

## 論文

## 高強度緻密モルタルの性能とコンクリート床版補修効果に関する実験研究

石田学\*, 赤江信哉\*\*\*, 大垣賀津雄\*\*\*

\* 太平洋マテリアル株式会社 営業本部 (〒114-0014 東京都北区田端 6-1-1)

\*\* 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 (〒285-0802 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

\*\*\* 工博, ものつくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

道路橋の RC 床版は交通荷重を受け、上面から水や塩分の侵入により過酷な環境にあり、水平ひび割れの発生や RC 床版上面の土砂化等の劣化が進行している。その対策工法が種々検討されている。また床版表面の不陸修正材として高強度緻密モルタルを用いれば、防水性能も期待できるものと考えられる。本研究で使用した高強度緻密モルタル材料の性能を紹介し、劣化させた RC 床版の上面に適用した場合の静的曲げ載荷試験を行い、その補強効果を確認した。

キーワード: 高強度モルタル, 緻密モルタル, RC 床版, 上面増厚, 曲げ載荷

## 1. はじめに

RC床版は交通荷重を直接受ける部材であり、経年劣化することが知られている。また近年、凍結防止剤の使用増加の影響を受け、水や塩分が床版内部に侵入し、水平ひび割れやRC床版上面付近の土砂化を誘発して、劣化を促進させている。

その対策として床版防水の重要性が明らかになっている。しかしながら、床版防水は、健全かつ表面が平滑な床版を想定して開発されたものである。従って、維持管理の現場においては、舗装改良時の過切削により床版を損傷させてしまい、付着性が低下し、接着不良によって供用後に舗装損傷などの不具合による性能低下が懸念される。また過切削は、床版厚さを減少させ疲労耐久性の低下を引き起こす。

このような状況の中で、床版表面の不陸調整材料として超緻密高強度繊維補強材を用いれば、防水性能も期待できるとの報告がある<sup>1)4)</sup>。そこで、床版表面に鋼繊維補強高強度緻密モルタル(以下、床版表面補強材と呼ぶ)を施工し、正曲げや負曲げの静的載荷実験による基礎的な検討を実施した結果、2cm程度の薄層でも上面増厚の代替補強になる可能性があり、さらなる検討の結果、等価応力ブロック法により補強後の終局曲げ強度を推定できることが分かった<sup>5)6)</sup>。

本文では、本研究対象としている床版表面補強材の各種材料試験結果を示す。また、簡易な試験施工により、その施工性や経年劣化状況を紹介する。さらに、健全床版より2~4cm上面が薄い劣化床版、および劣化床版を曲げ載荷して下面にひび割れが生じて上面が圧壊する終局状態に至ったものに、床版表面補強材を上面に施工した

RC床版を製作し、それぞれ静的曲げ載荷を行った<sup>7)</sup>。これらの結果を示したものである。

## 2. 床版表面補強材の材料性能

## 2.1 強度特性

本研究で使用した床版表面補強材の各種材料試験結果を表-1に示す。同表より、材齢4時間で33N/mm<sup>2</sup>の超速硬性と、28日で約100N/mm<sup>2</sup>の高い圧縮強度が得られている。本材料は高強度コンクリートに通常よく使われているセメント材料、細骨材、鋼繊維、および混和剤から構成している。

表-1 床版表面補強材の材料試験結果

試験項目	試験方法	材齢	試験結果
フロー値	JIS R 5201	—	175mm
単位容積質量	JIS A 1171	—	2.32kg/L
凝結時間	始発	JIS A 1147	—
			58分
圧縮強度	JIS A 1108	4時間	33.8N/mm <sup>2</sup>
		1日	56.4N/mm <sup>2</sup>
		7日	80.7N/mm <sup>2</sup>
		28日	99.8N/mm <sup>2</sup>
静弾性係数	JIS A 1149	28日	42.2kN/mm <sup>2</sup>
曲げ強度	JIS A 1106	28日	15.0N/mm <sup>2</sup>
曲げ靱性係数	JSCE-G552	28日	5.0N/mm <sup>2</sup>
乾燥収縮	JIS A-1129-3	91日	-387×10 <sup>-6</sup>
自己収縮	JCI-SQA4	28日	-156×10 <sup>-6</sup>
塩化物浸透深さ	塩水 10%溶液 6ヶ月浸漬(26W)	28日	3.0mm
凍結融解抵抗性 (相対弾性係数)	JIS A 1148 (300 サイクル)	28日	102%
透水性	JIS A 1404 (0.5MPa・7日間)	28日	1.3g (接着剤塗布 0.3g)

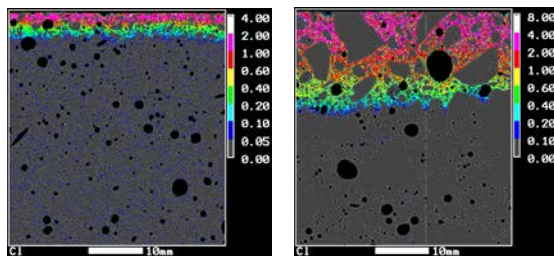
また、床版表面補強材の曲げ引張強度は  $15 \text{ N/mm}^2$  であり、圧縮強度と共に引張強度が上昇していることと、長さ  $30\text{mm}$  の鋼繊維を混入しているため曲げじん性係数も  $5 \text{ N/mm}^2$  と高い値を確保できている。このように高いひび割れ抵抗性を有するため、鋼主桁直上の RC 床版負荷領域に適用しても、有害なひび割れが発生しにくく、表面からの塩害等による劣化が生じ難い材料である。

## 2.2 フレッシュ性状

床版表面補強材の凝結は約 1 時間弱と短いので、現場で練混ぜることが前提であり、環境温度に合わせて遅延剤を添加することにより、可使時間を確保する必要がある。モルタルフロー値は  $175\text{mm}$  であり、通常モルタルよりやや硬目であるが、簡易フィニッシャーやバイブレータ等を用いると、流動性が現れ施工性が向上する。

## 2.3 長さ変化

本モルタル材料の配合設計に当り、単位結合材量の増量による高強度化は、自己収縮や乾燥収縮による長さ変化の増大を招きひび割れ発生リスクが高まるため、結合材と細骨材の比率を  $1:3$  の貧配合とし、その上で、水セメント比の低減および各種骨材・混和材の最適配合によって超高強度化、および薄層打設可能なワーカビリティを実現し、表-1 に示す乾燥収縮量は  $387 \times 10^{-6}$  で、自己収縮量も  $156 \times 10^{-6}$  であり、小さいことが特長である。



(a)床版表面補強材 (b)SFRC  
図-1 塩化物イオン浸透深さ

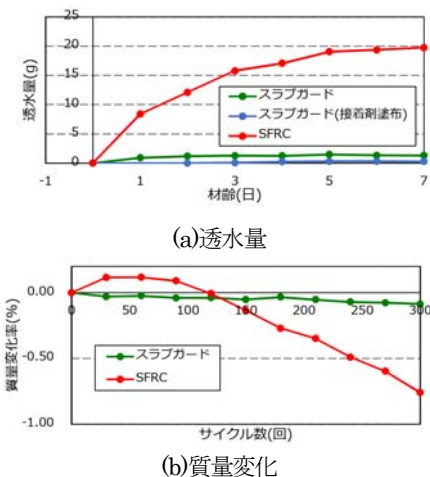


図-2 防水性と凍結融解抵抗性

## 2.4 塩化物の浸透

床版表面補強材の遮塩性を評価するため、 $10\%$  塩水に 6 か月間浸漬させた試験での塩化物イオン浸透深さの結果を図-1 に示す。同図において、設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$  の鋼繊維補強コンクリート (以下、SFRC と呼ぶ) と比較している。床版表面補強材の塩化物イオン浸透深さは  $3\text{mm}$  であり、SFRC の約  $15\text{mm}$  に比べて高い遮塩性を有していることがわかる。

## 2.5 凍結融解抵抗性

防水性と凍結融解抵抗性の評価指標として、材齢 7 日までの透水量試験と凍結融解 300 サイクルによる質量変化率を図-2 に示す。同図(a)より、床版表面補強材の透水量は表-1 に示した通り  $1.3\text{g}$  であり、材齢 7 日の SFRC の透水量約  $20\text{g}$  に比べて小さいことがわかる。なお、この補強材と既設床版との界面にはエポキシ系接着剤を塗布することを標準としているが、その場合はさらに遮水性が向上し、ほとんど透水しないといえる。

凍結融解抵抗性の指標である相対動弾性係数は表-1 に示す通り  $102\%$  であった。また、図-2 より、凍結融解 300 サイクルによる質量変化率は SFRC が  $-0.8\%$  生じたが、床版表面補強材は  $-0.1\%$  と小さいことがわかる。さらに、凍結融解 300 サイクル試験後の状態を図-3 に示すが、同図から、SFRC は表面変化状態が確認できるのに対して、床版表面補強材は変化が少ないことがわかる。以上のことから、床版表面補強材の凍結融解抵抗性のよさが確認できたといえる。

## 3. 試験施工

### 3.1 施工対象

床版表面補強材の適用は、図-4(a)に示す通り、舗装材の切削等でかぶりが減少した場合や RC 床版上面の塩害等による劣化で土砂化した部分への適用を想定している。劣化した床版上面に最低  $2\text{cm}$  の薄層での施工により床版厚さの増加がほとんどないため、伸縮装置部の取替えや、縦断勾配の擦付け等の工事が軽減できる。また、同図(b)に示す通り、コンクリート中空床版橋のかぶり不足対策として、表面に強度の高い補強層を施工することで延命化を図ることができると考えられる。



(a)床版表面補強材



(b)SFRC

図-3 凍結融解 300 サイクル試験後の状態

### 3.2 試験施工

床版表面補強材を図-5に示す長さ7.2m×幅3.0mのコンクリート舗装上に打設した<sup>8)</sup>。打設に際しては、ウォータージェットでコンクリート舗装表層の脆弱層を除去して均一な下地を作り、図-6(a)に示す接着剤の有無と養生方法を試験水準とした。床版表面補強材は水セメント比低減により流動性が低いため、図-6(b)に示す面型バイブレータによって敷き均しを行い、表面仕上げのみ左官コテで実施した。実施工においては、工事規模に応じて図-7に示すような簡易フィニッシャ等を用いる必要がある。施工厚さは20mmとし、各水準間に打継ぎは設けず連続施工とした。高強度モルタルの硬化直後にシート養生および樹脂系塗膜養生剤の塗布を行い、シート養生は6日後に撤去した。

### 3.3 付着試験結果

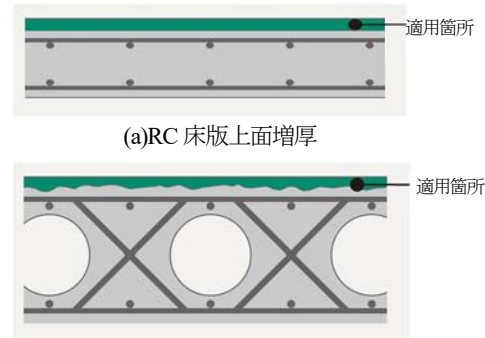
材齢6日における建研式付着試験の実施状況を図-8に、付着試験結果を表-2に示す。エポキシ樹脂を全面塗布した水準①および水準②はそれぞれ4.4N/mm<sup>2</sup>、4.6N/mm<sup>2</sup>と高い付着強度を示した。また、エポキシ樹脂の塗布を実施せず下地コンクリートに水湿しのみ実施した水準④は5.2N/mm<sup>2</sup>と、相対的に一番高い値を示した。一方、付着試験をエポキシ樹脂未塗布部で実施した水準③は平均値が一番低い3.5N/mm<sup>2</sup>となった。これは試験箇所による付着力のバラつきが大きいことが影響したと考えられる。破断位置は母材のコンクリート舗装内部、もしくは床版表面補強材の表層であった。

### 3.4 目視確認結果

目視確認は材齢6日と材齢100日、および650日で実施したが、いずれもひび割れ、浮き等の変状の発生は確認されなかった。床版表面補強材は2.3節で示した通り、自己収縮や乾燥収縮などの長さ変化が少なく、鋼繊維補強されていることもあり、施工後6日までの養生以外は日射や風雨にさらされた状態で放置していたが、ひび割れが生じなかったものと考えられる。

表-2 付着試験結果

水準 施工界面の処理 養生方法	n	付着強度 N/mm <sup>2</sup>		破断位置
		各値	平均	
① エポキシ樹脂全面接着 樹脂塗膜養生剤散布	1 2 3	4.6 3.7 5.0	4.4	床版表面補強材の表層 床版表面補強材の表層 母材コンクリート舗装内部
② エポキシ樹脂全面接着 シート養生	1 2 3	4.2 4.7 4.9	4.6	床版表面補強材の表層 床版表面補強材の表層 母材コンクリート舗装内部
③ エポキシ樹脂周辺部塗布 シート養生	1 2 3	3.7 6.0 0.7	3.5	母材コンクリート舗装内部 母材コンクリート舗装内部 補強材と母材コンクリートの界面
④ 水浸し シート養生	1 2 3	5.4 4.7 5.4	5.2	補強材と母材コンクリートの界面 床版表面補強材の表層 母材コンクリート舗装内部



(a)RC 床版上面増厚  
(b)中空床版橋のかぶり不足部  
図-4 床版表面補強材の適用

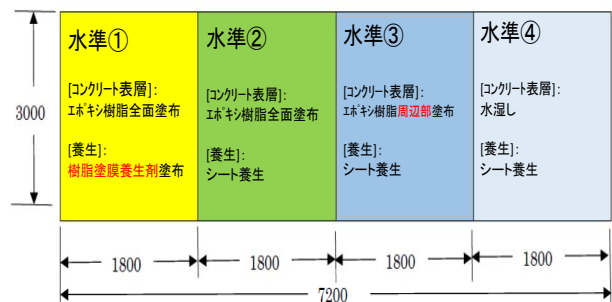


図-5 コンクリート舗装上の打設箇所



(a)接着剤塗布状態 (b)敷き均しと仕上げ  
図-6 試験施工状況



(a)練混ぜ後 (b)施工後  
図-7 簡易フィニッシャによる施工状況



図-8 付着試験実施状況



## 4. 曲げ載荷実験

### 4.1 実験供試体の製作

#### (1) 実験供試体

曲げ載荷実験を行う供試体を図-9に示す。実験供試体は、幅600mm、支間2000mm、健全床版の厚さは220mm、劣化床版の厚さは200mmおよび180mmとした。鉄筋はD16を125mmピッチで配置しており、D13のスターラップで囲むように配筋した。また、この3体の床版を載荷後、床版表面補強材で2cmの上面増厚による補強を実施して、再度載荷を行った。劣化床版に関しては、上面からの土砂化や舗装改良時の過切削による版厚減少を想定している。これらの供試体の材料諸元は表-3に示すとおりである。同表中の基盤コンクリートおよび床版表面補強材の強度は圧縮強度試験値(材令28日)である。

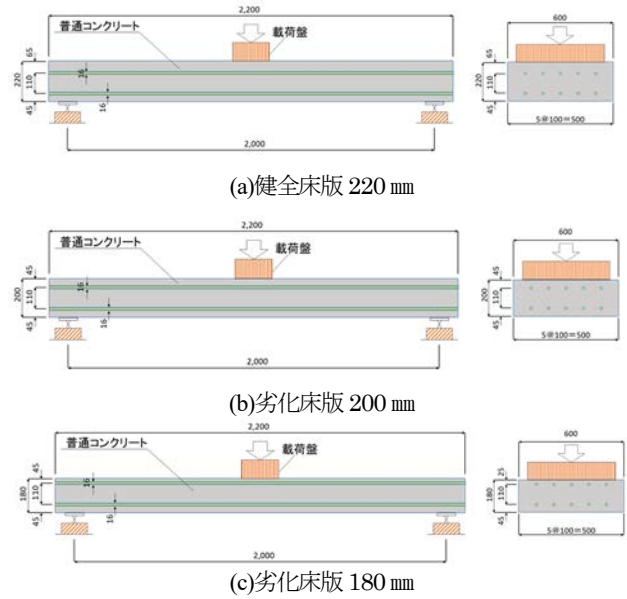


図-9 実験供試体

#### (2) 逆曲げ載荷

補強前の供試体載荷後、曲げた供試体を上面増厚するため、図-10に示す通り、供試体を裏返して逆曲げ載荷を行い、曲がっていた鉄筋をほぼ直線に戻して、供試体全体を水平な状態にした。この際に、上面のコンクリートは圧壊されており、鉄筋は水平にしたものの降伏による残留伸びが残った状態であり、曲げひび割れも閉じておらず、損傷が残っている状況にある。

#### (3) 下地処理

床版表面補強材の剥離防止措置として、供試体の施工面を均一な下地にするため、図-11(a)に示す通りウォータージェットによる下地処理を行った。ウォータージェットは200MPaの超高水圧によりコンクリート表層のレイタンス層および脆弱層の除去を行い、表面を均一化することができる。

#### (4) エポキシ樹脂の塗布

床版表面補強材施工前に図-11(b)に示す通り、曲げ載荷時に床版表面補強材の打設面付近で水平せん断破壊し、強度が低下することを防ぐ目的がある。その後、床版表面補強材で上面増厚を行った。

#### (5) 床版表面補強材打設

エポキシ樹脂の塗布後、床版表面補強材の打設を行った。パン型ミキサーで材料を練混ぜ、図-11(c)に示す面型パイプレーダーで敷き均し、最後に同図(d)に示す左官コテで平滑仕上げを行った。床版表面補強材の打設ではブリーディングの発生がないため、普通にコテで均すとしわができてしまう。これを改善するため少量の水を表面に散布しながら仕上げ作業を行った。

表-3 材料諸元

使用材料	強度(N/mm <sup>2</sup> )	割線弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )
基盤コンクリート	28.8	$2.9 \times 10^4$
床版表面補強材	99.8	$4.2 \times 10^4$
鉄筋	300	$2.00 \times 10^4$

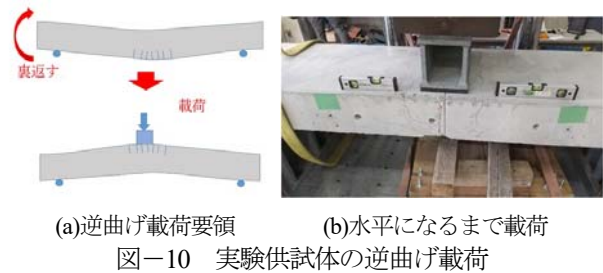


図-10 実験供試体の逆曲げ載荷



図-11 実験供試体の逆曲げ載荷

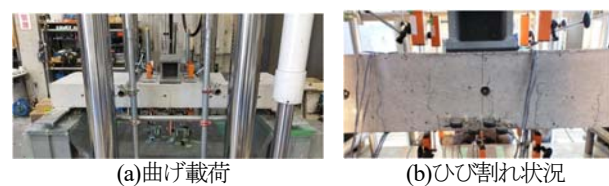


図-12 曲げ載荷実験

#### 4.2 曲げ載荷実験方法

載荷状況を図-12 に示す。載荷は、2mの床版支間中央に500mm×200mmの接地面で正曲げ載荷を、荷重制御による単調載荷で実施した<sup>7)8)</sup>。

計測位置は図-13に示すとおりであり、供試体中央直下の変位と、供試体中央付近上下面のひずみを計測している。また初期ひび割れ発生から初期降伏が起こるまで、10kN毎にひび割れに印をつけ、ひび割れの進展状況を確認した。

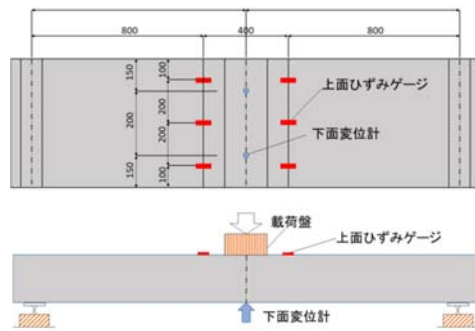


図-13 計測位置

#### 4.3 実験結果

曲げ載荷試験による荷重強度の結果を表-4にまとめて示す。曲げひび割れ発生後、一定の剛性で鉛直変位が増加し、ある荷重点において変位は急増する、この時の荷重を鉄筋降伏荷重と定義している。最後に、載荷実験における最大の荷重を示している。また補強床版は劣化床版を載荷後、床版表面補強材で補強した供試体を再度載荷しているため、一度鉄筋が降伏しているので降伏荷重の明確な数値が得られていない(表-4参照)。また、鉄筋降伏荷重や等価応力ブロック法<sup>9)</sup>による終局強度の計算値は、文献10)に示す方法で算出している。

同表の終局荷重実験値をみると、劣化床版は、2cm、4cmと薄くなると、健全床版に比べ強度が19%、62%と低下しており、床版の厚さが薄くなるほど著しく強度が低下していることがわかる。一方、床版表面補強材で2cmの上面増厚を行うことにより、劣化床版厚さ200mmを補修した補強床版の強度が46%、劣化床版180mmを補修した補強床版で63%、健全床版を補強した床版で37%、終局強度が改善することが明らかになった。

図-14に荷重-鉛直変位の関係を示す。変位は載荷点直下の2つの変位計の平均である。同図より床版が薄くなるほど最大荷重に至るまでの鉛直変位が著しく増加し、変形しやすいことがわかる。また補強床版の変形は元の床版よりも大きいですが、強度はよく増加している。補強床版180mmは、道路橋示方書<sup>11)</sup>より求められた設計荷重の3倍程度(健全床版と同等)の強度があり、劣化床版を補修する際に、2cmの上面増厚で元の床版の強度に戻っており、十分な補強効果があると考えられる。これは、道路橋の補修において、床版表面補強材の上面増厚を検討する上で重要な事項である。

#### 4.4 破壊状況

図-15に補強床版の破壊状況を示す。劣化床版と健全床版では、曲げ載荷により30~40kN付近で初期ひび割れが発生し、ひび割れが載荷点に向かって伸びていくとともに、終局段階で載荷点間のコンクリートが圧壊した。同様に補強床版においても、終局段階において載荷点間の床版表面補強材が圧壊により破壊している。これは、ウォータージェットによる下地処理とエポキシ樹脂接着剤の塗布により、コンクリート床版面と床版表面補強材

表-4 曲げ載荷実験結果

供試体	鉄筋降伏荷重(kN)			終局荷重(kN)		
	実験	計算	比	実験	計算	比
劣化床版220	134	136	0.98	189	159	1.19
劣化床版200	118	120	0.99	158	133	1.19
劣化床版180	94	105	0.89	124	106	1.17
補強床版220	劣化床版の鉄筋を降伏させた供試体の再載荷のため計測不能			260	220	1.18
補強床版200				232	293	1.20
補強床版180				190	165	1.15

注) 比は実験値/計算値より算出

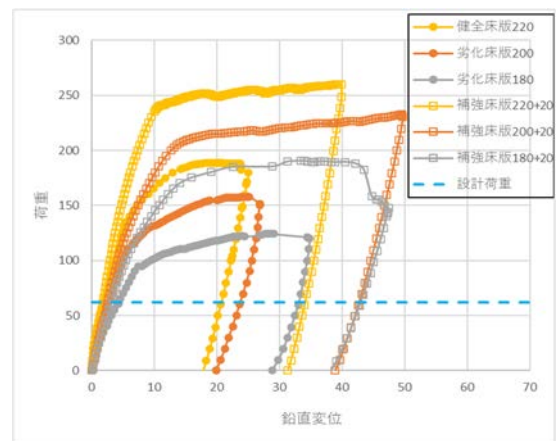


図-14 荷重-変位の関係



(a)補強床版180+20mm



(b)補強床版200+20mm



(c)補強床版220+20mm

図-15 補強床版の破壊状況

であるモルタル打設面が一体化しており、界面付近での水平せん断破壊を防ぐ効果あることが明らかになった。両者の接合面でエポキシ樹脂接着剤を用いなかったケースでは、水平せん断破壊が生じている<sup>5)6)</sup>。

## 5. まとめ

本研究の成果は以下のとおりである。

- (1) 鉄筋降伏荷重、および終局荷重の評価方法を示し、概ねよく一致することがわかった。
- (2) 2cm程度の薄層の床版表面補強材を上面増厚として施工すると、薄い床版ほど、補強効果が高くなることがわかった。
- (3) 健全床版より、4cm薄い劣化床版に2cm程度の薄層の床版表面補強材を上面増厚として施工すると、健全床版と同等の強度まで改善し十分な補強効果があることが明らかになった。
- (4) 劣化床版は、薄くなるほど著しく強度が低下することがわかった。
- (5) ウォータージェット下地処理とエポキシ樹脂の塗布をすることにより基盤コンクリートと上面増厚の接着部付近の水平せん断によるずれを防ぐことができた。

## 謝辞

本研究を遂行するに際して、高速道路総合技術研究所の方々から貴重なご意見を頂きました。感謝致します。

## 参考文献

- 1) 三田村浩, 今井隆, 松井繁之: 道路橋床版補修に適する超緻密高強度繊維補強材料の開発, 土木学会年次学術講演会, Vol.70, CS10-030, 2015.9
- 2) 松井繁之編著: 道路橋床版の長寿命化技術, 森北出版, 2016.9
- 3) 岩本康平, 松田浩, 森田千尋, 上坂康雄, 岡村哲夫: RC 床版補修・補強材料としての超緻密高強度繊維

補強コンクリートの材料物性に関する研究, 土木学会年次学術講演会, Vol.71, V-112, 2016.9

- 4) 植田健介, 三田村浩, 真鍋英規, 馬場弘毅: 松島橋床版補修工事における超緻密高強度繊維補強コンクリートの適用事例報告, 土木学会 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2018.11
- 5) 大垣賀津雄, 鈴木仁士, 中島裕, 大久保藤和, 石田学, 広瀬剛, 豊田雄介: RC 床版表面における高強度緻密モルタルの適用に関する基礎実験研究, 土木学会 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2018.11
- 6) 関貴悠, 大垣賀津雄, 中島裕, 赤江信哉, 石田学, 原田拓也, 豊田雄介: 高強度高靱性緻密モルタルの床版上面不陸調整層への適用性能に関する実験研究, 土木学会年次学術講演会, Vol.74, I-356, 2019.9
- 7) 渡邊健也, 大垣賀津雄, PHAMNGOC VINH, 石田学, 赤江信哉: 劣化させた RC 床版の高強度緻密モルタルによる補強に関する実験的研究, 土木学会第14回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2021.11
- 8) 石田学, 赤江信哉, 大垣賀津雄, 柴崎晃, 服部雅史, 長谷俊彦: RC 床版表面における薄層の高強度高靱性緻密モルタルの試験施工, 土木学会年次学術講演会, Vol.76, I-248, 2021.9
- 9) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.3
- 10) 大垣賀津雄, 星名誉紀, 柴崎晃, 原田拓也, 長谷俊彦, 赤江信哉, 石田学: 上面増厚および下面 CFRP 接着により補強した RC 床版の曲げ強度に関する実験研究, 土木学会第8回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2020.11
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説I共通編II共通編, 平成24年3月

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)