

グラウトホースの伝い水現象と補修技術 に関する実験的検討

徳光 卓*¹・岡田 繁之*²・田中 寛規*³・谷 慎太郎*⁴

主にPC鋼棒による張出し架設を行ったPC箱桁橋において、定着突起やウェブからの漏水を生じる変状事例が顕在化している。この変状はとくに1985年から1995年頃に施工された橋梁を中心に確認されており、施工当時のグラウトホースの配置や張出し床版部の水しみからグラウトホースが関与しているものと推定された。筆者らはその原因の検証のため、供試体を用いた長期暴露試験を行った。実験の結果、漏水は橋面の滞水がグラウトホースの周囲を伝って浸透したものであり、漏水は冬季に発生すること、グラウトホースの配置本数に関わらず発生することを確認した。凍結防止剤を散布する地域では漏水による塩害が懸念されるため、漏水防止のための補修方法について検討した。前記供試体に補修を施し、再度長期の暴露試験を行うことにより、提案した補修方法によって漏水を防止できることを確認した。

キーワード：グラウトホース、水しみ、伝い水、線膨張係数、漏水補修

1. はじめに

10年ほど前より、昭和の末期から平成の初期頃に張出し架設されたプレストレストコンクリート箱桁橋（以後、PC箱桁橋と略す）において、ウェブや定着突起から漏水を生じる変状が定期点検時に確認されていた。これらの橋梁に共通するのは、張出し床版の下面に水しみが多くみられること、漏水部にグラウトホース（以後、ホースと略す）が存在することであった。変状を生じた橋梁の架設年代にはホースの端部が地覆に配置された事例が多いこと、床版の水しみがホースに沿う形状であったことから、橋面の水がホースに沿って流下した可能性が疑われた。

この問題に対処するため、プレストレスト・コンクリート建設業協会（以後、PC建協と略す）では西日本高速道路株式会社、ならびに株式会社高速道路総合技術研究所の協力をいただき、実橋調査、ならびに現象の確認と原因の解明、予防的な補修方法の確立に向けた実験的検討を行ってきた^{1,2)}。本稿ではこれらの取組みを紹介するとともに、一連の実験などから得られた結論について述べる。

2. 対象とする漏水現象の概要と推定原因

2.1 実橋調査により確認された漏水の特徴

PC建協では定期点検においてウェブや定着突起からの漏水が確認された高速道路橋のPC箱桁橋について調査した。定着突起からの漏水の例を写真-1に、ウェブからの漏水の例を写真-2に示す。漏水の発生箇所は箱桁の内側であり、漏水はコンクリートの内部からしみ出し、鉛直ひび割れや鉛直打継目とは無関係に発生していた。

調査対象のPC箱桁橋のうち、押出し工法により架設された1橋を除けば、ほかの橋はすべてPC鋼棒を用いた張



写真-1 定着突起からの漏水



写真-2 ウェブからの漏水

出し架設工法により架設されており、押出し工法の橋についても架設用PC鋼棒が用いられていた。そのため漏水はPC鋼棒の使用との相関が高いと考えられた。漏水現象を

*1 Suguru TOKUMITSU：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修委員会 保全補修部会

*2 Shigeyuki OKADA：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修委員会 保全補修部会

*3 Hironori TANAKA：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会 中国支部 技術部会

*4 Shintaro TANI：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会 中国支部 技術部会

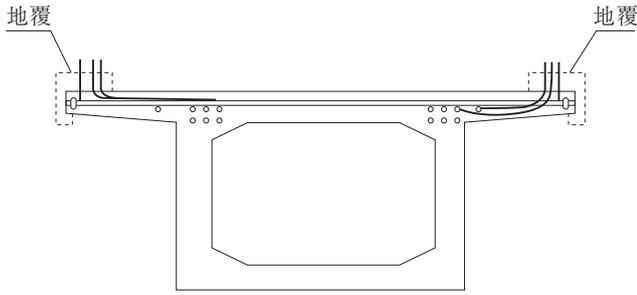


図 - 1 平成初期頃に推奨されたホース末端処理方法

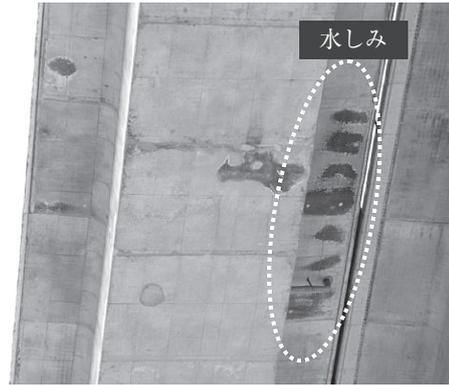
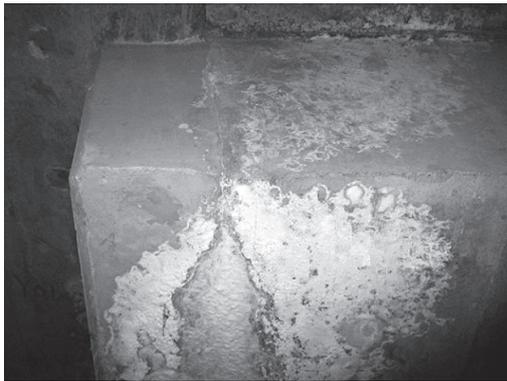
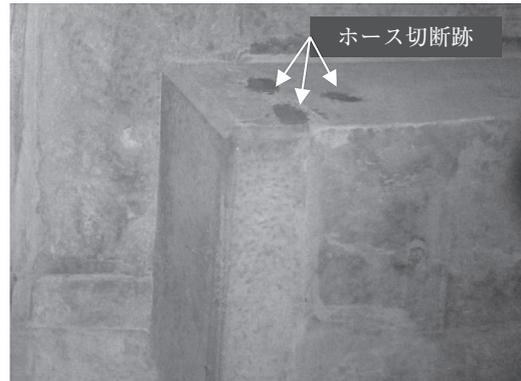


写真 - 3 張出し床版下面の水しみ



(a) ホース切断跡なし (漏水あり)



(b) ホース切断跡あり (漏水なし)

写真 - 4 下床版定着突起のホース切断跡の有無と漏水の関係

生じた橋の多くに共通する事柄は以下のとおりである。

(1) 地覆下へのホース末端の配置

これらの橋は平成初期に施工されており、ホースの配置本数が多いこと、ホースの端部が図 - 1 のように地覆下に配置されていることが共通していた。PC 鋼棒はマルチストランドケーブルに比べて緊張力が小さいため、張出し架設した PC 箱桁では、PC 鋼材の配置本数が多く、カップラーにより接続するためホースの本数が増える。なお、この配置方法が採用された理由は橋面の平坦性確保やグラウト作業の効率化のため、当時、一定量のホースを束ねてホースの端部を地覆下に配置することが推奨されたためである。

(2) 張出し床版下面の水しみ

張出し床版下面の水しみの例を写真 - 3 に示す。水しみは橋軸直角方向にすじ状に伸びた形状を呈する。この位置は束ねたホースの位置に近似している。

(3) 定着突起のホース切断跡の有無

下床版の定着突起から漏水を生じた例と漏水を生じていない例を写真 - 4 に示す。この写真に示した事例は同一橋梁内で確認されたものである。この橋梁では下床版の定着突起から漏水を生じた箇所と生じていない箇所が混在しており、漏水を生じた箇所では、いずれも定着突起の上面や前面にホースの切断跡が認められなかった。施工当時は施工の都合から定着突起のホースを地覆位置まで伸ばして配置する場合があり、この定着突起のホースは地覆部まで



写真 - 5 平成初期頃の張出し架設橋ホース配置状況

伸びていると考えられる。一方、ホースの切断跡が確認できた定着突起では漏水がまったく認められなかった。

2.2 漏水原因の推定

平成初期頃の張出し架設橋におけるホースの配置状況を写真 - 5 に示す。平成初期にはコンクリート中でのホースの潰れを防止するため、塩化ビニル製ポリエステル繊維補強ホースが使用されていた。写真から分かるように、地覆下へのホース末端の配置を採用した橋梁では、多本数のホースを束ねて配置することが行われていた。グラウトホース 3 本を束ねた状態の模式図を図 - 2 に示す。円形のホースを 3 本束ねると、ホースの間には三角形の空間を生じるため、締固めを十分に行った場合でもホース間に粗骨材が回ることは考えにくい。

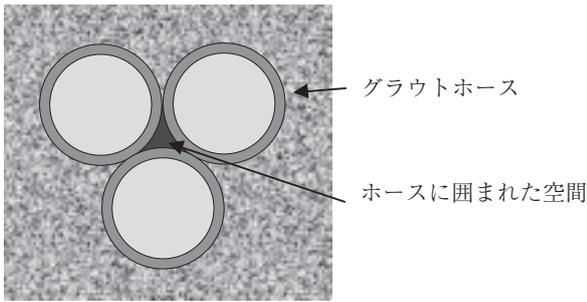


図 - 2 束ねたホースに生じる空間の模式図



写真 - 6 漏水を生じた橋の橋面の状況の例

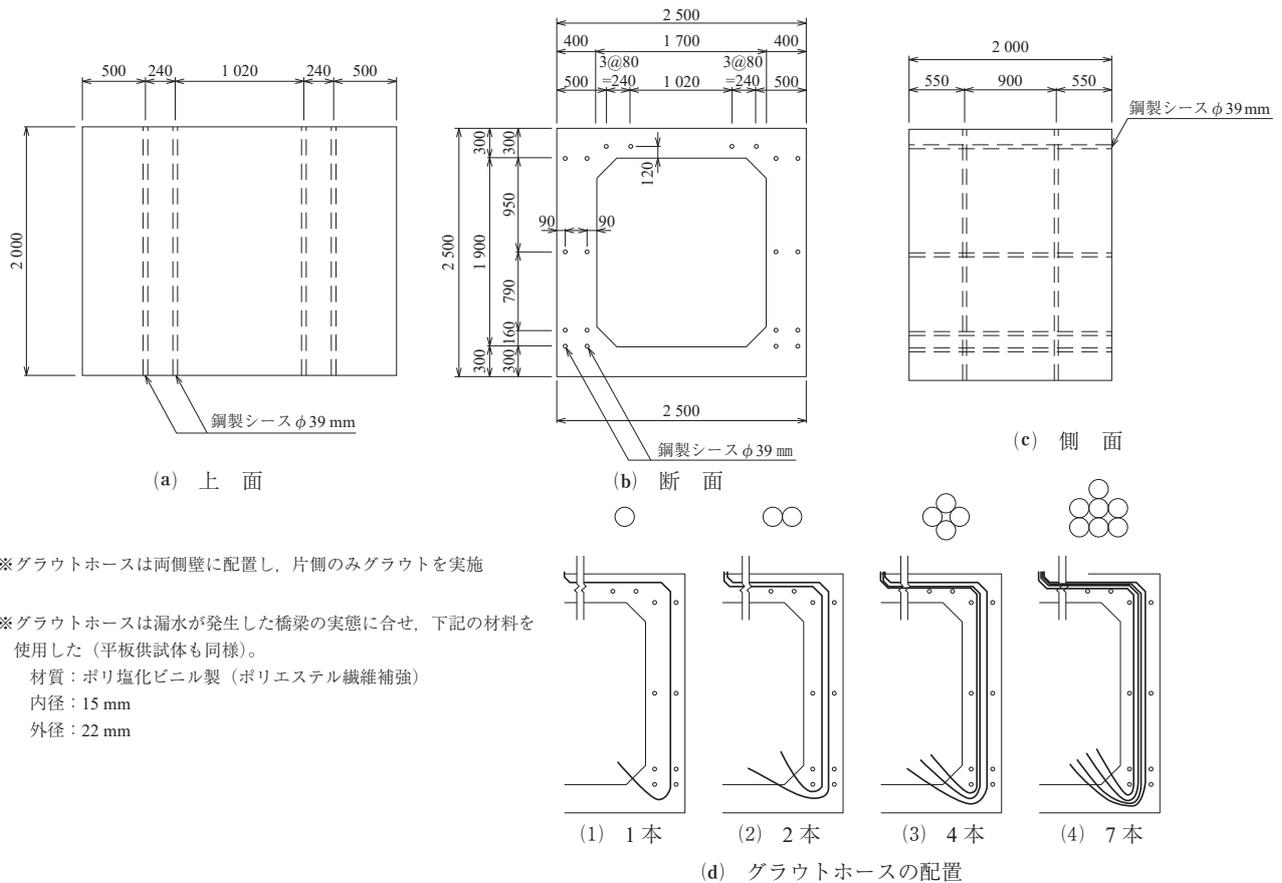


図 - 3 ボックスカルバート供試体

漏水を生じた橋の橋面の状況の例を写真 - 6 に示す。平成初期頃の地覆は、前面に縁石を配置し、壁高欄との間に地覆コンクリートが打ち込まれていた。縁石はドライモルタル上に据え付けられるが、ドライモルタルは防水性に乏しい。写真に示した橋梁では地覆の上面が凍結融解作用によりスケーリングを生じて滞水し、地覆部前面にも舗装面の水濡れによる変色が確認できることから、地覆下面に水の浸透を生じていることが推測できる。

これらの状況から、確認された変状の主な原因は、橋面上の水が縁石の下面から地覆直下に浸入し、ホース間に生じた空間を伝って流下したものと推測した。この推論の妥当性を確認するため、確認実験を行うものとした。

3. 漏水原因の確認実験

3.1 供試体

(1) ボックスカルバート供試体

ボックスカルバート供試体の概要を図 - 3 に示す。供試体は 2 体製作した。ボックスカルバートは頂版を箱桁橋の張出し床版に、側壁をウェブに、底版を下床版に見立て、頂版の中央から側壁を経て底版のハンチ部までホースを配置した。ホースには実橋での使用が確認されている直径 15 mm の塩化ビニル製ポリエステル繊維補強ホースを用いた。ホースは左右の側壁それぞれに 1 本、2 本、4 本、7 本を束ねて配置した。

表 - 1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	Ad 1	Ad 2
39	37	186	477	608	1 050	1.43	0.0334

注) W : 水 C : 早強セメント S : 細骨材 G : 粗骨材 (2005)
Ad1 : 高性能減水剤 Ad2 : AE 剤

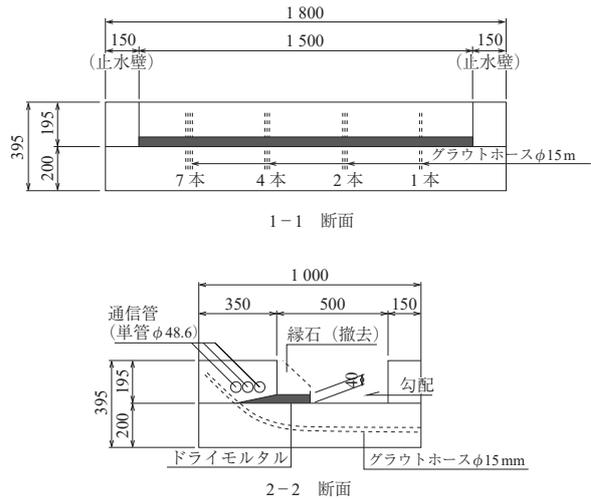
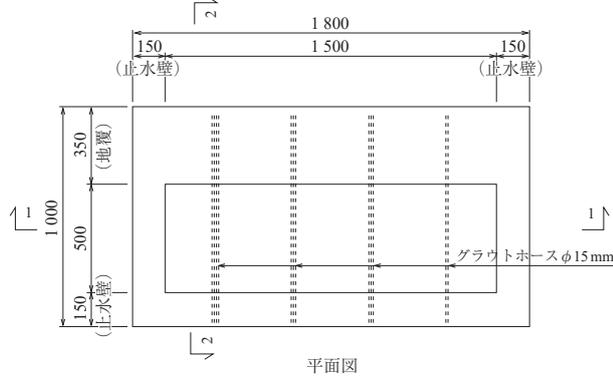


図 - 4 平板供試体

コンクリートの配合を表 - 1 に示す。供試体の配合は平成 5 年頃の実橋の配合を模し、水セメント比 39%，設計基準強度 40 N/mm² の早強コンクリートとした。ホース内への PC グラウト注入の有無が漏水に与える影響を確認するため、片側の側壁のホースにだけ PC グラウトを注入した。頂版の上部中央にはコンクリート製の水槽を設け、水槽より上にホースを曲げ上げた状態とした。

(2) 平板供試体

平板供試体の概要を図 - 4 に示す。供試体は 2 体製作した。コンクリートの配合およびホースの径・材質などの使用材料はカルバート供試体と同一であり、平板内のホース配置本数は 1 本、2 本、4 本、7 本として、PC グラウトを充填した。平板供試体は箱桁橋の張出し床版を模したものであり、ホースは供試体の上面に設けた水槽の端部付近から供試体側面に向けて配置した。上面のホース端部は水槽内の模擬地覆の下に配置した。模擬地覆はドライモルタル上に緑石を据えたのち、地覆部に通信管を模した直径 48 mm の鋼管を 3 本配置し、緑石と水槽壁の隙間にコンクリートを打ち込む方法で製作した。地覆コンクリートが硬化したのち緑石を撤去した。

3.2 実験方法

実橋の漏水傾向から実験は長期間に及ぶことが予想された。また、橋面の水が伝ったと考えられることから漏水には凍結防止剤の塩分が含まれる可能性があり、長期的な塩害耐久性を考慮したとき、漏水の量より漏水の有無の方が重要と考えた。そのため実験は長期観察試験とした。供試体の材齢が 28 日を経過したのち、水槽部に水を溜め、春夏秋冬の各シーズンにおいて漏水の発生状況を目視観察した。

3.3 実験結果と考察

カルバート供試体は 2 体中 1 体を 4 年間、1 体を 7 年間暴露した。カルバート供試体の暴露状況を写真 - 7 に、漏水状況の例を写真 - 8 に示す。湛水後約半年で、底版から引き出したホースの周囲に水しみとエフロレッセンスが発生した。推論では、漏水は多数本のホースを束ねて配

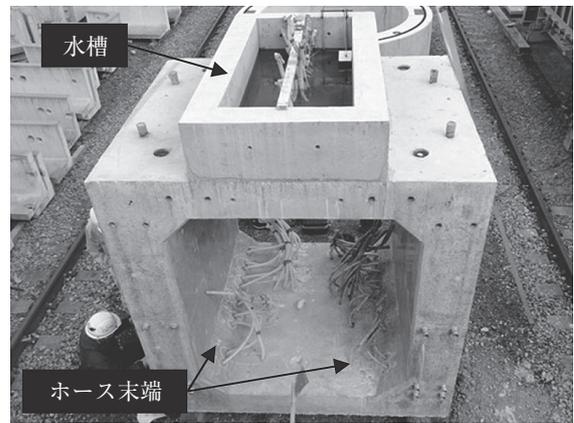


写真 - 7 カルバート供試体の暴露状況

置した場合に生じるものと考えていたが、実験では配置本数に関わらず 1 本配置を含むすべてのホースに発生した。また、漏水は PC グラウト充填の有無と無関係に発生した。

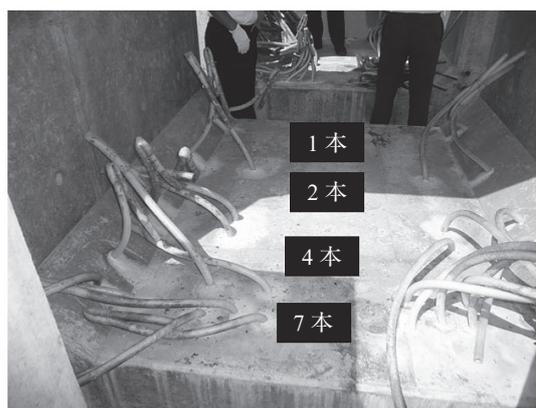
平板供試体は 2 体とも 7 年間暴露した。平板供試体の漏水状況の例を写真 - 9 に示す。平板供試体では、配置本数が多いと漏水量も多くなる傾向はみられるものの、カルバート供試体と同様に、漏水はホースの配置本数に関わらず発生した。

経過観察の結果、漏水は冬季に発生し、夏季には停止することを確認した。この傾向は 7 年間変化しなかった。漏水開始と停止の境界となる温度条件にはばらつきがあるものの、およそ 10 ~ 15℃ 程度であった。これらの結果から、漏水は橋面の水がホースの周囲を伝って流下したものであり、漏水発生の要因は、配置本数でなく温度の影響が支配的であると確認された。

グラウトホースとして使用したホースのポリ塩化ビニル樹脂の線膨張係数は $6 \sim 8 \times 10^{-5} \cdot K^{-1}$ であり、コンクリートの線膨張係数 $7 \sim 13 \times 10^{-6} \cdot K^{-1}$ より一桁大きい。ホースはコンクリートの打込み前に配置するが、打込み後は、水和熱によって一旦 60 ~ 70℃ 程度まで温度が上昇し、硬化し

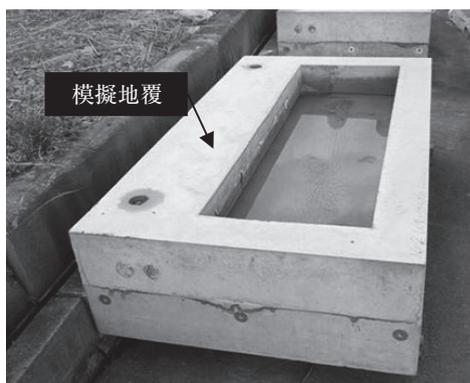


(a) 冬季の状況 (2013.2)

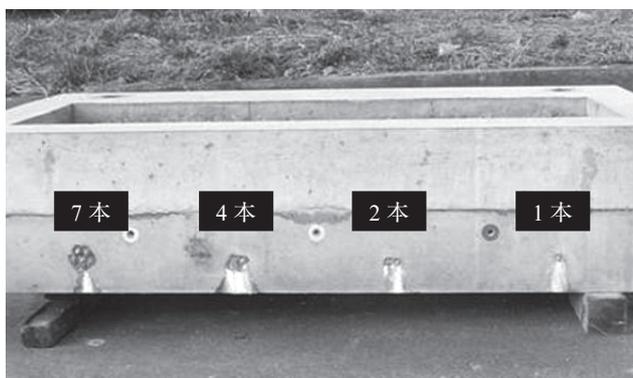


(b) 夏季の状況 (2013.8)

写真 - 8 カルバート供試体の漏水状況の例



(a) 湛水暴露状況



(b) 漏水状況

写真 - 9 平板供試体の漏水状況の例

たのちに温度が低下する。このことから、コンクリートが硬化した段階でコンクリートとホース周囲は肌離れを生じており、さらに、冬季にホースが収縮することで、コンクリートとの間に肌すきを生じ、伝い水を生じたものと考察した。

4. 漏水防止のための補修実験

4.1 漏水の問題点と補修の目標

実験において漏水は冬季に発生することが明らかになった。とくに高速道路橋では、通行車両の安全を確保する目的で冬季に多くの凍結防止剤を散布する。漏水はコンクリート内部をホースの周囲を伝って通過するため、凍結防止剤に含まれる塩分が漏水の経路上にあるPC鋼材を腐食させる可能性がある。そのためコンクリートの表面から塩分が拡散浸透することにより生じる一般的な塩害とは異なり、構造物の外面に塩害劣化の症状が現れたときには、すでにPC鋼材破断などの重篤な劣化状態に至っている可能性も否定できない。そのため補修の目標は新たな漏水を防止するものとした。

4.2 実橋における地覆部の状況

計画に先立ち、グラウトホースの伝い水による漏水現象を生じた橋梁の舗装の改修工事に併せ、地覆部近傍について以下の状況を確認した。

(1) 地覆側面の状況

緑石撤去後の地覆側面の状況を写真 - 10 に示す。緑石



写真 - 10 緑石撤去後の地覆側面の状況



写真 - 11 ドライモルタル除去後の地覆下の空洞

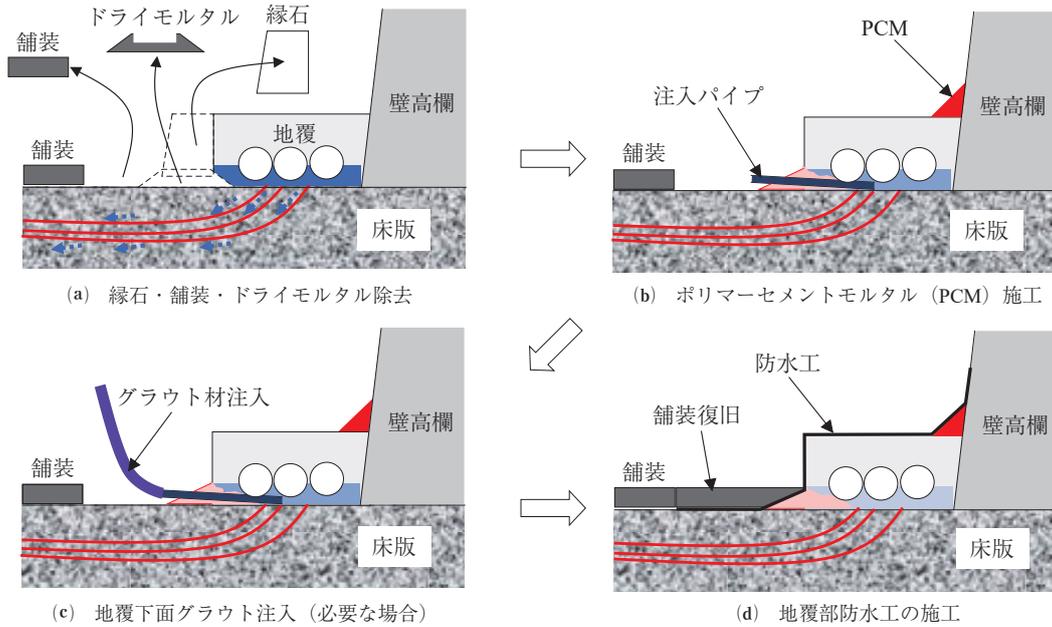


図 - 4 補修手順



写真 - 12 模擬地覆内の配筋・鋼管設置



写真 - 13 敷砂除去後の模擬地覆下の空洞

直下のドライモルタルは地覆の直下に食い込み、湿った状態であった。硬化状態は比較的脆くテストハンマーによって容易に除去が可能であった。このことからドライモルタルの防水性は十分でないと判断され、防水性が高い材料に置き換えることが必要と判断した。

(2) 地覆下の状態

通信管が配置された地覆の一部で床版上が空洞になっている箇所を確認した。状況を写真 - 11 に示す。このような充填不良箇所はごく一部ではあるが、補修は締め固めが不十分な箇所があることを前提として計画することが必要と判断した。

4.3 補修方法

補修は、腐食などの劣化が顕在化する前に水の浸入を防止する予防保全を基本とした。補修手順を図 - 4 に示す。補修では、まず緑石の撤去とドライモルタルの除去を行ったあと、地覆部前面と壁高欄の打継部に遮水性に優れたポリマーセメントモルタルで止水部を作り、写真 - 11 に示したような空洞が確認された場合は、地覆下にグラウトを充填してホース切断面に蓋をしたあと、防水工で地覆全体を覆うものとした。

4.4 補修実験の概要

補修実験はカルバート供試体の水槽内に模擬地覆を設け、その補修を行ったあと、再度水槽内を湛水する方法とした。暴露4年目を迎えた2体のカルバート供試体の内の1体を補修実験に供した。まず、供試体の水槽の水を一旦除去し、頂版の上面から約5cmの高さでホースを切断した。次に、地覆前面の位置にドライモルタルを模擬した敷砂を敷き、模擬地覆内に鉄筋と通信管を模した鋼管を配置したあと(写真 - 12)、コンクリートの打込みを行った。コンクリートが硬化したのち、側面から敷砂を掻き出し(写真 - 13)、空洞部の前面を左官工法により補修用ポリマーセメントモルタルで塞いだ(写真 - 14)。モルタルが硬化したのち、空洞部にPCグラウト用の超低粘性型プレミックスセメントグラウトを充填した(写真 - 15)。グラウトが硬化したのち、注入用ホースを引き抜き、断面修復材であと埋めした。

本試験ではセメント系材料の補修効果に着目し、防水工は実施しなかった。そののち、再度、水槽に水を溜め、漏水の発生状況を目視確認した。

4.5 実験結果

経過観察時のカルバート供試体の状況を写真 - 16 に示



写真 - 14 ポリマーセメントモルタルによる修復



写真 - 15 地覆下グラウト完了



(a) 補修あり (漏水なし)



(b) 補修なし (漏水あり)

写真 - 16 補修の有無による漏水状況の違い

す。暴露試験は3年間実施した。この間、未補修の供試体は冬季における漏水の発生と夏季における漏水停止を繰り返したが、補修供試体では通年にわたり漏水が認められなかった。この結果から、考案した補修方法は漏水を防止する予防保全工法として有効であると判断した。

5. おわりに

本稿では主に張出し架設によって架橋されたPC箱桁橋の漏水現象について、現象の概要を示すとともに、原因究明のための実験結果、漏水補修のための現場調査結果の概要、補修方法と補修実験の結果について述べた。

一連の研究により得られた結論は以下のとおりである。

- 1) PC鋼棒を用いたPC箱桁橋で多く観察されたウェブの水平打継目や定着突起からの漏水は、地覆下面に浸透した橋面の水が、末端を地覆部に配置したグラウトホースの外周を伝い流下したものである。
- 2) 伝い水はPCグラウト充填の有無や、束ねたホースの本数に関係なく発生し、冬季に発生しやすい。
- 3) 予防保全工法として考案した補修方法は、伝い水による漏水の防止に効果的である。

なお、本研究は約7年間にわたりPC建協の保全補修部会と中国支部が合同で取り組んだ成果に基づくものである。

日本ではこれまでにさまざまな種類のホースをグラウトホースとして使用してきた。本稿では塩化ビニル製ポリエステル繊維補強ホースを対象とした実験を行ったが、他の種類のホースについての検証はできていない。また、新設

橋については、日本ではPCグラウトの設計施工指針³⁾にホース末端の処理方法が規定され、国際的には*fib*の勧告⁴⁾に比較的高い耐久性が要求される場合のホースの仕様が表示されるなど、グラウトホースの伝い水現象への対策が進められているが、その実験結果などは明確でない。そのためPC建協では、新設ならびに補修を対象として、本稿に示した実験に引き続き、ホースの種類や形状、切断部の処理方法、塩化物イオンを有する湛水の影響などの諸条件を変えた検証実験を行っている。これらの結果はまとめ次第、論文にとりまとめる予定である。

最後に、本研究の遂行にあたり多大なるご協力とご助言をいただいた西日本高速道路株式会社中国支社ならびに株式会社高速道路総合技術研究所橋梁研究室の各位についで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 横山和昭ほか：PC箱桁橋を模擬した供試体によるグラウトホース伝い水の検証実験，土木学会第69回年次学術講演会，V-148，pp.295-296，H.26.9
- 2) 徳光卓ほか：グラウトホースの伝い水現象の検証ならびに補修技術に関する実験的検討，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.487-492，2017.10
- 3) プレストレストコンクリート工学会：PCグラウトの設計施工指針-改訂版-，H24.12
- 4) *fib*：Durability of post-tensioning tendons, Recommendation bulletin 33, 2005.12

【2018年7月12日受付】