

NEXCO における PC 鋼材の維持管理上の課題と取り組み

村西 信哉*1・緒方 辰男*2

東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)が管理する高速道路の PC 橋において、PC グラウトの充填不足が確認されている。今後、PC グラウト充填状況の調査を進めるとともに、PC グラウト充填不足箇所における再注入の施工が本格化される。本稿では、PC グラウトの充填状況および PC 鋼材の状態を把握するための調査技術とその事例を紹介する。また、PC グラウト再注入の施工事例と技術基準の整備に向けた研究の一部を紹介する。

キーワード：PC グラウト充填不足、PC 鋼材破断、非破壊検査、PC グラウト再注入

1. はじめに

東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)（以降、NEXCO）が管理する高速道路は、昭和 38 年 7 月 16 日にわが国最初の高速道路として名神高速道路（栗東～尼崎）が開通して以降順次整備を進めており、平成 26 年 1 月時点で延長約 9 000 km を供用している。そのうち供用から 30 年以上を経過した延長が約 3 700 km で全延長の 4 割程度を占めており、老朽化の進展とともに変状が顕在化してきている。

高速道路橋の橋種別の内訳は、PC 橋が約 4 割、鋼橋が約 3 割、RC 橋およびそのほか他が約 3 割であり、PC 橋は高速道路橋の維持管理に占める割合が大きい。PC 鋼材の腐食や破断は PC 橋の安全性に影響を及ぼすことから、できるだけ早期に変状を把握し対策を行い、予防保全的に維持管理を行うことが重要である。とくにポストテンション橋においては、PC グラウト充填不足に伴う PC 鋼材の腐食や破断が懸念されることから、PC グラウトの充填状況を把握することが重要である¹⁾。高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会²⁾において、これまでに行われた PC グラウト充填状況の調査結果を分析したところ、調査を行った PC 鋼材約 4 087 本のうち、2 割を超える箇所で PC グラウトの充填が十分でないものが確認された。とくに、PC 鋼棒を使用しているものの割合

が高い結果であった（図 - 1）。NEXCO では PC グラウトの充填状況および PC 鋼材の状態の調査を進めているところであり、PC グラウト充填不足に対する PC グラウト再注入などの補修工事を今後本格化していく。

本稿は、PC 鋼材の維持管理の取り組み事例として、ポストテンション橋における PC グラウト充填状況および PC 鋼材の状態を対象とした点検および調査における技術とその事例について紹介する。また、PC グラウト再注入の施工事例と技術基準の整備に向けた取り組みの一部を紹介する。

2. PC 鋼材の腐食・破断事例

PC グラウトは、PC 鋼材を腐食から保護することおよび PC 鋼材とコンクリート部材とに付着を与え一体化させることが要求される³⁾。PC 橋の耐久性と安全性を確保するため要求されるものであり、PC グラウトは従来から確実な施工が求められている。しかし、過去における材料、施工方法、品質管理や検査方法に関する技術の限界もあり、結果として PC グラウトが充填不足となっている場合がある。

国外において、PC グラウト充填不足により PC 鋼材が腐食・破断し落橋に至った代表事例としてイギリスの Ynys-Y-Gwas 橋が知られている。ほかにもアメリカの Niles Channel 橋の落橋した事例があり、ブリーディング水の発生による PC 鋼材の腐食および PC グラウト充填不足が原因とされている¹⁾。

高速道路橋における PC 鋼材の破断事例¹⁾を写真 - 1 に示す。当該橋梁は 1986 年に供用した PC ラーメン箱桁橋



*1 Nobuya MURANISHI

(株) 高速道路総合技術研究所
道路研究部
橋梁研究室 主任研究員



*2 Tatsuo OGATA

(株) 高速道路総合技術研究所
道路研究部
橋梁研究担当部長

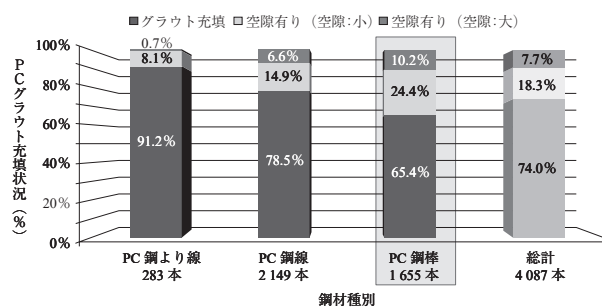


図 - 1 PC 鋼材種別の PC グラウト充填状況²⁾

であり、寒冷地に位置していることから、冬季に凍結防止剤が多く散布される環境下にある。PCグラウトの充填不足によりシース内に凍結防止剤を含む水が伝わることで、PC鋼棒が腐食し破断したものと考えられる。また、破断が確認されたPC鋼棒はφ32mmであるのに対し、シース径はφ38mmであったため、PCグラウトの施工が難しいものであったことが想定される。写真-2は、PC鋼棒の破断により突出した事例²⁾である。原因はPCラーメン箱桁橋の事例と同様である。

3. PCグラウトおよびPC鋼材の調査技術⁴⁾

PC鋼材が腐食した場合、PC鋼材は降伏後の伸びが少なくなり、ぜい性的な挙動を示す。すなわち、PC鋼材の腐食が進行した場合、PC構造物に大きな変形を伴うことなく急激に落橋に至る可能性が考えられる。この場合、外観目視による点検では落橋の予兆を捉えることが困難である。したがって、PC鋼材の状態を把握することがPC構造物の健全性の評価においては重要である。NEXCOにおいては漏洩磁束法、放射線透過法、削孔調査などの手法により調査を行うこととしている。

調査の流れとしては、PCグラウト充填不足によりPC鋼材の腐食および破断が想定されることから、PCグラウトの充填調査を行い、充填が不十分と判定された箇所について、PC鋼材の状態を調査し、破断の確認を行う。次項3.1にPCグラウトの充填状況、3.2にPC鋼材の状態の調査技術について紹介する。

3.1 PCグラウトの充填調査技術

PCグラウトの充填調査は、充填不足箇所の有無およびその程度を把握することを目的として実施する。外観調査で異常が無い場合でも、充填不足によりPC鋼材が変状している可能性があるため、充填調査を行うことを基本としている。以降に各調査手法の概要を述べる。

(1) 放射線透過法

コンクリート表面からX線を使って放射線透過写真を撮影し、PCグラウトの充填状況を推定する手法である。調査対象部材の表側と裏側に作業スペースが確保できることが前提である。また、部材が厚い箇所の探査は困難であることが課題である。図-2に、充填が良好な場合、充填不足の場合の例をそれぞれ示す⁵⁾。充填されている場合、密度の高い鋼材のみ白く写り、シース内と周辺のコンクリートでコントラストに差が生じない。一方、充填不足がある場合、空隙部はX線が透過しやすくなるため黒く写り、充填不足箇所を判定できる。

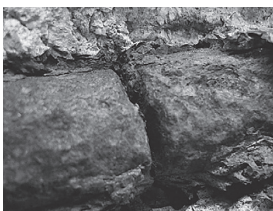


写真-1 PC鋼棒の破断¹⁾

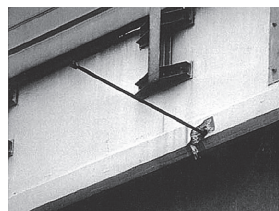


写真-2 PC鋼棒の突出²⁾

(2) 打音振動法

PC鋼材両端の定着部近傍のコンクリート表面にセンサーを取り付け、入力センサー側をハンマーなどで打撃し、弾性波伝搬速度や入力側と出力側のエネルギー減衰および周波数特性を測定し、直線配置PC鋼材におけるPC鋼材1本ごとのPCグラウト充填状況を推定する手法である。PC鋼材が途中で曲げられている場合は、弾性波が減衰するため、主鋼材への適用は難しい。

(3) 広帯域超音波法

コンクリート内に高強度で広帯域の周波数を有する超音波を入力し、反射波をすべて収録する。収録した波をフィルタリングし、特定したシースからの反射波特性を分析することで、グラウト充填状況を推定する手法である。本手法の詳細と調査事例を3.4で後述する。

(4) インパクトエコー法

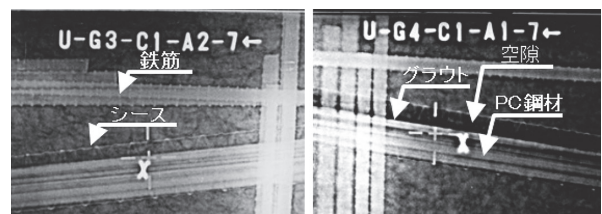
PC鋼材が配置されている部分のコンクリート表面に鋼球打撃により弾性波を入力し、その反射波を振動センサーで受信し周波数スペクトル解析を行うことで、PCグラウトの充填状況を推定する手法である。

3.2 PC鋼材の状態調査技術

PCグラウトが完全に充填されていない場合、PC鋼材の破断の有無の調査が必要となる。

(1) 漏洩磁束法

鋼材が強磁性体であることを利用して、コンクリート表面からPC鋼材を着磁し、漏洩した磁束を測定する。これにより、調査位置におけるPC鋼材の破断を特定する手法である。磁束密度と破断の関係について、イメージを図-3に示す。これまでのNEXCO総研における研究でPC鋼材の破断が評価できることを明らかにし^{6,7)}、その適用の範囲を示した^{8,9)}。



(a) 充填状況が良好な場合 (b) 充填不足の場合

図-2 放射線透過法の例⁵⁾

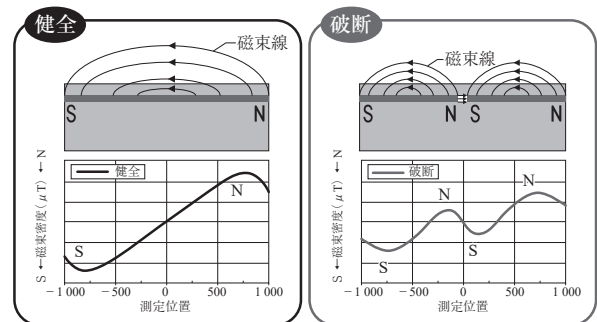


図-3 磁束密度波形のイメージ

(2) 放射線透過法

PC グラウトの充填状況の調査と同様である。

(3) 削孔調査

コンクリート削孔を行い、PC 鋼材の状態を目視、CCD カメラ、通気法（空圧法）などを用いて確認する。調査位置における PC 鋼材の腐食や破断を特定する。なお、削孔によりシース内に通気が生じるため、削孔調査は PC 鋼材の腐食を促進させる可能性があることに留意すべきである。

3.3 調査箇所

PC グラウト充填不足の主な要因として、建設時において、ブリーディングの発生による充填不足、PC グラウトの先流れによる充填不足のほか、シースのつぶれや緊張作業によるカプラーのずれによりシースを閉塞することで起こる充填不足があげられる。

図 - 4 に代表的な PC 鋼材の配置形状で PC グラウトの充填不足が生じやすい箇所を示す。ブリーディングによる要因では、定着部付近（着目箇所①、③）や中間支点部の曲げ上げ頂部付近（着目箇所②）に発生しやすいと考えられる。PC グラウトの先流れの要因では、PC 鋼材の配置角度が下り勾配の箇所に発生しやすく、注入方向によって発生する箇所が変化するため、着目箇所①～③のすべての箇所に着目する必要がある。

PC グラウトの充填状況および PC 鋼材の状況の調査箇所は、前述のグラウト充填不足の要因を考慮して、着目箇所①～③の付近に着目するのが良いと考えられる。また、PC 鋼材 1 本あたり 1 箇所のグラウト充填調査で PC 鋼材全体の充填状況を推察するためには、グラウト注入・排出口となる PC 鋼材両端部付近の充填状況を確認することが重要と考えられる。

3.4 広帯域超音波法による調査事例

(1) 広帯域超音波法による調査

NEXCO における広帯域超音波法（以下、WUT とする）による調査事例を紹介する。WUT を用いた PC グラウト充填調査は、① 電磁波レーダ法による鉄筋・PC 鋼材位置の確認、② シースかぶりの探査、③ WUT を用いた PC グラウト充填探査、④ 削孔調査によるキャリブレーション、を組み合わせたシステムで行った。図 - 5 に調査フローを示す。④ の削孔調査は、WUT はシースのかぶり、コンクリート中の超音波の伝播速度、PC 鋼材の種類により判定に差異が生じる可能性があるため、調査作業時に超音波ドリルを用いた削孔調査によるキャリブレーションを行うこと基本とした。削孔調査によるキャリブレーションは、最初の調査断面および PC グラウトが充填不足の可能性が

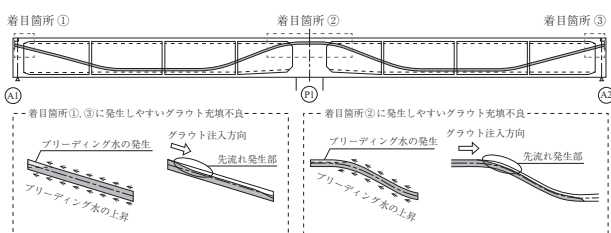


図 - 4 PC グラウトの充填不足が生じやすい箇所

ある波形が得られた箇所、PC グラウトが充填不足と判定され、シース内部の PC 鋼材状態を確認する必要がある場合にも行った⁴⁾。PC グラウトの充填状況のほか、削孔調査によりキャリブレーションを行うとともに、水の有無や PC 鋼材の状況についてもそれぞれ確認した。削孔調査は電磁波レーダにて主鋼材の位置およびかぶりを確認し、超音波ドリルを用いてシース位置まで削孔した。

調査は、上縁定着を有する複数の PC 箱桁橋におけるウェブ内側に配置された主鋼材を対象に行った。調査箇所は、PC グラウトの充填不足が発生し易いと思われる桁端定着頂部付近、中間支点部および上縁定着部の頂部付近、定着部付近にて行った。

(2) 調査結果

広帯域超音波装置を写真 - 3 に、測定状況を写真 - 4 に、コンクリート内の超音波伝搬模式図を図 - 6 に示す。WUT はコンクリート上に探触子を配置し、シースからの反射波を受信して、その特性値の差で PC グラウトの充填状況を判定する。これまでの探査実績より、PC グラウトが充填不足の場合は、充填されている場合に比べて高い周波数帯域でピークが発生する傾向があることが明らかになっている。

WUT による調査結果は、充填が良好と思われるものを○、充填不足と思われるものを×、充填不足の可能性があるとと思われるものを△の3パターンに分類した。充填判定は、シースのかぶり位置の波形で判断した。判定例を図 - 7～9 にそれぞれ示す。また、削孔調査による PC 鋼材の状況も合わせて示す。図 - 7 の波形は、低い周波数帯域（40 kHz 以下）にシース反射波のピークが確認できるため、判定○とした。一方、図 - 8 の波形は、図 - 7 の波形と

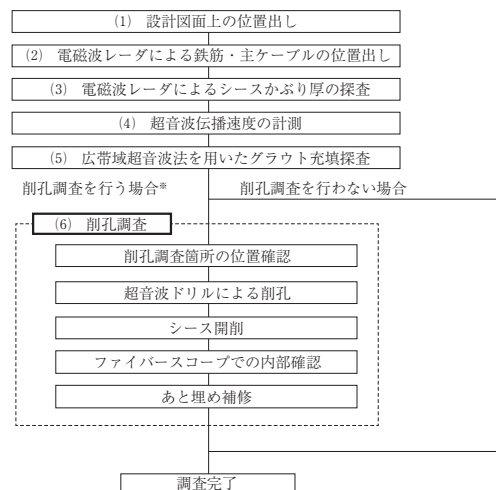


図 - 5 調査フロー

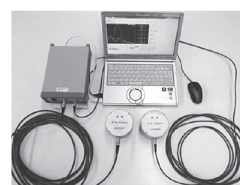


写真 - 3 広帯域超音波装置



写真 - 4 測定状況

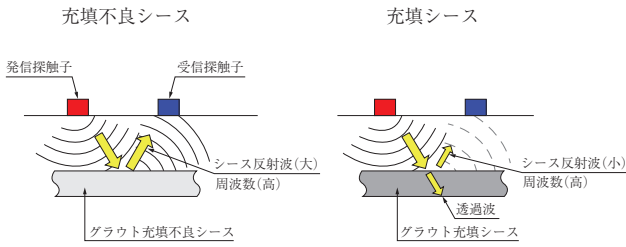
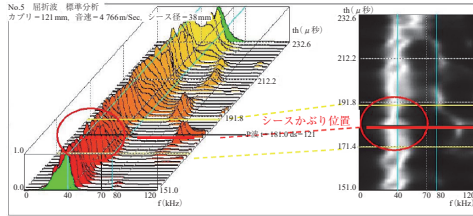


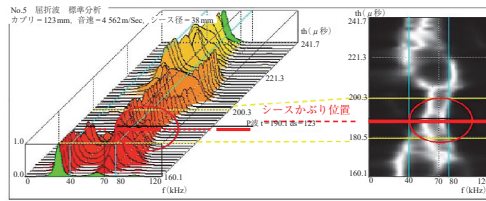
図 - 6 超音波伝搬模式図



シース反射波のピークが低い周波数領域 (40kHz 以下) で確認できるため、充填○と判定



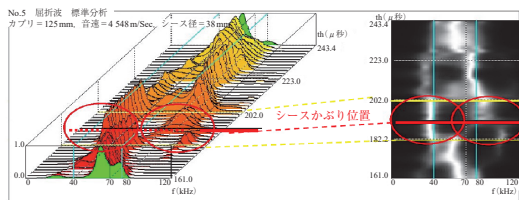
図 - 7 判定○の例



シース反射波のピークが高い周波数領域 (80kHz 付近) で確認できるため、充填不良×と判定



図 - 8 判定×の例



シース反射波のピークが、低い周波数帯域 (40kHz 付近) に確認できるが、シースかぶりよりも若干深い位置で高い周波数帯域 (80kHz 付近) にもピークが確認できるため、充填不良の可能性△と判定

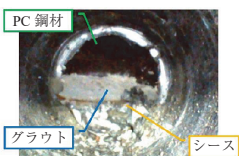


図 - 9 判定△の例

比較して高い周波数帯域 (80 kHz 付近) にピークが確認できることから、判定×とした。削孔調査による確認の結果、これらの判定結果は正しいものであった。図 - 9 の波形は、低い周波数帯域 (40 kHz 以下) にピークが確認できるが、シースかぶりよりも若干深い位置で高い周波数帯域 (80kHz 付近) にもピークが確認できることから、判定△とした。削孔調査の結果、PC グラウトは十分に充填されていない状況であった。

4. PC グラウト再注入

PC グラウト再注入は、PC グラウトの充填不足箇所、新たな PC グラウトを再注入することにより、PC 鋼材の腐食環境の改善や、PC 鋼材とコンクリート部材との一体化を図り PC 橋の耐久性能を回復させることを目的に行うものである。

NEXCO では PC グラウトの充填調査を順次進めており、充填不足や PC 鋼材の腐食が確認された橋梁に対し、PC グラウト再注入などの補修工事を今後本格化していく。4.1 に最近の PC グラウト再注入の事例として、施工対象は高速道路橋ではないが、NEXCO のグループ会社が一般会社と共同開発した PC グラウト再注入工法¹⁰⁾の施工事例を紹介する。また、PC グラウト再注入に関する技術基準の整備を目指した検討を行っており、その検討内容の一部を 4.2 で紹介する。

4.1 PC グラウト再注入の施工事例

PC グラウトの充填不足が発見された橋梁は PC 4 径間連続箱桁橋であり、平成初期に建設された橋梁である。当該橋梁の定期点検時に確認された損傷 (うき、遊離石灰) 部の補修工事の過程で充填不足箇所を発見し、そのうち、橋梁に対する充填状況を非破壊検査手法により調査し、充填不足箇所に対し再注入を行った事例である。

調査は、各径間の主鋼材の曲げ上げ定着部付近について行った。調査手順としては電磁波レーダ法によりシースおよび鉄筋位置を確認、チョーキングを行い、インパクトエコー法により PC グラウト充填状況を確認した。充填不足の疑いがある箇所については削孔調査を行うこととし、シース内部を確認した。なお、シースの削孔は PC 鋼材を傷めないよう、慎重に行わなければならない。かぶり測定値を参考にシースの直前までコンクリート削孔したのち、磁石を用いてシース位置との距離を見極めながらシースの表面まで削孔し、ドライバーを用いてシースを押し開けた。削孔調査の結果、PC グラウトの充填不足箇所が確認されたが、PC 鋼材に顕著な腐食は認められなかった (写真 - 5)。充填不足が確認された径間側の主鋼材に対し、再注入を行うこととした。充填不足箇所は、いずれも定着部付近であり、計 9 本の PC 鋼材を再注入の対象とした。施工フローを図 - 10 に、施工状況を写真 - 6 にそれぞれ示す。

本工法は、シースと連通した減圧容器の圧力変化により、PC グラウトの充填不足によるシース内の空洞量の推定を行えることが特徴である。空洞量の推定結果に基づき注入量を管理し、また漏気が大きく空洞量の推定ができない箇所については、PC 鋼材およびシースの断面積、PC グラウト

トの充填不足延長から空洞量を推定し、注入量を管理した。再注入は、いずれの箇所においても推定した空洞量と同程度を注入することができた。

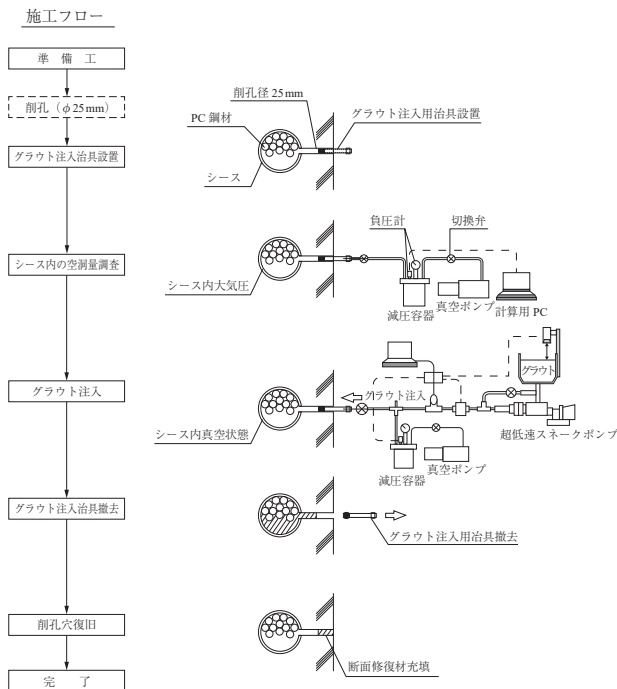


図 - 10 施工フロー

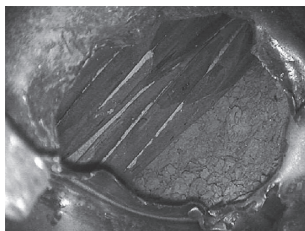


写真 - 5 PC鋼材の状況



写真 - 6 施工状況

4.2 PC グラウト再注入の技術基準化の検討

NEXCO 総研のこれまでの研究により、PC グラウトの再注入によりマクロセル腐食の発生が懸念される¹¹⁾ことから、マクロセル腐食に対する抵抗性を持たせる必要があると考え、過年度においては防錆材を添加した再注入用グラウトの基礎性状を把握した¹²⁾。

PC グラウト再注入は、シース内の狭隘な充填不足箇所に対して注入を行うことから、再注入する PC グラウトには確実に充填できる性能が求められる。新設工事のグラウトにおいては、PC グラウトの充填性能の確認、すなわち有害となる残留空気を発生させないための試験項目として JP 漏斗試験、材料分離抵抗性試験などが挙げられる。PC グラウト再注入のグラウトにおいてはこれらに加え、シース内の狭隘な充填不足箇所への充填性能を確認できる試験項目を追加するのが良いと考えた。

そこで、狭隘な充填不足箇所を模擬した既設グラウト材により形成された細径管を作製し、再注入用 PC グラウトを通過させる試験(細径管試験)を行った(図 - 11)。また、狭隘な充填不足箇所を模擬した大型のコンクリート版供試体(図 - 12)を作製し、再注入用 PC グラウトを注入し、充填性能を確認する実験(再注入実験)を行うこととした。再注入実験に使用する材料は、細径管試験を通過したものとした。両者の実験結果に相関が確認できれば、細径管試験が再注入用 PC グラウトの充填性能を確認する基準試験として適用できるものと考えた。

細径管試験はφ 38 mm シースとφ 32 mm PC 鋼棒の組合せをモデルとして、片側 3 mm の隙間に対する再注入用 PC グラウトの充填性能を確認するため行った。細径管試験に使用した材料と試験結果を表 - 1 に示す。材料は、過年度の研究¹²⁾と同様に、市販されている PC グラウトに防錆材を混合したものとした。また表中 No.1 の材料は、1980 年代頃に使用されていたグラウト材とした。細径管試験の結果、水粉体比の大きい材料が通過しやすい傾向が確認された。また別途行った材料分離抵抗性試験の結果、水粉体比の大きい材料はブリーディングの発生が確認された。なお、材料分離抵抗性試験は長さ 3 000 mm × 外径φ 48 mm / 内径φ 38 mm のアクリル直管にφ 32 mm の PC 鋼棒を挿入し行ったものである。評価方法については NEXCO 試験法 419-2004 に準拠し、判定 a)、b) はブリーディングなし、判定 c) はブリーディングありとした。

コンクリート版供試体は、建設時に緊張作業によるカブラーのずれによりシースを閉塞したことによる PC グラウトの充填不足箇所を想定したものとした。図 - 12 はコンクリート版供試体の側面図を示したものである。充填不足を模擬した PC 鋼材を各 6 本配置した供試体とし、各材料、各工法を組み合わせ再注入実験を行った。使用材料は、防錆材を混合したもののうち、細径管試験を通過し、かつ、材料分離抵抗性試験によりブリーディングの発生が無かった材料を選定し、再注入実験の対象とした(表 - 2)。再注入の工法は、圧入工法、真空工法(グラウト再注入する空洞部をポンプで真空吸引し、圧入により注入)によりそれぞれ行い、再注入した PC グラウトが硬化したのち、コンクリートブレーカーにより解体し、充填状況を確認した。なお、真空工法は注入口と排出口を同じ箇所とする 1 穴タイプと、別べつの箇所とする 2 穴タイプをそれぞれ行った。再注入実験の結果、真空工法(1 穴タイプ)ではすべての材料が充填されていることが確認できた(写真 - 7)。しかし、圧入工法ではすべての材料が充填されておらず、ま

た真空工法（2穴タイプ）は一部充填不足がある、もしくは充填されていない材料があった（写真 - 8）。本稿では割愛したが、カプラーによるシースの閉塞がない条件の再注入実験も別途実施しており、このケースでは真空工法（1穴タイプ）以外の工法でも比較的良好に充填されていることが確認できている。再注入用 PC グラウトの充填性能を確認する基準試験内容のほか、既設 PC グラウトの充填状況に応じた最適な注入工法を検討するなど、技術基準の整備に向けた研究を今後も継続する必要がある。

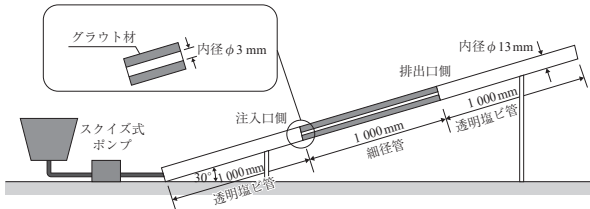


図 - 11 細径管試験

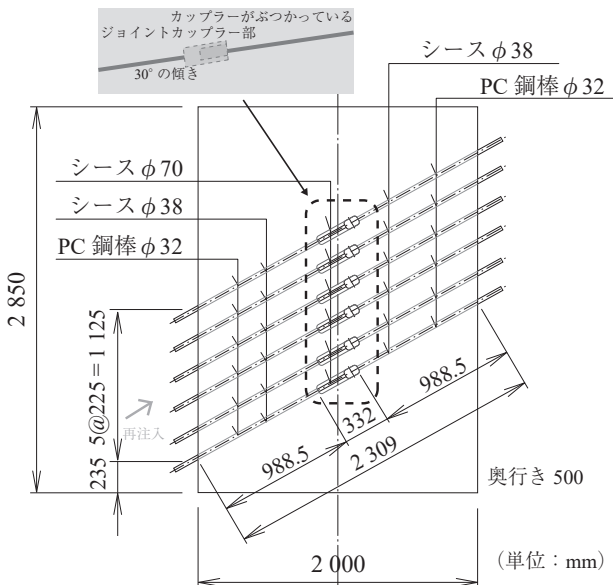


図 - 12 再注入実験

表 - 1 使用材料（細径管試験）

No.	グラウト	混合する防錆材	細径管試験	
			通過	ブリーディング
1	過去に使用されていたグラウト材	なし	◎	発生
2	低粘性型	なし	○	無
3	低粘性型	亜硝酸リチウム	○	無
4	低粘性～高粘性	なし	○	発生
5	低粘性～高粘性	イオン交換樹脂	○	無
6	超低粘性型	なし	×	無
7	超低粘性型	亜硝酸リチウム	×	無
8	超低粘性型	イオン交換樹脂	○	無
9	超低粘性型	塩素吸着剤	○	無
10	超微粒子セメント	なし	◎	発生
11	超微粒子セメント	亜硝酸リチウム	◎	発生

◎：通過，○：通過，ただし高圧力，×：通過せず

表 - 2 使用材料（再注入実験）

No.	グラウト	混合する防錆材	再注入実験		
			圧入(2穴)	真空圧入(1穴)	真空圧入(2穴)
3	低粘性型	亜硝酸リチウム	×	○	○
5	低粘性～高粘性	イオン交換樹脂	×	○	△
8	超低粘性型	イオン交換樹脂	×	○	○
9	超低粘性型	塩素吸着剤	×	○	×

○：完全充填，△：一部充填不足あり，×：充填されず



写真 - 7 充填が良好



写真 - 8 充填が不十分

5. おわりに

PC 鋼材の維持管理に関する取組みとして、PC グラウトの充填状況および PC 鋼材の状態を把握する調査技術とその事例、PC グラウト再注入の事例と研究の一部を紹介した。今後も PC 橋の適切な維持管理に努めていくとともに、技術基準の整備に向けた検討を継続していく。

参考文献

- 公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会：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，2016.9
- 東・中・西日本高速道路(株)：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方「報告書」高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会，2014.1
- 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，p369，2017.11
- 東・中・西日本高速道路(株)：調査要領，2017.7
- 野島昭二：PC グラウトの充填確認方法，コンクリート工学，Vol.50，No.9，2012.9
- 廣瀬誠，青木圭一，宮川豊章：漏洩磁束法によるポストテンション実橋における PC 鋼材破断調査，第 23 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，2014.10
- 横山貴士，青木圭一，宮永憲一，廣瀬誠：漏洩磁束法による PC 鋼材破断測定実験，第 23 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，2014.10
- 萩原直樹，宮永憲一，青木圭一：実験による漏洩磁束法の適用性検証，第 24 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，2015.10
- 萩原直樹，広瀬剛，廣瀬誠，木村美紀：漏洩磁束法を用いた実橋調査，第 25 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，2016.10
- 中日本高速道路(株)，中日本高速技術マーケティング(株)：ニュースリリース「プレストレストコンクリート構造物における新たなグラウト再注入工法（PC-Rev 工法）の開発」，2017.10
- 宮永憲一，青木圭一，萩原直樹，渡邊晋也：PC グラウト再注入が鋼材腐食に及ぼす影響に関する実験的検討，第 24 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，2015.10
- 萩原直樹，広瀬剛，中村浩章，渡邊晋也：PC 再グラウト材料の基礎性状に関する研究，第 26 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，2017.10

【2018年8月31日受付】