

論文 高浸透型防水材料による水平ひび割れが生じた道路橋 RC 床版の補修方法に関する実験的検討

前島 拓*1・小野 貫太郎*2・吉田 雅義*3・岩城 一郎*4

要旨: 本研究は、水平ひび割れが発生した RC 床版に対して、高浸透型防水材料を用いた新たな補修方法とその効果について実験的に検討したものである。その結果、輪荷重走行試験により水平ひび割れが生じた RC 床版上面から浸透道を削孔するとともに、RC 床版に振動を与えながら高浸透型防水材料を塗布するという簡易な補修方法により、RC 床版内部に生じた水平ひび割れまで高浸透型防水材料が充填され、床版の剛性回復に寄与することを明らかとした。

キーワード: 道路橋 RC 床版, 高浸透型防水材料, 水平ひび割れ, 輪荷重走行試験, 補修効果

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版)は、車両による輪荷重を直接受け持つ部材であり、疲労によりその性能が低下する。特に積雪寒冷地においては、凍結防止剤の大量散布により鋼材腐食や凍結融解によるスケールリング、アルカリシリカ反応が促進され、RC 床版の早期劣化が社会問題となっている。このような地域の RC 床版では、床版の砂利化や水平ひび割れといった床版上面および内部で劣化が進行するケースが多く、現在行われている床版下面からの目視によるひび割れ点検ではこれらの変状を検知することが難しい。また、橋面舗装の修繕工事においては、舗装および防水層の切削後に予期せぬ損傷が見つかり応急的に補修せざるを得ないという施工上の問題が多く生じているものの、床版上面から簡易かつ適切に床版内部の損傷までを補修・補強する技術は未だ確立されていない。

他方、著者らはこれまでに床版表面および内部に生じたひび割れに浸透して防水層を形成する浸透性の高い防水材料(以下、高浸透型防水材料)を用いた床版補修工法について検討を進めてきた²⁾。提案する補修工法は、床版防水工時に高浸透型防水材料を床版上面に塗布するという簡易かつ迅速に床版補修が可能な手法であり、床版に発生する鉛直方向のひび割れに深く浸透・接着し、床版の剛性回復や耐疲労性の向上に寄与することを明らかとしている³⁾。しかし、試験終了後に高浸透型防水材料の浸透範囲を観察した結果、床版内部に発生した水平方向のひび割れについては高浸透型防水材料が充填されていなかったことから、高浸透型防水材料を床版内部の水平ひび割れに充填する手法を確立することで、RC 床版の更なる延命化に寄与する可能性が考えられる。

そこで本研究では、水平ひび割れが発生した RC 床版に対する補修工法の開発を目的とし、水平ひび割れを模擬した要素試験体および輪荷重走行試験により水平ひび割れが発生した RC 床版供試体に対して、高浸透型防水材料を用いた補修方法とその効果について実験的に検討した。

2. 高浸透型防水材料の特性および補修方法

2.1 高浸透型防水材料の特性

本材料は主に都市内高速道路などで採用される複合防水工における一次防水材料として使用されており、現在までに 40 万 m² 以上の施工実績を有している。既往の研究により、本材料を用いることで RC はりの曲げ剛性⁴⁾や RC 床版の耐疲労性³⁾を向上させることが明らかとされており、床版上面のひび割れや剥離が顕著な箇所でも適用されるケースが多い。表-1 に高浸透型防水材料の基本性能を示す。本材料はエポキシアクリレート系材料であり、アクリル系接着材料が有する急速硬化性とエポキシ基が有する接着強靱性を併せ持つ。また、全試験項目で規格値⁵⁾を満足しており、特に浸透性能については試験温度によらず規格値 10mm を大幅に上回る性能を有する。JIS K 6833 に準拠した粘度試験では、常温下(20℃)で

表-1 高浸透型防水材料の基本性能

試験項目	温度(℃)	試験値	規格値	
1 防水性試験	23	0.0ml	減水量0.2ml以下	
2 低温可撓性試験	-10	なし	防水材料の折損が生じないこと	
3 せん断試験	強度	-10	3.44N/mm ²	0.78N/mm ²
		23	0.30N/mm ²	0.15N/mm ²
	伸び	-10	1.5%	0.5%以上
		23	3.7%	1.0%以上
4 引張接着試験	強度	-10	3.43N/mm ²	1.2N/mm ²
		23	0.70N/mm ²	0.59N/mm ²
	強度比	23	94%	水浸7日後が水浸前の50%以上
5 浸透性試験	深さ	23	100mm	10mm以上
		5	100mm	規格値なし

*1 日本大学 工学部土木工学科専任講師 博士(工学) (正会員)

*2 日本大学 大学院工学研究科博士前期課程(現・(株)復建技術コンサルタント)

*3 (株)NIPPO 総合技術部技術研究所 研究第一グループ

*4 日本大学 工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

19MPa・s, 低温下 (5°C)で 35 MPa・s と, 低温下においても低粘度を保持し得る材料であることが確認されており, 寒冷地で使用する場合においても床版内部のひび割れまで浸透することが期待される。

2. 2 水平ひび割れに対する補修方法

前述の通り, 高浸透型防水材料は主として床版防水に使用されており, 本材料を用いた床版補修については防水工における時間制約の範囲で実施することが望ましいと考えた。本材料は床版内部の水平ひび割れや層間剥離に用いる従来の充填材料と比しても低粘性であることから, 床版上から水平ひび割れまでの浸透道を設けることで, 水平ひび割れへの充填が可能と考えられる。そこで本検討では, 床版上から水平ひび割れへの充填方法として, 1)床版上から水平ひび割れまで高浸透型防水材料が浸透するように小径削孔により浸透道を設け, さらに水平方向への浸透/充填を目的として, 2)床版上から振動を与えながら高浸透型防水材料を塗布する方法にて検討を行った。

3. 水平ひび割れ模擬試験体による補修効果に関する検討

3. 1 実験概要

図-1 に供試体概要, 表-2 にコンクリートの配合を示す。本検討に用いた供試体は 100×100×400mm の角柱コンクリート供試体であり, 後述する輪荷重走行試験用の RC 床版供試体と合わせて水セメント比を 65%とした。供試体は打込み後 1 日で脱型した後に材齢 28 日まで水中養生とした。実験条件は, 水平ひび割れのない健全な供試体(H)および水平ひび割れを模擬した供試体の 2 条件であり, 水平ひび割れ模擬供試体については, 削孔数の違いによる補修効果を検討するため, 補修なし(C), 削孔 1 箇所(C-1 で図-1 中の赤着色部), 2 箇所(C-2 で図-1 中の黄着色部)および 3 箇所(C-3 で図-1 中の黄・赤着色部)の 4 条件とした。水平ひび割れは, 供試体作製時に型枠側面から幅 300mm, 厚さ 2mm のアクリル板(図-1 中の点線部)を挿入し, コンクリート硬化前にアクリル板を抜き取った後に供試体側面に同配合のモルタルを薄層で塗布することで模擬した。削孔は浸透道をφ13mmの吸塵ドリルにより上面より深さ 60mm の位置までとし, さらに振動周波数 157Hz の平面バイブレータ(振動面: 150mm×200mm)を供試体上面中央部に 30 秒間押し当て, 供試体全体を振動させながら高浸透型防水材料を供試体上面に塗布する方法で補修を施した。なお, バイブレータについては, 現場への持ち込みと片手での移動が容易であるものを選定したが, 本検討では振動周波数領域については検討しておらず, 水平ひび割れへの充填に適切な振動周波数については今後検討する予定である。試験項目は高浸透型防水材料塗布後における曲げ強度であり, ま

た塗布前後におけるコンクリート供試体の剛性を評価するために局所振動試験により共振周波数を計測した。ここで, 局所振動試験⁶⁾は小型加振器を供試体上面に接触させて指定した周波数帯域にわたってほぼ均等な強度を持つホワイトノイズを入力波とした加振方法により局所的な振動を励起させることで共振周波数を計測した。なお, 本実験では周波数領域を 1000~15000Hz, パワースペクトル密度を 0.020G²/Hz とし, 供試体上面中央部に加振器と加速度センサを取り付けて共振周波数を計測した。

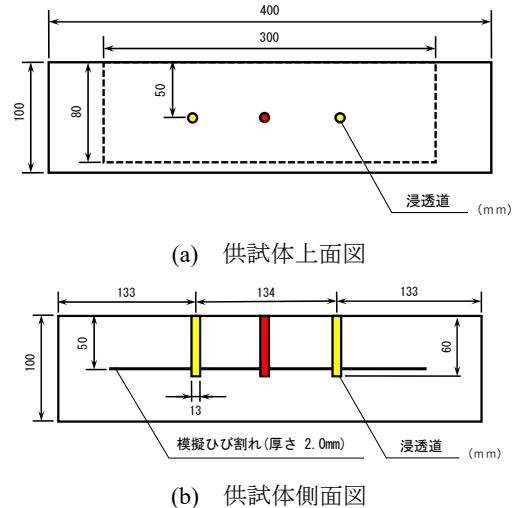


図-1 模擬ひび割れ供試体概要

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 (C×%)
				W	C	S	G	
20	12.0	64.3	45.0	178	277	839	1005	0.8

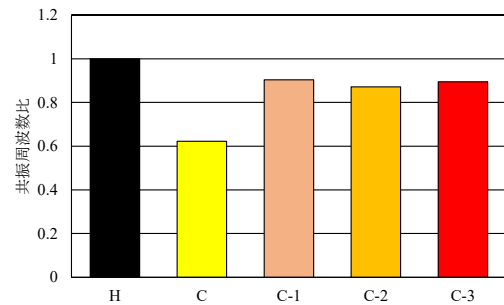


図-2 共振周波数比

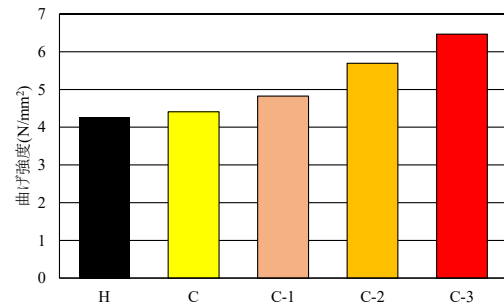


図-3 曲げ強度試験結果

3. 2 実験結果

図-2 に共振周波数比を示す。ここで、共振周波数比は各供試体の共振周波数を健全供試体(H)の共振周波数で除した値である。図より、高浸透型防水材料を塗布した供試体の共振周波数比は削孔数の違いによる差異はなく、削孔1箇所でも0.90、削孔2箇所でも0.87、削孔3箇所でも0.89であり、補修をしていないCと比較すると25~28%程度剛性が回復していることが示された。図-3 に曲げ強度試験結果を示す。図より、CはHと比較して同等の曲げ強度であり、水平ひび割れの有無に係わらず曲げ強度に差異は認められなかった。一方、高浸透型防水材料による補修を施した供試体では、削孔1箇所でも4.83MPa、削孔2箇所でも5.70MPa、削孔3箇所でも6.47MPaであり、いずれもHを上回る結果となった。また、削孔数の増加に伴い曲げ強度が向上する傾向であり、本手法により高浸透型防水材料を水平ひび割れに浸透させることでコンクリートの曲げ強度向上に寄与することが示された。なお、C-2、C-3の切断面を確認すると水平ひび割れ全域に高浸透型防水材料が充填されていることが確認されており、削孔数を増やすことで水平ひび割れ全面に浸透し、コンクリートの曲げ耐力を向上させることが示唆された。

以上より、高浸透型防水材料を水平ひび割れに充填することでコンクリートの曲げ強度向上に寄与することが示され、RC床版の延命効果についても期待できる結果であった。そこで次章では、別研究の輪荷重走行試験により疲労限界に至ったRC床版を用いて削孔と振動を組み合わせ合わせた補修を施し、本手法による水平ひび割れへの充填範囲について確認するとともに、その補修効果について検討した。

4. 輪荷重走行試験による補修効果の検討

4.1 供試体および輪荷重走行試験の概要

図-4 に供試体概要を示す。供試体は3000×2000×160mmの複鉄筋コンクリート床版であり、配合は前述した曲げ強度試験用供試体と同配合とした。輪荷重走行試験(写真-1)は、床版上面に水張り範囲(図-5中の水色枠)を設けて常時5mmの真水を湛水させた状態で実施し、事後保全対策の効果を検証するため疲労限界確認後に高浸透型防水材料を用いて補修を行った。補修後は、基本荷重を98kNとし、実走行回数5万回ごとに載荷荷重を29.4kNずつ増加させる段階載荷方式により実施した。計測項目は、目標走行回数終了時点で基本荷重98kNを供試体中央に静的載荷した際の床版に発生する弾性変形成分のたわみ(活荷重たわみ)と供試体下面のひび割れ観察および局所振動試験による共振周波数である。活荷重たわみは高感度変位計(感度1/100mm)を用い、供試体中央と中央から橋軸、橋軸直角方向にそれぞれ200mmずつ

配置して計測した。また、ひび割れ密度は規定の走行回数において床版下面のひび割れをスケッチし、画像解析ソフトによって床版中央の1600mm×1200mmの範囲にあるひび割れの総延長を求め算出した。輪荷重走行回数は段階載荷による走行回数を98kNによる走行回数に換算した等価繰返し走行回数で評価した。具体的には、各荷重における走行実績を、マイナー則を仮定した式(1)により98kNに換算した際の走行回数として求めた。

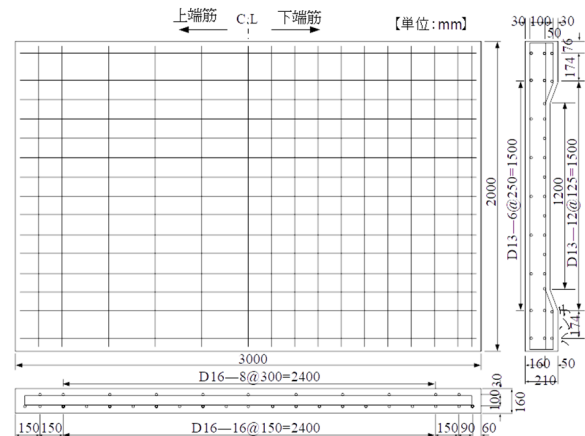


図-4 RC床版供試体の概要



写真-1 輪荷重走行試験装置

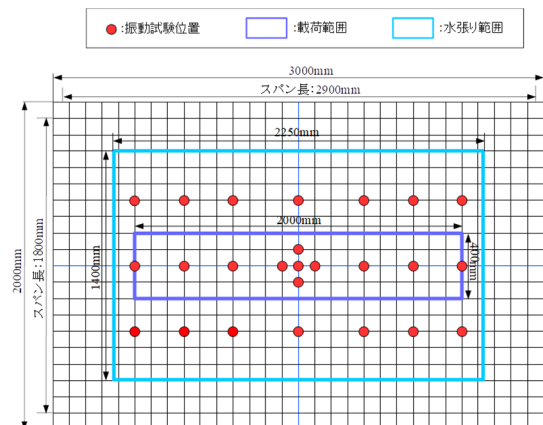


図-5 共振周波数の計測位置

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (1)$$

ここで、 N_{eq} : 基本荷重 P_0 に換算した走行回数、 P_0 : 基本荷重(98kN)、 n_i : 荷重 P_i の走行回数、 m : S-N 曲線の傾きの逆数(12.76)である。

局所振動試験による共振周波数の計測は、床版上面から前章と同条件で補修前後において図-5 に示す 25 点で計測した。

4.2 補修前の損傷状況

図-6 に補修前における輪荷重走行試験結果として活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。図中には本研究で補修した床版(以下、本床版)に加えて、既往の研究により水張り状態で輪荷重走行試験を行った後に高浸透型防水材料を上面から塗布することで補修した床版供試体(以下、上面塗布床版)の結果を併記している。なお、各床版作製時に採取したコンクリート床版供試体と同配合で作製し、同様の養生を行った円柱供試体(φ100×H200mm)による試験開始材齢における圧縮強度およびヤング率は、本床版で圧縮強度 24.9MPa、ヤング率 24.9GPa、上面塗布床版で圧縮強度 32.6MPa、ヤング率 23.8GPa であった。

各床版の活荷重たわみは、走行回数に伴い徐々に増加する傾向であり、活荷重たわみが急増する点を疲労限界とすると、上面塗布床版では約 15 万回、本床版では約 440 万回で疲労限界に至る結果であった。図-7 および図-8 に疲労限界時点における各床版のひび割れ発生状況を示す。床版下面については床版間でのひび割れ発生形態に大きな差異はないが、床版上面では上面塗布床版では床版中央位置で橋軸直角方向に横断するひび割れが生じている程度であったが、本床版では輪走行範囲においてひび割れが卓越し、床版コンクリートの砂利化(写真-2)が確認されており、損傷が著しく進行していた。

写真-3 に本床版における高浸透型防水材料の塗布状況を示す。浸透道(図-7(a)中の黄丸)は、床版上面におけるひび割れを囲うように床版中央から 2000×800mm の範囲において橋軸方向に 500mm、橋軸直角方向に 400mm 間隔で削孔し、さらにこれら削孔箇所を中心位置となるように、床版中央から橋軸直角方向に 200mm の位置において 500mm 間隔で削孔した計 23 箇所である。前述した曲げ供試体同様に φ13mm の粉塵吸引ドリルを用いて、水平ひび割れおよび水平ひび割れから斜め方向に進展するひび割れへの浸透を考慮して、床版上面から垂直方向に深さ 80mm(床版厚さの 1/2)まで削孔した。その後、振動周波数 157Hz の平面パイププレートで床版上面の削孔位置近傍を振動させながらひび割れおよび削孔位置から気泡が出なくなるまで高浸透型防水材料を供試体上面に塗布した。各削孔位置における振動時間にはバラツキがある

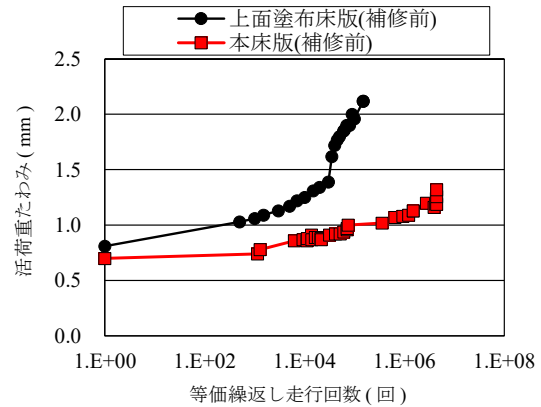
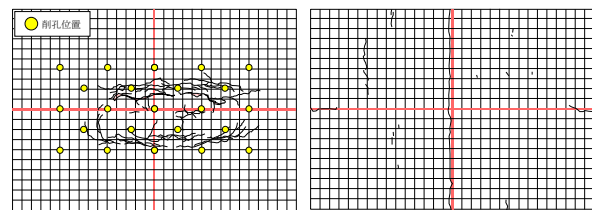
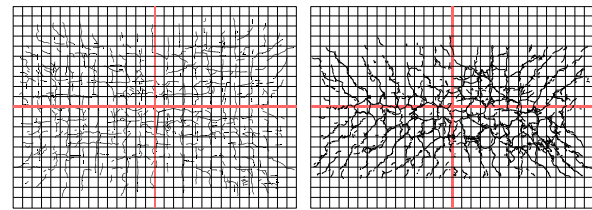


図-6 補修前の活荷重たわみ



(a) 本床版 (b) 上面塗布床版

図-7 補修前のひび割れ図(上面)



(a) 本床版 (b) 上面塗布床版

図-8 補修前のひび割れ図(下面)

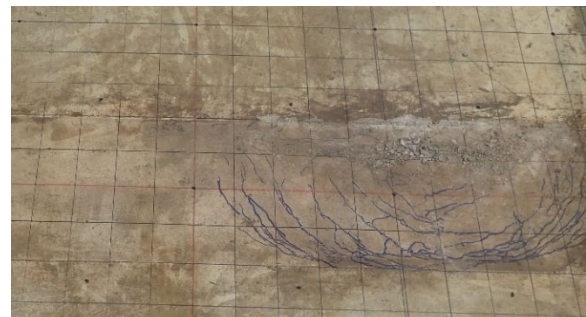


写真-2 本床版の砂利化状況



(a) 削孔状況 (b) 塗布状況

写真-3 削孔および高浸透型防水材料の塗布状況

ものの、概ね 20 秒～60 秒であった。なお、試験後に浸透範囲を確認するため、高浸透型防水材料には蛍光粉末を混和した。

高浸透型防水材料の塗布量は、上面塗布床版では 0.7kg/m^2 であったのに対して、本床版では 2.1kg/m^2 であり、損傷が進行していたことに加えて、浸透道を削孔したことで塗布量が 3 倍まで増加する結果であった。なお、補修に要した時間は、上面塗布床版で約 16 分、本床版では削孔から塗布完了までで 33 分間であった。

図-9 および図-10 に高浸透型防水材料塗布前後における共振周波数比を示す。なお、共振周波数比は補修前後の共振周波数を輪荷重走行試験開始前における健全状態の共振周波数で除した値である。図より、補修前の共振周波数比を比較すると、上面塗布床版では床版中央位置においても 0.5 程度であるのに対して、本床版では広い範囲にわたって 0.2 程度を示し、共振周波数比からも両者の損傷状況が大きく異なる結果であり、本床版は概ね押抜きせん断破壊に近い状態であったと考えられる。一方、補修後の共振周波数比は、上面塗布床版では床版中央位置の値が回復した程度であったが、本床版では床版全域で健全相当まで回復しており、水平ひび割れを含む床版全域のひび割れに高浸透型防水材料が浸透したことによって剛性が回復したものと考えられた。

図-11 に補修後の輪荷重走行試験結果を示す。図より、補修前後の活荷重たわみは、上面塗布床版で補修前が 2.12 mm、補修後が 1.72 mm であり、高浸透型防水材料を塗布したことで剛性が回復する結果であった。一方、本床版では、前述した共振周波数では補修前後で顕著な回復が見られているものの、活荷重たわみは補修前 1.19 mm、補修後 1.17 mm であった。また、各床版補修後の疲労限界に至った走行回数は、上面塗布床版で約 27 万回

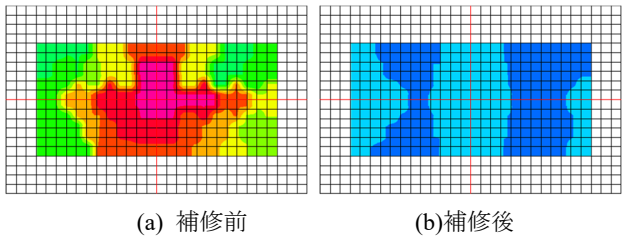
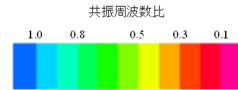


図-9 補修前後の共振周波数比分布(本床版)

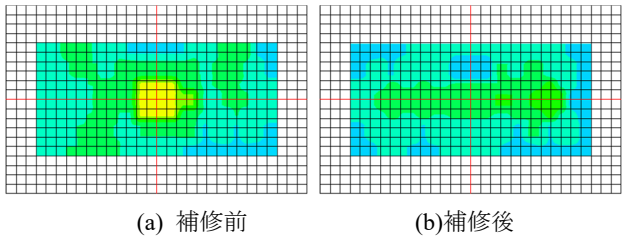


図-10 補修前後の共振周波数比分布(上面塗布床版)

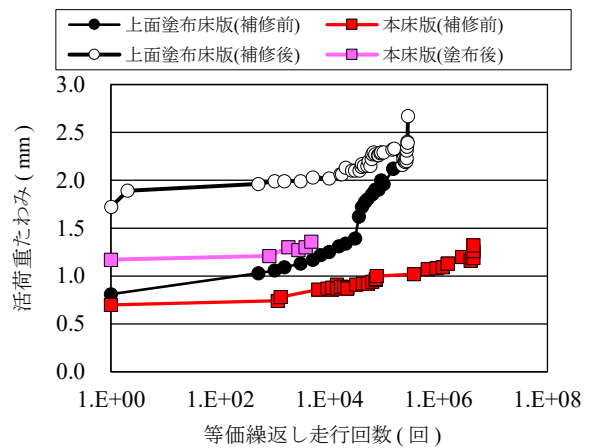


図-11 補修前後の活荷重たわみ

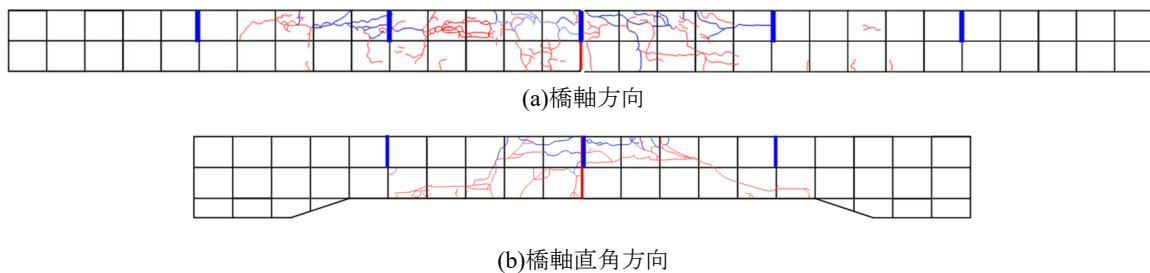


図-12 床版断面のひび割れ発生状況(本床版)

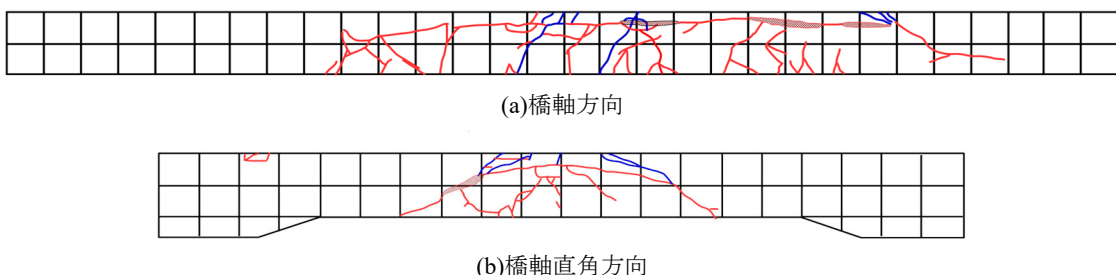


図-13 床版断面のひび割れ発生状況(上面塗布床版)

(補修前は約 15 万回), 本床版で約 5000 回(補修前は約 440 万回)であり, 本床版においては高浸透型防水材料による延命効果が得られなかった。これは前述した通り, 本床版は補修段階で損傷が著しく進行しており, 押抜きせん断破壊に近い状態であったことが要因と考えられ, 上面塗布床版の補修段階における損傷状況やそれ以前に補修を施し, 本工法による延命効果を検証する必要がある。

図-12 および図-13 に試験終了後において床版を中央から 4 分割して観察した切断面の損傷状況と高浸透型防水材料の浸透状況を示す。なお, 図中の青線は高浸透型防水材料の浸透したひび割れ, 赤線は浸透のなかったひび割れを示している。ここで, 高浸透型防水材料の浸透状況は, 写真-4 に示すように切断面にブラックライトを照射して確認した。図より, 上面塗布床版では床版上面に生じたひび割れから高浸透型防水材料が浸透し, 床版鉛直方向のひび割れにのみ浸透が見られたのに対して, 本床版では水平方向のひび割れに浸透している。特に, 削孔した浸透道から水平方向に充填していることが確認され, 削孔と振動を組み合わせた新たな補修工法により高浸透型防水材料を水平ひび割れに充填し得ることが示された。また, 本実験の範囲内では, 浸透道を中心に±200mm 程度まで水平ひび割れに充填する結果であり, 削孔間隔を 200mm ピッチとすることで床版内部に生じた水平ひび割れ全域への充填が可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- 1) 水平ひび割れを模した供試体の曲げ強度試験結果より, 高浸透型防水材料を水平ひび割れに充填することで, 共振周波数から得られる見かけの剛性および曲げ強度が向上することを明らかとし, 本材料による補修効果を確認した。
- 2) 削孔と振動を組み合わせた新たな補修方法により, 簡易かつ迅速に RC 床版内部に発生したひび割れまで高浸透型防水材料が充填され, 押抜きせん断破壊に至った RC 床版においても局所振動試験により得られる共振周波数(見かけの剛性)が大きく回復することを明らかとした。
- 3) 本検討の範囲内では, RC 床版が押抜きせん断破壊に至った段階で補修を施したため顕著な延命効果は得られなかったものの, 本工法により RC 床版内部に発生したひび割れまで高浸透型防水材料を充填することが可能であり, RC 床版の延命化に寄与することが示唆された。
- 4) 輪荷重走行試験終了後に高浸透型防水材料の浸透範囲を確認した結果, 浸透道を中心に概ね±200mm まで水平ひび割れに浸透する結果であり, 200mm

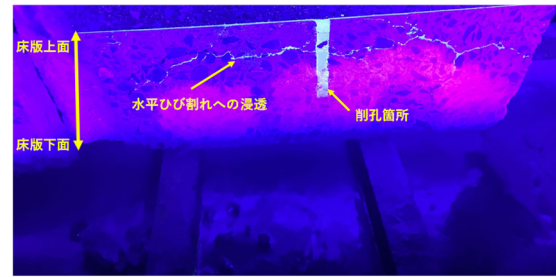


写真-4 高浸透型防水材料の浸透状況

間隔で浸透道を設けることで床版全域の水平ひび割れに高浸透型防水材料を浸透し得る可能性が示唆された。

本研究により, 削孔と振動を組み合わせた新たな補修工法により簡易かつ迅速に床版内部に生じたひび割れまで高浸透型防水材料を充填し得ることが確認され, 凍結防止剤散布環境下において疲労と材料劣化の複合劣化を受ける RC 床版の補修工法として適用することで, RC 床版の延命化に寄与することが期待される。今後は, 本工法の実用化に向けて, 適切な補修時期やその判定方法, および削孔間隔や振動条件を含めて, 補修設計方法の構築を進めていく予定である。

謝辞: 本研究は日本大学工学部と株式会社 NIPPO の共同研究によって行われた成果を取りまとめたものであり, 実験の遂行には著者らが所属する機関の職員・学生にご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 赤平勝也ほか: 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, 土木学会第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.37-40, 2014
- 2) 前島拓ほか: 高浸透型防水材料による RC 床版の耐疲労性向上効果, 第 14 回北陸舗装道路会議技術報告集, 5-1, 2018
- 3) 前島拓ほか: 高浸透型防水材料による道路橋 RC 床版の補修効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp.445-450, 2021
- 4) 蒲和也ほか: コンクリート床版の高浸透型防水材料の開発, 土木学会年次学術講演会, pp.7-8, 2015
- 5) 首都高速道路株式会社: 舗装設計施工要領, 2019
- 6) 内藤英樹ほか: 局所振動試験に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.73, No.2, pp.133-149, 2017
- 7) 松井繁之: 橋梁の長寿命予測-道路橋 RC 床版の寿命予測, 安全工学, Vo.30, No.6, pp.432-440, 1996