASE-5	56	45	170	302	-	-	1.00 ^{注2)}	-

注1) C:普通ポルトランドセメント B:高炉スラグ F:フライアッシュ

注2) CASE-4, CASE-5は流動化剤 (メラミンスルホン酸系) を後添加。

表-4.3.13 練り上がり時の品質と持続荷重

配合No.	練り上がり時の品質			持続荷重		
	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	材令28日圧縮強度 (kgf/cm ²)	持続荷重 $0.3 \times \sigma_{28}$ (kgf/cm ²)	弾性ひずみ (μ)
CASE-1	21.5	-	4.3	501	150	403
CASE-2	-	70.5	4.0	447	134	390
CASE-3	-	69.5	3.8	549	165	548
CASE-4	7.5	-	3.8	480	144	210
CASE-5	16.4	-	3.9	410	123	340

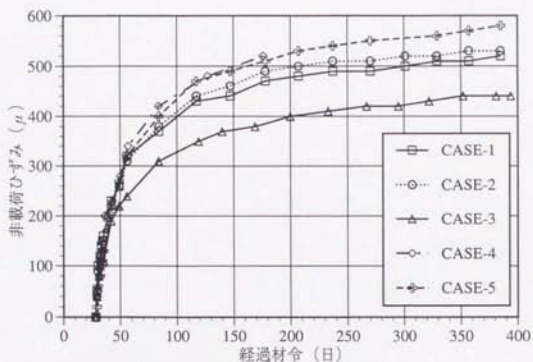


図-4.3.15 非載荷条件でのひずみ量

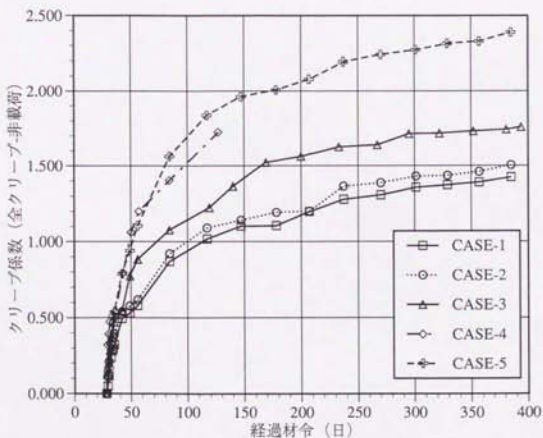


図-4.3.16 クリープ量 (非載荷ひずみを除いた場合)

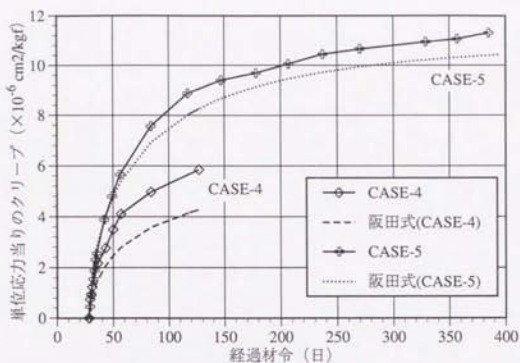


図-4.3.17 坂田式との比較 (一般コンクリート)

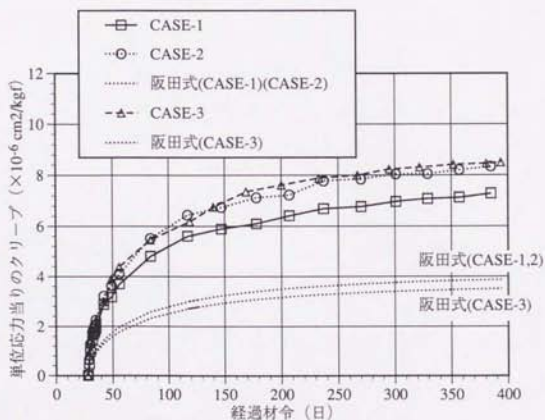


図-4.3.18 坂田式との比較 (超流動コンクリート)



写真-4.3.1 クリープ試験要領

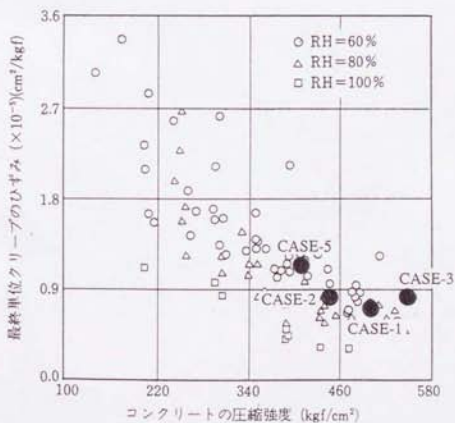


図-4.3.19 強度と単位クリープひずみの関係 [4.23]

4.3.4 耐久性の検証

(1) 乾燥収縮特性 (JIS A 1129準拠)

一般に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートにおいて、十分な湿潤養生を行った場合には、普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べて、乾燥収縮が小さくなることが知られており[4.15][4.26]、初期の湿潤養生期間として7日間程度行うことにより、良好な性能が確保されるものと言える。したがって、本超流動コンクリートにおいても初期の湿潤養生を十分に行うことが乾燥収縮を低減させることになる。

ここでは、表-4.3.14に示す3成分系結合材の混合比あるいは本分離低減剤の添加の有無を要因とした6種類の配合において、初期の湿潤養生期間の違いによる本超流動コンクリートの乾燥収縮特性を評価した。ここで、表中のCASE-3は先の4.2項に示した実証試験に適用した超流動コンクリートと同じ配合であり、CASE-5配合は水セメント比56%の一般的に使用されるコンクリートに相当する。

また、表-4.3.15に各ケースのフレッシュコンクリートでの品質を示す。

乾燥収縮量の評価試験は、JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」に準拠して行ったが、ここでは、初期養生条件の違いが本超流動コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす影響を調査するため、水中養生期間として、JIS A 1129に規定された7日間養生とは別に3日間あるいは28日間の養生条件についても行ない、所定の水中養生を行った後、20℃・60% R.H.の恒温恒湿室に暴露した。

1) 本分離低減剤の添加が乾燥収縮特性に及ぼす影響

CASE-1とCASE-2、および、CASE-4とCASE-5について、本分離低減剤の添加が乾燥収縮特性に及ぼす影響を調査した結果を図-4.3.20に示す。

CASE-1とCASE-2を比較すると、本分離低減剤を添加したCASE-2の方が僅かに収縮量が小さい傾向にあるが、特に本分離低減剤を添加したことによる影響は認められない。

CASE-4およびCASE-5は、CASE-1およびCASE-2と比べて乾燥収縮量は大きい、これは、フライアッシュの混合比が多い配合であるために乾燥開始材令である材令7日時点では、十分に水和が進行していないことによるものと考えられる。また、CASE-5はCASE-4に比べて10%程度収縮量が大きい傾向にあり、先のCASE-1とCASE-2の場合と逆の結果となっているが、これは、本分離低減剤の添加による影響と見るよりは、高性能減水剤の添加量が2倍程度と多いことにより水和の進行がさらに遅かったためと考えられる。

いずれにせよ、CASE-1とCASE-2あるいはCASE-4とCASE-5の比較において、両者の差は僅かであり、本分離低減剤の添加が乾燥収縮特性に及ぼす影響は認められない。

2) 結合材の混合比の違いが乾燥収縮特性に及ぼす影響

図-4.3.21に、結合材の混合比の異なるCASE-2、CASE-3およびCASE-5の3ケースの超流動コンクリート、および、比較用としてW/C=56%の一般的なコンクリートであるCASE-6における乾燥収縮特性を示す。図を見ると、本超流動コンクリートにおいてはフライアッシュおよび高炉スラグの混合比が多い順に乾燥収縮が大きくなる傾向にあるのが分かる。

また、一般的なコンクリートであるCASE-6と比較して、フライアッシュの混合量が 100kg/m^3 程度の超流動コンクリートにおいては15%程度収縮量は小さく、フライアッシュを 200kg/m^3 混合したCASE-5は35%程度大きいことが分かる。これは、先にも述べたようにフライアッシュの混合比が多い場合には初期の水和が遅いことにより、JIS試験に定められた7日間水中養生の条件では、十分に水和が進行していない状態で乾燥条件に曝されたためと考えられる。

いずれにせよ、本超流動コンクリートの標準的なフライアッシュの使用量はCASE-2あるいはCASE-3配合に相当する 100kg/m^3 程度であり、この程度の使用量であれば、比較的早期に乾燥条件に曝されても、一般的なコンクリートと比べて乾燥収縮量は小さいものと言える。

3) 初期養生の違いが乾燥収縮特性に及ぼす影響

図-4.3.22に、超流動コンクリートであるCASE-2および一般的なコンクリートであるCASE-6において、初期の水中養生期間を3日間とした場合の乾燥収縮の経時変化を示す。

また、図-4.3.23は先の4.2項に示した実証試験に用いた配合であるCASE-3において、初期の水中養生期間を3日、7日および28日間行った場合の各乾燥収縮量の経時変化を示したものである。

図-4.3.22において初期の養生期間の違いによる乾燥収縮量の差を見ると、W/C=56%のCASE-6の場合には湿潤養生期間の違いによる乾燥収縮量の差は僅かであるが、本超流動コンクリートにおいては初期の湿潤養生期間の影響を強く受け、湿潤養生期間3日間の乾燥収縮量は7日間の場合と比べて20%程度大きくなる事が分かる。また、湿潤養生期間が3日間の場合には、CASE-2の乾燥収縮量はCASE-6に比べて10%程度小さいが、養生期間を7日間とすることにより25%程度小さくなる事が分かる。

図-4.3.23において、初期養生期間が長いほど乾燥収縮量は小さくなるが、養生期間7日間と28日間との差は僅かであり、従来より言われているのと同様に、初期の湿潤養生期間として7日間行うことによってほぼ良好な耐乾燥収縮性を確保できるものと言える。

なお、先の壁部材における実証試験では散水養生期間は2日間であったが、有害な乾燥収縮ひびわれの発生は認められなかった。しかしながら、表面に微細な亀甲状のひびわれの発生は認められたことから、これらを低減するためにも初期の7日間程度までは散水養生などの湿潤養生を行う必要があると考えられる。

表-4.3.14 長さ変化量における検討配合

配合No.	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤	
			W	結合材 P ^{注1)}			高性能 減水剤 P*%	分離 低減剤 W*%
				C	B	F		
CASE-1	36	45	170	189	189	95	0.90 ^{注1)}	-
CASE-2							1.20	0.6
CASE-3	36	46	180	180	220	100	1.4	0.8
CASE-4	33	45	165	150	150	200	0.6	-
CASE-5							1.20	0.9
CASE-6	56	45	170	302	-	-	1.00 ^{注2)}	-

注1) C:普通ポルトランドセメント B:高炉スラグ F:フライアッシュ

注2) CASE-1,CASE-6は流動化剤(メラミンスルホン酸系)を後添加。

表-4.3.15 練り上がり時の品質と持続荷重

配合No.	練り上がり時の品質		
	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)
CASE-1	21.5	-	4.3
CASE-2	-	70.5	4.0
CASE-3	-	70.0	3.8
CASE-4	19.5	-	3.9
CASE-5	-	69.5	3.8
CASE-6	16.4	-	3.9

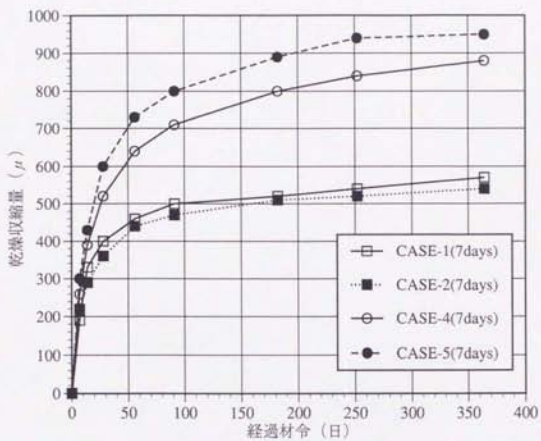


図-4.3.20 本分離低減剤添加の有無と乾燥収縮量の関係

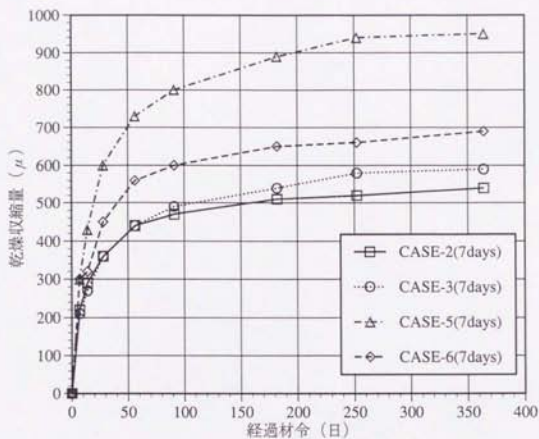


図-4.3.21 各種配合の乾燥収縮量の比較

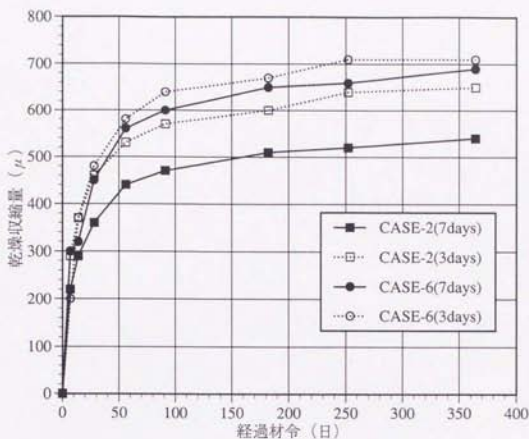


図-4.3.22 初期水中養生期間と乾燥収縮量の関係

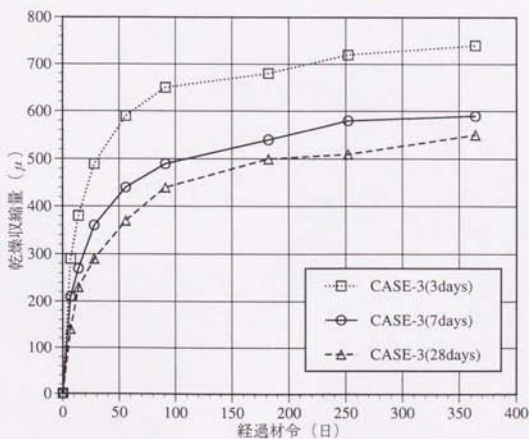


図-4.3.23 初期水中養生期間と乾燥収縮の関係

(2) 耐凍結融解特性

表-4.3.16に示す3成分系結合材の混合比および混入空気量を要因とした7種類の配合について、本超流動コンクリートの耐凍結融解特性を評価した。ここで、表中の配合C-1からC-3は、先の実構造物レベルでの実証試験に適用した超流動コンクリートの配合にほぼ相当する。また、B-1配合はA-2配合を基本とするが本分離低減剤を添加せず高性能減水剤の添加量を少なくしたスランブ8.5cmのコンクリートである。

表-4.3.17に各ケースにおける練り上がり時のフレッシュコンクリートの品質および硬化後に行った気泡組織測定結果を示す。なお、空気量の調整はAE補助剤により行った。

耐凍結融解性の評価試験は、ASTM C 666に準拠した水中凍結・融解試験とし、凍結融解の開始までの水中養生期間は14日間であるが、フライアッシュの混合比の多いA-1からA-3およびB-1については、硬化に時間を有することを考慮し、試験開始までの水中養生期間は28日間とした。

1) 本分離低減剤の添加が凍結融解性に及ぼす影響

図-4.3.24にA-1～A-3およびB-1における凍結融解試験結果を示す。凍結融解300サイクル時点において、B-1の相対動弾性係数が10%以上低下しているのに対して、本超流動コンクリートは相対動弾性係数の低下は5%程度であり、本分離低減剤の添加による凍結融解性への影響は認められない。なお、これらの結果は、表-4.3.17に示すように本試験に用いた供試体はいずれも気泡間隔係数として $140\mu\text{m}$ 程度と極めて小さいことから予想される結果である。

2) 配合上の特殊性が耐凍結融解性に及ぼす影響

図-4.3.25は、C-1～C-3配合における試験結果であり、これは、先の実構造物レベルでの実証試験に適用した超流動コンクリートの配合にほぼ相当し、気泡間隔係数もほぼ同程度の超流動コンクリートと言える。

図を見ると分かるように、いずれのケースも凍結融解300サイクル時点における相対動弾性係数はASTMの基準である60%以上を満足しているが、十分な耐凍結融解性を有しているものは空気量を5.5%としたC-3であることが分かる。

図-4.3.26は各ケースの気泡間隔係数と耐久性指数との関係を示し、図-4.3.27はエアメータにより測定した空気量と耐久性指数との関係を示したものである。

一般的に気泡間隔係数が $200\mu\text{m}$ 以下であれば良好な耐凍結融解性を有することが知られている[4.27][4.28]が、図-4.3.26を見ると分かるように、本試験結果においても気泡間隔係数が小さいほど大きな耐久性指数が得られており、従来言われているのと同様に、耐久性指数として80%以上の耐凍結融解性能を確保するためには気泡間隔係数として $200\mu\text{m}$ 以下とする必要があるものと考えられる。

また、図-4.3.27に示すように、十分な耐凍結融解性を確保するのに必要な空気量としては5%程度以上と言える。特に、本超流動コンクリートは単位結合材量を比較的多く使用したペースト量の多い配合上の特長から、単位結合材量が300～400kg/m³程度の範囲である一般的なコンクリートと比較して、エアーメータにより測定される空気量は同じであっても、相対的にはペースト中の空気量は少ないものと言える。したがって、対象とする構造物が特に耐凍結融解性を要求するような場合には、空気量として5%程度以上とするのが良いと考えられる。

表-4.3.16 凍結融解性評価における検討配合と品質

配合 ケース	Gmax (mm)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						フレッシュコンクリートの品質	
				水 W	結合材 p注1)		高性能 減水剤 (P*%)	分離 低減剤 W×%		スランプ フロー (cm)	空気量 (%)
					C	B					
A-1	20	33	45	165	150	150	200	1.5	0.9	69	3.6
A-2										69	4.2
A-3										68	5.5
B-1								0.35	-	8.5 (スランプ)	4.7
C-1	20	33	45	165	200	200	100	1.45	0.6	64	3.2
C-2										67.5	4.3
C-3										63	5.5

注1) C:普通ポルトランドセメント、B:高炉スラグ、F:フライアッシュ

表-4.3.17 気泡組織測定結果

配合NO.	練り上がり 空気量	気泡組織測定結果			細孔径分布測定結果	
		換算空気量	比表面積 (mm ² /mm ³)	気泡間隔係 数(μm)	平均細孔径 (μm)	全細孔量 (ml/g)
A-1	3.6	4.4	40.43	143	-	-
A-2	4.2	5.5	40.90	128	-	-
A-3	5.5	7.0	33.14	141	-	-
B-1	4.7	5.3	38.97	136	-	-
C-1	3.2	3.7	20.78	295	0.0219	0.0560
C-2	4.3	3.4	27.33	232	0.0225	0.0580
C-3	5.5	5.7	22.33	225	0.0279	0.0693

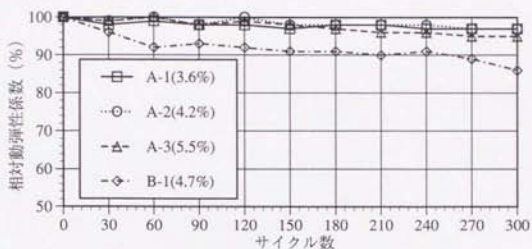


図-4.3.24 分離低減剤添加の有無と耐凍融解性の関係

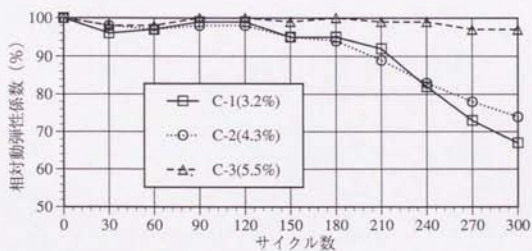


図-4.3.25 空気量と耐凍結融解性の関係

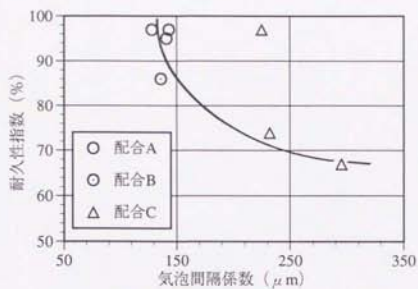


図-4.3.26 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

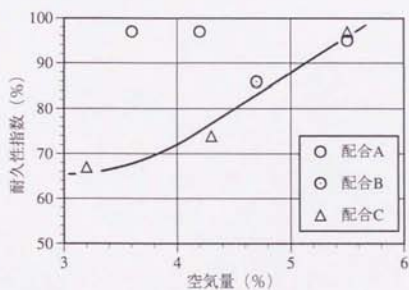


図-4.3.27 空気量と耐久性指数の関係

(3) 耐中性化特性

中性化抵抗性に影響を及ぼす要因には、主にセメントの種類、水結合材比、強度などが挙げられ、高炉スラグやフライアッシュなど水和反応の遅い結合材を使用した場合にはポルトランドセメント単身の場合に比べて同一水結合材比での中性化の進行が速く、また、水結合材比が小さい、あるいは圧縮強度が大きいなど基本的に緻密な配合ほど中性化が遅いことが知られている[4.29][4.30][4.31]。

本超流動コンクリートは、水結合材比が35%程度と小さく緻密な配合である点では中性化に対して有利であると言えるが、結合材に高炉スラグやフライアッシュを比較的多く使用する点において中性化が大きくなることが予想される。

そこで、表-4.3.18に示す3種類の配合について促進中性化試験を行い、本超流動コンクリートの耐中性化性能を評価した。CASE-1およびCASE-2配合は本研究対象の分離低減剤を添加したスランプフロー70cmの超流動コンクリートであり、CASE-3はCASE-2の配合を基準として分離低減剤を添加せず、また、高性能減水剤の添加量を減らしたスランプ18cmのコンクリートである。供試体の形状は $\phi 10 \times 20$ cmとし、CASE-3はJIS A 1132に準拠した突き棒による締固めを行い、CASE-1およびCASE-2は締固めしないで作製した。

促進試験条件は CO_2 濃度5%-温度30℃-湿度60%であり、供試体を作製後、28日間の標準養生を行った後、促進試験装置内に静置した。また、中性化深さの測定はフェノールフタレイン変色法によった。

図-4.3.28に促進期間と中性化深さの関係を示す。フライアッシュの混合割合が大きいCASE-2およびCASE-3はCASE-1に比べて中性化が速く進行するのが分かる。また、CASE-2およびCASE-3を比較すると、分離低減剤を添加しないCASE-3の方が中性化が速い傾向にあり、超流動コンクリートとすることによりブリージングなどの材料分離が生じないことにより緻密性が向上したためと考えられるが、いずれにせよ、本分離低減剤を添加することによる中性化抵抗性を低下させるような影響は認められない。

図-4.3.29は、中性化深さ： C と経過時間： T を \sqrt{T} 則する $C=A\sqrt{T}$ と仮定してもとめた各ケースの中性化速度係数： A [4.32]と水結合材比の関係について、ここで行った促進試験と同条件で行われた普通ポルトランドセメント単身を使用した場合の既往のデータ[4.30]とを比較したものである。

超流動コンクリートとしたCASE-1およびCASE-2は普通ポルトランドセメント単身を使用した場合の水セメント比52%～58%程度に相当する。本超流動コンクリートの水結合材比は33%あるいは35%であるが、高炉スラグやフライアッシュを比較的多く使用していることにより、予想したように、普通ポルトランドセメント単身を使用した場合の水セメント比と中性化深さの関係と比べて中性化深さは大きくなる傾向にある。

ここで、普通ポルトランドセメントを単身で使用した水セメント比52%相当のコンクリ

ートにおける、屋外暴露1年経過時点での中性化深さを既往の推定式^[4,29]から算出すると、中性化深さとして概ね2mm程度となる。

ここで、先の4.2.1項に示したように実構造物レベルでの1年間暴露後の中性化深さは1mm以下であったことから、実際に打ち込まれた本超流動コンクリートは、少なくとも、ここで換算した普通ポルトランドセメント単身の水セメント比よりは、高い耐中性化性能を有するものと言える。

表・4.3.18 検討配合

配合 種別	W/P (%)	s/a (%)	單位量 (kg/m3)						AE 減水劑 (P×%)	高性能 減水劑 (P×%)	分離 低減劑 (W×%)
			水 W	結合材 P			細骨材 S	粗骨材 G			
				C	B	F					
CASE-1	35	45	175	230	170	100	726	869	0.15	1.5	0.86
CASE-2	33	45	165	150	150	200	698	884	0.15	1.2	0.9
CASE-3										0.5	-

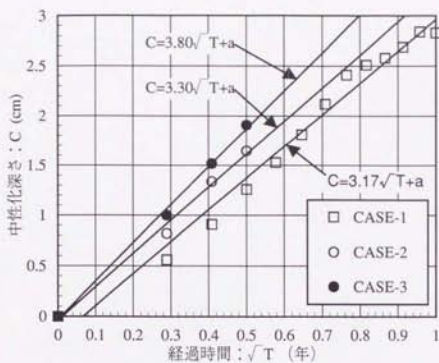


図-4.3.28 中性化深さと経過時間の関係

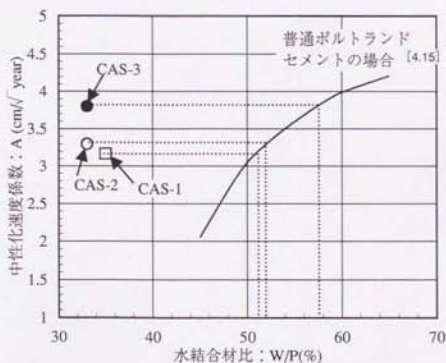


図-4.3.29 中性化速度係数と水結合材比の関係

4.4 まとめ

ここでは、本超流動コンクリートを適用したコンクリート部材において、締固めを排除することによってもたらされる部材全体としての均質性を実構造物レベルで検証した。

大型壁状部材において調査した高さ方向における均質性については、理想的な養生条件と言える標準養生供試体と同等の強度発現性を有し、さらに、一般に部材上層部で急激な強度低下が生じる水平鉄筋の付着強度においても良好な品質と均質性が確保されていることを確認し、締固めの排除と本コンクリート自体の高材料分離抵抗性によって付与される均質性について、予測したとおりの結果を得た。

また、本超流動コンクリートは自由落下高さとして4mまでは十分に均質性を確保した打ち込みが可能であること、一般的な壁部材の2倍以上と言える縦横100mm間隔の高密度な配筋条件の場合においても十分な均質性が得られることが明らかとなった。

さらに、比較的配筋量の少ないマスコンクリート部材ではあるが、水平方向への流動距離として13m程度の範囲であれば、本超流動コンクリートの高品質性を損なうことなく、均質性が確保されることが明らかとなった。

また、本超流動コンクリートの適用範囲である使用材料および配合の特殊性から予想される硬化後の品質および耐久性への影響を室内試験により調査した。

その結果、普通ポルトランドセメントに高炉スラグとフライアッシュを混合した3成分系結合材を使用する上で配慮すべき点として、従来より言われているとおり、初期の湿潤養生を十分に行う必要があること、具体的には、本超流動コンクリートの品質を十分に期待するためには初期の湿潤養生期間として少なくとも7日間が必要であることを確認した。

また、単位結合材量が比較的多くコンクリート中に占めるペースト分が多い配合上の特殊性によって、一般的なコンクリートと比べてクリープが小さくなる傾向にあること、および、特に耐凍害性が要求される構造物については空気量として5%程度を混入するようにAE補助剤により空気を混入する必要があることが明らかとなった。

なお、本超流動コンクリートに用いる分離低減剤の添加は硬化後の品質ならびに耐久性に悪影響を及ぼさないことが明らかとなった。

以上まとめれば、本超流動コンクリートの配合上の特殊性が硬化後の品質および耐久性に及ぼす影響は、いずれも予測したとおりの結果であり、本超流動コンクリートの品質は基本的には高品質で高耐久性を有しているが、これらの品質を確実に得るためには、従来より指摘されているのと同じ範疇での配慮が必要であることを改めて確認するに至った。

第5章 実用化システムの開発

5.1 はじめに

現状の製造・管理システムおよび施工体制において超流動コンクリートの速やかな実用化を図るためには、配合選定・製造・施工に至る一連の実用化システムを現状に即した比較的汎用性のある形で構築しなければならない。

本研究の最終目標はこの実用化システムの確立にあり、この目標を達成するために、まず、現状の製造プラントの製造・管理システムにおいて抑制することの難しい使用材料の品質変動に対して、所要の自己充填性が比較的容易に確保できるような超流動コンクリートを開発することとした。その結果、前章までに述べてきたように、「ハイパフォーマンスコンクリート」の配合を基本とし、これに、膨潤と吸水機構を主体とする新しい分離低減剤を添加することを特徴とする超流動コンクリートを選定するに至った。

したがって、ここで取り扱う実用化システムは、本超流動コンクリートを用いることを前提としたものであり、また、レディーミクストコンクリート工場で製造した本超流動コンクリートを現場打ちによって構築するコンクリート構造物に適用することを対象としたシステムである。

本章では、まず本超流動コンクリートの基本性能を評価するための定量評価手法について提案し、本手法を用いた簡易的な配合選定手法ならびに実工事における品質管理の指標値の設定を行なった。

さらに、製造・運搬にともなうフレッシュコンクリートの品質変化および打設にともなうポンプ圧送性と側圧の作用状態ならびに流動勾配の検証を行ない、従来のコンクリートとは異なる性状を示すと予想される本超流動コンクリートの施工面での特性と施工条件を明確にし、これらの結果をふまえて、現状の製造、施工体制に即した形での実用化システムの確立を行ったものである。

5.2 自己充填性に関するフレッシュコンクリートの評価手法の提案

超流動コンクリートのフレッシュな状態において、締固めを行うことなく高密度配筋部への自己充填性を可能とするためには、相反する性能と言える高変形性と高分離抵抗性をいかに適正にバランスさせるかが重要な課題と言える。

したがって、付与する高変形性と高分離抵抗性を的確に評価することが要求されるが、超流動コンクリートは従来のコンクリートとは全く異なる概念であることから、これらの要求性能を定量的に評価する方法はまだ確立されていない。

これらの要求性能を定量的に評価することができれば、超流動コンクリートの適正配合を選定する上での指標を得ることができ、また、良好な自己充填性を確保することのできる変形性や分離抵抗性の適正範囲を明かにすることによって、実施工において適正かつ無理のない品質管理目標値を設定することが可能となる。

ここでは、変形性と分離抵抗性、および、自己充填性に関する定量的な評価試験方法を提案するとともに、自己充填性を確保することのできる変形性と分離抵抗性の適正範囲を定量的に把握することを試みた。これによって、本超流動コンクリートの配合を選定する際の良否の判定と実工事の際の品質管理目標値の設定が可能になると考えたからである。

なお、ここに提案する評価試験方法は図-5.2.1に示す手順によって行なうものであり、変形性と分離抵抗性および高密度配筋部への自己充填性の3項目の評価試験によって構成される。すなわち、変形性の評価としてスランブフロー試験とスランブフロー変形速度の測定、および、分離抵抗性の評価としてモルタルの見掛けの粘度と降伏値の測定あるいは便宜的な方法として前記のスランブフロー変形速度の測定、そして、最終的に高密度配筋部への自己充填性の良否を評価する充填性評価試験である。

先にも述べたように、これらの評価は最終的には配合選定における指標値および実工事における品質管理目標値を選定することを目的としており、実施工における管理結果からのフィードバックによって、さらに実工事に適した定量化ができるものと考えられる。

以降、これらの評価方法について詳細を述べる。

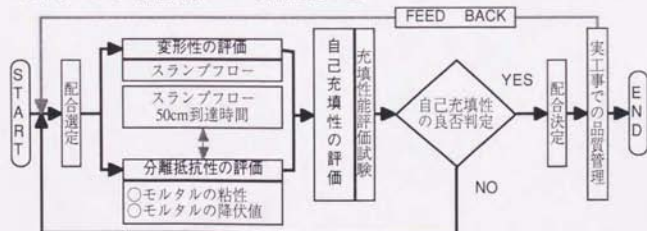


図-5.2.1 本超流動コンクリートの評価手順

5.2.1 変形性の評価

変形性の評価は、土木学会「水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）」に示されたコンクリートのスランブフロー試験方法（案）に準拠した方法を基本とする。すなわち、JIS A 1101に準拠したスランブ試験後のコンクリートの直径を測定し、コンクリートの変形性を評価する方法である。さらに、ここではスランブフローが50cmに到達するまでの経過時間を測定し、変形速度の評価も合わせて行う。

スランブフローの測定において、一般に、コンクリートの変形速度はスランブフロー値とその時間の相関曲線における接線で表され、変形開始 F_i から静止 F_j までの平均変形速度 V_{ave} は(5.1)式で表される。

$$\text{平均速度: } V_{ave} = \int_{F_i}^{F_j} V \, dF / \int_{F_i}^{F_j} dF \quad \cdots (5.1)$$

スランブフロー試験は容易な測定方法であるが、反面、スランブフロー値とその経過時間を精度良く測定するためには、スランブコーンの引き上げ等の測定者による誤差や、変形初期の比較的速度の速い区間あるいは変形終了間近かの低速度区間を除く必要がある。

そのため、本超流動コンクリートの適用範囲において、図-5.2.2に示す手法によりスランブフローと変形速度を画像解析し、フロー時間の偏差が少なく測定誤差の少ないスランブフローの範囲を求めた。その結果、 $F_i=40\text{cm} \sim F_j=60\text{cm}$ の範囲が平均的な速度を算出する区間として適正であることを確認した。

さらに、図-5.2.3に示すように、(5.2)式より求めたフロー50cm到達時点における変形速度： V_{50} と上記のフロー40cm～60cm区間の平均速度： V_{ave} には高い相関が認められることから、フロー50cm到達時点の変形速度： V_{50} を代表値として測定することとした。

$$50\text{cmフロー変形速度: } V_{50} = (\Phi_{50} - \Phi_i) / T_{50} \quad \cdots (5.2)$$

ここで、 V_{50} : 50cmフロー変形速度(cm/sec),

Φ_{50} : フロー50cm, Φ_i : 初期値20cm, T_{50} : 50cmフロー到達時間(sec)

なお、50cmフロー変形速度： V_{50} は基本的には充填速度の目安となるものであり、実工事において本超流動コンクリートが速やかに変形し充填する状態を予想するための指標と位置付けている。当然のことながら、対象とする部材の打ち込み断面あるいは配筋条件の違いによって、打込んだ超流動コンクリートの充填速度や充填状態は異なるが、現段階では、実施工での測定結果からフィードバックした経験値ではあるが、スランブフロー50cm到達時間： T_{50} として、5秒～10秒の範囲であれば、速やかに充填して行き、円滑な

施工ができる速度であることを確認しており、この範囲を現時点での管理目標値としている。

なお、スランブフロー50cm到達時間から換算した変形速度の逆数（ $1/V_{50}$ ）と後述の分離抵抗性評価試験によって得られる見掛けの粘度には、図-5.2.4に示すように比較的良好な相関が得られており、本超流動コンクリートの適用範囲に限られてはいるが、50cmフロー到達時間を測定することにより、間接的に分離抵抗性を推定できる評価手法となり得るものと考えられる。

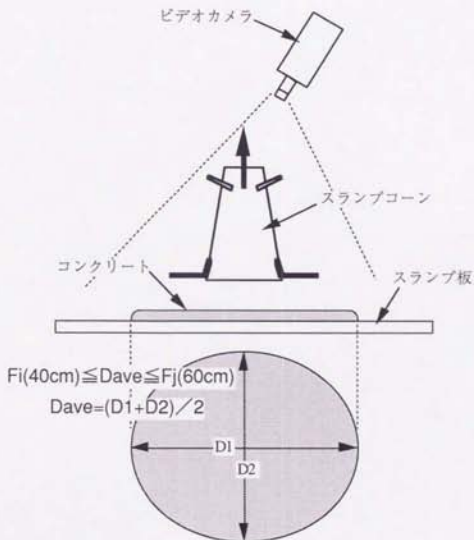


図-5.2.2 変形速度の解析方法

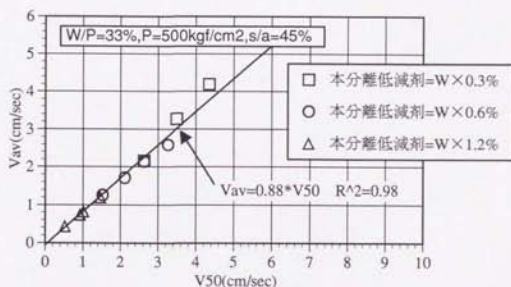


図-5.2.3 フロー40cm～60cm区間での平均変形速度
とフロー50cm変形速度の関係

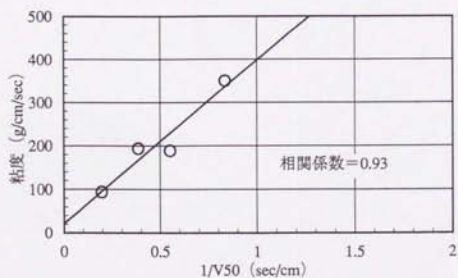


図-5.2.4 50cmフロー変形速度の逆数 ($1/V_{50}$) と見掛け粘度の関係

5.2.2 分離抵抗性評価試験

本試験は粗骨材に対するモルタルの分離抵抗性を相対的に評価するものであり、図-5.2.5に示すように、対象とする超流動コンクリートのモルタルに相当する試料において、粗骨材に見立てた十字の鋼板を一定速度で引上げ、図-5.2.6に示すように引上げ速度と引上げ荷重の関係を測定し、図-5.2.7に示すようにモルタルの見掛けの粘性および降伏値を評価する手法である。また、図-5.2.6に示すように一定速度の下で粗骨材に見立てた鋼板とモルタルとのすべりも含まれていることから、引き上げ荷重としてはその平均値をとっている。したがって、本試験はモルタルのレオロジー定数を評価するものではなく、モルタルと粗骨材との分離抵抗性を相対的に評価する試験と言える。

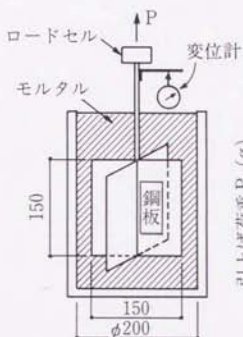


図-5.2.5 分離抵抗性評価試験装置

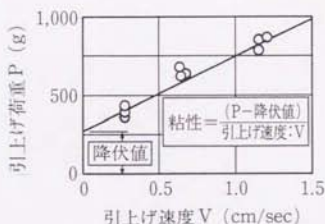


図-5.2.7 分離抵抗値の算定方法

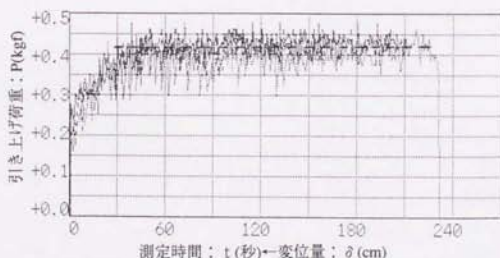


図-5.2.6 引き上げ荷重～引き上げ速度の関係（一例）

5.2.3 自己充填性能評価試験

本試験は、鉄筋が密に配置された部材中に、締固めを行わないでコンクリートの充填が可能であるか否かを評価するものであり、超流動コンクリートのフレッシュコンクリートとしての自己充填性の良否の判定を行う試験である。

試験装置は図-5.2.8に示すように、中央部に純間隔35mmでD-13mm異形棒鋼を配置した障害部を設けたU型充填装置により行うもので、中央部のゲートを閉めた状態で片側にコンクリート試料を詰め、一気にゲートを開け、障害部を通過した後のコンクリートについて、充填高さ：Hと洗い試験による障害部通過後の粗骨材量を測定する手法である。

ここで、本装置の静水位は29.5cmとなることから、コンクリート試料と容器周囲の摩擦を考慮し、良好な超流動コンクリートを用いて障害部の無い状態での充填高さが、少なくとも静水位と同等以上となるように、6kgf (13.5cm×19cm、等分布荷重0.024kgf/cm²) の重りを載せることとした。

充填性の良否の判定は、充填高さ：Hが30cm以上となり、障害部通過後の粗骨材量が通過前と同量となる場合を充填性良好と判定する。

当然のことながら、対象とする部材の形状あるいは配筋条件ごとに障害部の条件と適切な充填高さの設定が異なるものと考えられるが、少なくとも、上記の評価条件を満足する超流動コンクリートは、小沢ら^[1.8]の提案した図-5.2.9に示すような極めて過密な配筋条件を有する部材中においても良好に充填することが可能であり、また、図-5.2.10に示すように高密度配筋部材の中でも特に厳しい配筋条件と考えられるD-51太径鉄筋が純間隔7cmでダブル配筋されている実構造物へ適用した場合でも十分に良好な自己充填性を有することを実証している。

写真-5.2.1は、本試験によって評価した表-5.2.1に示す表面水の変動を要因とした3種類のコンクリートを用いて、図-5.2.9の高密度配筋部材へ打ち込んだ場合の充填状況の一例を示したものである。

分離抵抗性が低く骨材の閉塞により充填高さが24.5cmと評価されたCASE-1配合の場合には下層部でのモルタルの先走りと中央部でのブロッキングが生じ、また、変形性に劣り硬いCASE-3配合の場合には骨材の閉塞は生じないが中央部の段状の配筋により面的な抵抗を受け流動勾配は極めて大きいのが分かる。充填高さ30cm以上の良好な超流動コンクリートと評価されたCASE-2配合の場合には、狭い鉄筋の間隙を良好に通過しながら緩やかな流動勾配の状態で充填して行くのが分かる。

また、充填高さ30cm以上となる本超流動コンクリートを図-5.2.10に示す実構造物に打ち込んだ場合の充填状況は、後述の第6章の写真-6.2.4に示すとおりであり、粗骨材を保持した状態で密実に充填することが確認された。

以上のように、本評価試験による自己充填性の判定が可能な範囲は、ここに示した配筋

条件までの構造物と言えるが、これらは、現状の実構造物における一般的な配筋条件と比べて極めて高密度な配筋条件と言え、本評価試験により高密度配筋部への自己充填性の良否を十分に安全サイドで判定できると考えている。

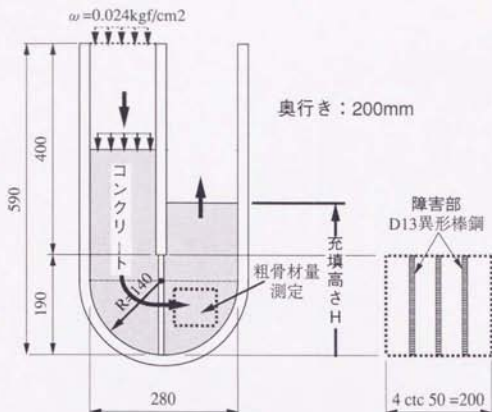


図-5.2.8 自己充填性評価試験装置

表-5.2.1 高密度配筋部材により実証した超流動コンクリートの配合

配合 No.	水結合材 比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			混和剤		評価結果	
			水 W	投入水 調整量	結合材P C+B+F	高性能減 水剤 P×%	分離 低減剤 W×%	スランプ フロー (cm)	充填高さ (cm)
CASE-1	34	48	170	+20	500	1.23	0.6	74	23.5
CASE-2				±0				70	33.5
CASE-3				-15				57	29.0

結合材P：普通ポルトランドセメントC+高炉スラグB+フライアッシュF(C:B:F=4:4:2)

細骨材：大井川+君津混合砂、比重2.59、粗粒率2.77

粗骨材：青梅碎石、比重2.65、粗粒率6.74

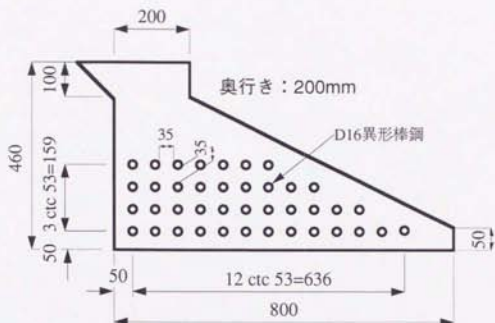


図-5.2.9 検証に用いた高密度配筋試験体^[1.8]

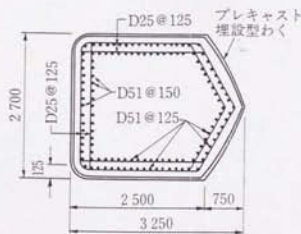


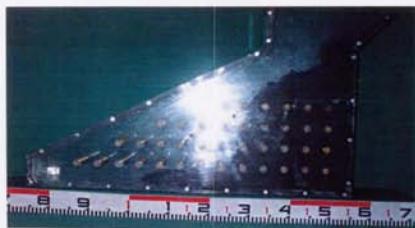
図-5.2.10 実証構造物の配筋状況



CASE-1 (分離抵抗性が小、粗骨材分離により閉塞)
スランプフロー=74cm, 充填高さH=23.5cm



CASE-2 (充填性良好、流動勾配が小)
スランプフロー=70cm, 充填高さH=33.5cm



CASE-3 (変形性が小、流動勾配が大)
スランプフロー=57cm, 充填高さH=29.0cm

写真-5.2.1 充填高さ評価結果と高密度配筋部材の充填状況の一例

5.3 簡易配合選定手法の提案

ここでは、先の5.2項に示した評価手法を用いて、製造プラントにおいて、試験練りによって簡易的に本超流動コンクリートの配合を選定する手法について提案する。

なお、本手法に示すスランブフローおよびフロー時間、自己充填性など配合選定における判定値あるいは単位結合材量や細骨材率の値は、以降に述べる基礎試験の結果をもとに決定したものであり、本研究の超流動コンクリートの適用範囲の基本ともなっている。すなわち、ポルトランドセメントと高炉スラグおよびフライアッシュの3成分系結合材を単位結合材量として 500kg/m^3 程度使用すること、最大寸法 20mm の碎石の使用と細骨材率 45% 程度であり、さらに、本研究対象の分離低減剤の使用である。

以降、これらの検討によって得られた知見を踏まえた配合選定手法について述べるものとする。

5.3.1 所要単位結合材量の選定

(1) 検討配合および使用材料

本超流動コンクリートが良好な自己充填性を有するのに必要な単位結合材量を選定するために、表-5.3.1に示す単位結合材量を要因とする3種類の配合について、その変形性と自己充填性を評価した。

各配合は材料分離を生じない範囲で最も高い充填高さが得られる配合となるように、高性能減水剤の添加量を調整することとした。また、水結合材比 32% を基本として検討したが、水結合材比を一定とする場合には、単位結合材量 400kg/m^3 において明らかに単位水量が不足し、高性能減水剤が過剰に必要な硬いコンクリートとなったことから、この場合については単位水量を若干増やし、水結合材比 34% の条件とした。

また、使用材料の品質は表-5.3.1に示すとおりであり、結合材には普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを $3:3:4$ の比率で混合した3成分系結合材を使用し、粗骨材は最大寸法 20mm の碎石を使用した。また、高性能減水剤はナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物系である。

(2) 検討結果

各単位結合材量において最も高い充填高さとなる高性能減水剤の添加量は、図-5.3.1に示す高性能減水剤の添加量、スランブフロー、充填高さの関係をもとに選定した。図を見ると分かるように、高性能減水剤の添加量の増加にともないスランブフローは大きくなるが、高性能減水剤の添加量が過剰となる場合には、当然のことながら分離抵抗性が低下することから、自ずと充填高さが最大となる適正な高性能減水剤の添加量が存在する。また、単位結合材量の増加にともない、分離を生じない範囲でのスランブフローが大きく

なることが分かる。

図-5.3.2は、これらの結果から得られた最大の充填高さと単位結合材量の関係を示したものである。この結果からも分かるように、充填高さ30cm以上の良好な自己充填性を確保するためには、単位結合材量として500kg/m³程度が必要であると言える。

以上の結果から、本超流動コンクリートにおける所要の単位結合材量としては500kg/m³程度とすることとした。

表-5.3.1 単位結合材量選定における検討配合

水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)		高性能減水剤 P×%	分離低減剤 W×%	評価試験結果		
		水 W	結合材 P			空気量 (%)	スランプフロー (%)	充填高さ (cm)
32	45	160	500	1.7	0.6	4.4	72	36.0
32		144	450	2.1		5.0	66	23.0
34		135	400	4.0		4.9	62	16.0

表-5.3.2 使用材料の品質

材料種別	混合比	(表乾)比重	ブレン値 (cm ² /g)	粗粒率
普通ポルトランドセメント	30	3.16	3270	-
高炉スラグ微粉末	30	2.90	4280	-
フライアッシュ	40	2.24	3140	-
細骨材 (相模川・木更津混合砂)	-	2.57	-	2.80
粗骨材 (八王子砕石；Gmax=20mm)	-	2.69	-	6.45

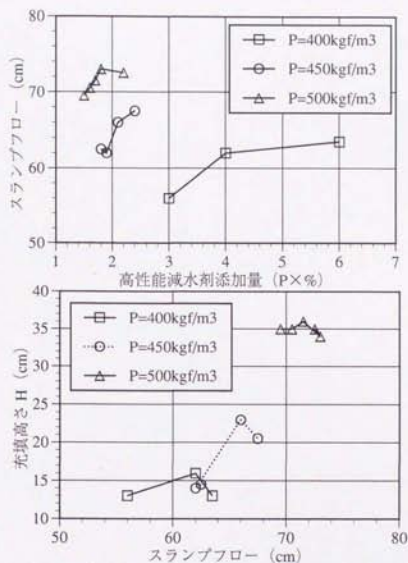


図-5.3.1 充填高さ-スランプフロー-高性能減水剤添加量-の関係

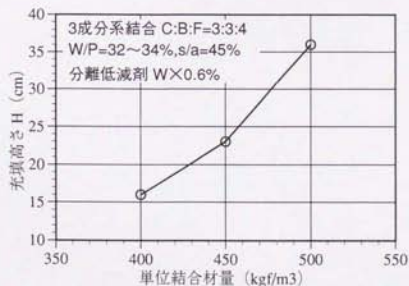


図-5.3.2 単位結合材量と充填高さHの最大値の関係

5.3.2 最適細骨材率の選定

(1) 検討配合および使用材料

本超流動コンクリートが良好な自己充填性を有する適正な細骨材率を選定するために、表-5.3.3に示す細骨材率を要因とする7種類の配合について、スランプフローおよび充填高さ、分離抵抗性を評価した。使用材料の品質は先の5.3.1項に示した単位結合材量に関する検討の場合と同様である。

また、ここでは使用する細骨材率における実績率（空隙率）と充填性との関係を把握するために、JIS A 1104に準拠して行った細骨材と粗骨材を混合した状態での実績率測定結果を表-5.3.4に示す。

(2) 検討結果

図-5.3.3に、各細骨材率におけるスランプフロー、充填高さ、分離抵抗性の関係を示す。また、同図中には細骨材率と実績率から逆算した空隙率の結果も併記する。

図-5.3.3より、細骨材率が35%から46.5%までのスランプフローはほぼ同等となっているが、46.5%を越えると急激にフローが低下する傾向にあるのが分かる。これは、モルタルの見掛けの降伏値あるいは粘度の増大にともなう変形性の低下と言える。

一方、充填性に関しては、細骨材率45%を最大値として42%～46.5%の概ね±2%の範囲で良好な充填性が得られ、この範囲以下の場合には粗骨材の増加による閉塞が生じる。この範囲以上の場合にも充填性の低下が認められるが、これは変形性の低下に起因するものであり充填性の著しい低下は認められない。

なお、充填高さが最大となる細骨材率は、ほぼ空隙率を最少とすると考えられる細骨材率と良く一致している。このことから、本超流動コンクリートの配合を検討するにあたり、まず、空隙率を最少とする細骨材率を求めることは、ほぼ適確な配合選定を行う上での指標となり得ると考えられる。

以上のことから、まず空隙率を最少とする細骨材率を求め、この細骨材率を基本とした配合を選定する手法は推奨されるが、先の結果において細骨材率として45%±2%程度の範囲でほぼ良好な充填高さが得られること、および、細骨材率が小さくなる場合に比べて大きくなる場合の方が充填高さの著しい低下が生じにくいことを考慮し、ここでは、本超流動コンクリートの標準的な細骨材率を45%以上とすることとした。

ただし、ここに選定した細骨材率の範囲は粗骨材の最大寸法が20mmの碎石を前提とするものであり、川砂利や玉石などは対象としていない。

表-5.3.3 最適細骨材率の検討配合および試験結果

配合 No.	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)		高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%	コンクリート 試験結果			分離抵抗性 試験結果	
			水 W	結合材 p ^{注)}			空気量 (%)	スラン プフロ ー (cm)	充填 高さ (cm)	降伏 値 (g)	粘度 (g/cm/sec)
CASE-1	32	35	160	500	1.5	1.0	4.3	67.0	17.5	58	136
CASE-2		39					3.9	68.0	24.4	63	168
CASE-3		42					3.9	67.5	35.2	56	308
CASE-4		45					4.0	68.5	36.3	84	335
CASE-5		46.5					5.1	66.5	35.5	-	-
CASE-6		48					3.6	58.5	32.0	120	411
CASE-7		51					3.7	56.0	32.5	291	754

注) 3成分系結合材 (普通ポルトランドセメントC:高炉スラグB:フライアッシュF=3:3:4)

表-5.3.4 実積率^{注1)} (空隙率) 測定結果

細骨材 率 s/a (%)	総単位 容積重量 (kg/l)	細骨材 ^{注2)}			粗骨材 ^{注2)}			実積率 (%)	空隙率 =100-実積率 (%)
		単位 容積重量 (kg/l)	表乾 比重	吸水率 (%)	単位 容積重量 (kg/l)	表乾 比重	吸水率 (%)		
40	1.916	0.741	2.56	3.51	1.175	2.70	0.89	73.87	26.13
45	1.930	0.842			1.088			74.70	25.30
50	1.918	0.933			0.986			74.57	25.43
55	1.900	1.019			0.881			74.12	25.88

注1) JIS A 1104「骨材の単位容積重量及び実積率試験方法」に準拠。

注2) 細骨材：相模川・木更津混合砂、粗骨材：八王子砕石Gmax=20mm

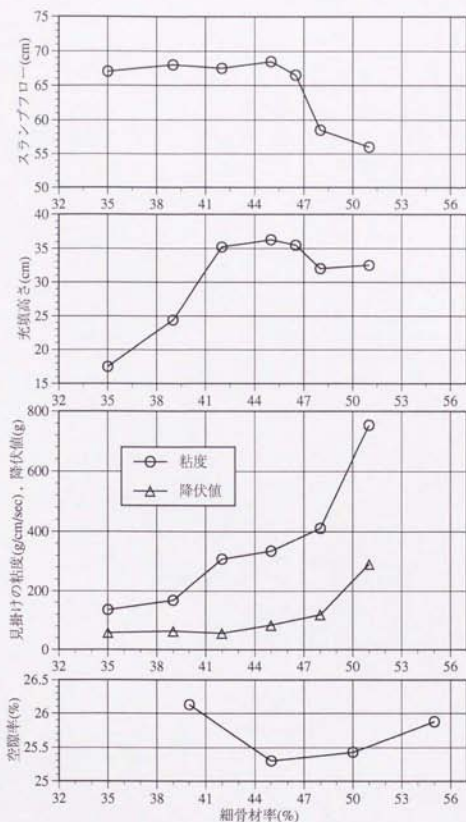


図-5.3.3 細骨材率と各種性能の関係

5.3.3 配合選定および品質管理における指標値の選定

超流動コンクリートの配合を選定するためには、試験練りによって得られたコンクリートが適正な性能を有するものであるか否かを判定するための指標値が必要である。

先の5.2項に述べたように、超流動コンクリートに要求される基本性能は、高変形性と高分離抵抗性、および、最終的な高密度配筋部への自己充填性と言える。したがって、これら3項目において適正な性能を確保しているか否かを定量的に判定することが必要となる。

ここでは、本研究対象の超流動コンクリートに対して、種々の配合要因における変形性および分離抵抗性の基礎データと実工事における管理データに基づいて、同性能の適正範囲を総合的に評価し、この評価結果をもとに、本超流動コンクリートの性能における配合選定での判定値と実工事における品質管理目標値の選定を行うこととした。

(1) 変形性に関する指標値の設定

変形性に関する配合選定での判定値あるいは実工事での品質管理目標値は、本超流動コンクリートにおいて各種の配合要因におけるスランブフローと充填性の関係を総合的に評価することにより、良好な自己充填性を有するスランブフローの適正範囲を求めることとした。

評価対象の配合は、水結合材比32～36%、単位結合材量400～500kg/m³、細骨材率35～51%、細骨材の粗粒率1.89～3.26の範囲について行った。また、本分離低減剤の添加量を0.5～1%（単位水量×重量%）の範囲で添加したコンクリートを対象としている。

したがって、ここに示す適正範囲は、変形性と分離抵抗性に影響する配合要因を総合的に評価したものであり、3成分系結合材を使用し、本分離低減剤を添加した超流動コンクリートを前提としている。

図-5.3.4から図-5.3.7は、各種の配合要因に対するスランブフローと充填高さの関係を示したものである。

先の5.3.1項にも述べたが、良好な自己充填性を有する単位結合材量は500kg/m³程度であり、図-5.3.4において、単位結合材量500kg/m³の場合において30cm以上の良好な充填性が得られるスランブフローの範囲は66cm～73cmと言える。

図-5.3.5において、細骨材の粗粒率の違いに対しては1.89から2.77の範囲で概ね良好な充填性を示し、この場合のスランブフローの範囲としては59～69cmである。

図-5.3.6において、細骨材率の違いに対しては42%～51%の範囲で充填性は良好であり、そのスランブフローの範囲は56cm～69cmと言える。

また、図-5.3.7は表面水の変動量に対する充填高さとの関係を示すが、表面水の変動として-15から+20kg/m³の範囲で、概ねスランブフロー57cm～70cmの範囲において良好な充

充填高さを示している。

図-5.3.8は、これらの各種要因における評価結果をもとに、充填高さが30cm以上となるものについて、まとめたものである。

高密度配筋部への自己充填性は変形性と分離抵抗性との両性能の複合効果によって決ることから、変形性の指標であるスランブフローだけでは的確な判定できないが、図-5.3.8に示す基礎データおよび現在までに行った各種のスランブフローと充填高さの関係から、3成分系結合材を単位結合材量として 500kg/m^3 程度を使用し、細骨材率 $s/a=45\%$ 程度の本超流動コンクリートの適用範囲について、良好な充填高さを得ることのできるスランブフローは平均的に60cm～70cmの範囲にあり、特に65cm～70cmの範囲において良好な充填性が得られるものと言える。

このことから、本超流動コンクリートにおける施工管理におけるスランブフローの品質管理目標値は60cm～70cmの範囲とし、また、配合選定においては本超流動コンクリートの基準となる極力最適な配合を選定すること考慮して、特に良好な充填高さが見られるスランブフローとして65cm～70cmの範囲を判定値とした。

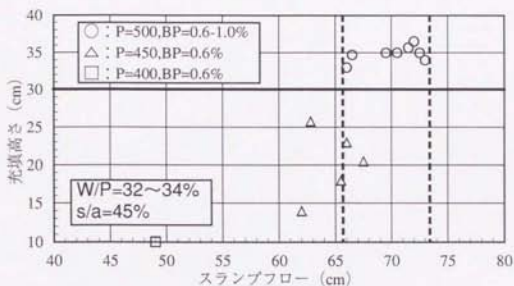


図-5.3.4 スランプフローと充填高さの関係
(単位結合材量の違い)

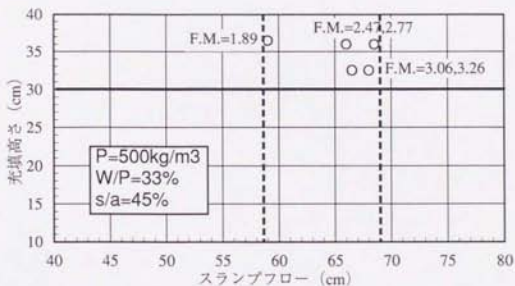


図-5.3.5 スランプフローと充填高さの関係
(粗粒率の違い)

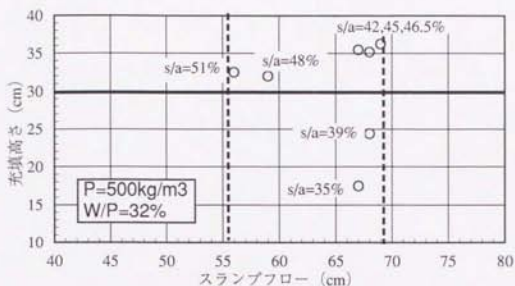


図-5.3.6 スランプフローと充填高さの関係
(細骨材率の違い)

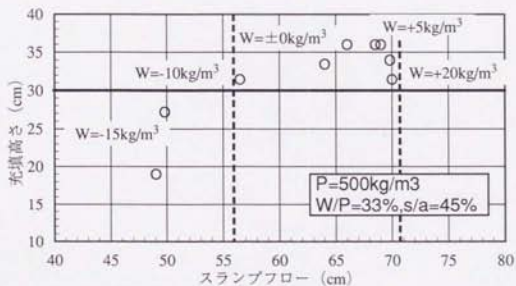


図-5.3.7 スランプフローと充填高さの関係
(表面水変動量の違い)

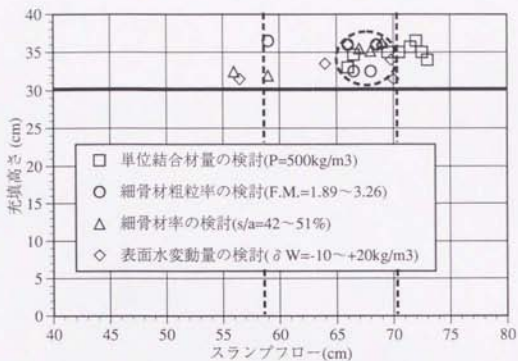


図-5.3.8 各種要因におけるスランプフローと充填高さの関係

(2) 分離抵抗性に関する指標値の設定

図-5.3.9は、細骨材率および表面水変動量の違いにおいて行った、モルタルの見掛けの降伏値と粘性の関係を一例として示したものである。

わずかなデータではあるが、良好な自己充填性を有するモルタルの分離抵抗性は、降伏値および粘性とがバランスする適正な範囲に集合する傾向が認められ、見掛け粘度として100g/cm/sec～500g/cm/secの範囲で、これに対応する降伏値として50g～120gの範囲の場合に良好な充填性が得られている。したがって、良好な自己充填性を有する本超流動コンクリートのモルタルにおいて、粘性と降伏値との関係から分離抵抗性としての適正範囲を求めることが可能であると考えられる。

以上のように、粘度と降伏値との関係から求めた適正範囲を目標にして分離抵抗性の判定を行うことは適正配合を精度良く選定する上で有効であると考えられるが、ここに提案した分離抵抗性の評価試験は比較的複雑な手順を踏み即座に対応できないことから、試験練りによる配合選定への適用、および、特に実施工における品質管理への適用を考えるとその実用性は乏しい。

そこで、評価の簡略化を図るために、スランブフロー50cm到達時間(T50)を便宜的に分離抵抗性を代用する値とする。この測定は先の5.2項に述べたように、基本的には施工における速やかな充填性を有するか否かを評価するものではあるが、本超流動コンクリートの適用範囲の配合であれば、分離抵抗性の指標であるモルタル粘度との相関が認められることを前提としたものであり、現時点では、実工事での管理結果からもとめた経験値ではあるが5秒～10秒を品質管理の目標値および配合選定における適正配合の判定に用いることとする。

なお、測定方法は、スランブフロー測定の際に予めスランブ板に記した50cmの目盛りをコンクリートが通過する時点を目視により判断し、その時間をストップウォッチにより測定する手法である。

図-5.3.10は、本手法による測定結果の一例として、数種の配合を対象に細骨材表面水の変動に対して行ったスランブフロー50cm到達時間(T50)と充填高さの関係を示したものである。フロー50cm到達時間として5秒～10秒の範囲において概ね充填高さ30cm以上の良好な自己充填性が得られているのが分かる。



図-5.3.9 自己充填性におけるモルタルの見掛け粘度と降伏値の関係

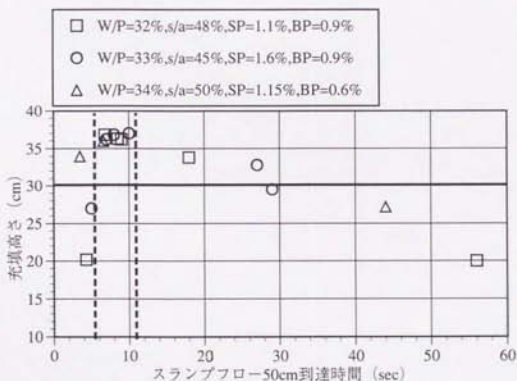


図-5.3.10 スランブフロー50cm到達時間と充填高さの関係

5.3.4 簡易配合選定手法

ここでは本研究対象の超流動コンクリートにおける簡易的な配合選定手法について提案する。本手法は配合設計を行うのではなく、図-5.3.11のフローにしたがって試験練りを行ない、本超流動コンクリートの標準的な配合を選定する手法である。

いずれにせよ試験練りを行うこと自体は従来と変りはないが、ここに提案する手法は、従来のコンクリートとは異なる性状を有する本超流動コンクリートを、特に専門的な知識を持たずとも比較的容易かつ少ないバッチ数で配合選定が行えることを目指したものである。

本手法は、これまで述べてきた基礎試験の結果を踏まえており、本超流動コンクリートの適用範囲である、普通ポルトランドセメント、高炉スラグおよびフライアッシュの3成分系結合材を単位結合材量として 500kg/m^3 程度を使用し、また、細骨材率として45%程度とし、最大寸法 20mm の碎石を使用することを基本条件としている。

したがって、本配合選定手法は上記の適用範囲に限られている点において十分に汎用的であるとは言えないが、適用範囲を絞りこむことで比較的容易に配合を選定することが可能であると考えられる。以下に本配合選定手法の詳細について述べる。

(1) 初期値の設定および配合選定における前提条件

初期設定値および得られた配合の良否の判定値は表-5.3.5に示すとおりであり、基本的にこの初期値から開始し、図-5.3.11に示すフローにしたがって試験練りを行う。ここで使用する高性能減水剤はナフタレンスルホン酸塩系を前提としたものである。

なお、本配合選定手法における前提条件は以下のとおりである。

1) 本分離低減剤の添加量は経済性を考慮して $1\sim 2\text{kg/m}^3$ の範囲を目安とし、その添加量の上限値は 2kg/m^3 以下とする。また、耐久性の面を考慮し、単位結合材量 500kg/m^3 における単位水量の上限値を 180kg/m^3 とするか、あるいは、水結合材比の上限値を36%とする。

本超流動コンクリートの適用範囲において、分離低減剤が 2kg/m^3 以上となること、単位水量が 180kg/m^3 を越える、あるいは水結合材比が36%を越えることは、既往の実績から判断すると極めて少ない。このような場合には、使用材料の品質がJISや土木学会の規格値を満足しているか否かを調査することが必要であり、規格値を満足していない場合には材料を変更するが、再検査により規格品であった場合には根本的に初期値の設定から配合を見直す必要がある。

2) 本配合選定手法は所要の自己充填性を有する配合を選定することが主目的であるが、これとは別に、施工条件あるいは環境条件を考慮して必要に応じて以下の条件設定を行う。

i) 早期強度発現性が要求される場合には、3成分系結合材における普通ポルトランドセメントの混合比を大きくする。これについては、先の第4章4.3.2項に示した混合比を目安とする。

ii) 特に耐凍害性が要求される場合には、AE調整剤によって5%以上の空気量を混入する。

iii) スランブフローの経時変化が大きい場合にはAE減水剤の添加量を増やし調整する。

これは、AE減水剤を適量添加することによって、スランブフローの経時ロスを抑制することが可能であることによるものであり、本件については、後述の5.4.2項において改めて詳述する。

(2) 配合調整手法と配合選定

図-5.3.11に示す配合選定フローにおいて、各々の判定試験によって得られた結果に対して表-5.3.6に示す要領にしたがって配合調整を行う。

表-5.3.6は各判定試験結果の組み合わせとして想定される状況に対して具体的な調整項目を設定したものであり、調整項目を極力簡素化するために高性能減水剤の添加量の調整を主体としている。したがって、場合によっては高性能減水剤の添加量を調整するのみでは成立しないこともあり得ることから、より多くの試験練りのデータが集積された段階でより効率的な調整項目について再度見直す必要はある。

さらに、図-5.3.11に示すように、以上の配合調整によっていずれの判定値も満足した配合が得られた段階で、その製造プラントの表面水の変動幅を考慮した量の投入水を増減させた場合において所要の自己充填性を確保するか否かを改めて評価し、判定値を満足した場合を最終配合とすることによって、より確実な配合を選定できるものと言える。

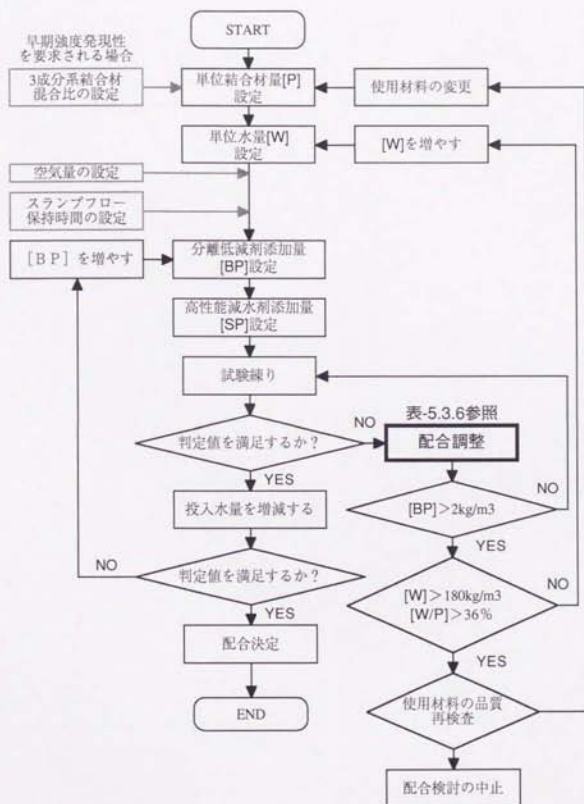


図-5.3.11 本超流動コンクリートの配合選定フロー

表-5.3.5 配合調整における初期値および判定値

種別	初期値	判定値
[P] 単位結合材量	500 kg/m ³	スランブフロー=65~70cm 50cmフロー所要時間=5~10秒
[W] 単位水量	170 kg/m ³	
[B P] 分離低減剤添加量	1.0 kg/m ³	
[S P] 高性能減水剤添加量	[P] × 1.3容量%	U形充填高さ：H ≥ 30cm

表-5.3.6 配合調整手法

分類	判定結果			性状	調整項目	
	スランブフロー (cm)	50cmフロー 時間 ^{注1)}	充填高さ (cm)		分離 低減剤	高性能 減水剤
決定	○65~70cm	○5~10秒以内	○30cm以上	良好	-	-
1	×70cm以上	×5秒以下	×30cm以下	分離	-	減量
2	×70cm以上	×5秒以下	○30cm以上	敏感 ^{注2)}	-	減量
3	×70cm以上	○5~10秒以内	×30cm以下	分離	-	減量
4	×70cm以上	○5~10秒以内	○30cm以上	敏感 ^{注2)}	-	減量
5	○65~70cm	×5秒以下	×30cm以下	分離	-	減量
6	○65~70cm	×5秒以下	○30cm以上	敏感 ^{注2)}	増量	-
7	×65cm以下	×10秒以上	×30cm以下	硬過ぎ	-	増量
8	×65cm以下	×10秒以上	○30cm以上	硬過ぎ	-	増量
9	×65cm以下	○5~10秒以内	×30cm以下	硬過ぎ	-	増量
10	×65cm以下	○5~10秒以内	○30cm以上	硬過ぎ	-	増量
11	○65~70cm	×10秒以上	×30cm以下	硬過ぎ	-	増量
12	○65~70cm	×10秒以上	○30cm以上	硬過ぎ	減量	-
13 ^{注3)}	13-1	○65~70cm	○5~10秒以内	×30cm以下	分離	増量
	13-2	○65~70cm	○5~10秒以内	×30cm以下	分離	-

注1) 50cmフロー時間の測定：スランブフロー50cm以下の場合は10秒以上とする。

注2) 敏感とは材料分離しやすい配合あるいは充填後の粗骨材量が少ないことを示す。

注3) 13-1：分離低減剤が2kg/m³以下の場合、13-2：分離低減剤が2kg/m³の場合

5.4 製造・運搬にともなうフレッシュコンクリートの品質安定性

比較的粉体量が多く水結合材比の小さいコンクリートとして、高強度コンクリートが挙げられるが、その製造にあたっては、ミキサーにより均一に分散混合するための検討が多くなされている[5.1][5.2]。一般的には、空練りを十分に行い、また、練り混ぜ時間を通常のコンクリートと比べて長くする方法により対応されている。

本超流動コンクリートにおいても、3成分系結合材を単位結合材量として 500kg/m^3 程度使用し、水結合材比が34%程度であることから、高強度コンクリートと同様に一般のコンクリートと比べて単位結合材量が比較的多く水結合材比が小さい特徴を有する。したがって、均一に分散混合するためにはミキサーの練り混ぜ時間を長くするなどの対応が必要と考えられる。

また、一般のコンクリートにおいて運搬後のスランプロスが問題となり夏期施工の際には遅延型の混和剤を使用するなどの対応がなされているが、特に、超流動コンクリートにおいてはその機能上、運搬にともなう品質の変化を把握し、締固め不要の自己充填性を低下させるようなスランプフローの経時ロスを生じる場合には何らかの対策を講じる必要がある。

ここでは、本超流動コンクリートを製造するにあたり、所要の品質を確保するために必要な練り混ぜ条件と運搬にともなう品質変化を確認するために行った検証試験と、さらに、運搬による品質変化が生じた場合の対応策について述べることにする。

5.4.1 練り混ぜ時間と練り混ぜ量に関する検証

ここでは、練り混ぜ時間および練り混ぜ量と本超流動コンクリートの練り上がり時の品質について、実際の製造プラントにおいて実施した検証結果について述べる。なお、使用したミキサーは強制2軸ミキサーであり、その最大練り混ぜ容量は 3m^3 である。

まず、本超流動コンクリートの製造にあたって、ミキサーの消費電力計の読み値が安定するまでに要する時間を事前に調査し、安定する時間として60秒～75秒を要することを確認した。以降の検討は、練り混ぜ時間として75秒を基本としたものである。

図-5.4.1は、1バッチ 2m^3 で練り混ぜた場合の練り混ぜ時間と練り上がり時のフレッシュコンクリートの品質を示す。練り混ぜ時間が75秒以上の場合には、練り混ぜ時間の差によるスランプフローの違いはなくほぼ同等であるが、空気量については一般のコンクリートと同様[5.3]に練り混ぜ時間の増加にともなって減少する傾向にある。

この結果から、本超流動コンクリートの所要練り混ぜ時間は消費電力計が安定する時間である75秒とすれば十分であり、それ以上の練り混ぜを行っても、スランプフローの変化は認められず、空気量が減少するのみであることが確認された。

図-5.4.2は練混ぜ時間75秒における練混ぜ量とフレッシュコンクリートの品質の関係を示す。

1バッチの練混ぜ量をミキサーの最大容量である 3m^3 とした場合には、スランブフロー値として2cm程の僅かな増加が認められるが、特に練り上がり時の品質が異なるような差とは考えられない。

また、空気量は練混ぜ量の増加にともない減少する傾向にある。当然のことながら、ミキサーの消費電力計の最大値は練混ぜ量の増加にともない大きくなるが、安定した時点においては、練り混ぜ量による差は僅かである。このことから、練り混ぜ量と練り上がり時における本超流動コンクリートの品質の違いは空気量の減少が主体であり、スランブフローには大きな影響を及ぼさないとと言える。

図-5.4.3は、1バッチの練混ぜ量を 2m^3 とした場合の練り上がり時点のスランブフローと練り混ぜ中の消費電力の関係を示す。スランブフローとして6cm程度の差に対して、電力計の読み値の差は最大値あるいは安定時の両者ともに2~3Ampであり、80Amp.あるいは50Amp.の読み値に対して非常に小さく、電力計読み値の変動範囲内に含まれてしまうことが分かった。したがって、本超流動コンクリートのような高スランブフローの範囲では、一般的な製造プラントに常設された電流計ではスランブフローとして6cm程度の違いを明確に判定することはできないものと言える。

いずれにせよ、本超流動コンクリートの強制2軸ミキサーにおける所要の練り混ぜ時間として75秒程度とすれば十分であり、この練り混ぜ時間は電力計の読み値が安定する時間と同等であることが確認された。

なお、当然のことながら使用するミキサーの練り混ぜ性能によって所要の練り混ぜ時間は異なることから、基本的には、対象とする製造プラントごとに適正な練り混ぜ時間を事前に確認する必要がある。

しかしながら、ここで使用した強制2軸ミキサーは標準的な容量と練り混ぜ能力を有するものであり、本試験によって得られた結果は、一般的な製造プラントにおける標準的な練り混ぜ時間と考えられる。これまで実施した適用例として後述の第6章で改めて述べるが、殆どの工事において、練り混ぜ時間として75秒であれば安定した本超流動コンクリートを製造できることを確認している。

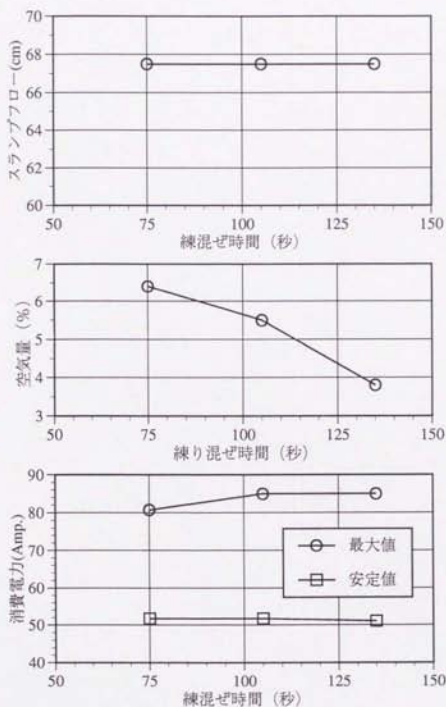


図-5.4.1 練り混ぜ時間の影響 (1バッチ当り2m3練り)

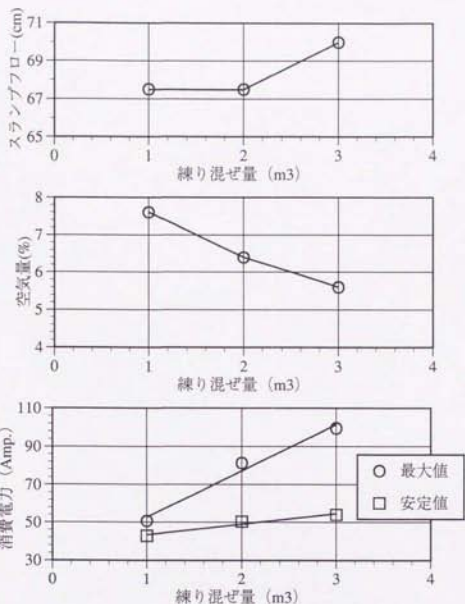


図-5.4.2 練り混ぜ量と消費電力の関係 (1バッチあたり75秒練り)

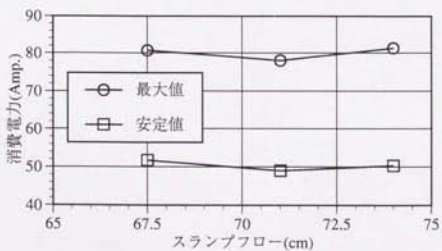


図-5.4.3 スランプフローと消費電力の関係

5.4.2 運搬にともなうフレッシュコンクリートの品質安定性の検証

超流動コンクリートは高変形性と高分離抵抗性との複合効果によって締固め不要の自己充填性が付与されることから、運搬にともないスランプフローが大きく低下するような場合には、その自己充填性を著しく損なうことになる。

本超流動コンクリートは、普通ポルトランドセメントとともに高炉スラグおよびフライアッシュの水和反応の遅い結合材を併用している点においてはスランプフローのロスが生じにくいと言えるが、水結合材比が小さく高性能減水剤を多く使用している点においてスランプフローの低下を生じる可能性を含んでいる。

ここでは、各種の実工事における品質管理データをもとに、本超流動コンクリートの運搬にともなう品質の変化について検討を加え、さらに、品質変化が生じる場合の対応策について述べる。

(1) 運搬にともなう品質変化

運搬時間および施工時期の異なる数種の実工事において行った、出荷時から荷卸し時までの運搬にともなう品質変化を図-5.4.4から図-5.4.11に示す。

ここで、各工事に適用した超流動コンクリートの配合は表-5.4.1に示すとおりであり、A、B、C配合はほぼ同等の配合であり、D配合は普通ポルトランドセメントの混合比が他のものに比べて多い。なお、各配合には高性能減水剤の添加とは別に、リグニンスルホン酸系のAE減水剤を添加している。AE減水剤の添加に関する検討は改めて詳述するが、AE減水剤を添加することによりスランプフローの経時ロスを低減することが可能であり、本超流動コンクリートにおいてはAE減水剤を併用することを基本としている。

A配合を適用した工事は夏期の施工であり、その運搬時間は平均30分間である。B配合は春から秋にかけての工事であり、運搬時間は平均60分間と最も長時間を要した。C配合は冬期施工で運搬時間は20分間であり、D配合は春から秋にかけて工事を行い運搬時間は20分間である。なお、いずれもトラックアジテータ車により運搬した。

図-5.4.4および図-5.4.5において、A配合における運搬後のスランプフローのロスは平均的に2cm程度あり、出荷時のスランプフロー値の大きさに因らず、出荷時のスランプフロー65cmから75cmの範囲で荷卸し時におけるロスはほぼ同等と言える。空気量については運搬により2%程度のロスが認められ、これも、出荷時の空気量に因らずほぼ同等のロスを生じている。

図-5.4.6および図-5.4.7において、B配合における運搬によるスランプフローのロスは平均的に7cm～4cmあり、運搬時間が60分間と長いことによりロスが大きくなる傾向にある。また、出荷時のスランプフローが小さいほど荷卸し時のロスは大きくなる傾向が認められる。なお、夏期施工の場合に特にスランプフローのロスが大きくなるような傾向はなく、平温時と同程度であると言える。また、空気量のロスは1～2%程度であり、出荷時の空気

量が大きいほど荷卸し時のロスが大きい傾向が認められる。

図-5.4.8および図-5.4.9において、C配合は運搬時間が20分程度と短いことからスランブフローのロスは平均的に1cm程度と他の場合と比較して小さく、また、空気量については1~1.5%程度のロスを生じる傾向にある。

一般に早期強度発現性の高いものほど運搬後のロスが大きくなる傾向にあるが、図-5.4.10および図-5.4.11において、D配合は普通ポルトランドセメントの混合比が大きいが他の配合と比べてスランブフローのロスが大きくなるような傾向は認められず、むしろ、本工事の場合にはスランブフローのロスは殆ど生じていない結果が得られた。これは、運搬時間が20分程度と短時間であったこともあるが、同じ運搬時間であるC配合の場合には多少のロスが認められたことから考えると、使用する結合材の品質による影響とも考えられる。

空気量については、他の場合と同様に1%程度のロスが生じている。また、平温あるいは夏期における差は認められなかった。

以上の品質管理の結果から、本超流動コンクリートの運搬にともなうスランブフローのロスは、一般に言われているように運搬時間が長いほど大きくなり、運搬時間60分間で概ね4cm~7cm、運搬時間30分以内の場合に2cm程度のロスが見込まれる。また、運搬時間が長い場合には、出荷時のスランブフローが小さいほど荷卸し時点でのロスも大きくなる傾向にあることが明らかとなった。

なお、空気量については運搬時間あるいは施工時期による差は僅かであり、運搬にともない平均的に1%~2%のロスが生じるものと言え、一般的に運搬や打ち込みによってエントレインドエアが減少する傾向^[5.3]と同様の結果が得られた。したがって、本超流動コンクリートにおいて、荷卸し時での所要の空気量を確保する対策は、運搬後のロスを見込んで練り混ぜ時に空気量を適量に調整する通常のコンクリートと同様の手法とし、AE調整剤により空気量を1%~2%程度多くすることで対応することとする。

表-5.4.1 各実工事に適用した超流動コンクリートの配合

配合 種別	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤		
			w	結合材 P ^{注)}			細骨材	粗骨材	AE 減水剤	高性能 減水剤	分離 低減剤
				C	B	F					
A	36	45	180	180	220	100	724	882			
B	36	43.5	170	189	189	95	691	965			
C	34	45	170	180	220	100	714	902			
D	34	45	170	240	160	100	717	907			

注) 結合材 C:普通ポルトランドセメント B:高炉スラグ F:フライアッシュ

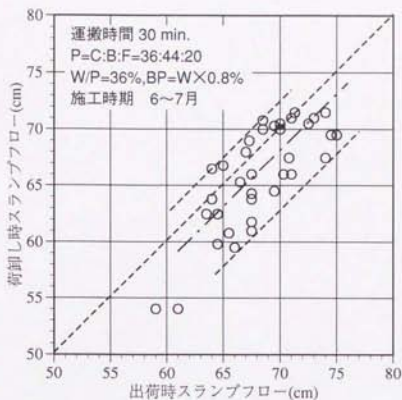


図-5.4.4 運搬によるスランプフローの変化 (A配合-運搬時間30分)

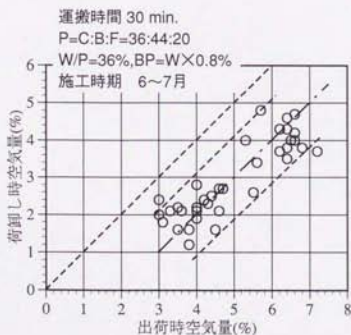


図-5.4.5 運搬による空気量の変化 (A配合-運搬時間30分)

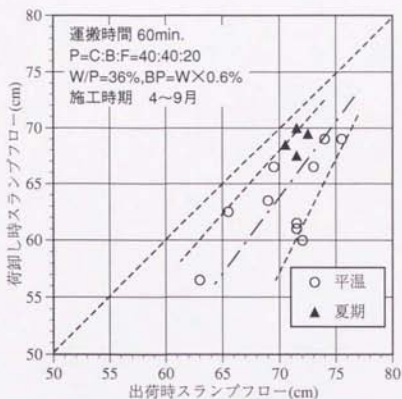


図-5.4.6 運搬によるスランプフローの変化 (B配合-運搬時間60分)

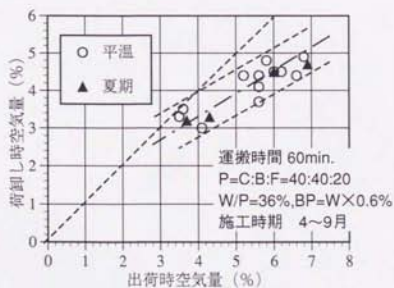


図-5.4.7 運搬による空気量の変化 (B配合-運搬時間60分)

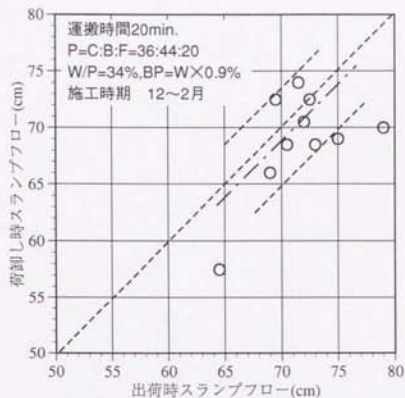


図-5.4.8 運搬によるスランプフローの変化
 (C配合・運搬時間20分・冬期施工)

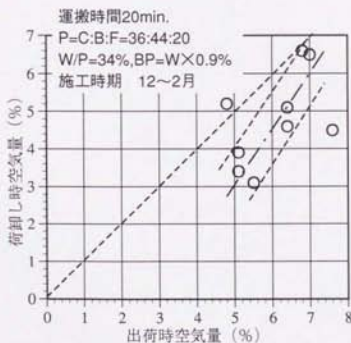


図-5.4.9 運搬による空気量の変化
 (C配合・運搬時間20分・冬期施工)

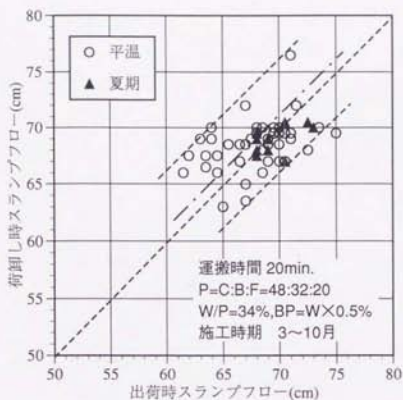


図-5.4.10 運搬によるスランブフローの変化 (D配合-運搬時間20分)

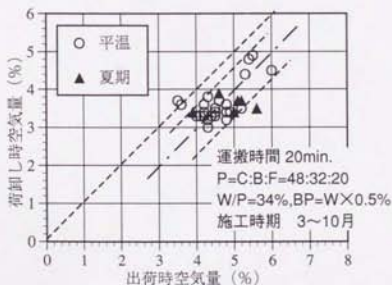


図-5.4.11 運搬による空気量の変化 (D配合-運搬時間20分)

(2) スランブフローの経時変化と対策

先の検証結果から、運搬にともなうスランブフローの経時ロス、運搬時間30分以内であれば平均2cm程度とわずかであるが、運搬時間が1時間を超えるような場合には7cm～4cmと比較的大きなロスを生じることが明らかになった。

ここで、先にも述べたように、これらの工事に適用した配合には、混和剤として高性能減水剤および本分離低減剤とともにAE減水剤（リグニンスルホン酸化合物系ポリオール複合体）を併用している。このAE減水剤を使用する理由は、本来の使用法であるエントレインドエアーの連行および減水性の付与よりは、むしろ、中川^[5,4]によって明らかにされているAE減水剤を添加することによるスランブフローのロス低減を主目的としている。

本超流動コンクリートにおいては、スランブフローのロスが問題となる場合の対策として、標準的には上記のようにAE減水剤を併用する手法をとり、本手法では改善されない場合あるいは不測の事態により運搬に長時間を要した場合に対する補助的な手段として現地で高性能減水剤を後添加し再流動化する手法により対応する。

以下に、本超流動コンクリートにおける、AE減水剤を添加した場合のスランブフローのロス低減効果について述べる。

表-5.4.2に示す配合において行ったAE減水剤添加量の違いによるスランブフロー経時変化の関係を図-5.4.12に示す。

AE減水剤を添加しない場合には、時間の経過にともない、ほぼ直線的にスランブフローのロスが生じるが、AE減水剤の添加量が増加するにつれてスランブフローのロスが小さくなるのが分かる。

また、表-5.4.3に示す配合において、練り上がり温度が低い場合のスランブフロー経時変化を確認するため、練り上がり温度12℃の条件下で行った結果を図-5.4.13に示す。

AE減水剤を添加しない場合にはスランブフローのロスが大きいが、AE減水剤の添加量の増加にともないロスは減少しているのがわかる。

以上のように、スランブフローのロスに対しては、AE減水剤の添加量を増やすことで対応することが可能であり、現状の製造プラントの製造システムの範囲で行うことができる。ただし、表-5.4.3に示すようにAE減水剤の添加量にともない凝結硬化時間は大幅に遅延する場合もあり、スランブフローのロスの低減のみを考慮してAE減水剤を多量に添加することは凝結硬化の面で問題となる。

したがって、当然のことではあるが、試験練りによって適切なAE減水剤の添加量を選定することが必要と言える。

なお、実際の施工を考慮すると、所要のスランブフロー保持時間としては運搬および打ち込みを合わせて平均的に1時間程度であることから、本実用化システムにおいては先の図-5.4.12および図-5.4.13より1時間程度は良好な抑制効果を有すると考えられる添加量と

して単位結合材量の0.15%を標準添加量と設定している。

表-5.4.2 AE減水剤添加によるスランブフローロス抑制効果に関する検討配合

水 W kg/m ³	結合材 p ^{注1)} kg/m ³			s/a (%)	高性能 減水剤 P*%	AE 減水剤 P*%	分離 低減剤 W*%	空気量 (%)	備考
	C	B	F						
165	150	150	200	45	1.45	0	0.90	4.9	温度 条件 20℃
						0.15		3.8	
						0.25		4.6	
170	180	220	100	45	1.45	0	0.90	5.0	温度 条件 12℃
					1.37	0.075		4.8	
					1.35	0.15		6.0	
					1.30	0.25		4.7	

注1) C：普通ポルトランドセメント B：高炉スラグ F：フライアッシュ

表-5.4.3 AE減水剤添加量と凝結時間の一例

配合 No.	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤			凝結時間 (hour)	
			W	結合材 p ^{注1)}			高性能 減水剤 P*%	分離 低減剤 W*%	AE 減水剤 P*%	始発	終結
				C	B	F					
CASE-1	33	45	165	150	150	200	1.45	0.9	0	16.0	20.5
CASE-2									0.15	29.5	35.6
CASE-3									0.3	46.5	51.8

注1) C：普通ポルトランドセメント B：高炉スラグ F：フライアッシュ

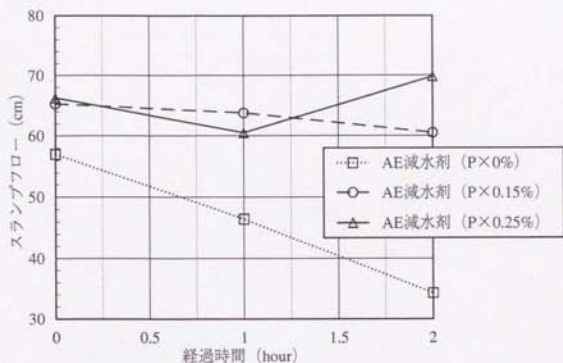


図-5.4.12 スランプフローの経時変化

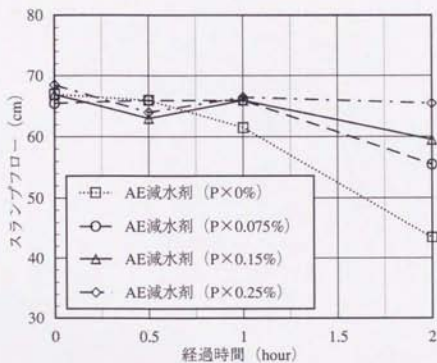


図-5.4.13 AE減水剤添加量とスランプフローの経時変化の関係

5.5 ポンプ圧送性に関する検証

本超流動コンクリートの打設方法としては、ポンプ圧送が主体となると言える。この場合に、本超流動コンクリートは水結合材比が小さく比較的多量の単位結合材量を使用する点と本研究対象における分離低減剤を使用していることにより従来のコンクリートに比べて比較的高粘性が高いことからポンプ圧送圧が高くなる要因を有している。

しかしながら、その高分離抵抗性と骨材どうしの噛み合いが殆どないことにより、従来のコンクリートにおける圧送性の低下や管内閉塞の主要因であった、曲り管やテーパ管を流動する際のセン断摩擦抵抗が極めて小さい点において、ポンプ圧送性を向上させる特長を合わせ持った性質を有すると考えられる。

ここでは、各種のポンプ圧送における実証データをもとに、本超流動コンクリートのポンプ圧送性を明らかにし、本実用化システムにおけるポンプ圧送の適用条件を示すものとする。

5.5.1 管内圧送圧に関する検証

一般に、ポンプ車の機種選定のために、ポンプの圧送負荷 P を推定する場合に用いられる圧送負荷計算式すなわち水平換算距離に基づいた圧送負荷は(5.3)式より算出される[5.5]。

$$P = KL + 3KM + 2KN + 2KT + WH/10 \quad \cdots (5.3)$$

P : 圧送負荷 (kgf/cm²)

K : 水平管 1 m 当たりの管内圧力損失 (kgf/cm²/m) [125A=0.1, 100A=0.12]

L : 配管の実長 (m) [125Aで4m, 100Aで59m]

W : コンクリートの単位容積重量 (γ/m³)

H : 圧送高さ (m)

M : ベント管の長さ (m) [125Aで3m, 100Aで1m]

N : フレキシブルホースの長さ (m) [100Aを8m]

T : テーパ管の長さ (m) [125Aを1m]

上式は、ベント管やテーパ管などのコンクリートの圧送障害となる部分には、一定の安全率を乗じて水平距離換算を行い、見掛け上、圧送距離を長く見積もる手法である。

先にも述べたように、超流動コンクリートの場合には粘性が高いことによる管内圧力損失は通常のコンクリートと比べて大きくなるものと考えられるが、ここに示されたような圧送障害に対する考慮は必要とせず、管内圧力損失と配管の実長とを検討することで対応できるものと考えられる。

ここでは、配管条件のこととなる2種類のポンプ圧送における実証データを分析し、本超流動コンクリートのポンプ圧送性を検証することとする。

(1) 配管条件および管内圧力測定結果

図-5.5.1に示す5B管を主体とするブーム付きコンクリートポンプ車の配管条件において、ポンプ車吐出口近傍（P1）およびフレキシブルホース手前（P2）の2ヶ所に圧力計を取り付け、本超流動コンクリートの管内圧力を測定した。

また、図-5.5.2に示す5B管および4B管のポンプ配管状況において、ポンプ車吐出口近傍（P1）および中央部の5B管から4B管に変る手前（P2）の2ヶ所に圧力計を取り付け、管内圧力を測定した。

両者の配管条件において圧送した本超流動コンクリートの配合は表-5.5.1に示すとおりであり、圧送時のフレッシュコンクリートの品質は表-5.5.2に示すとおりであった。なお、ブーム付きコンクリートポンプ車における圧送は吐出量 $29\text{m}^3 \sim 75\text{m}^3$ の範囲であり、また、ポンプ配管における圧送は吐出量 35m^3 および 46m^3 で行ったが、吐出量 35m^3 の際の超流動コンクリートにおいては、運搬後にスランプフローのロスが認められたため、現地で再流動化を行なった上で圧送した。

ブーム付きコンクリートポンプ車打設およびポンプ配管打設の両者について、各吐出量とP1～P2間の圧力差を図-5.5.3に示す。

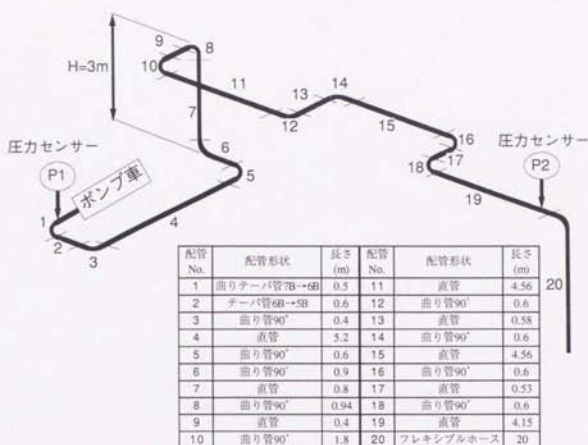


図-5.5.1 ブーム付きコンクリートポンプ車における配管状況

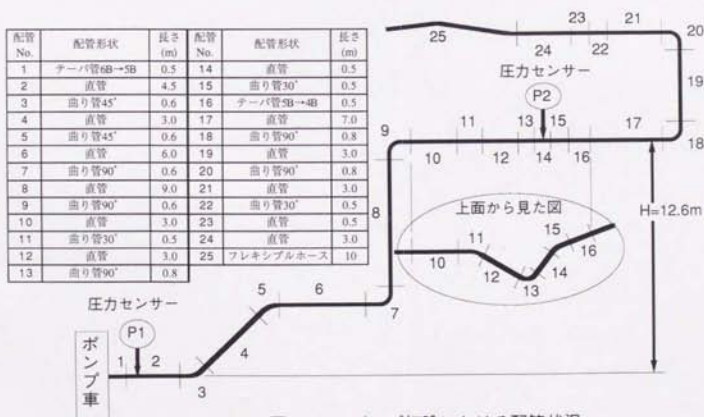


図-5.5.2 ポンプ打設における配管状況

表-5.5.1 超流動コンクリートの配合

種別	W/P (%)	s/a (%)	単位量 kg/m^3				混和剤		
			水 W	結合材 P注)	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 P×%	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
ブーム 打設	36	46	180	500	724	882	0.15	1.4	0.83
ポンプ 配管打設	35	45	170	482	731	920	0.25	1.55	1.0

注) 結合材: 普通ポルトランドセメント(C)、高炉スラグ(B)、フライアッシュ(F)3成分系
 ブーム打設→C:B:F=34:46:20 ポンプ打設→C:B:F=40:40:20

表-5.5.2 圧送時のフレッシュコンクリートの品質

種別	吐出量 (m^3/hr)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	打込み温度 ($^{\circ}\text{C}$)
ブーム打設	29~75	61~73.5 平均 69	1.9~2.7 平均 2.3	27.5~29.5 平均 28.5
ポンプ 配管打設	35	再流動化→73,73.5 平均 73	1.7,2.9 平均 2.3	27.0,27.0 平均 27.0
	46	64,72 平均 68	2.5,4.5 平均 3.5	26.0,26.5 平均 26.0

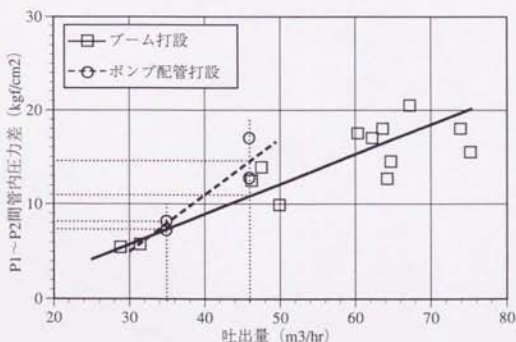


図-5.5.3 P1~P2間の管内圧力測定結果

(2) ポンプ圧送性の検証

両者の配管条件において、本超流動コンクリートのポンプ圧送性を検証することとする。圧送性の検討は、先の(5.3)式を基本として直管、曲り管および圧送高さを考慮した(5.4)式において、曲り管の安全率Aを算出することとする。ここで、ブーム付きコンクリートポンプ車については曲りターバ管(7B→6B)およびターバ管(6B→5B)がポンプ車吐出口近傍に配置されているが、管径が太いことと評価が繁雑となる理由から、曲りターバ管は5B曲り管に、ターバ管は5B直管と仮定する。

$$\partial P = KL + K(A \times M) + WH / 10 \quad \cdots (5.4)$$

ここで、 ∂P : P1~P2間圧力差(kgf/cm²)、A: 曲り管の安全率とする。

1) ブーム付きコンクリートポンプ車における圧送時

$$\begin{aligned} \partial P_b &= K_b \times (\text{直管} L : 21.38\text{m}) + K_b \times [A \times (\text{曲り管} M : 7.54\text{m})] + 2.3 \times (\text{圧送高さ} H : 3.0\text{m}) / 10 \\ &= K_b \times (21.38 + A \times 7.54 + 0.69) \end{aligned}$$

ここで、 ∂P_b : ブーム車打設におけるP1~P2間圧力差(kgf/cm²)

K_b : ブーム車打設における水平管1m当りの圧力損失(kgf/cm²/m)

2) ポンプ配管における圧送時

$$\begin{aligned} \partial P_p &= K_p \times (\text{直管} L : 29.0\text{m}) + K_p \times [A \times (\text{曲り管} M : 3.7\text{m})] + 2.3 \times (\text{圧送高さ} H : 12.6\text{m}) / 10 \\ &= K_p \times (29.0 + A \times 3.7 + 2.90) \end{aligned}$$

ここで、 ∂P_p : ポンプ配管打設におけるP1~P2間圧力差(kgf/cm²)

K_p : ポンプ配管打設における水平管1m当りの圧力損失(kgf/cm²/m)

両者の配合は異なるが、ここで、 $K_b = K_p$ と仮定すれば(5.5)式が導かれる。

$$\partial P_b / (21.4 + A \times 7.54 + 0.69) = \partial P_p / (29.0 + A \times 3.7 + 2.90) \quad \cdots (5.5)$$

図-5.5.3より、ポンプ配管打設の場合の吐出量46m³/hrおよび35m³/hrにおけるP1~P2間の圧力差 ∂P_p はそれぞれ14.5kgf/cm²および8kgf/cm²であり、同吐出量におけるブーム付きコンクリートポンプ車打設での圧力差 ∂P_b を推定すれば、それぞれ、11.0kgf/cm²(46m³/hr)および7.5kgf/cm²(35m³/hr)となる。これらの結果から、(5.5)式より安全係数Aを求めると各吐出量に対して以下ようになる。

$$\cdot 46\text{m}^3/\text{hr} \rightarrow A = 0.45$$

$$\cdot 35\text{m}^3/\text{hr} \rightarrow A = 1.92$$

各吐出量に対する算出結果の差は大きい、この理由としては、ポンプ配管の場合の吐出量 $35\text{m}^3/\text{hr}$ において圧送した超流動コンクリートは、圧送前に再流動化したことで、他の場合と比べて粘性が小さく、圧送圧も小さくなったためと考えられる。

本検討は異なる配合と異なる圧送条件の下で比較したものであり、ここで得られた安全係数Aの精度は劣るが、少なくとも、圧送時の品質が同程度であった吐出量 $46\text{m}^3/\text{hr}$ におけるAの値が1以下となったことを考えると、本超流動コンクリートの圧送においては、曲り管の影響は非常に小さく、圧送障害とはならないものと推定される。

以上の知見をもとに、曲り管の影響を受けないと仮定し、圧送高さによる水頭分を補正し、P1～P2間の圧力差を配管の実長で除して算出した5B管1m当りの管内圧力損失は、図-5.5.4に示すとおりである。同図には、土木学会コンクリート標準示方書（施工編）に示された一般のコンクリートにおける5B管の標準的な管内圧力損失も併記する。

本超流動コンクリートの圧送圧は吐出量の増大にともない顕著に増大する傾向にあるが、吐出量 $35\text{m}^3/\text{hr}$ 程度では一般のコンクリートとほぼ同等と言える。この結果は、本超流動コンクリートをポンプ圧送する場合には、吐出量 $35\text{m}^3/\text{hr}$ 程度であれば曲り管等の圧送障害の影響を受けない分だけ一般のコンクリートと比べて長距離の圧送が行える可能性を示唆するものである。

以上のことから、本実用化システムにおいては、本超流動コンクリートの吐出量の範囲を $35\text{m}^3/\text{hr}$ 以下とすることによって、局所的な圧送障害を生じない機能を生かした安定圧送が可能であると言える。

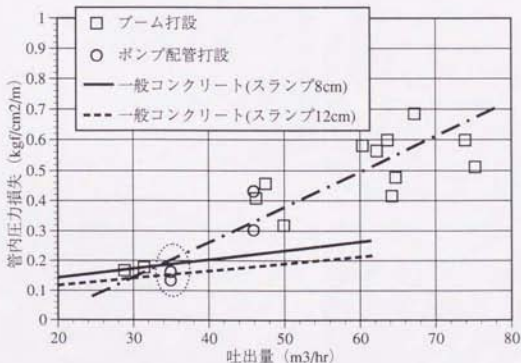


図-5.5.4 吐出量とP1～P2間管内圧力損失の関係

5.5.2 圧送による品質の変化

図-5.5.5は、先の5.5.1項に示したブーム付きコンクリートポンプ車により本超流動コンクリートを圧送した場合の圧送前後の品質試験結果の一例を示したものである。

図に示すように、圧送後にはスランプフローが5~20cm程度ロスする傾向が認められ、吐出量が増大し管内最大圧力が大きくなるにともなってロス量も大きくなる傾向にある。また、自己充填性において、管内最大圧力が6~24kgf/cm²で圧送後のスランプフローが60cm程度であれば良好な自己充填性が確保されるものと言えるが、管内最大圧力が30kgf/cm²近くなりスランプフローが40cm程度まで低下した場合には十分な自己充填性は得られないものと言える。

なお、表-5.5.3に示すように分離抵抗性についての変化を見ると、圧送後において見掛けの粘性および降伏値が増加する傾向が認められる。また、図-5.5.6に示すように圧送前後での圧縮強度の差はわずかであった。

図-5.5.7は、先の5.5.1項に示したポンプ配管における圧送前後の本超流動コンクリートの品質試験結果である。ブーム付きコンクリートポンプ車の場合と同様に圧送によるスランプフローのロスが認められるが、ブーム打設と比べて管内最大圧力が20~46kgf/cm²と大きいことからロス量も20~35cmと大きくなっている。

以上のように、本超流動コンクリートにおいては、ポンプ圧送によりスランプフローがロスする傾向が認められ、圧送圧の増大にともないロス量も増大する傾向にある。なお、このようなポンプ圧送にともなうスランプフローのロスは常時生じるものではなく、定性的には、練り混ぜ後の経過時間が長い場合すなわち運搬時間に長時間を要するような場合にロスを生じやすい傾向にあるが、現時点ではロスの原因は明らかとなっていない。

いずれにせよ、本検証試験の範囲で得られた知見ではあるが、本超流動コンクリートをポンプ圧送する際には圧送によりスランプフローがロスする場合があることを考慮して、少なくとも、先の5.5.1項に示した一般のコンクリートの圧力損失相当と言える35m³/hr程度以下の吐出量とし、また、良好な自己充填性が確保される管内最大圧力の目安として20kgf/cm²程度以下とすることが必要であると考えられる。

表-5.5.3 圧送後の分離抵抗性の変化（吐出量40m³）

種別	見掛けの粘性 (g/cm/sec)	見掛けの降伏値 (g)
圧送前	321	355
圧送後	353	467

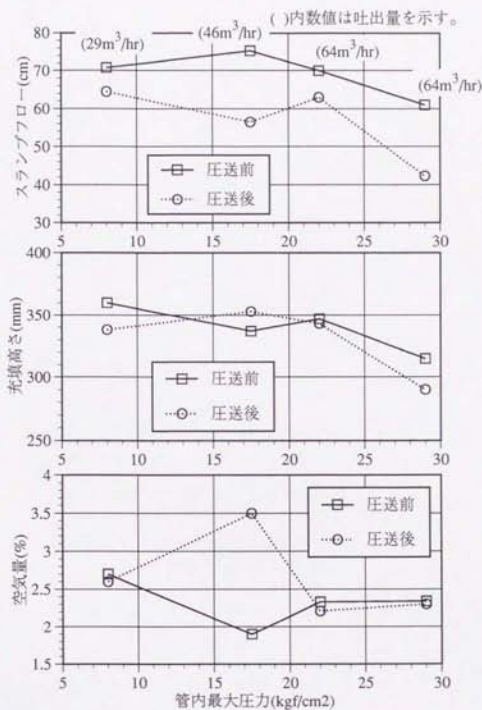


図-5.5.5 管内最大圧力と圧送前後の品質の関係
(ブーム付きコンクリートポンプ車の場合)

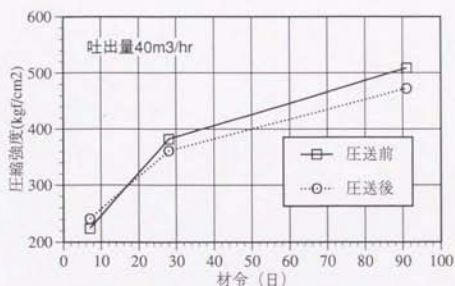


図-5.5.6 圧送前後による圧縮強度の変化

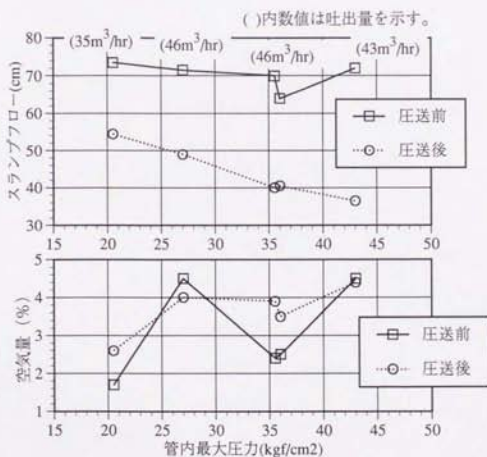


図-5.5.7 管内最大圧力と圧送前後の品質の関係
(ポンプ配管の場合)

5.6 側圧に関する検証

一般に、コンクリート打設にともない型枠に作用する側圧は、コンクリートの単位容積重量やコンシステンシー、セメントの種類、配合あるいは打ち込み温度などコンクリートの材料特性や凝結硬化特性に関する要因、鉛直方向打ち込み高さや打ち込み速度、打ち込み方法や振動締固め方法などの施工に関する要因、型枠の形状や剛性あるいは配筋の有無など部材特性に関する要因によって左右される。

また、側圧は打ち込み高さの増大にともなって大きくなるが、全打ち込み高さに相当する液圧として作用するわけではなく、打設高さがある限界値に達するまでは液圧で作用し、それより下層に行くにともない減少する分布となり、この側圧が最大となる打設高さは、コンクリートの凝結性状や骨材どうしの噛み合いによるアーチアクションなど先の諸要因の複合作用によって左右される[5.6][5.7]。

なお、コンクリートの側圧最大値とその分布に影響する主要因は、打ち込み速度と打ち込み温度および締固めの方法であり、鉛直打ち込み速度が大きく、コンクリートの凝結が遅いほど側圧が大きくなり、また、内部振動機による締固めは振動による衝撃とコンクリートの骨材の噛み合いによるアーチ作用を崩壊させることにより側圧が大きくなる[5.6]。

超流動コンクリートは、内部振動機による締固めを行わない点において側圧を小さくする上で有利であるが、骨材どうしの噛み合いがなくアーチ作用が生じない点において側圧が大きくなる傾向にある。さらに、本研究対象の超流動コンクリートは、ボルトランドセメントに高炉スラグとフライアッシュを混合した3成分系結合材を使用することから一般のコンクリートに比べて凝結開始までに長時間を要する傾向にあり、全打ち込み高さ分の側圧が液圧に近い状態で作用するものと言える。

ここでは、実大規模の大型壁状部材への試験打設および実構造物の壁部材において本超流動コンクリートの側圧の作用状態を検証し、本実用化システムにおける型枠および支保工の施工にあたって配慮すべき点について述べることにする。

5.6.1 壁部材を一気に打設した場合

「土木学会コンクリート標準示方書（施工編）」においては、標準的な打ち込み速度の推奨値として30分につき1～1.5m程度とすることが示されているが、これは、コンクリートの振動締固めを十分に行なうための条件と言える。

超流動コンクリートにおいては締固め作業を必要としないことから、一気に最上部まで打ち込むことが可能であり、この場合には、全打ち込み高さ分の側圧がほぼ液圧に近い状態で作用するものと予想される。

ここでは、本超流動コンクリートを一気に最上部まで打設した場合の側圧について、表-5.6.1に示す部材厚さおよび配筋条件の異なる4種類の大型壁状部材への試験打設により検証することとした。表に示すように、CASE-1は無筋部材であり、CASE-2～CASE-4は一般的な壁部材の配筋条件と部材厚さを有するものである。

打ち込み方法は、CASE-1についてはバケットで打設し、CASE-2～CASE-4についてはブーム付きコンクリートポンプ車を用いて打設した。ただし、各部材ともに打ち込み速度は14m/時間で一定であり、部材天端である高さ4mまで打上がるのに要する時間はいずれも17分程度である。また、CASE-2およびCASE-3は「土木学会コンクリート標準示方書（施工編）」に準拠して自由落下高さは1.5m以内で打ち込んだが、CASE-1およびCASE-2は部材の天端から自由落下高さ4mで打ち込んだ。

側圧の測定は写真-5.6.1に示すように、 $\phi 10\text{cm}$ の受圧面を有する圧力計を用いて行った。本測定方法は、最大側圧までは主動圧として測定できるが、最大側圧以降の側圧減少の割合については、型枠の剛性や締め付け度合いとコンクリートの収縮などによる体積変化との関係により結果が異なる。したがって、側圧減少の割合についての真の値は評価できないが、本試験では各部材ともに同じセパレータ間隔であることから型枠の剛性はほぼ同等と言え、各部材における側圧の減少傾向の違いは比較できるものと考えられる。

打設した超流動コンクリートの配合および使用材料を表-5.6.2および表-5.6.3に示す。また、打設時のフレッシュコンクリートの品質は先の表-5.6.1に併記したとおりである。

各ケースにおける、高さ方向の側圧分布および実測値と液圧換算値との比の経時変化を図-5.6.1から図-5.6.8に示す。

図-5.6.1および図-5.6.2において、無筋部材であるCASE-1の打上がり直後の側圧は、液圧換算値の93%であり、ほぼ液圧相当分が作用することが分かる。また、これらの側圧は打設後2～3時間経過時点において半分程度に減少し、打設後7時間経過するとほぼ0となる。

図-5.6.3から図-5.6.8において、有筋部材であるCASE-2からCASE-4の側圧を見ると、打設直後の段階で液圧換算値の75%から85%程度を示し、以降、3時間から4時間を経過した時点で半分程度に減少し、7時間から8時間経過時点ではほぼ0となる。

ここで、図-5.6.9は、CASE-2からCASE-4部材の打設の際に、ポンプの筒先から採取した本超流動コンクリートを5mmフルイでウェットスクリーニングし、その試料について行

った凝結硬化時間の測定結果である。凝結始発時間は7時間30分であり、本部材の側圧がほぼ0となる時間は凝結硬化の始発時間に相当することが分かる。

この関係をもとに、各部材の下端より20cmの位置における側圧と貫入抵抗値の逆数($1/P$)との関係を求め図-5.6.10に示す。貫入抵抗値の逆数($1/P$)と側圧の経時変化は概ね指数関数と線型性を有するものと言え、凝結硬化時間を求めることによって側圧の作用状態を予測することが可能であると考えられる。

一般に、壁部材に作用する側圧は部材厚さが小さいほど小さくなるが、逆に、壁部材が小さいほど打ち込みや内部振動機による衝撃の影響を受け易く側圧が大きくなる傾向にある。また、鉄筋の配置は側圧を減少させる要因であり[5.6][5.8]、一般のコンクリートにおいては、部材に配筋が施された場合の側圧は無筋の場合の半分以下となる報告もなされている[5.8]。

図-5.6.11は、液圧換算値に対する打設直後の側圧実測値との比を部材厚さごとに示したものである。有筋部材の液圧換算値に対する比は0.85程度であり、無筋部材と比べて10%程度小さく、格子状の配筋により側圧の減少効果が認められるが、本超流動コンクリートにおいては鉄筋と骨材あるいは骨材どうしのアーチ作用が殆ど生じないことにより、一般のコンクリートにおける側圧の減少度合いに比べて、配筋の影響は極めて僅かであると言える。

また、有筋部材どうしを比較した場合には壁厚さ20cmの部材において他の部材に比べて側圧が大きい傾向にあるが、これは、自由落下高さが大きかったことにより打ち込み時の衝撃が多く作用したことによるものと考えられる。

図-5.6.12は、側圧が半減する時点および側圧が0になるまでの経過時間と部材厚さの関係を示したものである。側圧の減少傾向を見ると、部材厚さが厚いほど早期に減少する傾向が認められる。この理由は凝結硬化時間の違いによるものと考えられ、部材厚さが大きいほど硬化時の温度上昇が高くなることによって凝結硬化速度が促進されたためと考えられる。

以上のように、格子状の鉄筋によって側圧の最大値は低減されるものと言えるが、その減少量は10%程度であり、基本的には本超流動コンクリートにおける側圧は液圧として考慮すべきであると考えられる。なお、一般に言われているのと同様に本超流動コンクリートにおいても側圧の経時変化は凝結硬化時間と相関を有するが、側圧の作用がほぼ0となるのに要する時間は概ね凝結硬化の始発時間に相当するものと言える。

表-5.6.1 部材形状寸法および打設コンクリートの品質

試験体 種別	形状寸法			配筋量 (mm)	打設コンクリートの品質			
	幅 (m)	高さ (m)	厚さ (m)		スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	打込み 温度 (℃)	単位容積 質量 (t/m ³)
CASE-1	1.2	4.0	0.6	なし	62	3.6	31.5	2.32
CASE-2	3.0	4.0	0.2	D13ctc200 縦横ダブル	67.5	3.9	27.5	2.303
CASE-3			0.4	D16ctc150 縦横ダブル	66	3.2	28.0	2.316
CASE-4			0.6	D22ctc200 縦横ダブル	68.5	4.3	28.0	2.289

表-5.6.2 超流動コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 W	結合材 P	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	高性能 減水剤	分離 低減剤
20	36	46	180	500	724	882	0.9	8.4	1.5

表-5.6.3 使用材料の品質

種類	区分	品質
結合材	フライアッシュ混入 低発熱型高炉セメントB種 (混合比：C:B:F=34:46:20)	比重=C:3.16、B:2.90、F:2.30 ブレン値=3640cm ² /g
細骨材	相模川・君津混合砂	比重=2.77、粗粒率=2.77
粗骨材	八戸産砕石	比重=2.70、粗粒率=6.58
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物 ポリオール複合体	-
高性能減水剤	ナフタレンスルホン酸 ホルマリン高縮合物	-

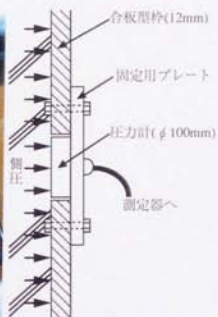


写真-5.6.1 側圧の測定方法

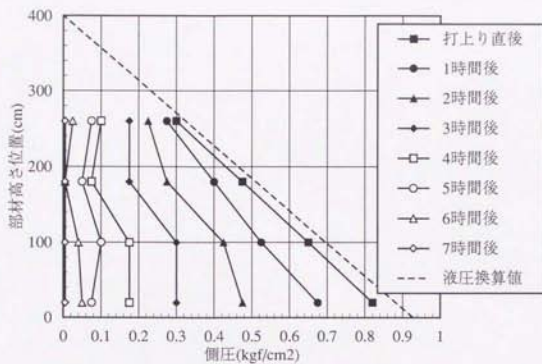


図-5.6.1 高さ方向側圧分布 (CASE-1: 壁厚さ60cm-配筋なし)

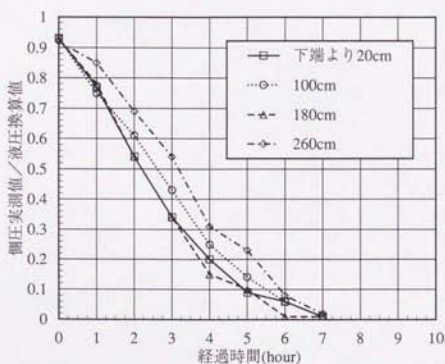


図-5.6.2 側圧実測値／液圧換算値の経時変化
(CASE-1: 壁厚さ60cm-配筋なし)

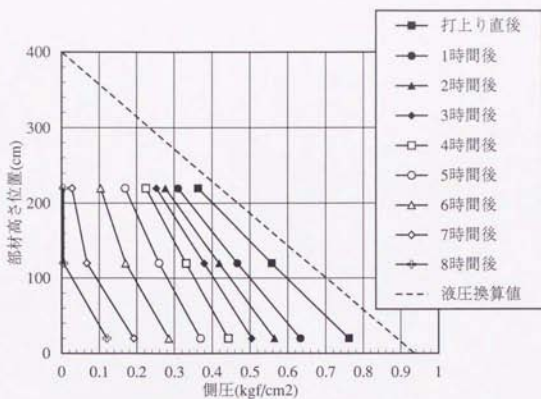


図-5.6.3 高さ方向側圧分布 (CASE-2: 壁厚さ20cm-D13ctc200)

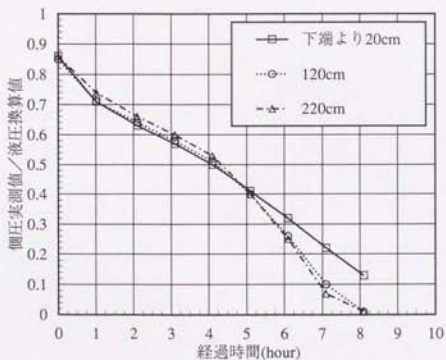


図-5.6.4 側圧実測値／液圧換算値の経時変化
(CASE-2: 壁厚さ20cm-D13ctc200)

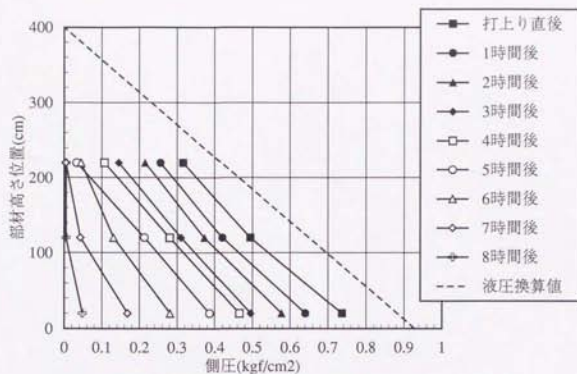


図-5.6.5 高さ方向側圧分布 (CASE-3: 壁厚さ40cm-D16ctc150)

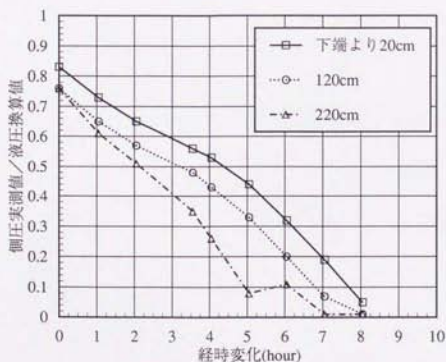


図-5.6.6 側圧実測値/液圧換算値の経時変化
(CASE-3: 壁厚さ40cm-D16ctc150)

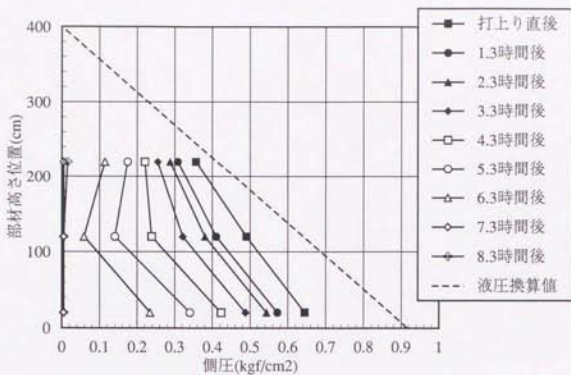


図-5.6.7 高さ方向側圧分布 (CASE-4: 壁厚さ60cm-D22ctc200)

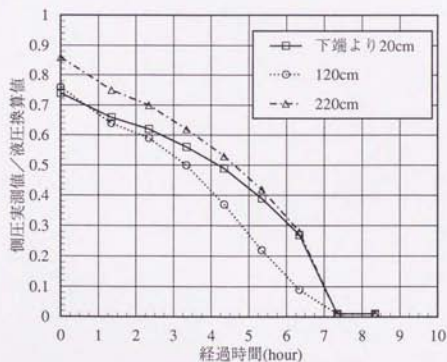


図-5.6.8 側圧実測値/液圧換算値の経時変化
(CASE-4: 壁厚さ60cm-D22ctc200)

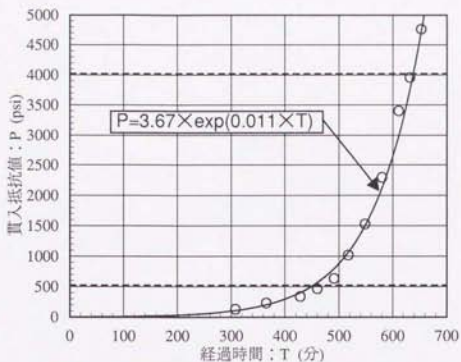


図-5.6.9 凝結硬化時間測定結果(CASE-2~CASE-4)

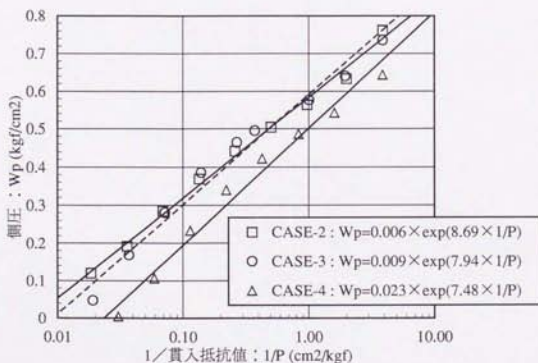


図-5.6.10 $1/P$ と側圧の関係
(下端より20cm位置)

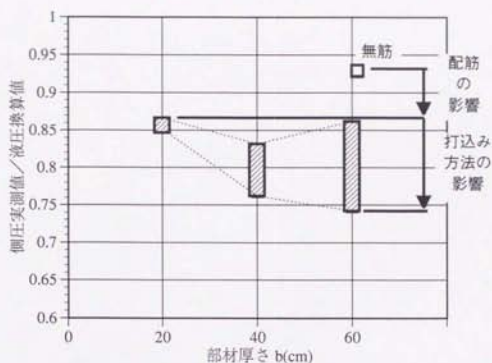


図-5.6.11 壁厚さと側圧の関係

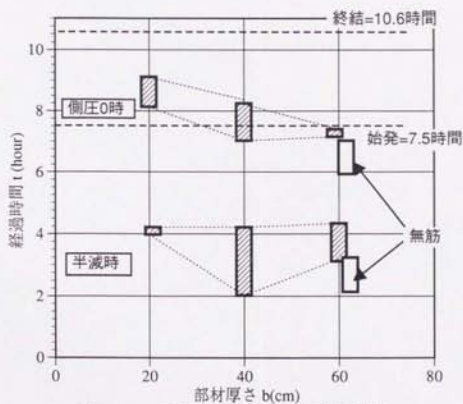


図-5.6.12 壁厚さと側圧の減少時間の関係

5.6.2 層打ち打設した場合

先の5.6.1項において、本超流動コンクリートを一気に部材の最上部まで打ち上げた場合の側圧について述べたが、壁部材は比較的延長距離が長いことから一般的には何層かに分けて打ち上げていく打設手順となる場合が多く、下層を打ち込んだ後、ある程度時間が経過してから上層を打設することになる。

このような層打ち打設を行った場合の側圧を検証するため、実構造物における外壁の一部に圧力計を取り付け、層打ちにおける側圧の経時変化を調査した。

測定対象の壁部材は厚さ40cmであり、全打込み高さは375cmである。また、打込み手順は、1層目を打込み開始より10分程度で高さ195cmまで打ち込み、その約1時間10分後に330cmまで、さらに2時間20分後に天端である375cmまで打ち込んだ。

圧力計は最下部から45cm (A点)、135cm (B点)、226cm (C点) の3ヶ所に取り付けた。各測定点における側圧の実測値と液圧換算値を図-5.6.13に示し、また、液圧換算値に対する実測値の比を図-5.6.14に示す。

下端から45cm (A点) の位置での側圧を見ると、第1回の打ち込みにより液圧換算値の66%の圧力が作用し、以降は時間の経過とともに減少していき、第2回および第3回の打ち込みによる影響は殆ど認められないのが分かる。

また、下から135cm (B点) においては、第1回の打ち込みによりほぼ液圧換算値に相当する側圧が作用し、さらに第2回の打ち込みにより側圧は打ち込み高さ分の液圧換算値の50%程度となるが、2時間20分後の第3回の打ち込みによる影響は殆ど認められず側圧の増加は僅かである。

下から226cm (C点) においては、最初の打ち込みにより液圧換算値の74%の側圧が作用し、以降は時間の経過とともに減少して行く傾向にあるが、第3回の打ち込みにより液圧換算値の87%までの側圧が作用し、第3層の打ち込みによって既設層の打込み時点よりも液圧換算値に近い側圧が作用する傾向が認められる。

ここで、第2層 (打込み高さ330cm) から第3層 (天端375cm) までの打込み高さの差は45cmであり、図-5.6.13においてPで示すように液圧換算値としての側圧増加量は 0.1kgf/cm^2 程度と言える。しかしながら、第3層の打設による実測値の増加量は図に③Pで示すように 0.16kgf/cm^2 であり、液圧換算値による増加量よりも大きい値となっているのが分かる。

この結果は、第3層の打込みによってC点近傍のコンクリートが再び流動している可能性を示唆する結果である。いずれにせよ、壁部材には開口部が設けられることも多く、この場合には開口部下側などでは上層あるいは近傍の打ち込みによって、コンクリートが片押しされて動き出すこともあり、C点に見られたような既設コンクリートの再流動による側圧の上昇は十分に想定されるところである。

以上のことから、時間をおいて打ち込むことにより必ずしも液圧に相当する側圧が作用するわけではなく、層打ちによって型枠に作用する側圧を抑制することは可能であると言える。しかしながら、従来の型枠設計の範疇で側圧を低減させる目的で層打ち打設を採用することは避け、基本的には液圧に耐えられるように型枠設計を行なった上で、セパレータの締め付け度合いのバラツキや隅角部での型枠工の不確実性や偏圧などの不測の事態に対する安全性を高める補助的な手段として層打ち打設を採用すべきであると考えられる。

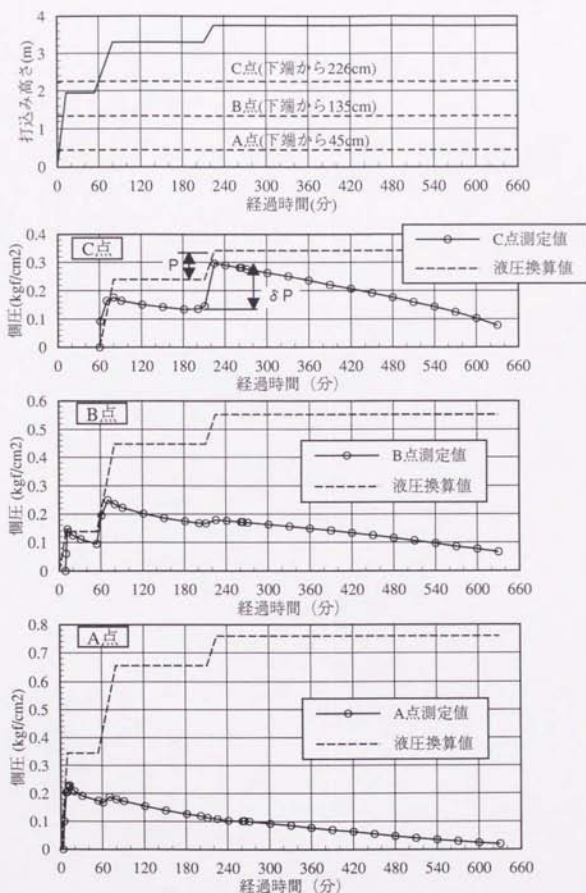


図-5.6.13 各測定点の側圧経時変化

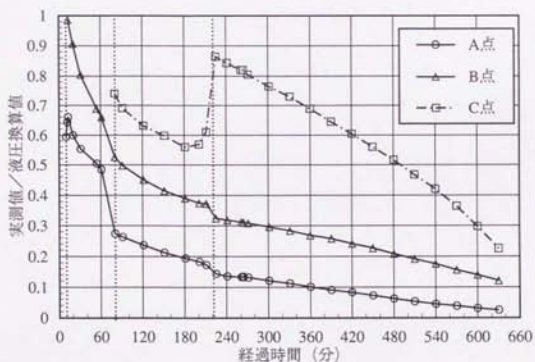
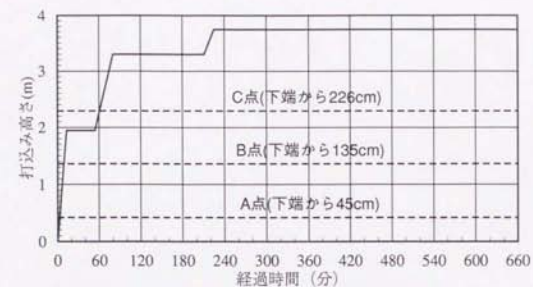


図-5.6.14 側圧実測値/液圧換算比の経時変化

5.7 流動勾配における検証

通常、壁状構造物のような比較的延長距離の長い部材を打設する場合には、全体として均一な打上がり高さとなるように適宜打ち込み位置を移動し、打上がり速度の調整を行いながら打設する。また、「土木学会コンクリート標準示方書（施工編）」では、壁や柱を連続的に打設する場合には、締固め作業を確実にに行えるだけの余裕を持つとともに、特にブリージングの発生による品質低下を抑制するために、標準的な打上がり速度として30分で1~1.5m程度とすることとしている。

超流動コンクリートにおいてはブリージングなどの材料分離が生じないことから、前述のような品質低下を考慮した打上がり速度の制限は必要ないと考えられるが、先の5.6項に述べたように側圧はほぼ液圧の状態で作用することから、局部的に打上がり高さが大きくなることは避けるべきである。

ここでは、本超流動コンクリートの流動勾配を検証し、壁部材に適用する場合に均一な打ち上がり高さとするための適切な打ち込み間隔や打ち込み位置あるいは分岐管工法における適正な配管間隔を計画する上での基礎データを得ることとした。

図-5.7.1に示すような実構造物の壁部を対象に、C1およびC2の柱部を起点として片押し流動させた際の流動勾配を測定した。なお、同図にはC1およびC2の各起点から測定位置までの流動距離も併記する。

本壁部材は厚さ25cmで高さ2.95mであり、配筋条件は写真-5.7.1に示すようにD13mm異形棒鋼が縦横200mm間隔にてダブル配筋されている。

本試験に用いた超流動コンクリートの配合および使用材料の品質は表-5.7.1、表-5.7.2に示すとおりであり、また、荷卸し時のフレッシュコンクリートの品質は表-5.7.3に示すとおりである。なお、コンクリートの打設はブーム付きコンクリートポンプ車により行った。

図-5.7.2に流動距離と各測定位置での打上がり高さの関係を示す。ここで、打上がり高さは各測定位置では流動が停止した時点で行ったものであり、打ち込み位置から流動して行き先端の流動が停止するまでに要する時間は約5分間であった。

図-5.7.2を見ると分かるように、本超流動コンクリートにおいて片押しして打設した場合の流動勾配は概ね1/10と言える。

当然のことながら、流動勾配は打ち込み面の断面寸法や配筋条件によって左右されることから、この結果は本構造物の固有の数値であると言える。しかし、第6章にて改めて詳述するが、ここで得られた知見をもとに簡先間隔を10mとした4分岐管を用いて側壁を打設した場合に全体として均一な打ち上がり高さで打設できることを確認した。

分岐管工法により通常のコンクリートを打設した場合の既往の実績^{[5.9][5.10]}では、簡先間隔は5m程度以下であるのに対して、本超流動コンクリートの場合には少なくとも簡先間隔を2倍程度まで大きくすることができるものと言える。

したがって、極端に配筋条件が厳しい場合や部材寸法が小さい場合を除き、一般的な壁部材の範囲では、本検証試験によって得られた流動勾配をもとに、従来の打ち込み間隔あるいは分岐管工法における筒先間隔を大きくした打ち込み計画を立案できるものと考えられる。

表-5.7.1 超流動コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		
			水 W	結合材 P	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 P×%	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
20	36	46	180	500	724	882	0.15	1.4	0.8

表-5.7.2 使用材料の品質

種類	区分	品質
結合材	フライアッシュ混入 低発熱型高炉セメントB種 (混合比：C:B:F=34:46:20)	比重=C:3.16、B:2.90、F:2.30 ブレン値=3640cm ² /g
細骨材	相模川・君津混合砂	比重=2.77、粗粒率=2.77
粗骨材	八戸産砕石	比重=2.70、粗粒率=6.58
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物 ポリオール複合体	-
高性能減水剤	ナフタレンスルホン酸 ホルマリン高縮合物	-

表-5.7.3 荷卸し時のフレッシュコンクリートの品質

区分	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	打ち込み温度 (℃)	単位容積重量 (kg/m ³)	データ数
平均値	65.9	4.0	31.8	2287	13
標準偏差	6.2	0.38	0.73	12	

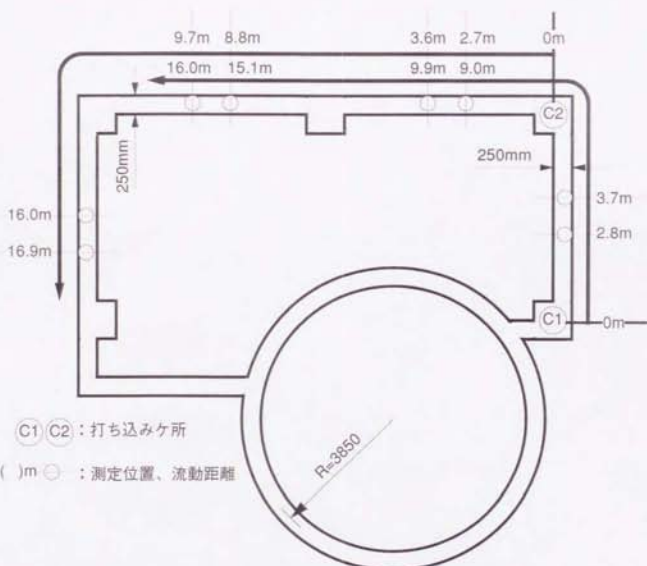


図-5.7.1 壁部材平面図および打ち込み位置・測定位置



写真-5.7.1 壁部材の配筋状況

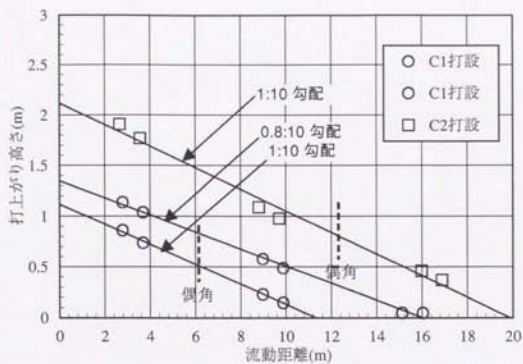


図-5.7.2 流動距離と打上がり高さの関係

5.8 まとめ

本章では、現状の製造・管理システムおよび施工体制の下で、本超流動コンクリートの配合選定から製造、施工に至る一連の実用化システムの構築を行った。

まず、本超流動コンクリートの基本性能と言える変形性、分離抵抗性および自己充填性についての評価試験法を提案し、本評価手法を用いて、本超流動コンクリートが良好な自己充填性を確保することが可能な変形性と分離抵抗性の適正範囲を定量的に把握することとした。

その結果、スランブフローの適正範囲として平均的には60cm～70cmの範囲であり、65cm～70cmの範囲において特に良好な自己充填性が得られることを明らかにした。さらに、良好な自己充填性を有する分離抵抗性においてはモルタルの見掛け粘度と降伏値とがバランスする適正な範囲が存在し、僅かなデータではあるが、見掛け粘度として100～500g/cm²secの範囲で、これに対応する降伏値として50～120gの範囲が求まり、この適正範囲をさらに絞り込むことによって、より精度の高い配合選定が行える可能性を示した。

なお、ここに提案した分離抵抗性の評価試験は比較的複雑な手順をふみ、実工事の際の品質管理としての実用性は乏しいことから、便宜的な手法として、スランブフロー50cm到達時間を測定する手法を提案し、現時点では経験的な要素も含んでいるが良好な自己充填性が確保される適正範囲として5秒～10秒とすることを提示した。

これらの適正範囲を基本として、試験練りによって比較的容易に本超流動コンクリートの適正配合を選定することが可能な配合選定手法を提案した。この配合選定手法は、3成分系結合材を単位結合材量として500kg/m³程度使用し、また、最大寸法20mmの砕石を使用することを前提とする、いわゆる本超流動コンクリートの適用範囲において成立するものである。したがって、十分に汎用的なものではないが、これらの制約を設けることで比較的容易かつ少ないバッチ数での配合選定を可能とすることを目指した手法である。

次に、施工面での実用化システムの開発を行った。具体的には、本超流動コンクリートを実工事に適用するにあたって、従来のコンクリートと特に異なる本超流動コンクリート特有の性状を示すと予想される施工要因として、高変形性を確保する場合の練混ぜ条件と運搬による品質変化、比較的高粘性であることによるポンプ圧送圧の増加、その良好な自己充填性と比較的凝結硬化が遅いことによって生じる側圧の増加、および、高変形性によってもたらされる流動勾配の減少に着目し、これらの各種要因に対して実工事レベルでの検証を行ない、本超流動コンクリートを適用する場合の適用条件を明確にすることとした。

まず、製造段階における練り混ぜ条件として、標準的な製造プラントにおける強制2軸ミキサーを使用した検証試験により、品質を安定させるのに要する正味の練り混ぜ時間として75秒程度とすることを示した。

また、運搬による品質変化において、各種の実施工における品質管理の結果から、運搬

時間30分以内であればスランプフローのロスは一時的に2cm程度であり特に問題とならないこと、運搬時間が1時間となると平均的に4cm～7cmのスランプフローのロスを生じることが明らかとなり、スランプフローのロスに対してはAE減水剤の併用あるいは現地での再流動化によって対応することを示した。なお、空気量の変化については運搬時間に因らず平均的に1～2%のロスを生じることが明らかとし、空気量のロスについては、通常のコンクリートと同様の手法として練り混ぜ段階でAE調整剤によりロス分を見込んだ調整を行うことで対応することとした。

さらに、配管条件の異なる2種類の実証データをもとに、本超流動コンクリートのポンプ圧送性を検証した。その結果、本超流動コンクリートは比較的粘性が大きいことから、一般のコンクリートと比べて吐出量の増大にともない圧送圧の増大する度合いは大きい傾向にあるが、曲り管などの圧送障害の影響を受けにくいことが明らかとなり、曲り管やテーパー管などの圧送障害部に一定の安全係数を乗じて圧送距離を長く見積もる従来の水平換算距離の考え方をそのまま適用できないことを示した。また、この知見をもとに配管の実長と圧送圧との関係から本超流動コンクリートの1m当りの管内圧力損失を算出した結果、吐出量 $35\text{m}^3/\text{hr}$ 程度以下では一般のコンクリートと同等となり、この吐出量の範囲であれば、圧送障害の影響を受けない分、安定した圧送が可能であることを示した。

なお、吐出量あるいは最大圧送圧の増加にともないスランプフローが大きくロスする場合があり、現段階では最大圧送圧の目安として $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度で圧送することが必要であることを示した。

本超流動コンクリートの型枠に作用する側圧について、配筋条件の異なる壁部材への試験打設により検証した結果、一気に打設した場合には液圧に近い状態で作用するが、配筋が施された部材は無筋と比べて側圧が小さくなること、側圧の経時変化は打ち込んだ超流動コンクリートの凝結硬化時間と相関が有り、側圧が無くなる時点はほぼ凝結硬化の始発時点に相当することを明らかとした。

また、時間をおいて層打ち打設した場合には、上層の打ち込みによる下層への影響は小さく必ずしも液圧に相当する側圧が作用するわけではないが、場合によっては上層の打ち込みによって下層の側圧が再び上昇することもあり、基本的には、液圧に耐えられるように型枠の設計を行ない、型枠工の不確実性や偏圧などの不測の事態に対する安全性を高める補助的な手段として層打ち打設を採用すべきであることを示した。

最後に、厚さ25cmで一般的な配筋条件の壁部材において、本超流動コンクリートの流動勾配を検証した。その結果、本超流動コンクリートの流動勾配は概ね $1/10$ であり、極端に配筋条件が厳しい場合や部材寸法が小さい場合を除き、従来の打ち込み間隔あるいは分岐管工法における簡先間隔を2倍程度まで大きくした打ち込みが可能であることを示した。

第6章 実構造物への適用

6.1 はじめに

これまで述べてきたように、本研究対象の超流動コンクリートを基本として、現状の製造・管理ならびに施工体制において超流動コンクリートの技術を適用することが可能な、実用化システムを確立するに至った。また、本超流動コンクリートの硬化後の品質においては、部材全体にわたって良好な均等性を有するとともに、基本的には高品質かつ高耐久性であることを実証した。

本章では、本実用化システムを適用した代表的な施工例についてまとめたものであり、これらの実構造物への適用によって本システムの適用性と正当性を実証することとした。

なお、ここに報告する各種の工事は、曲面や開口部を多く有する建築物の外壁への適用はもとより、超流動コンクリートの有する優れた特長をさらに生かすことが可能と考えられる埋設型枠工法あるいは分岐管工法との併用工事、さらに、超流動コンクリート以外では達成不可能であったと考えられる高層建築物における鉛直高さ約40mの充填型鋼管コンクリート柱を対象とした圧入充填工事などであり、いずれも今後の建設工事の将来性を占うものばかりである。

以降、これらの工事の概要と施工上の知見について述べることにする。

6.2 PC斜張橋の主塔部への適用

6.2.1 概要

一般に、PC斜張橋の主塔は小断面で鉛直方向に高いスレンダーな構造形式を有しており、その小断面の中に太径鉄筋を主体とする鉄筋が小間隔で多段配筋され、さらに、斜材定着部補強筋・鉄骨・ケーシングパイプ等の補強鋼材が多数配置された極めて高密度な配筋条件を有する構造物である。

このように、鉄筋や鋼材が錯綜する閉鎖断面であるため、バイブレータによる振動締固め作業には多大な労力を必要とし、コンクリートを確実に充填するためには極めて入念かつ高度な施工管理が要求される。

ここに紹介する工事は、上記のような高密度配筋を有するPC斜張橋の主塔部を対象に超流動コンクリートを適用したものであり、本超流動コンクリートの打設は1991年3月より約6ヶ月間にわたって行われた。この種の構造物への適用自体これまで前例の無い工事であるが、さらに、本構造物には美観の向上と高所作業の低減および脱型作業の省略を目的とした埋設型枠工法を併用している。

このように、脱型作業を省略した埋設型枠工法と確実な充填を可能とする超流動コンクリートとの併用は、施工精度の向上ならびに施工性の大幅な改善を可能とするものである。

以下に本工事の概要を述べ、本工事によって得られた施工性についての知見について報告する。

6.2.2 構造物の概要

本橋は、写真-6.2.1に示すようなファン形の斜材側面形状を有するPC斜張橋である。

PC斜張橋の主桁は8段の斜材ケーブルによって吊られ、橋台と橋脚部で鉛直方向に、主塔部で橋軸および橋軸直角方向ともに水平方向に支持されている。また、主桁は平面的に有効幅員10～25mで変化する。

道路条件は管理用車両の通行を考慮した2等橋（TL-14）であるが、震災時には避難通路として4万人/時間を誘導する命綱となる機能を有する重要施設と言える。

本橋の主塔は図-6.2.1に示すように、高さ60mの柱2本と両柱を連結する横梁で構成され、また、塔の断面は図-6.2.2に示すように、木材をイメージした五角形の形状で鉛直方向に曲線を保ちながら徐々に細くなる3次元的な形状となっている。

配筋条件は図-6.2.2に示すとおりであり、主筋にD51およびD38の太径鉄筋が125mm間隔で2段配筋され、さらに、D25～D22異形棒鋼のフープ筋が125mm～250mm間隔で配筋されているとともに斜材定着部補強筋・鉄骨・ケーシングパイプ等の補強鋼材が多数配置されており、隅角部など局部的には各種鋼材の純間隔が5cm以下となるヶ所も多くある極めて高密度配筋の部材と言える。

さらに、型枠作業と脱型作業を省略することによる施工の効率化と耐久性の向上およびコンクリート仕上り面の改善による美観の向上を目的として、ポリマー含浸コンクリート製のプレキャスト埋設型枠^[6.1]を採用していることも大きな特徴である。

以上のように、本構造物は極めて高密度配筋であり、コンクリートの締固め作業には入念な施工管理と多大な労力が要求され、さらに、脱型不要の埋設型枠工法の併用によりコンクリート充填後の良否を確認できないことから、高密度配筋および埋設型枠中への確実な充填を達成するために本超流動コンクリートを採用することとなった。

ここで、超流動コンクリートの適用対象は、主塔の断面が小さくなるとともに斜材定着部のある特に配筋状態が密な7ブロック～17ブロックおよび横梁を対象とし、その総打設量は 650m^3 である。なお、6ブロック以下はスランブ8cmの通常のコンクリートを用いて、パイププレートによる振動締固めを行い打設した。



写真-6.2.1 PC斜張橋の全景



図-6.2.1 主塔形状およびブロック割り

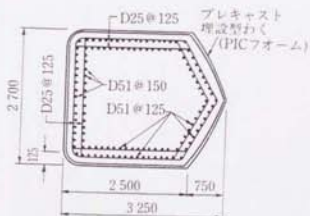


図-6.2.2 A断面形状および配筋

6.2.3 施工概要

(1) 超流動コンクリートの配合

超流動コンクリートのフレッシュコンクリートにおける品質目標値は表-6.2.1に示すとおりとし、この目標値により試験練りを行い配合を選定するとともに、施工時において荷卸し時品質管理値とした。

超流動コンクリートの配合を表-6.2.2に、使用材料の品質を表-6.2.3に示す。結合材には高炉セメントB種にフライアッシュを20%内割りで置換したものを使用し、粗骨材には最大寸法20mmの砕石を使用した。

表-6.2.1 フレッシュコンクリートの品質目標値

項目	目標値・品質管理値
スランプフロー	65±5cm
空気量	4±1%
設計基準強度（材令28日）	400kgf/cm ²

表-6.2.2 超流動コンクリートの配合

W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤		
		水 W	結合材P		細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 P×%	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
			KC	F					
34	45	170	400	100	717	907	0.15	2.2	0.47

表-6.2.3 使用材料の品質

使用材料	仕様		比重	比表面積 (cm ² /g)	粗粒率
結合材	KC	高炉セメントB種（普通ポルトランドセメント55%+高炉スラグ45%）	3.04	3760	-
	F	フライアッシュ	2.25	3160	-
細骨材S	千葉県市原産中目砂		2.60	-	2.57
粗骨材G	八戸産砕石（Gmax=20mm）		2.69	-	6.58

(2) 製造

超流動コンクリートは、レディーミクストコンクリート工場にて強制2軸ミキサー（容量 2m^3 ）により1バッチ 2.5m^3 として練り混ぜた。練混ぜ手順は図-6.2.3に示すとおりである。各材料の投入は基本的に自動計量・自動投入であるが、分離低減剤については細骨材の投入と同時に細骨材計量槽に粉体の状態で手投入した。材料投入から練り混ぜ終了までの所要時間は1バッチ当たり約90秒である。

(3) 運搬

超流動コンクリートはトラックアジテータ車にて1台当たり 5m^3 積載して運搬した。なお、製造プラントから現場までの運搬に要した時間は約30分であった。

(4) 打設

高所圧送にともなうポンプ配管作業の手間と打設工程が1ブロックごとで1回当たりの打設量も 20m^3 程度と少量であることを考慮して、コンクリートの打設はバケット打設とした。

まず、地上にて運搬車から容量 1m^3 のバケットに卸し、クローラクレーンにて打設位置まで吊上げ、長さ8～10mで接続したフレキシブルシュートを介して流し込んだ。

フレキシブルシュートは打込みケ所のほぼ中央部に固定した状態で、その中央部1ヶ所から流し込み、全体に流動させ充填させた。なお、シュート先端から打ち込み面までの自由落下高さは50cm～1mとした。（写真-6.2.2、写真-6.2.3）

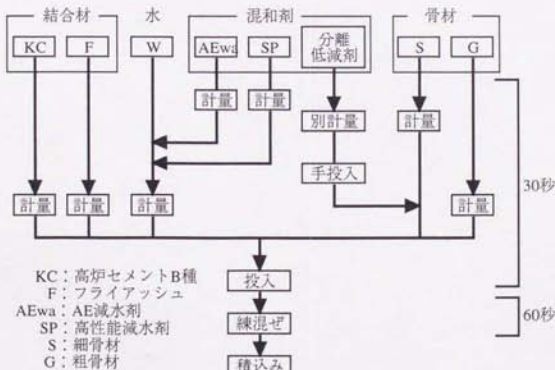


図-6.2.3 超流動コンクリートの製造手順



写真-6.2.2 吊上げ状況



写真-6.2.3 打込み状況

6.2.4 品質管理結果

(1) 荷卸し時の品質

荷卸し時に、全ての運搬車を対象にスランブフロー・空気量・打込み温度・単位容積重量を測定した。図-6.2.4、図-6.2.5、図-6.2.6は、スランブフローと空気量および単位容積重量の管理試験結果を、各打設ブロックごとに示したものである。

スランブフローの平均値は68.1cm（標準偏差2.0cm）で、空気量の平均値は3.6%（標準偏差0.4%）であり、また、単位容積重量の平均値は2.32ton/m³（標準偏差0.02ton/m³）であった。これらの値は、いずれも所要の目標値を満足し、変動も僅かで安定して供給されているのが分かる。

(2) 強度管理結果

JIS A 5308に準拠した頻度で荷卸し時に圧縮強度供試体（ $\Phi 10 \times 20\text{mm}$ ）を採取し、材令28日の圧縮強度を測定した。なお、これらの供試体は実構物と同様に締固めを行わないで採取した。図-6.2.7は標準養生における材令28日の圧縮強度管理結果を示したものである。圧縮強度は平均で551kgf/cm²で（標準偏差34kgf/cm²）あり、硬化後においても設計基準強度である400kgf/cm²を十分に満足する圧縮強度の超流動コンクリートが安定した品質で供給されているのが分かる。



図-6.2.4 スラブフロー管理結果

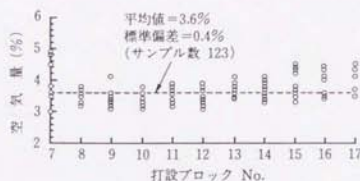


図-6.2.5 空気量管理結果

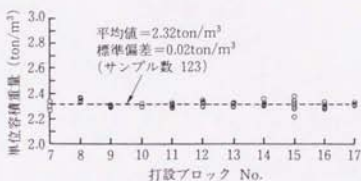


図-6.2.6 単位容積重量管理結果



図-6.2.7 圧縮強度管理結果 (材齢28日)

6.2.5 施工性と改善効果

(1) 充填性について

写真-6.2.4は、超流動コンクリートの充填状況を示したものである。このように、締固めを行わなかったにも拘らず、粗骨材を確保した状態で隔々まで密実に充填しているのが分かる。充填状況を見ると、バケットから流し込むと同時に速やかに流動していき、狭い鋼材間を通り抜けながら充填が終了し、流動勾配もほとんど無く数分間の後に水平な面となった。また、打設後にはブリージング等は生じておらず、レイタンスの発生も殆ど認められなかった。

(2) 省人化について

写真-6.2.5には、柱および横梁における本超流動コンクリートの打設状況を示す。コンクリート打設に携わる作業員は僅かであり、極めて整然とした状態で遂行されているのが分かる。

表-6.2.4には、超流動コンクリートを打設した場合と6ブロック以下を対象としたスランブ8cmの通常コンクリートにより締固めを行って打設した場合のコンクリート打設作業に要する標準配置要員を示す。超流動コンクリートの打設に際して標準配置要員は5人であったのに対して、通常のコンクリートを用いる場合には締固め作業要員として、さらに4人以上が必要であり、超流動コンクリートを用いることにより、打込み時の省人化が可能であることが確認された。

なお、レイタンスの発生は殆ど生じないことから、各ブロックごとの打継ぎ処理についても表面の汚れを洗い流す程度の僅かな労力で済み、通常のコンクリートの場合には作業員1人がほぼ1日を費やしたのに対して、打継ぎ処理作業は数時間で終了した。

(3) 施工の効率化について

コンクリートの打込みに要した時間は、運搬車からバケットへの積み込み→打込み位置への吊り上げ→バケット据付け→流し込み→吊り下げの一連の作業において1サイクル当たり約7分であり、運搬車1台につき30～40分であった。

運搬車1台分の 5m^3 に対する打ち込み速度としては早いとは言えないが、ここで、流し込み自体は30秒程度であり全体に充填し水平となる時間も数分で終了していることから、殆どの時間がバケットへの積み込みと吊上げと吊下げのバケットの移動に要したものである。

一方、同様のバケット打設によりスランブ8cmのコンクリートを締固め作業を行って打設した場合には、締固めを行う都合上、流し込み量を少量ずつ調整しながら打ち込みを行うことから、1サイクル当たり2倍以上の時間を要していた。

以上のように、超流動コンクリートを用いることにより、打込み作業の軽減ならびに効率化が可能であることが実証された。



写真-6.2.4 超流動コンクリートの充填状況



写真-6.2.5 打設状況全景

表-6.2.4 コンクリート打設時の標準配置要員の比較

作業内容	通常コンクリート (スランプ8cm)	超流動コンクリート
運搬車からバケットへの 積み込み	1人	1人
バケット据え付け 流し込み時のゲート開閉	2人	2人
パイプレータによる締固め	平均4人～6人（下部ブロック）	-
打込み時の型枠点検	1人	1人
クレーンオペレータ (バケット吊上げ・吊下げ)	1人	1人
総配置要員	9人	5人

6.3 充填形鋼管コンクリート柱への適用

6.3.1 概要

充填形鋼管コンクリート柱を有する構造形式は、従来のRC造やSRC造と比較して柱部分の型枠や配筋工事が不要であること、また、S造と比較してフレームの剛性を確保し易いこと等、経済性および機能性に優れた構造である。この構造形式は、1967年に日本建築学会から「鋼管コンクリート構造計算基準」が発刊されて以来、各方面で研究開発が行われるようになり、近年においては建設省の「新都市ハウジングプロジェクト」とも相まって、高層建築物に有効な躯体構造形式として注目されるようになった。

しかしながら、この種の構造物は鋼管柱内にコンクリートを充填するコンクリート打設の面で以下のような問題点が指摘されている。

- イ) 鋼管が型枠となる反面、鋼管内部のコンクリートの充填性が確認できない。
- ロ) コンクリートの材料分離による沈降、浮き水の影響
- ハ) 圧密にともなう材料分離による上層部コンクリート強度の低下
- ニ) 鋼管内部に設置される柱梁接合部ダイヤフラムの下部に生じる空隙
- ホ) ダイヤフラムの隅角部に生じる未充填部

一般的にロ)～ホ)の問題点は、コンクリートの充填高さが高くなるほど影響の度合いが大きくなる。

以上のような充填形鋼管コンクリート柱の施工上での問題点を解決するには、充填用コンクリートとして高充填性かつブリージング等の材料分離が極力少ないことが要求され、ここに、高分離抵抗性と高変形性を兼ね備えた超流動コンクリートは、鋼管充填用コンクリートとして極めて有効な材料と言える。

ここでは、超高層ビルにおける高さ約40mのSRC造の充填形鋼管コンクリート柱を対象にした超流動コンクリートの適用工事について述べるものであり、圧入工法により下部から一気に全高さの充填を達成した事例について紹介する。

なお、本工事は1991年5月に実施されたが、それまで前例はなく、この種の構造に対して超流動コンクリートの適用が極めて有効であることを実構造物で実証した最初の事例である。

6.3.2 構造物の概要

本構造物は写真6.3.1に示すような地上70階（最大高さ296m）の高層ビルであり、超流動コンクリートの圧入充填は地上1階から地上9階までを対象に実施した。

充填形鋼管コンクリート柱の平面配置および鋼管柱の種類は表-6.3.1、図-6.3.1に示すとおりである。このうち、円形鋼管柱は外ダイヤフラム形式であり鋼管内部にダイヤフラムはないが、角形鋼管柱は内ダイヤフラム形式であり、図-6.3.2に示すように中心にφ180mmのコンクリート通過用孔と4隅にφ30mmの空気抜き孔のあるダイヤフラムが各階の梁接合部ごとに2枚ずつ、鋼管柱一本当たり合計16枚配置されている。

これら全ての鋼管柱において、地上1階から地上9階までを一気に圧入したものであり、圧入高さは最大で39.4mであった。表-6.3.1に示すように総打設量は約885m³であり、コンクリート打設は1回当たり100m³程度で合計9回にわたり実施した。



写真-6.3.1 本構造物の外観

表-6.3.1 鋼管柱内訳および充填数量

記号	形状：断面×厚さ (mm)×(mm)	本数	1本当りの充填量 (m ³)	全充填量 (m ³)	圧入高さ (m)
C1	□-900×900×40~100	4	24.2	96.9	39.4
C3	○-φ 900×40~90	8	19.6	156.5	
C4	○-φ 900×40~90	8	19.0	152.3	
C5	○-φ 850×40~60	7	17.8	124.7	
C5A	○-φ 850×40~60	1	17.8	17.8	
C7A	□-600×600×55~70	4	8.3	33.0	36.0
C7	□-600×600×50~60	8	8.7	69.9	
C8	□-600×600×45~60	24	9.0	215.3	
C9	□-600×600×45~55	2	9.4	18.8	
合計		66		885.2	

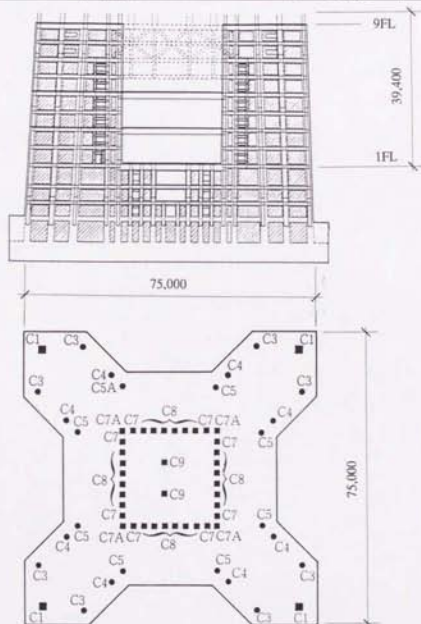


図-6.3.1 鋼管柱配置図

6.3.3 施工概要

(1) 超流動コンクリートの配合

超流動コンクリートの配合および使用材料の品質を表-6.3.2、表-6.3.3に示す。結合材にはプレミックスのフライアッシュ混合マスコン型高炉セメントB種の3成分系結合材を使用し、粗骨材には最大寸法20mmの砕石を使用した。

また、本工事では、鋼管柱1本当りの圧入時間が約30分かかることや不測のトラブル等を考慮し、圧入開始後約60分間はスランプフロー60cm以上を確保することを条件とした。そのため、本超流動コンクリートのスランプフローは標準的には 65 ± 5 cmを品質管理目標値としているが、上記の条件を満足するためには初期のスランプフローが70cm以上とする必要があることを事前の試験で確認し、これに基づいてスランプフローの管理目標値も70cm以上とした。

なお、躯体内部に埋設された鋼管柱であることから耐凍結融解性は特に考慮しないこととし、空気量の上限值は5%としたが管理下限値は設けていない。

(2) 製造

超流動コンクリートの製造はレディーミクストコンクリート工場にて強制2軸ミキサ(容量 3m^3)により、1バッチ 2.75m^3 として練り混ぜた。練り混ぜ手順は図-6.3.3に示すとおりであり、各材料の投入は基本的に自動計量・自動投入とし、分離低減剤のみ手投入により細骨材の投入と同時に細骨材計量槽に粉体添加した。なお、材料投入を除き正味の練り混ぜに要した時間は1バッチ当たり70秒である。

(3) 運搬

コンクリートの運搬はトラックアジテータ車により1台当たり2バッチ分 5.5m^3 を積載し、運搬した。また、運搬に要した時間は約40分であった。

(4) 打設

超流動コンクリートの圧入充填は最大主油圧 240kgf/cm^2 のポンプ車により行い、分岐管工法を採用し、写真-6.3.2に示すように2分岐にて2本の鋼管柱を同時に圧入した。

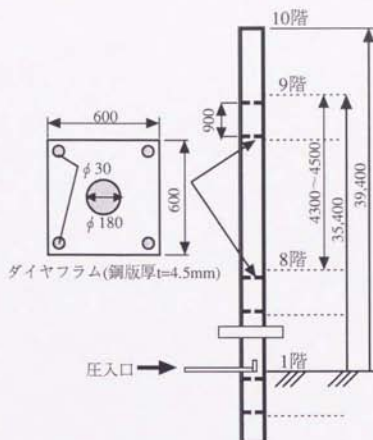


図-6.3.2 鋼管柱縦断面およびダイヤフラム形状

表-6.3.2 超流動コンクリートの配合

W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		
		水 W	結合材 P FMKC	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 P×%	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
34	46	170	500	753	926	0.15	1.4	0.9

表-6.3.3 使用材料の品質

使用材料	仕様	比重	比表面積 (cm ² /g)	粗粒率
結合材 FMKC	フライアッシュ混合マスコン型 高炉セメントB種 (普通ポルトランドセメント36% +高炉スラグ44%+フライアッシュ20%)	2.85	3520	-
細骨材S	君津産	2.56	-	2.63
粗骨材G	鳥形産砕石 (Gmax=20mm)	2.69	-	6.59

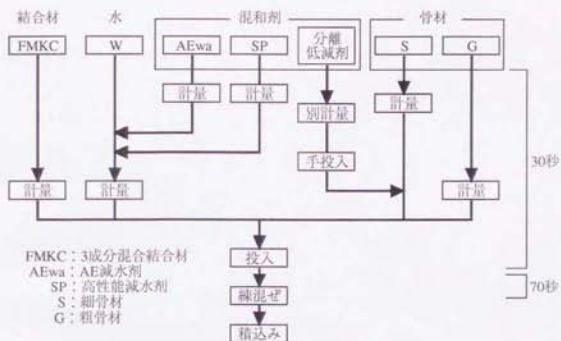


図-6.3.3 超流動コンクリートの製造手順



写真-6.3.2 分岐管工法による圧入充填状況

6.3.4 品質管理

品質管理としては、荷卸し時でのフレッシュコンクリートの受け入れ検査として、スランブフロー・空気量を測定管理した。

(1) スランブフローおよび空気量管理結果

スランブフローおよび空気量の測定は運搬車全車を対象に行ったが、まず、荷卸し時にスランブフローを測定し、スランブフローが小さいと判断された場合には流動化剤を添加し再流動化した後、スランブフローと空気量を再度測定した。

図-6.3.4および図-6.3.5に再流動化後のスランブフローおよび空気量の管理結果を示す。

圧入時のスランブフローは平均71cm（標準偏差5cm）であり、空気量は平均2.5%（標準偏差0.5%）であった。管理目標値を外れるものも僅かにあったが、特に充填に支障をきたすことはなかった。

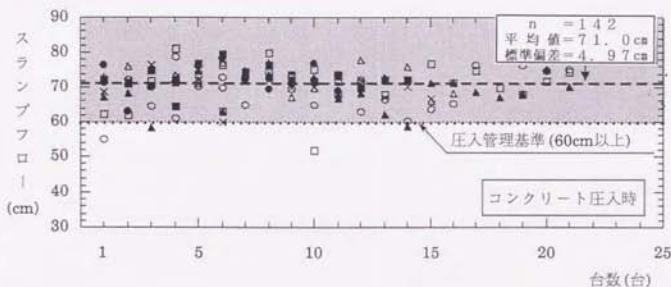


図-6.3.4 圧入時スランブフロー管理結果

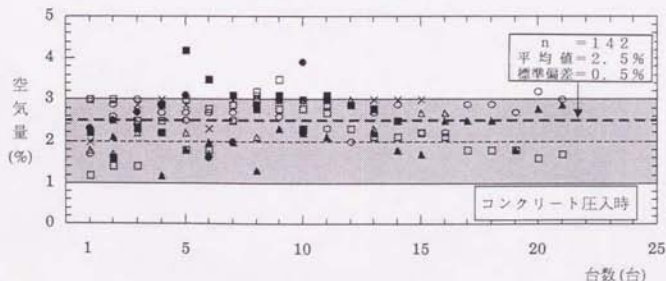


図-6.3.5 圧入時空気量管理結果

6.3.5 施工管理

鋼管柱は完全に構造躯体中に埋設された状態にあることから、外観からの施工管理は不可能である。したがって、本工事で鋼管柱に確実に充填されているか否かを確認する充填管理として以下に示す測定を実施した。

イ) ピストンストローク数による圧入量の確認

コンクリート充填中にポンプ車のピストンストローク数を測定し、圧送高さ、充填量および鋼管内容量を管理した。

ロ) ビデオカメラによる充填状況確認

鋼管柱上部よりビデオカメラを吊り下げ、コンクリートの充填状況を地上計測車内のモニターテレビで確認した。

ハ) コンクリート充填終了後における天端沈下量の測定

充填終了後に、コンクリート天端の沈下量の測定、および、ブリージングの有無を調査した。

6.3.6 施工管理結果

(1) ポンプストローク数による充填量の管理

ポンプストローク数の測定結果と充填予定量との関係として一例を表6.3.4に示す。ポンプストローク数より算出した充填量は充填予定量と良く一致し、この方法で概ね所要の充填量を確認できることが分かる。

(2) ビデオカメラによる充填状況確認結果

写真-6.3.3は、実構造物ではないが、本超流動コンクリートの鋼管柱内への充填状況を検証するため事前に行ったダミー柱における充填状況である。本超流動コンクリートはほぼ水平な状態で上昇して行き、角形鋼管柱においてはダイヤフラム中央部の $\phi 180\text{mm}$ のコンクリート通過用孔と同時に四隅の $\phi 30\text{mm}$ の空気抜き孔からもコンクリートが上昇していることが分かる。実工事においてもほぼこれと同様の充填性を得ることができた。

(3) コンクリート天端の沈下量測定結果

充填終了後の鋼管柱上部の沈下量の測定結果を表6.3.5に示す。24時間経過時点において、内部にダイヤフラムを有する角形鋼管柱の場合の沈下量は圧入充填高さ36mに対して2~3mmであり、ダイヤフラムの無い丸形鋼管柱の沈下量は圧入充填高さ39m充填に対して4mmであった。これらの値は充填高さに対して0.01%以下と極めて小さく、材料分離に起因する沈下が殆ど生じないことを改めて実証することができた。

表-6.3.4 ポンプストローク数と充填予定数量の関係

柱の種類	全ストローク数 (回)	換算充填量 ¹⁾ (m ³)	充填予定量 ²⁾ (m ³)
C8	205	9.2	8.97
C8	199	9.0	8.97
C8	206	9.3	8.97
C9	221	9.9	9.39
C8	205	9.2	8.97
C7+C7A	381	17.1	17.0
C7+C7A	389	17.5	17.0

1) 1ストローク 0.045m³×全ストローク数として算出

2) 鋼管設計図より計算した結果

表-6.3.5 鋼管柱上部の沈下量測定結果

柱の種類	柱No.	沈下量 (mm)	
		1時間後	24時間後
角形鋼管柱	1	1.5	2.0
	2	1.0	2.0
	3	0.0	3.0
	4	0.5	2.0
	5	1.0	1.0
	6	1.0	2.0
	7	2.0	2.5
円形鋼管柱	1	-	4.0



写真-6.3.3 超流動コンクリートのダイヤフラム部の通過状況

6.3.7 まとめ

優れた材料分離抵抗性と変形性を兼ね備えた超流動コンクリートによって、高さ39.4mと極めて高い充填形鋼管コンクリート柱への圧入充填が可能であることが実証された。

本工事によって得られた知見をまとめると以下のとおりである。

(1) ビデオカメラによる観察の結果、超流動コンクリートの上面はほぼ水平な状態で鋼管柱内を上昇して行き、良好な充填状況であることが確認された。

(2) 充填終了後、コンクリート上面には全くブリージングは認められず、また、高さ39mの充填においても天端の沈下量は4mm程度であり、充填高さに対して0.01%以下と無視できる程度の極めて僅かな沈下にとどまっていることが確認された。

(3) 本体の鋼管柱最上部に取り付けたダミー柱において、ダイヤフラム下面にはブリージングや沈降などの空隙は無く密実に充填されているのが確認され、本超流動コンクリートの極めて優れた充填性を実証した。

6.4 LPG貯蔵タンクPC外槽への適用

6.4.1 概要

プレストレストコンクリート構造の壁部材は、一般に薄肉部材の中に鉛直方向および周方向に配置されたPCシース管をはじめ、定着鋼材や補強筋などが複雑に交錯する高密度な配筋条件となり、局部的にはパイプレータの挿入クリアランスを確保すること自体が困難な部分も多く、コンクリートを確実に充填するためには締固め作業に極めて多大な労力を要する。

ここでは、写真-6.4.1に示すLPG低温貯蔵タンクの防液堤を兼ねたPC側壁を対象に行った超流動コンクリートの適用工事について述べるが、特に本工事の特徴として、打設後10日以内に一次緊張を行う工程上の理由から早期の強度発現性を有する超流動コンクリートを使用したこと、また、比較的延長距離が長いことから部分的ではあるが分岐管工法を併用した点が挙げられる。

本構造物のように、打ち込み高さが高く延長距離の長い広域にわたってコンクリートを打設する場合には、局部的に打ち込み高さが高くなり偏った側圧が作用しないように、全体として均一な打ち上がり高さとするのが望まれるが、流動勾配の小さい本超流動コンクリートにおいては特に分岐管工法との併用が有効である。

超流動コンクリートの打設は1991年12月より約3ヶ月にわたり行われたが、このように、プレストレストコンクリート構造で延長距離の比較的長い壁部材への適用は前例の無い初めての試みであった。



写真-6.4.1 LPG貯蔵タンクPC外槽の外観

6.4.2 工事概要

本構造物は容量43,000トンのLPG貯蔵タンクであり、図-6.4.1に示すように、従来の鋼製2重殻タンクにプレストレストコンクリート構造の防液堤（以下、PC側壁と称する）を限りなく接近させ、外槽と一体化させたPC外槽式低温貯槽である。

このように防液堤を兼ねたPC外槽の利点は、狭い用地の有効利用もさることながら、万一、内槽から液漏れを生じても貯槽外への流出が一切なく安全性が図れることにある。

PC側壁は図-6.4.2および図-6.4.3に示すように、部材幅が下部リフトより $1\text{m} \rightarrow 0.775\text{m} \rightarrow 0.55\text{m}$ に変化する構造であり、側壁内にはD19～D25の異形棒鋼が平均的に縦横200mm間隔で配筋されているとともに、鉛直および横締め用のシース管（VSL E6-17, VSL E6-19）が複雑に交差する高密度の配筋条件となっている。

また、側壁下部の1～3リフトには横締め用シースが350mm間隔の多段数で配置されており、他のリフトと比較して特に高密度な配筋条件となっている。そこで、この1～3リフトを対象に本超流動コンクリートを適用することとした。

コンクリートの打設は12月から翌年2月にかけて、約1ヶ月に1リフトの間隔で計3回の打設を行なった。各リフトの打設量は、それぞれ、第1リフト 590m^3 、第2リフト 450m^3 、第3リフト 330m^3 であり、総打設量は計 1370m^3 である。

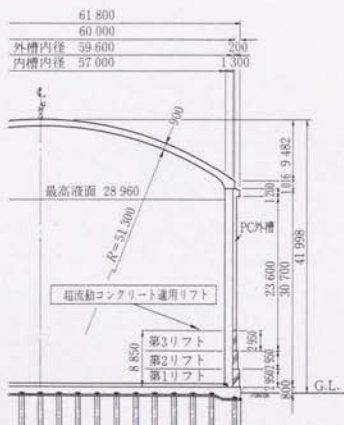
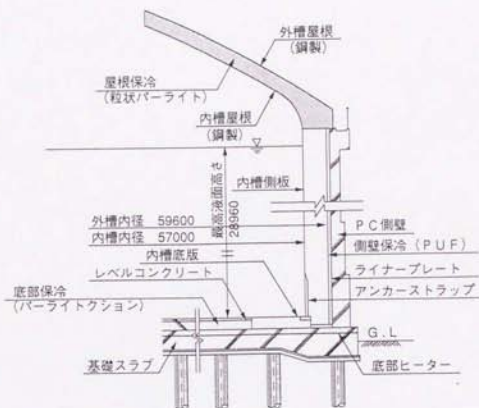


図-6.4.1 LPG貯蔵タンクPC外槽の構造

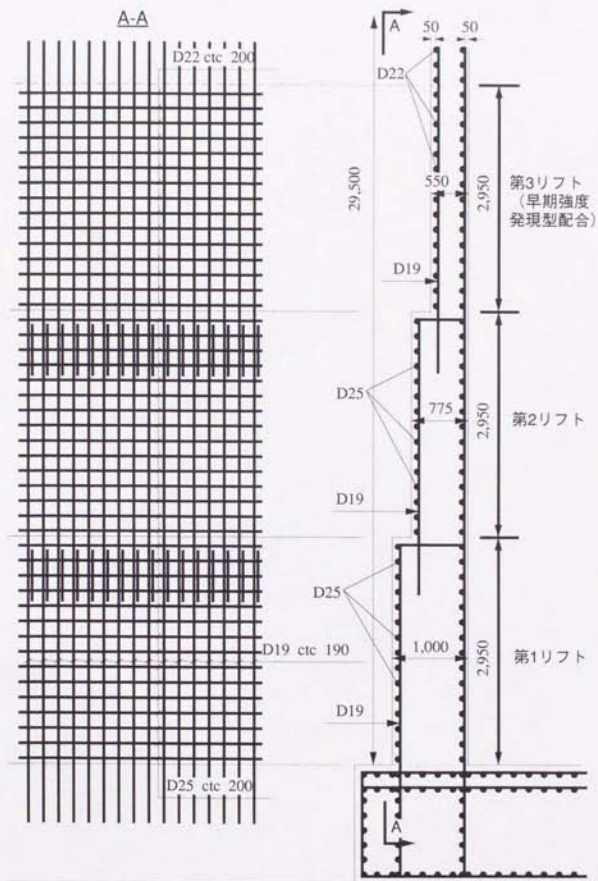


図-6.4.2 PC側壁配筋図 (超流動コンクリート適用リフト部)

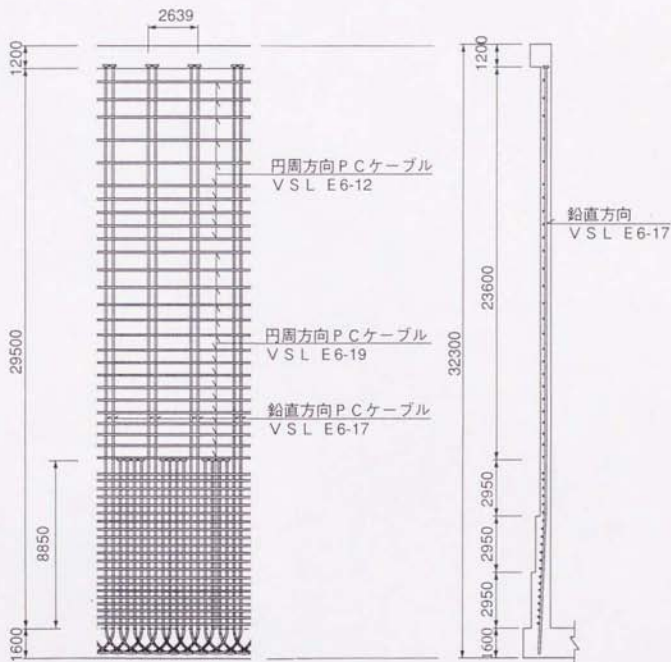


図-6.4.3 PC鋼材配置図

6.4.3 施工概要

(1) 超流動コンクリートの配合

本工事に使用した超流動コンクリートの配合を表-6.4.1に示し、使用材料の品質を表-6.4.2に示す。第1から第3の各リフトともに設計基準強度は材令91日で400kgf/cm²であり、これら2種類の配合は設計基準強度を十分に満足するものであるが、第3リフトについては、打設後10日以内と比較的短期間のうちに鉛直および円周方向において一次緊張を行う施工上の制約により、材令7日で250kgf/cm²以上を目標にした早期の強度発現性を有する配合を選定した。

したがって、第1リフトおよび第2リフトは、フライアッシュ混合マスコン型高炉セメントB種のプレミックス3成分系結合材のみを500kg/m³使用した配合とし、第3リフトについては、この3成分系結合材を350kg/m³に普通ポルトランドセメント175kg/m³を別投入により混合することとした。

表-6.4.1 超流動コンクリートの配合

適用 リフト	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤			
			水 W	結合材 P		細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 P×%	高性能 減水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
				FMKC	C					
第1リフト 第2リフト	34	45	170	500	-	714	902	0.15	1.8	0.88
第3リフト	33		175	350	175	753	926		2.1	0.86

表-6.4.2 使用材料の品質

使用材料		仕様	比重	比表面積 (cm ² /g)	粗粒率
結合材 P	FMKC	フライアッシュ混合マスコン型 高炉セメントB種 (普通ポルトランドセメント36% +高炉スラグ44%+フライアッシュ20%)	2.78	3650	-
	C	普通ポルトランドセメント	3.16	3270	-
細骨材S		千葉県君津産	2.56	-	2.61
粗骨材G		奥多摩産砕石 (Gmax=20mm)	2.67	-	6.61

図-6.4.4に荷卸し時に採取した供試体により行った現場水中養生での構造体強度管理結果の一例を示す。冬期施工であり平均外気温が10℃以下と低かったことから、標準養生と比べて強度発現性は低い、早期の強度発現性を付与した第3リフト用の配合においてはほぼ目標強度である材令10日以内に250kgf/cm²以上を満足する結果が得られているのが分かる。

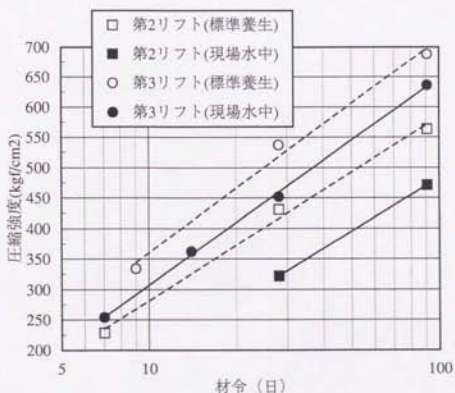


図-6.4.4 構造体強度管理結果

(2) 製造

超流動コンクリートは、第1リフトについては1ヶ所のレーダーミストコンクリート工場にて製造し、第2リフトおよび第3リフトについては2ヶ所の工場にて製造した。いずれの工場も、強制2軸ミキサー（容量 3m^3 ）により1バッチ当たり 2.75m^3 として練り混ぜた。

練り混ぜ手順は図-6.4.5に示すとおりであり、材料投入から練り混ぜ終了までの所要時間は1バッチ当たり約90秒である。

(3) 運搬

コンクリートはトラックアジテータ車により運搬車1台当たり2バッチ分 5.5m^3 を積載して運搬した。運搬時間は約30分である。

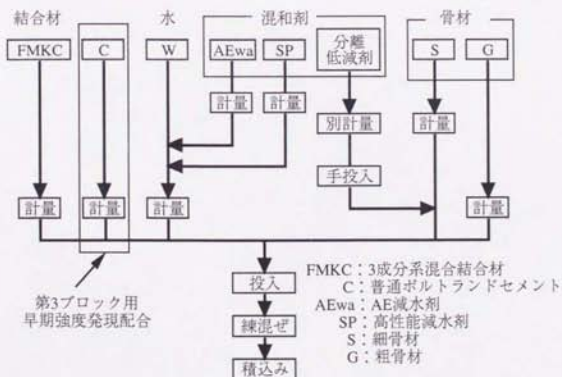


図-6.4.5 超流動コンクリートの製造手順

(4) 打設

コンクリートの打設は3台のブーム付きコンクリートポンプ車（IPF-110B）により行った。また、写真-6.4.2に示すように、各ポンプ車は周方向にはほぼ等間隔で配置し、ポンプ車1台当り側壁の1/3周長として約60mを分担させることとした。なお、この内1台のポンプ車には直接配管を施し、図-6.4.6に示すように各筒先間隔10mの4分岐とした分岐管工法を採用した。

また、円周全体が均等な打上がり高さとなるよう、ブーム打設を行う2台のポンプ車はまずブームの旋回により吐出口を逐次移動し、側壁のほぼ中段まで打上がった時点でポンプ車の据え付け位置を移動した。

6.4.4 充填状況

写真-6.4.3に充填状況を示す。超流動コンクリートは打設後速やかに流動して行き、シース管や定着金具、補強鉄筋が錯綜する定着アバット部においても良好に充填することが確認された。

特に、4分岐管により打設した場合には、各筒先から均等に吐出した超流動コンクリートが流動勾配も小さく水平の状態で打ち上がることが確認され、壁構造物のように延長距離が長い部材には、本超流動コンクリートと分岐管工法との併用が極めて有効な施工法であることを実証した。

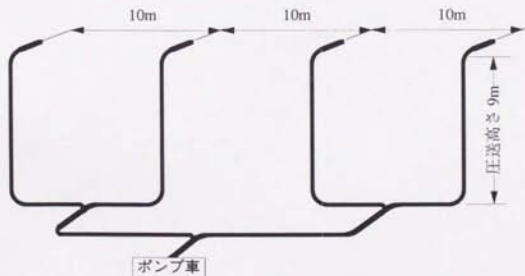


図-6.4.6 分岐管配管図



写真-6.4.2 打設状況全景



分岐管工法による充填状況



標準断面部



定着部

写真-6.4.3 充填状況

6.5 建築構造物の打放し外壁への適用

6.5.1 工事概要

本構造物の特色はその外観デザインにあり、写真-6.5.1に示すように表通りに面して高さ37.5mの3本の塔が立ち、その間を抜けて建物内部に入ると正面におおいがぶさってくるような大きな斜め壁がある。また、裏通り側はカーブにあわせた曲面壁であり、建物全体が曲線や斜めの線を多用したデザインとなっている。また、この外壁仕上げはコンクリートの質感を生かすために打放し仕上げとなっている。

以上のように、本構造物の外壁は打ち放し面の美観が必要とされ、さらに、曲面形状や開口部が多く有り、確実な充填と高い施工精度が要求されることから、本超流動コンクリートを適用することとなった。総打設量は約3,000m³であり、本超流動コンクリートの打込みは1991年3月から10月までの約7ヶ月間で延べ37回にわたって行った。

このような打ち放し仕上げの建築構造物に超流動コンクリートを適用した前例は無く、本コンクリートの高充填性によって、密実かつ良好な仕上り精度を実証したものである。



写真-6.5.1 本建築物の外観

6.5.2 施工概要

(1) 超流動コンクリートの配合

工事に採用した本超流動コンクリートの配合を表-6.5.1に示し、使用材料の品質を表-6.5.2に示す。結合材には、普通ポルトランドセメントと高炉スラグおよびフライアッシュを重量比で2:2:1で混合したブレミックスの3成分系結合材を使用した。なお、本工事では打ち放し面の美観が特に必要とされることから、高強度コンクリート等に多く見られる表面の微細ひびわれを抑制するために、酸化カルシウムを主成分とする膨脹材を外割りで 10kg/m^3 使用することとした。

(2) 製造

超流動コンクリートの製造は、レデーミクストコンクリート工場にて強制2軸ミキサにより行い、1バッチ 2.8m^3 として練り混ぜた。練り混ぜ手順は図-6.5.1に示すとおりであり、各材料の投入は基本的には自動計量・自動投入で行ったが、分離低減剤および膨脹材については、細骨材の投入と同時に、ミキサー上に設けられた粉体用投入口から手投入した。

また、材料投入から練り混ぜ終了までに要した時間は105秒である。

(3) 運搬

コンクリートはトラックアジテータ車にて1台当り2バッチ分の計 5.6m^3 を積載して運搬した。工場から現地までの運搬時間は平均60分であった。

表-6.5.1 超流動コンクリートの配合

W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤		
		水 W	結合材 P	細骨材 S	粗骨材 G	膨張材 (外割)	AE 減水剤 P×%	高性能減 水剤 P×%	分離 低減剤 W×%
35	45	170	482	731	920	10	0.3	1.6	0.6

表-6.5.2 使用材料の品質

使用材料	仕様	比重	比表面積 (cm ² /g)	粗粒率
結合材 P	普通ポルトランドセメント40% +高炉スラグ40%+フライアッシュ20% プレミックス3成分系結合材	2.85	3880	-
膨張剤	酸化カルシウム系	-	-	-
細骨材S	市原産+八戸産混合砂	2.61	-	2.58
粗骨材G	八戸産+宇部産混合砕石 (Gmax=20mm)	2.69	-	6.61

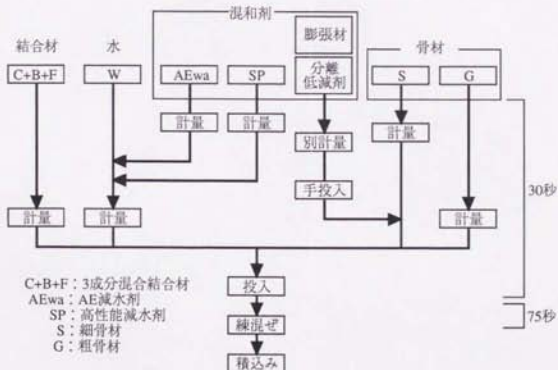


図-6.5.1 超流動コンクリートの製造手順

6.5.3 品質管理結果

品質管理は、基本的に一般のコンクリートにおける品質管理方法であるJASS 5に準拠して行なった。なお、変形性はスランブフローで管理し、管理目標値を60～70cmとし、この範囲を越える場合については材料分離の無いことを確認して75cmまで許容し、下回るものについては原則として荷卸し前に高性能減水剤を添加して再流動化し、所定の目標値に入るように調整した。

荷卸し時におけるスランブフローのデータを全て平均すると67.4cmであり、その標準偏差は5.1cmであった。また、目標空気量は4%としたが、荷卸し時の平均値は3.9%、標準偏差は0.8%であった。

品質管理用の圧縮強度の平均値は、材令7日で320kgf/cm²、28日で504kgf/cm²、91日で614kgf/cm²であった。なお、設計基準強度は保証材令28日において210kgf/cm²あるいは部材により240kgf/cm²であることから、本超流動コンクリートの強度は過大ではあるが、結合材量を減じて設計基準強度に近づけることは充填性を犠牲にすることになるので避けた。

6.5.4 施工上の知見

垂直の打継ぎにおいて、本超流動コンクリートは10mmメッシュ程度のラス金網で打止めることが可能であるが、コンクリートを打止める方法には注意を要し、ラス取り付け部に砂利の通れるような隙間があれば、そこから大量のコンクリートが流失することになる。

そのため、事前にラス金網の取り付け方法についての確認試験を行った。試験体は、幅30cmで高さ4mであり、型枠の一方の端を図-6.5.2に示す要領にてラス金網で塞ぎ、本超流動コンクリートを3層に分けて打ち込んだ。

その結果は写真-6.5.2に示すとおりであり、モルタル等の流出はごく少量であり、図-6.5.2に示すような処置で十分にコンクリートを打止められることを確認した。なお、当然のことながら、ラス型枠には打込み高さに相当する液圧に近い側圧が作用することに注意して、ここに示したような補強を行わなければならない。

一例として、写真-6.5.3にガレージ入口付近の外壁における充填状況を示す。ここには、徐々に壁厚が薄くなり端部では厚さ5cmと極めて薄肉となる壁部材があるが、この部分においても本超流動コンクリートは密実に充填されているのが分かる。

以上のように、今回の施工を通じて、本超流動コンクリートの良好な充填性を実証することができたものである。

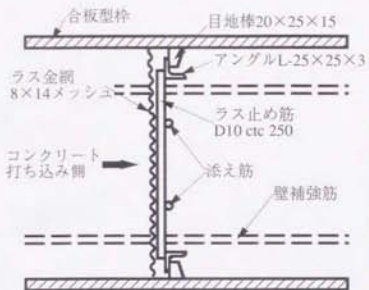


図-6.5.2 垂直打ち継ぎにおけるラス止め要領



写真-6.5.2 ラス止めによる打ち止め状況

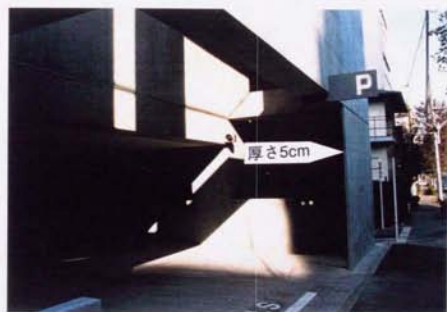


写真-6.5.3 本超流動コンクリートの充填状況

6.6 まとめ

以上、本実用化システムを適用した各種の実工事について述べたが、いずれの工事も現状の製造・管理システムならびに施工体制の下で極めて円滑に遂行され、本システムの正当性を実証することができた。

また、埋設型枠工法あるいは分岐管工法との併用が超流動コンクリートの優れた特長を十分に生かした施工法であることを実証するとともに、高さ40mの鋼管柱への圧入充填を極めて短期間で達成し得たことは、構造的には優れているにも拘らず施工面での難しさによって汎用されなかったハイブリッド構造への道が開けたものと考えられる。

しかしながら、これらの実施工事には吐出量の増大に伴いポンプ圧送圧が急増するために吐出量を小さく抑える必要があること、側圧が大きいため型枠補強を確実に行うか、あるいは、打込み速度を遅くしたり、1回当りの打込みリフトを小さくする等、施工計画段階で考慮する制約も含まれている。

本実用化システムは現状の建設工事体制の範疇において、十分に実用性のある技術と言えるが、さらに合理的で汎用性を高めたシステムとして確立するためには、以上のような打設工法あるいは型枠工法などの基本に立ち戻った施工法の開発が必要であると考えられる。

第7章 結 論

本研究は、現状の製造・管理体制と施工体制において、超流動コンクリートの速やかな実用化を図るべく、「ハイパフォーマンスコンクリート」の配合を基本とし、これに、基材の耐久性に悪影響を及ぼさず、取扱い易く、比較的容易に品質変動に対する適用範囲を向上させることが可能な新しい分離低減剤を添加することの特徴とする超流動コンクリートを用いて、その配合選定から製造と施工に至る一連の実用化システムの確立を目的として進めたものである。

本研究によって得られた結論を各章ごとにまとめ以下に述べる。

第2章では、本研究で取り扱う新しい分離低減剤の基本的性質を把握し、本分離低減剤の分離抵抗性および変形性に対する作用機構について検証した。その結果、本分離低減剤は結合材液中のカルシウムイオンと架橋した膨潤ゲルを形成する性質を有すること、その膨潤の際にセメントペースト中の練り混ぜ水を吸水することによりセメントペースト中の自由水が少ない状態になり、見掛け上、ペーストの分離抵抗性を高める作用機構が主体であること、さらに、本分離低減剤の練り混ぜ水への溶解は僅かであり、練り混ぜ水自体の粘性の増加が小さいことによって、高性能(AE)減水剤の変形性付与効果が効率的に得られることを示した。

また、混和剤として使用する上での絶対条件と言える基材の水和への影響を調査し、本分離低減剤は基材の水和機構や水和過程に影響を及ぼさず、硬化後においては、本分離低減剤の膨潤粒子が結合材の水和生成物と複合体を形成した球状粒子の形態で存在していることを明らかにした。

第3章では、本分離低減剤を添加することによって付与される超流動コンクリートのフレッシュコンクリートへの作用効果についての検証を行った。その結果、第2章で示した本分離低減剤の有する作用機構によって高分離抵抗性が付与され、また、高性能減水剤の併用によって効率的に材料分離を生じない状態での変形性を大きくできることを明らかにした。すなわち、これら両性能の複合効果によって、比較的容易に基材の自己充填性を向上させることが可能であり、この自己充填性の向上によって、使用材料の品質変動に対する良好な自己充填性を確保する充填可能範囲を高めることが可能であることを示した。

第4章では、本分離低減剤を添加した超流動コンクリートの硬化後の品質について、その均質性と耐久性について検証した。

まず、実工事とはほぼ同じ条件の下で、大型壁状部材および実構造物の一部を対象に、締固めの排除と材料自体の有する高分離抵抗性によって付与される部材全体にわたっての均質性を検証することとした。

大型壁状部材については、部材の高さ方向での圧縮強度と鉄筋付着強度のパラツキを評価し、部材全体にわたって高さ方向の品質差はなく、特に、ブリージングなどの材料分離

に如実に影響される水平鉄筋の付着強度においても十分な付着性能と均質性が確保されていることを検証し、予測したとおりの結果を得た。

さらに、実構造物の一部を対象とした試験打設において、本超流動コンクリートの水平方向への流動による品質の変化について調査した。その結果、13m程度の比較的長距離の流動後も、強度や比重のパラツキは僅かであり、部材全体としての均質性が確保されていることを実証した。

次に、本超流動コンクリートの配合上の特殊性から予想される硬化コンクリートの基礎物性を確認するとともに、前述の大型壁状部材の実環境暴露試験ならびに室内での促進試験により、その耐久性を検証した。

その結果、本分離低減剤は基材の硬化後の基礎物性や耐久性に悪影響を及ぼさないこと、本超流動コンクリートは基本的には高品質で高耐久性を有しているが、この品質を確実に得るためには、使用材料や配合の特殊性に対して従来より指摘されているのと同じ範疇での配慮が必要であることを示した。

第5章では、現状の製造・管理体制ならびに施工体制において、本超流動コンクリートを用いた、配合選定から製造、施工に至る一連の実用化システムの構築を行った。

まず、本超流動コンクリートの基本性能を定量的に評価できる評価試験法を提案した。本評価法によって、本超流動コンクリートに要求される変形性および分離抵抗性の適正範囲を定量化し、この評価結果を基に、配合選定における良否の判定値および実工事での品質管理目標値を設定するに至った。

さらに、試験練りを主体とするものではあるが、ここで設定した判定値を用いて簡易的に本超流動コンクリートの配合を選定する配合選定手法を提案した。

次に、本超流動コンクリートを実工事に適用する上で従来のコンクリートと異なる性状を示すと考えられる施工上の要因として、所要の自己充填性を確保する上での練り混ぜ条件、運搬による品質の変化、従来のコンクリートに比べて高粘性であることによるポンプ圧送性の違い、自己充填性が高く比較的凝結硬化が遅いことによる側圧の増加、高変形性であることによる流動勾配に着目し、これらの施工性についての実証試験を行ない、施工計画の段階で考慮すべき留意事項を明確にし、その適用条件を示した。

以上の一連の研究の結果、本超流動コンクリートの適用範囲において、ある程度の施工上の制約を含んではいるが、現状の製造・管理体制および施工体制のもとでも比較的汎用性のある実用化システムを確立するに至った。

第6章は、ここに確立した実用化システムを適用した、実構造物への実施例についてまとめたものである。これらは、超流動コンクリートの有する長足をさらに生かすことが可能であると考えられる埋設型枠工法や分岐管工法との併用、あるいは、本超流動コンクリートでなければ達成しえなかったと考えられる高さ40mの充填形鋼管コンクリート柱への圧入工事であり、いずれも、前例のない初めての試みであった。

その結果、いずれの工事も円滑かつ確実に遂行され、本研究で構築した実用化システム

の正当性を実構造物において実証するに至った。

本研究によって開発した実用化システムは、現状の建設工事の範疇において実用的で比較的汎用性のあるシステムであると考えている。しかしながら、吐出量の増大にともないポンプの圧送圧が急増することから吐出量等を比較的小さく抑える必要があること、側圧が大きいため型枠補強を確実にを行うか、あるいは、打込み速度を遅くしたり、1回当りの打込み高さを制限する等、施工計画の段階で十分に考慮しなければならない制約も含まれている。

しかしながら、超流動コンクリートは従来の施工法と単に組み合わせて適用する技術ではなく、その特性を十分に生かすことによって、建設工事全体を体系的に革新するような新しい施工法を生み出す可能性を秘めた技術である。

本超流動コンクリートの適用において先に挙げた施工上の制約は、逆に言えば、建設工事の基本とも言えるこれらの施工法自体に改善の余地を多く含んでいると言い換えることができる。

今後は、従来の施工法自体の改良は勿論のこと、建設工事全体を体系的にとらえた新しい施工法の確立が必要であり、これらの施工法に関する研究開発を推進することが特にわれわれ施工に携わる技術者の使命であると考えている。

謝 辞

平成4年10月に第1種博士課程社会人教育プログラムにより東京大学大学院に入学して以来、終始温かい御指導と御鞭撻を賜わるとともに、本論文の審査において主査をして頂きました東京大学教授 岡村甫博士に心より感謝申し上げます。

また、東京大学助教授 小沢一雅博士ならびに東京大学助教授 前川宏一博士には、本論文をまとめるにあたって数々の問題点について適切な御助言と御指導を頂くとともに、多くの励ましの御言葉を頂きました。ここに深く感謝いたします。

さらに、東京大学教授 柳田博明博士、東京大学教授 瓜生敏之博士、東京大学教授 友澤史紀博士、東京大学教授 魚本健人博士には、ご多忙にもかかわらず副査となって頂き、かつ御厚意ある数多くの御指導を頂きました。ここに深甚なる感謝の意を表する次第であります。

また、東京大学教授 國島正彦博士ならびに東京大学助手 下村匠助手には、在学中において、日頃より暖かい御支援と御助言を頂きました。ここに心から感謝いたします。

武田薬品工業(株) フードビタミン事業部 楠井貞郎グループリーダー、フードビタミン研究所 奈良潔所長ならびに研究所員の皆様には、本研究の遂行に対して多大な御配慮と御協力を頂きました。ここに謹んで御礼を申し上げます。

大成建設(株) 技術本部 後藤英一副本部長、技術研究所 内藤隆史副所長ならびに松岡康訓チームリーダーには、本研究の遂行の機会を与えて頂くとともに、社会人プログラムへの入学に際しまして多大なる御理解と御配慮を頂きました。さらに、本研究の遂行に際しまして、THAMMASAT UNIVERSITY Assistant Professor Dr. Somnuk Tangtermsirikul、ならびに、大成建設(株) 技術研究所 早川光敬主任研究員、横田和直氏、坂本淳氏および土木構造チームの皆様にも多くの御協力と御支援を頂きました。ここに、深甚なる謝意を表明いたします。

なお、日々にわたり叱咤激励して頂いた友人ならびに諸先輩、私を温かく見守るとともに心配し応援してくれた家族、父母、親類縁者に心より感謝いたします。

最後になりましたが、この社会人教育プログラムによって、本論文のとりまとめのもとより、研究に対する物の考え方や取り組む姿勢など研究者としてあるべき姿について多く学ぶことができましたことは、今後の自分の一生を左右する貴重な財産となりました。

我々社会人にとって理想のシステムと言える本プログラムに入学できたことは身に余る榮譽であったと深く感じ入るとともに、本プログラムへの入学にあたって多大なる御配慮と御尽力をいただきました、岡村甫教授、前川宏一助教授ならびに小沢一雅助教授に改めて深く御礼申し上げます。

＜参考文献一覧＞

- [1.1]吉田徳次郎 著：コンクリート及び鉄筋コンクリート施工法、丸善（株）、1953
- [1.2]岡村 甫：新しいコンクリート材料への期待、セメントコンクリート、No.475、pp.2-5、1986
- [1.3]前川宏一ほか：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの流動途上における分離抵抗性、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp.9-14、1987
- [1.4]橋本親典ほか：フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞過程の可視化に関する実験手法、コンクリート工学、Vol.26、No.2、pp.119-127、1988
- [1.5]Ozawa K., et al. : Flow and Segregation Behavior of A Two-Phase Model Concrete around Bifurcating Pipe Lines、土木学会論文集、No.408、V-11、pp.195-203、1989
- [1.6]泉 達男ほか：固体間摩擦抵抗に及ぼすペーストの効果、コンクリート工学年次論文報告集、10-2、pp.309-314、1988
- [1.7]小沢一雅ほか：ハイパフォーマンスコンクリート-コンクリート構造物の信頼性向上に最も有効な材料-、土木学会誌4月号、pp.24-25、1989
- [1.8]小沢一雅ほか：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集、11-1、pp.699-704、1989
- [1.9]岡村 甫ほか：「締固め不要」のコンクリート-ハイパフォーマンスコンクリートへの挑戦-、土木施工、pp.27-33、1989
- [1.10]岡村 甫・小沢一雅：締固め不要コンクリートの可能性と課題、コンクリート工学、vol.30、No.2、pp.5-14、1992
- [1.11]岡村 甫・小沢一雅：コンクリートの製造システム研究委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集、14-1、pp.23-26、1992
- [1.12]竹下治之ほか：締固め不要な高流動コンクリートに関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、第1巻、第1号、pp.143-153、1990
- [1.13]佐原晴也ほか：高流動コンクリートのワーカビリティ評価試験方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、13-1、pp.137-142、1991
- [1.14]牧野英久ほか：高流動化コンクリートのワーカビリティと材料不分離性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp.297-300、1990
- [1.15]近松竜一ほか：超流動コンクリートの流動性と分離抵抗性に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、14-1、pp.381-386、1992
- [1.16]坂田 昇ほか：高流動コンクリートの充填性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp.301-306、1990

- [1.17] 福留和人ほか：増粘剤および高性能減水剤を用いた高流動化コンクリートの材料分離抵抗性について、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.210-211, 1990
- [1.18] 糸日谷淑光ほか：大型橋りょう基礎のコンクリート-多品種対応型・大容量コンクリート製造設備、コンクリート工学、Vol.31、No.3、pp.49-55、1993
- [1.19] 長友良一ほか：LNGタンク防液堤における超流動コンクリートの施工、コンクリート工学、Vol.30、No.9、pp.27-36、1992
- [1.20] 北村八朗ほか：わが国初の14万kL LNGタンクの建設、コンクリート工学、Vol.31、No.4、pp.42-56、1993
- [1.21] 古澤晴彦・山本博之：水溶性高分子を添加したフレッシュモルタルの性状に関する基礎実験、コンクリート工学年次論文報告集、11-1、pp.415-420、1989
- [1.22] 中村亦夫：水溶性高分子、新增補二版、化学工業社
- [1.23] 下山善秀ほか：第42回セメント技術大会講演要旨、pp.106-107、1988
- [1.24] 長合友造・山本泰彦：水中不分離性コンクリートの耐凍害性に関する基礎研究、水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム、pp.167-174、1990
- [1.25] 福留和人ほか：特殊水中コンクリートの乾燥収縮・クリープ特性、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.356-357, 1987
- [1.26] 水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）、土木学会コンクリートライブラリー-67、1991
- [2.1] Akira KONNO and Hiroshi KIMURA : Gel Formation of Curdlan and Ca^{++} in Aqueous Alkaline Solution、金蘭短期大学研究誌、第23号、1992
- [2.2] 水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）、土木学会コンクリートライブラリー-67、1991
- [2.3] T. Harada, et al. : Bull. Kobe Women's Univ., 20(2)-143、1987
- [2.4] Robert H., et al. : FINESTRUCTURE OF (1-3)- β -D-GLUCANS、Carbohydrate Research 75、pp.231-242、1979
- [2.5] 中川良隆：大規模水中不分離性コンクリートの性能に及ぼす材料の品質ならびに製造方法に関する研究、東京大学学位論文、1991
- [2.6] 早川和久ほか：メチルセルロースのセメントへの吸着挙動とセメント凝結遅延作用との関係、第38回高分子討論会、1989
- [2.7] 早川和久ほか：水中不分離性混和剤の分布と溶出に関する基礎実験、水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集、pp.15-20、1990
- [2.8] 和泉 隆：特殊水中コンクリート用混和剤、コンクリート工学、vol.28、No.3、pp.27-33、1990

- [4.1] 神田 衛・吉田八郎：コンクリート打込み後の柱断面における水セメント比の分布性
状、セメント・コンクリート、No.342、pp.27-32、1975
- [4.2] 児玉武三：打設コンクリートの高さによる性質の変化について、セメント技術年報、
18巻、pp.386-394、1964
- [4.3] 上野裕康ほか：コンクリート柱の各部における強度、土木技術資料、12-12、pp.23-28、
1970
- [4.4] 高強度コンクリートの技術の現状、日本建築学会、丸善（株）
- [4.5] 岸谷孝一ほか：流動化コンクリートの施工性に関する現場実験、セメント・コンクリ
ート、No.419、pp.26-34、1982
- [4.6] 流動化コンクリート施工指針（案）、土木学会コンクリート・ライブラリー、第51号、
1983
- [4.7] 関 博・赤塚雄三：コンクリート柱に水平に埋込んだ異形鉄筋の付着強度、土木学会
論文報告集、第164号、pp.45-51、1969
- [4.8] 鈴木忠彦・庄川選男：プラント添加による高強度コンクリートの検討（その1）、日
本建築学会大会学術講演梗概集、pp.49-50、1986
- [4.9] 鄭 憲秀・黒正清治：減水剤を使用した高強度コンクリートと鉄筋の付着強度実験、
日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.125-126、1979
- [4.10] 内川 浩：組成と構造の観点から見た硬化セメントペースト、モルタルおよびコン
クリートの類似点と相違点、セメント・コンクリート、No.507、pp.33-46、1989
- [4.11] P.k.Meththa：Concrete:Structure,Properties and Materials、Pretice-Hall International Series in
Civil Engineering and Engineering Mechanics、1986
- [4.12] 国府勝郎：水中不分離性コンクリートの流動、凝結および強度発現性状に対するセ
メントおよび混和材料の影響、水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集、
pp.37-34、1990
- [4.13] 大倉真人：水中不分離性コンクリートの強度および耐久性に関する実験、水中不分
離性コンクリートに関するシンポジウム論文集、pp.93-100、1990
- [4.14] 中川良隆 他：水中不分離性コンクリートの品質、特に分離抵抗性と凝結、流動性
の長時間保持に関する研究、水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集、
pp.53-60、1990
- [4.15] 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針（案）、土木学会コンクリ
ート・ライブラリー第63号、1988
- [4.16] セメント協会コンクリート専門委員会：コンクリートによる高炉スラグ微粉末の混
合率に関する研究、F-14、1988
- [4.17] 長瀬重義 他：低発熱型セメントを使用したコンクリートの特性と大型モデル実験、
セメント・コンクリート、No.522、pp.32-42、1990

- [4.18]岡田凌太・三百田敏夫：低発熱セメントの現状（水中不分離性コンクリートへの適用を中心に）、コンクリート工学、Vol.30、No.9、pp.17-26、1992
- [4.19]鈴木康範ほか：新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の定量化、土木学会論文集、第396号、V-9、pp.109-117、1988
- [4.20]ACI Committee 363R：State of the Art Report on High Strength Concrete、ACI Manual of Concrete Practice、1987-Part 1
- [4.21]上西 隆・林 芳尚：高強度コンクリートの基本特性と構造物強度について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.231-236、1991
- [4.22]河井 徹ほか：1000kgf/cm²コンクリートの実用化への挑戦（超高強度コンクリートに関する実験的研究）、セメント・コンクリート、No.508、pp.31-38、1989
- [4.23]阪田憲次ほか：コンクリートのクリープひずみの予測式の提案、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、pp.271-276、1988
- [4.24]阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測、コンクリート工学、Vol.31、No.2、pp.5-14、1993
- [4.25]前川宏一：弾塑性破壊理論に基づくコンクリートの構成則、コンクリート工学協会第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp.1-8、1983
- [4.26]国府勝郎：高炉スラグ微粉末、コンクリート工学、vol.26、No.4、pp.25-31、1988.
- [4.27]ACI Committee 212：Admixtures for Concrete、ACI Journal、60-11、1963
- [4.28]ACI Committee 201：Guide to Durable Concrete、ACI Journal、74-12、1977
- [4.29]岸谷孝一 著：鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版、1963
- [4.30]和泉意登志：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類、調合および養生条件の影響について、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.117-120、1985
- [4.31]依田彰彦：高炉セメントコンクリートの中性化、セメント・コンクリート、No.429、pp.26-32、1982
- [4.32]友澤史紀：中性化による問題、施工、No.229、pp.71-78、1985
- [5.1]出光隆也ほか：高性能減水剤を用いた高強度コンクリートの性質について、セメント技術年報、No.31、pp.203-206、1977
- [5.2]小玉克己・橋 大介：練り混ぜ方法の相違による高強度コンクリートの品質の変化、セメント技術年報、No.31、pp.333-336、1977
- [5.3]岡田 清著：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店
- [5.4]中川良隆：大規模水中不分離性コンクリートの性能に及ぼす材料の品質ならびに製造方法に関する研究、東京大学学位論文、1991
- [5.5]コンクリートポンプ工法施工指針（案）・同解説、日本建築学会

- [5.6] 神山 一：マスコンクリート型わくおよび壁型わくの側圧、土木学会論文集、第95号、pp.43-54、1963
- [5.7] 伊東茂富 著：コンクリート工学、森北出版
- [5.8] M.Adams, et al. (近藤基樹 訳)：型わくに加わる生コンクリートの側圧、コンクリート・ジャーナル、Vol.4、No.6、pp.61-74、1966
- [5.9] 田辺 清・高瀬三郎：分岐配管によるコンクリートのポンプ施工-東電・東扇島LNGセンター、コンクリート工学、Vol.25、No.6、pp.40-50、1987
- [5.10] 加島 聡ほか：みなとみらい21・25街区ランドマークタワーにおける超低発熱コンクリートの施工、コンクリート工学、Vol.29、No.4、pp.50-58、1991
- [6.1] 内藤隆史：ポリマー含浸防食技術の実用化に関する研究、東京大学学位論文、1990

