# 論文 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

山之内 康一郎\*1・山口 晋\*2・鵜澤 正美\*3・伊藤 義也\*4

要旨:本研究では、コンクリートの管内流動において、従来の「管壁での液体摩擦状態」に代わって、圧送管 内にはコンクリートと管壁との界面に薄い水膜が存在し、2 層流れが生じていると仮定した既往の研究成果 の解析手法を種々のコンクリートを用いて確認するとともに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 Bingham 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。そ の結果、コンクリートの種類に関わらず 2 層流れの流動解析手法および管型粘度計を用いたレオロジー定数 の推定方法の適用性が示された。

キーワード:管型粘度計,2層流れ,加圧脱水量,レオロジー定数,施工の合理化

#### 1. はじめに

近年のコンクリート構造物の工事にあたっては、高層 化・高強度化・高耐久化に伴う過密な配筋や複雑な配管 経路へ圧送するなど、フレッシュコンクリートに対する 要求性能も多様化している。これら過密配筋や配管条件 に対応する場合, 普通コンクリートでは施工が困難とな るため、流動性の高い高流動コンクリートの使用が増加 する傾向となっている。高流動コンクリートは、ベント 管が多用されているような複雑な形状の配管状態におい てもポンプによる圧送が可能であり、また、過密な配筋 箇所においては振動・締固めを行うことなく,型枠の隅々 までコンクリートを充填することができる自己充填性を 有していることから,施工の省力化も期待できる。しか し、粉体量の多い高流動コンクリートや増粘剤を併用し た高流動コンクリート、近年開発された増粘剤含有高性 能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリート(以降,中流 動コンクリート)などは、圧送実績も少なく、配合やコ ンシステンシー試験結果を基にした経験則の活用が困難 であり,事前の試験圧送により,配管径やポンプ能力を 選定している。そのため、コストや労力など大きな負担 がかかっているのが実情である。そこで、コンクリート 圧送時の管内の流動性状が予め把握できれば、工事計画 で必要となる圧送量を確保するためのポンプ能力が選定 でき,施工の合理化が実現する。

従来の研究成果<sup>1),2),3)</sup>では、コンクリートが Bingham 体 に近似した挙動を示すことから、管内流動のモデルは、 Buckingham の流量式をベースに管壁でのすべりを考慮 し、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。この仮定によって、コンクリートの流量を予測 するには、塑性粘度、降伏値、粘性摩擦係数および付着 力を物性値として、事前に把握することが必要である。

\*1 全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 \*2 日本大学 生産工学部土木工学科専任講師 博士(工学) \*3 日本大学 生産工学部環境安全工学科教授 博士(工学) \*4 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学)

本研究は、合理的な管内流動の解析モデルとして、従 来の「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膜が存在すると仮定し、コン クリートの壁面におけるすべりを水膜部分が圧送圧力に よって Newton 流れを生じ、水膜のコンクリートと接す る部分の流速が、コンクリートのすべり速度と考え、管 内では「2 層流れ」が生じていると仮定した既往の研究 成果 4)の解析手法を基に、コンクリートの圧送性の評価 に必要なレオロジー定数の推定の可能性を圧送試験装置

(以降,管型粘度計と称す)を用いて種々のコンクリートについて実験的に検討し,管型粘度計による簡易な圧送性評価方法の適用性を確認した。

「2 層流れ」の仮定に基づいた水膜の厚さの推定には, JSCE-F502 (加圧ブリーディング試験方法(案))に示さ れた加圧ブリーディング装置を用いた。また,流動解析 に必要な圧力勾配および実測流量の測定には,圧送を模 擬した管型粘度計を用いて圧力勾配を3水準に変化させ, 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(すべり量)と水膜自体の流量とを減じて Bingham 流 量を求め, Buckingham 式を三元連立に解いて塑性粘度 と降伏値とを求めた。

## 2. コンクリートの管内流動

## (1) Bingham 体の管内流量式

コンクリートの管内流動<sup>2)</sup>における Bingham 体の流速 分布とせん断力分布は,図-1のa)に示す通りであり, 試料と管壁の付着力がせん断力より大きい場合,その流 量 QB は式(1)で与えられる。

$$Q_{\rm B} = \frac{\pi R^4}{8\eta_{\rm Pl}} \frac{\Delta P}{L} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{r_{\rm f}}{R} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{r_{\rm f}}{R} \right)^4 \right\}$$
(1)

ここに, Q<sub>B</sub>: Bingham 流量(cm<sup>3</sup>/s), R: 管の半径(cm),

(正会員)	
(正会員)	
(正会員)	
(正会員)	

L:管の長さ(cm),  $\eta_{Pl}$ :塑性粘度(Pa・s),  $r_f$ : 栓流半径 (cm)(=2L  $\tau_f \Delta P$ ),  $\tau_f$ : 降伏値(Pa)

## (2) 管壁にすべりを伴う Bingham 流れ

図-1のb)は、管壁にすべりを伴う Bingham 流れであ り、試料と管壁との間に働くせん断力が付着力を超え、 管壁面ですべりを生じる分布を示したものである。この 場合の管壁面における試料のすべり速度は、実測流量と Bingham 流量の差から式(2)によって求められる。

$$V_{\rm R} = \frac{Q_{\rm A} \cdot Q_{\rm B}}{\pi R^2} \tag{2}$$

ここに、VR: すべり速度(cm/s)、QA: 実測流量(cm<sup>3</sup>/s) 次に、コンクリートが管壁面ですべる場合、摩擦が生 じ、この摩擦抵抗は、すべり速度に比例して増加する。 すなわち、管壁と試料との界面が液体摩擦状態にあると 仮定 2)すれば、ラビング応力 f<sub>R</sub>は式(3)で表わされる。

$$f_{\rm R} = \alpha V_{\rm R} + A \tag{3}$$

ここに、 $\alpha$ :粘性摩擦係数(Pa・s/cm),A:付着力(Pa) 管壁面に働くせん断力  $\tau_R$ は式(4)で与えられ、ラビング 応力  $f_R$ と等しいとすれば、すべり速度は式(5)となる。

$$\tau_{\rm R} = \frac{R}{2} \frac{\Delta P}{L}$$
 (4),  $V_{\rm R} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{R}{2} \frac{\Delta P}{L} - A \right)$  (5)

ここに, τ<sub>R</sub>:管壁内に働くせん断力 (Pa)

既往の研究成果 4によれば,中・高流動コンクリートの圧送管内の流動は,すべりを伴う塑性流れとなるから, その流量は式(6)で表わされる。

$$Q_{A} = Q_{B} + Q_{S} = Q_{B} + \pi R^{2} V_{R} = \frac{\pi R^{4}}{8\eta_{Pl}} \frac{\Delta P}{L} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{r_{f}}{R} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{r_{f}}{R} \right)^{4} \right\} + \pi R^{2} V_{R}$$
(6)

## (3)2層流れの流量式

圧送管内におけるコンクリートは、圧送時に圧力を受けるとコンクリート中の自由水が管壁面との界面に滲み 出て、薄い水の膜を形成すると仮定 4し、これが潤滑層 となって、すべりを伴う塑性流れとなる。この場合、コ ンクリートの管内流量は式(7)で与えられる。

$$Q_{A} = Q_{B} + Q_{S} + Q_{W}$$
(7)

ここに、Q<sub>A</sub>:実測流量(吐出量)、Q<sub>B</sub>: Bingham 流量、Q<sub>S</sub>: すべりによる流量、Q<sub>W</sub>:水膜部分の流量

また, コンクリートと管壁との界面の水膜の流速分布 Vr は Hagen-Poiseuille の式を基に式(8)で表され, 流速分 布図は, 図-2 で示される。

$$V_{\rm r} = \frac{\Delta P \left(R^2 - r^2\right)}{4L\eta} \tag{8}$$

ここに、Vr: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),

△P/L: 圧力勾配(Pa/cm), η: 水の粘性係数(Pa·s)
式(8)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(9)となる。



図-2 2層流れの管内流動の流速分布

$$V_{\rm r} = \frac{\Delta P \{R^2 - (R-y)^2\}}{4L\eta} \tag{9}$$

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 考えれば、コンクリートの R-y における流速も式(9)に おける水膜の流量と等価であると考えられる。

従って、コンクリートのすべりによる流量 Qs は、式(10)で表される。

$$Q_{\rm S} = \pi (R - y)^2 V_{\rm r} \tag{10}$$

また,水膜部分の圧力勾配における流量は,式(9)を R -y から R まで積分した式(11)で表される。

$$Q_{W} = \pi \Delta P \left\{ \frac{R^{4}}{4} - \frac{(R-y)^{2} \cdot R^{2}}{2} + \frac{(R-y)^{4}}{4} \right\} / 2L\eta$$
(11)

なお、中・高流動コンクリートは Bingham 体に近似す ることから、その流量式は、式(1)の Buckingham 式によって、式(12)が与えられる。

$$Q_{\rm B} = \frac{\pi \Delta P (R-y)^4}{8 L \eta_{\rm pl}} + \frac{2\pi \tau_{\rm f}{}^4 L^3}{3 \eta_{\rm pl} \Delta P^3} - \frac{\pi (R-y)^3 \tau_{\rm f}}{3 \eta_{\rm pl}}$$
(12)

従って,圧送管内を流れるコンクリートの実測流量  $Q_A$ は,  $\Delta P/L=i$  と置けば式(13)となる。

$$Q_{A} = Q_{B} + Q_{S} + Q_{W} = \frac{\pi R^{3} \tau_{f}}{3 \eta_{pl} \pi} + \left\{ \frac{-\pi (R-y)^{2} R^{2}}{4 \eta} + \frac{\pi (2Ry-y)^{2} (R-y)^{2}}{4 \eta} \right\} i + \frac{2\pi \tau_{f}^{4}}{3 \eta_{pl} i^{3}}$$
(13)

#### 3. 水の膜厚の推定およびレオロジー定数の測定

圧送管内の水の膜厚については、コンクリートに圧力 が作用したとき、管壁とコンクリートとの界面にコンク リートの自由水の一部が滲み出ると仮定し、その水膜の 厚さをレオロジー定数の異なる種々のコンクリートにつ いて実験的に検討し、「2層流れ」による簡易な圧送性評 価方法の適用性を検証した。

既往の研究 <sup>4</sup>では、増粘剤が含有された高性能 AE 減 水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 程度の中流動コンクリートを用いて、水 の膜厚を仮定した「2 層流れ」の管内流動解析手法によ るレオロジー定数の測定方法の可能性を示した。本実験 では、中流動コンクリートと流動性の異なる粉体系高流 動コンクリートおよび併用系高流動コンクリートを用い て、水の膜厚およびレオロジー定数を推定した。

#### (1) 使用材料及び配合

実験に用いたセメントは,密度 3.16g/cm<sup>3</sup>,粉末度 3,200cm<sup>2</sup>/gの普通ポルトランドセメント,細骨材は,密 度 2.63g/cm<sup>3</sup>,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<sup>3</sup>,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 cm<sup>2</sup>/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-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<sup>3</sup>の3水準に変化させたものとした。 なお,粉体系の配合は,セメント量を400~500kg/m<sup>3</sup>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±1.5%とした。

## (2)練り混ぜおよびコンシステンシー試験

高流動コンクリートの練り混ぜは,容量 100L の強制 二軸ミキサを用いて,1バッチの量を85Lとして行った。

練り混ぜは、粗骨材、細骨材、セメント、混和材をミ キサ内に投入し、空練りを30秒行った後、混和剤を含む 練混ぜ水を投入して、2分間練混ぜ、高性能 AE 減水剤 や増粘剤の使用によるバッチ間のバラツキを低減させる 目的でミキサ内に3分間静置してから再度ミキサを1分 間攪拌し、練り舟に排出することとした。練上がったコ ンクリートは、切り返しを行い、フレッシュコンクリー トの基礎物性となるスランプフロー試験、空気量試験、 O漏斗流下試験および回転粘度計によるレオロジー定数 の測定を行った。次に、同一配合の高流動コンクリート を練り混ぜ、管型粘度計による流量測定および加圧脱水 試験を行った。

スランプフロー試験は,JIS A 1150 に従って試料を一 層に詰め、コーンを引上げた後、コンクリートの流動停 止を確認し、広がり直径を測定した。また、O 漏斗の流 下試験は、土木学会規準 JSCE-F 512 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した。な お、試験は1バッチのコンクリートについて2回行った。 回転粘度計によるレオロジー定数の測定は、共軸二重円 筒型回転粘度計(内円筒半径 150mm、高さ 200mm、外円 筒半径 250mm)を用いて、内円筒の回転数を 5rpm から、 5rpm 毎に 50rpm まで上昇させて、それぞれの回転数に おいてトルクを測定する多点法<sup>3</sup>によって行った。

管型粘度計は,写真-1に示す容量 80L の試料容器, 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。流量の測定は, 練り 上がったコンクリートを試料容器に約 65L を投入し, 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, 排出ロシ ャッターを開けて, 試料受け容器にコンクリートを流出 させ, 排出管出口におけるコンクリート流が安定してい ることを確認する。次に, 圧力勾配を約 150Pa/cm および 250Pa/cm に調整し, 同様の操作を繰り返してコンクリー

配合	コンクリート	スランフ゜	空気量	水結合	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
No.	の種類	フロー		材比		W	С	BFS	S	G	Ad	増粘剤
		(cm)	(%)	(%)	(%)						(C×%)	(C×%)
1		50±5			52.9	165	471		887	814		
2	粉体系	60±5			50.9	170	486	—	828	828	1.00	—
3		70±5	4.5	25	48.6	175	500		797	854		
4		50±5	$\pm 1.5$	33	49.6	165	330	141	840	862		
5	併用系	60±5			51.7	170	340	146	861	814	0.80	0.003
6		70±5			53.9	175	350	150	884	766		

表-1 コンクリートの配合

トの吐出量を測定した。流量は、単位時間当たりの流出 量が一定となっている時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。

### (3) 水の膜厚の推定方法

圧送管内の水の膜厚は、加圧によるコンクリートから の脱水量により推定した。脱水量は、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 用いて測定した。測定は、約1.840cm<sup>3</sup>のコンクリートを 練り舟から採取し、加圧ブリーディング試料容器に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。試料の表面に空気が残らないようにプ ランジャを挿入後,試験装置全体を耐圧機の上下載荷版 の間に設置し、加圧力が 1.5MPa となるよう載荷して、 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 されたコックから流出する脱水量を測定する。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-2 に示すように、計量容器とはかりを用いて、10、20、 30, 40, 50 秒および 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10分における質量測定により行った。また、加圧初 期の脱水が安定して流出するようにコックは加圧前から 開放しておくこととした。次に、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 3.5 MPa についても行い、それぞれの応力毎、配合 毎に、時間脱水曲線を求めた。



写真-1 管型粘度計

質量を脱水量として測定



脱水用コック 計量容器およびはかり 写真-2 脱水量の質量測定

図-3は、単位水量 170 kg/m<sup>3</sup>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-3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、併記した既 往の中流動コンクリート4)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。なお、脱水試験終了時にコンクリート試料 に作用する加圧を除荷しても、脱水された水は、脱水用 のパイプを逆流することは無かったため、コンクリート が配管入口で受ける最大圧力により, 圧送管内の壁面に 生じた脱水量, すなわち水の膜厚は, 配管出口まで一定 であるといえる。

### (4)水の膜厚およびレオロジー定数の推定結果

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,瞬間的(t≒0)である ことから図-3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≒0における 時点と仮定した。

なお,t≒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-3 脱水量の推移

図-4は、単位水量 170 kg/m<sup>3</sup>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-3参照)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-3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 QA, それぞれの圧 力勾配 (ΔP/L), 水膜部分の流量 Qw, すべり速度 Vr, 並びに実測流量 QAからすべりによる流量 Qsと水膜部分 の流量 Qw とを差し引いた Bingham 流量 QB を示した。 脱水量は、粉体系および併用系ともに図-3 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 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 0.0638~0.0789ml, 併用系で 0.0451~0.0668ml 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-3 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 5.6×10<sup>-5</sup>~11.1×10<sup>-5</sup>cm, 併用系で 5.7×10<sup>-5</sup>~9.4 ×10-5cm 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、既往の中流動コンクリートでは、水の膜 厚は11.6×10-5~16.4×10-5cm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。





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

表-3 管型粘度計による実測流量に基づく Bingham 流量の推定

注)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。

配合	スランフ゜	0 漏斗	回転料	占度計	管型粘度計				
No.	70-	流下時間	塑性粘度	降伏值	塑性粘度	比	降伏値	比	
	(cm)	(s)	$\eta_{pl}(Pa \boldsymbol{\cdot} s)$	$\tau_{\rm f}(Pa)$	$\eta_{pl}$ ' (Pa·s)	$\eta_{\rm Pl}$ / $\eta_{\rm Pl}$	$\tau_{f}'(Pa)$	$\tau_f'/\tau_f$	
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	

表-4 コンシステンシー試験結果と管型粘度計による塑性粘度および降伏値の推定結果

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 Qw とすべり速度 から計算されるすべりによる流量 Qs 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、簡易に流 量 QA 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-3 に示す Bingham 流量(式(12))と圧力勾配 (ΔP/L)で整理した式(14)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(15)および式(16)により求 められる。

$$Q_{\rm B} = Ai + \frac{B}{i^3} - C \tag{14}$$

ここに、  $\Delta P/L=i$  と置けば式(12)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
$$(\eta_{pl}) = \frac{\pi (R-y)^4}{8A}$$
 (15)

降伏値
$$(\tau_f) = \frac{3(R-y)C}{8A}$$
 (16)

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に示す通りである。また,表-4には、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。

### 4. 結論

本実験の範囲で得られた成果は、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「2 層流 れ」の流動解析は、流動性を付与した種々のコンクリ ートにおいて適用可能である。

- (2)コンクリートの種類に関わらず圧送管内のコンクリ ートに圧力が作用するとコンクリート中の自由水は, 管壁面に滲み出ており,その量は,単位水量,スラン プフロー値が同じであっても,コンクリートの粘性な どコンシステンシーによって異なる。
- (3)「2 層流れ」を仮定した加圧による脱水量 Qw とすべ り速度から計算されるすべりによる流量 Qs から簡易 に流量 Qaを推定することができる。
- (4)管型粘度計による実測流量から水膜の厚さの推定値 を用いて計算したすべりによる流量および水膜部分 の流量を差し引いて求めた Bingahm 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 粘度計による測定結果とほぼ同等な値が推定でき、管 型粘度計によるレオロジー定数測定の適用性が示さ れた。

## 参考文献

- 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
- 岡本寛昭ほか:コンクリート施工設計学序説 p205, 技法堂出版, 2004
- 村田,菊川: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提案,土木学会論文報告集,第284号,pp.117-125,1979.4
- 山之内康一郎ほか:管型粘度計によるレオロジー定数の測定、コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1159-1164 (2017)