

## 論文

## 浸透性エポキシ樹脂接着剤の土砂化抑制効果に関する実験的研究

横山広\*, 牧祐之\*, 角間恒\*\*, 中村拓郎\*\*, 榎谷浩\*\*\*, 栗橋祐介\*\*\*\*, 久保善司\*\*\*\*\*

\*博(工), 大日本コンサルタント(株), インフラ技術研究所 (〒102-0075 東京都千代田区三番町 6-3)

\*\* 博(工), 国立研究開発法人, 土木研究所, 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*\*工博, 国立大学法人金沢大学教授, 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*\*\*博(工), 国立大学法人金沢大学教授, 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*\*\*\*博(工), 国立大学法人金沢大学准教授, 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

著者らは、反応性骨材使用実物大供試体で土砂化後に低弾性ポリマーセメントモルタルによる断面修復を実施すると、土砂化までの輪荷重走行回数より修復後の回数が上回ることを確認している。その際の施工では劣化部除去後に浸透性エポキシ樹脂接着剤を塗布しており、それが土砂化抑制に寄与した可能性が推察された。そこで、効果を確認するために接着剤のみを塗布した反応性骨材使用実物大供試体で水張り条件下での走行試験を実施したので結果を報告する。

キーワード：道路橋床版，土砂化，輪荷重走行試験，浸透性エポキシ樹脂接着剤

## 1. はじめに

昭和 40 年代の道路橋床版の陥没破壊を契機に床版に関する研究が活発化し、その後の輪荷重走行試験機の開発によって広義の疲労現象<sup>1,2)</sup>であることが解明された。続けて進められた対策検討により疲労現象に関わる問題は解決されてきている。しかしながら、その後に疲労現象や材料劣化、それらが複合した要因による土砂化問題が顕在化し、アスファルト舗装の変状に進展することで車両の通行障害に繋がることから、その発生メカニズムや調査手法などの活発な研究<sup>3,4)</sup>が進められている。土砂化の事例としてアルカリ骨材反応が影響した土砂化の状況を写真-1 に示す。損傷の原因として、アルカリ骨材反応による微細ひび割れが影響していると推察している。

著者らもアルカリ骨材反応による材料劣化が生じた供試体で輪荷重走行試験を実施し、土砂化の再現や、断面修復後の耐久性を検討している<sup>5)</sup>。具体には、反応性骨材を使用した実物大供試体による土砂化後の断面修復した供試体による輪荷重走行試験で、低弾性ポリマーセメントモルタルの使用により、土砂化による再劣化までの走行回数が、初期の未補修状態での土砂化出現回数よりも大幅に上回る補修後の耐久性向上を確認した。試験では昭和 39 年と 47 年の道路橋示方書に準じた配筋の供試体を使用し、39 年床版供試体では補修前/補修後の土砂化に至る回数比が 8.64 で 47 年床版供試体が 1.02 であった。使用した低弾性ポリマーセメントモルタルの試験時



写真-1 アルカリ骨材反応との複合作用による土砂化の例

の圧縮強度は  $32.6\text{N/mm}^2$  で一般的なコンクリートと同等以上であるもののヤング係数は  $14.5\text{kN/mm}^2$  と小さく、ひび割れが生じることでたわみが増大化した劣化床版への変形追従性能に優れることが耐久性向上に寄与したと考えている。試験の際の断面修復施工では、劣化部除去後に浸透性エポキシ樹脂接着剤を塗布し、その後に打ち継ぎ用接着剤を塗布してポリマーセメントモルタルを打設している。浸透型エポキシ樹脂接着剤は微細ひび割れへの浸透によって、既設コンクリートを改良し一体性を向上させるものであるが、土砂化抑制に直接効果を発揮し、疲労耐久性に寄与した可能性が推察された。

そこで、浸透型エポキシ樹脂接着剤の接着界面の表面

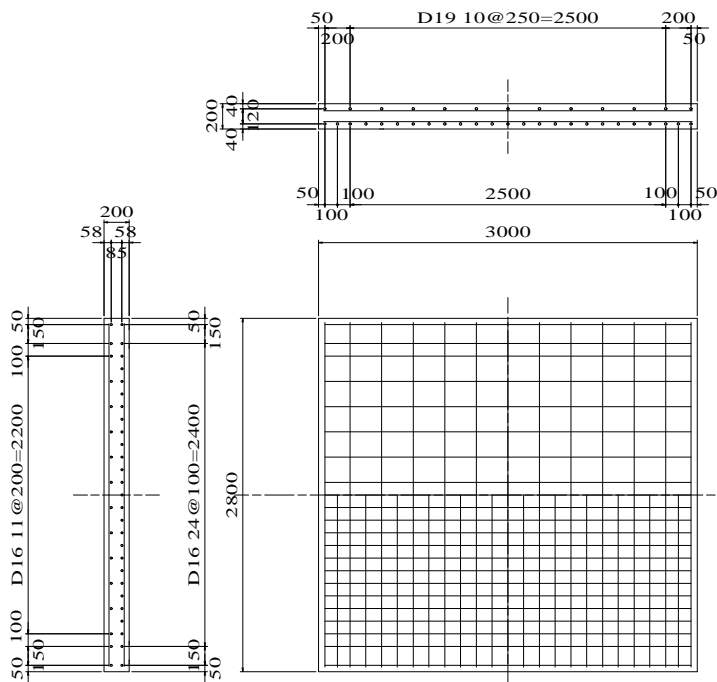


図-1 供試体形状と配筋 (単位: mm)

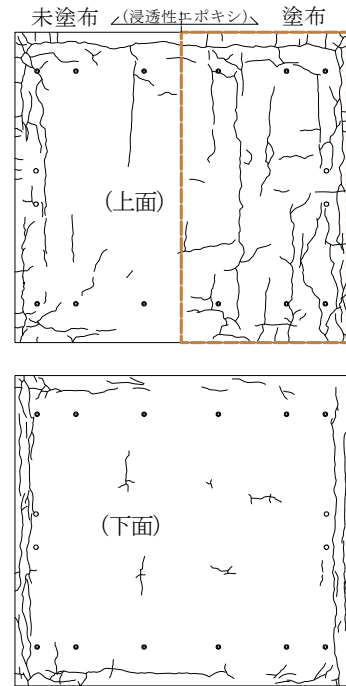


図-2 試験前のひび割れ発生状況

表-1 浸透性エポキシ樹脂の物性 (カタログ値)

| 項目            | 規格値                                 | 備考                     |
|---------------|-------------------------------------|------------------------|
| 混合比 (主材: 硬化剤) | 10 : 3                              | 重量比                    |
| 硬化物比重         | 1.20±0.20                           | JIS K 7112             |
| 混合粘度          | 200mpa・s/23°C以下                     | JIS K 7117             |
| 圧縮強さ          | 50 N/mm <sup>2</sup> 以上             | JIS K 7181             |
| 圧縮弾性係数        | 1000 N/mm <sup>2</sup> 以上           | JIS K 7181             |
| 曲げ強さ          | 35 N/mm <sup>2</sup> 以上             | JIS K 7171             |
| 引張りせん断強さ      | 10 N/mm <sup>2</sup> 以上             | JIS K 6850             |
| コンクリート付着強さ    | 1.6 N/mm <sup>2</sup> 以上<br>または母材破壊 | JIS A 6909<br>(JHS412) |
| 標準塗布量         | 0.5kg/m <sup>2</sup> 以上             | —                      |

改質による土砂化抑制効果を確認するために、接着剤のみを塗布した反応性骨材使用実物大供試体を用いて、水張り条件下での輪荷重走行試験を実施したのでその結果を報告する。

## 2. 試験の概要

### 2.1 試験供試体

供試体は細骨材に反応性の材料を用いており、補強鉄筋は昭和47年道路橋示方書に準じている。供試体形状と配筋は図-1に示す通りで、床版厚は $t=200\text{mm}$ 、主鉄筋にはD19を用い配力鉄筋にはD16を用いている。試験開始時のコンクリートの材齢は約6.5年で圧縮強度が $31.8\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数は $9.53\text{kN/mm}^2$ であった。試験前のひび割れ発生状況を図-2に示す。下面のひび割れは



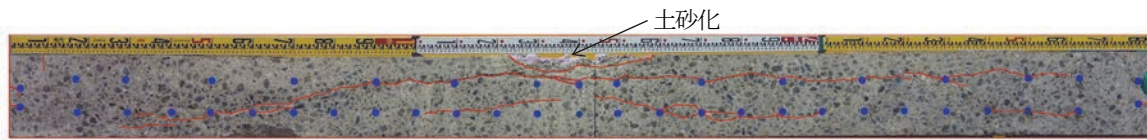
写真-2 輪荷重走行試験機と水張り試験状況

見下げ図で示している。アルカリ骨材反応の影響が想定されるひび割れは、補強鉄筋による拘束を受けない周辺部に多く発生しており、特に下面側ではその補強鉄筋量の多さから中央部分のひび割れが少ない状況となっている。

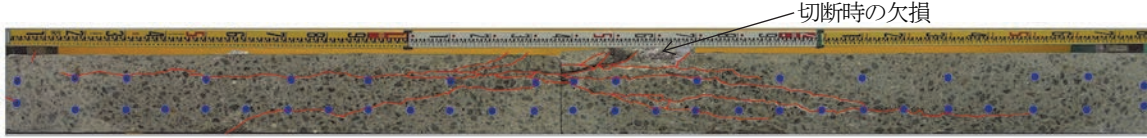
使用した浸透性エポキシ樹脂接着剤は表-1に示す物性を有する無色液状のもので、図-2に示すように供試体の中央を境に片側にのみ規定量を塗布した。

### 2.2 輪荷重走行試験

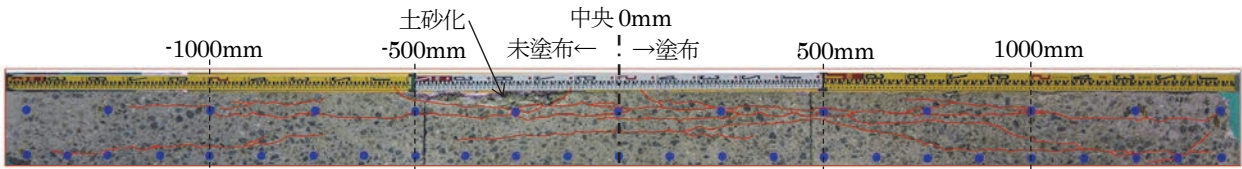
載荷試験には写真-2に示す国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所が所有する輪荷重走行試験機を使用した。この試験機はフライホイールの回転運動をシャフトを介して往復運動に変換するもので、任意の設定荷重を作用させながら往復運動させることで実橋での輪荷重の繰り返し作用を再現する機構である。供試体上の台車には鉄輪が組み込まれており、供試体への荷重伝達



(a) ①-①切断面 (未塗布)



(b) ②-②切断面 (塗布)



(c) ③-③切断面

写真-3 試験後の切断面

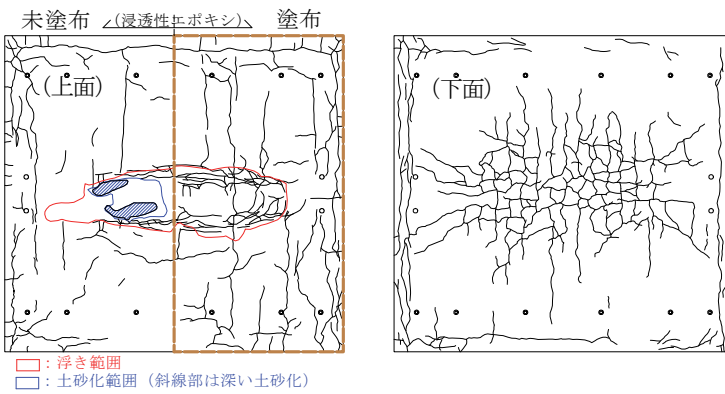


図-5 試験後のひび割れ等損傷状況

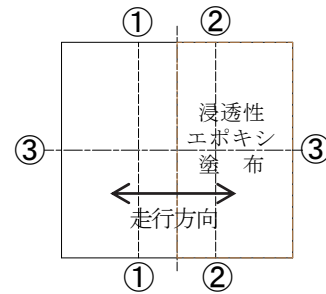


図-4 供試体の切断位置

は鋼製ブロックを介することで面的に作用するように工夫されている。試験での作用荷重は200kNの一定荷重で、鋼製ブロックのサイズは走行軸方向×直角方向の寸法が120×300mmのものを用いた。供試体の走行軸方向の支持間隔は2.50mで、回転可能なように丸鋼で支持し相対する2辺は形鋼による弾性支持としている。試験は写真-2に示すように水張り環境下で実施した。

計測項目はひび割れ発生状況などの外観と一定走行回数毎のたわみで、中央の他に走行軸方向に±500mm離れた位置でも載荷時と除荷時の値を計測することで浸透性エポキシ樹脂接着剤の塗布、未塗布の違いが観察できるようにした。

### 3. 輪荷重走行試験の結果

#### 3.1 輪荷重走行試験結果と供試体の状況

輪荷重走行試験の結果、走行回数10万回から12万回でたわみの増加傾向が顕著となり、その後の126,200回でたわみが急増したことから試験を終了することとした。供試体の外観では押抜きせん断破壊が確認されなかった

ものの、写真-3に示す試験後供試体の切断面では押抜きせん断破壊に繋がるひび割れが形成されていることがわかる。なお、切断位置は図-4に示すとおり走行軸直角方向の塗布、未塗布でそれぞれ一断面と走行軸方向中央で切断している。写真-3で未塗布側上面の中央付近に欠損が見られるが、これは土砂化に加えて浮き箇所が切断時に欠落したものである。

供試体上面の土砂化は走行回数10万回までは生じておらず、その後に浸透性エポキシ樹脂が未塗布の位置で発生していた。試験終了後の土砂化の状況を図-5と写真-4に示すが一部で土砂化が進展し深くなっている箇所が確認されている。表面コンクリートの浮きは塗布の有無に関わらず、走行位置を中心に広がっているが、塗布範囲の一部で写真-5に示すように、載荷ブロックの近傍で剥離し捲れ上がるような状態であった。

図-5には試験終了時の床版下面のひび割れ発生状況も示しているが、輪荷重走行範囲の中央付近では格子状となっており、走行終了前の時点で浸透性エポキシ樹脂の塗布範囲のひび割れから漏水が発生していた(写真-6)。これは、ひび割れの進展により水みちが形成された



写真-4 未塗布範囲の土砂化状況

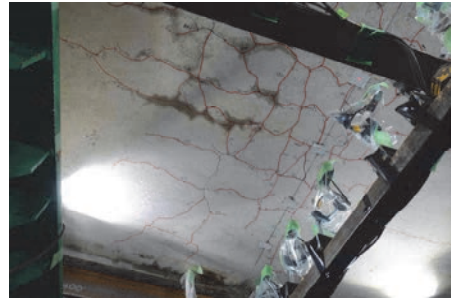


写真-6 塗布範囲試験終了前の床版下面の漏水



写真-5 塗布範囲の剥離と捲れ上がり

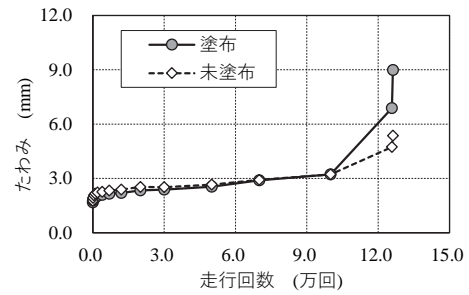
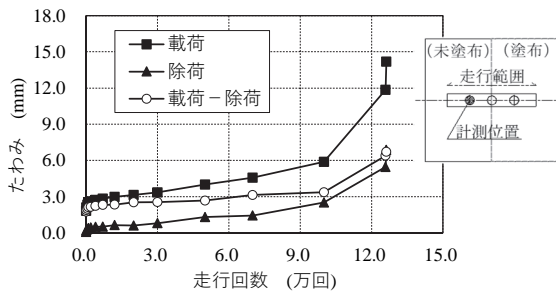
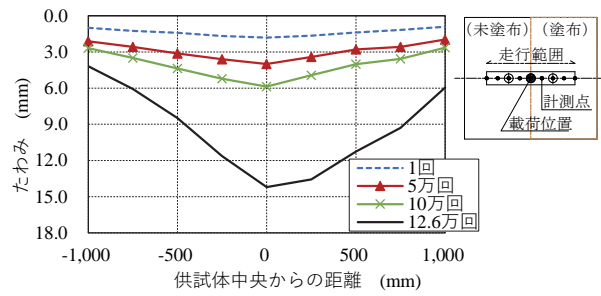


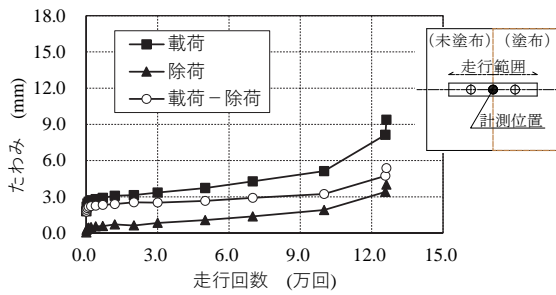
図-7 塗布, 未塗布位置の「載荷-除荷」たわみの経時変化



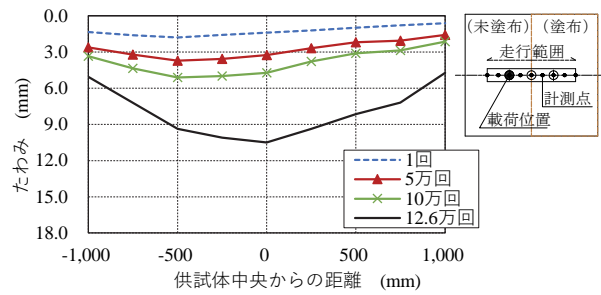
(a) 中央



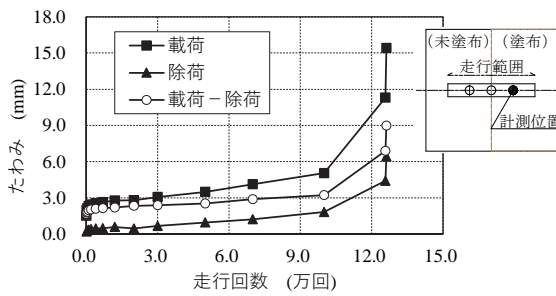
(a) 中央



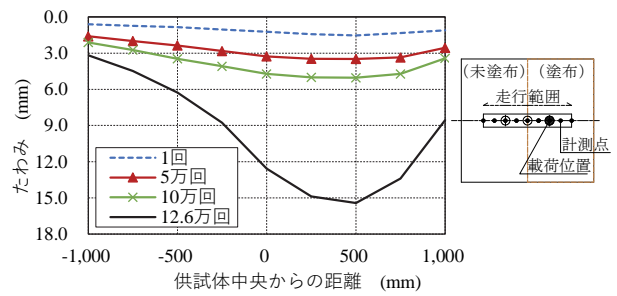
(b) 未塗布



(b) 未塗布



(c) 塗布



(c) 塗布

図-6 輪荷重走行試験でのたわみの経時変化

図-8 走行軸方向(中央)のたわみ分布

ものと推察され、内部のひび割れが比較的少ない未塗布範囲で漏水は生じていなかった。

### 3.2 たわみの経時変化

供試体中央と中央から±500mm離れた塗布、未塗布位置の輪荷重走行試験時のたわみの経時変化を図-6に示す。図-6(a)は中央のもので、載荷時と除荷時、載荷時から除荷時を減じた活荷重成分も示している。(b)は中央から500mm離れた未塗布範囲の位置で(c)は塗布範囲のものである。各位置での経時変化のうち、載荷-除荷の成分は走行回数10万回まではほぼ同様の傾向となっているが、10万回以降では中央と塗布箇所の載荷時と除荷時のたわみが未塗布と比較して大きくなっている。図-7は塗布、未塗布の活荷重成分を示したものであり、走行回数10万回まではほぼ同等の耐荷性能を有していることがわかる。

### 3.3 たわみの分布状況

各載荷位置での走行軸方向のたわみ分布を図-8に示す。図中に示した走行回数は第一回目載荷の他に5万回、10万回、最終計測の126,200回を示している。図-8(a)は中央のもので、(b)は中央から500mm離れた未塗布範囲の位置の取得値であり、(c)は塗布範囲のそれである。図-9は走行回数10万回の載荷時たわみから除荷時を減じた活荷重成分の分布を示したものである。図-8のそれぞれを比較すると、走行回数10万回までは塗布、未塗布の影響は認められないが(図-9)、表面の変状形態に差が生じた頃より変形も非対称となっており、写真-3(b)に示した切断面との状態、即ち内部ひび割れの多さとも一致する。

## 4. 浸透性エポキシ樹脂接着剤の土砂化抑制効果

本実験は限られた供試体での結果であり、今後の追加検討が望まれるものの、耐久性を向上させる有意な結果と考えられることから、浸透性エポキシ樹脂接着剤の塗布効果を考察する。輪荷重走行試験の結果からは、土砂化は浸透性エポキシ樹脂接着剤の未塗布範囲で発生しており、その塗布によって土砂化が抑制された可能性がある。その要因としては、樹脂材料のコンクリート内への浸透によって、水分の侵入が妨げられたことに加え、写真-5の捲れ上がるような状態から推察すると、浸透性エポキシ樹脂接着剤の塗布面からの浸透によりコンクリート表面が改質され、強度が向上した薄い膜が形成されたことが影響していると考えられる。ただし、輪荷重走行試験を続行した場合には、写真-5に示した損傷の近傍で微粉砕による土砂化と同様の変状が生じた可能性がある。

写真-3の内部のひび割れ発生状況を観察すると、走行軸直角方向での塗布範囲(②-②断面)のひび割れ本

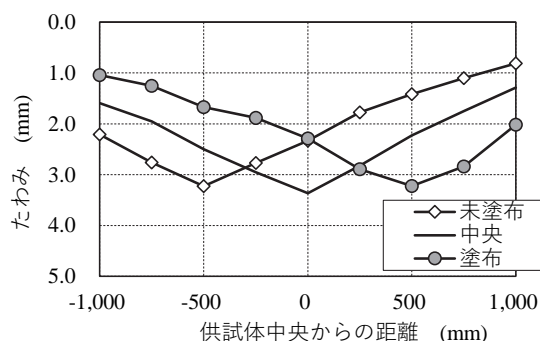


図-9 走行回数10万回の「載荷-除荷」たわみの分布

数が多くなっている。アルカリ骨材反応では内部に程度の異なる微細ひび割れが発生するが、塗布側において試験開始前からひび割れが多く存在し、これらが繰返し走行の影響で進展したものと推察される。結果として、浸透性エポキシ樹脂接着剤塗布のみでは内部ひび割れを補修する効果は無いため、耐荷性能が低下して塗布側で押抜きせん断破壊に至ったものと考えられる。

浸透性エポキシ樹脂接着剤を使用することの目的は、接着界面の微細ひび割れへの接着剤充填による耐久性向上ではあるが、本試験の結果からはその塗布によって防水効果が期待できる可能性があるものの、さらなる追加の実験等データの蓄積は必要である。また、床版防水材料に要求される柔軟性は有していないので、何らかの原因で塗布後にひび割れが発生すると、写真-6に示されるように漏水に繋がることから、浸透性エポキシ樹脂接着剤単体の使用には十分な検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究では浸透性エポキシ樹脂接着剤の土砂化抑制効果を確認するために実物大の反応性骨材を使用した供試体で輪荷重走行試験を実施した。浸透性エポキシ樹脂接着剤は供試体の中央を境に片側に塗布し、未塗布の範囲と同一の試験条件で比較できるようにした。得られた結果を以下に列挙する。

- 1) 輪荷重走行試験ではたわみの急増により126,200回の走行で試験を終了した。押抜きせん断での破壊は無かったが、切断面の観察ではその破壊に繋がるひび割れが形成されていた。
- 2) 土砂化は浸透性エポキシ樹脂接着剤の未塗布の範囲で走行回数10万回以降で発生しており、一部ではその範囲が深い箇所も見られた。
- 3) 表面の浮きは塗布、未塗布に関わらず走行範囲を中心に発生しており、塗布箇所の一部で捲れ上がるような状態であった。
- 4) 輪荷重走行試験のたわみの経時変化は、中央と中央

から 500mm 離れた塗布，未塗布範囲で走行回数 10 万回まではほぼ同様の傾向であったが，その後中央から塗布範囲で押抜きせん断に繋がるひび割れが形成され，たわみが急増した。

- 5) 浸透性エポキシ樹脂接着剤の塗布により土砂化が抑制された可能性があり，その要因は，水分の浸透が妨げられたことと，浸透によりコンクリートが改質され，表面に強度が向上した膜が形成された効果であると推察される。

#### 謝辞

本研究では，北陸・道路メンテナンス会議に設置された「道路橋の維持管理における各構成部材の限界状態ならびに AI 技術の活用に関する検討ワーキンググループ」の委員にご協力いただいた。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 園田恵一郎，堀川都志夫：輪荷重の反復作用下での道路橋 RC 床版の低サイクル疲労特性，土木学会論文集，第 390 号/v-8，pp.97-106，1988.
- 2) 松井繁之：橋梁の寿命予測—道路橋 RC 床版の寿命予測—，安全工学 Vol.30，No.6，pp.432-440，1991.
- 3) 国土交通省道路局国道・調査課ほか：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，土木研究所資料第 4398 号，2020.
- 4) 例えば，横山広，角間恒，榎谷浩，久保善司：ASR 縮小モデル供試体の輪荷重走行試験，第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.155-158，2018.
- 5) 横山広，中村拓郎，榎屋浩，久保善司：道路橋床版の土砂化対策としての断面修復に関する実験的研究，第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.225-230，2020.

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)