

高チクソトロピー性 PC グラウトの研究開発

蝦名 貴之*1・二戸 信和*2・丸岡 正知*3・藤原 浩巳*4

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋（以下、PC 橋）の耐久性に大きな影響を与える重要なものとして PC グラウトがある。近年では、部材断面の縮小化に伴う軽量化や維持管理の容易さなどの理由から緊張材をコンクリート部材の外に配置した外ケーブル工法の普及が盛んであるが、外ケーブル工法も従来から実施されてきた内ケーブル工法と基本的な施工上の留意点は同様であるといえる。

内ケーブル工法に PC グラウトを適用する場合の目的は、PC 鋼材を腐蝕から保護することと PC 鋼材と部材コンクリートの間の一体性を確保することである。PC 鋼材が腐食してしまうと最終的には破断に至る可能性があり、構造物としては致命的なものとなり得る。そのため PC グラウトにはシース管内を空隙なく充てんし、材料分離によるブリーディング水の発生を防止し、さらに、硬化に伴う収縮によるひび割れの発生を防止することが要求される。

現在、プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC 建協）では、平成 9 年 4 月より、グラウトはノンブリーディングの使用が義務づけられており、また、粘性の面から高粘性型と低粘性型に分けられる。これらのグラウトの特徴として高粘性型グラウトは粘性が高いことによりシース傾斜角 15° までは確実な充てんが可能であるが、注入区間が長いシース内に確実な充てんをしようとするれば、注入ポンプ圧を高くせざるを得ず、ポンプの圧送能力を超えて閉塞に至る場合がある。このため、PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル（改訂版 2002¹⁾（以下、施工マニュアル）では図 - 1 に示すように適切な位置に複数箇所の注入口および排出口を設けて注入計画を行うこととしているが、シース管の製作効率および充てん作業の効率化の面で懸念が想定される場合がある。

低粘性型グラウトは粘性が低いため注入ポンプ圧を低く抑えることが可能であり、注入区間が長くても一度に注入することができる。しかしながら、多径間の PC 橋においては橋軸方向のケーブル配置は、図 - 1 に示すような波形形状となるが、このとき、粘性が低いことによりシース管の下り勾配部で図 - 2 のような先流れ現象が発生しやすく、シース内に空隙が残った状態で充てん作業が終了してしまう場合がある。

これらのことから、下り勾配部を有するシース管内にお

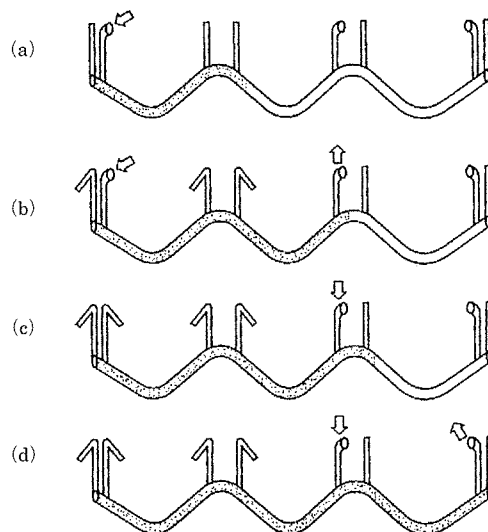


図 - 1 ステップバイステップ式グラウト注入（施工マニュアル¹⁾より抜粋）

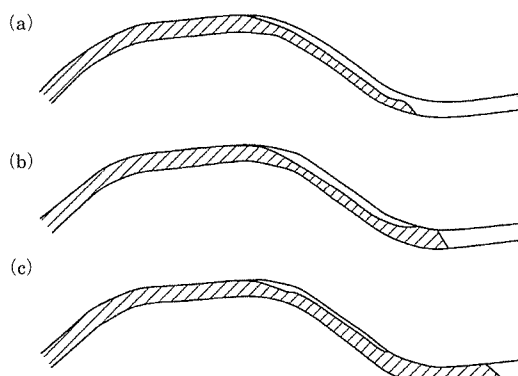


図 - 2 先流れによる残留空隙の発生メカニズム（施工マニュアル¹⁾より抜粋）

いて PC グラウトを確実に充てんするためには、低粘性型グラウトの流動性と高粘性型グラウトの充てん性を同時に満たす性能が必要であると考えられる。そこで、PC グラウトにチクソトロピー性を付与することでこれらの性能を同時に満たすことを目的に研究開発を行った。

そもそもチクソトロピー性とは、レオロジー特性の一種であり、せん断速度の増加とともに粘性が見かけ上減少するというものであり、たとえていうならばマヨネーズや歯

*1 Takayuki EBINA : ドービー建設工業(株) 技術センター 主任研究員

*2 Nobukazu NITO : (株) デイ・シー セメント事業本部 川崎工場

*3 Masanori NARUOKA : 宇都宮大学 工学部 建設学科 助手

*4 Hiromi FUJIWARA : 宇都宮大学 工学部 建設学科 助教授 工学博士

磨き粉のような性状を示すものである。それらは容器を逆さにしても中身は出てこないが、容器に力を加えたり振ったりする、つまり、せん断速度を増加させると粘性が低下し流動性が増して排出される。

この特性をPCグラウトに付与すれば、シース管内においては注入時の圧力を受けることで粘性が低下し、低いポンプ圧で注入作業が可能となり得る。また、シース管内に充てん中のグラウト先端部においては、シース管内の空間に非加圧状態で充てんされるため、粘性が回復し、シース管の下り勾配部において先流れ現象にともなう残留空隙の発生を防止することができる。

本報告では、高チクソトロピー性PCグラウト（以下、高チクソ型グラウト）を開発し、現在、標準的に使用されている高粘性型および低粘性型PCグラウトとの性状比較と実橋を想定した実物大のケーブル配置による充てん実験の最新の結果について報告するものである。

2. 各種品質管理試験

高チクソ型グラウトの品質性状を把握するため、各種品質管理試験を行い評価することとした。比較用として従来から一般的に使用されている高粘性型および低粘性型グラウトの品質管理試験も同時に行った。

2.1 使用材料および配合

品質管理試験に使用した高チクソ型グラウトの化学成分を表-1に、低粘性型グラウトおよび高粘性型グラウトの

表-1 高チクソ型グラウトの化学成分

Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
0.94	27.62	5.46	2.23	53.50	2.38	6.70	0.32	0.40

表-2 低粘性および高粘性型グラウトの使用材料

種類	使用材料	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.15 g/cm ³ 比表面積：3310 cm ² /g
混和剤	高粘性型グラウト用混和剤	GF	メラミンスルホン酸系化合物
	低粘性型グラウト用混和剤		
水	水道水	W	密度：1.00 g/cm ³

表-3 高チクソ型グラウトの配合

W/P (%)	単位量 (g/l)	
	W	P
31.0	481.0	1552.7

表-4 低粘性型グラウトの配合

W/P (%)	単位量 (g/l)		混和剤 (C×%)
	W	C	GF (低粘性用)
45.0	586.3	1303.0	1.0

表-5 高粘性型グラウトの配合

W/P (%)	単位量 (g/l)		混和剤 (C×%)
	W	C	GF (高粘性用)
42.5	572.4	1346.9	1.0

材料を表-2にそれぞれ示す。また、高チクソ型グラウト、低粘性型グラウトおよび高粘性型グラウトの配合を表-3～表-5にそれぞれ示す。

高粘性型グラウトおよび低粘性型グラウトの混和剤は一般的に使用されているメラミンスルホン酸系化合物および水溶性高分子エーテル系化合物を主成分としたものを使用した。

高チクソ型グラウトの混和材はチクソトロピー性を付与する役割としてベントナイトを用いている。ベントナイトは粘土鉱物の一種であり、モンモリロナイトを主成分とする層状ケイ酸塩である。このモンモリロナイトは結晶構造が層状になっているため、層間に水分子が吸着して体積が増大する膨潤作用を発生させ、これがチクソトロピー性に大きく関与している。

しかしながら一方でベントナイトを用いた場合、一般的には強度の低下を引き起こすことが知られている²⁾。このため、所要の強度を得るために特殊混合セメントを使用している。

2.2 各種グラウトの練混ぜ方法

練混ぜは図-3に示す手順で行った。1バッチあたり11として回転数が140 rpmのホバートミキサを使用し、室温20℃の実験室内で実施した。

2.3 品質試験項目および方法

(1) JP漏斗流下試験

JP漏斗流下試験は図-4に示すJP漏斗を用いて、土木学会コンクリート標準示方書（規準編）³⁾「PCグラウトの流動性試験方法（JSCE-F531-1999）」に準じて行った。

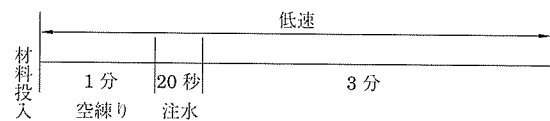


図-3 練混ぜ手順

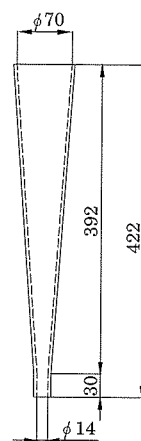


図-4 JP漏斗

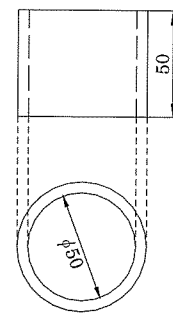


図-5 フローコーン

(2) フロー試験

フロー試験は図-5に示すフローコーンを用いて行った。グラウトの詰め込みは通常、フローコーン内に一度に流し

込むものとするが、高チクソ型グラウトについては上面が盛り上がるため、上面はスペーシングナイフを用いてならした。また、流し込むことが困難な場合は、スプーン等で5回程度突きながら密実に詰め込み、最後に上面を同様にならした。

(3) レオロジー特性試験

高チクソ型グラウトが、ビンガム流体と見なされる従来の高粘性および低粘性型グラウトに比べてどの程度レオロジー的挙動が異なるかを評価することを目的とした。測定は内円盤型回転粘度計を用いて、JIS Z 8803「液体の粘度-測定方法」およびJIS K 7117-2「プラスチック-液状、乳濁状または分散状の樹脂-回転粘度計による定せん断速度での粘度の測定方法」などに準じて行い、流動曲線を得た。

(4) 加圧流下試験

高チクソ型グラウトが従来の高粘性および低粘性型グラウトに比べてどの程度のチクソトロピー性を有しているかを評価することを目的とした。現在のところチクソトロピー性の評価方法は規格化されていないのが現状である。そのため本報告では、圧力の作用で塑性粘性が低下するといったチクソトロピー性の特徴を利用し、加圧流下試験を行うことで圧力と流下時間の関係を調べ、チクソトロピー性の評価を行った。試験には図-6および写真-1に示すJP漏斗を内部に装着した加圧流下試験装置およびエアコンプレッサーを用いた。測定項目は、0.1 MPa (約1気圧)の圧力をかけた状態のJP漏斗流下時間とした。試験手順を次に示す。

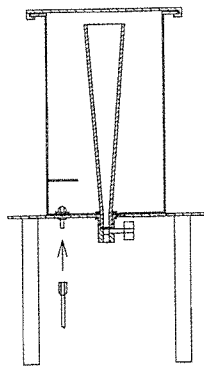


図-6 加圧流下試験装置



写真-1 加圧流下試験装置 (実物)

- ① 圧力流下試験装置内のJP漏斗に水を通し、内側を湿らす。
- ② コックを閉め、漏斗にグラウトを注ぎ、ふたを閉める。
- ③ 圧力弁を調節して、容器内を所定の圧力にする。
- ④ コックを開いてグラウトを流出させ、流出開始からグラウト流が流れきるまでの流下時間をストップウォッチで測定し、10分の1秒の単位で表す。
- ⑤ 器内を減圧し、ふたを開けて漏斗内のグラウトの残留状態を確認し、ほぼ全量が流出したことを確認する。この試験による漏斗流下時間と、(1)の通常の漏斗流下時間との差より、チクソトロピー性を評価した。

(5) ブリーディング率試験および膨張率試験

ブリーディング率試験および膨張率試験を土木学会コンクリート標準示方書(規準編)³⁾「PCグラウトのブリーディング率および膨張率試験方法(ポリエチレン袋方法)(JSCCE-F 532-1999)」に準じて行った。測定項目は、練混ぜより3時間後のブリーディング率および20時間後のブリーディング率・膨張率、4日後の膨張率とした。

(6) 加圧ブリーディング率試験

高チクソ型グラウトの加圧下におけるブリーディングがどの程度であるかを評価することを目的とした。

現在のところ国内においては、グラウトの加圧ブリーディングの評価方法は規格化されておらず、グラウトの加圧ブリーディングの評価を行っている研究も数例ほどしか確認されていないのが現状である^{4), 5)}。そのため本報告では、海外で用いられている加圧ブリーディング試験(Schupack Pressure Bleed Test Procedure for Cement Grouts for Post-Tensioned Structures⁶⁾)を参考にし、図-6の加圧流下試験装置の排出部先端にフィルターを装着し(図-7参照)加圧ブリーディング試験を行った。測定項目は、0.5 MPa (約5気圧)の圧力を5分間かけて発生するブリーディング水の体積とした。試験手順を次に示す。

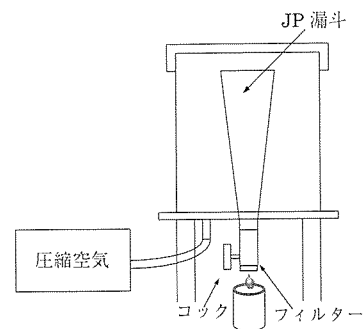


図-7 加圧ブリーディング試験装置

- ① JP漏斗流出口に接続したコックの部分に上からパッキン、珪酸ガラス濾紙(1 μm孔サイズ)、濾紙を支えるステンレススクリーンの順で設置する。
- ② コックは開放しておく。
- ③ 容器内のJP漏斗にグラウトを注ぎ、ふたを閉める。
- ④ グラウトを漏斗内に10分間放置する。
- ⑤ 圧力弁を調節して、容器内の圧力を0.5 MPaにする。

- ⑥ 0.5 MPa を 5 分間維持し、その間に流出するブリーディング水量を時間終了まで測定し、0.1 ml の単位で表す。
- ⑦ 次の式により加圧ブリーディング率を算出する。

$$\text{加圧ブリーディング率 (\%)} = \frac{B_p}{V} \times 100 \quad (1)$$

(7) 圧縮強度試験

圧縮強度は材齢 28 日について測定し、土木学会コンクリート標準練示方書（規準編）³⁾「PC グラウトの圧縮強度試験方法（JSCE - G 531 - 1999）」に準じて試験を行った。供試体は直径 5 cm、高さ 10 cm の円筒型とし、一度の測定に 3 本以上の供試体を用いた。

2.4 品質試験結果

(1) JP 漏斗流下試験結果

JP 漏斗流下時間を図 - 8 に示す。ここで図 - 8 には参考値として水の流下時間も示すこととした。図 - 8 より、JP 漏斗流下時間は低粘性型グラウトが 10.74 秒、高粘性型グラウトが 20.50 秒、高チクソ型グラウトは最後まで流下せずに閉塞した。この結果、高チクソ型グラウトの粘性は、高粘性型グラウトよりも高いことが分かった。また、参考値として水は 1.97 秒であった。

(2) フロー試験結果

フロー試験の結果を図 - 9 に示す。図 - 9 より、フロー値は低粘性型グラウトが 176.3 mm、高粘性型グラウトが 150.3 mm、高チクソ型グラウトが 83.4 mm であった。この結果、高チクソ型グラウトの降伏値は、低粘性および高粘性型グラウトに比べて非常に大きいことが分かった。

また、低粘性型グラウトのフロー供試体を写真 - 2、高粘性型グラウトのフロー供試体を写真 - 3、高チクソ型グラウトのフロー供試体を写真 - 4 にそれぞれ示す。これらより、

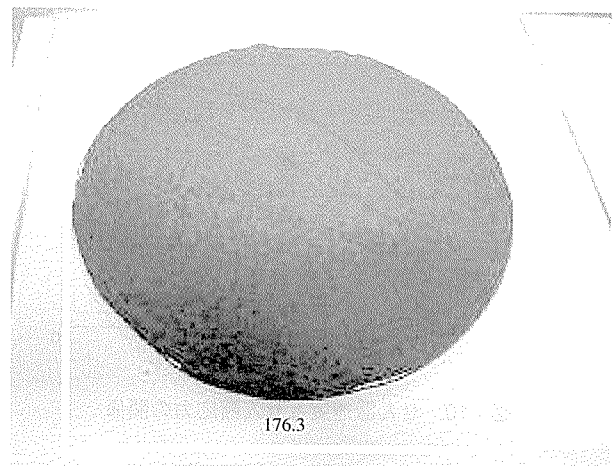


写真 - 2 低粘性型グラウト

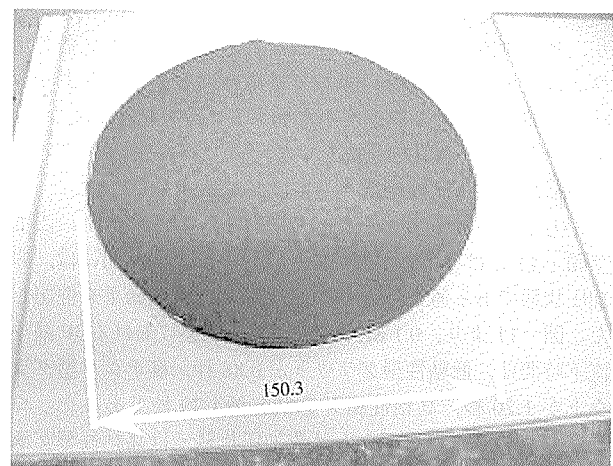


写真 - 3 高粘性型グラウト

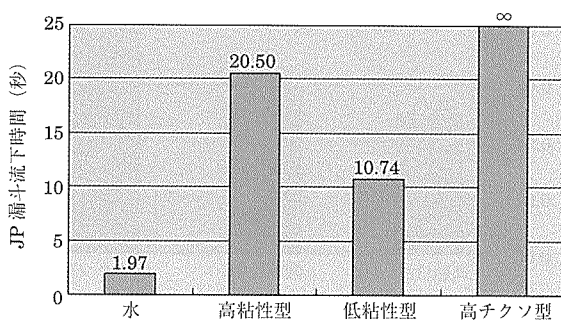


図 - 8 JP 漏斗流下時間

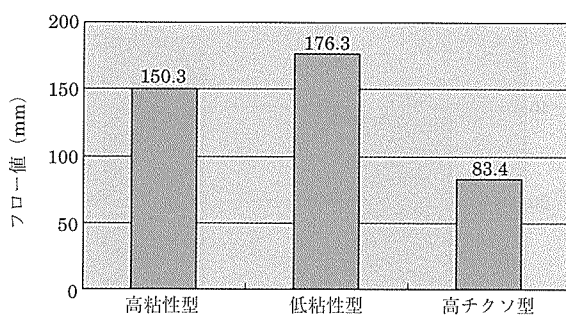


図 - 9 フロー値

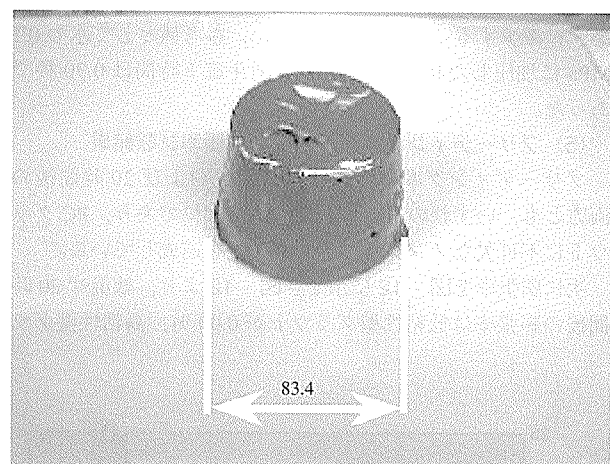


写真 - 4 高チクソ型グラウト

高チクソ型グラウトのフロー供試体は、高粘性および低粘性型グラウトに比べて非常に広がり小さく、形状を維持するような結果となった。

(3) レオロジー特性試験結果

回転粘度計によって測定したせん断速度とせん断応力の関係を図 - 10 に示す。図の傾きは粘性を示しており、図 -

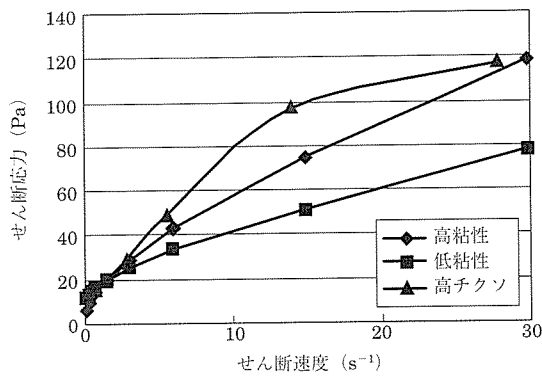


図 - 10 せん断速度とせん断応力の関係

10 より、高粘性型グラウトの粘性は高く、低粘性型グラウトの粘性は低いことが確認できる。また、高粘性および低粘性型グラウトの粘性は回転数が増加してもほぼ一定であり、ビンガム流体の挙動を示した。一方、高チクソ型グラウトはせん断速度の低い領域では高粘性型グラウトよりも粘性が高いが、せん断速度が増加するに伴い粘性が減少し、チクソトロピー流体の挙動を示した。

(4) 加圧流下試験結果

圧力下における JP 漏斗流下時間を図 - 11 に示す。ここで図 - 11 には参考値として水のデータも示す。図には、非加圧状態である通常の JP 漏斗流下時間の測定結果を併記した。図 - 11 より、0.1 MPa に加圧した状態における JP 漏斗流下時間は、低粘性型グラウトが 0.88 秒、高チクソ型グラウトが 1.20 秒、高粘性型グラウトが 1.79 秒であった。つまり、高チクソ型グラウトは非加圧状態では高粘性型グラウトよりも流動性が低かったのに対し、加圧状態では低粘性型並みの流動性であることが分かる。この結果からも、高チクソ型グラウトは、圧力が作用すると見かけの粘性が急激に減少することが分かる。また、参考値として水の 0.1 MPa に加圧した状態における JP 漏斗流下時間は 0.30 秒であった。

(5) ブリーディング率試験および膨張率試験結果

ブリーディング率は練混ぜ 3 時間後および 20 時間後の両方とも、いずれのグラウトにおいてゼロであり、PC グラウトに不可欠なノンブリーディング性を達成している。

次に膨張率を図 - 12 に示す。図 - 12 より、練混ぜ 20 時間後の膨張率は低粘性型グラウトが 0.00 %、高粘性型グラ

ウトが 0.24 %、高チクソ型グラウトが 0.21 % であり、練混ぜ 4 日後の膨張率は低粘性型グラウトが 0.00 %、高粘性型グラウトが 0.24 %、高チクソ型グラウトが 0.42 % であった。これより、いずれのグラウトも PC グラウトに不可欠な無収縮をほぼ達成していることがわかる。また、高チクソ型グラウトの膨張率は 4 日後においても 0.42 % と低いいため、過膨張を引き起こさないと考えられる。

(6) 加圧ブリーディング率試験結果

加圧ブリーディング率を図 - 13 に示す。図 - 13 より、加圧ブリーディング率は低粘性型グラウトが 0.06 %、高粘性型グラウトが 0.05 %、高チクソ型グラウトが 0.08 % であり、すべてのグラウトで小さい値であった。

(7) 圧縮強度試験結果

後述する実物大充てん実験で使用した高粘性型グラウトと高チクソ型グラウトの圧縮強度を図 - 14 に示す。図 - 14

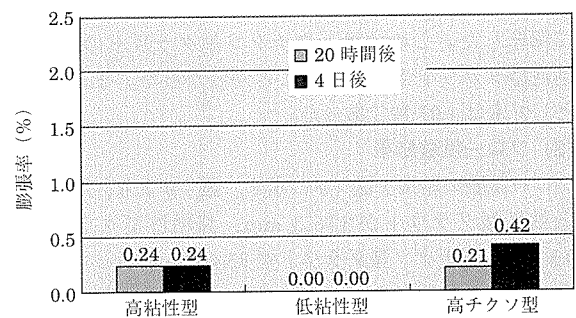


図 - 12 膨張率

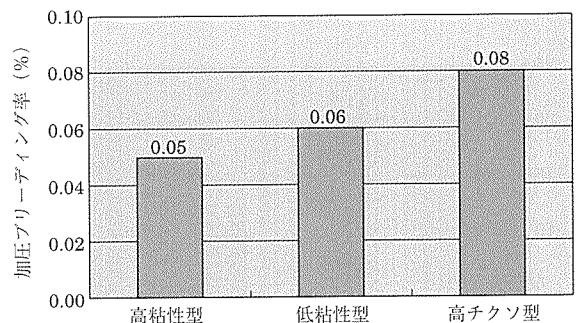


図 - 13 加圧ブリーディング率

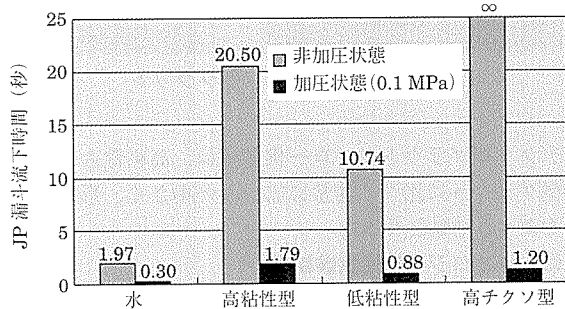


図 - 11 圧力の状況と JP 漏斗流下時間の関係

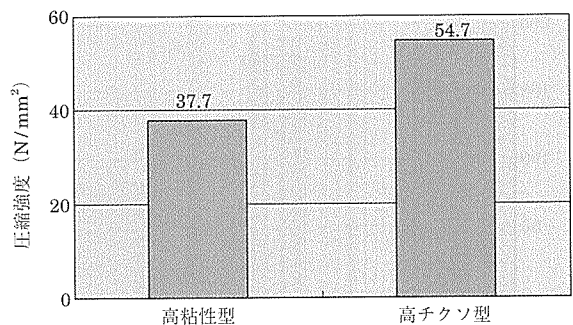


図 - 14 圧縮強度

より、材齢 28 日の圧縮強度は高粘性型グラウトが 37.7 N/mm²、高チクソ型グラウトが 54.7 N/mm²であり、今回用いた高チクソ型グラウトは他より高い強度が得られた。

一般にベントナイトを含むと圧縮強度が低下すると報告されているが、本報告における高チクソ型グラウトについてはベントナイトを含んでいても、特殊混合セメントを用いることで高い強度が得られたと考えられる。

3. 実物大充てん実験

3.1 実験概要および評価方法

(1) 試験体の概要

高チクソ型グラウトの充てん性および作業性を評価するために、実際の PC 鋼材の形状を想定し、写真 - 5 に示す実物大試験体を用いて充てん実験を実施した。また、比較用として高粘性型グラウトについても同時に行い評価を実施した。

本実験では、グラウトの充てん状況が目視で確認できるようにポリエチレンシースではなく塩化ビニル管（外径 89 mm × 内径 79 mm）を用いた。このため実際のケーブル形状のような曲げ半径（シース径の 100 倍以上）よりも小さい曲げ半径にせざるを得なかったが、曲げ上げ角度は、グラウトの先流れ現象がより発生しやすいように 20° とし、充てん実験を実施した。さらに、シース内の空隙率が充てん率に影響を及ぼすことが知られていることから、シース内には PC 鋼より線 12 S 15.2 mm を配置することとした。

(2) 練混ぜおよび注入方法

高チクソ型グラウトの練混ぜ方法は図 - 15 に示す方法で行った。また、水以外の材料はプレミックス材であり、水投入後、プレミックス材を投入し練混ぜを行った。高粘性型グラウトは、水投入後、混和剤（GF）、セメントを順に投入後に 3 分間練混ぜを行った。

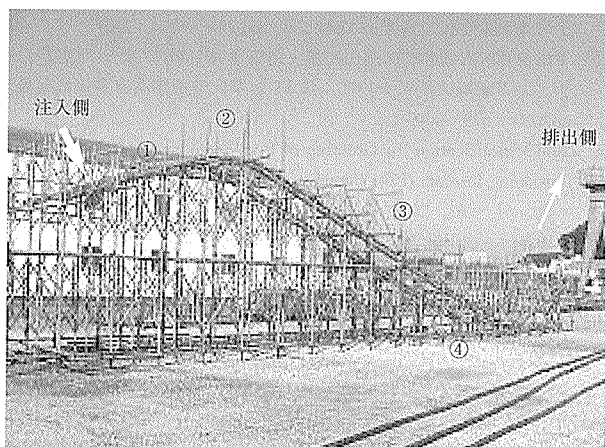


写真 - 5 実物大充てん実験の試験体



図 - 15 高チクソ型グラウトの練混ぜ方法

練り量は、1 バッチあたり 100 リットルとして箱型タイプのグラウトミキサーを使用した。グラウトポンプは最大注入圧力 1.5 MPa のスクイズ式を用いた。

(3) 充てん性および作業性の評価方法

充てん性の評価は試験体全体を観察することで行った。具体的な観察ポイントは、写真 - 5 に示した①上り勾配部、②最上部、③下り勾配部、④最下部とし、とくに先流れ発生の有無については、先流れの発生しやすい③および④区間を重点的に観察することとした。

作業性の評価は、グラウトポンプの注入圧力を測定することで行った。作業性は、注入圧力が小さいほど容易に注入できるとし、作業性に優れると評価した。

3.2 実験結果

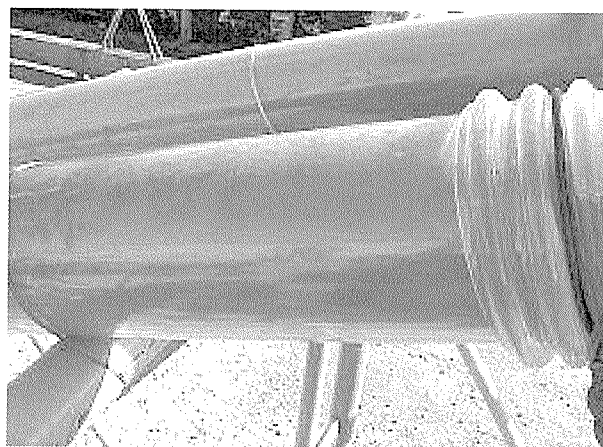
(1) 充てん性評価

一例として先流れが発生しやすい区間におけるグラウトの充てん状況を写真 - 6 に示す。

高粘性型および高チクソ型グラウトとも、①上り勾配部、②最上部においてはシース内にグラウトが密実に充てんされた。しかしながら、写真 - 6 に示すように③下り勾配部～④最下部にかけての区間において、高粘性型グラウトは先流れに伴う空隙が確認された。本実験では、一般のケーブル角度 15° を超えた 20° であったことから高粘性型グ



(a) 高粘性型グラウト



(b) 高チクソ型グラウト
写真 - 6 充てん状況

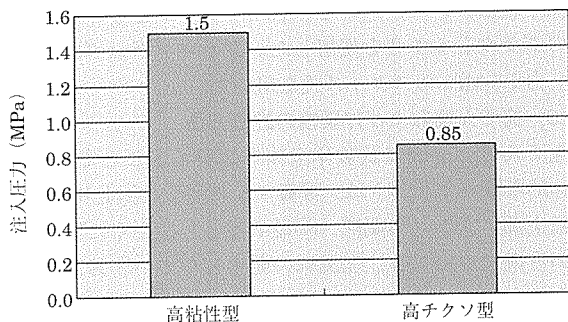


図 - 16 充てん時の注入圧力

ラウトに先流れが発生したものと考えられる。

一方、高チクソ型グラウトにおいては、すべての区間において密実な充てんが確認できた。

(2) 作業性評価

試験体にグラウトを注入する際にポンプが要した注入圧力の測定結果を図 - 16 に示す。図 - 16 より、注入圧の最大値は高粘性型グラウトが 1.5 MPa、高チクソ型グラウトは 0.85 MPa であることが分かる。

高粘性型グラウトは注入圧が 1.5 MPa とグラウトポンプの最大注入圧力に達する結果となった。

一方、高チクソ型グラウトは注入圧が 0.85 MPa と比較的低い圧力で注入することが可能であることが分かった。

以上の結果より、高チクソ型グラウトは比較的低い注入圧力で注入することができるため注入作業が容易であり、高粘性型グラウト以上の高い充てん性を有することが分かった。

4. 結 論

PC 橋の耐久性を考えるうえで PC グラウトの影響は大きく、施工不良等により PC 鋼材が腐食してしまい最終的には破断に至る場合があり、構造物としては致命的なものとなり得る。

多径間連続 PC 橋においては、その PC 鋼材配置は図 - 1 に示すような波形形状になる。波形形状のシースに PC グラウトを注入するには、低粘性型グラウトを用いた場合、シースの下り勾配部において先流れが生じやすいという問題があり、高粘性型グラウトを用いた場合には、注入圧が高くなるためステップバイステップ方式によって注入することが必要となり、シース管の製作効率および充てん作業効率が悪い等の問題が考えられる。本報告では、この問題

の解決として、高粘性型並みの高い充てん性と低粘性型並みの作業性を同時に有するグラウトとして、高チクソ型グラウトを開発した。この新しいグラウトの性状を確認するために、従来、一般的に用いられている高粘性型および低粘性型グラウトと比較した性状の品質管理試験を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本グラウトの流動性は、非加圧状態では高粘性型グラウトよりも低いですが、加圧状態 (0.1 MPa) では低粘性型グラウトに匹敵する高流動性を有する。
- (2) 本グラウトのフロー値は高粘性型グラウトに比べて非常に小さく、降伏値は非常に高い。
- (3) 本グラウトは、PC グラウトに必要な不可欠なノンブリーディング性および無収縮性を有する。
- (4) 本グラウトの圧縮強度は、特殊混合セメントを用いるため、材齢 28 日においておよそ 55 N/mm² という高強度を有する。
- (5) チクソトロピー性を有するグラウトは、高粘性型グラウトよりも高い充てん性を有し、かつ低い注入圧力で容易に注入することができる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、ご協力していただいた藤江幸人氏 (JR 東日本) および藤原 了氏 (宇都宮大学大学院) に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) PC グラウト & プレグラウト PC 鋼材 施工マニュアル (改訂版) 2002, プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2002 年
- 2) 脇坂安彦、宇治公隆、林 順三、佐々木 肇: モンモリロナイト含有骨材を使用したコンクリートの物理的性質, コンクリート工学年次論文報告集第 12 巻第 1 号, pp.733 ~ 738, 1990
- 3) 【2002 年制定】コンクリート標準示方書[規準編]: 土木学会, 2002
- 4) Ammar YAHIA · Akira OKUMA · Chengning WU: Study on Cement-Superplasticizer Compatibility and its Effect on Rheology and Filtration Properties of High-performance Cement Grout, コンクリート工学年次論文報告集第 23 巻第 2 号, pp.289 ~ 294, 2001
- 5) 東田典雅・大城社司・濱田 譲・山崎通人: PC グラウトのブリーディング試験方法について, 第 58 回年次学術講演会講演概要集, pp.627 ~ 629, 2003
- 6) Guide Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures, Post-Tensioning Institute (PTI) Committee on Grouting Specifications, pp.29 ~ 30, 61 ~ 63, 2001
- 7) 出雲淳一・山口征伸: シース内に鋼材を有するグラウトの充てん性に関する実験的検討, 第 13 回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.125 ~ 128, 2004

【2005 年 2 月 25 日受付】