

論文

実橋における砂利化した道路橋床版の低粘度エポキシ樹脂系補修材による補修効果の確認

夏堀格*, 飯土井剛**, 松田道雄***, 和田学****, 押野有汰*****子田康弘*****

*工修, (株)復建技術コンサルタント, 構造技術部 (〒980-0012 宮城県仙台市青葉区錦町 1-7-25)

**工博, (株)復建技術コンサルタント, 構造技術部 (〒980-0012 宮城県仙台市青葉区錦町 1-7-25)

***国土交通省 東北地方整備局 酒田河川国道事務所 (〒998-0011 山形県酒田市上安町 1-2-1)

****国土交通省 東北地方整備局 東北道路 MC (〒985-0842 宮城県多賀城市桜木 3-6-1)

*****国土交通省 東北地方整備局 郡山国道事務所 (〒963-0117 福島県郡山市安積荒井 1-5)

*****工博, 日本大学 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

道路橋床版上面の砂利化については一般にセメント系の材料による補修が行われているが、既設床版と補修材の付着不良による再劣化が多く発生している。また砂利化の補修は道路交通による振動や施工技術者の技量による耐久性への影響など課題も多い。本稿ではこれらの課題を改善するため、低粘度エポキシ樹脂系補修材による補修を供用中の橋梁において試行し、その効果を確認するとともに適用にあたっての施工条件を検討した。その結果、施工条件として今回適用したエポキシ樹脂では硬化過程において23°C以上の温度を確保することで、砂利化部がエポキシ樹脂によってよく接着された状態であった。このことから応急復旧としての補修効果があることを確認した。

キーワード：床版砂利化、維持管理、補修、エポキシ樹脂

1. はじめに

2020年に広島県が管理する橋梁において、道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下RC床版）が抜け落ちる事例が発生した。同様の事例は2013年に東北地方整備局管内の橋梁においても発生しており、調査の結果から床版上面に水分が供給されたことで各種劣化が促進されたことが抜け落ちの主たる要因であるとの報告がされている¹⁾。抜け落ちが生じた両橋梁に共通して見られた損傷として床版の砂利化（土砂化）が挙げられる。床版の砂利化は近年注目をされ始めた劣化形態であり、2020年に直轄国道における調査・研究の成果が報告²⁾されているが、劣化機構や損傷過程については不明な点が多い。このような現状から現在様々なアプローチで研究が行われており、数値解析による砂利化の予測とそれに基づく対策費用を考慮した補修シナリオのシミュレーション³⁾⁴⁾や、砂利化が生じている撤去床版を用いた各種調査⁵⁾、砂利化の予防保全を目的とした電磁波レーダ調査⁶⁾など多岐に渡る。

研究が幅広く行われている一方で実務を担う道路管理者や設計・施工業者はRC床版に生じた不具合の対応に追われているのが現状である。先にも述べた通り砂利化

の劣化機構や損傷形態については不明な点が多く研究段階であることから、措置方針が体系化されておらず各現場において個別の対応が求められる。そのため設計・施工技術者の経験に左右され、正しい施工ならびに適切な補修範囲を選定することが難しく再劣化の発生リスクが高まることが懸念される。さらに砂利化の補修には交通規制が必須であることから、交通整理員の確保や交通規制に伴う工事費用の高騰、施工に時間的制約が伴うことによる工事品質確保の難しさ等の課題が山積している。

以上の背景から著者らはこれまで室内試験によって低粘度エポキシ樹脂系補修材を砂利化部の補修に適用し、耐疲労性の評価からその有効性を評価してきた⁷⁾⁹⁾。そこで本研究における次なるフェーズとして、低粘度エポキシ樹脂系補修材を砂利化部に直接注ぎ込む補修工法を、山形県内に架橋する供用中の橋梁において試験的に施工を試みた。本稿では試験施工と追加調査で得られた知見および補修効果について述べる。また試験施工時に養生条件の違いによるエポキシ樹脂の硬化不良が確認された。そのため硬化不良について簡易的な室内試験を別途実施し、外気温と相対湿度の変化が与えるエポキシ樹脂硬化への影響について検証を行うことで適用にあたっての施

工条件についても検討した。

2. 低粘度エポキシ樹脂による補修の概要

試験施工を実施した補修工法は砂利化した部位に対して低粘度エポキシ樹脂を直接流し込むというものである。特徴としては砂利化したコンクリート片は除去せず骨材として使用するため、廃棄物が少ないことに加えて短時間且つ施工者の技量に左右されにくいことが挙げられる。また低粘度エポキシ樹脂を使用するメリットとして、マイクロクラックへの浸透による床版の剛性回復効果と、エポキシ樹脂層が形成されることによる防水性の向上が見込める。一方で適用にあたっての制約条件としては、粘性が低いことから道路勾配が大きい橋梁においては流し込み後に偏りが生じる。偏りが生じることで同一の補修範囲内で剛性回復効果に差が生じることや、施工品質の管理が難しいことなどが挙げられる。

既往の研究⁷⁾では疲労限界まで輪荷重試験を実施した供試体に対して、流し込みによる補修を実施している。補修後に再度輪荷重走行試験を実施し、補修前後における活荷重たわみの変化に着目した実験結果について整理されている。図-1に着目する。供試体名のNはASRによる劣化を受けていない供試体であり、AはASRによる劣化を受けた供試体である。Fdは乾燥状態で輪荷重走行試験を実施したものであり、Fwは水張りの状態で輪荷重走行試験を実施したものである。各供試体の流し込みによる補修前における疲労限界時の走行回数は、N-Fdで2300万回、N-Fwで15万回、A-Fwで3600万回であり、補修後ではN-Fdで1000万回、N-Fwで27万回、A-Fwで5万回であった。補修前後の活荷重たわみに着目すると、N-Fwで0.4mm、A-Fwで0.2mmの回復が確認されており、N-Fdではたわみの回復が確認されていないことが報告されている。

3. 実橋による試験施工と追跡調査

3.1 A橋における結果および考察

図-2に試験施工及び追跡調査時の状況を示す。対象とした橋梁は山形県内の山間部に位置する、単純合成鉄桁および単純鋼合成箱桁からなる2径間の橋梁とした。試験施工を実施した箇所は、上部工形式が単純合成鉄桁の区間であり上り線の路肩とした。図-2(a)(b)開削前の状況と床版上面の状況を示す。試験施工を実施した箇所は舗装の部分補修が実施されており、開削後の床版上面の状態は開削面積の概ね半分程度が砂利化した状態であった。図-2(c)(d)に流し込み直後の状況と流し込みから6時間後の状況を示す。流し込みを実施する前にブラシで粉塵や泥等を除去した。その後、主剤と硬化剤からなるエポキシ樹脂をバケツに入れ搅拌し、砂利化部に流し込んだ。施工箇所にムラが生じないよう刷毛も併用した。

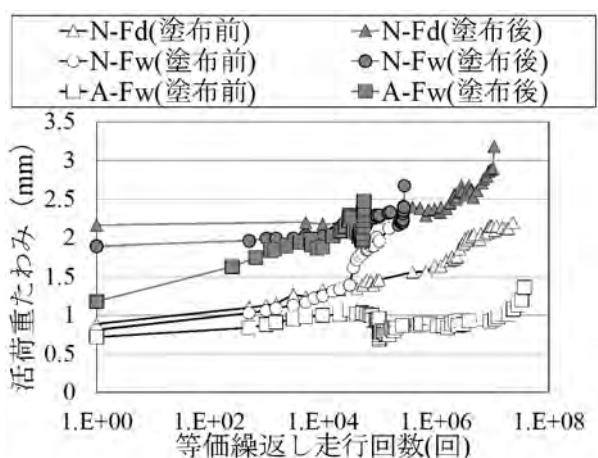


図-1 輪荷重走行試験結果⁷⁾



図-2 A橋の試験施工及び追跡調査の状況

表-1 エポキシ樹脂の仕様

項目	性能規格
混合粘度	200mPa・s以下(23°C)
可使時間	約35分(23°C)
硬化時間	約6時間(23°C)
混合比	主剤：硬化剤=5:1(質量比)
圧縮降伏強さ	50以上(N/mm ²)
引張接着強さ	1.6以上(N/mm ²)

なおエポキシ樹脂の仕様は表-1に示すとおりである。エポキシ樹脂の仕様上、硬化までに23°Cの温度環境で6時間要するが、試験施工の実施は11月の下旬であり当

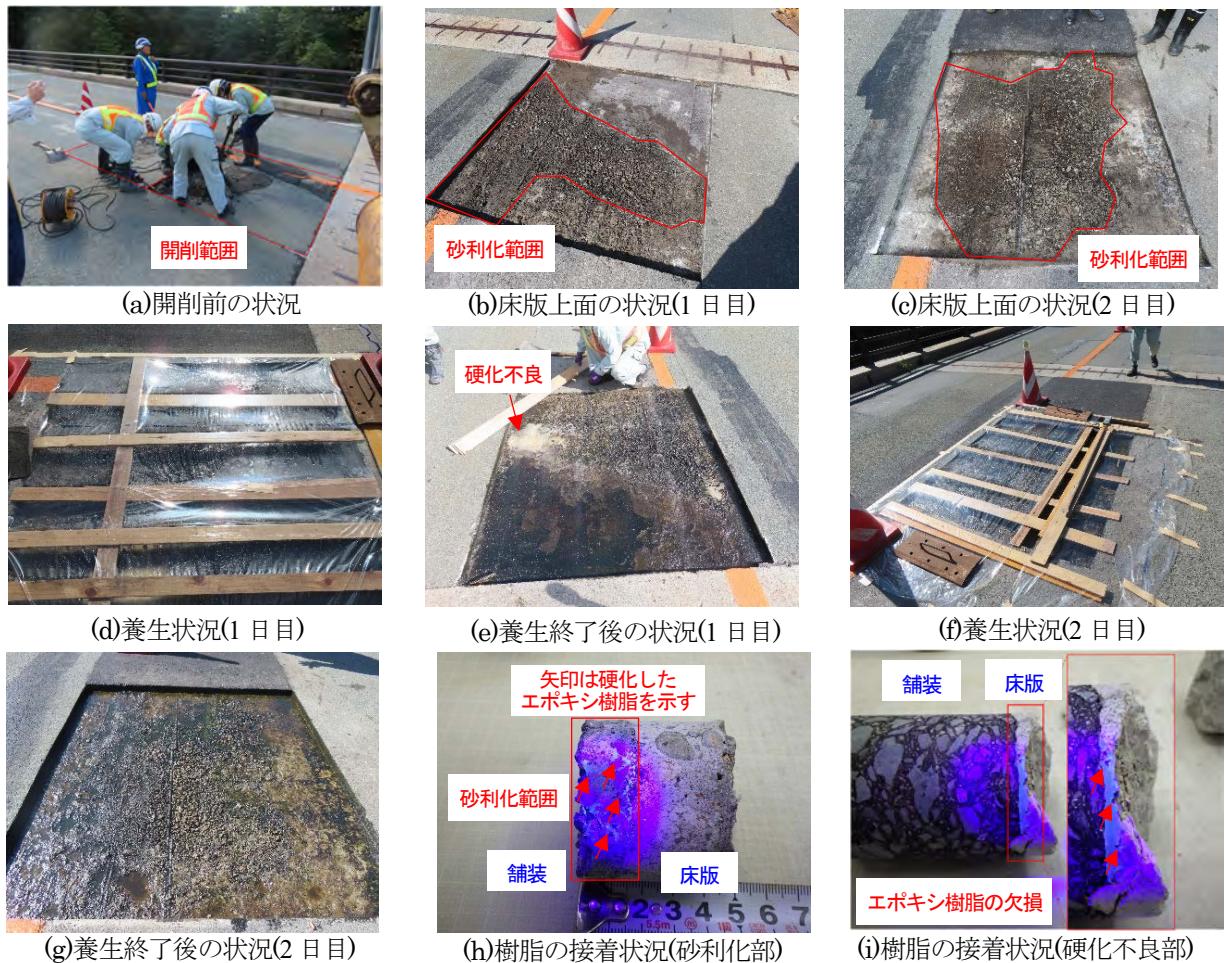


図-3 B 橋の試験施工及び追跡調査の状況

日の最高気温は15°C程度であったことから、図-2(d)に示した状況では指で触ると指紋が残るような硬化状況であった。交通規制の制約上、完全硬化という状態ではないとされたが、アスファルト敷設による復旧を実施した。図-2(e)に復旧時に確認されたエポキシ樹脂の滲み出しの状況を示す(図中赤枠部、エポキシ樹脂がアスファルトに混ざりこむように滲み出している)。完全に硬化していなかったことから、硬化途中のエポキシ樹脂がアスファルトの熱によって、溶けだした可能性がある。

試験施工の半年後にコア採取による追跡調査を実施した。追跡調査の内容は試験施工を実施した箇所からφ75mmのコアを3本採取し、アスファルトと床版上面に生じた土砂化部の接着状況についてブラックライトを使用して確認したものである。図-2(f)に樹脂の接着状況を示す。矢印で示した青白い線がエポキシ樹脂である。赤矢印で示したエポキシ樹脂はアスファルトと流し込みによる補修部の境界部である。黄色矢印で示したエポキシ樹脂は、滲み出しの影響でアスファルト内部に浸透したエポキシ樹脂であると推察され、採取したコアには同様の傾向が見られた。試験施工当日は外気温が低いことに加え、アスファルト側へのエポキシ樹脂の滲み出し影響で、当初想定した補修効果が得られなかつた可能性がある。砂利化部の接着状況は後述するB橋で採取したコア

と比較して、床版コンクリート側の接着層が薄い傾向であった。赤矢印で示した層の直下には水平クラックに起因したとされるコンクリートの割れが生じており、割れが生じている深さまでのエポキシ樹脂の浸透は確認されなかった。一方、滲み出しによってアスファルト側にエポキシ樹脂が浸透したことにより、アスファルト内部に防水層が形成され防水性の向上に寄与した可能性が有る。

3.2 B 橋における結果および考察

図-3に試験施工の状況及び追跡調査の状況を示す。対象とした橋梁はA橋と同一路線で、A橋から700mほど離れた位置に架橋する単純合成H桁橋4連の橋梁である。試験施工を実施した箇所を図-3(a)に示す。P2-P3間の上り線道路センター付近を1日あたり2.0m×2.0m程度の範囲で2日間に渡り実施した。当該箇所もA橋と同様に、アスファルトの部分補修が実施されていた。図-3(b)(c)に開削後の床版上面の状況を示す。試験施工を実施した両箇所に砂利化が生じており、鋼材の露出も確認された。A橋と同様にアスファルト補修部から水が浸透し、砂利化が生じた可能性がある。電気抵抗式のコンクリート含水計で床版上面の含水率を測定したところ、測定限界値である6.9%を両箇所で記録した。

図-3(d)に1日目に実施した試験施工の養生の様子を

示す。B 橋の試験施工ではエポキシ樹脂を塗布した後に、樹脂の硬化促進を目的としたビニールシートによる養生を実施した。ビニールシートは試験施工箇所を密閉するように設置しており、30 分おきに外気温とシート内の温度を計測した。当日の最高気温は 24.0°C でシート内の温度は最高で 39.0°C であった。ビニールシートの内側には水滴が多く発生しており、養生環境としては高温多湿であったと考えられる。ビニールシートによる養生を 3 時間程度実施した後の状況を図-3(e)に示す。全体としては概ね硬化が完了している状態であったが、一部シートの内側に生じた水滴による水たまりが確認された。水たまりが生じていた箇所のエポキシ樹脂の表面には白色の薄い脆弱層が形成されており、指で触れると容易に剥がれる状態であった。硬化途中のエポキシ樹脂が加水されたことによって生じた硬化不良の可能性が考えられる。

図-3(f)に 2 日目に実施した養生状況を示す。2 日目の養生は密閉せず、通気口を設けることで多湿にならないよう配慮した。当日の最高気温は 23.7°C であり、シート内の温度は最高で 44.0°C であった。およそ 3 時間半程度の養生を実施したがシートの内側に水滴は見られず、1 日目と比較してシート内の湿度は抑えられていたと見られる。図-3(g)にビニールシート養生撤去後の状態を示す。1 日目に見られた水たまりとそれに伴う脆弱層の形成は見られず、硬化も概ね完了した状態であった。通気口を設け、湿度の上昇を抑えたことが水たまりの発生を抑制したと考えられる。試験施工の両日でアスファルト復旧時にエポキシ樹脂の滲み出しは確認されなかった。また試験施工を実施した B 橋は起点から終点にかけて 2.5% の縦断勾配、道路のセンターから 2.0% の横断勾配を有している。低粘度のエポキシ樹脂を使用しているため勾配が低い側に樹脂が流れ、補修範囲内に偏りが生じていたことが確認された。

試験施工の実施からおよそ 2 ヶ月後に A 橋と同様のコア採取による追跡調査を実施した。 $\varphi 50\text{mm}$ のコアを複数本採取し、エポキシ樹脂の接着状況を確認した。図-3(h)(i)に砂利化部から採取したコアと脆弱層が形成されていた箇所から採取したコアを示す。A 橋で採取したコアと比較して、砂利化部がエポキシ樹脂によってよく接着された状態であったことが確認された。他のコアについても概ね同様の状態であった。エポキシ樹脂は舗装と床版の境界部からおよそ 2.0cm の深さまで確認されたことから、当該箇所における砂利化深さは 2.0cm 程度であったことが分かる。B 橋においても A 橋と同様に砂利化が生じていた箇所より深い位置に、水平クラックに起因したとされるコンクリートの割れが生じていた箇所もあったが、その深さまでのエポキシ樹脂の浸透は確認されなかった。水たまりによって脆弱層が形成された付近から採取したコアに着目すると、エポキシ樹脂の細かい欠損が確認された。硬化不良によるものだと考えられる一方で、コア採取時に欠損が生じた可能性もある。

A 橋および B 橋の試験施工の結果から、エポキシ樹脂の硬化過程において、「外気温」と「養生を行う際は養生内の温度と湿度」が品質に影響を与える可能性が示唆された。これらについて簡易的な室内試験を実施し、品質に与える影響について検証した内容について次章で述べる。

4. 外気温と湿度の変化が与える樹脂硬化への影響

外気温や湿度が与えるエポキシ樹脂の品質への影響を明らかにすることを目的に、恒温恒湿器を用いて検証を実施した。表-2 に温湿度の試験条件、図-4 に供試体の概要を示す。温湿度の条件は季節ごとの変化を想定し設定した。温度 23°C はエポキシ樹脂の性能規格から比較用として設定した。供試体についてはステンレス製のバットにエポキシ樹脂をバットの半分程度の深さまで流し込んだものとし、供試体作成後すぐに恒温恒湿器へ入れ試験を開始した。なお、検証に使用したエポキシ樹脂は試験施工に使用したものと同様のものであり、この 1 種類のみで試験を実施した。試験開始後 1 時間おきに試験機から供試体を取り出し、硬化状態の観察と硬さ計による測定を実施した。なお硬さ計による測定は、エポキシ樹脂がある程度硬化した状態でなければ測定が不可能なため、すべてのケースにおいて実施していない。試験は 1 日 1 ケースを基本として実施したが、温度 35°C のケースについては 1 時間で硬化が完了したため、3 ケースとも同日に試験が完了した。

図-5(a)に硬さ計によるエポキシ樹脂の硬さ測定状況を示す。本検証ではエポキシ樹脂の硬化過程を定量的に示す必要があるため、T 社製のゴム・プラスチック硬さ計を用いた。この硬さ計の仕組みについて概略的に説明する。計器下部に設置された押針を供試体に押し付け、供試体表面に変形を与える。この時供試体表面には押し付けによる加圧力に対する反力が発生する。この硬さ計で測定している硬さは、加圧力と反力が平衡状態になったときの押針の押し込み量を指している。なお、この硬さ計を用いて得られる値は、単位の無い相対的な物理量である。エポキシ樹脂の硬度の求め方については、JIS K 7148-2 にフーリエ変換赤外分光光度計による測定方法が規定されている。また参考文献¹⁰⁾については各種硬さ試験の種類や測定方法についての整理がなされている。規格化された硬さの試験方法が複数ある一方で、本検証においては温湿度の違いによる硬化過程の傾向に主眼をおいたため、また今後は現地でも硬さ測定を実施することを想定して硬さ計を用いた簡易的な評価手法を採用した。

図-6 に試験結果を示す。硬さの測定は測定可能な範囲で複数点測定し、その平均値をグラフに示している。温度 5°C および 15°C の環境では、「サラサラ」「ドロドロ」の状態であり、一部を除いて硬さ計での測定は不可能であった。湿度 90% および温度 15°C の供試体においては試

表-2 溫湿度の条件

湿度	温度				供試体数量
	①5°C	④15°C	⑦23°C	⑩35°C	
30%	①5°C	④15°C	⑦23°C	⑩35°C	4
60%	②5°C	⑤15°C	⑧23°C	⑪35°C	4
90%	③5°C	⑥15°C	⑨23°C	⑫35°C	4

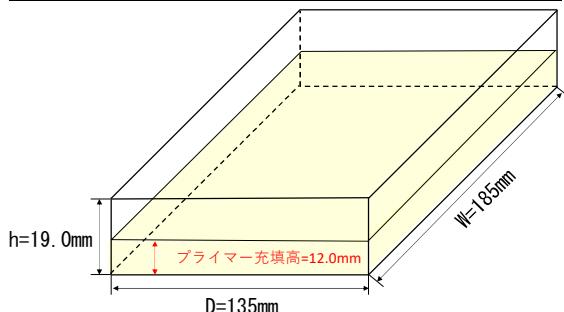


図-4 供試体の概要

験開始から 8 時間後に測定可能な状態となり、測定された硬さは平均値で 5.0 であった。温度 23°C の条件では試験開始から 4 時間後に測定可能な状態となり、湿度の違いによる硬さの変化が確認された。湿度 90% の供試体は硬さの平均値が 43.0 であったのに対し、湿度 60% で 26.0、湿度 30% で 20.0 という結果であった。試験開始から 6 時間後には湿度 90% の供試体の硬さは平均値で 84.0 に達し、概ね硬化は完了していた。湿度 60% や 30% の供試体は、試験開始から 7 時間後に硬さの平均値がそれぞれ 80.0、83.0 に達し硬化が完了した。温度 23°C の供試体においては湿度 90% の供試体が最も早く硬化が完了した結果となった。温度 35°C の供試体については、湿度の違いに関わらず試験開始から 1 時間で硬さの平均値が 82.0 および 83.0 に達し硬化が完了した。

図-5(b)(c)に温度 35°C、湿度 60% や 90% の試験終了時の状態を示す。湿度が上昇するごとに供試体表面に形成された気泡が多いことが確認された。同様の気泡は温度 35°C、湿度 30% の供試体表面にもわずかに発生していた。なおその他の供試体については発生していない。気泡が形成されたメカニズムについては明らかとなっていないが、温度上昇による飽和水蒸気量の増加と、エポキシ樹脂の硬化過程に生じる発熱が影響した可能性が考えられる。発生した気泡は指で押しても脆的に壊れることは無く硬い状態であった。このような気泡の発生は室内試験でのみ確認されたことではあるが、エポキシ樹脂内に気泡が存在すると応力伝達が不連続となることが懸念されるため、実橋で施工する際はこのような状態とならないよう養生内の湿度管理に留意する必要がある。また、温度 23°C の条件では高湿度が硬化速度に対して優位に働いたが、温度 35°C の条件では高湿度が硬化後の品質に対して悪影響を及ぼす結果となった。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

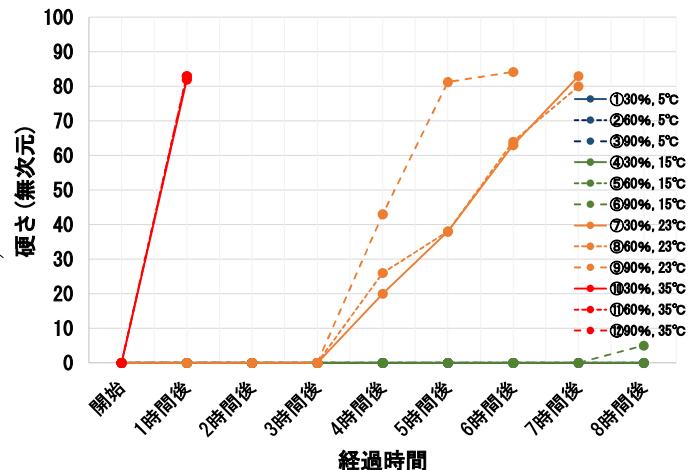


図-6 経過時間と硬さの関係



(a)測定状況



(b)温度 35°C、湿度 60% の供試体



(c)温度 35°C、湿度 90% の供試体

図-5 硬さ計の測定状況と試験後の状態

- ・舗装のパッチ補修が実施されていた箇所で試験施工を実施した結果、試験施工を実施した両橋で床版の砂利化が確認された。
- ・試験施工において、舗装の開削からエポキシ樹脂の流し込みが完了するまでの時間は概ね 30 分程度で完了し、作業員の経験や技量に左右される施工上の要因となるものは見られなかった。また作業員からは作業内容が簡素なため施工しやすいという声があった。
- ・試験施工の範囲内において、縦断勾配と横断勾配の影響により、流し込んだエポキシ樹脂に偏りが生じることが確認された。
- ・追跡調査の結果から、砂利化が生じた箇所より深い位置に生じていた水平クラックに起因したとされるコンクリートの割れが確認された部分までは、エポキシ樹脂の浸透が確認されなかったことから恒久対策としての適用には課題が残る結果であった。
- ・B 橋においては流し込みを行った砂利化部の接着状況は良好であったことから、応急復旧としての補修効果があることを確認した。
- ・試験施工時の状況から、当日の最高気温が 23°C 以下の場合は性能規格に示された硬化時間内での硬化が難しいこと、養生を行う際に施工箇所を密閉した形にすると水たまりが生じ硬化不良を起こす可能性があることが確認された。
- ・室内試験の結果から、試験機内の温度 35°C の養生条件ではエポキシ樹脂表面に気泡が生じることが確認された。また温度条件 15°C 以下で実施した供試体は、8 時間が経過しても十分に硬化しなかったことが確認された。
- ・室内試験では試験施工と異なり、高湿度の条件が硬化速度に対して優位に働くとされる結果が得られた。一方で、実橋においては高湿度の条件によって施工箇所内に水滴による水たまりが生じると硬化不良を起こす可能性が有ることから、養生条件に応じた湿度管理が重要であると考える。
- ・本研究の範囲内で得られた成果より、実際に施工を行う際の施工条件としては、硬化過程において 23°C 以上の温度を確保すること、養生を行う際は養生内の通気性を確保し、高温多湿な環境とならないようにすることが重要である。加えて本研究で使用したエポキシ樹脂は 1 種類のみであることから、他のエポキシ樹脂を適用した際はこの限りではない。適用するエポキシ樹脂の種類を検討することで、低気温時の施工条件を解消できる可能性がある。

謝辞

試験施工および室内試験の実施にご協力いただいた関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 赤平勝也, 佐々木博臣, 菊地淳 : 複合劣化による鉄筋コンクリート床版の抜け落ち損傷事例について, 第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.37-40, 2014.10
- 2) 国立研究開発法人土木研究所 : 土木研究所資料第 4398 号, 道路橋コンクリート床版の土砂化対策に関する調査研究, pp.7-34, 2020.3
- 3) 高橋佑弥, 古川智也, 房捷, 土屋智史, 石田哲也 : マルチスケール統合解析による道路橋 RC 床版の疲労損傷理解と社会実装, 橋梁と基礎, Vol.56, No.2, pp.33-38, 2022.
- 4) 嘉瀬由葉, 古川智也, 高橋佑弥 : 実道路橋梁を対象とした床版土砂化予測に基づく予防保全的維持管理の提案 : コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集第 22 卷, pp.523-528, 2022.10
- 5) 国立研究開発法人土木研究所 : 土木研究所資料第 4442 号, 道路橋コンクリート床版の土砂化に関する調査, pp.3-211, 2023.3
- 6) 藤木裕二, 岩谷祐太, 夏堀格, 石田雅博 : 電磁波レーダーを用いた RC 床版上面の滯水検知手法, 橋梁と基礎, Vol.56, No.8, pp.37-40, 2022
- 7) 大場智, 島野孝則, 前島拓, 岩城一郎, 蒲和也 : 疲労損傷を受けた RC 床版に対する高浸透型防水材の補修・補強効果に関する検討, 土木学会東北支部技術研究発表会, V-17, 2016
- 8) 大内凌輔, 飯土井剛, 白井悠, 前島拓, 子田康弘 : 高浸透型防水材の注ぎ込みによる砂利化した床版の耐疲労性回復効果に関する検討, 第 34 回日本道路会議, 2021.11
- 9) 大内凌輔, 飯土井剛, 白井悠, 前島拓, 子田康弘 : 高浸透型防水材を用いた床版砂利化箇所の補修に関する基礎的検討, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, V-612, 2022.9
- 10) 山本卓 : 正しい硬さ試験の理解のために, 精密工学会誌 Vol.75, No.10, pp.1183-1188, 2009

(2024 年 7 月 12 日受付)