

中流動および高流動コンクリートの
レオロジー評価に基づくポンプ圧送性に関する研究

山之内 康一郎

目 次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 研究の概要	4
1.3 本論文の概要および構成	5
参考文献 [第1章]	7
第2章 既往の研究	9
2.1 概説	10
2.2 中・高流動コンクリートのコンシステンシー試験方法	11
2.2.1 普通コンクリートのスランプ試験	11
2.2.2 中・高流動コンクリートのスランプフロー試験方法	12
2.2.3 フレッシュコンクリートの物性値と スランプ（スランプフロー）との関係	13
2.2.4 漏斗試験方法	19
2.2.5 漏斗内のコンクリートの流動解析	20
2.3 コンクリートの管内流動解析手法	25
2.3.1 回転粘度計法	25
2.3.2 レオロジー定数の測定方法	32
2.4 測定結果の一例	35
2.4.1 使用材料およびコンクリートの配合	35
2.4.2 コンシステンシー試験結果	36
2.4.3 レオロジー定数の結果	40
2.5 コンシステンシー試験方法における検討課題	42
参考文献 [第2章]	43

第3章 中・高流動コンクリートのレオロジー測定	45
3.1 概説	46
3.2 フレッシュコンクリートの管内流動	47
3.3 管型粘度計（圧送試験装置）の緒言	53
3.4 管型粘度計による流量の測定	54
3.4.1 流量の測定手順	54
3.4.2 圧送圧力と流量との関係	55
3.4.3 管内流動における新しいコンシステンシーのパラメータ	57
3.5 管型粘度計によるレオロジー定数の測定	58
3.5.1 レオロジー定数の測定手順	58
3.5.2 使用材料および配合	58
3.5.3 各種コンシステンシー試験結果	60
3.5.4 レオロジー定数の測定結果	63
3.5.5 管長の相違が測定結果に及ぼす影響	68
3.6 まとめ	70
参考文献 [第3章]	71
第4章 中・高流動コンクリートの新たな管内流動式	73
4.1 概説	74
4.2 2層流れの管内流動	75
4.3 水膜の厚さの設定方法	77
4.3.1 使用材料および配合	77
4.3.2 コンクリートからの脱水量の測定	78
4.3.3 管壁とコンクリートとの間に生じる水膜の厚さ	80
4.4 管型粘度計（圧送試験装置）によるレオロジー定数の測定	83
4.4.1 測定方法	83
4.4.2 測定結果	83

4.5	種類の異なるコンクリートを用いた検証	86
4.5.1	使用材料および配合	86
4.5.2	検証結果	87
4.6	O漏斗を活用した圧送試験方法の簡易法の提案	92
4.6.1	使用材料および配合	93
4.6.2	O漏斗を活用したレオロジー定数の設定方法	94
4.6.3	漏斗内のコンクリートの流れ	94
4.6.4	改良O漏斗による流量の測定	96
4.6.5	O漏斗を活用した流量の測定手順	97
4.6.6	O漏斗による流量の測定結果	98
4.7	まとめ	101
	参考文献 [第4章]	103
第5章	圧送可能領域の予測	105
5.1	概説	106
5.2	使用材料および配合	107
5.3	水膜の厚さの設定方法およびレオロジー定数の測定	108
5.3.1	コンクリートのフレッシュ性状	108
5.3.2	圧送試験装置による流量の測定方法	108
5.3.3	水膜の厚さの設定方法	109
5.3.4	圧送可能領域およびレオロジー定数の推定結果	113
5.4	まとめ	117
	参考文献 [第5章]	118
第6章	結論	119
6.1	本研究の成果	120
6.2	検証例	123

6.3 社会への貢献 126

謝辞 129

Study on Pumping Performance based on Rheological Evaluation of Medium-flow and High-flow Concrete

Kouichiro Yamanouchi

Choosing proper pump capacity is essential to ensuring a required pumping rate in concrete work, and a simplified way of determining the rheological constants will greatly help the evaluation of pumpability. Mix design and construction of medium to high fluidity concrete will also be made more efficient if pumpability can be predicted from the concrete properties.

This study applies a two-layer flow model, in place of the liquid friction state at the pipe wall in previous studies, to the flow of medium to high fluidity concrete in a pipe, assuming a presence of a thin film of water at the interface between the concrete and the pipe wall. With this, the flow rate can be given from the Bingham flow rate, the amount of slip displacement of the concrete and the volume of the water film.

In this study, the amount of dehydration was obtained by using the pumping test equipment and the pressurization dewatering test, and, based on the dehydration amount, the thickness of the water film and the slip velocity of the concrete were calculated to determine the Bingham flow rates, which were then put in the Buckingham formula to obtain approximate values of the rheological constants. The estimates were verified experimentally, showing the capability of the proposed method to predict the pumpability of medium to high fluidity concrete.

In addition, using an O type funnel test equipment with a sample container fitted at its top as a substitute for the pumping test equipment, flow rate measurement was carried out at three different levels of head differential at the inlet of the funnel pipe. With the combined use of the pressurization dewatering test, the water film thickness and approximate rheological constants were estimated. The predicted flow rates obtained by multiplying the approximate values by a correction coefficient were found to be close to the actual flow rates measured with the pumping test equipment, showing a possible simple prediction of the flow rate.

第 1 章

緒 論

1.1 研究の背景

近年のコンクリート工事においては、構造物の高強度化や大型化に伴い特殊な配管経路への圧送や過密配筋部材への打設など、コンクリートを型枠内に密実に充填させることが困難となる場合もあり、自己充填性と分離抵抗性を付与したコンクリートの必要性が高まっている。これら多様な条件に対応するために流動性と材料分離抵抗性を付与した中・高流動コンクリートの採用が増えつつある。

レディーミクストコンクリートの施工現場における場内運搬には、多くの場合コンクリートポンプにより圧送され、打設場所まで運ばれている。しかし、この種の多機能・高機能なコンクリートは圧送実績も少なくコンクリート配合やコンシステンシーの試験結果を基に配管条件や圧送条件を適確に定めることができないため、試験圧送を行うなどして、配管径やポンプの能力を選定するなど、多くの経営資源を投じている。

コンクリート工事の合理化を実現するためには、コンクリートの管内流動解析に必要な圧送性に関する情報を資材生産者であるレディーミクストコンクリート工場から提供できれば、コンクリート施工の合理化と品質証明ができるので、特殊コンクリートに対して付加価値を付与することが可能となる。

本研究は、特殊なコンクリートに対してレディーミクストコンクリート工場でも、荷卸し地点においても簡易にレオロジー一定数を測定し、購入者に提供できるように、フレッシュコンクリート用管型粘度計(圧送試験装置)を試作し、その性能評価および試験方法により流動性・圧送性を簡易に予測するための技術資料を収集することである。

近年のコンクリート工事においては、構造物への要求性能が多様化し、特殊な配管経路や過密配筋部材への圧送が要求されるなどフレッシュコンクリートの高品質化とともに施工の合理化など生産性向上の必要性が高まっている。これら複雑な条件に対応するために用いるコンクリートとしては、優れた自己充填性を有するとともに材料分離抵抗性を付与するために高性能 AE 減水剤や増粘剤を使用した中・高流動コンクリートの使用が増加傾向にある。しかし、この種のコンクリートは圧送実績も少なく、圧送量の確保だけでなく材料分離や圧送管内での閉塞の可能性など経験的知見が活用できないことから特殊な経路に圧送する場合のポンプ能力や配管径の選定にあたっ

では、工事計画に基づき所定の性能や打設量を確保するために事前に実際の配管状態を再現し試験圧送を行うなど多大な労力や費用を費やしている。そこで試験圧送をすることなくポンプ能力を選定でき、且つ圧送の可否を予測することができれば、コンクリートの配合修正の省力化やポンプ施工の合理化に寄与する。ポンプ施工の合理化のためには事前に流量(吐出量)の予測が必要であり、ポンプ能力の選定にあたっては、圧送管内のコンクリートの流動性状の把握が必要となる。

1.2 研究の概要

ポンプ施工の合理化の為には、圧送性を評価するシステムの構築が必要となっている。ポンプによる圧送性を総括的に評価する為には、レオロジー定数(物性値)を把握することが必要である。フレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定には、従来、回転粘度計を用いる手法^{1-1)~1-4)}が採用されていた。しかし、回転粘度計によるレオロジー定数による測定は、手順が複雑であることや解析に技術が必要となる。そのため、配合の選定や施工計画段階での試験室における試験としては問題ないが、製造管理や現場での試験としては、必ずしも有用であるとはいえない。フレッシュコンクリートの施工技術について、総括的な解析を行った事例はないがコンクリートの管内流動をモデル化し、実験的に解析を行った事例^{1-5)~1-11)}はわずかにある。

近年、混和剤(材)などの改良により高流動コンクリートと普通コンクリートの中間に位置づけられる中流動領域のコンクリート¹⁻¹²⁾の要求が増えつつある。中流動コンクリートは、その特徴として、普通コンクリートと同程度のセメント量で高流動コンクリートと同様の流動性を有するものである。製造技術は普通コンクリートに近く、ユーザーニーズにこたえることができるコンクリートである。しかし、この中流動コンクリートは示方書や JASS5(鉄筋コンクリート工事標準仕様書)においても定義がされておらず、これらの普及を考慮するとともに、中流動・高流動コンクリートの施工の合理化の一端としてコンクリートの場内運搬に用いるポンプによる圧送のシステム化のための、第一歩として、管内流動の解析に用いる中流動・高流動コンクリートの物性値(コンシステンシー)を簡易に測定できる試験方法の開発が必要と考えられる。

1.3 本論文の概要および構成

本論文は、全 6 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章「緒論」では、本研究の背景と概要を述べている。また、本研究の概要と構成を示した。

第 2 章「既往の研究」では、管内流動に関する概要およびレオロジーに関する既往の研究を説明し、本研究の意義を示した。

第 3 章「中・高流動コンクリートのレオロジー測定」では、コンクリートの管内流動モデルによる流量予測と本研究で試作した圧送試験装置および試験方法を詳しく説明し、装置の精度および試験手順の信頼性を確認するとともに、中・高流動コンクリートのレオロジーを把握した。

第 4 章「中・高流動コンクリートの新たな管内流動式」では、既往の研究の管内流動モデル(すべりを伴うビンガム体に近似した挙動)に対し、本研究では、コンクリートと管壁との界面に薄い水の層が存在すると仮定した「2 層流れ」を提案するとともに、圧送試験装置および加圧脱水試験を併用して、塑性粘度・降伏値・粘性摩擦係数及び付着力など流量予測に必要な情報を得るための実験を行い、「新たな管内流動のモデル」を実験的に検証した。

また、O 漏斗流下時間測定装置を改良し、圧送試験装置の簡易法として、位置付けるための実験検証について説明した。

第 5 章「圧送可能領域の予測」では、本研究に用いた中・高流動コンクリートを用いて、「新たな管内流動のモデル」によるレオロジーの推定とともに、圧送の可否の予測について実験的に検討した。

第6章「結論」では、各章で行った検討によって得られた成果を要約するとともに、事例による検証と社会への貢献、今後の課題について総括した。

参考文献[第 1 章]

- 1-1) 菊川浩治:フレッシュコンクリートの粘度式とその適用に関する研究, 1987
- 1-2) 土木学会:コンクリートのポンプ施工指針(案),コンクリートライブラリ第 57 号, 昭和 60 年 11 月
- 1-3) 岡本寛昭ほか:コンクリート施工設計学序説, 技法堂出版, p.205, 2004
- 1-4) 長滝重義:回転粘度計によるモルタルの流動性解析の 1 考察, セメント技術年報 XXIX, pp.207-212, 1975
- 1-5) 村田二郎, 鈴木一雄:管壁にすべりを伴うグラウトモルタルの管内流動に関する研究,土木学会論文集,第 384 号, 129-136, 1987.8
- 1-6) 鈴木一雄: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, 2004
- 1-7) 村田二郎他:まだ固まらないコンクリートのレオロジー一定数測定法に関する一考察,土木学会論文報告集, 第 284 号,pp.117-125,1979.4
- 1-8) 村田二郎, 鈴木一雄:管壁にすべりを伴うグラウトモルタルの管内流動に関する研究,土木学会論文集,第 384 号, 129-136, 1987.8
- 1-9) 村田二郎, 鈴木一雄 : グラウトモルタルの管内流動に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 354 号, pp99-108, 1985.2
- 1-10) 村田二郎, 鈴木一雄 : 傾斜管法によるグラウトの粘度測定, 土木学会「フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム」論文集, pp.1-8. 1983.3
- 1-11) 山之内康一郎ほか:管型粘度計によるフレッシュコンクリートの流動性評価方法の提案, 全国生コンクリート工業組合連合会第 17 回生コン技術大会研究発表論文集, 研 8. , pp.47~52, 2013
- 1-12) 小山田英弘ほか: 中流動コンクリートの調合法に関する実験的研究(フレッシュコンクリート), コンクリート工学年次論文集, pp.463-468, 2000

第 2 章

既往の研究

2.1 概説

既往の研究では、圧送性をはじめとするコンクリートの諸性状を定量的に把握する方法として、レオロジー定数(塑性粘度及び降伏値)とコンシステンシーとの関係から評価を行う報告^{2-1)~2-8)}もある。また、レオロジー定数を求める手法として、圧送時の管内のコンクリートは、ビンガム体に近似した挙動を示すことから、管内における流動モデルはビンガムの流量式をベースに管壁での液体摩擦状態を考慮した式を用いて解析を行っている。

2章では、試験室や現場などでも使用されているコンクリートの簡易的なコンシステンシー試験(スランプ試験, スランプフロー試験, O 漏斗流下試験)の試験方法について、数値解析を行った。

次に、レオロジー定数(塑性粘度・降伏値)を把握するための方法として広く用いられている回転粘度計による試験手順とコンシステンシー曲線から中流動コンクリートおよび高流動コンクリートがビンガム体に近似する挙動を示すことを確認した。

また、コンシステンシー試験の測定結果とレオロジー定数(降伏値, 塑性粘度)について、その関係性を整理した結果、中・高流動コンクリートはほぼ同様な流動挙動を示すとともに、コンシステンシー試験値とレオロジー定数とは相関関係があることを示した。

2.2 中・高流動コンクリートのコンシステンシー試験方法

2.2.1 普通コンクリートのスランプ試験

コンクリートのコンシステンシー試験として、一般的にオーソライズされている方法は、JIS A 1101 によるスランプ試験であり、硬化する前の生コンクリート(フレッシュコンクリート)の柔らかさや流動性を示す値(スランプ値:cm)を求める試験のことである。スランプの値が大きくなるほど柔らかい流動性の大きい生コンクリートであり、スランプはコンクリートを打設する際の作業効率やワーカビリティを把握する指標となる。

ワーカビリティの大小は打設が建築物対象か、土木構造物対象かによって異なる。例えば、ワーカビリティが小さすぎると、鉄筋の隙間にコンクリートが充填されずジャンカなどの欠陥が発生する。ダムなどの土木工事の場合、鉄筋間隔が十分にあり、強度や重量が必要であることから、水分量が少なく高強度・低スランプのコンクリートが使用される。また、ビルなどの建築物は鉄筋が密集し、開口部の配置などによる型枠の形状で左右されるため、流動性・作業性の良い流動性を付与したコンクリート(中流動や高流動などスランプフローを指標とするコンクリートも含む)が要求される。

スランプ(スランプフロー)試験に用いる機器を写真 2-1 に示す。

スランプコーン

上端内径 ϕ 100mm 下端内径 200mm 高さ 300mm



写真 2-1 スランプ試験器²⁻⁹⁾

2.2.2 中・高流動コンクリートのスランプフロー試験

スランプフローは、中・高流動コンクリートや高強度コンクリートの流動性を表す指標であり、普通コンクリートは、スランプ値で流動性を測定するのに対し中・高流動コンクリートはスランプフローを測定する。(写真 2-2 参照)

スランプはスランプコーンを抜いたときのコーン頂部からコンクリート頂部までの下がりの距離を計測し、スランプフローはスランプコーンを抜いたときの円形に広がったコンクリートの直径を計測する。

スランプフローは、スランプ値と同様に適切な流動性(ワーカビリティ)が必要であるとともに材料分離抵抗性を付与したコンクリートの品質に注意が必要である。

スランプフロー試験は、試料の詰め方を一層詰めとし、JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法に従って行い、コンクリートの動きが止まったことを確認した後測定を行う。なお、フローの流動停止時間の測定は、目視により 0.1 秒単位で測る。また、500mm フロー到達時間の測定を行う。



写真 2-2 スランプフロー測定

2.2.3 フレッシュコンクリートの物性値とスランプ(スランプフロー)との関係

スランプ(スランプフロー)試験におけるコンクリートの変形は、既往の研究²⁻⁹⁾で解析されており、変形解析方法を以下に示す。

(1)変形解析方法

図 2-1 に示すように、スランプコーンの頂面の中心に原点 O をとり、原点より鉛直下方に X 軸をとった円柱座標系でスランプコーンを表示する。任意の X において厚さ dx の薄層円板を考え、さらに円板内の任意の半径において中心角 dθ の扇形要素を考える。この要素には自重による垂直応力 σ_X 式(2-1)が作用する。

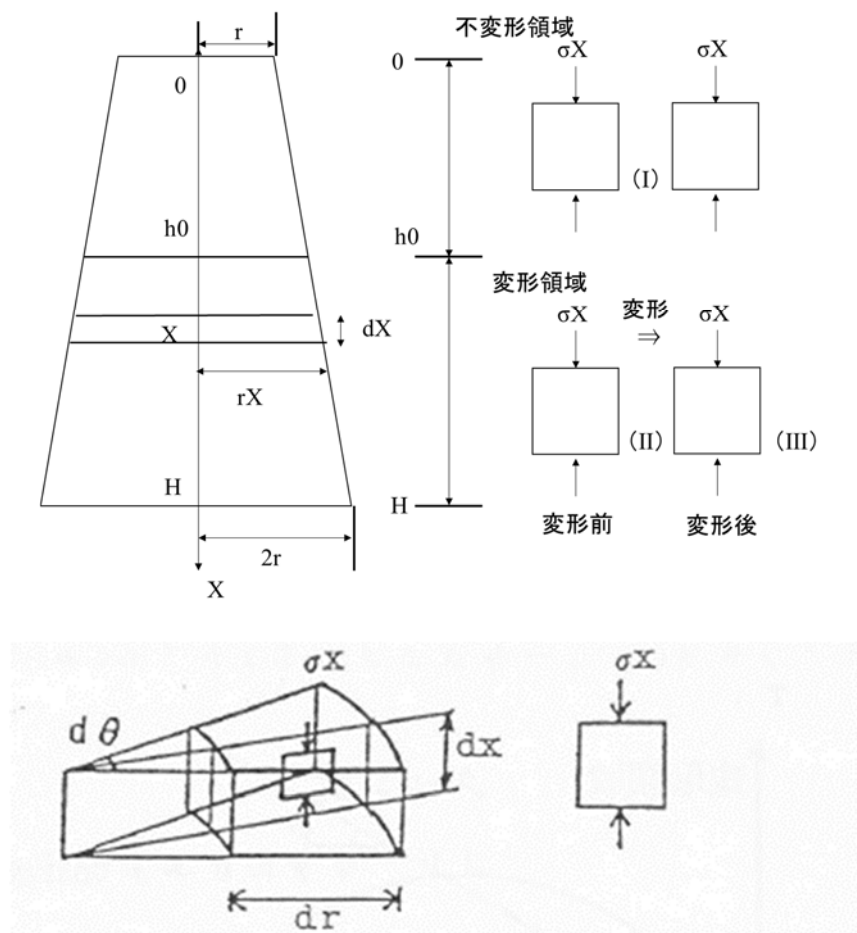


図 2-1 スランプコーンの変形²⁻⁹⁾

$$rx = r(H + x)/x$$

$$wx = w \left\{ \frac{\pi r x^2 (H + x)}{3} - \frac{\pi r^2 H}{3} \right\}$$

$$\sigma_X = \frac{wx}{\pi r x^2} = \frac{w \{ (H + x)^3 - H^3 \}}{3(H + x)^2} \quad \dots \text{式(2-1)}$$

ここに,

r_x : 任意の x における薄層円板の半径(cm)

w_x : 任意の x における薄層円板より上部のコンクリート重量(gf)

σ_x : 扇形要素に作用する垂直応力(gf/cm²)

τ : 扇形要素に作用するせん断応力(gf/cm²)

w : コンクリートの単位容積重量(gf/cm³)

H : スランプの高さ(30cm)

r : スランプ頂面の半径(5cm)

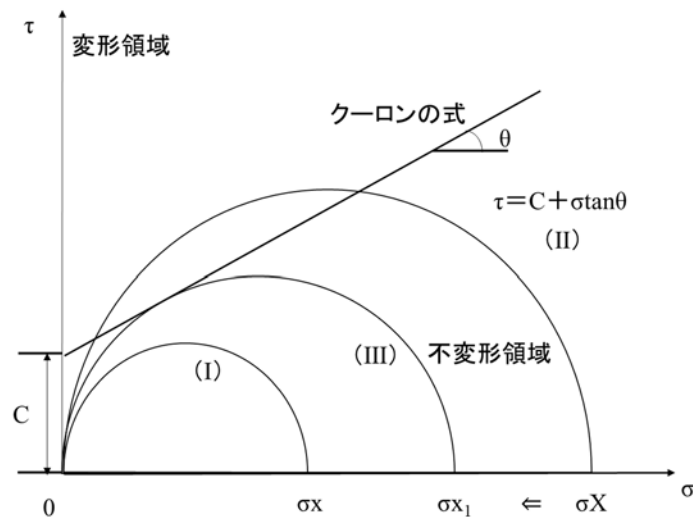


図 2-2 扇形要素の各断面の応力状態²⁻⁹⁾

従って、扇形要素の各断面における応力状態は、スランプ型枠を取るとコーン側方の拘束力がなくなるので図 2-2 に示すモールの応力円式(2-2)で表すことができる。

$$(\sigma - \sigma_x)^2 + \tau^2 = (\sigma_x/2)^2 \quad \dots \text{式(2-2)}$$

また、硬練りコンクリートの物性値である粘着力 C および内部摩擦角 φ より決まるクーロンの破壊条件式(2-3)は、同図内の直線で示される。

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \quad \dots \text{式(2-3)}$$

コンクリートの変形は、このモールの応力円がクーロン式より上方の領域にある時、すなわち(II)の状態の時に可能と考えられるので、式(2-2)と式(2-3)の σ についての連立式(2-4)で σ が自乗をもつ条件、すなわち式(2-4)の判別式(式(2-5)のDが $D > 0$ の時に変形することになる。

$$(1 + \tan^2\varphi)\sigma^2 + (2C\tan\varphi - \sigma x)\sigma + C^2 \dots \text{式(2-4)}$$

$$D = \sigma x^2 - 4C\sigma x \tan\varphi - 4C^2 \dots \text{式(2-5)}$$

従って、不変形領域高さ h_0 は $D = 0$ となる条件から求めることができる。

$D > 0$ の変形領域にある扇形要素の変形は、モールの応力円がクーロン式に接する(III)の状態になるまで要素が潰れることによって起こると考えられるので、図 2-3 に示すように、変形後の自重による垂直応力 σx_1 は、式(2-6)で与えられる。

$$\sigma x_1 = 2ra = 2C(1 + \sin\varphi)/\cos\varphi \dots \text{式(2-6)}$$

変形前後で薄層円板上のコンクリートの重量は不変なので、変形前後で薄層円板の半径 r_{x1} は式(2-7)で計算することができる。

$$\int_0^{rx} \int_0^{2\pi} r d\theta dr \sigma x = \int_0^{rx1} \int_0^{2\pi} r d\theta dr \sigma x_1$$

$$\pi r x^2 dx = \pi r x_1^2 \sigma x_1$$

$$r_{x1} = \sqrt{\sigma x / \sigma x_1} r x \dots \text{式(2-7)}$$

また、変形前後で薄層円板の体積は変わらないと仮定すれば変形後の薄層円板の厚さ dx_1 は、式(2-8)で計算することができる。

$$\pi r x^2 dx = \pi r x_1^2 dx_1$$

$$dx_1 = (r x^2 / r x_1^2) dx = (\sigma x_1 / \sigma x) dx \dots \text{式(2-8)}$$

以上より、スランプ値 SL は、式(2-9)で計算することができる。

$$SL = H - h \dots \text{式(2-9)}$$

$$h = h_0 + \int_{h_0}^H (\sigma x_1 / \sigma x) dx$$

$$= h_0 + 2C(1 + \sin\phi) \ln[7H^3 / \{(H + h_0)^3 - H^3\}] / \rho \cos\phi \quad \dots \text{式(2-10)}$$

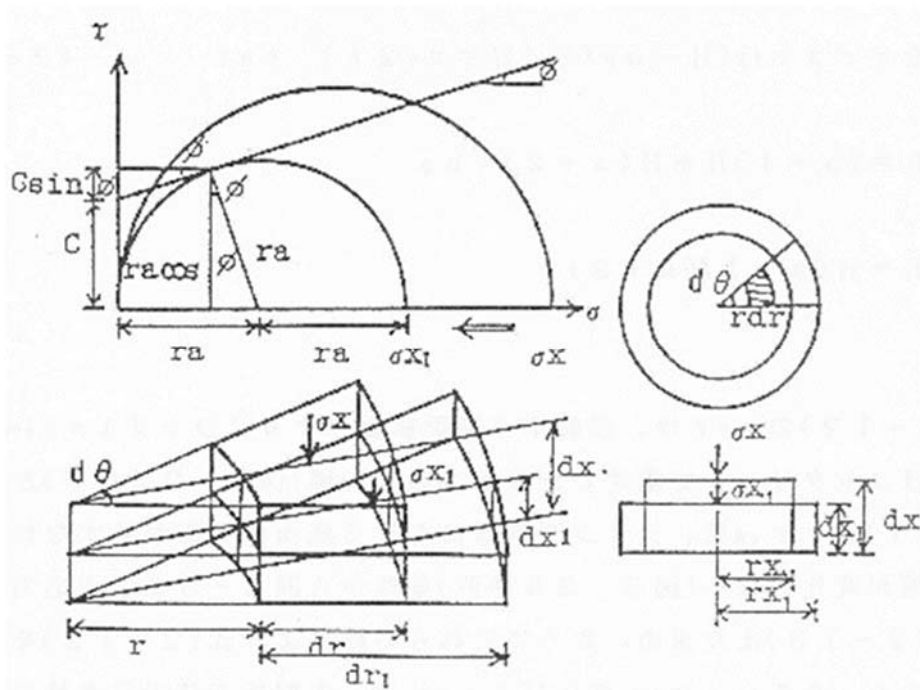


図 2-3 変形前後の扇形要素および薄層円板²⁻⁹⁾

しかし、実際のスランプ試験では、底面部において試料とゴム板との間に摩擦力が生じ変形に影響を与えるのでこの点を考慮する必要がある。そこで、図 2-4 に示すように、底面部においては、摩擦力 τ_{hr} による合力($\tau_{hr} \times$ 底面積)と等価となるような水平直応力 σr_1 が変形領域 $h_0 \leq x \leq H$ の x に関する指数乗式(2-11)で分布し、変形を拘束すると仮定すれば式(2-12)が得られる。

$$\sigma r_1 = \sigma r_{1H} \{(x - h_0) / (H - h_0)\}^a \quad \dots \text{式(2-11)}$$

$$\int_{h_0}^H \sigma r_1 (2\pi r x) dx = \pi (2r)^2 \tau_{Hr}$$

$$2\pi r \sigma r_{1H} (H - h_0) A / B = \pi (2r)^2 \tau_{Hr} \quad \dots \text{式(2-12)}$$

$$A = (a + 1)H + H(a + 2) + h_0 \quad B = H(a + 1)(a + 2)$$

式(2-12)の τ_{Hr} は、斜面試験によりスランプ 1~14cm のモルタルまたはコンクリートで測定した摩擦力の平均値とし、また式 (2-11)の σ_{r1H} は、スランプ試験における底面部の広がりすなわちスランプフロー値が変化しない条件から図 2-5 に示す応力状態を想定して式(2-13)より求め、さらにこれらの結果より式(2-12)を満足する a を算定する。ただし、 τ_{Hr} および σ_{r1H} は、本解析方法の妥当性を確認するために、個々の斜面試験の結果およびスランプフロー値の実測値から求める場合についても行っている。

$$\sigma_{r1H} = 2b' - \sigma_{x1H}$$

$$b' = \sigma_{x1H}(1 + \tan^2\varphi) + C\tan\varphi - (\sigma_{xH}\tan\varphi + C)\sqrt{1 + \tan^2\varphi}$$

$$\sigma_{r1H} = \sigma_{xH}(rx_H/rx_{1H})^2 \quad \dots \text{式(2-13)}$$

ここに、

σ_{xH} :変形前の底面における鉛直応力(gf/cm²)

rx_H :変形前の底面の半径(cm)

σ_{x1H} :変形後の底面における鉛直応力(gf/cm²)

rx_{1H} :変形後の底面の半径(cm)

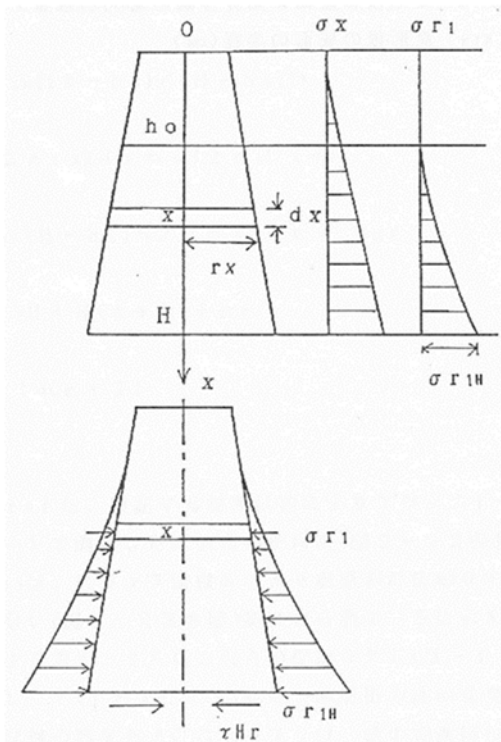


図 2-4 底面摩擦抵抗の考慮²⁻⁹⁾

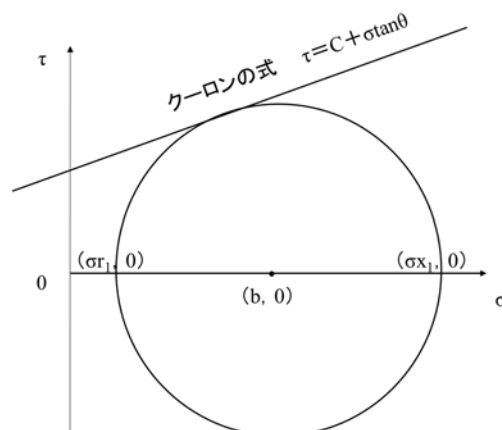


図 2-5 コーン底面部の応力状態²⁻⁹⁾

任意のxにおける扇形要素には、図 2-6 に示すように σ_x および σ_{r_1} が作用し、その各断面の応力状態は同図中のモールの応力円で示される。変形領域の要素の変形後の σ_{x_1} は、前記の変形解析同様にモールの応力円がクーロンの式に接する条件よりもとめることができる。ただし、変形後各要素は底面に近づくので実際には変形前後で σ_{r_1} は変化する。しかし、ここでは硬練りコンクリートの変形を扱っており、その変化は小さいものと考えられるので一定値と仮定する。従って、同図に示すように座標 $(\sigma_{r_1}, 0)$ を通り、クーロンの式に接するモールの応力円を求め、その円の中心座標を $(b, 0)$ とすれば σ_{x_1} は、式(2-14)で与えられる。

$$\sigma_{x_1} = 2b - \sigma_{r_1}$$

$$b = \sigma_{r_1}(1 + \tan^2\varphi) + C\tan\varphi + (\sigma_{r_1}\tan\varphi + C)\sqrt{1 + \tan^2\varphi} \quad \dots \text{式(2-14)}$$

従って薄層円板の変形後の形状、すなわち層厚 d_{x_1} および半径 r_{x_1} は、底面摩擦を考慮しない変形解析同様に式(2-15)および式(2-16)で求めることができる。なお、ランプはこれらの積分式の解析解が得られないので、コーンを適当な厚さ (たとえば 1cm 程度)の薄層円板に分割して、それぞれの変形後の形状を求め、その和から全変形形状を求め計算する方法で行う必要がある。

$$rx_1 = \sqrt{\sigma_x/\sigma_{x_1}}rx \quad \dots \text{式(2-15)}$$

$$dx_1 = (\sigma_{x_1}/\sigma_x)dx \quad \dots \text{式(2-16)}$$

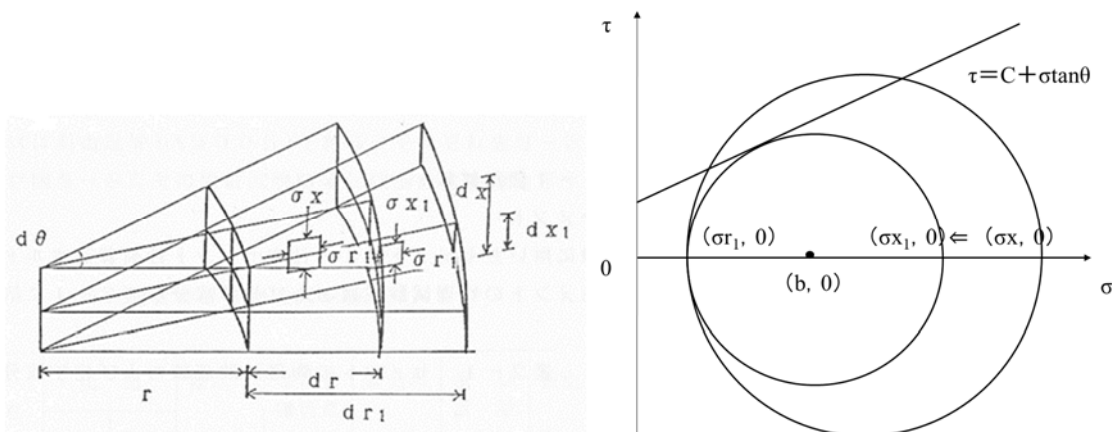


図 2-6 扇形要素の応力(底面摩擦の考慮)²⁻⁹⁾

2.2.4 漏斗試験方法

○ 漏斗を用いたコンクリートの流下試験は、土木学会規準 JSCE-F-512 高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法²⁻¹⁰⁾に従って、漏斗内のコンクリートが全量流出するまでの時間を測定する。なお、試験回数は 1 バッチのコンクリートについて 2 回とする。

高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験手順は以下の通りである。

- 1) 漏斗内壁面を湿潤状態にして上面が水平となるように設置する。
- 2) 吐出口株にコンクリートの受け容器を設置し、底蓋を占める。
- 3) 試料のコンクリートは、投入用容器を用いて漏斗内上端まで静かに流し込む。
- 4) コンクリートの上面を漏斗上端面に合わせてエッジ等でならす。
- 5) 上端面をならし終わったら、10 秒以内に吐出口の底蓋を開け、コンクリートが全量流出するまでの時間をストップウォッチで測定する。
- 6) 流下時間の測定結果を JIS Z 8401 によって、小数点以下 1 けたに丸める。

なお、本研究で使用した漏斗は○漏斗であり、試験器の全景を写真 2-3 に、寸法を図 2-7 に示す。



写真 2-3 ○ 漏斗流下試験器

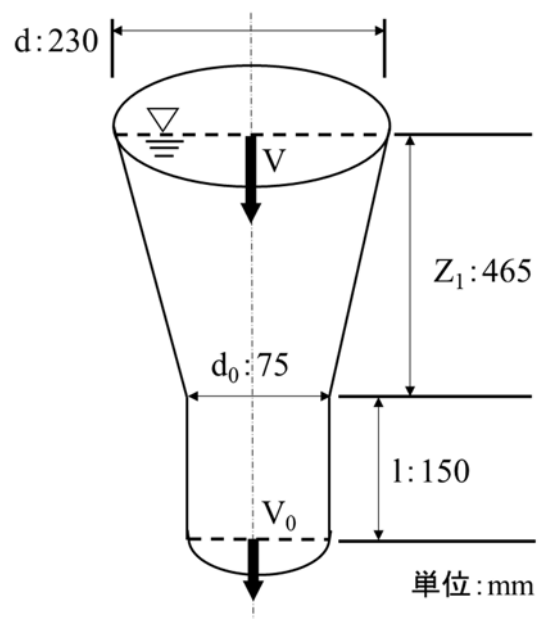


図 2-7 ○ 漏斗流下試験器の寸法

2.2.5 漏斗内のコンクリートの流動解析²⁻¹¹⁾

図 2-8 の模式図に示すモルタル液面の流速を V とし、流出間における流速を V_0 とし、液面と流出間出口にエネルギー方程式を適用する。

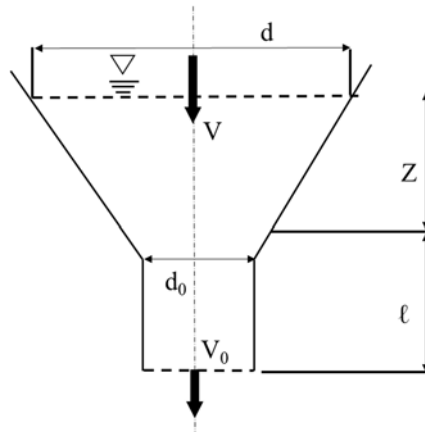


図 2-8 O 漏斗流下試験器の模式図

$$\frac{v^2}{2g} + Z + l = \frac{v_0^2}{2g} + f_m \frac{v_0^2}{2g} + h_0 \quad \dots \text{式(2-17)}$$

ここに、

$f_m \frac{v_0^2}{2g}$: 漏斗から流出管に流入するまでの損失エネルギー

h_l : 流出管における損失エネルギー

$I = \frac{h_l}{l}$: エネルギー勾配

勾配を持つ内管内にビンガム体を流す場合の流量は Buckingham の式を一般化すると、

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta_{pl} l} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4 \right\} \quad \dots \text{式(2-18)}$$

ここで、

$\frac{\Delta p}{l}$: 圧力勾配

$\Delta p = \rho g h$

$\frac{\rho g h}{l} = \frac{\rho g l I}{l} = \rho g I$

ここに、

ρ : 密度(g/cm^3) g : 重力加速度(cm/s^2) I : エネルギー勾配 ($I = \frac{h}{l}$) $\dots \text{式(2-19)}$

h: 水頭(cm) l: 管長(cm)

式(2-16)の $\Delta P/L$ についてエネルギー勾配を用いて表すと,

$$Q = \frac{\pi R^4 \rho g I}{8 \eta_{pl}} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4 \right\} \quad \dots \text{式(2-18)}$$

ここで, 簡単に $E = 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4$ とおけば式(2-18)は以下通りとなる。

$$Q = \frac{\pi R^4 \rho g I E}{8 \eta_{pl}} \quad \dots \text{式(2-19)}$$

漏斗における流出管の平均流速 U_m より,

$$U_m = \frac{Q}{\pi R^4} = \frac{\pi R^4 \rho g I E}{\pi R^4 8 \eta_{pl}} = \frac{R^2 \rho g I}{8 \eta_{pl}} E \quad \dots \text{式(2-20)}$$

式(2-19)より

$$I = \frac{8 \eta_{pl}}{R^2 \rho g E} U_m$$

エネルギー勾配は式(2-17)より

$$I = \frac{h_l}{l} \rightarrow h_l = Il$$

$$h_l = \frac{8 \eta_{pl}}{R^2 \rho g E} U_m l \quad \dots \text{式(2-21)}$$

式を簡単にするため $K = \frac{\rho g E}{8 \eta_{pl}}$ とおけば式(2-21)は,

$$h_l = \frac{l}{K} U_m \quad \dots \text{式(2-22)}$$

漏斗の流出管において $U_m = V_0$ であるから式(2-22)は,

$$h_l = \frac{l}{K} V_0 \quad \dots \text{式(2-23)}$$

また, $Q = \left(\frac{d}{4} \right)^2 \pi V = \left(\frac{d_0}{4} \right)^2 \pi V_0$ であるから,

$$d^2 V = d_0^2 V_0$$

$$V = \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 V_0 \quad \dots \text{式(2-24)}$$

式(2-24)を式(2-17)に代入して整理すると,

$$\frac{1}{2g} \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 V_0^2 + Z + l = \frac{V_0^2}{2g} + f_m \frac{V_0^2}{2g} + h_l$$

式(2-22)を代入して整理すると,

$$\frac{1}{2g} \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 V_0^2 + Z + l = \frac{V_0^2}{2g} + f_m \frac{V_0^2}{2g} + \frac{l}{K} V_0 \quad \dots \text{式(2-25)}$$

式(2-24)を $\frac{V_0^2}{2g}$ で整理すると,

$$\begin{aligned} \frac{V_0^2}{2g} \left\{ \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 - 1 - f_m \right\} - \frac{l}{K} V_0 + (Z + l) &= 0 \\ \left\{ 1 + f_m - \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right\} \frac{V_0^2}{2g} + \frac{l}{K} V_0 - (Z + l) &= 0 \quad \dots \text{式(2-26)} \end{aligned}$$

ここで, 根の方程式を利用して,

$$x = v_0$$

$$a = - \left\{ 1 + f_m - \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right\} \frac{1}{2g}$$

$$b = \frac{l}{K}$$

$$c = -(Z + l) = 0$$

式(2-26)の解は,

$$V_0 = \frac{-\frac{l}{K} \pm \sqrt{\frac{l^2}{K^2} + 4a(Z + l)}}{2a} \quad \dots \text{式(2-27)}$$

式(2-27)において分子がマイナスになることは流速 V_0 もマイナスになるので, 流速の解はプラスを採用する, そのため式(2-27)は,

$$V_0 = \frac{-\frac{l}{K} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2} + 4a(Z + l)}}{2a} \quad \dots \text{式(2-28)}$$

分母子を $\frac{l}{K} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2} + 4a(Z + l)}$ をかけると,

$$V_0 = \frac{-\frac{l^2}{K^2} + \frac{l^2}{K^2} + 4a(Z + l)}{2a \left\{ \frac{l}{K} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2} + 4a(Z + l)} \right\}} = \frac{2(Z + l)}{\frac{l}{K} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2} + 4a(Z + l)}}$$

分母に $(Z + l)$ で割ると,

$$V_0 = \frac{2}{\frac{l}{K(Z+l)} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2(Z+l)^2} + \frac{4a(Z+l)}{(Z+l)^2}}} \quad \dots \text{式(2-28)}$$

aを戻すと,

$$a = 1 + f_m - \left(\frac{d_0}{d}\right)^4 \frac{1}{2g}$$

$$V_0 = \frac{2}{\frac{l}{K(z+l)} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2(z+l)^2} + \frac{2}{(z+l)} \left\{1 + f_m - \left(\frac{d_0}{d}\right)^4\right\}}} \quad \dots \text{式(2-29)}$$

式(2-29)はある瞬間における、流出管からの流速を与える。

流出管が十分長い場合、流出管で層流になる場合、式(2-29)において第3項は分母のLが長くなるので、第三項 ≈ 0 と考え、

$$V_0 = \frac{2}{\frac{l}{K(z+l)} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2(z+l)^2}}} = \frac{2}{\frac{l}{K(z+l)} + \sqrt{\left(\frac{l}{K(z+l)}\right)^2}}$$

$$= \frac{2}{2\frac{l}{K(z+l)}} = \frac{K(z+l)}{l} \quad \dots \text{式(2-30)}$$

式(2-28)に $K = \frac{\rho g R^2 E}{8\eta_{pl}}$ を置き戻すと,

$$V_0 = \frac{\rho g R^2 E}{8\eta_{pl}} \frac{z+l}{l}$$

次に $E = \left\{1 - \frac{4}{3}\left(\frac{r_f}{R}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{r_f}{R}\right)^4\right\}$ をおき戻すと,

$$V_0 = \frac{\rho g R^2 E}{8\eta_{pl}} \frac{z+l}{l} \left\{1 - \frac{4}{3}\left(\frac{r_f}{R}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{r_f}{R}\right)^4\right\} \frac{z+l}{l} \quad \dots \text{式(2-31)}$$

式(2-31)において流出管が十分に長い場合の流速は η_{pl} に反比例し、また扇流半径は $r_f = \frac{2\tau_f}{\rho g l}$ であるから、降伏値 τ_f に比例する。

一般的に高流動コンクリートの降伏値は小さいため、その場合の差は 0 として、式(2-31)の中括弧内は 1 になる。このため、解析的にも O 漏斗流下時間は塑性粘度と関係すると考えられる。

2.3 コンクリートの管内流動解析手法

2.3.1 回転粘度計法

(1)一般

回転粘度計試験における理論は、既存の研究²⁻⁴⁾で解析されており、解析方法は以下に示す。

写真 2-4 に示す回転粘度計には外円筒回転型と内円筒回転型がある。内円筒回転型は図 2-9 に示すように内円筒にトルクを加え、静止している試料にずり速度が生ずるようにしたものである。外円筒回転型は外円筒が試料容器の側壁を兼ねているので、外円筒を回転させることによって、相対的に内円筒に回転を与えることと同じになり、試料にずり速度が生ずる。したがって、内円筒回転型も外円筒回転型も力学的には同様に扱ってよい。ここでは共軸二重円筒型の内円筒回転型について述べる。

(2)測定上の条件

回転粘度計を用いて粘性流体のレオロジー一定数を測定する場合、次の仮定が設定される。

- ①粘性流体は非圧縮性である。
- ②回転軸に垂直な面における流線は円である。
すなわち、流体は層流をなす。
- ③回転軸に垂直な各面における流体の運動は相等しい。
- ④円筒壁面と試料間には相対移動、いわゆるすべりが無い。

(3)回転系のレオロジー方程式

回転流動する試料中に半径および $r+dr$ の 2 層を考え、それぞれの角速度を ω および $\omega-d\omega$ とする。2 層の相対速度の差は、

$$dv = (r + dr)(\omega - d\omega) - r\omega$$

$$dv = r\omega - rd\omega + \omega dr - drd\omega - r\omega$$

$$= \omega dr - rd\omega \quad \therefore \frac{dv}{dr} = \omega - r \frac{d\omega}{dr}$$



写真 2-4 二重円筒型回転粘度計

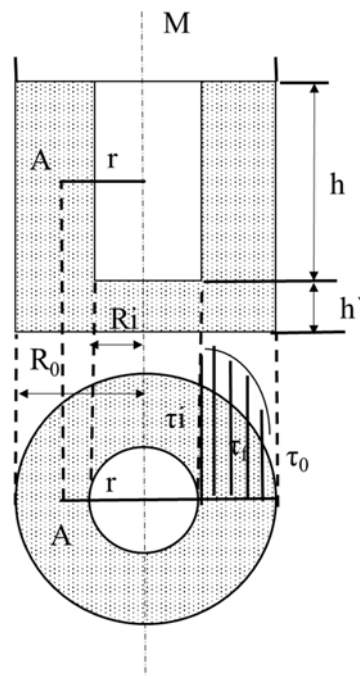


図 2-9 二重円筒型回転粘度計(内円筒回転型)

ここで、 $\left(-r \frac{dv}{dr}\right)$ が粘性抵抗を生じさせるずり速度となる。したがって、ずり速度は、式 (2-32) となる。

$$r = \frac{dv}{dr} = r \frac{d\omega}{dr} \quad \dots \text{式(2-32)}$$

図 2-9 を参照して回転系におけるトルクは、式(2-33)でありせん断応力は、

$$M = 2\pi r^2 h \tau \quad \dots \text{式(2-33)}$$

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 h} \quad \dots \text{式(2-34)}$$

今、 $d\omega = d\dot{\omega}$ 、 $\omega = \dot{\omega}$ と置き換えビンガム流体のレオロジー方程式に式(2-32)および式(2-34)を代入すると

$$\tau = \eta_{pl} \dot{\gamma} + \tau_f \quad \dots \text{式(2-35)}$$

$$\frac{M}{2\pi r^2 h} = \eta_{pl} \left(-r \frac{d\dot{\omega}}{dr} \right) + \tau_f = \left\{ -\eta_{pl} d\dot{\theta} \left(\frac{r}{dr} \right) \right\} + \tau_f$$

$$\therefore \eta_{pl} d\dot{\theta} = \frac{M}{2\pi r^2 h} \frac{dr}{r} + \tau_f \frac{dr}{r}$$

$$\int \eta_{pl} d\dot{\theta} = -\frac{M}{2\pi r^2 h} \int \frac{dr}{r} + \tau_f \int \frac{dr}{r}$$

$$\therefore \eta_{pl} \dot{\theta} = \frac{M}{4\pi r^2 h} + \tau_f \ln r + C$$

ここで、境界条件 $r = R_0$ のとき $\dot{\theta} = 0$

$$\therefore C = -\left(\frac{M}{4\pi R_0^2 h} + \tau_f \ln R_0 \right)$$

$$\begin{aligned} \therefore \eta_{pl} \dot{\theta} &= \frac{M}{4\pi r^2 h} + \tau_f \ln r - \left(\frac{M}{4\pi R_0^2 h} + \tau_f \ln R_0 \right) \\ &= \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{r}{R_0} \quad \dots \text{式(2-33)} \end{aligned}$$

ここに、

η_{pl} : 塑性粘度 (Pa·s)

M: トルク (N·m)

τ_f : 降伏値 (Pa)

h: 試料に面している内円筒の長さ (cm)

$\dot{\theta}$: 半径 r における試料の各速度 (rad./s)

r: 試料の流動半径 (cm)

R_0 : 外円筒半径 (cm)

式(2-33)からせん断応力は半径の 2 乗に反比例するから、最大値は内円筒面に起こり、最小値はそと外円筒壁面におこる。

$$\text{最大せん断応力 } \tau_i = \frac{M}{2\pi R_i^2 h} \quad \dots \text{式(2-36)}$$

ここに、

τ_i :内円筒壁面における試料のせん断応力(Pa)

R_i :内円筒半径(cm)

$$\text{最小せん断応力 } \tau_0 = \frac{M}{2\pi R_0^2 h} \quad \dots \text{式(2-37)}$$

τ_0 :外円筒壁面における試料のせん断応力(Pa)

R_0 :外円筒半径(cm)

τ_i が τ_f より小さい間は流動しない。 $\tau_i \geq \tau_f$ のとき、内円筒壁面の近くの試料から流動を開始する。流動開始トルクは、

$$Mf = 2\pi R_i^2 h \tau_f \quad \dots \text{式(2-38)}$$

試料全体に粒度が起こるのは、 $\tau_0 \geq \tau_f$ となったときで、全試料の流動開始トルクは、

$$M_0 = 2\pi R_0^2 h \tau_f \quad \dots \text{式(2-39)}$$

$M_0 > M > Mf$ の場合、試料は部分的に流動する。すなわち図 2-10 の τ_f :降伏値の点がこれに相当する。

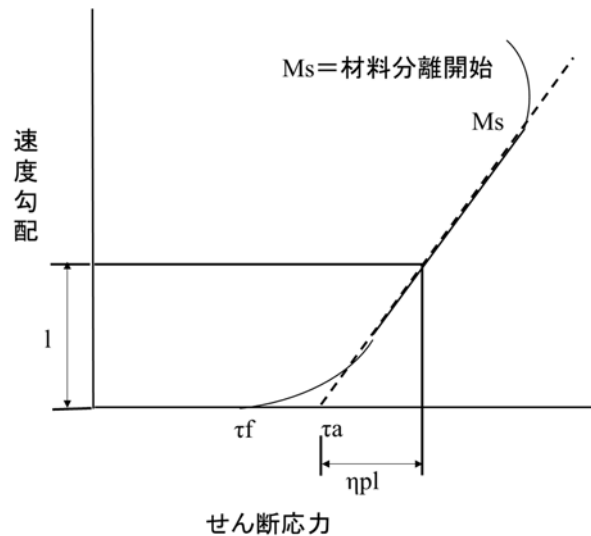


図 2-10 コンシステンシー曲線

図 2-10 のコンシステンシー曲線は、試料が流動を開始してから2次曲線を形成し、試料のずり速度がある値を超えると線形となる。

$\tau = \tau_f$ の位置の半径を r_n とすれば、 r_n 以内の部分は流動し、 r_n 以外の部分は静止している。

$$\eta_{pl}\dot{\theta} = \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r_n^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{r_n}{R_0}$$

$$\tau_f = \frac{M}{2\pi r_n^2 h}$$

$$r_n^2 = \frac{M}{2\pi h \tau_f}$$

$$\therefore r_n = \sqrt{\frac{M}{2\pi h \tau_f}} \quad \dots \text{式(2-40)}$$

$M > M_0$ の場合、内円筒壁面の試料の角速度を $\dot{\theta}_i$ とすれば、

$$\eta_{pl}\dot{\theta}_i = \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{R_i}{R_0} \quad \dots \text{式(2-41)}$$

なお、容器定数として、

$$K_1 = \frac{1}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right)$$

$$K_2 = \ln \frac{R_i}{R_0}$$

とすれば、

$$\dot{\theta}_i = \frac{K_1 M}{\eta_{pl}} - \frac{K_2 \tau_f}{\eta_{pl}}$$

全試料が流動したあとは、角速度とトルクの関係は線形となる。式(2-39)に

$M = 2\pi R_i^2 h \tau_f$ を代入して整理すると、

$$\begin{aligned}
\eta_{pl}\dot{\theta}_i &= \frac{2\pi R_i^2 h \tau_i}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{R_i}{R_0} \\
&= \frac{R_i^2 \tau_i}{2} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{R_i}{R_0} \\
2\eta_{pl}\dot{\theta}_i &= R_i^2 \tau_i \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) + 2\tau_f \ln \frac{R_i}{R_0} \\
&= \tau_i \left(1 - \frac{R_i}{R_0} \right) + 2\tau_f \ln \frac{R_i}{R_0}
\end{aligned}$$

ここで、 $\left(\frac{R_i}{R_0}\right)^2 = a$ とおくと、

$$\begin{aligned}
2\eta_{pl}\dot{\theta}_i &= \tau_i(1-a) + 2\tau_f \ln \frac{R_i}{R_0} \\
\frac{2\dot{\theta}_i}{1-a} \eta_{pl} &= \tau_i + 2\tau_f \frac{1}{(1-a)} \ln \frac{R_i}{R_0} \\
\frac{2\dot{\theta}_i}{1-a} &= \frac{\tau_i}{\eta_{pl}} + \frac{2\tau_f}{(1-a)\eta_{pl}} \ln \frac{R_i}{R_0}
\end{aligned}$$

ここで、全試料の流動開始するトルク M_0 が働くときの内円筒壁面における試料のせん断応力を τ_b とすれば、

$$M_0 = 2\pi R_i^2 h \tau_b$$

式(2-39)の $M_0 = 2\pi R_0^2 h \tau_f$ を代入すると、

$$2\pi R_i^2 h b = 2\pi R_0^2 h \tau_f$$

$$\therefore \tau_b = \left(\frac{R_0}{R_i}\right)^2 \tau_f = \frac{\tau_f}{a} \quad \dots \text{式(2-43)}$$

コンシステンシー曲線の直線部と横軸の交点 τ_a は式(2-41)に

$\dot{\theta}_i = 0, M = 2\pi R_i^2 h \tau_a$ を代入すると、

$$\begin{aligned}
\frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{R_i}{R_0} &= 0 \\
\frac{2\pi R_i^2 h \tau_a}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{R_i}{R_0} &= 0 \\
\frac{\tau_a}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^2 \right\} &= \tau_f \ln \frac{R_i}{R_0} \\
\therefore \tau_a &= \tau_f \frac{2 \ln(R_i/R_0)}{(a-1)} \quad \dots \text{式(2-44)}
\end{aligned}$$

コンシステンシー曲線を描くには、内円筒の回転速度を徐々にあげ、各回転速度におけるトルクを読み取り、縦軸 V および横軸 P を求める。

$$\text{縦軸 } V = \frac{2\dot{\theta}_i}{(1-a)}$$

$$\text{横軸 } P = \frac{M}{2\pi R_i^2 h}$$

V~P図上に打点し、線形に分布していると思われる測点について最小二乗法によって直線式をつくる。

$$V = aP - b$$

塑性粘度はこの直線の逆勾配として求める。すなわち、

$$\eta_{pl} = \frac{1}{a} \times 980 \quad (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

降伏応力は次のようにして求める。

$$V = 0 \text{ のとき, } P = b/a = \tau_a$$

式(2-44)から、

$$\tau_f = \tau_a \frac{(a-1)}{2 \ln(R_i/R_0)} \quad (\text{Pa}) \quad \dots \text{式(2-47)}$$

2.3.2 レオロジー一定数の測定方法

回転粘度計によるレオロジー一定数の測定は、二重円筒型回転粘度計(内円筒半径 150mm, 高さ 200mm, 外円筒半径 200mm)を用い多点法²⁻⁵⁾によって測定した。レオロジー一定数の測定に用いた多点法は、粘度計内の試料上面に直径 1mm 程度の発泡スチロール粒子を数多く配置し、それらの流速をビデオカメラで撮影するもので、内円筒壁面と試料との間の相対移動ならびに試料の流動範囲を画像から読み取り測定するもので、コンクリートのレオロジー一定数の測定方法としては最も信頼できる方法の一つである。

また、容器内の試料は、軸線に沿って一様な円運動をすとしてしているが、内円筒底面に働く吸収トルクの影響を受けることから、外円筒内の底面に、厚さ 5cm 程度の敷きモルタル(C:S:W=1:3.5:0.4)を敷均し、内円筒端末にスリップを生じさせ、吸収トルクの影響を 0 とする方法で行う。なお、回転数は、5rpm, 10rpm, 20rpm, 30rpm, 40rpm, 50rpm の 6 点とする。

回転粘度計は、写真 2-5 に示す機器であって、多点法²⁻¹²⁾によるレオロジー一定数の測定手順は以下の通りである

- 1)外円筒底面に敷きモルタル(C:S:N=1:3:0.4)を厚さ 5cm 程度敷きならし、コテで仕上げをあげる。
- 2)内円筒と底面を密着させトルクを 0 で測定
- 3)試験機にコンクリートを投入しローターを 5rpm, 10rpm, 20rpm, 30rpm, 40rpm, 50rpm (rpm)の順番 に回転させ、対応するそれぞれのトルクの測定する
- 4)試験時に回転粘度計試験機の上部から試料面に対して垂直となるようにビデオカメラを設置し、それぞれの円筒と回転と標点としての発泡スチロール移動状態を測定する。
- 5)解析時に標点の内円筒中心からの距離を測定し、ビデオカメラをコマ送りし、標点の移動した場所までの移動距離を測定し、角速度を求める。
- 6)角速度とトルクより図 2-11 のようなコンシステンシー曲線を作成し、近似式より傾き a と切片 b を求めて式(2-46), 式(2-47)より塑性粘度, 降伏値を求める。

$$\eta_{pl} = \frac{1}{a} \times 980 \quad (Pa \cdot s) \quad \dots \text{式(2-46)}$$

$$\tau_f = \frac{b}{a} \frac{(a-1)}{2 \ln(R_i/R_0)} \quad (Pa) \quad \dots \text{式(2-47)}$$

なお、図 2-11 に一例を示すとおり、中・高流動コンクリートはコンシステンシー曲線が直線的に推移しておらず、逆 S 字の挙動を示している。これは普通コンクリートにはない傾向で、要因としては高性能 AE 減水剤や増粘剤含有高性能 AE 減水剤による粘性の付与によりフレッシュ性状がチキソトロピーの性質を有していることが一因と考えられる。

今回は直線回帰して求めた直線式により塑性粘度，降伏値を求めた。便宜上，図 2-11 に示すようにコンシステンシー曲線を直線回帰した場合，相関は 0.96～0.98 でありレオロジー定数には問題がない程度と考えられる。



写真 2-5 回転粘度計試験機

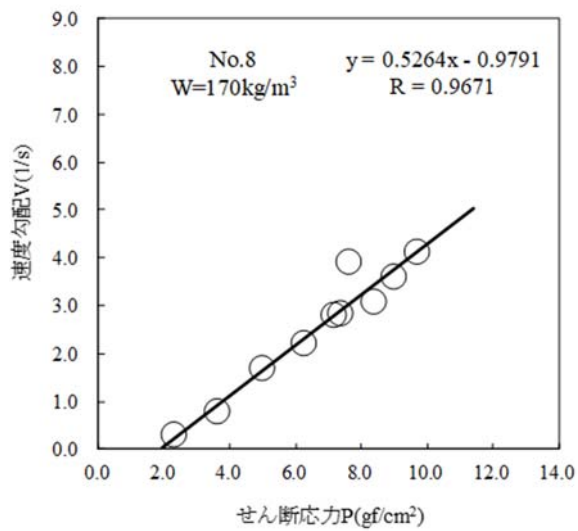
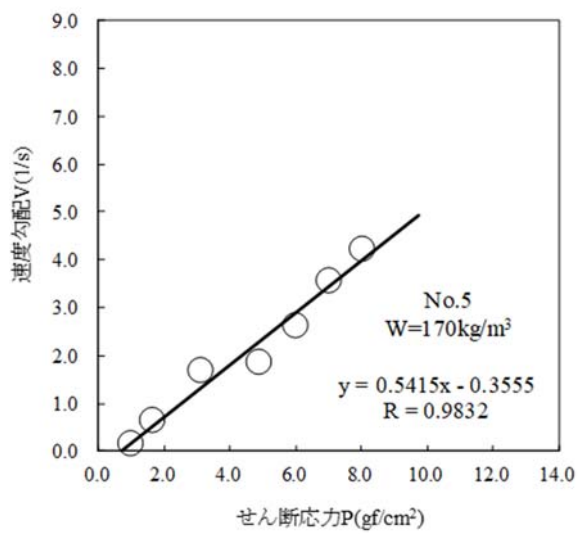
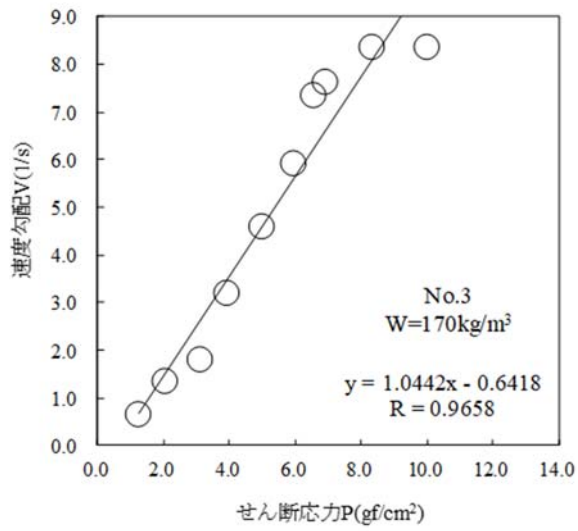


図 2-11 コンシステンシー曲線

2.4 測定結果の一例

2.4.1 使用材料およびコンクリートの配合

測定に用いた中流動コンクリートの使用材料を表 2-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)，細骨材は茨城県産鹿島産陸砂(表乾密度 2.63g/cm³，吸水率 1.23%，FM2.56)を，粗骨材は東京都青梅産砕石 2005(最大寸法 20mm，表乾密度 2.67g/cm³，吸水率 0.92%，FM6.77)，混和剤はポリカルボン酸エーテル性化合物，増粘性高分子化合物の複合体を主成分とする高性能AE減水剤をそれぞれ使用した。

表 2-2 にコンクリートの配合を示す。スランプフローは 50, 60, 65cm を目標として，単位水量と混和剤を変化させた 3 水準で検討を行った。

表 2-1 使用材料

材料	種類および物性	
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³ ， 粉末度 3,200cm ² /g
細骨材	茨城県鹿島産陸砂	密度 2.63g/cm ³ ， 吸水率 1.23%， F.M.2.56
粗骨材	東京都青梅産砕石 2005	密度 2.67g/cm ³ ， 吸水率 0.92%， F.M.6.77
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
	増粘剤含有型高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル性化合物 増粘性高分子化合物の複合体

表 2-2 コンクリートの配合

種類	配合 No.	目標 SF(cm)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (c×%)	助剤 (c×%)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
中流動	1	50.0	53.7	160	356	966	862	0.5	0.003
	2	60.0	53.1	165	367	945	814	0.8	0.003
	3	65.0	52.4	170	378	937	766	1.0	0.003

2.4.2 コンシステンシー試験結果

表 2-3 は、本実験で測定したスランプフロー試験結果(スランプフロー、流動停止時間、50cm 到達時間、50cm 到達後～流動停止時間)および後述する回転粘度計試験で求めた塑性粘度および降伏値の試験結果を示したものである。

表 2-3 において 50cm 到達時間について検討を行ったが、スランプフローが 50cm 未満のコンクリートについては未測定となっている。50cm フロー到達時間の測定は高流動コンクリートを想定して提案されたもので、本実験で用いた中流動コンクリートのなかでも 50cm 以下のフローの場合は測定ができず 50cm 到達～流動停止時間についても求めることはできない。

次に、図 2-12 に示すようにスランプフローと回転粘度計により求めた降伏値との関係については、いずれの結果とも高い相関関係を得ることが確認できた。これは 2.2 で述べたスランプの変位解析理論及び従来²⁻³⁾の知見の通り、中流動コンクリートはスランプフローと降伏値とが密接関係していることを実証している。また、各コンシステンシー試験と降伏値との関係において、スランプフローと降伏値とが直線関係であるとするとその相関係数は $R=0.96$ であり高い相関性を示している。これは既往の研究²⁻³⁾である高流動コンクリートの場合と同様な傾向であった。以上より、中流動コンクリートは高流動コンクリートと近似した流動性状を有していると推察される。

さらに、図 2-13 に示すようにスランプフローと回転粘度計により求めた塑性粘度との関係については、いずれの結果も直線近似した場合の相関係数は $R=0.72\sim 0.93$ であって、降伏値との相関よりも若干低い結果であるものの既往の研究²⁻¹²⁾にもある通り、一定の関係性は示していると考えられる。本実験において相関関係がもっとも高いのは流動停止時間であったが、既往の高流動コンクリートを用いた実験結果では 50cm 到達時間であった。この要因としては、高流動と中流動とでは流動挙動は同様な傾向であっても使用材料や配合、粘性の違いによるものと考えられる。また、フレッシュコンクリートは、スランプコーンを引き上げた直後は速い速度でフローが広がっていくが、最終フロー付近になると速度が低下している。これは、中流動コンクリートの降伏値が高流

動コンクリートより大きく 2.2 に述べたように、コンクリートの自重によるせん断力変形開始後、高流動コンクリートより速い段階で降伏値と同等となったためと推察している。

表 2-3 スランプフロー試験結果とレオロジー定数(塑性粘度・降伏値)

スランプフロー試験						回転粘度計	
スランプフロー			50cm 到達時間	流動 停止時間	50cm 到達～ 流動停止時間	塑性粘度	降伏値
(cm)×(cm)		平均	(s)	(s)	(s)	(Pa・s)	(Pa)
65.5	66.0	65.8	3.71	19.57	15.86	90.2	56
70.0	69.0	69.5	3.45	20.04	16.59	85.2	58
69.0	68.0	68.5	3.71	17.52	13.81	96.3	52
66.0	67.0	66.5	4.25	20.15	15.9	82.5	50
69.0	68.5	68.8	3.64	19.04	15.4	89.1	62
64.0	63.0	63.5	3.74	18.02	14.28	86.3	64
67.0	64.0	65.5	5.31	18.98	13.67	84.5	66
67.0	65.0	66.0	3.52	19.7	16.18	89.6	57
61.0	60.0	60.5	4.81	14.9	10.09	93.9	70
62.0	59.0	60.5	6.11	16.13	10.02	95.4	65
59.0	58.0	58.5	5.62	16.45	10.83	90.3	71
59.0	58.5	58.8	4.28	13.67	9.39	94.1	69
58.0	58.0	58.0	5.62	15.08	9.46	92.1	68
62.0	61.5	61.8	5.21	17.03	11.82	94.5	67
62.0	61.0	61.5	4.67	13.37	8.7	98.9	62
59.5	59.0	59.3	4.92	14.17	9.25	91.9	69
62.0	61.0	61.5	4.61	14.45	9.84	92.2	68
49.0	45.5	47.3	-	9.25	-	124.5	100
50.0	48.0	49.0	-	6.55	-	150.5	92
50.0	47.0	48.5	-	8.83	-	128.8	95
52.0	50.0	51.0	6.91	7.73	0.82	141.4	97
49.0	48.5	48.8	-	11.67	-	112.9	98
49.0	49.5	49.3	-	6.64	-	164.2	93
47.5	49.0	48.3	-	7.64	-	148.5	92
50.5	50.0	50.3	6.56	10.71	4.15	122.2	88
51.0	50.5	50.8	6.31	10.03	3.72	131.6	87

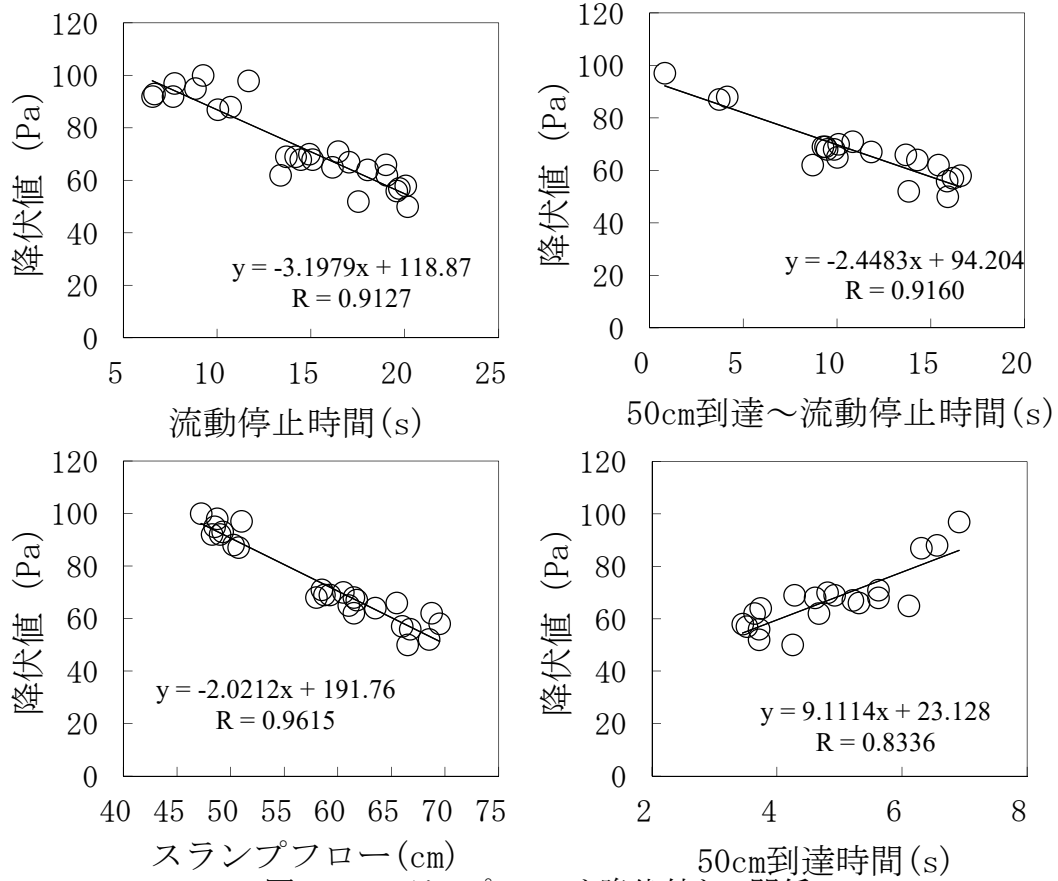


図 2-12 スランプフローと降伏値との関係

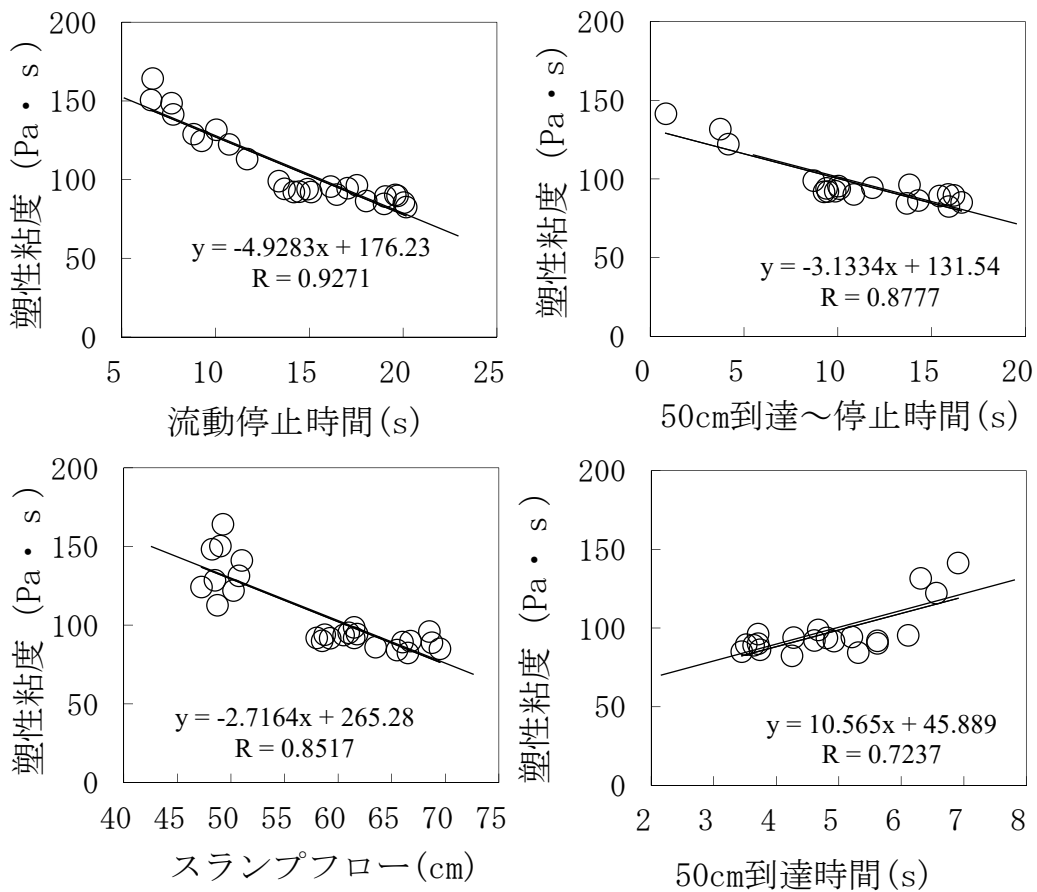


図 2-13 スランプフローと塑性粘度との関係

表 2-4 は、本実験で測定した O 漏斗流下時間と回転粘度計試験により求めた塑性粘度および降伏値の試験結果を示したものである。

表 2-4 および図 2-14 において、O 漏斗流下時間は一部の結果を除いて 3.16～5.16 の範囲となり、回転粘度計で求めた塑性粘度との関係について整理すると異なるレオロジー定数を有するコンクリートに対して明確な関係性は見受けられなかった。

この結果より、O 漏斗流下時間と塑性粘度は一定の関係は見込めるが、密接に関係していないと考えられる。これは 2.2.5 で述べた解析結果が適用できるほど、流下時間の測定結果が回転粘度計により求めたレオロジー定数に対して顕著に表れないためと推察され、流出管の長さも影響していると考えられる。

表 2-4 O 漏斗流下時間とレオロジー定数(塑性粘度・降伏値)

O 漏斗流下試験			回転粘度計	
流下時間			塑性粘度 (Pa・s)	降伏値 (Pa)
1 回目	2 回目	平均		
3.53	3.81	3.67	90.2	56
3.06	3.17	3.12	85.2	58
3.83	3.91	3.87	96.3	52
3.95	4.22	4.09	82.5	50
4.18	4.27	4.23	89.1	62
3.74	3.99	3.87	86.3	64
3.95	4.01	3.98	84.5	66
3.32	3.13	3.23	89.6	57
3.33	3.04	3.19	93.9	70
3.23	3.39	3.31	95.4	65
4.44	4.47	4.46	90.3	71
3.31	3.35	3.33	94.1	69
6.11	3.91	5.01	92.1	68
4.79	3.37	4.08	94.5	67
3.29	3.22	3.26	98.9	62
4.18	3.89	4.04	91.9	69
4.10	6.22	5.16	92.2	68
4.99	4.66	4.83	124.5	100
4.85	3.62	4.24	150.5	92
4.30	3.86	4.08	128.8	95
5.19	4.03	4.61	141.4	97
4.43	4.48	4.46	112.9	98
4.78	4.37	4.58	164.2	93
4.15	3.70	3.93	148.5	92
4.09	3.73	3.91	122.2	88
4.74	4.59	4.67	131.6	87

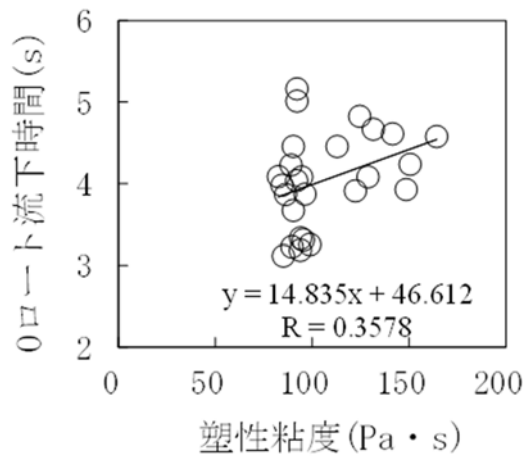


図 2-14 O 漏斗流下時間と塑性粘度の関係

2.4.3 レオロジー定数の結果

表 2-5 に回転粘度計によって求めたレオロジー定数と前述した各コンシステンシー試験結果を示す。また、図 2-15 は単位水量と塑性粘度との関係および降伏値との関係を示したものである。

塑性粘度は、単位水量 $170\text{kg}/\text{cm}^3$ のコンクリートの場合 $83\sim 90\text{Pa}\cdot\text{s}$ となり、平均 $88\text{Pa}\cdot\text{s}$ で変動係数は 4.6% であった。単位水量 $165\text{kg}/\text{cm}^3$ では塑性粘度 $90\sim 99(\text{Pa}\cdot\text{s})$ となり、平均 $94\text{Pa}\cdot\text{s}$ で変動係数は 2.5% であった。単位水量 $160\text{kg}/\text{cm}^3$ では塑性粘度 $122\sim 164\text{Pa}\cdot\text{s}$ となり、平均が $136\text{Pa}\cdot\text{s}$ で変動係数は 11.3% であった。

降伏値は、単位水量 $170\text{kg}/\text{cm}^3$ のコンクリートの場合 $50\sim 64\text{Pa}$ となり、平均 58Pa で変動係数は 9.0% であった。単位水量 $165\text{kg}/\text{cm}^3$ では降伏値 $62\sim 71\text{Pa}$ となり、平均 68Pa で変動係数は 3.8% であった。単位水量 $160\text{kg}/\text{cm}^3$ では降伏値 $87\sim 100\text{Pa}$ となり、平均が 94Pa で変動係数は 4.4 であった。

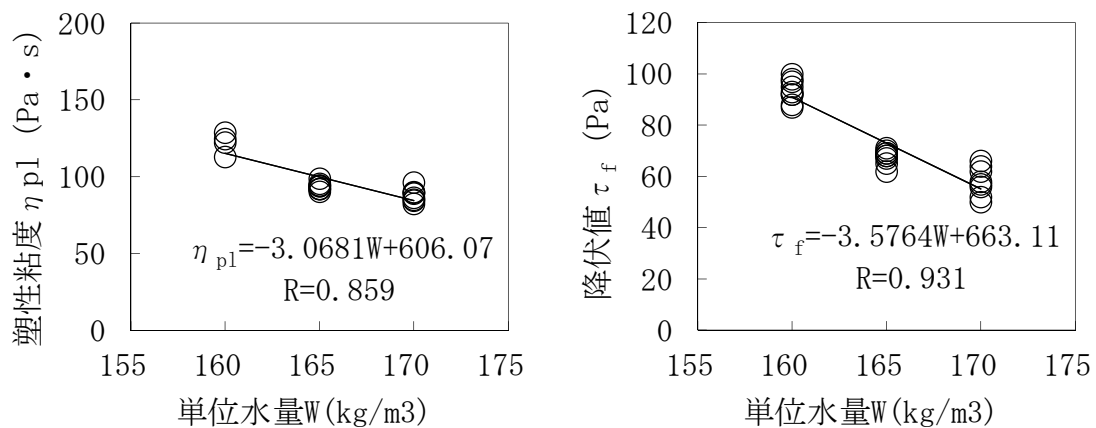


図 2-15 単位水量と塑性粘度, 降伏値との関係

表 2-5 コンシステンシー試験結果と回転粘度計による試験結果

単位水量	スランプフロー				O漏斗流下時間(s)			回転粘度計				
	平均径 (cm)	50cm到達時間 (s)	流動停止時間 (s)	50cm～流動 停止時間 (s)	1回目	2回目	平均	測定値	平均	降伏値	変動 係数	
W (kg/m ³)	170	67.0	3.71	19.57	15.86	3.53	3.81	3.67	90		56	9.0%
		69.5	3.45	20.04	16.59	3.06	3.17	3.12	85		58	
		68.5	3.71	17.52	13.81	3.83	3.91	3.87	96		52	
		66.5	4.25	20.15	15.90	3.95	4.22	4.09	83	88	50	
		69.0	3.64	19.04	15.40	4.18	4.27	4.23	89		62	
		63.5	3.74	18.02	14.28	3.74	3.99	3.87	86		64	
		65.5	5.31	18.98	13.67	3.95	4.01	3.98	85		66	
		66.0	3.52	19.70	16.18	3.32	3.13	3.23	90		57	
		89.0	4.81	14.90	10.09	3.33	3.04	3.19	94		70	
		61.0	6.11	16.13	10.02	3.23	3.39	3.31	95		65	
165	58.5	5.62	16.45	10.83	4.44	4.47	4.46	90		71	3.8%	
	59.0	4.28	13.67	9.39	3.31	3.35	3.33	94		69		
	58.0	5.62	15.08	9.46	6.11	3.91	5.01	92	94	68		
	62.0	5.21	17.03	11.82	4.79	3.37	4.08	95		67		
	61.5	4.67	13.37	8.70	3.29	3.22	3.26	99		62		
	59.5	4.92	14.17	9.25	4.18	3.89	4.04	92		69		
	61.5	4.61	14.45	9.84	4.10	6.22	5.16	92		68		
	47.5	—	9.25	—	4.99	4.66	4.83	125		100		
	49.0	—	6.55	—	4.85	3.62	4.24	151		92		
	48.5	—	8.83	—	4.30	3.86	4.08	129		95		
160	51.0	6.91	7.73	0.82	5.19	4.03	4.61	141	136	97	11.3%	
	49.0	—	11.67	—	4.43	4.48	4.46	113		98		
	49.5	—	6.64	—	4.78	4.37	4.58	164		93		
	48.5	—	7.64	—	4.15	3.70	3.93	149		92		
	50.5	6.56	10.71	4.15	4.09	3.73	3.91	122		88		
	51.0	6.31	10.03	3.72	4.74	4.59	4.67	132		87		

2.5 コンシステンシー試験方法における検討課題

各種コンシステンシー試験方法と回転粘度計によるレオロジー定数との関係性を把握し、汎用的なコンシステンシー試験結果からレオロジー定数を把握できる可能性はあるものの使用材料や配合、粘性によっては相関性が認められないものもあり、一義的に結果を得るには適切とはいえない。

また、レオロジー定数を求める方法として広く用いられている回転粘度計を適用するには解析に時間や技術を必要とすること(1 データの塑性粘度と降伏値 1 組を得るのに要する時間は 3 時間程度:測定 15 分, 解析 2~3 時間), 定性的な評価となること, さらには設備も大掛かり(重量物で移動が容易でない・費用も数百万単位)で実験研究には問題ないが, 現場試験などの実用には必ずしも有用とはいえない。

そのため, レオロジー定数を定量的にかつ簡易に測定できる方法の開発が必要であると考えられる。

参考文献[第2章]

- 2-1) 森博嗣:フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価試験に関する解析的検討,
コンクリート工学年次論文報告集,Vol.34,No.12
- 2-2) 佐久間翔平:高流動コンクリートの流動評価に関する一考察,日本大学生産工学
第48回学術講演概要,2015
- 2-3) 村田二郎他:まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定法に関する一考
察,土木学会論文報告集,第284号,pp.117-125,1979.4
- 2-4) 後藤 廉平, 平井 西夫, 花井 哲也:レオロジーとその応用, P29,式 2.9, 共立出
版, 1962.2
- 2-5) 土木学会:コンクリートのポンプ施工指針(案),コンクリートライブラリ第57号, 昭和
60年11月(1985)
- 2-6) 鈴木一雄: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,2004
- 2-7) 岡本寛昭ほか:コンクリート施工設計学序説, 技法堂出版, p.205, 2004
- 2-8) 越川茂雄, 伊藤義也, 西村昌史, 高橋一義 : セメント懸濁液のレオロジー特性,
第50回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.54-55, 1995.9
- 2-9) 下山善秀:フレッシュコンクリートの変形に関する基礎的研究, pp.104-116 (1988)
- 2-10) 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 高流動
コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法, 2018
- 2-11) 谷川恭雄ほか:セメント系粘性材料のロート試験に関するレオロジー的考察, セ
メント系充填材に関するシンポジウム論文集, pp.1-6, 1992.12
- 2-12) 菊川浩治:フレッシュコンクリートの粘度式とその適用に関する研究(1987)

第 3 章

中・高流動コンクリートのレオロジー測定

3.1 概説【流量予測についての検討(コンクリートの管内流動)】

第3章では、コンクリートの管内流動の基礎理論を述べるとともに、新しいコンシステンシー試験方法として管型粘度計(圧送試験装置)を試作し、装置の緒元、試験方法および試験結果を示した。

コンクリートはビンガム体に近似した流動挙動を示すが、ビンガム体の流量式である Buckingham 式による流量推定より大きな流量を示す。これは管内の壁面におけるすべり現象が起因していることから、コンクリートの管内流動解析に必要な塑性粘度、降伏値、付着力および粘性摩擦係数を求めるために管壁にすべりを伴う流量式を用いて検討した。

検討の結果、試作した管型粘度計の圧送圧力と流出量とは比例関係が認められ、管型粘度計により求まるコンシステンシーの試験値はポンプ圧送量と同じディメンションで表示されるため、圧送経験のないコンクリートでも流動性状を容易に把握することができる可能性が示された。また、同一の圧力勾配における流出量は単位水量に比例して流量の増加が確認できた。

なお、管型粘度計による圧送圧力と流出量との測定による 4 組の圧力勾配と流量との測定値を用いても流量式が発散し四元連立で解けないため、物性値となる付着力と極めて高い相関関係があるスランプフロー値との実験式を活用して、流量式を三元連立に解いて塑性粘度、降伏値および粘性摩擦係数を求める方法について検証した。

検証の結果、中・高流動コンクリートのラビング応力とすべり速度との関係において、付着力および粘性摩擦係数は、管内の流動性状によって相違すること、管型粘度計を用いて推定した塑性粘度および降伏値は、回転粘度計による測定値と比較的良く近似していることを示した。また、回転粘度計に比して、機器の費用も安価であり、測定結果を定量的に示すことが可能となった。

しかし、レオロジーを把握するための解析手法として実験式を用いることは合理的でないこと、さらに装置も簡易的ではないことなど課題も見出された。

3.2 フレッシュコンクリートの管内流動^{3-1)~3-13)}

フレッシュコンクリート管内流動は、図 3-1 および図 3-2 に示す通り、鈎合式より、ビンガム体に近似したレオロジーの挙動を示すと言われている。

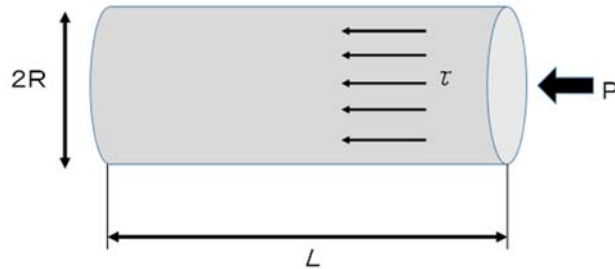


図 3-1 コンクリートの管内流動³⁻¹⁾

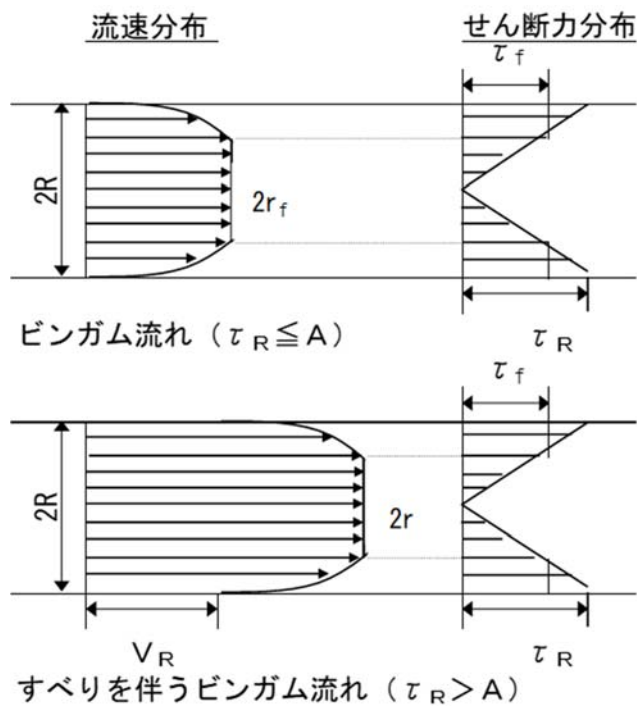


図 3-2 圧送管内における流速分布³⁻¹⁾

ここに、

Q_B :ビンガム流量(cm^3/s)、 R :管の半径(cm)、 L :管の長さ(cm)、

η_{pl} :塑性粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)、 r_f :栓流半径(cm)($=2L \tau_f / \Delta P$)、 τ_f :降伏値(Pa)

$$\pi r^2 \Delta p = 2\pi r l \tau \quad \dots \text{式(3-1)}$$

$$\tau = \eta_{pl} \gamma_f + \tau_f \quad \dots \text{式(3-2)}$$

$$\gamma = \frac{dv}{dr} \quad \dots \text{式(3-3)}$$

式(3-1)より,

$$\tau = \frac{\pi r^2 \Delta p}{2 \pi r l} = \frac{r \Delta p}{2l} \quad \dots \text{式(3-4)}$$

式(3-3),(3-4)を式(3-2)に代入すると,

$$\frac{r \varphi}{2l} = -\eta_{pl} \frac{dv}{dr} + \tau_f$$

$$\eta_{pl} \left(\frac{dv}{dr} \right) = -\frac{r}{2} \frac{\Delta p}{l} + \tau_f$$

$$\frac{dv}{dr} = \frac{-r}{2\eta_{pl}} \frac{\Delta p}{l} + \frac{\tau_f}{\eta_{pl}}$$

$$dv = -\frac{r}{\eta_{pl}} \int \left(\frac{\Delta p}{2l} r + \tau_f \right) dr$$

$$v = -\frac{r}{\eta_{pl}} \left[\frac{r^2}{4} \frac{\Delta p}{l} - \tau_f r \right] + C \quad \dots \text{式(3-5)}$$

$r = R$ で $v = 0$ を式(3-5)に代入すると,

$$C = \frac{1}{\eta_{pl}} \left(\frac{R^2}{4} \frac{\Delta p}{l} - \tau_f R \right) \quad \dots \text{式(3-6)}$$

式(3-6)を式(3-5)に代入すると,

$$v = -\frac{1}{\eta_{pl}} \left(\frac{r^2}{4} \frac{\Delta p}{l} - \tau_f r \right) + \frac{1}{\eta_{pl}} \left(\frac{R^2}{4} \frac{\Delta p}{l} - \tau_f R \right)$$

$$v = -\frac{r^2 \Delta p}{4l\eta_{pl}} + \frac{\tau_f r}{\eta_{pl}} + \frac{R^2 \Delta p}{4l\eta_{pl}} - \frac{\tau_f R}{\eta_{pl}}$$

$$v = \frac{\Delta p}{4l\eta_{pl}} (R^2 - r^2) - \frac{\tau_f}{\eta_{pl}} (R - r)$$

$$v = \frac{1}{\eta_{pl}} \left\{ \frac{\Delta p}{4l} (R^2 - r^2) - \tau_f (R - r) \right\} \quad \dots \text{式(3-7)}$$

式(4-2)において,

$$\tau_f = \frac{\tau_f}{2} \frac{\Delta p}{l} \Rightarrow \tau_f = \frac{2l}{\Delta p} \tau_f \quad \dots \text{式(3-8)}$$

流量は,

$$Q_A = \text{外側} \times \text{中心流れ}$$

$$Q_A = \int_{r_f}^R v \, dr + \pi r_f^2 h$$

$$Q_A = \int_{r_f}^R 2\pi r v \, dr + \pi r_f^2 v_f \quad \dots \text{式(3-9)}$$

式(3-9)に $r = r_{f1}$ $v = v_f$ とおけば,

$$v_f = \left\{ \frac{\Delta p}{4l} (R^2 - r_{f1}) - \tau_f (R - v_{f1}) \right\} \quad \dots \text{式(3-10)}$$

第2項は,

$$\frac{\pi r_f^2 f}{\eta_{pl}} \left\{ \frac{\Delta p}{4l} (R^2 - r_{f1}) - \tau_f (R - r_{f1}) \right\} \quad \dots \text{式(3-11)}$$

第1項は,

$$\begin{aligned} \int_{r_f}^R 2\pi r v \, dr &= \frac{2\pi}{\eta_{pl}} \int_{r_f}^R \frac{\Delta p}{4l} (R^2 - r^2) - \tau_f (R - r_{f1}) \, r \, dr \\ &= \frac{2\pi}{\eta_{pl}} \int_{r_f}^R \left(\frac{\Delta p R^2}{4l} r - \frac{\Delta p}{4l} r^3 - \tau_f R r + \tau_f r^2 \right) \, dr \\ &= \frac{2\pi}{\eta_{pl}} \left[\frac{\Delta p R^2}{4l} \frac{r^2}{2} - \frac{\Delta p}{4l} \frac{r^4}{4} - \tau_f R \frac{r^2}{2} + \tau_f \frac{r^3}{3} \right]_{r_f}^R \\ &= \frac{2\pi}{\eta_{pl}} \left[\frac{\Delta p R^2 r^2}{8l} - \frac{\Delta p}{16l} r^4 - \tau_f \frac{r^2}{2} + \tau_f \frac{r^3}{3} \right]_{r_f}^R \\ &= \frac{2\pi}{\eta_{pl}} \left\{ \left(\frac{\Delta p R^4}{8l} - \frac{\Delta p R^4}{16l} - \tau_f \frac{R^3}{2} + \tau_f \frac{R^3}{3} \right) - \left(\frac{\Delta p R^2}{8l} r_f^2 - \frac{\Delta p}{16l} r_f^4 - \frac{\tau_f R}{2} r_f^2 + \frac{\tau_f r_f^3}{3} \right) \right\} \\ &\quad \dots \text{式(3-12)} \end{aligned}$$

第1項+第2項 \Rightarrow 式(3-12)+式(3-11)

$$\begin{aligned} Q_A &= \frac{2\pi}{\eta_{pl}} \left(\frac{\Delta p R^4}{8l} - \frac{\Delta p R^4}{16l} - \frac{\tau_f R^3}{2} + \frac{\tau_f R^3}{3} - \frac{\Delta p R^2}{8l} r_f^2 + \frac{\Delta p r_f^4}{16l} + \frac{\tau_f R}{2} r_f^2 - \frac{\tau_f r_f^3}{3} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\Delta p R^2}{8l} r_f^2 - \frac{\Delta p}{8l} r_f^4 - \frac{\tau_f R r_f^2}{2} + \frac{\tau_f r_f^3}{2} \right) \quad \dots \text{式(3-13)} \end{aligned}$$

式を整理すると,

$$\frac{\Delta p R^4}{8l} - \frac{\Delta p R^4}{16l} = \frac{\Delta p R^4}{16l} \quad \dots \text{式(3-14)}$$

$$-\frac{\tau_f R^3}{2} + \frac{\tau_f R^3}{3} = -\frac{\tau_f R^3}{6} \quad \dots \text{式(3-15)}$$

$$-\frac{\Delta p R r_f^2}{8l} + \frac{\Delta p r_f^2}{16l} + \frac{\Delta p R^2 r_f^2}{8l} = 0 \quad \dots \text{式(3-16)}$$

$$-\frac{\Delta p r_f^4}{16l} + \frac{\Delta p r_f^4}{8l} = -\frac{\Delta p r_f^4}{16l} \quad \dots \text{式(3-17)}$$

$$-\frac{\tau_f r_f^4}{3} + \frac{\tau_f r_f^2}{2} = \frac{\tau_f r_f^2}{6}$$

$$\frac{\tau_f R r_f^2}{2} - \frac{\tau_f R r_f^2}{2} = 0$$

従って,

$$\begin{aligned} Q_A &= \frac{2\pi}{\eta_{pl}} \left(\frac{\Delta p R^4}{16l} - \frac{\tau_f R^3}{6} - \frac{\Delta p r_f^4}{16l} + \frac{\tau_f r_f^4}{6} \right) \\ &= \frac{\pi \Delta p R^4}{8l \eta_{pl}} - \frac{\pi \Delta p r_f^4}{8l \eta_{pl}} - \frac{\pi \tau_f R^3}{3 \eta_{pl}} + \frac{\pi \tau_f r_f^4}{3 \eta_{pl}} \quad \dots \text{式(3-18)} \end{aligned}$$

$$\tau_f = \frac{r_f \Delta p}{\Delta l} \Rightarrow r_f = \frac{2l}{\Delta p} \tau_f$$

これを2項と4項に代入すると,

$$\begin{aligned} \text{2項目} \quad & -\frac{\pi r_f}{8l \eta_{pl}} \left(\frac{2l}{\Delta p} \tau_f \right)^4 = -\frac{\pi \Delta p}{8l \eta_{pl}} \frac{2^4 l^4 \tau_f^4}{\Delta p^4} = -\frac{2\pi l^3 \tau_f^4}{\eta_{pl} \Delta p^4} \\ \text{4項目} \quad & \frac{\pi \tau_f}{3 \eta_{pl}} \left(\frac{2l}{\Delta p} \tau_f \right)^3 = \frac{\pi \tau_f}{3 \eta_{pl}} \frac{2^3 l^3 \tau_f^3}{\Delta p^3} = \frac{8\pi l^3 \tau_f^4}{3 \eta_{pl} \Delta p^3} \end{aligned}$$

第2項+第4項

$$-\frac{2\pi l^3 \tau_f^4}{\eta_{pl} \Delta p^3} + \frac{8\pi l^3 \tau_f^4}{3 \eta_{pl} \Delta p^3} = \frac{-6\pi l^3 \tau_f^4 + 8\pi l^3 \tau_f^4}{3 \eta_{pl} \Delta p^3} = \frac{2\pi l^3 \tau_f^4}{3 \eta_{pl} \Delta p^3} \quad \dots \text{式(3-19)}$$

従って, 式(3-18)の第1項+(第2項+第4項)+第3項

$$\begin{aligned} Q_A &= \frac{\pi R^4 \Delta p}{8l \eta_{pl}} + \frac{2\pi l^3 \tau_f^4}{3 \eta_{pl} \Delta p^3} - \frac{\pi \tau_f R^3}{3 \eta_{pl}} \quad \dots \text{式(3-20)} \\ &= \frac{\pi R^4 \Delta p}{8l \eta_{pl}} \left(1 + \frac{2\pi l^3 \tau_f^4}{3 \eta_{pl} \Delta p^3} \frac{8l \eta_{pl}}{\pi R^4 \Delta p} - \frac{\pi \tau_f R^3}{3 \eta_{pl}} \frac{8l \eta_{pl}}{\pi R^4 \Delta p} \right) \\ &= \frac{\pi R^4 \Delta p}{8l \eta_{pl}} \left(1 + \frac{16l^4 \tau_f^4}{3R^4 \Delta p^4} - \frac{8\tau_f l}{3R \Delta p} \right) \end{aligned}$$

第3項は,

$$-\frac{2 \cdot 4}{3} \frac{l \tau_f}{R \Delta p} = -\frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)$$

第2項は,

$$\frac{16}{3} \frac{l^4 \tau_f^4}{R^4 \Delta p^4} = \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4$$

従って,

$$Q_A = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 l \eta_{pl}} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4 \right\} \quad \dots \text{式(3-21)}$$

よって、ビンガム体の流量は式(3-20)の Buckingham 式にて表すことができる。

しかし、実際のコンクリートの流れは後述するように式(3-21)より実際の流量の方が大きな値となる。これはコンクリートが管壁ですべりを伴って流れているため、ビンガム流量を Q_B とした場合、下記補正³⁻¹⁾を行う必要がある。

$$Q_A = Q_B + \pi R^2 V_R = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 l \eta_{pl}} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4 \right\} + \pi R^2 V_R \quad \dots \text{式(3-22)}$$

ここに,

V_R : すべり速度(cm/s), Q_A : 実測流量(cm³/s)

式(3-22)におけるすべり速度は、次のように算定できる。

実測流量 Q_A は全流量であって、ビンガム流量 Q_B より、著しく多く、管壁と試料間にすべりが生じ、すべりを伴う塑性流れとなっていることから、

$$V_R = \frac{Q_A - Q_B}{\pi R^2}$$

試料と間壁の間が図 3-3 より液体摩擦状態にあり、管壁に作用するラビング抵抗力は流速に比例すると考えられるので、

$$f_R = \alpha V_R + A \quad \dots \text{式(3-23)}$$

ここに,

f_R : ラビング抵抗力(Pa), α : 粘性摩擦係数 $(\text{Pa} \cdot \frac{\text{s}}{\text{cm}})$, A : 付着力(Pa)

また, 既往の研究³⁻¹⁾である図 3-4 よりラビング抵抗力は, 管壁に接する試料のせん断応力と等しいから,

$$f_R = \tau_R \frac{R\Delta P}{2l} \quad \dots \text{式(3-24)}$$

ここに,

τ_R : 管壁に接する試料のせん断応力(Pa)

式(3-23)及び式(3-24)より,

$$V_R = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R\Delta P}{2l} - A \right) \quad \dots \text{式(3-25)}$$

したがって, 物性値として塑性粘度及び降伏値に加えて粘性摩擦係数と付着力とが与えられれば, 式(3-22)及び式(3-25)より任意の圧力条件における流速の予測が可能となる。³⁻¹⁴⁾

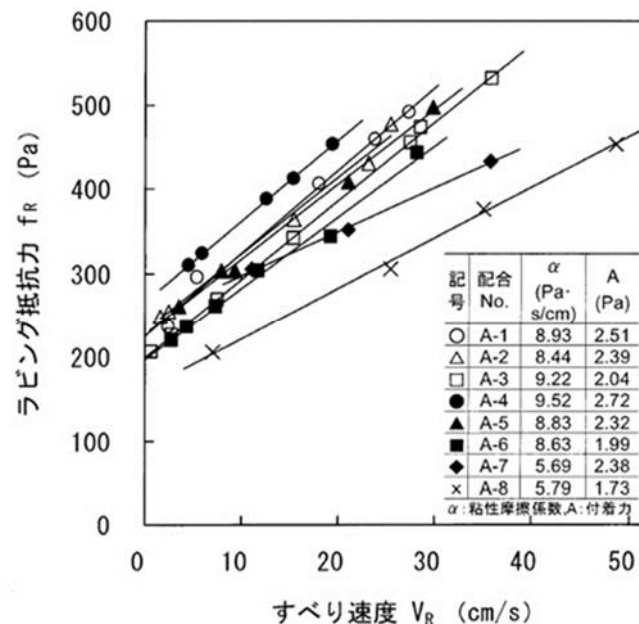


図 3-3 すべり速度とラビング抵抗力との関係

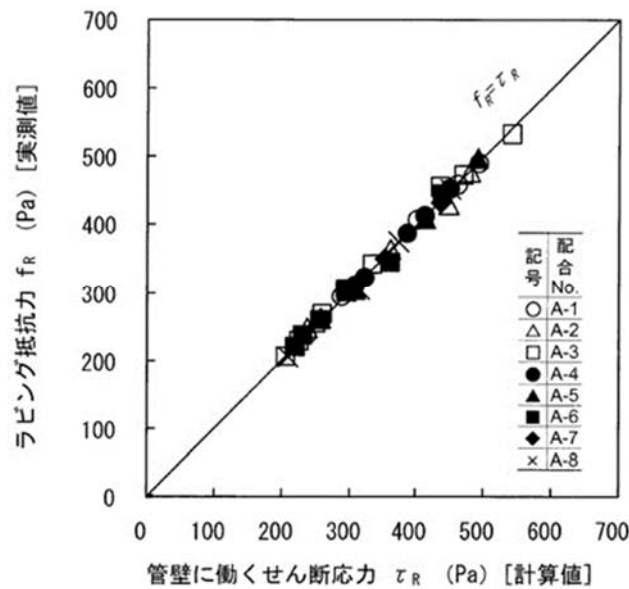


図 3-4 管壁に働くせん断応力とラビング抵抗力との関係

3.3 管型粘度計(圧送試験装置)³⁻¹⁵⁾の緒言

管型粘度計(圧送試験装置)は、試料容器、コンプレッサ、圧送管、容量 0.2MPa の圧力計、容量 40L の試料受け容器、秤量 150kg(目量 20g)の流量測定用秤で構成され、流出したコンクリート試料の質量をデータレコーダに保存できるものである。(写真 3-1 および写真 3-2 参照)

試料容器は、容量 80L で最大圧力 0.2MPa の鋼製のもので、排出管は、90 度のベント管の一方の口を拡張し、ベルマウス形に加工したものである。

圧送管は、シームレスのステンレス製のもので管長 0.5m, 1.0m, 1.5m または 2.0m のものを水平に設置できるものである。なお、管径は直径 100mm である。

圧力計は、ダイヤフラム式の容量 20Pa のもので配管の入口から 5cm の位置に水平方向にセットする。はかりは、電子秤で秤量 150kg, 感量 20g のものである。

水平架台は、ほぼ 0.5m 間隔で配管を水平に保てるものである。

コンプレッサは、S 社製で最高圧力 90kg/cm², 容量 24L のものである。

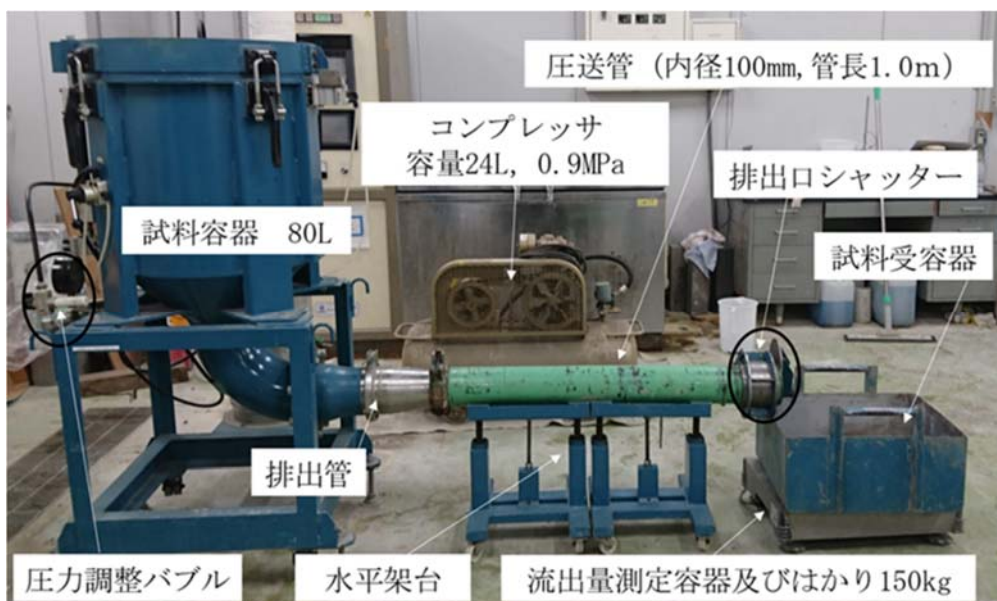


写真 3-1 管型粘度計(圧送試験装置)

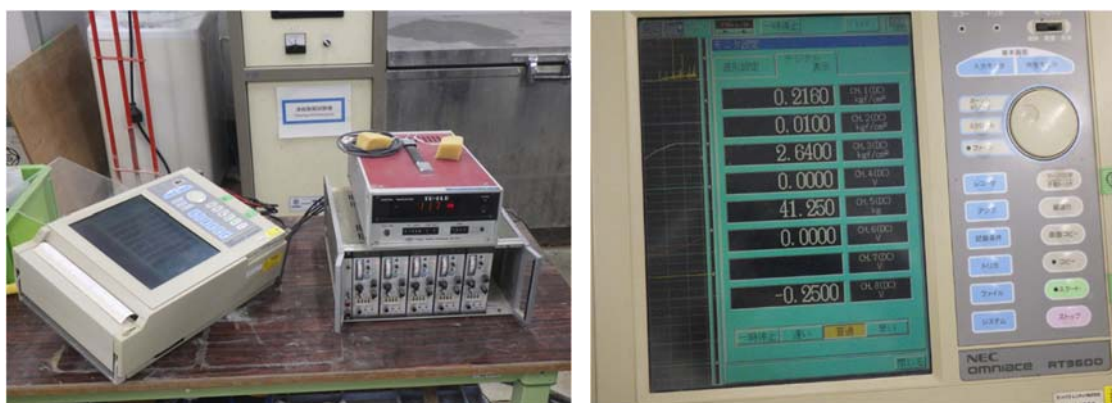


写真 3-2 データレコーダ(圧力および流出試料の質量測定)

3.4 管型粘度計による流量の測定

3.4.1 流量の測定手順

管型粘度計による流量の測定手順を以下に示す。

- ① 中・高流動コンクリートの圧送に先立って、試料容器表面および圧送(管長1.0m)の管内を水で湿潤にした後、余分な水分を取り除く。
- ② 圧力計および流量測定用はかり記録計を始動させる。
- ③ 試料容器にコンクリート試料約 70L を投入した後、容器の蓋を閉め、コンプレッサのバルブを開いて目標の圧送圧力約 1.0kPa としコンクリートを圧送する。

④圧送管出口から、コンクリートが流出し、その流れが安定したことを確認した後、圧送圧力を約 100Pa 増加させ、圧送管出口のコンクリートの流れが安定するのを確認し、③の動作を繰り返し、圧送圧力と流量の試験値が 3 組以上得られるまで圧送実験を行う。

3.4.2 圧送圧力と流量との関係

図 3-5 はフレッシュコンクリートを管型粘度計により圧送した際に求めた圧力勾配と流量との関係を示したものである。(写真 3-3～写真 3-5 参照)



写真 3-3 管型粘度計の排出口



写真 3-4 試料の投入



写真 3-5 圧力計および流量測定

図 3-5 は、圧力勾配が約 200Pa/cm^{3-1} における流量と単位水量との関係を示したもので、圧力勾配 200Pa/cm とした配合を基にするコンクリートの流量は単位水量の増加とともに大きくなり、その関係は直線で見られ、相関係数は 0.99 となっている。すなわち、圧力勾配が 200Pa/cm の流量は、コンシステンシーのパラメータとなることを示している。従って、管型粘度計において、圧送圧力を種々に変化させ、その流量の測定結果を用いて、圧力勾配すなわち圧送圧力に対する流量を求める方法によりコンシステンシーの把握に活用できる。

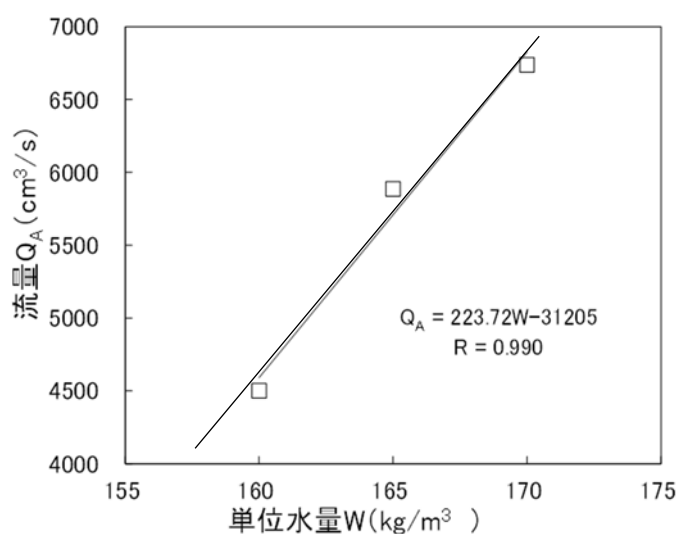


図 3-5 同一圧力勾配における単位水量と流量の関係

図 3-6 は単位水量の異なるコンクリートの圧力勾配と流量との関係を示したものであり、単位水量 160kg/cm^3 における圧力勾配と流量との関係は直線的に推移しており、比例関係にあると考えられる。また、その直線式は $Q_A = 41.2 \Delta P/L - 1337.8$ となっており、相関係数は $R=0.970$ であった。同様に単位水量 165kg/cm^3 における圧力勾配と流量との関係も直線的に推移しており、比例関係にある。また、その直線式は $Q_A = 37.4 \Delta P/L - 1446.7$ となっており、相関係数は $R=0.982$ であった。さらに、単位水量 170kg/cm^3 における圧力勾配と流量との関係も直線的に推移しており、比例関係にある。また、その直線式は $Q_A = 29.6 \Delta P/L - 1309.6$ となっており、相関係数は $R=0.973$ であった。

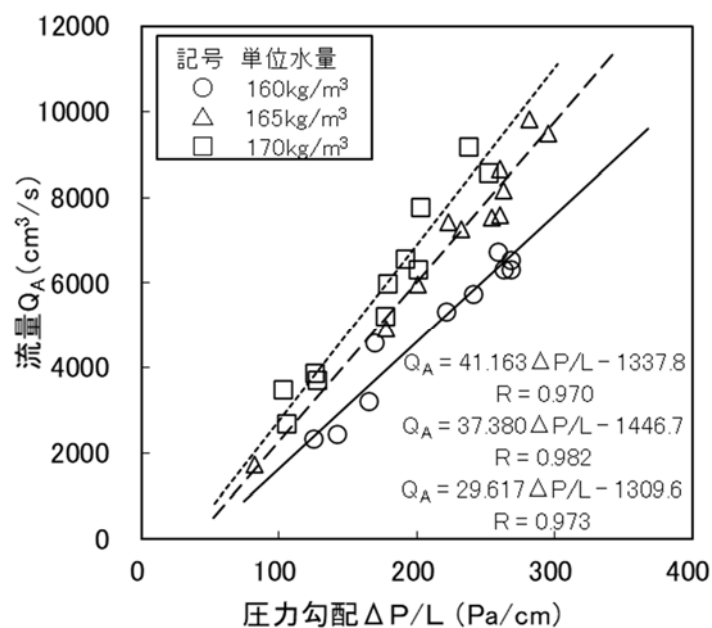


図 3-6 圧力勾配と流量との関係

3.4.3 管内流動における新しいコンシステンシーのパラメータ

図 3-6 に示すように圧力勾配と流量との関係は、コンクリートの単位水量毎に個々の直線で示される。また、それぞれの直線の相関係数は 1.0 に近似していることから、圧力勾配を種々に変化させてそれぞれの流量を求めることにより、一定の圧力勾配における流量が精度良く測定できることになる。したがって、中・高流動コンクリートのコンシステンシーは、単位水量や使用材料による粘性の相違によって流動抵抗の相違と解釈すると新しいコンシステンシーのパラメータとなり得る。

3.5 管型粘度計によるレオロジー定数の測定

3.5.1 レオロジー定数の測定手順

レオロジー定数の測定手順を以下に示す。

- 1)コンクリートの試験圧送に先立ち、練上がりのコンクリート試料の性状が変化しないよう試料容器・圧送管などを湿潤状態にする。
- 2)圧力センサを圧送管に設置する。設置は圧力センサが管内のコンクリートの流動の妨げにならないよう行う。排出口から吐出されるコンクリート試料の質量測定ができるように流量測定用の秤を設置する。
- 3)測定するコンクリート試料を投入し、初期圧送を行い圧送管出口からのコンクリートの流出が安定していることを確認する。
- 4)流出を確認後、3組以上の圧送圧力と流量の測定を行う、管内に試料容器内のコンクリートが少ない場合は吐出された試料を繰り返し投入して試験を行う。
- 5)流出管から吐出される流量を実測し、単位容積質量と流量測定時間とで除して単位時間当たりの実測流量を求める。
- 6)管型粘度計試験と並行して、コンクリートの練り上がりと同時にスランプフロー、O漏斗流下時間および回転粘度計によるレオロジー定数の測定を行う。

3.5.2 使用材料および配合

実験に用いた材料は表 3-1 に示す通りであって、セメントは T 社製の普通ポルトランドセメントであって、密度 3.16g/cm^3 、粉末度 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$ のものを用いた。混和材は S 社製の比表面積 $6,000\text{ cm}^2/\text{g}$ 高炉スラグ微粉末、細骨材は粒度分布が標準粒度範囲となるよう茨城県鹿島産陸砂と北海道白老産陸砂とを 7:3 に混合したもの（密度 2.63g/cm^3 、吸水率 2.00%、F.M.2.33）を用いた。粗骨材は、青梅産碎石 2005（密度 2.67g/cm^3 、吸水率 1.03%、F.M.6.77）を用いた。

また、混和剤について、高流動を対象としたコンクリートでは、高性能 AE 減水剤とし、N 社製のポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもので、増粘剤は、S 社製のセルロース系を主成分とするものを用い、中流動を対象としたコンクリートでは、N

社製の増粘剤含有型高性能 AE 減水剤(主成分:ポリカルボン酸エーテル性化合物, 増粘性高分子化合物の複合体)をそれぞれ用いた。

中流動コンクリートの配合は, 表 3-2 に示す通り, 目標スランプフローを 50, 60, 65cm として, 単位水量およびの添加量を 3 水準に変化させたものである。

高流動コンクリートの配合は, 表 3-2 に示す通り, 高性能 AE 減水剤の添加量を一定量とし, 単位水量は目標のスランプフローを 50, 60 および 70cm として 165~175kg/m³ の間で 3 水準に変化させたものである。

表 3-1 使用材料

材料	種類	
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³ , 粉末度 3200cm ² /g
細骨材	茨城県鹿島産陸砂	密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.00%, F.M.2.10
	北海道白老産陸砂	密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 1.25%, F.M.4.26
粗骨材	東京都青梅産碎石 2005	密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 1.03%, F.M.6.77
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
	増粘剤含有型 高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル性化合物 増粘性高分子化合物の複合体
混和材	高炉スラグ微粉末	比表面積 6,000cm ² /g

表 3-2 コンクリートの配合(中流動/高流動)

種類	配合 No.	目標 SF (cm)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (c×%)	助剤 (c×%)	増粘剤 (c×%)
				水 W	セメント C	高炉スラグ [*] 微粉末 BFS	細骨材 S	粗骨材 G			
中流動	1	50.0	53.7	160	356	-	966	862	0.5	0.003	-
	2	60.0	53.1	165	367	-	945	814	0.8	0.003	-
	3	65.0	52.4	170	378	-	921	766	1.0	0.003	-
高流動	4	50.0	49.6	165	330	141	840	814	0.8	-	0.0003
	5	60.0	51.7	170	340	146	861	828	0.8	-	0.0003
	6	70.0	53.9	175	350	150	884	854	0.8	-	0.0003

3.5.3 各種コンシステンシー試験結果

各種コンシステンシー試験結果及び回転粘度計によるレオロジー定数の測定結果を表 3-3 に、コンシステンシー試験結果と回転粘度計により求めたレオロジー定数との関係を図 3-7～図 3-14 に示した。

図 3-7～図 3-10 に示すように、従来から言われているとおり、スランプフローと降伏値とは密接な関係があること、また、図 3-11～図 3-14 に示すように、50cm フロー到達時間、流動停止時間及び O 漏斗流下時間とそれらの支配的な物性値となる塑性粘度とは高い相関関係が得られ、これらの相関係数は 0.9 以上となっていることを示した。

表 3-3 各種コンシステンシー試験結果

配合 No.	コンクリートの種類	単位 水量 W (kg/m ³)	塑性 粘度 η_{pl} (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)	スランプフロー			O 漏斗 流下 時間 (s)
					平均径 (cm)	50cm 到達時間 (s)	流動 停止時間 (s)	
1	中流動	160	141	97	51.0	6.91	7.73	4.61
			146	93	49.5	—	6.64	4.88
			132	87	51.0	6.31	10.03	4.67
2		165	94	70	60.5	4.81	14.90	3.67
			99	62	61.5	4.67	13.37	3.87
			92	69	59.5	4.92	14.17	3.52
3		170	90	56	67.0	3.71	19.57	3.19
			96	52	68.5	3.73	17.52	3.26
			86	64	65.5	3.74	18.02	3.04
4	高流動	165	459	209	54.0	5.84	54.25	12.84
			468	198	55.0	5.32	55.35	12.51
			436	203	55.0	5.11	55.11	12.12
5		170	243	113	62.5	4.46	56.62	9.94
			238	111	63.0	4.68	68.51	10.61
			229	104	63.0	4.38	63.67	9.98
6		175	68	48	74.0	3.94	74.25	9.47
			84	71	73.5	4.26	73.60	9.62
			75	57	75.0	4.03	78.23	9.75

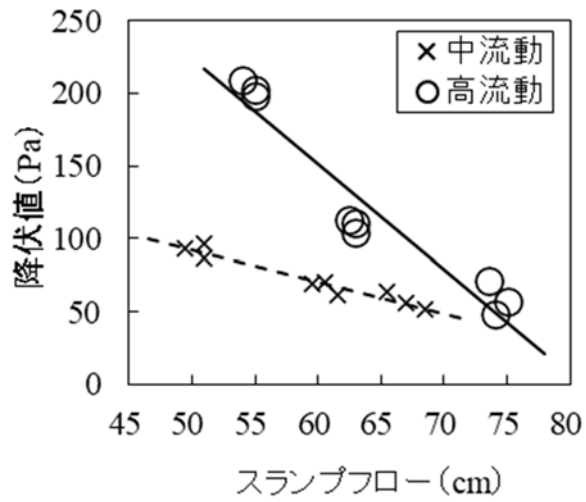


図 3-7 スランプフローと降伏値との関係

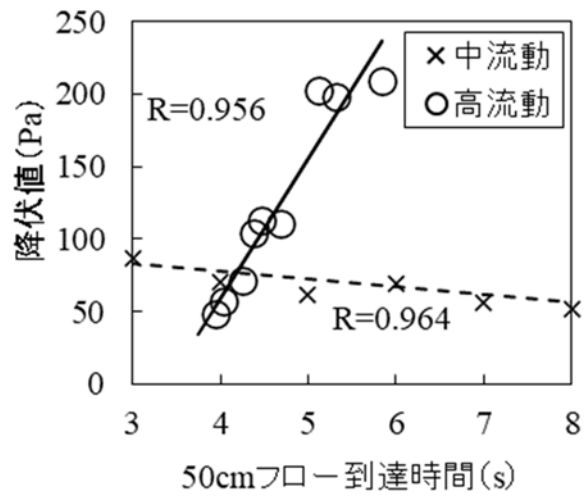


図 3-8 50cm フロー到達時間と降伏値との関係

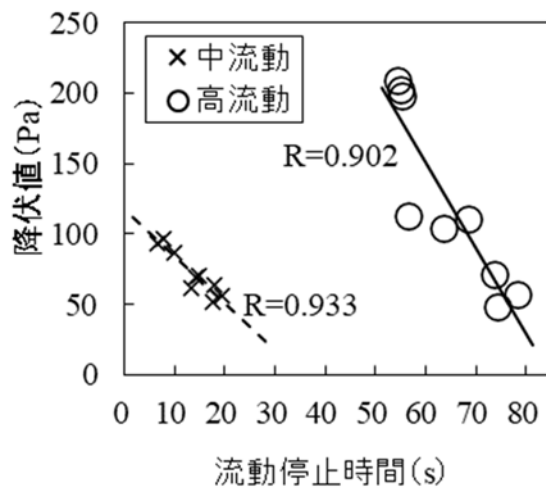


図 3-9 流動停止時間と降伏値との関係

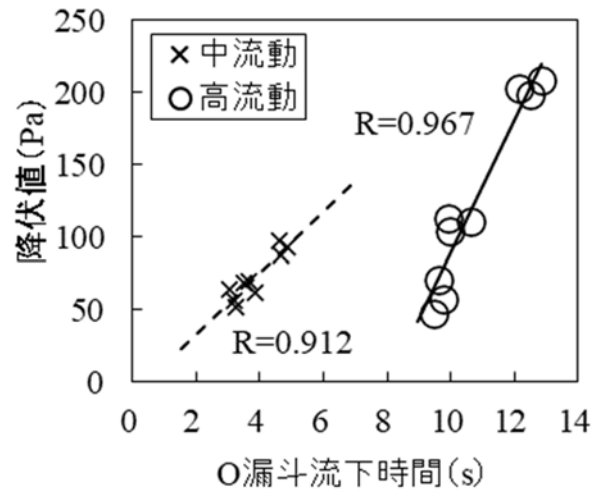


図 3-10 O 漏斗流下時間と降伏値との関係

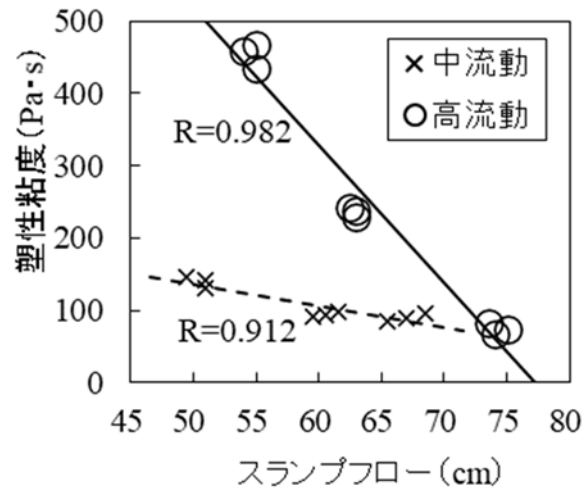


図 3-11 スランプフローと塑性粘度との関係

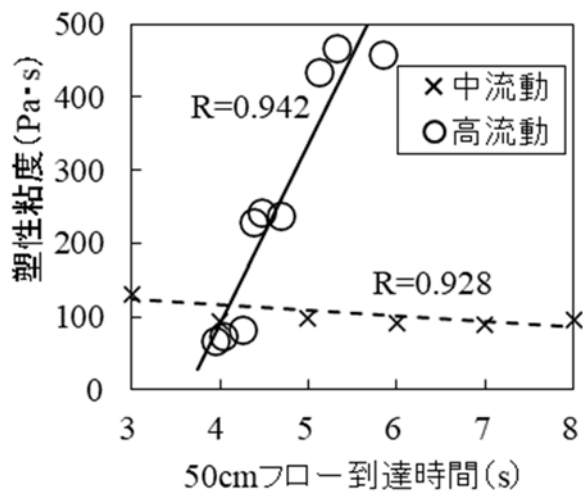


図 3-12 50cm フロー到達時間と塑性粘度との関係

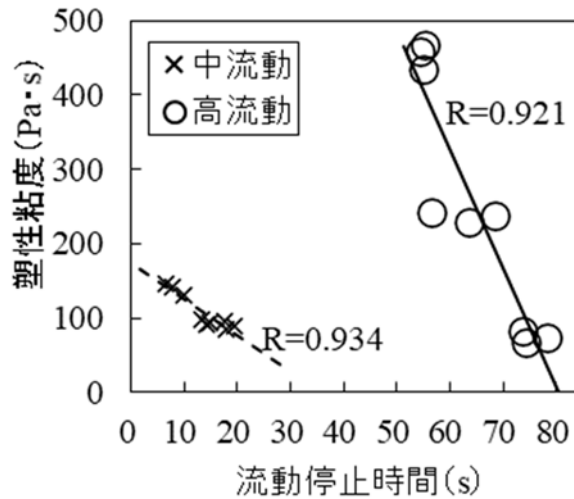


図 3-13 流動停止時間と塑性粘度との関係

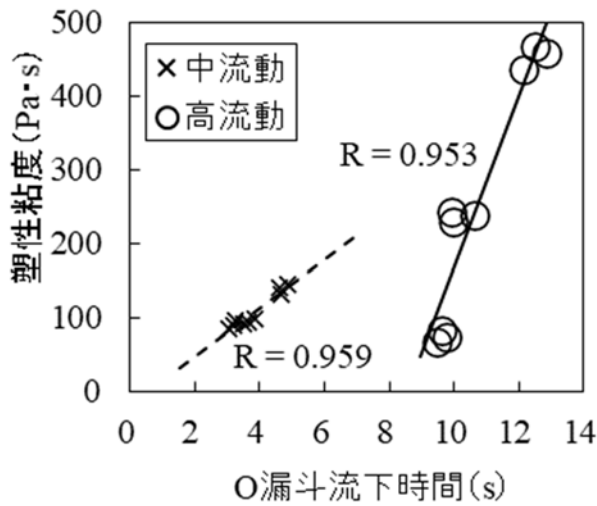


図 3-14 漏斗流下時間と塑性粘度との関係

3.5.4 レオロジー定数の測定結果

コンクリートの管内流量式である式(3-22)に 4 つ未知数であるレオロジー定数(η_{PI} : 塑性粘度, τ_f : 降伏値, A : 付着力および α : 粘性摩擦係数)があるが, 流量式を四元連立に解けば未知数が求められることになるが, これを解析すると式が発散するので, 4 つの未知数の内 1 項目をコンシステンシーの定性値, すなわち, 図 3-19 に示すスランプフローと付着力との実験式を活用することとした。これは, スランプフロー試験が汎用的な試験であること, 著しい試験技術を必要としないこと, 両者の関係を示す実験式の相関係数が 0.9 以上と 1.0 に近似していることなどによるためである。

高流動コンクリートについて、圧力勾配と流量との関係を図 3-15 に示す。実験結果を式(3-24)および式(3-25)を用い、管壁面におけるコンクリートのすべり速度とラビング応力との関係について整理し図 3-16 に示した。図 3-16 において、ラビング応力はすべり速度の増加に伴って直線的に増大し、その傾きはスランプフローが大きいものほど緩やかであった。また、直線と y 軸との切片は、スランプフローが大きいものほど小さい値となっている。既往の研究結果³⁻¹⁶⁾によれば、AEコンクリートの付着力は、降伏値との間に 1 次比例関係が認められ、その降伏値はスランプ値と密接に関係³⁻¹⁶⁾する。

また、高流動コンクリートのスランプフローと降伏値とは密接に関係する³⁻¹⁴⁾ことが明らかとなっているので、実験値を両者の関係について整理し図 3-17 に示した。前述したように図 3-17 において、スランプフローと降伏値との関係はほぼ直線関係となっている。

次に、降伏値と付着力の関係は、式(3-24)と式(3-25)より、密接に関連することは分かるので、実験結果を両者の関係について整理し図 3-18 に示した。図 3-18 において、両者は比例関係にあると考え、その回帰式を式(3-26)に示した。

$$A = -1.76 \times SF + 130.9 \quad (R=0.99) \quad \cdots \text{式(3-26)}$$

ここに、A:付着力(Pa), SF:スランプフロー(cm)

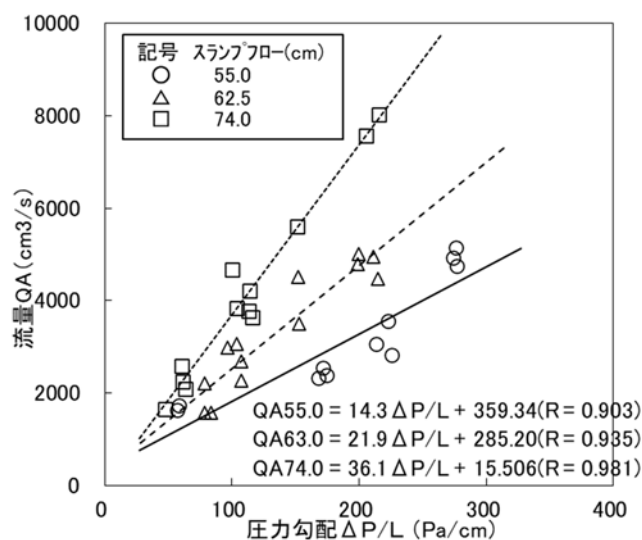


図 3-15 圧力勾配と流量との関係

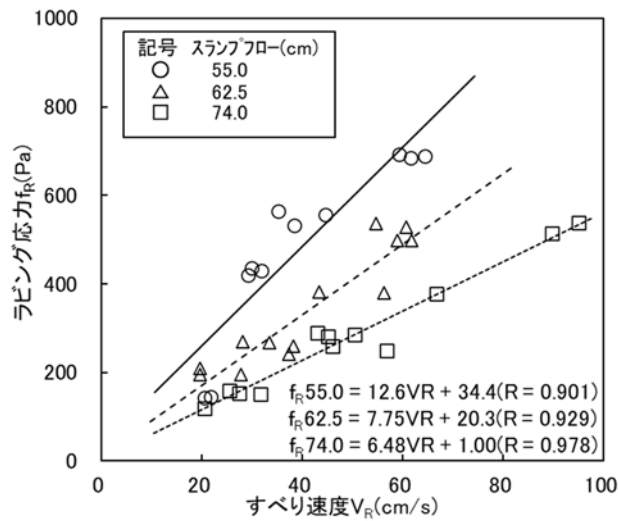


図 3-16 スレリ速度とラッピング応力との関係

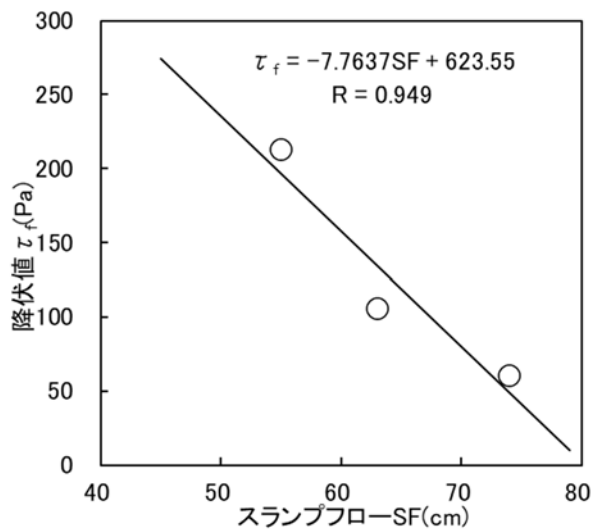


図 3-17 スランプフローと降伏値との関係

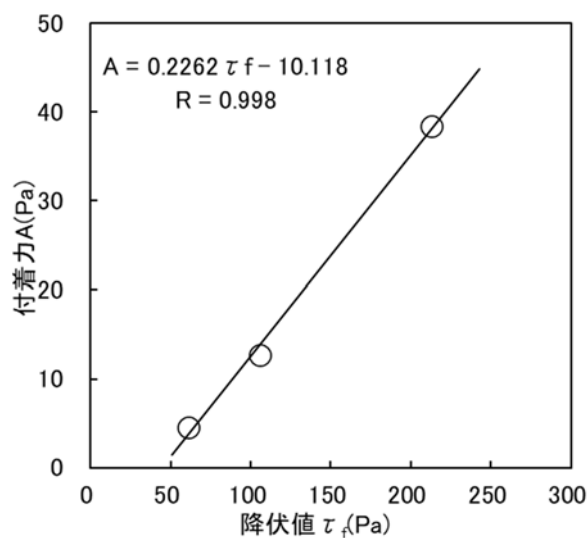


図 3-18 降伏値と付着力との関係

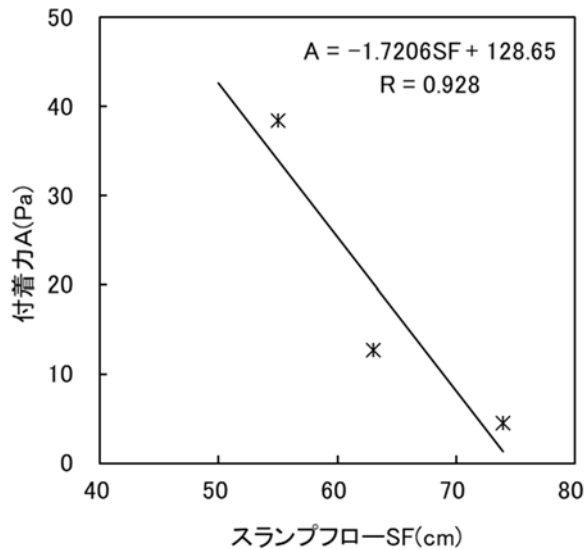


図 3-19 スランプフローと付着力との関係

次に、粘性摩擦係数は、管壁面に接する流体の性状によって相違すると考え、粘性(塑性粘度)と粘性摩擦係数との関係を図 3-20 に示した。

また、O 漏斗流下時間の支配的な物性値としては塑性粘度であることから、O 漏斗流下時間と塑性粘度との関係を図 3-21 に示し、O 漏斗流下時間と粘性摩擦係数との関係は式(3-27)によって与えられる。

$$\alpha = 2.11 \times F - 14.01 \quad (R=0.97) \dots \text{式(3-27)}$$

ここに、 α : 粘性摩擦係数 (Pa·s/cm), F : O 漏斗流下時間 (s)

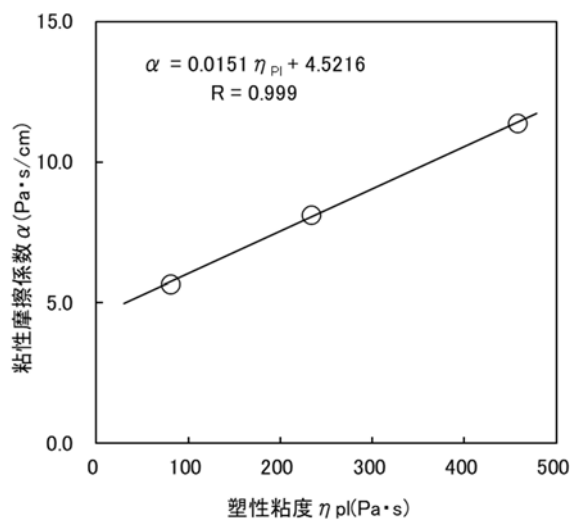


図 3-20 塑性粘度と粘性摩擦係数との関係

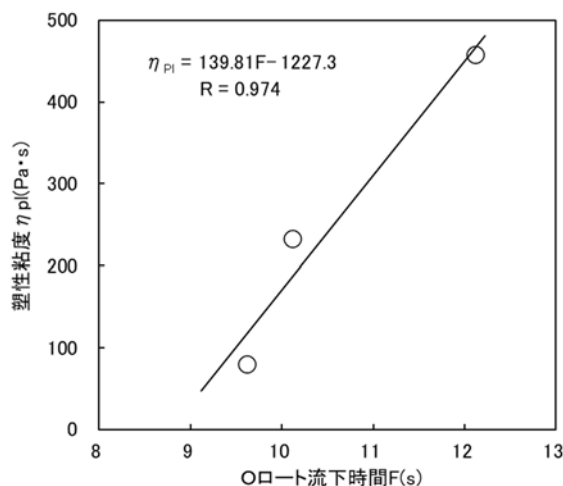


図 3-21 ○ 漏斗流下時間と塑性粘度との関係

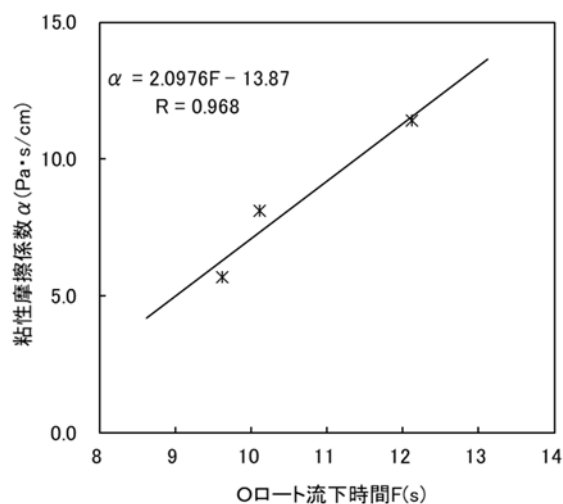


図 3-22 ○ 漏斗流下時間と粘性摩擦係数との関係

以上のように、中流動コンクリートおよび高流動コンクリートの場合、液体摩擦が生ずる管内のコンクリートの粘性が相違すると摩擦の大きさも変化するものと推察される。

また、表 3-4 は、中流動コンクリートの圧送試験結果を示したものである。ビンガム流量は、実測流量と比較すると、どの水準においてもビンガム流量が小さく、前述したようにコンクリートはすべりを伴って流動していると考えられる。また、ビンガム流量と実測流量の比は 4.4～7.5%となっており、コンクリートの管内流動は管壁面ですべりを生じていることを裏付けている。

表 3-4 圧送実験結果(中流動)

単位水量 W (kg/m ³)	管型粘度計					回転粘度計	
	圧力勾配 $\Delta P/L$ (gf/cm ² /cm)	栓流半径 r_f (cm)	ビンガム流量 Q_B (cm ³ /s)	実測流量 Q_A (cm ³ /s)	流量比 Q_B/Q_A (%)	塑性粘度 η_{pl} (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)
160	1.724	1.147	204.6	4608.3	4.4	141	97
	2.639	0.749	360.7	6731.2	5.4		
	2.681	0.724	376.4	6554.3	5.7		
165	2.68	0.540	611.7	8171.7	7.5	94	69
	2.37	0.611	529.1	7273.7	7.3		
	3.01	0.481	699.7	9482.8	7.4		
170	1.82	0.717	412.2	5993.6	6.9	86	64
	2.57	0.501	622.1	8574.2	7.3		
	1.95	0.669	448.6	6575.6	6.8		

※圧送管半径: 5.0cm

3.5.5 管長の相違が測定結果に及ぼす影響

前述の検討方法を確認することを含め、管長の相違が試験結果に及ぼす影響について検討した。この実験に用いた高流動コンクリートの配合は、表 3-5 に示すように、単位水量を 170kg/m³ と一定にし、高性能 AE 減水剤の添加量を変化させてスランプフローを 3 種類とした。これらのコンクリートについて、管型粘度計の管長を 0.5, 1.0, 1.5 または 2.0m に変化させ圧送実験を行った。

その結果は表 3-6 に示すように、管型粘度計により推定した塑性粘度及び降伏値は、回転粘度計による測定値と比して、いずれのスランプフローにおいても管長 1.0m 以上では、0.87~1.10 となっており、上記の検討方法の信頼性が確認できた。

また、図 3-23 は管長と流量比との関係を示したものであって、管長 0.5m では流量比が 0.80~1.20 であるのに対し、管長 1.0m 以上ではその比が 0.90~1.10 以内と安定した流量が測定できていることを示している。

表 3-5 コンクリートの配合

配合 No.	スランプ・ スランプ (cm)	細骨 材率 (%)	単位粗 骨材絶 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)						
				水 W	セメント C	混和 BFS	細骨 S	粗骨 G	混和 Ad	増粘
1	50±5	52.4	0.305	170	340	146	880	809	7.29	0.15
2	60±5								8.75	
3	70±5								9.72	

表 3-6 レオロジー定数の試験結果

配合 No.	スランプフロー SF (cm)	回転粘度計		管型粘度計						
		塑性粘度 η_{pl} (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)	管長 L (m)	塑性粘度 η_{pl}' (Pa·s)	比 η_{pl}'/η_{pl}	降伏値 τ_f' (Pa)	比 τ_f'/τ_f	粘性摩擦係数 α (Pa·s/cm)	付着力 A (Pa)
1	48.0	465	211	0.5	567	1.22	252	1.19	13.8	46.5
				1.0	404	0.87	188	0.89		
				1.5	407	0.88	184	0.87		
2	60.0	236	111	0.5	188	0.80	88	0.80	11.1	25.4
				1.0	224	0.95	103	0.93		
				1.5	255	1.08	119	1.07		
				2.0	223	0.94	104	0.94		
3	68.5	82	59	0.5	70	0.85	50	0.85	9.6	10.4
				1.0	87	1.06	64	1.08		
				1.5	76	0.92	55	0.93		

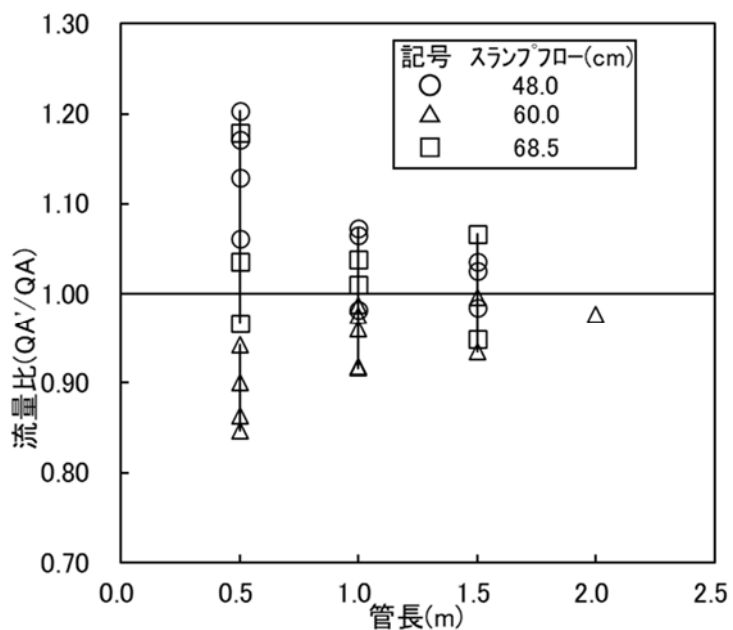


図 3-23 管長と流量比との関係

3.6 まとめ

3章では、管型粘度計(圧送試験装置)によるレオロジー定数の測定に関する実験検討を行った。

管型粘度計により、測定は任意の圧送圧力に対応する流量 3 組とスランプフローと付着力との実験式から求めた付着力を求め、流量式に代入して三元連立で解くことにより、未知数である塑性粘度、降伏値および粘性摩擦係数を求めることが出来る。また、これを利用することにより、任意の配管における流量の予測を行うことが出来ると考えられる。

また、管長を 1.0m 以上とし管型粘度計を用いて推定した塑性粘度および降伏値は、回転粘度計による測定値と比較的良く近似しており、費用も安価ではあり、画像解析のような熟練は特に必要なく、試験に要する時間は回転粘度計に比べ著しく短縮できる。

しかし、一般に中・高流動コンクリートのコンシステンシー試験方法として用いられている試験値と回転粘度計によるレオロジー定数との関係は高い相関関係(相関係数 0.9 以上)を示し、圧送性評価に活用できる可能はあるものの、スランプフローと降伏値との関係において、中流動コンクリートと高流動コンクリートとでは、その傾きも異なっており、同じフロー値であっても、塑性粘度や降伏値は相違しているため、これらの実験式を一様に活用して、レオロジー定数を推定することはできず、コンクリートの圧送性評価に活用する場合などでは使用材料の物性及び配合が常に一定であることが必要となり、工事現場において納入されるコンクリートに迅速に対応することは困難であること、また、レオロジーを把握するための解析手法として実験式を用いることは合理的でないこと、さらに装置も簡易的ではないことなど必ずしも有用な方法であるとはいえず課題も見出された。

参考文献[第3章]

- 3-1) 村田二郎, 鈴木一雄:管壁にすべりを伴うグラウトモルタルの管内流動に関する研究,土木学会論文集,第 384 号, 129-136, 1987.8
- 3-2) 村田二郎, 鈴木一雄 : グラウトモルタルの管内流動に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 354 号, pp99-108, 1985.2
- 3-3) 村田二郎, 鈴木一雄 : 傾斜管法によるグラウトの粘度測定, 土木学会「フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム」論文集, pp.1-8. 1983.3
- 3-4) 鈴木一雄: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, 2004
- 3-5) 岡本寛昭ほか:コンクリート施工設計学序説, 技法堂出版, p.205, 2004
- 3-6) A.N.Ede : The Resistance of Concrete Pumped though Pipelines, Magazine of Concrete Research, Vol.9, No.27, pp.125-140, 1957.11
- 3-7) 坂本全布, 田沢栄一, 松岡康訓 : 流動化した高強度コンクリートのポンプ圧送性と品質管理に関する研究土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部 pp.63-364 1980.9
- 3-8) 中田善久, 毛見虎雄, 高野肇, 岩沢徹 : 高炉セメントを用いた増粘剤系コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察, 日本建築学会技術報告集, 第 8 号 1-6 pp.1-6 1999.6
- 3-9) 高山俊一, 渡辺明, 出光隆坂田康二 : 高強度コンクリートのポンパビリティ評価法に関する実験的研究セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.186-191, 1989. 12
- 3-10) 和美廣喜, 桜本文敏, 柳田克巳 : 高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 466 号, pp.11-20, 1994. 12
- 3-11) 森永 繁 : コンクリートポンプの管内圧送に関する研究, コンクリートジャーナル, Vol.9, No.7, pp. 1-11, 1971.7

- 3-12) 村田二郎, 越川茂雄 : 各種化学混和剤を用いたコンクリートポンプ圧送性に関する研究, 平成 8 年度日本大学生産工学部生産工学研究所委託研究報告書 pp2-12.1997. 3
- 3-13) 本間 仁 : 応用水理学 (上巻), 丸善, pp.78
- 3-14) 山之内康一郎ほか: 管型粘度計によるフレッシュコンクリートの流動性評価方法の提案, 全国生コンクリート工業組合連合会第 17 回生コン技術大会研究発表論文集, 研 8. , pp.47~52, 2013
- 3-15) 小山田英弘ほか: 中流動コンクリートの調合法に関する実験的研究(フレッシュコンクリート), コンクリート工学年次論文集, pp.463-468, 2000
- 3-16) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針(案), コンクリートライブラリ第 57 号, 昭和 60 年 11 月, 1985

第 4 章

中・高流動コンクリートの新たな管内流動式

4.1 概説

第2章に示す通り、従来の研究成果^{4-1)~4-8)}では、コンクリートがビンガム体に近似した挙動を示すことから、管内における流量は、Buckingham 式をベースに管壁での滑りを考慮した式を用いている。

管壁における滑り現象は、コンクリートが管壁で液体摩擦状態にあると仮定しているため、コンクリートの流量を予測するには、塑性粘度、降伏値、粘性摩擦係数及び付着力を物性値として、事前に把握することが必要である。

第4章では、コンクリートの管内流動の解析モデルとして、「管壁での液体摩擦状態」に代わって、コンクリートと管壁との界面に薄い水の層が存在し、これが潤滑剤の役目を果たすと仮定した。このコンクリートの壁面における滑りは、水の層の部分が圧送圧力によって Newton 流れを生じており、水の層とコンクリートとが接する部分の流速は、コンクリートの滑り速度と等価と考えることとした。すなわち、管内には薄い水膜、その内側にコンクリートとの2層の流れが生じていると仮定した。

この仮定に基づき、水膜の厚さの推定を JSCE-F502 に用いる加圧ブリーディング装置を用いて実験的に検討し、管型粘度計による圧力勾配を3水準に変化させた実測流量から水膜部分の流速に伴うコンクリートの移動量(滑り量)及び水膜自体の流量を減じてビンガム流量を求めた。このようにして求めた Buckingham 式を三元連立に解いて塑性粘度と降伏値とを求め、コンクリートの配管計画の基礎となるコンクリートの物性値を求める方法を提案し、回転粘度計による試験結果と比較することで、管型粘度計の試験値の信頼性を照査した。

4.2 2層流れの管内流動⁴⁾⁹⁾

管内におけるコンクリートは、圧送圧力を受けるとコンクリートと管壁との間隙に自由水の一部が滲みでて、薄い水膜を形成すると仮定した。図 4-1 を参照して水膜の流速分布 V_r は Hagen-Poiseuille の式(4-1)で示される。

$$V_r = \frac{\Delta P(R^2 - r^2)}{4l\eta} \quad \dots \text{式(4-1)}$$

ここに、 V_r : 管の中心から任意の r における流速(cm/s), R : 管の半径(cm),

r : 中心から任意の半径(cm), $\Delta P/l$: 圧力勾配(Pa/cm), η : 水の粘性係数(Pa・s)

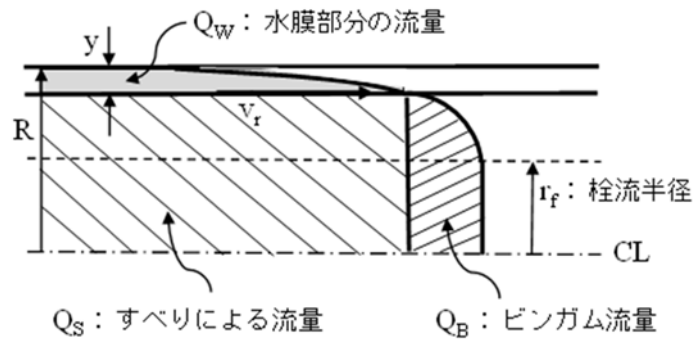


図 4-1 2層流れの管内流動の流速分布

式(4-1)において、コンクリートと管壁とが接する部分の流速は、 $r=R-y$ と置けば、式(4-2)となる。

$$V_R = \frac{\Delta p\{R^2 - (R - y)^2\}}{4l\eta} \quad \dots \text{式(4-2)}$$

ここに、 y : 水膜の厚さ(cm)

コンクリートと管壁との間の水膜が潤滑層をなすと仮定すれば、コンクリートの $R-y$ のすべり速度 V_R は式(4-2)における水膜の流量と等価であると考えられる。

従って、コンクリートの滑りによる流量 Q_s は、式(4-3)となる。

$$Q_s = \pi(R - y)^2 V_R \quad \dots \text{式(4-3)}$$

また、水膜部分の圧力勾配における流量は、式(2)を $R-y$ から R まで積分した次式(4-4)によって与えられる。

$$Q_w = \pi \Delta P \left\{ \frac{R^4}{4} - \frac{(R-y)^2 \cdot R^2}{2} + \frac{(R-y)^4}{4} \right\} / 2l\eta \quad \dots \text{式(4-4)}$$

なお、流動コンクリートはビンガム体に近似するので、その流量は式(4-5)に示すように Buckingham 式によって与えられる。

$$Q_B = \frac{\pi \Delta P (R - y)^4}{8l\eta_{pl}} + \frac{2\pi \tau_f^4 l^3}{3\eta_{pl} \Delta p^3} - \frac{\pi (R - y)^3 \tau_f}{3\eta_{pl}} \quad \dots \text{式(4-5)}$$

ここに、 Q_B : Bingham 流量 (cm^3/s)、 τ_f : 降伏値 (Pa)、 η_{pl} : 塑性粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

従って、配管内を流れるコンクリートの流量(実測流量 Q_A)は、 $\Delta P/l=i$ と置けば、式(4-6)となる。

$$Q_A = Q_B + Q_s + Q_w = \frac{\pi R^3 \tau_f}{3\eta_{pl} \pi} + \left\{ \frac{-\pi (R - y)^2 R^2}{4\eta} + \frac{\pi R^4}{8\eta} + \frac{\pi (2Ry - y)^2 (R - y)^2}{4\eta} \right\} i + \frac{2\pi \tau_f^4}{3\eta_{pl} l^3} \quad \dots \text{式(4-6)}$$

4.3 水膜の厚さの設定方法

管内におけるコンクリートに圧送圧力が作用したとき、コンクリートと管壁との間隙にコンクリートの自由水の一部が滲み出るとして、その水膜の厚さを実験的に検証した。

実験には、混和剤により流動性と材料分離抵抗性を付与したスランプフロー50～65cm程度のコンクリートを用いた。

4.3.1 使用材料および配合

実験に用いたセメントは、T社製の普通ポルトランドセメントであって、密度 3.16g/cm^3 、粉末度 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$ のものを用いた。細骨材は、粒度分布が標準粒度範囲となるよう鹿島産陸砂と北海道白老産陸砂とを7:3に混合したもの(密度 2.63g/cm^3 、吸水率2.00%、F.M.2.33)を用いた。粗骨材は、青梅産碎石2005(密度 2.67g/cm^3 、吸水率1.03%、F.M.6.77)を用いた。混和剤は、B社製の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高性能AE減水剤で近年提案されたものである。その特性は、粉体量を増加することなく、普通コンクリートと同程度のセメント量で高流動コンクリートに近い流動性と分離抵抗性を付与するものである。

コンクリートの配合は、混和剤の特性を生かして流動性を付与したコンクリート(以降;中流動コンクリートと称す)として、水セメント比を45%とし、単位水量を160、165及び 170kg/m^3 としJIS A 1150によるスランプフロー値がそれぞれ約50cm、60cm及び65cmとした。これらの配合は表4-1に示す通りである。なお、空気量は練上り直後で $4.5\pm 1.5\%$ とした。

表 4-1 コンクリートの配合

配合 No.	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad	助剤 AE
1	50±5	4.5±1.5	45	53.7	165	356	966	844	2.85	1.07
2	60±5			53.1	170	367	845	944	2.94	1.10
3	65±5			52.4	175	378	937	960	2.38	1.13

4.3.2 コンクリートからの脱水量の測定

コンクリートは、容量 100L の強制二軸ミキサを用いて、1バッチの量を 100L として練り混ぜた。練混ぜは、練混ぜ水を除く材料をミキサに投入し、30 秒間空練りを行った後、混和剤を含む練混ぜ水をミキサに投入して、2 分間攪拌させた。練上がったコンクリートは、ミキサ内で 3 分間静置し、再び 1 分間攪拌したのち、スランプフロー試験と第 3 章に前述した管型粘度計 (圧送試験装置) による流量測定及び土木学会規準 JSCE-F503 に規定されている加圧ブリーディング試験装置を用いて加圧脱水試験に供した。(写真 4-1 参照)



写真 4-1 加圧脱水試験

コンクリートの加圧による脱水量の測定は、練り舟から約 $1,840\text{cm}^3$ のコンクリートを採取し、加圧ブリーディングの試料容器に 2 層に分けて 1 層当たりの突き数を 20 回として、2 層に分けて突き棒を用いて締め固めた。試料上面に空気が残らないようにプランジャを挿入し、試験装置全体を圧縮強度試験機の上下载荷板の間に設置し、荷重を 1.5MPa となるよう载荷して、この応力状態を維持したまま試料容器の底面近傍に設置された脱水用コックから流出する脱水量を測定する。また、本実験では加圧初期の脱水が安定するようにコックの開放は加圧前に行うこととし、10, 20, 30, 40, 50 秒及び 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 分における脱水量をメスシリンダにて測定した。

この操作を試料が受ける応力で 2.5MPa 及び 3.5 MPa についても実施し、それぞれの応力毎、配合毎に時間脱水曲線を求めた。

図 4-2 は、単位水量 160kg/m^3 の中流動コンクリートにおける脱水量の推移を加圧力毎に整理した結果である。図 4-2 において、脱水量の推移は、加圧力が大きいほど、また加圧時間が長いほど大きくなることが分かる。

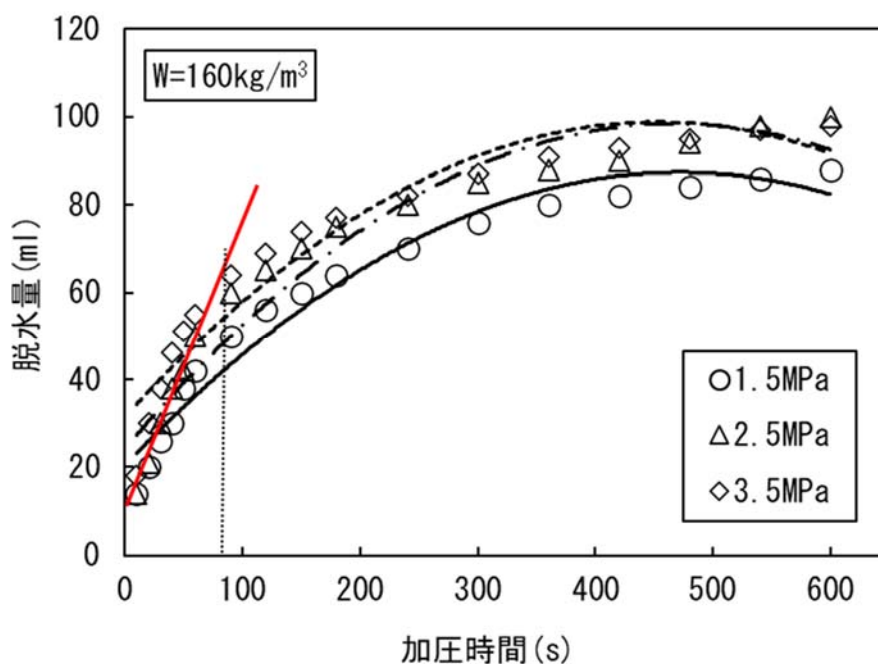
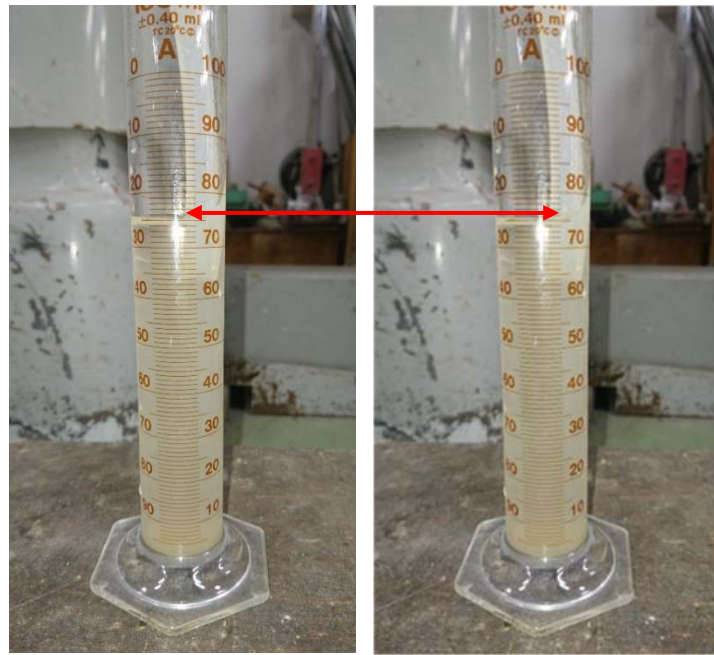


図 4-2 脱水量の推移

なお、管内におけるコンクリートの脱水量の傾向は、脱水試験終了直後に徐荷しても既にコンクリートから分離し脱水された水は元に戻らないことを確認している。すなわち写真 4-2 に示すように脱水試験終了直後に脱水用のパイプをメスシリンダの液面下において、試料に作用する荷重を除いても、脱水用のパイプを逆流することは無く、メスシリンダの液面に変化が無いことから上記が裏付けられる。従って、コンクリートがポンプ出口(配管入口)で最も大きな圧力を受け、圧送管内の管壁面に生じた脱水量、すなわち薄い水の層が発生しても、その量は配管出口に至るまで変わらない(脱水された水の膜厚に変化はない)ものと考えられる。



加圧時

除荷時

写真 4-2 脱水試験終了前後のメスシリンダ液面

4.3.3 管壁とコンクリートとの間に生じる水膜の厚さ

圧送時にコンクリートが受ける圧力は、ポンプ出口で最大値となり、その圧力の作用時間は極めて短時間であるから、圧送圧力に対応する脱水量は図 4-2 において $t=0$ の脱水量と考えられる。また、図 4-2 においては、測定結果に若干ではあるがバラツキが見られるが、加圧時間 90 秒程度以内の測定値は時間とともに増加し、その傾きは直線的になっている。このため、 $t=0$ の脱水量の推定には、初期の脱水量の測定値のうち直線とみなせる脱水量を用いて一次回帰した切片の値とした。

管型粘度計を用いて圧力を3水準に変化させてコンクリートを圧送した時の圧力を加圧ブリーディング容器内の試料に作用させ、加圧時間 90 秒以内で直線と認められる部分のデータを一次回帰して、圧送時の脱水量を推定した。

図 4-3～図 4-5 は単位水量を $W=160, 165$ 及び 170kg/m^3 とし、それぞれの単位水量のコンクリートを圧送した時の脱水量の推移を示した結果である。

図 4-3 において、脱水量は図 4-2 と同様に加圧力が大きいほど、加圧時間が長いほど大きくなる傾向が単位水量毎に示されているが初期の加圧時間と脱水量との関係を示す直線式の切片は、加圧力の大きさに係わらず、単位水量毎にほぼ一定の値となっている。管壁面の水の膜圧は、この切片における脱水量を加圧容器内試料の表面積で除して求めた。

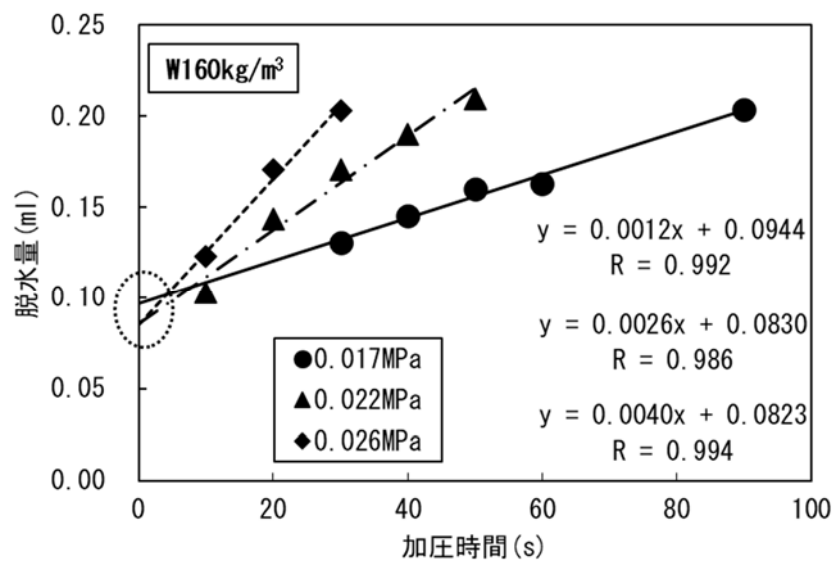


図 4-3 加圧力と脱水量との関係 ($W=160\text{kg/m}^3$)

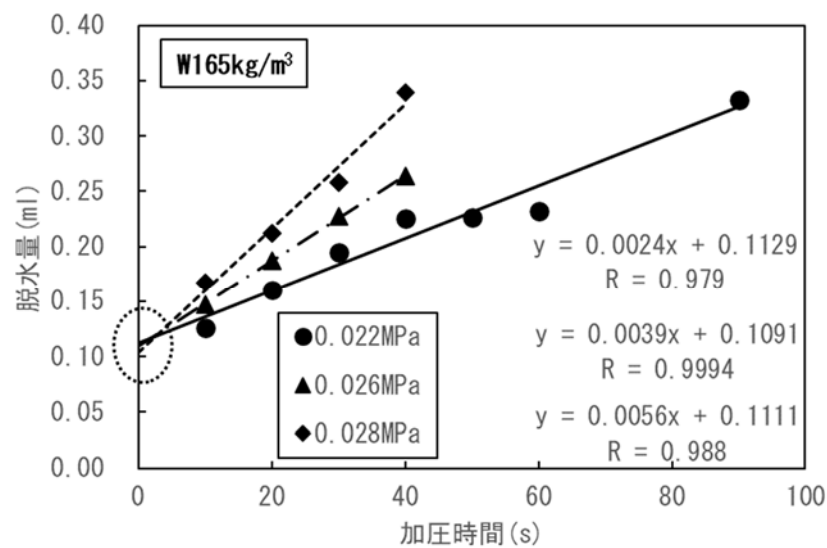


図 4-4 加圧力と脱水量との関係 ($W=165\text{kg/m}^3$)

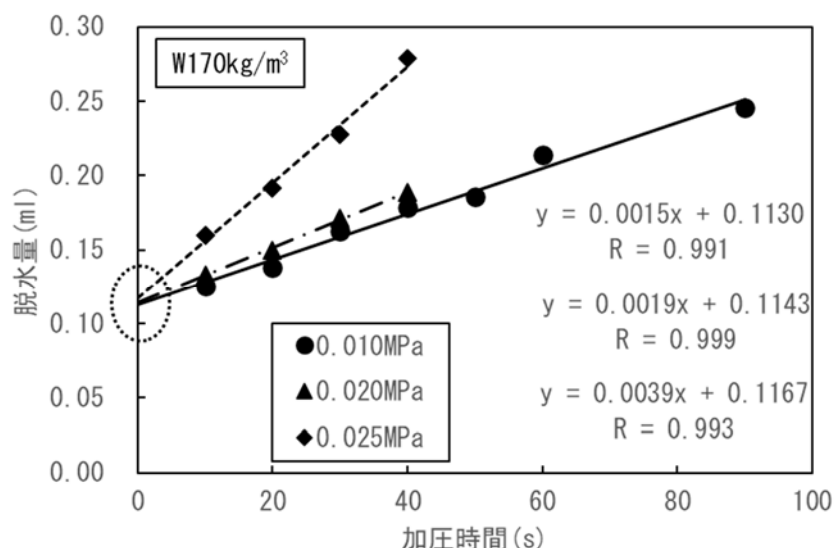


図 4-5 加圧力と脱水量との関係 (W=170kg/m³)

これら水の膜厚は、表 4-2 に示すようであって、その値は 0.000116～0.000164cm となり、極僅かではあるが単位水量によって脱水量が相違するものの、加圧力によってほぼ同等の値となっていることが分かる。

水の膜厚と単位水量との関係を示す実験式は、式(4-7)に示すようであり、その相関係数は R=0.918 となっている。

$$y = 4.0 \times 10^{-6}W - 5.0 \times 10^{-4} \dots \text{式(4-7)}$$

ここに、y: 膜厚(cm), W: 単位水量(kg/m³)

これらの関係を圧送に先立って求めておけば、任意の圧送圧力に対応する水の膜厚(y), この値と式(4-2)を利用して滑り速度, 式(4-6)を用いて任意の圧送量を得るための圧送負荷(圧力勾配)の推定が可能となる。

表 4-2 水の膜厚の推定結果

単位水量 (kg/m³)	応力 (MPa)	脱水量 (ml)	膜厚 (cm)
160	0.017	0.0944	0.000133
	0.022	0.0830	0.000117
	0.026	0.0823	0.000116
165	0.022	0.1129	0.000159
	0.026	0.1091	0.000153
	0.028	0.1111	0.000156
170	0.010	0.1130	0.000159
	0.020	0.1143	0.000161
	0.025	0.1167	0.000164

4.4 管型粘度計(圧送試験装置)によるレオロジー定数の測定

4.4.1 測定方法

測定に用いたコンクリートの使用材料, 配合及び練混ぜ手順は 4.3 に示した方法によった。

実験に用いた管型粘度計は, 前述の第3章に示すようであって, 流量の測定は, 練混ぜ完了後 3 分間静置したコンクリートを管型粘度計の試料容器に約 70L を投入した後, 蓋を閉めて容器内を密閉した後, 圧力を調整するバルブを操作し, 圧力勾配を約 100Pa/cm に調整した後, 排出口シャッターを開けて, 試料受け容器にコンクリートを圧送させた。管内流動においては, コンクリート試料の流出状態が定常状態であることが条件となるため, 排出管出口におけるコンクリートの流線が安定したことを確認し, 圧力勾配が, 約 150Pa/cm 及び 250Pa/cm についても同様の操作を繰り返してコンクリートの吐出量を測定した。流量は, 試料受け容器内の試料質量の推移をデータレコーダのモニターに表示し, 単位時間当たりの流量が一定の質量差を測定時間とコンクリートの単位容積質量とで除して求めた。

4.4.2 測定結果

レオロジー定数の算出に必要なビンガム流量の推定結果を表 4-3 に示す。表 4-3 には, 管型粘度計による実測流量 Q_A , それぞれの圧力勾配 ($\Delta P/l$), 加圧脱水試験により推定した膜厚 y , 式(4-4)による水膜部分の流量 Q_w , 滑り速度 V_r , 並びに実測流量 Q_A から滑りによる流量 Q_s , 水膜部分の流量 Q_w を差し引いたビンガム流量 Q_B を併記した。

表 4-3 において, 水膜の厚さは 0.000116~0.000164cm と極めて薄く, これによる流量は 0.108159~0.266205cm³/s 程度と極めて少ない。

なお, 表中の圧力勾配は, 管型粘度計の圧送圧力を圧送管長で除して求めた。

表 4-3 管型粘度計による実測流量に基づくビンガム流量の推定

配合 No.	単位水量 W(kg/m ³)	圧力勾配 ΔP/l(Pa/cm)	実測流量 Q _A (cm ³ /s)	膜厚の推定値 y(cm)	水膜の流量 Q _w (cm ³ /s)	滑り速度 V _r (cm/s)	ビンガム流量 Q _B (cm ³ /s)
1	160	169.1	4608.3	0.000133	0.117110	56.1	204.6
		220.9	5342.7	0.000117	0.117641	64.3	294.6
		263.0	6335.8	0.000116	0.138041	76.0	367.8
2	165	222.7	7435.3	0.000159	0.219965	88.3	502.4
		260.0	8663.8	0.000158	0.254637	102.6	603.7
		295.3	9482.8	0.000152	0.266205	111.8	699.7
3	170	178.5	5993.6	0.000159	0.177788	71.1	412.2
		252.1	8574.2	0.000161	0.255574	101.2	622.1
		103.0	3503.5	0.000164	0.108159	42.1	196.9

また、表 4-3 に示すビンガム流量(式(4-5))と圧力勾配(ΔP/l)で整理した式(4-8)を用いて、これを三元連立に解けば塑性粘度と降伏値が式(4-9)及び式(4-10)より求められる。

$$Q_B = Ai + \frac{B}{i^3} - C \quad \dots \text{式(4-8)}$$

ここに、 $\Delta p/l=i$ と置けば式(4-5)より、

$$A = \frac{\pi(R-y)^4}{8\eta_{pl}}$$

$$B = \frac{2\pi\tau_f^4}{3\eta_{pl}}$$

$$C = \frac{\pi(R-y)^3\tau_f}{3\eta_{pl}}$$

塑性粘度

$$(\eta_{pl}) = \frac{\pi(R-y)^4}{8A} \quad \dots \text{式(4-9)}$$

降伏値

$$(\tau_f) = \frac{3(R-y)C}{8A} \quad \dots \text{式(4-10)}$$

塑性粘度及び降伏値の計算結果は表 4-4 に示す通りであって、回転粘度計による多点法^{4-10), 4-11)}によって測定した塑性粘度及び降伏値を併記した。

表 4-4 において、管型粘度計によって測定した塑性粘度は、全体として回転粘度計による試験値と比較し 1.00～1.01 と同等な値となった。また、降伏値の測定結果は回転粘度計による試験値と比較し 0.95～1.00 とやや小さくなっているものもあるがほぼ同等な値となっている。

表 4-4 塑性粘度及び降伏値の計算結果

回転粘度計		管型粘度計			
塑性粘度 η_{pl} (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)	塑性粘度 η_{pl}' (Pa·s)	比 η'/η	降伏値 τ_f' (Pa)	比 τ_f'/τ_f
141	97	141	1.00	96	0.99
90	71	91	1.01	68	0.95
86	64	86	1.00	64	1.00

4.5 種類の異なるコンクリートを用いた検証

前述の 4.2～4.4 においてコンクリートの管内流動はコンクリートと薄い水の層との流れが生じていると仮定し、水の膜厚やレオロジー定数を実験的に求めた。この解析手法を用いて流動性や粘性など種類の異なるコンクリートについて、加圧脱水試験と管型粘度計による実測流量から水膜部分の流量を差し引いたビンガム流量と圧力勾配とを用いて塑性粘度と降伏値とを求める方法の適用性を確認した。

4.5.1 使用材料および配合

実験に用いたセメントは、密度 3.16g/cm^3 、粉末度 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$ の普通ポルトランドセメント、細骨材は、密度 2.63g/cm^3 、吸水率 1.23%、粗粒率 2.56 の茨城県鹿島産陸砂、粗骨材は、密度 2.67g/cm^3 、吸水率 0.92%、粗粒率 6.77 の青梅産砕石 2005、混和材は、比表面積 $6,000\text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末、増粘剤は、セルロース系を主成分とするもの、混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤をそれぞれ用いた。

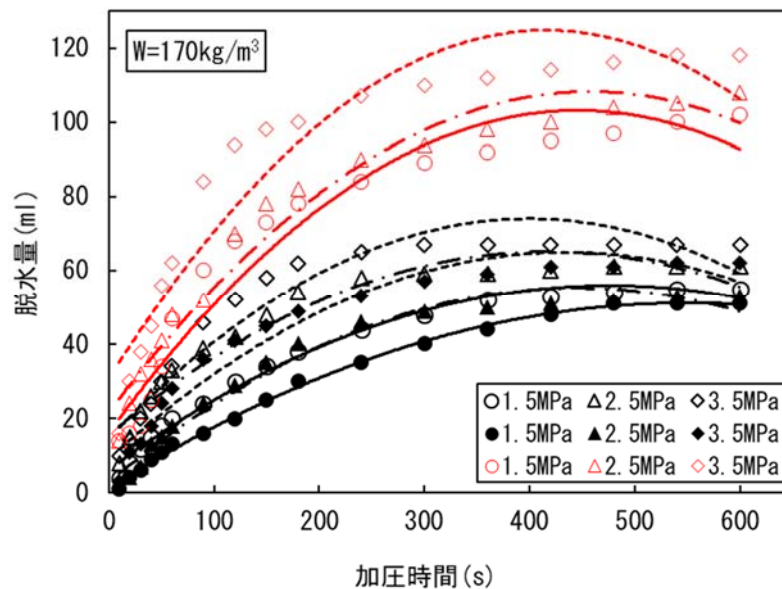
コンクリートの配合は、表 4-5 に示す通りであって、高性能 AE 減水剤の添加率を一定とし、単位水量は目標スランプフロー値が 50, 60 および 70cm となるよう 165, 170 および 175kg/m^3 の 3 水準に変化させた高流動コンクリートとした。なお、粉体系の配合は、セメント量を $400\sim 500\text{kg/m}^3$ とし、併用系の配合は、セメントの一部を高炉スラグ微粉末に置き換え、増粘剤を併用したものとした。また、目標空気量は練上り直後で $4.5\pm 1.5\%$ とした。

表 4-5 コンクリートの配合 (高流動コンクリート)

配合 No.	コンクリートの種類	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)						
						W	C	BFS	S	G	Ad (C×%)	増粘剤 (C×%)
1	粉体系	50±5	4.5 ±1.5	35	52.9	165	471	—	887	814	1.00	—
2		60±5			50.9	170	486		828	828		
3		70±5			48.6	175	500		797	854		
4	併用系	50±5			49.6	165	330	141	840	862	0.80	0.003
5		60±5			51.7	170	340	146	861	814		
6		70±5			53.9	175	350	150	884	766		

4.5.2 検証結果

図 4-6 は、単位水量 170 kg/m^3 における粉体系および併用系高流動コンクリートの脱水量の推移を加圧力毎に示したものである。図 4-6 おいて、脱水量は、粉体系および併用系ともに加圧力の保持時間が長いほど、また加圧力が大きいほど多くなる傾向となっており、前述の 4.2～4.4 の実験に用いた中流動コンクリートと同様の傾向であった。また、単位水量は同じであっても、加圧による脱水量の推移はコンクリートの種類によって異なるが、同一コンクリートにおける脱水量の総量は、加圧力を変化させた場合でも加圧力の保持時間を長時間とすればほぼ同等な脱水量に収束している。これらの結果から、圧送管内のコンクリートに圧力が作用することでコンクリート中の自由水は、コンクリートの種類に関わらず管壁面のとの界面に滲み出ていると考えられ、滲み出る自由水の量は、同一コンクリートであれば加圧力が変化しても一定であり、粘性などコンシステンシーの相違によって異なることが確認できた。



(○△◇粉体系, ●▲◆併用系, ○△◇中流動)

図 4-6 脱水量の推移

次に、水の膜厚およびレオロジー定数の推定結果について、圧送時のコンクリートは、配管入口で最大圧力を受け、コンクリートが受けるその圧力は、瞬時的($t \doteq 0$)であることから図 4-6 に示す脱水曲線の圧送圧力に対応する脱水量は、加圧初期の接線と Y 軸との交点 $t \doteq 0$ における時点と仮定した。

なお、 $t \doteq 0$ の脱水量の推定には、脱水曲線の測定値に若干バラツキが見られるので、脱水曲線初期の Y 軸における接線の方程式を最小二乗法によって求めた切片の値として求めた。

図 4-7 および図 4-8 は、単位水量 170 kg/m^3 における粉体系および併用系高流動コンクリートを管型粘度計により圧送した時の加圧力を加圧ブリーディング容器内の試料に作用させた時の脱水量の推移(図 4-2 参照)から加圧時間 100 秒以内のほぼ直線と見なせる部分の測定値を一次回帰して、圧送時の脱水量を推定したものである。ここで、管壁面の水の膜厚 y は、図 4-7 および図 4-8 に示す脱水曲線の $t=0$ の脱水量を加圧ブリーディング試料容器内の表面積で除して求めた。また、表 4-〇には、加圧脱水試験により推定した水の膜厚 y 、管型粘度計による実測流量 Q_A 、それぞれの圧力勾配($\Delta P/L$)、水膜部分の流量 Q_w 、すべり速度 V_r 、並びに実測流量 Q_A からすべりによる流量 Q_s と水膜部分の流量 Q_w とを差し引いたビンガム流量 Q_B を示した。脱水量は、粉体系および併用系ともに図 4-6 と同様に加圧時間が長いほど、また加圧力が大きいほど、多くなる傾向が示されている。なお、図 4-7 および図 4-8 に示した初期の加圧時間と脱水量との関係を示す直線式の切片は、粉体系で $0.0638 \sim 0.0789 \text{ ml}$ 、併用系で $0.0451 \sim 0.0668 \text{ ml}$ となり、加圧力が大きくなると脱水量も僅かではあるが多くなる傾向であった。表 4-6 に示した粉体系および併用系高流動コンクリートの圧送管内壁面の水の膜厚の推定値は、粉体系で $5.6 \times 10^{-5} \sim 11.1 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 、併用系で $5.7 \times 10^{-5} \sim 9.4 \times 10^{-5} \text{ cm}$ となっており、単位水量や加圧力によって僅かではあるが脱水量が変化するものの、その値は極僅かであった。なお、前述の 4.2~4.4 の実験に用いた中流動コンクリートでは、水の膜厚は $11.6 \times 10^{-5} \sim 16.4 \times 10^{-5} \text{ cm}$ であり、粉体系や併用系よりも膜厚が大きい(脱水量が多い)結果であった。

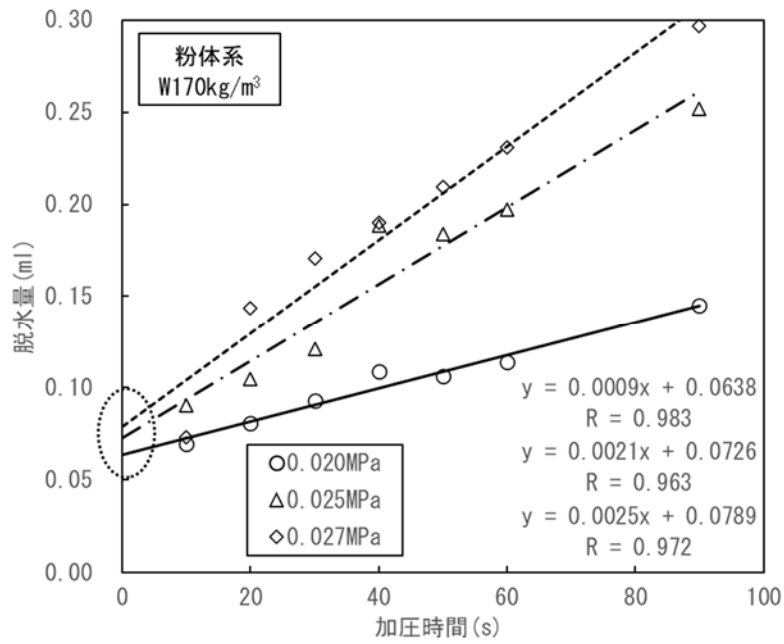


図 4-7 加圧力と脱水量との関係(粉体系, y:脱水量)

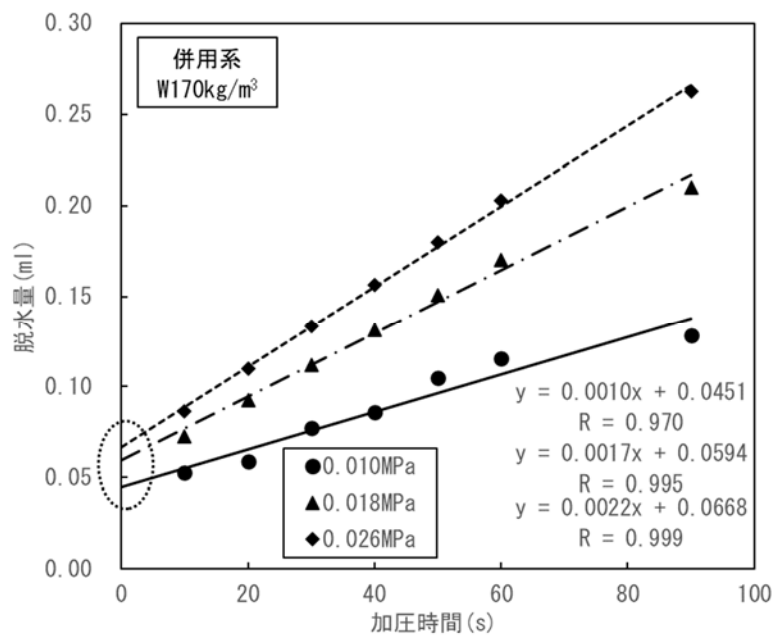


図 4-8 加圧力と脱水量との関係(併用系, y:脱水量)

表 4-6 管型粘度計による実測流量に基づくビンガム流量の推定

配合 No.	単位水量 W(kg/m ³)	圧力勾配 ΔP/L(Pa/cm)	実測流量 Q _A (cm ³ /s)	水の膜厚の 推定値 y(cm)	水膜の流量 Q _w (cm ³ /s)	すべり 速度 V _r (cm/s)	ビンガム 流量 Q _B (cm ³ /s)
1	165	174.5	2412.1	6.9×10 ⁻⁵	3.299×10 ⁻²	30.3	35.4
		222.7	2516.9	5.6×10 ⁻⁵	2.761×10 ⁻²	31.3	60.4
		277.2	4148.8	7.5×10 ⁻⁵	6.057×10 ⁻²	51.7	89.2
2	170	168.2	3067.6	9.0×10 ⁻⁵	5.306×10 ⁻²	37.7	107.5
		213.3	4430.4	10.2×10 ⁻⁵	8.711×10 ⁻²	54.4	158.1
		222.6	5015.6	11.1×10 ⁻⁵	10.738×10 ⁻²	61.7	171.8
3	175	78.2	1735.8	11.1×10 ⁻⁵	3.802×10 ⁻²	21.8	27.3
		107.6	2209.0	10.2×10 ⁻⁵	4.383×10 ⁻²	27.4	58.3
		199.7	4322.0	10.6×10 ⁻⁵	8.843×10 ⁻²	52.9	158.9
4	165	151.7	1852.2	6.1×10 ⁻⁵	2.224×10 ⁻²	23.2	32.3
		225.7	3030.3	6.7×10 ⁻⁵	3.978×10 ⁻²	37.8	62.0
		277.1	4979.8	9.0×10 ⁻⁵	8.796×10 ⁻²	62.3	88.5
5	170	83.7	1073.7	6.3×10 ⁻⁵	1.318×10 ⁻²	13.3	32.9
		214.7	3622.7	8.3×10 ⁻⁵	5.869×10 ⁻²	44.8	106.3
		151.8	2970.9	9.4×10 ⁻⁵	5.247×10 ⁻²	35.6	175.3
6	175	103.9	1378.1	5.7×10 ⁻⁵	1.313×10 ⁻²	14.7	220.8
		151.5	2843.9	8.3×10 ⁻⁵	4.127×10 ⁻²	31.5	366.7
		205.7	4089.9	8.8×10 ⁻⁵	6.266×10 ⁻²	45.3	533.0

このように単位水量やスランプフロー値が同等のコンクリートにおいても、使用材料やコンシステンシー、圧送時の加圧力によって、圧送管内の流動性状が異なることから、実工事における圧送に先立って「2層流れ」を仮定した加圧による瞬間的な脱水量から求まる薄い水膜の流量 Q_w とすべり速度から計算されるすべりによる流量 Q_s と回転粘度計による塑性粘度と降伏値とを流量式に代入すれば、簡易に実測流量 Q_A の概略値を推定することができ、任意の圧送量を得るための圧送負荷(圧力勾配)の予測が可能となる。また、表 4-6 に示すビンガム流量と圧力勾配で整理した式(4-4), (4-5), (4-8)を用いて、これを三元連立に解けば塑性粘度と降伏値が式(4-9)および式(4-10)により求められる。

管型粘度計による塑性粘度および降伏値の推定結果は表 4-7 に示す通りであり、本実験で用いたコンクリートのスランプフロー値および O 漏斗流下時間の測定値の範囲と共軸二重円筒型回転粘度計によって求めた塑性粘度および降伏値を併記した。表 4-7 において、管型粘度計によって推定した塑性粘度および降伏値は、全体として回転粘度計による測定値と同等な値が得られ、その比(管型/回転)は、塑性粘度で 0.94~1.06, 降伏値で 0.92~1.11 であった。

表 4-7 管型粘度計による塑性粘度および降伏値の推定結果

配合 No.	スランブ° フロー (cm)	O 漏斗 流下時間 (s)	回転粘度計		管型粘度計			
			塑性粘度 η_{pl} (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)	塑性粘度 η_{pl}' (Pa·s)	比 η_{pl}'/η_{pl}	降伏値 τ_f' (Pa)	比 τ_f'/τ_f
1	48.5～53.0	7.32～10.21	131	145	123	0.94	159	1.10
2	60.0～63.0	8.09～10.28	114	115	108	0.95	108	0.94
3	69.0～72.0	8.25～12.04	85	87	90	1.06	80	0.92
4	49.0～52.5	10.30～13.94	458	209	445	0.97	233	1.11
5	58.0～63.0	10.00～12.48	223	104	220	0.99	110	1.06
6	70.5～74.0	7.23～9.51	80	60	81	1.01	60	1.00

4.6 O 漏斗を活用した圧送試験方法の簡易法の提案

本研究では、中・高流動コンクリートの管内流動モデルとして、「管壁での液体摩擦状態」に代わり、コンクリートと管壁との界面に薄い水膜が存在すると仮定した「2 層流れ」を提案した。すなわち、管壁面の水膜の厚さを JSCE-F502 における加圧ブリーディング装置を用いた加圧脱水試験による脱水量から求めるとともに、管型粘度計(圧送試験装置)によるコンクリートの流出量から水膜部分の体積(流量)と滑りを伴う流量とを減じてビンガム流量を求め、Buckingham 式から塑性粘度と降伏値の概略値(見掛けの値)とを求める方法を提案した。

ここでは、流量式による管内流動の解析に必要な圧力と流量とを把握する方法として用いた圧送試験装置に替わり、より簡易に流量と圧力とを測定できる方法として、装置が簡易で測定方法の容易な O 漏斗を活用することを検討した。O 漏斗試験装置はコンクリート試料が流出する時間を測定し、その流動性や粘性を把握する試験方法であるが、その流出するコンクリート試料の質量を流出時間とともに計測することで単位時間当たりの流量の把握が可能となる。また、圧送管内のコンクリート試料にかかる圧力については、O 漏斗を用いた場合、コンクリート試料の自重を試料にかかる圧力と考え、異なる圧力を得るには試料容量を増やし自重を変化させることが必要であることから、既存の O 漏斗に増槽を設けることとした。(後述 4.6.4, 改良 O 漏斗の図 4-9 および写真 4-3 参照)

以上により得られる圧力と流量の概略値を用いて、回転粘度計による測定結果との比較による補正係数を導入し、予測した流量とコンクリート圧送試験装置の実測流量とを比較した。

4.6.1 使用材料および配合

実験に用いた使用材料は、高流動コンクリートの場合、セメントとして普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³, 粉末度 3,150cm²/g), 混和材として高炉スラグ微粉末(比表面積 6,000 cm²/g), 細骨材として茨城県鹿島産陸砂(表乾密度 2.63g/cm³, 吸水率 2.23%, F.M.2.56), 粗骨材として東京都青梅産砕石 2005(表乾密度 2.67g/cm³, 吸水率 0.92%, F.M.6.7), 混和剤として高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分)及び増粘剤(セルロース系を主成分)をそれぞれ用いた。

また、中流動コンクリートでは、細骨材に粒度分布が標準粒度範囲となるよう鹿島産陸砂と北海道白老産陸砂とを 7:3 に混合したもの(密度 2.63g/cm³, 吸水率 2.00%, F.M.2.33)を、混和剤に近年提案されたの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高性能 AE 減水剤(増粘剤一液タイプ)を用いた。

中流動コンクリートの配合は、表 4-8 に示すように、混和剤の特徴を生かし、粉体量を普通コンクリートと同程度とし、水セメント比を 45%, 単位水量を 160~170kg/m³ とし、スランプフロー値がそれぞれ約 50cm, 60cm 及び 65cm となる 3 水準とした。

高流動コンクリートの配合は、表 4-8 に併記したように、高性能 AE 減水剤の添加量を一定量とし、単位水量は JIS A 1150 による目標スランプフロー値が 50, 60 及び 70cm となるよう 165~175kg/m³ の間で 3 水準に変化させた。

なお、空気量は練り上り直後で 4.5±1.5%とし、コンクリートの練混ぜは、容量 100L の強制二軸練りミキサを用いて、1 バッチの量を 85L として行った。

表 4-8 コンクリートの配合

配合 No.	コンクリートの種類	スランプ° フロー (cm)	空気量 (%)	水セ メント 比 (%)	s/a (%)	単位粗 骨材絶 対容積 (m ³ /m ³)	単位量((kg/m ³))								
							W	C	BFS	S	G	Ad	AE	V _A	
1	中流動	50±5	4.5±1.5	45	53.7	0.316	160	356	—	966	844	2.85	1.07	—	
2		60±5			53.1		165	367		945	844	2.94	1.10		
3		65±5			52.4		170	378		937	860	2.38	1.13		
4	高流動	50±5		50	49.5	0.323	165	330	141	834	862	9.72	—		0.15
5		60±5			51.7	0.305	170	340	146	857	814				
6		70±5			53.8	0.287	175	350	150	878	766				

4.6.2 O 漏斗を活用したレオロジー一定数の設定方法

前述の 4.2~4.5 では、中・高流動コンクリートの管内流動の解析モデルとして、コンクリートと管壁との界面に薄い水の層が存在すると仮定した。このコンクリートの壁面近傍における滑りは、水膜部分が圧送圧力によって Newton 流れを生じ、水膜とコンクリートとの接する部分の流速が、コンクリートの滑り速度と考えることとした。すなわち、管内には薄い水膜、その内側にコンクリートの 2 層流れが生じていると仮定した。

この仮定に基づき、土木学会規準 JSCE-F502 に規定されている加圧ブリーディング装置を活用して、加圧により脱水量を測定し、水の膜厚を実験的に推定することとした。

4.6.3 漏斗内のコンクリートの流れ

フレッシュコンクリートの物性値の測定法として、図 4-9 に示すように漏斗内試料の液面と流出管の出口にエネルギー方程式⁴⁾¹²⁾を適用すれば式(4-11)となる。

$$\frac{V^2}{2g} + Z_i + l = \frac{V_0^2}{2g} + f_m \frac{V_0^2}{2g} + h_i \quad \dots \text{式(4-11)}$$

ここに V: 漏斗内液面の流速 (cm/s)

V_0 : 流出管出口の流速 (cm/s)

$f_m(V_0^2/2g)$: 漏斗から流出管に流入する時の損失エネルギー (cm)

h_i : 流出管における損失エネルギー (cm)

Z: 流出管入口からの高さ (cm)

l: 流出管の長さ (cm)

式(4-11)に $V = (d_0/d)^2 V_0$ 及び $h_i = (l/K) V_0$ を代入し、 V_0 について解けば、式(4-12)となる。

$$V_0 = \frac{2}{\frac{l}{K(Z_i + l)} + \sqrt{\frac{l^2}{K(Z_i + l)^2} + \frac{2}{g(Z_i + l)} \left\{ 1 + f_m - \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right\}}} \quad \dots \text{式(4-12)}$$

ただし,

$$K = \frac{\rho g R^2}{8\eta_{pl}} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau_f}{\rho g IR} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_f}{\rho g IR} \right)^4 \right\} \quad \dots \text{式(4-13)}$$

ここに ρ : 単位容積質量 (g/cm^3)

I: エネルギー勾配

式(4-13)において, $l=0$ の場合, 式(4-14)となり, 流出速度は漏斗の深さや内径及び流出管の内径に関係し, 物性にはほとんど無関係となる。この場合, 損失係数のみが物性値に関連するが, 流出速度への影響は小さい。

$$V = \sqrt{\frac{2gZ_i}{1 + f_m - \left(\frac{d_0}{d}\right)^4}} \quad \dots \text{式(4-14)}$$

これに対し, 流出管の長さが十分長い場合には, その流速は式(4-15)であらわされる。

$$V_0 = \frac{K(Z_i + l)}{l} = \frac{R^2 \rho g E}{8\eta_{pl}} \times \frac{Z_i + l}{l} \quad \dots \text{式(4-15)}$$

ここに,

$$E = 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4 \quad \dots \text{式(4-16)}$$

なお, この式(4-16)に示すように流速はレオロジー一定数と関連することがわかる。

4.6.4 改良O漏斗による流量の測定

漏斗法による実測流量と圧力とを簡易に測定できる装置として、JSCE-F 512-199 に準拠した図 4-9 及び写真 4-3 に示す流入管径 $\phi 230\text{mm}$ 、高さ 615mm 、流出管径 $\phi 75\text{mm}$ 、流出管の長さ 150mm の O 漏斗を改良し、漏斗上部に脱着可能な高さを異にする 2 種類の試料容器を増設 ($\phi 230\text{mm}$ 、高さ 250 及び 500mm) させた (以降、改良 O 漏斗法と呼ぶ)。それぞれの水頭差におけるコンクリートの流出量を測定するために、試料受け容器と秤 (秤量 150kg 、目量 20g) 及びデータロガーを用いた。

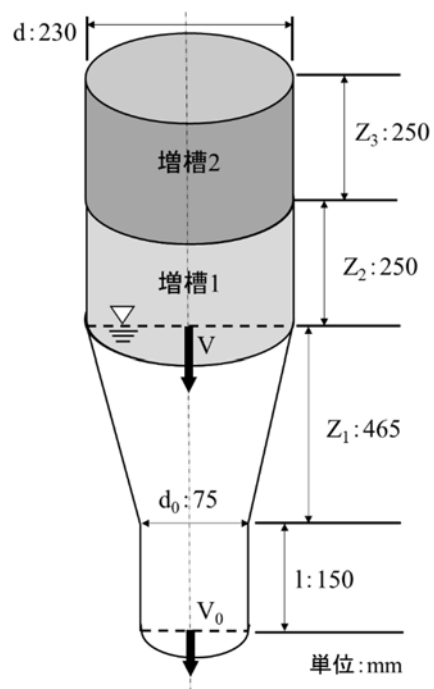


図 4-9 改良 O 漏斗流下試験装置

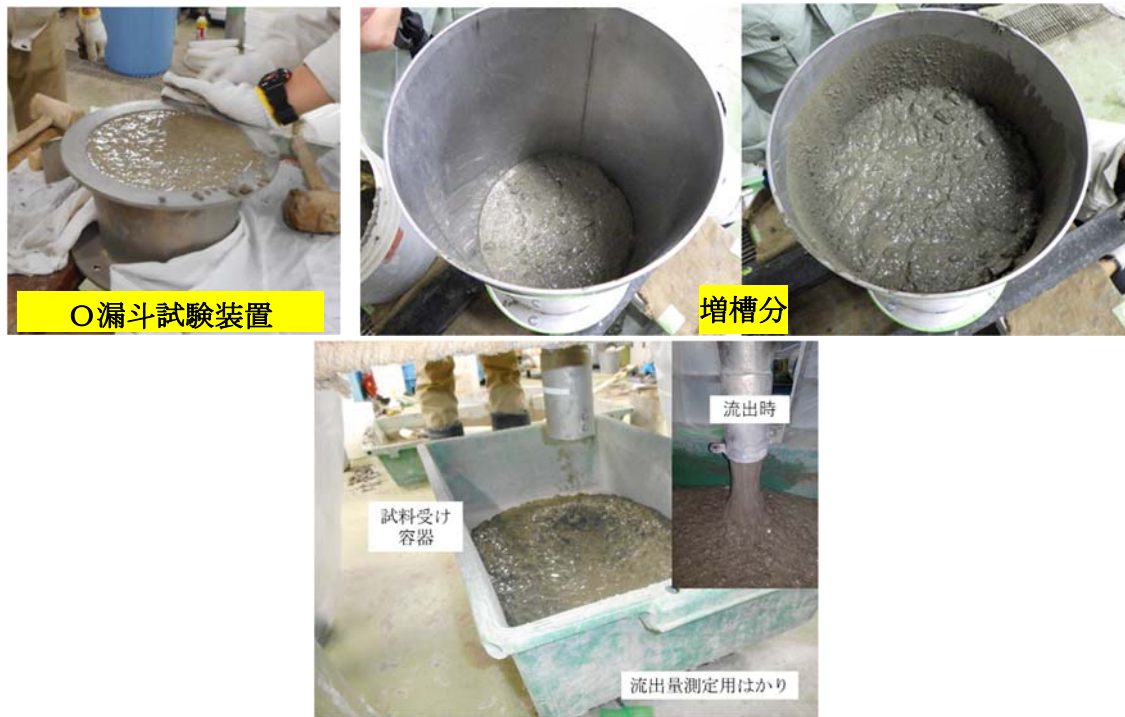


写真 4-3 改良 O 漏斗による測定

4.6.5 O 漏斗を活用した流量の測定手順

測定手順は、試料受け容器を載せた秤の上方に O 漏斗を設置し、500mm の試料容器(増槽)を取付けた後、コンクリート試料を増槽の頂面まで入れ、上端を平滑に仕上げる。O 漏斗流出管のレバーを操作して、コンクリートを漏斗の流出管から流出させる。コンクリートの流出量は、秤からデータレコーダを介して、質量を 50g 単位で表示させ、0.1 秒単位で試料質量の推移を記録させる。実験は、増槽 250mm 及び 0mm(増槽なしの O 漏斗)についても同様に行い、流出管入口に作用する水頭差を変化させて流量の測定を行った。

さらに、加圧ブリーディング装置にて O 漏斗の流出管入口に作用する水頭差に対応する圧力(3 水準)で加圧脱水量の推移を測定し、図 4-10 に示すように $t=0$ 秒の水量を求めて、O 漏斗の流出管の内表面積で除して膜厚を計算した。そして、O 漏斗による流量 Q_A と加圧脱水による脱水量 Q_w 、滑りによる流量 Q_s からビンガム流量 Q_B を求めた(式 4-5 参照)。

4.6.6 O 漏斗による流量の測定結果

O 漏斗による流量測定結果の一例として、配合 No.2 について測定した流出量の推移を図 4-10 に示す。

図 4-10 は横軸に経過時間(sec), 縦軸に試料の流出量の累計(cm^3)を示したものであり、また、図 4-11 に示すように O 漏斗による圧力勾配と実測流量との関係は、繰返し 3 回の結果とも原点を通る直線となり、O 漏斗による流出量も圧送試験装置と同様に安定的に測定することができる。また、O 漏斗からの流出量は、時間とともに単位時間当たりの流量は減少するが、流出開始後 3 秒程度までは直線関係が認められることから、この間は流出管における流動状態を定常状態と見なせる。

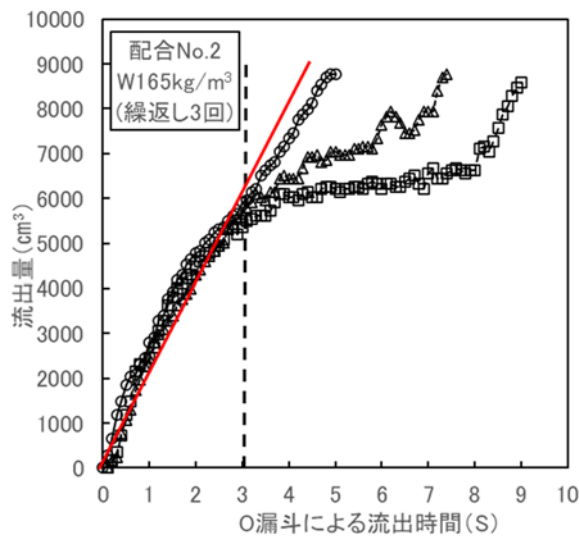


図 4-10 O 漏斗からの流出量の推移

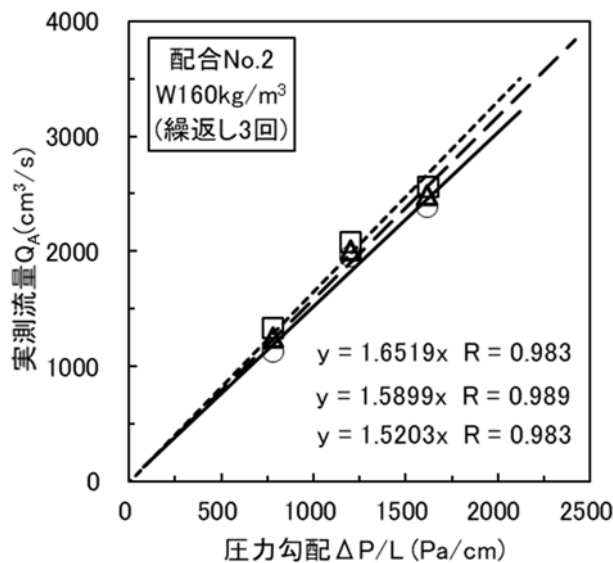


図 4-11 圧力勾配と流量との関係(O 漏斗)

これらを 3 水準に変化させビンガム流量式(4-5)と圧力勾配($\Delta P/L$)で整理した式(4-8)を用いて、これを三元連立に解き、式(4-9)および式(4-10)より塑性粘度と降伏値を計算した。(前述 4.4.2 式参照)

塑性粘度及び降伏値の計算結果は表 4-9 に示す通りである。改良 O 漏斗による塑性粘度及び降伏値は、回転粘度計による測定値に対し、0.70~0.94 と小さくなった。これは式(4-11)で仮定した、O 漏斗の流出管長が十分長く無いためと推測した。そこで、改良 O 漏斗で試験し、回転粘度計による測定値と改良 O 漏斗によるレオロジー定数の推定値との比の逆数を補正係数として、塑性粘度には 1.19, 降伏値には 1.21 を乗じる(簡便のため両者とも 1.20 として)ことで回転粘度計による試験値を近似できるものと思われる。

表 4-9 塑性粘度と降伏値の結果

配合 No.	Thickness of water film y(cm)	O 漏斗		回転粘度計		比(O/R)		補正係数			
		塑性粘度 η_{PI} (Pa·s)	降伏値 τ_r (Pa)	塑性粘度 η_{PI} (Pa·s)	降伏値 τ_r (Pa)	塑性粘度 η_{PI} (Pa·s)	降伏値 τ_r (Pa)	塑性粘度 η_{PI} (Pa·s)	平均(標準偏差)	降伏値 τ_r (Pa)	平均(標準偏差)
1	0.000026	126	79	141	97	0.89	0.81	1.12	1.16 (0.04)	1.23 1.12 1.13	1.16 (0.06)
	0.000030	122	83	146	93	0.84	0.89	1.19			
	0.000027	112	77	132	87	0.85	0.89	1.18			
2	0.000028	83	60	94	70	0.89	0.86	1.13	1.19 (0.10)	1.17 1.19 1.28	1.21 (0.06)
	0.000030	87	52	99	62	0.88	0.84	1.14			
	0.000028	71	54	92	69	0.77	0.78	1.30			
3	0.000030	66	44	90	56	0.73	0.79	1.36	1.37 (0.05)	1.27 1.27 1.33	1.29 (0.04)
	0.000031	73	41	96	52	0.76	0.79	1.32			
	0.000029	60	48	86	64	0.70	0.75	1.42			
4	0.000014	401	181	459	209	0.87	0.87	1.14	1.11 (0.04)	1.15 1.15 1.43	1.25 (0.16)
	0.000021	427	172	468	198	0.91	0.87	1.10			
	0.000022	405	142	436	203	0.93	0.70	1.08			
5	0.000013	223	93	243	113	0.92	0.82	1.09	1.12 (0.05)	1.22 1.07 1.12	1.13 (0.07)
	0.000020	202	104	238	111	0.85	0.94	1.18			
	0.000022	209	93	229	104	0.91	0.89	1.10			
6	0.000013	55	38	68	48	0.81	0.79	1.24	1.21 (0.03)	1.26 1.15 1.20	1.20 (0.06)
	0.000020	69	62	84	71	0.82	0.87	1.22			
	0.000022	64	48	75	57	0.85	0.84	1.17			

この改良 O 漏斗に加圧脱水量(水膜の厚さ)と補正係数を乗じたレオロジー一定数の概略値を用いて、任意の圧送条件における流量と圧送試験装置を用いた実測流量とを比較した結果は表 4-10 に示す通りである。表 4-10 に示すように両者の比は、一部の例外的な値を除いて、0.9~1.1 程度であり、改良 O 漏斗と加圧脱水試験を併用することで、所要時間 5 分程度と簡易に流量予測ができる可能性が示された。

表 4-10 改良 O 漏斗法による流量測定の結果

配合 No.	圧力勾配 $\Delta p/l(\text{Pa/cm})$	実測流量(cm^3/s)		比 Q_A'/Q_A
		Q_A' (O 漏斗)	$Q_A^{(4)}$ (圧送試験装置)	
1	2814	6226	6674	0.92
2	2598	8323	8527	0.98
3	1784	7389	6693	1.09
4	836	2564	2319	1.11
5	1034	2581	2995	0.95
6	1988	6604	5649	1.16

また、改良 O 漏斗と加圧脱水による物性値の測定における設備費用は、回転粘度計を用いた方法に比して 1/10、圧送試験装置を用いた方法に比して 1/3 と軽減できる。

4.7 まとめ

第4章で得られた成果を要約すれば、以下の通りである。

(1)コンクリートと管壁との間に水膜を仮定した場合、その膜厚は、下記の手順で推定可能である。

①JSCE-F503 による加圧ブリーディング試験装置を用いて、加圧力を3水準に変化させて 90 秒までの時間－脱水曲線を直線回帰する。

②管型粘度計で求めた圧力勾配を加圧ブリーディング用として応力換算して算出した脱水量と加圧力との関係を一次回帰する。

③それぞれの圧力勾配に対応する脱水量を加圧容器内試料の表面積で除し水膜の厚さを求める。

(2)水膜の厚さは、単位水量によって相違し、本実験の範囲では、 $y=4\times 10^{-6}W^{-5}\times 10^{-4}$ (ここに、 y :膜厚(cm), W :単位水量(kg/m^3))の関係が認められた。

これらの関係を圧送に先立って求めておけば、任意の圧送圧力に対応する水膜厚(y)、この値を利用して滑り速度、さらに流量の推定式を用いて任意の圧送量を得るための圧送負荷(圧力勾配)の推定が可能となる。

(3)コンクリートの管内流動解析に薄い水の層(2層流れ)を仮定した場合、圧送圧力によるコンクリートからの瞬間的な脱水量(水膜の厚さ)は、単位水量により変化するが、加圧力に関係なくほぼ一定となった。

(4)管型粘度計による実測流量から膜厚の推定値を用いて計算した滑りによる流量及び膜厚部分の流量を差し引いて求めたビンガム流量と圧力勾配とを三元連立に解いて求めたレオロジー定数は、回転粘度計による試験結果と比較し、ほぼ近似した値となり、中・高流動コンクリートのレオロジー定数の測定に管型粘度計が活用できることが示された。

(5)改良 O 漏斗を用いて試料の量を変化(水頭差)させて流量測定を行い、加圧脱水量に基づく管壁の水膜の厚さを併用する方法により、補正係数を乗じてレオロジー定数の概略値が簡易に推定できる。

(6)改良 O 漏斗と加圧脱水により推定したレオロジー一定数から予測した流量と圧送試験装置による実測流量との比は、0.9～1.1 程度となり、改良 O 漏斗法は現場での流量予測に活用できる可能性が示された。

(7)改良 O 漏斗と加圧脱水による物性値の測定における設備費用は、回転粘度計や圧送試験装置を用いた方法に比して、それぞれ 1/10 及び 1/3 と軽減できる。

参考文献[第4章]

- 4-1) 森博嗣:フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価試験に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.34, No.12
- 4-2) 佐久間翔平:高流動コンクリートの流動評価に関する一考察,日本大学生産工学第48回学術講演概要, 2015
- 4-3) 村田二郎他:まだ固まらないコンクリートのレオロジー一定数測定法に関する一考察,土木学会論文報告集, 第284号, pp.117-125, 1979.4
- 4-4) 後藤 廉平, 平井 西夫, 花井 哲也:レオロジーとその応用, P29, 式 2.9, 共立出版, 1962.2
- 4-5) 土木学会:コンクリートのポンプ施工指針(案), コンクリートライブラリ第57号, 昭和60年11月(1985)
- 4-6) 鈴木一雄: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, 2004
- 4-7) 岡本寛昭ほか:コンクリート施工設計学序説, 技法堂出版, p.205, 2004
- 4-8) 越川茂雄, 伊藤義也, 西村昌史, 高橋一義:セメント懸濁液のレオロジー特性, 第50回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.54-55, 1995.9
- 4-9) 山之内康一郎ほか:管型粘度計によるレオロジー一定数の測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1159-1164 (2017)
- 4-10) 菊川浩治:フレッシュコンクリートの粘度式とその適用に関する研究(1987)
- 4-11) 岡本寛昭ほか:コンクリート施工設計学序説, 技法堂出版, p.205, 2004
- 4-12) A.N.Ede: The Resistance of Concrete Pumped though Pipelines, Magazine of Concrete Research, Vol.9, No.27, pp.125-140, 1957.11

第 5 章

圧送可能領域の予測

5.1 概説

第1章緒論でも述べたように近年のコンクリート工事においては、構造物の高強度化や大型化に伴い特殊な配管経路への圧送や過密配筋部材への打設など、コンクリートを型枠内に密実に充填させることが困難となる場合もあり、自己充填性と分離抵抗性を付与したコンクリートの必要性が高まっている。これら多様な条件に対応するために流動性と材料分離抵抗性を付与した中・高流動コンクリートの採用が増えつつある。

しかし、この種のコンクリートは圧送実績も少なく、圧送量の確保だけでなく材料分離や圧送管内での閉塞の可能性など経験的知見が活用できないことから特殊な経路に圧送する場合のポンプ能力や配管径の選定にあたっては、工事計画に基づき所定の性能や打設量を確保するために事前に実際の配管状態を再現し試験圧送を行うなど多大な労力や費用を費やしている。

そこで試験圧送をすることなくポンプ能力を選定でき、且つあらかじめポンプによる圧送の可否を予測することができれば、試験労力や費用の削減とともにコンクリートの配合修正の目安となる。すなわち、現場におけるポンプ閉塞のトラブルを事前に回避することが可能で、打設遅延によるアジテータトラックの待機時間の短縮化、経過時間によるコンクリートの品質変化の抑制、戻りコンクリートの削減などポンプ施工の省力化、合理化に寄与する。

第5章では、第4章で述べた管内流動モデル^{5-1)~5-3)}の「管壁での液体摩擦状態」に代わり、コンクリートと管壁との界面に薄い水の層が存在すると仮定した「2層流れ」の流動モデルを活用し、レオロジー定数を推定する方法について、フレッシュコンクリート(本実験では、増粘剤含有高性能AE減水剤を用いたスランプフロー50~65cmの中流動コンクリートおよび高性能AE減水剤を用いた粉体系・併用系の高流動コンクリート)の管壁面に生じる水の膜厚から、当該コンクリートの圧送の可否の予測について検証した。

5.2 使用材料および配合

実験には、密度 3.16g/cm^3 、粉末度 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$ の普通ポルトランドセメント、粒度分布が標準粒度範囲となるよう 2 種の陸砂を 7:3 に混合した密度 2.63g/cm^3 、吸水率 2.00%、F.M.2.33 の細骨材、密度 2.67g/cm^3 、吸水率 1.03%、F.M.6.77 の碎石 2005 粗骨材、混和材は、比表面積 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末、増粘剤は、セルロース系を主成分とするものを用いた。混和剤はポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤および増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤をそれぞれ用いた。

コンクリートの配合は、表 5-1 に示す通りであって、高性能 AE 減水剤の添加率を一定とし、単位水量は目標スランプフロー値が 50, 60 および 70cm となるよう $165, 170$ および 175kg/m^3 の 3 水準に変化させた高流動コンクリートとした。なお、粉体系の配合は、セメント量を $400\sim 500\text{kg/m}^3$ とし、併用系の配合は、セメントの一部を高炉スラグ微粉末に置き換え、増粘剤を併用したものとした。また、増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤を用いて粉体量が普通コンクリートと同程度となるものとし、水セメント比を 45%、単位水量を $160\text{kg/m}^3, 165\text{kg/m}^3$ および 170kg/m^3 を基本に異なる粘性のコンクリートを得るために混和剤の添加量によってスランプフローが 50~65cm 程度となるよう調整した中流動コンクリートとした。また、目標空気量は練り上り直後で $4.5\pm 1.5\%$ とし、コンクリートの練混ぜは、容量 100L の強制二軸練りミキサを用いて、1 バッチの量を 85L として行った。

表 5-1 コンクリートの配合

配合 No.	コンクリートの種類	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	s/a (%)	単位粗骨材絶対容積 (m^3/m^3)	単位量 (kg/m^3)								
							W	C	BFS	S	G	Ad (C×%)	AE (C×%)		
1	中流動	50~65	4.5±1.5	45	53.7	0.316	160	356	—	966	844	0.5~1.7	1.05~1.15		
2					53.1		165	367		945	844				
3					52.4		170	378		937	860				
4	粉体系	50~70		35	52.9		0.316	165	471	—	887	814	1.0	—	
5					50.9			170	486		828	828			
6					48.6			175	500		797	854			
7	併用系	50~70		35	49.6			0.316	165	330	141	840	862	0.80	0.003 (増粘剤)
8					51.7				170	340	146	861	814		
9					53.9				175	350	150	884	766		

5.3 水膜の厚さの設定方法およびレオロジー定数の測定

5.3.1 コンクリートのフレッシュ性状

スランプフロー試験は、JIS A 1150 に従って行なった。なお、試料は一層詰めとし 50cm フロー到達時間と流動停止時間についても測定を行った。また、コンクリートの性状として、良好・分離気味・分離の判断をスランプフロー測定時に確認した。なお、性状確認には、写真 5-1 に示す JIS A 5308 解説図のスランプフロー状況を参照し、目視判断の目安とした。塑性粘度と降伏値の測定には従来の汎用的な方法である共軸二重円筒型回転粘度計を用いた。



良好(○)

分離気味(△)

写真 5-1 コンクリートの性状

5.3.2 圧送試験装置による流量の測定方法

実験に用いた圧送試験装置(前述第3章参照)は、容量 80L の密閉型試料容器、最大圧力 0.9MPa のコンプレッサ、容量 0.2MPa のダイヤフラム式圧力計、内径 100mm・管長 1.0m の圧送管、容量 40L の試料受け容器、秤量 150kg の流量測定用の秤で構成されている。また、流出するコンクリート試料の質量は、0.1 秒単位でデータレコーダを介して連続記録した。練混ぜは混和剤の作用効果による練上がりの性状を安定させるために所定の練混ぜ完了後 3 分間静置し 60 秒再攪拌した後排出することとした。流出量の測定は、練上がったコンクリートを試料容器に約 70L 投入し、容器内を密閉

した後、圧力調整バルブを操作し、圧力勾配を約 100Pa/cm に調整した後、排出口シッターを開放して、試料受け容器にコンクリートを流出させた。なお、排出管出口におけるコンクリート流が安定したことを確認し、圧力勾配約 150Pa/cm および 250Pa/cm についても同様の操作を繰り返して流出量を測定した。実測流量 Q_A は、試料受け容器内の試料質量の推移をデータレコーダのモニターに表示し、単位時間当たりの流出量が一定のときの質量差を測定時間とコンクリートの単位容積質量とで除して求めた。

5.3.3 水膜の厚さの設定方法

圧送管内におけるコンクリートに圧力が作用するとコンクリートと管壁との間にコンクリート中の自由水が一部滲み出ると仮定し、JSCE-F502 に規定されている加圧ブリーディング試験装置を用いて加圧による脱水量を測定し、脱水量から水の膜厚を実験的に推定することとした。測定は、約 1,840cm³ のコンクリートを加圧ブリーディングの試料容器に詰め試料上面に空気が残らないようにプランジャを挿入し、荷重を 3.5MPa となるよう载荷して、この応力状態を維持しつつ試料容器の底面付近に設置された脱水用コックから流れ出る水量を測定した。脱水量は、メスシリンダの目視による誤差を排除するため、写真 5-2 に示す計量容器とはかりにより 10, 20, 30, 40, 50 秒および 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 分における質量を連続的に収集した。

なお、本実験では加圧初期の脱水が安定するようにコックの開放は加圧前に行うこととし、JSCE-F502 に規定されている 3.5MPa を最大の圧力として加圧力の違いによる脱水量を確認するために、試料が受ける応力で 2.5MPa および 1.5MPa についても配合毎に時間脱水曲線を求めた。

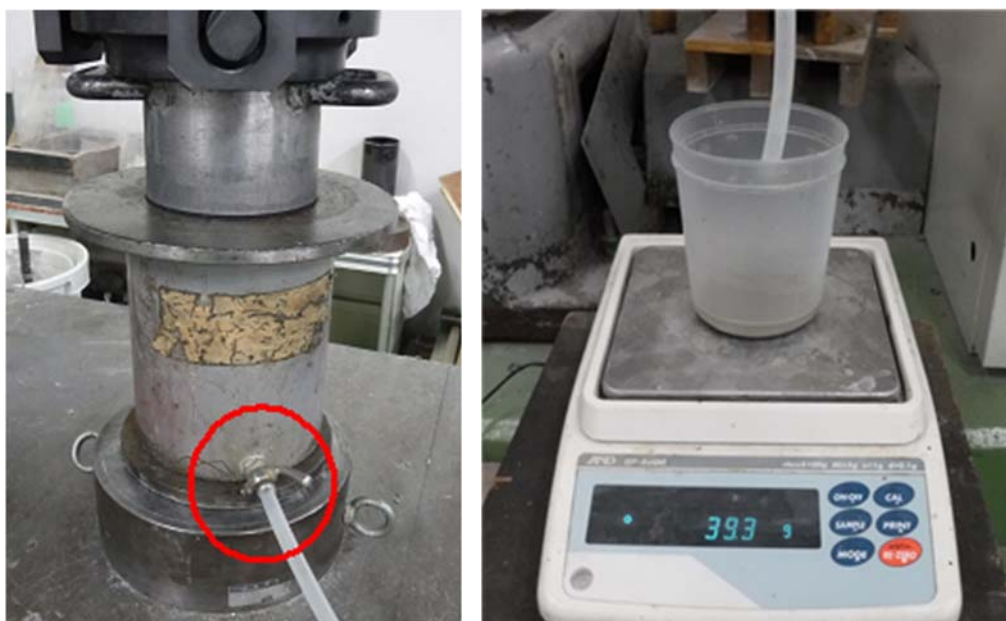


写真 5-2 脱水量の測定

図 5-1 には、中流動コンクリートの単位水量 160 kg/m^3 の粘性の異なるコンクリートの加圧による脱水量の推移(0-600s)の一例を加圧力毎に示したものである。図 5-1 において、脱水量は加圧力が大きく加圧力の保持時間が長いほど多くなる傾向となっている。また、単位水量は同じであっても、脱水量の推移はコンクリートの種類(粘性)によって異なるが、同一コンクリートにおける脱水量の総量は、加圧力を変化させた場合でも加圧力の保持時間を長時間とすればほぼ同等な脱水量に収束している。これらの結果から、圧送管内のコンクリートに圧力が作用することでコンクリート中の自由水は、コンクリートの種類に関わらず管壁面に滲み出ていると考えられ、滲み出る自由水の量は、同一コンクリートであれば加圧力が変化してもほぼ一定となり、粘性などコンシステンシーの相違によって異なることが確認できた。

圧送時のコンクリートは、配管入口で最大圧力を受け、圧送管内のある一点の断面におけるコンクリートが受けるその圧力は瞬時的($t \doteq 0$)であることから図 5-1 に示す脱水曲線の圧送圧力に対応する脱水量は、加圧初期の接線と Y 軸との交点 $t \doteq 0$ における時点と考え、 $t \doteq 0$ の脱水量は、脱水曲線の測定値にバラツキがあるため脱水曲線初期の Y 軸における接線の方程式を最小二乗法によって求めた切片の値として求めた。

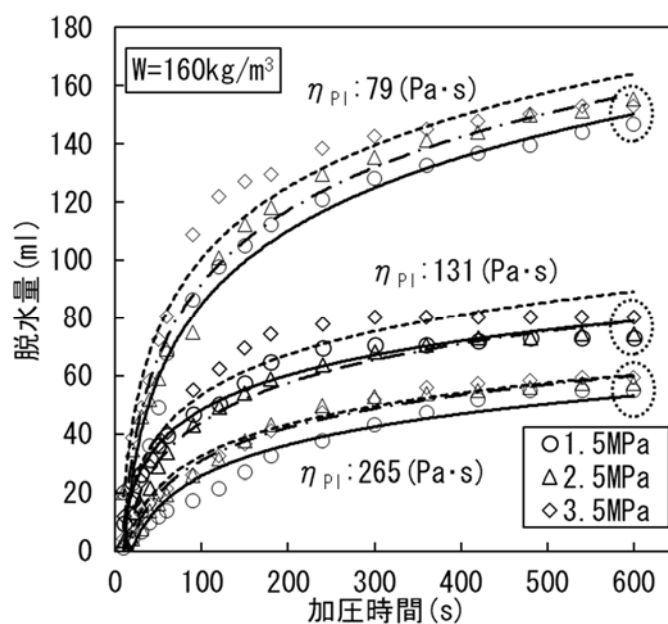


図 5-1 加圧時間と脱水量との関係

図 5-1 は、単位水量 160 kg/m^3 におけるコンクリートを圧送試験装置により圧送した時の加圧力を加圧ブリーディング容器内の試料に作用させた時の脱水量の推移から加圧時間 100 秒以内のほぼ直線と見なせる部分の測定値を一次回帰し圧送時の脱水量を推定した。管壁面の水の膜厚 y は図 5-2 に示す脱水曲線の $t=0$ の脱水量を加圧ブリーディング試料容器内の表面積で除して求めた。

また、表 5-2 には加圧脱水試験により推定した水の膜厚 y 、圧送試験装置による実測流量 Q_A 、それぞれの圧力勾配 ($\Delta P/L$)、水膜部分の流量 Q_w 、すべり速度 V_r 、実測流量 Q_A からすべりによる流量 Q_s と水膜部分の流量 Q_w とを差し引いたビンガム流量 Q_B を示した。

図 5-2 に示した初期の加圧時間と脱水量との関係を示す直線式の切片は、 $0.0125 \sim 0.4168 \text{ ml}$ となり、加圧力が大きくなると脱水量も僅かではあるが多くなる傾向であった。表 5-2 に示した水の膜厚の推定値は、 $0.18 \times 10^{-4} \sim 5.86 \times 10^{-4} \text{ cm}$ となっており、単位水量や加圧力、粘性の違いによって脱水量が変化する。

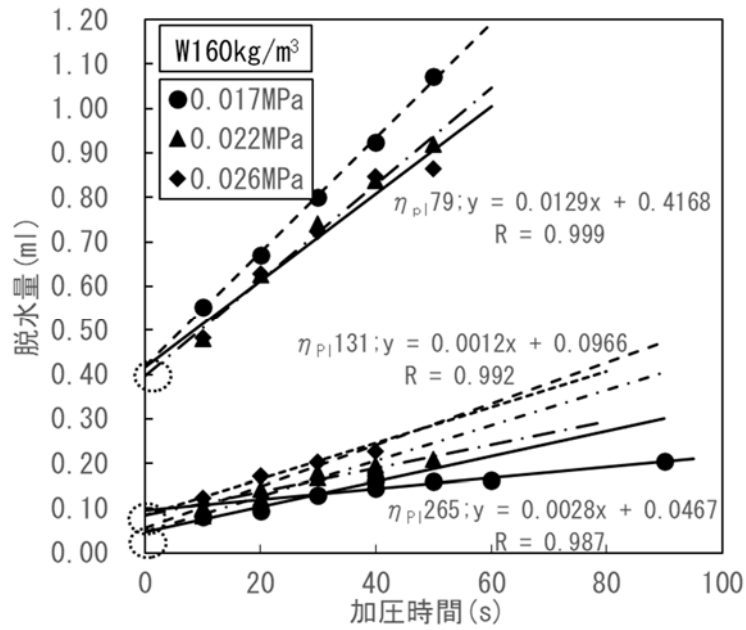


図 5-2 加圧時間と脱水量との関係

表 5-2 水の膜厚の推定結果

配合 No.	単位水量 (kg/m ³)	塑性粘度 η _{PI} (Pa·s)	圧力勾配 ΔP/l (Pa/cm)	実測流量 Q _A (cm ³ /s)	水の膜厚 y (cm)	水膜部分の流量 Q _w (cm ³ /s)	すべり速度 V _r (cm/s)	ビンガム流量 Q _B (cm ³ /s)	目視確認 (良好○/分離気味△)
1	160	79	54.0	6208	5.86×10 ⁻⁴	72.6×10 ⁻²	79.0	7.0	△
		75	62.8	7189	5.77×10 ⁻⁴	82.1×10 ⁻²	90.6	77.6	△
		110	107.9	6835	2.89×10 ⁻⁴	35.3×10 ⁻²	77.9	720.7	○
		131	173.6	5434	1.33×10 ⁻⁴	11.9×10 ⁻²	57.6	913.9	○
		145	260.0	6633	1.17×10 ⁻⁴	13.8×10 ⁻²	75.8	682.8	○
		139	279.6	6689	1.16×10 ⁻⁴	14.7×10 ⁻²	80.8	343.7	○
		185	80.4	1096	0.56×10 ⁻⁴	0.97×10 ⁻²	11.2	217.7	○
		265	107.9	1574	0.66×10 ⁻⁴	1.82×10 ⁻²	17.7	184.0	○
2	165	295	200.1	790	0.18×10 ⁻⁴	0.24×10 ⁻²	8.8	97.6	○
		75	73.6	8552	5.86×10 ⁻⁴	99.0×10 ⁻²	107.7	96.0	△
		85	98.2	8365	4.27×10 ⁻⁴	70.4×10 ⁻²	104.9	128.8	○
		100	130.4	10080	3.89×10 ⁻⁴	77.4×10 ⁻²	126.7	126.6	○
		111	83.7	2874	1.59×10 ⁻⁴	8.2×10 ⁻²	33.2	267.0	○
		115	214.7	6623	1.53×10 ⁻⁴	19.8×10 ⁻²	82.3	161.6	○
		117	151.8	4753	1.56×10 ⁻⁴	14.5×10 ⁻²	59.2	100.8	○
		200	103.9	2378	1.06×10 ⁻⁴	4.60×10 ⁻²	27.4	223.2	○
3	170	248	151.5	2944	0.96×10 ⁻⁴	5.44×10 ⁻²	36.2	99.4	○
		250	205.7	3161	0.78×10 ⁻⁴	4.87×10 ⁻²	39.9	25.8	○
		53	76.5	10112	6.59×10 ⁻⁴	72.6×10 ⁻²	126.0	219.8	△
		70	104.9	11617	5.61×10 ⁻⁴	82.1×10 ⁻²	147.1	68.9	△
		80	120.6	8849	3.64×10 ⁻⁴	35.3×10 ⁻²	109.8	229.8	○
		106	168.2	5368	1.59×10 ⁻⁴	11.9×10 ⁻²	66.8	125.0	○
		102	213.3	6780	1.61×10 ⁻⁴	13.8×10 ⁻²	85.6	54.8	○
		106	222.6	7215	1.64×10 ⁻⁴	14.7×10 ⁻²	91.2	49.2	○
		115	78.2	1006	0.59×10 ⁻⁴	0.97×10 ⁻²	11.5	103.8	○
192	107.6	1299	0.61×10 ⁻⁴	1.82×10 ⁻²	16.3	19.0	○		
200	199.7	2588	0.64×10 ⁻⁴	0.24×10 ⁻²	31.9	80.2	○		

5.3.4 圧送可能領域およびレオロジー定数の推定結果

図 5-3 には塑性粘度と水の膜厚との関係を示し、図 5-4 には単位水量と水の膜厚との関係を示した。図 5-3 および図-5-4 に示すようにいずれの単位水量においても粘性が高くなると水の膜厚は小さくなり、粘性が低くなるほど膜厚の変位量は顕著であるが、粘性がある程度高くなると変位量は収束する傾向であった。なお、相関係数は 0.850 ~0.923 であった。また、図 5-4 に示すように単位水量に関わらず水の膜厚は異なり、本実験に用いたコンクリートでは目視確認においてコンクリートの広がり周辺の周辺部にセメントペーストおよび水が偏在していた分離気味のコンクリートの水の膜厚は 5.61×10^{-4} ~ 6.59×10^{-4} cm であり、良好と判断したコンクリートよりも膜厚が大きい(脱水量が多い)傾向であった。分離気味の性状が確認されたコンクリートは塑性粘度が $80 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以下で水の膜厚が 5.00×10^{-4} cm を超える領域になっている。本実験結果のように単位水量やスランプフロー値が同等のコンクリートにおいても、粘性の違いによって水の膜厚は異なり、異なる単位水量であっても粘性の違いによって水の膜厚は同程度となるなど、使用材料やコンシステンシーによって圧送管内の流動性状が異なることが示された。

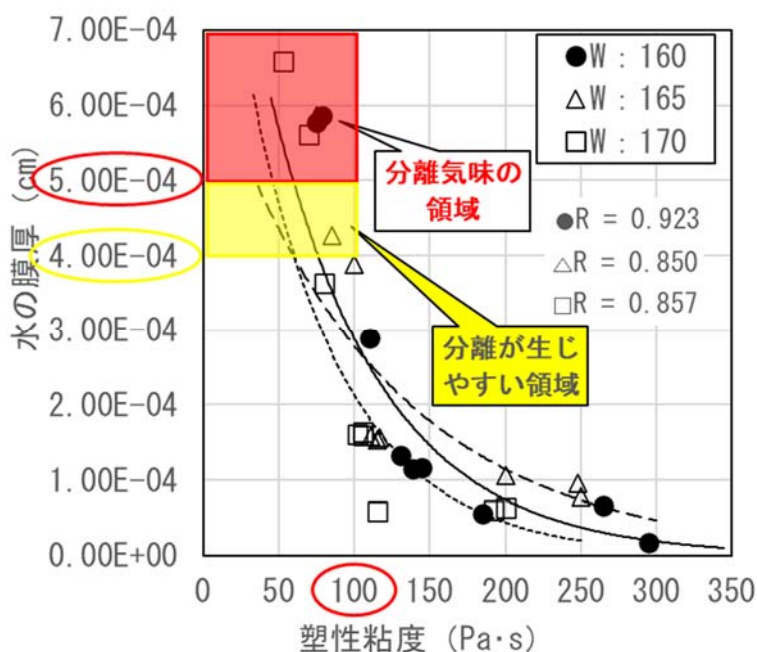


図 5-3 塑性粘度と水の膜厚との関係(中流動)

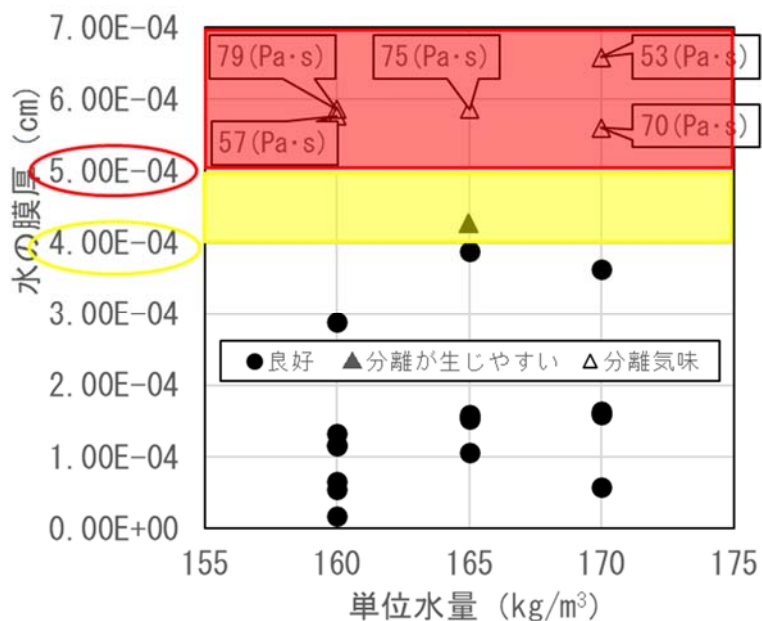


図 5-4 単位水量と水の膜厚との関係(中流動)

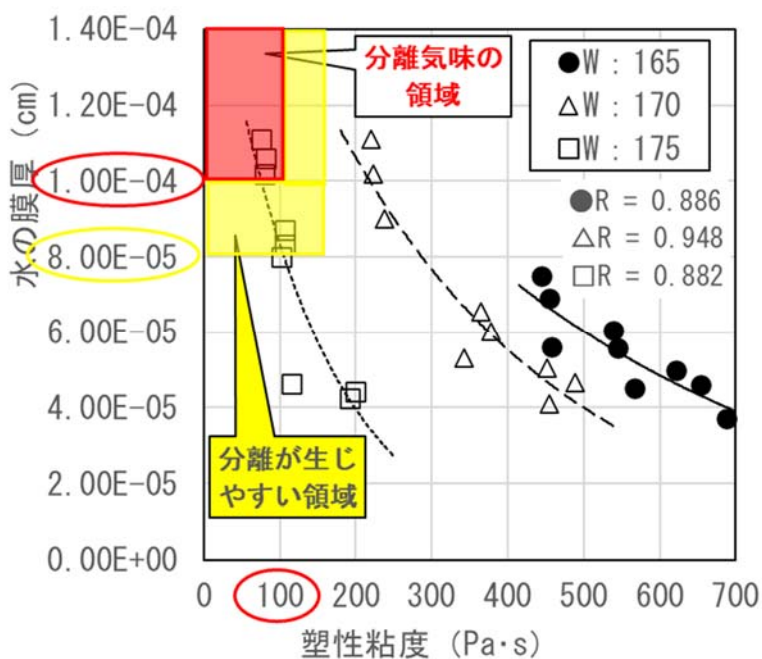


図 5-5 塑性粘度と水の膜厚との関係(高流動)

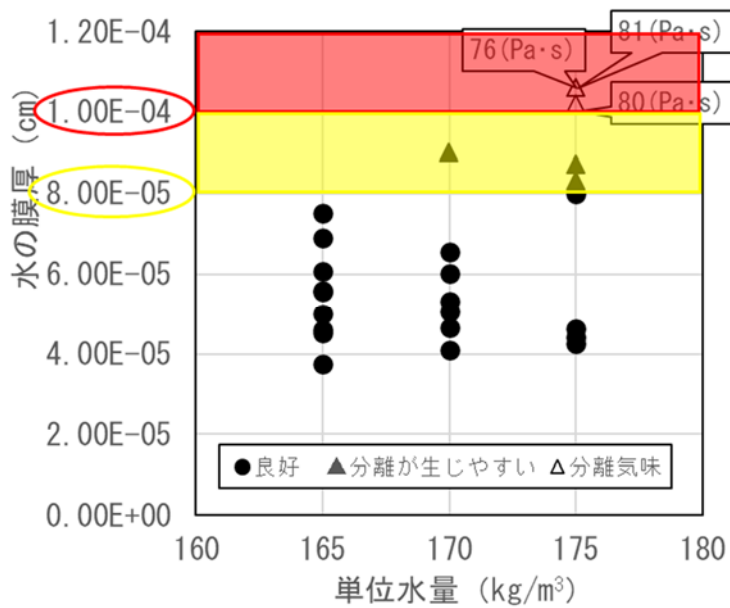


図 5-6 単位水量と水の膜厚との関係(高流動)

今回の実験の範囲では、中流動コンクリートの場合、塑性粘度が $80\text{Pa}\cdot\text{s}$ より低く、水の膜厚が $5.00\times 10^{-4}\text{cm}$ を超えるコンクリートは、圧送試験装置による圧送は可能であるが材料分離気味のコンクリートであり、塑性粘度が $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ より低く水の膜厚が $4.00\times 10^{-4}\text{cm}$ を超えるコンクリートは、材料分離が生じやすい領域であったと考えられる。また、高流動コンクリートの場合(図 5-5 および図 5-6 参照)、塑性粘度が $85\text{Pa}\cdot\text{s}$ より低く水の膜厚が $1.00\times 10^{-4}\text{cm}$ を超えるコンクリートは、材料分離気味のコンクリートであり、塑性粘度が $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ より低く水の膜厚が $0.80\times 10^{-5}\text{cm}$ を超えるコンクリートは、材料分離が生じやすい領域であったと考えられる。

上記のように性状の異なる中流動または高流動コンクリートについては、配合設計や圧送に先立って「2層流れ」を仮定した流量モデルを活用し、圧送管内の管壁面の水の膜厚と粘性との関係を把握することで圧送による分離の可能性の領域を予測することが可能である。すなわち、同一材料・同一配合のコンクリートを連続的に出荷している場合、工程管理として水の膜厚を把握することで、製造段階でコンクリートの品質と圧送の可否を予測することができ、現場における閉塞のトラブルや戻りコンの発生を抑制することに寄与し、施工の合理化の一助となる。さらに、加圧による瞬間的な脱水

量 Q_w とすべり速度から計算されるすべりによる流量 Q_s と回転粘度計による塑性粘度と降伏値とを流量式に代入すれば、流量 Q_A の概略値を把握することができ任意の圧送量を得るための圧送負荷(圧力勾配)の予測が可能となる。また、表 5-2 に示すビンガム流量と圧力勾配($\Delta P/L$)とで整理した式(4-8)を用いて、これを三元連立に解けば塑性粘度と降伏値が式(4-9)および式(4-10)により求められる。(前述第4章 4.4.2 式参照)

5.4 まとめ

第5章で得られた成果を要約すれば、以下の通りである。

- (1) コンクリートの管内流動解析にコンクリートと薄い水の層との2層流れを仮定した場合、圧送圧力によるコンクリートからの脱水量の推移は、単位水量が同じであってもコンクリートの種類(粘性)によって異なる。
- (2) 管壁面に滲み出る自由水の総量は、同一コンクリートであれば加圧力を変化させた場合でもほぼ同等な脱水量に収束し、粘性などコンシステンシーの相違によって異なる。
- (3) 水の膜厚はいずれの単位水量においても粘性が高くなると小さくなり、粘性が低くなると大きくなる傾向であった。
- (4) 目視確認において分離気味のコンクリートの水の膜厚は良好と判断したコンクリートよりも大きい(脱水量が多い)傾向であった。
- (5) 本実験の範囲では、中流動コンクリートの場合、塑性粘度が $80\text{Pa}\cdot\text{s}$ より低く、水の膜厚が $5.00\times 10^{-4}\text{cm}$ を超えるコンクリートは、材料分離気味であり、塑性粘度が $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ より低く水の膜厚が $4.00\times 10^{-4}\text{cm}$ を超えるコンクリートは、材料分離が生じやすい領域と判断できた。また、高流動コンクリートの場合、塑性粘度が $85\text{Pa}\cdot\text{s}$ より低く水の膜厚が $1.00\times 10^{-4}\text{cm}$ を超えるコンクリートは、材料分離気味であり、塑性粘度が $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ より低く水の膜厚が $0.80\times 10^{-5}\text{cm}$ を超えるコンクリートは、材料分離が生じやすい領域であった。
- (6) 薄い水の層を仮定した2層流れの管内流動モデルを活用し、水の膜厚と粘性との関係を把握することで圧送による分離の可能性の領域を予測することが可能であることを示した。

参考文献[第5章]

- 5-1) 山之内康一郎, 山口晋, 伊藤義也;管型粘度計によるレオロジー定数の測定, 公益社団法人 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1159~1163
- 5-2) 山之内康一郎, 山口晋, 伊藤義也, 伊藤康司;O 漏斗試験装置を活用したレオロジー定数の推定方法に関する一検討, 一般社団法人セメント協会, セメント・コンクリート論文集, 72 卷 1 号, pp.136~143
- 5-3) 山之内康一郎, 山口晋, 鶴澤正美, 伊藤義也;管型粘度計によるフレッシュコンクリートの圧送性に関する一考察, 公益社団法人 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.911~916

第 6 章

結 論

6.1 本研究の成果

本論文は、コンクリート工事の合理化を目的に流動性や圧送性を簡易に予測することで、大がかりな試験圧送をすることなく、ポンプ能力の選定や配管計画を立案することが可能となる圧送性評価について実験的に検討を行ったものである。各章で得られた成果を以下にまとめる。

第1章「緒論」では、研究の背景について、コンクリート工事の合理化を実現するためには、流動性・圧送性を簡易に予測することが必要であり、ポンプ施工の合理化の為には、圧送性を評価するシステムの構築が必要となっている。また、ポンプによる圧送性を総括的に評価する為には、コンクリートの管内流動をモデル化し、レオロジー定数(物性値)を定量的に把握することが必要であることを詳細に述べ本研究の意義を明確に示した。さらに、本論文の構成を示した。

第2章「既往の研究」では、管内流動に関する概要および圧送性をはじめとするコンクリートの諸性状を定性的に把握する方法として広く用いられている回転粘度計によるレオロジー定数(塑性粘度及び降伏値)を把握する方法の解説とコンシステンシー試験の測定結果とレオロジー定数との関係性を整理し、中・高流動コンクリートがビンガム体に近似する挙動を示していることを実験的に確認した。

第3章「中・高流動コンクリートのレオロジー測定」では、コンクリートの管内流動の基礎理論を述べるとともに、新しいコンシステンシー試験方法として管型粘度計(圧送試験装置)を試作し、任意の圧送圧力に対応する流量 3 組およびスランプフローと付着力との実験式から求めた付着力を流量式に代入して三元連立で解くことにより、未知数である塑性粘度、降伏値および粘性摩擦係数を求めることができ、これを利用することにより、任意の配管における流量の予測を行うことが出来ることを示した。

また、管長を 1.0m 以上とし管型粘度計を用いて推定した塑性粘度および降伏値は、回転粘度計による測定値と比較的良く近似しており、費用も安価ではあり、画像解析

のような熟練は特に必要なく、試験に要する時間は回転粘度計に比べ著しく短縮できることを示した。

しかし、一般に中・高流動コンクリートのコンシステンシー試験方法として用いられている試験値と回転粘度計によるレオロジー定数との関係は高い相関関係(相関係数0.9以上)を示し、圧送性評価に活用できる可能はあるものの、スランプフローと降伏値との関係を示す実験式において、中流動コンクリートと高流動コンクリートとでは、その傾きも異なっており、同じフロー値であっても、塑性粘度や降伏値は相違しているため、これらの実験式を一様に活用して、レオロジー定数を推定することはできず、コンクリートの圧送性評価に活用する場合などでは使用材料の物性及び配合が常に一定であることが必要となり、工事現場において納入されるコンクリートに迅速に対応することは困難であり必ずしも有用な方法であるとはいえず課題と見出された。

第4章「中・高流動コンクリートの新たな管内流動式」では、従来の研究成果においてコンクリートがビンガム体に近似した挙動を示すことから、管内における流量は、Buckingham 式をベースに管壁での滑りを考慮した式を用いてること、管壁における滑り現象は、コンクリートが管壁で液体摩擦状態にあると仮定しているため、コンクリートの流量を予測するには、塑性粘度、降伏値、粘性摩擦係数及び付着力を物性値として、事前に把握することが必要であることを解説した。次に、コンクリートの管内流動の解析モデルとして、「管壁での液体摩擦状態」に代わって、コンクリートと管壁との界面に薄い水の層が存在し、このコンクリートの壁面における滑りは、水膜部分が圧送圧力によって Newton 流れを生じて、水膜とコンクリートとが接する部分の流速は、コンクリートの滑り速度と等価と考え、管内には薄い水の層とその内側にコンクリートの層との流れが生じていると仮定した。この新たな管内流動解析手法を提案するとともに、この仮定に基づき、水の層の厚さ(水膜)の推定を JSCE-F502 に用いる加圧ブリーディング装置を用いて実験的に検証し、管型粘度計による圧力勾配を3水準に変化させた実測流量から水膜部分の流速に伴うコンクリートの移動量(滑り量)及び水膜自体の流量を減じてビンガム流量を求める方法を実験的に検討した。また、このようにして求め

た Buckingham 式を三元連立に解いて塑性粘度と降伏値とを求め、コンクリートの配管計画の基礎となるコンクリートの物性値を求める方法を提案し、回転粘度計による試験結果と比較することで、管型粘度計の試験値の信頼性を照査した。

また、管型粘度計に替わる改良 O 漏斗を用いて試料の量を変化(水頭差)させて流量測定を行い、加圧脱水量に基づく管壁の水膜の厚さを併用する方法により、補正係数を乗じてレオロジー定数の概略値が簡易に推定できることを示した。

第5章「圧送可能領域の予測」では、近年のコンクリート工事においては、多様な施工条件に対応するために自己充填性と分離抵抗性を付与した中・高流動コンクリートの必要性が高まっていること、この種のコンクリートは圧送実績も少なく、圧送量の確保だけでなく材料分離や圧送管内での閉塞の可能性など経験的知見が活用できないことから特殊な経路に圧送する場合のポンプ能力や配管径の選定にあたっては、工事計画に基づき所定の性能や打設量を確保するために事前に実際の配管状態を再現し試験圧送を行うなど多大な労力や費用を費やしていることを述べた。

これに対し、試験圧送をすることなくポンプ能力を選定でき、且つ圧送の可否を予測することができれば、試験労力や費用の削減とともにコンクリートの品質管理の目安となることから、第4章で述べた管内流動モデルの「管壁での液体摩擦状態」に代わり、コンクリートと管壁との界面に薄い水膜が存在すると仮定した「2 層流れ」の流動モデルを活用し、レオロジー定数を推定する方法について、中・高流動コンクリートの管壁面に生じる水膜の厚から、当該コンクリートの圧送の可否の予測について検証した。

その結果、今回実験に用いたコンクリートの性状の範囲については、配合設計や圧送に先立って「2 層流れ」を仮定した流量モデルを活用し、圧送管内の管壁面の水膜厚と粘性とのデータを蓄積することで圧送による分離の可能性の領域を予測し、品質管理の一助とすることが可能であることを示した。すなわち、現場におけるポンプ閉塞のトラブルを事前に回避することが可能で、打設遅延によるアジテータトラックの待機時間の短縮化、経過時間によるコンクリートの品質変化の防止、戻りコンクリートの削減などポンプ施工の省力化、合理化に寄与することを示した。

6.2 検証例

① 圧送可能領域の予測例

写真 6-1 に試験圧送の配管経路の一例を示す。また、下記の表 6-1 の試験結果におけるフレッシュコンクリートについて「2 層流れ」のモデルにより圧力勾配と流量、脱水量から管壁面の水の膜厚を推定し、圧送の可否を予測した手順および結果を示す。



写真 6-1 試験圧送の配管経路の一例

1) コンクリートの試験練り結果

表 6-1 フレッシュコンクリートの試験結果

単位 水量 (kg/m ³)	単位 セメント (kg/m ³)	塑性粘度 η_{pl} (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)	スランプフロー			O 漏斗 流下時間 (s)
				平均径 (cm)	50cm 到達 時間 (s)	流動停止 時間 (s)	
170	327	51	36	67.0	3.73	14.15	3.16

2) 改良 O 漏斗でコンクリートの流量を測定

(圧力勾配 169, 220, 263Pa/s および実測流量 4405, 5342, 6335cm³/s)

3) 加圧脱水測定によりコンクリート圧送管内の脱水量を測定 0.4689ml

4) 推定した水の膜厚・流量・圧力勾配を流量式に代入

(塑性粘度 51(Pa·s), 降伏値:36(Pa))

$$Q_A = Q_B + Q_S + Q_W$$
$$= \frac{\pi(R-y)^4 \Delta P}{8\eta_{pl} L} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R-y} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R-y} \right)^4 \right\} + \pi(R-y)^2 V_R + Q_W \dots \text{式}$$

5) 脱水量から管壁の水の膜厚を推定。

$$y = 6.59 \times 10^{-4} (\text{cm})$$

※水の膜厚が $5.00 \times 10^{-4} \text{cm}$ を超える領域

6) 今回の実験の検証範囲(増粘剤含有高性能 AE 減水剤を使用した中流動コンクリート)では、圧送性としては「材料分離気味」の水の膜厚となるので、配合修正や圧送方法の変更が必要となる目安と判断できる。

②ポンプ能力の選定手順の例

図 6-1 に配管経路の一例を示す。また、下記の工事条件におけるポンプ能力の選定手順を示す。

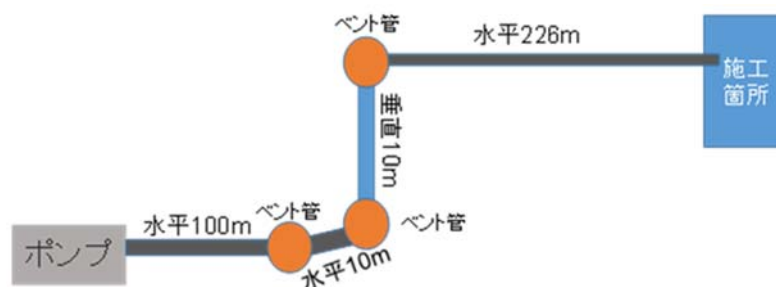


図 6-1 配管経路の一例

- 1) 工事条件より 1 時間当たり 21m^3 のコンクリートが必要。
- 2) 内径 100mm の圧送管を用いる。

3)配管経路を決定し、水平換算距離を計算する。

【水平管(100m)+ベント管(6m)+水平管(10m)+ベント管(6m)

+垂直管(3×10m)+ベント管(6m)+水平管(226m)=384m(水平換算距離)】

4) 改良O漏斗でコンクリートの流量を測定

(圧力勾配 172, 260, 301Pa/s および実測流量 4608, 6731, 9482cm³/s)

5) 加圧脱水測定によりコンクリート圧送管内の水の膜厚を推定。

($y=1.33\times 10^{-4}$)

6)推定した水の膜厚・流量・圧力勾配を流量式に代入

(塑性粘度:148(Pa・s), 降伏値:62(Pa))

$$Q_A = Q_B + Q_s + Q_w$$
$$= \frac{\pi(R-y)^4}{8\eta_{pl}} \frac{\Delta P}{L} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R-y} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R-y} \right)^4 \right\} + \pi(R-y)^2 V_R + Q_w \dots \text{式}$$

7)工事条件から定まる流量およびレオロジー定数を流量式に代入し圧力勾配を

Newton 法により計算する。

$$\Delta P/L = 169 \text{ (Pa/cm)}$$

8)推定した圧力勾配に水平換算距離を乗じ、ポンプの吐出圧力を計算する。

$$169 \text{ (Pa/cm)} \times 384 \text{ (m)} = 6.489 \text{ (MPa)} \text{ 【} \doteq 66.2 \text{ (kgf/cm}^2 \text{)} \text{】}$$

9)計算したポンプの吐出圧力に安全係数 1.25 を乗じこれを超える最小のポンプを選定する。

$$6.49 \text{ (MPa)} \times 1.25 \text{ (安全係数)} = 8.11 \text{ (MPa)}$$

この圧送圧力を超えるポンプは K 社の最大吐出力=80(MPa)を選定する。

6.3 社会への貢献

本研究の成果である管型粘度計(圧送試験装置)や改良 O 漏斗法と加圧脱水試験を用い、実測流量と圧力とを簡易に把握するが可能となるとともに、2層流れの流量モデルとを併用することで簡易にレオロジー定数を把握することが可能となる。

流量やレオロジー定数を把握することで、大掛かりな試験圧送は不要となり、ポンプ能力の選定に必要な情報が収集可能となる。

したがって、試験圧送の費用や労力の省力化(発注者, 施工者)は元より、生産者である生コン工場側から流動性や圧送性の情報を提供することが可能となれば出荷されるコンクリートへ付加価値が付与できると考えられる。

例えば、試験圧送(設備)では、模擬的な打設現場を想定するとポンプ車やアジテータ車の手配、労力として、ポンプ操作1人工, アジテータ車1人工, 筒先2人工, 線持ち1人工, バイブレータ2人工, 締固め2人工の確保, 試験用コンクリートの残コンの発生と処理(コンクリートの種類ごと)の負荷に対し、本提案では、試験圧送(設備)は、管型粘度計(圧送試験装置)・O 漏斗・加圧ブリーディング, 労力や発生する残コンは試験室レベルであり、費用や労力の省力化だけでなく環境負荷低減にも寄与する。

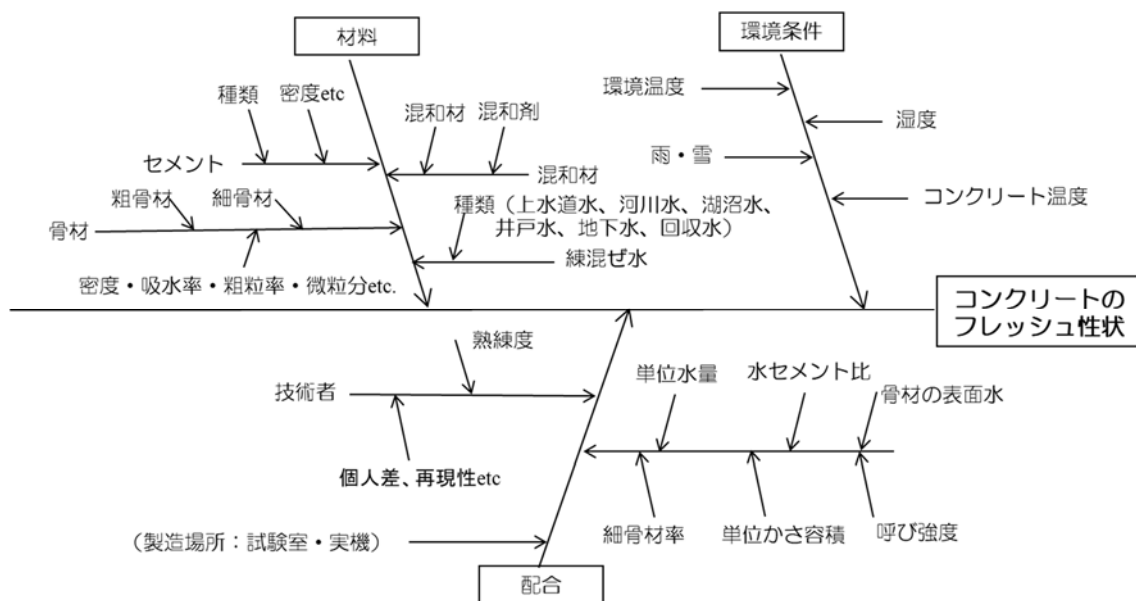


図 6-2 コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす各種要因図

なお、本実験では使用材料や配合が限定的であり、限られた範囲での指標ではあるものの、図 6-2 のコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす各種要因に示すように、パラメータとして「単位水量・セメントの種類・細骨材および粗骨材の岩種、粒度などの物性・混和剤の種類と添加量・コンクリート温度」などが影響することから、今後の課題として、引き続き種々の中・高流動コンクリートのフレッシュ性状におけるデータ収集と蓄積により、モデル式の信頼性を向上させるとともに最適化を図る計画である。

また、材料分離などによる圧送不可の可能性のある領域が判明した場合の対策としては、増粘剤の添加や高性能 AE 減水剤の添加、流動化剤の添加のほか、骨材種の見直しなど、配合修正の目安となるとともに、図 6-2 に示すような要因を修正することにより圧送可能となる改善策のデータを蓄積し、製造段階での対策の一助とする。

中・高流動コンクリートの出荷実績(普及率)は 0.1%程度となっていたが、近年の混和剤の性能によりセメント量を普通コンクリートと同程度とすることが可能となり、型枠に作用する側圧の問題(型枠の補強)など、費用面、工程面での問題があるものの、耐震性を高めるために過密配筋化が進むなかで中流動コンクリートのニーズも高まりつつある。また、JIS A 5308:2019 レディーミクストコンクリートでは、一般強度領域のスランプフロー区分が追加されるなど普及に向けた取り組みもなされていることから、中・高流動コンクリートのフレッシュ性状の把握、施工の合理化に関する技術的な情報は不可欠となる。中・高流動コンクリートの製造に関する情報については、各県工組・協組連の組合員工場や試験場の協力を得て実績を収集し、これらの情報は、IT 化・IoT 化することで製造段階での圧送可否を自動判定できるシステムの構築も将来の展望として考慮することで、施工の合理化・省力化による生産性向上のさらなる普及にも寄与する。

謝 辞

本論文をとりまとめるにあたり、主査を務めて頂きました日本大学生産工学部環境安全工学科 教授 鶴澤 正美 博士には、終始懇切なるご指導を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

本論文の副査を務めて頂きました日本大学生産工学部土木工学科 教授 澤野 利章 博士ならびに秋葉 正一 博士には、博士課程での研究の進め方や論文執筆に関わる詳細なご指導を賜りました。心から厚く御礼申し上げます。同じく副査を務めて頂きました日本大学理工学部土木工学科 教授 梅村 靖弘 博士におかれましては、コンクリート工学分野における詳細なご助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

本論文は、2013年から約7年間にわたり実施した研究成果をとりまとめたものです。本研究を遂行するうえで、日本大学生産工学部土木工学科 教授 伊藤 義也 博士ならびに専任講師 山口 晋 博士には、格別なるご支援と多大なるご尽力を賜りました。心から厚く御礼申し上げます。また、日本大学生産工学部土木工学科 非常勤講師 鈴木 一雄 博士(元:全国生コンクリート工業組合連合会 常務理事)には、研究を遂行するにあたり、示唆に富んだ助言を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。さらに、コンクリート研究室の大学院生・卒業研究生の皆様方には、実験遂行にあたり困難を共にしました。ここに厚く御礼申し上げます。

なお、学生時代に卒業研究のご指導を賜り、研究者としての心構えや姿勢の大切さを教えて頂きました故 越川 茂雄 先生(元:日本大学生産工学部土木工学科 教授)におかれましては、ここに深甚なる謝意を表します。

最後に、社会人博士課程において本研究を取り纏めるための機会を賜りました全国生コンクリート工業組合連合会 吉野 友康 会長、原田 修輔 常務理事ならびに業務上の配慮を頂いた中央技術研究所 伊藤 康司 所長をはじめ職場の皆様に対し、感謝の意を表します。

このように、本論文は多くの方々のご指導、ご支援の結果の賜物であり、改めて感謝の意を表します。

令和3年2月吉日

