

(61) SFRC舗装鋼床版試験体における 接着剤接合部の経年劣化傾向

魏 宗鐸¹・村越 潤²・小野 秀一³・佐々木 良輔⁴・高橋 実⁵

¹学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 博士前期課程
(〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: wei-zonuduo@ed.tmu.ac.jp

²正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: murakos@tmu.ac.jp

³正会員 (一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)
E-mail: ono@cmi.or.jp

⁴正会員 (一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)
E-mail: sasaki_r@cmi.or.jp

⁵正会員 (国研)土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: takahashi-m503jp@pwri.go.jp

鋼床版の疲労き裂に対する対策技術として、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)舗装による補強工法が広く適用されている。本工法では、SFRC舗装とデッキプレート間の接合にエポキシ樹脂系接着剤を使用しているが、接着剤接合部の耐久性については評価事例が少なく、耐久性に優れた適切な接着剤を適用していくために経時的な強度特性の変化を調査していくことが重要と考えられる。本検討では、製作後約13年間経過した、SFRC舗装を敷設した実大鋼床版試験体を対象として、建研式の引張接着強度試験機によるコア抜き引張試験を実施し、同接合部の経年的な引張強度の変化を把握した。また、試験時温度及び試験前の温度及び水による環境負荷が引張強度や破壊形態に及ぼす影響について明らかにした。

Key Words : orthotropic steel deck, fatigue, SFRC overlay, adhesive joint, tensile strength

1. はじめに

交通条件の厳しい鋼床版橋において、輪荷重直下の溶接部に疲労き裂が報告されている¹⁾。このうち、閉断面の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、Uリブとデッキの片側の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。これらの鋼床版の疲労き裂に対する対策技術として、鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)舗装による補強工法^{2),3)}が開発され、2004年に横浜ベイブリッジ(国道357号)、2005年に湘南大橋に適用され³⁾、以降、既設鋼床版に広く適用されている¹⁾。本工法は、SFRCを現場打設時に、接着剤によりデッキと一体化させ、溶接部の局部応力を軽減するものである。これまでSFRC舗装及び接着剤接

合部の強度特性に関して、輪荷重載荷や温度変化、ひび割れからの水の浸入等の環境負荷による影響も含めて輪荷重走行疲労試験及び接着剤接合部を模擬した小型試験体による劣化促進試験等による確認が土木研究所において行われている^{2),4),5)}。これらの既往研究を踏まえ、第二著者らは、3種類のエポキシ樹脂系接着剤を使用した接合部を模擬した小型試験体を対象として、約1年間の温水浸漬による引張強度の経時変化を分析し、接着剤によっては温度及び水の影響により接合部の引張強度が低下することを確認している。

一方で、現場における様々な環境条件に対して、SFRC舗装及び接着剤接合部について十分な強度や耐久性を有することを検証することは容易ではなく、室内試験での環境負荷条件と、実際の環境作用との関係についても、必ずしも明確でないのが現状である。耐久性に優れた適切な接着剤を選定していくためには、経年的な強

度特性の変化を調査していくことが重要と考えられる。第二著者らは、SFRC舗装を敷設した実大鋼床版試験体2体に対してコア抜き引張試験を実施し、経年的な強度低下を確認している⁴⁾⁶⁾⁷⁾。このうち、文献4)では、SFRC舗装を敷設した実大鋼床版試験体に対して、屋外に2年間、引き続き室内に5年間保管された後に、コア抜き引張試験を実施し、接合部の引張強度が20%程度低下することを示している。

本文では、文献4)の調査に引き続き同試験体を対象に、その後の引張強度特性の調査結果を報告する。具体的には、室内に約10年間保管後(製作13年後)に、建研式の引張接着強度試験機を用いたコア抜き引張試験を実施し、接着剤接合部の引張強度及び破壊性状の経年変化を調査した結果について述べる。

2. 対象試験体の概要

対象とした実大鋼床版試験体は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疲労試験を実施したものである(図-1)。着目する接着剤接合部は非載荷部のSFRC舗装部分を切り出しており、当初の試験体の構造諸元及び試験の詳細²⁾³⁾は省略し、ここではSFRC舗装の概要について述べる。

表-1に接着剤の性状及び硬化後の材料物性を、表-2にSFRCの配合条件を示す。急速施工を想定し超速硬セメントを使用し、75mm厚の1層としている。ブラスト工法により鋼板厚12mmのデッキの素地調整を行った後に、エポキシ樹脂系接着剤を塗布し、SFRCを打設して鋼床版上にSFRC舗装を敷設している。接着剤は本工法用に



図-1 過年度の実大鋼床版試験体の輪荷重走行疲労試験状況²⁾

開発され、現在広く使用されている高耐久性エポキシ樹脂系接着剤である。接着剤の塗布量は標準的な使用量 1.4kg/m^2 (平均塗布厚1mm相当)である。SFRCの圧縮強度は材齢3時間、7日でそれぞれ 27N/mm^2 、 51N/mm^2 である。

疲労試験時及び試験終了直後にコア抜き引張試験を実施しているが、輪荷重の載荷部と非載荷部と有意な強度差はみられず、SFRC内で破壊が生じており材料破壊であった²⁾。その後、土木研究所敷地内に約2年間屋外暴露した後の2010年7月に、第二著者らが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²⁾。試験後にはSFRC舗装とデッキを含む一部分(非載荷部)を切り出して、実験棟内に保管し、その後、第二著者らが2016年3月に、5年間保管した試験体に対してコア抜き引張試験を実施し、引張強度が輪荷重走行疲労試験時から約24%低下していることを確認している。

なお、実験棟内保管期間において、切り出し試験体のデッキ下面温度を7日間計測している。その期間中の外気温との関係を基に、保管期間中の外気温変動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、下面温度は最高約 27°C 、最低約 12°C であった。ここで、接着剤のガラス転移点温度は約 56°C であり、保管期間中に接着剤接合部の温度が接着剤の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。

3. 試験ケースと試験方法

(1) 試験ケース

接着剤接合部の経年劣化を把握するため、今回、10年間室内保管後の切り出し試験体に対してコア抜き引張試

表-1 使用接着剤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	50N/mm ² 以上 (JIS K 7181)	
圧縮弾性係数	1.0×10 ³ N/mm ² 以上 (JIS K 7181)	
曲げ強さ	35N/mm ² 以上 (JIS K 7171)	
引張せん断接着強さ	10N/mm ² 以上 (JIS K 6850)	

表-2 対象試験体のSFRC配合条件

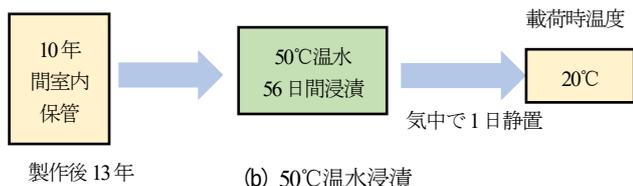
セメントの種類	コンクリート					鋼繊維		
	設計基準圧縮強度(3時間 N/mm ²)	水セメント比W/C (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	寸法 (mm)	使用量 (kg/m ³)
超速硬セメント	24	40	50.1	5.0±1.5	3.0±1.5	13	φ0.6×30	100



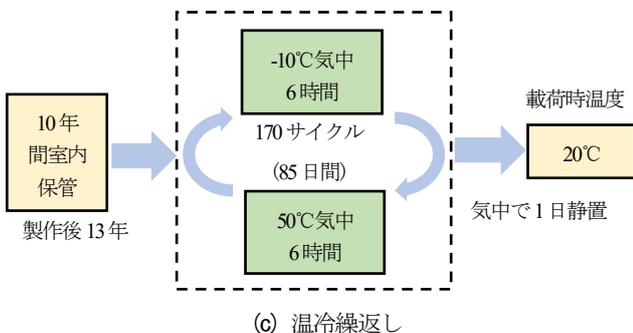
図-2 試験時温度の影響検討における試験ケース



(a) 20°C水中浸漬



(b) 50°C温水浸漬



(c) 温冷繰返し

図-3 環境負荷の影響検討における試験ケース

験を実施した。切り出し試験体は2体で、鋼板寸法はそれぞれ1050mm×620mm、1200mm×300mmである。接着剤への各種影響要因による強度変化を確認するために、経時的な強度特性の調査に加えて、以下に示す、a) 試験時温度の影響、b) 環境負荷(試験前の温水浸漬負荷)の影響について検討を行った。

a) 試験時温度の影響

接着剤の強度特性は使用温度により変化することが考えられ、文献4)においても荷重載荷時の温度をパラメータとしてコア抜き引張試験を行い、高温になるほど強度が低下する傾向が確認されている。本検討においても、基本ケースである常温(20°C)に対して、低温側(-10°C)、高温側(50°C)を加えた3ケースとした(図-2)。高温側では、都市内高速道路のSFRC舗装内部(デッキ面から10mm上位置)の計測結果より³⁾、50°Cとした。また、低温側では、道路橋示方書⁸⁾に規定されている鋼構造の温度変化の範囲をもとに、デッキの温度が外気温と同程度になることを想定し、-10°Cとした。

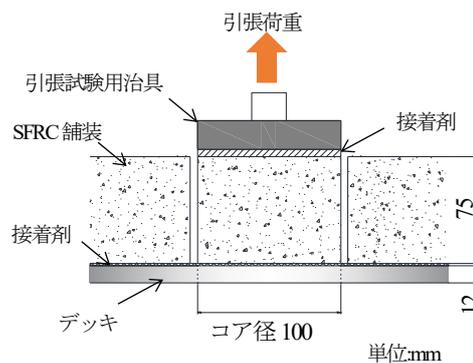


図-4 試験体とコア抜き引張試験の概要

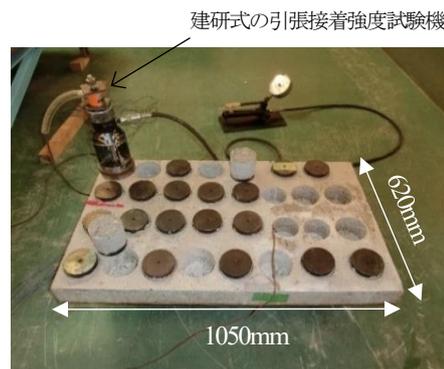


図-5 試験状況(試験時温度の影響検討用の試験体)

b) 環境負荷の影響

著者らが実施した小型試験体によるコア抜き引張試験では、一定期間の温水浸漬後に引張強度の低下を確認している⁹⁾。長期保管した試験体において接着剤接合部への水分の浸入や温度変化が接着剤接合部に与える影響を確認するため、コアリングしてから、3ケース(図-3)の環境負荷を与えた後、常温下でコア抜き引張試験を実施した。図-3(a), (b)の水中浸漬の2ケースは、それぞれ20°C水中、50°C温水に56日間浸漬させている。負荷期間は文献3), 9)を参考に、また、接着剤の養生効果の影響¹⁰⁾も勘案し56日間とした。温冷繰返しでは、-10°C気中で6時間、50°C気中で6時間を1サイクルとし、これを170サイクル(85日間)実施した。なお、コア抜き引張試験は環境負荷後の試験体を1日間室温で気中保管した後に実施した。

(2) 試験方法

図-4にコア抜き引張試験の概要を、図-5に試験状況を示す。試験方法は、過年度に実施した建研式の引張接着強度試験機による試験法と同じとした。コアカッターを用いて直径100mmの切込みをデッキ上面に達するまで設け、荷重治具を舗装面に接着後、毎秒約0.1N/mm²の荷重速度で、デッキとSFRC舗装の接合部が破壊するまで引張荷重し、破壊時の荷重値を計測した。この荷重値をコア断面積(7854mm²)で除した値を引張強度とした。また、

表-3 試験結果

試験時温度	環境負荷	引張強度 (N/mm ²)	平均値 (N/mm ²)	材料破壊の面積割合 (%)
20°C	負荷なし	2.33	2.23	97.7
		2.01		98.6
		2.15		99.6
		2.57		98.2
		2.42		97.6
		1.91		99.7
	20°C 水中	2.27	2.32	91.1
		2.35		92.5
		2.23		89.4
		2.42		94.1
	50°C 温水	2.42	2.47	92.6
		2.51		91.2
		2.64		100
		2.30		93.4
	温冷繰返し	2.15	2.10	98.3
2.22		100		
1.92		95.8		
-10°C	負荷なし	2.21	2.47	97.9
		2.83		95.2
		2.34		97.4
		2.49		97.8
50°C	負荷なし	1.76	1.92	99.4
		1.81		99.1
		1.85		99.7
		2.01		97.9
		2.15		98.3

破壊面より破壊位置の外観観察を行った(4(4)に詳述)。なお、切込み時には、接合面を極力傷めないように配慮して施工を行った。

4. 試験結果と考察

表-3に試験結果をまとめ、以下に、引張強度の経時変化と、各ケースの試験条件が引張強度に与える影響について考察する。

(1) 引張強度の経時変化

図-6に常温下での引張強度の経時変化を示す。赤線は平均値を結んでいる。図中には試験結果とともに、引張強度の平均値及び標準偏差を示している。ばらつきが大きいが平均値で見ると、今回(製作13年後)の試験結果(試験時温度20°C、環境負荷無し：2.23N/mm²)は、製作半年後の輪荷重走行疲労試験終了時(3.20N/mm²)から約30%、製作2年後(3.25N/mm²)から約31%、製作8年後(2.37N/mm²)から約6%低下していた。試験体は2年間屋外に暴露後、実験棟内で約10年間保管していたため、日射や雨水の影響は比較的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接合部の強度に

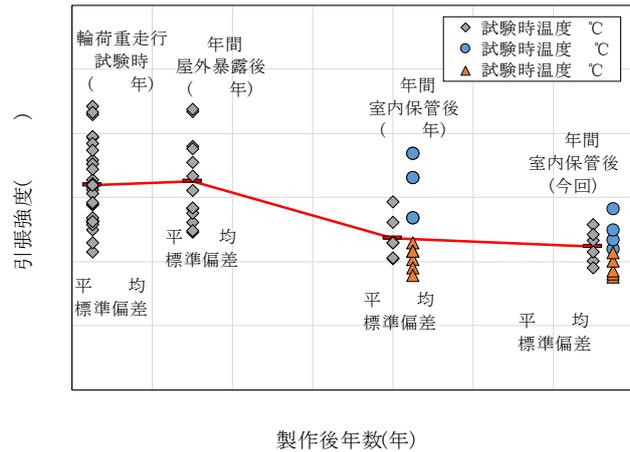


図-6 引張強度の経時変化

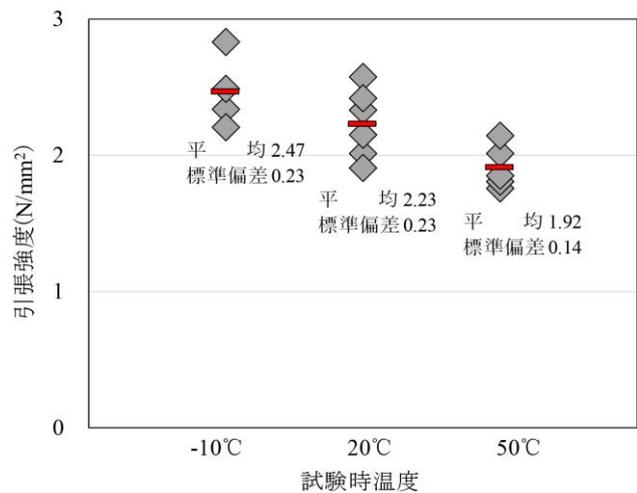


図-7 引張強度への試験時温度の影響

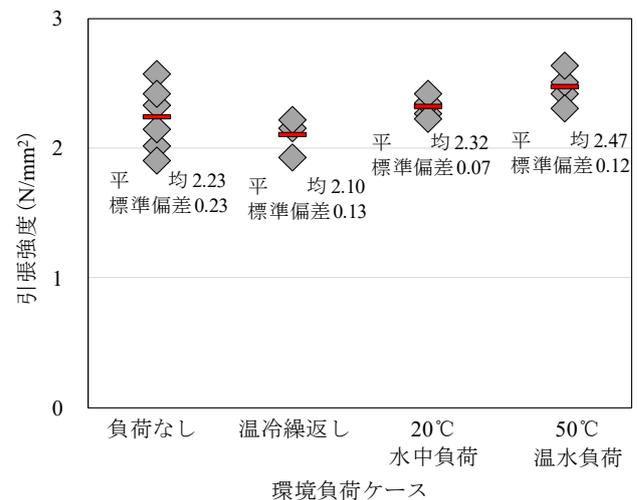


図-8 引張強度への環境負荷の影響

影響していると考えられる。

(2) 試験時温度の影響

図-7に試験時温度と引張強度の関係を示す。試験時

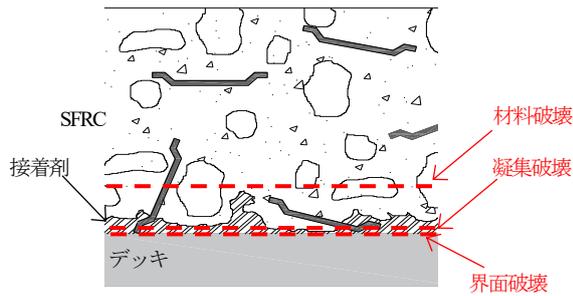
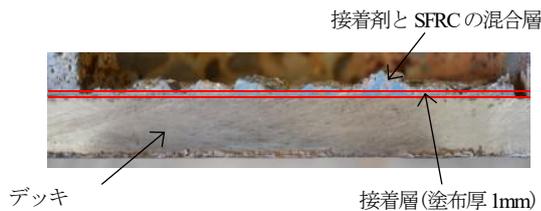


図-9 接合部の破壊位置の分類



(a) 破壊面の例(50℃温水)



(b) 破壊面の切断面の例(50℃温水)

図-10 接合部の破壊例

温度が高温になるにしたがって、引張強度は低下する傾向にある。試験時温度20℃での引張強度に対して-10℃では約1.1倍、50℃では約0.85倍になっている。なお、同試験体の製作8年後の調査⁴⁾においても同様の試験を実施しているが、試験時温度に対する引張強度低下は同様の傾向であった。

(3) 環境負荷の影響

図-8に各環境負荷ケースと引張強度の関係を示す。温冷繰返しによる影響はみられなかった一方、水中浸漬の場合には、強度の若干の増加がみられた。56日間20℃水中、50℃温水浸漬後の引張強度(平均値)は、環境負荷無しの試験体(試験時温度: 20℃)と比較してそれぞれ4%、11%増加していた。56日間水中浸漬では、むしろ気中で保管されていた試験体に対してSFRCの強度が相対的に若干増加した可能性が考えられる(破壊性状については4(4)に詳述)。なお、同一仕様の接合部を有する小型試験体に対する50℃温水浸漬後による環境促進試験⁵⁾では、

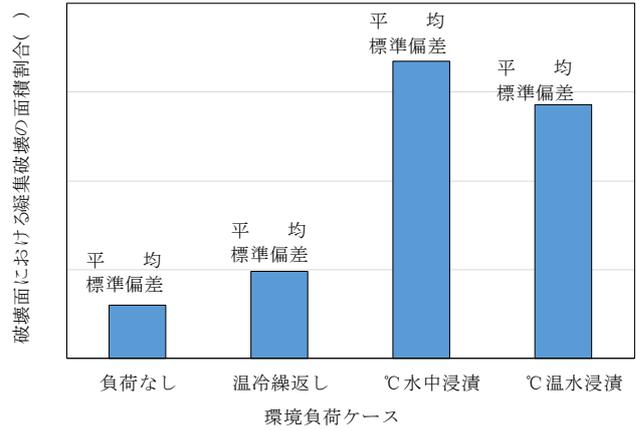


図-11 環境負荷ケースでの凝集破壊の面積割合

負荷期間56日ではSFRC及び接着剤の養生効果により強度が増加する傾向がみられた。今回の長期保管した試験体においても、56日間程度の負荷では同様の結果であった。

(4) 破壊性状

図-9に接着剤接合部における破壊形態の分類の模式図を示す。接着剤接合部の破壊性状を、その破壊位置の外観目視観察により、材料破壊(SFRC内で破壊)、凝集破壊(接着層内で破壊)、界面破壊(接着剤と鋼板との界面で破壊)の3形態に分類することとした。その際、破壊面全体が必ずしも一つの破壊形態に分類できない部分もみられたため、デッキ面側の破断面を写真撮影し、接着剤付着部分、SFRC付着部分、デッキ面露出部分をそれぞれ抽出し各破壊形態の面積割合として整理した。このうち界面破壊は強度のばらつきが大きく接着性能としての信頼性が低いとされており、破壊形態の変化を経年劣化の一つの指標と考えた²⁾。

破壊面の観察の結果、すべての試験箇所のコアにおいて、接着剤とSFRCの接合面からわずかにSFRC側に入った位置(接合面に接するSFRC部分やSFRCと接着剤が混合する部分)で破壊していた。界面破壊はみられず、接着剤接合部の著しい強度低下に至るような劣化はみられなかった。材料破壊としての引張強度は試験時温度や環境負荷により異なるが、接着剤に接するSFRC部分や接着剤とSFRC混合部分の強度特性に依存しているものと推測される。

図-10に破壊面の状況例(コア側)及び破壊面の切断面(デッキ側)を示す。青い部分は硬化した接着剤の色を表しており、コア側とデッキ側の破壊面を照合した結果、その大部分が凝集破壊が生じていることを確認している。図-11に、環境負荷条件毎の破壊面における凝集破壊部分の面積割合の平均値を示す。面積割合は小さいが、水中・温水浸漬の場合、破壊面に凝集破壊の部分が増加し

ており、破壊位置がSFRC側に入った位置から接着剤側へ移行する傾向がみられた。この理由は明確でないが、水中・温水浸漬によりSFRCの強度が増加する一方で、接着剤では樹脂の膨潤¹⁰⁾により強度低下が生じたことによる可能性が考えられる。

5. まとめ

製作後約13年間経過したSFRC舗装実大鋼床版試験体においてコア抜き引張試験を実施し、経時変化と各種試験条件下での接着剤接合部の引張強度及び破壊性状を検討した。以下に、主な結果をまとめる。

- 1) 常温下(試験時温度20℃)での引張強度は、製作半年後、2年後、8年後と比較して、それぞれ30%、31%、6%程度低下していた。
- 2) 試験時温度が高温になるにつれて、引張強度が低下する傾向がみられた。また、56日間水中・温水浸漬では引張強度(平均値)の若干の増加がみられた。
- 3) 接合部の破壊位置は、試験時温度や環境負荷の有無によらず、SFRC側にわずかに入った部分(接合面に接するSFRC部分もしくはSFRCと接着剤の混合部分)の材料破壊であり、界面破壊はみられず、接着剤接合部の著しい強度低下に至るような破壊性状の変化はみられなかった。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18K04326 の補助を受けて実施した。ここに記して感謝の意を表する。

(Received September 10, 2021)

参考文献

- 1) (社)土木学会：鋼構造シリーズ19 鋼床版の疲労, 2010.12.
- 2) 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.

- 3) (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, 2009.10.
- 4) 佐藤歩, 佐々木寛幸, 村越潤, 小野秀一, 森猛：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, 第9回道路橋床版シンポジウム, 土木学会, pp.157-162, 2016.11.
- 5) 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 と鋼板との接着剤接合面の強度及び耐久性に関する実験的検討, 第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2016.7.
- 6) 幅三四郎, 村越潤, 小野秀一, 佐藤歩：屋外暴露した鋼床版 SFRC 舗装試験体の接着剤接合部の経年劣化傾向, 第25回鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, Vol.25, No.9, pp.63-70, 2017.11.
- 7) 魏宗鐸, 村越潤, 小野秀一, 佐々木良輔：実環境下で長期間暴露した SFRC 舗装実大試験体の経年劣化傾向, 第48回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, V-27, 2021.3.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2017.11.
- 9) 穴戸洗希, 村越潤, 小野秀一, 千葉浩幸：鋼床版 SFRC 舗装接着剤接合部の劣化特性に関する実験的検討, 第28回鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, Vol.76, No.5, pp.63-70, 2020.11.
- 10) 松本稔将, 村越潤, 堀井久一, 小野秀一：鋼床版 SFRC 舗装の接合に使用するエポキシ系接着剤の環境負荷後の材料特性に関する実験的検討, 鋼構造論文集, Vol.27, No.105, pp.77-88, 2020.3.

AGING PROPERTIES OF ADHESIVE JOINT IN SFRC OVERLAY TEST SPECIMEN STORED DURING ABOUT 13 YEARS

Zongduo WEI, Jun MURAKOSHI, Shuichi ONO, Ryosuke SASAKI
and Minoru TAKAHASHI

As a retrofit measure to prevent fatigue cracks in orthotropic steel decks (OSDs), steel fiber reinforced concrete (SFRC) overlay has been increasingly used for damaged OSDs. In this method, SFRC has been adhesively bonded to deck plate by epoxy adhesives. However, there is no sufficient data to confirm the durability of SFRC/steel joints because there are few verification cases. It is important to investigate the durability performance under the effect of environmental action. In this study, in order to clarify the aging properties of the adhesive joints, tensile bond strength tests were conducted using SFRC overlay OSD specimens which were made about 13 years ago.