

(62) 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

渡邊 健也¹・大垣 賀津雄²・PHAM NGOC VINH³
石田 学⁴・赤江 信哉⁵

¹学生会員 ものづくり大学院 ものづくり研究科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)
E-mail: g02121007@iot.ac.jp

²正会員 ものづくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

³正会員 ものづくり大学特任講師 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)
E-mail: pnvinh@iot.ac.jp

⁴正会員 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)
E-mail: manabu-ishida@taiheiyo-m.co.jp

⁵正会員 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)
E-mail: shinya-akae@taiheiyo-m.co.jp

RC床版は過積載車両の通行や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浸入する過酷な環境下において、水平ひび割れやRC床版上面付近の土砂化といった、上面からの経年劣化が生じることが明らかになってきている。その補修対策の一つとして、床版の上面増厚工法が実施されている。本研究では健全なRC床版、健全床版より2~4cm上面が薄い床版（以下、劣化床版と呼ぶ）、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を、鋼繊維補強高強度緻密モルタルを上面に合成して補強したRC床版を製作し、それぞれに静的曲げ載荷実験を行った。これらの結果と、補強後の合成構造を考慮した等価応力ブロックなどによる計算方法も提示し、両者を比較したものである。

Key Words : *Bending Strength, RC Slab, Topthickening, UHPFRC*

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工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厚が不足するなどの状況にある。また、切削痕等で付着性が低下し、供用後に舗装損傷などの不具合による防水性能低下が懸念される。また過切削による床版厚さの減少は鉄筋応力の増加とともに疲労耐久性の低下を引き起こすと考えられる。

このような状況の中で、床版表面の不陸調整材料として緻密高強度超繊維補強材料を用いれば、防水性能も期待できるとの報告がある¹⁾⁴⁾。そこで、床版表面に高強度緻密モルタルを施工し、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ことを実験で明らかにし、等価応力ブロック法等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⁵⁾⁷⁾。

本文ではさらに、健全なRC床版、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を、鋼繊維補強高強度緻密モルタルを上面に補強したRC床版を製作し、それぞれ静的曲げ載荷を行った⁸⁾。本文では、これらの載荷実験結果と、補強後の合成構造を考慮した等価応力ブロックなどによる計算方法を用いて比較している。

2. 上面増厚材概要

上面増厚材として鋼繊維補強高強度緻密モルタルを用いた。これは、従来のモルタルと比べ水セメント比を大幅に削減した配合で超高強度化を実現しているため、セメント硬化体の乾燥収縮に起因するひび割れが抑制される。併せて、セメント硬化体が緻密に形成されているため、高い防水性および耐久性を有している。

表-1に鋼繊維補強高強度緻密モルタルの物性を示す。

同表より高強度緻密モルタルは、 $90\text{N}/\text{mm}^2$ を発現する超高強度特性をもち、厚さ20mmの薄層上面増厚での床版の補強を可能にしている。これにより、死荷重増加の抑制や路面が高くなることで生じる伸縮装置の取り替え工事がなくなる。

また、3時間で強度約 $27\text{N}/\text{mm}^2$ と高い速硬性、鋼繊維（ドラミックス）の配合により引張応力が作用する場合において高い抵抗性を示している。

3. 曲げ載荷実験

(1) 実験供試体

曲げ載荷実験を行う供試体を図-1に示す。実験供試体は、幅600mm、支間長2000mm、健全床版厚さは220mm、劣化床版厚さ200mm、および180mmとした。主鉄筋は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、上述した3体の床版を載荷後、鋼繊維補強高強度緻密モルタルで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。基盤コンクリート材の圧縮強度は $28.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、割線弾性係数は $2.9 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ である。また、鉄筋SD295の降伏点は $300\text{N}/\text{mm}^2$ である。

(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前に、図-2に示す通り供試体を反転させて逆曲げ載荷を行い水平に戻した後、再度反転させてから上面増厚施工を行った。

(3) 下地処理

高強度緻密モルタルのはく離防止措置として、供試体の施工面の脆弱な部分を除去して健全な下地にするため、図-3(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。この下地処理は、 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、表面を粗面で均一化するものである。

表-1 鋼繊維補強高強度緻密モルタルの物性

試験項目	材齢	試験結果
フロー値(15打)	—	175mm
単位容積質量	—	2.32kg/L
凝結時間	始発	72分
圧縮強度	3時間	$26.7\text{N}/\text{mm}^2$
	1日	$56.4\text{N}/\text{mm}^2$
	7日	$80.7\text{N}/\text{mm}^2$
	28日	$99.8\text{N}/\text{mm}^2$
静弾性係数	28日	$42.2\text{N}/\text{mm}^2$
曲げ強度	28日	$15.0\text{N}/\text{mm}^2$
曲げ靱性係数	28日	$5.0\text{N}/\text{mm}^2$
長さ変化	28日	-374 μ
塩化物浸透深さ	26W	3.0mm
凍結融解抵抗性	300サイクル	101.5%

注) 表中の数値はカタログ値である

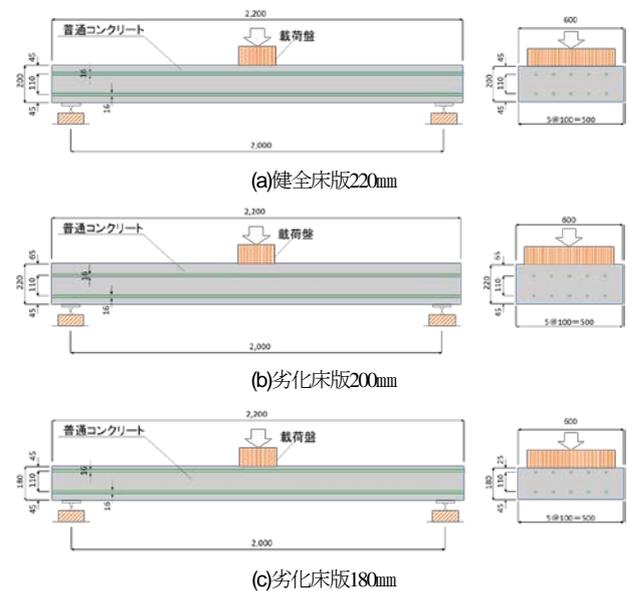


図-1 実験供試体

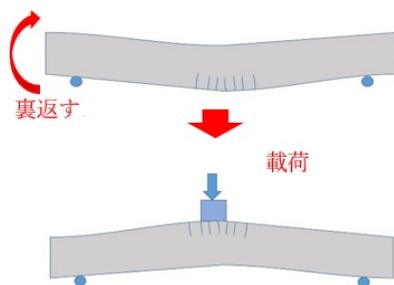


図-2 逆曲げ載荷

(4) エポキシ樹脂の塗布

曲げ載荷実験において、鋼繊維補強高強度緻密モルタルの打設面付近で水平せん断破壊し、強度低下することが考えられる。このようなことを防ぐ目的で、高強度緻密モルタル施工前に図-3(b)に示す通り、エポキシ樹脂接着剤の塗布を行った。

(5) 鋼繊維補強高強度緻密モルタル打設

エポキシ樹脂の塗布後、高強度緻密モルタルの打設を行った。パン型ミキサーで材料を練り混ぜ、面型パイプリーダーで敷き均し(図-3(c))、最後に左官コテで平滑仕上を行った(図-3(d))。高強度緻密モルタルの打設ではブリーディングの発生がほとんどないため、普通に均すとシが出来てしまう。これを改善するためごく少量の仕上げ水を表面に散布しながら均しを行った。

(6) 載荷方法

載荷状況を図-4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。

計測位置は図-5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。

4. 実験結果

(1) 終局強度

曲げ載荷実験による荷重強度の結果を表-2にまとめて示す。同表中のひび割れ発生荷重は、50mm間隔に並べた9個のπ型変位計のいずれかの値が急激に増加したときの荷重である。また、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が急増する、この時の荷重を鉄筋降伏荷重と定義している。最後に、表中の終局荷重は載荷実験における最大の荷重値を示している。また補強床版は劣化床版を載荷後、補強を行い再度載荷をしているため、ひび割れ発生荷重と鉄筋降伏荷重の明確な数値が得られていない(表-2参照)。

同表の終局荷重をみると、劣化床版は、2cm、4cmと薄くなるにつれて、健全床版に比べて強度がそれぞれ84%、64%に低下しており、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、鋼繊維補強高強度緻密モルタルで2cmの上面増厚を行うことにより、劣化床版180mmを補修した補強床版で164%に、劣化床版厚さ200mmを補修した補強床版の強度が147%に、健全床版を補強した床版で138%、終局強度が改善することが



図-3 下地処理, 樹脂の塗布, 敷き均し, コテ仕上げ



図-4 載荷状況

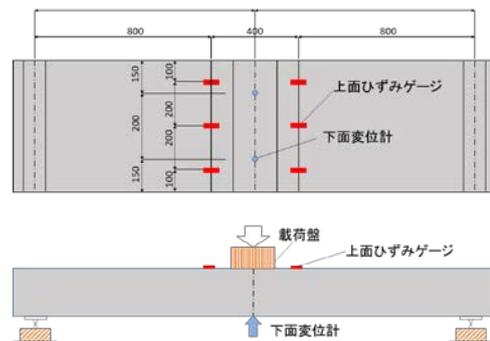


図-5 計測位置

表-2 曲げ載荷実験結果 (単位: kN)

供試体	ひび割れ荷重	鉄筋降伏荷重	終局荷重
健全床版 220	40	134	189
劣化床版 200	35	118	158
劣化床版 180	30	94	116
補強床版 220	再載荷のため計測不能		260
補強床版 200	再載荷のため計測不能		232
補強床版 180	再載荷のため計測不能		190

明らかになった。

(2) 変形性能

図-6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。また補強床版の剛性は向上しており、変形性能は元の劣化床版よりも大きく強度はよく増加している。補強床版180+20mmは、道路橋示方書⁹⁾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もどり、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、鋼繊維補強高強度緻密モルタルの上面増厚を検討する上で重要である。

図-7に荷重-ひずみの関係を示す。ひずみは、供試体中央近傍上面2点のひずみの平均である。同図から補強床版のひずみは補強前の床版のひずみより減少しており、補強後の剛性が向上していることから、補強効果があることを確認できる。

(3) 破壊状況

図-8、9に劣化床版と健全床版および補強床版の破壊状況を示す。劣化床版と健全床版では、曲げ荷重により30~40kN付近で初期ひび割れが発生し、ひび割れが載荷上方に向かって伸びていくとともに、終局段階で載荷点付近のコンクリートが圧壊した。同様に補強床版においても上面の高強度緻密モルタルの圧壊が生じている。

このように上面増厚材が水平せん断破壊せずに、終局段階において載荷点付近の上面増厚材の圧壊による終局

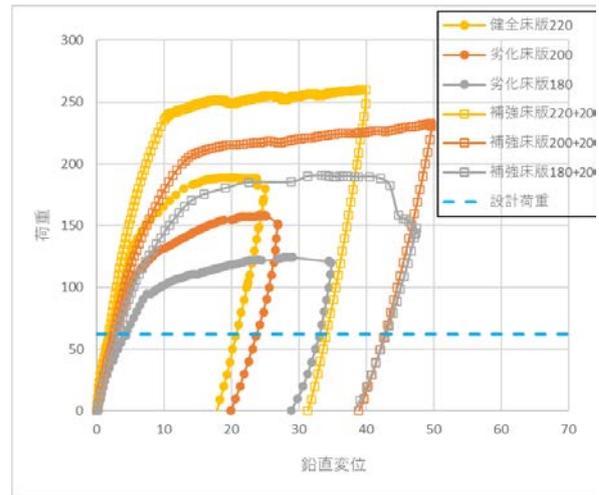


図-6 荷重-鉛直変位の関係

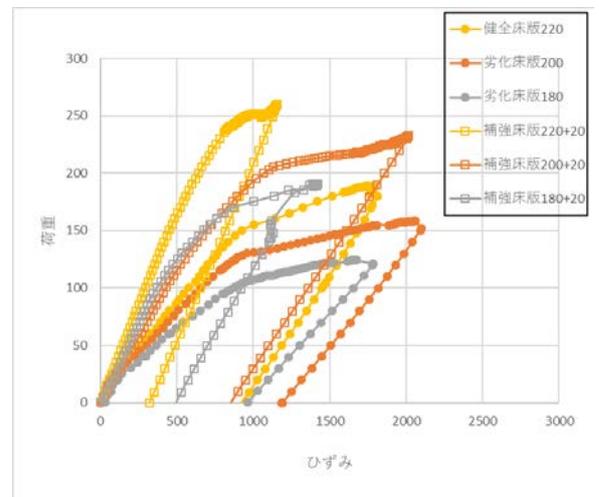


図-7 荷重-ひずみの関係



(a)劣化床版180mm



(b)劣化床版200mm



(c)健全床版220mm

図-8 劣化床版・健全床版破壊状況



(a)補強床版180+20mm



(b)補強床版200+20mm



(c)補強床版220+20mm

図-9 補強床版破壊状況

状態を迎えることが確認された。このことから、ウォータージェットによる下地処理とエポキシ樹脂の塗布により、モルタル打設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。

5. 実験値と計算値の比較

(1) 計算による評価方法

計算に使用した基盤となる鉄筋コンクリートの材料諸元を表-3に、上面増厚材の材料諸元を表-4に示す。表-3、4に示す値は文献10)を参考に与えたものである。また強度は圧縮試験の結果を参考にしている。図-10に供試体分担力を示す。供試体の初期ひび割れ荷重および鉄筋降伏荷重は、供試体断面の力のモーメントと載荷荷重 P の力のつり合いから下式(1)により求められる。

$$P = -M_c + M_t \quad (1)$$

ここに、 M_c :断面(圧縮側)の力のモーメント

M_t :断面(引張側)の力のモーメント

併せて、終局段階における供試体分担力は、図-11により等価応力ブロック法を適用して求められる⁷⁾。これにより、終局段階の載荷荷重と終局モーメントのつり合いから終局荷重を下式(2)により算定する。

$$P_{ucal} = 2M_{ucal} \quad (2)$$

ここに、 P_{ucal} :終局段階の載荷荷重、 M_{ucal} :終局モーメント

また図-6における設計荷重は文献9)を参考に求めたものである。供試体の支間長 $L=2m$ 、 $0 < L \leq 4$ から車両進行方向に直角な主鉄筋方向の曲げモーメントは、下式(3)により求められる。

$$M = (0.12L + 0.07) P = 31 \text{ kN}\cdot\text{m/m} \quad (3)$$

供試体の曲げモーメントは、 $M = P \cdot L/4$ であり、従って設計荷重 P_l は下式(4)により求められる。

$$P_l = M \cdot 4/L = 2M = 62 \text{ kN} \quad (4)$$

(2) 初期ひび割れ発生荷重

ひび割れ発生荷重について、実験で得られた値と上述の計算から得られた値を表-5に比較した。両者は比較的良好に一致しており、上述の計算で評価できることがわかった。

(3) 鉄筋降伏荷重

鉄筋降伏荷重について、実験で得られた値と上述の計算から得られた値を同表に比較した。両者の比は0.89～0.99であり、実験値が計算値よりやや小さいが、比較的良好に一致しているといえる。実験値のほうが小さくなる理由として、ひび割れ発生位置におけるひび割れ幅の広

表-3 基盤鉄筋コンクリート床版の材料諸元¹⁰⁾

項目	記号	単位	適用値
供試体の幅	B	mm	600
鉄筋のヤング係数	E_s	N/mm ²	2.0×10^5
鉄筋の降伏点	f_{ys}	N/mm ²	362
圧縮鉄筋断面積×本数	A_{dt}	mm ²	198.6×5
引張鉄筋断面積×本数	A_{dl}	mm ²	198.6×5
圧縮鉄筋かぶり	d'_u	mm	5-45
引張鉄筋かぶり	d'_l	mm	45
コンクリートの設計基準強度	f_{ck}	N/mm ²	24
コンクリートのヤング係数	E_c	N/mm ²	2.9×10^4
コンクリート曲げひび割れ強度	f_{tk}	N/mm ²	3.11
コンクリート強度低減係数	k_{fc}	—	0.85
コンクリートの圧縮強度	$k_{fc} f_{ck}$	N/mm ²	28.8
コンクリートの終局ひずみ	ϵ'_{cu}	μ	3500
等価応力ブロック係数	β	—	0.72, 0.80
終局段階の有効高さ	$\beta x - h_m$	mm	29.36-44.32

表-4 上面増厚材の材料諸元

項目	記号	単位	適用値
圧縮試験強度	f_{cm}	N/mm ²	90
ヤング係数	E_m	N/mm ²	3.8×10^4
強度低減係数	k_{fm}	—	0.73, 0.85
終局ひずみ	ϵ'_{cu}	μ	2500
等価ブロック係数	β	—	0.72, 0.80

注) 表中の数値は材齢28日の試験結果によるものである

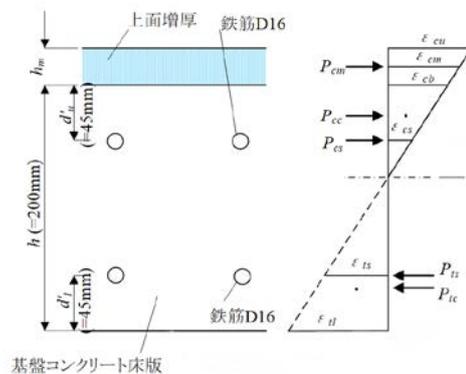


図-10 供試体断面の分担力

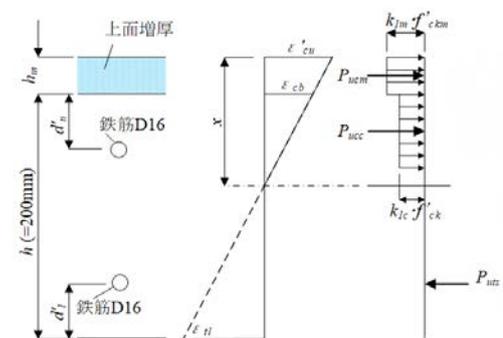


図-11 等価応力ブロック法による終局段階の分担力

表-5 実験と計算の比較結果

供試体	ひび割れ荷重			鉄筋降伏荷重			終局荷重		
	実験kN	計算kN	比	実験kN	計算kN	比	実験kN	計算kN	比
劣化床版 220	40	39	1.02	134	136	0.98	189	159	1.19
劣化床版 200	35	34	1.04	118	120	0.99	158	133	1.19
劣化床版 180	30	28	1.07	94	105	0.89	116	106	1.17
補強床版 220	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

がりにより、鉄筋が局所的に計算値よりも早く降伏したことが考えられる。

(4) 終局荷重

載荷実験における最大荷重と上述の等価応力ブロック法による計算値を同表に比較した。両者の比は 1.15～1.20 であり、実験値が計算値よりやや高いが比較的良好一致しているといえる。またそれぞれの供試体の比に大きな誤差がないことから、基盤コンクリートおよび上面増厚材の実強度が計算上で評価した強度より少し高くなっており、安全側の評価ができるようにしていることが主な原因と考えられる。

6. まとめ

本研究の成果は以下のとおりである。

- (1) 劣化床版は薄くなるほど著しく曲げ強度が低下することがわかった。
- (2) ウォータージェットによる下地処理とエポキシ樹脂の塗布を行うことにより、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。
- (3) 2cm程度の薄層の鋼繊維補強高強度緻密モルタル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。
- (4) 4cm薄い劣化床版（厚さ180mm）破壊後に2cm程度の薄層の高強度緻密モルタル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。
- (5) ひび割れ発生荷重、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。

今後の課題は、以下のとおりである。

- ・試験施工による施工性や品質の確認

- ・RC 補強床版の補強に関する設計・施工マニュアルの整備。

謝辞：本研究にこの実施に際して、ものづくり大学橋梁・構造研究室の平井遥嘉君他、協力いただいた皆様に心より感謝いたします。

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, 大垣, 中島, 赤江, 石田, 原田, 豊田: 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) 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, 第 8 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2020.11
- 8) 柴崎晃, 原田拓也, 長谷俊彦, 大垣賀津雄, 星名誉紀, 赤江信哉, 石田学: 各種上面打替と CFRP による RC 床版の曲げ補強に関する実験研究, 土木学会年次学術講演会, Vol.75, V-346, 2020.9
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説I共通編II鋼橋編, H24.3
- 10) 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

(Received September 10, 2021)

EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCEMENT OF DETERIORATED RC SLAB WITH HIGH STRENGTH DENSE MORTAR

Tatsuya WATANABE, Kazuo OHGAKI, Ngoc Vinh PHAM,
Shinya AKAE and Manabu ISHIDA

RC slabs are affected by the passage of overloaded vehicles and the increased use of antifreeze agents, and are in a harsh environment where water and salt infiltrate into the slab, causing horizontal cracks and sedimentation near the top of the RC slab. It has become clear that aging deterioration occurs from the top surface. As one of the repair measures, a method of thickening the upper surface of the slab is being implemented. In this study, a healthy RC slab, a slab whose upper surface is 2 to 4 cm thinner than a healthy slab (hereinafter referred to as a deteriorated deck), and a deteriorated slab are bent and loaded, causing cracks on the lower surface and crushing the upper surface. After reaching the final state, RC slabs reinforced by synthesizing steel fiber reinforced high-strength dense mortar on the upper surface were manufactured, and static bending loading experiments were conducted for each. We also present these results and a calculation method using equivalent stress blocks that take into account the composite structure after reinforcement, and compare the two.