

解体性材料を用いた鋼床版上 SFRC 舗装の付着特性

日大生産工 ○野口博之 水口和彦 日大・名誉教授 阿部忠 鹿島道路(株) 伊藤清志

1. はじめに

疲労き裂が生じた道路橋鋼床版の補修補強策および新設された道路橋鋼床版の予防保全策としてデッキ上面に高耐久型エポキシ樹脂接着剤（以下、接着剤）を塗布した鋼床版上 SFRC 舗装法が数多く採用され、その有用性が評価されている¹⁾。また、一定期間の交通規制が可能な路線において、既設アスファルト舗装撤去後の研掃処理から SFRC の打ち込みまでが 4 時間以上となる場合は、研掃面の発錆を防ぐために接着剤との付着性能が確認された高耐久型・耐水耐熱性エポキシ樹脂プライマー²⁾（以下、防錆剤）を塗布されている。

一方、疲労き裂の進展を抑制することが可能な鋼床版上 SFRC 舗装は、接合界面の付着切れが生じないように付着性やせん断力に優れた接着剤で結合されているため供用開始 10 数年が経過しても SFRC 舗装上への軽微な損傷が見られるものの車両走行に影響を及ぼす損傷は見られず、舗装界面においても維持管理における十分な付着性を有し、健全な状態が維持されている³⁾。しかし、車両の繰り返し走行や環境負荷による SFRC 舗装への損傷が進行し、補強効果が減少した場合の SFRC 舗装の取壊しにおいて強固な鋼床版と SFRC 層との接合界面をブレーカなどによる斫り作業となることから多くの作業時間を必要とするとともに鋼床版に新たな損傷を与えることが懸念される。SFRC 舗装の撤去に伴う新たな損傷への対策として電磁誘導加熱機器を用いた撤去工法が検討され、その一つとして電磁誘導加熱により発泡する熱膨張性材料を添加した防錆剤を鋼床版に全面塗布してから接着剤を塗布する解体性技術について報告されているが疲労による影響は考慮されていない⁴⁾。

そこで本研究では、鋼床版上 SFRC 舗装の解体技術として、防錆処理に用いる防錆剤に接合面の解体性向上を目的とした熱膨張性材料を添加させた鋼床版上 SFRC 舗装を施した供試体を製作し、輪荷重走行疲労実験を行い走行面に疲労損傷を与え、疲労試験後に接合面の付着性を建研式引張試験より検証する。また、実施工を想定した鋼床版上 SFRC 舗装として防錆剤塗布後に散水と乾燥の繰り返しおよび曝露による環境負荷を与えたデッキと SFRC との接合面の付着性についても併せて検証した。

表-1 SFRC の配合条件

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)					減水剤 (C×%)
			W	C	S	G	SF	
6.5±1.5	38.4	53.5	160	417	829	912	100	1.5

W:水, C:セメント, S:砕砂, G:粗骨材, SF:鋼繊維(両端フック型)

表-2 防錆剤および接着剤の材料特性値
(1) 防錆剤

項目	実測値	備考	
外観	主剤	灰色液状	異物混入なし
	硬化剤	褐色液状	
塗膜の外観	正常	目視	
混合比 (主剤:硬化剤)	2:1	重量比	
混合粘度 (Pa・s/23°C)	0.04	JIS K7117	
塗膜乾燥時間 (時間/23°C)	3.0	ドラインレコーダー	
引張せん断強さ (N/mm ²)	12.5	JIS K6850	

(2) 接着剤

項目	実測値	備考	
外観	主剤	白色ペースト状	異物混入なし
	硬化剤	青色液状	
混合比 (主剤:硬化剤)	5:1	重量比	
硬化物比重	1.42	JIS K7112	
可使時間 (分/°C)	52	温度上昇法	
圧縮強さ (N/mm ²)	115	JIS K7181	
圧縮弾性係数 (N/mm ²)	3,341	JIS K7181	
曲げ強さ (N/mm ²)	63	JIS K7171	
引張せん断強さ (N/mm ²)	17	JIS K6850	
付着強さ (N/mm ²)	3.8	JIS A6909	

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 鋼床版 鋼床版を構成する鋼部材には SS400 を用いた。なお、試験成績表より、デッキおよび U リブの材料特性値は降伏強度がそれぞれ 285N/mm², 311N/mm², 引張強度がそれぞれ 455N/mm², 445N/mm², ヤング係数がともに 200kN/mm² である。

(2) SFRC 本実験に用いる SFRC は、養生 3 時間で道路橋示方書・同解説（以下、道示）⁷⁾ に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm² 以上を確保することが可能な配合条件とした。配合条件は、超速硬セメントと最大骨材寸法 15mm の粗骨材、φ0.6mm、長さ 30mm の両端フック型の鋼繊維を添加量 1.27Vol.% (100kg/m³) で配合した。ここで、SFRC の配合条件を表-1 に示す。なお、SFRC の圧縮強度は養生 3 時間で 27.6N/mm², 実験開始時に 71.7N/mm² と材料の要求性能

Adhesion Properties in SFRC Pavement on Orthotropic Steel Deck Using Dismantlable Material

by

Hiroyuki NOGUCHI, Kazuhiko MINAKUCHI, Tadashi ABE and Kiyoshi ITO

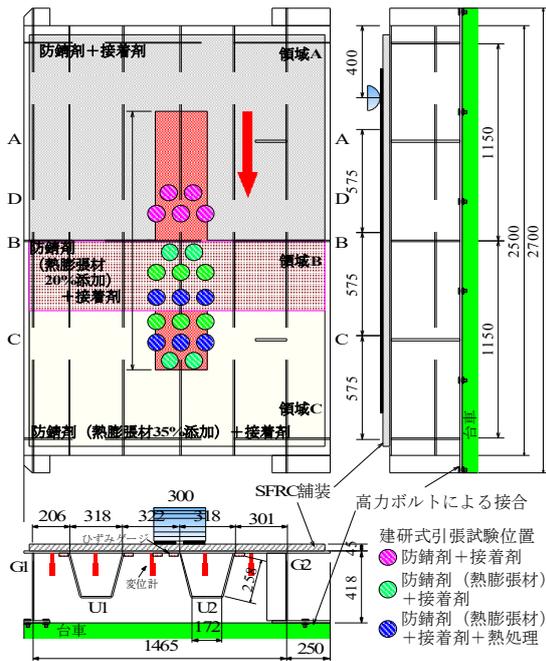


図-1 供試体寸法および計測位置

を十分に満足している。

(3) 防錆剤および接着剤²⁾ 鋼床版上 SFRC 舗装における接合技術として、本研究では実橋梁鋼床版での施工に適用されている防錆剤および接着剤を用いた。ここで防錆剤および接着剤の材料特性値を表-2に示す。

(4) 熱膨張性材料⁵⁾ デッキと SFRC との界面に接着剤を塗布した鋼床版上 SFRC 舗装はデッキと SFRC と界面が強固に接合されているため損傷箇所の再補修を施す場合には簡易的に解体可能な技術が求められる。本研究では、接合面の機能を維持しながら電磁誘導加熱機器による熱処理で容易に解体を可能とする熱膨張性材料を用いた。なお、熱膨張性材料の添加量が接合面に及ぼす影響を考慮して防錆剤塗布量の 20% 添加、35% 添加した場合を検証した。

2.2 供試体寸法

本実験に用いた鋼床版供試体の寸法を図-1 に示す。供試体は既設鋼床版をモデル化し、実構造と同一板厚のデッキおよび U リブを 2 本、横リブを 3 本、主げたを 2 本を有する供試体を製作した。鋼床版を構成するデッキには板厚 12mm、幅 1,765mm、長さ 2,500mm の鋼板、U リブには幅 320mm、高さ 250mm、板厚 6mm の鋼板を用いる。主げたは I 形断面とし、主げた間隔を 1,465mm とした。なお、鋼床版供試体をモデル化していることから SFRC 舗装厚も同様に一般的な SFRC 層厚をモデル化し、舗装厚を 45mm とした。

2.3 鋼床版上 SFRC 舗装の施工手順²⁾

鋼床版上 SFRC 舗装の施工手順を図-2、施工時の気象条件および環境負荷を図-3 に示す。

図-2 に示す施工手順のとおりデッキ面の不純物の

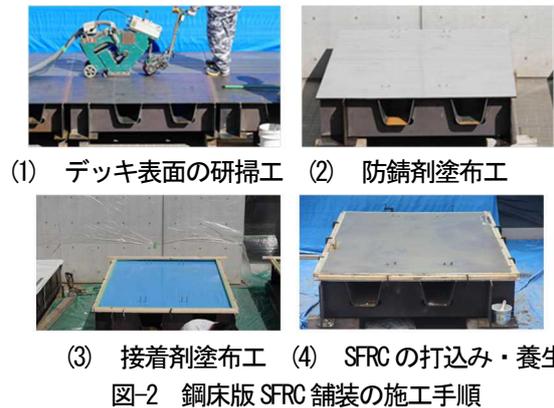


図-2 鋼床版 SFRC 舗装の施工手順

外気温	湿度	気象条件・環境負荷
最大 21℃	最高 79%	晴天 6日 環境負荷：散水 (降雨量1mm程度)
最低 7℃	最小 10%	雨天 1日 環境負荷：降雨 (降雨量10mm)

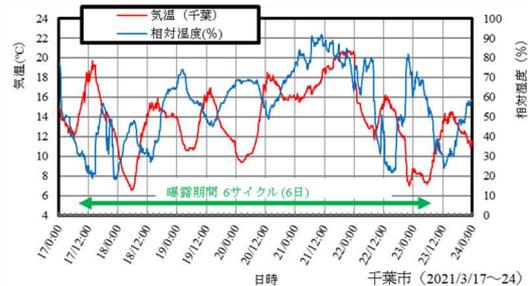


図-3 施工時の気象条件および環境負荷

除去およびデッキと SFRC との付着性を高めるためにショットブラスト (投射密度 250kg/m²以上) を用いてデッキ表面を研掃した (図-2(1))。次に、ショットブラストによる研掃から接着剤の塗布、SFRC の打ち込みまでに数日間空ける工程となる現場を想定し、デッキ研掃後、直ちに防錆剤および熱膨張性材料を添加した防錆剤を塗布量 0.15kg/m² で図-1 に示す範囲 (防錆剤のみの範囲を領域 A、熱膨張性材料を防錆剤塗布量の 20% 添加した範囲を領域 B、熱膨張性材料を防錆剤塗布量の 35% 添加した範囲を領域 C とする) を塗布した (図-2(2))。防錆剤の硬化後にデッキ表面の散水および乾燥による環境負荷および曝露試験を一定期間繰り返した (図-3) 後に防錆剤の付着性状を確認し、接着剤をデッキ表面塗布量 1.4kg/m² (平均塗布厚さ 1.0mm) で塗布し、ウェットゲージを用いて確認した (図-2(3))。接着剤塗布後、直ちに表-1 に示す配合で SFRC を練り混ぜ、厚さ 45mm で打ち込み・表面仕上げ後に、養生を行った (図-2(4))。

3. 実験方法

3.1 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は、SFRC 舗装を施した鋼床版の横リブ I から 400mm の位置を起点に、1,500mm の走行範囲を元の位置まで走行させる。荷重の載荷条件

は、段階荷重載荷とし、鋼部材の疲労耐久性の評価として 2.0×10^6 回疲労強度 σ_w が用いられることから等価繰返し回数が 2.0×10^6 回程度となるように荷重の載荷ステップを設定した。

3.2 等価走行回数

鋼部材と SFRC の合成構造となるため鋼床版上 SFRC 舗装の等価走行回数の算定方法が異なる。鋼構造物の疲労耐久性評価には、道示 ⑨ および鋼構造物の疲労設計指針・同解説 ⑩ で規定されている鋼部材の S-N 曲線から溶接継手の強度区分 E あるいは F を適用し、等価走行回数の算出にはマイナー測に従うとすると式(1)として与えられる。また、SFRC の寿命評価には水越 ⑪ が SFRC の疲労ひび割れの進展状況を考慮した S-N 曲線式を用い、マイナー測に従うとすると式(2)として与えられる。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P} \right)^m \times n_i \quad (1)$$

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n [10^{(S_i - S_0)/(1/m)}] \times n_i \quad (2)$$

$$S_i = (1/3) \times (P_i/P)$$

ただし、 N_{eq} ：等価走行回数（回）、 P_i ：載荷荷重（kN）、 P ：基準荷重（鋼床版=50kN、SFRC=72kN）、 n_i ：実験走行回数（回）、 S_i ：上限応力比（作用最大曲げ応力/静的曲げ強度）、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値（鋼床版=3.0、SFRC=10.3）

3.3 建研式引張試験 ⑫

本実験では、疲労実験終了後の鋼床版のデッキと SFRC との界面の付着特性を確認するために建研式引張試験を実施する。実験方法は SFRC 上面に電動コアマシンを設置し、 $\phi 100\text{mm}$ で鋼床版デッキの位置まで切り込みを入れる。次に、コアの上面の 2mm 程度をディスクサンダーで研磨してレイタンスを除去した後接着剤を塗布してから鋼製アタッチメントを固定し、接着剤が硬化するまで養生する。建研式引張試験は載荷速度 $1.0\text{N/cm}^2/\text{sec}$ で引張試験を実施する。ここで、建研式引張試験の概略図を図-4 に示す。

建研式引張試験における引張接着強度の算定は式(3)として与えられている。なお、SFRC 舗装における引張接着強度の基準は 1.0N/mm^2 以上、SFRC 側での破壊面積 90%以上が条件とされている ⑬ 。

$$f_T = P_T/A \quad (3)$$

ただし、 f_T ：引張接着強度（ N/mm^2 ）、 P_T ：引張接着荷重（N）、 A ：破断断面積（ mm^2 ）

4. 実験結果および考察

4.1 等価走行回数

本実験における SFRC 舗装した鋼床版の等価走行回数は 1.995×10^6 回である。 2.0×10^6 回疲労強度における鋼

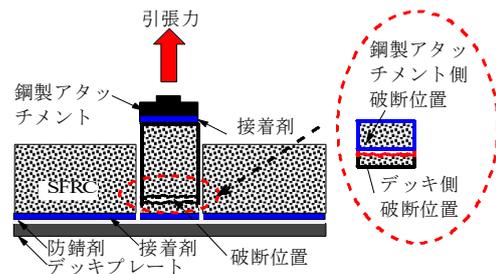


図-4 建研式引張試験の概略図

床版の損傷状況は、目視による観察ではデッキとウリの溶接接合部へのき裂は確認されない。次に、SFRC 舗装の式(2)より算出した等価走行回数は 252.591×10^6 回である。

4.2 SFRC 舗装の付着性状

(1) 建研式引張試験における引張接着強度

建研式引張試験における試験結果を表-3 に示す。

輪荷重走行による影響を最も受けた載荷輪直下の SFRC 舗装界面の引張接着強度は熱膨張性材料を添加していない領域 A で平均 2.56N/mm^2 、防錆剤に熱膨張性材料を 20%あるいは 35%添加させた領域 B および領域 C では、それぞれ平均 1.64N/mm^2 、平均 2.02N/mm^2 である。各領域で引張接着強度に差が見られるものの引張接着強度の基準値 1.0N/mm^2 を上回る結果となった。また、一部引張接着強度が基準値を下回る結果が見られたが、これは載荷輪直下でかつ輪荷重の繰返し走行によりデッキと SFRC との界面付近あるいは SFRC 層内に作用するせん断力によって強度が低下したものと推察される。次に、電磁誘導加熱機器による加温処理（デッキの温度： $110 \sim 130^\circ\text{C}$ ）を施したのちに建研式引張試験を実施した領域 B および領域 C の引張接着強度はそれぞれ平均 0.18N/mm^2 、平均 0.34N/mm^2 と加温処理を施す前に採取した結果と比較して引張接着強度が 89%、87%低減する結果となった。これは、熱膨張性材料が加温処理によって適切に発砲したことにより SFRC 層内での破断から引張接着強度が低下した防錆層内での凝集破壊に移行していると推察される。

(2) 建研式引張試験における破断状況

建研式引張試験による SFRC 舗装接合界面の破断状況の一例を図-5 に示す。

建研式引張試験による破断状況は、領域 A および加温処理を施す前の領域 B と領域 C では破断面が付着界面から 3~5mm 程度の SFRC 層で破断している。

次に、加温処理を施した後に採取した領域 B では一部 SFRC の付着が見られたものの熱膨張性材料の膨張により防錆剤塗布層内での凝集破壊ならびに破断面積の低減が確認された。領域 C では破断面に SFRC および接着剤の付着は見られず、防錆剤塗布層内での凝集破壊に至っていることが確認された。

表-3 建研式引張試験における引張接着強度

採取位置	防錆剤+接着剤 塗布領域			防錆剤(熱膨張性材料20%添加) +接着剤 塗布領域			防錆剤(熱膨張性材料35%添加) +接着剤 塗布領域		
	引張接着強度(N/mm ²)		破壊面積 または 破断位置	引張接着強度(N/mm ²)		破壊面積 または 破断位置	引張接着強度(N/mm ²)		破壊面積 または 破断位置
	計測値	平均値		計測値	平均値		計測値	平均値	
No.1	3.17	2.56	治具	-	-	-	-	-	
No.2	2.67		治具						
No.3	2.97		100%						
No.4	2.62		100%						
No.5	1.38		100%						
加温 処理前	No.1	-	3.11	1.64	100%	2.02	2.69	100%	
	No.2		1.54		92%		1.68	100%	
	No.3		0.52		100%		0.48	92%	
	No.4		1.58		100%		2.17	100%	
	No.5		1.43		100%		3.08	100%	
加温 処理後	No.1	-	0.36	0.18	凝集破壊	0.34	0.32	凝集破壊	
	No.2		0.12		40%		0.43	凝集破壊	
	No.3		0.05		35%		0.27	凝集破壊	



(1) 領域A (2) 領域B(加温前) (3) 領域B(加温後) (4) 領域C(加温前) (5) 領域C(加温後)

図-5 建研式引張試験による接合面の破断状況(一例)

以上より、熱膨張性材料を添加させた防錆剤を塗布した鋼床版上 SFRC 舗装法は、電磁誘導加熱機器による加温処理によって接着層の引張接着強度を低下させ、破壊面も防錆剤塗布層内となることから、SFRC の部分的な再補修を簡易的に施すことが可能であると考えられる。

5. まとめ

- (1) 建研式引張試験より、解体性材料を用いた道路橋鋼床版上 SFRC 舗装の疲労試験終了後における SFRC 舗装界面の引張接着強度は熱膨張性材料の有無にかかわらず荷重条件が最も厳しい載荷輪直下においても基準値である 1.0N/mm² を十分に満足し、破断面においても破断面積の 92%以上が SFRC 側で引張破壊に至っている。よって、自然な気象条件下での車両走行による疲労に対して熱膨張性材料の添加による付着性への影響は見られず、健全な付着性を有している。
- (2) 防錆剤に熱膨張性材料を添加して塗布した領域では、電磁誘導加熱機器による加温処理を行うことで引張接着強度を大幅に低減させることができ、破断面においても一部 SFRC の付着が見られるものの防錆剤層での凝集破壊となるため SFRC を簡易的に撤去することで、鋼床版上 SFRC 舗装における部分的な再補修を施すことが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) (独)土木研究所ほか：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する研究(その 2・3・4) 報告書—SFRC 舗装による既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル(案)一、共同研究報告書整理番号第 395 号, 2009.10
- 2) 野口博之ほか：早強・普通セメントに低収縮型早強性混和材を配合した鋼床版 SFRC 舗装における応力低減効果および耐疲労性の評価、構造工学論文集, Vol.62A, pp.1226-1239, 2016.3
- 3) (国研)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ：鋼床版 SFRC 舗装の環境作用を考慮した耐久性に関する研究, 土木研究所資料, 第 4426 号, 2022.9
- 4) 木下孝樹ほか：鋼床版上の鋼繊維補強コンクリート舗装撤去の施工方法, 舗装, Vol.55, No.4, pp.21-24, 2020.4
- 5) 木下孝樹ほか：解体可能な接着材を用いた鋼床版 SFRC 舗装の接合技術の研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.76, No.1, pp.36-50, 2020.
- 6) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II, 2017.11
- 7) (一社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説—付・設計例—2012年改訂版, 2012.
- 8) 水越陸視ほか：SFRC の曲げ疲労ひび割れ進展寿命の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.199-204, 2000.6