

博士論文

流動性の高いコンクリートの品質に及ぼす
混和材料および高圧圧送の影響

2023年3月

太田 貴士

東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 建築学域

目次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.2 本研究の目的.....	3
1.3 本論文の構成.....	5
第1章の参考文献.....	7
第2章 既往の研究.....	8
2.1 はじめに.....	8
2.2 流動性の高いコンクリートの品質およびその評価方法.....	8
2.3 増粘剤含有混和剤を用いた流動性の高いコンクリートの研究事例.....	18
2.4 圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響.....	20
2.5 コンクリートの圧送性評価方法.....	26
2.6 まとめ.....	30
第2章の参考文献.....	31
第3章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの品質検討.....	35
3.1 はじめに.....	35
3.2 増粘剤含有混和剤の添加がコンクリートの品質に及ぼす影響の検討.....	35
3.2.1 実験概要.....	35
3.2.2 フレッシュコンクリートの試験結果.....	40
3.2.3 硬化コンクリートの試験結果.....	44
3.3 中流動コンクリートに必要な締固め程度の評価方法の検討.....	46
3.3.1 振動試験装置および締固め性の評価方法.....	46
3.3.2 コンクリートの使用材料および調合.....	47
3.3.3 調合の相違による締固め完了エネルギーの変化.....	48
3.3.4 締固めを考慮した中流動コンクリートの調合選定方法の検討.....	51
3.4 まとめ.....	55
第3章の参考文献.....	56
第4章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの実用化検討.....	57
4.1 はじめに.....	57
4.2 模擬柱壁試験体を用いた施工性および躯体品質の検討.....	58
4.2.1 室内実験.....	58
4.2.2 実大施工実験.....	60
4.3 建築物への実適用.....	70
4.3.1 増改築工事への適用.....	70
4.3.2 新築工事への適用.....	73
4.3.3 免震改修工事への適用.....	75
4.4 製造・施工マニュアル.....	78
4.5 まとめ.....	79
第4章の参考文献.....	79

第5章 高圧圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響の検討.....	80
5.1 はじめに.....	80
5.2 コンクリートの使用材料および調合.....	80
5.3 長距離圧送実験の概要.....	82
5.3.1 圧送条件.....	82
5.3.2 試験項目.....	83
5.4 長距離圧送実験の結果.....	84
5.4.1 コンクリートの試験結果.....	84
5.4.2 管内圧力計測結果.....	86
5.5 まとめ.....	94
第5章の参考文献.....	94
第6章 高圧圧送によるコンクリートの流動性変化の評価方法および要因の検討.....	96
6.1 はじめに.....	96
6.2 小型圧送性試験装置.....	96
6.3 予備実験.....	98
6.3.1 実験概要.....	98
6.3.2 実験結果.....	100
6.4 圧送性試験.....	101
6.4.1 試験概要.....	101
6.4.2 試験結果.....	101
6.5 高圧圧送による圧力およびせん断力が流動性低下に及ぼす影響の検討.....	105
6.5.1 試験概要.....	105
6.5.2 試験結果.....	105
6.6 高圧圧送によってコンクリートに生じる各種変化の検証.....	109
6.6.1 粗骨材の含水率.....	110
6.6.2 凝結時間.....	110
6.6.3 セメント粒子の総吸着可能面積.....	111
6.6.4 混和剤吸着量.....	111
6.6.5 骨材粒度分布.....	113
6.7 まとめ.....	114
第6章の参考文献.....	115
第7章 総括.....	116
7.1 本研究の総括.....	116
7.2 各章のまとめ.....	118
7.3 今後の展開.....	122
第7章の参考文献.....	123
本研究に関連する発表論文等.....	124
謝辞.....	126

第1章 序論

1.1 本研究の背景.....	1
1.2 本研究の目的.....	3
1.3 本論文の構成.....	5
第1章の参考文献.....	7

第1章 序論

1.1 本研究の背景

コンクリートの密実な充填を確実に得るためには、打込み時に必要な流動性（ここではスランプ、スランプフローを指す）を確保したうえで、適切な締固めを行う必要がある。コンクリートの流動性は、コンクリートの製造から打込みまでの時間経過や運搬等によって変化する。打込みに必要なコンクリートの流動性を確保するために、圧送条件や環境温度等の影響によるコンクリートの流動性の変化を予測して、その変化を見込んだスランプ、スランプフローの設定を行う必要がある。ここで、コンクリートの密実な充填を得るために考慮しなければならないプロセスの一例として、各施工段階におけるコンクリートの流動性の変化を図1.1に示す。同図は文献1-1)を参考にして作成しており、後述する現状の課題を併記した。図1.1に示すように、荷卸しの目標スランプ、スランプフローは、打込みの最小スランプ、スランプフローを基準として、これに荷卸しから打込みまでの現場内での運搬（圧送等）および時間経過に伴うスランプ、スランプフローの低下、現場までの運搬に伴うスランプ、スランプフローの低下、および製造における品質の許容差を考慮して設定する。設定されたスランプ、スランプフローや、その他の求められる性能および条件を考慮し、使用するコンクリートを選定する。このようなプロセスにおいて、近年の変化により以下の点が課題として認識されるようになった。

- (1) 普通強度領域において汎用的に使用できる流動性の高いコンクリートの選択肢がないこと。
- (2) 締固めを必要とする高流動コンクリート（以下、中流動コンクリートという）に必要な締固めの程度が明確になっていないこと。
- (3) 高圧圧送に伴うコンクリートの流動性の変化が明確になっていないこと。

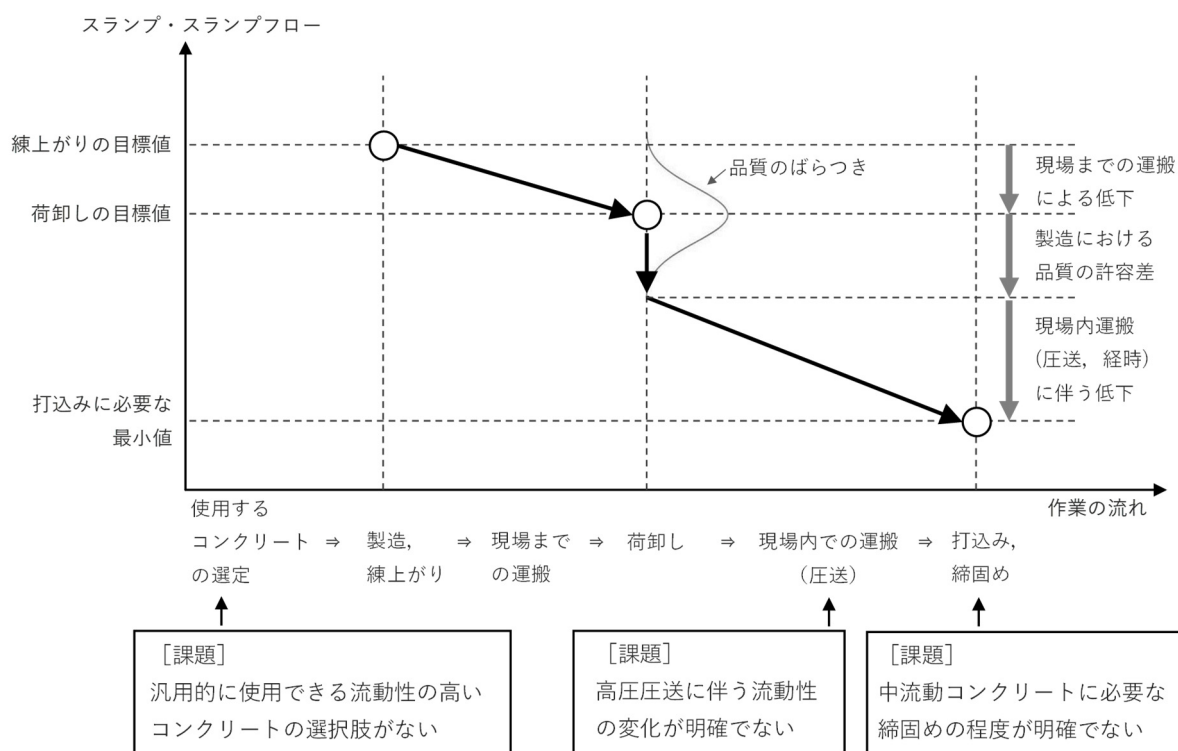


図 1.1 各施工段階におけるコンクリートの流動性の変化および現状の課題

近年、建築物の耐震化や意匠性の多様化が進み、鉄筋コンクリート構造物においては高密度な配筋を要する部材や、断面が小さくスレンダーな部材が増えている。このような鉄筋コンクリート部材の隅々までコンクリートを充填し、躯体品質を確保するためには、中流動コンクリートや高流動コンクリートのように、打込み時に大きなスランプ、スランプフローを有することが効果的である。さらに、このようなコンクリートは締固め作業を軽減もしくは省略できるため、建設現場におけるコンクリート工事の生産性を向上させる効果も期待できる。昨今では建設工場の生産性向上が強く求められており、国土交通省が策定した「流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン」¹⁻²⁾、¹⁻³⁾では、現場打ちコンクリート工場の生産性が著しく向上すると判断された場合には、高流動コンクリートを選定してよいと示されている。

これまで建築分野における高流動コンクリートは、一般的に単位セメント量を増やして流動性と材料分離抵抗性を高めたものが多く、建築物に要求されるコンクリート強度に対して、過剰な単位セメント量やコンクリート強度を有する割合を用いなければならない場合が多かった。また、このような高流動コンクリートは JIS A 5308 レディーミクストコンクリートの範囲外であり、国土交通大臣の認定を取得する必要があった。このため高流動コンクリートは、適用までの煩雑さやコストアップを理由に特殊な案件以外での適用が見送られることが少なくなかった。このような状況の中、流動性の高いコンクリートの普及促進を図るべく本研究に着手した。

現在では、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤等の混和剤を用いて単位セメント量を多くすることなく流動性と材料分離抵抗性を高めた中流動・高流動コンクリートの実用化が進み¹⁻⁴⁾、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートに呼び強度 27~45 のスランプフロー45~60cm のコンクリートが新設されている。しかし、当該コンクリートの JIS を取得した工場は限られており、汎用的に使用できる状況ではないと言える。そのため建設現場によっては、適用可能な流動性の高いコンクリートの選択肢が無い課題が残っている。そこで、例えば建設現場で混和剤を後添加することで容易に製造でき、十分な流動性と材料分離抵抗性を併せ持つ中流動・高流動コンクリートが開発されれば、適用可能な建設現場が広がり、流動性の高いコンクリートの普及を促進させることができると考えられる。

また近年では、トンネル覆工コンクリートを中心に中流動コンクリートの適用事例が増えている。中流動コンクリートは、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間の流動性を持つコンクリートであり、高流動コンクリートと比較して経済性に優れる利点がある。また、施工条件に対して過度に高い流動性を求めて単位セメント量や混和剤使用量を増やすのではなく、必要十分な流動性としたコンクリートを用いることは、サステナビリティの観点からも利点があると言える。中流動コンクリートは高流動コンクリートのような自己充填性を有しておらず、外力による締固めを必要とする。しかし現状では、この必要な締固めの程度が明確になっていないことが懸念事項となっている。例えば、中流動コンクリートの施工において、必要となる締固めの程度を把握していないと、締固め過少の場合の充填不良、締固め過多による材料分離等が発生しやすくなる。

一方で近年では建築物の高層化も進んでおり、海外の事例では高さ 828m の超高層ビルが実現し、高さ 600m までのコンクリートの圧送が行われている¹⁻⁵⁾。日本国内では、最も高いビルとして高さ 300m の超高層ビルが実現されており¹⁻⁶⁾、¹⁻⁷⁾、今後はさらに高層となるビルの建設が複数計画されている。高所圧送や長距離圧送では、コンクリートの品質の変化が生じやすいことが経験的に知られており¹⁻⁸⁾。スランプ 8~18cm の範囲で圧送距離 100m 当たり 2cm 程度、スランプ 18cm 以上の場合は 100m 当たり 0.5cm 程度スランプが低下する報告もある¹⁻⁹⁾。

圧送距離の増加に伴い、コンクリートポンプの根本（筒元）に作用する圧力すなわち圧送負荷も大きくなり、既往の高さ 200m 級の高層ビルのコンクリート圧送における圧送負荷が 10~12N/mm²程

度であるのに対して、高さ 300m を超える超高層ビルのコンクリート圧送では圧送負荷が $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に達すると予想される。 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる圧送について、国内における施工事例や研究事例はほとんど無く、高圧圧送によるコンクリートの品質への影響が明確になっていないこと、ならびに高圧圧送における管内圧力損失などの実施工に資するデータが不十分であることが課題となっている。

圧送によるコンクリート品質の変化に関する資料がなく、コンクリートの要求品質を満足した圧送が可能か否かの予測ができない場合には、実大規模の試験圧送を行う必要がある¹⁻¹⁰⁾。この場合、特に長距離圧送配管を要する条件では多大な労力や費用を要するため、室内試験規模の評価方法の確立が望まれている。コンクリートの圧送性を評価・検討する試験方法や関連する既往の研究事例として、作栄らは加圧ブリーディング試験装置を用いてモルタルに圧縮力を作用させた後に、ミキサによる再練混ぜによりせん断力を作用させることで圧送により生じる応力状態を模擬し、流動性の変化を検討している¹⁻¹¹⁾。また、梁らは、圧送配管内のコンクリートの状態をモデル化した圧送性評価装置により、コンクリートが閉塞すること無く圧送可能な水平換算距離を定量的に評価する方法を提案している¹⁻¹²⁾。その他にも様々な研究がなされているものの、現状では圧送によるコンクリートの品質の変化を定量的に評価できる室内規模の試験方法は確立されていない。さらに、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じる高圧圧送を対象とした研究事例はほとんどない。

以上の時代的背景、技術的背景から、先に述べた3つの課題が認識されるようになった。

1.2 本研究の目的

前節の背景を踏まえ、コンクリートの密実な充填による構造物の躯体品質の確保、およびコンクリート工事の生産性向上に貢献すべく、本研究では以下を目的とした。

- (1) 建設現場において増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤（以下、増粘剤含有混和剤という）を後添加することで容易に製造でき、普通強度領域（呼び強度 27～45 相当）でも汎用的に使用できる流動性の高いコンクリートの品質を検証し、実用化すること。
- (2) 中流動コンクリートに必要な締固めの程度を評価する方法を提案すること。
- (3) $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化を把握すること。
- (4) 高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化を評価する室内試験方法を構築すること。
- (5) 高圧圧送によってコンクリートに生じる各種変化を明らかとし、高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化が生じる要因に資する知見を得ること。

具体的に(1)については、増粘剤含有混和剤を添加することで、材料分離を生じることなく高い流動性を持つ中流動・高流動コンクリートを製造する方法を検討するとともに、当該コンクリートのフレッシュ性状、材料分離抵抗性、型枠充填性、構造体コンクリート強度等を実験により検証し、開発したコンクリートを実構造物へ適用した。

(2)については中流動コンクリートの流動性および充填性に関する締固め完了エネルギーの観点から、必要な締固め程度の評価方法を実験により検討した。

(3), (4), (5)については $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる長距離圧送実験を行い、圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の検討および管内圧力損失等の施工データの測定を実施した。また、長距離圧送実験で得られた結果を基に、小型の試験装置を用いて高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化を評価する室内試験方法を検討すると共に、高圧圧送によってコンク

リートに生じる各種変化を検討し、流動性の変化が生じる要因を考察した。

日本建築学会「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説」¹⁻¹⁴⁾では、「流動性」を「重力や外力による流動のしやすさを表すフレッシュコンクリートの性質。流動を起こさせるのに必要な最小限の応力（降伏値）と流動中の速度に比例して増加する抵抗性を表す粘性（塑性粘度）によって評価する。」と定義している。これを踏まえ、本研究では下記のとおり用語を定義した。

流動性の高いコンクリート：材料分離を生じない粘性を有するスランプフロー45cm 以上のコンクリートを指す。

中流動コンクリート：呼び強度 27～45，スランプフロー45～55cm の締固めを必要とするコンクリートを指す。なお，株式会社高速道路総合技術研究所「NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ」¹⁻¹³⁾に取りまとめられているスランプフロー35～50cm 程度のトンネル覆工コンクリートである「中流動覆工コンクリート」とは区別している。

高流動コンクリート：スランプフロー60cm 以上で自己充填性を有するコンクリートを指す。

1.3 本論文の構成

本論文は全7章から構成されている。各章の概要を以下に示す。

「第1章 序論」では、本研究の背景および目的について述べると共に、本論文の構成を示した。

「第2章 既往の研究」では、既往の研究を参考にして、流動性の高いコンクリートの性能およびその評価方法に関する研究や、圧送がコンクリート品質に及ぼす影響に関する研究等を調査し、現状の課題および本研究の方向性について述べた。

「第3章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの品質検討」では、増粘剤含有混和剤を後添加することで得られる流動性の高いコンクリートについて、室内実験によりフレッシュ性状や硬化後の品質を検討した。また、中流動コンクリートに必要な締固め程度の評価方法を検討した。

「第4章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの実用化検討」では、増粘剤含有混和剤を後添加することで得られる流動性の高いコンクリートの実用化および普及を図るべく、模擬柱壁試験体を用いた実大施工実験により施工性や躯体品質を検証し、建築構造物へ実適用した事例についてまとめた。

「第5章 高圧圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響の検討」では、高圧圧送のための基礎資料を得ること、ならびに高圧圧送によるコンクリート品質への影響を把握することを目的として、20N/mm²程度の高い圧送負荷が生じる長距離圧送実験による検討を行った。圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の比較、ならびに管内圧力損失等の施工データの測定を実施した。

「第6章 高圧圧送によるコンクリートの流動性変化の評価方法および要因の検討」では、圧送を模擬してコンクリートに圧力とせん断力を同時に作用させる小型圧送性試験装置を開発し、本試験装置を用いて圧送によるコンクリートの流動性の変化を評価する室内試験方法を検討した。また、本試験装置を用いて管内圧力の大小や管内流動の有無等を変えた圧送性試験、ならびにコンクリート中のセメント粒子の分散、骨材の吸水、混和剤吸着量等に着眼した各種測定を行い、高圧圧送によるコンクリートの流動性低下の要因を検討した。

「第7章 総括」では、本研究の総括を示すと共に、得られた知見を章ごとにまとめた。また、今後の展開について述べた。

次頁の図1.1に本論文の構成を示す。

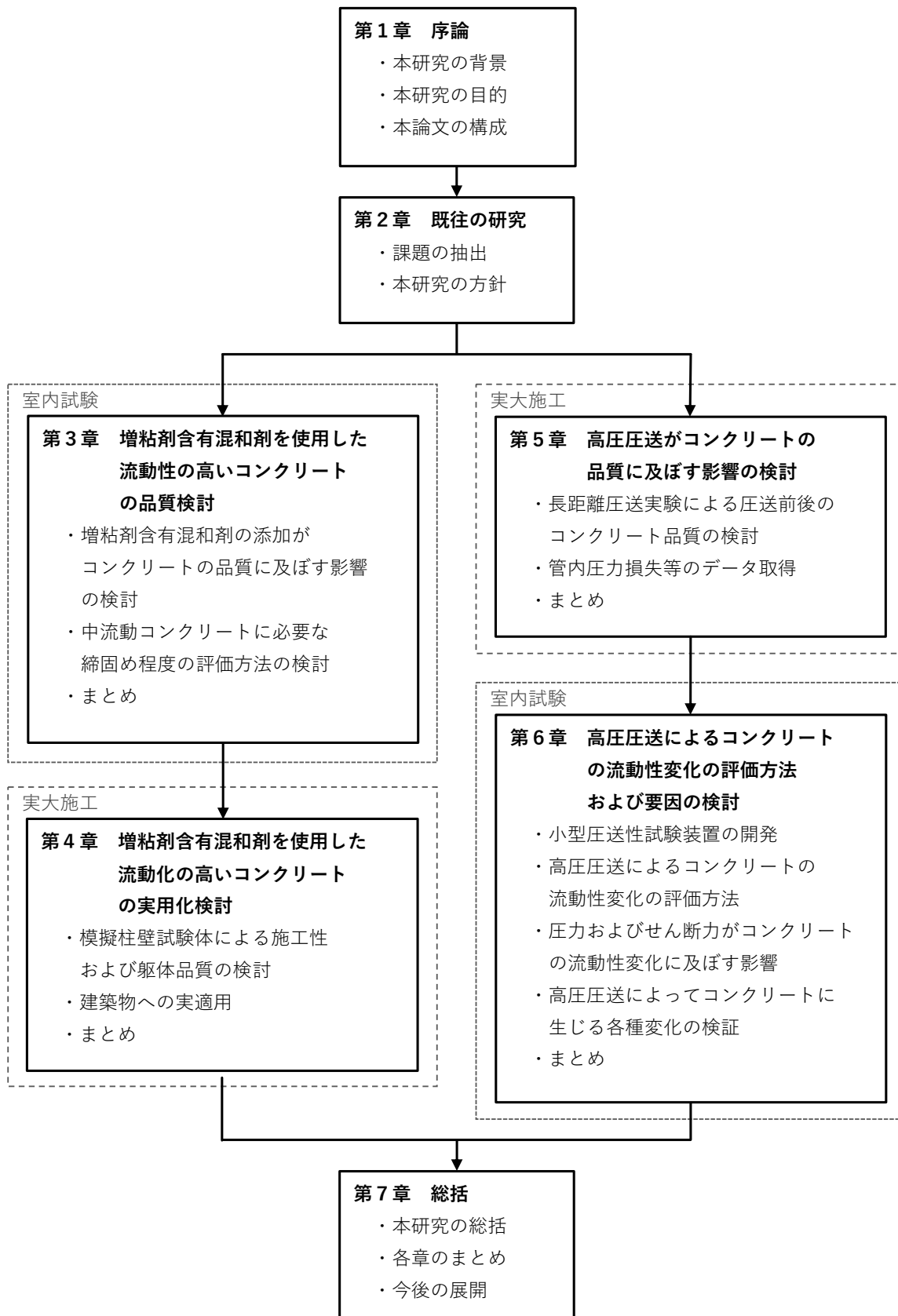


図 1.1 本論文の構成

第1章の参考文献

- 1-1) 土木学会 コンクリート委員会編：コンクリート標準示方書 [施工編：施工標準]，pp.69-79，2017
- 1-2) 流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会：流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン，2017.3
- 1-3) 国土交通省大臣官房 技術調査課：「流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン」について，コンクリートテクノ，Vol.36，No.7，pp.17-19，2017.7
- 1-4) 小泉信一：増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの現状 -スマートダイナミックコンクリート(SDC)の概要と適用拡大に向けた取組み-，GBRC，Vol.42，No.1，pp.2-10，2017.1
- 1-5) 杉山知巳：アジア太平洋地域におけるコンクリート用化学混和剤の適用の動向，コンクリート工学，Vol.49，No.9，pp.40-43，2011.9
- 1-6) 青木義彦，岩清水隆，山田佳博，永野浩一： $F_c=150\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリート CFT 柱の施工—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—，コンクリート工学，Vol.50，No.8，pp.683-688，2012.8
- 1-7) 岩清水隆，青木義彦，九嶋壮一郎，永野浩一：軽量コンクリートの高さ 300m への超高所圧送—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—，コンクリート工学，Vol.51，No.8，pp.648-655，2013.8
- 1-8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート圧送工法ガイドライン 2009 および解説，2009
- 1-9) 土木学会編：コンクリートライブラリー126 施工性能にもとづくコンクリートの調合設計・施工指針(案)，pp.72-75，2007
- 1-10) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009.12
- 1-11) 作栄二郎，大内雅博，筒井浩平：ポンプ圧送による自己充填コンクリートの流動性変化のメカニズム，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.79-84，2007
- 1-12) 梁俊，坂本淳，丸屋剛，橋本貴之：加圧履歴に基づいたコンクリートの圧送性の室内評価試験方法に関する研究，コンクリート工学，Vol.58，No.12，pp.937-943，2020
- 1-13) 株式会社高速道路総合技術研究所：NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ，2011.12
- 1-14) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説，2021.12

第2章 既往の研究

2.1 はじめに	8
2.2 流動性の高いコンクリートの品質およびその評価方法.....	8
2.3 増粘剤含有混和剤を用いた流動性の高いコンクリートの研究事例	18
2.4 圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響	20
2.5 コンクリートの圧送性評価方法.....	26
2.6 まとめ.....	30
第2章の参考文献	31

第2章 既往の研究

2.1 はじめに

本章では、既往の研究を参考にして、流動性を高めた普通強度領域のコンクリートの品質およびその評価方法に関する研究や、圧送がコンクリート品質に及ぼす影響および圧送性の評価方法に関する研究等を調査し、現状の課題および本研究の方向性について述べる。

2.2 流動性の高いコンクリートの品質およびその評価方法

日本建築学会「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説」²⁻¹⁾によると、高流動コンクリートの性能は、使用箇所の施工条件、建築物の構造体および部材の要求性能に応じて必要な項目を定め、その品質は、所要の性能を満足させるように定めなければならないとしている。これは一般のコンクリートと全く同じであるが、高流動コンクリートの場合、要求される性能項目のうち、特に施工にかかわる性能項目およびそれらを満足させる品質が確保されることが最も重要であり、高流動コンクリートの施工にかかわる性能項目は下記の(1)～(8)とされている²⁻¹⁾。

- (1) 流動性
- (2) 材料分離抵抗性
- (3) 間隙通過性
- (4) 流動保持性
- (5) ブリーディング
- (6) 沈降
- (7) 仕上げ可能時間
- (8) 施工上要求される強度発現性

(a) 流動性

フレッシュコンクリートの流動性は、構造物の打込み箇所、部位、部材および施工条件に応じて、一般的にはスランプフロー (JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法)²⁻²⁾で定められ、目標スランプフローが 60cm 未満の場合の許容差は $\pm 7.5\text{cm}$ 、目標スランプフローが 60cm 以上の場合の許容差は $\pm 10\text{cm}$ とされている²⁻¹⁾。スランプフロー試験のほかに、フレッシュコンクリートの流動性を評価する試験には、流動を起こさせるのに必要な最小限の応力(降伏値)を評価する試験方法が提案されており、以下に例を挙げる。

Lフロー試験は、土木学会規準 JSCE-F 514-2018(高流動コンクリートのL形フロー試験方法(案))²⁻³⁾に規定されており、試料を一方向のみに流動させるため測定値のばらつきが少なく、測定に関する個人差が少ないのが特徴である。Lフロー試験器の概要および一例を図 2.1 および写真 2.1 に示す。装置の鉛直部に試料を充填し、仕切りゲートを引き上げてコンクリートを流動させ、流動が停止した時の鉛直部の沈下量と、仕切りゲートの内面からコンクリート先端までの距離となる最大Lフローを測定する。

また、仕切りゲート引き上げてコンクリートが流動している時に、その先端が開口部から 5cm および 10cm 地点を通過する時間を赤外線あるいは超音波センサで計測し、5～10cm 区間の通過時間を求め、この区間におけるLフロー速度を算出し、これをコンクリートの粘性に関する特性値として扱うことも検討されている²⁻¹⁾。

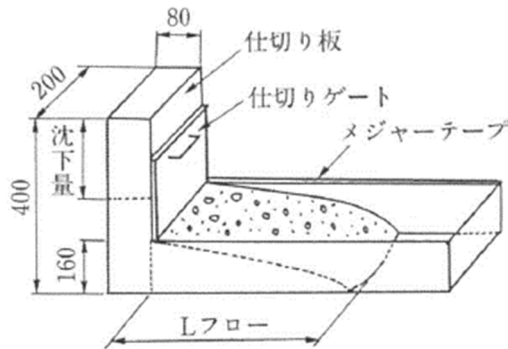


図 2.1 Lフロー試験器（寸法は内部寸法）²⁻³⁾

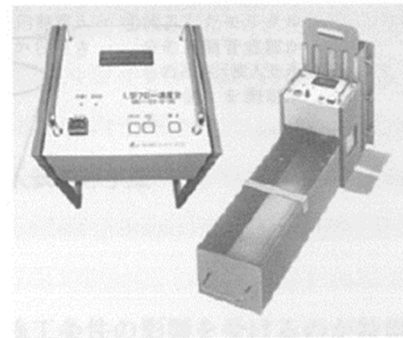


写真 2.1 Lフロー試験器の一例²⁻¹⁾

V 漏斗試験は、土木学会規準 JSCE-F 512-2018（高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法（案））²⁻⁴⁾に規定されており、図 2.2 および写真 2.2 に示す V 漏斗試験装置を用いて、約 10 L の試料を漏斗部に突きや叩きを行わず 1 層で詰め、下部の吐出口を解放し、コンクリートの流下時間を、ストップウォッチを用いて測定する試験である。この流下時間は、吐出口の解放から、漏斗上面より観察して吐出口を通して下部が見えるまでの時間である。

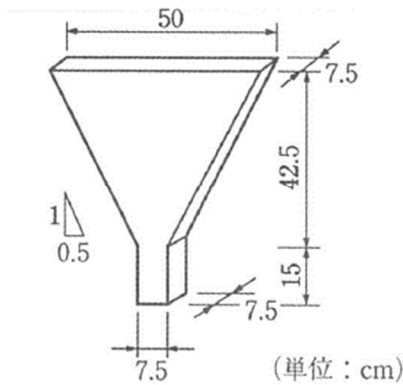


図 2.2 V 漏斗試験装置概要（寸法は内部寸法）²⁻⁴⁾

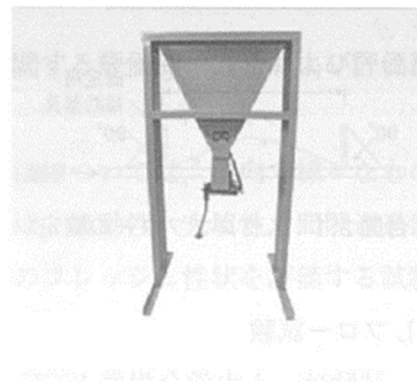


写真 2.2 V 漏斗試験装置の一例²⁻⁴⁾

O 漏斗試験は、土木学会規準 JSCE-F 512-2018（高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法（案））²⁻⁴⁾に規定されており、V 漏斗試験とは異なる円錐状の漏斗を用いるが、試験方法はほぼ同じである。図 2.3 に示す O 漏斗試験装置を用いて、10 L の試料を漏斗上端まで流し込み、上面をエッジでならした後、吐出口のふたを開け、全量のコンクリートが流出するまでの流下時間を測定する。この流下時間は、上面から見てほぼ全面が開口するまでの時間である。流下時間の測定とともに、流下途中の流動・閉塞状況を目視観察する。O 漏斗試験では、流下時間の測定ならびに目視観察から、コンクリートの粘性（見かけの粘性）、材料分離抵抗性を判定するものである。O 漏斗流下時間とスランプフローの相関は、V 漏斗と同様に、基本的にはない。

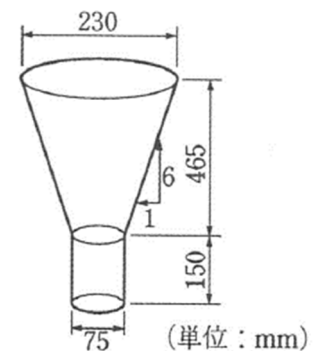


図 2.3 O 漏斗試験装置概要（寸法は内部寸法）²⁻⁴⁾

(b) 材料分離抵抗性

フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性は、スランプフロー試験後のコンクリートの状態を目視で評価し、広がったコンクリートの中央部に粗骨材が偏在しておらず、周辺部にペーストや遊離した水が偏在していないこととされている。材料分離抵抗性を定量的に評価する標準的な方法や評価基準は、現在のところない。フレッシュコンクリートの粘性（塑性粘度）に関係する特性値としては、スランプフロー速度やLフロー速度などがある。スランプフローが同じコンクリートでもスランプフロー速度が異なる、すなわち粘性が異なる場合がある。一般にスランプフロー速度が遅いコンクリートは粘性が高いと判断できる²⁻¹⁾。

(一社)日本建設業連合会が提案した「分離状態の目視判定（目視判定指数）方法」^{2-5), 2-6)}では、スランプフロー試験後の状態、練舟および一輪車での試料切返し後の状態について、「分離していない」「分離気味」「分離している」のいずれかの判定を各自行い、その結果について、「分離していない」を0、「分離気味」を0.5、「分離している」を1.0とし、各判定人数を乗じて合計した点数を総人数で除したものを「目視判定指数」として求める。目視判定として、その指数が0.25未満の場合を「分離していない」、0.25以上0.7未満を「分離気味」、0.7以上を「分離している」コンクリートと評価する。一輪車とスランプフローによる目視判定指数の比較を図2.4に示す。分離傾向にあるコンクリートについては、一輪車の方が状態をより判断しやすいことがうかがえる。

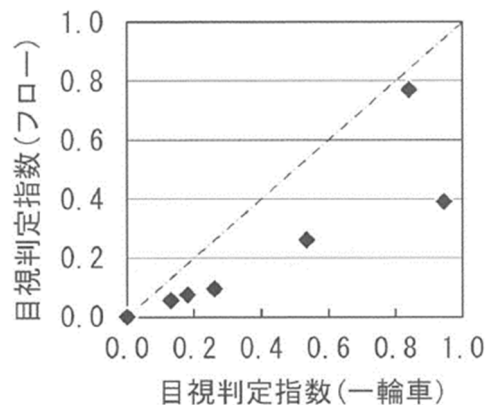


図2.4 一輪車とスランプフローによる目視判定指数の比較²⁻⁶⁾

河野ら^{2-6), 2-7)}は、普通強度領域の高流動性コンクリートを対象に、材料分離抵抗性について、目視による評価と、表2.1に示す材料分離抵抗性試験で得られる指標を比較し、その結果から材料分離抵抗性に関する定量的な評価方法を検討している。各種材料分離抵抗性試験の評価のまとめを表2.2に示す。各試験について、材料分離抵抗性の評価判定試験としての適正、試験の簡便性および総合評価として調合作成時の室内試練りに実施を想定した際の有用性を相対評価(◎・○・△・×)した。

円筒貫入試験、粗骨材沈下割合試験が材料分離抵抗性の評価法として有効であると考えられ、限られた実験条件、データ数ではあるが、目視判定指数との関係から数値の目安が得られた。ふるい分離打撃試験においては、データを蓄積しさらに検討が必要ではあるが、材料分離抵抗性を評価できる可能性が示唆されたとしている。

表 2.1 材料分離抵抗性試験²⁻⁶⁾

試験項目	試験・測定方法	材料分離抵抗性の評価方法
分離状態の目視判定	複数のコンクリート技術者が一輪車運搬の切返し後と、スランプフロー試験後の状態を各自の主観で、「分離していない」「分離気味」「分離している」の3つのいずれかに判別し、その判定結果を集計した。	判定結果について「分離していない」を0、「分離気味」を0.5、「分離している」を1.0とし、各判定人数を乗じて合計した点数を総人数で除した「目視判定指数」で評価した。
加振変形試験	NEXCO 試験法 733 に準拠し、10 秒間テーブルを加振させ、加振時と加振後のコンクリートの状態を観察し、加振前後のスランプフローを測定した。	加振後の粗骨材の偏在、周囲部のペーストの状態や遊離した水の存在の目視による評価と、加振前後のスランプフロー差により評価した。
J リング試験 ³⁾	JIS A 1159 に準拠し、コンクリートの流動停止後に、状態観察し、フロー値およびリング中央部およびリング外部 4 か所のコンクリートの高さを測定した。	コンクリートの流動停止後の状態の目視による評価と、リング中央部とリング外部の高さの差である PJ 値で評価した。
J リング+加振変形試験	J リング試験後に加振変形試験(NEXCO 試験法 733)を実施し、加振後のコンクリートの状態を観察し、加振後のフロー値およびリング中央部およびリング外部 4 か所のコンクリートの高さを測定した。	加振前後の状態の目視による評価と、加振後の PJ 値(加振 PJ 値)により評価した。
タンピング試験 ⁴⁾	土木学会 CL 145 に示されているタンピング試験を参考に、平板(スランプフロー板)は 800mm×800mm とし、平板の四隅に木製棒を落下させ、所定のタンピング回数時に状態観察とスランプフローを測定した。タンピング回数は、0, 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56 回までとした。	タンピング時の状態の目視による評価と、スランプフローの変化により評価した。
円筒貫入試験 ⁵⁾	日本建築学会の「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説」の円筒貫入試験に準拠し、5ℓ ジョッキに採取した試料に、内径 30mm の筒の周囲に 7mm の穴が 28 個空いた円筒貫入計を 10 秒間挿入し、流入したモルタル量を測定した。	円筒貫入計に流入したモルタル量を流入モルタル値として評価した。
ふるい分離打撃試験	EN12350-11 Sieve segregation test ⁶⁾ を参考に、コンクリート試料 4.8kg を 50cm の高さから、5mm ふるい上に試料を落下させ、その後突き棒を高さ 10cm より 10 回打撃し、通過したモルタル量を測定した。	モルタル量の測定結果から、以下のモルタル採取率 X_{m10} を算出し評価した。 モルタル採取率: $X_{m10}(\%) = \text{打撃後のふるいを通じたモルタル分の質量} / \text{落下前のコンクリート試料中の調合上のモルタル分の質量} \times 100$
粗骨材沈下割合試験(円柱式装置による分離抵抗性試験)	直径 150mm, 高さ 450mm の円柱容器にコンクリートを 3 層詰めで、各層突き棒で 5 回突きして試料を採取し、その円柱供試体を JIS R 5201 に規定されるフローテーブルに置き、落下運動を与えた後、3 層に分割し上部と下部の粗骨材量を測定した。フローテーブルの落下運動の回数は、0, 5, 10 回の 3 種類とした。	粗骨材量の測定結果から、以下の材料分離指数 ⁷⁾ を算出し評価した。 材料分離指数: $SI = (G1 - G2) / (G1 + G2) \times 100$ SI: 材料分離指数 (%) G1: 下部の粗骨材の水中質量 (g) G2: 上部の粗骨材の水中質量 (g)
硬化コンクリート粗骨材面積の測定	直径 150mm, 高さ 300mm の型枠にコンクリートを 2 層詰めで、各層突き棒で 5 回突きして供試体を製作し、硬化後、供試体の高さ方向におけるコンクリートの上面と下面から約 20mm と中央部の 3 か所で切断し、円形の切断面の粗骨材の面積率を測定した。	下面と上面の粗骨材面積率の比により評価した。

表 2.2 各種材料分離抵抗性試験の評価²⁻⁶⁾

試験項目	測定値(項目)		分離の判定*1	簡便性*2	総合評価*3と試験の特徴	
	指標					
分離状態の目視判定	スランプフロー試験後、 一輪車運搬切返し後、 「分離」・「分離気味」・ 「分離していない」の判別	目視判定指数	◎	×	◎	一輪車運搬の状態が分離の状態を判定しやすい傾向にある
加振変形試験	スランプフロー 加振後スランプフロー (目視判定)	加振フロー差 (mm)	×	×	△	目視判定で分離傾向が確認されたものでも、加振変形後のフローの状態から分離傾向が確認できず、また、加振フロー差でも評価できないものがある
Jリング試験	Jリングフロー ブロッキング値・PJ値 (目視判定)	PJ値(mm)	×	△	△	PJ値と目視判定指数には相関が認められない。 フロー60cm以上に適する
Jリング+加振変形試験	Jリングフロー値 加振Jリングフロー値 加振ブロッキング値 加振PJ値 (目視判定)	加振PJ値(mm)	×	×	×	加振PJ値と目視判定指数には相関が認められない
タンピング試験	スランプフロー タンピング後スランプフロー (目視判定)	スランプフロー の変化量(cm)	△	○	△	分離傾向が見られるコンクリートにフロー増加量が比較的小さい傾向にあるものの、目視判定指数により分離傾向が確認されたものでも、タンピングフローの状態(目視)では分離が確認されない
円筒貫入試験	流入モルタル量	流入モルタル値 (mm)	○	○	○	目視判定指数とモルタル流入値の間に正の相関性が確認された
ふるい分離打撃試験	打撃後のふるい通過モルタル量の割合	モルタル採取率 X _{m0} (%)	○	○	○	目視判定指数が大きくなるとモルタル採取率も大きくなる傾向がみられ、分離抵抗性の評価に適用できる可能性が確認された
粗骨材沈下割合試験	3層に分割した上部と下部の粗骨材量の差の割合	材料分離指数 SI(%)	○	△	○	目視判定指数から分離傾向が見られるコンクリートほどSI値(材料分離指数)が大きく評価される
硬化コンクリート粗骨材面積の測定	供試体の下面と上面の粗骨材面積の比	下面/上面の粗骨材面積率の比 (%)	○	△ (硬化後に測定)	○	目視判定指数から分離傾向が見られるコンクリートほど試験体(φ15×30cm)の下面と上面の粗骨材面積率の比が大きく評価される

*1 分離の判定：判定試験としての適正を有する順に◎○△×、*2 簡便性：測定が容易なものから順に◎○△×、

*3 総合評価：室内試練り時の実施を想定した場合に有用なものから順に◎○△×

円筒貫入試験²⁻⁸⁾は、底部を閉鎖した中空円筒の側面にモルタル流入用の開口部を設けた円筒貫入計を、コンクリート中に差し込み、開口部から円筒内に流入したモルタル量により、コンクリートのコンシステンシーを評価するものである。円筒貫入計を図 2.5 に示す。本試験は、非常に簡便に高流動コンクリートの材料分離抵抗性を評価することができ、現場での品質管理用に適している。通常、流入モルタル値 30mm 程度が分離限界と考えられている。

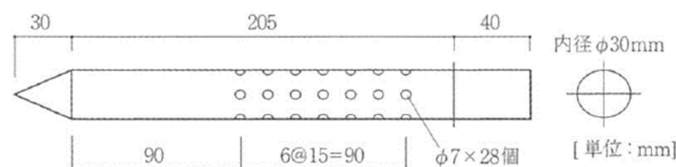


図 2.5 円筒貫入計²⁻⁸⁾

土木学会「締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会（358委員会）」では、当該委員会で新たに提案した「粗骨材の沈下量評価試験」と「触感による評価試験」の2つの試験方法が、締固めを必要とする高流動コンクリートの材料分離抵抗性を評価する有効な試験方法となることを示している²⁻⁹⁾。上記2つの試験方法と評価方法を表2.3に示す。

表2.3 試験方法の概要と評価方法²⁻⁹⁾

試験名	試験方法の概要	評価方法
粗骨材の沈下量評価試験	円筒容器に試料を詰め、棒状バイブレータにより、容器の中心部に10秒締固めを行う。締固めを行った上層部のコンクリート2リットルを採取し、洗い分析試験を行う。	洗い分析試験の結果から、計画配合の粗骨材単位質量を100%として粗骨材残存率を算出する。
触感による評価試験	練り舟における切返し後のコンクリートの触感評価を行う。	練り舟の試料に対してハンドスコップによってコンクリートに直接触れた時の感覚を「-2~+2」の5段階で評価する。

昨今では、AIによる機械学習を利用した材料分離の判断、推定方法についての研究がなされている。以下に研究事例を3件示す。

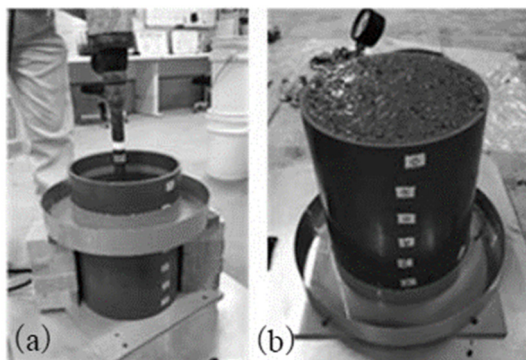
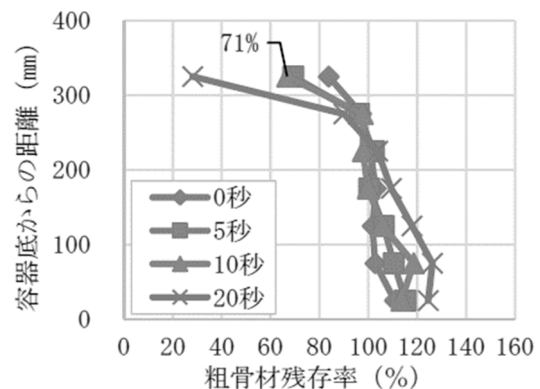
親本ら²⁻¹⁰⁾は、スマートデバイスを使用してコンクリートのスランプ画像を撮影し、コンクリートの材料分離を自動的に判定するシステムを開発している。撮影したスランプ画像をコンクリート（前景）とスランプ板等の背景に分離し、画像処理を通してコンクリートの部分を二値化し、黒い画素を同心円状にカウントする。黒い画素が一樣に分布しているかどうかで材料分離の判定を行っている。

比嘉ら²⁻¹¹⁾は、試し練りの労力を減らし、高流動コンクリートの品質管理を行うために、機械学習を用いて調合から高流動コンクリートの目視材料分離判定の予測を試み、特徴量の重要度から材料分離への影響を評価している。検討を行った学習アルゴリズム3項目のうち、最も良い精度で予測したものは、正解率および適合率が80%を超え、再現率は約88%であった。また、特徴量の重要度については、混和剤添加率、細骨材率、単位細骨材量の順で高く、材料分離に影響を及ぼしていたとしている。

三谷ら²⁻¹²⁾は、品質管理での普通強度領域の高流動コンクリートの材料分離の評価を目的として、AIを活用してフレッシュコンクリートの写真から材料分離の一種である粗骨材の沈降のしやすさを推定する方法を検討している。硬化コンクリートの粗骨材面積率の比を粗骨材の沈降のしやすさの指標とし、画像から学習した予測値と比較することで精度を検証した。その結果、ばらつきはあるものの、フレッシュコンクリートの写真から沈降のしやすさを予測できたとしている。

梁ら²⁻¹³⁾は、締固めを必要とする高流動コンクリートについて、写真 2.4 に示す内径 250mm、高さ 50mm の塩化ビニル筒体 7 個を上下に接続した試験装置による材料分離抵抗性の評価を検討している。容器にフレッシュコンクリートを 2 層に分けて充填し、内部振動機により一定時間 (0, 5, 10, 20 秒の 4 ケース) 加振した後、最上部の筒体を撤去すると、振動を受けた試料の上から 50mm の高さのコンクリートが、筒体の外面に設置された上下に移動できる受け皿に溢れて落ちる。同様にして各筒体から採取したコンクリート中の粗骨材の質量から筒体内コンクリートの粗骨材絶対容積を計算し、設計配合の単位容積粗骨材量との比を粗骨材残存率として、各筒体内試料中の粗骨材残存率を比較することで粗骨材の沈み具合を確認した。また、W500×L500×H800 試験体における粗骨材の沈み具合を検討した。

実験結果を図 2.6 に示す。本試験装置におけるコンクリートの加振による粗骨材の沈み具合と W500×L500×H800 試験体における粗骨材の沈み具合を確認、比較した結果、分離抵抗性試験においては上面から 50mm 程度の範囲のコンクリートの品質を検査することにより、実施工中のコンクリートの分離抵抗性を評価できる可能性が示唆された。本検討の範囲内では、同試験における適切な加振時間は 10 秒で、粗骨材残存率 70% 以上であれば、締固め実施後のコンクリートは分離してないと判断できるとの結果になったとしている。

写真 2.4 材料分離抵抗性試験²⁻¹³⁾図 2.6 粗骨材残存率測定結果²⁻¹³⁾

(c) 間隙通過性・充填性

フレッシュコンクリートの間隙通過性は、試し練りにおいて確認し、構造物の打込み箇所、部位・部材に応じて、JIS A 1159 (コンクリートの J リングフロー試験方法)²⁻¹⁴⁾による PJ 値または信頼できる試験方法によって評価するとされている²⁻¹⁾。

鹿毛、丹羽ら^{2-15), 2-16), 2-17)}は、模擬鉄筋を中央に一直線に配置した小型壁モデル型枠内への高流動コンクリートの打込み試験を実施し、締固め無しでコンクリートが鉄筋間を通過して型枠内に充填される度合いとスランプフローや PJ 値との関係性を調べた。図 2.7 に PJ 値と充填率の関係を示す。充填率と PJ 値の間の相関は高く、このことから「間隙通過を伴う充填性」を PJ 値により良好に評価できることがわかったとしている。

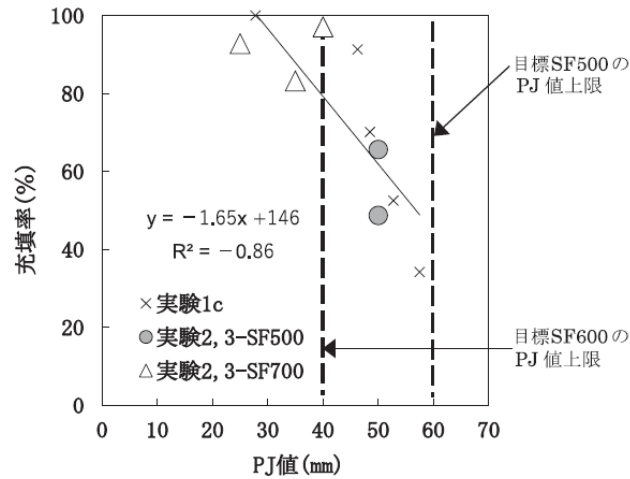


図 2.7 PJ 値と充填率の関係²⁻¹⁷⁾

土木学会規準 JSCE-F 701-2018 (ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法 (案))²⁻¹⁸⁾には、流動障害を取り付けたボックス形容器と振動機を用いてコンクリートの間隙通過性を試験する方法が規定されている。試験概要を図 2.8 に示す。

なお、当該試験を用いることを提案している「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(2016年版)」の 5.7 試し練りの解説に「高密度な配筋部材を施工対象とした場合等において、試し練りの段階で充填性の確認が必要な場合には、これを確認する試験方法として『ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法 (案)』がある。」と記載があるように、この試験で把握するのは、間隙通過性ではなく充填性であると考えられる²⁻⁹⁾。

また、当該試験は加振条件下でのコンクリートの充填性の評価を目的としたものであるため、締固めを必要としない自己充填性のある高流動コンクリートには適用できない。

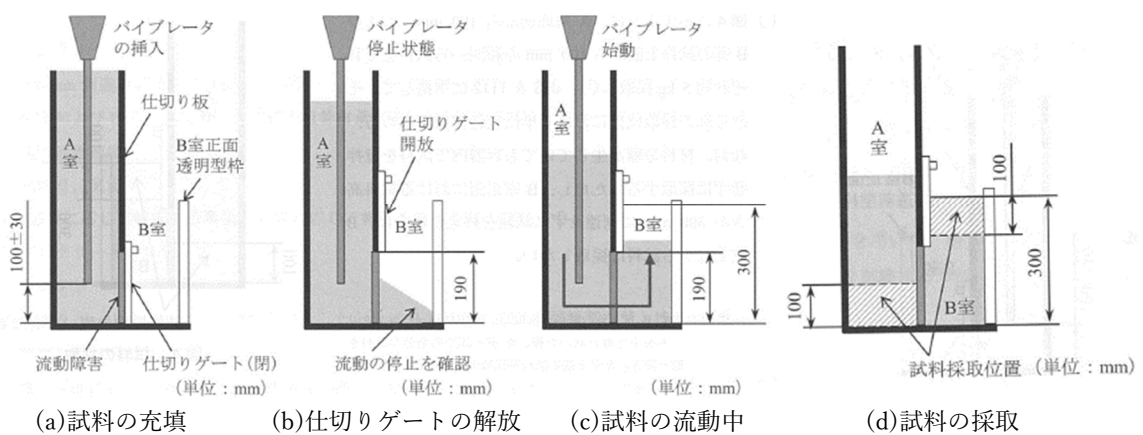


図 2.8 試験概要²⁻¹⁸⁾

土木学会規準 JSCE-F 511-2018 (高流動コンクリートの充填試験方法 (案))²⁻¹⁹⁾には、高流動コンクリートの充填性を試験する方法が規定されている。図 2.9 に示すような形状を有する U 形またはボックス形の容器および流動障害を用い、容器の A 室に試料を入れた後に仕切りゲートを開き、B 室に流れた試料の充填高さや充填時間を測定する。

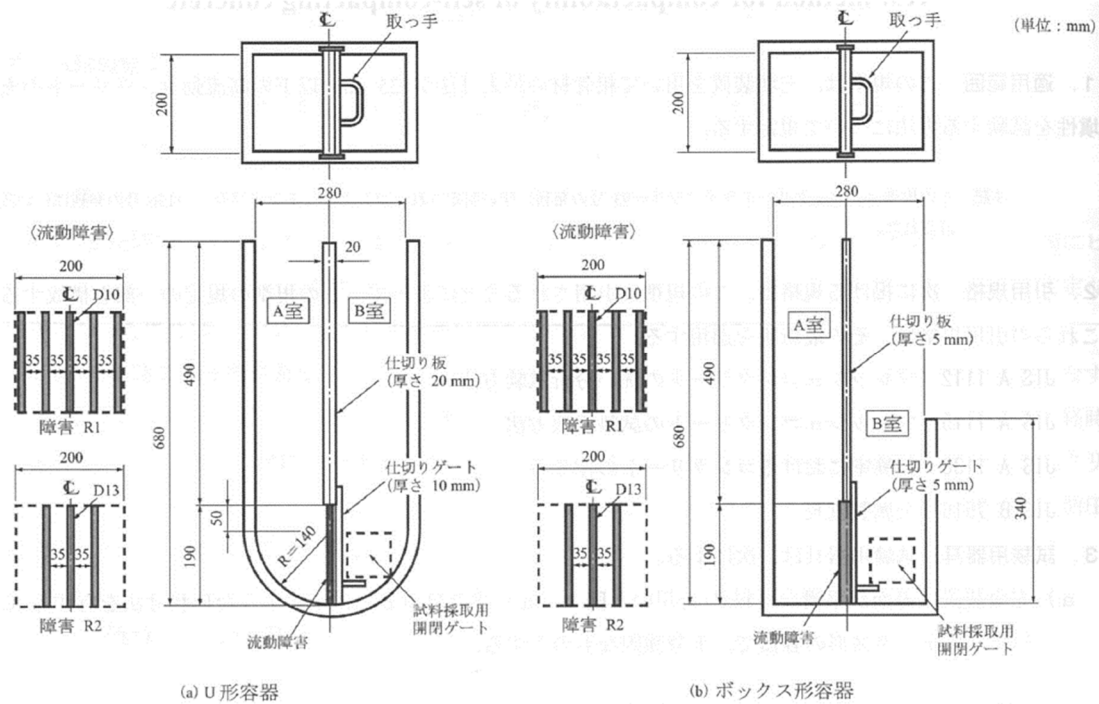


図 2.9 充填装置の形状および流動障害²⁻¹⁹⁾

(d) 施工性

依田ら^{2-20), 2-21), 2-22), 2-23)}は、呼び強度 45 以下の普通強度領域でのスランプフロー管理のコンクリート (依田らは高流動性コンクリートと呼んでいる) について、鉄筋コンクリート造の柱と壁を模擬した小型試験体および実大模擬試験体による実験を行い、構造体の品質や施工性、型枠充填性等について検討している。

小型試験体を用いた実験では、図 2.10 に示す試験体を用いて、締固めの程度が部材表面の仕上がりにや構造体品質に及ぼす影響の検討と、打重ね時間間隔や打重ね後の経過時間が高流動性コンクリートを打込む型枠の側圧に及ぼす影響の検討を行った。その結果、高流動性コンクリートは 5 秒の締固め時間でも、スランプ 18cm コンクリートを 15 秒締固めた場合と仕上がりが同等であり、鉄筋の通過に伴う強度低下は、普通コンクリートおよび高流動性コンクリートともに認められなかった。また、高流動性コンクリートは打重ね時間間隔や打重ね後の経過時間が短い場合、液圧と同程度の側圧が作用した。打重ね時間間隔が長い場合、先に打込む部位の側圧を液圧より低減できるが、実際には施工速度が早いことから型枠設計時には液圧としての計画が望ましいとしている。

図 2.11 に示す柱・壁の実大模擬試験体を用いた実験では、呼び強度 33・スランプ 18cm の普通コンクリートおよび呼び強度 33・スランプフロー 55cm の高流動性コンクリートについて、施工性、型枠充填性、構造体品質を比較した。図 2.12 に実大模擬試験体の施工時間を示す。普通コンクリートおよび高流動性コンクリートの打込み開始から最後の締固め完了までの施工時間は、それぞれ 27.2 分

および 20.9 分となり、高流動性コンクリートの施工時間は普通コンクリートと比べて 23.2%短縮される結果となった。また、両コンクリートの構造体中の圧縮強度は設計基準強度以上を、静弾性係数は RC 構造計算規準式の推定値の 80%以上を満足した。

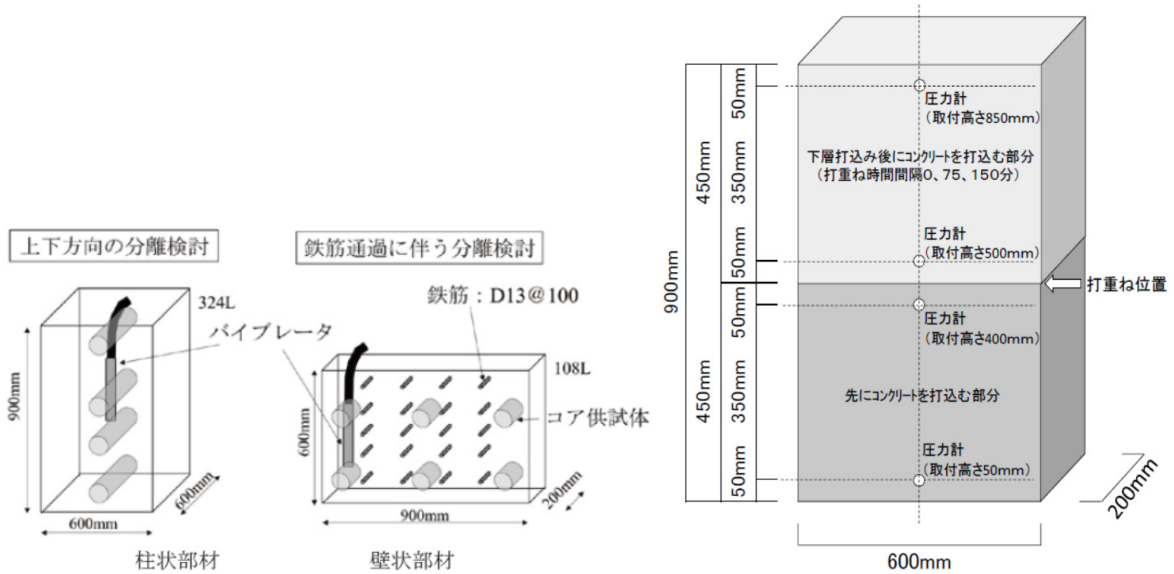


図 2.10 小型試験体の概要 (2-20), (2-21)

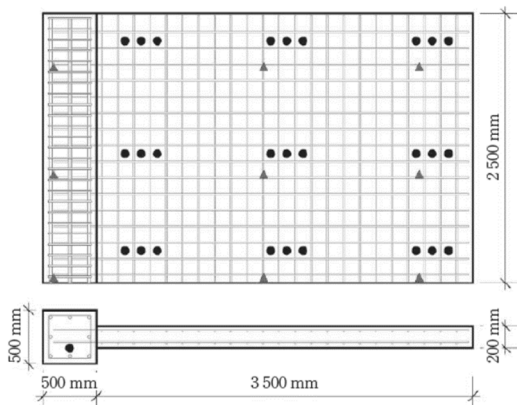


図 2.11 柱・壁の実大模擬試験体 (2-20), (2-22), (2-23)

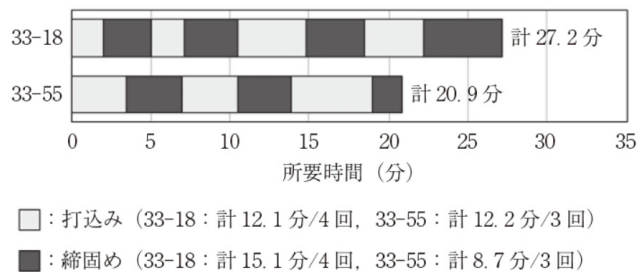


図 2.12 実大模擬試験体の施工時間 (2-23)

(e) 締固め性

普通コンクリートと高流動コンクリートの中間の流動性を持つ中流動コンクリートについては、土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」では、自己充填性を有する高流動コンクリートと区別して「締固めを必要とする高流動コンクリート」と呼称されており、構造体コンクリートとして密実な充填を確保するためには外力による軽微な振動・締固めが必要とされている²⁻²⁴⁾。しかし現状では、軽微な締固めの程度が明確になっていないことが施工計画の策定、および施工の実施において懸念事項となっている。

中流動コンクリートの締固め性に関する試験方法はいくつか検討されている^{2-25), 2-26)}。例えば、東・中・西日本高速道路株式会社の「トンネル施工管理要領 (中流動覆工コンクリート編)」では、加振変形試験により配合選定を行い、実施工中では、型枠に与えられる振動エネルギーが約 3.7 J/L になるように型枠パイプレータの間隔を調整するように決められている²⁻²⁷⁾。なお、「振動エネルギー 3.7 J/L」

は、3.7 J/L の振動エネルギーを受けたコンクリートの硬化後の品質を確認することで決めた数値で、必ずしも締固めに最適な締固め完了エネルギーであるとは言い切れない。また、配合選定方法における加振変形試験による10秒加振と「振動エネルギー3.7 J/L」の相関も明確に示されていない。

梁ら²⁻²⁸⁾は、締固め度を締固めの進行程度の指標として、スランプ5cm～15cm程度のコンクリートを対象として、コンクリートが鉄筋間隙を通過して、配合上求まる理論密度まで締め固められるのに必要な総エネルギーを締固め完了エネルギーとして評価することで、内部振動機の締固め完了範囲を定量的に評価できる室内試験方法を提案している。しかし、中流動コンクリートの締固め完了エネルギーの評価までには至っていない。

以上、流動性の高いコンクリートに求められる性能およびその評価方法についてまとめた。高流動コンクリートの材料特性の指標として重要と考えられる材料分離抵抗性については、簡易的な評価方法は少なく一般的に採用されるには至っていない。また、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間の流動性を持つ中流動コンクリートについては、構造体コンクリートとして密実な充填を確保するためには外力による軽微な振動・締固めが必要とされているが、現状では必要とされる締固めの程度が明確になっていない。このように、中流動・高流動コンクリートの品質基準や性能評価方法については課題がある。本研究では、中流動コンクリートに必要とされる締固め程度を評価する方法について検討することとした。

2.3 増粘剤含有混和剤を用いた流動性の高いコンクリートの研究事例

近年、増粘剤含有混和剤を用いた普通強度領域の中流動・高流動コンクリートの研究が進み、適用事例も見られるようになってきた²⁻²⁹⁾。増粘剤含有混和剤とは、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤²⁻³⁰⁾、²⁻³¹⁾を指しており、高性能 AE 減水剤（増粘剤一液タイプ）とも呼ばれている。現在のところ、高性能 AE 減水剤と増粘剤含有高性能 AE 減水剤を区別できる品質基準が無いため、従来の高性能 AE 減水剤との品質の区別をするには JASS 5 M-406:2021「増粘剤含有高性能 AE 減水剤の品質基準(案)」を参照することとしている²⁻¹⁾。

宇井、河合ら²⁻³²⁾、²⁻³³⁾は、レディーミクストコンクリート製造時に増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤を使用し、さらに膨張材添加による乾燥収縮率を低減した中・高流動コンクリートを技術開発し（技術審査証明 取得済み）、実施工に適用した事例を報告している。

適用した工事は、大学の耐震改修工事であり、新設の増打ち壁や梁側面の増打ちに、呼び強度 30, 33 の当該コンクリートを採用し、主に圧入による工法でコンクリートの打込みを実施した。コンクリート工事による施工は計 14 回の打込みを行い、合計 151.5m³を使用した。施工の対象部位は、地上 1 階から 7 階までの増打ち壁・梁・柱である。受入れのフレッシュ性状として、目標値のスランプフロー55cm(±7.5cm)に対して、60cm 以下であれば問題のないフレッシュ性状であったが、60cm を超えた場合に限り、やや粘性が低下して材料分離ぎりの状態が施工途中に何度か発生したとしている。

古川ら²⁻³⁴⁾は、スランプフロー管理の高流動化コンクリートを現場適用するにあたり行った一連の実験、流動化におけるコンクリートの品質管理について報告している。高流動化コンクリートの適用部位は免震基礎の充填コンクリートであり、十分な材料分離抵抗性を確保するためにセメント量を

340kg/m³以上とし、調合管理強度 33N/mm²を採用した。流動化前のベースコンクリートでスランプ 21±2cm、流動化後でスランプフロー55±10cmとした。試し練りにより良好な流動性及び圧縮強度が確認された高流動化コンクリートを用いて免震基礎への試験施工を行い、目標とする充填性率が確保されることを確認した。その結果をもって実施工を行い、コンクリートの品質管理結果が良好であったとしている。

全ら²⁻³⁵⁾は、流動化剤の添加によりスランプフローを 55±10cmとし、高炉セメント B種を用いた中・高流動コンクリートを場所打ち杭に適用した際の、実機練りや実大模擬部材実験および本施工時の品質管理結果について報告している。コンクリートは Fc45N/mm²であり、複数の工場におけるベースコンクリートの調合は、水セメント比 36.1~40.1%、単位水量 170~175kg/m³、単位セメント量 431~485kg/m³であった。実験結果から、フレッシュ性状、圧縮強度、充填性を確認し、実施工では、材料分離や大きなスランプフローのロスなどの問題がなく、良好な品質管理下で施工することができたとしている。

端ら²⁻³⁶⁾は、増粘成分が含まれる高機能性流動化剤（含浸タイプ）を用いて、スランプ 18cm をスランプフロー47.5±7.5cm に流動化した軽量コンクリート 1種について、超高層階への圧送を想定した圧送実験を行っている。ベースコンクリートは呼び強度 27、水セメント比 48.4%、単位水量 170kg/m³である。実吐出量約 20m³/hにおいて、筒先のスランプフローが 46.3cm から 53.5cm に大きくなった。これは流動化剤のスランプ保持性能が高く、さらに圧送によるコンクリートの再攪拌が原因と考えられるとしている。また、13MPa の圧力を負荷した実験では筒先でスランプロスが生じたが、時間経過による影響が大きく、高圧力の負荷による影響は小さいと考えられる。今回使用した流動化剤には増粘成分が含まれており、軽量骨材の圧力吸水が抑制されたと予想されるとしている。

依田ら^{2-37), 2-38)}は、意匠性の高い建物において、ひび割れ低減性を付与した後添加型中流動コンクリートを適用した事例を報告している。適用にあたっては、モックアップ実験による施工方法の最適化検討および FEM によるひび割れ解析を実施している。中庸熱セメント、膨張材を使用し、呼び強度 39、水結合材比 43.5%、ベーススランプ 21cm のコンクリートを、増粘成分がブレミックスされた流動化剤を用いてスランプフロー55cm にした。当該コンクリートをモックアップ試験体に打設した結果、適切に締固めおよび養生を行うことにより、豆板などの初期欠陥や目立った空気泡がなく、ひび割れも見られないコンクリートを施工できており、適用した建物については、打設から 12 ヶ月経過した段階でも外壁のひび割れや漏水等故障は見られていないと報告している。

近年、普通強度領域において増粘剤含有混和剤を用いることで流動性を高めたコンクリートの研究が進み、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートに呼び強度 27~45 のスランプフロー45~60cm のコンクリートが新設された。しかし、当該コンクリートの JIS を取得した工場は限られている。そのため、上記コンクリートを工場で製造する施工事例は少なく、建設現場における流動化によって流動性の高いコンクリートを製造し、適用する事例がいくつか見られる程度である。本研究では、流動性の高いコンクリートの普及促進を図るべく、増粘剤含有混和剤を後添加することで容易に製造でき、様々な建設現場で対応可能で汎用的に使用できる中流動・高流動コンクリートについて、その品質を検証して実用化を推進することとした。

2.4 圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響

日本コンクリート工学協会「コンクリート圧送工法ガイドライン 2009 および解説」²⁻³⁹⁾では、圧送条件や環境温度によるコンクリートの品質変化を考慮し、圧送後に所要の性能が得られるよう圧送前のコンクリートの品質を設定するようになっている。当ガイドラインでは、圧送条件に応じたスランプの低下の標準値を表 2.4 のように規定している。従来から施工条件によっては、圧送後のコンクリートに品質変化が生じ、スランプの低下を起こすこと、特に荷卸し地点での目標スランプが小さく、外気温が高いほどスランプの低下が大きいたことが経験的にわかっている。

表 2.4 圧送条件に応じたスランプ低下の標準値²⁻³⁹⁾

圧送条件		スランプの低下量 (cm)	
水平換算距離	輸送管の接続条件	圧送前のスランプが 12cm 未満の場合	圧送前のスランプが 12cm 以上の場合
50m 未満	—	0	0
50m 以上 150m 未満	一般	0	0
	テーパー管を使用し 100A (4B) 以下の配管を接続	1	1
150m 以上 300m 未満	一般	1.5	1
	テーパー管を使用し 100A (4B) 以下の配管を接続	2	1.5
その他特殊条件下		既往の実績や試験圧送による	

注 1) 日平均気温が 25°C を超える場合は、上記の値に 1 cm を加える。

注 2) 連続した上方、あるいは下方の圧送距離が 20m 以上の場合、上記の値に 1 cm を加える。

注 3) スランプの低下量が 3 cm 以上となる場合は、配 (調) 合および圧送条件を見直す。

スランプ 8~12cm 程度の普通コンクリートでは、圧送距離 100m 以内の範囲では品質変化はほとんど認められない。しかし、圧送距離が 150m を超えるとポンプ圧送によりスランプ 1~3cm 程度の変化が生じる傾向が認められている。一方、スランプ 15cm 程度以上のコンクリートでは、圧送距離に関する関係は示されていないものの、平均的にスランプ 0.5cm 程度の変化が生じる傾向にある²⁻⁴⁰⁾。したがって、荷卸し箇所の目標スランプが小さく、圧送距離が長いほどスランプの低下が大きくなると言える。

軽量コンクリートは、骨材として人工軽量骨材が用いられるが、人工軽量骨材は表面に多数の気孔を有したポーラスな材料で吸水率が大きいため、含水率が小さい状態では圧送できないとされている。このため、圧送時には人工軽量骨材のプレウェッティングが行われ、高い含水率の状態では製造される。このような状態の軽量コンクリートを圧送した場合、平均的に 1.0cm 程度の変化が生じる²⁻⁴⁰⁾。普通コンクリートよりも変化量が大きい理由としては、人工軽量骨材を十分にプレウェッティングしたとしても、圧送時の圧力により、人工軽量骨材の残留空隙に吸水してしまう影響によると考えられている。

図 2.13 は軽量コンクリートの単位水量と圧送によるスランプ低下の関係を示したものであるが、単位水量が 185kg/m³ 以下の場合にはスランプの低下が大きくなる傾向を示している²⁻⁴¹⁾。軽量コンクリートの場合、骨材の圧力吸水のために、特に単位水量が小さいコンクリートでは圧送が困難になることがあるため、十分に吸水を行った骨材を用い、圧送方法について入念に検討する必要がある。

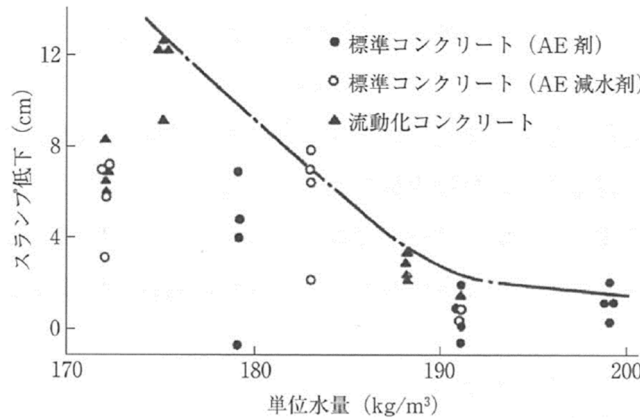


図 2.13 軽量コンクリートの単位水量と圧送によるスランプ低下の関係²⁻⁴¹⁾

中田ら²⁻⁴²⁾は、水セメント比 20~50%のコンクリートにおける圧送前後の品質について文献調査により検討した結果、水セメント比が小さい高強度コンクリートでは、圧送後に、スランプやスランプフローがやや低下し、空気量はやや増加する傾向であるものの、空気量が増加した場合を含めて圧縮強度は同等であることを確認している。

一般的なコンクリートの場合、圧送距離 100m 以内では品質変化はほとんど認められず、圧送距離が 150m を超えるとスランプ 1~3cm 程度低下する傾向がある。また高所への圧送、低所への圧送、暑中での圧送では、コンクリートの品質の変化が生じやすいことが経験的に知られている。長距離圧送では、圧送負荷が大きくなることに加え、配管内の滞留時間が長くなるため、コンクリートが品質変化を生じやすくなる。150m 以上の圧送距離とスランプ低下量の関係の測定例を図 2.14 に示す。スランプ 8~18cm の範囲で圧送距離 100m 当たり 2cm 程度、スランプ 18cm 以上の場合は 100m 当たり 0.5cm 程度低下し、単位粉体量が多くスランプが大きい配合の方が圧送距離の増加に伴うスランプ低下量が小さい傾向であると報告されている²⁻⁴³⁾。すなわち、長距離圧送では圧送負荷の観点およびコンクリートの品質変化の観点において、材料分離抵抗性を備えた流動性の高いコンクリートを圧送することが有利となる。

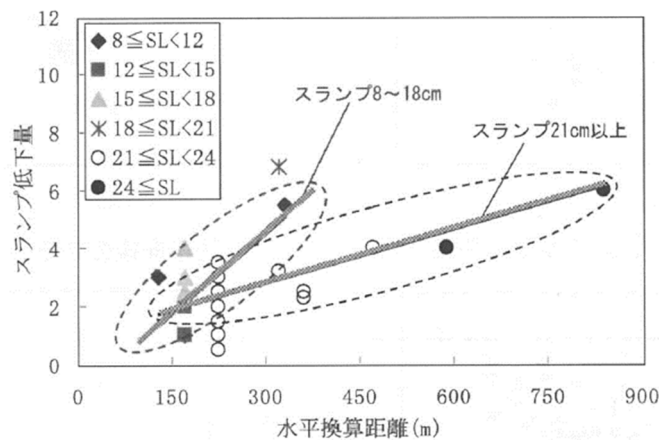


図 2.14 圧送距離とスランプ低下量の関係²⁻⁴³⁾

圧送前後の変化には、経時変化と圧送することによる変化の2つの要素が含まれている。目標スランプを21cm、流動化後を24cmとした流動化コンクリートを用いた場合の長距離圧送時のスランプは、コンクリート温度が30°C程度のとき、圧送距離が大きくなるほどスランプ低下量が大きくなった報告がある²⁻⁴⁴⁾。この変化量には経時変化と圧送による変化が含まれていると考えられているが、一方で、同一の実験条件において、コンクリート温度が25°C程度以下の場合、圧送距離が大きくなってもスランプの低下量が増大しない場合もあることが示されており、コンクリート温度も影響していると考えられる²⁻⁴⁵⁾。

神代ら²⁻⁴⁶⁾は設計基準強度（以下、Fc という）50~120N/mm²に対応する6種類の高強度コンクリート（水セメント比35.6~17.0%）について圧送実験を行い、圧送によるコンクリートの品質の変化および管内圧力損失の測定結果を述べると共に、管内圧力損失に及ぼす影響要因について考察している。Fc50~80N/mm²に対応する高強度コンクリートでは中庸熟ポルトランドセメントを用い、Fc80~120N/mm²に対応する高強度コンクリートにはジルコニア起源シリカフェームを事前に混入した中庸熟ポルトランドセメントベースのプレミックセメント（ZFC）を用いている。圧送条件は、5インチ管を用いた配管長110m、吐出量は15~50m³/hの間の4水準としている。

圧送前後のフレッシュ性状を図2.15に示す。中庸熟ポルトランドセメント単体を用いたFc50~80N/mm²では、圧送後で20cm程度の比較的大きなスランプフローのロスが見られた。これはコンクリート温度が30°Cを超える条件であったこと、最終的な吐出量が50m³/hと速かったことが影響していると考察している。一方、ZFCを用いたFc80~120N/mm²では、同じ条件でもFc80およびFc100で2~3cm程度、Fc120で10cm程度と比較的小さいスランプフローのロスであった。Oロート流下時間については、ほとんどのコンクリートで圧送後の方が短くなっており、スランプフローは低下するものの、コンクリートの粘性は小さくなる傾向を示し、特にZFCを用いたコンクリートではその傾向が強かった。空気量については、中庸熟ポルトランドセメント単体を用いたコンクリートでは圧送により0.8%程度増加する傾向であったが、ZFCを用いたコンクリートではほぼ横ばいか若干低下したと報告している。

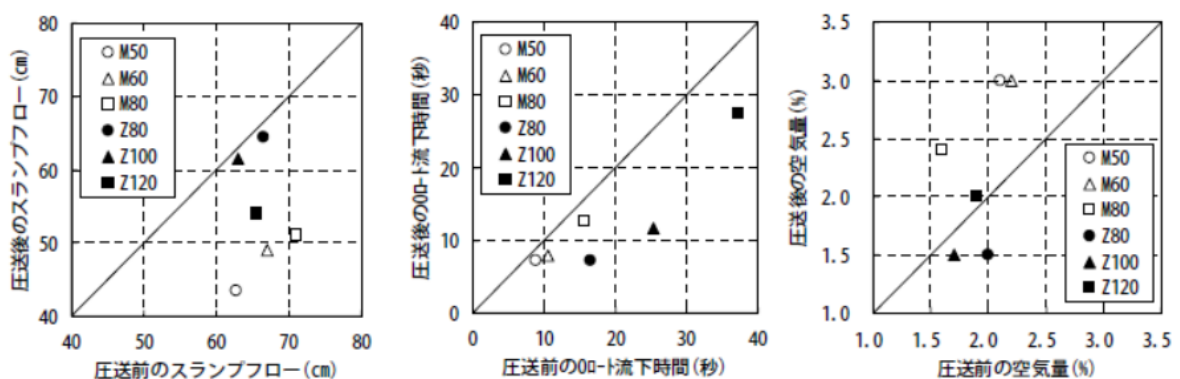


図 2.15 圧送前後のフレッシュ性状²⁻⁴⁶⁾

岩清水らは、スランプ23cmの軽量コンクリートの実大レベルの圧送実験を、日本建築学会近畿支部材料・施工部会と近畿生コンクリート圧送協同組合と共同で組織している「ポンプ工法WG」の実験の一環として行っている²⁻⁴⁷⁾。配管の水平換算距離は184mである。フレッシュコンクリートの試験結果を表2.5に、実吐出量と管内圧力損失の関係を図2.16に示す。圧送前後のフレッシュ性状に大

きな変化は認められず、管内圧力損失は日本建築学会「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」に示されている軽量コンクリートのスランブ 21cm の値よりも小さな値となっている。これは、荷卸し地点で測定した軽量粗骨材の含水率が、31.8~32.6%と高かったことが理由の一つと考えられるとしている。

表 2.5 フレッシュコンクリートの試験結果²⁻⁴⁸⁾

調査記号	スランブ (cm)			スランブフロー (cm)			空気量 (%)		
	出荷時	圧送前	圧送後	出荷時	圧送前	圧送後	出荷時	圧送前	圧送後
⑦24-18	21.5	21.0	19.5	40.0	34.5	33.0	5.7	6.2	5.7
⑧24-21	23.5	22.5	22.0	45.5	39.0	37.5	5.1	6.0	5.4
⑨24-23	23.5	23.5	23.5	43.8	44.0	42.0	4.8	6.8	6.0
⑩27-21	23.0	21.5	20.5	42.0	38.5	38.0	5.3	6.4	6.0
⑪30-21	23.5	22.5	22.5	45.3	41.5	41.0	5.5	5.3	4.8
⑫24-21 P	23.0	23.0	22.0	43.5	41.5	38.5	5.4	6.8	5.9

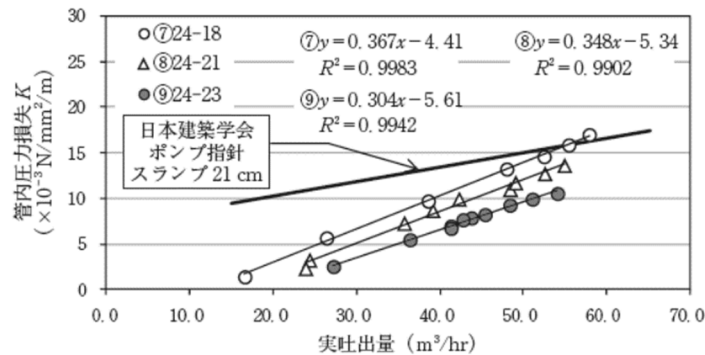


図 2.16 実吐出量と管内圧力損失の関係²⁻⁴⁸⁾

また、岩清水ら²⁻⁴⁸⁾は、大阪市にある高さ 300m、地上 60 階、地下 5 階の超高層建築においてスランブ 23cm の軽量コンクリート 1 種を圧送施工した結果を報告している。圧送前後の試験結果を表 2.6 に示す。高所への圧送においても、コンクリートの品質の大きな変化は認められなかった。その大きな理由は、人工軽量粗骨材の含水率の平均値が 30.5%と非常に高く、全期間を通じて含水率が安定して高かったことが挙げられるとしている。

表 2.6 圧送前後の試験結果²⁻⁴⁸⁾

施工日	階数	圧送	フレッシュコンクリートの試験結果						圧縮強度 (N/mm ²)	
			スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	単位容積質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	C・T (°C)	1 週	4 週
H 23. 10. 24	25	前	24.0	46.0	1937	3.9	183.3	26	27.8	37.3
		後	19.0	34.5	1955	3.9	-	26	27.6	38.2
H 24. 5. 30	47	前	25.0	52.5	1946	5.1	182.2	26	34.1	42.1
		後	23.5	42.5	1934	5.8	-	26	-	-
H 24. 8. 20	58	前	23.0	42.5	1968	4.6	175.6	35	-	43.7
		後	22.5	43.5	1968	5.6	186.2	34	-	40.4
		前	23.0	41.0	1988	4.6	174.5	35	-	44.7
		後	20.5	35.0	1943	6.5	176.1	35	-	40.2
		前	22.5	41.5	1994	4.4	176.1	35	-	42.6
		後	22.5	42.5	1972	5.5	179	35	-	43.4
H 24. 10. 4	PRF	前	25.0	47.5	1948	4.5	179.1	28	31.9	40.2
		後	22.0	36.0	1935	5.0	-	28	33.4	41.1

実吐出量と圧力計から求めた鉛直配管のみの水平管内圧力損失の関係を図 2.17 に示す。図中には水平配管であった 2009 年に実施した実大圧送実験における軽量コンクリート 1 種、指定強度 27、スランプ 23cm の測定結果²⁻⁴⁹⁾も併せて示しているが、今回の計測結果とほぼ同等の値が得られており、水平圧送と鉛直圧送の管内圧力損失は同等と考えてよいことがわかるとしている。

図 2.18 には、ポンプ根本近くの圧力計で測定した圧力の結果を生コン工場ごとに示している。管内圧力は生コン工場ごとに違う傾向を示している。軽量コンクリートは、粗骨材は同じであるが、細骨材や運搬時間の違いなどが生コン工場間の差となって表れたものと考えられるとしている。また、管内圧力は最大で 12N/mm² 程度であったことがわかる。

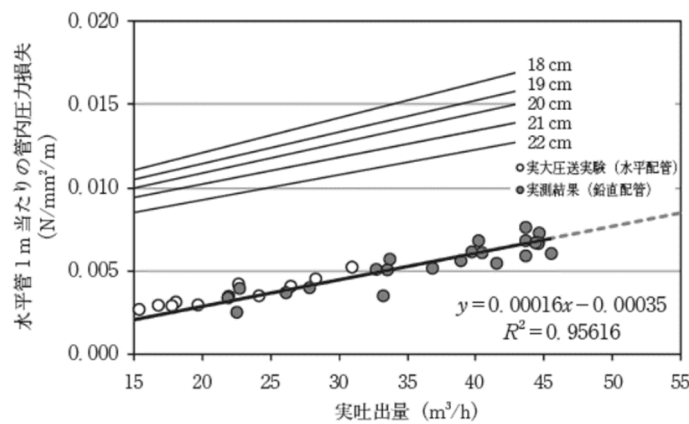


図 2.17 実吐出量と管内圧力損失の関係²⁻⁴⁸⁾

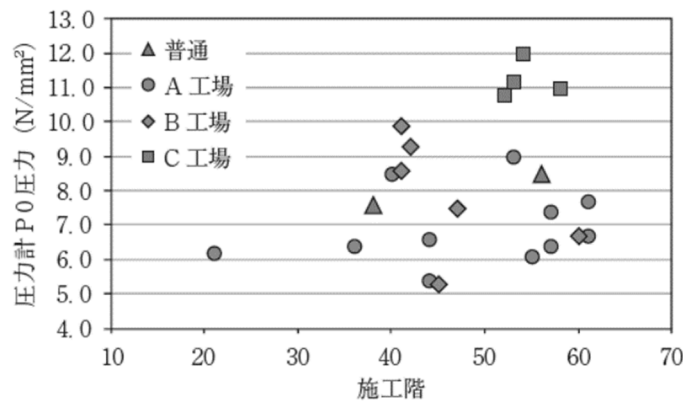


図 2.18 施工階と管内圧力の関係²⁻⁴⁸⁾

青木ら²⁻⁵⁰⁾は、前述した大阪市にある高さ 300m、地上 60 階、地下 5 階の超高層建築において、シリカフェーム混入セメントを使用した Fc150N/mm² の超高強度コンクリートを、地上 22 階、112m の高さまで CFT への圧入施工した結果と、先立って行った実大圧入施工実験の結果を報告している。

実大圧入施工実験における配管の水平換算距離は 108.5m であり、圧送速度は実吐出量が約 30, 40, 60m³/h となるよう調整している。コンクリートの試験結果を図 2.19 に示す。圧送前後でのスランプフロー、空気量および圧縮強度の変化は僅かであった。一方、粘性を表す指標である L フロー初速度は大幅に大きくなり、圧送後に粘性が大幅に低下した。管内圧力損失は実吐出量約 60m³/h でも約 0.07N/mm²/m 程度と小さく、この結果から、高さ 112m までの圧入の際の圧送負荷は最大 15N/mm² 程度と予測された。実施工における圧送負荷の実測値は、17.0~18.6N/mm² であった。

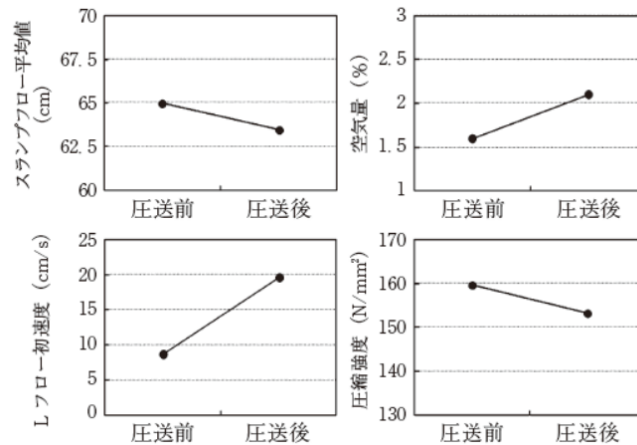


図 2.19 コンクリートの試験結果²⁻⁵⁰⁾

Yan ら²⁻⁵¹⁾は、中国にある超高層建築物において、水結合材比 31%の高強度コンクリートを 555m の高さまで圧送した事例を報告している。コンクリートの圧送負荷を図 2.20 に、圧送後のスランプフローの低下量を図 2.21 に示す。圧送負荷は最大 25N/mm²程度、コンクリートのスランプフローは圧送した先で 40mm 程度低下した。Yan らは高所圧送のために、コンクリート中のセメントペーストや細骨材の比率を高めてコンクリートの流動性や圧送性を向上させており、高所圧送の実現においてはこのような配慮が必要になると考えられる。

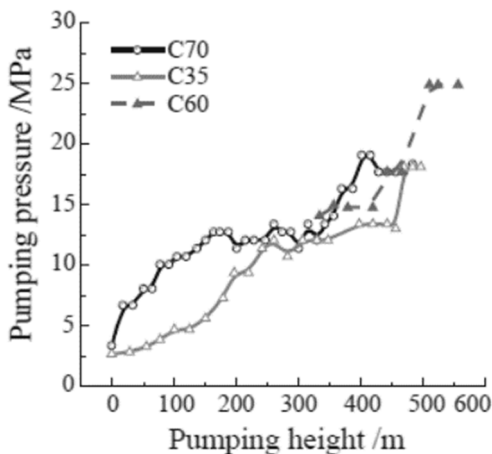


図 2.20 コンクリートの圧送負荷²⁻⁵¹⁾

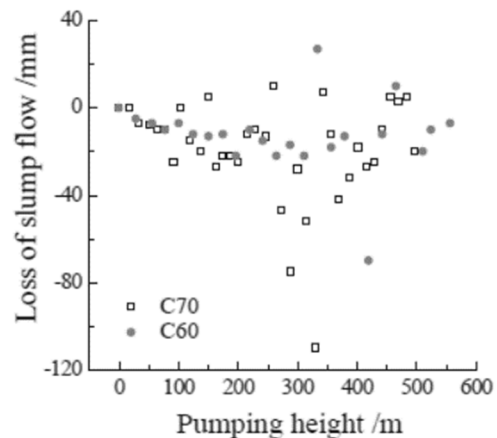


図 2.21 圧送後のスランプフローの低下量²⁻⁵¹⁾

そのほか、海外の超高層建築物の事例を以下に挙げる。

中国にある広州国際金融センターは、高さ 432m、地上 103 階、地下 4 階の超高層建築であり、C60 以上の高強度コンクリートが 70,000m³使用されている。そして C90 は 167m まで、C80 は 410m までの圧送に成功している。また、建設に伴い行われた施工実験においては、普通セメント、スラグ、シリカフューム系の結合材量 750kg/m³、水結合材比 20%の C100 コンクリートを 400m 以上圧送できることも確認している²⁻⁵²⁾。

ドバイにある高さ 828m の超高層建築物であるブルジュ・ハリファには、C60 あるいは C80 レベルの高強度コンクリートが使用され、地上 600m の高さまで圧送された。この高さはコンクリートの圧送高さとして世界記録となっている。このコンクリートに要求された性能は、3 時間のスランプ

保持性、高さ 600m 以上の圧送が可能、スランプフローは 650mm、10 時間強度が 12MPa、28 日強度が 80MPa および通年にわたる性能の確保であった。²⁻⁵²⁾

以上のように、圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響について様々な研究や実施工例があるが、高さ 300m を超える超高層ビルにおける高所圧送の事例は希少であり、20N/mm² 程度の高い圧送負荷が生じる圧送によるコンクリート品質への影響は明確になっていない。例えば、軽量骨材を使用したコンクリートの場合、高圧になることで圧送時の軽量骨材への圧力吸水はさらに大きくなると予想されるが、それがどの程度コンクリートの品質へ影響を及ぼすのか不明確である。また、高圧圧送における管内圧力損失などの実施工に資するデータが不十分と言え、正確な施工計画の立案が難しくなっている。そこで本研究では、20N/mm² 程度の圧送負荷が生じる規模の長距離圧送実験を行い、コンクリートの品質への影響および実施工に資するデータの測定を行うこととした。

第5章で後述するとおり、本研究の実験では高所への圧送を行うことが困難であったため、水平配管による圧送実験を行うこととした。そのため、鉛直方向の圧送においてコンクリートの自重によって生じる圧送負荷の分は、水平方向の圧送距離を延長することで反映させ、圧送負荷が最大で 20N/mm² 程度になるよう配管計画を行った。このように、鉛直方向の圧送時にコンクリートへ及ぼす重力の影響について直接的には検討出来ていないため、重力の直接的な影響については今後の検討課題とした。

2.5 コンクリートの圧送性評価方法

特殊なコンクリートや特殊な条件下の圧送を行ううえで、圧送計画の段階において信頼できる管内圧力損失に関するデータや圧送によるコンクリート品質の変化に関する資料がなく、コンクリートの要求品質を満足した圧送が可能か否かの予測ができない場合には、試験圧送を行う必要があるとされている²⁻⁴¹⁾。試験圧送は実大規模の圧送実験を行うことが一般的となっているが、その実験規模の大きさから多大な労力とコストを要するため、室内試験の規模でコンクリートの圧送性を評価、検討する方法が望まれている。このような試験方法や関連する既往研究の事例を以下に挙げる。

加圧ブリーディング試験は、土木学会規準 JSCE-F 502-2018 (加圧ブリーディング試験方法 (案))²⁻⁵³⁾に規定されており、R.D. Browne と P.B. Bamforth²⁻⁵⁴⁾が提案した加圧ブリーディング試験装置を用いて、一定圧力によるコンクリートの脱水量を測定し、その経時変化からフレッシュコンクリートの圧送性を評価する試験である。すなわち、閉塞圧の下限値と推定される 35kgf/cm² の圧力下において、水分が早期に分離するコンクリートはポンプ圧送に適していないと考えるものである。

田沢、坂本ら^{2-55), 2-56)}は、加圧ブリーディング試験によって得られた結果からフレッシュコンクリートの圧送性能を評価する方法として、加圧ブリーディング試験における経過時間と脱水量の関係の標準曲線を提案し、これらの妥当性を検討した結果、圧送性能との対応は十分な効果が得られたとしている。

作栄ら²⁻⁵⁷⁾は加圧ブリーディング試験装置を用いてモルタルに圧縮力を作用させた後に、ミキサによる再練混ぜによりせん断力を作用させることで圧送により生じる応力状態を模擬し、流動性の変化を検討している。外力による流動性低下についてセメント粒子の分散状態に着目し、圧力および高性能 AE 減水剤吸着量の測定を行った結果、外力の作用によるセメント粒子の分散が間接的に認められ、

高性能 AE 減水剤吸着総量の増加が認められた。また、外力の作用によってセメント単位表面積あたりの高性能 AE 減水剤吸着量は減少し、これが外力による変形性低下の原因であると推定している。

橋本ら²⁻⁵⁸⁾は、圧送配管に加速度センサを取り付けた変形性評価試験装置(図 2.22)を用いて、管内で骨材により発生する振動特性を計測し、コンクリートの圧送性を評価する手法を検討している。その結果、テーパ管の入り口下部付近で加速度を計測することにより、加速度の値の乱れや大きさから圧送性を正確に評価することが可能であるとしている。当該評価試験方法は、土木学会規準 JSCE-F 509-2018 (フレッシュコンクリートの変形性評価試験方法(案))²⁻⁵⁹⁾に規定されている。

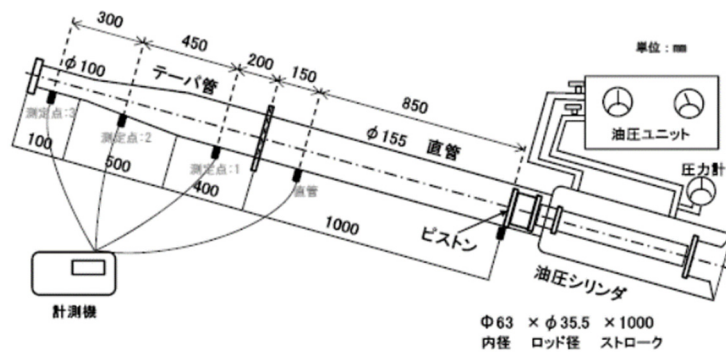


図 2.22 試験装置と加速度センサの取付け位置²⁻⁵⁸⁾

梁, 橋本ら^{2-60), 2-61), 2-62)}は、圧送配管内のコンクリートの状態をモデル化した圧送性評価装置により、コンクリートが閉塞すること無く圧送可能な水平換算距離を定量的に評価する方法を提案し、本手法を実現場に適用して評価結果おおむね妥当であることを確認している。圧送性評価装置の概略平面図および設置状況をそれぞれ図 2.23 および写真 2.5 に示す。当該研究で考案した圧送性評価試験装置において、ポンプ圧の設定値およびピストンのストローク長がコンクリートの圧送性に与える影響を検討した結果、圧送圧を 1.25~5.0MPa、ピストンのストローク長を 300mm 以上に設定すれば、これらの設定条件の影響を受けずに、式(2.1)によって計算される許容積算受圧量によりコンクリート(とくにスランプ 12cm)の圧送性を評価できることが分かったとしている。

$$CP_T = \int_0^T P_t dt \quad (2.1)$$

ここに、 CP_T : 許容積算受圧量 (MPa・分),

T : シリンダーの動きが止まるまでのピストン稼働時間 (分)

P_t : 時間 t におけるコンクリートが受ける圧力 (MPa)

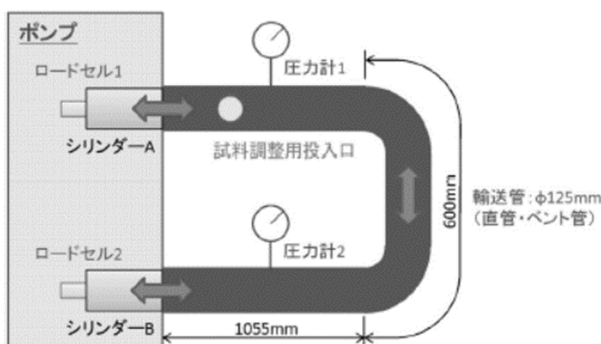


図 2.23 圧送性評価装置の概略平面図²⁻⁶⁰⁾

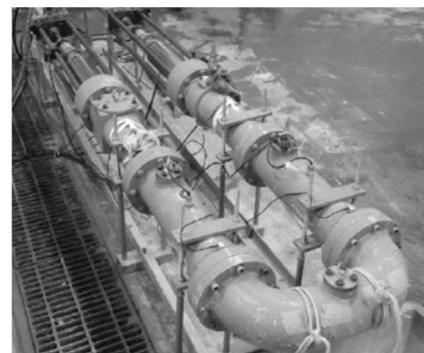


写真 2.5 圧送性評価装置の設置状況²⁻⁶⁰⁾

加藤、筆者ら²⁻⁶³⁾は、梁ら²⁻⁶²⁾が用いている圧送性評価装置を使用して、配管内閉塞の主要因と考えられる粗骨材の分離に着目した圧送性試験を行った。具体的には、圧送性試験前の試料および圧送性試験後に装置配管の所定の箇所から採取した試料について、含まれる粗骨材の体積を測定し、圧送前後の粗骨材体積の変化量を圧送前の粗骨材体積で除し、粗骨材体積変化率として分離抵抗性の評価を行った。圧送性試験の最大圧力は1MPa、試験時間は25分、シリンダーの往復移動時のストローク長さは35cmと設定した。加えて、加圧ブリーディング試験容器(φ200mm)を使用し、非排水の状態では5MPa一定で5分間加圧する静加圧試験を行い、加圧のみの影響によるコンクリートの流動性変化について検討した。

コンクリートの使用材料を表2.7に、コンクリートの調合条件とフレッシュ性状を表2.8に示す。調合は軽量コンクリート1種および2種、高強度コンクリートとした。分離抵抗性改善を目的として、増粘剤1液タイプの高性能AE減水剤(V1)およびセルロースエーテル系の増粘剤(V2)を使用した調合についても検討を行った。

表2.7 コンクリートの使用材料²⁻⁶³⁾

使用材料	記号	詳細
セメント (C)	N	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³)
	M	中庸熟ポルトランドセメント(密度3.21g/cm ³)
細骨材	S1	市原産山砂(表乾密度2.58g/cm ³)
	S2	鳥形山産石灰砕砂(表乾密度2.62g/cm ³)
	LS	軽量骨材(表乾密度1.85g/cm ³ , 吸水率15.5%)
粗骨材	LG	軽量骨材(表乾密度1.69g/cm ³ , 吸水率30.5%, 最大寸法15mm)
	G	峯朗産石灰砕石(表乾密度2.70g/cm ³ , 最大寸法20mm)
混和剤	AD1	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
	AD2	AE減水剤(流動保持剤)
	V1	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(増粘剤1液タイプ)
	V2	セルロースエーテル系増粘剤

表2.8 調合条件とフレッシュ性状²⁻⁶³⁾

調合名	調合条件										フレッシュ性状				
	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤添加量 (C×%)			V2 (kg/m ³)	スランプ ^{*1} (cm)	空気量 ^{*1} (%)	流入モルタル値 (mm)
		C	W	S1	S2	LS ^{*2}	LG ^{*2}	G	AD1	AD2	V1				
L1-27	52.0	356 (N)	185	447	447	-	523	-	0.20	0.10	-	-	23.0	4.7	20
L1-27-V1									-	0.10	0.28	-	23.5	6.0	20
L1-27-V2									0.40	0.10	-	0.10	23.0	4.6	15
L1-33	44.5	416 (N)	185	418	418	-	528	-	0.20	0.15	-	-	23.5	4.5	19
L2-27	52.0	356 (N)	185	160	160	409	523	-	0.18	0.10	-	-	24.0	5.3	21
L2-27-V1									-	0.10	0.23	-	23.0	4.2	17
L2-27-V2									0.43	0.10	-	0.10	23.0	5.5	14
Fc70	26.6	639 (M)	170	374	374	-	-	875	1.05	-	-	-	62.5 (フロー)	1.5	31

*1 L1,L2: 目標スランプ 23±2cm, 目標空気量 5.0±1.5%

Fc70: 目標フロー65±10cm, 目標空気量 2.0±1.5%,

*2 表乾質量で表記

粗骨材体積変化率を図 2.24 に示す。各試験ではストローク回数が異なるため、それぞれの粗骨材体積変化率を各試験のストローク回数で除したものを併記した。圧送性試験による粗骨材体積変化率は軽量1種より2種の方が小さく、モルタルと粗骨材の密度差の影響と考えられた。また、軽量1種は増粘剤を添加することにより粗骨材体積変化率が小さくなった。高強度コンクリートについては、軽量コンクリートと比較して圧送性試験による粗骨材体積変化率は小さかった。

静加圧による流動性の変化を図 2.25 に示す。静加圧試験により軽量1種はスランプ低下が生じており、これは粗骨材の圧力吸水によるものと考えられた。高強度コンクリートは静加圧試験によるフローの変化はほとんど生じなかった。

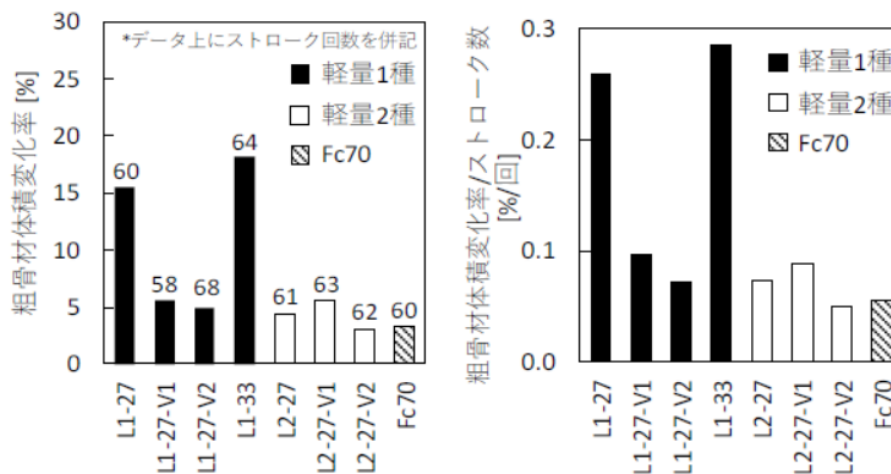


図 2.24 粗骨材体積変化率²⁻⁶³⁾

(右図は左図を各ストローク回数で除したもの)

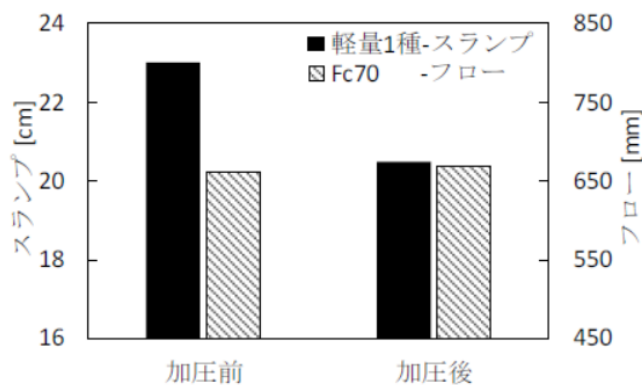


図 2.25 静加圧による流動性の変化²⁻⁶³⁾

以上のように様々な研究がなされているものの、現状では圧送によるコンクリートの品質の変化を定量的に評価できる室内規模の試験方法は確立されていない。さらに、20N/mm²程度の高い圧送負荷が生じる高圧圧送を対象とした研究事例はほとんどない。そこで本研究では、新たに小型の圧送性試験装置を作製し、高圧圧送によるコンクリートの品質の変化を室内試験で検討する方法の構築を試みた。

2.6 まとめ

本章では、既往の研究を参考にして、流動性の高いコンクリートの品質およびその評価方法に関する研究や、圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響に関する研究等を調査し、現状の課題および本研究の方向性について述べた。

- (1) 高流動コンクリートの材料特性の指標として重要と考えられる材料分離抵抗性については、簡易的な評価方法は少なく一般的に採用されるには至っていない。また、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間の流動性を持つ中流動コンクリートについては、構造体コンクリートとして密実な充填を確保するためには外力による軽微な振動・締固めが必要とされているが、現状では必要とされる締固めの程度が明確になっていない。このように、中流動・高流動コンクリートの品質基準や性能評価方法については課題があることを示した。本研究では、中流動コンクリートに必要とされる締固め程度を評価する方法について検討することとした。
- (2) 近年、普通強度領域において増粘剤含有混和剤を用いることで流動性を高めたコンクリートの研究が進み、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートに呼び強度 27~45 のスランプフロー 45~60cm のコンクリートが新設された。しかし、当該コンクリートの JIS を取得した工場は限られている。そのため、上記コンクリートを工場で製造する施工事例は少なく、建設現場における流動化によって流動性の高いコンクリートを製造し、適用する事例がいくつか見られる程度である。本研究では、流動性の高いコンクリートの普及促進を図るべく、増粘剤含有混和剤を後添加することで容易に製造でき、様々な建設現場で対応可能で汎用的に使用できる中流動・高流動コンクリートについて、その品質を検証して実用化を推進することとした。
- (3) 圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響について様々な研究や実施工例があるが、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じる圧送によるコンクリート品質への影響は明確になっていないこと、ならびに、日本国内においては上記のような高圧圧送の事例が無く、管内圧力損失などの実施工に資するデータが不十分であることを示した。そこで本研究では、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる規模の長距離圧送実験を行い、コンクリートの品質への影響および実施工に資するデータの測定を行うこととした。
- (4) 室内試験規模でコンクリートの圧送性を評価する方法について様々な研究がなされているものの、現状では圧送によるコンクリートの品質の変化を定量的に評価できる試験方法は確立されていないこと、また、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じる高圧圧送を対象とした研究事例はほとんどないことを示した。そこで本研究では、新たに小型の圧送性試験装置を作製し、高圧圧送によるコンクリートの品質の変化を室内試験で検討する方法の構築を試みた。

第2章の参考文献

- 2-1) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説，2021.12
- 2-2) JIS A 1150：2020（コンクリートのスランプフロー試験方法）
- 2-3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔規準編〕（土木学会規準 JSCE-F 514-2018（高流動コンクリートのL形フロー試験方法（案））），2018.10
- 2-4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔規準編〕（土木学会規準 JSCE-F 512-2018（高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法（案））），2018.10
- 2-5) 高流動性コンクリートの利用ガイドライン ～高い流動性と材料分離抵抗性をあわせ持つコンクリートの普及による建築物の品質と施工性の向上を目指して～，（一社）日本建設業連合会，2020.9
- 2-6) 河野政典，梅本宗宏，宮野和樹，金森誠治，中島忠大，本間大輔，唐沢智之，加藤淳司，金子樹：高流動性コンクリートの材料分離抵抗性評価に関する研究，日本建築学会技術報告集，第26巻，第64号，pp.827-832，2020.10
- 2-7) 河野政典ほか：高流動性コンクリートの材料分離抵抗性の評価に関する研究（その1～9），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.767-784，2018.9
- 2-8) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説，pp.74-76，2015.2
- 2-9) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.123 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会（358委員会）委員会報告書，2020.5
- 2-10) 親本俊憲，平田真佑子：スマートデバイスを用いたコンクリートの材料分離判定の自動化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.483-484，2021.9
- 2-11) 比嘉龍一，山田義智：機械学習を用いた高流動コンクリートの目視材料分離判定の予測，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.653-654，2022.9
- 2-12) 三谷和裕，五百藏沙耶，加藤貴之：AIを用いたコンクリートの材料分離抵抗性の推定方法に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.651-652，2022.9
- 2-13) 梁俊，坂本淳，丸屋剛，太田貴士：締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め性に関する基礎研究，大成建設技術センター報，第53号，pp.06-1～06-9，2020
- 2-14) JIS A 1159：2018（コンクリートのJリングフロー試験方法）
- 2-15) 鹿毛忠継ほか：低粉体系高流動コンクリートのフレッシュ性状に関する検討（その1～7），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.491-504，2019.9
- 2-16) 鹿毛忠継ほか：高流動コンクリートの材料分離抵抗性および間隙通過時の性能の評価（その1～7），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.363-376，2020.9
- 2-17) 丹羽大地，寺西浩司，鹿毛忠継：高流動コンクリートの材料分離抵抗性および間隙通過性に関する実験的検討，GBRC，Vol.46，No.1，pp.19-27，2021.1
- 2-18) 土木学会：コンクリート標準示方書〔規準編〕（土木学会規準 JSCE-F 701-2018（ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法（案））），2018.10
- 2-19) 土木学会：コンクリート標準示方書〔規準編〕（土木学会規準 JSCE-F 511-2018（高流動コンクリートの充填試験方法（案））），2018.10
- 2-20) 依田和久ほか：高流動性コンクリートの施工性と躯体の品質評価に関する研究（その1～7），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.467-480，2019.9
- 2-21) 依田和久，松田拓，古川雄太，木村仁治，塩田博之，太田貴士，梅本宗宏：高流動性コンクリートの施工性と躯体の品質評価に関する研究（その1）：小型模擬試験体による基礎実験およ

- び型枠側圧実験, 日本建築学会技術報告集, Vol.26, No.64, pp.839-844, 2020
- 2-22) 依田和久, 松田拓, 古川雄太, 木村仁治, 塩田博之, 太田貴士, 梅本宗宏: 高流動性コンクリートの施工性と躯体の品質評価に関する研究(その2): 実大模擬試験体実験の結果と効果の検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.27, No.65, pp.36-41, 2021
- 2-23) 神代泰道, 河野政典, 依田和久, 梅本宗弘, 浦川和也: 日本建設業連合会「建築分野における高流動性コンクリートの普及に関する研究会」の活動概要, コンクリート工学, Vol.58, No.7, pp.493-500, 2020.7
- 2-24) 土木学会編: コンクリートライブラリー136 高流動コンクリートの配合設計・施工指針[2012年版], 資料-85, 2012
- 2-25) 桜井邦昭, 近松竜一: 中流動コンクリートの合理的な配合設計方法に関する一提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1225-1230, 2013
- 2-26) 小山田英弘, 松藤泰典, 小山智幸, 赤松壘: 中流動コンクリートの調合法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.463-468, 2000
- 2-27) 東・中・西日本高速道路株式会社: トンネル施工管理要領, p.44, 2013
- 2-28) 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳, 井櫻潤示: 鉄筋間隙を通過するコンクリートにおける締固めエネルギーに基づいた締固め性に関する研究, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.175, No.2, pp.142-156, 2019
- 2-29) 小泉信一: 増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの現状 -スマートダイナミックコンクリート(SDC)の概要と適用拡大に向けた取組み-, GBRC, Vol.42, No.1, pp.2-10, 2017.1
- 2-30) 小泉信一・鈴木澄江, 鹿毛忠継, 榎田佳寛: 増粘剤含有高性能 AE 減水剤を使用した高流動コンクリートのワーカビリティの評価, 日本建築学会技術報告集, 第25巻, 第59号, pp.5-10, 2019.2
- 2-31) JISA 1160:2018 (増粘剤含有高性能 AE 減水剤を使用した高流動コンクリートのワーカビリティの評価基準)
- 2-32) 宇井衛, 河合智寛, 立松和彦, 山崎順二: 増粘剤1液タイプの高性能 AE 減水剤を用いた無収縮中・高流動コンクリートの開発 その3 耐震改修工事における適用事例および概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.455-456, 2019.9
- 2-33) 河合智寛, 宇井衛, 立松和彦, 山崎順二: 増粘剤1液タイプの高性能 AE 減水剤を用いた無収縮中・高流動コンクリートの開発 その4 実施工における硬化物性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.457-458, 2019.9
- 2-34) 古川雄太, 大岡督尚: 建築分野における主要構造部に適用するスランプフロー管理の流動化コンクリートの実施と品質管理, コンクリート工学, Vol.52, No.10, pp.884-891, 2014.10
- 2-35) 全振煥, 依田和久, 河野聡志, 杉本健太郎: 中・高流動コンクリートの場所打ち杭への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1061-1066, 2020
- 2-36) 端直人, 右田周平, 網干祐也, 梅本宗宏: 流動化した軽量コンクリートの超高層階へのポンプ圧送性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.357-358, 2020.9
- 2-37) 依田和久, 坂敏秀, 百瀬晴基, 森田健一: ひび割れ低減性を付与した後添加型中流動コンクリートの施工, コンクリート工学, Vol.45, No.10, pp.51-56, 2007.10
- 2-38) 依田和久, 関田徹志, 百瀬晴基, 森田健一: 流動性とひび割れ低減性を有したコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.427-432, 2007

- 2-39) 日本コンクリート工学協会：コンクリート圧送工法ガイドライン 2009 および解説，2009
- 2-40) 土木学会編：コンクリートライブラリー135 コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版]，pp.33-34，2012
- 2-41) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009.12
- 2-42) 中田善久，大塚秀三，毛見虎雄：ポンプ圧送に伴う高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の品質変化に関する文献的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.2223-2228，2007
- 2-43) 土木学会編：コンクリートライブラリー126 施工性能にもとづくコンクリートの調合設計・施工指針(案)，pp.72-75，2007
- 2-44) 浦野真次，熊野知司，名倉健二，河井徹：ポンプ圧送によるフレッシュコンクリートの性状変化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.343-348，1999.6
- 2-45) 浦野真次，名倉健二，栗田守朗，田中博一：ポンプ圧送によるフレッシュコンクリートの流動性変化に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.445-450，2000.6
- 2-46) 神代泰道，一瀬賢一，都築正則：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1217-1222，2006.
- 2-47) 第7回圧送技術研究会 -コンクリートのポンプ圧送性に関する総合的な評価-，2010.12
- 2-48) 岩清水隆，青木義彦，九嶋壮一郎，永野浩一：軽量コンクリートの高さ 300m への超高所圧送—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—，コンクリート工学，Vol.51，No.8，pp.648-655，2013.8
- 2-49) 第6回圧送技術研究会 -コンクリートのポンプ圧送性に関する総合的な評価-，2009.10
- 2-50) 青木義彦，岩清水隆，山田佳博，永野浩一： $F_c=150\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリート CFT 柱の施工—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—，コンクリート工学，Vol.50，No.8，pp.683-688，2012.8
- 2-51) Yan, P., Han, J., Li, M., Liu, Y.: Pumping Process of High Strength Self-consolidating Concrete in the Construction of Skyscraper, Rheology and Processing of Construction Materials, RheoCon 2019, SCC 2019, RILEM Bookseries 23, pp. 346-352, 2020.
- 2-52) 杉山知巳：アジア太平洋地域におけるコンクリート用化学混和剤の適用の動向，コンクリート工学，Vol.49，No.9，pp.40-43，2011.9
- 2-53) 土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編] (土木学会規準 JSCE-F 502-2018 (加圧ブリーディング試験方法 (案))), 2018.10
- 2-54) R. D. Browne and P. B. Bamforth: "Tests to Establish Concrete Pumpability," ACI JOURNAL MAY 1977
- 2-55) 田沢栄一，松岡康訓，坂本全布：特殊コンクリートの圧送性と品質に関する研究，大成建設技術研究所報，第12号，pp.77-86，1979
- 2-56) 坂本全布，田沢栄一，松岡康訓：特殊コンクリートの圧送性と品質に関する研究 (その2)，大成建設技術研究所報，第13号，pp.139-146，1980
- 2-57) 作栄二郎，大内雅博，筒井浩平：ポンプ圧送による自己充填コンクリートの流動性変化のメカニズム，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.79-84，2007
- 2-58) 橋本紳一郎，江本幸雄，伊達重之，橋本親典：コンクリートのポンプ圧送性簡易評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1186-1191，2012
- 2-59) 土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編] (土木学会規準 JSCE-F 509-2018 (フレッシュ

- コンクリートの変形性評価試験方法(案))), 2018.10
- 2-60) 橋本貴之, 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛: 加圧履歴に基づいたポンプ圧送性の室内試験評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1143-1148, 2018
- 2-61) 梁俊, 橋本貴之, 坂本淳, 丸屋剛, 古川成光, 三坂浩昭, 徳永光宏: 加圧履歴に基づいたポンプ圧送性の室内試験評価方法による圧送可能距離の検討, 土木学会第73回年次学術講演会, V-027, pp.53-54, 2018.8
- 2-62) 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛, 橋本貴之: 加圧履歴に基づいたコンクリートの圧送性の室内評価試験方法に関する研究, コンクリート工学, Vol.58, No.12, pp.937-943, 2020
- 2-63) 加藤優志, 山本佳城, 黒岩秀介, 太田貴士, 渡邊悟士: 軽量コンクリート・高強度コンクリートの圧送性に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.249-250, 2019.9

第3章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの品質検討

3.1	はじめに	35
3.2	増粘剤含有混和剤の添加がコンクリートの品質に及ぼす影響の検討	35
3.2.1	実験概要	35
3.2.2	フレッシュコンクリートの試験結果	40
3.2.3	硬化コンクリートの試験結果	44
3.3	中流動コンクリートに必要な締固め程度の評価方法の検討	46
3.3.1	振動試験装置および締固め性の評価方法	46
3.3.2	コンクリートの使用材料および調合	47
3.3.3	調合の相違による締固め完了エネルギーの変化	48
3.3.4	締固めを考慮した中流動コンクリートの調合選定方法の検討	51
3.4	まとめ	55
	第3章の参考文献	56

第3章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの品質検討

3.1 はじめに

現在では、増粘剤を含有した高性能 AE 減水剤等の混和剤を用いて、単位セメント量を多くすることなく流動性と材料分離抵抗性を高めた中流動・高流動コンクリートの実用化が進み³⁻¹⁾、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートに呼び強度 27~45 のスランプフロー45~60cm のコンクリートが新設されている。しかし、当該コンクリートの JIS を取得した工場は限られており、汎用的に使用できる状況ではないと言える。そのため、例えば建設現場で混和剤を後添加することで容易に製造でき、十分な流動性と材料分離抵抗性を併せ持つコンクリートが開発されれば、適用可能な建設現場が広がり、流動性の高いコンクリートの普及を促進させることができると考えられる。

また近年では、トンネル覆工コンクリートを中心に中流動コンクリートの適用事例が増えている。中流動コンクリートは、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間の流動性を持つコンクリートであり、高流動コンクリートのような自己充填性を有しておらず、外力による軽微な締固めを必要とする。しかし現状では、この締固めの程度が明確になっていないことが懸念事項となっている。

そこで本章では、増粘剤含有混和剤を後添加することで得られ、普通強度領域においても汎用的に使用できる流動性の高いコンクリートの実用化および普及に向けて、ベースコンクリートの調合条件や増粘剤含有混和剤の添加量が、流動化後のコンクリートのフレッシュ性状や硬化後の品質に及ぼす影響を室内実験により検討した。また、中流動コンクリートに必要な締固め程度の評価方法を検討した。

本研究における対象のコンクリートは、JIS A 5308 のレディーミクストコンクリートに適合する呼び強度 27~42、スランプ 18~21cm の普通コンクリートに、粉末の流動化剤および増粘剤含有混和剤を後添加することで得られる流動化コンクリートである。様々なレディーミクストコンクリート工場の調合に対応するために、流動化剤と増粘剤含有混和剤を分けて、それぞれ添加量を調整できるようにしている。流動化後のスランプフロー目標値は $45 \pm 7.5\text{cm}$ 、 $50 \pm 7.5\text{cm}$ 、 $55 \pm 10\text{cm}$ 、 $60 \pm 10\text{cm}$ として検討を行った。なお、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(2018)」における流動化コンクリートのスランプは、調合管理強度 $33\text{N}/\text{mm}^2$ 未満の場合は 21cm 以下、 $33\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の場合は 23cm 以下としているが、本研究の流動化コンクリートでは、増粘剤含有混和剤を用いて材料分離抵抗性を高めているため、JASS 5 における流動化コンクリートよりもスランプを大きく設定している。

3.2 増粘剤含有混和剤の添加がコンクリートの品質に及ぼす影響の検討

3.2.1 実験概要

コンクリートの使用材料を表 3.1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、細骨材は山砂 2 種類および砕砂 2 種類、粗骨材は砕石 3 種類を用いた。混和剤として高性能 AE 減水剤を、後添加用の混和剤としてポリカルボン酸エーテル系化合物の流動化剤と、セルロース系化合物およびポリカルボン酸エーテル系化合物を混合した増粘剤含有混和剤を用いた。新たな増粘剤含有混和剤を使用するにあたり、アルカリ水溶液中における増粘効果を確認するため、増粘剤含有混和剤の粘度の経時変化を測定した。測定は $W/C=100\%$ に調合したセメントスラリーの上澄み液を濾過した濾液中に、増粘剤含有混和剤を 2.0% 添加、攪拌し、B 型粘度計を用いて行った。各時間での測定は、 25°C の室内で 60rpm の回転速度により 1 分間攪拌した後に行った。粘度の経時変化を図 3.1 に示す。初期に粘度が上昇した後は経時による変化はほとんど無く、安定した増粘効果を確認した。

表 3.1 コンクリートの使用材料

材料名	記号	種類・物性等
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm ³
細骨材	S1	山砂，表乾密度 2.61g/cm ³ ，FM 2.48
	S2	石灰石砕砂，表乾密度 2.65g/cm ³ ，FM 2.92
	S3	山砂，表乾密度 2.61g/cm ³ ，FM 1.71
	S4	玄武岩砕砂，表乾密度 2.81g/cm ³ ，FM 3.00
粗骨材	G1	石灰石砕石 2005，表乾密度 2.70g/cm ³ ，FM 6.52
	G2	玄武岩砕石 1505，表乾密度 2.82g/cm ³ ，FM 6.50
	G3	玄武岩砕石 2010，表乾密度 2.84g/cm ³ ，FM 7.04
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 標準形，ポリカルボン酸エーテル系化合物
後添加剤	AD	粉末流動化剤，ポリカルボン酸エーテル系化合物
	V	粉末増粘剤含有混和剤，セルロース系化合物および ポリカルボン酸エーテル系化合物の混合

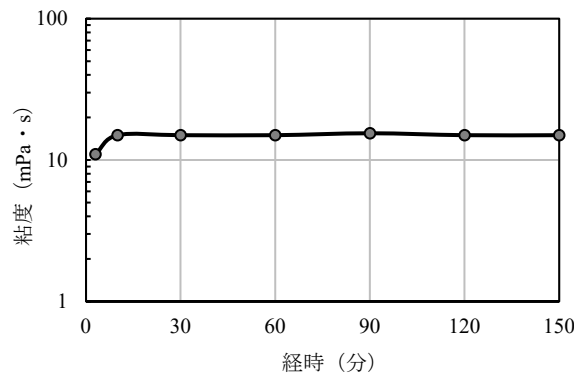


図 3.1 増粘剤含有混和剤の粘度の経時変化

コンクリートの調合を表 3.2 に示す。呼び強度 27～42 に相当する水セメント比（以下，W/C）のコンクリートで検討を行った。調合 No.（以下，No.）1～12 および No.13～15 は，それぞれ東京近郊地域および関西地域のレディーミクストコンクリート工場で用いられている骨材および調合を想定した。ベースコンクリートのスランプは No.5～8 および No.10 が 21cm，それ以外の調合では 18cm とした。細骨材率はベースコンクリートのスランプを得るために合わせたものを基本とした。ただし，No.2 は細骨材率を基本調合よりも低くした調合であり，No.6，7，8，10 は細骨材率を基本調合よりも高くした調合である。

表 3.2 コンクリートの調合

調合 No.	呼び強度	ベーススランプ (cm)	流動化後目標スランプフロー (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位粗骨材絶対容積 (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)						添加量 (C×%)
								W	C	S1	S2	G1	SP	
1	27	18	45	56.5	4.5	47.4	363	170	301	430	430	980		0.25
2	30	18	50	53.0	4.5	44.3	381	170	321	398	398	1029		0.22
3	30	18	50	53.0	4.5	46.1	368	170	321	414	414	994		0.23
4	33	18	50	50.0	4.5	45.5	369	170	340	405	405	996		0.26
5	33	21	55	50.0	4.5	50.7	330	175	350	446	446	891		0.32
6	36	21	60	46.5	4.5	50.1	330	175	376	435	435	891		0.27
7	36	21	60	46.5	4.5	52.4	315	175	376	455	455	851		0.30
8	36	21	60	46.5	4.5	54.6	300	175	376	475	475	810		0.35
9	42	18	55	41.0	4.5	43.5	370	170	415	374	374	999		0.40
10	42	21	60	41.0	4.5	49.5	330	170	415	426	426	891		0.47
11	27	18	45	54.0	4.5	44.7	382	159	294	820	-	1050		0.80
12	30	18	50	51.0	4.5	44.1	389	160	314	801	-	1050		0.80
以下, 【S1, S2, G1】 を 【S3, S4, G2, G3】 に変更。										S3	S4	G2	G3	
13	27	18	45	55.0	4.5	50.0	334	175	318	318	591	378	568	0.85
14	30	18	50	51.0	4.5	48.8	344	174	341	313	581	390	585	0.70
15	33	18	50	47.0	4.5	47.5	350	173	368	301	559	396	595	0.65

コンクリートの練混ぜおよびフレッシュ性状試験は 20°C, 70%RH の恒温恒湿室で行った。練混ぜには水平 2 軸形強制練りミキサ (容量 60L) を用い、セメントと骨材を投入し 15 秒間空練りを行った後に、水と混和剤を投入し 60 秒間練混ぜを行い、ミキサ内の掻き落としを行った後さらに 60 秒間練り混ぜた。ベースコンクリートの空気量が 4.5±1.5%, スランプが設定範囲(18±2.5cm, 21±2.5cm)となるように混和剤の添加量を調整した。ベースコンクリートの練混ぜ後にフレッシュ性状を確認し、ミキサ内にベースコンクリートを戻して流動化剤および増粘剤含有混和剤を添加し、120 秒間練り混ぜた。なお、ベースコンクリートの注水から流動化コンクリートの練上がりまでの時間は全てのバッチで 15 分程度であった。

コンクリートおよびモルタルの試験項目を表 3.3 に示す。ベースコンクリートの試験は全ての調合についてスランプ、空気量を測定し、一部の調合についてブリーディング量、沈降量、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮を測定した。流動化コンクリートの試験は、全ての調合についてスランプフロー、空気量を測定し、一部の調合についてブリーディング量、沈降量、J-Ring, Sieve segregation test, 圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮を測定した。沈降量の測定は 20°C, 80%RH の恒温恒湿室にて行った。また、流動化コンクリートの一部の調合について、ウェットスクリーニングして採取したモルタルの 0 打フローおよび J14 漏斗流下時間を測定した。0 打フローは、JIS R 5201 のフロー試験に従ってフローコーンを上方に取り去ったときに広がった直径を、フローテーブルに打撃を加えずに測定した。

表 3.3 試験項目

項目	試験方法	備考
スランプ	JIS A 1101	ベースコンクリートのみ
スランプフロー	JIS A 1150	
空気量	JIS A 1128	
ブリーディング量	JIS A 1123	調合 No.3,10,14 のみ
沈降量	JASS 5T-503	調合 No.3,10,14 のみ
J-Ring	ASTM C 1621 ³⁻²⁾	流動化後の一部のみ
Sieve segregation test	EN 12350-11 ³⁻⁴⁾	流動化後の一部のみ
圧縮強度	JIS A 1108	調合 No.3, 9 のみ
静弾性係数	JIS A 1149	調合 No.3, 9 のみ
乾燥収縮	JIS A 1129-3 附属書 A	調合 No.3 のみ
0 打フロー	JIS R 5201※打撃無し	流動化後モルタルのみ
J ₁₄ 漏斗流下時間	JSCE-F 541	流動化後モルタルのみ

J-Ring および Sieve segregation test の試験状況を写真 3.1 に示す。J-Ring 試験は ASTM C 1621-2014³⁻²⁾に準じ、スランプコーンを正置する A 法により行った。試験はリング直径 300mm、バー本数 16 本、バー直径 16mm、バー間隔 (芯々) 58.9±1.5mm の金属製装置を用い、J-Ring フロー、500mm フロー時間、スランプフローと J-Ring フローとの差 (以下、ブロッキング) および通過能力 PJ を測定した。J-Ring フローは一様な円形にフローしない場合も見受けられたため、広がりが最大と思われる直径とその直交する方向の直径を測定した。ブロッキングは ASTM において表 3.4 のように評価区分されている指標であり、PJ は EN12350-12 : 2010³⁻³⁾において通過能力として式(3.1)で計算される指標である。これらは共に間隙通過性の指標として用いられており、数値が小さいほど間隙通過性が高いと判断される。なお、本実験を行った当時は、JIS A 1159 : 2018 (コンクリートの J リングフロー試験方法) がまだ制定されていなかったため、上記のとおり ASTM C 1621-2014 を参照して J-Ring 試験を実施した。

$$PJ = (\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})/4 - \Delta h_0 \quad (3.1)$$

ここに、PJ: 通過能力(mm), Δh: 測定高さ(mm), 測定位置は図 3.2 に示す。

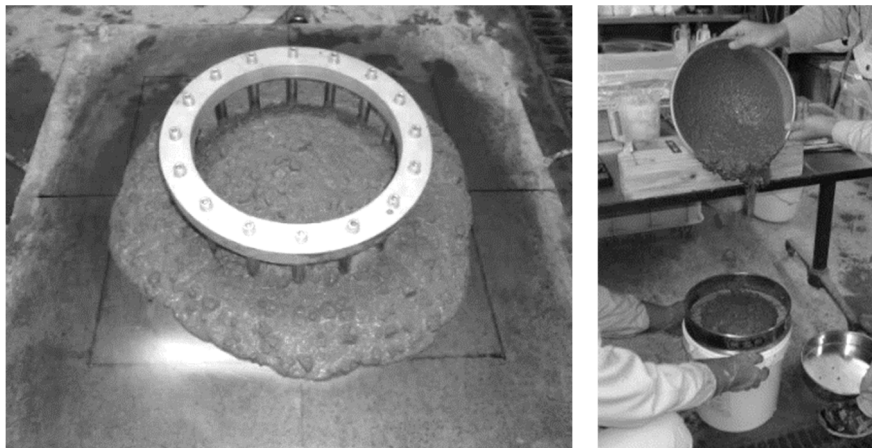


写真 3.1 J-Ring (左) および Sieve segregation test (右)

表 3.4 ブロッキング評価³⁻²⁾

ブロッキング	ブロッキング評価
0~25mm	明らかなブロッキングは無し
>25~50mm	わずかなものから顕著なブロッキング
>50mm	顕著なものから極端なブロッキング

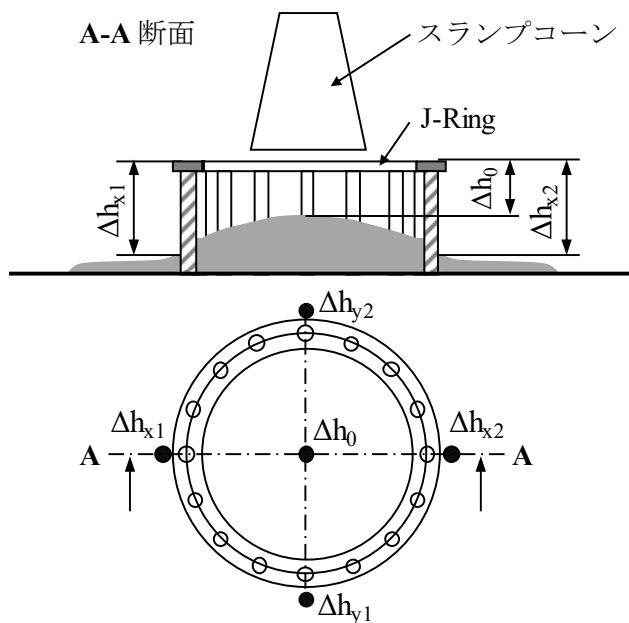


図 3.2 PJ の算出に用いる Δh の測定位置³⁻³⁾

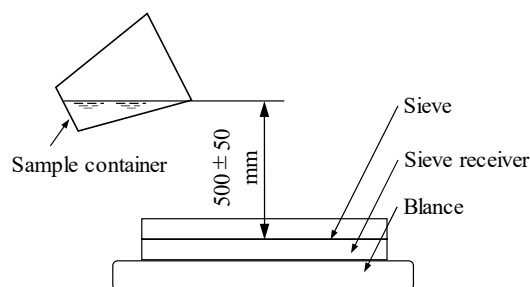


図 3.3 Sieve segregation test 概要³⁻⁴⁾

Sieve segregation test は EN 12350-11 : 2010³⁻⁴⁾ に準じて行った。試験概要を図 3.3 に示す。流動化後のコンクリートから試料 $4.8 \pm 0.2\text{kg}$ を採取してその質量 W_C を測定後、直径 300mm、高さ 60mm、目開き 5mm のふるいの上方 500mm の位置から、試料をふるいの中央部へ速やかに落下させた。ふるいの上で試料を 2 分間静置させた後、ふるいを通過した試料の質量 W_P を測定し、式(3.2)から材料分離抵抗性 SR(%)を求めた。

$$SR = (W_P/W_C) \times 100 \quad (3.2)$$

ここに、SR：材料分離抵抗性(%), W_C ：採取した試料の質量(g),

W_P ：ふるいを通過した試料の質量(g)

材料分離抵抗性は 2 段階で評価し、SR1 (流動距離が 5m 以下で、鋼材のあきが 80mm 以上の薄いスラブや鉛直部材) では 20% 以下、SR2 (流動距離が 5m 以上で流動時に材料分離に関する配慮が必要な場合、もしくは流動距離が 5m 以下であっても鋼材のあきが 80mm 以下の高い鉛直部材) では 15% 以下の場合に所要の材料分離抵抗性を有すると評価する³⁻⁵⁾。

3.2.2 フレッシュコンクリートの試験結果

No.2, 3, 5, 6 について、流動化剤や増粘剤含有混和剤の添加量を変えたフレッシュ性状試験結果を表 3.5 に、No.3, 6 の流動化コンクリートの各種試験結果を表 3.6 に示す。ケース a~d では流動化剤の添加量を、ケース e では増粘剤含有混和剤の添加量を変えて検討を行った。なお、練上がり温度は全てのバッチで 20~21°C の範囲であった。ケース a~d における流動化後のスランプフローをベースのスランプフローで除したスランプフロー比と流動化剤添加量との関係を図 3.4 に示す。流動化剤の添加量が大きくなればスランプフロー比も大きくなる傾向と共に、例えば単位粗骨材量の多い No.2 がスランプフロー比およびその上昇勾配が大きくなる等、調合の違いによる影響が確認された。

流動化剤および増粘剤含有混和剤の添加量と各種試験結果の関係を図 3.5 に示す。ケース d において、流動化剤添加量の増加に伴って流動性が高くなると共に、ブロッキングおよび PJ の減少から間隙通過性も高くなることが分かった。その一方で、SR が増大していることから、材料分離抵抗性は低くなる傾向が認められた。ケース e においては、増粘剤含有混和剤の添加量が 1.0kg/m³ から 2.0kg/m³ に増えた場合に、SR は同等のまま 0 打フローおよび J14 漏斗流下時間の増大していることから、モルタルの流動性および粘性が高くなっていることが分かり、増粘剤含有混和剤による増粘効果が確認された。また、ブロッキングおよび PJ は減少しており、コンクリートの間隙通過性が高くなった。これは粘性が増したことでペーストと骨材がより一体となって流動したためと考えられる。

No.3, 10, 14 については、上記試験とは別に増粘剤含有混和剤の添加量を変えてブリーディングおよび沈降量の検討を行った。その試験結果を図 3.6 に示す。流動化剤の添加量は各バッチで目標スランプフローと同等になるよう調整した。流動化後のブリーディング量および沈降量は、ベースに対してそれぞれ -0.02~+0.04cm³/cm² および -0.61~±0mm と大きな差は無かったものの、流動化後の沈降量が若干の減少傾向となったのは増粘剤含有混和剤の増粘効果による影響と考えられる。

表 3.5 フレッシュ性状試験結果（調合 No.2, 3, 5, 6）

ケース	調合 No.	添加量			ベースコンクリート			流動化コンクリート				
		SP (C×%)	AD (C×%)	V (kg/m ³)	空気量 (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	スランプフロー (cm)	50cm フロー時間 (秒)	フロー停止時間 (秒)	ベースに対するスランプフロー比
a	2	0.22	0.10	1.0	4.2	18.5	30.0	3.8	56.5	4.4	23.0	1.88
		0.22	0.125	1.0	4.5	19.0	28.5	4.3	59.0	2.9	23.2	2.07
b	3	0.23	0.125	1.0	5.2	20.0	31.0	4.5	55.0	5.3	16.3	1.77
		0.25	0.15	1.0	4.9	20.0	32.0	4.3	58.5	5.2	25.1	1.83
c	5	0.32	0.10	1.0	4.6	20.0	31.5	4.6	54.5	3.9	20.3	1.73
		0.32	0.15	1.0	5.1	21.0	33.5	4.2	61.5	4.1	24.0	1.84
d	6	0.27	0.10	1.0	3.9	18.5	27.5	4.3	51.0	9.9	13.7	1.85
		0.27	0.15	1.0	4.7	20.5	34.0	3.8	70.0	2.3	30.8	2.06
e	3	0.23	0.125	1.0	4.9	18.5	28.5	4.1	55.0	7.0	20.1	1.93
		0.23	0.125	2.0	5.2	19.0	29.0	5.2	56.5	6.5	29.0	1.95

表 3.6 流動化コンクリートの各種試験結果（調合 No.3, 6）

ケース	調合 No.	添加量			流動化コンクリート						ウェットスクリーニングモルタル			
		ベース SP (C×%)	流動化		J-Ring フロー (cm)	J-Ring フロー時間		ブロッッキング (mm)	PJ (mm)	SR (%)	0 打フロー (mm)	0 打フロー時間		J ₁₄ 漏斗流下時間 (秒)
			AD (C×%)	V (kg/m ³)		50cm (秒)	停止 (秒)					20cm (秒)	停止 (秒)	
d	6	0.27	0.10	1.0	45.5	-	21.4	55	44.4	1.8	135	-	14.0	31.7
		0.27	0.15	1.0	67.5	3.5	37.8	25	18.4	10.1	250	2.3	26.8	15.0
e	3	0.23	0.125	1.0	48.3	-	26.8	66	47.7	2.6	155	-	11.1	13.3
		0.23	0.125	2.0	51.5	28.8	36.5	51	43.9	2.6	215	6.6	13.0	23.7

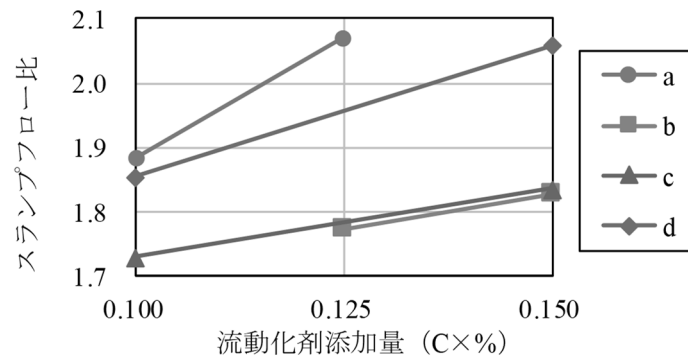


図 3.4 流動化剤添加量とスランプフロー比の関係

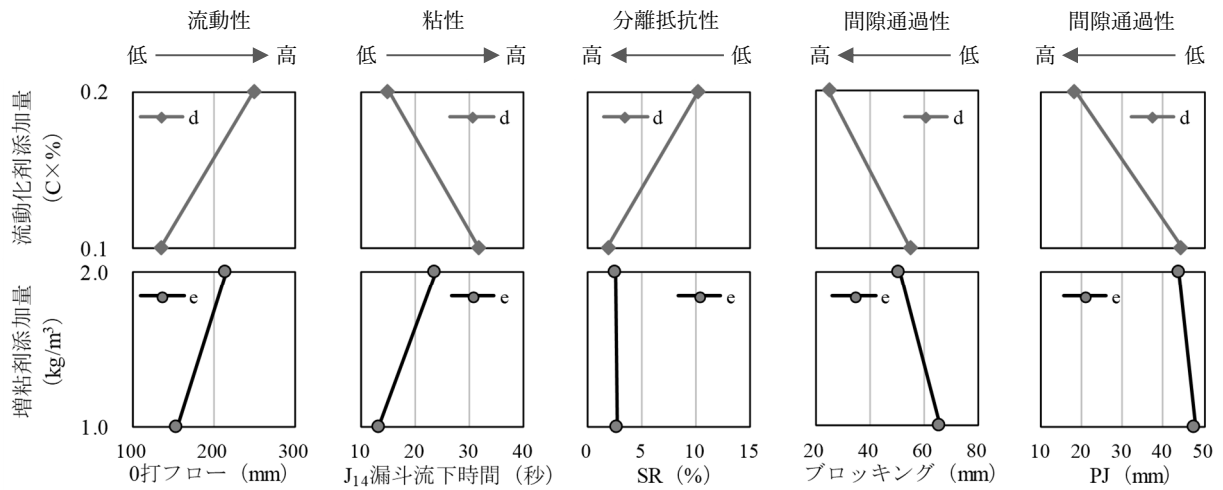
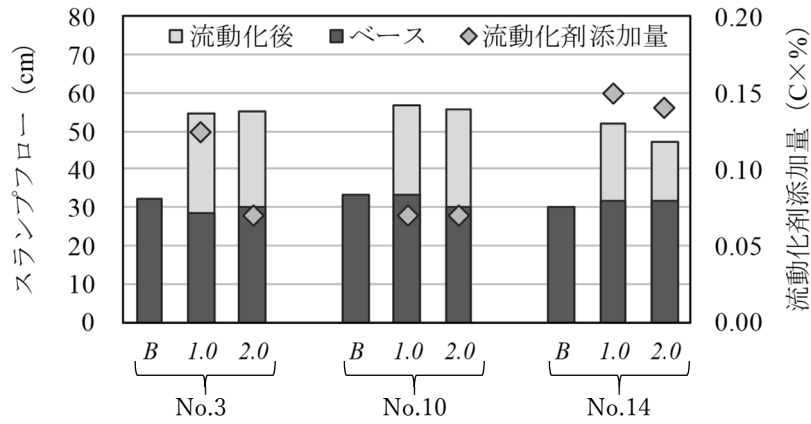
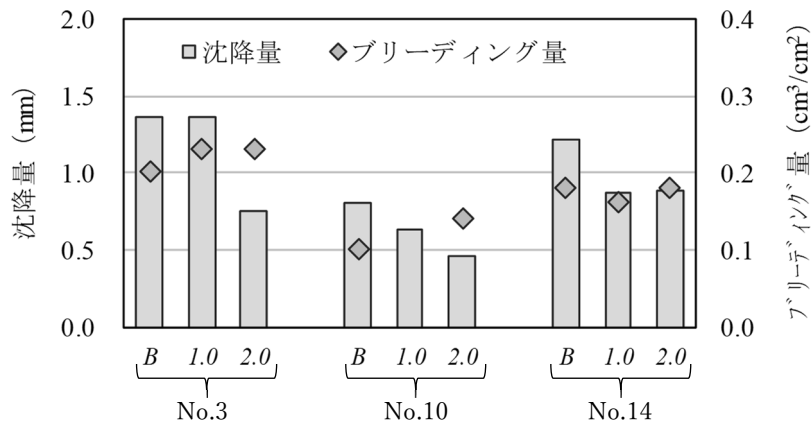


図 3.5 後添加剤の添加量と各種試験結果の関係



a) スランプフロー試験結果



b) 沈降量・ブリーディング量測定結果

※ 斜体の B はベース，数字は増粘剤含有混和剤の添加量(kg/m³)を示す。

図 3.6 増粘剤含有混和剤の添加量と各種フレッシュ性状の関係

調査毎の各種試験結果をまとめたものを図 3.7 に示す。本研究で検討した調査では、目標スランプフロー(45±7.5cm, 50±7.5cm, 55±10cm, 60±10cm)を得るために要した流動化剤添加量はC×0.10～0.20%の範囲となった。流動化剤および増粘剤含有混和剤の後添加によって、材料分離を生じることなく呼び強度 27～30 (W/C=56.5～51.0%, 単位セメント量 301～321kg/m³) のコンクリートで 45～50cm 前後、呼び強度 33～42 (W/C=50.0～41.0%, 単位セメント量 340～415kg/m³) のコンクリートで 55cm 前後のスランプフローが得られた。各調査ともスランプフロー試験後の目視観察では分離無しと判断されたが、ブロッキングは ASTM による評価で顕著なブロッキングと評価される 50mm を超えるものがほとんどであった。なお、ブロッキングの値は若林ら³⁻⁶⁾の水セメント比 40～50%の試験結果と同程度の範囲であり、小泉ら³⁻⁷⁾は ASTM におけるブロッキングの評価基準では、増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの評価基準として適用するには厳しすぎる傾向にあるとしている。本研究における流動化コンクリートでも同様の傾向となり、コンクリート打込み時には軽微な締固めの併用などが必要であると考えられる。また、No.3 および 13 に着目すると、同等の強度レベルかつ同等のスランプフローであってもブロッキングの値は大きく異なり、骨材の種類によって間隙通過性が異なることが分かった。

No.6, 7, 8 は、呼び強度 36 のコンクリートについて、フロー55cm 以上の高い流動性および間隙通過性を得ることを目的として、単位粗骨材量を少なくして検討を行ったものである。No.7, 8 については 60cm 程度のスランプフローを得られ、目視観察および SR の値から材料分離抵抗性を有すると判断した。No.6 のようにスランプフロー70cm (60±10cm の上限値) となった場合に、他の調査と比べて SR の値は 10.8%と高くなったが、上述した評価指標 SR1 および SR2 において所要の材料分離抵抗性を有するとされるものであった。これらの結果から、材料分離を生じることなくスランプフロー55±10cm の流動化コンクリートを得るには、呼び強度 36 (W/C=46.5%, 単位セメント量 376kg/m³) 以上のコンクリートを、同様にスランプフロー60±10cm の流動化コンクリートを得るには、呼び強度 40 以上 (単位セメント量 376kg/m³超) のコンクリートを使用することが適切であると考えられる。

フレッシュ性状の検討をした結果、材料分離を生じることなく流動性の高いコンクリートを得るためには、目標スランプフローに応じた単位セメント量や粉体量の設定が必要であり、本研究の範囲では、目標スランプフロー45cm (許容差±7.5cm) では粉体量 301kg/m³ (呼び強度 27 相当) 程度以上、目標スランプフロー50cm (許容差±7.5cm) では粉体量 340kg/m³ (呼び強度 33 相当) 程度以上、目標スランプフロー55cm (許容差±10cm) では粉体量 376kg/m³ (呼び強度 36 相当) 程度以上、目標スランプフロー60cm (許容差±10cm) では 376kg/m³を超える粉体量 (呼び強度 40 以上相当) が適切な適用範囲と考えられる。なお、増粘剤含有混和剤の添加量を一方的に増やすことで、材料分離抵抗性をさらに向上させることは可能であるが、作業性や経済性を考慮し、添加量を過剰に増大させない実用的な範囲で検討し、上述した適用範囲が適切と判断した。

本実験では、東京近郊地域および関西地域と異なる地域のレディーミクストコンクリート工場で使用されている骨材を実験水準とし、骨材の種類や形状が流動化後のフレッシュ性状に及ぼす影響を検討した。その結果、骨材の違いによらず、上述した目標スランプフローと粉体量の適切な適用範囲の知見が得られた。しかし、これはあくまで一部の調査例であり、国内各地の骨材を網羅した結果ではない。そのため実施工の際には、使用するベースコンクリートを製造するレディーミクストコンクリート工場毎に試し練りを行い、製造した流動化コンクリートが材料分離を生じないことを確認する必要がある。

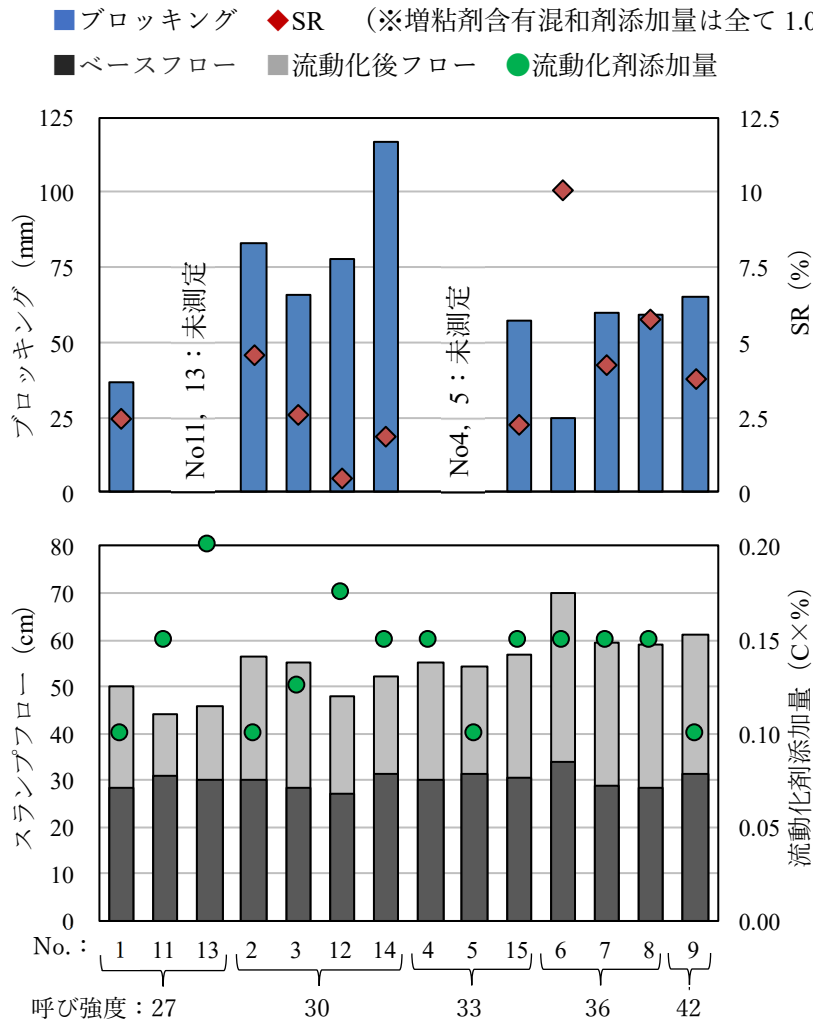
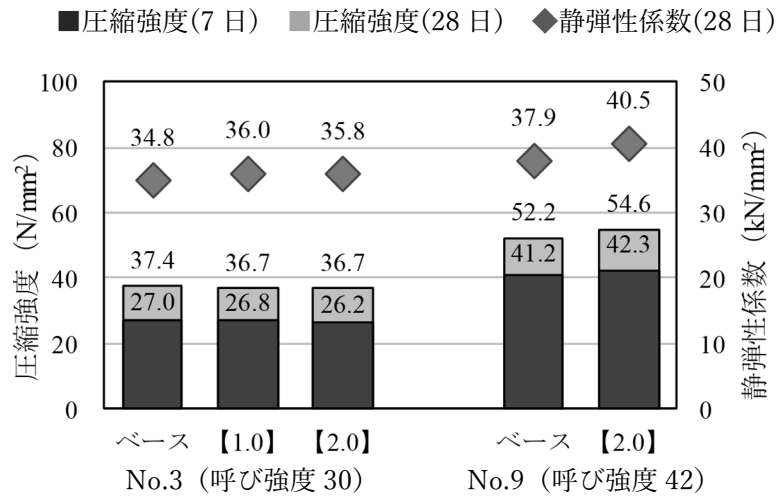


図 3.7 調合毎の各種試験結果

3.2.3 硬化コンクリートの試験結果

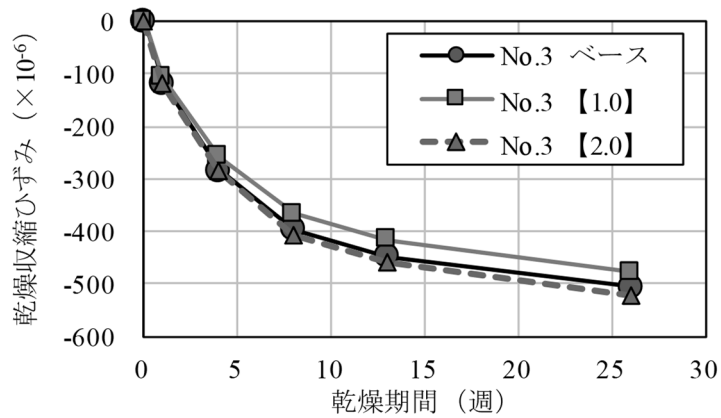
圧縮強度および静弾性係数試験は、本実験で各種試験を実施した代表調合である No.3（呼び強度 30）と、対象とした呼び強度の範囲のうち高強度側である No.9（呼び強度 42）について実施した。その試験結果を図 3.8 に示す。流動化コンクリートの材齢 28 日圧縮強度は、ベースコンクリートと比べて -1.9~+4.6%と、増粘剤含有混和剤の添加量によらず流動化前後で同等となった。また、流動化コンクリートの静弾性係数は、ベースコンクリートと比べて +2.9~+6.9%と流動化前後で同等となった。

代表調合の No.3 の乾燥収縮測定結果を図 3.9 に示す。基長測定後からの乾燥期間 26 週までにおいて、ベースコンクリートおよび増粘剤含有混和剤添加量 1.0, 2.0kg/m³ の流動化コンクリートの乾燥収縮ひずみの推移に大きな差は無く同程度となった。増粘剤の添加量が多い場合では乾燥収縮が増大した報告³⁻⁸⁾もあるが、本研究の範囲では増粘剤含有混和剤の添加量が 2.0kg/m³ までは乾燥収縮に影響を及ぼさないことが分かった。



【 】内は増粘剤含有混和剤添加量 kg/m³を示す。

図 3.8 圧縮強度および静弾性係数試験結果



【 】内は増粘剤含有混和剤添加量 kg/m³を示す。

図 3.9 乾燥収縮測定結果

3.3 中流動コンクリートに必要な締固め程度の評価方法の検討

3.3.1 振動試験装置および締固め性の評価方法

本研究で用いた振動試験装置を写真 3.2 に示す。上部の振動台はスランプフローを測定することを考慮して 1.0×1.0m とし、振動台の横揺れを最小とするために単軸ぶら下げ式モーターを用いた。振動台の中心下部には加速度センサーを設置し、振動台上の四隅にはスランプフロー測定用の非接触型変位計を設置した。

本研究では、中流動コンクリートが振動を受けて、分離することなく、自己充填性を有する高流動コンクリートと同等の状態となれば、十分な充填性を発揮できると考えた。このため、図 3.10 に示すように、高流動コンクリートと同等のスランプフロー 60cm に達するために要する振動エネルギーを、中流動コンクリートの流動性に関する締固め完了エネルギー（以下、 E_f ）と定義した。同様に、流動障害 R2 の U 形充填試験で充填高さ 350mm に達するために要する振動エネルギーを、中流動コンクリートの充填性に関する締固め完了エネルギー（以下、 E_u ）と定義した。

締固めエネルギーは式(3.3)³⁻⁹⁾により求めた。振動台の上でスランプフロー試験を行った試料に振動を与え、非接触型変位計の測定データからスランプフローが 60cm に到達するまでの時間を読み取り、その時間を式(3.3)の t に代入して求めた E_t を E_f とした³⁻¹⁰⁾。なお、測定時には、スランプフローが 60cm に到達するまで、試料中央部に粗骨材が露出した状態を呈することなく周囲部に 2cm 以上のペーストや遊離した水の帯がないことを確認した。

$$E_t = \rho \alpha_{max}^2 t / 4\pi^2 f \quad (3.3)^{3-9)}$$

ここに、 E_t : t 秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー(J/L), ρ : 試料の単位容積質量(kg/L), α_{max} : 最大加速度(m/s²), t : 振動時間(s), f : 振動数(s⁻¹)

また、JSCE-F 511 に準じた U 形充填試験器を振動台に固定して U 形充填試験を行った後、振動を与えて充填高さが 350mm に到達するまでの時間を式(3.3)の t に代入して求めた E_t を E_u とした。

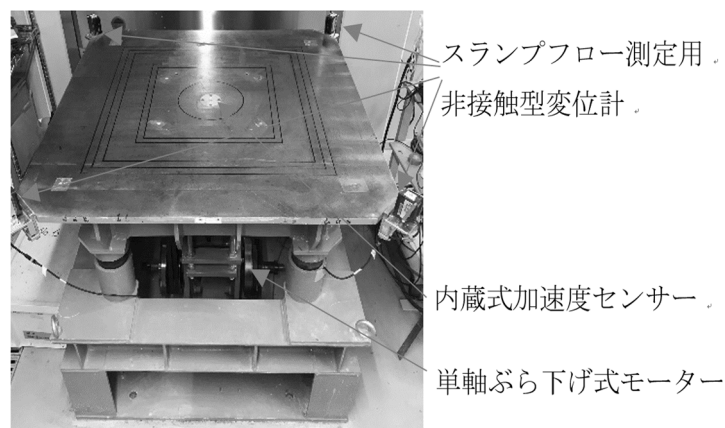


写真 3.2 振動試験装置



図 3.10 E_f および E_u の概要

3.3.2 コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料は、セメントに普通ポルトランドセメント（密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ ），細骨材に千葉県君津産山砂（表乾密度 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率 1.56% ，FM 2.44），粗骨材に青梅産石灰石碎石（最大寸法 20mm ，表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率 2.86% ，FM 6.39，実積率 62.0% ）を用いた。混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系化合物の高性能 AE 減水剤（以下，SP），とポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体の増粘剤含有型高性能 AE 減水剤（以下，VSP）を使用し，一般的に使用されるアルキルエーテル系の AE 剤により空気量を調整した。

コンクリートの調合を表 3.7 に示す。粗骨材絶対容積が一定の場合，単位水量の変化に伴う E_f と E_u の変化を確認するため，単位水量を $150\sim 175\text{kg}/\text{m}^3$ の間で $5\text{kg}/\text{m}^3$ ずつ変化させ（調合 1～6，9～14），試験を行った。単位粗骨材絶対容積は $360\text{ L}/\text{m}^3$ ， $390\text{ L}/\text{m}^3$ の 2 水準にした。なお，ペーストの粘性が E_f と E_u に与える影響を確認するために，単位水量 $155\text{ kg}/\text{m}^3$ と $175\text{ kg}/\text{m}^3$ の調合の混和剤を高性能 AE 減水剤から増粘剤含有型高性能 AE 減水剤に変えた調合についても検討を行った（調合 7～8）。その後，単位水量を $160\text{ kg}/\text{m}^3$ 一定で，粗骨材絶対容積を $315\sim 420\text{ L}/\text{m}^3$ の間で変化させて最適な粗骨材絶対容積を検討し（調合 15～20），求めた最適な粗骨材絶対容積をもとに，単位水量を $155\sim 175\text{ kg}/\text{m}^3$ の間で振って，最適な単位水量を決めた（調合 21～25）。詳細は，3.3.3 試験結果で述べる。

コンクリートの練混ぜおよび試験は 20°C の恒温試験室で行い，練混ぜには水平 2 軸型強制練りミキサーを用いた。混和剤の添加量は各バッチでスランプフローが $42\pm 2\text{cm}$ ，空気量が $4.5\pm 1.0\%$ となるよう調整した。

表 3.7 コンクリートの調合

調合 No.	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位粗骨材絶対容積 (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	SP	VSP
1	50.0	49.3	360	150	300	917	958	9.90	-
2	50.0	48.7		155	310	895	958	6.82	-
3	50.0	48.2		160	320	876	958	5.76	-
4	50.0	47.5		165	330	855	958	4.62	-
5	50.0	46.8		170	340	831	955	1.25	-
6	50.0	46.2		175	350	809	958	3.15	-
7	50.0	48.7	360	155	310	895	958	-	6.82
8	50.0	46.2		175	350	809	958	-	3.50
9	50.0	45.1	390	150	300	839	1037	6.60	-
10	50.0	44.5		155	310	818	1037	5.27	-
11	50.0	43.8		160	320	797	1037	4.48	-
12	50.0	43.1		165	330	775	1037	3.47	-
13	50.0	42.4		170	340	752	1037	3.06	-
14	50.0	41.7		175	350	732	1037	2.80	-
15	50.0	54.6	315	160	320	994	838	10.88	-
16	50.0	52.4	330		320	953	878	7.20	-
17	50.0	48.2	360		320	876	958	5.76	-
18	50.0	43.8	390		320	797	1037	4.48	-
19	50.0	41.6	405		320	757	1077	3.84	-
20	50.0	39.5	420		320	719	1117	3.52	-
21	50.0	50.9	345	155	310	935	912	2.25	-
22	50.0	50.3		160	320	914	912	1.80	-
23	50.0	49.7		165	330	893	912	1.50	-
24	50.0	49.0		170	340	870	912	1.30	-
25	50.0	48.4		175	350	849	912	1.00	-

3.3.3 調合の相違による締固め完了エネルギーの変化

各調合の E_f と E_u の測定結果を表 3.8 に示す。単位水量の変化による E_f の変化を図 3.11 に示す。同図に示した近似直線からその傾向を考察すると、単位水量の増加により E_f が小さくなっている。水セメント比一定の条件で、単位水量が増えるとペースト量が増えることからスランプフローを 60cm にするのに必要なエネルギー E_f が小さくなったと考えられる。粗骨材絶対容積が 360 L/m³ の調合の E_f は、390 L/m³ の調合の E_f より大きくなっている。ペースト量が一定の条件で、粗骨材絶対容積 360 L/m³ の調合は、粗骨材絶対容積が少ないにもかかわらず、 E_f が大きくなっていることは、粗骨材絶対容積の減少によって増えた細骨材の噛み合わせが影響したと考えられる。

表 3.8 各調合の E_f と E_u 測定値

調合 No.	単位粗骨材絶対容積 (L/m ³)	W (kg/m ³)	E_u (J/L)	E_f (J/L)
1	360	150	14.38	10.04
2		155	11.92	7.82
3		160	6.40	7.92
4		165	4.82	7.08
5		170	8.92	8.04
6		175	5.38	7.30
7	360	155	9.50	9.44
8		175	4.22	7.92
9	390	150	13.24	8.14
10		155	10.50	7.58
11		160	7.68	6.64
12		165	7.34	6.28
13		170	7.62	5.96
14		175	7.28	5.62
15	315	160	9.90	9.16
16	330	160	6.24	9.46
17	360	160	6.40	7.92
18	390	160	8.70	7.24
19	405	160	12.20	6.94
20	420	160	12.60	9.48
21	345	155	11.13	6.37
22	345	160	8.99	6.28
23	345	165	5.85	5.60
24	345	170	2.59	5.38
25	345	175	3.09	4.79

単位水量の変化による E_u の変化を図 3.12 に示す。単位水量の増加により E_u は小さくなり、その傾向は E_f よりも E_u で顕著となっている。これは、単位水量の増加に伴い粗骨材を取り巻くペースト量が増えることにより、充填性が改善されたためと考えられる。また、粗骨材絶対容積を少なくした場合に、 E_f の変化の傾向は同傾向であったことに対して、 E_u は単位水量 155~160 kg/m^3 を境に増減傾向が異なる結果となった。このことは、細骨材量と粗骨材量のバランスが充填性に大きく影響することを説明している。以上より、充填性の検討においては、粗骨材絶対容積のみでなく、細骨材量と粗骨材量のバランス、単位水量などと併せて検討する必要があることを示している。

図 3.11 と図 3.12 に示すように、VSP を用いた調査は SP を用いた調査と比べて、 E_f は大きく、 E_u は小さくなる傾向となり、ペーストの粘性の増大による影響が確認された。

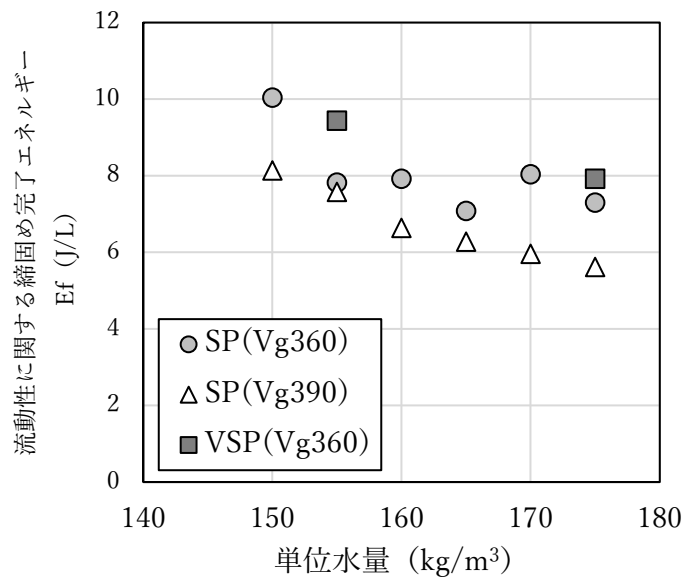


図 3.11 単位水量が E_f に与える影響

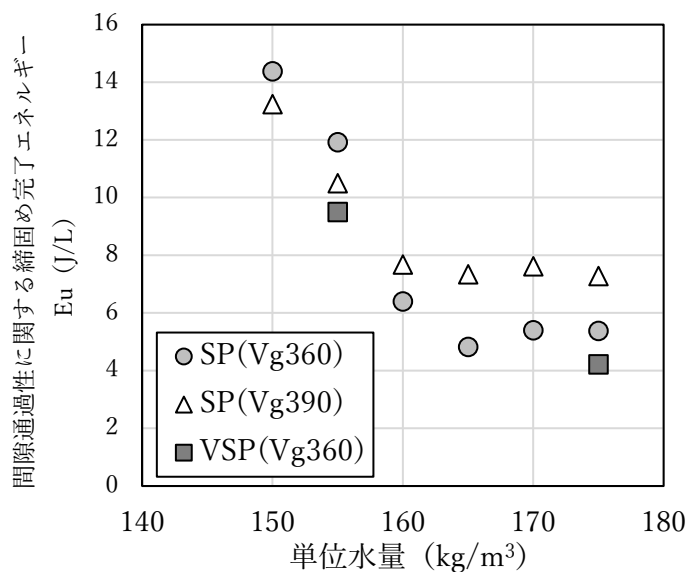


図 3.12 単位水量が E_u に与える影響

3.3.4 締固めを考慮した中流動コンクリートの調合選定方法の検討

前述したように、スランプフローが同じ中流動コンクリートであっても、単位水量や粗骨材絶対容積、混和剤種類の違いによって E_f および E_u が異なることが分かる。また、調合の相違によって、 E_f と E_u の大きさとその大小関係が変わる場合がある。

調合の相違による E_f と E_u の大きさとその大小関係の変化を確認するため、 E_f を横軸に、 E_u を縦軸にして、締固め完了エネルギーの測定結果を図 3.13 にプロットした。図 3.13 に示す斜めの分割線は、 E_f と E_u が等しい場合を示している。したがって、分割線より上方にプロットされる調合は、コンクリートの流動性を確保する締固めエネルギー (E_f) ではコンクリートの十分な充填性を確保できない調合であり、例えば単位水量が少なく粗骨材量が多い調合等である。また、分割線よりも下部にプロットされる調合は、コンクリートを流動させる締固めで十分な間隙通過性を確保できる調合である。コンクリートの打込み、締固め作業時において、コンクリートの流動は目視により確認できるが、流動中のコンクリートが確実に鉄筋間隙を通過しながら流動しているかを目視により確認することは困難である。コンクリートが閉塞または未充填部を生じることなく確実に流動するために、所定の流動性を確保すれば、必要な充填性も確保できる調合を選定することが合理的である。なお、分割線より下部にある調合でも流動性を確保するためのエネルギーが大きいと、コンクリートが分離するリスクが大きくなるばかりでなく、締固めの作業量も増えるため避けたほうがよいと考えられる。また、 E_u が極端に小さい調合 (図中、青色の領域) は、中流動コンクリートとしてはペースト量が必要以上に多い、あるいは粗骨材量を必要以上に減らしたような高流動コンクリートに近い調合だと言える。上記考察の結果、締固めを考慮した中流動コンクリートの合理的な調合は、分割線に近く、分割線を下回り、締固め完了エネルギーが小さい調合 (図中、黄色の領域) だと考えられる。

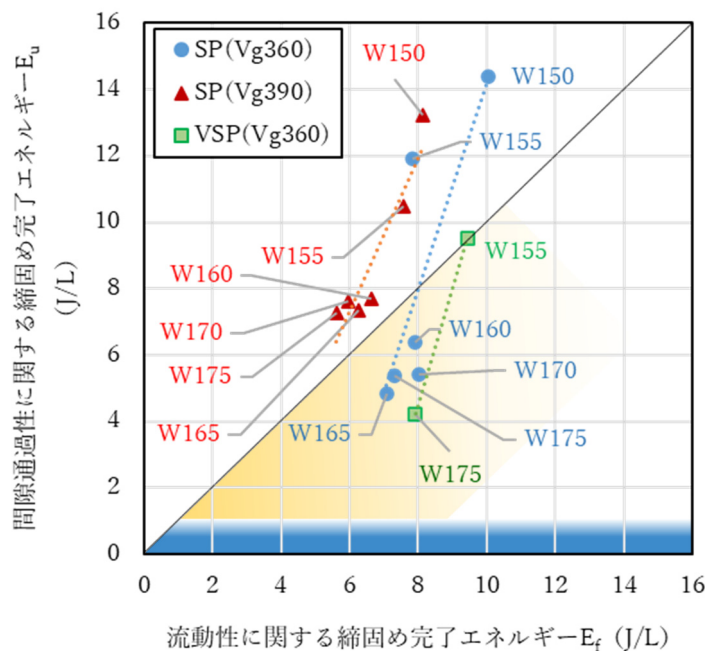


図 3.13 調合の相違による E_f と E_u およびその大小関係の変化

E_f を横軸に、 E_u を縦軸にして、締固め完了エネルギーの測定結果をプロットすると、単位水量や粗骨材絶対容積、混和剤添加量が調合に与える影響も確認できる。図3.13に示すように、粗骨材絶対容積 360 L/m^3 の調合が粗骨材絶対容積 390 L/m^3 の調合に比べて右側にプロットされていることがわかる。また、単位水量が多くなることによって、下の方にプロットされている。粘性を大きくしたVSPを使用した調合は、SPを使用した調合より右下にプロットされている。これらは、中流動コンクリートの合理的な調合を選定するためには、単位水量を大きくしてペーストの量を増やす、粘性を大きくして分離抵抗性を大きくする、粗骨材絶対容積を調整して充填性を改善する等の対応が必要であることを示している。

表3.7で示した粗骨材絶対容積を $315 \sim 420 \text{ L/m}^3$ の間で変化させた調合15~20の締固め完了エネルギーを図3.14に示す。スランプフローを一定として、粗骨材絶対容積を変化させた場合、 E_f および E_u はそれぞれ異なる粗骨材絶対容積で極小値をとる傾向となった。粗骨材絶対容積を 420 L/m^3 から少なくしていくと、分割線より上部にいたプロットが 360 L/m^3 で分割線より下部にプロットされ、さらに 315 L/m^3 では再度分割線よりも上部にプロットされた。このように、粗骨材絶対容積が少ないことで必ずしも調合が合理的になるとは言い切れないことが分かった。

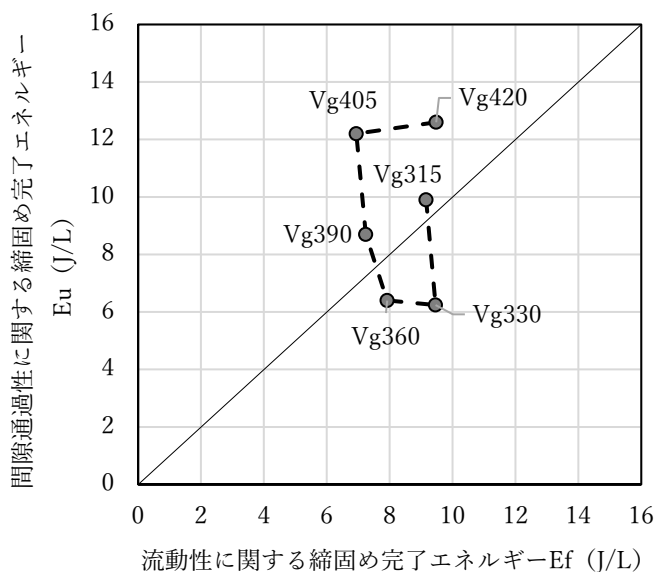


図3.14 粗骨材絶対容積の相違による E_f と E_u の大きさとその大小関係の変化

以上より、 E_f を横軸に、 E_u を縦軸にして締固め完了エネルギーの測定結果をプロットする方法によって、施工に合理的な中流動コンクリートの調合の範囲を判断することが可能となった。ここでは、さらに施工に最適な調合を選定する方法を検討した。

中流動コンクリートの施工に最適な調合を選定する方法として、横軸を粗骨材絶対容積とし、縦軸を締固め完了エネルギーとして、 E_f と E_u を同じグラフにプロットして比較することを試した。表3.7で示した粗骨材絶対容積を315~420L/m³の間で変化させた調合15~19の E_f と E_u を図3.15に示す。粗骨材絶対容積が約315~375L/m³の範囲にプロットされた調合が $E_f > E_u$ の範囲で、コンクリートの流動性を確保する締固めエネルギー (E_f) でコンクリートの充填性を確保できる調合であることがわかる。確実な充填性を確保するためには、 E_f と E_u の差が一番大きい調合を選定することが安全である。したがって、コンクリートの最適粗骨材絶対容積は E_f と E_u の差が一番大きくなる345L/m³と言える。

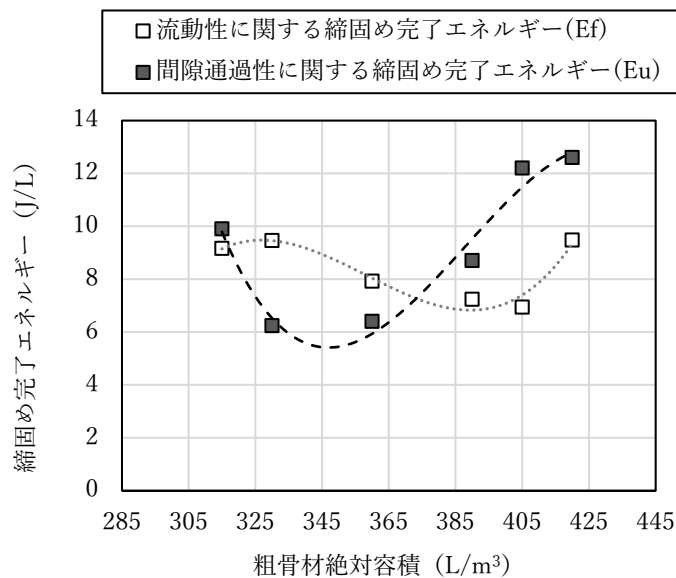


図 3.15 粗骨材絶対容積の相違による E_f と E_u

土木学会コンクリート標準示方書によると、コンクリートの調合選定においては、先に最適細骨材率あるいは粗骨材絶対容積を選定し、それをもとに最適な単位水量を決めている³⁻¹¹⁾。これにならない、ここでは最適粗骨材絶対容積を前述した 345 L/m³として、単位水量を 155~175 kg/m³の間で変化させた調合 20~24 の E_f と E_u を求めた。測定結果を図 3.16 に示す。単位水量が約 165~175kg/m³の範囲にプロットされた調合が $E_f > E_u$ を満足させる調合の範囲で、コンクリートの流動性を確保する締固めエネルギー (E_f) を与えれば、充填性も十分に確保できる調合であることがわかる。確実な充填性を確保するためには E_f の変動が大きくない場合、 E_f と E_u の差が大きい調合を選定することが安全であると考えられるため、図 3.16 に示すように、コンクリートの単位水量は E_f と E_u の差を一番大きくする 170kg/m³近傍にした方が安全であることが分かった。

構造物として必要な圧縮強度と耐久性からコンクリートの水セメント比が決められるので、最適粗骨材絶対容積と最適単位水量が決められたら、混和剤の混入量によりスランプフローを調整することで、中流動コンクリートの最適な調合を決定することができる。

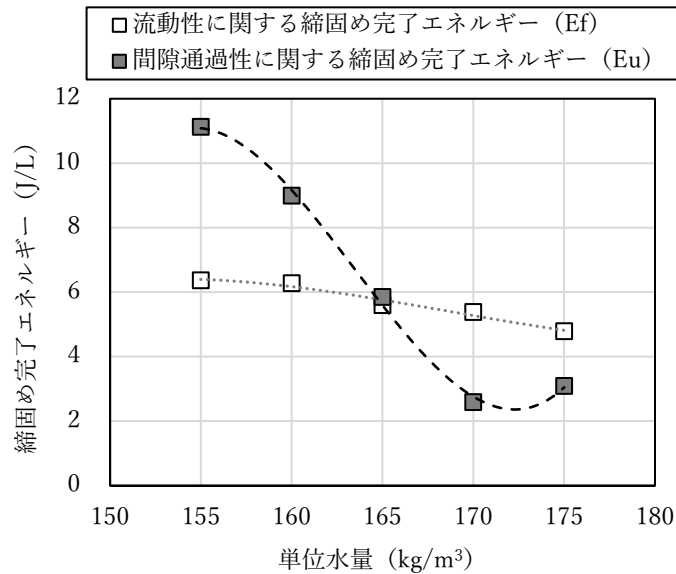


図 3.16 単位水量の相違による E_f と E_u

以上、本研究で検討した評価方法によって、中流動コンクリートに必要とされる締固めの程度を、流動性および間隙通過性を考慮した締固めエネルギーという観点から捉えられることが分かった。この評価方法を行うことで、より最適な中流動コンクリートの調合を計画できる可能性が示唆された。

3.4 まとめ

本章では、普通強度領域において増粘剤含有混和剤を後添加することで流動性および材料分離抵抗性を高めたコンクリートの実用化および普及に向けて、ベースコンクリートの調合条件や流動化剤および増粘剤含有混和剤の添加量が、流動化後のコンクリートのフレッシュ性状や硬化後の品質に及ぼす影響を室内実験により検討した。また、中流動コンクリートに必要な締固め程度を評価する方法を検討した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 増粘剤含有混和剤の添加によりモルタルの粘性が高くなり、コンクリートの材料分離抵抗性、間隙通過性が高くなることが確認された。
- (2) フレッシュ性状の検討をした結果、材料分離を生じることなく流動性の高いコンクリートを得るためには、目標スランプフローに応じた単位セメント量や粉体量の設定が必要であり、本研究の範囲では、目標スランプフロー45cm（許容差 ± 7.5 cm）では粉体量 $301\text{kg}/\text{m}^3$ （呼び強度 27 相当）程度、目標スランプフロー50cm（許容差 ± 7.5 cm）では粉体量 $340\text{kg}/\text{m}^3$ （呼び強度 33 相当）程度、目標スランプフロー55cm（許容差 ± 10 cm）では粉体量 $376\text{kg}/\text{m}^3$ （呼び強度 36 相当）程度、目標スランプフロー60cm（許容差 ± 10 cm）では $376\text{kg}/\text{m}^3$ を超える粉体量（呼び強度 40 以上相当）が適切な適用範囲であると考えられる。
- (3) 増粘剤含有混和剤を後添加した流動性の高いコンクリートのブリーディング量、沈降量、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮率は、いずれもベースコンクリートに対して同程度であった。なお、沈降量については増粘剤含有混和剤添加量の増加により減少傾向が見られた。
- (4) 本章で検討した評価方法によって、中流動コンクリートに必要とされる締固めの程度を、流動性および間隙通過性を考慮した締固め完了エネルギーという観点から捉えられることが分かった。この評価方法を行うことで、より最適な中流動コンクリートの調合を計画できる可能性が示唆された。

第3章の参考文献

- 3-1) 小泉信一：増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの現状 -スマートダイナミックコンクリート(SDC)の概要と適用拡大に向けた取組み-, GBRC, Vol.42, No.1, pp.2-10, 2017.1
- 3-2) ASTM C 1621-2014 Standard test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring
- 3-3) BS EN 12350-12:2010 Testing fresh concrete Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test
- 3-4) BS EN 12350-11:2010 Testing fresh concrete Part 11: Self-compacting concrete – Sieve segregation test
- 3-5) 桜井邦昭：高流動コンクリートに求められる性能とその評価試験方法, コンクリート工学, Vol.53, No.8, pp.721-727, 2015.8
- 3-6) 若林和義, 鈴木澄江, 小泉信一, 永山勝, 梶田佳寛, 鹿毛忠継：増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートのワーカビリティに関する基礎的検討 その3 J-Ring 試験における測定方法の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.523-524, 2016.8
- 3-7) 小泉信一, 松倉隼人, 鈴木澄江, 永山勝, 梶田佳寛, 鹿毛忠継：増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートのワーカビリティに関する基礎的検討 その5 J-Ring 試験方法の適用性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.527-528, 2016.8
- 3-8) 佐原晴也, 竹下浩之, 横田季彦：水溶性高分子化合物を添加した高流動コンクリートの諸物性, 土木学会第45回年次学術講演会梗概集, 第5部, pp.756~757, 1990.9
- 3-9) 國府勝郎, 上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.109-118, 1996.2
- 3-10) 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳, 松元淳一, 下村泰造, 滝沢正徳：締固めエネルギーに基づくコンクリートの締固め完了範囲の評価方法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.69, No.4, pp.438-449, 2013
- 3-11) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）, p.73, 2017

第4章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの実用化検討

4.1	はじめに	57
4.2	模擬柱壁試験体を用いた施工性および躯体品質の検討.....	58
4.2.1	室内実験	58
4.2.2	実大施工実験	60
4.3	建築物への実適用	70
4.3.1	増改築工事への適用	70
4.3.2	新築工事への適用.....	73
4.3.3	免震改修工事への適用	75
4.4	製造・施工マニュアル	78
4.5	まとめ.....	79
	第4章の参考文献.....	79

第4章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの実用化検討

4.1 はじめに

流動化剤および増粘剤含有混和剤を後添加することで得られる流動性の高いコンクリートの実用化および普及を図るべく、実大施工実験により当該コンクリートの品質を検証した。具体的には、市中のレディーミクストコンクリート工場のJIS 調合コンクリートをベースに用いて製造した後添加型の中流動コンクリートについて、室内実験でフレッシュ性状を確認後、模擬柱壁試験体を用いた実大施工実験を行い、型枠充填性、材料分離抵抗性、構造体コンクリート強度等を検証した。その結果を踏まえ、後添加型の中流動コンクリートを建築構造物へ実適用した事例についてまとめた。

本研究における後添加型の中流動・高流動コンクリートの概要を図4.1に示す。本コンクリートはJIS A 5308のレディーミクストコンクリートに適合する呼び強度27~42、スランプ18~21cmの普通コンクリートを現場で受け入れた後、粉末の流動化剤および増粘剤含有混和剤の入ったパックをトラックアジテータに投入し攪拌することで製造される流動化コンクリートである。このパックはコンクリート中のアルカリ分で解砕される紙で作られているため、パックのまま投入することができる。また、一般的に多く用いられる液体ではなく粉末の混和剤であるため、コンクリート中の水分の量を変化させないことが特徴である。流動化後のスランプフロー目標値は45~60cmであり、本章の実験ではスランプフロー45cm（管理値±7.5cm）の中流動コンクリートとして検討を行った。



図4.1 後添加型の中流動・高流動コンクリートの概要

4.2 模擬柱壁試験体を用いた施工性および躯体品質の検討

4.2.1 室内実験

コンクリートの使用材料を表 4.1 に示す。後添加剤を除く各材料は、本実験を行ったレディーミクストコンクリート工場（以下、工場）で通常使用しているものである。ベースコンクリートの調合を表 4.2 に示す。なお、表 4.2 には後述する実構造物への適用時に用いた調合 No.3 も併記している。室内実験で用いたベースコンクリートは JIS A 5308 に適合するスランプ 18cm、空気量 4.5%の呼び強度 27(調合 No.1)および呼び強度 30(調合 No.2)とし、流動化後の目標スランプフローは 45±7.5cm とした。

練混ぜには水平 2 軸形強制練りミキサを用いた。フレッシュ性状を確認したベースコンクリートをミキサ内に戻して流動化剤および増粘剤含有混和剤を添加し 60 秒間練り混ぜた。流動化前後のフレッシュコンクリートについてスランプ、スランプフロー、空気量、コンクリート温度を、硬化コンクリートについて圧縮強度を測定した。流動化剤および増粘剤含有混和剤増粘剤の 1 パック当たりの内容量は、それぞれ 235g および 500g である。実機では 1 パック単位での使用を考慮し、かつ前章の実験結果を踏まえ、流動化剤および増粘剤含有混和剤の添加量はそれぞれ 1 パック/m³ (235g/m³) および 2 パック/m³ (1000g/m³) を基本とし、流動化剤添加量とフロー増加量の関係を把握するために添加量を増やした調合についても試験を行った。

表 4.1 コンクリートの使用材料

材料名	記号	種類・物性等
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm ³
細骨材	S	混合砂（山砂 55%，砕砂①25%，砕砂②20%）， 表乾密度 2.62g/cm ³ ，FM 2.50
粗骨材	G1	硬質砂岩碎石，表乾密度 2.65g/cm ³ ，実積率 60.0%
	G2	安山岩碎石，表乾密度 2.62g/cm ³ ，実積率 60.0%
	G3	石灰石碎石，表乾密度 2.70g/cm ³ ，実積率 60.0%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤，ポリカルボン酸エーテル系化合物
後添加剤	AD	粉末流動化剤，ポリカルボン酸エーテル系化合物
	V	粉末増粘剤含有混和剤，セルロース系化合物および ポリカルボン酸エーテル系化合物の混合

表 4.2 ベースコンクリートの調合

調合 No.	呼び強度	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
				W	C	S	G1	G2	G3	SP
1	27	54.1	49.3	170	315	886	368	275	281	3.31
2	30	51.5	48.9	170	330	872	368	275	281	3.47
3	30	53.5	49.2	170	318	883	368	275	281	3.18

(共通事項) ベーススランプ 18cm，流動化後スランプフロー45cm，
空気量 4.5%，単位粗骨材絶対容積 348L/m³

フレッシュ性状および圧縮強度試験結果を表4.3に示す。いずれの調合も基本添加量でスランプフロー50cm程度が得られ、目視観察で材料分離無しと判断できる性状であった。流動化剤の添加量を基本の1.5倍まで増やした場合に、基本添加量におけるスランプフローからの増大量は比較的小さかった。また、流動化後の空気量は0.3~1.0%程度減少する傾向であり、流動化前後の圧縮強度は流動化剤の添加量によらず同等であった。以上の結果から、呼び強度27や30程度でベーススランプ18cmの細骨材率をそのまま用いる今回の中流動コンクリートでは、上述した基本添加量が適切だと判断した。次項の実大施工実験によって、基本添加量とした中流動コンクリートの充填性や材料分離抵抗性等を確認すると共に、強制練りミキサとトラックアジテータの攪拌効率の違いによるフレッシュ性状への影響を把握することとした。

表4.3 フレッシュ性状および圧縮強度試験結果

調合No.	分類	添加量 (g/m ³)		コンクリート温度 (°C)	空気量 (%)	スランプ [スランプフロー] (cm)	50cm フロー [フロー停止] 時間 (秒)	標準養生材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)
		AD	V					
1	ベース	-	-	23	5.0	20.0 [33.0]	- [-]	36.4
	流動化	235	1000	23	4.3	23.5 [50.0]	- [17.1]	37.0
	流動化	353	1000	23	4.0	23.5 [50.5]	- [18.4]	36.6
2	ベース	-	-	23	5.4	20.0 [30.5]	- [-]	39.7
	流動化	235	1000	23	5.1	24.0 [53.0]	7.8 [18.6]	40.3
	流動化	353	1000	23	4.5	24.0 [54.5]	6.7 [20.5]	39.5

4.2.2 実大施工実験

(a) 実験概要

実寸大の柱壁を模擬した試験体を用いて施工実験を行い、後添加型の中流動コンクリートのフレッシュ性状および部材強度や耐久性などの硬化後の物性を確認した。ベースコンクリートの使用材料は表 4.1 に示す材料と同様であり、調査は表 4.2 に示すもののうち、事前検討に調査 No.1 を、模擬柱壁試験体の打込みに調査 No.2 を用いた。それぞれ工場で製造したコンクリートをトラックアジテータによって実験場所へ運搬した。試験項目を表 4.4 に示す。フレッシュコンクリートの試験は、スランプ、スランプフロー、空気量、コンクリート温度について行い、施工実験時に流動勾配を測定した。硬化コンクリートについては、模擬柱壁試験体から採取したコア供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を用いて圧縮強度、静弾性係数、粗骨材面積率を測定した。なお、粗骨材面積率は採取コアの両端面を除く側面について、全体面積に対する粗骨材部分の面積の割合として算出した。また、フレッシュ試験時に作製した供試体を用いて圧縮強度試験を実施し、調査 No.2 については凍結融解試験および促進中性化試験を実施した。

表 4.4 試験項目

項目	試験方法
スランプ/スランプフロー	JIS A 1101/JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
コンクリート流動勾配	透明型枠部の打上がり高さをマーキング
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JIS A 1149
粗骨材面積率	採取コア表面における面積を測定
凍結融解試験	JIS A 1148 A 法
促進中性化試験	JIS A 1152, JIS A 1153

模擬柱壁試験体の型枠状況を写真 4.1 に、模擬柱壁試験体の概要を図 4.2 に示す。試験体は開口部を有する壁付き柱であり、断面 $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ 、高さ 3000mm の柱と、中央部に $1000 \times 1500\text{mm}$ の開口部を有する長さ 5000mm 、高さ 3000mm 、壁厚 200mm の壁が一体となった形状とした。柱の配筋は、主筋 8-D22、帯筋 D13-□-@100 とし、壁の配筋は D13-@150 ダブルとした。開口部周りの十分な補強として、隅角部に 2-D13 ダブルの斜め補強筋を、開口部左右に 5-D13 ダブルの鉛直補強筋を、開口部上下に 3-D13 ダブルの水平補強筋を配筋した。なお、図中の丸印は硬化コンクリートの試験に用いたコア採取位置を示している。また、コンクリートの流動状況を確認するため、壁型枠の一部にアクリル板による透明型枠を用いた。



写真 4.1 模擬柱壁試験体の型枠状況

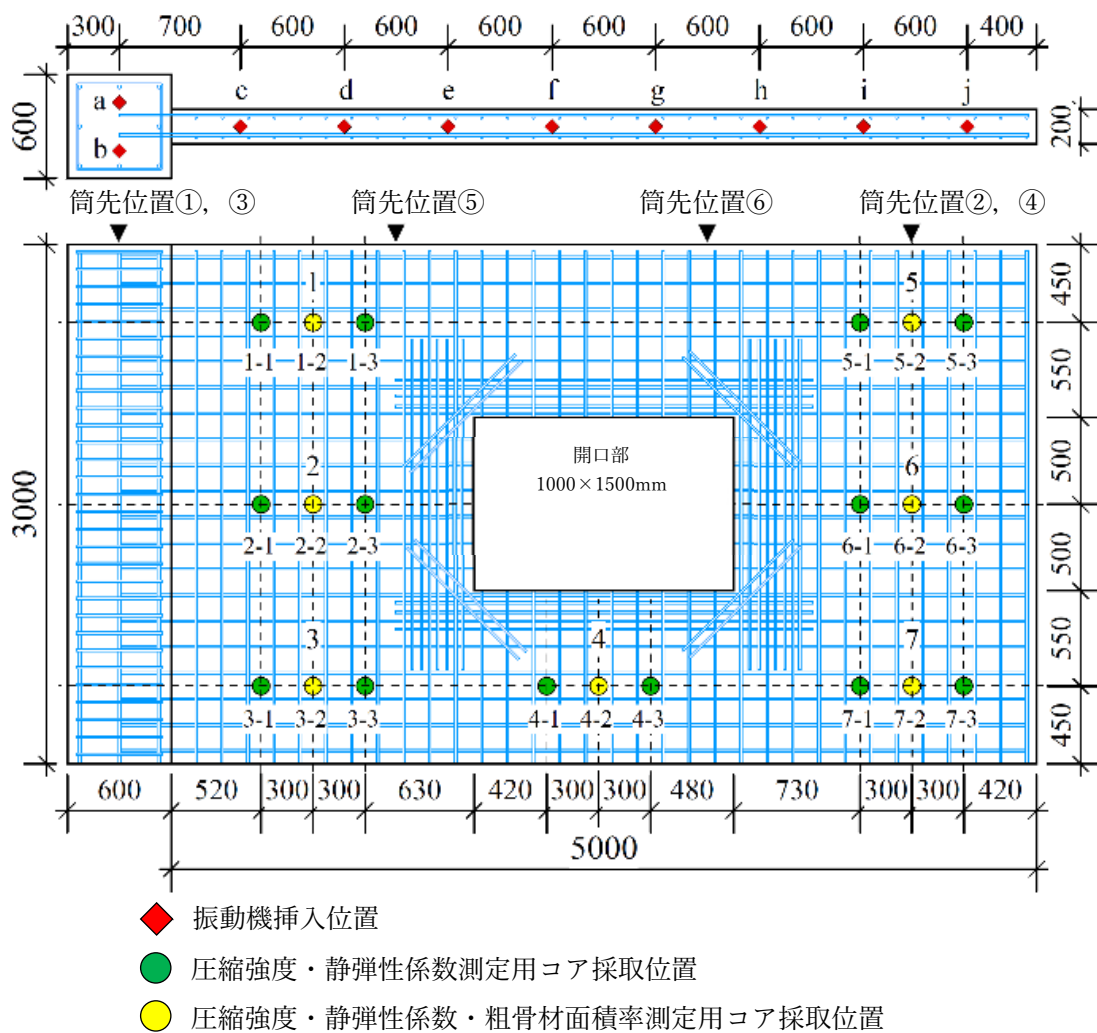


図 4.2 模擬柱壁試験体の概要

(b) 事前検討の実施内容および結果

トラックアジテータでの後添加型中流動コンクリートの製造および施工実験の事前検討として、模擬柱壁試験体の施工実験を行う2週間前に、模擬柱壁試験体の転倒防止のための基礎の打込みを行った。打込みおよびフレッシュ性状の経時変化測定には、呼び強度27（調合No.1）のベースコンクリートに流動化剤および増粘剤含有混和剤を後添加し、2分間の高速攪拌を行って製造した中流動コンクリートを用いた。なお、経時変化測定は、トラックアジテータ内での低速攪拌環境下と、手押し車に試料を入れてシートを被せた静置状態の2種類について行った。

フレッシュ性状試験結果を表4.5に、フレッシュコンクリートの経時変化試験結果を図4.3に示す。表4.5および図4.3には後述する模擬柱壁試験体の施工実験の際に行った試験結果を併記している。事前検討では前項の室内実験と同程度のベーススランプおよび流動化剤添加量であったが、流動化後のスランプフロー増大量は室内実験時より小さくなった（表中の調合No.1）。これは後添加後の攪拌効率の違いによるものと考えられる。そのため、実大施工実験時（表中の調合No.2）では流動化剤の添加量を増加させた。また、流動化直後の空気量は室内実験とは異なり増加する傾向にあった。これはトラックアジテータによる高速攪拌の際、フレッシュコンクリート中に空気が巻き込まれたためと考えられ、積載量が少ない場合にその傾向がより大きくなった。

各トラックアジテータとも流動化後のスランプフローおよび空気量は管理値の許容範囲内であり、目視観察で材料分離無しと判断した。スランプフローおよび空気量の経時による減少傾向は、静置状態よりも低速攪拌環境下の方が緩やかであった。また、呼び強度や流動化直後のスランプフローに相違はあるものの、後添加時期が遅くなった場合でも流動化後のスランプロスの傾きが大きくなる傾向は見られなかったため、実工事の際は可能な限り打込み開始に近い時期に後添加を行うことで、打込み時のスランプロスの影響を最小限にできると考えられる。

表 4.5 フレッシュ性状試験結果

項目	調査 No.	コンクリート積載量 (m ³)	分類	添加量 (g/m ³)		コンクリート温度 (°C)	空気量 (%)	スランプ ^o [スランプ フロー] (cm)	フロー停止時間 (秒)
				AD	V				
事前検討	1	1.50	ベース	-	-	31	3.2	19.5 [32.0]	-
			流動化	235	1000	31	5.0	22.5 [42.0]	3.2
	1	3.00	ベース	-	-	29	4.3	19.5 [30.5]	-
			流動化	235	1000	30	5.0	22.0 [41.0]	6.3
実大施工実験	2	4.25	ベース	-	-	31	5.7	20.5 [35.5]	-
			流動化	290	1000	31	5.8	24.5 [51.0]	10.9

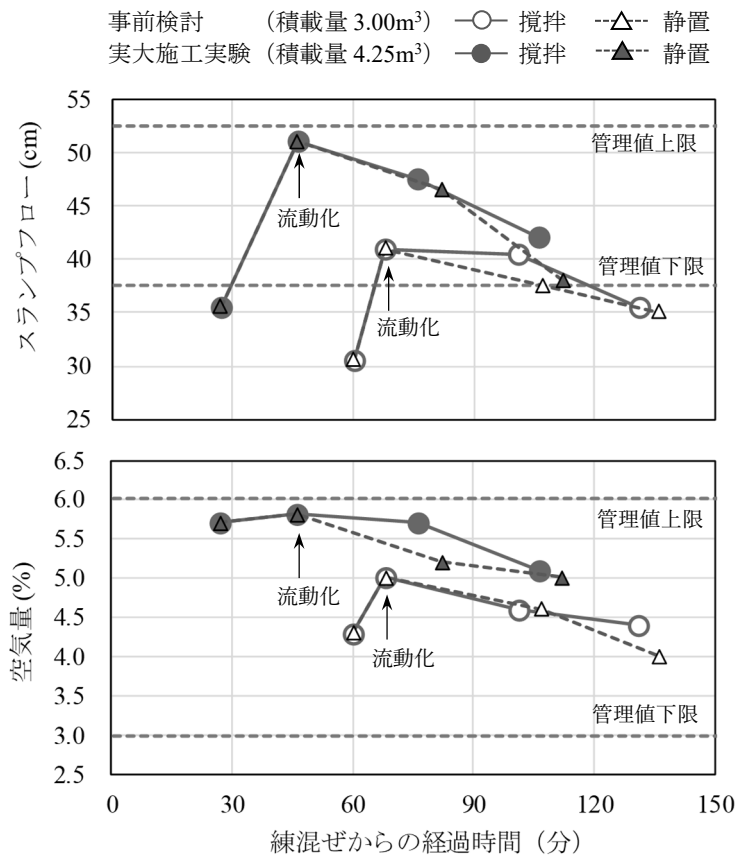


図 4.3 フレッシュコンクリートの経時変化試験結果

(c) 模擬柱壁試験体の施工実験方法

実大試験体の施工実験には、呼び強度 30（調合 No.2）のベースコンクリートに流動化剤および増粘剤を後添加し、2分間の高速攪拌を行って製造した中流動コンクリートを用いた。なお、打込み前のフレッシュ試験時に、圧縮強度試験および凍結融解試験、促進中性化試験に用いる供試体を採取した。はじめに、図 4.2 に示す筒先位置①からポンプ車の筒先を降ろしてコンクリートを約 0.7m³ 打ち込み、透明型枠部分のコンクリートの打上がり高さをマーキングして流動勾配を測定した。その後、振動機挿入位置 a, b, c, d, e, h の 6 箇所について、a から順に 1 箇所ずつ棒形振動機を挿入して締固めを行い、6 箇所の締固めを終えた後に透明型枠部分のコンクリートの打上がり高さをマーキングして流動勾配を測定した。なお、1 箇所の加振時間は、JASS 5⁴⁾において一般的な加振時間とされる 5～15 秒の下限値である 5 秒とした。流動勾配の測定後は、引き続き筒先位置①からコンクリートを打ち込みつつ、振動機挿入位置 a～j で 1 回 5 秒間の締固めを適宜行った。柱のおよそ 2/3 の高さまでコンクリートが打ち上がった後に筒先を筒先位置②に移動し、コンクリートを打ち込みながら同様の締固めを行い、開口上部に達する高さまでコンクリートを打ち上げた。その後、筒先位置③、④、⑤、⑥の順で同様の打込みおよび締固めを行い、試験体の天端までコンクリートを打ち上げて終了した。なお、打込み中は型枠側面を木槌で適宜叩く締固めも行った。また、上記の施工と並行して、トラックアジテータ内での低速攪拌環境下および静置状態におけるフレッシュ性状の経時変化を測定した（図 4.3 に記載）。

コンクリートの硬化後、材齢 27 日で図 4.2 に示す所定の位置から $\phi 100 \times 200\text{mm}$ のコア供試体を 3 本 \times 7 セットの合計 21 本採取し、各セットのうち 1 本について粗骨材面積率を測定した。材齢 28 日にコア供試体 21 本全てについて圧縮強度および静弾性係数を測定した。

(d) 施工実験結果

流動勾配の測定結果を図 4.4 に、脱型後の試験体状況を写真 4.2 に示す。透明型枠間の通常の型枠部の流動勾配については、透明型枠部のマーキング端を直線でつなぎ、流動勾配の両端部は透明型枠部のマーキングから算出した勾配を用いて外挿した。締固め前後の流動勾配はそれぞれ 23.8% および 21.7% であった。1 箇所 5 秒間の軽微な締固めを行った結果、コンクリートの流動勾配を大きく変えることは無かったものの、脱型後の試験体には開口部周りを含めて充填不良は無く、開口部下面に目立つ空気泡跡は無かったこと等から、中流動コンクリートの良好な充填性が確認された。

コア供試体による圧縮強度、静弾性係数、粗骨材面積率の測定結果を表 4.6 に、各試験値と高さおよび水平距離の関係を図 4.5 示す。なお、圧縮強度および静弾性係数は 3 本の供試体の平均値を示し、粗骨材面積率は 1 本の供試体の測定値を示している。試験体底面からの高さ 450mm における試験結果を見ると、圧縮強度、静弾性係数、粗骨材面積率ともに水平距離の長短に伴う明確な増減傾向は無く、打込みおよび締固めに伴うコンクリートの水平流動による材料分離や骨材の偏りは無かったものと考えられる。

圧縮強度は水平距離 4580mm の位置において上部が若干高くなる傾向が見られ、その差は下部と比べて 8% 程度であった。静弾性係数は上部で若干小さくなる傾向が見られ、その差は下部と比べて 4.5～8.4% 程度であった。いずれも顕著な差は生じていなかった。粗骨材面積率は各箇所 1 本ずつの結果であるため、3 本平均の場合と比べてばらつきのある結果であると考えられるが、上部で粗骨材面積率が低くなる傾向が見られた。このことから、構造体の上部では粗骨材の沈降によりコンクリート中のモルタルの割合が増加し、圧縮強度の増大および静弾性係数の低下がわずかに生じたと考えられる。普通コンクリートの場合には過度な締固め等により材料分離や粗骨材の沈降が生じると、ブリー

ディング水の上昇により圧縮強度が低下する傾向となる⁴⁻⁶⁾が、中流動コンクリートでは普通コンクリートと比べて粘性が高いことにより、ブリーディング水の上昇量も小さくなるため、粗骨材の沈降が生じても圧縮強度は低下しなかったものと考えられる。

また、高さ方向の粗骨材面積率は29～35%程度の幅を持つ分布となった。本田ら⁴⁻²⁾が行った高さ2900mmの柱・壁部材への施工実験では、高さ方向の粗骨材面積率は33～36%程度の幅を持つ分布となっており、高見ら⁴⁻³⁾が行った高さ3000mmの柱・梁・壁部材への施工実験では、高さ方向の粗骨材面積率は、壁では33～38%程度、柱では30～35%程度や、32～39%程度または34～43%程度の幅を持つ分布となっている。本実験においてもこれらの既往研究と同程度の幅を持つ粗骨材面積率の分布であった。

粗骨材面積率が上部で低下していることから、1箇所5秒間の締固めでも必要以上の締固めとなった可能性があり、本実験で使用した荷卸しのスランプフロー51cmのコンクリートの場合、締固めエネルギーをさらに低減する必要がある可能性が示唆された。

材料分離の評価に関しては、現状で客観的に数値化する手法が開発されていない。そのため日本建築学会「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説」⁴⁻⁴⁾では、フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性は、スランプフロー試験後のコンクリートの状態を目視で評価し、広がったコンクリートの中央部に粗骨材が偏在しておらず、周辺部にペーストや分離した水が偏在していないことを確認することとしている。本実験で使用した流動化コンクリートについても上記手法により材料分離抵抗性を有することを確認したコンクリートであるが、前述した粗骨材面積率の測定結果のように、打込み方法や締固めの程度によっては粗骨材の沈降が生じ得ることが分かった。

中流動コンクリートの粗骨材の沈降に関する研究事例として、梁ら⁴⁻⁵⁾は、水セメント比50%、単位セメント量340kg/m³、スランプフロー42±5cmのコンクリートについて、断面寸法500×500mm、高さ800mmの試験体への打込みおよび内部振動機による締固めを行い、硬化後に採取したコアを用いて粗骨材の沈降程度を検討している。採取した長さ800mmのコアを高さ方向に4等分し、各コア側面の単位面積当たりの粗骨材面積を求め、これと長さ800mmコア全体の単位面積当たりの粗骨材面積との比を粗骨材残存面積率として評価した。その結果、締固めを15秒間行った場合に、上面から200mmの範囲では粗骨材残存面積率が68%となり、800mmのコア全体の粗骨材面積率100%に対して32%低くなっている。

このように、目視により材料分離抵抗性を有すると評価される中流動コンクリートにおいても、一般的な5～15秒程度の締固めを行うことで、打込み箇所上部で粗骨材の沈降がある程度生じるものと考えられ、締固めの程度に留意が必要となる。粗骨材の沈降程度が構造体の性能に及ぼす影響について現状では明確な指標は無いが、今後定量的な知見が得られれば、コンクリートに要求される材料分離抵抗性を定量的に管理する手法についても研究が進むものと考えられる。

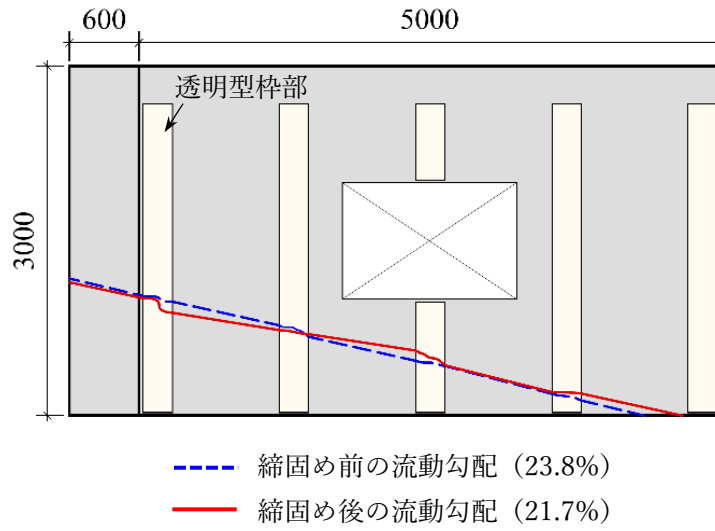


図 4.4 コンクリートの流動勾配測定結果



(a) 全体状況



(b) 開口部下面状況

写真 4.2 脱型後の試験体状況

表 4.6 圧縮強度，静弾性係数，粗骨材面積率測定結果

		平均圧縮強度 (N/mm ²)			平均静弾性係数 (kN/mm ²)			粗骨材面積率 (%)		
試験体 底面 からの 高さ (mm)	2550	35.9 [3.9]	-	37.8 [5.2]	27.1 [4.6]	-	27.5 [7.5]	29.2	-	28.6
	1500	34.7 [7.2]	-	37.0 [3.7]	28.4 [1.6]	-	28.6 [4.2]	30.6	-	35.0
	450	35.3 [3.7]	34.6 [5.9]	35.0 [2.8]	29.6 [2.4]	28.5 [4.1]	28.8 [3.4]	35.2	32.0	33.6
[] 内は 変動係数(%)		1120	2770	4580	1120	2770	4580	1120	2770	4580
		柱中心からの水平距離 (mm)								

※標準養生供試体の材齢 28 日圧縮強度：ベース 37.9N/mm²，流動化後 37.8N/mm²

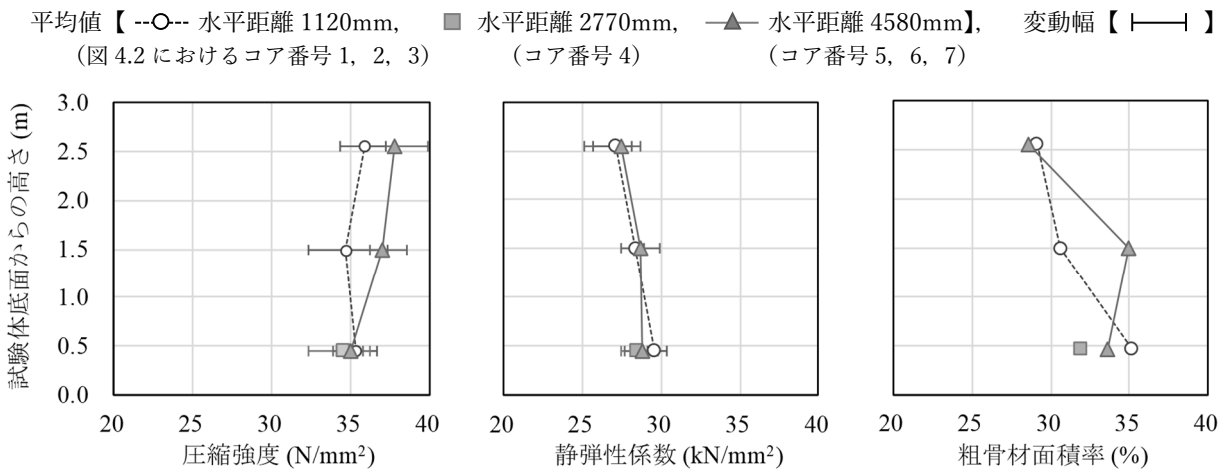


図 4.5 各試験値と高さおよび水平距離の関係

凍結融解試験結果を表 4.7 および図 4.6 に示す。ベースコンクリートおよび流動化後のコンクリートにおいて、相対動弾性係数の変化および耐久性指数は同等であった。質量減少率は流動化後のコンクリートの方が若干大きい傾向であったが、300 サイクル後には 0.1%の差であり同等と言える結果であった。

促進中性化試験結果を表 4.8 および図 4.7 に示す。促進期間 26 週での中性化深さは、流動化後のコンクリートがベースコンクリートと比べて僅かに大きくなったが、その差は 1.7%と小さいものであり、両者は同等と言える結果であった。

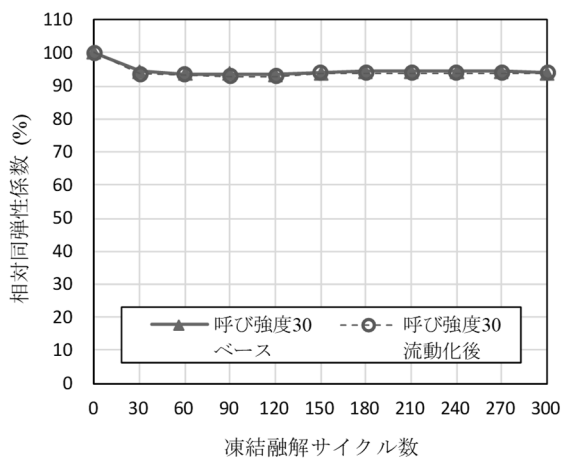
表 4.7 凍結融解試験結果

(a) 相対動弾性係数

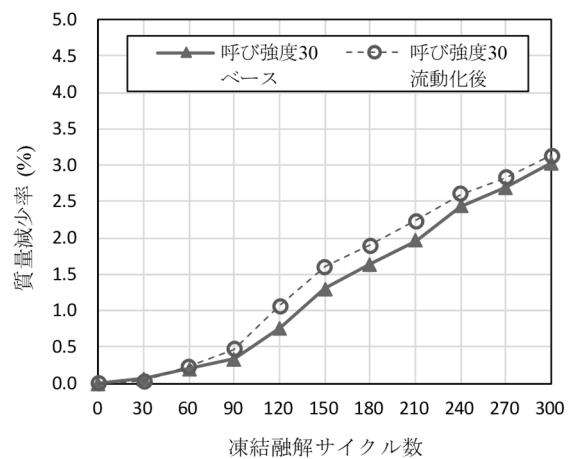
種別	No.	試験開始時 動弾性係数 (kN/mm ²)	凍結融解サイクル - 相対動弾性係数 (%)											耐久性 指数 (DF)
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	
呼び強度 30 ベース	1	37.4	100	94	93	93	93	94	94	94	94	94	93	93
	2	38.8	100	95	94	94	94	94	95	95	95	95	95	95
	3	39.2	100	94	94	94	93	94	94	94	94	94	94	94
	平均	38.5	100	94	94	94	93	94	94	94	94	94	94	94
呼び強度 30 流動化後	1	38.0	100	94	94	93	93	94	94	94	94	94	94	94
	2	36.7	100	94	93	93	93	94	94	94	94	94	94	94
	3	37.6	100	93	93	93	93	94	94	94	94	94	94	94
	平均	37.4	100	94	93	93	93	94	94	94	94	94	94	94

(b) 質量減少率

種別	No.	試験開始時 質量 (g)	凍結融解サイクル - 質量減少率 (%)											単位容積 質量 (kg/m ³)
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	
呼び強度 30 ベース	1	9370	0.0	0.0	0.2	0.4	0.9	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.3	2319
	2	9400	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.3	1.6	2.1	2.3	2.6	2356
	3	9449	0.0	0.1	0.2	0.3	0.8	1.4	1.7	2.1	2.6	2.9	3.2	2368
	平均		0.0	0.1	0.2	0.3	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	2.7	3.0	
呼び強度 30 流動化後	1	9344	0.0	0.1	0.3	0.5	1.1	1.6	1.9	2.2	2.5	2.8	3.1	2330
	2	9405	0.0	0.0	0.2	0.5	1.1	1.6	1.9	2.3	2.7	2.9	3.2	2305
	3	9493	0.0	0.0	0.2	0.4	1.0	1.6	1.9	2.2	2.6	2.8	3.1	2326
	平均		0.0	0.0	0.2	0.5	1.1	1.6	1.9	2.2	2.6	2.8	3.1	



(a) 相対動弾性係数



(b) 質量減少率

図 4.6 凍結融解試験結果

表 4.8 促進中性化試験結果

種 別	供試体No.		促進期間(週) - 中性化深さ(mm)					
			0	1	4	8	13	26
呼び強度30 ベース	1	平均値	0	4.5	8.0	10.4	13.2	17.6
	2	平均値	0	4.1	8.2	9.8	13.2	17.0
	3	平均値	0	5.1	7.8	10.9	12.7	17.8
	3個の供試体平均値		0	4.6	8.0	10.4	13.0	17.5
呼び強度30 流動化後	1	平均値	0	5.5	9.0	12.2	13.6	18.8
	2	平均値	0	5.8	8.4	11.2	13.4	17.1
	3	平均値	0	4.8	8.2	11.3	13.8	17.4
	3個の供試体平均値		0	5.4	8.5	11.6	13.6	17.8

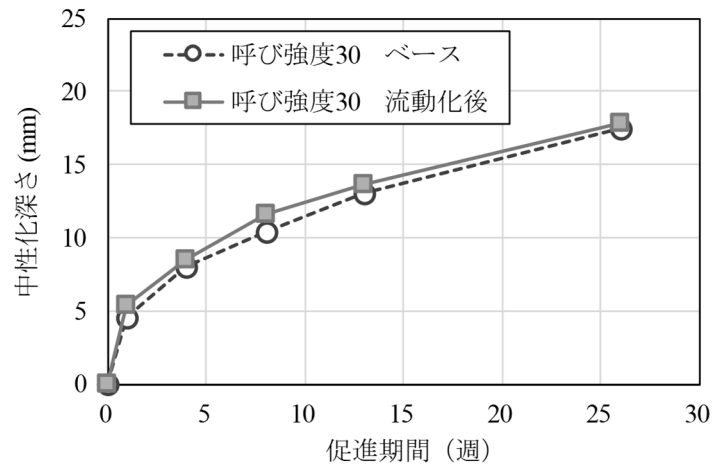


図 4.7 促進中性化試験結果

4.3 建築物への実適用

4.3.1 増改築工事への適用

(a) 建築概要

後添加型の中流動コンクリートを実適用した建物概要を下記に示す。

敷地面積 34,821.92m²

建築面積 1,817.77m²

延床面積 5,189.82m² (改築前 4,387.49m²)

階数 地下2階 地上3階 (改築前 地下1階(中2階あり)/地上2階)

構造 鉄筋コンクリート造 一部鉄骨造

昭和54年竣工の研究所施設に対して、LCCO₂削減効果が高い既存躯体の活用を選択した増改築工事である。増改築工事において、壁の増打ち等では配筋量の多さや狭小部の存在等によりコンクリートの打込みが困難な事例も多い。それらの部位に対して密実なコンクリート躯体を構築するために後添加型の中流動コンクリートを採用した。当該コンクリートを新設壁、増打ち壁、増打ち柱等に総量約300m³使用した。適用部位の一例を表4.9に示す。

表 4.9 実適用部材例

種類	高さ(mm)	断面(mm)	配筋要領
新設壁	3000	5200×180	D10+D13-@200 ダブル
	6200	7500×250	D13-@200 ダブル
増打ち壁	6200	5200×300	D16-@150 ダブル
増打ち柱	6200	500×300	主筋 6-D22 帯筋 D-10-□-@100

(b) コンクリートのフレッシュ性状および適用状況

ベースコンクリートは表4.1に示した材料を用い、表4.2に示した調合No.3である。なお、実大施工実験は夏期に実施したため夏期調合のNo.2を用いたが、実適用は標準期に実施したため、標準期調合のNo.3を用いている。工場で製造したベースコンクリートを現場で受け入れてフレッシュ性状試験を行った後、流動化剤および増粘剤含有混和剤をトラックアジテータに投入し、2分間の高速攪拌直後に流動化コンクリートの試料を採取してフレッシュ性状試験を行った。流動化剤および増粘剤の添加量は、前章までの検討を踏まえてフレッシュコンクリート1m³あたりそれぞれ235g(1パック)および1000g(2パック)を基本とし、小数点以下の袋数については切り捨てとした。ただし、ベースコンクリートのフレッシュ性状や外気温等に応じて、流動化剤の添加量のみを4m³あたり1~2袋増減させた。また、流動化後の流動性が不足していると判断された場合は、流動化剤を1~2袋再添加してスランプフローの調整を行った。なお、後述する他の適用案件についても共通して、流動化後のコンクリートには粉末の流動化剤および増粘剤含有混和剤やパックの溶け残りは無く、これらの溶解状況が確認された。

実適用時のフレッシュ性状試験結果を表4.10に、フレッシュコンクリートの積載量4m³および4.25m³における流動化直後の空気量とコンクリート温度の関係を図4.8に示す。打込み日ごと、打込み工区ごと、かつ150m³またはその端数ごとに1回行う品質管理を目的とした試験のほか、データ採取を目的とした試験も合わせ、打込み日数9日間、トラックアジテータ36車の流動化前後について

実施した試験結果を示している。ベースコンクリートのスランプは管理値 $18 \pm 2.5\text{cm}$ に対して平均 19.0cm 、変動係数 6.5% であり、流動化後のスランプフローは管理値 $45 \pm 7.5\text{cm}$ に対して平均 43.3cm 、変動係数 9.3% であった。空気量は流動化後に概ね増加する傾向となった。実大施工実験時と同様に後添加後の高速攪拌に伴う巻き込み空気によるものと考えられる。実大施工実験時に、フレッシュコンクリートの積載量が少ないと空気量の増大量が大きくなる傾向を確認したが、同程度の積載量の場合はコンクリート温度が低いと空気量の増大量が若干大きくなる傾向が見られた。温度による中流動コンクリートのフレッシュ性状への影響については、今回の実適用時の温度範囲よりもさらに低・高温の場合も含め、今後もデータを蓄積し引き続き検討を進めていく。

表 4.10 実適用時のフレッシュ性状試験結果

分類	空気量			スランプ			スランプフロー		
	平均値 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	平均値 (cm)	標準偏差 (cm)	変動係数 (%)	平均値 (cm)	標準偏差 (cm)	変動係数 (%)
ベース	4.5	0.51	11.4	19.0	1.23	6.5	31.4	2.80	8.9
流動化	5.2	0.63	12.1	22.6	0.87	3.9	43.3	4.03	9.3

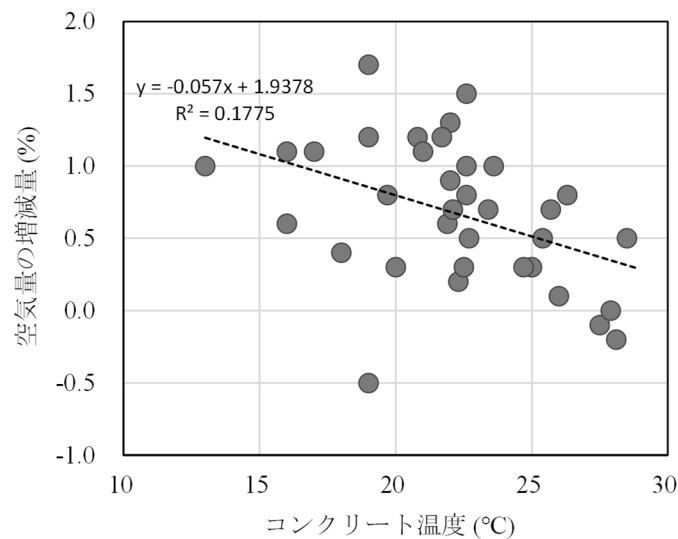


図 4.8 流動化直後の空気量とコンクリート温度の関係

中流動コンクリートの打込み時および脱型後の状況を写真 4.3 に示す。打込み箇所の鉄筋が干渉して筒先を挿入できない場合には、 $\phi 100\text{mm}$ 以下の細径のシュートを挿入し、それに伝わせるかたちでコンクリートの打込みを行った。また、打込みと並行して棒形振動機による締固めおよび木槌を用いた型枠側面の叩きによる締固めを行った。結果として、高さ 6200mm の柱や壁、開口部を有する壁等について、脱型後の部材表面に充填不良は見受けられず、中流動コンクリートの良好な充填性が確認された。部位によっては、既存の梁や床が干渉して最小限の打設口しか設けられない場合も生じたが、中流動コンクリートの高い流動性と適度な粘性により、細径シュート内部や鉄筋間を滞りなく通過し、密実な躯体の構築に至ったものと考えられる。以上のようにコンクリートの打設・充填が困難な箇所において中流動コンクリートの有効性を確認した。



打込み状況



脱型後（増打ち壁，増打ち柱，開口部を有する壁）

写真 4.3 打込み時および脱型後の状況

4.3.2 新築工事への適用

(a) 建築概要

美術館施設の新築工事に後添加型の中流動コンクリートを適用した。建物は地上6階、地下1階、地上階の平面計画は約38m×約13m、階高は1階4.2m、2階6.6m、3～6階5.5m、敷地面積は941.5m²、建築面積は576.37m²である。シームレスな外観意匠を実現するために、3～R階の北面・東面・南面、および西面の一部には鋼板仕上げ外壁が採用された。

本建物は、曲面のある鋼板で躯体が包まれた特徴的な外観であり、施工段階では鋼板型枠の内部にどのようにコンクリートを充填するかが課題となった。構造設計段階で壁躯体内に鋼板を支持する仮設鉄骨が計画され、施工計画をもとに、コンクリートの側圧や斜壁部分の鋼板自重による鋼板変形の検討を行い、鋼板取付けファスナーの計画を行った。一方で、鋼板型枠と対面となる外壁内側は在来型枠にて計画し、鋼板型枠内側に設置したセバスタッドにセパレータを緊結させて内側型枠を保持する工法とした。鋼板仕上げ外壁は鋼板型枠の内面まで構造体であるため、鋼板型枠の補強リブ部分および仮設鉄骨の部分にも、コンクリートを密実に充填することが求められた。これらの部位へのコンクリートの打込み、締固めにおける主な課題として、曲面部や斜壁部、鉄骨梁下部では上部から棒形振動機の挿入ができず、十分な締固めができないこと、および厚さ12mmの鋼板型枠側からの締固めができないことが挙げられた。

上述した課題から、鋼板仕上げ外壁の部分では充填性の良いコンクリートの採用が必要であった。鋼板仕上げ外壁に用いるコンクリートの設計基準強度は、24～36N/mm²であり、これらの普通コンクリートを高流動コンクリートに調合変更するには、材料分離抵抗性を確保するためにセメント量を多くすることとなり、構造的に不必要な調合管理強度となる42N/mm²まで高強度化する必要があった。充填性と経済性を両立する適切なコンクリートの調合について協議を重ねた結果、後添加型の中流動コンクリートを採用することとした。本工事においては、スランプ21±2cmの普通コンクリートを、スランプフロー50cm±7.5に流動化して使用した。

(b) 後添加型中流動コンクリートの施工

レディーミクストコンクリート工場毎の各調合について、予め試し練りを行って粉末パックの投入量を検討した。ここでは、ある1工場における試し練りおよび本施工時のフレッシュ性状試験結果を報告する。コンクリートの使用材料および調合を表4.10に、フレッシュ性状試験結果の一例を表4.11に、スランプフロー試験状況例を写真4.4に示す。試し練りの結果、粉末パック投入後の攪拌方法が小型ミキサよりもトラックアジテータによる場合の方が、流動化後のスランプフローの増大量がやや小さい傾向となった。これは、攪拌効率の違いが影響したものと考えられる。また、実際の建設現場における本コンクリートの製造においては、気温条件や運搬時間が、流動化剤や増粘剤含有混和剤の効き方に影響を及ぼすため、試し練りで検討した粉末パックの投入量を基準に若干の調整を行った。その結果、本施工時においても目標範囲内のスランプフローを得られた。

本施工では、コンクリートの自由落下高さ軽減のため、屋内側の一般型枠の高さ2.5mの位置に設けた開口から打込みを行った。また、初回の打込みの際には、一部にアクリル板を使用した型枠を用い、型枠内の充填状況を確認しながら打込みを行った。

本コンクリートの適用により、鋼板型枠内部の鉄筋と仮設鉄骨が取合う部位における打込み手間が低減され、施工性の向上に寄与したと考えている。また、上記部位やファスナー部においても豆板やコールドジョイントは見られず、良好な出来形であった。出来形の一例を写真4.5に示す。

表 4.10 コンクリートの使用材料および調合

呼び強度	スランプ [°] (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	単用量 (kg/m ³)*2					
				水	C	S1	S2	G1	G2
30	21	4.5	53.0	175	331	354	531	365	548

C：普通ポルトランドセメント，密度 3.16 g/cm³

S1：陸砂（千葉県産），表乾密度 2.58 g/cm³

S2：砕砂（栃木県産），表乾密度 2.65 g/cm³

G1：碎石（栃木県産），表乾密度 2.70 g/cm³

G2：碎石（埼玉県産），表乾密度 2.70 g/cm³

混和剤：高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系化合物）を使用

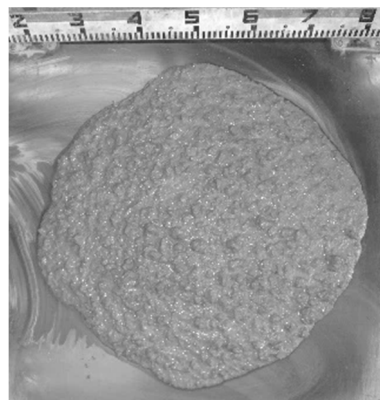
表 4.11 試し練りおよび実施工時のフレッシュ性状試験結果

試験種類	攪拌方法	練混ぜ量 (m ³)	粉末パック投入量 (パック/m ³)		スランプ [°] (cm)	スランプ [°] フロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
			流動化剤	増粘剤含有 混和剤				
試し練り	小型 ミキ	0.03	流動化前		22.0	40.5	5.0	21
			1.5	2	-	57.0	3.8	20
	トラック アジテータ	3.0	流動化前		23.0	42.5	5.8	21
			1.5	2	-	52.0	4.5	22
本施工時	トラック アジテータ	4.25	流動化前		21.0	34.5	3.4	13
			2	2	-	49.0	4.7	13
	トラック アジテータ	4.25	流動化前		20.5	32.0	4.4	14
			2	2	-	56.0	4.8	14



ベースコンクリート

(スランプ 22.0cm, スランプフロー 40.5cm)



流動化後

(スランプフロー 57.0cm)

写真 4.4 スランプフロー試験状況の一例



写真 4.5 出来形の一例

4.3.3 免震改修工事への適用

(a) 建築概要

既存建物の免震改修工事において、後添加型の中流動コンクリートを適用した。本建物は、地上12階、地下2階の鉄骨鉄筋コンクリート造のオフィスビルである。免震改修に伴って増打ちする補強梁やキャピタル、新設する仮設壁などの充填性確保のために、当該コンクリートを使用することとした。

ベースコンクリートは呼び強度40または42、スランプ18cmの普通コンクリートである。レディーミクストコンクリート工場毎の各調合について予め試し練りを行い、流動化後の目標スランプフローが 55 ± 10 cmとなる流動化剤および増粘剤含有混和剤の粉末パックの添加量を検討した。レディーミクストコンクリート工場での製造から建設現場までの運搬時間を考慮し、試し練りではミキサによる練混ぜから30分経過後にベースコンクリートのフレッシュ性状試験を行った。その直後にベースコンクリートに流動化剤および増粘剤含有混和剤を添加してミキサによる練混ぜを行い、流動化コンクリートのフレッシュ性状試験を行った。増粘剤含有混和剤の添加量は、これまでの室内実験や実適用時のデータから傾向を検討し、 1.0 パック/ m^3 とした。また、流動化後のスランプフローが目標の55cm程度よりも小さい場合に、流動化剤のみを再添加してスランプフロー増大量への影響を確認した。

各工場のコンクリートの使用材料および調合を表4.12に、フレッシュ性状試験結果を表4.13に、流動化剤の添加量と流動化後のスランプフローの関係を図4.9に示す。いずれの工場の調合についても、目標のスランプフロー 55 ± 10 cmとなった流動化後のコンクリートに材料分離の傾向および過度な粘性によるこわばり等は見られず、増粘剤含有混和剤の添加量が適切であることを確認した。図4.10に示すように、各工場でスランプフロー55cmを得るための流動化剤の添加量は若干異なり、A工場では 3.0 パック/ m^3 、B工場およびD工場では 2.5 パック/ m^3 、C工場では 2.0 パック/ m^3 が適切な添加量と判断された。スランプフロー55cmを得るための流動化剤の添加量は若干異なるものの、流動化剤の添加量によるスランプフロー増減の傾きは同程度であった。また、空気量は流動化後に減少する傾向となった。

表 4.12 コンクリートの使用材料および調合

工場	使用材料	呼び強度	ベーススランブ (cm)	流動化後のスランブフロー (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
							水	C	S1	S2	G1	G2
A	C: 普通ポルトランドセメント S1: 山砂 (千葉県君津産) S2: 石灰石砕砂 (栃木県佐野産) G1: 石灰石砕石 (栃木県佐野産) G2: 石灰石砕石 (埼玉県秩父郡産) SP: 高性能AE減水剤	40	18	55	42.5	46.7	170	400	323	484	379	569
	C: 普通ポルトランドセメント S1: 山砂 (千葉県市原産) S2: 石灰石砕砂 (高知県島形山産) G1: 石灰石砕石 (北海道峯朗産) SP: 高性能AE減水剤	40	18	55	43.0	44.5	170	396	382	382	989	-
	C: 普通ポルトランドセメント S1: 山砂 (千葉県君津産) G1: 石灰石砕石 (北海道峯朗産) G2: 石灰石砕石 (大分県津久見産) SP: 高性能AE減水剤	40	18	55	41.5	42.3	168	405	725	-	513	513
	C: 普通ポルトランドセメント S1: 石灰石砕砂 (栃木県佐野産) S2: 山砂 (千葉県市原産) G1: 石灰石砕石 (栃木県佐野産) SP: 高性能AE減水剤	40	18	55	41.1	44.3	170	414	304	456	983	-

表 4.13 試し練りのフレッシュ性状試験結果

工場	バッチ	項目	練混ぜ量 (L)	添加量(バツク/m ³)				試験結果								
				流動化剤		増粘剤		スラップ (cm)	スランブフロー (cm)		50cm フロー時間 (秒)	フロー停止 時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	塩化物 量 (kg/m ³)	
				合計		合計			平均							
A	1	ベース(30分後)	40	-	-	-	-	19.0	33.5 × 33.0	33.5	-	-	4.8	24	-	
		流動化後	30	2.0	2.0	1.0	1.0	-	39.0 × 38.0	38.5	-	5.8	3.9	24	0.04	
	2	ベース(30分後)	40	-	-	-	-	19.5	35.0 × 34.0	34.5	-	-	4.7	24	-	
		流動化後	40	3.0	3.0	1.0	1.0	-	60.0 × 59.0	59.5	4.2	21.2	3.7	24	0.04	
B	1	ベース(30分後)	40	-	-	-	-	20.0	36.0 × 35.0	35.5	-	-	5.2	25	-	
		流動化後	30	2.0	2.0	1.0	1.0	-	48.6 × 47.8	48.0	-	7.5	3.0	24	0.07	
	2	ベース(30分後)	40	-	-	-	-	19.5	36.0 × 35.0	35.5	-	-	5.4	24	-	
		流動化後	40	2.5	2.5	1.0	1.0	-	57.3 × 55.9	56.5	3.1	14.3	3.1	24	-	
C	1	ベース(30分後)	40	-	-	-	-	19.0	34.0 × 33.0	33.5	-	-	4.6	24	-	
		流動化後	30	2.0	2.0	1.0	1.0	-	58.0 × 57.0	57.5	5.0	15.1	4.4	24	0.02	
	2	ベース(30分後)	40	-	-	-	-	17.5	28.5 × 28.0	28.5	-	-	4.5	24	-	
		流動化後	40	1.5	1.5	1.0	1.0	-	47.0 × 46.0	46.5	-	11.1	3.9	24	-	
D	1	ベース(30分後)	40	-	-	-	-	20.5	34.0 × 33.0	33.5	-	-	4.5	21	-	
		流動化後	30	2.0	2.0	1.0	1.0	-	49.3 × 48.1	48.5	-	-	4.0	20	0.08	
		再添加後	30	0.5	2.5	-	1.0	-	57.5 × 57.3	57.5	-	-	3.7	20	-	

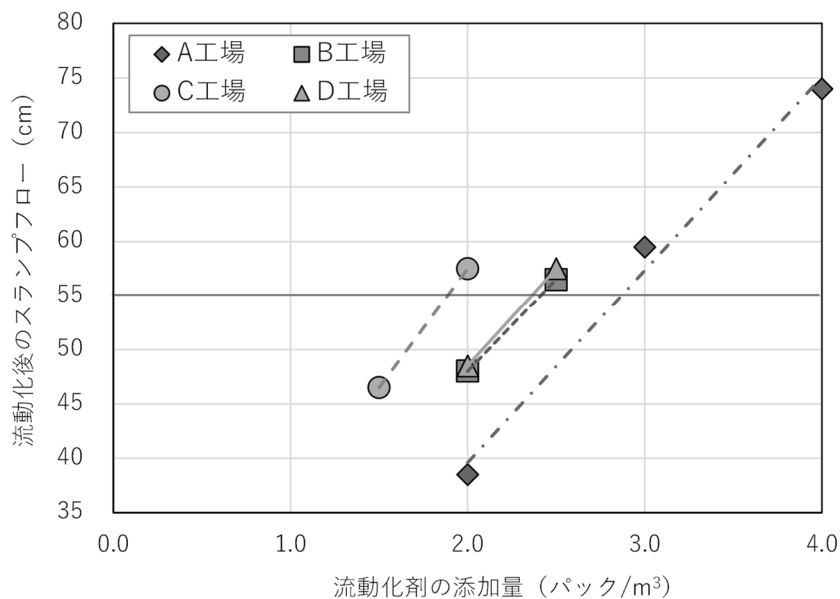


図 4.9 流動化剤の添加量と流動化後のスランプフローの関係

実施工時のフレッシュ性状試験結果の一例を表 4.14 に示す。試し練りによって得られた流動化剤および増粘剤含有混和剤の適切な添加量をもとに、実施工において建設現場での流動化を行った結果、流動化後のコンクリートは目標のスランプフロー55±10cmを得られた。また、流動化後の空気量は試し練りではいずれも減少する傾向であったが、実施工では減少する場合と増大する場合の双方が見られた。これはミキサによる攪拌とトラックアジテータによる攪拌の違いが影響したと考えられる。

後添加型の中流動コンクリートを適用した部位は、既存の梁や床が干渉して最小限の打設口しか設けられず、締固めが難しい条件もあったが、いずれも充填不良は無く、十分な型枠充填性が確認された。

表 4.14 実施工時のフレッシュ性状試験結果の一例

工場	車	積載量 (m³/ 車)	添加量 (パック/車)		項目	試験結果				
			流動化剤	増粘剤		スランプ (cm)	スランプフロー(cm)		空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
							平均			
B	1	4.25	10	4	ベース	19.0	29.5 × 28.0	29.0	4.9	13
					流動化後	-	56.8 × 55.6	56.0	4.7	12
	2	4.25	10	4	ベース	19.0	29.0 × 28.0	28.5	3.6	14
					流動化後	-	51.2 × 49.0	50.0	3.9	14

4.4 製造・施工マニュアル

実験および実適用の結果を踏まえ、増粘剤含有混和剤を後添加した中流動・高流動コンクリート（以下、本コンクリートという）の製造・施工マニュアルを作成し、建設現場で行う流動化剤および増粘剤含有混和剤の投入、攪拌、保管方法や、品質管理方法等をまとめた。本マニュアルの目次を以下に示す。

増粘剤含有混和剤を後添加した中流動・高流動コンクリートの製造・施工マニュアル

目次

1. 総則	6. 本コンクリートの製造・管理
1.1 目的	6.1 本コンクリートの製造場所の選定
1.2 適用範囲および適用の原則	6.2 本コンクリート用後添加剤の保管
2. 施工計画	6.3 本コンクリートの製造
2.1 本コンクリートの使用目的	6.4 本コンクリートの製造工程の管理
2.2 施工計画	7. 運搬および打込み・締固め
2.3 施工管理体制	7.1 運搬
2.4 周知会	7.2 打込み
3. 材料	7.3 締固め
3.1 セメント	8. 型枠
3.2 骨材	8.1 型枠の設計
3.3 練混ぜ水	8.2 型枠の存置期間
3.4 混和材	9. 特殊な考慮を要するコンクリート
3.5 化学混和剤	10. 品質管理・検査
3.6 後添加剤	10.1 コンクリートの試験構成
4. 調合	10.2 不合格の場合の処置
4.1 適用範囲および品質の目標値	
4.2 調合設計	
4.3 試し練り	
5. ベースコンクリートの発注・製造および受入れ	
5.1 レディーミクストコンクリート工場の選定	
5.2 発注	
5.3 製造・管理	
5.4 運搬	
5.5 受入れ	

4.5 まとめ

本章では、増粘剤含有混和剤を後添加することで製造できる流動性の高いコンクリートの実用化および普及を図るべく、模擬柱壁試験体を用いた実大施工実験を行い、型枠充填性、材料分離抵抗性、構造体コンクリート強度等を検証した。その結果を踏まえ、後添加型の中流動コンクリートを建築構造物へ実適用した事例についてまとめた。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 攪拌方法の違いにより流動化剤および増粘剤含有混和剤添加後のコンクリートのフレッシュ性状の傾向は異なり、室内小型ミキサと比べてトラックアジテータでの攪拌ではスランプフロー増大量は小さく、空気量は大きくなる傾向となった。
- (2) 流動化剤および増粘剤含有混和剤添加後のコンクリートの空気量は、トラックアジテータによる攪拌時の巻き込み空気によって概ね増大し、その増大量は積載量が少ない場合やコンクリート温度が低い場合に若干大きくなる傾向であった。
- (3) 細骨材率補正をしていないスランプフロー45cmの中流動コンクリートでも、1箇所5秒間の軽微な締固めにより良好な型枠充填性を得られることが確認された。
- (5) 目視により材料分離抵抗性を有すると評価される中流動コンクリートにおいても、一般的な5～15秒程度の締固めを行うことで、打込み部位の上部付近では粗骨材の沈降が生じるものと考えられ、締固めの程度に留意が必要となる。
- (5) 締固めを行った部位の上部では、粗骨材の沈降に伴うモルタルの割合が増加したことにより、圧縮強度が高く、静弾性係数が小さくなる傾向が見られたが、いずれも下部と比べて最大8%程度の差であった。
- (6) 様々なレディーミクストコンクリート工場の調合について、本研究の手法により、材料分離を生じることなく流動性の高いコンクリートが製造できることが分かった。
- (7) 建築構造物への実適用を通して、粉末パックの投入により容易に製造でき、建設現場で汎用的に使用できる流動性の高いコンクリートの実用性が確認された。

第4章の参考文献

- 4-1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2018
- 4-2) 本田亮，菅谷泰之，阿合延明：増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を用いた低粘性高流動コンクリートの実大施工実験における柱・壁部材への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.529-530，2016.8
- 4-3) 高見錦一，千々岩伸佐久，岩竹秀昭，元木亮，福島和将，岸繁樹：コンクリートポンプ工法における施工性改善に関する提案 その8 コア供試体試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.625-626，2012.9
- 4-4) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説，2021.12
- 4-5) 梁俊，坂本淳，丸屋剛，太田貴士：締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め性に関する基礎研究，大成建設技術センター報，第53号，pp.06-1～06-9，2020
- 4-6) 日本建築学会：構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点，2008.3

第5章 高圧圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響の検討

5.1	はじめに	80
5.2	コンクリートの使用材料および調合	80
5.3	長距離圧送実験の概要	82
5.3.1	圧送条件	82
5.3.2	試験項目	83
5.4	長距離圧送実験の結果	84
5.4.1	コンクリートの試験結果	84
5.4.2	管内圧力計測結果	86
5.5	まとめ	94
	第5章の参考文献	94

第5章 高圧圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響の検討

5.1 はじめに

現在、日本国内で最も高いビルとして高さ 300m の超高層ビルが実現されており^{5-1), 5-2)}、今後はさらに高層となるビルの建設が複数計画されている。高さ 300m を超える超高層ビルのコンクリート圧送における圧送負荷は $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に達すると予想される。このような高い圧送負荷が生じる圧送について、国内における施工事例や研究事例はほとんど無く、高圧圧送によるコンクリートの品質への影響が明確になっていない。例えば、軽量骨材を使用したコンクリートの場合、高圧になることで圧送時の軽量骨材への圧力吸水はさらに大きくなると予想されるが、それがどの程度コンクリートの品質へ影響を及ぼすのか不明確である。また、高圧圧送における管内圧力損失などの実施に資するデータが不十分と言え、正確な施工計画の立案が難しくなっている。

本章では、高所圧送のための基礎資料を得ることを目的として、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる長距離圧送実験を行い、圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の検討、ならびに管内圧力損失等の施工データの測定を実施した。

なお、後述するとおり、本実験では高所への圧送を行うことが困難であったため、水平配管による圧送実験を行うこととした。そのため、鉛直方向の圧送においてコンクリートの自重によって生じる圧送負荷の分は、水平方向の圧送距離を延長することで反映させ、圧送負荷が最大で $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度になるよう配管計画を行った。このように、鉛直方向の圧送時にコンクリートへ及ぼす重力の影響について直接的には検討出来ていないため、重力の直接的な影響については今後の検討課題とした。

5.2 コンクリートの使用材料および調査

超高層ビルにおけるコンクリート圧送を想定した $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じる長距離圧送実験を実施するにあたり、高所圧送において現時点で課題があると考えられる下記のコンクリートを実験対象とした。

- ① 軽量コンクリート 1 種（以下、軽量 1 種という）および 2 種（以下、軽量 2 種という）。当該コンクリートは、高圧時の材料分離や軽量骨材の圧力吸水に伴う配管閉塞が懸念されると共に、圧送高さが高い上層階の床への使用が想定されるため実験対象とした。
- ② 高強度・高流動コンクリート（以下、HC という）。当該コンクリートは、超高層ビルへの適用事例が多い鋼管充填コンクリートとして、圧入に必要な高い流動性と流動保持性が要求される。本研究では、粘性が高く圧送負荷が大きいことでより厳しい圧送・圧入条件となるコンクリートとして、シリカフェームを使用しない設計基準強度（以下、 F_c ） $70\sim 80\text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリートを実験の主対象とし、比較用としてシリカフェームを使用したものも実験を行った。
- ③ 超高強度・高流動コンクリート（以下、UHC という）。当該コンクリートは、鋼管充填コンクリートとして圧入に必要な高い流動性と流動保持性が要求される。シリカフェームを使用しても粘性が高く、圧送負荷が大きくなり十分な吐出量が得られない懸念のある強度領域として、 $F_c 150\text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリートを実験対象とした。

圧送実験に用いたコンクリートの使用材料および調査を表 5.1、表 5.2 および表 5.3 に示す。軽量 1 種（L1）は普通ポルトランドセメント、陸砂、砕砂、膨張性頁岩を主原料とした人工軽量粗骨材（日本メサライト工業㈱製）および高性能 AE 減水剤を使用し、軽量 2 種（L2）は上記材料に加えて膨張性頁岩を主原料とした人工軽量細骨材（日本メサライト工業㈱製）を使用した。いずれも水セメント比 52%、単位水量 $185\text{kg}/\text{m}^3$ とした。

HCは中庸熱ポルトランドセメント、山砂、硬質砂岩砕石および高性能AE減水剤を使用し、水セメント比24.9%、単位水量170kg/m³とした調合(H)のほか、同材料を用いて水セメント比24.9%、単位水量185kg/m³とした調合(HW)と、比較用としてシリカフェーム混入セメント、山砂、硬質砂岩砕石および高性能減水剤を使用し、水セメント比22.2%、単位水量151kg/m³とした調合(HS)の3調合とした。

UHC(UH)は結合材として中庸熱ポルトランドセメントと、JASS 5 M-701およびJIS A 6207にそれぞれ適合するスラグせっこう系混和材およびシリカフェームをプレミックスした高強度用混和材を使用し、安山岩砕砂、人工軽量細骨材、安山岩砕石および高性能減水剤を用いて、水結合材比15%、単位水量150kg/m³とした。

表 5.1 軽量コンクリート 1種および2種の使用材料および調合

記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W1	C1	S1	S2	S3	G1	SP1
L1	23	5.0	52	52.6	185	356	447	458	-	402	2.14
L2	23	5.0	52	52.6	185	356	159	163	365	402	1.07

W1：地下水
 C1：普通ポルトランドセメント、密度3.15g/cm³
 S1：陸砂、表乾密度2.60g/cm³、粗粒率2.40
 S2：石灰石砕砂、表乾密度2.68g/cm³、粗粒率3.20
 S3：人工軽量細骨材、絶乾密度1.65g/cm³、粗粒率2.75、吸水率15%
 G1：人工軽量粗骨材、絶乾密度1.30g/cm³、実積率64.0%、吸水率28%、最大寸法15mm
 SP1：高性能AE減水剤（使用量は単位セメント量に対してL1では0.6%、L2では0.3%とした。）
 ※S3およびG1の単位量は絶乾状態における値を示した。

表 5.2 高強度・高流動コンクリートの使用材料および調合

記号	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W2	C2	C3	S4	G2	G3	SP2	SP3
H	65	2.0	24.9	43.2	170	683	-	671	905	-	10.7	-
HW	70	2.0	24.9	42.2	185	743	-	619	870	-	11.1	-
HS	70	2.0	22.2	42.6	151	-	681	673	-	921	-	9.19

W2：上水道水
 C2：中庸熱ポルトランドセメント、密度3.21g/cm³
 C3：シリカフェーム混入セメント、密度3.08g/cm³
 S4：山砂、表乾密度2.60g/cm³、粗粒率2.65
 G2：硬質砂岩砕石、表乾密度2.67g/cm³、実積率61.0%
 G3：硬質砂岩砕石、表乾密度2.64g/cm³、実積率60.0%
 SP2：高性能AE減水剤（使用量は単位セメント量に対してHでは1.56%、HWでは1.49%とした。）
 SP3：高性能減水剤（使用量は単位セメント量に対してHSでは1.35%とした。）

表 5.3 超高強度・高流動コンクリートの使用材料および調合

記号	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W3	B		S5	S6	G4	SP4
						C4	A				
UH	75	1.5	15	38.5	150	800	200	254	160	818	14.5
W3：地下水 B：結合材 C4：中庸熟ポルトランドセメント，密度 3.21g/cm ³ A：高強度用混和材（スラグせっこう系混和材およびシリカフュームの混合物），密度 2.44g/cm ³ S5：安山岩砕砂，表乾密度 2.61g/cm ³ ，粗粒率 2.83 S6：人工軽量細骨材，絶乾密度 1.65g/cm ³ ，粗粒率 2.75，吸水率 15% G4：安山岩碎石，表乾密度 2.64g/cm ³ ，実積率 61.1% SP4：高性能減水剤（使用量は単位結合材量の 1.45%とした。） ※S6 の単位量は絶乾状態における値を示した。											

高い管内圧力が生じる長距離圧送によって筒先での流動性は大きく低下すると想定し，各コンクリートのスランプまたはスランプフローは材料分離が生じない範囲で大きくする考えのもと，L1 および L2 はスランプ 23 (±2) cm，H はスランプフロー 65 (±10) cm，HW および HS はスランプフロー 70 (±10) cm，UHC はスランプフロー 75 (+5, -10) cm に設定した。

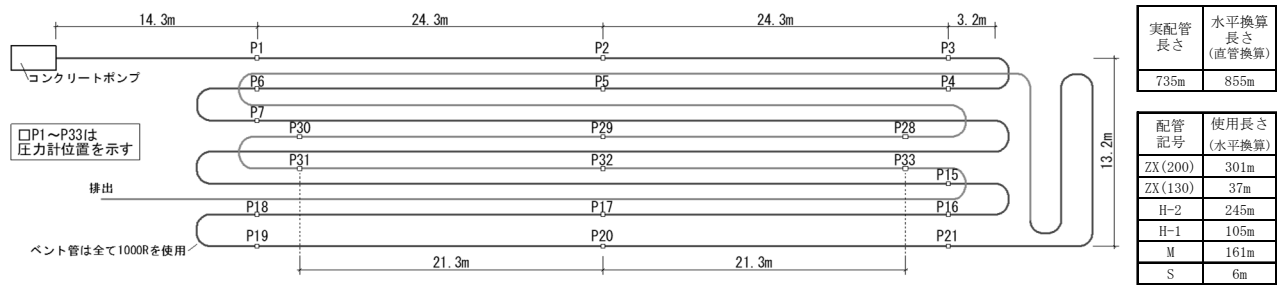
5.3 長距離圧送実験の概要

5.3.1 圧送条件

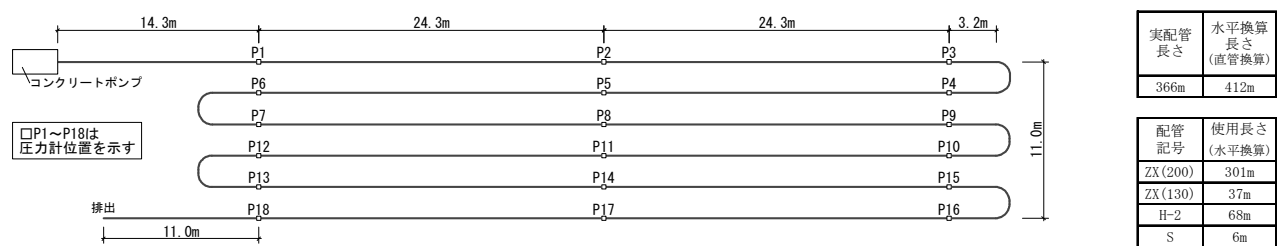
本実験では全ての調合について，圧送負荷が 20N/mm²程度に達することを目標に配管計画を定めた。配管概要を図 5.1 に示す。同図には配管長さや配管の種類および使用長さを併記した。圧送配管は全て水平管とし，実配管長さおよび直管に換算した水平換算長さは，軽量 1 種および軽量 2 種ではそれぞれ 735m および 855m，HC ではそれぞれ 366m および 412m，UHC ではそれぞれ 249m および 277m とした。なお，文献 5-3)を参照し，ベント管およびフレキシブルホースの水平換算係数をそれぞれ 3 および 2 として計算した。

使用した輸送管の種類は，筒元側から順に ZX 管 200kg 仕様（肉厚 9.5mm），ZX 管 130kg 仕様（肉厚 6.6mm），H-2 管（肉厚 6.6mm），H-1 管（肉厚 4.5mm），M 管（肉厚 3.5mm），S 管（肉厚 2.3mm）であり，全ての鋼製輸送管およびフレキシブルホースは 125A を使用した。配管長さが最も長くなる軽量 1 種および軽量 2 種の圧送実験では，配管の途中で設置高さを 200mm 上げて，高さ方向に 2 段組とする平面計画とした。

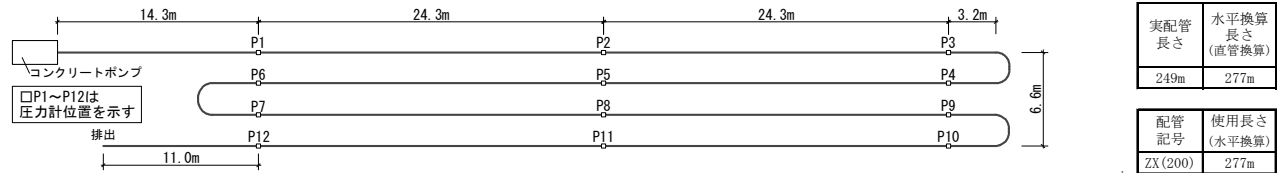
圧送配管の管内圧力は，フラッシュダイアフラム型圧力計（50MPa，20MPa，10MPa）を用いて 0.1 秒間隔で計測した。圧力計はコンクリート調合毎の配管長さに応じて図 5.1 に示す位置に設置した。設置箇所は 1 直線部につき両端および中央の 3 か所を基本とし，軽量 1 種および軽量 2 種では計 20 箇所，HC では計 18 箇所，UHC では計 12 箇所とした。コンクリートポンプは φ200×2100mm のコンクリートシリンダーを搭載するピストン式のコンクリートポンプを使用した。圧送実験は前述した 6 種類の調合に対し，目標の吐出量を 2～3 水準設定して実施した。



(a) 軽量コンクリート 1種および2種



(b) 高強度・高流動コンクリート



(c) 超高強度・高流動コンクリート

図 5.1 配管概要

5.3.2 試験項目

フレッシュコンクリートの試験は、荷卸しおよび筒先についてスランプ、スランプフロー、空気量、コンクリート温度を測定した。また、一部の試料についてφ100×200mmの供試体を採取し、圧縮強度試験を実施した。供試体の養生方法および試験材齢は、軽量1種、軽量2種およびHCでは標準養生28日、UHCでは40°C温水養生28日とした。

圧送実験では、先送りモルタルの圧送後に、コンクリートの圧送を行った。各コンクリートはトラックアジテータでコンクリートポンプまで運搬した。コンクリートの製造場所および運搬距離の違いにより、製造後から荷卸しまでに要した時間は、軽量1種および軽量2種が約60分、HCが約90分、UHCが約20分であった。複数台のトラックアジテータのコンクリートについて、荷卸し時のフレッシュ性状がいずれも同程度であることを確認して圧送し、圧送前後のフレッシュ性状を比較した。荷卸しで採取したコンクリートと同一のトラックアジテータのコンクリートを筒先で採取するために、配管内のコンクリート容積や吐出量を考慮して、試料の採取時期を調整した。なお、圧送実験時の外気温は7~19°Cの範囲であった。

5.4 長距離圧送実験の結果

5.4.1 コンクリートの試験結果

各調合に対し吐出量を2～3水準設定して圧送実験を行った結果、いずれの調合についても吐出量の大きい実験ケースにおいて、圧送時の最大管内圧力は目標とした $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に達した。また、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じた実験ケースを含め、いずれの調合および吐出量の水準においても配管閉塞を生じることなく筒先まで圧送できることが確認された。

圧送前後のスランプを図5.2に、圧送前後のスランプフローを図5.3に、最大管内圧力とスランプフロー比の関係を図5.4に示す。最大管内圧力は、後述する図5.7に示す管内圧力分布における最大値とし、スランプフロー比は筒先のスランプフローを荷卸し時のスランプフローで除して求めた。荷卸し時におけるフレッシュ性状試験の際に、全ての調合で材料分離が生じていないことを目視により確認した。圧送後のスランプまたはスランプフローは、軽量1種、軽量2種およびHCでは低下し、UHCでは増大した。また、いずれの調合も最大管内圧力が大きくなるほどスランプフロー比が小さくなる傾向となった。荷卸しの試験から筒先の試験までの経過時間は、L1では55～66分、L2では41～68分、Hでは53～65分、HWでは40～45分、HSでは38～48分、UHでは81～92分であった。各調合の一部の実験ケースについて、経時によるフレッシュ性状への影響確認のために、荷卸しの際に採取した試料を静置状態で保管し、筒先で採取した試料の試験と同時期に試験を実施した。その結果、荷卸しに対する静置試料のスランプは、L1では $-2\sim-1\text{cm}$ 、L2では $-1.5\sim 0\text{cm}$ となり、荷卸しに対する静置試料のスランプフローは、Hでは $-2.5\sim-0.5\text{cm}$ 、HWでは $+1.5\sim+2.5\text{cm}$ 、HSでは $-3.5\sim-2.5\text{cm}$ 、UHでは $+1\sim+5\text{cm}$ となり、経時によるスランプおよびスランプフローの変化は圧送による変化と比べて小さかった。

軽量コンクリートの荷卸し時に対する圧送後のスランプ低下量は、L1では $11.0\sim 14.0\text{cm}$ 、L2では $2.0\sim 4.5\text{cm}$ となり、L1よりもL2の方が圧送後のスランプ低下量が小さくなった。圧送による軽量コンクリートのスランプ低下量については、一般的な傾向は $1\sim 4\text{cm}$ 程度⁵⁻³⁾、既報⁵⁻²⁾の高さ300mの超高層ビルの施工時では $0\sim 5\text{cm}$ であり、これらと比較してL1はスランプ低下量が 10cm 程度大きく、L2は同様な傾向となった。軽量コンクリートを圧送する場合は軽量骨材の圧力吸水による圧送性の低下が懸念される。前述した既報⁵⁻²⁾では、軽量粗骨材の含水率の平均値が 30.5% と非常に高い値であり、その標準偏差も 0.79% と安定していたことが、圧送前後のスランプに大きな変化が認められなかった要因として挙げられている。本実験のL1およびL2の一部のコンクリートについて、圧送前後の軽量粗骨材の含水率を測定した結果、L1で圧送前 26.9% 、圧送後 27.5% 、L2で圧送前 28.3% 、圧送後 29.0% であった。圧送前と比べて圧送後の含水率がL1で 0.6% 、L2で 0.7% 高くなったことから、圧送による圧力吸水が生じたと推察され、これがスランプ低下の一要因であると考えられる。この他の要因については後述する6章で検討を行った。

軽量骨材への圧力吸水を考慮すると、軽量粗骨材に加えて軽量細骨材を使用するL2の方が、L1よりも圧送によるスランプ低下量が大きくなると予想されるが、本実験ではL2の方がスランプ低下量は小さくなる結果となった。L1およびL2における調合の違いに着目すると、L2はL1と比べて山砂および石灰石砕砂の使用量がそれぞれ $288\text{kg}/\text{m}^3$ および $295\text{kg}/\text{m}^3$ 減少し、新たに軽量細骨材が $365\text{kg}/\text{m}^3$ 追加されている。また、所定のスランプを得るための高性能AE減水剤の使用量がL2ではL1の半分と少なくなっている。なお本実験では、コンクリート製造前の材料の貯蔵時において軽量骨材の乾燥抑制に配慮しており、十分な含水状態の軽量細骨材を使用していた。上記の点が、L1と比べてL2の圧送によるスランプ低下が抑制された要因である可能性については、今後の検討課題としたい。

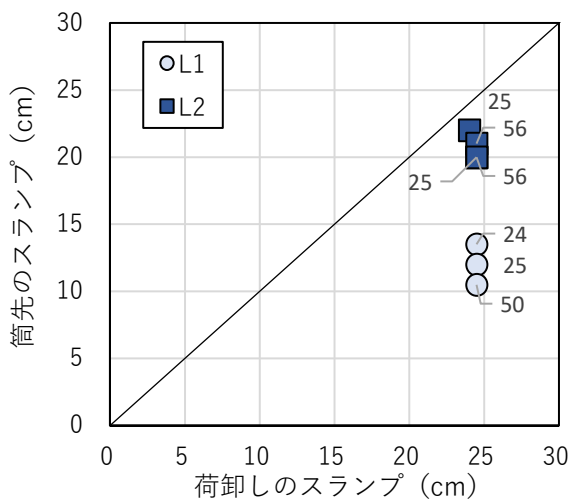


図 5.2 圧送前後のスランプ

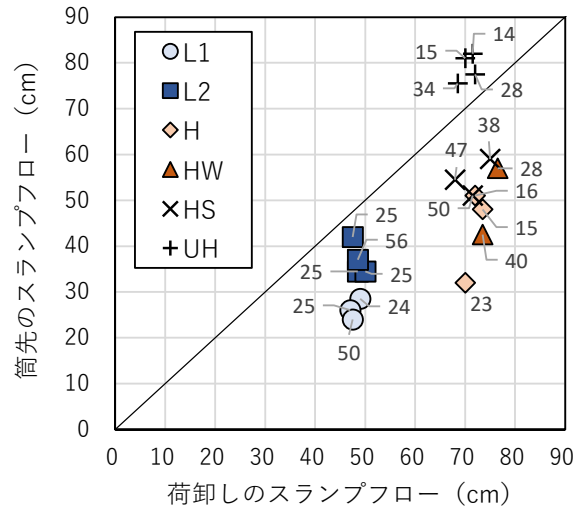


図 5.3 圧送前後のスランプフロー

※図中の数値は実吐出量(m³/h)を示す。

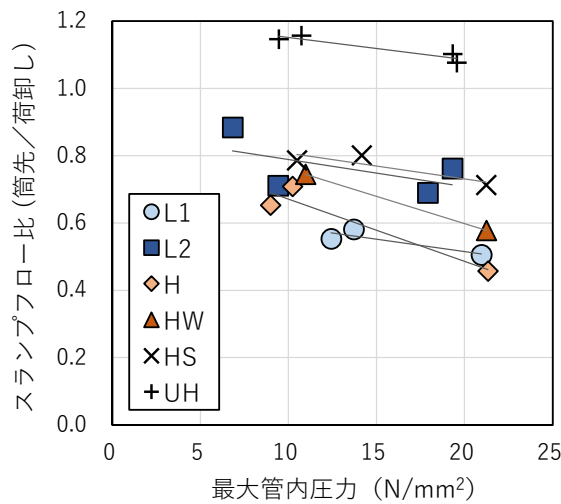


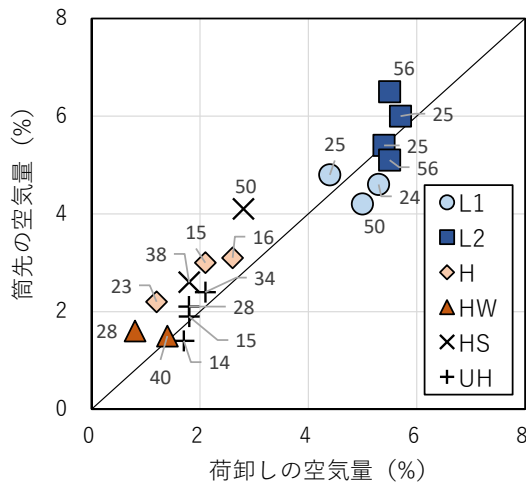
図 5.4 最大管内圧力とスランプフロー比の関係

HC における圧送後のスランプフロー低下量は H が最も大きく、次いで HW, HS の順となり、H では最大 38.0cm, HW では最大 31.0cm, HS では最大 20.5cm 低下した。単位水量の増大やシリカフェュームの混入により、圧送後のスランプフロー低下量が低減されることが分かった。筒先のスランプフローが大きく低下する圧送条件において、筒先で要求されるスランプフローを確保するために、上記のような調合変更が有効な手段の一つと考えられる。神代らが実施した圧送実験⁵⁻⁵⁾では、配管長 110m, 実吐出量 45m³/h, 最大管内圧力およそ 9N/mm²の場合、中庸熱ポルトランドセメントを使用した水セメント比 25.5%の高強度コンクリートの筒先のスランプフローは、荷卸し時の 71cm に対して 20cm 程度低下している。この結果と比較して本実験ではスランプフローの低下量が大きくなっており、これは圧送距離および管内圧力が增大したことが影響したと考えられる。

UHC では圧送後のスランプフローが荷卸し時から 5.5~11.0cm 大きくなった。前述したとおり UHC の経時によるスランプフローの変化は +1~+5cm であり、時間の経過により高性能減水剤が効いてきてスランプフローが後伸びする調合であったが、圧送後にはさらにスランプフローが大きくなる

なる結果となった。後藤らが実施した圧送実験⁵⁻⁶⁾では、配管長 50m、実吐出量 21.3m³/h、最大管内圧力およそ 10N/mm² の場合、シリカフェーム混入セメントを使用した水結合材比 15% の高強度コンクリートの筒先のスランプフローは、荷卸し時の 73cm に対して 3cm 低下している。後藤らの実験ではコンクリートの製造から荷卸しまで 60 分以上経過しているのに対して、本実験では 20 分と短い。すなわち両コンクリートの圧送開始時点における混和剤の粒子分散効果や、水和の進行度が異なっており、これが圧送前後のスランプフローの増減傾向に影響したものと推察した。また、前述した L2 のように十分な含水状態の軽量細骨材を使用していることが、圧送によるスランプフローの低下が抑制された一要因となった可能性については今後の検討課題としたい。

圧送前後の空気量を図 5.5 に、圧送前後に採取した供試体の材齢 28 日における圧縮強度を図 5.6 に示す。空気量は H, HW, HS では圧送後に若干増加傾向であるが、圧送前後の空気量は各調査で同程度と判断した。また、いずれの調査も圧送前後における圧縮強度は同程度であった。



※図中の数値は実吐出量(m³/h)を示す。

図 5.5 圧送前後の空気量

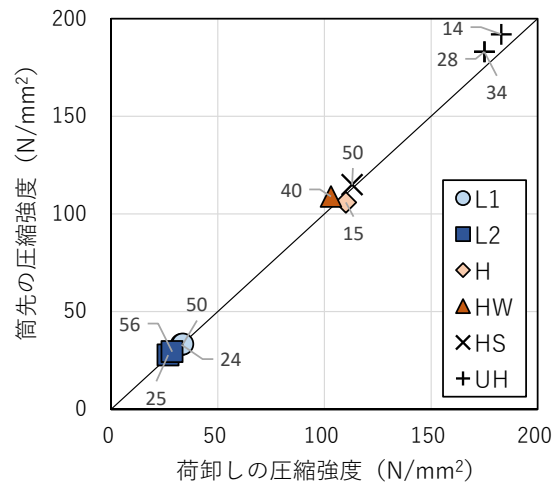


図 5.6 圧送前後の圧縮強度

5.4.2 管内圧力計測結果

管内圧力分布を図 5.7 に示す。同図に示した管内圧力は、トラックアジテータ 1 台分の圧送における圧力波形データから、安定した吐出量となったストロークのうち最大値を計測した 1 ストロークを抽出し、ピークを記録した時点の値とした。また、圧力計の計測データから求めた 1 ピストン当たりの時間により 1 時間当たりのピストン回数を算出し、その回数にコンクリートシリンダー容積と機械効率を乗じて実吐出量を求めた。機械効率は式(5.1)に示すように、トラックアジテータ 1 台当たりにおける積載量 (工場による容積保証の割り増しは考慮しない) および圧送に要した時間から算出した吐出量を、シリンダー容積および圧送に要したピストン回数から算出した理論吐出量で除して求めた。

$$\eta_m = \left(\frac{V_a}{t}\right) \div \left(\frac{nV_c}{t}\right) \quad (5.1)$$

ここに、 η_m : 機械効率、 V_a : トラックアジテータ 1 台当たりの積載量 (m³),

t : トラックアジテータ 1 台当たりの圧送に要した時間 (h),

V_c : シリンダー容積 (0.066m³),

n : トラックアジテータ 1 台当たりの圧送に要したピストン回数

全てのコンクリートについて、吐出量大きいほど管内圧力は概ね大きくなった。また、管内圧力は筒元側で最も大きくなり、圧送距離に応じて概ね直線的に減少した。いずれの調査も筒元から最初のベント管の通過直後までの P1-P4 間で大きな圧力差が生じ、P4 以降では P1-P4 間よりも圧力差が小さくなる傾向となった。有馬ら⁵⁻⁴⁾が行った Fc100 および 120N/mm² 高強度コンクリートの圧送実験では、管内圧力損失はコンクリートポンプに近いベント管で最も大きく、本研究においても同様の傾向が確認された。筒元側の管内圧力が 20N/mm² 程度となる場合の吐出量は、L1, L2 および HS で約 50~60m³/h, HW および UH で約 30~40m³/h, H が約 20m³/h であった。

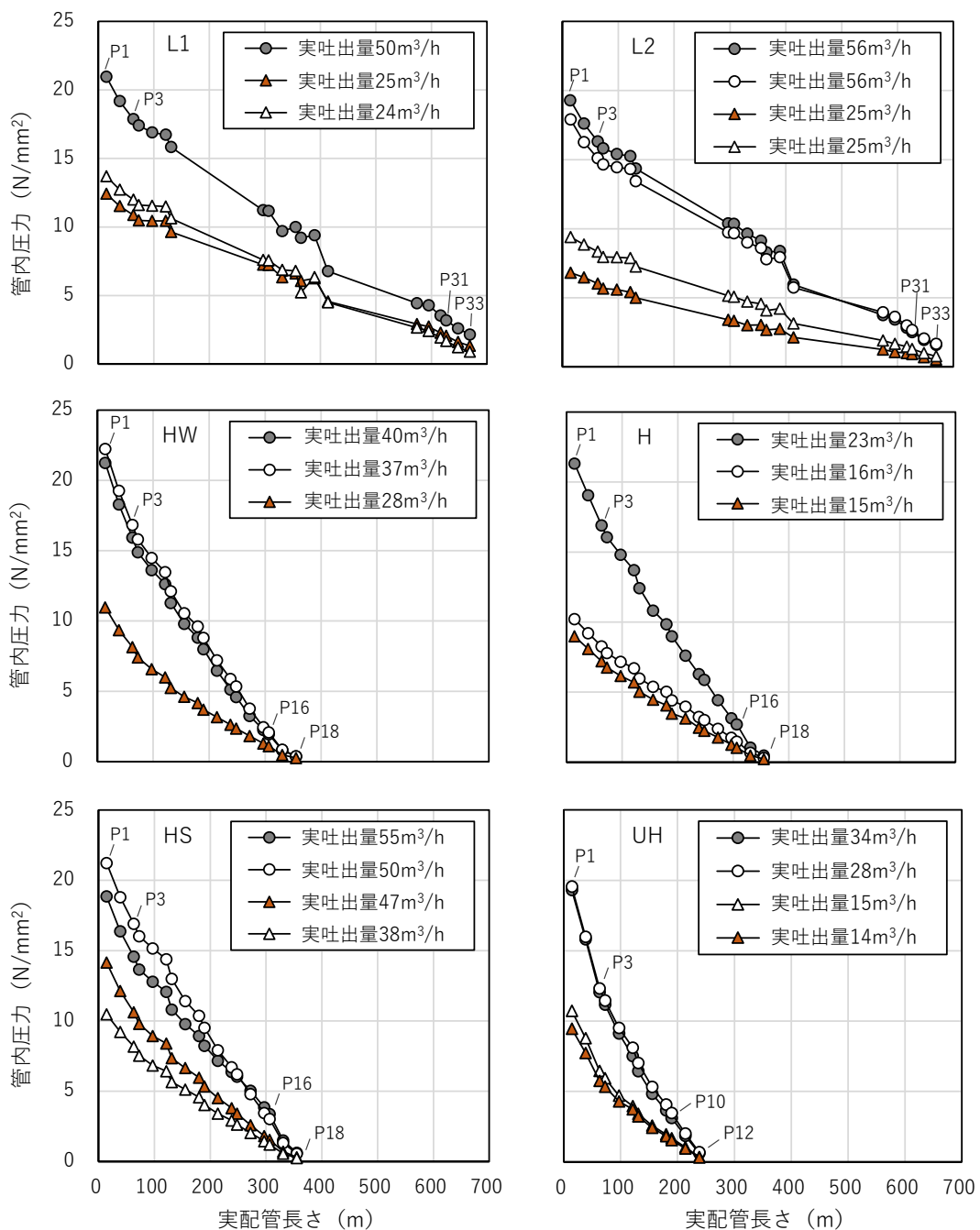


図 5.7 管内圧力分布

実吐出量と管内圧力損失の関係を図 5.8 に示す。管内圧力損失は、全ての調査で筒元および筒先にそれぞれ近接する直線区間について算出した。すなわち、L1 および L2 では P1-P3 間および P31-P33 間、H、HW および HS では P1-P3 間および P16-P18 間、UH では P1-P3 間および P10-P12 間について、管内圧力差を圧力計間距離で除して求めた。また図 5.8 には、軽量骨材を使用したスランブ 22cm コンクリートの管内圧力損失 (125A 管) の標準値⁵⁻³⁾や、既往^{5-5), 5-6), 5-7), 5-8)}の圧送実験データを併記した。いずれの調査も、吐出量の増加にともない管内圧力損失が増大する傾向であり、筒先側よりも筒元側の方が管内圧力損失は大きくなった。

軽量コンクリートの管内圧力損失は、L1 および L2 共に筒元側はスランブ 22cm の標準値⁵⁻³⁾の 2~4 倍程度大きく、筒先側は標準値と同程度であり、いずれも L1 の方が L2 よりも大きくなった。

HC の管内圧力損失は、水セメント比が同程度で中庸熟ポルトランドセメントまたはシリカフェューム混入セメントを用いた調査の既往の実験結果⁵⁻⁵⁾と比べて、筒元側はいずれも大きく、筒先側では概ね同程度の値となった。既往の結果⁵⁻⁵⁾における筒元の管内圧力損失は、コンクリートポンプから 2 箇所のカンパネ管を通過後の位置から算出したものに対し、本実験における筒元の管内圧力損失は、コンクリートポンプから直管のみを通過後の位置から算出したものである。このことから、コンクリートポンプから最初のカンパネ管までの間では、それ以降と比べて管内圧力損失が大きくなると考えられる。

UHC の管内圧力損失について、筒元側は既報^{5-6), 5-7), 5-8)}の W/B=13~16% の調査における管内圧力損失の範囲内にあり、筒先側は既報⁵⁻⁶⁾の W/B=20% の管内圧力損失と同等となった。本実験の UHC は、筆者らの既報⁵⁻⁶⁾における W/B=15% の調査をもとに圧送性の改善を図った調査である。具体的には結合材中の普通ポルトランドセメントを中庸熟ポルトランドセメントに変更し、結合材中のシリカフェュームの割合を増やし、高性能減水剤の銘柄を変更している。これらの調査変更により管内圧力損失が小さくなった要因としては、コンクリートの塑性粘度が低減されたことが考えられる。

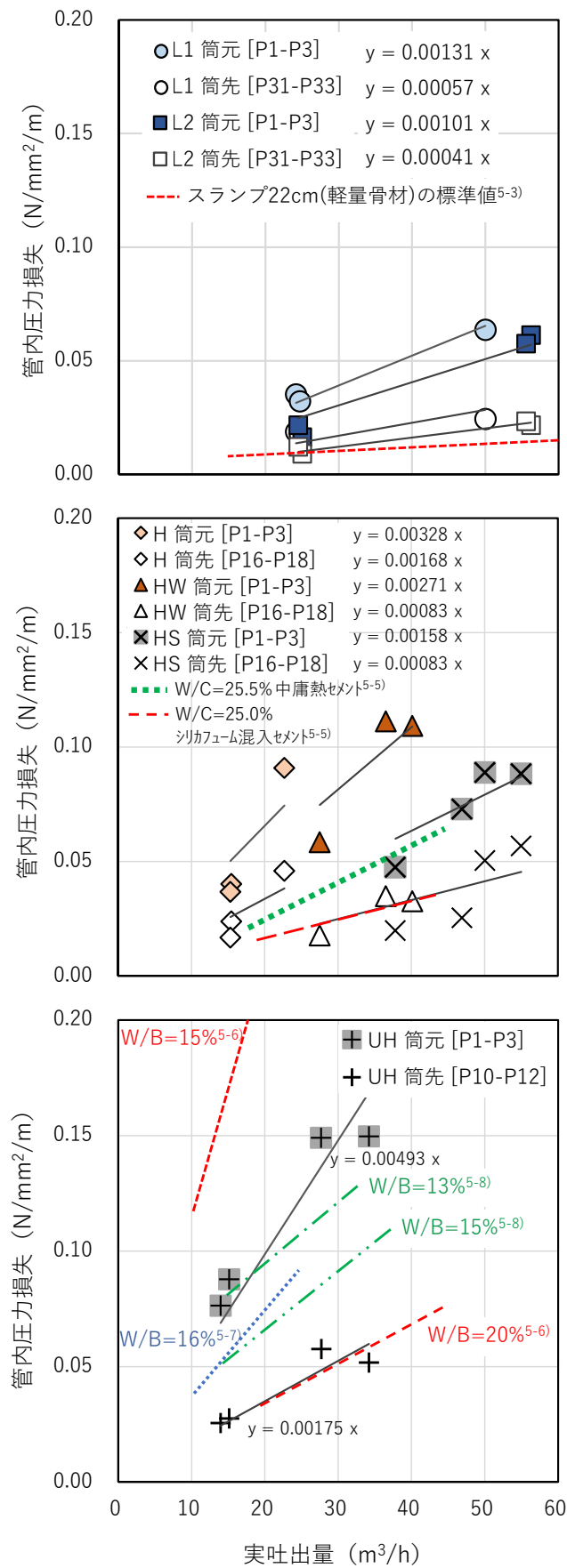


図 5.8 実吐出量と管内圧力損失の関係

長距離圧送実験を行った各コンクリートについて、コンクリートの流動特性と管内圧力損失の関係を検討した。スランプフロー40～50cm以上のコンクリートを対象として検討・提案されている既往の予測式を参考にして、式(5.2)⁵⁻⁹⁾を用いてコンクリートのスランプフローから降伏値の推定値を算出し、式(5.3)⁵⁻¹⁰⁾を用いてコンクリートの50cmフロー到達時間から塑性粘度の推定値を算出した。軽量コンクリートのL1およびL2についてはスランプフローが50cm未満であり、50cmフロー到達時間が測定できなかった。そこで、Lフロー試験を行い、式(5.4)⁵⁻¹¹⁾を用いてLフロー5cm～10cm間における流動時間(Lフロー速度)から塑性粘度の推定値を算出した。L1およびL2の降伏値は120Pa前後、試料密度は1750～1950kg/m³の範囲にあり、これらの数値は式(5.4)を参照した文献5-11)における検討範囲に含まれるため、L1およびL2の塑性粘度の推定に当該式が適用可能と判断した。

$$\tau_y = \frac{15^2 \rho g V^2}{4\pi^2 S f^5} \quad (5.2)^{5-9)}$$

ここに、 τ_y ：降伏値 (Pa)， ρ ：単位容積質量 (g/mm³)， g ：重力加速度 (=9806.7mm/s²)
 V ：試験体容積 (mm³)， Sf ：スランプフロー (mm)

$$\eta = \frac{125.3\rho}{2300} \left(1 - \frac{4 \times 10^4}{Sf.^2}\right) \left(1 - \frac{25 \times 10^4}{Sf.^2}\right) t_{500} \quad (5.3)^{5-10)}$$

ここに、 η ：塑性粘度 (Pa・s)， ρ ：コンクリートの密度 (kg/m³)，
 Sf ：スランプフロー (mm)， t_{500} ：50cmフロー到達時間 (秒)

$$\eta = \frac{Lt_{5-10}}{\left(8.33 \times \frac{10^{-5}}{\rho} - 2.35 \times 10^{-8}\right) \tau_y^2 + \frac{3.78}{\rho} - 4.98 \times 10^{-5}} \quad (5.4)^{5-11)}$$

ここに、 η ：塑性粘度 (Pa・s)， Lt_{5-10} ：Lフローの5cm～10cmにおける流動時間 (秒)
 ρ ：コンクリートの密度 (kg/m³)， Sf ：スランプフロー (mm)，
 t_{500} ：50cmフロー到達時間 (秒)

図5.8に示したとおり管内圧力損失は実吐出量に応じて変化しており、各調合について全く同一の実吐出量における管内圧力損失の計測データは得られていない。そのため、同程度の実吐出量として22.7～27.7m³/hの範囲となった5つの実験ケースを抽出して検討を行った。

抽出した実験ケースにおけるコンクリートのフレッシュ性状、流動特性、実吐出量および管内圧力損失を表5.4に、降伏値の推定値と管内圧力損失の関係を図5.9に、塑性粘度の推定値と管内圧力損失の関係を図5.10に示す。図5.9より、降伏値の推定値と管内圧力損失の間には負の相関が見られ、両者の関係における回帰式の決定係数 R^2 は筒元側で0.579、筒先側で0.596であった。相関は見られるものの、降伏値の小さい20Pa前後の範囲で管内圧力損失の実測値にばらつきが見られる。また、ここでは降伏値20Pa程度と120Pa程度に大きく二分するプロットとなっており、これらの中間のデータが追加された場合に、上述した結果とは異なる相関となる可能性が考えられる。一方、図5.10より、塑性粘度の推定値と管内圧力損失の間には正の相関が見られ、両者の関係における回帰式の決定係数 R^2 は筒元側で0.956、筒先側で0.637であった。

コンクリートの塑性粘度と管内圧力損失の関係に関する既往の研究事例として、宮田ら⁵⁻¹²⁾は文献調査の結果から、水セメント比45%以下の管内圧力損失は水セメント比が45%を超え65%以下に比べて著しく大きくなる傾向を示している。「水セメント比はコンクリートの粘性に直接的に起因するため管内圧力損失に及ぼす影響が大きい」として、管内圧力損失を実吐出量で除した値とセメント水比に相関性があることを確認している。岩竹ら⁵⁻¹³⁾は、水セメント比28.5~50%のコンクリートについて、Lフロー初速度から推定した塑性粘度が高いほど、実吐出量と管内圧力損失との関係における一次回帰式の傾きが大きくなることを示すと共に、スランプフロー、Lフロー初速度および実吐出量から管内圧力損失を推定する式を提案している。

高強度・高流動コンクリートの管内圧力損失を簡易的に予測する研究事例として、岩清水ら⁵⁻¹⁴⁾は、水セメント比40%以下の高強度コンクリートについて、塑性粘度の評価指標としてLフロー初速度を用いた簡易な式により管内圧力損失を推定している。依田ら⁵⁻¹⁵⁾は、高強度コンクリートの見かけの塑性粘度を回転翼型粘度計により測定し、この結果を管内圧力損失の関係を直線回帰で求めた推定式を提案している。この他にも研究事例^{例えば5-16)~5-18)}があるが、いずれの研究事例も高強度・高流動コンクリートの管内圧力損失の推定方法についてはコンクリートの塑性粘度に着目しており、その試験方法は50cmスランプフロー到達時間、Lフロー初速度、Oロート流下時間、回転翼型粘度計など様々な方法が行われている。

以上のように、コンクリートの塑性粘度と管内圧力損失の間には相関があることが報告されている。本研究においても塑性粘度と管内圧力損失との間に相関が見られ、普通強度の軽量コンクリートや超高強度・高流動コンクリートといった調合が大きく異なるコンクリートに対しても、コンクリートの塑性粘度から管内圧力損失を推定できることが分かった。

コンクリートの塑性粘度に関する特性値としては、測定が容易な50cmフロー到達時間が挙げられるが、中流動コンクリートのように、流動性は高いもののスランプフローが50cmに達しない場合もある。そこで本研究では、スランプフロー50cm未満となる調査では、既往の研究でも検討されているLフロー速度を塑性粘度に関する特性値として用いた。さらに本研究ではLフロー速度の他に、ある程度の流動性を持つコンクリートであれば測定が可能なV漏斗流下時間に着目し、塑性粘度との関係を検討した。

各コンクリートについて上述のとおり算出した塑性粘度の推定値とV漏斗流下時間の関係を図5.11に、V漏斗流下時間と管内圧力損失の関係を図5.12に示す。塑性粘度の推定値とV漏斗流下時間との間には正の相関が見られ、両者の関係における回帰式の決定係数 R^2 は0.937であった。上述したとおり塑性粘度と管内圧力損失の間には正の相関があるため、図5.12に示すとおり、V漏斗流下時間と管内圧力損失の間にも正の相関が見られ、両者の関係における回帰式の決定係数 R^2 は筒元側で0.958、筒先側で0.438であった。したがって、普通強度の軽量コンクリート、高強度・高流動コンクリートおよび超高強度・高流動コンクリートに対してV漏斗流下時間を測定することにより、特に管内圧力が高くなる筒元側の管内圧力損失を高い精度で推定できることが明らかとなった。

表 5.4 コンクリートのフレッシュ性状，流動特性，実吐出量および管内圧力損失

記号	実吐出量 (m ³ /h)	管内圧力損失 (N/mm ² /m)		スランブ (cm)	スランブ 70- (cm)	降伏値 ※スランブ 70- を用いて算 出 ⁵⁻⁹⁾ (Pa)	50cm70- 到達時間 (s)	塑性粘度 ※50cm70-到 達時間を用い て算出 ⁵⁻¹⁰⁾ (Pa・s)	Lフロー 5~10cm 流動時間 (s)	塑性粘度 ※L70-流動 時間を用い て算出 ⁵⁻¹¹⁾ (Pa・s)	V漏斗 流下 時間 (s)	単位 容積 質量 (kg/m ³)
		筒元側	筒先側									
L1	24.2	0.035	0.018	24.5	49.0	115	-	-	0.090	40	2.5	1930
L2	25.0	0.016	0.009	24.0	47.5	124	-	-	0.155	66	3.0	1773
H	22.7	0.091	0.055	-	70.0	25	6.9	417	-	-	13.0	2466
HW	27.5	0.058	0.025	-	76.5	16	3.9	280	-	-	8.9	2466
UH	27.7	0.149	0.041	-	72.0	21	10.3	645	-	-	29.2	2406

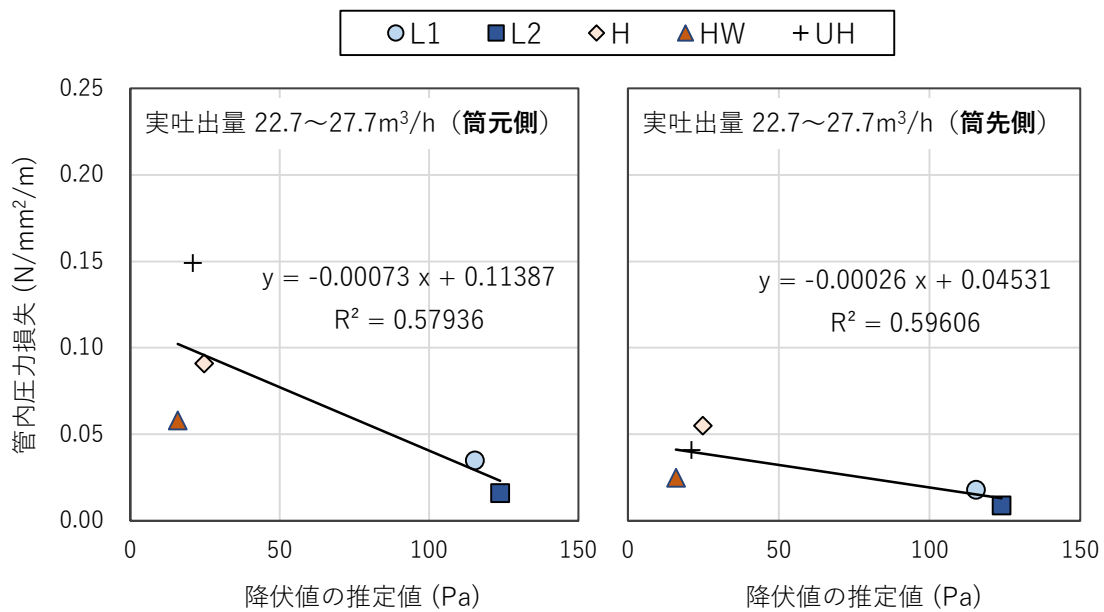


図 5.9 降伏値の推定値と管内圧力損失の関係

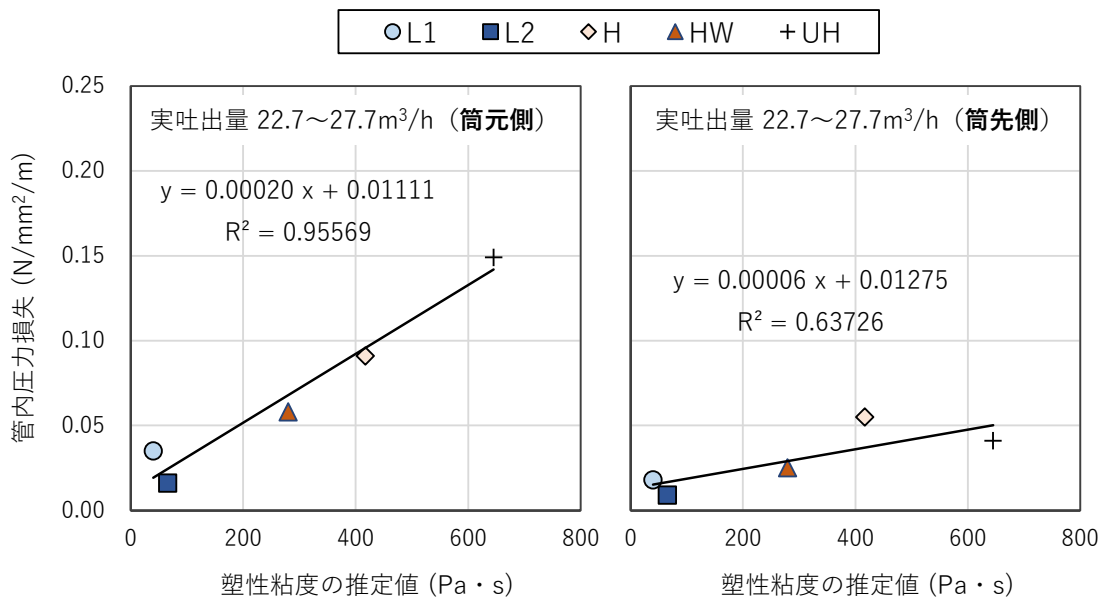


図 5.10 塑性粘度の推定値と管内圧力損失の関係

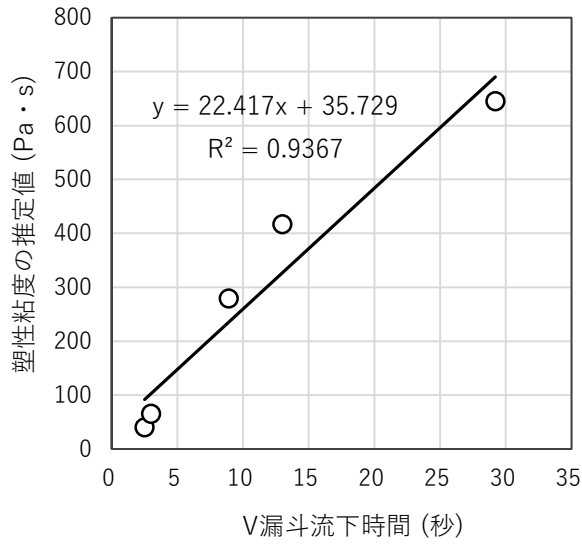


図 5.11 塑性粘度の推定値と V 漏斗流下時間の関係

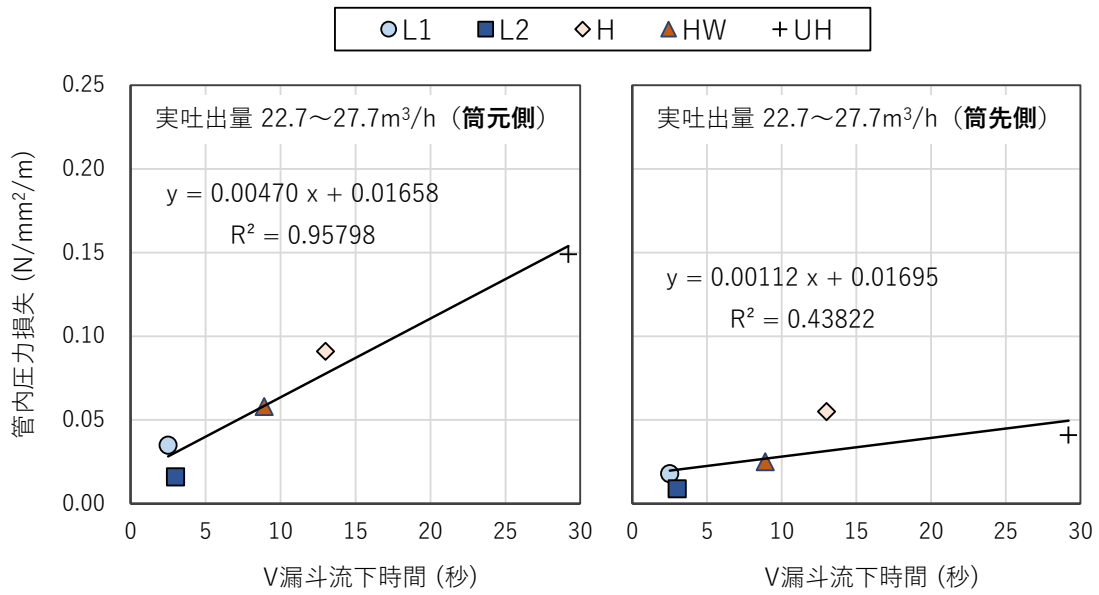


図 5.12 V 漏斗流下時間と管内圧力損失の関係

5.5 まとめ

本章では、軽量コンクリート1種および2種、高強度・高流動コンクリート、超高強度・高流動コンクリートを対象に、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じる長距離圧送実験を行い、圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の検討、ならびに管内圧力損失等の実施に資するデータの測定を実施した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 最大 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる圧送において、本研究で検討した軽量コンクリートや高強度コンクリートが配管閉塞を生じることなく筒先まで圧送できることが確認された。
- (2) 軽量コンクリート1種では、圧送後のスランプ低下量は標準値⁵⁻³⁾や既報⁵⁻²⁾よりも10cm程度大きくなった。これは高圧による軽量骨材への圧力吸水が一要因と考えられ、軽量骨材の吸水管理が圧送性を確保するうえで重要であると言える。
- (3) 軽量コンクリート2種では、1種よりも圧送後のスランプ低下量は小さくなった。普通骨材の使用量や軽量細骨材の有無、所要のスランプを得るために要する高性能AE減水剤の使用量などの調合の違いが、スランプ低下を抑制する一要因となった可能性が示唆された。
- (4) 水セメント比22.2~24.9%の高強度・高流動コンクリートでは、単位水量の増大やシリカフェュームの混入により、圧送後のスランプフロー低下量が低減された。
- (5) 水結合材比15%の超高強度・高流動コンクリートでは、圧送後のスランプフローは5.5~11cm大きくなった。
- (6) いずれのコンクリートも最大管内圧力が大きいほど、荷卸し時のスランプフローに対する筒先のスランプフローの比が小さくなる傾向となり、圧送前後の空気量および圧縮強度は同程度であった。また、いずれも管内圧力損失は筒元から最初のベント管の通過直後までの間で最も大きな値となり、それ以降は小さくなる傾向となった。
- (7) 軽量コンクリート1種、2種および高強度・高流動コンクリートにおける筒元側の管内圧力損失は、標準値⁵⁻³⁾や既報⁵⁻⁵⁾の結果よりも大きく、実施工においてはポンプの選定や配管計画に留意が必要と考えられる。
- (8) 超高強度・高流動コンクリートの管内圧力損失は、筒元側では既報^{5-6), 5-7), 5-8)}の $W/B=13\sim 16\%$ における結果の範囲内にあり、筒先側は既報⁵⁻⁸⁾の $W/B=20\%$ の結果と同等となった。結合材等の調合変更によりコンクリートの塑性粘度が低減され、管内圧力損失が小さくなることが確認された。
- (9) 軽量コンクリート1種、2種、高強度・高流動コンクリートおよび超高強度・高流動コンクリートについて、50cmフロー到達時間やLフロー速度から推定した塑性粘度から管内圧力損失を推定できることが分かった。また、V漏斗流下時間を測定することにより、特に管内圧力が高くなる筒元側の管内圧力損失を高い精度で推定できることが明らかとなった。

第5章の参考文献

- 5-1) 青木義彦, 岩清水隆, 山田佳博, 永野浩一: $F_c=150\text{N}/\text{mm}^2$ の超高強度コンクリートCFT柱の施工—高さ300m超高層複合ビル「あべのハルカス」—, コンクリート工学, Vol.50, No.8, pp.683-688, 2012.8
- 5-2) 岩清水隆, 青木義彦, 九嶋壮一郎, 永野浩一: 軽量コンクリートの高さ300mへの超高所圧送—高さ300m超高層複合ビル「あべのハルカス」—, コンクリート工学, Vol.51, No.8, pp.648-655, 2013.8

- 5-3) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009.12
- 5-4) 有馬義人，佐々木仁，塩田博之：高強度コンクリートのポンプ圧送実験，フジタ技術研究所報，第47号，pp.45-50，2011
- 5-5) 神代泰道，一瀬賢一，都築正則：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1217-1222，2006
- 5-6) 後藤和正，黒岩秀介，寺内利恵子，並木哲，松本修一，陣内浩，荒川友宏：Fc150及びFc100を用いたCFTの実大施工実験（その1：ポンプ圧送性），日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.805-806，2010.10
- 5-7) 寺内利恵子，早川光敬，陣内浩，黒岩秀介：超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第622号，pp.25-31，2007.12
- 5-8) 鳴瀬浩康，石中正人，藤井和俊，中瀬博一：設計基準強度150N/mm²級超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究，日本建築学会技術報告集，第15巻，第30号，pp.359-362，2009.6
- 5-9) 小門武，細田尚，宮川豊章，藤井學：スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究，土木学会論文集，No.578，V-37，pp.19-29，1997.11
- 5-10) 小村理恵，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸，蔡英：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関する研究 その1 レオロジー定数の推定方法，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.519-520，1994.9
- 5-11) 西之園一樹，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸：Lフロー試験時の粘塑性体の流動シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.465-466，1995.8
- 5-12) 宮田敦典，中田善久，大塚秀三：コンクリートポンプ工法におけるコンクリートの調合条件ごとの管内圧力損失に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第751号，pp.1217-1227，2018.9
- 5-13) 岩竹秀昭，木村芳幹，二村誠二，岩清水隆：フレッシュコンクリートの性能とポンプ圧送性の評価に関する研究 その9 レオロジー的検証による管内圧力損失の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.553-554，2007.8
- 5-14) 岩清水隆，木村芳幹，山崎順二，岩竹秀昭：フレッシュコンクリートの性能とポンプ圧送性の評価に関する研究 その8 高強度コンクリートの管内圧力損失の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.551-552，2007.8
- 5-15) 依田和久，全振煥，浅岡茂，戸田猛：中庸熱セメントを用いた高強度CFT充填コンクリート工事 一新宿六丁目N街区計画「イーストサイドスクエア」新築工事一，コンクリート工学，50巻，11号，pp.1022-1028，2012
- 5-16) 平弘毅他，CFT造充填コンクリートの管内圧力損失に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.555-556，2004
- 5-17) 小島正朗，三井健郎，森堅太郎，和地正浩：Fc100N/mm²超高強度コンクリートのポンプ圧送性とCFT柱への圧入施工に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1343-1348，2006
- 5-18) 神代泰道，都築正則，一瀬賢一，堀長生：設計基準強度50～120N/mm²に対応する高強度コンクリートのポンプ圧送性の簡易的予測方法の提案，大林組技術研究所報No.70，2006

第6章 高圧圧送によるコンクリートの流動性変化の評価方法および要因の検討

6.1	はじめに	96
6.2	小型圧送性試験装置	96
6.3	予備実験	98
6.3.1	実験概要	98
6.3.2	実験結果	100
6.4	圧送性試験	101
6.4.1	試験概要	101
6.4.2	試験結果	101
6.5	高圧圧送による圧力およびせん断力が流動性低下に及ぼす影響の検討	105
6.5.1	試験概要	105
6.5.2	試験結果	105
6.6	高圧圧送によってコンクリートに生じる各種変化の検証	109
6.6.1	粗骨材の含水率	110
6.6.2	凝結時間	110
6.6.3	セメント粒子の総吸着可能面積	111
6.6.4	混和剤吸着量	111
6.6.5	骨材粒度分布	113
6.7	まとめ	114
	第6章の参考文献	115

第6章 高圧圧送によるコンクリートの流動性変化の評価方法および要因の検討

6.1 はじめに

圧送によるコンクリート品質の変化に関する資料がなく、コンクリートの要求品質を満足した圧送が可能か否かの予測ができない場合には、前章で実施したような実大規模の試験圧送を行う必要がある⁶⁻¹⁾。この場合、特に長距離圧送配管を要する条件では多大な労力や費用を要するため、室内試験規模の評価方法の確立が望まれている。コンクリートの圧送性を評価・検討する試験方法や関連する既往の研究事例として、作栄らは加圧ブリーディング試験装置を用いてモルタルに圧縮力を作用させた後に、ミキサによる再練混ぜによりせん断力を作用させることで圧送により生じる応力状態を模擬し、流動性の変化を検討している⁶⁻²⁾。また、梁らは、圧送配管内のコンクリートの状態をモデル化した圧送性評価装置により、コンクリートが閉塞すること無く圧送可能な水平換算距離を定量的に評価する方法を提案している⁶⁻³⁾。その他にも様々な研究がなされているものの、現状では圧送によるコンクリートの品質の変化を定量的に評価できる試験方法は確立されていない。

そこで本章では、圧送を模擬してコンクリートに圧力とせん断力を同時に作用させる小型圧送性試験装置を用いて、圧送によるコンクリートの流動性の変化を評価する室内試験方法を検討した。当該試験方法で得られた結果を、前章の長距離圧送実験で生じたコンクリートの流動性の変化と比較した。また、同装置を用いて管内圧力の大小や管内流動の有無等を変えた圧送性試験、ならびにコンクリート中のセメント粒子の分散、骨材の吸水、混和剤吸着量等に着目した各種測定を行い、圧送によるコンクリートの流動性低下の要因を検討した。

6.2 小型圧送性試験装置

圧送によるコンクリートの流動性の変化を検討するために、コンクリートに圧力を加えながら配管内を流動させることで、圧送で生じる圧力およびせん断力をコンクリートに与える小型圧送性試験装置を設計、製作した。作栄ら⁶⁻²⁾はモルタルに圧縮力を作用させた後に、ミキサによる再練混ぜによりせん断力を作用させることで圧送により生じる流動性の変化を検討している。このように圧力とせん断力を別々に作用させる手法に対して、本研究では圧力とせん断力を同時に作用させることで圧送による影響の検討を試みた。室内試験規模で $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の高い圧力を加えつつ、配管内の試料を流動させて圧送による影響を検討した研究事例はこれまでにない。

小型圧送性試験装置全体の外観を写真 6.1 に、配管部の外観を写真 6.2 に、配管部の概略図を図 6.1 に示す。本装置はコンクリート試料が入る直管を連結し、その両端に試料投入口、シリンダーおよびロードセルを取り付けている。油圧で作動するシリンダーにより配管内の試料に圧力を加えつつ、試料を往復流動させる。両端のシリンダーは共に配管内の試料を押し方向に油圧が作動し、両シリンダーの油圧の大小に差を設けることで、油圧の小さい方のシリンダーが試料と共に押し、試料が配管内を流動する。所定の位置までシリンダーが移動したら両シリンダーの油圧の大小を切り換えることで、それまで押し側であったシリンダーが試料と共に押しされて反対方向に移動する。これを繰り返すことで配管内の試料を往復流動させる仕組みとした。両シリンダーの油圧を手動調整することで、管内圧力を任意の値に変えることができる。

長距離圧送実験の結果、 $21\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じたことを踏まえ、配管内に最大 $25\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧力を加えられる仕様とした。このような高い管内圧力を実現し、かつ室内で実施できる規模の装置とするために、輸送管の内径を $\phi 50\text{mm}$ と小さくして油圧ポンプ等を含めた装置全体の寸法を抑えることとした。室内規模の装置寸法とする点および後述するフレッシュ性状試験に要する試料

の量を確保する点を考慮して、配管の全長は 1100mm とし、長さ 300mm の直管を 2 本と、長さ 250mm の直管を 2 本連結するかたちとした。配管部の中央に連結した長さ 250mm の輸送管 2 本について、管内圧力を計測する圧力計を設置した。両端のシリンダーのストローク長は最大約 300mm、移動速度はおよそ毎秒 25mm であり、移動速度を管内試料の流速に換算すると 0.18m³/h と実際の圧送と比べて小さい。

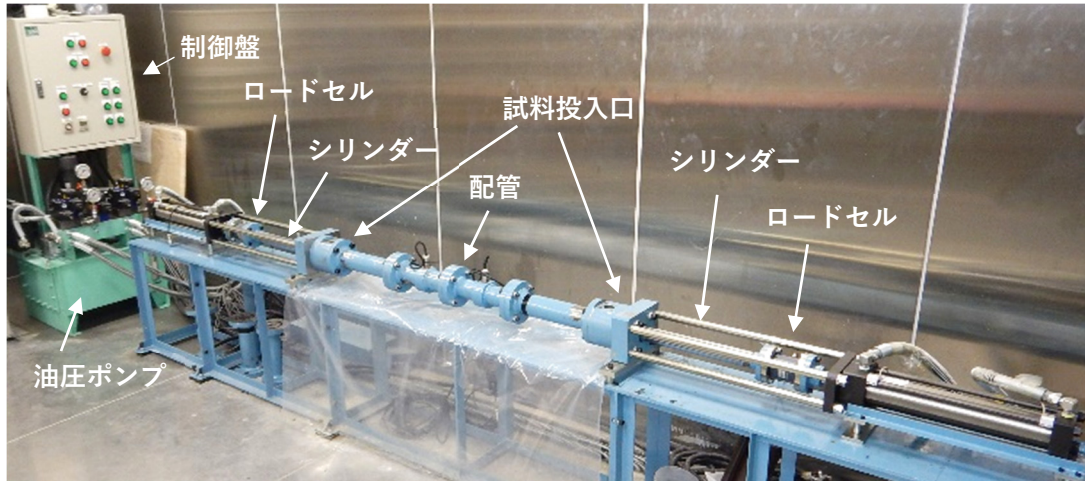


写真 6.1 小型圧送性試験装置全体の外観

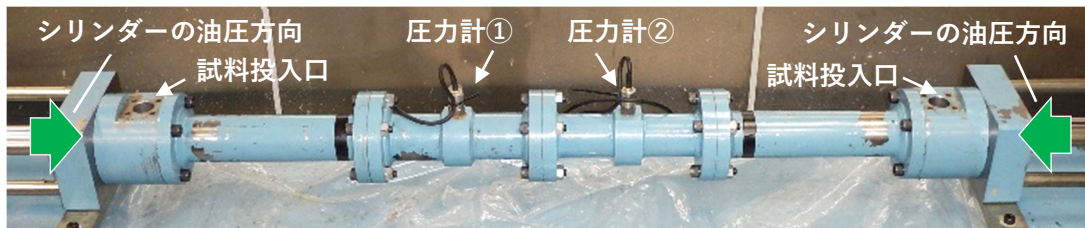


写真 6.2 配管部の外観

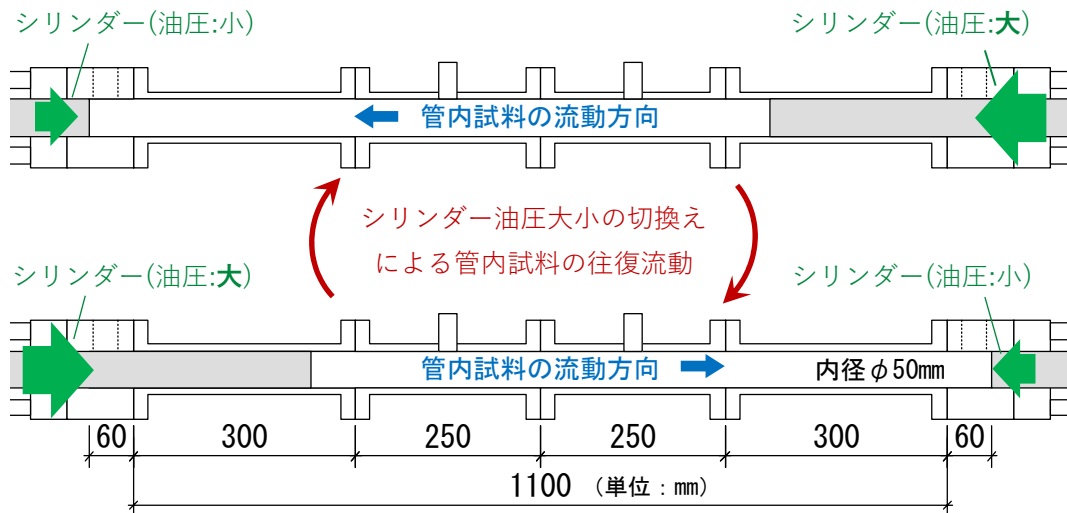


図 6.1 配管部の概略図

小型圧送性試験装置の輸送管内径が $\phi 50\text{mm}$ であるため、最大寸法 20mm の粗骨材を使用した通常のコンクリートでは、輸送管内径に対する粗骨材径の比率が長距離圧送実験と比べて過大となる。この違いが及ぼす影響については明確にできていないが、本実験では輸送管内径に対する粗骨材径の比率を同程度に合わせて検討することとし、コンクリートについては、ふるいにより 10mm を超える粗骨材を除いたコンクリート（以下、G10mmコンクリートという）を試験対象とした。このほかモルタルおよびセメントペーストを試験対象とした。また、通常のコンクリートと、G10mmコンクリートおよびモルタルのフレッシュ性状試験結果の相関を把握する予備実験を行い、G10mmコンクリートまたはモルタルのフレッシュ性状試験結果を、通常のコンクリートのフレッシュ性状試験結果に換算して比較することとした。

6.3 予備実験

6.3.1 実験概要

予備実験および6.4節の圧送性試験に用いたコンクリート（LCおよびHC）、G10mmコンクリート（LGCおよびHGC）、モルタル（LMおよびHM）およびセメントペースト（LPおよびHP）の使用材料および調合を表6.1および表6.2に、使用した粗骨材の粒度分布を図6.2に示す。コンクリートは前章の長距離圧送実験と同様の調合とした。ただし、ロットによる密度の違いにより一部の材料については異なる単位量となっている。コンクリートの調合から細骨材や粗骨材を除いてモルタルおよびセメントペーストの調合とした。LCの目標スランブは $23(\pm 2)\text{cm}$ 、HCの目標スランブフローは $70(\pm 10)\text{cm}$ とした。表6.1および表6.2に示す混和剤の使用量は、目標スランブおよび目標スランブフローを得るための数値を示した。予備実験における混和剤の使用量および実験手順は次のとおりである。

予備実験ではモルタルを先行して練り混ぜ、モルタルのフレッシュ性状試験を行った後に粗骨材の投入、練混ぜを行い、コンクリートのフレッシュ性状試験を行った。この手順を混和剤の使用量を変えて複数回実施し、モルタルとコンクリートのフレッシュ性状の相関を求めた。混和剤の使用量はコンクリートの単位セメント量に対して、LCでは $0.05\sim 0.92\%$ 、HCでは $0.7\sim 1.5\%$ の範囲で変えた。同様の手順でモルタルとG10mmコンクリートのフレッシュ性状の相関を求めた。混和剤の使用量はG10mmコンクリートの単位セメント量に対して、LGCでは $0.20\sim 0.92\%$ 、HGCでは $0.85\sim 1.45\%$ の範囲で変えた。

各試料のフレッシュ性状試験について、コンクリートではJIS A 1101によるスランブおよびJIS A 1150によるスランブフローを測定し、モルタルではJIS R 5201のフロー試験におけるフロー値（以下、15打フローという）と、上記フロー試験に従ってフローコーンを取り去った後のモルタルの広がり（以下、0打フローという）を測定した。なお、モルタルのフローについて、LMでは15打フローを、HMでは0打フローの値を使用した。また、室内規模のサイズとした小型圧送性試験装置では、配管内の試料の全量はおおよそ 2.1L であり、スランブ試験に要する試料の量が確保できないため、G10mmコンクリートではJIS A 1171によるスランブ試験におけるスランブ（以下、ミニスランブ）および当該スランブの広がり（以下、ミニスランブフロー）を測定することとした。実験は温度 20°C 、湿度 $70\%RH$ に設定した恒温恒湿室で実施した。

表 6.1 軽量コンクリート 1 種の使用材料および調合

記号	種類	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W1	C1	S1	S2	G1	SP1
LC	コンクリート	5.0	52	52.6	185	356	439	448	402	3.20
LGC	G10mm コンクリート	5.8	52	66.4	214	414	505	519	260	3.73
LM	モルタル	7.2	52	100	268	515	632	650	-	4.64
LP	セメントペースト	-	52	-	532	1023	-	-	-	-

W1：地下水
 C1：普通ポルトランドセメント，密度 3.15g/cm³
 S1：陸砂，表乾密度 2.55g/cm³，粗粒率 2.40
 S2：石灰石砕砂，表乾密度 2.62g/cm³，粗粒率 3.20
 G1：人工軽量粗骨材，絶乾密度 1.30g/cm³，実積率 64.0%，吸水率 28%
 SP1：高性能 AE 減水剤
 ※G1 の単位量は絶乾状態における値を示した。
 ※G1 の物性値は LC および LGC 共に同一の値を用いた。
 ※高性能 AE 減水剤の使用量は，目標のスランプを得るために単位セメント量の 0.9～1.2% の範囲で調整した。
 表中には上記範囲の代表的な単位量を示した。なお，セメントペーストには混和剤を使用しなかった。

表 6.2 高強度・高流動コンクリートの使用材料および調合

記号	種類	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W2	C2	S3	G2	SP2
HC	コンクリート	2.0	24.9	42.2	185	743	619	874	9.66
HGC	G10mm コンクリート	2.5	24.9	65.8	232	932	775	415	12.12
HM	モルタル	3.0	24.9	100	275	1104	913	-	14.35
HP	セメントペースト	-	24.9	-	424	1703	-	-	22.14

W2：上水道水
 C2：中庸熱ポルトランドセメント，密度 3.21g/cm³
 S3：山砂，表乾密度 2.60g/cm³，粗粒率 2.65
 G2：硬質砂岩砕石，表乾密度 2.68g/cm³，実積率 61.0%
 SP2：高性能 AE 減水剤
 ※G2 の物性値は HC および HGC 共に同一の値を用いた。
 ※高性能 AE 減水剤の使用量は，所定のスランプフローを得るために単位セメント量の 1.1～1.46% の範囲で調整した。表中には上記範囲の代表的な単位量を示した。

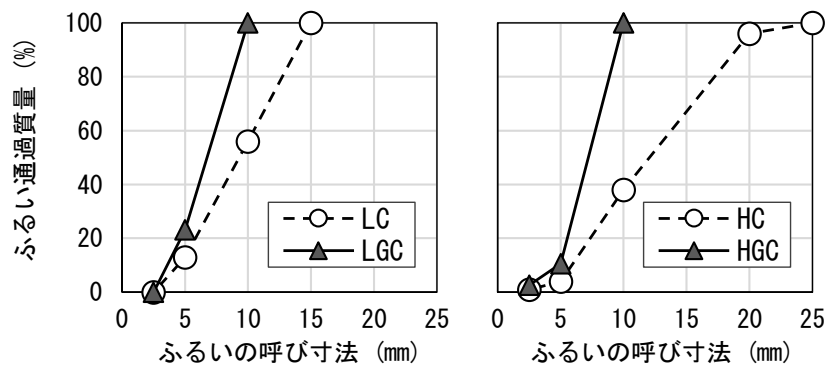


図 6.2 粗骨材の粒度分布

6.3.2 実験結果

各フレッシュ性状試験結果の関係を図 6.3 および図 6.4 に示す。それぞれ得られた関係から算出した回帰式は、いずれも決定係数 R^2 が 1 に近い結果であった。そのため、これらの回帰式を使用して G10mm コンクリートとコンクリートのフレッシュ性状の相関が高い精度で求められると判断し、G10mm コンクリートのミニスランプフロー測定結果をモルタルのフローに換算し、そのモルタルのフローをコンクリートのスランプ・スランプフローに換算することとした。具体的に LGC の場合、図 6.3 左図に示す回帰式および G10mm コンクリートのミニスランプフロー測定値から、モルタル 15 打フローを求め、そのモルタル 15 打フローおよび図 6.3 右図に示す回帰式から、コンクリートのスランプ・スランプフローを求めた。HGC の場合も同様に、図 6.4 左図に示す回帰式および G10mm コンクリートのミニスランプフロー測定値から、モルタル 0 打フローを求め、そのモルタル 0 打フローおよび図 6.4 右図に示す回帰式から、コンクリートのスランプフローを求めた。いずれもミニスランプよりもミニスランプフローの結果を用いた方が回帰式の決定係数が 1 に近く精度が高かったため、ミニスランプフローの結果のみを換算に使用した。なお、コンクリート、G10mm コンクリートおよびモルタルにおいては、みかけの降伏値や塑性粘度が異なる可能性があるが、本研究では上述した相関が得られた試験結果の値により比較することとした。

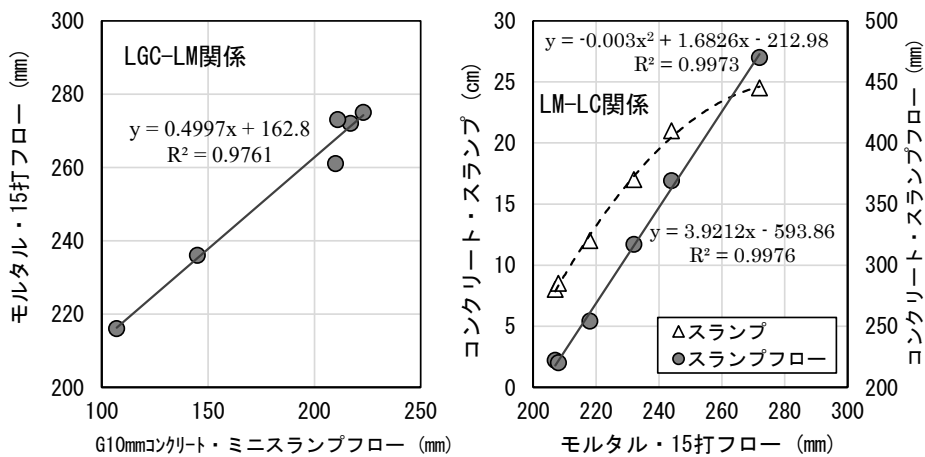


図 6.3 フレッシュ性状試験結果の関係 (LGC-LM および LM-LC)

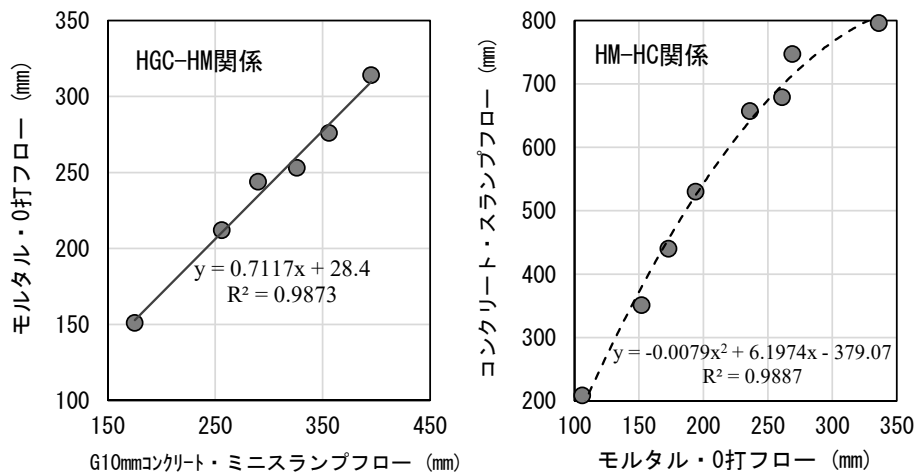


図 6.4 フレッシュ性状試験結果の関係 (HGC-HM および HM-HC)

6.4 圧送性試験

6.4.1 試験概要

圧送性試験には表 6.1 および表 6.2 に示した使用材料および調合を使用した。モルタルの練混ぜにはホバート型ミキサを用いた。練り上がり後にモルタルのフレッシュ性状試験を行い、所要の性状を確認した後に最大寸法 10mm にふるった粗骨材を投入し、手練りによる練混ぜを行った。練混ぜ量は G10mm コンクリートが 5.5L 得られる量とした。練り上がった G10mm コンクリートについて圧送性試験の実施直前にフレッシュ性状試験を行った。試料を 2L 採取して小型圧送性試験装置の配管内に投入し、投入側シリンダーを使用して片押しで配管内に試料を詰めていき、余分な空気を可能な限り排出した。配管内への試料の投入、充填が完了次第、投入側の蓋を閉め、両シリンダーによる試料の加圧および管内流動を所定の時間行った。その後、試料を配管から取り出して練り返し、フレッシュ性状試験を行った。その直後に、圧送性試験に用いずに静置させておいた試料のフレッシュ性状試験を行った。圧送性試験の実施直前のフレッシュ性状試験から、圧送性試験後のフレッシュ性状試験および静置試料のフレッシュ性状試験までの経過時間は、それぞれ 30～35 分程度および 40～45 分程度であった。フレッシュ性状試験として、G10mm コンクリートはミニスランプ、ミニスランプフロー、試料温度を、モルタルは 0 打フロー、15 打フロー、試料温度を、セメントペーストは 0 打フロー、試料温度を測定した。圧送性試験およびフレッシュ性状試験は温度 20°C、湿度 70%RH に設定した恒温恒湿室で実施した。

6.4.2 試験結果

圧送性試験における管内圧力履歴の例を図 6.5 に示す。同図には 2 箇所に設置した圧力計①および②の計測値と、これらの差(圧力計①の計測値から圧力計②の計測値を差し引いた値)を示しており、圧力差の絶対値は LGC では 0～0.35N/mm²、HGC では 0～0.80N/mm² の範囲で推移した。圧送性試験においても実際の圧送のように、管内圧力が筒元で最大となり筒先に向かって低下していく圧力履歴となるよう試みたが、圧送性試験の開始直後から高い管内圧力を作用させようとする、シリンダーの往復移動が円滑に行えず、シリンダーが停止する場合が見られた。圧送性試験でどのような管内圧力履歴とすれば圧送による流動性の変化を評価し得るか、いくつかのパターンを検討した結果、長距離圧送実験時の圧送に要した時間(LC では 590 秒、HC では 375 秒)で、最大管内圧力に到達する管内圧力履歴を与えることで、圧送による流動性の変化を評価できる可能性が得られた。この場合、長距離圧送実験と比較して管内圧力履歴すなわちコンクリートに与えられる圧力増減の勾配は異なるものの、最大管内圧力やコンクリートの積算受圧量は同程度になっている。梁らは、圧送性評価装置を用いた室内試験において、管内コンクリートの積算受圧量から、コンクリート品質の変化による閉塞が生じる圧送距離を評価しており⁶⁻³⁾、上述した本研究の圧送性試験における傾向も踏まえると、圧送によるコンクリート品質の変化に積算受圧量が関係している可能性が示唆された。

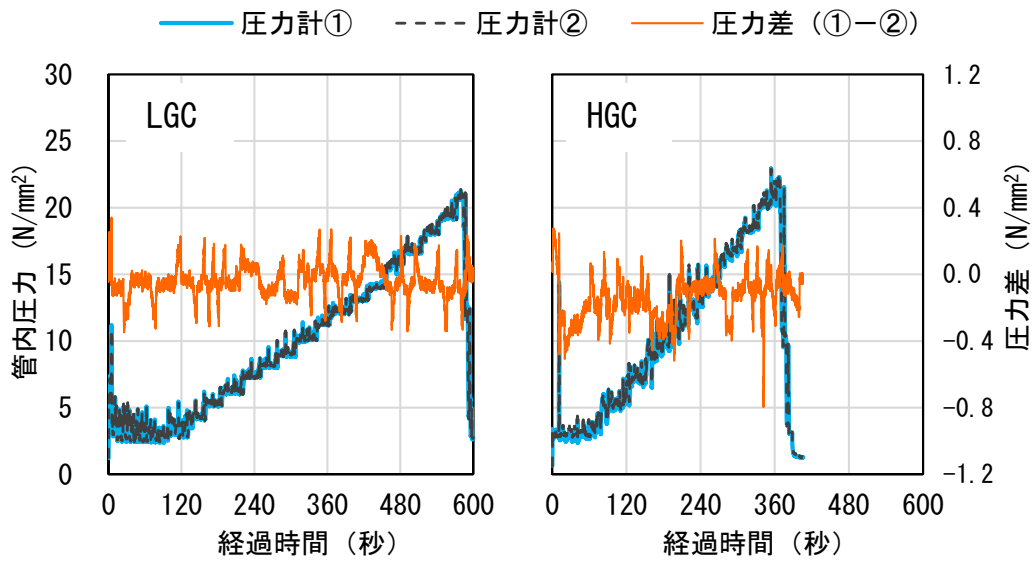


図 6.5 圧送性試験における管内圧力履歴

本論文では、試料が進行方向に受ける圧力に対し、管内流動によって管壁面に働くすべり抵抗力が反力となって、試料と管壁面との間にせん断力が働くと考え、このせん断力によって試料に生じたせん断応力が、流動性の低下に影響を及ぼすものとして考察した。ここで、文献6-4)をもとに式(6.1)により LGC および HGC に生じた見かけのせん断応力を算出して比較した。コンクリートが降伏値を有するビンガム流体であると仮定し、管内を流動するコンクリートの見かけのせん断応力は、配管断面の中心から半径方向に線形に増大する分布になるとして、ここでは管壁に接する試料の見かけのせん断応力を求めた。管内を流れるコンクリートの流速分布および見かけのせん断応力分布のモデルを図 6.6 に示す。

$$\tau_R = \frac{R \Delta P}{2 l} \quad (6.1)$$

ここに、 τ_R : 管壁に接する試料の見かけのせん断応力(N/mm²)
 R : 管半径(m)
 $\Delta P/l$: 管内圧力損失(N/mm²/m)

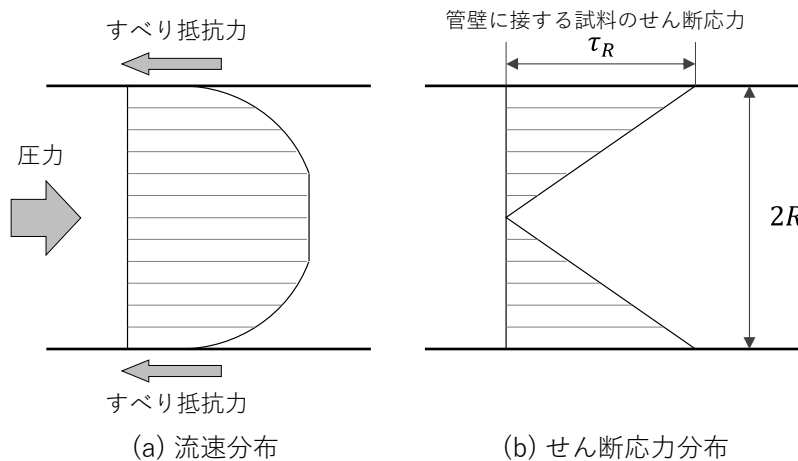


図 6.6 管内を流れるコンクリートの流速分布および見かけのせん断応力分布のモデル

図 6.5 に示したように、圧力計①および②の圧力差は局所的に大きく上下した。そこで、0.1 秒間隔で計測された圧力差の絶対値を試験時間で積分し、合計の試験時間 (LGC:590 秒, HGC:375 秒) で除した値を平均的な圧力差とし、それを両圧力計間の距離 0.25m で除して管内圧力損失を求めることとした。平均的な圧力差、管内圧力損失および管壁に接する試料の見かけのせん断応力は、LGC ではそれぞれ 0.082N/mm^2 , $0.328\text{N/mm}^2/\text{m}$, 0.0041N/mm^2 , HGC ではそれぞれ 0.167N/mm^2 , $0.668\text{N/mm}^2/\text{m}$, 0.0084N/mm^2 であり、LGC よりも HGC の方が、管壁に接する試料の見かけのせん断応力が大きかった。コンクリートの粘性が大きいと管内圧力損失も大きくなると考えられており⁶⁻¹⁾、本実験でも同様に、水セメント比が小さく粘性の大きい HGC の方が LGC よりも管内圧力損失が大きく、見かけのせん断応力も大きくなったと考えられる。

圧送試験前後のフレッシュ性状試験結果を表 6.3 に示す。経時変化の影響を考慮し、静置試料と圧送性試験後の試験結果を比較することで、圧送によるコンクリートの品質変化を検討した。また、前章の長距離圧送実験における一部のフレッシュ性状試験結果を表 6.4 に、長距離圧送実験のスランブフローおよび圧送性試験のスランブフロー換算値の比較を図 6.7 に示す。長距離圧送実験におけるスランブフローと、圧送性試験におけるスランブフロー換算値は概ね近い傾向となった。すなわち LC の荷卸し 47.5cm に対して LGC の圧送性試験前 46.2cm, LC の静置 42.5cm に対して LGC の静置 43.9cm, LC の筒先 24.0cm に対して LGC の圧送性試験後 29.1cm となり、HC の荷卸し 73.5cm に対して HGC の圧送性試験前 72.4cm, 静置 76.0cm に対して HGC の静置 74.1cm, HC の筒先 42.5cm に対して HGC の圧送性試験後 45.4cm となった。

また、長距離圧送実験では筒先のコンクリート温度が経時と比べて $6\sim 7^\circ\text{C}$ 高くなった。一方、圧送性試験においては次章の試験結果も含めると、圧送性試験後の試料温度が静置と比べて最大 6.3°C 高くなっており、長距離圧送実験と同程度の温度変化となった。温度に関する考察は次章の試験結果と合わせて後述する。

表 6.3 圧送性試験前後のフレッシュ性状試験結果

調合	試験時期	圧送性試験直前からの経過時間 (分)	ミニスランプ (cm)	ミニスランプフロー (mm)		スランプ換算値 (cm)	スランプフロー換算値 (cm)	試料温度 (°C)
					平均			
LGC	圧送性試験前	0	12.4	215 × 211	213	22.6	46.2	20.8
	静置	43	12.0	204 × 199	202	22.1	43.9	20.3
	圧送性試験後	37	8.9	130 × 122	126	14.0	29.1	21.0
HGC	圧送性試験前	0	13.9	346 × 342	344	-	72.4	22.2
	静置	42	13.9	358 × 356	357	-	74.1	21.0
	圧送性試験後	36	12.0	204 × 200	202	-	45.4	23.3

表 6.4 長距離圧送実験におけるフレッシュ性状試験結果

調合	実吐出量 (m ³ /h)	最大管内圧力 (N/mm ²)	試験時期	荷卸しからの経過時間 (分)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)		50cm フロー到達時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)
							平均				
LC	50.0	21.0	荷卸し	0	24.5	47.6 × 47.3	47.5	-	5.0	15	10
			静置	54	22.5	42.8 × 41.8	42.5	-	5.6	14	11
			筒先	55	10.5	24.2 × 23.8	24.0	-	4.2	21	11
HC	40.2	21.3	荷卸し	0	-	73.6 × 73.1	73.5	4.3	1.4	20	15
			静置	40	-	76.9 × 75.5	76.0	3.6	0.9	19	15
			筒先	44	-	43.2 × 41.3	42.5	-	1.5	25	15

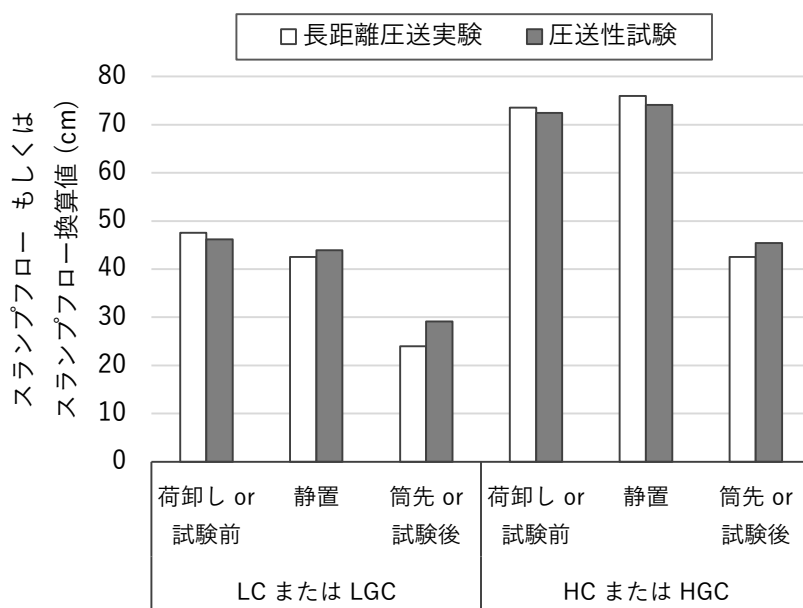


図 6.7 長距離圧送実験のスランプフローおよび圧送性試験のスランプフロー換算値の比較

小型圧送性試験装置を用いて、実際の高圧圧送と同等の最大管内圧力および圧送時間の条件による圧送性試験を行うことで、圧送によるコンクリートのスランプ、スランプフローの変化を評価できる可能性を得た。本手法では、コンクリートに圧力とせん断力が同時に作用する点や、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の高い管内圧力が生じる点について実際の圧送状況を再現している。一方で、試料が配管内を往復することや管内試料の流速が小さいこと、脈動を再現していないこと、輸送管内径が $\phi 50\text{mm}$ であることなど実際の圧送とは異なる条件もある。これらの実際の圧送と異なる条件の影響、ならびに本研究の実施調合以外の様々な調合を対象とした圧送によるスランプ・スランプフローの変化の評価方法については今後の課題とし、本手法の信頼性や汎用性を高めるために検討を続けていく。

次節では、小型圧送性試験装置を用いて管内圧力の大小や管内流動の有無等を変えた圧送性試験を行い、高圧圧送による圧力およびせん断力が流動性低下に及ぼす影響を検討した。続く6.6節では、高圧圧送によるコンクリートの流動性変化の要因を検討するべく、コンクリート中のセメント粒子の分散、骨材の吸水、混和剤吸着量等に着眼した各種測定を行い、圧送によってコンクリートに生じる各種変化を検証した。

6.5 高圧圧送による圧力およびせん断力が流動性低下に及ぼす影響の検討

6.5.1 試験概要

LGCおよびHGCについて、前述した圧送性試験を管内圧力の大小や管内流動の有無（せん断力の作用の有無）、骨材の有無等を変えて実施し、これらが圧送後の流動性低下に及ぼす影響を検討した。

各試験条件の流動性低下量を比較するにあたり、G10mmコンクリートの圧送性試験について、配管内への試料の投入から取り出しまでの手順を行うだけで生じる流動性の低下量を確認した。その結果、管内圧力や管内流動を生じさせず、前述した圧送時間すなわちLGCでは590秒間、HGCでは375秒間だけ配管内で静置させた試料についても流動性が若干低下した。その低下量はLGCがスランプ換算値 -2.0cm 、スランプフロー換算値 -4.7cm 、HGCがスランプフロー換算値 -1.9cm であった。この流動性の低下には、本試験装置の投入口から試料を投入後、シリンダーを押して配管内に試料を充填させる際に、わずかに圧力やせん断力が試料に作用してしまうこと、ならびに、配管内から試料を取り出す作業時に、管内およびシリンダー表面にわずかに残存してしまうセメントペーストや、作業者の手袋等に付着するセメントペーストにより、G10mmコンクリート中におけるセメントペーストの割合が低下することが影響したと考えられる。配管内への試料の投入および取出しの際には、上記の影響が過大とならないよう留意して作業を行っていたが、影響をゼロにすることは難しいと考え、上述した低下量をオフセット値として各試験の低下量から差し引くこととした。なお、長距離圧送実験においては先送りモルタルを圧送して予め配管内表面にモルタルを付着させているため、セメントペーストの損失は生じていないものとして扱うこととした。

6.5.2 試験結果

G10mmコンクリートのフレッシュ性状試験結果を表6.5に、圧送性試験後のスランプフロー換算値の低下量を図6.8に示す。図6.8(a)より、LGCおよびHGC共に管内圧力を最大 $21\text{N}/\text{mm}^2$ 程度とした場合に、管内流動無し（せん断力の作用無し）の条件よりも管内流動有り（せん断力の作用有り）の条件の方が、スランプ・スランプフロー換算値の低下量が大きくなった。また、管内流動無しの低下量に対する管内流動有りの低下量の比率は、LGCでは1.8、HGCでは5.4と明確に差があることが確認された。前述したように、管壁に接する試料の見かけのせん断応力は、LGCでは $0.0041\text{N}/\text{mm}^2$ 、HGCでは $0.0084\text{N}/\text{mm}^2$ と、LGCよりもHGCの方が管壁に接する試料の見かけのせん断応力が大

きくなっており、これが流動性の低下量の違いに影響を及ぼした要因のひとつと考えられる。

表 6.5 フレッシュ性状試験結果 (G10mm コンクリート)

調査	最大管内圧力 (N/mm ²)	管内流動	試験時期	ミニスランブ (cm)	ミニスランブフロー (mm)	スランブ換算値 (cm)		スランブフロー換算値 (cm)		試料温度 (°C)		
						低下量		低下量				
							オフセット後		オフセット後			
LGC	0 (オフセット)	無し	静置	11.3	191	21.4	-2.0	0.0	41.8	-4.7	0.0	22.3
			装置内静置後	11.3	167	19.4			37.1			21.3
	21	無し	静置	11.5	188	21.3	-6.4	-4.4	41.3	-11.1	-6.4	21.5
			圧送性試験後	8.5	132	14.9			30.2			21.4
	21	有り	静置	11.8	192	21.5	-10.4	-8.4	42.1	-16.2	-11.5	21.4
			圧送性試験後	5.3	110	11.1			25.9			22.7
	5	有り	静置	12.1	210	22.5	-6.2	-4.2	45.6	-13.4	-8.7	21.6
			圧送性試験後	9.0	142	16.3			32.2			22.3
HGC	0 (オフセット)	無し	静置	14.1	367	-	-	-	75.3	-1.9	0.0	23.8
			装置内静置後	14.1	351	-			73.4			22.5
	21	無し	静置	14.1	368	-	-	-	75.4	-6.9	-5.0	22.6
			圧送性試験後	13.7	317	-			68.5			22.3
	21	有り	静置	14.0	366	-	-	-	75.1	-28.9	-27.0	22.5
			圧送性試験後	12.5	206	-			46.2			26.0
	5	有り	静置	14.1	368	-	-	-	75.4	-16.7	-14.8	22.7
			圧送性試験後	13.0	262	-			58.7			25.6

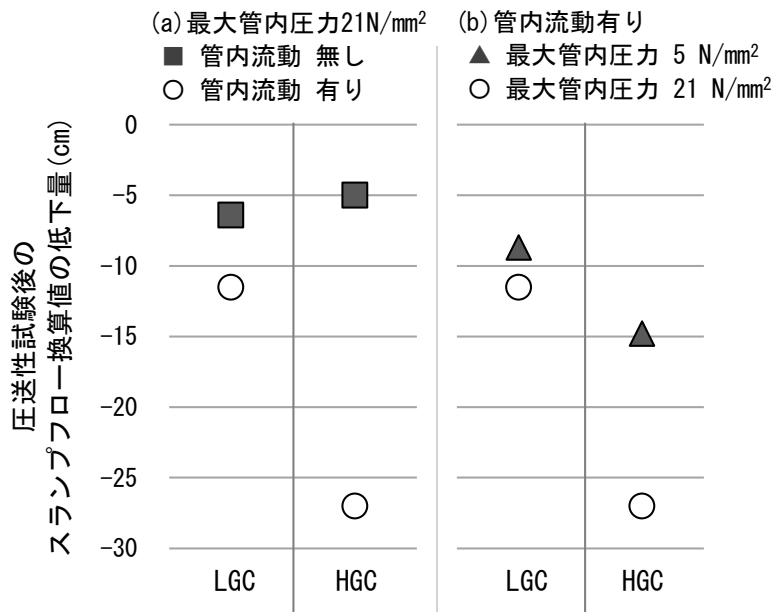


図 6.8 圧送性試験後のスランブフロー換算値の低下量

図 6.8(b)より, LGC および HGC 共に管内流動有りの場合に, 最大管内圧力が 5N/mm² よりも 21N/mm² の方がスランプ・スランプフロー換算値の低下量が大きくなった。管内圧力の大小がコンクリートの流動性の低下に影響することが確認された。最大管内圧力 5N/mm² の低下量に対する 21N/mm² の低下量の比率は, LGC では 1.3, HGC では 1.8 であった。これらの比率に対する前述した管内流動の有無による低下量の比率を LGC および HGC それぞれ算出するとその値は異なり, LGC では $1.8/1.3 \approx 1.4$, HGC では $5.4/1.8 = 3.0$ となった。流動性の低下に及ぼす「圧力」と, 管内流動によってコンクリートに生じる「せん断応力」の影響の度合いは, コンクリートの種類によって異なると考えられる。本実験の結果では, LGC よりも HGC の方が, 圧送によるスランプ・スランプフローの低下量に及ぼすせん断応力の影響が大きいことが分かった。

モルタルおよびセメントペーストのフレッシュ性状試験結果を表 6.6 に示す。いずれもモルタルやセメントペーストでは流動性の低下がほとんど生じなかったことから, 圧送によるコンクリートの流動性の低下には粗骨材の存在が大きく影響していることが分かった。この要因としては, 粗骨材の圧力吸水, 欠損やすりへりによる骨材の細粒分の増大, コンクリート中の粗骨材の流動によってセメントペーストやモルタルに及ぼすせん断力などの影響と推察した。

圧送性試験後のセメントペーストおよびモルタルの試料温度は静置と比べて 0.6~1.8°C 低くなる結果となった。これは, 試料温度が 20°C の室内に置かれた鋼製輸送管の表面温度に近づいたものと考えられる。この結果から, 長距離圧送実験における圧送後のコンクリート温度および圧送性試験後のコンクリート温度が上昇した現象は, 粗骨材と管壁面の摩擦による温度上昇と考えられる。この上昇したコンクリート温度が流動性の低下に影響を及ぼしている可能性も考えられるが, 長距離圧送実験における圧送や圧送性試験に要する時間は 6~10 分程度であり, この短時間における温度上昇が流動性の低下に及ぼす影響は小さいと考えた。なお, 長距離圧送実験におけるコンクリート温度の変化量と, 圧送性試験におけるコンクリート温度の変化量は同程度であることから, 温度による影響も長距離圧送実験および圧送性試験では同程度として考察した。

以上より, 圧送による流動性低下に影響を及ぼす外力を圧力およびせん断力に分け, これらの外力によってコンクリートに生じる変化を表 6.7 に示すとおり仮定した。

表 6.6 フレッシュ性状試験結果 (モルタル・セメントペースト)

調合	種類	最大管内圧力 (N/mm ²)	管内流動	試験時期	0打	15打	スランプ		スランプフロー		試料温度 (°C)
					70- (mm)	70- (mm)	換算値 (cm)	低下量	換算値 (cm)	低下量	
LM	モルタル	21	有り	静置	193	284	22.9	-0.2	51.8	-4.9	22.1
				圧送性試験後	171	271	22.7		46.9		21.5
LP	セメントペースト	21	有り	静置	286	-	-	-	-	-	22.3
				圧送性試験後	276	-	-		-		21.7
HM	モルタル	21	有り	静置	273	-	-	-	72.3	1.8	23.8
				圧送性試験後	283	-	-		74.1		22.5
HP	セメントペースト	21	有り	静置	322	-	-	-	-	-	24.8
				圧送性試験後	339	-	-		-		23.0

表 6.7 圧送によってコンクリートに生じる変化の仮定および測定項目

外力	圧送によってコンクリートに生じる変化の仮定	左記仮定を検証するための測定項目
圧力	・細骨材や粗骨材の圧力吸水によるセメントペースト中の水分の減少	・骨材の含水率
せん断力	・部分的に凝集したセメント粒子の分散による、セメント粒子表面の総吸着可能面積の増大 ・水和の促進、凝結時間の短縮 ・混和剤吸着量の変化 ・細骨材や粗骨材の欠損、すりへりによる細粒分の増加	・セメント粒子の総吸着可能面積 ・凝結時間 ・混和剤吸着量 ・骨材粒度分布

圧力による影響について、軽量骨材のように吸水率の大きい細骨材もしくは粗骨材を使用する場合には、骨材への圧力吸水によりセメントペースト中の水分が減少することが、流動性低下の要因になり得ると考えられる。なお、本研究で検討した調合においては、圧送性試験でモルタルの流動性の低下がほとんど生じなかった結果から、細骨材の圧力吸水は流動性に影響を及ぼしていないと判断し、細骨材の含水率測定は行わず、粗骨材の含水率測定のみを行った。

せん断力による影響については、圧送時のせん断力によってコンクリート中の部分的に凝集したセメント粒子が分散してセメント粒子の表面積が増大した、すなわち高性能 AE 減水剤が吸着可能なセメント粒子表面の総面積(以下、セメント粒子の総吸着可能面積という)が増大したものと仮定した。本研究ではこのセメント粒子の総吸着可能面積を、窒素吸着法一点式により測定した BET 比表面積で評価した。また、部分的に凝集したセメント粒子が分散することで、水和の促進や凝結時間の短縮が起き、セメント粒子の総吸着可能面積が増大することで、混和剤吸着量の変化が生じると仮定した。

さらに圧送時には、粗骨材同士または粗骨材と周囲の細骨材や管壁との間で生じる衝突および摩擦によって、粗骨材に欠損やすりへりが生じ、コンクリート中の骨材の粒度が細くなることで流動性が低下すると仮定した。

圧送性試験でセメントペーストおよびモルタルの流動性の低下がほとんど生じなかった結果から、セメントペーストやモルタルの圧送によって生じるせん断力は流動性にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。しかし、粗骨材の混入によって流動性の低下が生じた結果から、粗骨材が混入されることで、圧送時に粗骨材がコンクリート中を流動してセメントペーストやモルタルにせん断力を作用させ、コンクリートの流動性に影響を及ぼすものと推察した。作栄ら⁶⁻²⁾はミキサによる練混ぜによってモルタルにせん断力を作用させることで、セメント粒子が分散することや、高性能 AE 減水剤の吸着量が増加することを示している。粗骨材が混入することで生じる圧送時のせん断力によっても同様の現象が起きると想定した。

次節では、小型圧送性試験装置を用いた室内試験ならびに表 6.7 に示す各種測定を行い、上述した圧送によってコンクリートに生じる変化の仮定を検証した。

6.6 高圧圧送によってコンクリートに生じる各種変化の検証

G10mm コンクリートを用いて最大管内圧力 21N/mm² 以上、管内流動有りの条件で圧送性試験を行い、圧送性試験後の試料および静置した試料のフレッシュ性状試験を実施した後、各試料について表 6.7 に示した各種測定を行った。また、予め 105°C で絶対乾燥状態にした人工軽量粗骨材を用いた LGC について、上記と同様に圧送性試験およびフレッシュ性状試験を実施した後、粗骨材の含水率の測定を行った。圧送性試験におけるフレッシュ性状試験結果と測定項目の組合せを表 6.8 に示す。

表 6.8 圧送性試験結果と測定項目の組合せ

調合	試験時期	ミニスランプ (cm)	ミニスランプ フロー (mm)		スランプ 換算値 (cm)		スランプ ロー換算値 (cm)		試料 温度 (°C)	測定項目
			平均	低下量	平均	低下量				
LGC	静置	12.7	223 × 217	220	22.8	-8.7	47.6	-18.3	21.3	セメント粒子の 比表面積
	圧送性試験後	8.8	132 × 122	127	14.1		29.3		21.3	
	静置	13.0	233 × 232	233	22.9	-8.6	50.0	-20.5	21.1	凝結時間
	圧送性試験後	9.3	130 × 126	128	14.3		29.5		21.4	
	静置	12.5	218 × 206	212	22.5	-7.3	46.0	-15.4	20.9	混和剤吸着量
	圧送性試験後	8.3	137 × 130	134	15.2		30.6		21.5	
	静置	12.9	236 × 225	231	22.9	-7.4	49.6	-18.5	21.8	骨材粒度分布, 粗骨材の含水率
	圧送性試験後	9.2	140 × 132	136	15.5		31.1		22.3	
LGC 絶乾 粗骨材	静置	12.3	244 × 242	243	22.9	-11.4	52.1	-25.7	20.5	粗骨材の含水率
	圧送性試験後	4.5	114 × 110	112	11.5		26.4		22.0	
HGC	静置	14.0	357 × 356	357	-	-	74.1	-45.8	21.3	セメント粒子の 比表面積
	圧送性試験後	8.7	140 × 139	140	-		28.3		25.0	
	静置	14.2	362 × 349	356	-	-	73.9	-48.4	22.4	凝結時間
	圧送性試験後	9.0	131 × 129	130	-		25.5		28.7	
	静置	14.0	352 × 349	351	-	-	73.3	-31.5	20.5	混和剤吸着量
	圧送性試験後	12.5	189 × 187	188	-		41.8		24.2	
	静置	14.0	351 × 341	346	-	-	72.7	-49.5	20.1	骨材粒度分布, 粗骨材の含水率
	圧送性試験後	7.9	124 × 121	123	-		23.2		26.1	

6.6.1 粗骨材の含水率

粗骨材の含水率は、ウェットスクリーニングにより採取した粗骨材について、骨材表面の水分を布でふき取った後の質量および105°Cで絶対乾燥状態にした質量を測定して算出した。

粗骨材の含水率測定結果を図6.9に示す。LGCの圧送性試験後の粗骨材含水率は+0.2%と大きな変化量では無かった。しかし、軽量粗骨材を絶対乾燥状態で使用した場合に、圧送性試験後の粗骨材含水率は+11.8%と非常に大きくなり、流動性の低下量も大きくなった。本装置による圧送性試験においても、軽量粗骨材が十分に含水していないと圧送時にコンクリート中の水分が吸水されることが確認され、この現象が流動性低下の要因になり得ることが示唆された。一方HGCでは、圧送性試験後の粗骨材含水率は-0.03%であり、ほとんど変化が生じなかった。

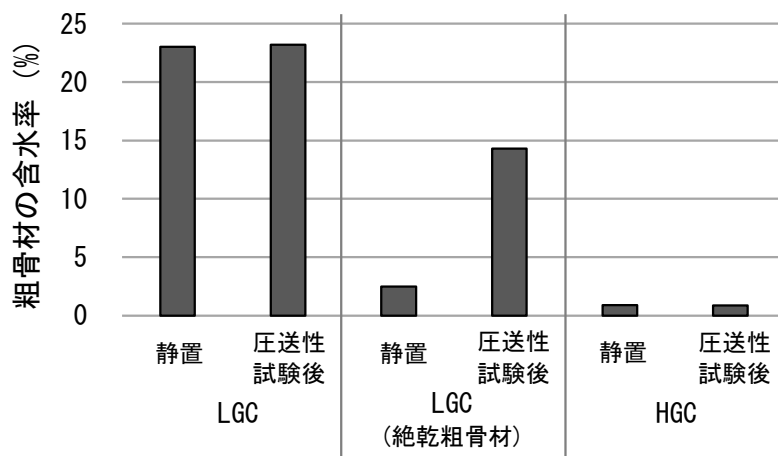


図 6.9 粗骨材の含水率

6.6.2 凝結時間

凝結時間は、ウェットスクリーニングにより採取したモルタルについて、自動凝結試験装置を用いて測定した。

凝結時間測定結果を図6.10に示す。圧送性試験後の凝結時間は、LGCでは始発が59分、終結が38分早くなり、HGCでは始発が2時間22分、終結が3時間38分早くなった。水和の促進や高性能AE減水剤の粒子分散効果の低下が生じると、凝結時間は短くなる。圧送によってコンクリートに上記の現象が起きた可能性が示唆された。水和の促進に関する考察は、セメント粒子の比表面積の測定結果と合わせて後述する。また、高性能AE減水剤の粒子分散効果の低下に関する考察は、混和剤吸着量の測定結果と合わせて後述する。

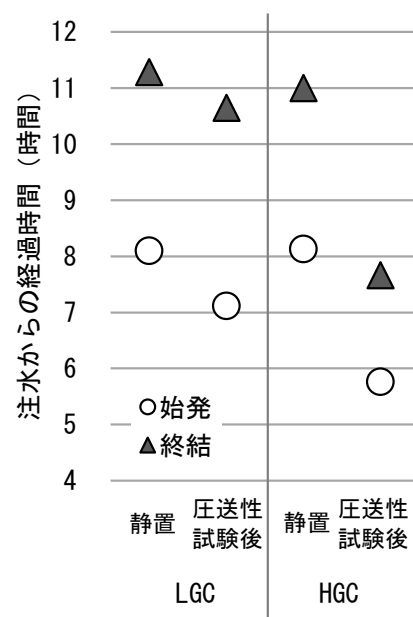


図 6.10 凝結時間

6.6.3 セメント粒子の総吸着可能面積

セメント粒子の総吸着可能面積の測定手順は次のとおりとした。ウェットスクリーニングにより採取したモルタルをアセトンと混合、攪拌し、吸引ろ過によりモルタルの固相部を取り出す作業を3回繰り返した後、モルタルの固相部をアセトンに1日浸漬した。40°Cで24時間以上乾燥させた後の固相部を0.075mmでふるって粉末試料とし、105°Cで乾燥させて測定用試料とした。測定用試料について窒素吸着法一点式により測定したBET比表面積を、セメント粒子の総吸着可能面積とした。

セメント粒子の総吸着可能面積の測定結果を図6.11に示す。圧送性試験後のセメント粒子の総吸着可能面積は、LGCでは3.04m²/gから3.14m²/gに、HGCでは2.88m²/gから3.30m²/gに増大した。菅俣ら⁶⁻⁵⁾は、ミキサの練混ぜ時間を10~30分程度延長することにより、中庸熟ポルトランドセメントを使用したモルタルにおけるセメント粒子の比表面積が、およそ2.8m²/gから3.2~3.3m²/gに増大することを確認しており、本研究のHGCにおけるセメント粒子の総吸着可能面積の増大量は、これと同程度であった。

高橋ら⁶⁻⁶⁾は、攪拌や圧送の外力を受けたモルタルは、フローが小さく、凝結時間が短くなることを実験により確認し、このメカニズムを次のとおり考察している。攪拌や圧送の外力による過剰なせん断によって、セメントの接水後にセメント粒子表面に析出した水和物の剥離や、セメント粒子表面に形成される保護層の破壊および電気層の薄化が生じ、粒子表面が拡大(新しい表面が生成)する。その結果、流動化剤の吸着量が増大し、水和物の剥離と流動化剤の吸着が繰り返され、溶液中にある活性状態の流動化剤が減少し不足することで流動性が変化する。水和過程においては、加速期における水和物の析出が早まり、水和が促進され、凝結が促進するとしている。

本実験において、圧送性試験後に凝結時間が短くなり、セメント粒子の総吸着可能面積が増大した結果を踏まえると、圧送性試験においても高橋ら⁶⁻⁶⁾の実験結果と同様に、外力による過剰なせん断によって、セメント粒子表面の拡大(新しい表面の生成)が起きたと推察した。

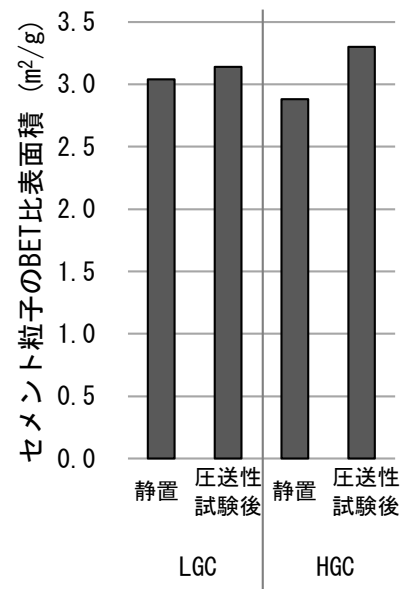


図 6.11 セメント粒子の総吸着可能面積

6.6.4 混和剤吸着量

混和剤吸着量の測定手順は次のとおりとした。ウェットスクリーニングにより採取したモルタルを遠心分離器にかけて液相を採取し、TOC計を用いて全有機炭素量を測定した。この液相中に残存している混和剤量(以下、未吸着量)を、混和剤添加量から差し引いて得られた値を吸着量とした。

高性能AE減水剤の吸着量および未吸着量の測定結果を図6.12に示す。LGCおよびHGC共に圧送性試験後の吸着量は増大し、未吸着量は減少した。前述したとおり、高橋ら⁶⁻⁶⁾によると攪拌や圧送の外力による過剰なせん断によって流動化剤の吸着量が増大し、溶液中にある活性状態の流動化剤が減少するとしている。また、菅俣ら^{6-5), 6-7)}によると、ミキサによる練混ぜ時間の延長に伴い、高性能AE減水剤の吸着量が増加し、ある練混ぜ時間以降になると高性能AE減水剤の粒子分散効果が低下

すること、また、液相中に残存している高性能 AE 減水剤すなわち未吸着量が減少すると、高性能 AE 減水剤の粒子分散効果が小さくなることを確認している。本研究の圧送性試験においても、高性能 AE 減水剤の吸着量の増大および未吸着量の減少はせん断応力によって生じたと推察され、これが圧送によるコンクリートの流動性の変化に影響を及ぼしたものと考えられる。さらに高い管内圧力が作用した場合、管内圧力損失が大きくなるため、コンクリートに生じるせん断応力が増大し、吸着量の増大および未吸着量の減少の程度も大きくなると考えられる。

未吸着の高性能 AE 減水剤が分散効果を示す仕組みとしてデプレッション分散安定化効果⁶⁻⁸⁾が挙げられる。これは、未吸着高分子あるいは飽和吸着後の余剰高分子が溶液中に存在する場合、分散粒子が接近してもその隙間に余剰高分子が存在し、粒子が凝集できずに粒子の分散安定化に作用する効果である。特に高強度コンクリートのような富調合な系では、減水剤を過剰添加し所要の流動性を得ていることが多く、このような場合、減水剤が結合材粒子に吸着せずにフリーな状態で存在し、分散安定化に大いに寄与すると考えられている⁶⁻⁹⁾。本実験の場合、未吸着量の減少による流動性低下への影響は、LGC よりも富調合である HGC の方が大きいものと考えられる。

混和剤の吸着量および未吸着量をセメント粒子の総吸着可能面積で除して算出した単位セメント表面積当たりの吸着量および未吸着量を図 6.13 に示す。圧送性試験後の単位セメント表面積当たりの吸着量は、LGC では $0.86\text{mg}/\text{m}^2$ から $0.85\text{mg}/\text{m}^2$ に、HGC では $1.44\text{mg}/\text{m}^2$ から $1.42\text{mg}/\text{m}^2$ に減少した。図 6.12 に示すとおり圧送性試験後の吸着量は増大したものの、図 6.11 に示すとおり圧送性試験後のセメント粒子の総吸着可能面積も増大したため、結果として単位セメント表面積当たりの吸着量は減少した。菅俣ら⁶⁻⁵⁾は、ミキサの練混ぜ時間を 10~30 分程度延長することにより、中庸熟ポルトランドセメントを使用したモルタルにおける単位セメント表面積当たりの吸着量が、およそ $2.75\text{mg}/\text{m}^2$ から $2.65\sim 2.72\text{mg}/\text{m}^2$ に減少することを確認している。また、単位セメント表面積当たりの吸着量が多いほど高性能 AE 減水剤の粒子分散効果が大きくなることを示している。本実験においても同様に、単位セメント表面積当たりの吸着量の減少によって、高性能 AE 減水剤の粒子分散効果が小さくなり、コンクリートの流動性が低下したと考えられる。

混和剤の未吸着量についても同様に単位セメント表面積当たりの未吸着量を用いて比較すると、圧送性試験後の上記未吸着量は、LGC では $0.16\text{mg}/\text{m}^2$ から $0.13\text{mg}/\text{m}^2$ に、HGC では $0.95\text{mg}/\text{m}^2$ から $0.67\text{mg}/\text{m}^2$ に減少した。その減少量および減少率は LGC よりも HGC の方が大きくなっていることから、前述したとおり未吸着量の減少による流動性低下への影響は HGC の方が大きいと考えられる。

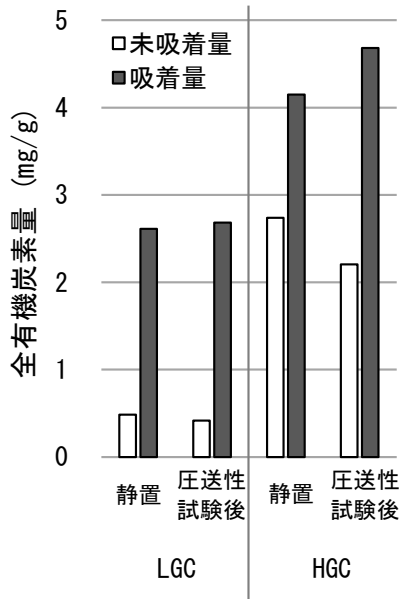


図 6.12 混和剤の吸着量および未吸着量

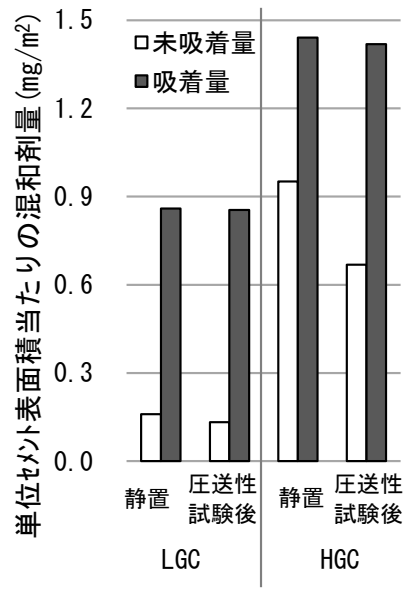


図 6.13 単位セメント表面積当たりの混和剤量

6.6.5 骨材粒度分布

骨材粒度分布は、G10mm コンクリート試料を水洗いしながらふるい分けを行い、各試料を 105°C で乾燥させた後に質量を測定して求めた。ふるい分けには呼び寸法 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15mm のふるいを使用した。

骨材の粒度分布測定結果を図 6.14 に示す。LGC では静置および圧送性試験後の粒度分布はほぼ同等であるのに対し、HGC では圧送性試験後の粒度分布が細かい方へ若干シフトする傾向が見られた。具体的に HGC では、ふるいの呼び寸法 5mm に残留する質量分率が圧送性試験後に 3.8%減少し、ふるいの呼び寸法 2.5, 1.2, 0.6, 0.3mm に残留する質量分率が圧送性試験後にそれぞれ 0.2, 1.8, 0.8, 0.9%増大した。コンクリートの調合や使用骨材の種類によっては、圧送により骨材粒度分布における細粒分が増加する可能性が見られた。

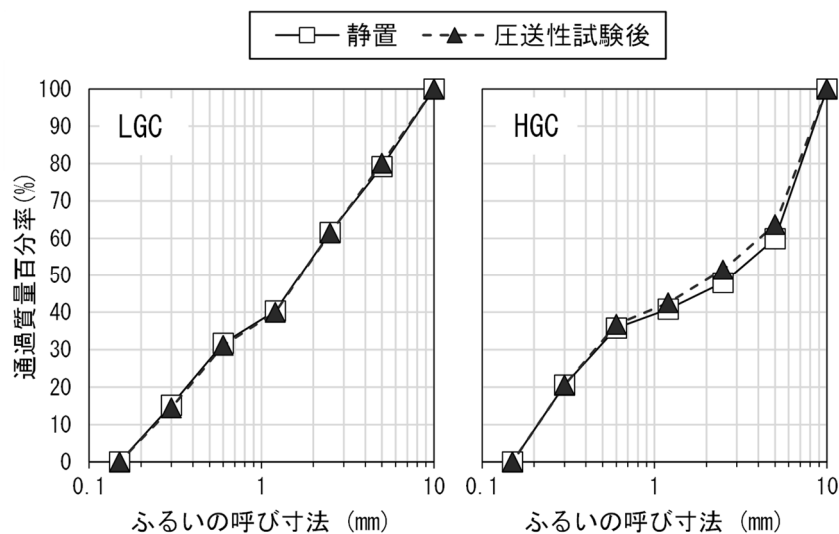


図 6.14 骨材の粒度分布

6.7 まとめ

本章では、圧送を模擬してコンクリートに圧力とせん断力を同時に作用させる小型圧送性試験装置を用いて、圧送によるコンクリートの流動性の変化を評価する室内試験方法を検討した。当該試験方法で得られた結果を、前章の長距離圧送実験で生じたコンクリートの流動性の変化と比較した。また、本試験装置を用いて管内圧力の大小や管内流動の有無等を変えた圧送性試験、ならびにコンクリート中のセメント粒子の分散、骨材の吸水、混和剤吸着量等に着目した各種測定を行い、圧送によるコンクリートの流動性低下の要因を検討した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) コンクリートに圧力を加えながら配管内を流動させる小型圧送性試験装置を設計、製作した。本装置を用いることで、室内規模の試験で $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧力と管内流動によるせん断力を同時にコンクリートへ作用させられることが確認された。
- (2) 実際の高圧圧送と同等の最大管内圧力および圧送時間を条件とした小型圧送性試験装置による室内試験を行うことで、圧送によるスランプ・スランプフローの変化を評価できる可能性を得た。
- (3) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験の結果、圧送によるコンクリートの流動性低下に及ぼす「圧力」と「せん断応力」の影響度は、コンクリートの種類によって異なると考えられる。本研究では、軽量コンクリート1種よりも高強度・高流動コンクリートの方が、流動性の低下に及ぼすせん断応力の影響が大きいことが分かった。
- (4) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験の結果、セメントペーストやモルタルでは流動性の低下がほとんど生じなかったことから、圧送によるコンクリートの流動性低下には、粗骨材の存在が大きく影響していることが分かった。
- (5) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験によりコンクリートに圧力およびせん断力を作用させることで、コンクリートの流動性が変化すると共に、下記①～⑤の変化が生じることが明らかとなり、これらが高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

① 軽量骨材の含水率の増大

② 部分的に凝集したセメント粒子の分散による、セメント粒子の総吸着可能面積の増大

③ 液相中に残存する混和剤未吸着量の減少

④ 単位セメント表面積当たりの混和剤吸着量の減少

⑤ 骨材粒度分布における細粒分の増加

本研究で検討した軽量コンクリート1種では上記①、②、③、④の変化が、高強度・高流動コンクリートでは上記②、③、④、⑤の変化が生じた。コンクリートの種類や調合によって上記変化の有無や変化量は異なるものと考えられる。

第6章の参考文献

- 6-1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009
- 6-2) 作栄二郎，大内雅博，筒井浩平：ポンプ圧送による自己充填コンクリートの流動性変化のメカニズム，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.79-84，2007
- 6-3) 梁俊，坂本淳，丸屋剛，橋本貴之：加圧履歴に基づいたコンクリートの圧送性の室内評価試験方法に関する研究，コンクリート工学，Vol.58，No.12，pp.937-943，2020
- 6-4) 鈴木一雄，越川茂雄，伊藤康司：コンクリートの管内流動に関する研究，コンクリート工学論文集，第15巻，第2号，pp.47-57，2004
- 6-5) 菅俣匠，日比野誠，大内雅博，岡村甫：練混ぜ時における高性能 AE 減水剤の粒子分散効果に関する定量的評価，土木学会論文集，No.634，V-45，pp.255-267，1999
- 6-6) 高橋恵輔，Thomas A Bier，平野義信，戸田靖彦：攪拌や圧送などの外力がセメント系モルタルの流動性および水和特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.52-57，2012
- 6-7) 菅俣匠，日比野誠，大内雅博，岡村甫：セメント粒子の分散性に及ぼすポリカルボン酸ポリマーの分子構造の影響，土木学会論文集，No.662，V-49，pp.17-27，2000
- 6-8) 北原文雄編：分散・凝集の解明と応用技術，テクノシステム，p.146，1992
- 6-9) 太田晃：超高強度コンクリート用高性能 AE 減水剤の現状，コンクリート工学，Vol.34，No.5，pp.23-32，1996

第7章 総括

7.1 本研究の総括.....	116
7.2 各章のまとめ.....	118
7.3 今後の展開.....	122
第7章の参考文献.....	123

第7章 総括

7.1 本研究の総括

本研究では、コンクリート構造物の躯体品質の確保、およびコンクリート工事の生産性向上に貢献するために、コンクリートの密実な充填を得るためのプロセスにおける課題に着目し検討を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。また、序論で示した各施工段階におけるスランプの変化と本研究の成果の関係を図7.1に示す。

- (1) 普通強度のコンクリートに増粘剤含有混和剤を後添加することで得られる流動性の高いコンクリートについて、充填性や材料分離抵抗性などのフレッシュ性状、および圧縮強度や耐久性に関する特性などの硬化後の品質を明らかにした。また、粉末パックの投入により製造でき、様々な建設現場で汎用的に使用できる流動性の高いコンクリートとして、実構造物への適用を通してその実用性を示した。
- (2) 中流動コンクリートに必要とされる締固めの程度を、流動性および間隙通過性を考慮した締固め完了エネルギーという観点から捉え、その評価方法を提案した。
- (3) 軽量コンクリートや高強度・高流動コンクリートについて、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる高圧圧送によるコンクリート品質の変化や管内圧力損失を明らかにした。また、コンクリートのV漏斗流下時間を測定することにより、特に管内圧力が高くなる筒元側の管内圧力損失を高い精度で推定できることを示した。
- (4) 高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化を、小型圧送性試験装置を用いた室内試験によって評価する方法を開発した。
- (5) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験によりコンクリートに圧力およびせん断力を作用させることで、コンクリートの流動性が変化すると共に、下記①～⑤の変化が生じることが明らかとなり、これらが高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化に影響を及ぼしている可能性が示唆された。
 - ① 軽量骨材の含水率の増大
 - ② 部分的に凝集したセメント粒子の分散による、セメント粒子の総吸着可能面積の増大
 - ③ 液相中に残存する混和剤未吸着量の減少
 - ④ 単位セメント表面積当たりの混和剤吸着量の減少
 - ⑤ 骨材粒度分布における細粒分の増加

(1)について、増粘剤含有混和剤を後添加することで得られる流動性の高いコンクリートを実用化し、普通強度領域において使用できる流動性の高いコンクリートの選択肢を増やした。

(2)について、提案した評価方法により中流動コンクリートに必要とされる締固めの程度が明らかとなることで、中流動コンクリートのより確実な充填性確保に貢献できる。

(3)について、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる高所圧送によるコンクリート品質の変化や管内圧力損失が明らかとなることで、現場までの運搬および圧送に伴うスランプ、スランプフローの変化を見込んだ荷卸しの目標スランプ、スランプフローの設定、ならびに目標の吐出量の実現に要するコンクリートポンプの性能の決定が可能となる。

(4)について、本研究で設計、製作した小型圧送性試験装置を用いた室内試験によって、高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化を評価する方法を開発した。7.3節で後述する課題が残されているものの、今後、本試験方法を改良することで、コンクリートの圧送性の評価検討に要する労力が削減

されると考えられる。

(5)について、本研究では高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化が生じる要因に資する知見を得た。今後、この成果を高圧圧送による流動性変化の要因検証および抑制方法の研究開発に活かすことができる。

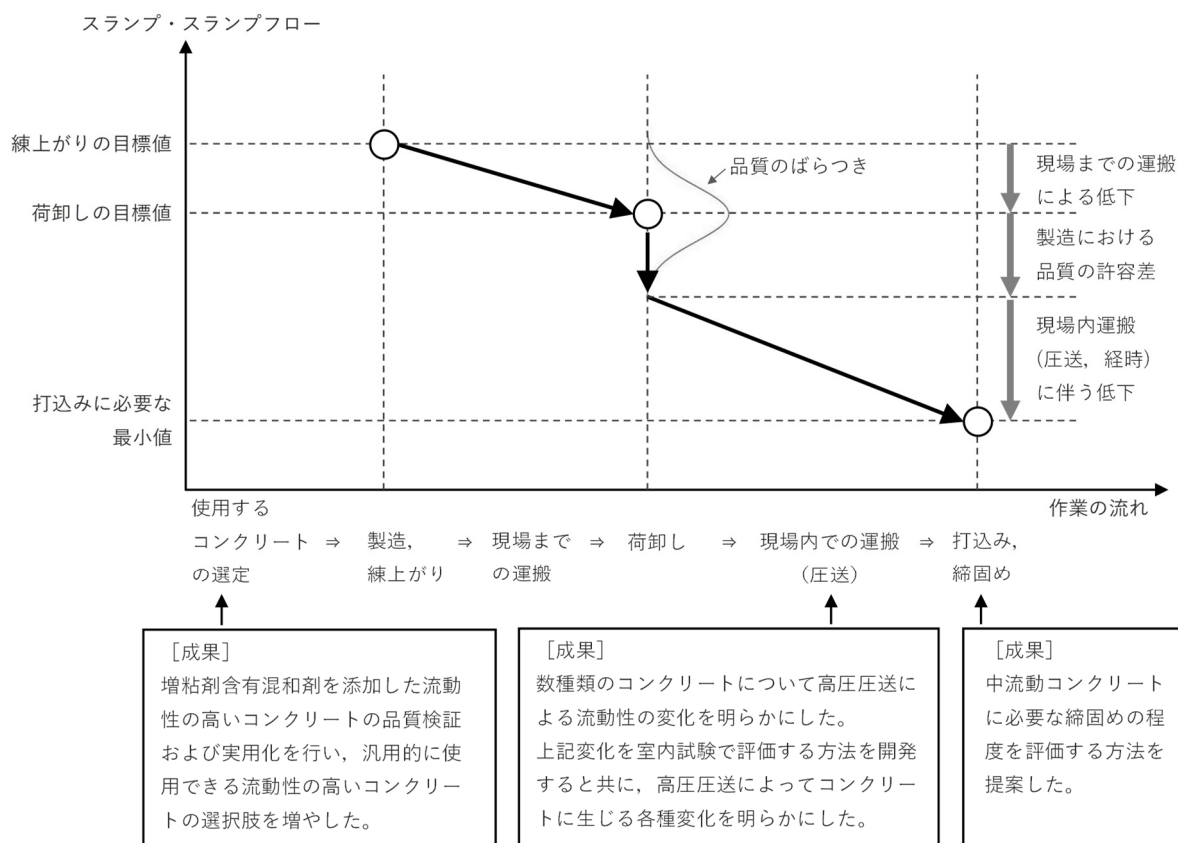


図 7.1 各施工段階におけるスランプの変化および本研究の成果

以上、コンクリートの流動性に着目した密実な充填を得るためのプロセスにおいて、これまで明確になっておらず近年の変化によって認識されてきた以下の課題を、本研究により解決した。

- ・ 普通強度領域において汎用的に使用できる流動性の高いコンクリートの選択肢がないこと。
- ・ 中流動コンクリートに必要な締めめの程度が明確になっていないこと。
- ・ 高圧圧送に伴うコンクリートの流動性の変化が明確になっていないこと。

7.2 各章のまとめ

「第1章 序論」では、本研究の背景および目的について述べるとともに、本論文の構成を示した。

「第2章 既往の研究」では、既往の研究を参考にして、流動性の高いコンクリートの品質およびその評価方法に関する研究や、圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響に関する研究等を調査し、現状の課題および本研究の方向性について述べた。

- (1) 高流動コンクリートの材料特性の指標として重要と考えられる材料分離抵抗性については、簡易的な評価方法は少なく一般的に採用されるには至っていない。また、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間の流動性を持つ中流動コンクリートについては、構造体コンクリートとして密実な充填を確保するためには外力による軽微な振動・締固めが必要とされているが、現状では必要とされる締固めの程度が明確になっていない。このように、中流動・高流動コンクリートの品質基準や性能評価方法については課題があることを示した。本研究では、中流動コンクリートに必要な締固め程度を評価する方法について検討することとした。
- (2) 近年、普通強度領域において増粘剤含有混和剤を用いることで流動性を高めたコンクリートの研究が進み、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートに呼び強度 27~45 のスランプフロー 45~60cm のコンクリートが新設された。しかし、当該コンクリートの JIS を取得した工場は限られている。そのため、上記コンクリートを工場で製造する施工事例は少なく、建設現場における流動化によって流動性の高いコンクリートを製造し、適用する事例がいくつか見られる程度である。本研究では、流動性の高いコンクリートの普及促進を図るべく、増粘剤含有混和剤を後添加することで容易に製造でき、様々な建設現場で対応可能で汎用的に使用できる中流動・高流動コンクリートについて、その品質を検証して実用化を推進することとした。
- (3) 圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響について様々な研究や実施工例があるが、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じる圧送によるコンクリート品質への影響は明確になっていないこと、ならびに、日本国内においては上記のような高圧圧送の事例が無く、管内圧力損失などの実施工に資するデータが不十分であることを示した。そこで本研究では、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる規模の長距離圧送実験を行い、コンクリートの品質への影響および実施工に資するデータの測定を行うこととした。
- (4) 室内試験規模でコンクリートの圧送性を評価する方法について様々な研究がなされているものの、現状では圧送によるコンクリートの品質の変化を定量的に評価できる試験方法は確立されていないこと、また、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じる高圧圧送を対象とした研究事例はほとんどないことを示した。そこで本研究では、新たに小型の圧送性試験装置を製作し、高圧圧送によるコンクリートの品質の変化を室内試験で検討する方法の構築を試みた。

「第3章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの品質検討」では、普通強度領域において増粘剤含有混和剤を後添加することで流動性および材料分離抵抗性を高めたコンクリートの実用化および普及に向けて、ベースコンクリートの調合条件や流動化剤および増粘剤含有混和剤の添加量が、流動化後のコンクリートのフレッシュ性状や硬化後の品質に及ぼす影響を室内実験により検討した。また、中流動コンクリートに必要な締固め程度を評価する方法を検討した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 増粘剤含有混和剤の添加によりモルタルの粘性が高くなり、コンクリートの材料分離抵抗性、

間隙通過性が高くなることが確認された。

- (2) フレッシュ性状の検討をした結果、材料分離を生じることなく流動性の高いコンクリートを得るためには、目標スランブフローに応じた単位セメント量や粉体量の設定が必要であり、本研究の範囲では、目標スランブフロー45cm（許容差±7.5cm）では粉体量 301kg/m³（呼び強度 27 相当）程度以上、目標スランブフロー50cm（許容差±7.5cm）では粉体量 340kg/m³（呼び強度 33 相当）程度以上、目標スランブフロー55cm（許容差±10cm）では粉体量 376kg/m³（呼び強度 36 相当）程度以上、目標スランブフロー60cm（許容差±10cm）では 376kg/m³を超える粉体量（呼び強度 40 以上相当）が適切な適用範囲であると考えられる。
- (3) 増粘剤含有混和剤を後添加した流動性の高いコンクリートのブリーディング量、沈降量、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮率は、いずれもベースコンクリートに対して同程度であった。なお、沈降量については増粘剤含有混和剤添加量の増加により減少傾向が見られた。
- (4) 本章で検討した評価方法によって、中流動コンクリートに必要とされる締固めの程度を、流動性および間隙通過性を考慮した締固め完了エネルギーという観点から捉えられることが分かった。この評価方法を行うことで、より最適な中流動コンクリートの調合を計画できる可能性が示唆された。

「第4章 増粘剤含有混和剤を使用した流動性の高いコンクリートの実用化検討」では、増粘剤含有混和剤を後添加することで製造できる流動性の高いコンクリートの実用化および普及を図るべく、模擬柱壁試験体を用いた実大施工実験を行い、型枠充填性、材料分離抵抗性、構造体コンクリート強度等を検証した。その結果を踏まえ、後添加型の中流動コンクリートを建築構造物へ実適用した事例についてまとめた。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 攪拌方法の違いにより流動化剤および増粘剤含有混和剤添加後のコンクリートのフレッシュ性状の傾向は異なり、室内小型ミキサと比べてトラックアジテータでの攪拌ではスランブフロー増大量は小さく、空気量は大きくなる傾向となった。
- (2) 流動化剤および増粘剤含有混和剤添加後のコンクリートの空気量は、トラックアジテータによる攪拌時の巻き込み空気によって概ね増大し、その増大量は積載量が少ない場合やコンクリート温度が低い場合に若干大きくなる傾向であった。
- (3) 細骨材率補正をしていないスランブフロー45cmの中流動コンクリートでも、1箇所5秒間の軽微な締固めにより良好な型枠充填性を得られることが確認された。
- (4) 目視により材料分離抵抗性を有すると評価される中流動コンクリートにおいても、一般的な5～15秒程度の締固めを行うことで、打込み部位の上部付近では粗骨材の沈降が生じるものと考えられ、締固めの程度に留意が必要となる。
- (5) 締固めを行った部位の上部では、粗骨材の沈降に伴うモルタルの割合が増加したことにより、圧縮強度が高く、静弾性係数が小さくなる傾向が見られたが、いずれも下部と比べて最大8%程度の差であった。
- (6) 様々なレディーミクストコンクリート工場の調合について、本研究の手法により、材料分離を生じることなく流動性の高いコンクリートが製造できることが分かった。
- (7) 建築構造物への実適用を通して、粉末パックの投入により容易に製造でき、建設現場で汎用的に使用できる流動性の高いコンクリートの実用性が確認された。

「第5章 高圧圧送がコンクリートの品質に及ぼす影響の検討」では、軽量コンクリート1種および2種、高強度・高流動コンクリート、超高強度・高流動コンクリートを対象に、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高い圧送負荷が生じる長距離圧送実験を行い、圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の検討、ならびに管内圧力損失等の実施に資するデータの測定を実施した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 最大 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧送負荷が生じる圧送において、本研究で検討した軽量コンクリートや高強度コンクリートが配管閉塞を生じることなく筒先まで圧送できることが確認された。
- (2) 軽量コンクリート1種では、圧送後のスランプ低下量は標準値⁵⁻³⁾や既報⁵⁻²⁾よりも10cm程度大きくなった。これは高圧による軽量骨材への圧力吸水が一要因と考えられ、軽量骨材の吸水管理が圧送性を確保するうえで重要であると言える。
- (3) 軽量コンクリート2種では、1種よりも圧送後のスランプ低下量は小さくなった。普通骨材の使用量や軽量細骨材の有無、所要のスランプを得るために要する高性能AE減水剤の使用量などの調合の違いが、スランプ低下を抑制する一要因となった可能性が示唆された。
- (4) 水セメント比22.2~24.9%の高強度・高流動コンクリートでは、単位水量の増大やシリカフェュームの混入により、圧送後のスランプフロー低下量が低減された。
- (5) 水結合材比15%の超高強度・高流動コンクリートでは、圧送後のスランプフローは5.5~11cm大きくなった。
- (6) いずれのコンクリートも最大管内圧力が大きいほど、荷卸し時のスランプフローに対する筒先のスランプフローの比が小さくなる傾向となり、圧送前後の空気量および圧縮強度は同程度であった。また、いずれも管内圧力損失は筒元から最初のベント管の通過直後までの間で最も大きな値となり、それ以降は小さくなる傾向となった。
- (7) 軽量コンクリート1種、2種および高強度・高流動コンクリートにおける筒元側の管内圧力損失は、標準値⁵⁻³⁾や既報⁵⁻⁵⁾の結果よりも大きく、実施工においてはポンプの選定や配管計画に留意が必要と考えられる。
- (8) 超高強度・高流動コンクリートの管内圧力損失は、筒元側では既報^{5-6), 5-7), 5-8)}の $W/B=13\sim 16\%$ における結果の範囲内にあり、筒先側は既報⁵⁻⁸⁾の $W/B=20\%$ の結果と同等となった。結合材等の調合変更によりコンクリートの塑性粘度が低減され、管内圧力損失が小さくなることが確認された。
- (9) 軽量コンクリート1種、2種、高強度・高流動コンクリートおよび超高強度・高流動コンクリートについて、50cmフロー到達時間やLフロー速度から推定した塑性粘度から管内圧力損失を推定できることが分かった。また、V漏斗流下時間を測定することにより、特に管内圧力が高くなる筒元側の管内圧力損失を高い精度で推定できることが明らかとなった。

「第6章 高圧圧送によるコンクリートの流動性変化の評価方法および要因の検討」では、圧送を模擬してコンクリートに圧力とせん断力を同時に作用させる小型圧送性試験装置を用いて、圧送によるコンクリートの流動性の変化を評価する室内試験方法を検討した。当該試験方法で得られた結果を、前章の長距離圧送実験で生じたコンクリートの流動性の変化と比較した。また、本試験装置を用いて管内圧力の大小や管内流動の有無等を変えた圧送性試験、ならびにコンクリート中のセメント粒子の分散、骨材の吸水、混和剤吸着量等に着眼した各種測定を行い、圧送によるコンクリートの流動性低下の要因を検討した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) コンクリートに圧力を加えながら配管内を流動させる小型圧送性試験装置を設計、製作した。本装置を用いることで、室内規模の試験で 20N/mm^2 以上の圧力と管内流動によるせん断力を同時にコンクリートへ作用させられることが確認された。
- (2) 実際の高圧圧送と同等の最大管内圧力および圧送時間を条件とした小型圧送性試験装置による室内試験を行うことで、圧送によるスランプ・スランプフローの変化を評価できる可能性を得た。
- (3) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験の結果、圧送によるコンクリートの流動性低下に及ぼす「圧力」と「せん断応力」の影響度は、コンクリートの種類によって異なると考えられる。本研究では、軽量コンクリート1種よりも高強度・高流動コンクリートの方が、流動性の低下に及ぼすせん断応力の影響が大きいことが分かった。
- (4) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験の結果、セメントペーストやモルタルでは流動性の低下がほとんど生じなかったことから、圧送によるコンクリートの流動性低下には、粗骨材の存在が大きく影響していることが分かった。
- (5) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験によりコンクリートに圧力およびせん断力を作用させることで、コンクリートの流動性が変化すると共に、下記①～⑤の変化が生じることが明らかとなり、これらが高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

① 軽量骨材の含水率の増大

② 部分的に凝集したセメント粒子の分散による、セメント粒子の総吸着可能面積の増大

③ 液相中に残存する混和剤未吸着量の減少

④ 単位セメント表面積当たりの混和剤吸着量の減少

⑤ 骨材粒度分布における細粒分の増加

本研究で検討した軽量コンクリート1種では上記①、②、③、④の変化が、高強度・高流動コンクリートでは上記②、③、④、⑤の変化が生じた。コンクリートの種類や調合によって上記変化の有無や変化量は異なるものと考えられる。

7.3 今後の展開

(1) 室内圧送試験方法の信頼性向上, 適用範囲の拡大

小型圧送性試験装置を用いた室内試験によって、圧送によるコンクリートのスランプ、スランプフローの変化を評価できる可能性を得た。本手法では、コンクリートに圧力とせん断力が同時に作用する点や、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の高い管内圧力が生じる点について実際の圧送状況を再現している。一方で、試料が配管内を往復することや管内試料の流速が小さいこと、脈動を再現していないこと、輸送管内径が $\phi 50\text{mm}$ であることなど実際の圧送とは異なる条件もある。これらの実際の圧送と異なる条件の影響、ならびに本研究の実施調合以外の様々な調合を対象とした圧送によるスランプ・スランプフローの変化の評価方法について、今後も検討を続け、本手法の信頼性や汎用性を高めていく。

(2) 高圧圧送によるコンクリートの塑性粘度の変化

本研究では、圧送によるコンクリートの流動性の変化のうち、特にスランプ・スランプフローに相関のある降伏値の変化に主眼をおいて検討を行った。コンクリートの塑性粘度の変化については今後検討を行う。

(3) 高圧圧送によるコンクリートの流動性変化の要因検証および抑制方法

本研究では、コンクリートに圧力とせん断力を作用させる室内試験により、コンクリートの流動性が変化すると共に、混和剤吸着量や骨材の含水率等の変化が生じることを明らかとした。これらの現象が高圧圧送によるコンクリートの流動性の変化に影響を及ぼしている可能性が示唆されたものの、各現象の流動性変化に及ぼす影響の有無および影響度については明らかになっておらず、今後検討を行う。さらに、高圧圧送による流動性変化の要因を踏まえ、流動性変化を抑制する具体的な方法についても検討を進めていく。

第7章の参考文献

- 7-1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009.12
- 7-2) 岩清水隆，青木義彦，九嶋壮一郎，永野浩一：軽量コンクリートの高さ 300m への超高所圧送—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—，コンクリート工学，Vol.51，No.8，pp.648-655，2013.8
- 7-3) 神代泰道，一瀬賢一，都築正則：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1217-1222，2006
- 7-4) 寺内利恵子，早川光敬，陣内浩，黒岩秀介：超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 622 号，pp.25-31，2007.12
- 7-5) 鳴瀬浩康，石中正人，藤井和俊，中瀬博一：設計基準強度 150N/mm² 級超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究，日本建築学会技術報告集，第 15 巻，第 30 号，pp.359-362，2009.6
- 7-6) 後藤和正，黒岩秀介，寺内利恵子，並木哲，松本修一，陣内浩，荒川友宏：Fc150 及び Fc100 を用いた CFT の実大施工実験（その 1：ポンプ圧送性），日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.805-806，2010.10

本研究に関連する発表論文等

査読論文

- 1) 太田貴士, 黒岩秀介, 野田泰史: 粉末の流動化剤および増粘剤を用いた高性能流動化コンクリートのフレッシュ性状に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.39, No.1, pp.1285-1290, 2017
- 2) 太田貴士, 黒岩秀介, 野田泰史, 篠原明: 粉末の流動化剤および増粘剤を用いた後添加型中流動コンクリートの実用化検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.40, No.1, pp.1173-1178, 2018
- 3) 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛, 太田貴士: 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合選定に関する基礎的な研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.42, No.1, pp.905-910, 2020
- 4) 太田貴士, 中村俊之, 加藤優志, 後藤和正, 渡邊悟士, 黒岩秀介, 山本佳城: 高圧力下の長距離圧送実験によるコンクリートの圧送性検討, 日本建築学会技術報告集, 第 29 巻, 第 72 号, pp.597-602, 2023
- 5) 太田貴士, 加藤優志, 渡邊悟士, 山本佳城, 黒岩秀介: 高圧圧送による軽量コンクリートおよび高強度・高流動コンクリートの流動性低下の要因に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集(投稿中)

国際会議

- 1) Takahi Ota, Shusuke Kuroiwa : Practical application of post-additive fluidity concrete added with powder superplasticizer and powder viscosity agent, RheoCon 2019/SCC 2019, RILEM, non-peer-reviewed proceedings, 2019

口頭発表論文

- 1) 太田貴士, 黒岩秀介: 粉末流動化剤および粉末増粘剤を用いた高性能流動化コンクリートに関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.341-342, 2017.8
- 2) 黒岩秀介, 太田貴士: 粉末流動化剤および粉末増粘剤を用いた後添加型中流動コンクリートの実用化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.809-810, 2018.9
- 3) 太田貴士, 梁俊, 黒岩秀介: 中流動コンクリートの締固め性評価方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.807-808, 2018.9
- 4) 太田貴士, 梁俊, 橋本貴之, 村田哲, 須藤敏明: 中流動コンクリートの締固め性および適正配合の評価方法の検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, pp.803-804, 2018.8
- 5) 加藤優志, 山本佳城, 黒岩秀介, 太田貴士, 渡邊悟士: 軽量コンクリート・高強度コンクリートの圧送性に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.249-250, 2019.9
- 6) 坪田玲, 太田貴士: 鋼板仕上げ外壁への高性能流動化コンクリートの適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.533-534, 2021.9

研究報告

- 1) 太田貴士, 黒岩秀介: 粉末バックを用いた高性能流動化コンクリートの実用化, セメント・コンクリート, No.863, pp.26-32, 2019.1
- 2) 阪井由尚, 太田貴士, 杉山智昭, 成田仁: 地球環境に配慮した既存ストック活用型の研究開発棟増改築工事, コンクリート工学, Vol.57, No.10, pp.785-790, 2019.10

謝辞

本論文は、筆者が大成建設株式会社 技術センターの在職中、ならびに東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 建築学域 博士後期課程の在学中に行った研究の成果を取りまとめたものです。本論文をまとめるにあたり、多くの方々からのご助言、ご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本論文の執筆にあたり、東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 建築学域 橘高義典教授には、筆者の学部生、院生時代に引き続きご指導を賜りました。ご多忙にも関わらず終始温かいご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

本論文の審査におきまして、東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 建築学域 北山和宏教授、東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 上野敦准教授には貴重なお時間をかけて本論文をご精読いただき、ご指導とご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

大成建設株式会社 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室長 黒岩秀介氏には、本研究の遂行にあたり、多大なご指導ならびにご助言をいただき、筆者が本研究に取り組む環境を与えていただきました。ここに深く感謝申し上げます。

大成建設株式会社 技術センター 今井和正氏、山本佳城氏、渡邊悟士氏、梁俊氏、高橋愛枝氏、吉田泰氏、加藤優志氏には、日頃より本研究の計画や実験の実施、考察、研究に対する姿勢など多岐にわたってご指導ならびにご助言をいただきました。皆様方のご協力の上で本研究を取りまとめることが出来ましたこと深く感謝申し上げます。

大成建設株式会社建築本部 並木哲氏、後藤和正氏、中村俊之氏、荒川琢也氏、寺内利恵子氏、大成建設株式会社建築総本部 紺野裕之氏、大成建設株式会社東京支店技術部 坪田玲氏には、開発したコンクリートの現場適用や長距離圧送実験に関して、多くのご助言およびご支援をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

大成建設株式会社技術センター長 長島一郎氏、大成建設株式会社技術センター都市基盤技術研究部長 坂本成弘氏には、学位取得に際してご理解をいただき、本研究を取りまとめる環境を与えていただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究の実験を行うにあたり、大成有楽不動産株式会社テクノセンター 田村誠氏、工藤敏博氏、半田佳正氏、酒田充氏、ならびに、株式会社エバーグリーン 新井重太氏、小川佳春氏をはじめとする多くの方々にご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

後添加型の中流動・高流動コンクリートの開発から適用に際して、ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株式会社 細田高明氏、野田泰史氏、篠原明氏、小笠原健太郎氏、大島典子氏には多大なご協力、ご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本論文の執筆は、家族の理解無くして成し遂げることは出来ませんでした。終始温かく見守り支えてくれた妻・直子や、まだ幼い長女・理子と長男・陽一には苦勞をかけました。最愛なる家族、両親に心から感謝いたします。

2023年3月
太田 貴士