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 静岡県富士市大渕 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¹¹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載荷に伴い,載荷位置に応じて,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

	コンクリート							鋼繊維	
セメントの 種類	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	24 N/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. ブ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 載荷を実施して 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	人上(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 ϕ 100mm 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°C)と、2 年間屋外暴露後(外気温 24~25°C) 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°C)での引張試験を主体に行うととも に、高温(50°C)、低温(-10°C)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		20°C	17.0%	2.93	98
1-2	1			2.29	95
1-3				2.29	95
2-1				2.62	97(96)
2-2	2			2.04	97(95)
2-3				2.06	95(94)
3-1	3	-10°C	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		50°C	23.8%	2.29	100
4-2	4			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



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 は接着材の点在が見られ、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℃ 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℃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⁾と切出し試験体 の試験結果の比較を示す. ここで、小型試験では、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



(※ 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 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 エマニュアル(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)