

ポストテンション緊張材のグラウト特性

向野 元治*1・笠倉 和義*2

1. はじめに

近年、グラウトされたポストテンション構造物に関して耐久性の観点からさまざまな議論がなされている。

とくにグラウト材料およびグラウト方法の品質に対する関心が高くなっている。国際的にもこれらに関する広範囲な研究・開発が続けられている。

本報告では、上記テーマを取り上げた VSL インターナショナル社より発行の『GROUTING OF POST-TENSIONING TENDONS』（2002年1月）¹⁾を紹介するものである。原典では、以下にあげる内容構成となっているが、本書では、紙面の都合もあり、第1章、第3章の部分をとくに取り上げ、要点を抜粋して掲載するものである。

原文の内容構成は以下のとおりである。

1. はじめに
 - 1.1 ポストテンション構造物の耐久性
 - 1.2 ポストテンション緊張材に関する過去の調査結果
 - 1.3 ボンド方式緊張材とアンボンド方式緊張材
 - 1.4 ボンド方式ポストテンション緊張材のためのプラスチックシース
 - 1.5 当レポートの意図
2. VSL が提供するグラウトパッケージ
 - 2.1 一般的システムとサービス
 - 2.2 VSL のグラウト工事パッケージ
3. セメント系グラウト
 - 3.1 通常のグラウト仕様と最近の傾向
 - 3.2 グラウトの構成材料
 - 3.3 グラウト特性
 - 3.4 推奨するグラウト性能仕様と試験法
 - 3.5 グラウト試験の諸段階
4. 現場グラウト作業
 - 4.1 一般事項
 - 4.2 職員の訓練と資格
 - 4.3 グラウト機器
 - 4.4 グラウトのためのポストテンションシステム詳細化
 - 4.5 現場におけるグラウト作業の手順
5. 緊張材の検査および看視
 - 5.1 検査方法
 - 5.2 緊張材検査に対して技術者がとるべき姿勢
 - 5.3 看視：新開発技術

6. グラウトに欠陥のある緊張材の補修

- 6.1 一般事項
- 6.2 準備
- 6.3 緊張材へのアクセス
- 6.4 空隙部のグラウト
- 6.5 緊張材の閉鎖
- 6.6 外ケーブル方式緊張材の補修

7. 結 論

2. ポストテンション構造物の耐久性

コンクリート構造物、とくにプレストレストコンクリート構造物は長い間、メンテナンスがほとんど、あるいはまったく不要なほど、本質的に耐久性に富んだものであると考えられてきた。しかしその後、これは誤りで、コンクリート構造物といえども条件次第では、耐久上の問題が生じ得ることが分かってきた。多くの場合そのような問題は、構造物内部の非プレストレス鋼材あるいは緊張材の発錆を伴っていた。しかし通常は、鋼材の発錆は耐久性問題の根本原因ではなく、むしろ構造物の全体設計に際して耐久性への配慮が不適切であった結果である。

ただ一つだけの防護対策に頼った耐久性設計では、鋼材の全体的防護を保証できるものではない、ということはずでに認識されている。

そこで、多数の対策を重ね合わせるという考え方が生じてきた²⁾。その考え方によれば、まず第1のもっとも重要な対策は、構造物に対する全体的な基本方針と設計である。この設計で重要な要因は、構造物とその鋼材に水をよせつけないこと、さらに構造物に侵入した水はいち早く排出することである。第2の防護対策は防水膜で、それをとくに水や凍結防止塩類などの有害媒体にさらされるおそれのある表面に施すことである。コンクリート構造物に対する第3の防護策は、低透水性をめざして緻密なコンクリートを特別に調合設計することで達成される。ポストテンション構造物の緊張材に対する第4番目の防護策は1990年代初期に導入されたもので、緊張材を強靱かつ耐劣化性のプラスチックで覆って、水漏れのないように密閉してしまおうとするものである。ポストテンション構造物に対する最後の防護策は、緊張材にセメント系グラウトを直接施すこと、あるいはストランド一本ごとにグリースおよびプラスチック被覆を工場で施すようなシステムによることである。

本報告で考察するように、グラウトはポストテンション

*1 Motoharu KONO : VSL ジャパン(株) 取締役

*2 Kazuyoshi KASAKURA : 大成建設(株) 土木設計部 課長

構造体の緊張材防護策の最後の、そして唯一のものといえよう。緊張材の耐久性にとって高品質のグラウト施工が重要なものはいまでもないが、それだけでは完全な保証とはならない。構造物が建設される場所の特定環境に応じて、各防護策を適切に組み合わせて選択し仕様決定することは、施主およびエンジニアの責務である。施工中に防護策を追加採用したとしても、その費用は構造物の使用中に生ずる耐久性上のトラブル対策費用に比べれば些細なものである。

3. ポストテンション緊張材に関する過去の調査結果

プレストレストコンクリートのアイデアはかなり昔からあるが、それが技術として実際に使用されだしたのは1940年代の後半で、E.Freyssinet, F.Dischinger, G.Magnel, U.Finsterwalder, F.Leonhardt, W.Bauer および他の多くの人々により手がけられた³⁾。つまり、プレストレストコンクリートはほぼ50年の歴史があるといえよう。優れた設計、詳細化、施工の法則に基づいて建設されたプレストレストコンクリート構造物の多くは、プレストレストコンクリート一般、とくにポストテンション緊張材の優れた耐久性を証明してきた。たとえば参考資料⁴⁾では、「数年来全世界で使用されてきたプレストレス用素材（鋼より線、鋼線、鋼棒）の量を考えれば、プレストレストコンクリート構造物に重大な錆問題が生じたのは極めてまれな事と強調されるべきだ」と記されている。

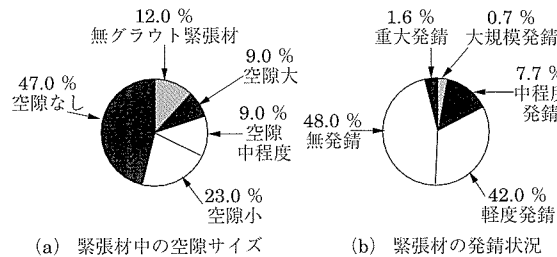


図-1 英国の橋梁 447 件のポストテンション緊張材調査結果

プレストレストコンクリートの技術は、1992年に英国のHighways Agencyが行った、ポストテンション緊張材を用いたプレストレストコンクリート橋梁の暫定禁止措置により、大きな抑制をこうむった。橋梁の設計と詳細化のあらゆる面、材料とグラウト作業の仕様、技術者や会社の資格づけ等の詳しい検討がおこなわれ、4年後になってようやく解かれることになった。英国でのこの事態を受けて、プレストレストコンクリートとポストテンション緊張材に関する一連の系統的な調査が、英国、フランス、スイス、オーストリア、その他の諸国で開始された^{5) 6) 7)}。これら調査のすべてが、プレストレストコンクリート構造物およびポストテンション緊張材の大部分はたとえあったとしてもきわめて軽微な錆による欠陥しか受けておらず、優れた耐久性を示していることを確認したが、他面、耐久性の問題やポストテンション緊張材の発錆問題のケースもいくつか発

見されていた。

たとえば参考資料⁵⁾では、英国において調査された国有のポストテンション橋梁、合計447件についての知見がまとめて報告されている。結果として分かった事項は、ポストテンション緊張材シースの47%は完全にグラウトされており空隙がない：シースの23%には小さな空隙がある：中程度から大きな空隙のあるものが18%：まったくグラウトのないものが12%、ということであった（図-1参照）。この447の橋梁において、ポストテンション緊張材の10%に中程度から重大な発錆が見られた。

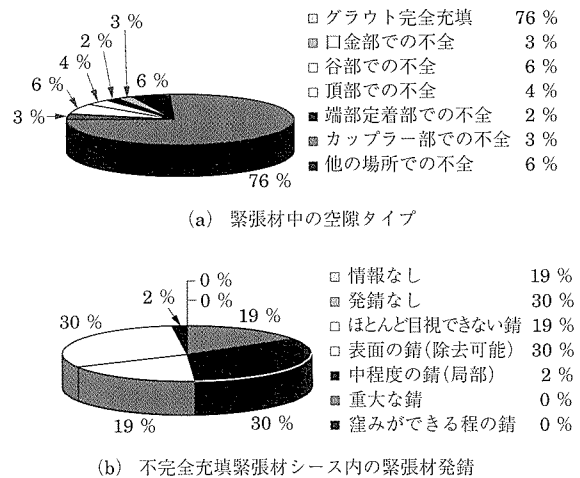


図-2 オーストリア、ウィーンの10件の橋梁に関するポストテンション緊張材調査の結果

参考資料⁶⁾には、ウィーンで1956年から1978年の間に建設された橋梁10件の調査に関する情報が記載されている。シースに局部的に開けた孔の数は合計1万以上、緊張材のグラウトおよび発錆の状況が記録された。この調査の結果、ポストテンション緊張材の実際の性能と耐久性は良好であることが確認され、これらの橋梁が高い品質で建設されたことが証明された。シースに開けた孔の個所の76%は完全に充填されていた。24%の不完全充填個所は、実はただ1つの橋梁で発見されたもので、用いた緊張材に対するシースの径が小さすぎた。このグラウト欠陥個所24%の内、中程度の局部発錆が認められたのはわずか2%、つまり1万個所の内48個所のみ過ぎない。他の個所では発錆がないか、わずかで柔らかい布で拭けば除去できるような程度の錆であった。（図-2参照）

参考資料⁷⁾には、橋梁107件、アンカー23件、その他13件の合計143プロジェクトの調査が記されている。構造物の大部分では、ポストテンション緊張材またはアンカー用緊張材の耐久性は良好であった。グラウトが不完全な14の橋梁では、緊張材の錆問題の大部分は塩化物を含む水の浸入が原因となっていた。防護対策を向上しグラウトされたポストテンション緊張材の耐久性を確実にするためには、たとえば強靱なプラスチックシースのような材料で、緊張材を耐久的かつ漏れの生じないように密封することが必要と思われる。

さらに最近になって、不完全グラウトや発錆による耐久

性上の問題が、米国でも報告されだした。フロリダ州の Mid-Bay プロジェクトでは、詳しい調査の間に、外ケーブルで完全に破損しているもの 1 本、部分的に破損しているもの 1 本が見つかった⁸⁾。またこの調査により、外ケーブルの緊張材配置形状頂点部に位置する端部定着部分の多くで、グラウトの充填が不十分であることが発見された。

上記調査の諸レポートには、それぞれにきわめて特殊な情報が含まれている一面、調査結果としていくつかの共通した傾向や結論が示されている。それらをまとめると次のようになる。

(1) ポストテンション構造物やポストテンション緊張材の詳細を再検討する

たとえば、橋梁床板からの水が定着部の上を通過して排出される場所、あるいは定着部がまったくシールされていない場所に定着された緊張材にあっては、その緊張材にいずれは錆が発生するのは当然である。また耐久性のある被覆材内に密封されることなしに多孔質モルタルを横切る緊張材が錆びるのも当然である。ポストテンション構造物やポストテンション緊張材の詳細をほんの少し改良するだけで、これら構造物や緊張材の耐久性は著しく向上され、それに必要な費用は、かかるとしてもきわめてわずかであることがほとんどである。

(2) ポストテンション緊張材のセメントグラウトの仕様を再検討する

現在用いられている仕様書が、承認条件の観点からは十分に厳格でないこと、また特殊なグラウト調合の劣悪な特性を検出できないような試験方法を採用していることは、指摘されてきている。このことは、グラウトのブリージングに対して一般的に利用されている必要事項や試験方法とくにあてはまる。ブリージングや骨材分離の極端なグラウトを用いると、必然的に、緊張材配置形状頂点部のような個所で、グラウトの不十分な部分が残ってしまう。そのような部分でも、たとえば緊張材上にアルカリ性グラウト等の層を設けて乾燥させておけば、緊張材の発錆はない。しかし、もし水の浸入があり得るとすれば、発錆のおそれがある。グラウト品質の仕様を厳格にすると、過剰水をセメントや特殊な混和剤と置き換える必要があり、往々にして費用がかかるが、その費用はプロジェクト全体からすればわずかである。

(3) ポストテンション作業やグラウト作業に熟達した社員のいるポストテンション専門業者に委任する

現場でセメントと水で作るにしても、レディミクスのものを使うにしても、グラウトはすべて必然的に注入前に現場で水と混ぜ合わされることになる。品質の良好なグラウトを保証するには、この作業の重要性を理解し、問題が起きた場合適切な処置をとるのに十分な経験を積んだ社員を使うことがつねに必要なことである。施主あるいはその代理者は、ポストテンションの作業について充分訓練され経験を積んだ社員を擁する専門業者のみを受け入れるようにすることが重要である。

レオンハルトの言葉に次のようなものがある。「プレストレストコンクリートの設計と施工を責任をもって行うには、

十分な知識と経験を集積し正確で慎重な実行が確実にいえるような技術者と施工会社が、この特殊な作業を行うことが肝要である」³⁾

4. ボンド方式ポストテンション緊張材のためのプラスチックシース

緊張材に対して防錆性かつ水密性の高い密封処置を行えば、その緊張材への有効な防護が可能となる。この考えは、プレストレスを用いたアンカー類に対して、永い間用いられてきている。VSL も 1990 年代初期に、ボンド方式ポストテンション緊張材用のコルゲートプラスチックシースシステムを導入したが、これは接続用細部やアンカーキャップ等の適切な付属品を用いた、ポストテンション緊張材の完全水密性密封法である。

英国では 1996 年に緊張材をプラスチックシースで密封することが義務づけられ、さらに新しい対処法として、システムの水密性をチェックするという考えが同時に導入された。これはシースと定着部を組み合わせたシステムに対する空気圧入試験である。シースの構成全体の完全気密性が確かめられない間は、コンクリートの打設が行えない。

定着部の詳細化を特別に行って緊張材をプラスチックの中に密封すれば、「電気絶縁緊張材 (EIT)」を作ることができる。上記の利点に加えて、EIT ではその密封性を、構造物の設計耐久年数の間いつでも看視することができる。緊張材と構造体との間の電気抵抗を測定するという簡単な方法で、緊張材の密封性を好きなときに確認できる。とくに都合の良いのは、取付け法が妥当であるか、緊張材が仕様適合しているか等を施工時に確認できることである。スイスでは、緊張材のプラスチックシースシステムへの密封と EIT とを組み合わせたものが 1993 年に導入されており、それ以来 20 を超える橋梁がこの考え方を基にして建設されている。この考え方に基づいた実績が良好であることを踏まえ、現在スイスでは緊張材防護のための新しいガイドラインが作成されている⁹⁾。環境条件の厳しくない場合にはコルゲートの鋼製シースを用いることもなお認められてはいるが、これらのガイドラインでは緊張材をプラスチック内に密封することが一般的には必要とされている。迷走電流に露呈される構造物には、密封性をチェックすることを目的として、緊張材の数のあるパーセントについては EIT を設けることが指定されている。

ポストテンション緊張材のプラスチックシース内への完全密封と EIT は、有効な防護方法となる。さらに高品質のグラウトが加われば、ポストテンション緊張材の信頼できる長期耐久性の完成に向かっての大きな一歩となると考えられる。

5. セメント系グラウトに関して

5.1 通常のグラウト試験と最近の傾向

きわめて最近に至るまでの永い間、セメント系グラウトの仕様はほとんど変化していない。「緊張材のグラウト」の妥当な施工法に関して記された "Federation Internationale de la Precontrainte" (FIP) 指針は、今日に至るまでのグラウト

に関する文献をよく代表しているものと考えてよい¹⁰⁾。

ヨーロッパやアジアの各国基準のほとんど、並びに Post-Tensioning Institute (PTI) から刊行された推奨条項などでも、まったく同じかあるいは類似のグラウト試験手順と承認条件とが用いられている。妥当な施工法に関する FIP 指針はまた、グラウトに関するヨーロッパ基準 EN445, 446, 447 の下敷きともなった¹¹⁾。

これらの基準類でグラウトの性能に関し考えられている特性の主なものとしては、以下のようなものがある。

- ・グラウトの流動性：緊張材シース内への完全充填を確実にするために重要と考えられている。
- ・グラウトの体積変化：緊張材シースの完全充填には、ゼロに近い特定値以内に保たれることが重要と考えられている。
- ・グラウトのブリージング：緊張材シース内の自由水を少なくし、所定時間内にブリージング水がすべてグラウトに再吸収されることが重要と考えられている。
- ・グラウトの強度：付着力およびせん断強度の点でグラウトの品質を示すものとして重要と考えられている。
- ・グラウトの耐凍結性：寒冷気候条件下での使用という面で重要と考えられている。

表 - 1 に FIP¹⁰⁾ とヨーロッパ基準 (EN)¹¹⁾ に示されている仕様特性をまとめて示す。また、グラウトに関する PTI 指針仕様¹²⁾ の最近変更された事項も参考のために記載した。その変更にはグラウトの硬化時間と透水性に関する追加試験が含まれている。

表 - 1 にはさらに、グラウトの特性をチェックするための試験方法や試験体についてもまとめて記載した。その内容は、排出側口径が 10 - 12.7 mm のフローコーン；体積変化とブリージング試験用の直径と高さが 100 mm オーダーの小さなプラスチック円筒 (FIP) あるいは直径が 50 mm で高さが 200 mm の円筒 (EN)；強度試験用の寸法が 50 mm ~ 100 mm オーダーの角柱・立方体・円筒である。

最近の現場調査や実績によれば、参考文献^{10) 11)} の仕様はどちらも適切でない、あるいは試験体や試験方法は緊張

材シース内グラウトの実際の挙動を代表していないことが示されている。上記の前半のコメントは、グラウト強度についてとくにあてはまる。グラウト調合の設計が良ければ、特定された値をはるかに超えた強度を発現するのが普通である。

後半のコメントはグラウトのブリージングと体積変化についていえることである。最近では、規定された寸法のプラスチック容器内におけるグラウトのブリージング性状は、PC 鋼より線内蔵の傾斜シース内におけるものに比べて顕著でないことが判明している。図 - 3 にさまざまな試験体における 2 種類のグラウトのブリージングおよび体積変化の性状を示す。「通常グラウト」は水セメント比が 0.38 で流動化剤と膨張剤を使用しており、「最適化グラウト」は水セメント比が 0.32 で別の流動化剤と安定化剤を用いているが、膨張剤は使用していない。通常グラウトと最適化グラウトとは、流動時間では同等である。4 種類の試験体を用いた。すなわち、高さが約 100 mm のプラスチック容器、鋼より線なしの直径 80 mm 高さ 1 m のプラスチックパイプ、鋼より線 1 本を内蔵する直径 80 mm 高さ 1 m のプラスチックパイプ、鋼より線 12 本を内蔵する直径 80 mm 長さ 5 m の水平に対し 30 度傾斜したチューブである。これら 4 種類の試験体に対して、それぞれ同じバッチからのグラウトを注入した。

ブリージングと膨張については、それぞれの試験体がまったく異なる結果を示した。各基準類で標準的に規定されている 100 mm 容器の試験体では、2 種類のグラウト間でブリージングの違いはほとんど認められなかった。実際、このグラウト両者ともに表 - 1 の仕様を満足したと思われる。鋼より線を含まない高さ 1 m のパイプでは両方のグラウト共ブリージングを生じなかったが、通常グラウトは膨張混和剤の影響で著しく膨張した。この点は、ブリージングが著しく膨張のなかった鋼より線内蔵の 1 m パイプとは大きく異なっていた。最適化グラウトでは、この場合もブリージングが生じなかった。最後に傾斜チューブの試験では通常グラウトは好ましからざる性状を見せ、800 mm 前

表 - 1 グラウトの通常仕様

特性	FIP 指針 ¹⁰⁾	EN447 ¹¹⁾	PTI ¹²⁾	試験方法/試験体
・流動性	注1)	≤ 25 秒	11 秒 ~ 30 秒	フローコーン (φ 10 mm または 12.7 mm)
・体積変化	-2 % ~ +5 %	-1 % ~ +5 %	0 % ~ +0.1 %	プラスチック円筒 (高さ 100 - 200 mm)
・ブリージング	≤ 2 %	≤ 2 %	0 % 注1)	プラスチック円筒 (高さ 100 - 200 mm)
・7 日強度	≥ 20 MPa	≥ 27 MPa	≥ 21 MPa	立方体または円柱 (50 - 100 mm)
・28 日強度	≥ 30 MPa	≥ 30 MPa	≥ 35 MPa 注1) 3 時間後芯誘導試験	



図 - 3 さまざまな種類の試験体におけるブリージングと体積変化

後のブリージング水が生じるとともにグラウト膨張は顕著でなかった。最適化グラウトではパイプの上部にわずか5 mm オーダーのブリージング水が生じたのみであった。再度言及するが、これら全4種類の試験体に注入された各グラウトは、同じバッチから注入されたものであった。すなわち、それぞれの試験体でグラウト特性に差異はなかったのである。

上記の結果はVSLが行った一連の試験で得られたものである。同様な現象は他者によっても認識され、確認されていた。とくにフランスでは、現場においてグラウトの過剰な分離とブリージングの問題が相前後して検出され、その後傾斜チューブによる試験法が開発された。この傾斜チューブ試験は、現場で見られる現象を現実的に再現する唯一の試験方法であった。このことからフランス当局は、特定のグラウトが現場で使用される以前に承認を与えるためのベースとして、この傾斜チューブ試験法を規定するに至った¹³⁾。その後、現場での試験に要する費用を節減する目的で、たとえばパイプ断面の約30%などの一定本数の鋼より線を内蔵した1.5 mのパイプを用いるというアイデアを、標準ブリージング試験として英国が導入した¹⁴⁾。ポストテンションシステムの承認に携わっていたヨーロッパのあるワーキンググループは、「芯誘導」ブリージング試験という名称をつけた、より線1本だけを内蔵する1 mのパイプを用いる方法を導入した¹⁵⁾。同様な試験法はPTIによっても導入されている¹²⁾。

上記のような状況から、世界の大部分で利用されてきた、あるいは今なお利用されているグラウト試験法や承認規定は、残念ながら緊張材シース内のグラウト性状を正確に代表するものではないということが確認できる。グラウト品質が妥当であるか否かの判定も正しく行うことができない。これらの試験法は、グラウト品質を的確に代表すると確認された試験法と早急に置き換え、より厳格な承認規定を設ける必要がある。そのような試験法と承認条件によって初めて、ポストテンション緊張材のグラウトの全体的品質が確実に保証されるのである。傾斜チューブ試験はもっとも実状に即した試験法であることが認められている。

5.2 グラウトの構成材料

グラウトを構成するのはセメント、水、混和剤であり、それぞれに複雑な相互作用を伴っている。このことはとくに、混和剤並びにアルミン酸三カルシウム(C3A)のようなセメントの特殊反応性成分についていえる。またセメント粒子のサイズもグラウト成分間の相互反応に大きく影響する。残念なことに、これらのセメントや混和剤の特性並びに粒子については、まったくとはいわないまでもほとんどが、各国または国際基準に盛り込まれていない。したがって、各国または国際基準に準拠して緊張材グラウト用のセメントの仕様を決めても、それが確実なグラウト特性を充分保証することにはならない。あるグラウトの特性と品質を確実なものとするには、むしろセメントの化学的および物理的特性の全体像を理解し、混和剤との組み合わせを考えて妥当な範囲内で使用することが重要である。

5.3 グラウト特性

次にグラウトの諸特性と、それに特別な要因が与える影響のいくつかについて考える。これにより、グラウトの挙動がよりよく理解でき、グラウトの仕様や承認条件を定める際に関係してくる性質を特定することができるようになる。

グラウトの特性としては、ブリージング、分離と沈殿、粘性とフロー時間、体積変化、発錆性と有害性、密度、硬化時間、強度、耐凍結性、等があげられるが、ここではその中でもとくに重要と考えられるブリージング、分離と沈殿、粘性とフロー時間、体積変化に関して取り上げるものとする。

5.3.1 ブリージング

セメントの水和作用には、グラウト中に水がなければならぬ。とはいうものの現実には、注入を容易に行うのに充分な低粘性のグラウトを得ることを目的として水和作用に必要な量をはるかに上回る水が使用されることがきわめて多い。このように水の量が多すぎる場合には、セメント粒子は凝固現象を起こして(塊が生じる)沈んでしまう(沈殿する)傾向があり、比重のより小さな水は上昇してグラウトの上面に集まることになる。この沈殿現象により、

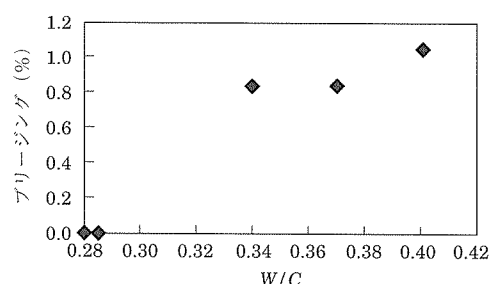


図-4 水セメント比がブリージングに及ぼす影響 (材齢3時間)

グラウトの分量は目に見えて減少してしまう。またこの水の上昇に伴ってセメントや混和剤からかなりの構成要素が洗い流され、グラウトに分離現象を招くおそれが生じる。

グラウトのブリージングと沈殿現象は、緊張材を伴う場合のグラウト作業や耐久性に関わる問題の、最重要とまではいえないにしてもおそらく主要な理由の一つである。ブリージング水が多すぎると、それは緊張材配置形状の頂部に集結し、その部分の緊張材はグラウトが有するアルカリ性の保護から外されてしまう。このような防護されない、露呈された部分は、第1章に引用した諸調査で発見されてきた。ブリージング水が再吸収され、他の水分や塩化物の浸入が高水密性コンクリートのかぶりや被覆密封により防止されたケースでは、上記のような露呈部分でも長期にわたって錆はまったくないか、あるいはほんのわずかしが発見されなかった。しかしこのような好条件に恵まれなかった場合には、この部分に緊張材の発錆が見られた。

ブリージングの程度はさまざまな要因で異なるが、最初に加えられた水の量がかつとも重要である。ある量のセメントに加える水量すなわち水セメント比(W/C)は、できるだけ小さくして過剰水を抑えなければならない。実際に

は、ブリージングの量は水セメント比に比例しない。ブリージングが突然顕著になるある限界値があるようである。おそらくこの限界値は、実際のグラウト組成に左右されると思われる。図-4にVSLが用いたあるグラウトにおいて、水セメント比がブリージング量に及ぼした影響を示す。このケースでの限界値は、水セメント比 W/C で 0.30 - 0.32 前後である。

グラウトが高圧を受けた場合もブリージングは増加する。これは鉛直の長い緊張材でよく知られていることであり、ブリージングによるトラブルを防ぐにはグラウト調合を特別に設計し、特殊なグラウト作業手順を実施する必要がある。このような場合、グラウトのブリージング特性は加える高圧の程度を考慮して検討しなければならない¹²⁾。

傾斜チューブ試験の所で示したように、緊張材、とくに鋼より線がシース内にある場合は、高所に集結するブリージング水の量は著しく増加する。外ケーブル緊張材で典型的に使用されるスムーズシースでは、内ケーブル緊張材に典型的に使用されるコルゲートシースと比べて、さらにブリージング水が高所に集まりやすい。

以上すべてのことから、グラウトのブリージングはいかなる場合も厳密にコントロールし、最少の量に保つべきである。もっとも効果的な方法としては、とにかくセメントに加える水の量をできるだけ少なくすることである。注入のために望まれる低粘性のグラウトは、水セメント比が小さくても、適切な流動化混和剤を用いれば得ることができる。

5.3.2 分離と沈殿

分離と沈殿の現象については5.3.1の項で紹介した。

そこで触れたように、これらはブリージングの産物であるとともに、グラウトの不安定性をもたらすようなグラウト構成成分の他の特性がおそらく原因であろう。これら2つの現象により、グラウトの密度は緊張材配置形状の谷部では濃くなり山部では薄くなる。傾斜チューブ試験の所で示したように、分離程度の増大はグラウトの色変化を伴う。たとえば密度の濃い所ではダークグレーで、薄いところではライトグレーあるいは白から黄色がかかった色を呈する。この色変化は、ブリージング水によりセメントや混和剤の粒子が洗い流された結果として生じたものである。この洗い流しによってさらに、山部での pH 値が低下するという

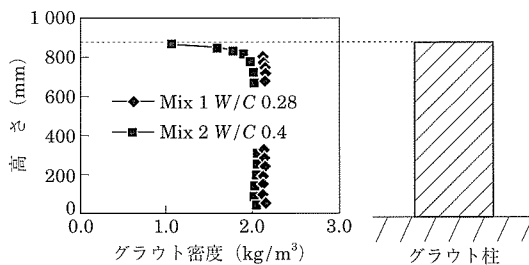


図-5 沈殿がグラウト密度に及ぼす影響

ような、グラウト特性の変化をもたらすこともある。

分離や沈殿は、いろいろな個所でのグラウト密度を測定

したりグラウトの色を観察したりすることで容易に確認できる。図-5にあるグラウトの高さ1mのパイプ内における、過剰水による沈殿の状態を示す。過剰水を有するグラウトの密度は、パイプの上方に向かうに従って急速に低下し、最高位置の近辺では密度が小さく気泡の多いグラウトとなってしまう。

分離や沈殿を生じやすいグラウトは、傾斜チューブ試験により見分けることができる。

5.3.3 粘性とフロー時間

作られてから間のないポストテンション用グラウトは、シース内への注入のための圧送が容易、すなわち粘性が比較的低いものでなければならない。実際面としては、ある特定量グラウトのコーンからの吐出時間（フロー時間）が、粘性度を測るものとして利用されてきた。したがって以下

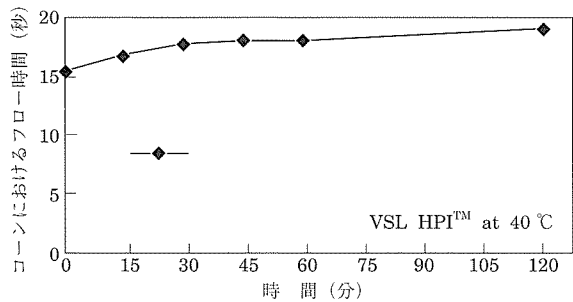


図-6 40 °Cにおけるフロー時間の安定化のために最適化されたグラウト

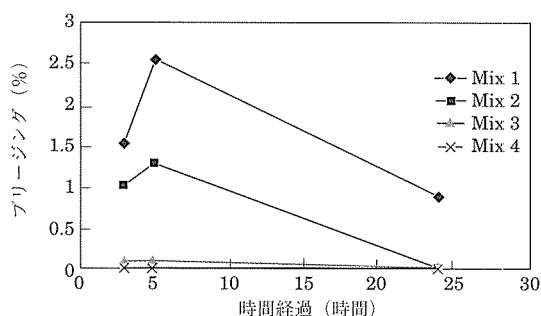
では、この2つの用語は同じ意味を有するものとする。

グラウトの粘性は水を加えることにより減らすことができる。流動化混和剤を含まない基本グラウトを圧送が容易に行えるような粘性とするには、その水セメント比を0.4 - 0.5のオーダーとする必要がある。これはセメントの水和作用に要するよりもかなり多い水量であり、出来上がったグラウトは安定性に欠け、ブリージングや沈殿をしておそらく分離も過多になるであろう。このような問題を避けるには、適切な流動化混和剤を用いれば水セメント比を0.3のオーダーまで下げつつ緊張材内への注入に適した低粘性グラウトとすることができる。水セメント比の小さいグラウトは本質的に安定性に優れ、過剰なブリージング、沈殿、分離を起こす可能性が少ない。あるグラウトに実際に必要な水量は、目標とするグラウト粘性度ないしフロー時間が達成されるような試行を経て定められることが多い。ヨーロッパ基準 EN445¹¹⁾ に準じてフローコーンを使用する場合は、注入が目的であればフロー時間は25秒以下に保つべきである。実際的には13秒から18秒の間が好ましいケースが多い。しかしフロー時間の最終的な値は、ある程度使用目的の特殊性、グラウト作業に使用される機器や方法により左右される。

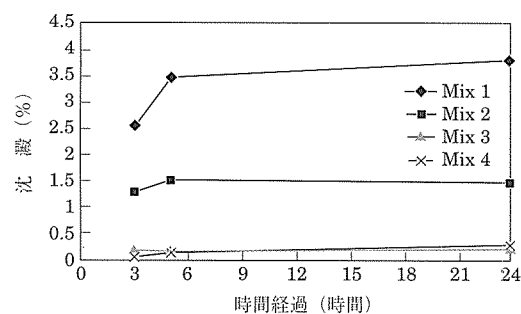
グラウト硬化が原因で注入中に生じるトラブルを避けるには、グラウトのフロー時間がある特定温度において充分長い時間安定させておくことが必要である。この場合はフロー時間の上限を決めるだけでは充分ではない。むしろフロー時間の時間経過に伴う変化の方が重要である。高温に

さらされるグラウトは、低温時のグラウトよりもフロー時間の変化が速くなる傾向がある。適切な調合設計が行われ、それに基づいた特殊な混和剤が用いられれば、高温状態においてもグラウトのフロー時間は長時間安定性を保つことが可能である。図 - 6 に VSL が高温に対して最適化したグラウトのフロー時間が、時間経過とともに長くなる例を示す。温度が 40℃ であっても、フロー時間の変化は 2 時間の間で 2 秒より少ない。これは水セメント比 W/C が 0.28 のグラウトで、そのグラウトを構成する素材を冷却することなしに達成されたものである。

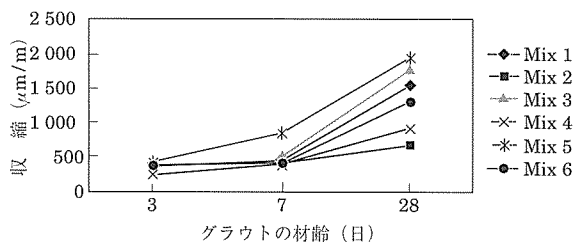
以前は、高温時に予測される早めの硬化への処置として、多少の水を追加することが奨励されたこともあった（たとえば FIP 指針¹⁰⁾を参照）。しかし、前述したような過剰水がブリージング・沈殿・分離に与える悪影響を考慮して、このような対処法は排除するべきである。その代わりとして、最少の水と特殊な混和剤を用いて、予期される温度変化の範囲に対するグラウト最適化を行うのが良い。



(a) 各種グラウトのブリージング特性(高さ 1 m のグラウト柱試験体)



(b) 各種グラウトの沈殿特性(高さ 1 m のグラウト柱試験体)



(c) VSL が最適化した各種グラウトの収縮値(標準試験試験体)

図 - 7 各種グラウトのブリージング、沈殿、収縮性状

5.3.4 体積変化

グラウトの体積変化は主として 2 つの原因、すなわちグラウトの収縮および沈殿とからもたらされる。都合の悪いことに、実際にはこの 2 つの原因が重複していることが多

い。

グラウトの沈殿については、5.3.1 および 5.3.2 の項で述べた。それを制御するもっとも良い方法は、水セメント比を小さくしてブリージングを減らすことである。この制御管理が行われていない場合は、過剰水によるグラウトの沈殿現象が原因となって、注入後数時間の間に当初体積の数パーセントにおよぶ体積変化が生じるおそれがある。異なる 4 種類のグラウトについて、このことが図 - 7 (a) および 7 (b) に示してある。これら 4 種類のグラウトは同じセメントを使用しているが、安定化混和剤によるブリージング制御の点で異なっている。明らかに、ブリージングが多ければ沈殿も数パーセントのオーダーで多くなるが (Mix 1 および Mix 2 参照)、ブリージングを制御すれば沈殿も制御されわずかな量にとどまることになる (Mix 3 および Mix 4 参照)。

一方、グラウトの収縮はまったく異なる現象で、主としてセメントの種類に、そしてある程度は水の量に関係している。図 - 7 (c) に 6 種類の異なったグラウトについて、材齢 28 日までの間の収縮測定の結果の一部を示す。材齢 28 日における収縮値は最大でも 2 000 μ m/m 未満で、この値は沈殿による影響よりも約 1 オーダー小さい。

以上のことから考えると、沈殿は元の体積の数パーセントオーダーの空隙を作る可能性があるので、厳重に管理する必要がある。そのためにはブリージングを制御するのがもっとも良い方法である。他方、収縮によるグラウトの体積変化量はほぼ 1 オーダー小さく、したがって緊張材の断面内に空隙ができるという面からするとあまり影響がない。緊張材の軸方向に沿っては、収縮は緊張材により完全に抑制される。これは補強筋が多量に配筋されたコンクリート断面においてコンクリートの収縮が抑制されるのと同じことである。以上から、膨張混和剤を用いることは不必要であり、さらに図 - 3 に示したブリージング試験の結果を考えると、膨張混和剤の使用はまったく推奨できない。実際に、図 - 3 に示した試験では、膨張混和剤の効果は緊張材が存在することによって役に立たなくなってしまうことが明示されている。さらに膨張混和剤を使用したグラウトには多量の気泡が含まれることになる。

6. 推奨するグラウト性能仕様と試験法

ここまでの考察と説明の結果に基づけば、本質的に重要と思われるグラウト特性はごくわずかである。過去において一般的に規定されてきた諸特性の多くは、本質的に重要とは思われないが、記録あるいは参考として利用することはできよう。

表 - 2 にポストテンション緊張材のグラウトを高品質に保つために本質的に重要と思われるグラウト特性をリストとして表示した。それらは(1)から(5)までの項目で、場合によっては(11)も含まれる。表 - 2 にはさらに、さほど重要とは思われないが、最適化が良好に行われたグラウトであれば当然の結果として、通常満たされているような特性(項目(6)から(8))も記載されている。また項目(9)および(10)の特性については、とくに要求はないにしても、記録

表 - 2 グラウトの性能仕様案

注：寒冷気候にのみ必要

項目	番号	グラウトの性能特性	試験方法	承認条件
必 要 事 項	(1)	グラウトのブリージングと分離	傾斜チューブ試験 ¹⁵⁾ , および芯材を含むブリージング試験 ¹⁵⁾	・ブリージング水：≤ 0.3 % ・空気間隙比：≤ 0.3 % ・分離：裸眼で明確に見えない (グラウト当初体積に対して)
	(2)	グラウトのフロー時間	EN 445 ¹¹⁾ 準拠のフローコーン	・初期フロー時間：≤ 25 秒 ・45 分内のフロー時間変化：≤ 3 秒
	(3)	グラウトの沈殿	沈殿試験 ¹⁵⁾	・密度変化：≤ 5 %
	(4)	グラウトの発錆性	認定試験場でのグラウト化学分析	・塩化物含有量：≤ 0.1 % (セメント重量に対して)
	(5)	グラウトの有毒性	認定試験場における素材確認あるいは化学分析	・グラウトは有毒成分を含まないこと
参 考 事 項	(6)	グラウトの強度	EN 445 ¹¹⁾ 準拠の試験	・材齢 7 日圧縮強度：≥ 30 MPa
	(7)	グラウトの体積変化	EN 445 ¹¹⁾ 準拠の試験	・24 時間の体積変化：- 0.5 % ~ + 1 % (元の体積に対して)
	(8)	グラウトの硬化時間	認定試験場における水和熱の測定	・硬化の開始：≥ 3 時間 ・硬化の開始・進行・終了の確認
記 録 事 項	(9)	グラウトの水セメント比	混和剤中の液体を含む成分の重量測定	・グラウトの水セメント比の確認
	(10)	グラウトの密度	グラウトの体積と重量の測定	・グラウト密度の確認
注	(11)	グラウトの耐凍結性	認定試験場における試験	・グラウトの耐凍結性の確認

と将来の参考のために実際の数値を確認しておくべきである。

7. おわりに

本稿は、VSL インターナショナル社の技術本部長である Dr. Hans Rudolf Ganz 氏が、近年のヨーロッパを中心としたポストテンション緊張材の防食、とくにグラウトについて記述した『GROUTING OF POST-TENSIONING TENDONS』を本人の理解を得て要約したものである。

施主や技術者達にとっても、グラウトを理解する上で非常に参考になるものと確信している。

参考文献

- 1) "GROUTING OF POST-TENSIONING TENDONS (VSL Report Series 5)", Hans Rudolf Ganz, VSL International LTD, Lyssach/Switzerland, 2002.
- 2) "Durable Bounded Post-Tensioned Concrete Bridges", Technical Report No. 47, The Concrete Society, Slough/UK, 1996.
- 3) F. Leonhardt: "Spannbeton für die Praxis" (prestressed Concrete in Practice). Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München/Düsseldorf, 3rd Edition, 1973.
- 4) "Corrosion protection of prestressing steels", FIP Recommendations, Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP), London, 1996.
- 5) Woodward R: "Durability of Post-Tensioned Tendons on Road Bridges in the UK", Proceedings of Workshop on Durability of Post-Tensioning Tendons, Fédération Internationale du Béton (fib), Bulletin 15, Lausanne, 2001.
- 6) E.M. Eichinger, J. Diem, J. Kollegger: "Bewertung des Zustandes von Spanngliedern auf der Grundlage von Untersuchungen an Massivbrücken der Stadt Wien" (Assessment of the condition of prestressing tendons on the basis of investigations on concrete bridges of the city of Vienna),

Institut für Stahlbeton und Massivbau, Heft 1, Technische Universität Wien, 2000.

- 7) F. Hunkeler, H. Ungricht, P. Matt: "Korrosionsschäden an Spannstählen in Spanngliedern und vorgespannten Boden- und Felsankern" (Corrosion defects on prestressing steel in prestressing tendons and prestressed soil and rock anchors), Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassen, Bericht Nr.534, 1998.
- 8) "Interim Statement on Grouting Practices", American Segmental Bridge Institute (ASBI), Grouting Committee, Phoenix/USA, December 4, 2000.
- 9) "Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von spanngliedern in Kunstbauten" (Measures to ensure the durability of post-tensioning tendons in Bridges), Guidelines, Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen und SBB AG Art. Nr. 308.322d, Bern, 2001.
- 10) "Grouting of tendons in prestressed concrete", FIP Guide to Good Practice, Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP), Thomas Telford, London, 1990.
- 11) "Grout for prestressing tendons: Test Methods (EN 445), Grouting procedures (EN 446), Specification for common grout (EN 447); European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 1996.
- 12) "Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures", Guide Specification, Post-Tensioning Institute (PTI), Phoenix, Arizona, February 2001.
- 13) "Coulis pour injection de conduits de précontrainte" (Grout for injection of post-tensioning ducts), Note d'information No. 21, SETRA/CTOA et LCPC/DTOA, Bagneux-France, Juillet 1996.
- 14) "Durable Post-Tensioned Concrete Bridges", The Concrete Society, Concrete Society Technical Report 47, Edition 2, Draft Version 3, November 2000.
- 15) "Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures", European Organisation for Technical Approvals (EOTA), Draft Edition October 2001, Brussels, 2001.

【2003年2月27日受付】