

シース管内の鋼材がグラウトの充填性に及ぼす影響について

出雲 淳一*1・山口 征伸*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とするとともに、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、英国において既存PC建造物のグラウト不良が報告されて以来、わが国においてもPC鋼材の腐食および破断により第三者へ影響を及ぼすことのないような、確実な充填が行われるための材料の開発、施工システムの検討が行われるようになってきた¹⁾²⁾。

グラウトの充填性に影響を及ぼす要因として、グラウト注入時のグラウト先端部分の角度があげられ、著者らは、これまでグラウトの充填性を定量的に評価する手法の検討³⁾、グラウト先端角度の予測式の提案⁴⁾⁵⁾、充填を可能にする施工性の検討を行ってきた⁶⁾⁷⁾。

これまで開発されたグラウト先端角度の予測式は、シース内に鋼材がないことを仮定して導出された式である。しかし、実際のシースには鋼材が配置されているので、その先端角度の予測はより難しいものとなっている。これまで、鋼材を有するグラウト先端角度に着目した研究はあまり行われておらず、今回、シース管内に鋼材を配置したモデル試験体を製作して、グラウトの先端角度と充填性との関係を明らかにするための実験を行い、鋼材を有するグラウトの先端角度の評価方法について検討を行うことにした。以下に、その検討結果を報告する。

2. 充填性試験

2.1 使用材料

粘性の異なるグラウトの充填性を調べるために、数種類のノンブリーディングタイプのグラウト材料を用いることにした。プレミックスタイプの超低粘性型グラウト（タイプH）、セメントとメラミンスルホン酸系化合物と水溶性高分子エーテル系化合物を主成分とする混和剤を用いた低粘性型グラウト（タイプG）および高粘性型グラウト（タイプG2）およびセメントとメラミン系高性能減水剤と増粘剤を主成分とする混和剤を用いた高粘性型グラウト（タイプC）の4種類を使用することにした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、練混ぜ水には上水道を用いた。

2.2 配 合

配合は、粘性がグラウトの充填性に及ぼす影響を調べる

ために、水セメント比を変化させることにより、粘性の異なるグラウト材料を製造することにした。超低粘性型グラウト（タイプH）は、水セメント比を31%とした。混和剤を使用するタイプのグラウト（タイプG、G2、C）については、混和剤の添加量はセメントに対して一定の1.0%とし、低粘性型グラウト（タイプG）は水セメント比を40%、45%に、高粘性型グラウト（タイプG2、C）は、水セメント比を45%、50%に変化させることにした。1m³あたりのグラウトの配合を表-1に示す。

表-1 グラウトの配合

	グラウトタイプ	W/P (%)	Ad (P×%)	P (kg)	W (kg)	Ad (kg)
H-31	超低粘性	31	0.0	1596	495	0.0
G-40	低粘性型	40	1.0	1305	587	13.0
G-45		45	1.0	1396	558	14.0
G2-45	高粘性型	45	1.0	1305	587	13.0
G2-50		50	1.0	1225	612	12.2
C-45	高粘性型	45	1.0	1305	587	13.0
C-50		50	1.0	1225	612	12.2

<備考> P：セメントを含む結合材，Ad：混和剤，W：水

2.3 練混ぜ方法

グラウトの練混ぜは、15リットル容器に水、混和剤の順で投入しハンドミキサで混ぜながらセメントを投入する。1バッチあたり約6リットルのグラウトを3分間練混ぜて製造した。ハンドミキサは、回転数の仕様が1300rpmで、ブレードタイプのものを用いた。

2.4 試験体

実験には、図-1に示すような形状のシースとその内部に模擬鋼材を有する試験体を製作した。試験体には透明な塩化ビニル管を用い、全長は1500mm、内径は52mm、および79mmの2種類とし、管内の空隙率を変化させることにした。管内の空隙率を変化させるために、管内にPC鋼

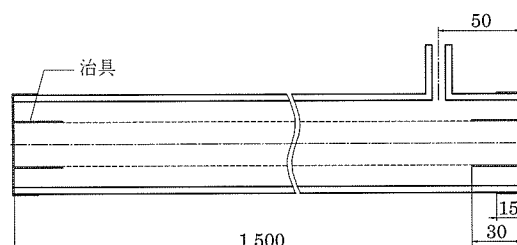


図-1 試験体側面図

*1 Junichi IZUMO：関東学院大学 工学部 社会環境システム学科 教授

*2 Yukinobu YAMAGUCHI：ニコンシステム

より線を配置することを基本としたが、管と鋼材の組み合わせによっては実験パラメータとしての空隙率を変化させることが難しいために、PC鋼より線以外に鋼管(φ32 mm)や塩化ビニル管(φ38 mm)を試験体内に配置して空隙率を変化させることにした。試験体の管と鋼材の組み合わせおよび概要を表-2に示す。また、管内に配置する材料の位置の違いによる検討を行うために、図-2に示すように、鋼材を管の中央に配置した場合、管の底面に置いた場合の2種類について実験を行うことにした。鋼材を管中央に配置する場合、鋼材は図-1に示すような治具を用いて管両端で鋼材を固定している。鋼材を管両端のみで固定しているために、管長手方向の中央部では鋼材の自重によるたわみが若干認められた。

表-2 試験体の概要

試験体タイプ	全長(mm)	管内径(mm)	管内に配置した材種		管断面積(mm ²)	鋼材断面積(mm ²)	空隙率(%)
A	1500	52	PC鋼より線	7S 12.4 A	2123.7	650.3	69.4
B			鋼管	φ32		804.2	62.1
C			塩化ビニル管	φ38		1134.1	46.6
D			—	—		0	100
E	79	79	PC鋼より線	7S 15.2 B	4901.7	970.9	80.2
F			PC鋼より線	7S 12.4 A		650.3	86.7
G			—	—		0	100

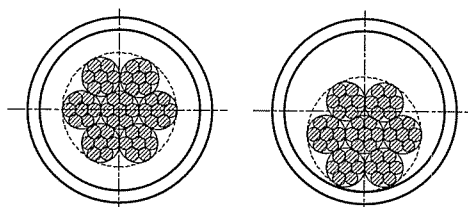


図-2 鋼材の配置(断面図)

2.5 実験方法

実験は、試験体を図-3に示すような配置にして充填状況を観察することにより行うことにした。注入は手動グラウトポンプにて行い、手動グラウトポンプと試験体は内径25 mmのグラウトホースを用いて接続した。手動ポンプを用いて練混ぜ直後のグラウトをゆっくりと注入させ、注入は試験体左端の排出口よりグラウトが排出されるまで行う。このとき排出口付近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し、コンピュータ上のデジタル画像から、グラウト先端部の角度および平均流速を求めている。

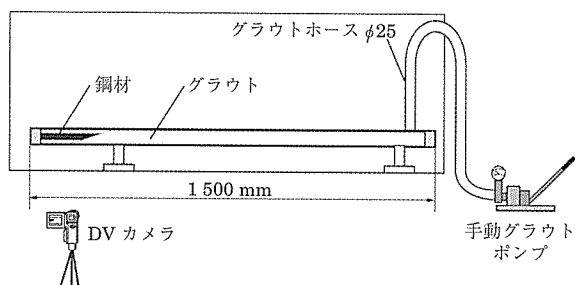


図-3 充填性試験装置の概要図

実験は、試験体を水平に配置した場合、下り勾配10度に配置した場合、上り勾配10度に配置した場合について行った。注入試験と同時にグラウトの物性を調べるために、デジタル回転粘度計を用いてグラウトの塑性粘度および降伏値の測定⁴⁾および単位体積質量の測定を行う。写真-1に充填性試験装置を示す。

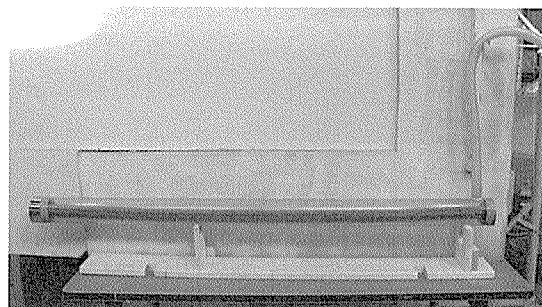
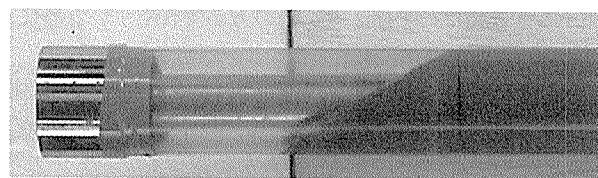


写真-1 充填性試験装置

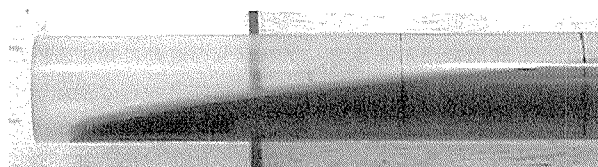
3. 試験結果および考察

3.1 充填状況

実験における代表的なグラウトの流動状況を写真-2~4に示す。管を水平に配置した場合、写真-2に示すように、同じ配合のグラウト材料を用いた場合、管内に鋼材を有す

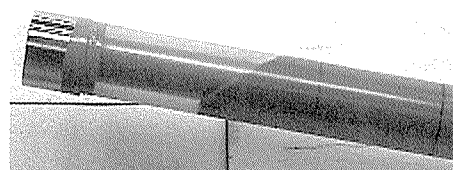


(a) 鋼材有り

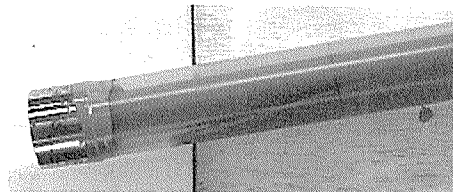


(b) 鋼材無し

写真-2 グラウト先端部

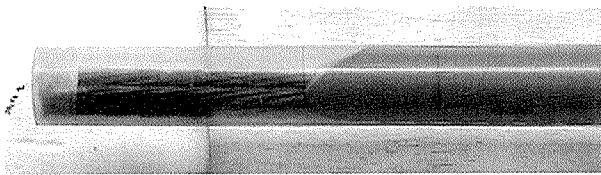


(a) 上り勾配

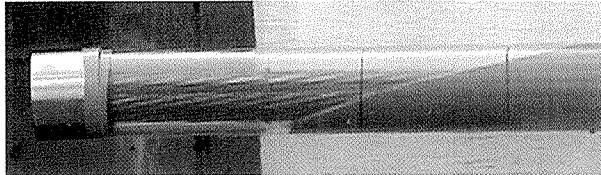


(b) 下り勾配

写真-3 グラウト先端部(シースに勾配がある場合)



(a) 鋼材を管底面に配置



(b) 鋼材を管中央に配置

写真-4 グラウト先端部(鋼材配置が異なる場合)

る場合のグラウト先端角度は、鋼材が無い場合に比べ角度が大きくなる傾向が認められる。上り勾配の場合は、写真-3に示すように、管を水平に配置した場合に比べ、先端角度が立つ傾向が認められた。また、下り勾配の場合は逆にグラウト先端部が寝てしまい、先流れを生じ、管内をグラウトで充填させることが難しかった。これは手動ポンプの場合には注入速度の制御ができずグラウトの注入速度が遅かったためと考えられる。また、鋼材の配置による違いについては、写真-4に示すように、鋼材を管中央に配置した場合のグラウト先端部分は管の下部から上部にかけてほぼ直線的であったが、鋼材を管底面に配置した場合には、グラウトは鋼材の下部より上部の方が流れやすいために、鋼材を巻き込むように流動することが観察された。

内径 52 mm の試験体において、PC 鋼より線を用いた場合の試験体は、塩化ビニル管、および鋼管を用いた場合の試験体より、空隙率は大きいにもかかわらず、グラウト先端角度が大きくなる傾向が認められた。これは PC 鋼より線の方が、疑似鋼材として使用した塩化ビニル管および鋼管よりも断面形状が複雑で、グラウトの流動に対する内部抵抗が大きいためと考えられる。実験結果からは空隙率の違いよりも鋼材の形状の方が先端角度に与える影響が大きいと考えられ、疑似鋼材として用いた塩化ビニル管、および鋼管の場合は、実際のグラウトの注入条件と異なることから、以後の検討では PC 鋼より線の場合の実験結果についてのみ取り扱うことにする。

3.2 グラウト先端角度

鋼材を管中央に配置した場合は、グラウト先端角度 θ はグラウト先端の中央部がふくらむ傾向があるが、これまで測定を行ってきた鋼材がない場合の定義と同様に、管底面と上面のグラウトとの接点を結ぶ直線と、管底面とがなす角度として定義することにした。(写真-5 参照)

しかし、鋼材を管の底面に配置した場合は、写真-6に示すように、鋼材の下部より上部の方がグラウトが流れやすく、鋼材を巻き込むように流動することが実験では観察された。したがって、グラウト先端部が図-4に示すように「くの字型」になりやすく、鋼材がない場合と同様な扱いで先端角度を定義することは難しい。また、鋼材が管底面に配置されている場合、鋼材の上面部分を流れるグラウ

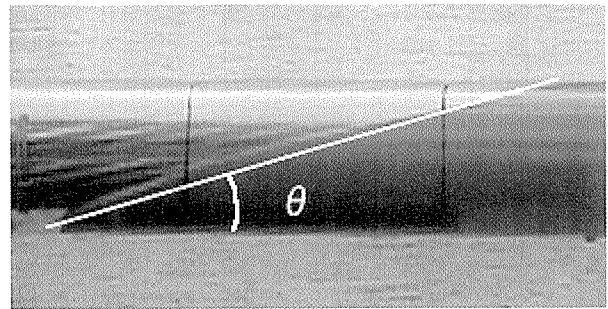


写真-5 グラウト先端角度(鋼材を管中央に配置)

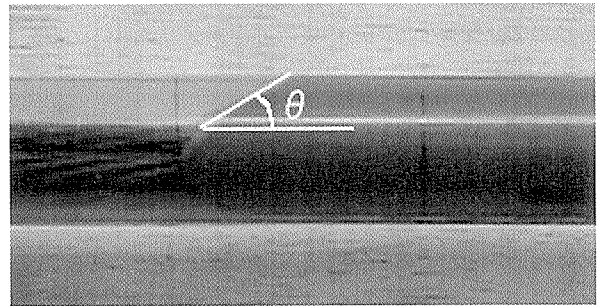


写真-6 グラウト先端部角度(鋼材を管底面に配置)

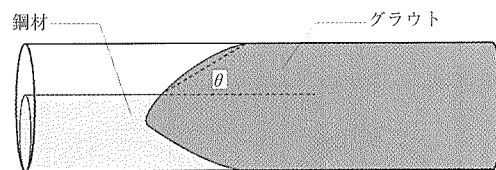


図-4 グラウト先端部の形状

グラウトの流れ →

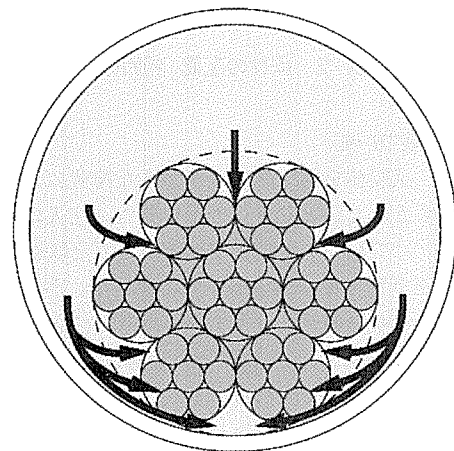


図-5 管断面におけるグラウトの移動

トと鋼材底面部分を流れるグラウトには速度差が生じやすく、図-5に示すように鋼材上部にあるグラウトは管底面に移動しやすい状態にある。したがって、鋼材を管の底面に配置した場合は、グラウトの充填性に影響を及ぼすと考えられる鋼材上面部分を流れるグラウトの形状に着目して、グラウト先端角度を定義することにした。すなわち、先端角度は鋼材上面と管の上面のグラウトとの接点を結んだ直線と、鋼材の図心軸と平行な鋼材上面とがなす角度として定義することにした。先端角度の測定は、画像上で、グラ

表 - 3 試験および解析結果

試験体 タイプ	材料 記号	鋼材配置	勾配 ^{※)} α (度)	密度 ρ (kg/m ³)	塑性粘度 μ (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)	流速 v (m/s)	測定値 θ_{exp} (度)	解析値 θ_{cat} (度)	$\frac{\theta_{exp}}{\theta_{cat}}$
D	C-45	なし	-10	1860	2.92	42.3	0.029	19.1	30.8	0.6
D	C-45	なし	0	1870	1.72	25.4	0.011	5.6	12.7	0.4
D	C-45	なし	10	1870	1.72	25.4	0.061	0.0	0.0	-
D	C-50	なし	-10	1840	1.34	16.3	0.034	14.9	30.8	0.5
D	C-50	なし	0	1790	1.23	9.2	0.014	4.3	6.6	0.7
D	C-50	なし	10	1790	1.23	9.2	0.065	0.0	0.0	-
D	G2-45	なし	-10	1900	2.42	11.5	0.028	17.3	32.2	0.5
D	G2-45	なし	0	1870	1.74	26.0	0.020	7.5	13.0	0.6
D	G2-45	なし	10	1870	1.74	26.0	0.048	0.0	0.0	-
D	G2-50	なし	-10	1850	1.09	18.9	0.032	18.0	30.2	0.6
D	G-40	なし	-10	1930	3.27	50.4	0.012	27.7	29.9	0.9
D	G-40	なし	0	1870	2.56	28.8	0.017	9.2	14.0	0.7
D	G-45	なし	-10	1900	1.29	8.4	0.030	15.3	31.0	0.5
D	G-45	なし	0	1870	1.10	20.4	0.021	7.8	10.9	0.7
D	H-31	なし	-10	2070	0.54	4.8	0.022	12.8	28.8	0.4
D	H-31	なし	0	1910	0.39	3.5	0.029	2.3	2.5	0.9
G	C-45	なし	0	1870	1.72	25.4	0.008	5.4	8.4	0.6
G	C-50	なし	0	1790	1.23	9.2	0.008	4.5	4.3	1.1
G	G2-50	なし	0	1870	1.73	30.4	0.008	5.8	9.2	0.6
G	G-40	なし	-10	1930	3.27	50.4	0.004	21.9	25.0	0.9
G	G-40	なし	0	1870	2.42	41.3	0.007	8.5	10.8	0.8
G	G-45	なし	0	1870	1.14	26.7	0.008	5.3	8.4	0.6
A	C-45	管中央	0	1870	1.72	25.4	0.025	41.6	31.1	1.3
A	C-45	管中央	10	1870	1.72	25.4	0.024	32.6	13.5	2.4
A	C-50	管中央	0	1790	1.38	18.0	0.018	15.6	26.4	0.6
A	C-50	管中央	10	1790	1.38	18.0	0.025	9.2	5.7	1.6
A	G2-50	管中央	0	1870	1.73	30.4	0.017	33.8	32.9	1.0
A	G2-50	管中央	10	1870	1.73	30.4	0.024	26.3	17.9	1.5
A	G-40	管中央	0	1870	2.56	28.8	0.021	39.2	33.6	1.2
A	G-45	管中央	0	1870	1.21	22.2	0.023	24.0	28.1	0.9
E	C-45	管中央	0	1870	1.72	25.4	0.009	17.0	16.3	1.0
E	C-50	管中央	0	1790	1.38	18.0	0.010	8.1	13.8	0.6
E	C-50	管中央	10	1790	1.38	18.0	0.040	3.5	0.0	-
E	G2-45	管中央	10	1870	1.74	26.0	0.028	0.0	0.0	-
E	G2-50	管中央	0	1870	1.73	30.4	0.009	11.7	17.9	0.7
E	G-40	管中央	0	1870	2.42	41.3	0.007	22.6	20.8	1.1
E	G-45	管中央	0	1870	1.14	26.7	0.010	13.9	16.3	0.9
F	C-45	管中央	0	1870	1.72	25.4	0.008	5.8	14.3	0.4
F	C-50	管中央	0	1790	1.38	18.0	0.012	6.1	12.0	0.5
F	G2-50	管中央	0	1870	1.73	30.4	0.009	10.4	15.7	0.7
F	G-40	管中央	0	1870	2.56	28.8	0.007	15.7	15.6	1.0
F	G-45	管中央	0	1870	1.14	26.7	0.011	10.1	14.3	0.7

※) 負の値は、上り勾配

ウト面の2点を結ぶ直線と軸線とのなす角度を読み取ることにより行われるために、先端角度の精度は、グラウト面の2点を選ぶ測定者や画像の解像度に左右される。したがって、先端角度の測定において、少なくとも $\pm 2\sim 3^\circ$ 程度の誤差は生じるものと考えられる。

試験結果について、それぞれ管内に鋼材がない場合および鋼材を管中央に配置した場合の実験結果を表-3に、鋼材を管底面に配置した場合の結果を表-4に示す。表-4には、目視による充填状況についても記号で示している。管が水平に置かれ、高粘性タイプのグラウトG2-45が用いられた場合に、一部空隙が認められる結果となっているが、

その他は管内がグラウトで充填されるのが確認された。前述の定義に従って求めた先端角度と充填性との関係調べてみると、一部空隙が認められたG2-45の先端角度が 16.2° であったのに対して、それ以下の角度であっても良好な充填が確認されている。低粘性タイプのG-45の場合、先端角度は 11.8° であり、超低粘性タイプH-31の場合、先端角度は 8.6° であった。実験データが少ないために、この結果が測定誤差の範囲の例外的な現象であるのか、粘性が低いタイプの充填現象を示しているのか判断しがたいが、著者はある実験条件下での粘性が低いタイプの充填現象を示しているのではないかと考えている。すなわち、管断面

表 - 4 試験および解析結果

試験体 タイプ	材料 記号	鋼材配置	勾配 ^{※)} α (度)	密度 ρ (kg/m ³)	塑性粘度 μ (Pa·s)	降伏値 τ_f (Pa)	流速 v (m/s)	測定値 θ_{exp} (度)	解析値 θ_{cal} (度)	$\frac{\theta_{exp}}{\theta_{cal}}$	充填状況
A	C-45	管底面	-10	1860	2.92	42.3	0.042	42.6	48.6	0.9	○
A	C-45	管底面	0	1860	2.92	42.3	0.034	32.9	39.5	0.8	○
A	C-50	管底面	-10	1840	1.34	16.3	0.042	20.6	42.2	0.5	○
A	C-50	管底面	0	1840	1.34	16.3	0.033	15.9	25.4	0.6	○
A	G2-45	管底面	-10	1900	2.42	11.5	0.036	27.4	42.8	0.6	○
A	G2-45	管底面	0	1900	2.42	11.5	0.030	16.2	23.0	0.7	△
A	G2-50	管底面	-10	1850	1.09	18.9	0.037	27.0	41.9	0.6	○
A	G2-50	管底面	0	1850	1.09	18.9	0.040	14.8	26.8	0.6	○
A	G-40	管底面	-10	1960	2.64	24.2	0.031	27.7	44.7	0.6	○
A	G-40	管底面	0	1960	2.64	24.2	0.027	26.3	31.0	0.8	○
A	G-45	管底面	-10	1900	1.38	2.9	0.038	23.8	36.6	0.6	○
A	G-45	管底面	0	1900	1.38	2.9	0.036	11.8	9.8	1.2	○
A	H-31	管底面	-10	2070	0.54	4.8	0.060	26.5	33.6	0.8	○
A	H-31	管底面	0	2070	0.54	4.8	0.047	8.6	9.1	0.9	○

※) 負の値は、上り勾配
○: 充填良好, △: 一部空隙が確認される

内において、鋼材より上部と鋼材より下部とでは空隙が異なり、下部にはグラウトは流れにくい。その結果、グラウト先端部が「くの字型」の形状になりやすく、鋼材より上部と下部のグラウトの速度差によって、グラウトが上部から下部に流れ込む。一方、下部を流れるグラウトもあり、この両者のグラウトで管底面付近が充填されることになる。しかし、粘性が低いと、流速にも依存するが、一般に鋼材上部から管底面に流れ込むグラウトよりも先に下部を流れるグラウトで管底面付近が充填される割合が高いと考えられ、鋼材上部を流れるグラウトは、上部空隙を満たすことに寄与する。今回の実験においては、鋼材上面から上部管内面までの距離がおよそ 16 mm と狭かったこと、グラウト速度が手動ポンプにより比較的遅かったこともあり、鋼材上面からの下面へのグラウトの流れ込みも少なく、先端角度が小さいにもかかわらず充填が良好であったのではないかと考えられる。しかし、下り勾配の注入実験において、鋼材上面をグラウトが流れ、先流れ現象が確認されており、現在のところ、鋼材が管底面にある場合、粘性の低いグラウトが、粘性の高いグラウトによりも充填性に関して有利であるとは結論づけられないと考えている。

3.3 グラウト先端角度の予測式

鋼材が管中心に配置された場合のグラウト先端角度の定式化をここでは行うことにする。グラウト先端角度の算定は、これまで著者らが提案している予測式を基本とするこ

とにした。すなわち、管内に鋼材がない場合、図 - 6 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つり合いから式 (1) が導かれ、さらにグラウト先端角度 θ はグラウトの物性、注入条件、および管の条件から式 (2) のように定式化される⁴⁾。

$$P + \rho g V \sin \alpha - \tau S = 0 \tag{1}$$

ここに、 P は OB 断面からグラウトに作用する力、 V は OAB 部分のグラウトの体積、 S は OAB 部分のグラウトが管内面に接している面積、 τ は管内面に作用するせん断応力、 ρ はグラウトの密度 (kg/m³)、 g は重力加速度 (m/s²)、 α は管の傾斜角度 (rad) である。

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

ここに、 θ はグラウト先端角度 (rad)、 v_m はグラウトの平均流速 (m/s)、 D は管の内径 (m)、 τ_f はグラウトの降伏値 (Pa)、 μ はグラウト塑性粘度 (Pa·s)、 μ_0 は水の粘性係数 (Pa·s)、 C_1 および C_2 は静水圧係数、圧力係数で式 (3) および式 (4) で与えられる⁴⁾。

$$C_1 = \frac{1}{1 + 0.35 \ln \frac{\mu}{\mu_0}} \tag{3}$$

$$C_2 = 4.0 \times 10^{-3} \tau_f \tag{4}$$

今回の実験では、管内に鋼材を配置しており、鋼材を管中央に配置した場合のグラウト先端角度の定式化をここでは試みることにする。鋼材が管の中央に配置される場合、

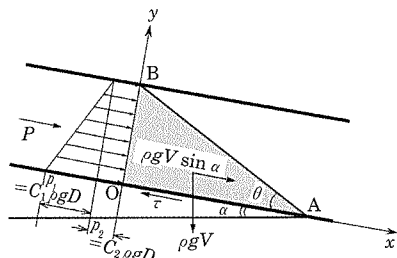


図 - 6 自由物体図

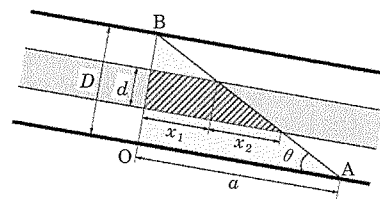


図 - 7 鋼材を有する場合のグラウト先端部の模式図

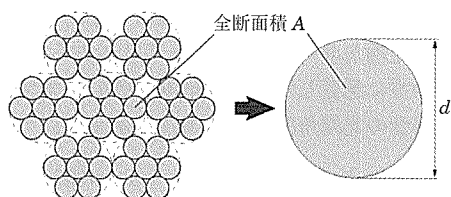


図-8 PC鋼材の見かけ上の換算径

鋼材がない場合の定式化に比べて、図-7に示すように、鋼材が存在する部分の圧力およびグラウトの体積は、図-6の場合に比べて減る一方で、グラウトが鋼材と接するため摩擦抵抗が増すと考えられる。また、PC鋼より線の場合、図-8に示すように、鋼より線より断面が構成され、円断面とみなすことができないので、PC鋼より線の実断面積を A としたとき、式(5)で求められる実断面積に相当する外径をPC鋼より線の換算径 d とすることにした。

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5)$$

鋼材の影響を考慮した、グラウト先端角度 θ (rad) を以下の手順で導出する。

図-7のOAB部分に着目して、相似の関係より、 x_1 、 x_2 がそれぞれ式(6)および式(7)で求められる。

$$x_1 = \frac{a}{D} \cdot \frac{1}{2} (D-d) = \frac{a}{2} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \quad (6)$$

$$x_2 = \frac{ad}{D} \quad (7)$$

図-7における鋼材を表わした斜線部分の圧力 P' は、図-6の自由物体におけるOB断面の鋼材部分に作用する圧力分布を積分することによって求められ、式(8)で与えられる。

$$P' = \frac{\pi \rho g d^2}{4} \left(\frac{C_1}{2} + C_2 \right) D \quad (8)$$

図-7における斜線部分の体積 V' は、式(6)および式(7)を用いることにより、式(9)で求められる。

$$V' = \frac{\pi d^2}{4} \cdot x_1 + \frac{\pi d^2}{8} \cdot x_2 = \frac{\pi d^2 a}{8} \quad (9)$$

図-7における斜線部分の周面積 S' は式(10)で求められる。ただし、PC鋼より線を7本よりと考えると場合、竹田によるとPC鋼より線の周長は $S = 1.33 \pi d$ で求められ、円の場合に比べ約1.33倍の周長になる⁸⁾。したがって、鋼材の周長を S' としたとき、鋼材の種類に応じて周長を補正する係数 k を導入することにし、PC鋼より線(7本より)の場合 $k = 1.33$ 、鋼棒のように円断面と考えられる場合は $k = 1$ を採用することにした。

$$S' = k \left(\pi d x_1 + \pi \frac{d x_2}{2} \right) = k \frac{\pi d a}{2} \quad (10)$$

鋼材の影響を考慮して、式(1)中の圧力 P 、グラウト体積 V および周面積 S を鋼材の影響を考慮して P' 、 V' 、 S' で補正すると式(11)を得る。

$$(P - P') + \rho g (V - V') \sin \alpha - \tau (S + S') = 0 \quad (11)$$

流動するグラウトに生じるせん断応力 τ は、ビンガム流体であることを仮定することにより、式(12)で表すこと

ができる。

$$\tau = \tau_f + \mu \frac{dv}{dy} \quad (12)$$

ここに、 τ_f はグラウトの降伏値 (Pa)、 μ はグラウト塑性粘度 (Pa·s)、 dv/dy は速度勾配である。速度勾配を直接求めることが難しいので、管内に鋼材が配置されていない場合には、式(2)に示すように、速度勾配 dv/dy を管内を流れるグラウトの平均流速 v_m と管径 D とを用いて表すことにした。しかし、管内に鋼材が配置されている場合には、管内を流れるグラウトの有効径は見かけ上減少するので、有効径を $D-d$ で代表させることにした。したがって、グラウトに作用するせん断応力 τ は、近似的に式(13)で表すことができる。

$$\tau = \tau_f + \mu \frac{v_m}{D-d} \quad (13)$$

式(8)~(10)および式(13)を式(11)に適用し、 $\tan \theta = \frac{D}{a}$ を代入して整理すると式(14)が得られる。この式より管中央に鋼材を配置した場合のグラウト先端角度 θ (rad) を求めることができる。

$$\tan \theta = \frac{4 \left(\tau_f + \mu \frac{v_m}{D-d} \right) (D+kd)}{\rho g (D^2-d^2) (C_1+2C_2)} - \frac{\sin \alpha}{C_1+2C_2} \quad (14)$$

導出された式(14)は $d \rightarrow 0$ の場合、式(2)に一致し、鋼材がない場合の先端角度式に一致する。また $d \rightarrow D$ の場合、式(14)の第1項は限りなく大きくなるために先端角度は90度に近づくことになり、空隙率が小さくなると先端角度が立ってくる現象を表現している。

3.4 解析結果および考察

グラウト先端角度を式(14)を用いて算定した解析値について、管内に鋼材がない場合、および管中央に鋼材を配置した場合の解析結果、および実験から得られた先端角度の測定結果を表-3示す。また、グラウト先端角度の解析値を横軸に測定値を縦軸にプロットしたものを図-9~10に示す。図-9は管内に鋼材のないもの、図-10は管の中央に鋼材を配置したものをそれぞれ示している。解析では、下り勾配の場合で、角度が負になる場合にはゼロとして示している。管内に鋼材を有しない場合の計算値と実測値との相関係数は $R = 0.91$ となり、これまで提案された式(2)

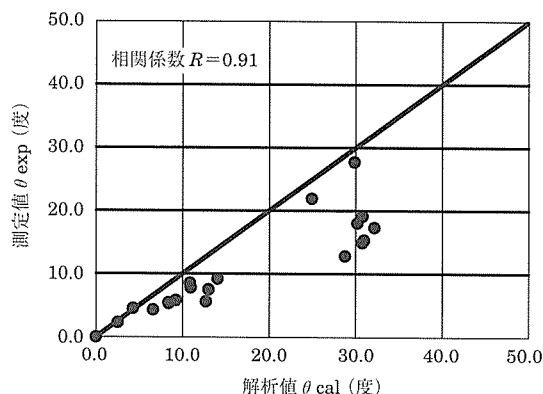


図-9 解析値と測定値の関係(鋼材なし)

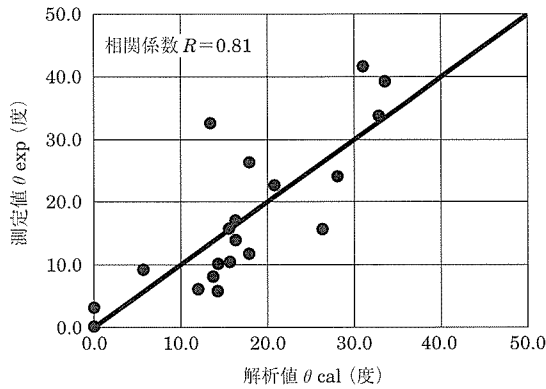


図 - 10 解析値と測定値の関係(鋼材を管中央に配置)

が今回の実験結果に対しても相関性が高いことを示す結果となっている。また、管の中央に鋼材を配置した場合の相関係数は $R=0.81$ となり、鋼材のない場合に比べると測定値と解析との相関関係は低下する結果となった。これは、管内に鋼材が存在することにより、グラウトの流れがより複雑になったこと、および画像上から求められるグラウト先端部の傾斜角度の取りかたに個人差が生じやすくなるなどの誤差が生じやすくなったことが原因として考えられる。図 - 10 からは、グラウト先端角度の計算値と実験値との間にばらつきも認められるが、先端角度の傾向をある程度推定できるものと考えられる。

曲線配置されたダクト内において、緊張された PC 鋼材は、ダクト中心から外れて位置することが考えられる。とくに、鋼材が管底面に位置すると、鋼材の上面を先にグラウトが流れ、未充填部分を生じることも考えられる。また、3.2 節でも述べたように、鋼材を中心に配置した場合と充填状況異なり、「くの字型」の形状で充填され、鋼材上面部分を流れるグラウト速度がさらに速くなると、鋼材上面を流れたグラウトが下に落ちながら管底面部分にグラウトが流れ込む現象が見られる。

鋼材が管底面にある場合のグラウトの充填機構は、鋼材が管中央に配置された理想的な状態に比べて複雑で、単純化された力学モデルから数値モデル化を試みるのは難しいと判断される。また、先端角度に関しても、鋼材がない場合や管中央に鋼材が配置される場合と異なり、明確な定義で先端角度を測定することに難点があるので、鋼材が管底面にある場合のグラウト先端角度の定式化は行わず、鋼材が管中心にある場合の実験結果および解析結果と比較することにより、鋼材が管底面にある場合の充填性を検討することにする。

表 - 5 鋼材の配置位置による先端角度の比較

試験体タイプ	材料記号	勾配 α (度)	中央 θ_c (度)	底面 θ_b (度)	$\frac{\theta_b}{\theta_c}$
A	C-45	0	41.6	32.9	0.79
A	C-50	0	15.6	15.9	1.02
A	G2-50	0	33.8	14.8	0.44
A	G-40	0	39.2	26.3	0.67
A	G-45	0	24.0	11.8	0.49

表 - 5 は、実験条件が同じで、鋼材の配置位置のみが異なる場合の先端角度の比較を示したものである。

鋼材を中央に配置した場合の先端角度 θ_c に対する底面に配置した場合の先端角度 θ_b との比を求めると、その値にはばらつきが見られるが、 $\frac{\theta_b}{\theta_c}$ は 0.49 ~ 1.02 の範囲にあり、平均値は 0.68 であった。また、表 - 4 には、鋼材が管中央にある場合に適用される式 (14) を用いて先端角度を求めた場合の計算結果を示しており、計算結果と測定値を図示したものが、図 - 11 である。式 (14) を適用して求めた先端角度 θ_c に対する底面に配置した場合の実験から得られた先端角度 θ_b との比を求めると、 $\frac{\theta_b}{\theta_c}$ は 0.49 ~ 1.2 の範囲にあり、

平均値は 0.74 であった。鋼材が管底面にある場合の先端角度は、管中央に鋼材がある場合の実験値および解析値よりも 2 ~ 3 の例外はあるものの全体として下回る傾向が見受けられる。これは、図 - 5 に示すように鋼材上部にあるグラウトが底面に移動しやすい状態にあるために、鋼材が管中央にある場合比べて、先端角度が低下するのではないかと考えられる。鋼材が管底面にある場合の先端角度は、管中央に鋼材がある場合の先端角度を上回することは考えにくく、鋼材が底面にある場合には、管中央に配置した場合の先端角度よりも低くなる傾向があると考えられる。式 (14) を適用して求めた先端角度の比 $\frac{\theta_b}{\theta_c}$ から、1.0 以上のデータを除いた場合の平均値は、0.71 となり変動係数は 13 % であった。実験から得られた先端角度の比 $\frac{\theta_b}{\theta_c}$ は、データ数も少ないが、1.0 以上のデータを除いた場合の平均値は 0.60、変動係数は 27 % であった。鋼材が管底面にある場合の先端角度は、管中央に鋼材がある場合の先端角度の解析値および実験値のいずれに対しても低く見積る必要があると考えられる。鋼材が管底面にある場合の先端角度を厳密に予測することは難しいが、式 (14) を適用して求めた先端角度のおよそ 0.6 ~ 0.7 倍程度が目安になるのではないかと考えられる。

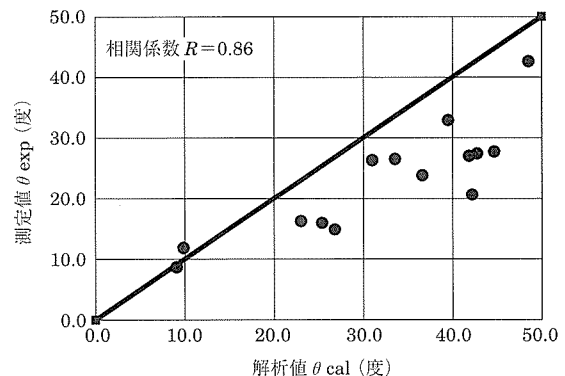


図 - 11 解析値と測定値の関係(鋼材を管底面に配置)

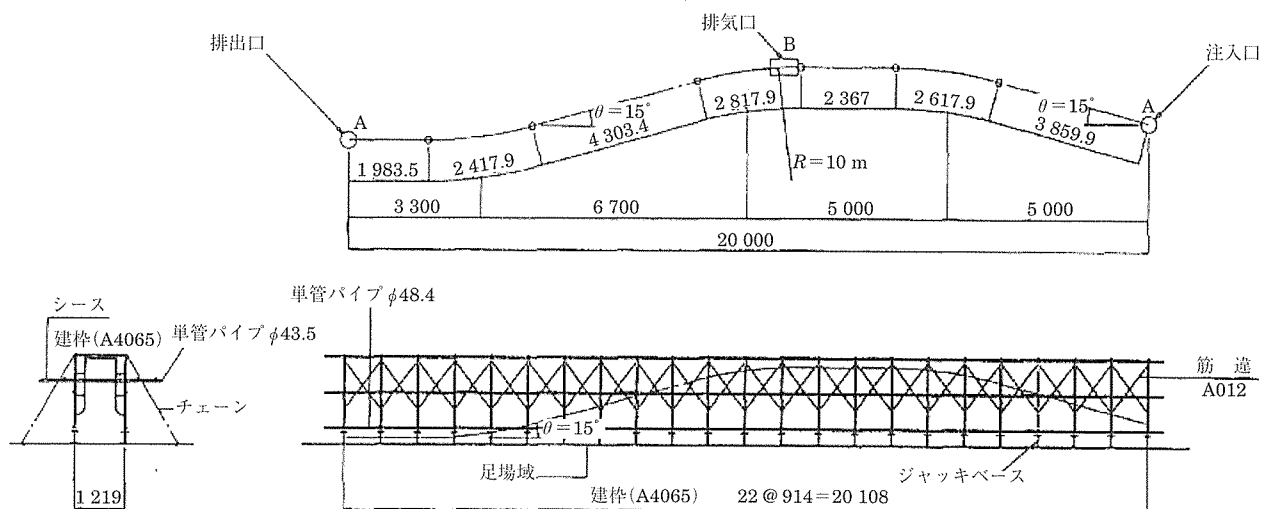


図 - 12 ケーブルの形状および配置図

4. 実物大レベルでのグラウト注入実験との比較

プレストレストコンクリート建設業協会では、グラウトの充填性能を評価するために、平成 10 年度および平成 13 年度に実物大レベルでのグラウト注入実験を行っている。この実験は、グラウト先端角度に着目した実験ではないが、この実験結果に対して、今回行った研究結果をもとにグラウト先端角度と充填性との関係について検討を試みることにする。

4.1 実験条件

本実験は、計 15 通りの実験条件で行われている。

(1) ケーブル形状

実験には図 - 12 に示すようなケーブル全長が 11.6 ~ 20.4 m の下り勾配を有する実物大レベルの装置が使用されている。シースは透明なプラスチックシース（内径 65 mm）、半透明のポリエチレン製シース（内径 65 mm および内径 75 mm）、鋼材は、PC 鋼より線 12 T 12.7, 12 S 15.2 が使用されており、下り勾配部の角度は 5, 15, 25 度の 3 種類となっている。実験結果を表 - 6 に示す。

(2) ポンプ・注入流量

ミキサの回転数は 1 000 rpm のものが用いられており、ポンプはスクイズ式、ロータリー式の 2 種類の電動ポンプで、注入流量 10 l/min で注入が行われている。

(3) グラウト配合

グラウト材料は、混和剤にノンブリーディング高粘性型、ノンブリーディング粘性型を使用したタイプと、プレミックスタイプの超低粘性型、高粘性型が使用されている。表 - 7 に 1 バッチ（セメント 4 袋）あたりの混和剤ごとの標準配合を示す。また、ノンブリーディング型グラウトは温度によって粘性が変化するため、一般的に使用されるグラウト温度である 20 °C と、粘性が低くなる想定される 30, 35 °C の 3 種類の温度で一部の材料について実験が行われている。

4.2 実験方法および測定項目

グラウトの注入は流量計で吐出量を確認しながら行い、注入中は下り勾配におけるグラウト先端部の充填状況と残留空気の有無の観察が行われている。注入終了時には 0.2 MPa の加圧を行い、注入を終了する。注入終了後、シース内に残留空気が確認された場合にはその長さを測定する。

表 - 6 注入実験結果および解析結果

No.	材料記号	使用シース	傾斜角度(度)	グラウト温度(°C)	流下時間 J ₁₄ (s)	塑性粘度 μ(Pa·s)	降伏値 τ _f (Pa)	注入流量 (l/min)	解析値 θ _{cut} (度)	残留空気 (m)
1	G 2 - 45	透明シース	15	21	6.2	1.4	11.4	11.1	10.4	4.0
2	C - 45	透明シース	15	21	9.7	2.5	21.1	10.4	16.1	2.5
3	Y - 45	PE シース	15	20	5.6	1.2	9.7	9.8	10.3	3.0
4	M - 40	PE シース	15	22	8.7	2.2	18.3	10.2	17.2	2.5
5	G 2 - 45	PE シース	15	26	5.5	1.1	9.4	10.0	10.3	3.0
6	C - 45	PE シース	15	28	10.0	2.6	21.9	9.4	18.6	0
7	G 2 - 45	PE シース	15	35	4.8	0.9	7.5	10.1	8.4	4.0
8	C - 45	PE シース	15	37	9.7	2.5	21.1	9.0	18.1	1.5
9	M - 40	PE シース	15	37	7.2	1.7	14.2	9.6	14.2	2.0
10	Y - 45	PE シース	15	35	5.0	1.0	8.1	9.6	8.7	5.0
11	C - 45	PE シース	5	29	14.5	4.1	34.4	9.2	20.8	0
12	C - 45	PE シース	15	20	14.5	4.1	34.4	10.1	21.0	0.2
13	C - 45	PE シース	25	29	11.0	3.0	24.7	9.8	17.7	0.6
14	K - 31	PE シース	5	30	3.1	0.3	2.8	9.5	2.5	2.7
15	K - 31	PE シース	15	30	3.0	0.3	2.5	9.6	1.9	5.7

グラウト材料の性状についてはグラウト温度、 J_{14} 漏斗流下時間の測定を行う。

4.3 実験結果および考察

この実験においては、グラウトの降伏値および塑性粘度の測定が行われていないため、 J_{14} 漏斗流下時間から、塑性粘度および降伏値を推定することにした。塑性粘度および降伏値は、これまで行ったグラウトの粘度試験と J_{14} による漏斗試験データを回帰して、式(15)および式(16)を求めている⁴⁾。

$$J_{14} = 0.36 \tau + 2.1 \quad (15)$$

$$\mu = 0.12 \tau \quad (16)$$

この回帰直線を用いると、実物大実験に用いたグラウトの降伏値 τ (Pa)と塑性粘度 μ (Pa·s)を推定することができる。この実験においては、グラウトの先端角度は測定されていない。また、鋼材は緊張されることなく、シース底面に置かれた状態で実験行われている。この実験の場合、推定される先端角度は、3.5の考察より、式(14)から得られる先端角度より低く見積もる必要があると考えられる。ここでは、検討例として、式(14)より算出されるグラウト先端角度に0.6を乗じて、この実験における先端角度を試算することにした。

注入実験では、注入後シース上面に生じた残留空気が観察されており、この残留空気の長さから計算から推定される先端角度との関係を調べてみた。表-6には、式(14)を適用して求めた先端角度の算定結果を示している。また、図-13には、グラウト先端角度の推定値と残留空気の関係を示している。図-13からは、鋼材を管底面に配置した場合の先端角度と注入後の残留空気の長さとの間には、相関関係が認められ、先端角度が増加するに伴い、残留空気の長さが減少する傾向が認められる。また、先端角度が20度前後を境にして、残留空気の長さが生じなくなっていることが理解される。

前述のように、実物大実験においては先端角度および粘性の測定が行われておらず、これまで行ってきた実験データから推定して先端角度を求めているために、計算結果の信頼性についてはあまり期待できないと考えている。しかし、実物大レベルのPC鋼より線を有する注入実験においても、鋼材が管中央にある場合の仮定から求められるグラウト先端角度の値を低減して用いることにより、充填性を

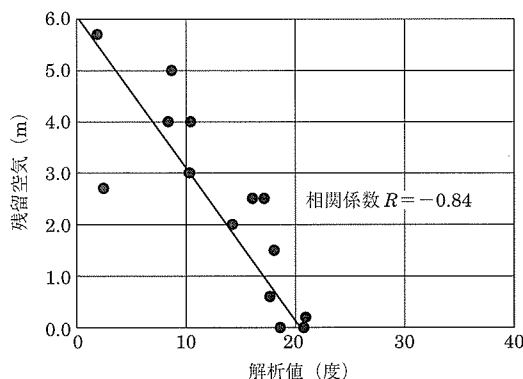


図-13 先端角度解析値と残留空気の関係

評価することがある程度可能ではないかと考えられる。さらに、グラウトが確実に充填されるために、あらかじめ注入計画を検討する場合、先端角度が20度程度を確保されることが、充填性評価の目安になるのではないかと考えられる。

5. まとめ

シース管内に鋼材を有する充填試験装置を用いて実験を行い、グラウト先端角度が充填性に及ぼす影響について検討を行った。今回の検討について以下のことが結論として得られた。

- (1) 管中央に鋼材を有する場合のグラウト先端角度は、鋼材が無い場合に比べ角度が立つ傾向にあり、充填状況は良くなる傾向が認められた。
- (2) 管を水平に配置した場合に比べ、上り勾配の場合にはグラウト先端角度は大きくなり、逆に下り勾配の場合には先端角度は小さくなり、流速が小さいと先流れを起す傾向が認められた。
- (3) 同径の管の場合、PC鋼より線を用いた試験体は、塩化ビニル管、鋼管を用いた試験体よりも、空隙率は大きいにもかかわらず、先端角度が大きくなる傾向が認められた。これはPC鋼より線の内部摩擦抵抗が大きいためと考えられ、実験結果からは空隙率の違いよりも鋼材の形状が先端角度に与える影響が大きいと判断された。
- (4) 定式化された先端角度の予測式は、鋼材のない場合に比べると精度は落ちるが、先端角度をある程度予想できると考えられる。
- (5) PC鋼より線を管底面に配置した場合、先端角度が鋼材を中央に配置した場合に比べ、小さくなる傾向が認められた。これは鋼材上面からの下面にグラウトが流れ込むためではないかと考えられる。
- (6) 下り勾配を有する実物大レベルの注入実験において、解析から推定されたグラウト先端角度と残留空気の長さの間には相関性が認められた。
- (7) グラウトの充填性を施工計画時にあらかじめ評価する場合に、先端角度をある程度確保することが、一つの目安になると考えられる。

謝 辞

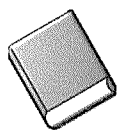
本研究を行うにあたり、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会からは貴重な実験データを提供して頂きました。また、(株)富士ビー・エスの太田豊氏、菅野昇孝氏、山口光俊氏には、実験や研究に関して多大な協力を頂きました。グラウト材料に関しましては、(株)ポゾリス物産、(株)太平洋マテリアル、フォセコ・ジャパン・リミテッド各社より、ご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会耐久性委員会：ノンブリーディンググラウトへの移項について、プレストレストコンクリート、Vol.40, No.3, pp.71-75, 1998
- 2) 社団法人 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.52 PC構造物の現状の問題点とその対策, 2003.6

- 3) 出雲淳一：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，42巻，第5号，pp.37-42，2000.9
- 4) 水上伸介，出雲淳一：PCグラウトの充填性能評価に関する一考察，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.5，pp.71-pp80，2001.9
- 5) 水上伸介，出雲淳一：数値シミュレーションによるPCグラウトの充填性能および施工性の評価，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.95-100，2001.11
- 6) 出雲淳一：PCグラウトの充填性評価とその施工への適用について，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.6，pp.104-109，2001.11-12
- 7) 山口征伸，水上伸介，川村幸典，鈴木雅博，出雲淳一：実物大レベルにおけるPCグラウトの流動性および充填性に関する基礎的実験，プレストレストコンクリート，Vol.45，No.5，2003.9-10
- 8) 竹田清二：PC鋼より線と被覆PC鋼より線の周長について，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.4，2001.7-8

【2004年3月18日受付】



刊行物案内

プレストレストコンクリート構造物の 新たな動向

第32回PC技術講習会

(平成16年2月)

頒布価格 会員特価：5 000円（税込み・送料別途500円）
非会員価格：6 000円（税込み・送料別途500円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会