

論文

鋼床版実大試験体上面に敷設した SFRC 舗装接合面の 引張強度の経年変化に関する調査

佐藤歩*, 佐々木寛幸**, 村越潤***, 小野秀一****, 森猛*****

*工修, (国研) 土木研究所, 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

**工修, 新日本技研(株), 東京支社, 設計部 (〒105-0014 東京都港区芝 2-1-23)

***工博, 首都大学東京大学院教授, 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

****工博, (一社) 施工技術総合研究所, 研究第二部 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

***** 工博, 法政大学教授, デザイン工学部都市環境デザイン工学科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

既設鋼床版の疲労対策として, 既存のアスファルト舗装を鋼繊維補強コンクリート舗装に置き換える対策工法が広く適用されている. その中には, 既に 10 年以上が経過している事例も存在し, 接着材接合面の強度・耐久性に関して経年的な変化を調査していくことが重要と考えられる. 本稿では, SFRC を敷設し, 輪荷重走行試験を実施してから約 8 年経過した実大鋼床版試験体を対象に, 接着材接合面の引張強度の経年的な変化を調査した結果について報告する.

キーワード: SFRC 舗装, 接合面, 接着層, 引張強度, 経年変化

1. はじめに

交通条件の厳しい鋼床版橋において輪荷重直下の溶接各部に疲労損傷が報告¹⁾されている. このうち, 閉断面リブ (以下, U リブ) を有する鋼床版のデッキプレート (以下, デッキ) と U リブの溶接部に発生している主な疲労き裂としては, U リブとデッキの片側すみ肉溶接のルート部に発生しデッキ表面に至るき裂と, 溶接ビード内に進展しビードを貫通するき裂の 2 種類のき裂が挙げられる.

これらのき裂に対して, 既存のアスファルト舗装を剛性が高くかつ比重のほぼ変わらない鋼繊維補強コンクリート (以下, SFRC : Steel Fiber Reinforced Concrete) 舗装に置き換える対策工法が提案され, 約 10 年前から既設鋼床版に広く適用されている²⁾. この工法では, SFRC を接着材によりデッキと接合させており (以下, 接合面), これまでも舗装体や接合面の強度特性に関して, ひび割れからの水の浸入や輪荷重の繰り返しによる影響も含めて輪荷重走行疲労試験や接合面を模擬した供試体の強度試験等により確認が行われている^{2,3)}. SFRC 舗装及び接合面には輪荷重の移動荷重に伴い, 荷重位置に応じて, せん断力, 圧縮力, 引張力が作用する. 著者らは, 同工法の実橋への適用にあたって, 耐久性に係る信頼性を確保するために, 材料 (接着材, SFRC) の組合せを考慮して,

少なくともせん断及び引張試験 (接合面を対象), 輪荷重走行試験 (接合面と SFRC 舗装体を対象) の 3 種の試験を行うことにより, 接合面の強度と SFRC 舗装自体の耐久性を確認することの必要性を示している³⁾.

一方, 現場における様々な条件に対して十分な強度や耐久性を有していることを確認することは容易ではなく, 強度・耐久性に関して経年的な変化を調査していくことが重要と考えられる. 著者らは, 過年度に実大鋼床版試験体上に SFRC 舗装を施工した上で輪荷重走行試験を実施するとともに, 試験後約 2 年が経過した時点で, 接合面を対象にコア抜きによる引張試験³⁾ (以下, コア抜き引張試験) を実施しており, 有意な強度低下がないことを確認している. コア抜き引張試験は, 実橋及び実大鋼床版試験体において, 接合面の強度を計測する上で, 実務的かつ比較的容易に実施できる試験方法法である.

本稿では, SFRC 舗装を敷設し, 輪荷重走行試験後約 8 年経過した同試験体 (以下, 既存試験体) でコア抜き引張試験を実施した結果について報告する. また, 別途実施した小型試験体の引張強度試験結果⁴⁾と比較し, 環境負荷と経年劣化の関連性について考察した結果を併せて報告する.

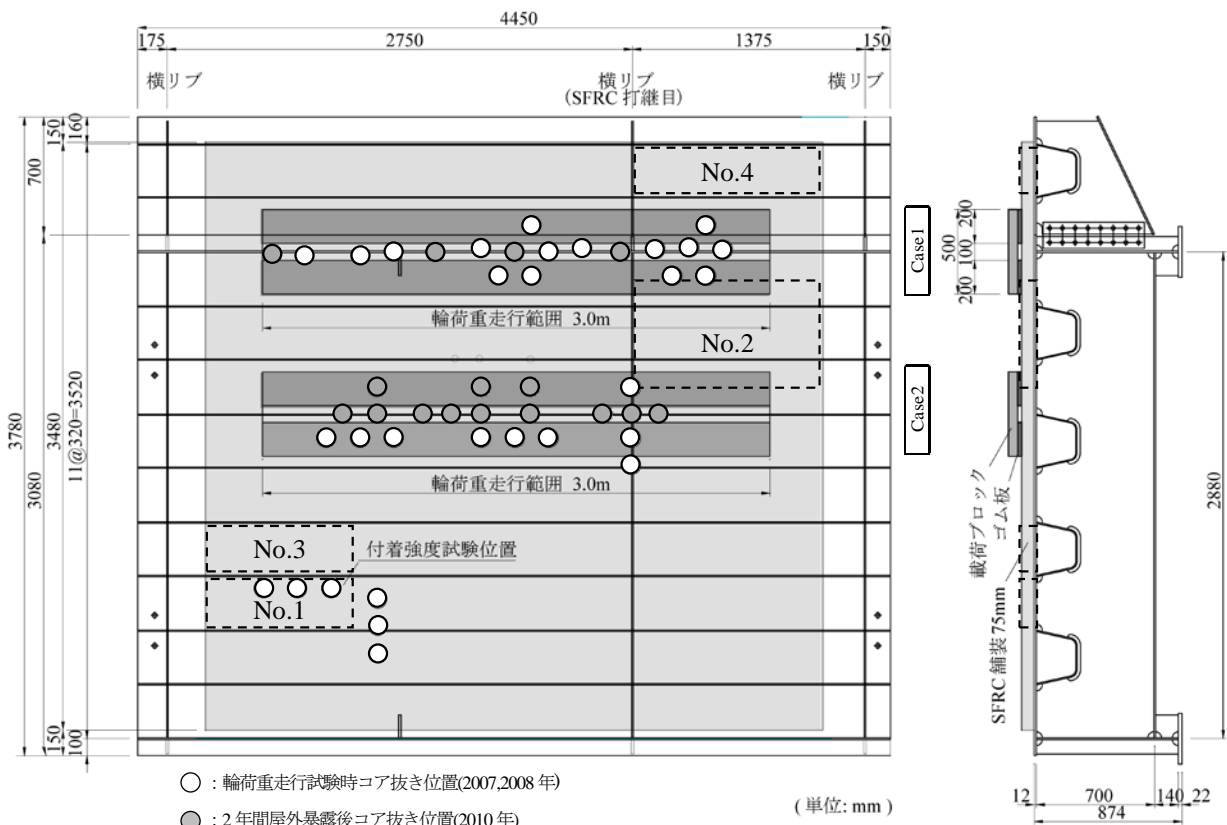


図-1 既存 SFRC 舗装敷設鋼床版試験体の形状及び切り出し試験体 (No.1~4 の破線枠) の採取位置

表-2 既存試験体の SFRC 配合条件

セメントの種類	コンクリート					鋼繊維		
	設計基準圧縮強度 (3時間)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	寸法	使用量 (kg/m ³)
超速硬セメント	24N/mm ²	40	50.1	5.0±1.5	3.0±1.5	13	φ 0.6×30mm	100

2. 既存試験体の概要

対象とした既存試験体は2007年10月に製作し、2007年12月から2008年3月にかけて輪荷重走行試験を実施したものである。当時の試験体の形状寸法を図-1に示す。鋼種はSM490Yである。プラスト工法によりデッキの素地調整を行った後に、表-1に示す接着材を塗布し、SFRCを試験体のほぼ全面に厚さ75mmで敷設した。SFRCの配合仕様と使用材料は表-2のとおりである。超速硬セメントを使用して材齢3時間で24N/mm²の圧縮強度が得られるSFRCを現場用コンクリートプラントで製造した。SFRCの圧縮強度は、27N/mm²(材齢3時間)、51N/mm²(材齢7日)であった。試験ケースは、主桁により支持される鋼床版上のSFRC舗装に負曲げが作用する場合(Case1)と正曲げが作用する場合(Case2)の2ケースとし、両ケースにおいて舗装上に水張りをした状態を含め200万回の輪荷重150kN载荷を実施している。試験時及び試験終了直後に、コア抜き引張試験を

表-1 接着材の性状及び硬化後の材料物性

項目	主剤	硬化剤
主成分	エポキシ樹脂	脂肪族ポリアミン
外観	白色ペースト状	青色液状
混合比	主剤:硬化剤=5:1(質量比)	
硬化物比重	1.40±0.20 (JIS K 7112)	
圧縮強さ	50 N/mm ² 以上 (JIS K 7181)	
圧縮弾性係数	1.0x10 ³ N/mm ² 以上 (JIS K 7181)	
曲げ強さ	35 N/mm ² 以上 (JIS K 7171)	
引張せん断接着強さ	10 N/mm ² 以上 (JIS K 6850)	

実施したが、すべての試験箇所のコアにおいてSFRC内で破壊が生じており材質破壊であり、かつ、輪荷重の載荷部、非載荷部での特段の強度差は見られなかった。その後、土木研究所敷地内に約2年間屋外暴露した後(2010

年7月)に、図-1に示す位置においてコア抜き引張試験を実施し、屋外暴露後においても有意な強度低下がないことを確認している³⁾。なお、輪荷重走行試験時及び試験終了直後は、非載荷部と輪荷重走行位置でコア抜き引張試験を実施し、屋外暴露後は、輪荷重走行位置で実施している。

その後、2010年7月に同試験体よりSFRC舗装とデッキを含む一部分をカッターで切り出した試験体4体(図-1破線部)が土木研究所実験棟内に約5年間保管されている状況である。なお、実験棟内保管期間において、切り出し試験体デッキ下面温度を一定期間計測し、その時の外気温との関係から、切り出し試験体デッキ下面の温度履歴を推定したところ、最高温度約27℃、最低温度約12℃であった。都市内高速道路におけるSFRC舗装内部(デッキ上面から10mm上)での温度計測結果²⁾では、高温側は約50℃、低温側は約-2℃であり、計測位置による違いはあるが、実験棟保管期間中に切り出し試験体が受けた温度変化の繰り返しによる環境負荷は、実橋に比べて小さかったと考えられる。使用した接着材のガラス転移点温度は約56℃であり⁴⁾、前述のとおり、試験体を切り出した2010年7月以降、試験体の接合面及びSFRC内部の温度がガラス転移点温度を超えることはなかったと推定される。一方で、ガラス転移点温度を超えない場合においても、温度変化の繰り返しによる負荷や、ひび割れ等からの水の浸入により接合面の強度が低下する可能性があることが示されており³⁴⁾、本試験体においても経年劣化の可能性を把握することを目的として、コア抜き引張試験を実施した。

3. 試験方法

試験状況を写真-1に示す。試験方法は、過年度に実施したコア抜き引張試験³⁾と同じとし、コアカッターを用いてφ100mmの切り込みをデッキ上面に達するまで入れ、毎秒0.1N/mm²の載荷速度で荷重を載荷し、デッキとSFRC舗装の接着接合面が破壊するまで試験を行い、破壊時荷重を計測した。

過年度のコア抜き引張試験は、輪荷重走行試験時(室温11~28℃)と、2年間屋外暴露後(外気温24~25℃)に実施した。今回の試験では、試験時温度をパラメータとし、恒温室で試験体が所定の温度になるまで1日以上保管し、常温(20℃)での引張試験を主体に行うとともに、高温(50℃)、低温(-10℃)を追加した計3ケースを実施した。試験体数は、各ケースにつき6体とした。

4. 試験結果と考察

試験結果を表-3に示す。また、試験後のコアの破断面状況の例を写真-2に示す。



写真-1 試験状況

表-3 コア抜き引張試験結果

No.	試験体 No.	試験時 温度	試験時 湿度	引張強度 (N/mm ²)	破壊位置の 面積割合※ (%)
1-1	1	20℃	17.0%	2.93	98
1-2				2.29	95
1-3				2.29	95
2-1	2			2.62	97(96)
2-2				2.04	97(95)
2-3				2.06	95(94)
3-1	3	-10℃	51.7%	3.31	95
3-2				2.68	100
3-3				2.68	91
3-4				3.31	94
3-5				3.69	91
3-6				3.69	94
4-1	4	50℃	23.8%	2.29	100
4-2				2.17	98
4-3				2.04	97
4-4				2.17	97
4-5				1.91	99
4-6				1.78	89

※ No.2-1~2-3については、デッキ側の面積割合を()内に記載

(1) 試験時温度による比較

試験時温度毎の引張強度の関係を図-2に示す。試験時温度が高温になるにつれて、引張強度は低下する傾向にある。写真-2より、コア側とデッキ側ともに概ねコンクリート面が観察できる。また、使用している接着材は青色であり、破断面に存在していればその部分が青く見られることになる。コア側において、破断面全体の面積のうち接着材が付着していない部分の面積の割合(以下、面積割合)を表-1中に示す。接着材の破壊性状は、その破壊位置により、一般に界面破壊(接着材と被着体との界面で破壊)、凝集破壊(接着層内で破壊)、材質破壊(被着体内で破壊)の状態に分類される³⁾。本研究では、文献3)を踏まえて、破壊面での材質破壊(接着層に沿ったSFRC内での破壊)の面積割合が100%に近い場合に被着体と同等以上の強度が得られていると考え、良

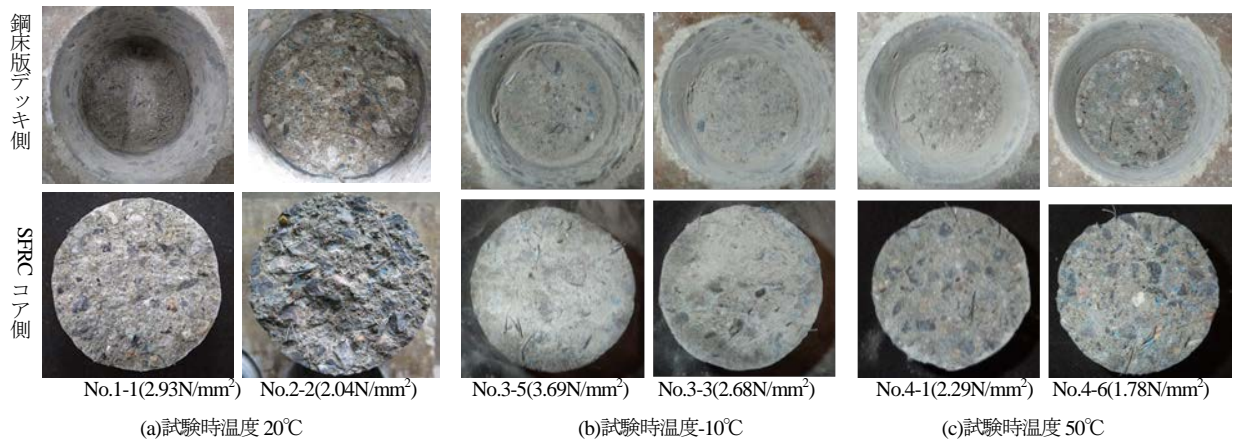


写真-2 試験後のコアの破断面状況の例 (各ケースのうち引張強度が最大と最小の試験体)

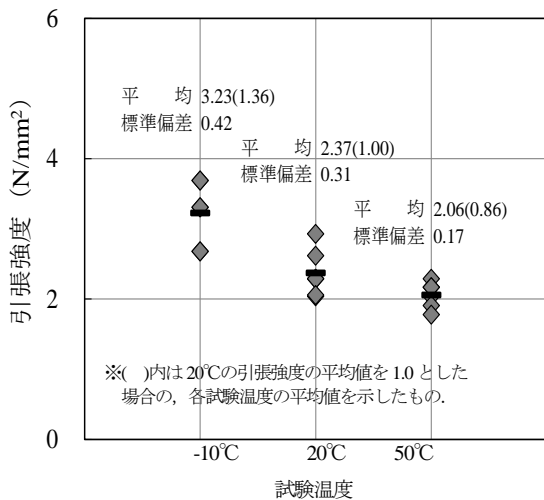


図-2 試験時温度毎の引張強度

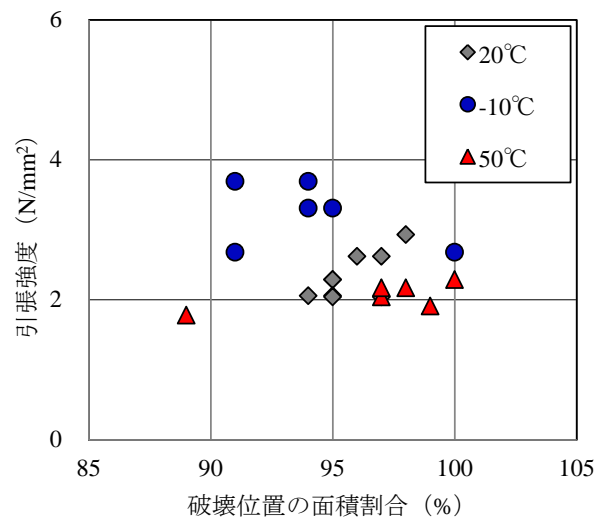


図-3 引張強度と破壊位置の面積割合の関係

好な接着性能を有していることの目安とした。

そこで、破断面の外観を写真撮影し、CAD上で接着材の面積を抽出することにより、破断面の接着材及びSFRC部分の面積割合を算出した。ほとんどの破断面には接着材の点が見られ、接合面からわずかにSFRC側に入った部分(接合面に接するSFRC部分もしくはSFRCと接着材の混合部分)で破壊している。したがって、温度増加とともに強度は低下傾向にあるが、少なくとも強度自体は接合面近傍のSFRC部分の強度に依存している可能性があると考えられる。

No.2-1~2-3については、デッキ側破断面の面積割合も算出したところ、コア側とデッキ側の面積割合と接着材の点在位置について概ね一致しており、接着材点在箇所については、接着材の凝集破壊が生じたものと考えられる。

図-3に引張強度とコア側のSFRC部分の面積割合の関係を示す。データが少ないため明確ではないが、20°C

の場合にはSFRC部の面積割合と引張強度には相関性が見られ、また、温度増加とともに破壊面積におけるSFRC部分の割合が若干増加する傾向がうかがえる。

今回のコア抜き引張試験に使用した試験体は、輪荷重載荷位置から離れており、目視で確認する限りひび割れもなかったことから、水や荷重繰り返しの影響は受けにくい部位であったものと推測される。ただし、後述するが、試験温度20°Cの場合に着目すれば、過年度の試験結果と比べて僅かながら強度が低下している傾向が見られた。接合部の強度特性に関して、破断面がほぼSFRC内であるため、SFRC部分の強度特性に依存していると考えられるが、接合面の付着状況、応力性状、接着材とコンクリートとの混合部分の温度変化や水に対する強度特性や劣化特性等、引き続き検討が必要と考えられる。

(2) 経過年数による比較

図-4に、引張強度の経年変化を示す。過年度に実施

した輪荷重走行試験時及び2年間暴露後のコア抜き引張試験³⁾では、引張強度の平均値はほぼ同程度の値を示しており、有意な変化は確認されなかった。一方、今回実施したコア抜き引張試験（試験時温度20℃）の引張強度の平均値（2.50N/mm²）は、輪荷重走行試験時（2008年）から約21%、2年間暴露後（2010年）から約24%低下していた。試験体は、2年間暴露後、実験棟内で約5年間保管していたため、日射や雨水の影響は屋外に比べて小さいと考えられるものの、実験棟内の温度変化等の継続的な環境作用が影響した可能性が考えられる。

(3) 小型試験体による引張試験結果との比較

図-5に著者らが別途実施した接合面を模擬した小型試験体による引張試験結果（平均値⁴⁾と切り出し試験体の試験結果の比較を示す。ここで、小型試験体では、製作後28日間気中養生を行った後、環境負荷あり・なしの2条件で引張試験を実施しており、環境負荷ありでは、2ケースの環境負荷をそれぞれ与えた後に引張試験を行っている。一つは、50℃の水中での28日間の完全浸漬とし、その後、1日間は気中（試験時温度）で乾燥させる環境負荷条件（以下、温水負荷）である。もう一つは、20℃の水中18時間、-20℃の気中3時間、50℃の気中3時間を1サイクルとし、これを15日間実施した後、1日間は気中で乾燥させる環境負荷条件（以下、温冷繰返し）である。また、今回実施したコア抜き引張試験と同様に、小型試験体にはSFRCに超速硬セメント、接着材にはエポキシ樹脂系を使用し、試験時温度をパラメータとしている。なお、いずれの条件下でも、接合面から僅かにSFRC側に入った位置（接合面に接するSFRC部分もしくはSFRCと接着材の混合部分）で破壊していた。

引張強度を試験時温度毎で比較すると、いずれの試験においても50℃では20℃に対して引張強度が低下する傾向が見られた。なお、切り出し試験体のコア抜き引張試験では、経過年数による引張強度の低下が見られたが、小型試験体では環境負荷を与えた場合に引張強度が増加している。いずれも引張試験時にSFRC側で破壊していることを考えると、環境負荷なしに比べて環境負荷を与えた場合には、SFRC自体の強度増加が影響している可能性がある。今後、小型試験体の環境負荷条件と実橋における環境条件との対応付けについて検討する予定である。

5. まとめ

SFRC舗装を敷設してから約9年（輪荷重走行試験後

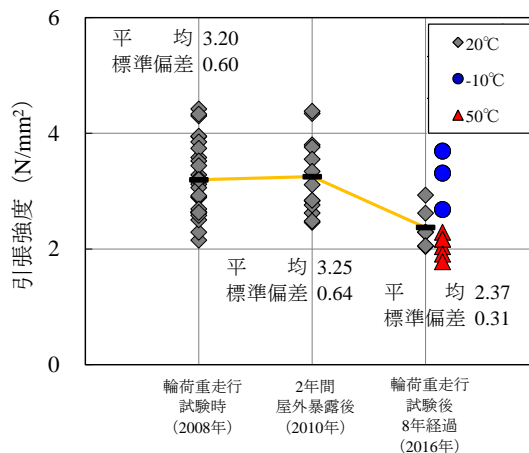


図-4 引張強度の経年変化

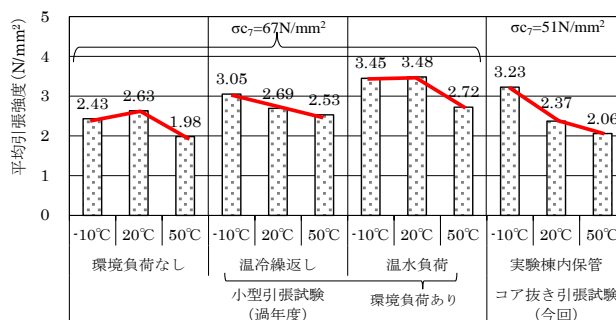


図-5 小型試験体による引張強度試験との比較

(※ σ_{c7}: 材齢7日のSFRCの圧縮強度)

約8年)経過した実大鋼床版試験体においてコア抜き引張試験を実施し、接合面の引張強度の経年変化や、試験時温度の引張強度への影響について検討した。主な結果を以下にまとめる。

- 1) 接合部の破壊位置は試験時温度によらず、SFRC側に入らずに入った部分(接合面に接するSFRC部分もしくはSFRCと接着材の混合部分)であった。
- 2) 常温下(試験時温度20℃)での引張試験では、引張強度は2.04~2.93N/mm²(平均値2.50N/mm²)であり、輪荷重走行試験時(2007年12月から2008年3月)から約21%、2年間屋外暴露後(2010年7月)から約24%の低下が見られた。
- 3) 破壊位置がSFRC内であるにもかかわらず、試験時温度が高温になるにつれて、接合面の引張強度の低下(試験時温度20℃に対して、-10℃では約1.4倍、50℃では約0.9倍)が見られた。

本研究は、平成27年度建設技術研究開発費補助金「鋼床版の疲労損傷に対するコンクリート系舗装による補

強技術の性能評価に関する研究」の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) (社)土木学会：鋼構造シリーズ 19 鋼床版の疲労，pp.63～75，2010.12.
- 2) (独)土木研究所，(株)横河ブリッジ，(株)NIPPO，鹿島道路(株)，大成ロテック(株)：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究（その2・3・4）報告書－SFRC 舗装した既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル（案）－，共同研究報告書，第 395 号，

pp.59，2009.10.

- 3) 村越潤，木ノ本剛，春日井俊博，児玉孝喜，辻井豪：既設鋼床版の SFRC 舗装による補強工法と耐久性評価に関する実験的検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.3，pp.416-428，2013.9.
- 4) 佐々木寛幸，佐藤歩，村越潤，小野秀一，森猛：小型試験体による SFRC と鋼板との接着材接合面の強度及び耐久性に関する実験的検討，第九回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2016.7.（投稿中）

（2016 年 7 月 18 日受付）