

特 集

明日のPCグラウト

【企画趣旨】

このたび、プレストレストコンクリート技術協会から『PCグラウトの設計施工指針』が刊行されました。本誌では指針の刊行に合わせてPCグラウトに関する特集を企画しました。

PCグラウトについては、その重要性については十分に認識されており、さまざまな研究が行われています。しかし国内、国外のPCグラウトに関連した不具合によって、PC構造物の信頼性に疑問が持たれた事例も見受けられます。このような背景のなかで、PCグラウトの信頼性を向上させるための取り組みとして「PCグラウト規準作成委員会」が発足し、今回の指針が刊行されました。

規準委員会では指針の作成にあたって、多くの調査・研究を実施しています。そこで本誌では、指針に記載されていない調査・研究の部分について解説していただき、さらに指針以外のPCグラウトに関連する事項を総合的に取りまとめる特集を企画しました。

本特集では、PCグラウト関連に詳しい研究者の方々から、『PCグラウトの設計施工指針』の解説を始めとして、PCグラウトの現状と問題点、歴史や海外情報、各種材料や工法の開発動向について寄稿いただき、『明日のPCグラウト』と題して紹介いたします。本特集号が、PC技術に関わるすべての読者に、大いに役立つことを期待しております。

本特集号 担当編集委員

大城 壮司・武知 勉・原田 光男
橋本 学・山中 待男・上原富士夫

PCグラウトの現状と問題点

睦好 宏史*

1. はじめに

鉄筋コンクリートやプレテンション（以下、プレテン）方式による PC では、型枠に配置された鋼材に直接コンクリートが打設されるため、鋼材とコンクリートが一体となり、良好な付着を有するとともに鋼材を腐食から守るといって、一見当然ではあるがきわめて重要な性能を同時に備えている。一方、ポストテンション（以下、ポステン）PC では狭いダクト内にグラウトを充てんするという技術的に高度な作業が必要であり、かつ要求される性能は鉄筋コンクリートやプレテン PC と同じものである。このような高度な技術を要するグラウトに施工不良が発見され、PC 橋の場合には落橋という最悪の事態に至っている。表 - 1 はイギリスにおいてグラウトの施工不良などが原因で損傷した PC 橋の一覧を示したもので、写真 - 1 は Ynys - y - Gwas 橋の落橋を示している。このようなことから、イギリスでは 1992 年から 1996 年までグラウト充てんによるポステン工法は禁止されていた。さらに、ベルギーにおいても PC 橋の落橋が報告されており、ドイツではウェブ内の PC 鋼材のグラウトは禁止されている。わが国においても、旧日本道路公団が管轄している PC 橋梁にグラウトの施工不良が発見されたことを受けて、「PC 橋の耐久性向上に関する技術検討委員会」が設立され、グラウト施工に替わる新しい材料や工法の開発が行われるとともに、「PC グラウト設計・施工マニュアル」が作成されている。また、その間グラウト充てんによる内ケーブル式ポステン PC 橋の建設は



写真 - 1 Ynys - y - Gwas 橋の落橋³⁾

禁止されていたことは記憶に新しい。このようなことを背景にして、PC 技術協会では 2003 年に「PC グラウト規準作成委員会」を発足させ、2 年間の審議を経て「PC グラウトの設計施工指針」を刊行した。ここでは、PC グラウトの現状と問題点について、その概要を述べることにする。

2. PC 橋梁の耐久性からみたグラウトの現状と問題点

2.1 PC 橋の耐久性に影響を及ぼす要因

グラウトに要求される性能の一つに、PC 鋼材を腐食から保護することがある。グラウトが PC 橋梁の耐久性にどの程度影響を及ぼしているかについて見てみることにする。図 - 1 はわが国の既設 PC 橋の中から劣化した 120 橋を調査して、劣化現象（PC 鋼材の腐食、鋼材の露出、PC 鋼材の破断、遊離石灰、錆汁、コンクリートの剥離）に影響を及ぼすと思われる要因（中性化、凍害、アルカリ骨材反応、疲労、塩害、グラウトの不良、施工不良）を示したものである²⁾。この中で、グラウトがもっとも大きな影響を及ぼしているのは PC 鋼材の破断である。すなわち、グラウトの充てん不良が PC 構造物に致命的な損傷を引き起こす原因となっている。また、遊離石灰や PC 鋼材の腐食に対してもグラウトの施工不良が大きな影響を及ぼしている。

このように、これまで建設された PC 橋において、グラウトの充てん不良が少なからず認められている。また、このようなグラウトの施工不良が経年とともに大きな損傷を引き起こす可能性があることが明らかとなっている。

2.2 グラウトの充てん不良の原因

それではグラウトの充てん不良はどうして起こるのであるか。グラウトの充てん不良は、一般に通常のコンクリート工事で生じる施工上の問題と同様に、技術的なもの

表 - 1 イギリスにおける PC 橋の損傷事例¹⁾

1967 年	Bickton Meadows 歩道橋（落橋）
1980 年	Angel 道路橋（架け替え）
1982 年	Taf Fawr 橋（架け替え）
1985 年	Ynys-y-Gwas 橋（落橋）
1988 年	Folly 新橋（架け替え）
1990 年	M1Blackburn 道路橋（架け替え）
1992 年	Botley 跨道橋（架け替え）



* Hiroshi MUTSUYOSHI

埼玉大学 工学部建設工学科
教授・工学博士

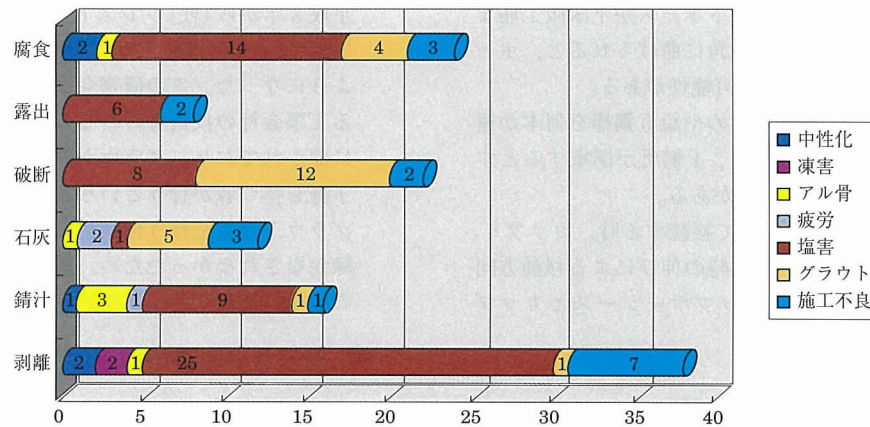


図 - 1 PC 橋の耐久性に影響を及ぼす要因²⁾

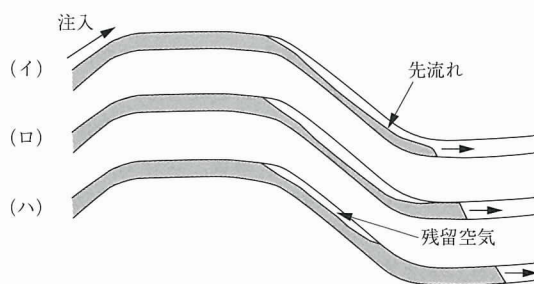


図 - 2 グラウトの先流れ現象

と、人為的なもの（ヒューマンエラー）の2種類が考えられる。ここでは、土木学会の「PC 構造物の現状の問題点とその対策に関する研究小委員会」⁴⁾でとりまとめた、グラウトの充てん不良の原因について簡単に紹介することにする。なお、以下に述べることについては、特殊な場合、あるいは事前に気付き、対策が取られたものなどが含まれており、統計的に調査・検討したものではないことをあらかじめお断りしておく。

2.2.1 過去におけるグラウトの考え方と問題点

PC に関する過去の示方書、規準等は主に荷重に対する安全性および本体のコンクリート施工に重点がおかれ、グラウトが構造物の耐久性に及ぼす影響およびその重要性が必ずしも認識されていたわけではない。これまでのグラウト施工は、一般に注入口から注入して排出口から排出されれば、その中間は完全に充てんされていると考えられてきた。しかし、グラウトの先流れ現象（図 - 2 参照）による空気だまりやブリーディングによる残留空気が生じることが明白になり、上記の方法だけではグラウトの充てんを保証できなくなった。また、グラウト施工は、シースによるダクト形成角度や空隙率、グラウトホースによる注入・排気・排出口の配置、定着具とシースとの接続およびグラウトホースのシースへの接続、グラウトの粘性やブリーディング率などの材料としての品質、グラウト施工機械の性能などがすべて完全に機能しないと、完全な充てんができない作業である。過去のグラウト作業では、これらのことを必ずしも完全に理解していたとはいえない。さらに、グラウトの作業中にダクトの閉塞などによりグラウトの充てん

が不可能になったとき、その原因に対する解決法または対策などが明確にされていなかった。

2.2.2 グラウト充てん不良の主たる原因

次にグラウト充てん不良の主たる原因について、いくつかの項目ごとに考えてみることにする。

(1) 天候や施工時期などの外的環境に起因するもの

わが国では、年度末を工期に設定している場合が多く、グラウト作業は施工の最終段階で行われることが多い。このため、冬季にグラウト施工をすることになり、寒冷地では十分な寒中対策が行われず、シース内が凍結してグラウトを施工してしまう場合がある。

(2) 材料に関するもの

- ・グラウトホースに柔らかい材質のものを使用した場合、コンクリート打設時につぶれて閉塞してしまう可能性がある。
- ・グラウトホースを支圧板に固定する時、接着剤のみによる固定の場合、グラウトホースがコンクリート打設時にはずれやすい。はずれた場合、シース中にコンクリートが入り込む可能性がある。
- ・木栓やチョークを直接支圧板にあいた孔に差し込んでグラウトを止めていた事例があった。このような場合、ブリーディング水は支圧板近傍に集まることになり、有害な残留空気の原因になりやすい。
- ・グラウトの品質（粘性、ブリーディング率等）を事前に検査していなかった。

(3) 施工に関するもの

- ・コンクリート打設時においてバイブレーターの振動により、シースがつぶれたり、はずれる場合がある。後取り付け型の支圧板を使用し、支圧板の裏に漏れ防止用パッキンを取り付けない場合、コンクリート面が平滑でないと、そこからグラウトが漏れる可能性がある。
- ・鉛直鋼棒を施工する場合、鉛直鋼棒の下端からグラウトホースを出して、下床版上に設置して、そこからグラウトを注入する施工法が一般的である。このグラウトホースは、コンクリート打設時には障害となるので、まとめてウェブ型枠を留めていた単管に結びつける場

合がある。このとき、グラウトホースが下床版上筋またはハンチ型枠のところで鋭角に曲げられると、ホースが折り曲げられ、つぶれる可能性がある。

- ・作業効率を上げるために横締めや鉛直鋼棒を何本か連続させてグラウト施工すると、1個所が閉塞するとすべてが注入できなくなる場合がある。
- ・PC鋼棒をカップラーを用いて接続する時、カップリングの実施工において、緊張時の伸びによる移動方向を間違えると、緊張時にカップラーシースとカップ

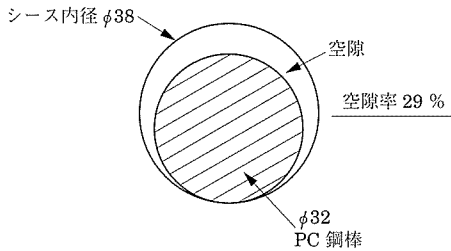


図-3 低空隙率の例

ラーが接触し、グラウトが閉塞する可能性がある。

(4) シースの配置に関するもの

- ・グラウトの粘性が低い場合、下り勾配のところでグラウトは先流れをする。先流れ個所で排気口が設置されていない場合、空気だまりができる可能性がある。
- ・シース断面積からPC鋼材断面積を引いた空隙部の面積が少ないと、グラウトの注入圧力が高くなってグラウトが閉塞する可能性がある(図-3参照)。

(5) 施工機械に関するもの

- ・グラウトミキサーの性能が適切でない場合、ブリーディングの発生や材料分離、セメント玉による閉塞などが生じる。グラウトポンプの性能が適切でない場合、注入圧が高くなってグラウトを押しきれなかったり、グラウトホースがはずれたりして注入不能になる場合がある。

(6) 管理・検査に関するもの

- ・施工者、発注者ともにグラウト充填に関する品質管理について熟知していない場合がある。

(7) 作業を監督する技術者および作業員の教育訓練

平成8年から(社)プレストレストコンクリート建設業協会において、PCグラウト研修会が定期的に行われるようになった。この研修会は、グラウト作業を監督する工事会社の技術者のみならず、現場の作業員も対象に開かれており、グラウト作業はこの研修会の受講終了証を持つ者が行うということになった。それまではグラウト作業を行う作業員に対して体系的な教育・訓練がなされなかったため、監督をする技術者や作業員の知識や経験に大きな差があったと思われる。

3. グラウト改善の取組み

上述した国内および海外におけるグラウトの問題を解決するためにさまざまな試みが行われている。グラウトの目的は一般に、緊張材を腐食から保護すること、ならびに緊張材とコンクリートの付着を確保することである。緊張材は外部からの空気、水、腐食性物質などの侵入により腐食する。緊張材の腐食が進行すると、その断面が減少し、破断による耐荷力の急激な低下を引き起こし、構造物に致命的な損傷をもたらす。また、コンクリートとの付着が不完全であると、ひび割れが生じた場合、ひび割れがある断面に集中するとともにその幅が大きくなり、構造物の耐久性を損なうこととなる。すなわち、グラウトの良否がPC部材の耐久性に大きな影響を及ぼすのである。

ヨーロッパおよびアメリカでは最新のグラウトに関する基準が以下に示すように相次いで刊行されている。

- 1) bulletin 20 "Grouting of tendons in prestressed concrete", fib, 2002年⁵⁾
- 2) Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures, PTI (Post-Tensioning Institute), 2001年2月(米国)⁶⁾
- 3) Technical Report No.47 - Second Edition "Durable post-tensioned concrete bridge", Concrete Society, 2002年(英国)⁷⁾
- 4) Grout for prestressing tendons - Specification for common grout, BS EN 447, 1997⁸⁾

上記の基準について、グラウトに求められる主な特性を日本の基準(土木学会)¹⁰⁾と比較すると表-2のようになる。

英国では、1992年から4年間ポステンPC橋の建設が禁止されていた。その後、Technical Report No.47(以下TR 47と略記)初版が出版されるに至って、ポステンPC橋が復

表-2 グラウトの各基準の比較

特 性	fib	TR 47 (英国)	EN 447 (欧州)	PTI (米国)	JSCE (日本)
流動性	とくに無し	練混ぜ直後において25秒以内 φ 10 mm > 10 秒 (排出時)	≦ 25 秒 φ 10 ~ 12.7 mm	11 ~ 30 秒 φ 10 ~ 12.7 mm	施工計画書準拠 JP φ 14 mm
ブリーディング率	- 2 % ~ + 5 %	< 1.0 % (N=1) < 0.3 % (平均 N = 4)	- 1 % ~ + 5 %	0 % (3 hr) 芯入り試験	0 %
膨張率	≦ 2 % φ 100 × 100 mm	0 ~ + 5 %	≦ 2 % φ 50 × 200 mm	0 % ~ + 0.1 %	0 % ~ 10 %
圧縮強度 (7 日) (28 日) 供試体	≧ 20 N/mm ² ≧ 30 N/mm ² 50,100 mm 立方体 φ 50,100 mm 円柱	≧ 27 N/mm ² 100 mm 立方体	≧ 27 N/mm ² ≧ 30 N/mm ² φ 100 × 100 mm	≧ 21 N/mm ² ≧ 35 N/mm ² 50 mm 立方体	≧ 20 N/mm ² ≧ 30 N/mm ² φ 50 × 100 mm

活したのである。TR 47ではマルチレイヤプロテクション (multi layer protection) という概念が導入されている。これは、もし一つのレイヤ (腐食を防護する手段) に効果がなくなったとしても他のレイヤが効果を発揮して、全体として完全な防食機能を発揮することをいう。このことは、一層のレイヤだけでは十分に信頼することができないからであり、たとえ高品質なグラウトが施工されたとしても、それだけでは PC 部材の耐久性を保証できないという視点に立っている。マルチレイヤプロテクションの概念の具体例としては、1) グラウトでダクトを充てんして緊張材を保護、2) 耐腐食性シースの使用、3) 定着具の位置、詳細、防護の設計、4) 水ならびに凍結防止塩などの侵入を阻止する表面防水層の設置、5) 透水係数の小さい密実なコンクリートの使用などが挙げられる。さらに、厳しい環境下 (たとえば海洋にかかる橋) では、追加対策として、1) かぶり厚の増大、2) コンクリートの透水性低減、3) 密封ダクト、4) 腐食監視装置、5) 防食鋼材の利用などが考えられる。

アメリカでは、グラウト施工の8週間以上前に、現場で使用する材料と機材を用いてグラウトの試験練りが行われる。その後、グラウト施工の4週間以上前に、施工者がグラウト作業手順書を提出し、設計技術者の許可を得た後にグラウトの施工を行うことになっている。また、フロリダ州では、グラウト技術者の訓練が行われており、一日の講習会では講義と現場実習が行われる⁶⁾。アメリカセグメント橋協会 (ASBI: American Segmental Bridge Institute) ではグラウトの三日間のトレーニングプログラム (グラウトの重要性、正しい施工手順、正しい材料の知識 (配合、注入法など)) を行い、グラウト技術者の認定書を発行している⁹⁾。イギリス以外のヨーロッパの国々においてもグラウトを含めた PC 橋の耐久性に関して新しい技術開発および設計施工指針が提案されている。これについては、本特集号の「PC グラウトの海外事情」で詳しく述べられている。

一方、わが国においても信頼できる PC グラウトの設計施工法を早急に確立するために、2003年に PC 技術協会に「PC グラウト規準作成委員会」を発足させ、2年間の審議を経て「PC グラウトの設計施工指針」¹¹⁾を作成した。本指針は、PC 橋における PC グラウトの位置づけを明確にして、PC グラウトに要求される性能を設定し、これらの要求性能を満足するための照査法を明確にしたもので、世界でも類を見ない新しいものである。また、本指針は PC グラウトの設計施工の流れおよび性能照査の基本的な考え方を示す第 I 編「性能照査型設計施工指針」と、仕様規定を含んだみなし規定で、より具体的な方法を示す第 II 編「設計

施工指針に準拠した標準マニュアル」との2部構成となっており、前者は時代とともに大きく変わることはないが、後者は技術の発展に伴い内容の改訂がその都度行われるべき性格のものである。本指針については、本特集号の「PC グラウトの設計施工指針の概要」で詳しく述べられている。

以上のように、グラウトの良否が PC 構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすことが先進国で再認識され、如何に品質の高いグラウト施工を行うかということについて技術開発されている。

4. あとがき

最近の PC 橋の技術の発展には目を見張るものがあり、外ケーブル PC から、エクストラドーズド橋、波形鋼板ウェブ PC 橋、プレテンウェブ橋などさまざまな新しい橋梁形式が開発され、実用化されている。一方、建設後年月を経た PC 構造物は、耐久性、維持・管理といったこれまでに経験したことがない大きな試練の場に立たされている。その中で、グラウトの重要性が再認識され、海外およびわが国において、新しい技術が開発されるとともに、新たな規準が作成されている。しかし、たとえどのような素晴らしい技術規準が生み出されても、それを使う人が技術者倫理にのっとって正しく行使しなければ質の高い PC 構造物は造り得ないのである。このことを切に噛みしめて、さらなる PC の発展を願ってやまない。

参考文献

- 1) PC 橋の耐久性向上に関する技術検討報告書、(財)高速道路技術センター、平成 11 年 2 月
- 2) PC 橋の耐久性向上マニュアル、(社)プレストレストコンクリート技術協会、平成 12 年 11 月
- 3) Management of Post-tensioned Grouted Duct Bridges, PIARC, C11 Committee on Road Bridges, 1999
- 4) PC 構造物の現状の問題点とその対策、コンクリート技術シリーズ 52、土木学会、2003
- 5) bulletin 20 "Grouting of tendons in prestressed concrete", fib, 2002
- 6) Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures, PTI (Post-Tensioning Institute), 2001.
- 7) Technical Report No.47 - Second Edition "Durable post-tensioned concrete bridge", Concrete Society, 2002
- 8) Grout for prestressing tendons - Specification for common grout, BS EN 447, 1997
- 9) Brett H Pielstick P.E: Grouting of Segmental Post-Tensioned Bridges in America, Proceedings of the first fib Congress 2002
- 10) コンクリート標準示方書 [施工編]、土木学会、2002 年
- 11) PC グラウトの設計施工指針、(社)プレストレストコンクリート技術協会、平成 17 年 12 月

【2006 年 1 月 17 日受付】