

主方向に PC 鋼棒が使用された PC 箱桁橋に対する リパッシブ工法の適用実験

大阪支店	開発営業部	鴨谷知繁
技術本部	技術部	深川直利
大阪支店	開発営業部	池田政司
技術本部	技術部	石井浩司

概要：著者らは、亜硝酸リチウム水溶液先行注入型グラウト再注入工法であるリパッシブ工法を開発し、主として PC 桁橋の主ケーブル、横締ケーブルに対して施工を行ってきた。本工法を主方向に PC 鋼棒が使用された PC 箱桁橋への適用するためには、前者と構造条件や施工条件が相違するため確実な施工性を確認する必要がある。そこで、本稿では主方向に PC 鋼棒が使用された PC 箱桁橋へリパッシブ工法の適用性の確認を目的に実物大試験体を製作し検討を加えたものである。実験の結果、施工に際して留意事項や工夫の必要性があるものの、概ね良好に施工できることを確認した。

Key Words：リパッシブ工法，PC 鋼棒，PC 箱桁橋，

1. はじめに

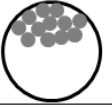
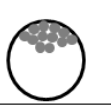
既設ポストテンション方式 PC 橋においてグラウト充填不足が多数確認されており、特に積雪寒冷地に建設された橋梁では凍結防止剤に含まれる塩化物イオンがグラウト充填不足部に侵入し PC 鋼材の腐食が報告されている¹⁾。著者らは、シース内へ亜硝酸リチウム水溶液を先行注入

した後、流動性が高く小間隙充填性に優れたセメント系補修材を充填する補修工法であるリパッシブ工法を開発し、主として PCT 桁橋の主ケーブルや横締めケーブルを対象に施工を行っている²⁾。

近年、主方向に PC 鋼棒が使用された PC 箱桁橋でもグラウト充填不足が確認されている。一般に PC 箱桁橋は長スパンの大規模橋梁で架替更新が難しいため、グラウト再注入対策には高い腐食抑制性能に加え、高い施工確実性が求められる。一方、PC 鋼棒は表-1 に示すように、12φ5mm や 12φ7mm のような PC 鋼線束と比較してシース内空隙が非常に小さい上、シース径の変化をとまなうカップラー部があり、施工難度が高い。

そこで、本稿では主方向に PC 鋼棒が使用された PC 箱桁橋の下床版およびウェブに配置されたケーブルを模擬した実物大試験体での施工実験を行い、リパッシブ工法の適用性を確認するとともに留意点の抽出を行った。

表-1 PC 鋼線束および PC 鋼棒の仕様抜粋

ケーブル名称	PC鋼線束 12φ7mm	PC鋼線束 12φ5mm	PC鋼棒 32mm
断面図			
シース径(mm)	45	35	38
空隙率(%)	71	76	29
空隙(mm ²)	1128	726	330



鴨谷知繁



深川直利



池田政司



石井浩司

2. シリーズ I

2.1 目的および概要

本シリーズは、シース内の最小間隙寸法に対する水溶液の注入性状および補修材の充填性状の把握を目的とした。試験体の概要を図-1に示す。表-1のφ32mmPC鋼棒においてシース内径とPC鋼棒の外径との差(6mm)が同条件となるよう、内径41mmの透明塩化ビニル管(以下、透明管)をシース、外径35mmの塩化ビニル製丸棒(以下、丸棒)をPC鋼棒の代わりに使用し、丸棒にはφ3mmの芯だしスパー

サーを固定し、丸棒を透明管の中央部に配置した。試験体の全長は約2.2mとし、上端および下端から500mmの位置をそれぞれ排出孔、および注入孔とし、3mm厚の閉塞模擬部を有する閉塞模擬管を設置した。閉塞模擬部は、文献③では同部を内径4mm長さ3000mmの管で模擬していること、本工法の補修材は内径2mm外径2.5mmの樹脂製チューブ(以下、高弾性チューブ)を通過する④ことを考慮してφ1mm×1孔、φ2mm×1孔、φ3mm×1孔、φ3mm×2孔の4水準とし、試験体名を順に、sp1-φ1×1、sp1-φ2×1、sp1-φ3×1およびsp1-φ3×2とした。貫通孔位置は、閉塞模擬部近傍にエア溜まりが最も生じやすい条件を仮定し、1孔管は最下部、2孔管は最下部および最上部とした。

2.2 試験方法

水溶液の注入方法を図-2①および②に示す。注入孔にφ15mmのグラウトホース、真空計、バルブおよび注入ベッセルを接続し自然流下方式にて水溶液を注入した。その後、排出部にホース拡幅部、真空計、バルブ、水溶液回収用密閉容器、真空ポンプ順に接続して減圧注入方式を行った。減圧注入方式は、注入側を閉塞した状態で排出側からシース内部を減圧してシース内外の圧力差を増大させて真空脱泡効果⑤により効果的にPC鋼材表面錆層内に亜硝酸イオンを注入しながら、注入側の開放によりシース内部へ水溶液および空気を流入させ、水溶液に乱流を発生させる方法であり、自然流下方式ではエア溜まりが生じる領域にも水溶液の注入が期待できる方法である。

補修材の注入実験方法を図-2③に示す。注入孔にコンプレッサー、空気圧調整弁、圧力計、密閉容器およびバルブからなる低圧ポンプシステムを接続して補修材を充填した。補修材は本工法専用材料を粘性が高めとなる亜硝酸リチウム無添加配合で練り混ぜたものとし、修正JASSフロー試験値は280mm(製品規格値:240mm~330mm)であった。

2.3 試験結果

閉塞模擬部近傍の注入・充填性状を表-2に示す。水溶液の注入に関しては、全ての試験体で通過し途中閉塞は生じなかった。最も厳しい条件のsp1-φ1×1では、排出側は減圧注入方式により全域に水溶液が注入できたが、注入側は自然流下方式では断面上部にエア溜まりが生じ、減圧注入方式にでも全域への水溶液の注

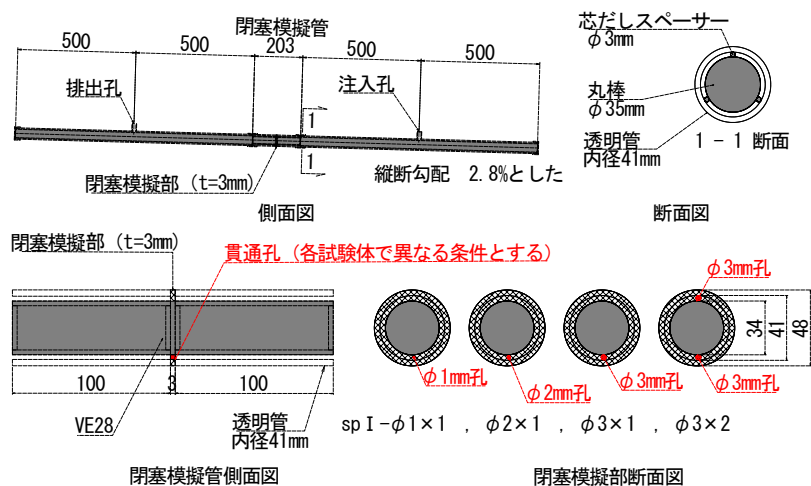


図-1 シリーズ I の試験体概要図

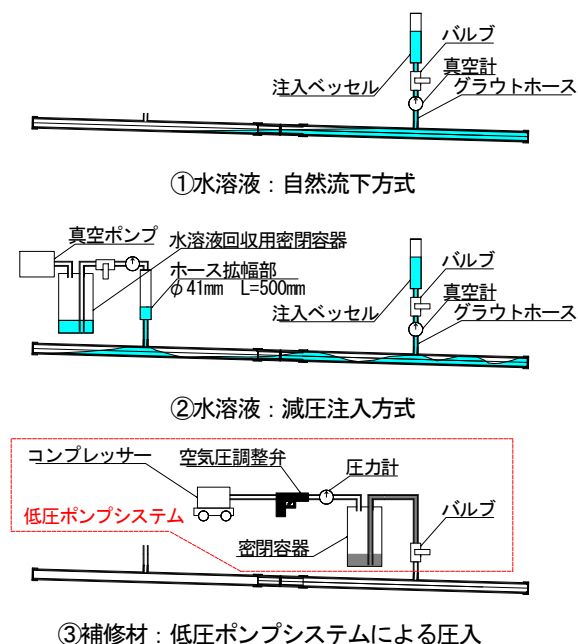
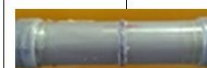


図-2 シリーズ I の試験方法

入はできなかった。sp1-φ1×1は貫通孔が小さく注入側の減圧が不十分となり、乱流発生に十分なシース内外の圧力差が得られなかったと推察される。一方、それ以外の試験体については自然流下方式では断面上部にエア溜まりが発生しても、減圧注入方式では全域に水溶液を注入できた。水溶液の注入に関しては、φ2mm孔×1箇所程度の隙間があれば、グラウト充填不足部全域に注入できると判断された。

補修材の充填に関しては、sp1-φ1×1では貫通孔を通過するものの、その後の充填が不可能で閉塞と判断した。sp1-φ2×1はその後の充填は可能であったが、閉塞模擬部排出側上方に大きなエア溜まりが生じた。貫通孔がφ3mmのsp1-φ3×1およびsp1-φ3×2は、閉塞模擬部をスムーズに通過し、閉塞模擬部のエア溜まりはsp1-φ3×1でわずかに発生したのみであった。補修材の充填に関しては、φ3mm×1孔程度の隙間があれば可能であり、それ以下では充填性能の低下や閉塞が生じる可能性があるかと判断された。

表-2 閉塞模擬部近傍の注入・充填性状

試験体名	項目	水溶液				補修材	
		自然流下		減圧注入		低圧加圧注入	
		排出側	注入側	排出側	注入側	排出側	注入側
sp-I-φ1×1	写真						
	注入状況	エア溜まり発生 (×)	エア溜まり発生 (×)	全域に供給 (○)	エア溜まり発生 (×)	排出側へ通過した補修材はわずかで、ほぼ閉塞とみなせる。	
	判定	×				×	
sp-I-φ2×1	写真						
	注入状況	全域に供給 (○)	エア溜まり発生 (×)	全域に供給 (○)	全域に供給 (○)	補修材は通過するもののスムーズではない。	
	判定	○				×	
sp-I-φ3×1	写真						
	注入状況	エア溜まり発生 (×)	エア溜まり発生 (×)	全域に供給 (○)	全域に供給 (○)	補修材はスムーズに通過し、上部にわずかなエア溜まりが発生しているものの良好な充填状況である。	
	判定	○				○	
sp-I-φ3×2	写真						
	注入状況	エア溜まり発生 (×)	全域に供給 (○)	全域に供給 (○)	全域に供給 (○)	補修材はスムーズに通過し、良好な充填状況である。	
	判定	○				○	

水溶液の 判定基準	排出側および注入側ともに、自然流下方式または減圧注入方式により、全域に水溶液が供給できる場合：○ できない場合：×
補修材の 判定基準	補修材がスムーズに通過し、わずかなエア溜まりが発生する程度の良好な充填状況である：○ 補修材の通過がスムーズではない：×

PC鋼棒では空気や水溶液は通過するが、補修材は途中で閉塞する場合が想定され、補修材充填工では、閉塞発生を速やかに検知し、閉塞位置を精度良く推定することが必要になる。そこで、図-3に示すように、図-2③の密閉容器のかわりに円筒型透明容器を用い、補修材天端高さの変化量から補修材充填量を把握でき、加圧後も補修材天端高さの変化がなくなった時点を開塞発生として検知する途中閉塞検知型低圧ポンプシステムを開発し、適用した。

次に、注入孔近傍の補修材の充填性状を写真-1に示す。下方向への充填性状は、上方向と同じように補修材の先

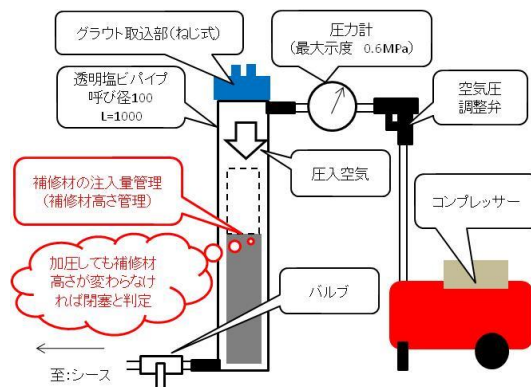


図-3 途中閉塞検知型低圧ポンプシステム

流れがほとんど発生していない。これはシーす和 PC 鋼棒との隙間が小さいことが主要因と考えられる。このような充填性状はグラウト充填不足部の中間位置に注入孔を設置した場合、再注入後の下端近傍にエア溜まりが残置することにつながり、充填方法の改良が必須である。そこで、注入および排出孔は図-4 に示すように、 $\phi 80\text{mm}$ のコア孔として、PC 鋼棒でも挿入可能な排気用の高弾性チューブを挿入する構造⁵⁾を標準的に使用することが望ましいと考えられる。

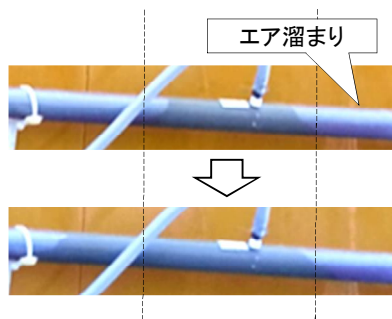


写真-1 注入孔近傍の補修材の充填状況

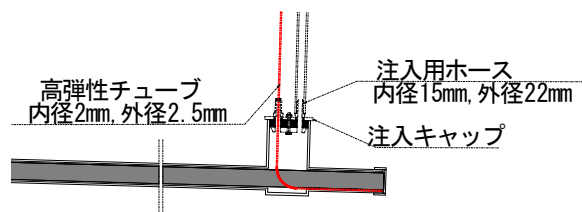


図-4 グラウト注入孔の構造

3. シリーズⅡ

3.1 目的および概要

PC 箱桁橋の 2BL 分を 1 施工箇所とした際の施工性の確認を目的とし、カップラー部における水溶液の注入状況および補修材の充填性状、補修材充填工における必要注入圧について確認を行った。シリーズⅡの試験体を図-5 に示す。試験体は全長 11m とし、実橋の下床版ケーブルを想定し、縦断勾配を 2.8% とした。張出ブロック打継ぎ部の気密性が低いことを想定し、下端から 4500mm、8500mm の 2 箇所にボールバルブを設置し気密性の低下を模擬した。なお、注入孔および排出孔を下端から 200mm、9200mm の位置とした。注入孔は、図-4 に示す構造とし下端方向へ高弾性チューブを挿入した。カップラー部は実橋を模擬し、下端から 7500mm の位置とした。

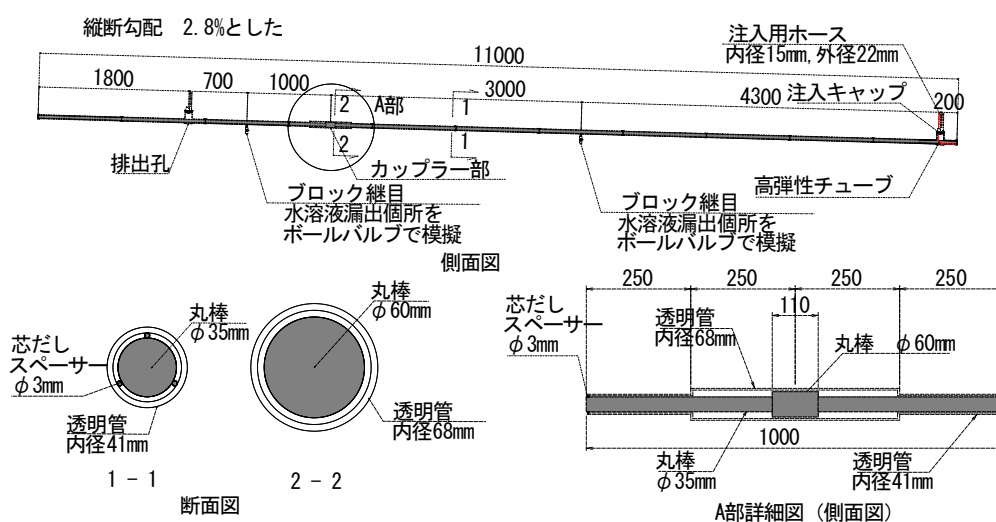


図-5 シリーズⅡの試験体概要

3.2 試験方法

水溶液の注入方法は図-2①および②と同様とし、補修材の充填方法は、図-2③の密閉容器を円筒型透明容器として、図-3 に示す途中閉塞検知型低圧グラウトポンプを用いた圧入方法とした。

3.3 試験結果

カップラー部の試験結果について記す。自然流下方式による水溶液の注入に関しては、左上端部にエア溜まりが生じたが、減圧注入方式を適用することにより写真-2に示すように乱流が生じ、全域に水溶液を注入できることを確認した。補修材充填状況を写真-3に示す。左上端部に僅かなエアだまりが生じたが、概ね良好な充填性が確保された。なお、カップラーシース内部のカップラー以外の区間は、シースの内径とPC鋼棒の外径の差が大きくなるため、写真-1に示した標準部と比較して補修材の先流れが顕著となっている。当該区間の補修材を下り勾配で充填した場合は、先流れにより大きなエア溜まりが生じると推察され、上り勾配での充填が望ましいと考えられる。

試験体下端の補修材充填状況を写真-4に示す。高弾性チューブを下端まで挿入できたことで、排気が確保され良好な充填性が得られた。

補修材の充填圧力は、試験体の塩化ビニル管接合部の耐圧性能を考慮して、上限圧力を0.25MPa以下としたが、排出孔まで問題なく充填を継続することができた。

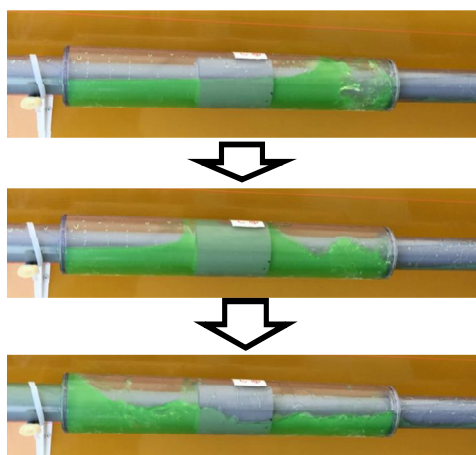


写真-2 水溶液の注入状況（カップラー部）

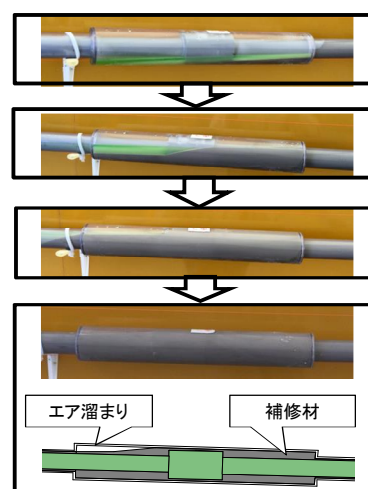


写真-3 補修材の充填状況（カップラー部）

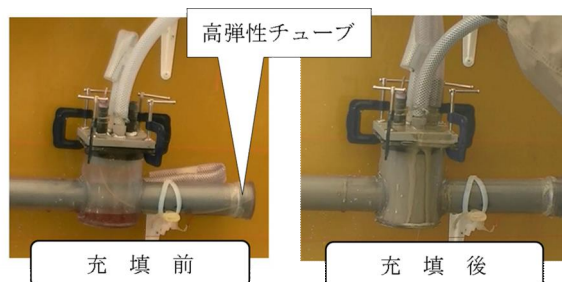


写真-4 補修材の充填状況

4. シリーズⅢ

4.1 目的および概要

PCT 桁を対象に本工法を施工する場合には、図-6①に示すようにグラウト充填不足部上端より高い位置に設置した注入ベッセルを利用した自然流下方式²⁾を採用している。これは水溶液注入工においては容易に低圧注入が可能となり亜硝酸リチウム水溶液の漏出による水質汚濁が生じるリスクを大幅に低減できること、補修材充填工については容易に低速充填が可能となり、空気と補修材との置換により小間隙の充填性向上が期待できるのに加え、高弾性チューブからの排出確認後も継続的にヘッド圧をシース内部に付与することで、定着部背面への通気性状に従い上端部における補修材充填性が向上する⁶⁾ためである。

一方、PC 箱桁橋のウェブケーブルは、複数列配置になっている場合が多く、内側ケーブルは箱桁内部から

の施工となり、定着部より高い位置に注入ベッセルを設置することが困難である。そこで、本シリーズでは、図-6に示すようにPC箱桁橋のウェブケーブルの上端部付近を模擬した全長1mの試験体を用いて、水溶液注入工および補修材充填工において自然流下方式と同等の施工確実性を有する施工方法の確立を目的とした。

4.2 低圧ポンプシステムによる自然流下方式を再現するための留意点と施工方法の考案

本検討では、図-6②に示すように低圧ポンプシステムを用いて自然流下方式の再現を試みた。試行錯誤の結果、低速注入を行うためには圧力計の示度範囲を適切に設定することが重要であることが明確となった。

図-6②に示すように、低圧ポンプシステムを箱桁下床版に設置する場合を想定すると、グラウト充填不足部上端～ポンプまでの高低差は桁高に準じ、数m～10m強程度と推定される。水溶液および補修材の比重は、1.25、最大2.1程度であることから、高低差を10mと仮定した場合の必要圧力は、水溶液で0.125MPa、補修材で0.21MPaに摩擦損失を加味した値となる。水溶液注入工で最大示度0.2MPa、補修材充填工で最大示度0.6MPaの圧力計を使用することで、空気圧調整弁の調整により容易に低速注入が可能となった。

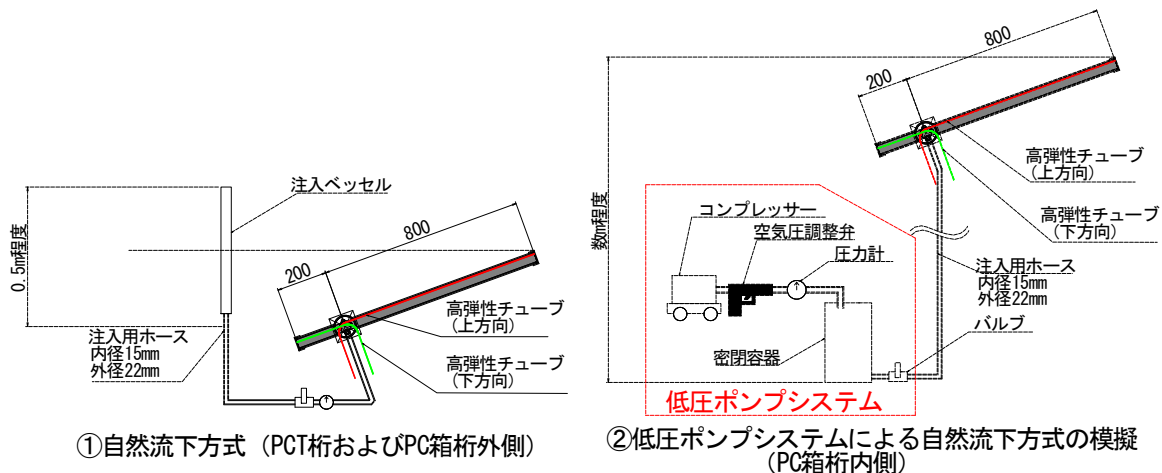


図-6 シリーズⅢの試験概要

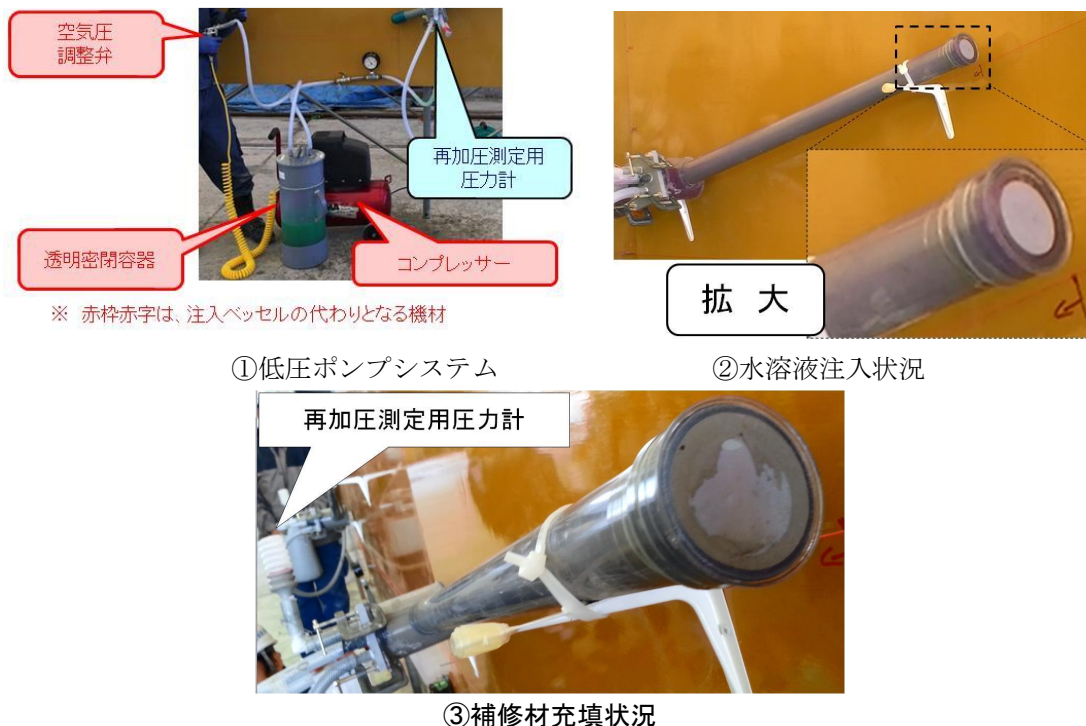


写真-5 低圧ポンプシステムによる施工

次に、補修材の継続的なヘッド圧付与の再現方法について述べる。ここで、注入孔位置は高弾性チューブの挿入性を考慮してウェブ上端近傍とすることから、定着具と注入孔との高低差は1~2m程度の範囲と推定され、また測定が可能と考えられる。これより、①注入キャップに再加圧測定用圧力計を設置し、②定着具と注入孔との高低差の計測により必要再加圧力を算定し、③低压ポンプシステムにより補修材の充填を行い、④ポンプ撤去後、グラウトホース余長部を折り曲げることで再加圧を行い、その補修材が硬化するまで維持する方法を考案した。なお、必要再加圧力は自然流下方式の実績より最大0.05~0.1MPa程度であること、補修材充填工1箇所ごとに再加圧測定用圧力計が必要となることを考慮して、再加圧測定用圧力計として事前に圧力・伸び関係を把握した樹脂製ジャバラ管を使用した。

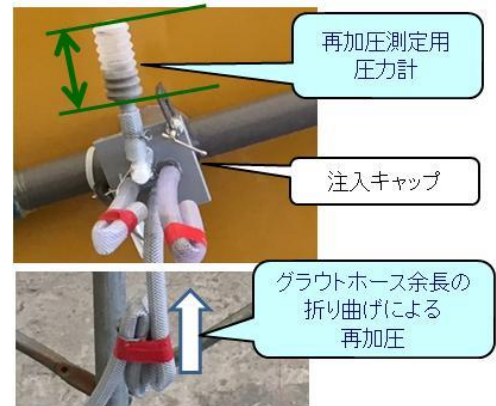


写真-6 再加圧測定用圧力計を用いた再加圧状況

4.3 考案した施工方法の検証

同形状の試験体2体を用いて自然流下方式と低压ポンプシステムによる方式で、水溶液注入および補修材充填を行い、両者を比較した。

写真-5に低压ポンプシステムによる施工状況を示す。圧力計確認しながら空気圧調整を行うことで、①水溶液注入工および②補修材充填工において自然流下方式を再現できることを確認した。

写真-6に再加圧測定用圧力計を用いた再加圧管理状況を示す。ポンプ撤去後も、ホース余長の折り曲げにより容易に必要な再加圧を行うことができ、補修材の硬化まで圧力を維持できることを確認した。以上の方法により、注入ベッセルを使用した自然流下方式を低压ポンプシステムにより再現でき、PC箱桁内部のウェブケーブルにおいてもPCT桁と同等の施工確実性があることを確認した。

5. まとめ

本稿では、主方向にPC鋼棒が使用されたPC箱桁橋に対するリパッシブ工法の適用性の確認を目的にPC箱桁橋の下床版およびウェブに配置されたケーブルを模擬した実物大試験体での施工実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 水溶液は、 $\phi 1\text{mm}$ 孔 $\times 1$ 箇所程度の隙間でも通過するが、グラウト充填不足部全域に注入するには、 $\phi 2\text{mm}$ 孔 $\times 1$ 箇所程度の隙間が必要であった。
- 2) 補修材を確実に充填するには、 $\phi 3\text{mm}$ $\times 1$ 孔程度の隙間が必要であった。それ以下の隙間では充填性の低下や途中閉塞が生じる可能性がある。
- 3) 実施工においては、空気や水溶液は通過するが、補修材は途中で閉塞するケースが想定されるため、補修材の閉塞発生を速やかに検知し、閉塞位置を精度良く推定できる途中閉塞検知型低压グラウトポンプを開発した。
- 4) PC鋼棒の標準部では先流れがほとんど発生しないため、グラウト充填不足部端部のエア溜まりを防ぐためには、シース内部に排気チューブを挿入する必要がある。
- 5) 本工法を適用した場合、カップラー部において水溶液を全領域に注入でき、補修材充填時のエア溜まりは軽微であることが確認された。
- 6) 本実験の材料を使用すれば、張出2ブロック(8m程度)ごとの分割施工により施工が可能であると考えられる。
- 7) グラウト充填不足部上端より高い位置に設置した注入ベッセルを用いた自然流下方式が適用できない場合にも、低压ポンプシステムの使用や再加圧測定用圧力計を利用した再加圧等を実施することで、自然流下方式を適用できる場合と同等の施工性を確保できることを確認した。

以上より、施工上の留意点があるものの、リパッシブ工法は主方向にPC鋼棒が使用されたPC箱桁橋適用できると判断された。

参考文献

- 1) 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, (公社) プレストレストコンクリート工学会, 2016
- 2) 鴨谷, 蝦名, 青山, 森川: 亜硝酸リチウムを用いた PC グラウト充てん不足部の新しい補修方法の腐食抑制効果と実橋への適用事例, コンクリート工学, Vol.50, No.12, pp.1084-1091, 2012
- 3) 萩原, 広瀬, 中村, 渡邊: PC 再グラウト材料の基礎性状に関する研究, プレストレストコンクリート工学会 第 26 回シンポジウム論文集, pp.311-316, 2017
- 4) 鴨谷, 青山, 福田, 森川: PC グラウト充てん・充てん不足境界近傍で著しく腐食した PC 鋼材束内部における LiNO_2 水溶液注入補修の適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1128-1133, 2014
- 5) 深川, 鴨谷, 石井: 亜硝酸リチウム水溶液を用いた PC 鋼棒のグラウト充填不足部の注入確認試験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, pp.1355-1356, 2017
- 6) 鴨谷, 青山, 石井, 森川: グラウト未充てん部の密閉度とグラウト再充てん方法に関する一報告, プレストレストコンクリート工学会 第 21 回シンポジウム論文集, pp.409-412, 2012