

# 論文 上面増厚後に層間剥離が生じた道路橋 RC 床版の再補修工法に関する実験的検討

田中 暁<sup>\*1</sup>・前島 拓<sup>\*2</sup>・青木 聡<sup>\*3</sup>・岩城 一郎<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は、上面増厚補強を施した後に再劣化した道路橋 RC 床版に対する再補修工法の補修効果について実験的に検討したものである。輪荷重走行試験装置を用いて、SFRCにより上面増厚した RC 床版へ終局限界状態程度まで疲労損傷を与え、高浸透型防水材料を用いた補修を行った後に再度輪荷重走行試験を実施した。その結果、提案工法により層間剥離部や母床版内部に発生したひび割れまで高浸透型防水材料が浸透し、これによって床版の剛性回復や延命効果に寄与することを明らかとした。

**キーワード：**高浸透型防水材料, 輪荷重走行試験, 道路橋 RC 床版, 上面増厚, 層間剥離, 補修効果

## 1. はじめに

高度経済成長期に一斉整備された、都市内高速道路をはじめとする道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版)では、設計当初と比較して大型車交通量が増加したことにより疲労損傷が想定以上に進行するという問題が生じ、緊急的に補修・補強を余儀なくされたケースが多く報告されている<sup>1)</sup>。RC 床版の補強工事として繊維補強コンクリートによる上面増厚工法が広く活用されているが、施工後数年で上面増厚部と既設床版の界面で層間剥離が生じた事例が報告されている<sup>2)</sup>。層間剥離のように床版断面に水平方向の損傷を有する床版については、床版の剛性が著しく低下することから緊急的な補修・補強が必要とされているが、この種の損傷に対する適切な補修方法は確立されていない。

他方、著者らはこれまでに、床版内部に水平ひび割れが生じた RC 床版を対象に、浸透性と接着性に優れた防水材料(以下、高浸透型防水材料)を用いた床版補修工法の開発を進めてきた<sup>3)</sup>。提案工法は、RC 床版供試体上面から水平ひび割れ発生位置まで小径ドリルで浸透道を削孔した後、型枠バイブレータで床版に振動を与えながら高浸透型防水材料を塗布することにより、高浸透型防水材料を水平方向のひび割れまで充填させ、床版の剛性回復と延命化を図るものである。前島ら<sup>3)</sup>は、輪荷重走行試験により押抜きせん断破壊に至った RC 床版に対して提案工法を適用し、削孔した浸透道を介して床版内部のひび割れに高浸透型防水材料が浸透し(写真-1)、その結果、RC 床版の剛性が回復することを明らかとしている。このように、提案工法は水平方向の損傷を有する床版の補修方法として有効であることが示されており、前述した上面増厚部と既設床版部の層間剥離に対しても適用可能と考え

られる。

以上の背景より本研究では、上面増厚工法を施した後に層間剥離が生じた RC 床版に対する再補修工法として、高浸透型防水材料を用いた補修の適用性を実験的に検討した。具体的には、1)鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)を用いて上面増厚補強した RC 床版供試体に対して輪荷重走行試験により終局限界状態程度まで疲労損傷を与え、2)提案工法により補修を施すことで層間剥離部に高浸透型防水材料を充填した。また、3)補修後に再度輪荷重走行試験を実施し、本工法による補修効果を検証した。

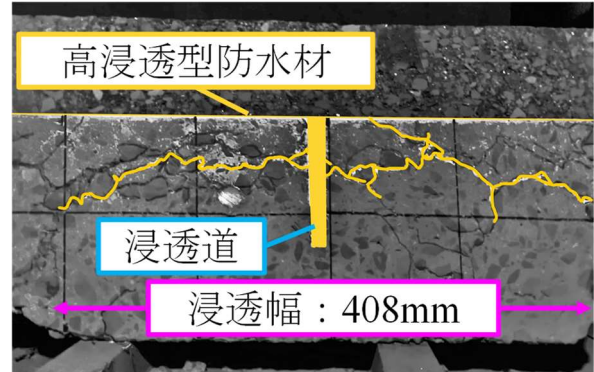


写真-1 高浸透型防水材料浸透状況

表-1 高浸透型防水材料基本性能

試験項目	温度(℃)	試験値	規格値	
防水性試験	23	0.0ml	減水量0.2ml以下	
低温可撓性試験	-10	なし	防水材料の折損が生じないこと	
せん断試験	強度	-10	3.4N/mm <sup>2</sup>	0.78N/mm <sup>2</sup> 以上
		23	0.30N/mm <sup>2</sup>	0.15N/mm <sup>2</sup> 以上
	伸び	-10	1.5%	0.5%以上
		23	3.7%	1.0%以上
引張接着試験	強度	-10	3.3N/mm <sup>2</sup>	1.2N/mm <sup>2</sup> 以上
		23	0.7N/mm <sup>2</sup>	0.59N/mm <sup>2</sup> 以上
引張接着試験	強度比	23	94%	水没7日後が水没前の50%以上
浸透性能試験	深さ	23	100mm	10mm以上
		5	100mm	-

\*1 日本大学 大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程 (学生会員)

\*2 日本大学 工学部土木工学科専任講師 博士(工学) (正会員)

\*3 一般財団法人 首都高速道路技術センター構造技術研究所第一構造研究開発室 (正会員)

\*4 日本大学 工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

## 2. 高浸透型防水材の基本性能

表-1に高浸透型防水材の基本性能を示す<sup>4)</sup>。ここで、試験方法および規格値は首都高速道路(株)の舗装設計施工要領<sup>5)</sup>に準拠している。本防水材はアクリル系接着剤が有する急速硬化性とエポキシ系接着剤が有する強接着性を併せ持つ材料であり、各試験項目で基準値を満足し、特に低温時においても優れた浸透性能を発揮することから、高速道路などにおける複合防水工法の一次防水層として利用されている防水材である(図-1)。

また、JIS K 6833に準拠した粘度試験の結果、常温下(20°C)で19MPa・s、低温下(5°C)で35MPa・sと、低温下においても低粘度を保持する材料であることが確認されており<sup>3)</sup>、本研究においても浸透道から層間剥離部まで広く浸透することが期待される。

## 3. 実験概要

### 3.1 供試体概要

表-2に増厚前のRC床版供試体(以下、母床版)のコンクリートの配合、表-3にSFRCの配合、表-4に輪荷重走行試験終了時における圧縮強度と静弾性係数、図-2に本研究で用いた母床版および上面増厚後の床版供試体概要を示す。本研究で用いた母床版は昭和39年道路橋示方書に準拠した複鉄筋RC床版(4500×2800×190mm)であり、母床版上面を切削機により20mm切削後、ショットブラスト機による研掃(150kg/m<sup>2</sup>)を行い、SFRC打設面に高浸透型防水材を塗布し(塗布量:0.35kg/m<sup>2</sup>)、さらに表-5に示すエポキシ系接着剤を母床版とSFRCの界面に1.2kg/m<sup>2</sup>塗布した。その後、鋼繊維を1.27Vol.%混入したSFRCを50mm増厚した供試体(以下、増厚床版)を作製した。また、上面増厚工法により補強された床版では、施工目地周辺における上面増厚部の剥離が生じることで損傷の進行が促進されることを考慮し<sup>2)</sup>、橋軸方向と橋軸直角方向に施工目地を設けている。

## 3.2 輪荷重走行試験概要

写真-2に輪荷重走行試験装置を示す。輪荷重試験装置は、任意の荷重を作用させながら鉄輪を往復運動させることで大型車の通行を再現する疲労促進試験装置であり、床版が疲労破壊に至るまでの試験を比較的短期間で実施可能である。供試体の支持条件は、橋軸方向の2辺を単純支持、その直角方向の2辺を弾性支持として、支持部には回転方向の拘束を与えずに浮き上がり防止す

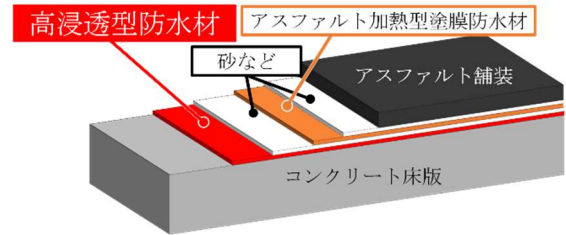


図-1 複合防水工法概要

表-2 コンクリートの配合(母床版)

粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水(W)	セメント(C)	細骨材(S)	粗骨材(G)	混和剤
25	8.5	4.5	53.5	46.5	156	292	865	990	3.50

表-3 コンクリートの配合(SFRC)

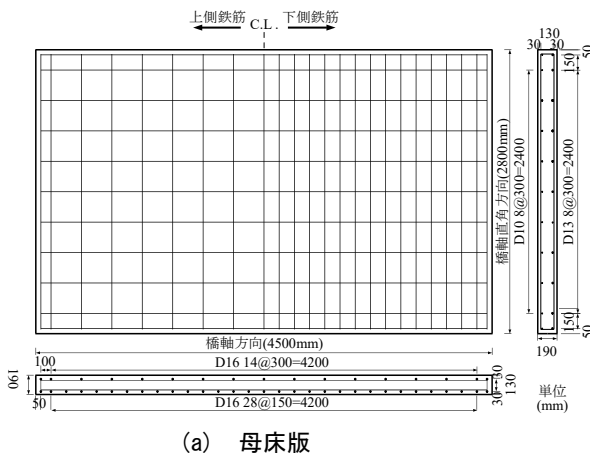
粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
				水(W)	セメント(C)	細骨材(S)	粗骨材(G)	鋼繊維(SF)	混和剤
13	6.0	38.6	52.5	168	435	872	823	100	3.70

表-4 試験時強度

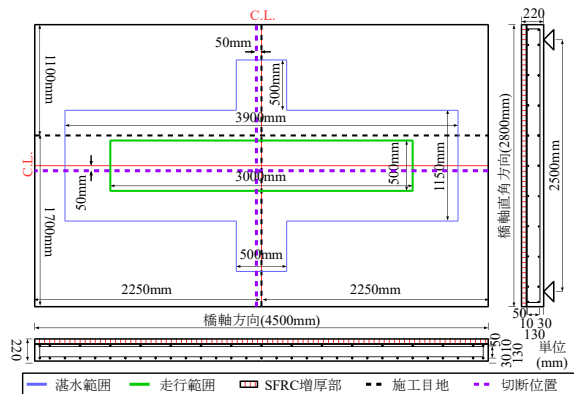
ID	材齢(日)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )
母床版	112	43.4	33.7
SFRC	69	78.7	41.3

表-5 エポキシ系接着剤の特性値

項目	品質特性	試験方法
硬化物比重	1.20±0.10	JIS K 7112
圧縮強さ	50N/mm <sup>2</sup> 以上	旧 JIS K 7208
圧縮弾性係数	1000N/mm <sup>2</sup> 以上	旧 JIS K 7208
曲げ強さ	35N/mm <sup>2</sup> 以上	旧 JIS K 7203
引張せん断接着強さ	10N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS K 6850
粘度(20°C)	10500Pa・s	JIS K 6833



(a) 母床版



(b) 増厚床版

図-2 供試体概要

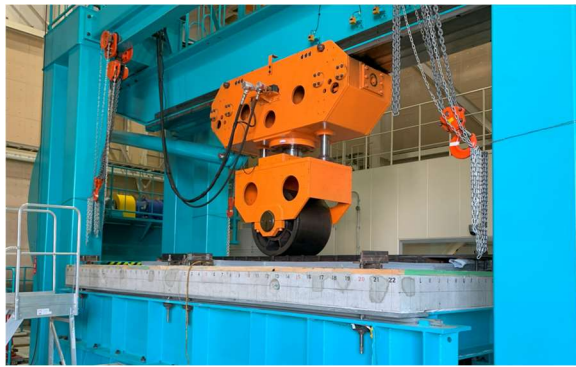


写真-2 輪荷重走行試験装置

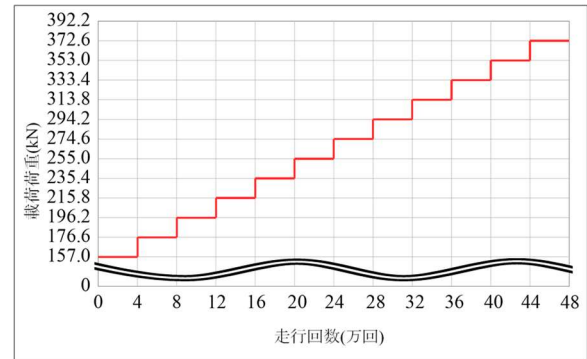


図-3 載荷プログラム

るための治具を設置した。また、本実験では既往の研究<sup>9)</sup>と同様に疲労損傷を促進させるため、補修前後に関わらず、図-2の青枠範囲内に示すように、走行部と横目地部を囲う範囲に枠を設け、真水を常時10mm以上湛水させた状態で輪荷重走行試験を行った。図-3に輪荷重走行試験の載荷プログラムを示す。本研究では、157kNを基本荷重とし、4万回走行ごとに荷重を19.6kNずつ増加させる階段状漸増載荷方式で試験を実施した。また、高浸透型防水材料による補修後は、載荷プログラムを初期段階に戻し、基本荷重から試験を実施した。ここで、補修後の輪荷重走行試験は補修を施した翌日から開始している。なお、本研究では500mm幅の鉄輪を±1500mmの範囲で走行させた。

計測項目は、床版のたわみ、目視による床版下面のひび割れ性状、局所振動試験による共振周波数とし、輪荷重走行試験終了時には床版上面から打音検査を行い、層間剥離範囲を評価した。床版のたわみは各荷重を供試体中央に静的載荷した際に発生したたわみを計測した。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3000mm×2200mmの範囲にあるひび割れの総延長を求め算出した。

本研究では、階段状漸増載荷方式を採用していることから、各荷重での走行実績についてはマイナー則を仮定した式(1)により基本荷重である157kNに換算した等価繰返し走行回数で評価した。

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

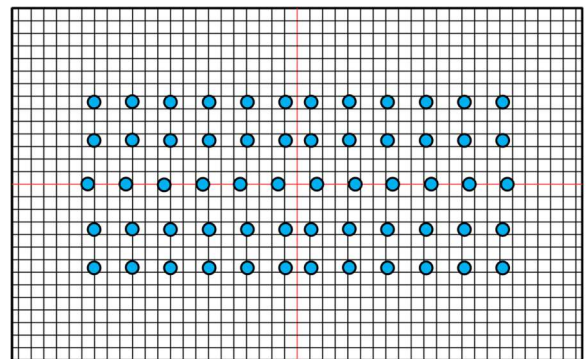
ここで、 $N_{eq}$ :基本荷重 $P_0$ に換算した等価繰返し走行回数、 $P_i$ :実際の載荷荷重、 $P_0$ :基本荷重(157kN)、 $n_i$ :荷重 $P_i$ での走行回数、 $m$ :S-N曲線の傾きの逆数(12.76)である<sup>9)</sup>。

### 3.3 局所振動試験概要

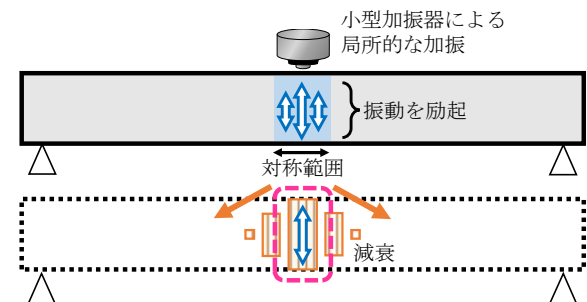
写真-3、図-4に局所振動試験概要を示す。局所振動試験は図中に示す青丸の地点で計測した。ここで、局所振動試験とは、小型加振器を床版の上面あるいは下面に接触させ、ホワイトノイズを入力波とした加振方法によ



写真-3 局所振動試験装置



(1) 局所振動試験位置



(2) 共振周波数計測イメージ

図-4 局所振動試験概要

り床版の厚さ方向に局所的な振動を励起し、振動が及ぶ範囲において共振現象が生じる周波数(以下、共振周波数)を計測することによって剛性を評価する非破壊検査手法であり、供用中の床版の損傷レベルを定量的に評価し得ることが示されている<sup>7)</sup>。なお、本研究では、式(2)に示す各計測段階の共振周波数から走行試験前に計測し



(1) 浸透道の削孔



(2) 高浸透型防水材料の塗布

写真-4 補修状況

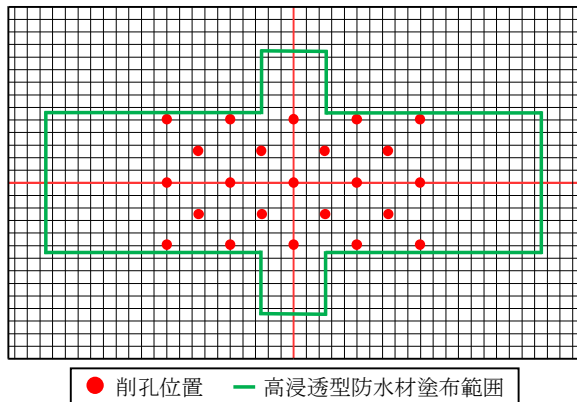


図-5 補修位置概要

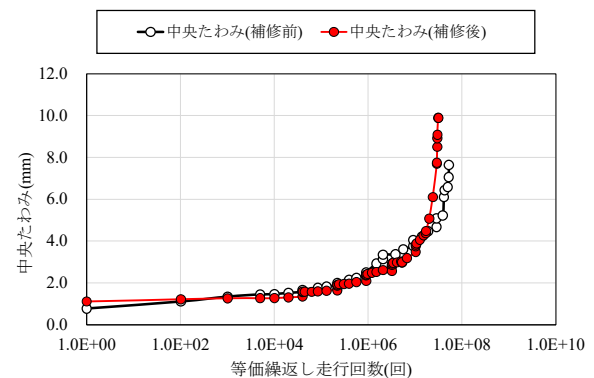


図-6 輪荷重走行試験結果

た共振周波数を除した値(共振周波数比)を用いて床版内部の損傷度を評価した。

$$R_f = f_i / f_0 \quad (2)$$

ここで、 $R_f$ ：共振周波数比、 $f_i$ ：各計測段階の共振周波数、 $f_0$ ：走行試験前に計測した共振周波数である。

### 3.4 補修状況

写真-4 に補修状況、図-5 に浸透道の削孔位置を示す。既往の研究<sup>3)</sup>を参考に、吸塵ドリルにより層間剥離部への浸透道を削孔した後に、床版上面より型枠パイプ（160~200Hz）を用いて床版に振動を与えながら高浸透型防水材料を塗布する方法により補修を施した。浸透道の削孔は、SFRCによる増厚部の厚さが50mmであるものの、床版切削のバラつきを考慮したうえで、確実に層間剥離部まで高浸透型防水材料を浸透させるため、図中に示す赤丸の地点にφ13mmの吸塵ドリルを用いて深さ70mmまで行った。なお、削孔間隔は既往の研究<sup>3)</sup>において、写真-1に示すように浸透道から左右200mmに浸透する結果を得ていることから、供試体中央部を基準とし、250mmずつの千鳥配列とし、高浸透型防水材料の塗布範囲は湛水範囲と同様とした。また、輪荷重走行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微量添加して補修を行い、塗布量<sup>3)</sup>は0.59kg/m<sup>2</sup>であった。なお、本実験では床版下面に設置した変位計を一

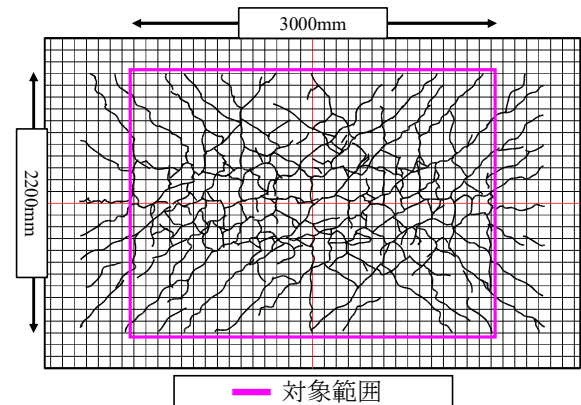


図-7 床版下面のひび割れ図

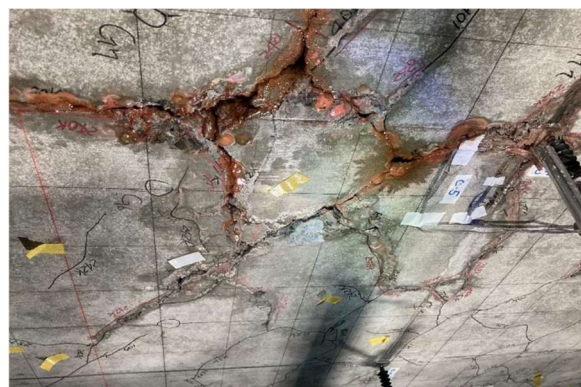


写真-5 床版下面の損傷状況

時的に撤去し、補修時における床版下面からの滲出状況を確認した。その結果、漏水箇所において高浸透型防水材料の滲出が確認されたものの、床版からの滴下は確認されなかった。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 補修前における各種試験結果

図-6 に輪荷重走行試験結果、図-7 および写真-5 に補修前における床版下面のひび割れ発生状況を示す。本実験では、床版の中央たわみの急増と床版上面からの打音検査により異音を確認された段階において床版下面の損傷が著しく進行していることに加え、層間剥離が発生しており、床版が終局限界程度に至ったと判断し、試験を終了した。図-6 より、補修前における輪荷重走行試験は等価繰返し走行回数 5328 万回で終了した。なお、この段階における最大載荷荷重は 274.6kN であった。図-7 より、補修前の輪荷重走行試験終了時におけるひび割れ密度は 12.3m/m<sup>2</sup> であり、この時点において床版下面では漏水が確認されるだけでなく、ひび割れの角落ちが生じるなど疲労損傷が著しく進行している状態であった(写真-5)。図-8 に局所振動試験によって得られた共振周波数比のコンター図および打音検査結果により得られた異音範囲を示す。図より、異音範囲は供試体中央から十字方向に進展していたことから、橋軸直角方向における目地部から水が浸入したことにより床版の劣化が促進されたものと推察される。共振周波数比は輪走行範囲および供試体中央で 0.2~0.4 まで低下する結果であり、疲労損傷が著しく進行している状態であった。また、共振周波数比の低下箇所と打音検査結果による異音範囲は概

ね一致しており、局所振動試験によって上面増厚床版の層間剥離範囲を評価し得ることが示唆された。

##### 4.2 補修効果に関する検討

図-9 に補修後の局所振動試験結果を示す。図より、補修前に共振周波数比の低下および打音検査時に異音が

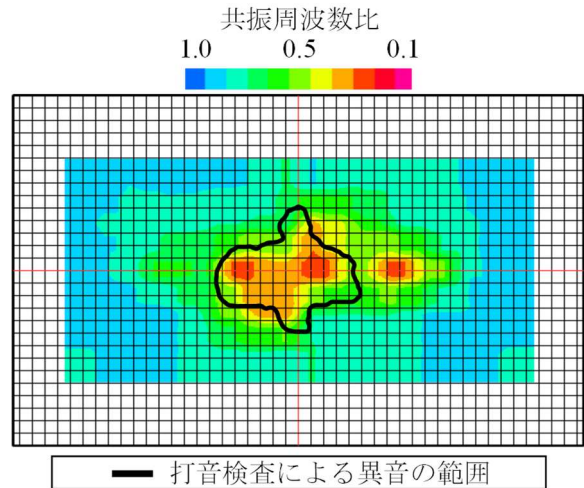


図-8 床版内部の損傷状況

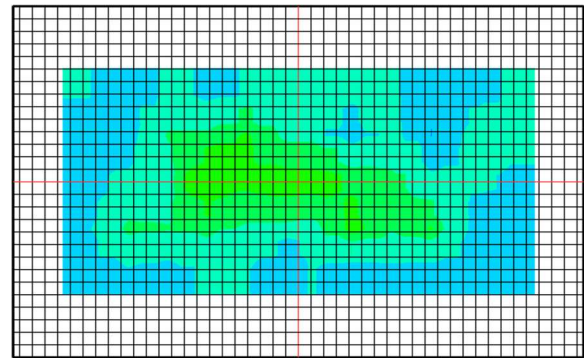


図-9 補修直後における局所振動試験結果

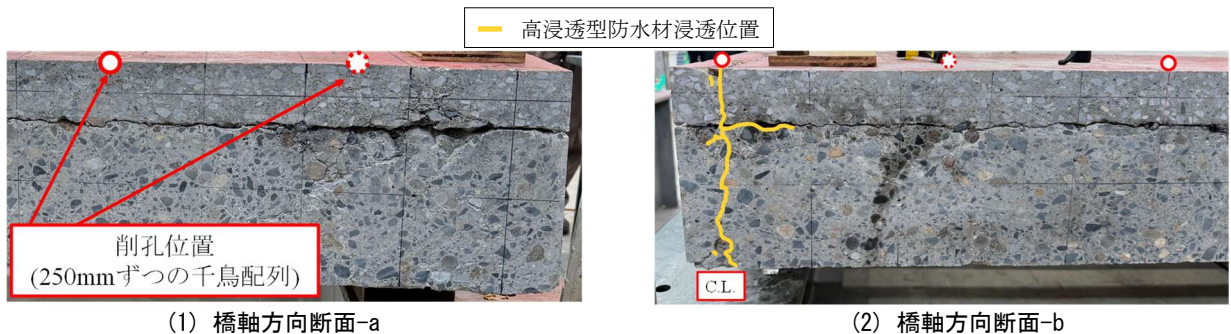


写真-6 橋軸方向切断面

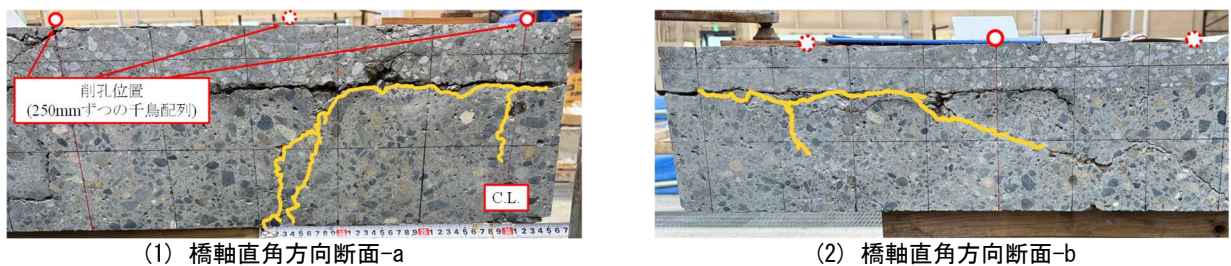


写真-7 橋軸直角方向切断面

確認された範囲で共振周波数比の顕著な回復が確認され、提案工法により層間剥離を有する床版の局所的な剛性回復に寄与することが示唆された。なお、補修前後における共振周波数比について、層間剥離が生じていた箇所の回復量は平均値で 0.35、最大値で 0.55 であった。図-6 より、補修前後における輪荷重走行試験開始時の床版中央たわみは、補修前で 0.772mm、補修後で 1.109mm であり、健全状態まで回復することはなかったものの、その後は補修前後で概ね同様の推移を示して終局限界状態程度に至る結果であった。共振周波数比の回復をはじめとする床版の剛性回復は既往の研究<sup>3)</sup>と同様の傾向を示しており、高浸透型防水材が層間剥離部および母床版のひび割れに浸透し、ひび割れ面を接着したことで剛性が回復したものと推察される。また、補修後の輪荷重走行試験において終局限界状態程度に至った等価繰返し走行回数 は 3138 万回であり、この際の最大載荷荷重は補修前と同様の 274.6kN であった。走行回数を比較すると、終局限界状態程度に至った床版に対して床版上面からの事後保全的な補修であったものの、58.9%の延命効果が認められる結果であった。

写真-6、写真-7 に輪荷重走行試験後に床版を中央から 50mm の位置より 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の浸透状況を示す。写真より、層間剥離部において土砂化が生じるなど、損傷が著しく進行していたために橋軸方向断面では高浸透型防水材が浸透した痕跡を判別することは難しいものの(写真-6)、橋軸直角方向断面については、層間剥離部で床版中央位置から±250mm 程度まで高浸透型防水材の浸透が確認された。また、せん断ひび割れ等への浸透範囲を含めると、高浸透型防水材の浸透幅は±400mm 程度であった(写真-7)。

以上の結果より、本提案工法により層間剥離部および母床版に生じたひび割れに高浸透型防水材が浸透してひび割れ面を接着したことにより、床版の剛性回復や延命効果がもたらされたものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究は再劣化した部材の再補修効果を構造性能に基づき定量的に評価したものである。本研究で得られた主な知見を以下に記す。

- (1) 上面増厚補強後に終局限界状態程度まで疲労損傷を与えた RC 床版に対して、局所振動試験と打音検査を実施した結果、共振周波数比の低下箇所と打音検査によって浮きと判断された範囲が概ね一致し、局所振動試験により上面増厚を施した RC 床版の層間剥離範囲を検出し得る可能性が示唆された。
- (2) 上面増厚部との層間剥離が生じた RC 床版に対して、

浸透道の削孔と振動を組み合わせた補修を施した結果、層間剥離部および母床版のひび割れに高浸透型防水材が充填され、終局限界状態程度の RC 床版においても共振周波数比の顕著な回復が認められた。

- (3) 輪荷重走行試験結果より、提案工法は貫通ひび割れが発生し、終局限界状態程度には達しているものの、押抜きせん断破壊は生じていない RC 床版に対する事後保全的な補修においても、床版の剛性回復と延命効果に寄与することを明らかとし、上面増厚後に層間剥離が生じた RC 床版に対する補修工法として適用可能であることを示した。

本研究により、高浸透型防水材を用いた床版補修工法が、上面増厚後に層間剥離が生じた RC 床版の剛性回復や延命に有効であることが示され、上面増厚補強後に再劣化した RC 床版に適用することで、既存の道路橋床版の延命化に寄与することが期待される。今後は、水平ひび割れは発生しているが、疲労限界には達していない段階で本補修工法による補修を行うなど、本補修工法の適用時期や適切な削孔位置、削孔間隔について検討を進める予定である。

## 謝辞

本研究は日本大学工学部、一般財団法人 首都高速道路技術センター、株式会社 NIPPO、ショーボンド建設株式会社の共同研究で行われ、実験の遂行には共同研究機関の学生・職員に多大な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) 中谷昌一ほか：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料，No.28，2002
- 2) 長谷俊彦ほか：上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討，コンクリート工学，Vol.50，No.3，pp.245-253，2012
- 3) 前島拓ほか：高浸透型防水材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，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.2，pp.949-954，2023
- 4) 蒲和也ほか：コンクリート床版の高浸透型防水材の開発，土木学会年次学術講演会講演概要集，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) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007
- 7) 内藤英樹ほか：局所振動試験に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷度評価，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