

東京都立大学 正会員 村田二郎

〇 鈴木一雄

1. まえがき

グラウトモルタルの施工の合理化を計る上で、管路における流量の予測を行うことはきわめて重要である。本研究はグラウトモルタルの管内流動をレオロジ的に解析し、直管における流量の推定式を提示するとともに、曲り管による影響についても検討したものである。

2. グラウトモルタルの配合

実験に使用したグラウトモルタルの配合は表-1に示すようになって、P-ロート流下時間18秒を基準とし、16秒および20秒についても実験を行なった。

3. グラウトモルタルの管内流動解析

グラウトモルタルをビンガム体と仮定すると、管内の流量式は式1のBuckingham-Reiner式で与えられる。

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \ell \eta_p} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_0}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{R} \right)^4 \right\} \quad (1)$$

ここに、 Q ；単位時間当りの流量(cm^3/sec) R ；管の半径(cm) ΔP ；圧力差(kg/cm^2) ℓ ；管長(cm) η_p ；塑性粘度(Poise) τ_0 ；栓流半径($=2\ell\tau_0/\Delta P$) τ_f ；降伏値(kg/cm^2)

実験は図-1に示す傾斜管試験装置により管径20mmの塩化ビニル管を

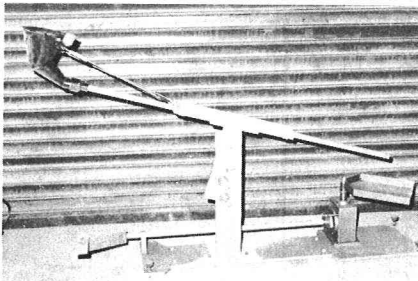


図-1 傾斜管試験装置
を用い、管長を50, 100, 150, 200および300cm、傾斜角を5°, 10°, 15°, 30°, 45° および60°に変化させ流量の測定を行なった。流量の測定結果を図-2に示す。図-2において実測流量と式-1による計算流量は圧力勾配が1.0以下の場合、大むね一致している。圧力勾配がこれより大きくなると実測流量は計算流量を上まわる。これはBuckinghamが指摘するように管内壁でグラウトモルタルがスベリを生じたためと思われる。実際の工事における圧力勾配は通常1.0以下であるが、1.5程度となることもあるので、これを考慮して式-2のような補正式を提示する。

表-2. α および β の値

この場合、式中の α および β の値を定めるにあたり、圧力勾配が2.0以下の測定値を用い、かつ、摩擦損失のごく少ない範囲として管長を150cm以下のものを用いた。 α および β の値を表-2に示す。

P-ロート流下時間(秒)	α	β
18.0	0.38	4.86
20.2	0.35	5.11
平均値	—	4.99

なお、圧力勾配が1.0以上の場合でもビンガム体としてのレイノルズ数は1.5~28.4程度でグラウトモルタルの管路内の流れは層流状態にあるといえる。

表-1 グラウトの配合

P-ロート流下時間(秒)	W/C+F (%)	F/C+F (%)	S/C+F (%)	Ad/C+F (%)	Al/C+F (%)	単位容積重 (kg/L)	降伏値 (kg/cm ²)	塑性粘度 (Poise)
16.1			1.10			2.04	0.17	4.65
18.0	50	20	1.18	0.25	0.015	2.04	0.16	5.78
20.2			1.26			2.05	0.18	7.22

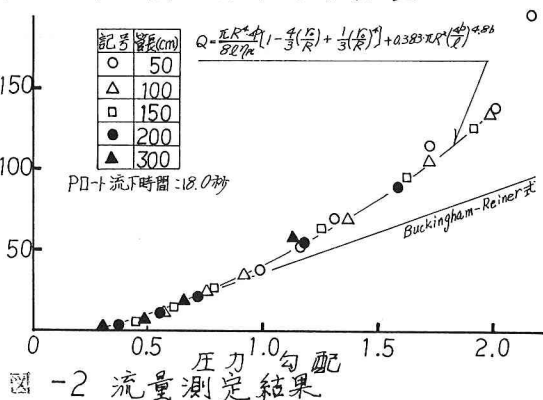


図-2 流量測定結果

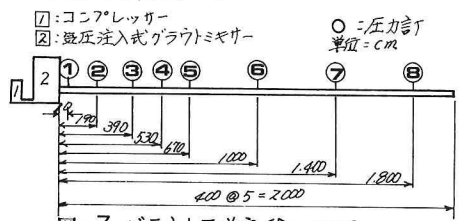


図-3. グラウト圧送実験の概要

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 l \eta \mu} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right] + \pi R^2 \alpha \left(\frac{\Delta P}{l} \right)^{\beta} \quad (2)$$

ここに、 α 、 β ；コンシステンシーによって決まる定数で、スリップ係数と呼ぶ、 β ；定数

4. グラウトモルタルのポンプ圧送

グラウトモルタルの圧送実験の概要は図-3に示すようであって管径20mmの塩化ビニール管を用い管長を4, 8, 12, および20mとして流量の測定を行なった。また、管内の圧力分布を図-3に示す各点に容量2kg/cm²、感度0.2% F.S.の圧力計をセットし測定を行なった。圧力分布の測定結果を図-4に示す。図-4において圧力分布は直線で示され管の入口から10cmの位置では圧送圧力から予想される値とほぼ一致し、管出口においては0となった。したがって層流の助走区間は10cm以下で管長に比べ十分小さく無視できると考えられる。各管長における流量測定結果を表-3に示す。表-3において実測流量は式-1による計算流量と圧力勾配が1.0以下でよく一致しているが、圧力勾配が1.0以上になると実測流量は計算流量を大きく上まわる。これに比べ式-2による流量の補正値は圧力勾配の相違にかかわらず実測流量とよく一致した。

実際のグラウトモルタルの圧送時における圧力勾配は1.0以下が多く、この圧力勾配の範囲ではスベリによる流量はきわめて小さく無視できるので式-1の Buckingham-Reiner 式を用いて流量の計算をして良い。これらのことは管長20m 程度の場合モルタルと管壁との間で摩擦による圧力損失が十分小さいことを示すものであって管長が長くなれば摩擦損失の影響を考慮する必要があるものと予想される。

曲り管による影響について検討するため、長さ2mの直管2本の中間に、曲り角90°, 120°および150°の曲り管をセットし、管の曲線部の始点および終点からそれぞれ15cm、外側に圧力計を設置し圧力の測定を行なった。圧力測定結果を図-5に示す。図-5において圧力分布を示す直線は曲り管を直線と考え、その管内の圧力分布が線型を示すと、仮定し描いたものである。曲り管入口の圧力測定値はこの直線と一致していることから、曲り管出口の圧力測定値と直線との差が曲り管による圧力損失を示すものと考えられる。なお、圧力損失に相当する水平距離から30cmを差し引いた値(L')を曲り管の長さ(L)で除し直管への換算係数($\alpha = L'/L$)としこれを表-4に示した。

曲り管による影響について検討するため、長さ2mの直管2本の中間に、曲り角90°, 120°および150°の曲り管をセットし、管の曲線部の始点および終点からそれぞれ15cm、外側に圧力計を設置し圧力の測定を行なった。圧力測定結果を図-5に示す。図-5において圧力分布を示す直線は曲り管を直線と考え、その管内の圧力分布が線型を示すと、仮定し描いたものである。曲り管入口の圧力測定値はこの直線と一致していることから、曲り管出口の圧力測定値と直線との差が曲り管による圧力損失を示すものと考えられる。なお、圧力損失に相当する水平距離から30cmを差し引いた値(L')を曲り管の長さ(L)で除し直管への換算係数($\alpha = L'/L$)としこれを表-4に示した。

図-5において圧力分布を示す直線は曲り管を直線と考え、その管内の圧力分布が線型を示すと、仮定し描いたものである。曲り管入口の圧力測定値はこの直線と一致していることから、曲り管出口の圧力測定値と直線との差が曲り管による圧力損失を示すものと考えられる。なお、圧力損失に相当する水平距離から30cmを差し引いた値(L')を曲り管の長さ(L)で除し直管への換算係数($\alpha = L'/L$)としこれを表-4に示した。

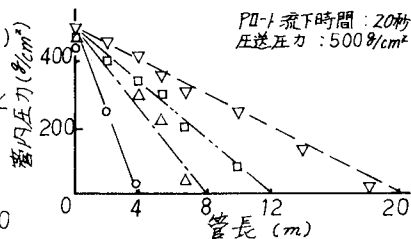


図-4. 管内の圧力分布の例
表-3 流量測定結果 (PD-1 流下時間: 18 sec)

管長 (m)	圧送圧力 (kg/cm²)	圧力勾配 (kg/cm²)	実測流量 Q _a (cc/sec)	Q _{B.R.} (cc/sec)	Q _a /Q _{B.R.}	Q (cc/sec)	Q'/Q _a
4	0.50	1.250	59.1	55.5	0.94	59.4	1.01
	0.75	1.875	124	97.1	0.79	130	1.05
	1.00	2.500	272	139	0.51	288	1.06
8	0.50	0.625	149	14.6	0.99	14.7	0.99
	0.75	0.938	34.7	34.8	1.01	35.7	1.03
	1.00	1.250	56.8	55.5	0.98	59.4	1.05
12	0.50	0.417	283	2.83	1.00	2.84	1.01
	0.75	0.625	14.7	14.6	0.99	14.7	1.00
	1.00	0.833	27.5	27.9	1.02	28.4	1.03
20	0.50	0.250	2.41	0	—	0	—
	0.75	0.375	2.77	1.16	0.47	1.16	0.42
	1.00	0.500	7.14	7.10	0.99	7.13	1.00

Q_{B.R.}: Buckingham-Reiner式による流量、Q': 式-2による計算流量

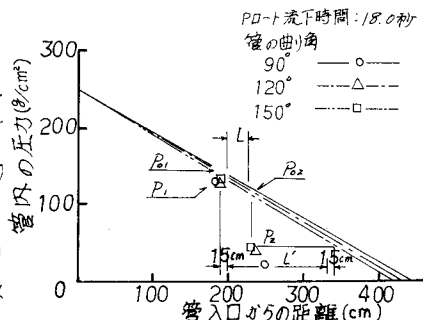


図-5. 曲り管による圧力損失

表-4 曲り管の影響

P0-1 流下 時間 (秒)	曲り管の 角 度 (度)	曲り管入口の圧力 (kg/cm^2)		曲り管出口の圧力 (kg/cm^2)			圧力損失 P_0-P_2 (kg/cm^2)	直管換 算長 L (cm)	換算 係数 $\alpha=1/2$
		P_1	P_1/P_0	P_2	P_2	P_1/P_2			
16.1	90	146	1.03	52.0	108	0.48	55.6	130	4.14
	120	140	1.00	58.0	110	0.53	52.2	111	5.31
	150	139	1.02	68.5	113	0.61	44.5	85.4	8.13
18.0	90	114	0.80	22.7	108	0.21	84.9	181	5.76
	120	131	0.93	40.5	110	0.37	69.7	141	6.75
	150	129	0.94	54.0	113	0.48	59.0	110	10.5
20.2	90	131	0.92	41.5	108	0.39	66.1	148	4.71
	120	136	0.97	36.9	110	0.33	73.3	147	7.03
	150	137	1.00	44.7	113	0.41	68.3	125	11.9

曲り管入口の圧力 P₀ (kg/cm²)

曲り管の長さ L (cm)

L': 曲り管入口の曲率半径
P₂: 曲り管出口の圧力 (kg/cm²)

90° = 142
120° = 140
150° = 138

90° = 31.4
120° = 20.9
150° = 10.5