

グラウトの管内流動に関する研究

STUDY ON PIPE FLOW OF GROUT

村田二郎*・鈴木一雄**

By Jiro MURATA and Kazuo SUZUKI

This study has the objective of rationalization of pressure grouting and rheologically examines flow of grout in pipes. It is confirmed by pressure grouting experiments using pipelines up to 80-m lengths in straight lines and lines with horizontal and vertical bends that under ordinary piping conditions grout roughly conforms to Bingham flow. Based on the above, a method of predicting the quantity of flow during pumping of grout, or the pressure load of the pump is described, and data useful for setting up piping plans and selecting the type of pump to be used are furnished. Further, an inclined pipe testing method is proposed as a way of readily measuring viscosity of grout in the field, and the usefulness of the method is described.

1. 緒 言

プレパックドコンクリート用グラウトやPC用グラウトのポンプ圧送の計画、施工は、従来、工事経験または試験圧送に依存することが多く、これを解析的に検討した資料はほとんどない。

本研究はグラウト圧送の合理化、システム化を目的として、圧送管内のグラウトの流れをレオロジー的に研究し、その適用を検討したものである。すなわち、プレパックドコンクリート用グラウトを対象として、延長80mまでの水平直管路、ならびに水平および鉛直曲り管による圧送実験を行い、通常の配管条件のもとでプレパックドコンクリート用グラウトはほぼビンガム流れに従うことを明らかにするとともに、圧送量およびポンプの圧力負荷を予測する方法について述べ、グラウト圧送におけるパイプラインの配管計画、ポンプ機種の選定等に役立つ資料を提供した。また、グラウトの粘度を現場で簡易に測定する方法として、傾斜管試験法を提案し、その有用性を述べている。

2. グラウトのコンシステンシー試験方法

グラウトのコンシステンシー試験方法としてロート法、回転粘度計法および傾斜管試験法を用いた。ロート法はグラウトの物理定数を与えないので、流れの解析には用いないが、グラウトのコンシステンシーの尺度として広く用いられ、実用上便利であり、規準化もされているので測定を行った。

グラウトの物性値は二重円筒型回転粘度計によって測定したが、この方法は現場で行うことが實際上難しいので、簡易試験方法として傾斜管試験法を提案した。

(1) ロート法

土木学会規準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのコンシステンシー試験方法」に規定するPロートを用いた。ただし、一部に行ったPC用グラウトの実験には土木学会規準Ⅰ-Ⅲ「コンシステンシー試験方法(案)」に規定するJロートを用いた。

(2) 回転粘度計法

外円筒半径2.5cm、内円筒半径1.25cm、円筒部長さ7.0cmで円筒末端には底角11.6度の円錐を有する外円筒回転型の二重円筒型回転粘度計を用いた。

試料を内外円筒間に充てんした後、外円筒の回転数をしだいに上昇させ、30rpm以降10rpmごとにトルクを

* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科
(〒158 東京都世田谷区深沢 2-1-1)

** 正会員 工修 東京都立大学助手 (同上)

読み取り，速度勾配 V およびせん断応力 P を式 (1) から計算し， V を縦軸， P を横軸としてコンシステンシー曲線を描いた。コンシステンシー曲線の直線部の逆勾配として塑性粘度を求め，降伏値は直線部の延長と横軸との交点のせん断応力 τ_a を用い，式 (2) から算定した。

$$\left. \begin{aligned} V &= 2\dot{\Omega} / \{1 - (R_i/R_o)^2\} \\ P &= M / 2\pi R_i^2 h_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに， R_i ：内円筒半径 (cm)， R_o ：外円筒半径 (cm)， $\dot{\Omega}$ ：外円筒の角速度 (rad/s)， M ：トルク (gf·cm)， h_c ：内円筒の有効長さ (cm)

$$\tau_f = \frac{1 - (R_i/R_o)^2}{2 \ln(R_o/R_i)} \tau_a \dots\dots\dots (2)$$

ここに， τ_f ：降伏値 (gf/cm²)， τ_a ：コンシステンシー曲線の直線部と横軸との交点のせん断応力 (gf/cm²)

式 (1) における内円筒の有効長さ h_c は円筒部長さに簡単のため試料をニュートン体と仮定して計算した円錐部の円筒換算長さを加算して求めた。すなわち，円錐尖端が容器底面に接していることから，円錐面と容器底面間のトルクは

$$M = \int_0^{R_i} 2\pi r^2 dr \left(\frac{\dot{\Omega}}{\tan \phi} \eta \right) = \frac{2}{3} \pi R_i^3 \eta \frac{\dot{\Omega}}{\tan \phi} \dots\dots (3)$$

ここに， ϕ ：円錐の底角 (度)， $\dot{\Omega}$ ：円筒の角速度 (rad/s)， η ：粘性係数 (gf·s/cm²)

円筒の換算長さを h_c とすれば

$$\eta \cdot \dot{\Omega} = \frac{M}{4\pi h_s} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$h_s = \frac{R_i^3}{6 \tan \phi} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$h_c = h_o + h_s \dots\dots\dots (6)$$

ここに， h_o ：円筒部長さ (cm)， h_s ：円錐部の円筒換算長さ (cm)

速度勾配およびせん断応力の計算に式 (1) を用いたのは，P ロート流下時間 20 秒程度以下の通常のコンシステンシーのプレパックドコンクリート用グラウトの場合，内外円筒間の全試料が流動すること，および円筒壁面と試料との間のすべりが無視できる程度に十分小さいことをあらかじめ確かめたからである。すなわち，図-1 は内円筒半径 1.25 cm，外円筒半径 5.0 cm の外円筒回転型粘度計を用い，試料面上の各点の流速を測定した結果の例であって，P ロート流下時間 18.6 秒のグラウトの場合である。試料の流動幅は回転数の増加に伴って増し，回転数 60 rpm 以上でほぼ一定となり，その値は約 15.3 mm となっている。また，試料と内円筒壁面とのすべりは円筒の角速度の 3% 以下にすぎない。しかし，P ロート流下時間約 20 秒を越える場合は外円筒半径 5.0 cm の粘度計を用い，内外円筒間の試料面上の 6

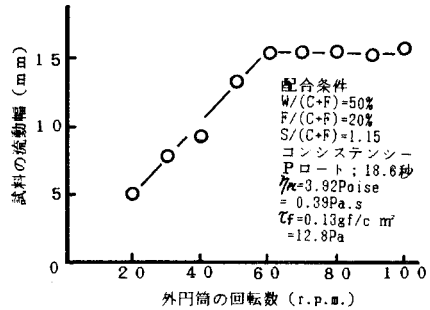


図-1 外円筒の回転数と試料の流動幅との関係

点の流速を測定し，試料の流動範囲 (R_n) を求め，内円筒壁面から 0.2 cm の点の角速度の実測値 ($\dot{\Omega}_i$) を用い，式 (1) において， $R_i=1.45$ cm， $\dot{\Omega}=\dot{\Omega}_i$ ， $R_o=R_n$ としてレオロジー定数を算定した¹⁾。

(3) 傾斜管試験法²⁾

傾斜管試験法はロート法の改良として考案したものである。すなわち，図-2 を参照してロート内の試料の液面と流出管出口にエネルギー方程式を適用すれば³⁾

$$\frac{V^2}{2g} + Z + l = \frac{V_o^2}{2g} + f_m \frac{V_o^2}{2g} + h_i \dots\dots\dots (7)$$

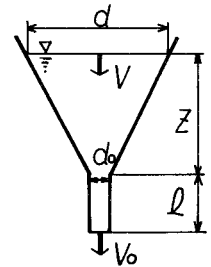


図-2 ロートの形状

ここに， V ：ロート内の液面の流速 (cm/s)， V_o ：流出管出口の流速 (cm/s)， Z ：液面の高さ (cm)， l ：流出管長 (cm)， $f_m (V_o^2/2g)$ ：ロートから流出管に流入するまでの損失エネルギー (cm)， h_i ：流出管における損失エネルギー (cm)

式 (7) に $V=(d_o/d)^2 V_o$ および $h_i = \frac{l}{K} V_o$ を代入し， V_o について解けば式 (8) を得る。

$$V_o = \frac{2}{\frac{l}{K(Z+l)} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2(Z+l)^2} + \frac{2}{g(Z+l)} \left[1 + f_m - \left(\frac{d_o}{d} \right)^4 \right]}} \dots\dots\dots (8)$$

ただし

$$K = \frac{\rho g R^2}{8\eta_{pl}} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau_f}{\rho g I R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_f}{\rho g I R} \right)^4 \right\}$$

ここに， R ：管の半径 (cm)， ρ ：グラウトの単位容積質量 (g/cm³)， I ：エネルギー勾配， g ：重力加速度 (cm/s²)， f_m ：損失係数

式 (8) において， $l=0$ の場合

$$V_o = \sqrt{\frac{2gZ}{1 + f_m - (d_o/d)^4}} \dots\dots\dots (9)$$

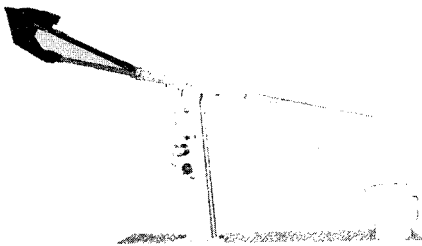
となり，流出速度はロートの形状に関係しグラウトの物性にほとんど無関係となる。これに対し， l が十分長い

場合

$$V_0 = \frac{K(Z+l)}{l} \dots\dots\dots(10)$$

したがって、流出管長を長くするほど試料の物性値と密接な関係をもつ測定値が得られる。P ロートおよび J ロートの流出管長は、それぞれ 3.8 cm および 3.0 cm でロートの深さに比べかなり小さい。

写真一はプレパックドコンクリート用グラウトに用いる傾斜管試験装置を示す。



写真一 傾斜管試験装置

装置の諸元について検討を重ねた結果¹⁾、流出管は直径 20 mm、長さ 70 cm のステンレス鋼管とし、これを水平近くに設置する。これは動水勾配を小さくして、管壁と試料間にすべりが生じないよう配慮したものである。ロートの形状を上縁直径 20 cm、高さ 15 cm のベルマウス形(朝顔形)とし、液面の流速を管内の流速に比べて十分小 (1/100) となるようにするとともに、ロート上縁にオーバーフローを設け、試料の流れが定常流となるよう配慮した。

通常、流出管の傾斜角度は 10 度を標準として流量の測定を行い、コンシステンシーの尺度とするが、この装置が一種の細管型粘度計であるから、試料のレオロジー定数を求めることもできる。すなわち、流出管の傾斜角度を 10 度のほか、5 度および 15 度として流量を測定するものであって、次の手順で行った。

- i) 流出管の傾斜角度を 15 度に設置した後、ホッパーにグラウトを満し、グラウトを常にオーバーフローさせつつ管内を流下させる。
- ii) グラウトが管から流出し始めてから約 5 秒後、試料受け容器により流出するグラウトを 10 秒間採取する。
- iii) 採取試料の質量を正しく計量し、試料の単位容積質量を用い、単位時間当たりの流量を算定する。
- iv) i)~iii) の操作を傾斜角度 10 度および 5 度についても行う。

ビンガム体の円管内の流量は Buckingham 式 (式

(11)) で与えられる。

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 l \eta_{pl}} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4 \right\} \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 Q : 流量 (cm^3/s)、 ΔP : 圧力差 (gf/cm^2) = $\rho g H$ 、 l : 管長 (cm)、 η_{pl} : 塑性粘度 ($\text{gf}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)、 r_f : 栓流半径 (cm) = $2 \tau_f / \Delta P$

式 (11) を書きかえて、

$$Q = A \rho g I + \frac{B}{(\rho g I)^2} - C \dots\dots\dots(12)$$

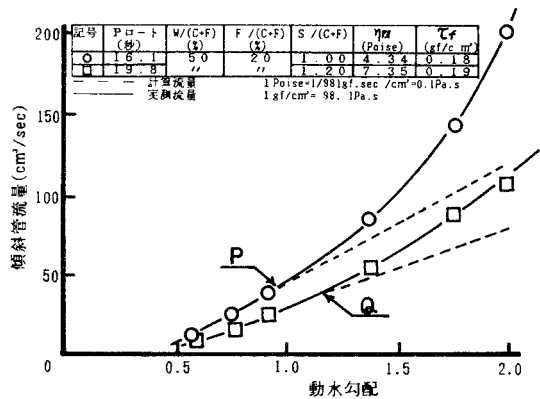
ここに、 $A = \pi R^4 / 8 \eta_{pl}$ 、 $B = 2 \pi \tau_f^2 / 3 \eta_{pl}$ 、 $C = \pi R^3 \tau_f / 3 \eta_{pl}$ 、 I : エネルギー勾配 = $(l \sin \theta + h_p \cos \theta) / l$ 、 h_p : ホッパーの高さ (cm)、 θ : 管の傾斜角度 (度)

塑性粘度および降伏値は式 (13) で算出する。

$$\left. \begin{aligned} \eta_{pl} &= \frac{\pi R^4}{8A} \\ \tau_f &= \frac{3RC}{8A} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

本来、傾斜角度を多数に変化させて流量を測定し、最小自乗法を適用してレオロジー定数の最確値を決定するのが望ましいが、上記の簡易法でも十分信頼度の高い試験値が得られる。すなわち、通常のコシステンシーを有するプレパックドコンクリート用グラウトについて傾斜管による簡易法および回転粘度計について求めたレオロジー定数はほぼ一致しており、両者の比は塑性粘度で 0.96~1.13、降伏値で 0.94~1.15 となっている。また、測定値の変動係数は塑性粘度で 1.9~7.6%、降伏値で 5.1~8.2% と比較的小さい²⁾。

傾斜管試験法によって上記のように満足な結果が得られるのは試料と管壁との界面にすべりが生じない場合である。図一3は 650 例以上行った実験結果のうち傾斜管の傾斜角度を 5 度~60 度に変化させた場合の動水勾配と傾斜管流量との関係の例を示したもので、この関係は動水勾配が約 0.4~1.0 の範囲で式 (11) による計算値



図一3 動水勾配と傾斜管流量との関係

とほぼ一致する。しかし、動水勾配が1.0を越えると、実測流量は計算流量よりしだいに増加し、試料と管壁間にすべりを生じたことを示している。

すべりの発生は試料との管壁間に作用するせん断力が付着力より大なることによる。したがって、図-3において実測流量曲線が計算流量曲線から外れる点(Pまたは、Q点)における管壁面のせん断力を算出すれば、その値は試料と管壁面の付着力に等しい。管壁面におけるせん断力は次式から与えられる。

$$\tau_R = \frac{R}{2} \cdot \frac{\Delta P}{l} \text{ または } = \frac{R}{2} \rho g I \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 τ_R ：試料と管壁の界面に作用するせん断力 (gf/cm²)、 $\Delta P/l$ ：圧力勾配 (gf/cm²/cm)

プレパックドコンクリート用グラウトおよびPC用グラウトについて、管の材質、管の直径、傾斜角度等を変化させて行った多数の実験結果^{(1),(5)}からグラウトの付着力を算出し図-4に示した。

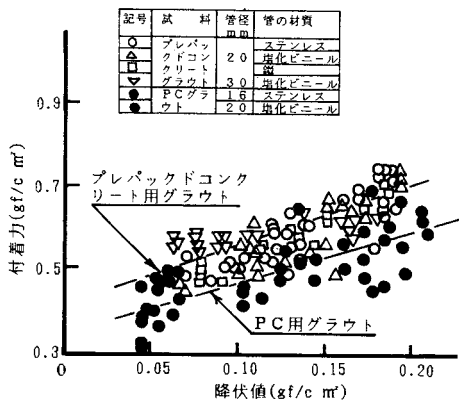


図-4 降伏値と付着力との関係

図-4は付着力を降伏値との関係で示したものであるが付着力の範囲は比較的狭く、Pルート流下時間16~20秒のプレパックドコンクリート用グラウトの場合、平均0.5~0.65 gf/cm² (49.1~63.8 Pa)、Jルート流下時間6~12秒のPC用グラウトの場合、平均0.4~0.55 gf/cm² (39.2~54.0 Pa)となっており、また使用したステンレス鋼管、塩化ビニール管および鋼管の間で差異は認められなかった。

表-1はプレパックドコンクリート工事におけるグラウト圧送の調査結果であって、使用した輸送管の直径と圧力勾配から計算した管壁におけるせん断力は19例中14例がグラウトの付着力より小さく、大部分は試料と管壁にすべりが無い場合と考えてよい。したがって傾斜管試験の結果がグラウト圧送工事に活用できる。なお、傾斜管試験法はPC用グラウトにも適用できる。この場合には流出管の直径を16mm、管長を50cmとするのがよい^{(2),(4),(5)}。

3. 管路によるグラウトの圧送実験

(1) 使用材料およびグラウトの配合

実験に用いたセメントはN社製普通ポルトランドセメント、フライアッシュはD社製フライアッシュであって、これらの物理試験成績および化学成分を表-2および表-3に示す。減水剤およびグラウト剤はN社製のNo.8およびGF-800である。

細骨材は利根川産川砂であって、その物理的性質を表-4に示す。

プレパックドコンクリート用グラウトの配合は水結合材比 (W/(C+F)) を50%、混和材率 (F/(C+F)) を20%とし、Pルート流下時間16秒、18秒および20秒程度としたもの、およびGF-800を用い、流下時間

表-1 グラウト圧送工事調査結果

工事名	水平直管換算長 (m)	管の直径 (mm)	圧力勾配 (gf/cm ² /cm)	管壁におけるせん断力 (gf/cm ²)
A	39.3	38	0.38	0.36
B	48.3 68.3	〃	0.56 1.27	0.53 1.21
C	39.6	50	0.38	0.47
D	9.8 18.8	〃	0.86 2.63	1.07 3.28
E	38.3	38	0.18 0.20	0.17 0.19
F	22.3 42.3	40	0.56 0.89	0.56 0.89
G	75.6	42	0.11 0.13	0.12 0.13
H	16.4	64	0.40	0.59
I	27.6	50	0.24 0.60	0.30 0.75
J	22.1	35	0.34 0.79	0.30 0.69
K	50.9 80.9	32	0.28 0.67	0.23 0.54

* 曲り管の水平直管換算長は1mとした。

表-2 セメントの物理試験成績および化学成分

比重	粉末度 ブレン法 (cm ² /g)	物理試験成績					安定性
		凝		結		良	
		水 (%)	量	始 (h-m)	終 (h-m)		
3.16	3130	27.8	2-34	3-50	良		
フロー値		強さ (Kg f/cm ²)					
		曲げ強さ		圧縮強さ			
		3日	7日	28日	3日	7日	28日
256	34	49	70	139	236	413	
化学成分 (%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ig. loss	insol	
22.3	5.4	3.0	63.4	1.4	0.5	0.8	

表-3 フライアッシュの物理試験成績および化学成分

比重	粉末度 ブレン法 (cm ² /g)	化学成分 (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
2.19	3200	55.3	33.8	6.6	0.3	1.8	0.4

表-4 細骨材の物理試験結果

NO.	産地	比重	吸水率 (%)	単位容積質量 (Kg/l)	実績率 (%)	粗粒率 F.M.
1	利根川産	2.52	4.26	1.49	60.1	2.17
2		2.56	4.02	1.44	58.8	2.05

※NO.1は直管路の実験に、NO.2は曲り管の実験にそれぞれ使用した。

36秒としたもので、各材料の単位量を表-5に示す。

なお、一部の試験は時期を異にして行ったので、細骨材の粒度その他が若干相違しており、これに伴って配合を調整した。

(2) 実験方法

a) 直管路の場合

容量80lのグラウトミキサを用い、1バッチの量を50lとし、回転数を650rpmとして4分間練りませた後、Pロート、回転粘度計および傾斜管試験装置によってコンシステンシーの測定を行い、直にグラウトを圧送した。

圧送用ポンプは容量40l、最大圧力10kgf/cm²(0.98MPa)の気圧注入式のものである。

管路は直径20mm、長さ4mの鋼管を連結し、管長40、

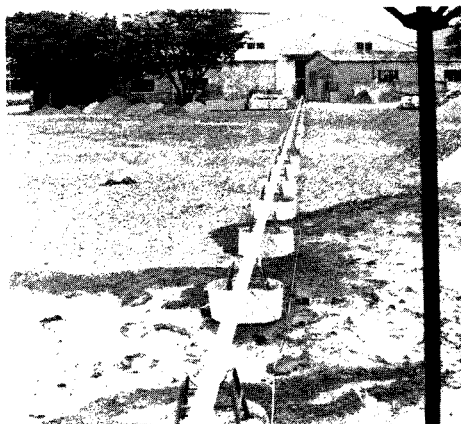


写真-2 グラウト圧送用配管

60および80mの水平直線配管とした。配管状況を写真-2に示す。

圧力勾配を0.625および0.9gf/cm²/cm(61.3および88.3Pa/cm)とし流量および管内圧力を測定した。圧力の測定位置は管入口から0.1, 19.9, 39.9, 59.9および79.9mとし、容量2, 5および10kgf/cm²(0.20, 0.49および0.98MPa)のダイヤフラム型圧力計を用いた。

b) 曲り管路の場合

a) で用いた圧送用ポンプは攪拌翼を備えているので、これを用い、1バッチの量を40lとし、回転数を650rpmとして4分間練りませた。練りませ完了後、Pロート、回転粘度計および傾斜管試験装置を用いてコンシステンシーを測定し、直に圧送圧力を水平曲り管の場合250~470gf/cm²(0.02~0.04MPa)、鉛直曲り管の場合は400~850gf/cm²(0.04~0.08MPa)として圧送を行った。

管路は直径20mmの塩化ビニール管とし、管長2mの直管2本の間中に表-6に示す7種の形状および寸法の曲り管を接続し、管路全体を水平に設置した場合(水平曲り管とよぶ)および、管長2mの水平直管に、表-6に示す曲率半径20cmおよび40cmで曲げ角度90度の曲り管を鉛直上向きに接続した(鉛直曲り管とよぶ)場合とし流量および管内圧力の測定を行った。圧力の測定は曲り管の入口および出口から外側15cmの位置とし、容量2kgf/cm²(0.02MPa)のダイヤフラム型圧力計を用いて行った。

表-6 曲り管の形状および寸法

曲げ角度 θ (度)	曲り管長 (cm)		
	20R	30R	40R
30	10.5	25.7	34.6
60	20.9	-	-
90	31.4	58.7	73.7

※ Rは管の半径を示す。

表-5 プレバッキングコンクリート用グラウトの配合

対象実験	Pロート流下時間 (sec)		配合比				単位量 (Kg/m ³)				
	練りませ時	圧送時	W	F	S	Ad	水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	混和剤 Ad (g)
			C+F (%)	C+F (%)	C+F (%)	C+F (%)					
直管路の実験	16.0	16.9	50.0	20.0	1.12	0.25	389	622	156	871	1945
	17.9	19.6			1.20		380	607	152	911	1898
	22.2	22.6			1.28		371	593	148	949	1855
	36.7	44.4			1.20		326	660	165	990	※8250
曲り管の実験	15.7	15.7	50.0		1.10	0.25	391	626	157	861	1958
	18.6	18.6			1.17		383	613	153	897	1915
	19.7	19.7			1.25		374	598	150	935	1800

※GF-800を添加

(3) 直管路による圧送実験結果

各配合のグラウトの回転粘度計および傾斜管試験装置によるレオロジー定数測定結果を表-7に、管路における流量測定結果を表-8に示す。

表-7 レオロジー定数測定結果

P-ロート 流下時間 (sec)	回転粘度計		傾斜管試験装置		比=傾斜管試験装置 回転粘度計	
	塑性粘度 (Poise)	降伏値 (gf/cm ²)	塑性粘度 (Poise)	降伏値 (gf/cm ²)	塑性粘度	降伏値
16.9	3.32	0.14	3.35	0.14	1.01	0.99
19.6	3.87	0.14	3.89	0.14	1.01	1.01
22.6	6.01	0.15	4.82	0.12	0.80	0.81
44.4	8.54	0.001	3.33	0.114	0.39	1.14

※ 1 Poise = 1/981gf・sec/cm² = 0.1Pa ・ s. 1gf/cm² = 98.1Pa. ●GF-800添加

表-7においてグラウトのレオロジー定数の測定値はP-ロート流下時間20秒以下の場合、測定法の相違にかかわらずほぼ同様の値となっており、(2)、(3)を裏づけている。これに比べP-ロート流下時間が約20秒以上のグラウトの場合、容器との界面にすべりを生ずるため、粘度計内の試料の流速分布を実測して求めた回転粘度計によるレオロジー定数と、すべりを含んだ流量を用いて求めた傾斜管試験による見掛けのレオロジー定数とは相違している。

表-8においてP-ロート流下時間が16.9秒および19.6秒の場合、実測流量は管長および圧力勾配の相違にかかわらず表-7のレオロジー定数を用い、式(11)より算出した計算流量とほぼ一致しており、両者の比は0.91~1.16である。これに比べP-ロート流下時間が20秒を越えると、試料と管壁との間にすべりが生じ実測流量は回転粘度計によって求めた物性値を用いて計算した流量より大となっており、両者の比は1.42~1.76であった。

すべりを伴う管内流動解析については別途検討を進めているが⁶⁾、P-ロート流下時間が20秒を越えるグラウトの流量は表-7に示す傾斜管試験から求めた見掛けのレオロジー定数を用いた計算流量とすべりを伴う管内流

量とはよく一致している。これは傾斜管試験においても管路と同様のすべりが生じているためであって、施工前に管路と同径の傾斜管を用いて見掛けのレオロジー定数を求めれば、その値を用いて管路における流量または圧送圧力の予測が可能となる。

なお、図-5に管内圧力測定結果の一例を示す。

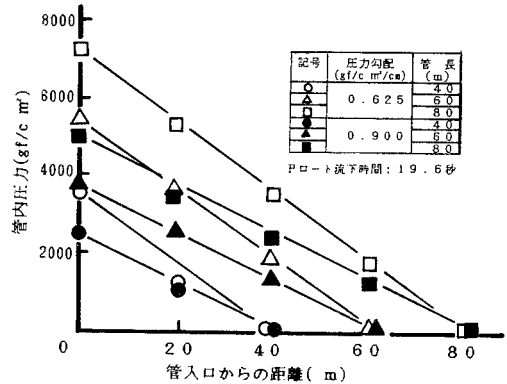


図-5 直管路における圧力測定結果

図-5において圧力の測定値は管入口から出口に向かい、ほぼ直線的に減少しており、管入口で圧送圧力、管出口で0となり、流体圧と同様な分布となっている⁷⁾。

(4) 曲り管による圧送実験結果

表-9ならびに表-10は水平曲り管における流量測定結果および直管換算長ならびに圧力測定結果および曲り管の圧力損失の例であって、P-ロート流下時間18秒の場合である。見掛けの圧力勾配(圧送圧力を配管実長で除した値)を約0.6, 0.8および1.0 gf/cm²/cm (58.9, 78.5および98.1 Pa/cm)としている。表-9において実測流量は配管全体を水平直管と仮定して求めた計算流量より小となっている。これは曲りによる圧力損失に起因する。

曲り管の入口および出口にエネルギー方程式を適用す

表-8 直管路における流量測定結果

P-ロート 流下時間 (sec)	管長 (m)	圧力勾配: 0.625 gf/cm ² /cm						圧力勾配: 0.900 gf/cm ² /cm					
		測定流量 Q _A (cm ³ /sec)		計算流量 (cm ³ /sec)				測定流量 Q _A (cm ³ /sec)		計算流量 (cm ³ /sec)			
		Q _R	Q _A /Q _R	Q _K	Q _A /Q _K	Q _K	Q _A /Q _K	Q _R	Q _A /Q _R	Q _K	Q _A /Q _K		
16.9	40	30.7	0.98	30.7	0.98	30.8	0.94	68.5	1.10	62.0	0.99	61.8	1.11
	60	28.9	0.94		0.94		61.4		0.99		1.00		0.99
	80	29.8	0.97		0.97		63.7		1.03		1.03		1.03
19.6	40	24.5	0.92	26.4	0.91	26.0	0.94	49.0	0.92	53.2	0.92	52.7	0.93
	60	24.1	0.91		0.91		53.0		1.00		1.01		1.01
	80	30.2	1.14		1.14		56.0		1.06		1.06		1.08
22.6	40	22.6	1.42	15.9	1.75	25.3	0.89	47.1	1.42	33.1	1.42	47.1	1.00
	60	27.8	1.75		1.75		46.9		1.42		1.00		1.00
	80	28.0	1.76		1.76		51.5		1.55		1.09		1.09
44.4	40	36.8	1.31	28.1	1.31	37.6	0.98	67.7	1.67	40.5	1.67	69.1	0.98
	60	34.9	1.24		1.24		65.2		1.66		1.66		0.94

※ Q_R: 回転粘度計により求めたレオロジー定数を用いて計算した流量。 Q_K: 傾斜管試験装置により求めたレオロジー定数を用いて計算した流量

表—9 水平曲り管路における流量測定結果および直管換算長

(Pポート流下時間: 17.8~17.9 sec)

曲率半径 Rb (cm)	レオロジー定数		曲げ 角度 θ (度)	圧送圧力 P ₀ (gf/cm ²)	実測流量 Q _A (cm ³ /sec)	計算流量 Q _B (cm ³ /sec)	有効圧力勾配 P _B (gf/cm ²)	※直管換 算距離 L ₀ (m)	曲り管の 直管換算 長 L ₁ (m)	式(21)による 曲り管の計算 換算長 L ₂ (m)	比 = L ₁ /L ₂
	塑性粘度 (Poise)	降伏値 (gf/cm ²)									
20	2.98	0.17	30	260	13.4	24.6	0.53	4.94	0.84	0.89	1.06
				320	29.1	41.2	0.66	4.83	0.73	1.22	
				420	47.1	71.2	0.81	5.19	1.03	0.82	
			60	260	12.3	21.6	0.52	5.04	0.94	1.15	
				320	26.4	38.5	0.64	4.99	0.89	1.21	
				420	44.2	68.7	0.89	5.34	1.24	0.87	
90	260	10.5	20.5	0.50	5.21	1.11	1.14				
	320	21.2	37.2	0.60	5.37	1.27	0.99				
	420	42.1	64.9	0.77	5.46	1.36	0.93				
30	2.26	0.19	30	255	11.7	21.4	0.53	4.83	0.73	0.81	1.11
				340	37.9	52.3	0.71	4.79	0.69	1.17	
				472	66.7	86.9	0.89	5.32	1.22	0.66	
			90	275	11.4	21.4	0.53	5.23	1.13	1.03	
				376	28.0	55.6	0.65	5.83	1.73	0.88	
				430	60.1	90.3	0.85	5.07	0.97	1.21	
40	2.36	0.19	30	296	16.0	23.3	0.57	4.74	0.64	0.77	1.20
				382	42.7	54.8	0.75	4.81	0.71	1.08	
				455	69.3	89.7	0.92	4.93	0.83	0.93	
			90	283	17.1	20.5	0.58	4.92	0.72	1.57	
				376	32.8	48.8	0.69	5.48	1.38	0.82	
				432	54.7	67.3	0.83	5.20	1.10	1.03	

* L₁ は直管換算距離 L₁ を m の単位で示した値。

れば

$$\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + f \frac{V_2^2}{2g} \dots\dots\dots(15)$$

ここに、V₁, V₂:それぞれ曲り管入口および出口における平均流速 (cm/s), Z₁, Z₂:それぞれ曲り管入口および出口における位置エネルギー (cm), f $\frac{V_2^2}{2g}$:曲り管における損失エネルギー (cm)

V₁=V₂であるから

$$P_1 - P_2 = \rho g \left(f \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 - Z_1 \right) \dots\dots\dots(16)$$

ここに、f:曲り管の損失係数

曲り管の損失係数は曲り管の入口および出口の圧力差から算定できる。本実験では曲り管の入口および出口から15cm外側の位置の圧力および流量を測定したので曲り管入口および出口における圧力を圧力測定値から推

定する方法と実測流量から推定する方法があるが、測定値の安定性を考慮し後者から推定することとした。圧力の推定値を表—10に示す。

曲り管の損失係数の算定には Richter 式, Weisbach 式, Creager 式等があるが検討の結果 Richter 式におけるレイノルズ数をビンガム体のレイノルズ数に置き換えて用いることとした。

$$f = \beta \left(\frac{R_b}{D} \right)^i \theta^j R_{eb}^k \dots\dots\dots(17)$$

ここに、D:管の直径 (cm), R_b:曲り管の曲率半径 (cm), θ:曲り角度 (度), β, i, j, k:実験定数, R_{eb}:ビンガム体のレイノルズ数

ビンガム体のレイノルズ数として次の富田の式を用いることとした。これは粘土, 汚泥等のサスペンションにおける実験結果とよく一致するといわれている⁸⁾。

表—10 水平曲り管内の圧力測定結果および曲り管の圧力損失

(Pポート流下時間: 17.8~17.9 sec)

曲率半径 Rb (cm)	レオロジー定数		曲げ 角度 θ (度)	圧送 圧力 P ₀ (gf/cm ²)	有効 圧力 P _B (gf/cm ²)	平均 流速 V _B (cm/sec)	レイ ノル ズ 数 Re _B	圧力測定値 (gf/cm ²)		損失 係数 f	曲り管の 直管換算 長 L ₁ (m)	曲り管の 直管換算 長 L ₂ (m)	比 = L ₁ /L ₂					
	塑性粘度 (Poise)	降伏値 (gf/cm ²)						1) Pr	2) Pn									
20	2.98	0.17	30	260	0.53	4.3	0.39	180	75	152	107	2379	44	37.9	0.90			
				320	0.66	3.3	2.15	198	85	184	136	548	48	57.0	1.18			
				420	0.81	15.0	5.66	263	108	254	168	384	68	75.3	0.88			
			60	260	0.52	3.9	0.32	183	73	154	106	3095	48	47.1	0.97			
				320	0.64	3.4	1.76	202	81	109	131	791	57	66.4	1.16			
				420	0.79	14.1	5.01	269	98	259	161	482	86	89.5	0.92			
			90	260	0.50	3.3	0.23	106	68	157	102	4842	55	49.8	0.90			
				320	0.60	6.8	1.09	205	78	198	122	1621	76	67.7	1.24			
				420	0.77	13.4	4.55	272	89	262	158	559	104	83.1	0.94			
30	2.26	0.19	30	255	0.53	3.7	0.27	155	82	147	108	2752	39	32.3	0.84			
				340	0.71	12.1	3.18	208	101	194	148	333	49	60.8	1.24			
				470	0.89	21.2	10.0	267	123	290	182	237	108	83.9	0.78			
			90	275	0.53	3.6	0.21	172	87	167	108	4486	59	80.4	1.02			
				378	0.65	3.9	1.65	239	112	244	132	1392	112	72.8	0.85			
				430	0.65	19.1	8.19	305	126	256	174	223	82	109	1.33			
			40	2.36	0.19	30	269	0.57	5.1	0.48	181	94	153	116	1936	37	36.0	0.98
							362	0.75	13.5	4.10	220	117	208	154	268	54	59.9	1.05
							455	0.92	22.1	10.9	282	141	226	189	157	77	75.8	0.96
90	293	0.58				5.4	0.55	175	100	195	119	1590	47	51.5	1.09			
	355	0.69				10.4	2.34	236	123	244	141	181	95	68.9	0.73			
	432	0.83				17.4	6.80	274	125	262	170	300	82	80.8	0.98			

注: 1) 曲り管入口から15cm外側の圧力測定値。 2) 曲り管出口から15cm外側の圧力測定値。 3) 実測流量と式(11)より求めた有効圧力勾配を用いて推定した曲り管入口の圧力。 4) 2)と同様に有効圧力勾配を用いて推定した曲り管出口の圧力。 5) 式(16)および式(17)を用いて計算した曲り管の圧力損失。 6) D=2.0cm。

$$R_{eb} = \frac{\rho v D (4aa)}{\eta_{pl}} F(a) \dots \dots \dots (18)$$

ここに、 ρ ：グラウトの密度 (g/cm³)、 v ：平均流速 (cm/s)、 a ：比栓半径 (r/R)、 $\alpha = (a^4 - 4a + 3)/12a$ 、 $F(a) = \frac{9}{5} \{ (5+6a-11a^2)/(3+2a+a^2)^2 \} - 1 - a$

表-10に示す R_b 、 θ 、 R_{eb} および D の値を用い最小自乗法により式 (17) の実験定数を定めれば $\beta = 1.100$ 、 $i = -0.44$ 、 $j = 0.30$ 、 $k = -0.70$ となった。これらの値を用い式 (17) から求めた損失係数および圧力損失の計算値を表-10に示す。表-10において曲り管における圧力損失の計算値と推定値との比は大部分 0.84~1.18 の範囲にあり平均 1.01 となっている。この関係は P ロート流下時間 16 秒および 20 秒の場合も同様であった。

以上のように、式 (17) を用いて曲り管における圧力損失を計算できるが、この方法は一般に繁雑であって実用上は曲り管の直管換算長 (L) を用いている。直管換

算長は圧送圧力を実測流量と式 (11) から計算した有効圧力勾配で除して得られた管路全長の直管換算距離 (l') から直管部の実長を差し引いた値として次式から計算した。

$$L = 0.01 \left(\frac{P_0}{q} - S \right) = 0.01 (l' - S) \dots \dots \dots (19)$$

ここに、 L ：曲り管の直管換算長 (m)、 P_0 ：圧送圧力 (gf/cm²)、 q ：有効圧力勾配 (gf/cm²/cm)、 l' ：管路全長の直管換算距離 (cm)、 S ：直管部の実長 (cm)

式 (19) による直管換算長の計算結果を表-9に示す。

直管換算長は管の半径と曲率半径との比および曲げ角度によって相違するが、この実験に用いた範囲のグラウトではコンシステンシーおよび圧送圧力の影響は比較的少ない。したがって水平曲り管の直管換算長の実用式として実験値をもとに最小自乗法により定数を定めた次式が提案できる。

$$L_{90} = 5.1 \left(\frac{R}{R_b} \right) + 1.0 \dots \dots \dots (20)$$

表-11 鉛直曲り管路における流量測定結果および直管換算長

(P ロート流下時間：18.2~18.6sec)

曲率半径 R _b (cm)	P ロート 流時間 (sec)	レオロジー定数		鉛直管長 (m)	圧送圧力 P ₀ (gf/cm ²)	実測流量 Q _A (cm ³ /sec)	計算流量 Q (cm ³ /sec)	有効圧力 勾配 P ₀ /l (gf/cm ² /cm)	曲り管の 換算長 L (m)	※ L _b (m)	比 = L _b / L	
		塑性粘度 (Poise)	降伏値 (gf/cm ²)									
2.0	18.8	3.67	0.19	0.50 [0.75]	408	20.6	94	0.68	1.25	1.25	0.94	
					486	34.3	115	0.82			0.98	
					525	47.7	136	0.95			1.06	
				1.00 [1.25]	478	8.3	94	0.54			1.06	0.85
					548	23.4	115	0.71			1.03	0.82
					615	42.1	136	0.90			0.94	0.75
				1.50 [1.75]	540	0.4	92	0.41			0.97	0.78
					630	12.5	118	0.59			1.07	0.89
					750	41.4	148	0.89			0.85	0.68
4.0	18.2	3.56	0.19	0.50 [0.95]	516	44.7	121	0.91	1.13	1.13	0.85	
					581	53.8	142	1.00			1.15	
					545	72.7	164	1.17			1.12	
				1.00 [1.45]	596	26.0	121	0.73			1.06	0.93
					671	43.8	142	0.90			1.09	0.96
					746	57.3	164	1.03			1.29	1.14
				1.50 [1.95]	676	13.3	120	0.60			1.13	1.00
					761	30.3	142	0.77			1.15	1.02
					846	48.7	164	0.97			1.26	1.12

※；式 (20) または式 (21) による曲り管の直管換算長。

表-12 鉛直曲り管内の圧力測定結果および曲り管内の圧力損失

(P ロート流下時間：18.2~18.6sec)

曲率半径 R _b (cm)	レオロジー定数	鉛直管長 (m)	圧送圧力 P ₀ (gf/cm ²)	有効圧力 勾配 P ₀ /l (gf/cm ² /cm)	平均流速 V (cm/sec)	レイノ ルズ数 Re _b	圧力測定値 (gf/cm ²)		P ₁ ³⁾	P ₂ ⁴⁾	損失 係数 f	曲り管の 換算長 L (m)	曲り管の 圧力損失 ΔP _b (gf/cm ²)	比 = ΔP _b / ΔP
							Pr ¹⁾	Pn ²⁾						
2.0	3.68	0.19	0.50 [0.75]	0.68	6.6	0.95	270	68	167	37	1601	128	123	0.98
				0.82	10.9	2.74	308	87	196	45	761	152	134	0.88
				0.95	15.2	5.20	347	93	228	52	485	176	156	0.89
			1.00 [1.25]	0.54	2.6	0.12	360	64	184	57	6718	107	89	0.83
				0.71	7.5	1.25	411	85	197	75	1318	122	116	0.95
				0.90	13.4	4.10	463	118	228	94	574	134	148	1.10
			1.50 [1.75]	0.47	0.1	0	445	74	152	69	—	98	—	—
				0.59	4.0	0.31	519	121	204	92	3481	112	98	0.89
				0.89	13.2	3.97	618	162	263	138	587	125	146	1.17
4.0	3.56	0.19	0.50 [0.95]	0.91	14.2	4.82	358	82	228	50	389	234	162	0.70
				1.00	17.1	6.54	408	104	274	55	305	219	174	0.73
				1.17	23.1	11.30	448	122	303	65	209	238	197	0.82
			1.00 [1.45]	0.73	8.3	1.55	487	89	243	77	896	167	141	0.94
				0.80	13.9	4.44	528	113	283	95	400	188	162	0.86
				1.03	18.2	7.34	586	138	332	108	281	224	179	0.80
			1.50 [1.95]	0.60	4.2	0.36	564	137	249	92	2335	157	124	0.79
				0.77	8.6	2.13	634	139	298	120	809	178	146	0.82
				0.93	14.8	5.02	705	163	350	144	367	206	165	0.80

注：1) 曲り管入口から15cm外側の圧力測定値。 2) 曲り管出口から15cm外側の圧力測定値。 3) 実測流量と式(11)より求めた有効圧力勾配を用いて定した曲り管入口の圧力。 4) 3)と同様に有効圧力勾配を用いて推定した曲り管出口の圧力。 5) 式(16)および式(17)を用いて計算した曲り管の圧力損失。

$$L_b = L_{90} - 0.006(90 - \theta) \dots \dots \dots (21)$$

ここに、 L_{90} ：曲げ角度 90 度の場合の直管換算長 (m)、
 R_b ：曲率半径 (cm)、 L_b ：曲げ角度 θ における曲り管
 の直管換算長 (m)

これらの式 (20) および式 (21) による計算値と直管換算長との比は大部分 0.80~1.24 の範囲にあり平均 0.9 であった。

表—11 ならびに表—12 は鉛直曲り管における流量測定結果および直管換算長ならびに圧力測定結果および鉛直曲り管の圧力損失の例であって、P ロート流下時間 18 秒の場合である。見掛けの圧力勾配を約 1.4、1.6 および 1.8 gf/cm²/cm (137, 157 および 177 Pa/cm) としている。

表—12 において水平曲り管と同様な方法で求めた圧力損失から鉛直管内の試料の自重による水頭を差し引いた圧力損失の推定値と計算値との比は一部を除いて 0.80~1.17 となっている。ここに計算値とは式 (16) を用いて求めた圧力損失に曲り管内の水頭差を加えた値である。

また、表—11 において鉛直曲り管の直管換算長は水平曲り管と同様に実測流量から有効圧力勾配を求め、曲り管および鉛直管内の試料の自重による圧力損失を曲り管内の水頭差で表わし、次式より直管換算長を求めた。

$$L = 0.01 \left(\frac{P_0 - \rho gh}{q} - S \right) \dots \dots \dots (22)$$

ここに、 L ：曲り管の直管換算長 (m)、 h ：配管内の高低差 (cm)

鉛直曲り管の直管換算長は表—11 に示すようであって、直管換算長の推定値と式 (20) および式 (21) による計算値との比は大部分 0.75~1.15 となっており、鉛直曲り管の直管換算長は配管の高低差を考慮することにより水平曲り管と同様に取り扱うことができる。

したがって、グラウトの配合、配管条件が定まれば圧送圧力に対する流量、あるいは流量に対するポンプの圧送圧力を次の手順で推定できる。

- i) 傾斜管試験によりグラウトのレオロジー定数を決定する。
- ii) 曲り管の曲率半径、管の直径、および曲げ角度を用いて式 (20) および式(21) から曲り管の直管換算長の概略値を算定する。
- iii) 曲り管の直管換算長に直管部の実長を加えた直管換算距離を用い、Buckingham 式 (式 11) から圧送圧力に対応する流量を計算する。ただし、鉛直配管路の場合は圧送圧力から配管内の高低差による圧力損失を差し引いた値を圧送圧力として計算する。
- iv) 所要の流量に対するポンプの圧力負荷を計算す

る場合には曲り管の直管換算長を考慮した直管換算距離を用い、次式から計算する。

$$\Delta P = \frac{8l\eta_{pl}}{\pi R^4} Q + \frac{8l\tau_f}{3R} \dots \dots \dots (23)$$

式 (23) は Buckingham 式を変形し (r_f/R)⁴ の項を省略したもので、省略による誤差は一般に 6% 以下である。

ポンプの圧力負荷 (P_0) は
 水平管路の場合 $P_0 = \Delta P$
 鉛直管路の場合 $P_0 = \Delta P + \rho gh$

v) 式 (17) に示す曲り管の損失係数 f を用いてポンプの圧力負荷を計算する場合には式 (23) の l とし直管部の実長を用いて ΔP を求め $\rho g \left(f \frac{V^2}{2g} \right)$ を加算して圧力負荷とする。

なお、本実験は、グラウト温度 20°C のもとで行ったが表—13 に示すように、グラウトの物性値は温度によって相違するので、上記の計算では温度変化に対応したレオロジー定数を傾斜管試験により求めればよい。

表—13 グラウトの温度変化がレオロジー定数に及ぼす影響

グラウトの温度 (°C)	回 転 粘 度 計		傾 斜 管 試 験 装 置	
	塑性粘度 (Poise)	降伏値 (gf/cm ²)	塑性粘度 (Poise)	降伏値 (gf/cm ²)
10.7	4.21	0.15	5.24	0.14
22.0	8.43	0.16	8.48	0.18
27.1	7.83	0.17	7.85	0.17

4. 結 論

グラウト施工の合理化を目標として、曲り管を含む管路におけるグラウトの流量および圧送圧力の予測方法について検討した。ただし、研究の対象はプレパックドコンクリート用グラウトおよび PC 用グラウトのように、通常使用する圧送管の直径および圧力勾配のもとで管壁との界面にすべりが生じない場合に限定されている。

また、この研究の過程でグラウトのレオロジー定数の簡易測定法として傾斜管試験法を提案した。この研究の範囲内で得られた結果を要約すれば次のとおりである。

- (1) ロート法の改良として提案した傾斜管試験法はグラウトのコンシステンシーのよい尺度を与えるだけでなく、一種の細管型粘度計として機能し、通常のプレパックドコンクリート用グラウトや PC 用グラウトのレオロジー定数を簡易に測定できる。傾斜管試験法によるレオロジー定数は二重円筒型回転粘度計によって得られた値とはほぼ一致し、両者の比は塑性粘度の場合 0.96~1.13、降伏値の場合 0.94~1.15 であって、測定値の変動係数はそれぞれ 1.9~7.6% および 5.1~8.2% であった。
- (2) プレパックドコンクリート用グラウトおよび

PC用グラウトの配管壁面との付着力はそれぞれ0.5～0.65 gf/cm² (49.1～63.8 Pa) および0.4～0.55 gf/cm² (39.2～54.0 Pa) であって、一般のグラウト工事に使用する圧送管の直径が30～50 mm、圧力勾配が0.1～0.8 gf/cm²/cm (9.8～18.5 Pa/cm) であることから通常、管壁ですべりが生じないものと考えてよい。

(3) 管径20 mm、圧力勾配約1.0 gf/cm²/cm (98.1 Pa/cm) 以下で試料と管壁との間にすべりが生じない場合、40～80 mまでの直管路におけるプレパッドコンクリート用グラウトの圧送実験の結果、実測流量とBuckinghamの塑性流動式による計算流量とはほぼ一致し、両者の比は0.93～1.16となっている。

(4) 曲率半径を管の半径の20～40倍、曲げ角度を30～90度とした水平曲り管および曲率半径を管の半径の20ならびに40倍、曲げ角度を90度とした鉛直曲り管を含む管路におけるプレパッドコンクリート用グラウトの圧送実験の結果、曲り管の損失係数(f)は次式で与えられる。

$$f = 1100 \left(\frac{R_b}{D} \right)^{-0.44} \cdot \theta^{0.30} \cdot R_{ob}^{-0.70}$$

ここに、 D ：管の直径 (cm)、 R_b ：曲率半径 (cm)、 θ ：曲げ角度 (度)、 R_{ob} ：ビンガム体のレイノルズ数

曲り管の損失係数を用いて計算した曲り管の圧力損失は実測流量を用いた推定値とはほぼ一致し、両者の比は大部分0.80～1.24の範囲にあり、平均0.94であった。

また、水平曲り管の直管換算長の実用式として次式を提案した。

$$L_{90} = 5.1(R/R_b) + 1.0$$

$$L_b = L_{90} - 0.006(90 - \theta)$$

ここに、 L_{90} ：曲げ角度90度の場合の直管換算長 (m)、 R ：管の半径 (cm)、 L_b ：曲げ角度 θ の場合の直管換算長 (m)

鉛直曲り管の圧力損失は実測流量から求めた推定値と損失係数を用い、さらに鉛直管内の試料の自重を考慮した計算値とはほぼ一致し両者の比は0.80～1.17であった。

また、鉛直曲り管の直管換算長は配管内の高低差を考慮することにより、直管換算長の推定値と計算値との比は0.75～1.15となっており、配管内の高低差を考慮することにより水平曲り管として取り扱うことができる。

(5) グラウト圧送時の配管条件が定まった場合の流量あるいは圧送圧力の算定は水平曲り管の場合、配管条

件から曲り管の直管換算長を計算し、これに直管部の実長を加えた直管換算距離を用いればBuckingham式より算定できる。また、鉛直配管路の場合は圧送圧力から配管内の鉛直管部の水頭差を差し引いた値を圧送圧力として計算する。

所要の流量から圧送圧力を推定する場合は直管換算距離を用い次式から推定する。

$$\Delta P = \frac{8l\eta_{pl}}{\pi R^4} Q + \frac{8l\tau_f}{3R}$$

ここに、 ΔP ：圧送圧力 (gf/cm²)、 l ：直管換算距離 (cm)、 η_{pl} ：塑性粘度 (gf·s/cm²)、 Q ：流量 (cm³/s)、 τ_f ：降伏値 (gf/cm²)

ただし、水平管路の場合 ΔP を圧送圧力とし、鉛直管路の場合 ΔP に水頭差を加えた値を圧送圧力とする。

圧送圧力の計算に曲り管の損失係数を用いる場合は上記の圧力算定式中の l として直管部の実長を用いて ΔP を求め、これに $\rho g \left(f \frac{V^2}{2g} \right)$ を加算することにより得られる。また鉛直配管の場合は上記の計算値に鉛直配管内の試料の自重による圧力損失を加えた値とする。

参 考 文 献

- 1) 村田・菊川：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提案，土木学会論文集，No. 284，pp. 117～125，1979年4月。
- 2) 村田・鈴木：傾斜管法によるグラウトの粘度測定法，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年3月。
- 3) 村田・荻原・鈴木：流動化コンクリートのレオロジー特性(日本大学生産工学部流動化コンクリート委員会報告)，日本大学生産工学部生産工学研究所，pp. 23～24，1982年5月。
- 4) 村田・鈴木：傾斜管試験法によるグラウトのコンシステンシー試験方法，セメント技術年報，No. 36，pp. 175～178，1982年。
- 5) 村田・鈴木：注入モルタルの新しいコンシステンシー試験方法，セメントコンクリート，No. 413，pp. 23～29，1981年7月。
- 6) 村田・鈴木：すべりを伴うモルタルの管内流動，土木学会年次学術講演会，1983年9月。
- 7) Ede, A. N. ; The resistance of Concrete pumped through pipelines, Magazine of Concrete Research, Vol. 9, No. 27, pp. 125～140, 1957年11月。
- 8) 富田幸雄：レオロジー，コロナ社，pp. 333～334。
(1984. 4. 12・受付)