論文 管型粘度計によるレオロジー定数の測定

山之内 康一郎 *1 · 山口 晋 *2 · 伊藤 義也 *3

要旨:本研究では、コンクリートのポンプ施工の合理化のため、コンクリートの管内流動の解析モデルとして、管内にはコンクリートと管壁との界面に潤滑層として機能する薄い水膜が存在する2層流れを仮定した。 水膜の厚さは、加圧ブリーディング装置を用い、ポンプ出口の圧力状態に対応する脱水量から推定し、滑り によるコンクリートの流量と水膜の部分の流量を管型粘度計による実測流量から差し引いて Bingham 流量を 求め、3組の Bingham 流量と圧力勾配を用いて塑性粘度と降伏値とを求める方法を提案した。その結果は、 回転粘度計による測定値に近似し、管型粘度計がレオロジー定数の測定に活用できる可能性が示された。 キーワード:管型粘度計、2層流れ、レオロジー定数、回転粘度計、ポンプ施工の合理化

1. はじめに

近年,コンクリート構造物の過密配筋や複雑な配管経 路にてコンクリートを圧送する要求も有り,コンクリー ト施工の合理化と高品質化の検討が必要となっている。

コンクリートの高品質化のためには,材料分離抵抗性 を付与するため高性能 AE 減水剤や増粘剤を使用した高 流動コンクリートが使用されるようになっている。この 種のコンクリートを特殊な経路にて圧送する場合,配管 径やポンプ能力の確認に試験圧送を行うことが必要とな るケースもある。この試験圧送の省力化のためには,配 管内のコンクリートの流動性状と物性値の把握が必要で ある。

従来の研究成果^{1),2)}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 用いていた。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。

本研究では、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膜が存在し、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、水膜部分が圧送圧力によって Newton 流れ を生じており、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,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

*1 全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 (正会員) *2 日本大学 生産工学部土木工学科助教 博士(工学) (正会員) *3 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

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 Bingham 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。

2. コンクリートの管内流動

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-1 を参照して水膜 の流速分布 Vr は Hagen-Poiseuille の式(1)で示される。

$$Vr = \frac{\Delta p(R^2 - r^2)}{4l\eta} \tag{1}$$

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(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(2)となる。



$$V_R = \frac{\Delta p \left\{ R^2 - (R - y)^2 \right\}}{4l\eta}$$
(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、コンクリートのすべり速度 VRは式(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 Qs は、

$$Q_{\rm S} = \pi (R - y)^2 V_R \tag{3}$$

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)によって与えられる。

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

なお,流動コンクリートはBingham体に近似するので, その流量は式(5)に示すようにBuckingham 式によって与 えられる。

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

ここに, Q_B : Bingham 流量 (cm³/s), τ_f : 降伏値 (Pa), η_{pl} : 塑性粘度 (Pa・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(6)となる。

$$Q_{A} = Q_{B} + Q_{S} + Q_{W} = \frac{\pi R^{3} \tau_{f}}{3\eta_{pl} \pi} + \left\{ \frac{-\pi (R-y)^{2} R^{2}}{4\eta} + \frac{\pi R^{4}}{8\eta} + \frac{\pi (2Ry-y)^{2} (R-y)^{2}}{4\eta} \right\} i + \frac{2\pi \tau_{f}^{4}}{3\eta_{pl} i^{3}}$$
(6)

3. 水膜の厚さの推定

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討 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(以降;流動コンクリートと称す)を用いた。

(1) 材料及び配合

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/cm³,粉末度 3,200cm²/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/cm³,吸水率 2.00%, FM.2.33)を 用いた。粗骨材は,青梅産砕石 2005(密度 2.67g/cm³, 吸水率 1.03%, FM.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た流動 コンクリートに対して、水セメント比を45%とし、単位 水量を160,165及び170kg/m³としJISA1150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**-1に示す通りである。なお、 空気量は練上り直後で4.5±1.5%とした。

(2) コンクリートからの脱水量の測定

表-1に示す配合のコンクリートは、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 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 分間練混ぜた。練上がったコンクリートは、練り舟に移 し、3分間静置して一往復半切り返したのち、スランプ フロー試験と後述する管型粘度計による流量測定及び加 圧脱水試験に供した。

コンクリートの加圧による脱水量の測定には土木学会 規準JSCE-F503に規定されている加圧ブリーディング試 験装置を用いた。試験は、練り舟から約1,840cm³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層当たり突き棒で20回突いて締め固めた。 試料上面にプランジャを空気が残らないように挿入し、 全体を圧縮強度試験機の上下載荷板の間に設置し、荷重 を 1.5MPa となるよう載荷して、この応力状態を維持し つつ、試料容器の底面近傍に設置された脱水用コックを 開いて、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 についても行って、それぞれの応力毎、配 合毎に、時間脱水曲線を求めた。

表-1 コンクリートの配合

配合	スランフ゜	空気量	水セメント	細骨	単位量(kg/m³)					
	フロー		比	材率	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	AE 助剤
No.	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	S	G	Ad	(100 倍希)
1	50±5			53.7	165	356	966	844	2.85	1.07
2	60±5	4.5±1.5	45	53.1	170	367	845	944	2.94	1.10
3	65±5			52.4	175	378	937	960	2.38	1.13

図-2は、一例として単位水量 160kg/m³の流動コンク 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-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。

なお、管内におけるコンクリートの脱水傾向は、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 た水は元に戻らないことを確認している。すなわち写真 -1 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、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、管壁面に脱水が 生じ薄い水膜が発生しても、その量は配管出口に至るま で変わらない(脱水した水膜の厚さに変化はない)もの 考えられる。

(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-2において t=0 の脱水量と考えられる。また、図-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-3は単位水量をW=160, 165及び170kg/m³ 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-3において, 脱水量は図-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。



脱水試験終了前後のメスシリンダ液面





図-3 加圧力と脱水量との関係

単位水量	応力	脱水量	膜厚	
(kg/m^3)	(MPa)	(ml)	(cm)	
	0.017	0.0944	0.000133	
160	0.022	0.0830	0.000117	
	0.026	0.0823	0.000116	
	0.022	0.1129	0.000159	
165	0.026	0.1091	0.000153	
	0.028	0.1111	0.000156	
	0.010	0.1130	0.000159	
170	0.020	0.1143	0.000161	
	0.025	0.1167	0.000164	

表-2 膜厚の推定結果

これら水の膜圧は,表-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 は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(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。

 $y = 4 \times 10^{-6} W - 5 \times 10^{-4}$ (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(2)を利用し て滑り速度,式(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。

4. 管型粘度計によるレオロジー定数の測定

(1) 実験方法

実験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3.(2)に示した同じ方法によった。

実験に用いた管型粘度計は,**写真-2**に示すように, 試料容器(容量 80L の鋼製密閉容器),S 社製のコンプレ ッサ(タンク容量 24L,最大圧力 0.9MPa),圧送管(管 内径 100mm,長さ 1000mm),K 社製のダイヤフラム式



圧力計(容量0.2MPa),試料受け容器(容量40L),A社 製の流量測定用の秤(秤量150kg,目量20g)で採取した 試料の質量を解析するためにT社製のデータレコーダを 介して質量を50g単位で表示できるようにした。なお, 質量の測定は0.1秒単位でデータレコーダに保存記録さ れるシステムとした。

流量の測定は、練混ぜ完了後3分間静置したコンクリ ートを写真-2に示す試料容器に約65L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、排出ロ 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。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。

(2)測定結果

レオロジー定数の算出に必要な Bingham 流量の推定 結果を表-3に示す。表-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($\Delta P/I$)、加圧脱水試験に

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 Qw(cm ³ /s)	滑り速度 Vr(cm/s)	Bingham 流量 Q _B (cm ³ /s)	
1		169.1	4608.3	0.000133	0.117110	56.1	204.6	
	160	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	

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。

より推定した膜厚 y, 式(4)による水膜部分の流量 Qw, 滑り速度 Vr,並びに実測流量 Q_Aから滑りによる流量 Qs, 水膜部分の流量 Qwを差し引いた Bingham 流量 Q_Bを併 記した。表-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。

また, **表**-3 に示す Bingham 流量(式(5))と圧力勾配 (Δp/l)で整理した式(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(9)及び式(10)より求められる。

$$Q_B = Ai + \frac{B}{i^3} - C \tag{8}$$

ここに、 $\Delta p/l=i$ と置けば式(5)より、

$$A = \frac{\pi (R - y)^4}{8\eta_{pl}}, \quad B = \frac{2\pi \tau_f^4}{3\eta_{pl}}, \quad C = \frac{\pi (R - y)^3 \tau_f}{3\eta_{pl}}$$

塑性粘度
$$(\eta_{pl}) = \frac{\pi (R-y)^4}{8A}$$
 (9)

降伏値
$$(\tau_f) = \frac{3(R-y)C}{8A}$$
 (10)

塑性粘度及び降伏値の計算結果は表-4 に示す通りで ある。表-4 には、内円筒の半径 20cm、高さ 20cm、外 円筒の半径 30cm、深さ 40cm の共軸内円筒回転型の粘度 計によって、内円筒の回転数を 5rpm から、5rpm 毎に 50rpm まで上昇されて、それぞれの回転数においてトル クを測定して、多点法 ³⁾によって測定した塑性粘度及び 降伏値を併記した。

表-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同様な値と なった。また,降伏値の測定結果も同様であるが,回転 粘度計による試験値よりやや小さくなっている。

なお、レオロジー定数を求めるにあたり、試験及びデ ータ解析に要する時間は回転粘度計の場合15分程度,各 回転数における粘度計内試料の流速分の画像解析に2時 間程度を要する。これに比べ管型粘度計の場合は、試験

回転粘	i度計	管型粘度計					
塑性粘度 降伏值		塑性粘度	Lk	降伏値	L۲		
$\eta_{\rm pl}$	$ au_{\mathrm{f}}$	η_{pl} '	Ľ n'/n	$\tau_{\rm f}$	μ ι τ _f ΄/τ _f		
(Pa·s)	(Pa)	(Pa·s)	יי וי	(Pa)			
141	97	141	1.00	96	0.99		
90	71	91	1.01	68	0.95		
86	64	86	1.00	64	1.00		

表-4 塑性粘度及び降伏値の計算結果

時間とデータ解析に要する時間は約 30 分と短時間に試 験値が得られる。さらに,試験装置の購入価格も管型粘 度計本体は回転粘度計の6分の1で,可搬性にも優れて いる。

5. 結論

本実験の範囲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=4×10⁻⁶W - 5×10⁻⁴ (ここに、y:膜厚(cm)、W:単位水量(kg/m³))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の膜厚(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)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 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、回転粘度計による試験結果と比較し、ほぼ近似した値となり、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。
- (4)管型粘度計によるレオロジー定数の測定では、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。

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
- 2) 土木学会:コンクリートのポンプ施工指針(案) pp.157-164,昭和60年11月
- 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