

PCグラウトの充填性能評価に関する一考察

水上 伸介*1・出雲 淳一*2

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PCと呼ぶ）用グラウトは、PC鋼材とシースとの間の空隙を埋めてコンクリートと一体化するとともに、PC鋼材の腐食を防ぐ働きをしており、PCの強度や耐久性の面で重要な役割を果たしている。しかし、既存の構造物の調査において、グラウトの充填不良による構造物の劣化事例が報告^{1), 2)}されており、注入が確実に行われるようなPCグラウト材の開発および施工方法の確立が必要とされている。

筆者らは、グラウトの充填性を可視的に評価する試験装置を提案し、グラウトの充填性に影響を及ぼす要因についてこれまで検討を行ってきた³⁾。その結果、筆者らが行ってきた実験ならびに既往の研究^{4), 5)}から、グラウトがシース内に充填される条件は、注入時のグラウト先端部分の角度に影響され、グラウトの先端角度が十分に大きければ、シース内に空隙を生じずに充填することができることが明らかになってきた。したがって、グラウトの流動特性および注入条件からグラウトの先端角度を定量的に評価することが可能になれば、グラウトの充填性能を照査するための一指標となることが考えられる。今回、粘性が異なるグラウトを用いて、グラウトの充填性能評価試験を行うとともに、管内を流れるグラウトの先端角度の定式化を行い、実験結果ならびに既往の実験データを用いて、導出された角度予測式の検証を行った。本研究では、グラウト先端角度はグラウトの充填性能を評価するための一指標として利用でき、グラウト先端部の角度はグラウトの物理的性状ならびに注入条件から予測できることを明らかにするとともに、グラウトの充填性能評価方法について検討を行っている。以下にその検討内容を報告する。

2. 実験計画

2.1 実験方法

実験は、筆者らが提案する透明な塩化ビニールホースを図-1のように配置した充填試験装置を用いて行うことにした。練混ぜ直後のグラウトを右端の注入口からゆっくりと注入し、自然流下させて左端吐出口よりグラウトが流れ出るまで試験装置に注入する。このとき、充填試験装置の管水平部を流れるグラウトの先端部をデジタルビデオカメラで撮影する。実験後、撮影されたデジタル画像はコンピュータを用いて解析し、グラウト先端部の角度および平均速度を求める。図-2に実験方法の概要図を示している。

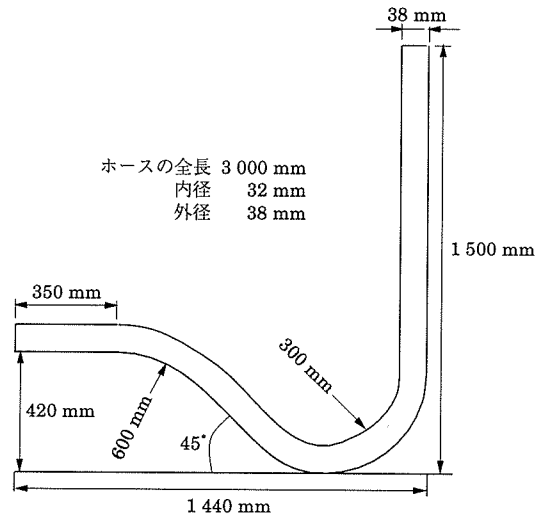


図-1 充填試験装置

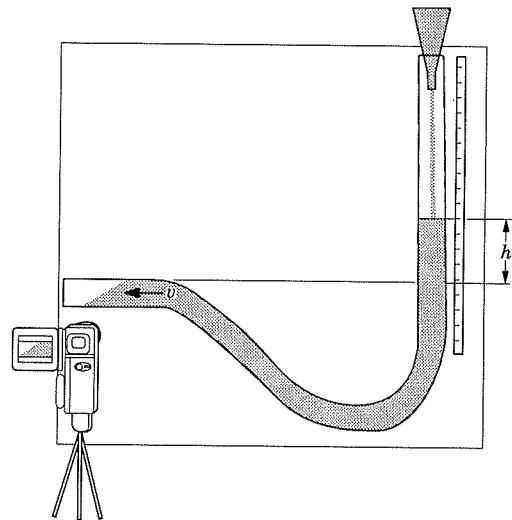


図-2 充填試験方法

グラウト注入後、管内のグラウトが落ち着き、排出口よりグラウトの流出が止まった後、管鉛直部に生ずる水頭差 h を測定し、グラウトが管内を隙間なく排出口まで充填されているか目視で確認する。この水頭差 h は粘性があるものほど大きくなる傾向が認められる。同時に、デジタル回転粘度計を用いてグラウトの粘度測定を行う。使用したデジタル回転粘度計は、ねじり常数が $673.7 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}$ の低粘度用内筒回転式粘度計を用いている。横軸にせん断速度、縦軸にせん断応力を取り、回転粘度計より求めた値をプロットし、図-3に示すように測定点から近似直線を引き、縦軸

*1 Shinsuke MIZUKAMI：関東学院大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

*2 Jun-ichi IZUMO：関東学院大学 工学部 土木工学科 教授

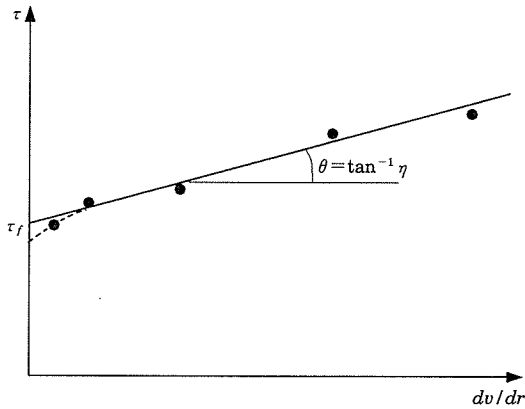


図-3 降伏値と塑性粘度の求め方

の切片を降伏値 τ_f ，その傾きを塑性粘度 η として求めることにした。真の降伏値は破線が縦軸と交わった点であると考えられ、直線近似から若干ずれる傾向にあるが、ここでは簡便のために縦軸の切片で降伏値を求めることにした。また、従来の流動性試験との関連を調べるために J_{14} 漏斗による流下時間の測定を JSCE-F531-1999 に従って行った。

2.2 使用材料

実験に用いたグラウトは従来型のグラウト、従来型のグラウトに高炉スラグを添加したグラウト、ノンブリーディングタイプグラウト、従来型グラウトに高性能減水剤と増粘剤を添加したグラウトおよびプレミックスタイプの高性能グラウトの5種類を製造することにした。材料には、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、ノンブリー-

ディンググラウトを製造する混和剤 GF-1700, GF-1720, ナフタリンスルホン酸塩を主成分とする高性能減水剤およびセルロース系の増粘剤、プレミックスタイプの高性能グラウトの粉体を用いた。練混ぜ水には上水道を用い、高炉スラグは公称ブレン値 $8\,000\text{ cm}^2/\text{g}$, $10\,000\text{ cm}^2/\text{g}$, $15\,000\text{ cm}^2/\text{g}$ の3種類を用いた。

2.3 配合

グラウトの流動特性が充填性に及ぼす影響を調べるために、粘度の異なるグラウトを今回製造することにした。従来型グラウトを3種類、従来型グラウトに高炉スラグ微粉末と高性能減水剤を添加することにより得られるグラウトを13種類、ノンブリーディングタイプのグラウトを6種類、従来型グラウトに高性能減水剤と増粘剤を添加したグラウトを2種類、プレミックスタイプの高性能グラウトを5種類の計29種類のグラウトを実験に用いることにした。プレミックスタイプの高性能グラウトは低熱ポルトランドセメント、分離低減剤、膨張剤および減水剤の粉体で構成されている。従来型グラウトは水セメント比を35%、40%、50%に設定した。セメントを高炉スラグ微粉末で置換したグラウトは、水セメント比を一定の45%とし、スラグ置換率を公称ブレン値ごとに、10%、20%、30%、40%に設定した。また、スラグ置換率を0%としたグラウトも製造することにした。ノンブリーディングタイプ、ノンブリーディング粘性タイプのグラウトを製造する混和剤の添加量はグラウトの配合例⁶⁾を参考にし、いずれの場合にもセメント質量の1%添加させることにした。ノンブリーディングタイプグラウトは水セメント比を38%、43%、50%、

表-1 グラウトの配合

試験番号	記号	グラウトタイプ	W/P (%)	R (%)	Ad (P×%)	SF (W×%)	SP (P×%)	C (kg)	W (kg)	SL (kg)	Ad (kg)	SF (kg)	SP (kg)
1	P 35	ブレン	35	0	0	0	0	1 501	525	0	0	0	0
2	P 40		40	0	0	0	0	1 396	558	0	0	0	0
3	P 50		50	0	0	0	0	1 225	612	0	0	0	0
4	BL 0-R 0	ブレン+SP	45	0	0	0	0.5	1 305	581	0	0	0	6.5
5	BL 8-R 10	ブレン+SL+SP (BL 8000)	45	10	0	0	0.5	1 174	581	131	0	0	6.5
6	BL 8-R 20		45	20	0	0	0.5	1 044	581	261	0	0	6.5
7	BL 8-R 30		45	30	0	0	0.5	913	581	391	0	0	6.5
8	BL 8-R 40		45	40	0	0	0.5	783	581	521	0	0	6.5
9	BL 10-R 10	ブレン+SL+SP (BL10000)	45	10	0	0	0.5	1 174	581	131	0	0	6.5
10	BL 10-R 20		45	20	0	0	0.5	1 044	581	261	0	0	6.5
11	BL 10-R 30		45	30	0	0	0.5	913	581	391	0	0	6.5
12	BL 10-R 40		45	40	0	0	0.5	783	581	521	0	0	6.5
13	BL 15-R 10	ブレン+SL+SP (BL15000)	45	10	0	0	0.5	1 174	581	131	0	0	6.5
14	BL 15-R 20		45	20	0	0	0.5	1 044	581	261	0	0	6.5
15	BL 15-R 30		45	30	0	0	0.5	913	581	391	0	0	6.5
16	BL 15-R 40		45	40	0	0	0.5	783	581	521	0	0	6.5
17	GF 1700-38	ノンブリーディング グラウト (GF 1700)	38	0	1.0	0	0	1 436	545	0	14.4	0	0
18	GF 1700-43		43	0	1.0	0	0	1 340	576	0	13.4	0	0
19	GF 1700-50		50	0	1.0	0	0	1 225	612	0	12.2	0	0
20	GF 1720-38	ノンブリーディング・粘性 グラウト (GF 1720)	38	0	1.0	0	0	1 436	546	0	14.4	0	0
21	GF 1720-40		40	0	1.0	0	0	1 396	558	0	14.0	0	0
22	GF 1720-43		43	0	1.0	0	0	1 340	576	0	13.4	0	0
23	SF 45-06	ブレン+増粘剤+SP	45	0	0	0.6	0.3	1 305	583	0	0	3.5	3.9
24	SF 45-09		45	0	0	0.9	0.3	1 305	583	0	0	5.3	3.9
25	OR-22	高性能グラウト	22	0	0	0	0	1 864	410	0	0	0	0
26	OR-23		23	0	0	0	0	1 830	420	0	0	0	0
27	OR-24		24	0	0	0	0	1 797	431	0	0	0	0
28	OR-26		26	0	0	0	0	1 735	451	0	0	0	0
29	OR-28		28	0	0	0	0	1 677	469	0	0	0	0

備考) P:セメントを含む結合材, W:水, R:スラグ置換率, SF:増粘剤, SP:高性能減水剤, SL:スラグ微粉末, Ad:ノンブリーディング用混和剤をそれぞれ表す。

ノンブリーディング粘性タイプグラウトは38%, 40%, 43%に設定した。増粘剤を添加したグラウトは水セメント比を45%の一定にし, 高性能減水剤をセメント質量の0.3%, 増粘剤を水の質量の0.6%, 0.9%添加させることにした。プレミックスタイプの高性能グラウトは, 水結合材比を22%, 23%, 24%, 26%, 28%に設定した。本研究では, それぞれのグラウトを1バッチあたり6l練ることとした。1m³あたりのグラウトの配合を表-1に示す。

2.4 練混ぜ方法

グラウトの練混ぜにはハンドミキサーを用いて, 1バッチあたり6lのグラウトを一括練りで3分間練り混ぜてグラウトを製造した。ハンドミキサーには回転数の仕様が1300rpmのものを用いた。グラウトの練混ぜは実験室内で行い, 練混ぜ後のグラウトの練上り温度は21±2℃の範囲であった。ただし, 水結合材比が22%のプレミックスタイプの高性能グラウトは, 他のグラウトに比べて予想以上に練上り温度が上昇し, 練上り温度は29℃となった。

3. 実験結果および考察

3.1 充填性試験結果

充填性試験結果を表-2に示す。試験装置水平部を流れるグラウト先端角度の測定例を写真-1に, 試験装置吐出口におけるグラウトの充填状況を写真-2~4に示している。シーす内を流れるグラウト先端部の傾斜は写真-1に示すように必ずしも直線とはならず, 管断面中央部でやや膨らむ傾向がある。グラウト先端部の角度の測定は, グラウトが管上面と下面とで接する点を結んだ直線が管下面となす角度と定義して, コンピュータ上の画像でのなす角度を測定することにした。また, グラウト先端部の移動速度は, あらかじめ設定された管水平部の測定区間を移動するのに要した時間をビデオのコマ数から求め, 流速を算出した。ビデオのコマ数は1秒あたり30コマであり, 時間の精度は1/30秒となる。この測定された流速は, グラウト先端部が形状変化を生じないと仮定した場合の測定区間における平均流速と考えることができ

表-2 充填性試験結果

No.	記号	練上り温度 (℃)	密度 ρ (kg/m ³)	平均速度 V_m (cm/s)	塑性粘度 μ (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)	流下時間 t (s)	水頭差 h (m)	角度 θ (度)	充填状況
1	P 35	22.0	2 040	4.3	1.5	12.3	9.2	0.050	16.3	良好
2	P 40	19.8	1 970	5.9	1.0	5.6	3.3	0.040	8.4	一部空隙
3	P 50	20.7	1 860	18.9	0.2	4.7	2.5	0.026	10.4	未充填
4	BL 0-R 0	21.6	1 910	10.3	0.9	2.0	2.4	0.034	6.2	未充填
5	BL 8-R 10	21.6	1 900	3.9	0.8	3.0	2.5	0.032	7.1	未充填
6	BL 8-R 20	20.0	1 880	15.0	0.7	2.9	2.5	0.032	5.3	未充填
7	BL 8-R 30	21.0	1 870	13.0	0.5	2.5	2.6	0.032	5.4	未充填
8	BL 8-R 40	20.1	1 860	12.0	1.0	2.2	2.6	0.034	6.6	未充填
9	BL 10-R 10	19.1	1 890	8.1	0.4	2.7	2.4	0.032	7.2	未充填
10	BL 10-R 20	19.8	1 890	9.3	0.5	3.2	2.5	0.034	8.6	未充填
11	BL 10-R 30	19.6	1 880	9.7	0.6	4.0	2.6	0.036	8.9	未充填
12	BL 10-R 40	20.5	1 870	6.5	1.1	4.1	2.8	0.048	13.1	未充填
13	BL 15-R 10	19.4	1 910	15.9	0.6	3.5	2.4	0.040	9.9	未充填
14	BL 15-R 20	20.4	1 880	7.3	1.1	3.8	2.5	0.040	11.3	未充填
15	BL 15-R 30	21.0	1 880	5.8	1.0	4.9	2.9	0.040	16.7	一部空隙
16	BL 15-R 40	21.5	1 870	2.9	1.7	6.9	4.6	0.060	24.2	良好
17	GF 1700-38	20.9	1 990	1.1	4.4	36.3	15.7	0.636	26.2	良好
18	GF 1700-43	20.8	1 930	8.1	1.8	19.1	6.4	0.210	21.1	一部空隙
19	GF 1700-50	20.9	1 850	9.7	1.4	9.1	3.9	0.108	15.8	一部空隙
20	GF 1720-38	20.9	1 980	0.5	4.9	41.3	18.7	0.710	35.7	良好
21	GF 1720-40	20.6	1 980	2.9	3.9	27.1	13.1	0.440	24.3	良好
22	GF 1720-43	20.6	1 920	4.8	3.1	19.0	9.2	0.380	22.4	一部空隙
23	SF 0.6-0.3	20.8	1 860	6.0	3.1	25.9	7.0	0.183	23.2	良好
24	SF 0.9-0.3	20.6	1 850	2.3	5.0	41.5	18.6	0.434	31.2	良好
25	OR-22	29.0	2 270	3.8	2.1	23.0	11.1	0.418	24.3	良好
26	OR-23	23.6	2 220	6.5	2.2	14.0	8.0	0.346	21.4	良好
27	OR-24	20.6	2 210	9.7	1.5	9.5	5.3	0.212	11.8	一部空隙
28	OR-26	20.8	2 170	10.4	1.1	7.2	3.8	0.168	11.4	一部空隙
29	OR-28	20.3	2 140	11.7	0.7	4.5	3.3	0.140	7.0	未充填

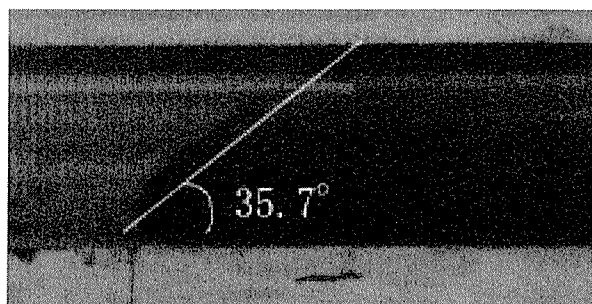


写真-1 先端角度の測定方法

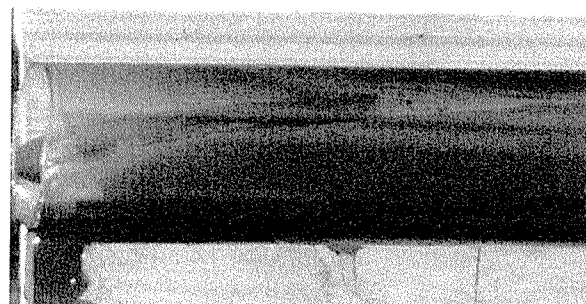


写真-2 未充填状況

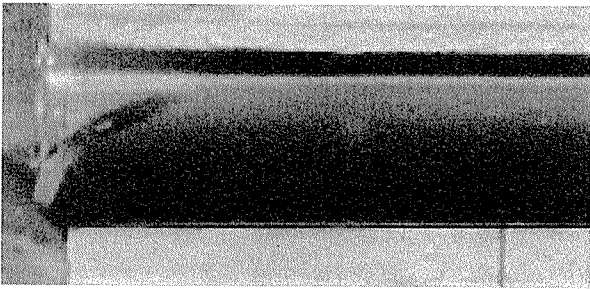


写真-3 一部空隙状況

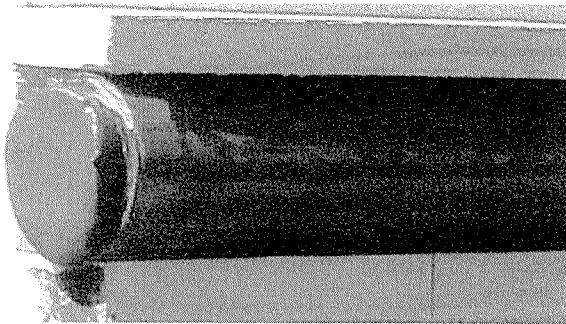


写真-4 充填状況

る。図-4、5にグラウトの先端角度と塑性粘度、降伏値の関係を示し、良好な充填性を示した箇所を網かけ部分で示している。この図より、塑性粘度が $2.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、降伏値が 20 Pa 以上であれば良好な充填性を示し、そのときの先端角度はほぼ 20 度以上であることが理解される。しかし、公称ブレン値 $15\,000$ の高炉スラグ微粉末を添加した置換率が 40% の場合のグラウトは、降伏値が小さいにもかかわらず良好な充填性を示した。公称ブレン値 $8\,000$ 、 $10\,000$ を添加したグラウトは、置換率を 0% に設定したグラウトと同じような流動特性を示し、これらのグラウトの場合、充填性を良くするには比表面積または置換率を大きくしなければならないと判断される。図-6には、 J_{14} 漏斗による流下時間と回転粘度計より求められた降伏値の関係を示している。この図

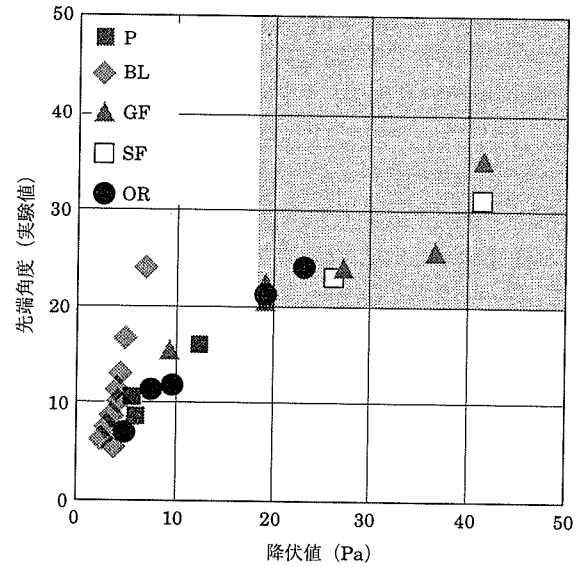


図-5 降伏値と先端角度の関係

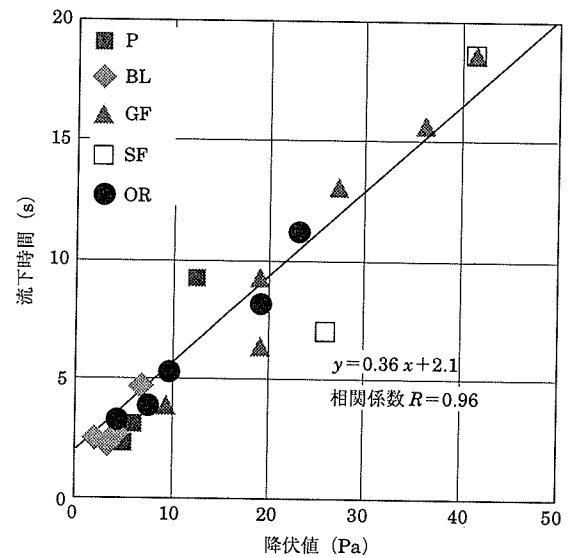


図-6 降伏値と流下時間の関係

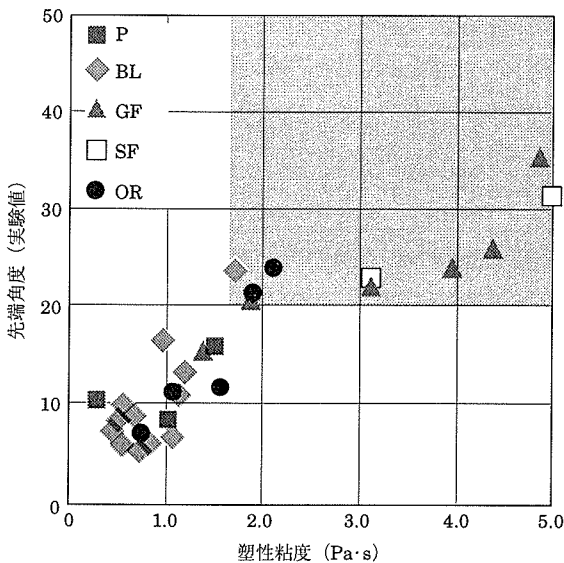


図-4 塑性粘度と先端角度の関係

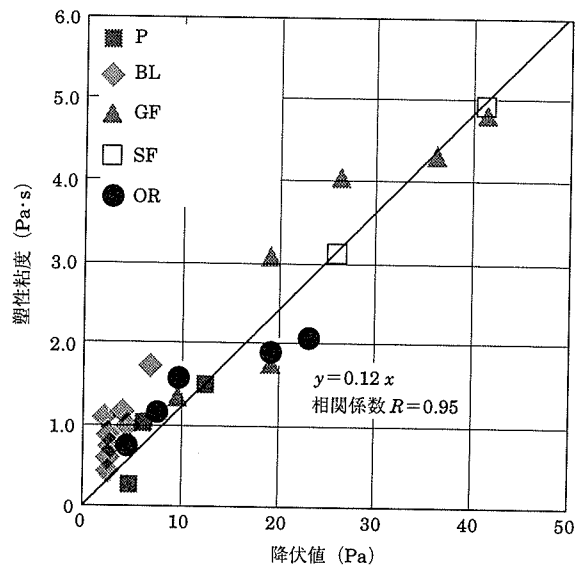


図-7 降伏値と塑性粘度の関係

にJ₁₄ ロートにおける水を流下させた場合の流下時間 2.1 s, 降伏値ゼロを通るような近似直線を引くとほぼ直線上にあり, 相関係数は 0.96 となり流下時間と降伏値の間には強い相関関係が認められる結果となった。すなわち, グラウトの降伏値が増加するのに伴い, J₁₄ 漏斗による流下時間も増加する傾向が認められ, 回転粘度計から得られる降伏値より流下時間のある程度予測することができると考えられる。また, 塑性粘度と降伏値の関係を図-7 に示している。20℃の水の粘性係数 $1.009 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 降伏値ゼロを通るような近似直線を引くと相関係数は 0.95 となり, 塑性粘度と降伏値の間にも強い相関関係が認められる。

3.2 グラウト先端角度の定式化

グラウトの充填性を評価するための指標として, 試験装置水平部を流れるグラウト先端角度に注目し, その角度を定量的に求めることを検討する。グラウト先端部分が図-8 に示すような模式図で表されるものとし, グラウト先端部の角度は, 簡単のためにグラウトが管上面と下面に接する点を結ぶ直線が管底面となす角度 θ (rad) で表すことにした。また, グラウト先端角度の定式化を一般化して考えるために管が傾斜 (水平との傾斜角度を α (rad)) しているものとする。グラウトは一定速度 v で流れ, グラウト先端部の角度も変化しないことを仮定すると, 管軸方向 (x 軸方向) に一定速度 v で移動する座標系では, グラウトは静止し, 釣り合い状態にあると考えることができる。図-10 に示すようなグラウト先端部分を切り出した自由物体図における力の釣り合い条件式(1)から, 以下の手順でグラウト先端角度 θ (rad) を導出することができる。

$$P + \rho g V \sin \alpha - \tau S = 0 \dots\dots\dots(1)$$

図-8 のA-A 部分における断面積 A (m²) は, 図-9 の断面図を参照して内径 r (m) と角度 β (rad) を用いて式(2)で表される。

$$A = r^2 \left(\pi - \beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right) \dots\dots\dots(2)$$

管と接しているOAB部分のグラウトの表面積 S (m²) は, A-A断面での周長が $2r(\pi - \beta)$ であるので, β と x との間には式(3)の関係が成り立つ。したがって, 表面積 S はA-A断面での周長を x 軸方向に積分することにより式(4)で求められる。

$$\frac{h}{a} (a - x) = r (1 + \cos \theta) \dots\dots\dots(3)$$

$$S = \int_0^a 2r (\pi - \beta) dx = \frac{\pi a D}{2} \dots\dots\dots(4)$$

グラウトの体積 V (m³) は, 式(2)で求められた断面積 A (m²) を x 軸方向に積分することにより, 式(5)より求めることができる。

$$\begin{aligned} V &= \int_0^a A(\beta) dx \\ &= \int_0^a r^2 \left\{ (\pi - \beta) + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right\} \cdot \frac{a}{2} \sin \beta d\beta \\ &= \frac{\pi a D^2}{8} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

O-B 断面における, 圧力分布を図-10 に示すような台形分布を仮定することにした。この圧力分布は圧力が深さ方

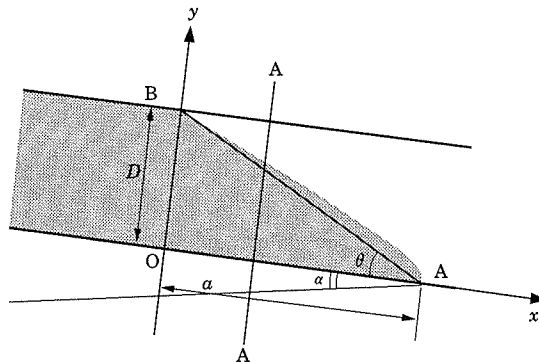


図-8 グラウト断面図

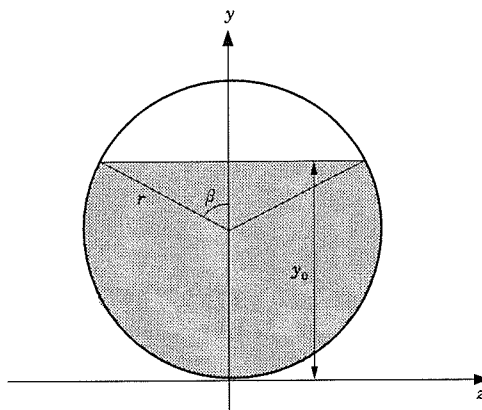


図-9 A-A断面図

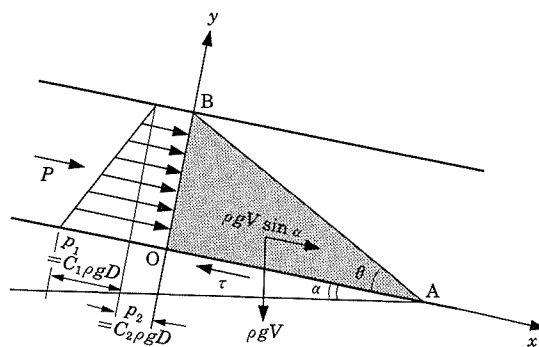


図-10 自由物体図

向に比例して増加する静水圧分布 p_1 と深さ方向に一定の圧力 p_2 との和で表されている。静水圧分布に対しては, グラウト自体に粘性があり, 水のような静水圧が作用しないと考えられるため, 静水圧係数 C_1 を導入することにした。 $C_1 = 1.0$ のとき水と同じ静水圧が作用し, $C_1 = 0$ のとき静水圧が作用しないことになる。したがって, 粘性のあるグラウトの場合 C_1 は 0~1 の間の値が考えられる。水との比較で静水圧を評価する場合, 水は降伏値をもたない流体なので, C_1 がグラウトの降伏値に応じて変化する性質を考慮するために, 降伏値と相関関係の良い塑性粘度 μ と水の粘性係数 μ_0 を用いて式(6)で表すことにした。

$$C_1 = \frac{1}{1 + k_1 \ln \frac{\mu}{\mu_0}} \dots\dots\dots(6)$$

ここに, k_1 の値にはパラメーター解析を行って, 実験結

果との整合性が良い値を定めることにした。グラウトを流動させる場合、静水圧 p_1 のみでグラウトを流動させることは一般に難しく、粘性が高いグラウトほど静水圧以外の圧力を作用させる必要があると考えられる。 p_2 に関しては、静水圧 p_1 と同じような形式を用いて式(7)で表すことにした。

$$p_2 = \rho g C_2 D \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに D は管径であり、 C_2 は圧力の程度を表す係数である。圧力の程度は充填試験装置から得られる水頭差 h から推定することができるが、充填試験装置以外の実験から C_2 を表すことは一般に難しい。充填試験装置より求められた水頭差 h とグラウトの降伏値との間には相互関係があり、降伏値が大きいグラウトの場合、水頭差 h も大きくなる傾向が認められる。したがって C_2 は、グラウトの降伏値によって特徴づけられるものと考えて式(8)で表すことにした。

$$C_2 = k_2 \tau_f \quad \dots\dots\dots(8)$$

式(8)で表される k_2 は定数であり、パラメーター解析を行って、実験結果と整合性の良い値を定めることにした。今回試験に用いる充填試験装置においても、グラウトの粘性の程度に応じて水頭差を生じる。また、粘性が大きいくほど h は大きくなる傾向があると考えられる。圧力の合力 P は、断面内の圧力を積分することにより式(9)で求めることができる。

$$P = \int_0^{2r} \rho g \{C_1(2r-y) + C_2 D\} \cdot b dy$$

$$= \pi \rho g \frac{D^3}{4} \left(\frac{C_1}{2} + C_2 \right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 ρ は密度、 g は重力加速度である。

グラウトの粘性により生じるせん断応力 τ は、降伏値 τ_f をもち、塑性粘度 μ と速度勾配 dv/dy で表されるビンガム流動体を仮定することにした。しかし、せん断速度勾配 dv/dy を直接求めることは難しいので、管内を流れるグラウトの平均速度 v_m と管の内径 D で代表させることにし、式(10)で表すことにした。

$$\tau = \tau_f + \mu \frac{dv}{dy} \doteq \tau_f + \mu \frac{v_m}{D} \quad \dots\dots\dots(10)$$

以上、式(1)の釣合い条件式に、式(4)、式(5)、式(9)、式(10)を代入し、整理するとグラウト先端角度 θ (rad) は式(11)で表すことができる。

$$\tan \theta = \frac{4 \left(\tau_f + \mu \frac{v_m}{D} \right) - \rho g D \sin \alpha}{\rho g D (C_1 + 2C_2)} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式(11)から得られる角度 θ は、グラウトの流速、密度、塑性粘度および降伏値のグラウトの物性に関する諸量と管径および管の傾斜角度などの管に関する諸量とで定式化されており、これらの諸量がグラウトの充填性に影響を及ぼすことが理解される。

3.3 モデルの検証

今回行った実験では管の内径は32 mmの一定で、傾斜角 α はゼロとなっている。実験結果を考慮して静水圧係数 C_1 に対して定数 k_1 を0.35に設定することにした。この場合、実験に用いたグラウトの静水圧係数 C_1 は0.25~0.34の範囲にあった。試験装置に生ずる水頭差 h と降伏値 τ_f の関係を図-11に示している。原点を通るように近似直線を引く

と、相関係数が0.92となり水頭差 h と降伏値 τ_f には相関関係が認められる。グラウト先端部には、水頭差 h が直接作用するのではなく、実際には管長、管の曲がりによる水頭差の損失を差し引いた圧力が生じていると考えられる。しかし、この水頭差の損失を定量的に評価することが難しいと考えられるために、降伏値より関係づけられる係数 C_2 の定数 k_2 は、実験結果を考慮して 4.0×10^{-3} に設定することにした。自然流下させたグラウトの平均速度は0.5 cm/s~18.9 cm/sの範囲で、粘性の高いグラウトほど平均速度が遅くなっている。前節で定式化した式(11)を用いて求めた先端角度の計算結果を表-3に示す。また、先端角度の実験値を

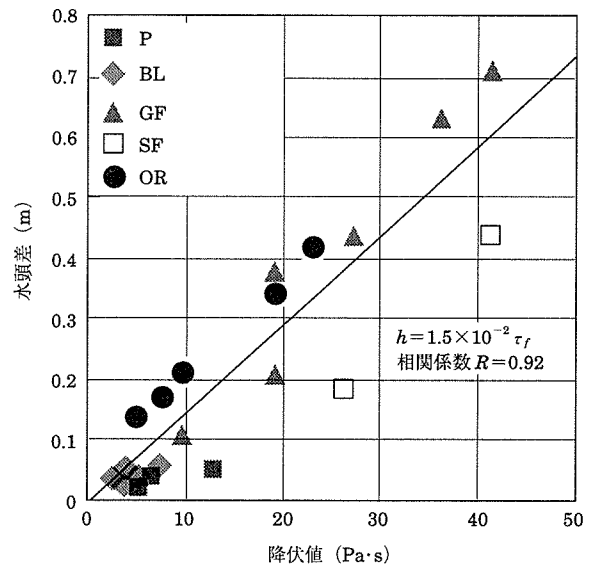


図-11 降伏値と水頭差の関係

表-3 解析結果

No.	記号	静水圧係数 C_1 ($k_1=0.35$)	水頭差 Δh (m) ($k_2=4.0 \times 10^{-3}$)	θ_{exp} (度)	θ_{cal} (度)	$\frac{\theta_{exp}}{\theta_{cal}}$
1	P 35	0.28	0.0015	16.3	13.4	1.2
2	P 40	0.29	0.0007	8.4	8.1	1.0
3	P 50	0.34	0.0006	10.4	6.3	1.7
4	BL 0-R 0	0.30	0.0003	6.2	5.9	1.1
5	BL 8-R 10	0.30	0.0004	7.1	4.7	1.5
6	BL 8-R 20	0.30	0.0004	5.3	7.4	0.7
7	BL 8-R 30	0.31	0.0003	5.4	5.3	1.0
8	BL 8-R 40	0.29	0.0003	6.6	7.6	0.9
9	BL 10-R 10	0.32	0.0003	7.2	4.2	1.7
10	BL 10-R 20	0.31	0.0004	8.6	5.3	1.6
11	BL 10-R 30	0.31	0.0005	8.9	6.8	1.3
12	BL 10-R 40	0.29	0.0005	13.1	7.7	1.7
13	BL 15-R 10	0.31	0.0004	9.9	7.0	1.4
14	BL 15-R 20	0.29	0.0005	11.3	7.7	1.5
15	BL 15-R 30	0.29	0.0006	16.7	7.7	2.2
16	BL 15-R 40	0.28	0.0009	24.2	9.9	2.5
17	GF 1700-38	0.25	0.0045	26.2	24.3	1.1
18	GF 1700-43	0.28	0.0024	21.1	20.3	1.0
19	GF 1700-50	0.28	0.0011	15.8	14.5	1.1
20	GF 1720-38	0.25	0.0051	35.7	25.3	1.4
21	GF 1720-40	0.26	0.0034	24.3	22.9	1.1
22	GF 1720-43	0.26	0.0024	22.4	20.9	1.1
23	SF 0.6-0.3	0.26	0.0032	23.2	25.2	0.9
24	SF 0.9-0.3	0.25	0.0052	31.2	28.4	1.1
25	OR-22	0.27	0.0029	24.3	17.6	1.4
26	OR-23	0.28	0.0024	21.4	17.2	1.2
27	OR-24	0.28	0.0012	11.8	13.0	0.9
28	OR-26	0.29	0.0009	11.4	10.2	1.1
29	OR-28	0.30	0.0006	7.0	7.1	1.0

縦軸に計算値を横軸にとり、プロットした結果を図-12に示している。全体の相関係数は0.93であり、グラウトの種類、粘度特性に関係なく計算値と実験値はほぼ一致していると判断される。

PCグラウトの充填性を定量的に評価するために西村ら⁷⁾は図-13に示すような装置を用いて、グラウトが全断面を満たしながら流れ出る条件を検討している。この実験から得られたグラウト先端部の角度の算定にも、式(11)を適用して本モデルの検証を行うことにした。ただし、静水圧係数 C_1 の係数 k_1 および、圧力の程度を表す C_2 の係数 k_2 については、前述の検討の場合と同じ値を用いることにした。実験では水とベントナイトで構成されたグラウトを1種類、ノンブリーディングタイプのグラウトを1種類、水と高炉スラグ微粉末および増粘剤で構成されるグラウト4種類の計6種類のグラウトを製造して、総数189の実験が行われている。実験では、透明なアクリル管内にグラウトをピストンで注入し、一定速度でグラウトが流れ出る様子からグラウト先端角度を測定している。実験パラメーターとしては、

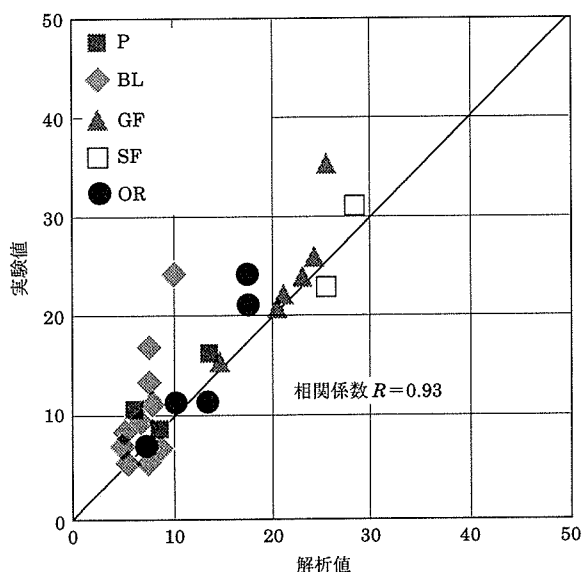


図-12 解析値と実験値の関係

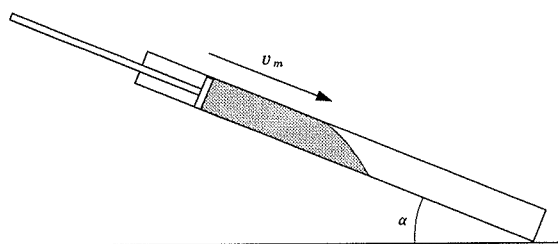


図-13 実験概要図

管の傾斜角度、管径、グラウトの流速および粘性である。粘性の異なる各種のグラウトの実験パラメーターを表-4にまとめて示している。筆者らが実験に用いたグラウトの降伏値は2.0 Pa~41.5 Paの範囲にあったのに対し、西村らが用いたグラウトの降伏値は15.2 Pa~181.7 Paの範囲にあり、これらの実験を用いることにより広範囲の粘性の実験データがグラウト先端角度のモデルの検証に利用されることになる。水とベントナイトから製造したグラウトは、通常のPCグラウトに用いられるグラウト材に比べ降伏値がかなり高い性質を有しており、流動性も著しく低下している。その他のグラウトは、今回筆者らが実験に用いたグラウトと比較的同程度の粘度特性と判断されるが、増粘剤を用いているため塑性粘度および降伏値が若干高い値となっている。各グラウトの種類ごとに計算結果をまとめたグラフを図-14~19に示している。管の傾斜角ごとにプロットしたグラフを図-14~16に示し、管径ごとにプロットしたものを図-17~19に示している。各グラウトの種類ごとの検討において、管の傾斜角および管径が変化しても計算値と実験値はよく一致していると考えられる。これらの計算結果を一つにまとめ直したグラフを図-20に示している。全体としての実験値と計算値との間の相関係数は0.97となり、計算結果は実験結果とほぼ一致していると判断される。したがって、グラウトの流動特性、管径、管の傾斜角度が変化した場合においても、(11)式より得られるグラウトの先端角度は実験結果を精度良く予測できると考えられる。

4. パラメーター解析による充填性への影響評価

実験結果より、充填試験装置を充填させるためには、先端角度が20度以上のグラウトであれば吐出口まで完全に充填することが確認された。この充填条件は注入圧を加えることのない自然流下で行っているため、一般の注入よりも厳しい条件であると考えられる。一方、西村らの実験では、管径が65mmのシースで先端角度が9.3度以上であれば、グラウトが先流れを起こさずに全断面流下することが報告されている。実験条件は異なるものの、これらの実験結果を考慮すると、先端角度が20度以上であれば、かなりの安全率を見込んで管内をグラウトで充填させることができると判断される。先端角度式を用いて管径、管の傾斜角度、グラウトの密度をパラメーターにして先端角度が20度以上になるときのグラウトの降伏値と流速の関係を求めることにした。先端角度式の係数 k_1 、 k_2 は検証時と同じ値に設定し、塑性粘度は降伏値との関係から求めている。図-21は管の傾斜を0度、グラウトの密度を2000 kg/m³、パラメーターとして管径を32 mm, 50 mm, 70 mmに設定し

表-4 実験パラメーター

No.	記号	グラウトタイプ	W/P (%)	密度 (kg/m ³)	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)	流下時間 (s)	平均速度 (cm/s)	傾斜角度 (度)	管径 (mm)
25	B 550	水+ベントナイト	550	1 090	4.2	181.7	測定不能	5~20	0~30	32~70
26	GF 172-45	ブレーン+GF 1720	45	1 910	2.1	16.7	9.5	5~140	0~30	
27	S 75-p3	水+スラグ+増粘剤 (3%)	75	1 560	1.9	16.7	10.6	5~140	0~20	
28	S 75-p5	水+スラグ+増粘剤 (5%)	75	1 540	8.7	37.5	82.2	5~80	0~20	
29	S 65-p3	水+スラグ+増粘剤 (3%)	65	1 610	2.9	26.2	18.3	5~140	0~20	
30	S 85-p3	水+スラグ+増粘剤 (3%)	85	1 500	1.7	15.2	9.2	5~140	0~20	

備考) W/P: 水結合材比

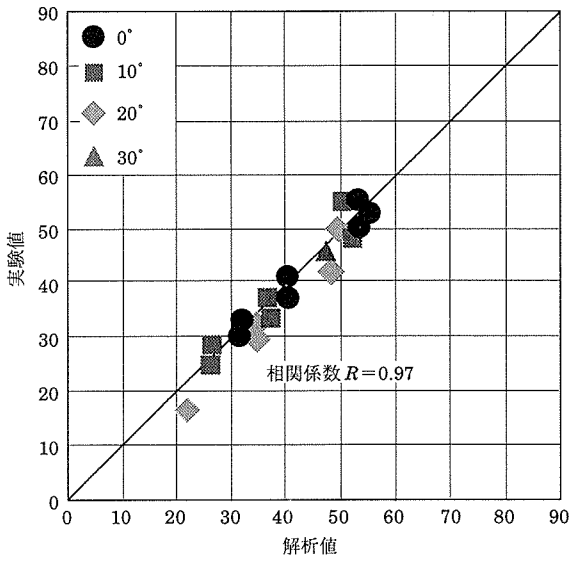


図-14 管傾斜角度が変化した場合の解析結果
(ベントナイト)

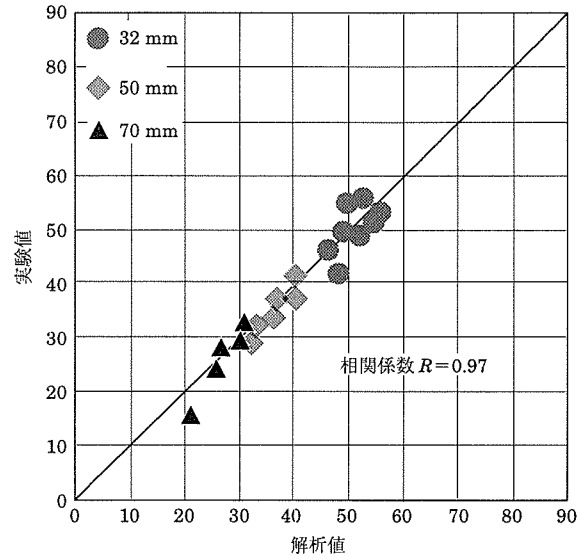


図-17 管径が変化した場合の解析結果
(ベントナイト)

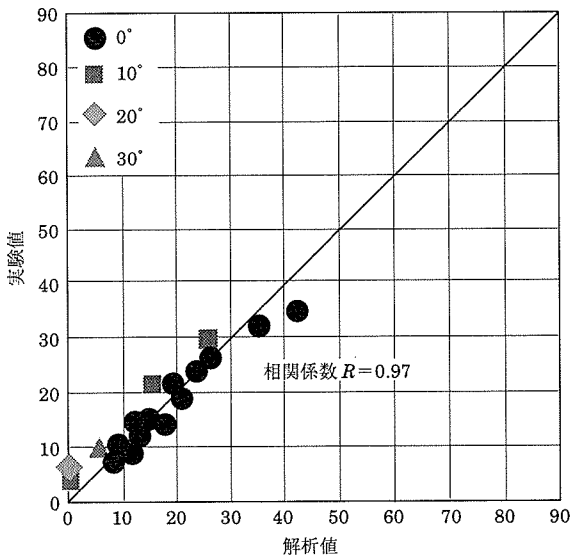


図-15 管傾斜角度が変化した場合の解析結果
(ノンブリーディングタイプ)

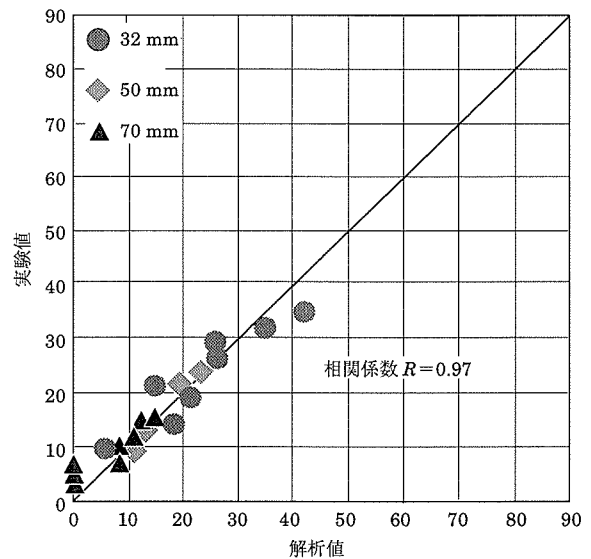


図-18 管径が変化した場合の解析結果
(ノンブリーディングタイプ)

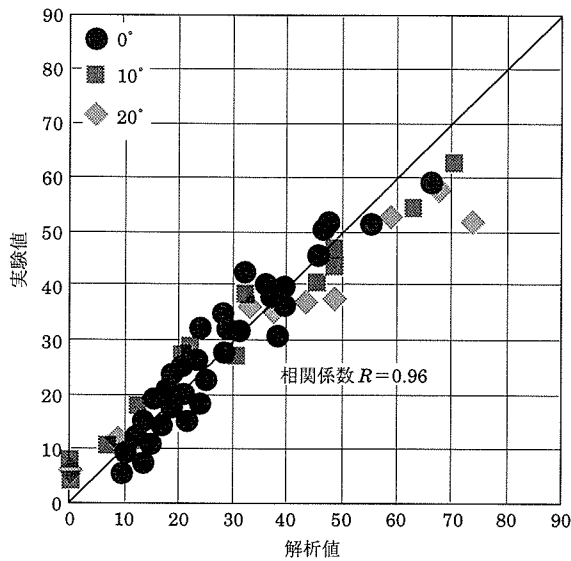


図-16 管傾斜角度が変化した場合の解析結果
(高炉スラグ+増粘剤)

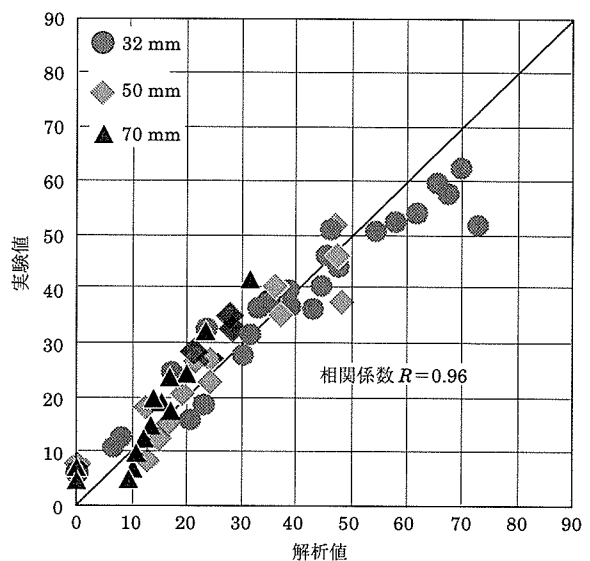


図-19 管径が変化した場合の解析結果
(高炉スラグ+増粘剤)

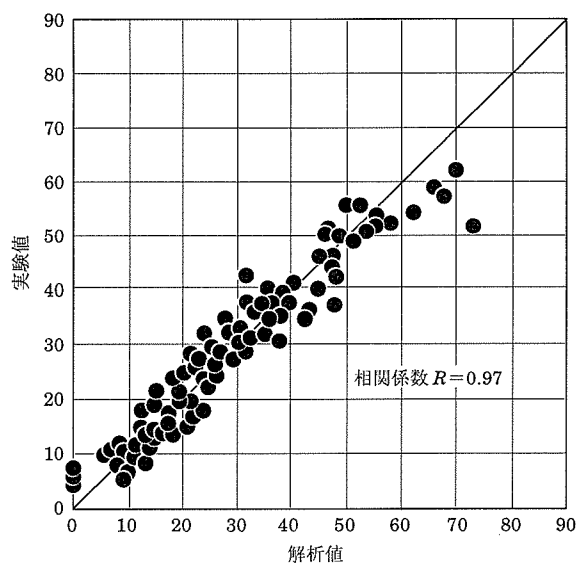


図-20 解析結果(全体)

た場合の流速と降伏値の関係を表している。図-22には管径を一定の32mm, グラウトの密度を 2000 kg/m^3 , パラメーターとして管の傾斜を0度, 5度, 10度, 15度に設定し, 図-23には管径を32mm, 管の傾斜を0度, パラメーターとしてグラウトの密度を 1500 kg/m^3 , 2000 kg/m^3 , 2500 kg/m^3 に設定した場合の流速と降伏値の関係を表している。グラウトの先端角度が20度以上になるためには, 降伏値が一定の場合, 管径, 管の傾斜角度, 密度が大きくなるほど流速は大きな値が必要になっていくことが認められる。また, 降伏値が大きくなるとグラウト先端角度が20度以上となるために, 必要とされる流速は小さくなることが理解される。降伏値が一定の場合, 管径が大きくなるのに伴い, 管を充填させるための流速は速くする必要があり, 管径が充填性に及ぼす影響は大きいことが図-21からは理解される。また, 管が傾斜した場合は, 先流れによる充填不良が生じないためには管の傾斜角度が大きくなるに伴い, 充填に必要とされる速度は速くなる傾向にある。管の傾斜角度も充填性に影響を及ぼすが, 降伏値が大きくなるにつれて管傾斜角度の影響が小さくなることが図-22からは理解される。また, グラウトの密度の違いも充填性に影響を及ぼすが, 充填に必要とされる速度変化は, 管径および管傾斜角度の変化による影響よりも小さい。以上の検討結果から, シースの管径および傾斜条件に応じたグラウトの粘性と注入時の流速を施工計画時に設定することにより, グラウトの充填を確実にを行うための施工計画を立てることが可能になるのではないかと考えられる。

5. 結論

グラウトの充填性能評価方法の確立を念頭において, 実験結果に基づきグラウトの流動特性および注入条件からグラウトの先端角度の定式化を行った。さらに, 定式化された先端角度式を用いて充填するために必要な先端角度を求め, 実験との検証を行った。今回の検討で得られた結論をまとめると以下のとおりとなる。

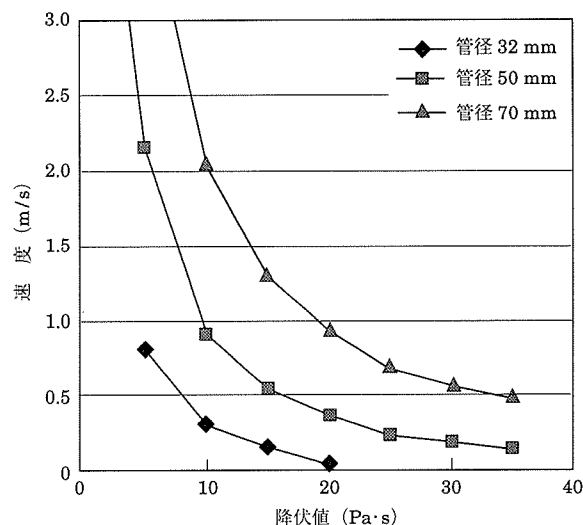


図-21 充填に必要とされる速度と降伏値の関係 (管径が変化した場合)

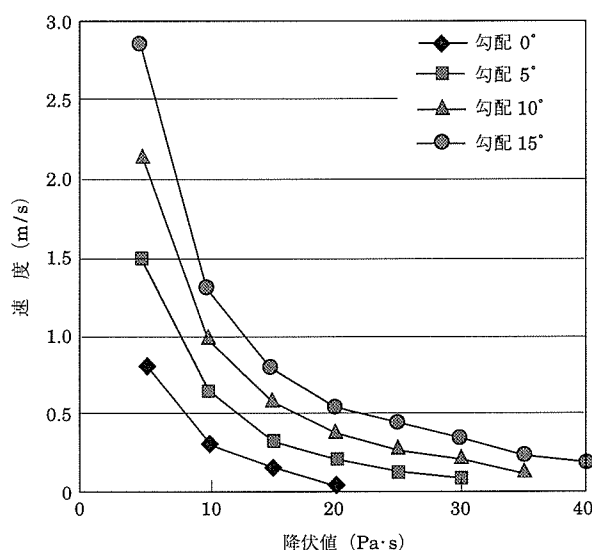


図-22 充填に必要とされる速度と降伏値の関係 (管傾斜角度が変化した場合)

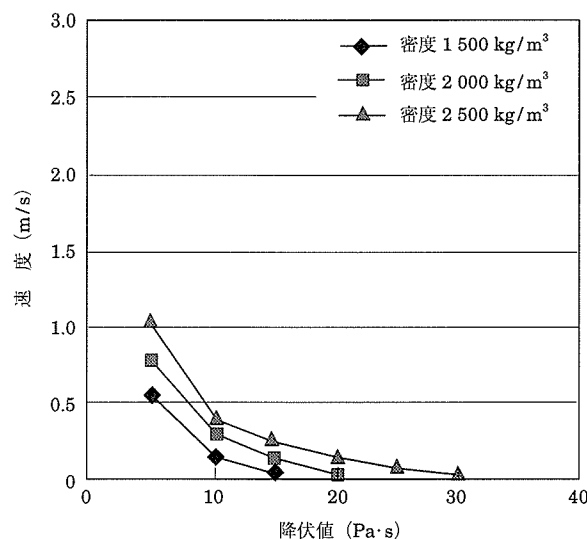


図-23 充填に必要とされる速度と降伏値の関係 (グラウト密度が変化した場合)

- ① 筆者らが提案する充填試験装置を用いた場合、グラウトの充填性は管内を流れるグラウトの先端部分の角度によって評価することができ、先端角度がおおよそ20度以上になると、充填試験装置の管内を充填させることができることが確認された。
- ② グラウトの降伏値は塑性粘度、充填試験装置から測定される水頭差および J_{14} ロートの流下時間との相関関係が認められた。
- ③ 定式化されたグラウトの先端部の角度は、今回行った実験結果および既往の実験結果と良い精度で一致することが確認された。
- ④ パラメーター解析を行った結果、グラウトの充填性を確保するために必要なグラウトの流速および降伏値の条件は、とくに管径および管の傾斜角度に影響を受けることが明らかになった。
- ⑤ シースの管径、配置条件に応じて、グラウトの流速、降伏値を設定することにより、充填性を確保した施工が可能になると判断される。

6. おわりに

筆者らが提案する充填試験装置による実験結果に基づき充填性能について検討を行った。その結果、グラウトの性能および注入条件を考慮しながら充填性能を定量的に評価することが可能になったと考えている。しかし、実物レベルのグラウトの注入に際しても、今回の検討結果が適用できるか、あるいは管の材質による違い、PC鋼材の影響については今後の課題と考えている。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京大学 魚本健人先生ならびに千葉工業大学の伊藤一聡氏からは貴重な実験データを提供していただいた。また、(株)ピー・エスから研究補助のご協力をいただいた。高性能PCグラウトに関してはオリエンタル建設(株)より、高炉スラグ微粉末に関しては住友鹿島鉱化(株)より、ノンフリーディンググラウト用混和剤および増粘剤に関しては(株)エヌエムビーより、高性能減水剤に関しては花王(株)よりご協力を賜った。実験に際しては、関東学院大学工学部に在学中であった磯谷光良、上林雅史、近藤厚志、松本晃徳各氏のご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 小林, 宮川, 杉江, 森: PC構造物のグラウト不良とその補修のための注入材料に関する実験, プレストレストコンクリート, Vol.36, No.3, pp.75~81, 1994
- 2) 佐々木, 堺: グラウト不良により劣化したPC橋の調査と補修, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1 089~1 094, 1996
- 3) 出雲: PCグラウトの性能試験方法に関する一考察, プレストレストコンクリート, Vol.42, No.5, pp.37~42, 2000
- 4) 西村, 魚本: 数値解析手法によるPCグラウトの充填性に関する定量評価, 土木学会第55回年次学術講演会, 2000.9
- 5) 伊藤, 足立, 魚本: PCグラウトの流動特性が充填性に及ぼす影響, 土木学会第55回年次学術講演会, 2000.9
- 6) プレストレスト・コンクリート建設業協会: PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル(改定版), 1999
- 7) 西村, 伊藤, 魚本: PCグラウトのレオロジー特性及び注入条件が充填性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1 399~1 404, 2000

【2001年5月11日受付】