

PC グラウト技術の変遷と展望

青木 圭一*1・宮川 豊章*2

わが国のポステン橋のPCグラウト技術の変遷、とくに技術基準、PCグラウト材料、試験法、充填検査方法について、その大きな変遷を述べる。PCグラウト材料においては、ノンブリーディング型の採用に至る経緯や高粘性型の採用について詳述する。また、試験法については、従来からのポリエチレン袋法から傾斜管および鉛直管試験の導入の背景、その概要について述べる。さらに、充填検査では、従前のPCグラウト排出孔での確認から流量計による確認、PCグラウト注入中の非破壊検査と注入後の非破壊検査法について詳述するとともに、既設ポステン橋でのPCグラウトおよびPC鋼材の健全性の非破壊検査技術、PCグラウト再注入技術などについて述べ、最後に、その技術変遷から、今後望まれる技術について解説する。

キーワード：ブリーディング、粘性、鉛直管試験、傾斜管試験、非破壊検査、再注入

1. はじめに

わが国におけるプレストレストコンクリート（以下、PCと述べる）橋は、1951年完成の長生橋（プレテンション橋）や1953年完成のわが国最初のポストテンション方式PC橋（以下、ポステン橋）の十郷橋、1954年完成の第一大戸川橋りょう（本格的なポステン橋）が建設されて以来、60年を超える歴史を有している。その間、さまざまなPC橋が建設され、道路橋においては実に6万橋を超えるPC橋が建設されている。

一方で、過去に建設されたPC橋において老朽化に伴う損傷や劣化も多数報告されている。とくに、ポステン橋におけるPCグラウトの充填不足が主な原因と思われる損傷も散見されており、PC鋼材が腐食・破断している事例も報告されている。このような状況の下、平成15年に(社)プレストレストコンクリート技術協会（現PC工学会）に「PCグラウト基準作成委員会」（委員長：池田尚治）が発足し、平成17年12月には「PCグラウトの設計施工指針」が発刊されるに至っている。なお、本指針は平成24年12月に、その後の新技術などを反映して「PCグラウトの設計施工指針－改訂版－」として発刊されている。また、既設ポス

テン橋に対しては、平成14年に土木学会コンクリート委員会に「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」（委員長：陸好宏史）が発足し、課題などが明らかになるとともに、平成24年にはPC工学会に「既設ポストテンション橋のPCグラウト問題対応委員会」（委員長 宮川豊章）が設置され、平成28年9月に「既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針」が発刊されるに至っている。

本稿では、これらの指針などを基に、PCグラウトの材料、試験法、検査技術、補修技術を中心に技術変遷と今後の展望について述べるものである。

2. PC グラウト材料の変遷

2.1 技術基準の変遷

わが国で最初にPCグラウトに関する記述が掲載されたのは、1955年土木学会制定「プレストレストコンクリート設計施工指針」である。本指針の制定にあたっては、標準的な施工方法を決定するために、第一大戸川橋りょうの建設時にブリーディング測定やPCグラウト注入試験などが実施されている。写真-1に第一大戸川橋りょうのPCグラウトの練混ぜ状況を示す。本指針では、「グラウトは十分にPC鋼線をつつみ、かつ確実に付着するものでなければならない。」とあり、解説で「セメント分散剤、アルミニウムの粉末などを混ぜたグラウトは有効である。」と述べられているのみであり具体的な規定は示されていない¹⁾。

最初に具体的な内容が示されたのは1961年に改訂された同指針である。その後、1966年「ディビダーク工法設計施工指針（案）」（土木学会）、1966年「フレシネー工法設計施工指針（案）」（土木学会）、1978年「コンクリート標準示方書」（土木学会）、1986年「PCグラウト施工マニュアル」（PC建協）、2005年「PCグラウトの設計施工指針」（PC技術協会）などが制定・改訂され整備されてきた。表-1にこれまでの主な基準・指針の制定を示す。



*1 Keiichi AOKI

中日本高速道路(株)
名古屋支社 名古屋工事
事務所 所長



*2 Toyoaki MIYAGAWA

京都大学
学際融合教育研究推進
センター 特任教授

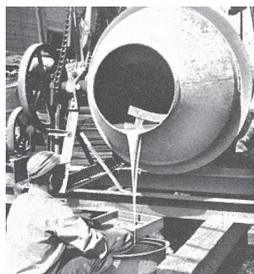


写真 - 1 第一大戸川橋りょうのPCグラウト練混ぜ状況

表 - 1 ポストテンション方式PC橋の主な技術基準

年	機関	規準・指針など
1955	土木学会	PC 設計施工指針
1961	土木学会	PC 設計施工指針 (改訂)
1966	土木学会	ディビダーク工法設計施工指針 (案)
1978	土木学会	コンクリート標準示方書 (施工編)
1984	国鉄	PC 施工の手引き
1986	土木学会	コンクリート標準示方書 (施工編)
1986	PC 建協	PC グラウト施工マニュアル
1995	JR 東日本	PC 施工の手引き
1997	日本道路公団	構造物施工管理要領
1999	PC 建協	PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル
2002	土木学会	コンクリート標準示方書 (施工編)
2005	PC 技術協会	PC グラウトの設計施工指針
2012	PC 工学会	PC グラウトの設計施工指針 - 改訂版 -
2015	PC 工学会	PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針 (案)
2015	PC 工学会	PC 構造物高耐久化ガイドライン
2016	PC 工学会	既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針

2.2 材料の変遷

(1) ブリーディング

PC グラウト材料としての大きな変遷は、ブリーディングの発生を許容していたものから、ノンブリーディング型への変更である。ポストテン橋の建設初期は、ブリーディングが発生する材料であったため、アルミニウム粉末を用いて膨張させ、この効果によりブリーディング水を排出させることとしていた。その後、1982年にノンブリーディング型が登場し、1995年には「PC 施工の手引き」(JR 東日本)、1997年「構造物施工管理要領」(日本道路公団)、2002年「コンクリート標準示方書」(土木学会)への記述により、ノンブリーディング型の採用が広まった。図 - 1 に、混和剤メーカーのPCグラウト材料の出荷量の状況を示すが、1997年以降では、ノンブリーディング型の出荷が急増している。

(2) 粘性

PC グラウトの粘性についても、大きな変遷をたどっている。当初は、低粘性型が標準であったが、下り勾配のシース内でPCグラウトが先流れを起こし、空隙が残る危険があったため、これを防止することを目的に高粘性型が誕生した。「PCグラウトの設計施工指針」(PC技術協会)においても、高粘性型の記述が加わる一方、高粘性型は注入圧力が増加すること、高粘性型でも一定以上の下り勾配では先流れを起こすことから、実物大実験で検証することが

求められ、排気口の位置などを適切に設定する必要があった。近年では、超低粘性型も誕生し、先流れを起こしても、適切に排気口を設けることや注入速度を低速にするなどの施工性の改善により、高粘性型と低粘性型の両タイプが併用されるようになってきている。

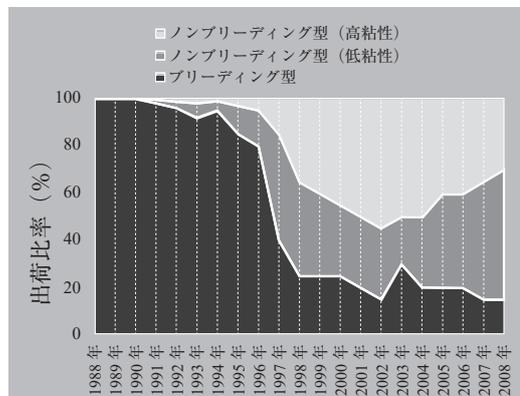


図 - 1 混和剤メーカーのPCグラウト材料出荷状況

2.3 試験法の変遷

(1) ブリーディング率および体積変化率

試験方法として大きな転換点は、2001年のIABSE・fib共催による「ポストテンション方式PC鋼材の耐久性に関する国際ワークショップ：ベルギー」である。本ワークショップにおいては、ポストテン橋の先進国である欧米諸国の課題や問題点、各国の改善策や戦略などが発表された。PCグラウト材料の試験方法については、フランスから傾斜管試験や鉛直管試験など、新たな試験法が制定されている情報もたらされた²⁾。

それまで、わが国の試験法は、写真 - 2 に示す長さ200 mm程度のポリエチレン袋法であり、単に体積変化を調べるものであった。



写真 - 2 ポリエチレン袋法

一方、ワークショップで紹介された鉛直管試験(写真 - 3)、傾斜管試験(写真 - 4)は、2001年に米国PTIのガイドラインに制定され、2002年には英国の「TR47 2nd Edition Durable post-tensioned concrete bridges」、fibの「Grouting of tendons in prestressed concrete」、欧州の「Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures」に採用されるなど、世界的に標準の試験法に至っている。



(a) 上 面 (b) 側 面
写真 - 3 鉛直管試験の状況



写真 - 4 傾斜管試験状況

ワークショップで紹介された鉛直管試験は、直径 60～100 mm、高さ 1.5 m の管に断面の 30% を占める PC 鋼より線を挿入したものに PC グラウトを注ぎ、PC 鋼より線から湧き出るブリーディング水の有無を調べる試験であり、一方、傾斜管試験は、直径 80 mm、長さ 5 m、上端側に栓、下端側に注入孔を設け、管内に 12 本の PC 鋼より線 $\phi 15.2$ mm を挿入した管を 30 度 \pm 2 度で傾け PC グラウトを下端から注入し、ブリーディングの発生状況を確認する方法である。管を傾けることで、より材料分離しやすくと解説している。

わが国においても、当該試験方法を準拠しつつ、汎用性や経済性を考慮し、土木学会基準として鉛直管試験 (JSCE - F535) および傾斜管試験 (JSCE - F534) が制定されている。

(2) 流動性

PC グラウトの流動性は、材料性能とともに先流れなどに起因して充填性にも大きく影響する。この流動性を検査する試験として広く用いられてきたものが漏斗試験である。漏斗試験は、PC グラウトが漏斗から流れ落ちた時間 (流下時間) を計測する方法であるが、その形状から PC グラウトが落ち切る時間に差があり、また、高粘性型の PC グラウトや超低粘性 PC グラウトの誕生により、従来から用いられていた漏斗形状では、的確にその流下時間を計ることが困難となってきたことから、さまざまな形状へ改訂されてきている。

昭和 36 年制定の「プレストレストコンクリート設計施工指針」では J 漏斗 (容積 640 ml, $\phi 70 \sim 10$) が規定され、昭和 53 年制定の「プレストレストコンクリート標準示方書」では JA 漏斗 (容積 1000 ml, $\phi 100 \sim 8$)、2005 年制定の「PC グラウトの設計施工指針」においては JP 漏斗 (容積 630 ml, $\phi 70 \sim 14$) が規定されている。また、漏斗試

験と並行して回転粘度計や円筒容器法などの直接的に粘性を計測する方法も検討されてきている。

3. PC グラウトの施工および検査技術の変遷

3.1 シース径およびシース材料

PC グラウトは、PC 鋼材の防食を目的して実施するが、PC 鋼材の防食においては、多重防食という考え方が 2004 年のスイスで開催された「第 2 回ポストテンション方式 PC 鋼材の耐久性に関する国際ワークショップ」で報告された。PC グラウトだけではなく、非鉄シース、モニタリングなどをその架橋環境に応じて実施するというものである。

わが国では、ポステン橋の建設以降、鋼製シースが採用されており、1994 年制定の「ディビダーク工法設計施工指針 (案)」において、その厚板専用シースが追加される以外は大きな変更点はなかった。しかし、欧州による非鉄シースの開発や、当時の日本道路公団によるポリエチレン製シースの標準採用 (1997 年：構造物施工管理要領)、2002 年制定の「コンクリート標準示方書」(土木学会) における塩害対策での推奨など、非鉄シースの採用拡大により、PC 工学会においても「PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針 (案)」(2015 年 8 月) が発刊され、現在では非鉄シースが一般的に採用されるに至っている。

また、シース径も、欧州の基準変更、確実な PC グラウト充填のための空隙率確保、高粘性 PC グラウトの登場によってその拡大化が図られ、従前に比べて確実な PC グラウト注入ができる環境となってきている。

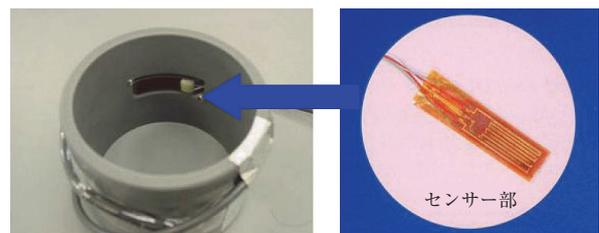
3.2 充填確認および検査

PC グラウトの施工および管理の主な変遷としては、流量計による注入量の確認があげられる。

従来は、緊張管理表へ PC グラウト注入の有無のみを記載する管理であり、その確認方法は、グラウトホースを目視で確認するのみであった。その後、1996 年 PC グラウト施工マニュアル (PC 建協) により流量計の設置が義務付けられ、注入忘れや注入不足といったヒューマンエラーの解消が図られている。

(1) PC グラウト注入時の充填検査

さらに、近年では、PC グラウト注入時にセンサー周辺の媒質の放熱値を測定してその出力差により媒質を特定し、電圧値を読み取ることを原理とした充填検知センサー (写真 - 5) や、排気孔へファイバースコープを挿入した充填確認など、新たな技術も開発されている。



(a) センサー配置状況 (b) 充填検知センサー
写真 - 5 充填検知センサーとシースへの配置状況

しかし、いずれの方法も全線、全数にわたる確認を行うことは経済性や施工性から困難であり、流量計などの従来の方法と併用しつつ採用されている。

(2) PC グラウト硬化後の充填検査

PC グラウト硬化後の検査も開発・採用されてきている。微破壊検査による方法はもちろん、非破壊検査によりPCグラウトの充填状況を把握する技術も採用されている。

その一つは、広帯域超音波法(写真-6(a))である。広帯域超音波法は、床版上に探触子を配置し、シースからの反射波を利用してPCケーブルシース内のPCグラウト検査を行う方法で、未充填の場合は、充填されている場合に比べ、反射波の強度が大きく異なる性質を利用するものである。本法は、新東名高速道路などで多くの実績を有する。

また、マルチパスアレイレーダ法(写真-6(b))も実績があり、電磁波レーダを利用しアンテナから発信された電磁波が電気的特性の異なる物質(たとえば、鉄筋や空隙)で反射されて戻ってくる性質を利用して床版内部の状況を調査するものであり、3次元画像で検査結果を表示できるため床版内部の認識が容易である³⁾。

また、インパクトエコー法(以下、IE法)も実績がある。本法は、部材表面から打撃などによって弾性波を入力し、その共振現象の周波数を高感度変位センサーおよび波形収録機で測定・解析することにより、PC鋼材のPCグラウト充填状況を調査する手法である。

いずれの方法においても、比較的浅いかぶり部に配置されたシース内部のPCグラウトのみしか計測できないなどの制約があり、万能ではないが、今後、確実なPCグラウト充填のためにも、必要不可欠な検査技術である。



(a) 広帯域超音波法 (b) マルチパスアレイレーダ法
写真-6 非破壊検査によるPCグラウト充填検査

4. 既設ポステン橋でのPCグラウト技術

既設ポステン橋において、PCグラウト充填不足が懸念される場合、調査などが実施される。一般には、PCグラウト充填確認には、削孔による確認や前述した非破壊検査(広帯域超音波法、IE法など)が用いられている。その後、耐久性確保のためにPCグラウト再注入が実施されるが、新設と異なることから、材料選定や注入方法、注入箇所の選定、注入用孔の削孔などの事前準備が必要となる。「既設ポステン橋のPC鋼材調査および補修・補強指針」(PC工学会)では、真空ポンプの採用、自然流下方式などの採用や、注入量の確認では、エアーコンプレッサーで空気を送り込み、その圧力変化と時間の関係により空隙

部分の体積を推定する通気法(空圧法)の採用などの事例が紹介されている。

また、近年ではポステン橋の命であるPC鋼材の健全性の検証技術において、PC鋼材を磁化させ、漏洩磁束の変化により破断の有無を捉える漏洩磁束(MFL)法(写真-7)も採用されるようになってきており、既設ポステン橋における検査技術も格段に進化してきている。



写真-7 漏洩磁束法によるPC鋼材破断調査状況

5. 現状の総括と今後の展望

PCグラウトの目的の一つは、PC鋼材の防食であるが、残念ながら、これまでに建設された数多くのポステン橋においては、その性能が十分に発揮されていない。ポステン橋は、道路や鉄道などの一部を構成しているものであり、わが国の経済を支える物流や、災害や救命などにおいて、今や欠かすことのできない一翼を担っていることから、今後、新たに建設される橋や建設されたポステン橋を、より長く使っていくために、検査が容易なPCグラウト技術(たとえば、PCグラウト材料に検査容易な材料を添加しておく)や、非破壊検査が容易となるPC鋼材配置、より安価な充填センサーの開発なども必要ではないだろうか。また、これらの機械化や自動化による汎用性も望まれるところである。

今後、新設されるポステン橋は減少すると予測される一方、リニューアルや補修補強されるポステン橋は、ますます増大すると予測されている。その際に、健全性が容易に把握できる技術を確立しておくことが、われわれ、ポステン橋を建設してきた技術屋の使命ではないだろうか。

参考文献

- 1) 池田尚治, 山口隆裕, 手塚正道: PCグラウトの歴史, プレストレストコンクリート Vol.48, No.2, 2006
- 2) 濱田 譲, 細野宏巳, 野島昭二, 辻 幸和: PCグラウトの品質管理と検査, プレストレストコンクリート Vol.48, No.2, 2006
- 3) 原 幹夫, 青木圭一: PCグラウトの充てん確認技術の動向 - 非破壊検査による内ケーブルのPCグラウト充填監査 -, プレストレストコンクリート Vol.48, No.2, 2006

[2019年1月7日受付]