

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

STUDY ON GROUT FLOW IN PIPE WITH SLIDING AT WALL

村田二郎*・鈴木一雄**

By Jiro MURATA and Kazuo SUZUKI

Grouts for backfilling of tunnels and for filling wallfooting gaps are taken up, and together with explaining the mechanisms of their flows in pipes, a rubbing resistance measurement apparatus is experimentally devised with the objective of obtaining fundamental data on pipe flow of concrete. The flow of grout is analyzed theoretically and experimentally, and a flow prediction formula is proposed. Grout is also pumped through a straight, horizontal pipeline to determine the viscous friction coefficient and adhesion of the grout, while horizontal and vertical bent pipes are used to study pressure losses in bent pipes to provide information useful in planning pipelines for pumping grout.

Keywords: grout, rheology, flow, fluid friction

1. 緒 言

著者らは、プレパックドコンクリート用グラウトモルタルのように、流動性の大きいものの円管内の流れは、一般に Buckingham の塑性流動式に従うことを明らかにし、土木学会論文集、第354号に報告した¹⁾。

本研究は上記のグラウトモルタルより流動性が小さいもの、たとえば、トンネルの裏込め用グラウト、間詰め用グラウト等を対象とし、それらの管内流れの機構を明らかにするとともに、コンクリートの管内流動の基礎資料を得ることを目的としている。

流動性があまり大きくないグラウトの場合は、圧力を伴う管内の流量が Buckingham 式で与えられるよりかなり大きくなることに着目し、これが管壁と試料間のすべりに起因すると考え、試料のすべりについて理論的、実験的に検討し、その結果からすべりを伴う管内流量の予測式を提案した。

次に水平直管路におけるグラウトの圧送実験を行って、提案式中の諸係数を定め、さらに水平および鉛直曲

がり管における圧力損失について検討し、この種のグラウトの圧送用パイプラインの配管計画について述べた。

2. 管壁にすべりを伴うグラウトの円管内の流れ

(1) 理論的検討

P ロート流下時間が約20秒以下のグラウトの場合、圧力を伴う円管内の流れは Buckingham の塑性流動式に従うが、P ロート流下時間が20秒を越えると、Buckingham 式に適合しない。これは、前者の場合、試料と管壁との付着力が、これらの界面に働くせん断応力より大きいことによるものであり、後者の場合は、付着力がせん断応力より小さく、したがって、試料と管壁との間にすべりが生じると考えられる。

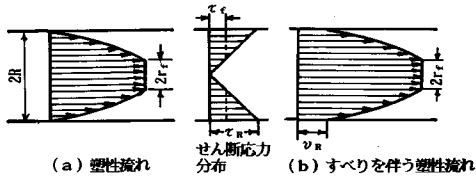
図—1は、ピンガム体の管内流動における流速およびせん断応力の分布を示したもので、(a) 図は塑性流れを、(b) 図はすべりを伴う塑性流れを示している。

図—1からわかるように、すべりを伴う場合の流量は、Buckingham 式で計算される流量に、すべりによる移動量を加算したものとし、次式で表わされる。

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \eta_{pl}} \frac{\Delta P}{l} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_f}{R} \right)^4 \right\} + \pi R^2 v_R \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

** 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科
(同上)



図一 グラウトの円管内の流速分布

ここに、 Q ：流量 (cm^3/s)、 R ：管半径 (cm)、 η_{pl} ：塑性粘度 (gf/cm^2)、 $\Delta P/l$ ：圧力勾配 ($\text{gf}/\text{cm}^2/\text{cm}$)、 r_f ：栓流半径 (cm)、 $[\tau_f = 2l\tau_r/\Delta P$ 、ここに、 τ_r ：降伏値 (gf/cm^2)]、 v_R ：すべり速度 (cm/s)

式(1)におけるすべり速度 v_R は、次のようにして算定できる。

管壁に作用するラッピング抵抗力は、試料と管壁との間が液体摩擦状態にあると仮定すれば流速に比例するので

$$f_R = \alpha v_R + A \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 f_R ：ラッピング抵抗力 (gf/cm^2)、 α ：粘性摩擦係数 (gf/cm^3)、 A ：付着力 (gf/cm^2)

また、ラッピング抵抗力は、管壁に接する試料のせん断応力に等しいと考えられるから

$$f_R = \tau_R = \frac{R}{2} \frac{\Delta P}{l} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 τ_R ：管壁に接する試料のせん断応力 (gf/cm^2) (図一参照)。

式(2)および(3)より次式が成立する。

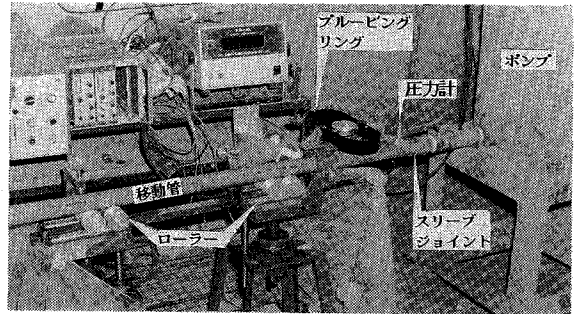
$$v_R = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{2} \frac{\Delta P}{l} - A \right) \dots\dots\dots (4)$$

したがって、物性値として粘性摩擦係数 α および付着力 A が与えられれば、圧送条件に応じてすべり速度を計算することができ、式(1)を用いてすべりを伴う場合の流量の予測が可能となる。

(2) 実験的検討

(1)に述べた考察において、ラッピング抵抗力は、式(3)で与えられること、および流速に比例することを仮定したが、これを確かめるためにラッピング抵抗測定装置を試作し、実験を行った。

ラッピング抵抗測定装置は、写真一に示すように、水平レール上にローラーを介して、管半径1.5 cm、長さ1 mの塩化ビニール製の移動管を設置し、これを容量40 l、最大圧力10 kgf/cm²の気圧注入式グラウトポンプに接続したものである。ポンプの排出管と移動管との接続は、両者の中心軸が一致するように突き合わせ、その外側にアクリル樹脂製のスリーブジョイントをはめ込んだ。移動管の外径は、試料が継目から漏れることなく、自由に管軸方向に移動できるように、スリーブジョイントの内径より1 mm小さく仕上げてある。試験は、試料の圧送に伴って移動管を軸方向に移動させようとする力が



写真一 ラッピング抵抗測定装置

働くので、これをラッピング力として、容量5 kgfのブルーピングリングを用いて検出した。

なお、フロー190以下の比較的硬練りのグラウトの場合は、圧送用ポンプとして最大圧力10 kgf/cm²、ホッパ容量160 lのダイヤフラム式コンクリートミニポンプを用い、移動管として管半径2.5 cm、長さ1 mの塩化ビニール管を使用し、容量30 kgfのブルーピングリングを用いた。

圧力勾配を、フロー190以上のグラウトの場合、約0.5、0.7、1.0、1.3および1.6 gf/cm²/cmとし、フロー190未満の場合、約1、2、4および6 gf/cm²/cmとして、ラッピング抵抗力を測定するとともに、流量および管内圧力を測定した。管内圧力は移動管入口から5 cm (管半径2.5 cmの場合10 cm) および50 cmの位置に容量2 kgf/cm²のダイヤフラム型圧力計を装着し、動アンプおよび電磁オシログラフによって記録した。

実験に用いた10種のグラウトの配合、フローおよび二重円筒型回転粘度計(内円筒半径2.5 cm、長さ10 cm、外円筒半径5 cm)を用いて多点方法²⁾によって測定したレオロジー定数を表一に示す。グラウトの配合は、表一に示すようにフロー約190~280のもの7種、約160~190のもの3種とした。

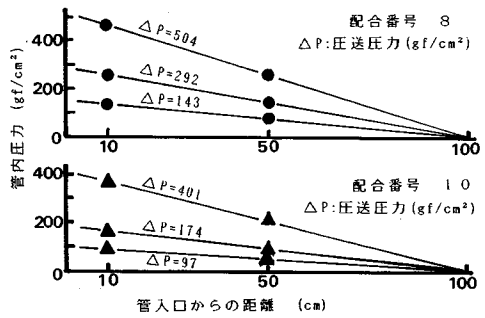
図二は、これらのグラウトについて測定した管内の単位面積当たりのラッピング抵抗力と式(3)から計算した管壁に接する試料のせん断応力との関係を示したもので、両者は、ほぼ一致している。すなわち、 f_R/τ_R の値は大部分0.9~1.1の範囲にあり、平均0.96であって式(3)が成立することを実証している。次に、図三はすべり速度とラッピング抵抗力との関係の例であって、すべり速度は、実測流量から試料のレオロジー定数を用い、Buckingham式より計算したピングム流量を差し引き、管の断面積で除して求めており、ラッピング抵抗力は、式(3)から計算している。図三において両者は、直線関係を示し、試料と管壁との間は液体摩擦状態とみなして差し支えない。

なお、管内圧力の測定結果の例は図四に示すよう

表一 グラウトの配合およびコンシステンシー

配合番号	使用砂 (F.M.)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m³)				フロ	塑性粘度 η_{pl} (poise)	降伏値 τ_r (gf/cm²)
			砂セメント比	水	セメント	細骨材			
1		1.85	325	649	1201	191	48.5	0.53	
2	利根川砂	1.72	332	674	1162	201	34.6	0.52	
3		1.68	340	679	1141	210	30.0	0.50	
4	(1.70)	1.60	347	693	1109	221	28.4	0.43	
5	富士川砂	1.98	318	636	1259	197	48.7	0.44	
6		1.90	320	640	1200	200	48.0	0.45	
7	(2.75)	2.90	260	520	1560	163	8.47	0.17	
8	富士川砂	2.80	265	530	1484	171	75.0	0.80	
9		2.70	282	564	1410	189	50.0	0.60	
10	(2.90)	2.70	282	564	1410	189	50.0	0.60	

(注) セメントはN社製普通ポルトランドセメントであって、流動化剤はメラミンスルホン酸を主成分とするN社製のNおよびナフタリンスルホン酸とオキシカルボン酸縮合物を主成分とF社製のPを用いた。



図一 管内の圧力分布の測定例

3. 直管路によるグラウトの圧送実験

グラウトの粘性摩擦係数および付着力を決定するために、管半径1.0~1.5 cm, 長さ4~12 mの水平直管路により、数種の配合のグラウトを用い圧送実験を行った。

(1) 使用材料および配合

セメントはN社製普通ポルトランドセメントで、その物理試験成績および化学成分を表一に示す。

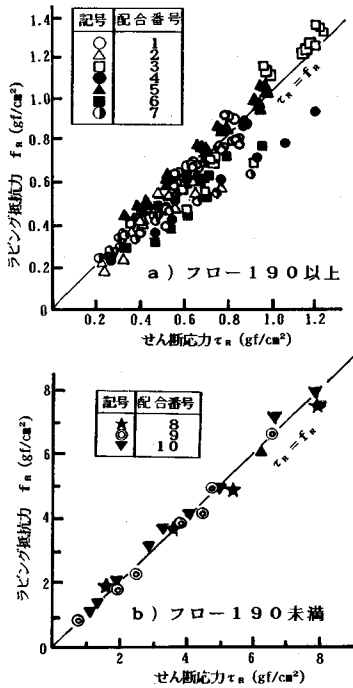
細骨材は富士川産の良質の川砂で、その物理的性質を表一に示す。

AE減水剤は、F社製のオキシカルボン酸塩を主成分とするもの、流動化剤は、F社製のナフタリンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩の共縮合物を主成分とするものである。

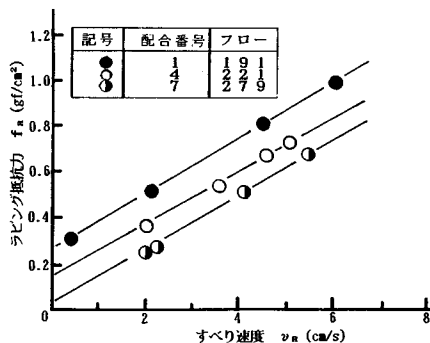
グラウトの配合は水セメント比を50%とし、砂セメント比を調整してフローを約220, 250および280としたもの、およびフロー約220のグラウトに流動化剤を後添加してフローを約250および280としたものの5種とした。これらの配合を表一に示す。

(2) 実験方法

グラウトは、1バッチの量を30 lとし、容量50 lの



図二 セン断応力とラビング抵抗力との関係



図三 すべり速度とラビング抵抗力との関係

あって、圧力の実測値と管出口の圧力を0 gf/cm²として描いた軸方向の圧力分布は、ほぼ直線となり、フロー約160以上のグラウトは粘性流体として取り扱ってよいことを示している。

表二 セメントの物理試験成績および化学成分

セメントの種類	比重	比表面積 (cm²/g)	物理試験成績			安定性	フロー
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		
普通セメント	3.15	3240	28.2	2-23	3-50	良	261
曲げ強さ (kgf/cm²)			圧縮強さ (kgf/cm²)				
	3日	7日	28日	3日	7日	28日	
	32	48	67	146	251	403	
化学成分 (%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	ig. los	insol
22.0	5.4	3.0	64.8	1.4	2.0	0.4	0.2

表三 細骨材の物理試験結果

種類	比重	吸水率 (%)	単位容積量 (kg/l)	実率 (%)	洗い試験 (%)	粗粒率 F.M.
富士川砂	2.62	2.80	1.63	63.0	2.8	2.90

表—4 グラウトの配合

配合番号	水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C	目 標 フロー	単 位 量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	AE減水剤 (l/m ³)	流動化剤 (l/m ³)
1	50	2.45	220	283	566	1389	1.132	—
2		1.97	250	319	638	1254	1.276	—
3		1.55	280	355	710	1099	1.420	—
4		2.45	250	283	566	1389	1.132	1.472
5		〃	280	〃	〃	〃	〃	2.943

パン型強制練りミキサにより3分間練りませ、ただちにフロー、二重円筒型回転粘度計(内円筒半径2.5cm,長さ10cm,外円筒半径5cm)および傾斜管³⁾によりコンシステンシーを測定するとともに圧送実験に供した。

なお、二重円筒型回転粘度計によるコンシステンシー試験は、多点法によって行った。また、傾斜管試験装置の諸元は、試料が硬練りであるため管半径を1.5cm,ホッパの上端内径を30cm,深さを27cmとするとともに、土木学会『フレッシュコンクリートの物性値測定法についてのガイドライン(案)』⁴⁾の推奨するものと同様な動水勾配を得るため管長を1.5mとしたものを用いた。

圧送管として、管半径1.0および1.5cm,長さ4,8および12mの塩化ビニール管,および管半径1.5cm,長さ12mの鋼管を用いた。圧送用ポンプは、2.(2)に述べた気圧注入式のものである。圧力勾配を約0.4,0.7,1.3,1.7および2.0gf/cm²/cmに変化させ流量および管内圧力を測定した。圧力測定位置は、管入口から10cmの位置とし容量2kgf/cm²のダイヤフラム型圧力計を装着した。

(3) 実験結果

グラウトのフロー、二重円筒型回転粘度計および傾斜管によるコンシステンシー試験結果を表—5に示す。表—5に示すように、流動化したグラウトのレオロジー定数は、同じフローを有する通常のグラウトに比べ、塑性粘度は若干大きく、降伏値は小となった。

表—6に圧送実験結果を示す。表—6には、実測した流量、二重円筒型回転粘度計によるレオロジー定数(表—5参照)を用いて計算したビンガム流量、すべり速度およびラビング抵抗力の計算値等が示されている。すべり速度とラビング抵抗力との関係の一例を図—5に示したが、両者は、よい直線関係を示している。これらの直線の勾配および縦軸上の切片をそれぞれ粘性摩擦係数および付着力として求め表—6に示した。表—6において、粘性摩擦係数は、グラウトの配合条件、使用した範囲で圧送管の材質、寸法等にかかわらず、ほぼ一定値を示し、0.11~0.14gfs/cm³,平均0.12gfs/cm³となっている。なお、2.(2)に述べたラビング抵抗測定装置の移動管の長さは、1mと短い、この実験結果(図—3参照)から計算した粘性摩擦係数も0.11~0.14gfs/cm³,平均

表—5 コンシステンシー測定結果

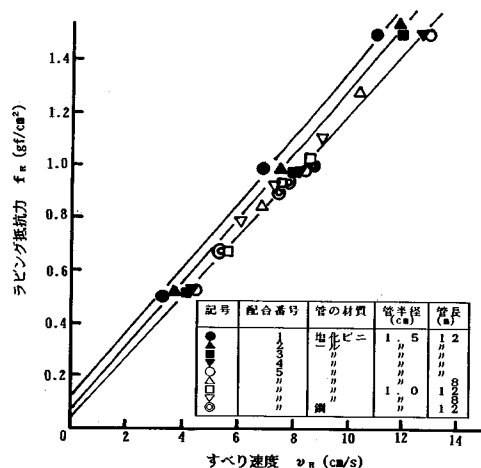
配合番号	フロー	回転粘度計		傾斜管試験装置							
		塑性粘度 τ _{0.1} (poise)	降伏値 τ _r (gf/cm ²)	θ = 5°		θ = 10°		θ = 15°		塑性粘度 τ _{0.1} (poise)	降伏値 τ _r (gf/cm ²)
		ΔP/g	Q ₀	ΔP/g	Q ₀	ΔP/g	Q ₀	ΔP/g	Q ₀		
1	210	30.3	0.40	0.574	26.4	0.766	46.7	0.952	69.6	28.1 (0.93)	0.38 (0.95)
2	246	21.8	0.28	0.562	32.1	0.749	54.8	0.931	77.9	22.3 (1.02)	0.27 (0.96)
3	278	14.6	0.18	0.547	53.6	0.730	84.4	0.908	115	15.1 (1.03)	0.18 (1.00)
4	248	25.0	0.19	0.570	44.5	0.761	67.8	0.945	90.5	24.2 (0.97)	0.18 (0.95)
5	275	18.0	0.14	0.565	56.4	0.754	84.2	0.937	111	18.6 (1.03)	0.15 (1.07)

注) θ:傾斜管の傾斜角度, ΔP/g:動水勾配, Q₀:変調流量(cm³/s),表中()の値は傾斜管試験によるレオロジー定数と二重円筒型回転粘度計による試験値との比を示す。

表—6 圧送実験結果

管の材質	管半径 (cm)	管長 (m)	配合番号	P ₀ /g	流速 v ₀ (cm ² /s)	ビンガム 流量 Q ₀ (cm ³ /s)	実測 流量 Q ₁ (cm ³ /s)	測定 流量 Q ₂ (cm ³ /s)	ビンガム 流量 Q ₃ (cm ³ /s)	すべり 速度 v _s (cm/s)	ラビング 抵抗 力F _r (gf/cm ²)	粘性摩擦 係数 α(gfs/cm ³)	付着力 A (gf/cm ²)
塩化 ビニ ール	1.5	12	1	0.73	1.07	6.62	29.8	0.22	3.28	0.53	0.115	0.125	
				1.30	0.62	38.7	87.3	0.44	6.88	0.98			
		2.00	0.40	83.2	162	0.51	11.8	1.50					
		8	4	0.73	0.80	19.8	46.5	0.43	3.78	0.53	0.121	0.068	
				1.30	0.43	72.0	125	0.58	7.50	0.98			
		2.00	0.28	134	218	0.82	11.8	1.50					
	4	12	0.73	0.51	51.2	80.4	0.64	4.12	0.53	0.120	0.029		
			1.30	0.28	131	187	0.70	7.88	0.98				
	2.00	0.18	224	311	0.70	12.3	1.50						
	1.0	12	0.73	0.54	22.7	58.8	0.47	4.40	0.53	0.144	0.033		
			1.30	0.28	72.8	131	0.55	8.26	0.98				
	2.00	0.19	126	217	0.58	12.9	1.50						
8	4	0.73	0.40	49.0	80.8	0.61	4.90	0.53	0.116	0.014			
		1.30	0.22	114	173	0.66	8.29	0.98					
2.00	0.14	190	290	0.68	12.8	1.50							
1.5	12	1.15	0.24	97.7	141	0.69	7.13	0.86	0.117	0.028			
		1.84	0.15	172	255	0.67	11.6	1.38					
2.35	0.12	228	332	0.69	14.8	1.76							
1.0	12	1.13	0.25	95.5	144	0.66	6.83	0.85	0.119	0.035			
		1.70	0.15	157	231	0.68	10.4	1.28					
2.38	0.12	237	335	0.69	14.7	1.79							
1.5	8	1.58	0.18	25.8	45.1	0.57	6.12	0.79	0.123	0.037			
		1.85	0.15	31.8	54.6	0.58	7.26	0.93					
2.29	0.12	41.0	69.3	0.59	9.01	1.14							
1.0	12	1.20	0.23	17.7	27.2	0.65	3.02	0.60	0.115	0.253			
		1.60	0.18	26.3	41.2	0.64	4.76	0.80					
2.08	0.13	36.5	58.0	0.63	6.84	1.04							
鋼	12	1.36	0.21	21.1	38.4	0.55	5.49	0.68	0.119	0.027			
		1.86	0.15	31.8	55.7	0.57	7.59	0.93					
2.08	0.13	36.5	63.3	0.57	8.51	1.04							

注) P₀/g:圧力勾配(gf/cm²/cm)



図—5 すべり速度とラビング抵抗力との関係

0.12gfs/cm³とほぼ同様な値であった。次に付着力は、グラウトのコンシステンシーにより0.01~0.25gf/cm²に変化し2.(2)の実験から求めた付着力も併せて、付着力と降伏値との関係を図示すれば、図—6のように両

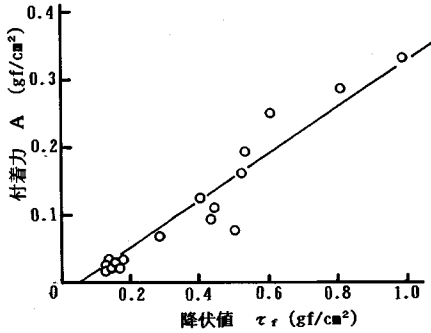


図-6 降伏値と付着力との関係

者の間に1次比例関係が認められ、その関係は、次式で与えられる。

$$A = 0.35 \tau_r - 0.02 \dots \dots \dots (5)$$

したがって、フロー 220~280 程度のグラウトの場合、その物性値として塑性粘度および降伏値が与えられれば、管半径 1.0~1.5 cm の範囲で、粘性摩擦係数を 0.12 gfs/cm² とし、付着力は式 (5) から推定し、式 (4) および式 (1) を用い、水平直管路における流量を予測することができる。

なお、表-5 の傾斜管試験における流量測定値も管壁と試料間のすべりを含んでいる。上記のようにグラウトの配合にかかわらず粘性摩擦係数 α は一定とみなせるから、 $\alpha = 0.12 \text{ gfs/cm}^2$ と仮定し、測定値を代入した3個の式 (1) を連立に解き、塑性粘度および降伏値を求め表-5 の右側欄に示した。これらの値は、二重円筒型回転粘度計による試験値とよく一致しており、両者の比は、塑性粘度の場合 0.93~1.03、降伏値の場合 0.95~1.07 となっている。したがって、流動性の大きいグラウトの粘度測定法として提案した、傾斜管試験方法は装置各部の寸法を適切に選定することによりフロー 220~280 程度の流動性があまり大きくないグラウトにも適用でき、それらの塑性粘度および降伏値を簡易に試験できると思われる。

4. 曲がり管による圧力損失

曲がり管による圧力損失を検討するために、短い水平直管に、数種の形状および寸法の曲がり管を水平、ならびに鉛直に接続し、グラウトの圧送実験を行った。使用材料およびグラウトの配合は、3.(1)の実験で用いたものと同様である。

(1) 実験方法

グラウトの練りませおよびコンシステンシーの測定方法は、3.(2)に述べたと同様である。

圧送管は、管半径 1.0~1.5 cm の塩化ビニール管とし、曲がり管を水平に設置した場合(水平

表-7 曲がり管の諸元

管半径 R (cm)	曲率半径 Rb (cm)	曲り管の実長 (cm)		
		$\phi=90^\circ$	$\phi=60^\circ$	$\phi=30^\circ$
1.5	10	(23.8)	-	-
	20	(37.1)	(31.6)	(23.7)
	30	(50.7)	-	-
1.0	30	(58.7)	-	-
	30	(88.7)	-	-

注) ϕ : 曲げ角度、()内は曲り管の両端にあるそれぞれ長さ5cmの直管部を加算した値を示す。

曲がり管とよぶ)は、長さ 2 m の水平直管 2 本の中間に表-7 に示す曲率半径 10 R~30 R (R: 管半径)、曲げ角度 30~90 度とした 6 種の曲がり管を接続した。曲がり管を鉛直上向に設置した場合(鉛直曲がり管とよぶ)は、長さ 2 m の水平直管の先端に表-7 に示す曲げ角度 90 度の 4 種の曲がり管を鉛直上向に接続し、さらに曲がり管出口に長さ 1.0 および 1.5 m の直管を鉛直に接続した。

圧送圧力を管の中心軸の長さで除して求めた見掛けの圧力勾配を、水平曲がり管の場合 1.0, 1.5, 2.0 および 2.5 gf/cm²/cm、鉛直曲がり管の場合、2.0, 2.5, 3.0 および 3.5 gf/cm²/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、直管の入口、ならびに曲がり管の入口および出口から 15 cm 外側の位置とし、容量 2 kgf/cm² のダイヤフラム型圧力計を装着した。

(2) 実験結果

a) 水平曲がり管の場合

表-8 および表-9 に、水平曲がり管における流量および圧力測定結果、曲がり管の直管換算長ならびに曲がり管による圧力損失の例として、フロー 280 の場合を示す。表-8 において、実測流量は管路全体を水平直管と仮定し式 (1) より求めた計算流量より小になっており、これは曲がり管による圧力損失に起因する。曲がり管による圧力損失は水理学の分野においても、Richter⁵⁾、Weisbach⁶⁾ 等の曲がり管の入口および出口におけるエネルギー式を基盤とした実験式が提示されており、理論

表-8 水平曲がり管における流量測定結果および直管換算長

管半径 R (cm)	曲率半径 Rb (cm)	曲げ角度 ϕ (度)	管路の実長 l (m)	圧送圧力 P_0 (gf/cm ²)	見掛けの圧力勾配 P_0/l (gf/cm ² /cm)	計算流量 Q (cm ³ /s)	実測流量 Q_0 (cm ³ /s)	有効圧力勾配 P_0/l (gf/cm ² /cm)	直管換算距離 l' (m)	曲り管の直管換算長 l_b (m)
1.5	45	90	4.81	721	1.5	203	121	0.968	7.45	2.64
				961	2.0	280	179	1.343	7.16	2.35
				1262	2.5	357	252	1.813	6.83	1.82
	30	90	4.57	686	1.5	203	115	0.927	7.39	2.82
				914	2.0	280	171	1.293	7.09	2.46
				1143	2.5	357	230	1.673	6.83	2.26
30	60	4.41	662	1.5	203	127	1.003	6.60	2.19	
			892	2.0	280	180	1.413	6.24	1.83	
			1104	2.5	357	234	1.826	6.04	1.63	
30	30	4.26	639	1.5	203	145	1.123	5.69	1.43	
			851	2.0	280	213	1.463	5.45	1.19	
			1064	2.5	357	275	1.964	5.42	1.16	
1.0	30	90	4.34	651	1.5	203	107	0.876	7.42	3.09
				884	2.0	280	162	1.231	7.05	2.71
				1084	2.5	357	213	1.561	6.95	2.61
1.0	30	90	4.47	671	1.5	44.1	25.4	0.963	6.79	2.32
				894	2.0	61.8	38.9	1.350	6.62	2.15
				1118	2.5	79.0	53.8	1.777	6.29	1.82

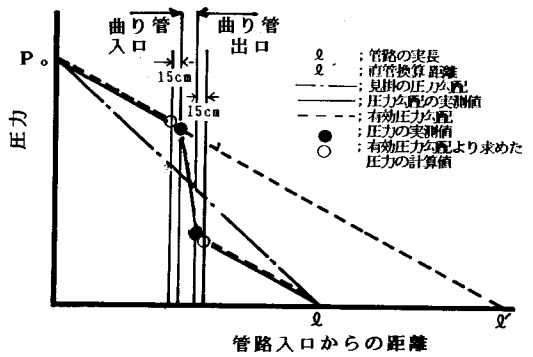
注) 塑性粘度: 18.0 poise、降伏値: 0.14 gf/cm²

表一 水平曲がり管の管内圧力の測定結果および圧力損失

(フロー: 280)

管半径 R (cm)	曲率半径 R _b (cm)	曲げ角度 φ (度)	管路の長さ L (m)	圧送圧力 P ₀ (gf/cm ²)	実測流量 Q _a (cm ³ /s)	有効圧力 勾配 P ₀ /L (gf/cm ² /cm)	曲り管の入口および出口 (gf/cm ²)				曲り管の 圧力損失 ΔP _{bc} = P ₁ - P ₂ (gf/cm ²)
							P ₁		P ₂		
							P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	
45	90	4.81	721	121	0.968	524	199	523	196	325	
			914	159	1.343	711	265	886	275	411	
30	90	4.57	886	115	0.927	510	177	496	190	306	
			914	159	1.343	625	261	939	593	469	
1.5	30	60	4.41	862	127	1.003	504	193	456	206	250
				882	190	1.413	616	352	730	374	358
30	30	4.26	4.26	639	145	1.123	426	214	499	230	178
				851	213	1.563	374	301	661	402	210
15	90	4.34	4.34	651	107	0.876	486	147	471	180	291
				867	162	1.231	635	234	616	252	364
1.0	30	90	4.47	671	25.4	0.963	452	200	474	197	277
				894	38.9	1.356	621	260	617	277	340
				1116	53.8	1.777	741	374	754	390	

注) P₁, P₂: 曲り管の入口および出口から15cm外側における圧力の実測値, P₁', P₂' : 有効圧力勾配を用いて算出した曲り管入口および出口の圧力の実測値, 塑性粘度: 18.0 poise, 降伏値: 0.14 gf/cm²



図一 曲がり管を含む管路内の圧力分布モデル

式はない。本研究においても、流量および管内圧力の実験値を用いて検討することとした。

曲がり管による圧力損失は、図一を参照して曲がり管の入口および出口近傍の圧力測定値から求める方法と、実測流量を式(1)に代入して求めた圧力勾配を有効圧力勾配とし、管路入口で圧送圧力、管路出口で圧力を0 gf/cm²として、これらを通る有効圧力勾配線を用い、曲がり管の入口および出口の圧力を計算して、この差として求める方法とがあるが、測定値の安定性を重視し、後者から求めることとした。

表一には圧力測定結果、実測流量を用いて算出した有効圧力勾配、これを用いて求めた曲がり管の入口および出口の圧力ならびに圧力損失が示されている。表一において、曲がり管による圧力損失は曲がり管の入口または出口の圧力、管半径、曲げ角度ならびにグラウトの塑性粘度によって相違し、降伏値の影響は比較的小なく、また、管の曲率半径の影響はほとんど認められない、したがって、水平曲がり管による圧力損失を表わす実験式は次式となる。

$$\Delta P_{bc} = \beta P_0^a R^b \phi^c \eta_{pl}^d \dots \dots \dots (6)$$

ここに、ΔP_{bc}: 曲がり管による圧力損失 (gf/cm²), P₂: 曲がり管出口の圧力 (gf/cm²), φ: 曲げ角度 (度), β, a, b, c, d: 実験定数, β = 2.9, a = 0.6, b = 0.1, c = -0.005, d = 0.5

式(6)において曲がり管出口の圧力 P₂ を用いたのは配管計画を行う際に式(6)を便利に適用することを配慮したためである。

以上のように式(6)を用いて、配管条件および試料のコンシステンシーから圧力損失を推定できるが、

この方法はやや繁雑であるので、曲がり管の直管換算長を用いるのが実用的と思われる。曲がり管の直管換算長は圧送圧力を有効圧力勾配で除して求めた直管換算距離から直管部の長さを差し引いたもので表わされる(後述の式(8)において h=0 として計算する)。この手順により求めた直管換算長の実験値を表一に併記した。表一において、曲がり管の直管換算長は主として管半径、曲げ角度および試料のコンシステンシーによって相違し、圧送圧力および曲率半径の影響は比較的小であった。したがって、水平曲がり管の直管換算長の実用式として次式が提案できる。

$$\left. \begin{aligned} L_{90} &= 2 \times 10^5 R^{0.2} FL^{-2} \\ L_{bc} &= L_{90} - 0.03(90 - \phi) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、L₉₀: 曲げ角度 90 度の曲がり管の直管換算長 (m), L_{bc}: 曲げ角度 φ の曲がり管の直管換算長 (m), FL: フロー

b) 鉛直曲がり管の場合

表一〇および表一一に、鉛直曲がり管における流量および圧力測定結果、直管換算長、ならびに管路にお

表一〇 鉛直曲がり管内の圧力測定結果および圧力損失

(曲り管: R=1.5cm, φ=90度, フロー: 280)

曲率半径 R _b (cm)	鉛直管長 (m)	圧送圧力 P ₀ (gf/cm ²)	実測流量 Q _a (cm ³ /s)	有効圧力 勾配 P ₀ /L (gf/cm ² /cm)	管内圧力の実験値 (gf/cm ²)				P ₀₁ ' (gf/cm ²)	P ₀₂ ' (gf/cm ²)	圧力損失 ΔP _{bc} = P ₁ ' - P ₂ ' (gf/cm ²)	式(6)に よる圧力 損失の推 定値 ΔP _{bc} (gf/cm ²)	比 = ΔP _{bc} / ΔP _{bc}
					P ₁		P ₂						
					P ₁	P ₂	P ₀₁	P ₀₂					
15	1.0	884	93.3	0.873	718	284	450	83	477	92	385	165	0.42
	[1.2]	1061	138	1.226	847	322	579	121	562	118	444	220	0.54
	1.5	959	85.2	0.783	810	423	431	111	415	121	294	142	0.48
30	1.0	1014	190	1.076	944	456	681	171	577	117	357	220	0.54
	[1.35]	1250	210	1.590	784	345	647	144	623	167	456	279	0.58
	1.5	1014	95.5	0.874	852	431	439	119	374	135	239	122	0.53
45	1.0	772	64.3	0.645	676	264	341	63	406	68	237	289	1.22
	[1.5]	1056	107	1.076	755	281	420	80	406	95	311	360	1.15
	1.5	1007	89.4	0.867	906	434	462	127	503	124	379	449	1.16
	[2.0]	1507	155	1.653	1209	545	763	231	722	256	464	582	1.26

注) P₁, P₂: それぞれ曲り管の入口及出口から15cm外側における圧力測定値, P₀₁, P₀₂: それぞれ P₁, P₂ より求めた曲り管の入口及出口の圧力の実験値からそれぞれの位置より管路の出口までの水頭差を減じた圧力, P₀₁', P₀₂' : 有効圧力勾配を用いて算出した曲り管の入口及出口の圧力の実験値, 塑性粘度=18.0 poise, 降伏値=0.14 gf/cm²

表一11 鉛直曲がり管における流量測定結果および直管換算長
(曲り管: R=1.5cm, φ=90度, フロー: 280)

曲率半径 R _c (cm)	鉛直管長 (m)	圧送 圧力 P ₀ (gf/cm ²)	見掛けの 力勾配 P ₀ /l (gf/cm ² /cm)	管径 半径 r _r (cm)	計算 流量 Q _c (cm ³ /s)	実測 流量 Q _a (cm ³ /s)	有効圧 力勾配 P ₀ /l' (gf/cm ² /cm)	管長換 算距離 L _b (m)	直管換 算長の 実験値 L _b (m)	比 = L _b c / L _b
15	1.0	884	2.5	0.32	350	99.3	0.873	7.08	3.52	0.86
		1051	3.0	0.25	427	138	1.192	7.04	3.50	0.87
	[1.2]	1238	3.5	0.20	504	186	1.495	6.78	3.22	0.84
	1.5	939	2.0	0.38	350	85.2	0.783	7.36	3.52	0.86
		1151	2.5	0.28	427	131	1.076	7.14	3.30	0.82
	[1.7]	1343	3.5	0.20	504	180	1.395	6.86	3.02	1.02
30	1.0	893	2.5	0.31	350	103	0.886	6.81	3.04	1.00
		1071	3.0	0.24	427	142	1.215	6.24	2.77	1.10
	[1.35]	1250	3.5	0.18	504	210	1.590	5.97	2.40	1.27
	1.5	1014	2.5	0.32	350	99.5	0.874	6.92	2.80	1.07
		1281	3.0	0.25	427	135	1.204	6.55	2.74	1.11
	[1.85]	1425	3.5	0.18	504	210	1.589	6.37	2.30	1.32
45	1.0	772	2.5	0.43	350	64.3	0.645	6.77	2.96	1.03
		956	3.0	0.31	427	104	0.902	6.55	2.74	1.11
	[1.5]	1080	3.5	0.24	504	147	1.179	6.32	2.51	1.21
	1.5	1087	2.5	0.32	350	98.4	0.887	7.16	2.85	1.07
		1282	3.0	0.25	427	115	1.231	6.87	2.56	1.19
	[2.0]	1507	3.5	0.17	504	220	1.653	6.42	2.11	1.44

注) L_bc: 式(7)より求めた曲がり管の直管換算長の計算値(3.04m)、試料の単位容積質量: 2.231 kg/l、塑性粘度: 18.0 poise、降伏値: 0.14 gf/cm²

る高低差による影響を除いた曲がり管の圧力損失(以降、湾曲流による圧力損失とよぶ)についてフロー 280 の場合の例を示した。

鉛直曲がり管における圧力損失を湾曲流による圧力損失と管路の高低差すなわち試料の自重による圧力損失(水頭差)との和と考え、圧送圧力から後者を差し引いた後、水平曲がり管の場合と同様にして湾曲流による圧力損失を求め、式(6)による推定値とともに表一10に示した。

表一10において湾曲流による圧力損失の実験値は一部の例外的な値を除き式(6)による推定値とほぼ一致し、両者の比は0.91~1.16, 平均1.01となっている。

直管換算長は圧送圧力から管路の高低差による圧力損失を減じ、これを有効圧力勾配で除した値から直管部の長さを差し引いたもので式(8)で表わされる。

$$L_b = 0.01 \left[\frac{P_0 - \rho gh}{(P_0/l')} - S \right] \dots\dots\dots (8)$$

ここに、L_b: 湾曲流の直管換算長 (m), P₀: 圧送圧力 (gf/cm²), P₀/l': 有効圧力勾配 (gf/cm²/cm), ρg: 試料の単位容積重量 (gf/cm³), h: 高低差 (cm), S: 直管部の長さ (cm)

表一11において直管換算長の実験値と式(7)による推定値とはほぼ一致し、両者の比は大部分0.86~1.12, 平均1.03となっており、鉛直曲がり管の直管換算長は管路の高低差を考慮することにより水平曲がり管と同様に取り扱うことができる。

5. グラウト用パイプラインの配管計画について

水平および鉛直曲がり管を含む管路内のグラウトの流れに関する解析結果を用いて、任意の配管および配合条件のグラウトの圧送時における流量、または、圧送圧力の計算手順を整理し、グラウト圧送用パイプラインの配管計画の方法を示す。この計算手順における曲がり管の圧力損失は4.(2)で述べたように圧力損失の実験式を

用いる方法と直管換算長を用いる方法とがあり、推定値の精度は前者のほうが良好であるが、実用性を考慮し後者を用いることとした。

1) 所定の圧送圧力に対応する流量を求める場合

i) グラウトの塑性粘度, 降伏値, 粘性摩擦係数および付着力を定める。

塑性粘度および降伏値は二重円筒型回転粘度計, 傾斜管試験装置等によって実測した値を用いるのが望ましいが, 塑性粘度は粘度式, 降伏値はフローとの関係式から推定することもできる。すなわち, グラウトの塑性粘度は菊川¹⁾によって提案されている式(9)より求める。

$$\eta_{pl} = \eta_0 \eta_{re} = \eta_0 \left(1 - \frac{V}{C} \right)^{-(K_1 \mu + K_2)} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、η_{pl}: グラウトの塑性粘度 (poise), η₀: セメントペーストの塑性粘度 (poise), η_{re}: 相対粘度, V: 細骨材の体積濃度, μ: 細骨材の粗粒率, C: 細骨材の実績率, K₁, K₂: それぞれ実験定数 (K₁=-0.51, K₂=3.28)

降伏値は、フローと密接な関係があることが認められているので⁹⁾, 3.(3)の実験より得られた降伏値とフローとの関係を示す次式より計算する。

$$\tau_y = 2.7 \times 10^7 FL^{-3.4} \dots\dots\dots (10)$$

付着力は式(5)から求め、粘性摩擦係数は、0.12 gfs/cm³を用いてよい。

ii) 管路にあるすべての曲がり管について管半径, 曲げ角度およびグラウトのフローを用いて式(7)より直管換算長を求める。

iii) 直管換算長の総和に直管部の長さを加えた直管換算距離を用いて式(1)より所定の圧力に対応する流量を計算する。この場合、管路に高低差があるときはこれに相当する圧力損失を差し引いた値を圧送圧力として計算する。

2) 所要の流量を得るための圧送圧力を求める場合

i) グラウトの塑性粘度, 降伏値, 粘性摩擦係数および付着力を1) 流量を求める場合と同様にして定める。

ii) 式(1)に所要の流量を代入し、有効圧力勾配を求める。

iii) 曲がり管の直管換算長を1)と同様にして求める。

iv) 直管換算長の総和に直管部の長さを加えて直管換算距離とし、これに有効圧力勾配を乗じて圧送圧力を求める。ただし、管路に高低差がある場合は、これに相当する圧力損失を加算して圧送圧力とする。

6. 結 論

グラウト圧送工事の合理化、ならびにコンクリートの管内流動の基礎資料を得ることを目的として、フロー220~280のグラウトモルタルを用い、直管路における

流れの機構，ならびに水平および鉛直曲がり管における圧力損失について検討した．この研究の範囲内で得られた成果を要約すれば次のとおりである．

(1) フロー 220～280 のグラウトモルタルの管内流動は管壁にすべりを伴う塑性流れとなる．したがって，流量は，Buckingham の塑性流動式から計算される流量にすべりによる移動量を加算したものとなる．すべりによる移動量は液体摩擦の概念を導入し，管壁と試料間のラビング抵抗力がすべり速度に比例するとして求めることができる．

(2) 直管路によるグラウトの圧送実験の結果，グラウトと管壁間の粘性摩擦係数は，本実験に用いた，管の諸元および材質ならびにグラウトの配合条件において 0.11～0.14 gfs/cm³，平均 0.12 gfs/cm³ であって，ほぼ一定値を示した．また，付着力は降伏値と 1 次比例の関係にあることが認められた．

(3) 管の湾曲部におけるグラウトの流れの機構を解明することはきわめて困難であるため，曲がり管による圧力損失を実験的に検討した．すなわち，曲がり管の曲率半径を管半径の 10～30 倍，曲げ角度を 30～90 度とした水平および鉛直曲がり管を用いて圧送実験を行い，水平曲がり管に対し管半径，曲げ角度，グラウトの塑性粘度および曲がり管出口における圧力を関数とした圧力損失の実験式を提示した．また，現場への適用を考慮し，曲がり管の直管換算長を表わす実用式を提案した．鉛直曲がり管の圧力損失および直管換算長は，管路の高低差に相当する圧力損失を考慮することにより，水平曲がり

管と同様に扱うことができる．

(4) グラウト用パイプラインの配管計画において所定の圧送圧力に対応する流量または，所要の流量を得るための圧送圧力は，曲がり管による圧力損失を直管換算長に変換し，グラウトのレオロジー定数を用い，管壁にすべりを伴う管内流動式より算定することができる．

参 考 文 献

- 1) 村田・鈴木：グラウトの管内流動に関する研究，土木学会論文集，No. 354/V-2，pp. 99～108，1985年2月．
- 2) 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，土木学会論文集，No. 284，pp. 117～125，1979年4月．
- 3) 村田・鈴木：傾斜管試験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年3月．
- 4) 土木学会：フレッシュコンクリートの物性値測定法についてのガイドライン(案)「傾斜管による測定法」，『フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム』論文集，pp. 196～198，1968年3月．
- 5) 本間：標準水理学，丸善，p. 85．
- 6) 本間：応用水理学(上巻)，丸善，p. 78．
- 7) 菊川：粘度式によるコンクリートの粘度の推定について，第38回土木学会年次学術講演会概要集，pp. 171～172，1983年9月．
- 8) 村田・鈴木・田中：繰り返し衝撃を受けるモルタルのレオロジー，セメント技術年報，Vol. 37，pp. 225～228，1983年．

(1987.1.20・受付)