

論文

低弾性ラテックス改質超速硬コンクリートで 上面補修を行った RC 床版の輪荷重走行試験

野口堅冬*, 郭度連**, 木田秀人**, 竹村浩志***

*ショーボンド建設(株)補修工学研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1 丁目 17 番)

**博(工), ショーボンド建設(株)補修工学研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1 丁目 17 番)

***ショーボンド建設(株)本社技術本部 (〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町 7 番 8 号)

初期損傷を与えた RC 床版上面をはつり、低弾性ラテックス改質超速硬コンクリートで補修する上面補修工法の効果を検証した。はつりをブレイカーとウォータージェットとの 2 種類で行った上面補修供試体と、無補修供試体を用い輪荷重走行試験を実施した。その結果、無補修供試体に対し、ブレイカー後にプライマーと接着剤を塗布した供試体は 11 倍、ウォータージェット後に接着剤を塗布した供試体は 21 倍、疲労寿命が延びることを確認した。

キーワード：上面補修，低弾性ラテックス改質超速硬コンクリート，輪荷重走行試験，接着剤

1. はじめに

道路橋コンクリート床版（以下、RC 床版）の損傷事例は疲労が多くを占めていたが、近年では、床版上面からコンクリートが損傷する事例も確認されている。これには、伸縮装置近傍にみられる衝撃荷重による局所的な損傷や、耐水しやすい箇所と比較的大きい範囲にわたり損傷が広がっているケースなどが存在する。いずれも放置すれば損傷は進み、やがては橋梁の構造的な性能にも影響を及ぼしかねない。

損傷の補修には、交通規制の短縮を目的に、速硬系材料を使用するのが一般的であるが、補修後、比較的早期に補修部の再劣化が顕在化する事例も存在する。これは補修材単体の性能や、補修材と既設床版との挙動の違いや界面処理の不足に起因するものと考えられる。ここで、挙動の違いとは既設床版と上面補修材の弾性係数の差によるものと考えられており、界面処理の不足とは既設床版のはつり方法の違いや、接着剤の有無などが挙げられ、これまでも様々な研究が行われている。

本研究では、上記のような懸念を払拭できる材料として開発された低弾性ラテックス改質超速硬コンクリート補修材¹⁾を用い、上面補修を行った場合の補修効果を輪荷重走行試験により確認した。

また、補修前の上面はつり方法にブレイカーとウォータージェットの 2 種類を想定し、補修界面の処理と疲労耐久性の向上効果に関して検証を行った。

2. 上面補修材について

今回使用した上面補修材は、交通規制下で使用する場面を想定し、短時間で強度が発現する仕様となっている。また、ラテックスによる改質効果で、曲げ強度や付着強度といった力学的性能、物質透過抵抗性等の耐久性能は一般的な補修材と比較して優れている。さらには、静弾性係数を既設構造物と同等程度にまで抑えており、これらの性能は、NEXCO 構造物施工管理要領の「床版上面における断面修復の性能照査」²⁾を通じて証明済みである。

また、当補修材の使用時には、床版はつり面へ速硬性接着剤を塗布することを標準としている。これは、母材と補修材との界面剥離が生じるのを避けるために講じるものである。

接着剤は図-1 に示すように、床版はつり方法によって使い分けられている。小規模補修の場合に使用されているブレイカー等による人力施工の場合、はつりの打撃と衝撃により既設床版にマイクロクラックや骨材の浮きが生じ脆弱部を生む可能性が高いとされる。この場合には、

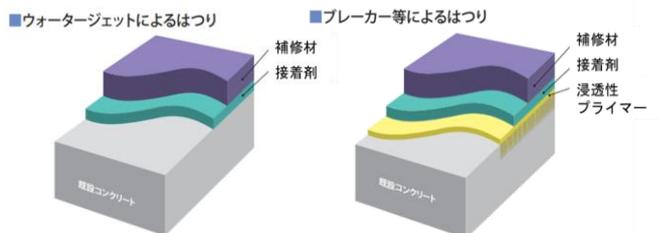


図-1 床版はつり方法の違いと接着剤の使い分け

はつり面に対しエポキシ樹脂系の浸透性プライマーを最初に塗布する。浸透性プライマーは極めて粘度が低く、マイクロクラックや骨材の浮き部に行き渡り、脆弱部の形成を阻止する狙いがある。浸透性プライマー塗布後は、超速硬接着剤を上から塗布し補修材を打設する。

一方、主に高速道路など大規模補修で使用されているウォータージェット（以下、WJ）を用いてはつりを行う場合、脆弱部が形成される懸念はないことから、補修材を打設直前に速硬性接着剤のみをはつり面へ塗布することとしている。

3. 輪荷重走行試験について

3.1 試験の流れ

試験は上面補修に関する既往研究³⁾を参考にを行った。

まずベースとなる RC 床版（以下、ベース床版）を3体用意した。その内訳を表-1に示す。No.1は上面補修を行わない供試体で、基準供試体である。No.2はWJによるはつりを行う供試体、No.3は人力はつりを行う供試体である。試験の流れを表-2に示す。

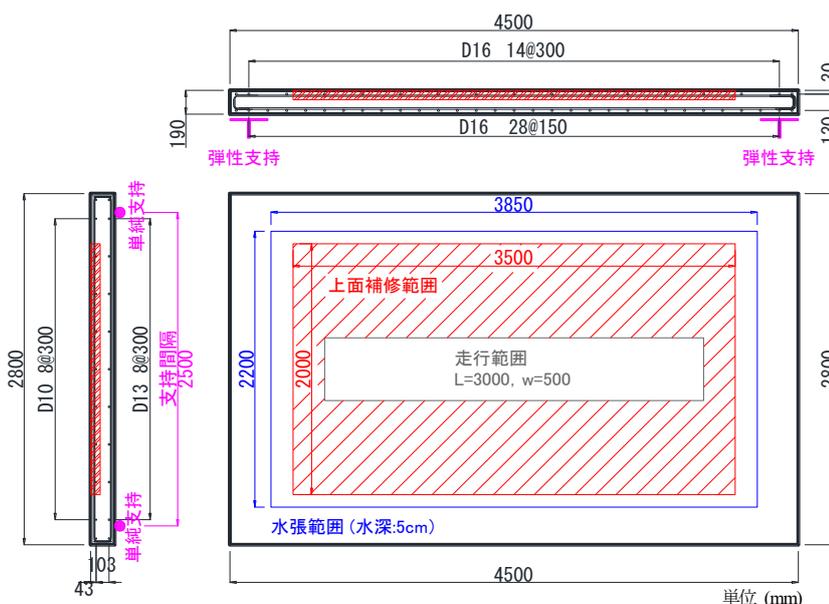
ベース床版は昭和39年道路橋示方書の設計に準拠したもの（以下、S39床版）で、表-3の諸元、図-3に示す形状のものとした。製作後の養生期間を経たのち、乾燥状態で140kN10万回の輪荷重走行により初期損傷を導入した。走行後、試験機から供試体を一度降ろし、上面補修を行った。上面補修完了後、再び試験機に供試体をセットし、走行荷重や走行環境（乾燥・湿潤）をStep毎に変えて走行を継続した。たわみの急激な増加や破壊と思しき外観変状の発生、過度な漏水等が見られる時点まで走行し回数を記録した。

表-1 供試体一覧

供試体	内容
No.1	基準供試体 (S39床版) 上面補修を行わない
No.2	WJはつり→ 接着剤→ 補修材
No.3	ブレーカーはつり→ プライマー→ 接着剤→ 補修材

表-2 試験の流れ³⁾

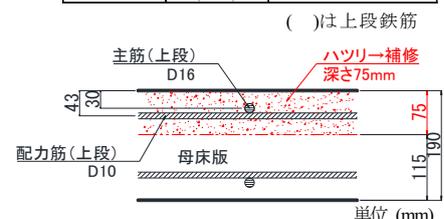
Step	目的	乾湿条件	載荷荷重 (kN)	走行回数 (万回)
1	ひび割れ導入	乾燥	140	10
2	上面補修直後の変状確認			10
3	実橋環境での耐久性確認	湿潤	150	10
4	破壊性状の検証			15



a) 供試体平面図

表-3 ベース床版諸元

供試体寸法 (mm)		2800×4500×t250
主鉄筋 SD295A	呼び径	D16(D16)
	有効高さ (mm)	160(30)
	間隔 (mm)	150(300)
配力筋 SD295A	呼び径	D13(D10)
	有効高さ (mm)	146(43)
	間隔 (mm)	300(300)



b) 補修断面詳細

図-3 供試体形状

表-4 コンクリート・補修材物性

供試体	コンクリート (材齢 No.1:77d, No.2:122d, No.3:164d)			補修材 (材齢 No.2:49d, No.3:66d)		
	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
No.1	29.9	26.9	2.7	—		
No.2	29.0	29.2	3.0	59.6	33.0	4.8
No.3	33.6	30.1	2.4	59.2	31.1	4.6
(28d平均)	26.0	21.8	2.6	58.1	31.4	5.0

表-5 接着剤・プライマー物性

供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮弾性率 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張せん断強度 (N/mm ²)
No.2_接着剤	83.1	3360	59.6	36.9	28.4
No.3_プライマー	73.7	2650	59.1	43.9	24.4
No.3_接着剤	81.8	3580	64.0	35.6	24.3

3.2 使用材料の物性

各供試体のベース床版と補修材のコンクリート物性を表-4に示す。表中に記載の材齢は、No.1がStep1開始時、No.2とNo.3は上面補修施工後のStep2開始時の値である。はつりの施工スケジュールと試験機稼働の効率を考え、本試験の実施順序はNo.2(初期損傷)→No.3(初期損傷)→No.1→No.2→No.3の順で実施している。参考までに、材料ごとの各物性項目の28日データの平均値を並べると、表-4最下段の値のようになった。なお、補修材と併用した接着剤の物性値は表-5に示すとおりである。

3.3 はつりについて

写真-1に供試体の製作状況を示す。WJはつり(No.2)は、ノズル部が敷設したレール上を縦横に移動するタイプの装置を用い、仕上げには低出力のハンドタイプの装置を併用した。人力はつり(No.3)は、汎用的な大型エアブレードと、鉄筋裏や端部の細部にチップャーを併用した。はつり完了後、両供試体のはつり深さを鉄筋の交差部(約300mmピッチ)で計測したところ、WJはつりは平均85mm、人力はつりは平均80mmであった。WJでは局所的に最大100mmの部分もあり仕上がり具合は人力はつりよりばらついた。



a) WJによるはつり



b) ブレーカーによるはつり



c) プライマー, 接着剤塗布



d) 補修材打設

写真-1 No.2, No.3 供試体の製作状況

3.4 プライマー、接着剤について

はつりを行ったのち、No.2 は接着剤を $1.2\text{kg}/\text{m}^2$ 、No.3 はプライマーを $0.5\text{kg}/\text{m}^2$ 塗布した後、接着剤を $0.8\text{kg}/\text{m}^2$ 塗布した。塗布方法は刷毛塗りとした。走行試験後に切断観察する際、視認しやすいよう蛍光顔料を微量添加している。

3.5 試験機と計測項目について

試験は写真-2 に示すクランク式走行試験機を用いて行った。供試体床版の支持条件は、間隔 2.5m の主桁上に取り付けた丸鋼による単純支持と、H 形鋼を利用した横梁による弾性支持とした。走行範囲は 3m で、図-4 に示す断面で構成される走行軌道を設置した。供試体上面には厚さ 20mm のゴム板を敷き、その上に $200 \times 500\text{mm}$ 厚さ 55mm の鋼板を載荷ブロックとして敷き並べ、カバーをかぶせたのち走行鉄板を敷くものである。走行試験時には、下面のたわみ、上下面のひび割れ進展、漏水有無、上面における補修界面のずれ変位（パイゲージ）等を計測・観察項目とした。

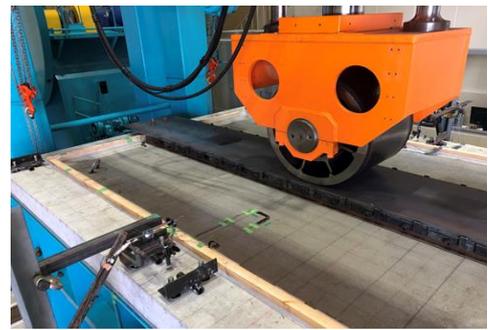


写真-2 クランク式試験機と走行軌道

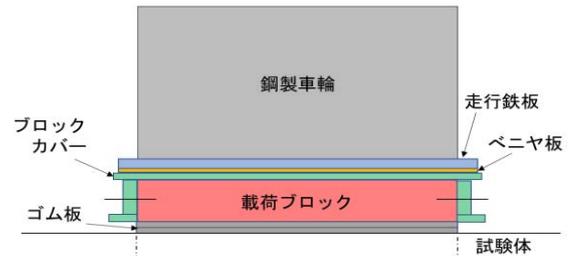


図-4 走行軌道の断面図

4. 試験結果

4.1 走行回数とたわみについて

走行回数と中央たわみ（弾性成分）の変化を図-5 に、走行軸端部における補修界面のずれ変位の変化を図-6 に、破壊走行回数を表-6 に示す。

No.1 は Step4 開始直後にたわみが急増した時点を終了とし、No.2 と No.3 はたわみの急増は確認されなかったがベース床版部が局部的に剥落しかかったため、その時点を終了とした。

Step1 の初期損傷導入時は、いずれの供試体も約 1 万回走行までにたわみの急増がみられた。供試体と試験架台とのなじみや下面ひび割れの発生に伴うものであると推察される。顕著な増加は約 2 万回までで落ち着き、そこから 10 万回まではゆるやかに増加した。たわみの値は、No.2→No.3→No.1 の順で大きくなった。これは各供試体走行開始の順とも一致するため、コンクリート材齢が要因の一つと考えられるものの顕著な差ではない。

Step2 では、補修前後の床版挙動（剛性）を確認することを目的にした。No.1 は Step1 から連続して当 Step へ移行したため、たわみの変化は微増する傾向のまま、大きな変化なく 20 万回まで走行した。No.2 と No.3 の両供試体の活荷重たわみは、Step2 開始直後は Step1 終了時よりも小さく、そこから 5 千回までは急激に増加する推移となった。供試体を再設置したことで供試体と支点部がなじむまでに回数を要した可能性がある。また、ベース床版が一部補修材と置き換わったことで、断面内の応力分布が変化し、Step1 では生じなかった箇所へ新たなひび割れが発生したことも考えら

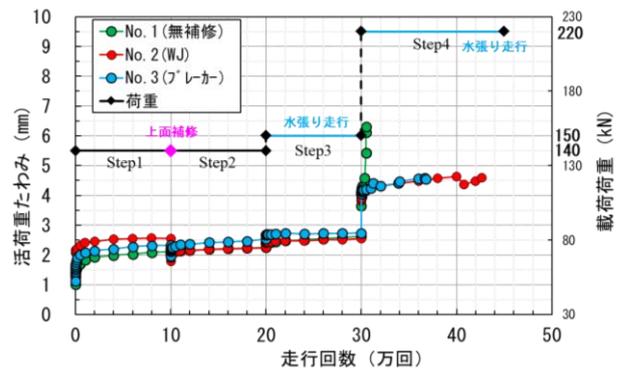


図-5 中央部弾性たわみの回数変化

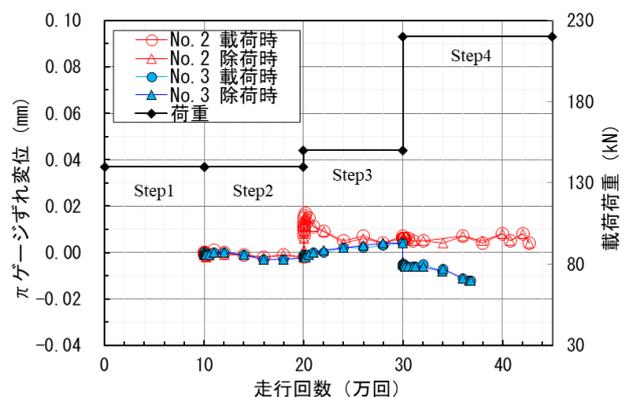


図-6 補修界面ずれ変位の回数変化

表-6 走行終了回数

供試体	破壊Step	破壊Step内の走行回数 (回)
No.1_無補修	Step4	5,251
No.2_WJ	Step4	126,356
No.3_フレカー	Step4	67,508

れる。なお、補修前後を比べると、No.2の活荷重たわみは2.55mm→1.78mm(0.77mm回復)まで戻り、急増後は2.0~2.2mm程度で推移したことから、補修前に比べ剛性の向上が見て取れる。一方、No.3の活荷重たわみは2.32mm→1.97mm(0.35mm回復)とたわみの回復量がNo.2より小さく、走行中の変化も比較的大きく推移し、2.5mm程度まで増加した。前述のはつり深さ(修復材断面高さ)の差やブレーカーの打撃で生じたひび割れが影響した可能性が伺える。

Step3では、荷重が10kN増加することから、いずれの供試体も載荷初期においてたわみの増加が確認されたが、以降10万回走行するまで、たわみは横ばいで推移した。しかし、No.1ではStep終盤で下面から漏水が生じ、一方でNo.2とNo.3供試体においては漏水が生じなかった。これは、補修材上面や界面で変状が生じなかったことを示唆している。

Step4ではさらに荷重が220kNまであがり、疲労が大幅に促進される。No.1無補修供試体は、走行直後からたわみが大幅に増加し始めた。約5,000回を過ぎ明らかに荷重を保持できなくなり、走行範囲で押し抜きせん断破壊に至っている。No.2とNo.3は荷重を上げて走行し始めた直後こそNo.1同様にたわみは急増したが、1万回走行時点でやや落ち着いた推移に変化した。その後、活荷重たわみは横ばいであったが、No.2は約10万回、No.3では約4万回以降、下面のひび割れから漏水が始まり、ベース床版が部分的に大きく剥落しそうになった段階で載荷時たわみが急増した。回数は違いますが両供試体とも同じような変化を生じた段階で走行を止め、破壊とした。最終的に、各供試体の破壊回数は表-6に示す回数となった。

本試験回数を乾燥状態の荷重一定走行に換算した結果を表-7に示す。ここで、回数の換算には、乾燥状態における式(1a)と湿潤状態における式(1b)で表される松井式⁴⁾を用いた。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835\log N + \log 1.52 \quad (1a)$$

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835\log N + \log 1.23 \quad (1b)$$

ここで、 P は載荷荷重(kN)、 P_{sx} は梁状化した版の押し抜きせん断耐力(kN)、 N は走行回数(回)である。

なお、乾湿が混合するため、ステップを通して累積した損傷度を指標に回数を算出している。

表中の P_{sx} は補修断面もすべてベース床版の物性と仮定したものである。No.1の換算回数を1とした場合、No.2は約21倍、No.3は約11倍の疲労寿命であった。

図-7には、本試験結果と松井式を示す。No.1はS39床版であり、松井式近傍に位置するが、No.2とNo.3は松井式以上の回数を示している。これには、二つの要因が考えられる。一つは、床版断面の圧縮領域

表-7 換算した走行回数

供試体	P_{sx} (kN)	換算荷重 (kN)	等価換算回数 (回)	回数比
No.1	330.41	157 (乾燥状態)	6,664,542	1
No.2	326.12		140,147,982	21
No.3	341.90		75,285,022	11

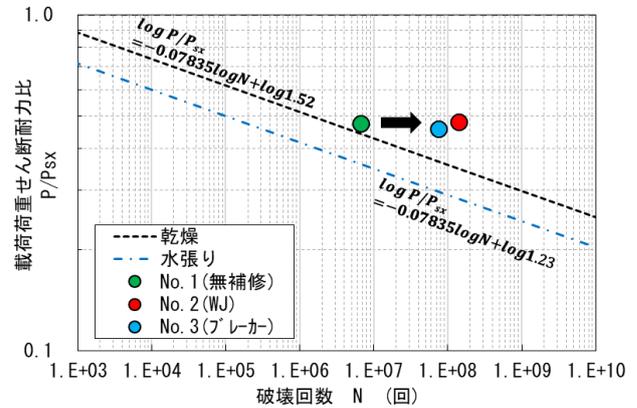


図-7 S-N 関係図

に位置する補修材のせん断強度が、ベース床版より優れていた可能性があること、もう一つは、物質透過抵抗性に優れた補修材を使用したことで、湿潤状態における疲労の促進が抑制されたものと類推される。

4.2 上下面と断面のひび割れ性状について

図-8に各供試体の上面、下面、中央直角断面のひび割れ性状を示す。No.1供試体は、下面ひび割れ網が形成されたのち上面部までひび割れが貫通し梁状化し、押し抜きせん断が生じていた。一方、No.2、No.3供試体は、No.1供試体と比べ、下面のひび割れ網の密度が図中に示すように高くなった。特にStep4以降、それまで形成されてきたひび割れの格子内で、新たな細かいひび割れが主筋方向に生じたことが確認されている。切断面内のひび割れも、No.2は補修材に深、ベース床版部分のひび割れが多く存在していることがわかる。また、下面から伸びたひび割れの多くは補修材との境界に到達せず、界面近傍のベース床版で平行に連続しており、No.1のそれとは異なる。上面においても、No.2とNo.3は、橋軸直角方向へ数か所ひび割れが生じたが、図の上下方向には貫通せず、走行範囲のあたりで留まっており、梁状化が明確に生じた様子はなかった。また、上面の走行範囲中央に、走行軸に沿って連なるひび割れが確認された。上面のひび割れは必ずしもベース床版側のひび割れと貫通はしておらず、補修材表面に層状に生じていることから、圧壊状態であったと推察される。押し抜きせん断破壊とならなかった要因として、プライマーや接着剤の影響が考えられる。図-9には、No.3の走行試験後に、床版中央付近から採取したコアの状態を示す。前述のとおり、補修

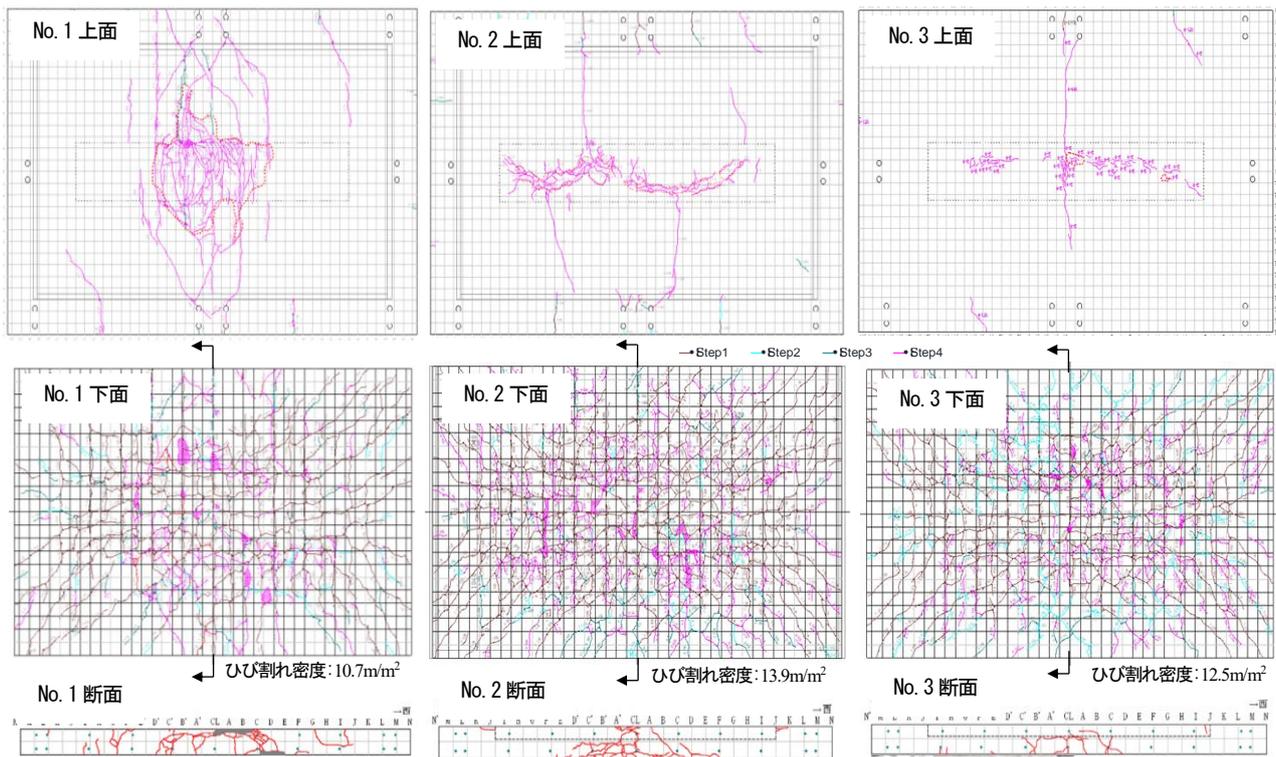


図-8 各供試体のひび割れ性状

界面に用いたプライマーと接着剤には蛍光顔料を混入している。図のように、肉眼では認識できないほど細かいマイクロクラックにまで樹脂が浸透していることがわかる。さらに、下面から上面方向へ伸びる大きな曲げひび割れは、マイクロクラックに到達後、進路を変えて伸びた様子が確認できる。以上より、接着剤による界面の付着力強化とプライマーによるマイクロクラックの閉塞の効果で、断面全体が押し抜かれなかったものと考えられる。

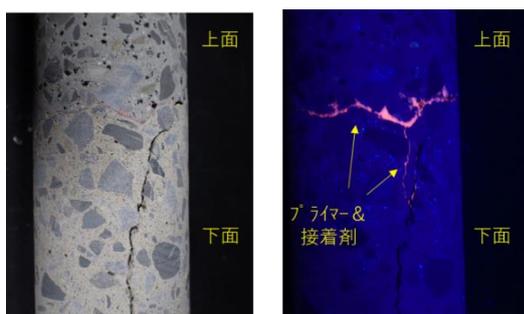


図-9 界面とマイクロクラックへの樹脂浸透状態

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ① 初期損傷を与えた S39 床版に対し、低弾性ラテックス改質超速硬コンクリートを用いて上面補修を行い、輪荷重走行に対する疲労耐久性を検証した。小規模補修の場合に使用されているブレーカーはつりの場合には浸透性プライマーと速硬性接

着剤を、主に高速道路など大規模補修で使用されている WJ はつりの場合には速硬性接着剤のみを はつり面に塗布した。その結果、無補修供試体と比較して、走行回数がそれぞれ 11 倍、21 倍と伸び、はつり方法に応じた界面処理が有効であることを確認した。

- ② 無補修供試体は上面からの押し抜きせん断破壊であったのに対し、上面補修供試体はベース床版に損傷が集中する傾向がみられた。また、試験後の切断面からは、補修界面や上面補修材にひび割れが少ないことが確認された。低弾性で靱性に優れ、遮水性等に優れた上面補修材料の特性が発揮されたことが疲労耐久性の向上に寄与したものと考えられる。

参考文献

- 1) 郭度連, 組永健一, 荒井撰, 中村俊一: 低弾性ラテックス改質超速硬コンクリートを用いた橋面コンクリート舗装, 第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.145~148, 2020.7
- 2) NEXCO3 社: 構造物施工管理要領, p.III-79, 2017
- 3) 長谷俊彦, 白川裕之, 後藤俊吾: コンクリート床版の性能評価と耐久性向上をめざして NEXCO 総研, セメント・コンクリート No.872, pp.21~28, 2019.10
- 4) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, pp.49-51, 2007.

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)