

論文

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

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

*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)

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

****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 東京都新宿区谷田町 2-33)

既設鋼床版の疲労き裂への対策として, SFRC 舗装による補強工法が提案されている. この補強工法において, デッキプレートと SFRC 舗装の接合面及び舗装体の強度及び耐久性を確保するには, 適切な接着材, 舗装材料及び構造細目の選定が重要であり, そのためには所要の性能があることを評価する必要がある. 本稿では, SFRC と接着材接合面の強度及び耐久性の評価のための試験内容及び試験結果について報告する.

キーワード: SFRC, 接合面, 接着層, 耐久性

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. 閉断面縦リブ(以下, Uリブ)を有する鋼床版デッキプレート(以下, デッキ)とUリブ間に発生している主な疲労き裂としては, 輪荷重直下のUリブとデッキの片側すみ肉溶接のルート部から主に板厚方向に進展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, 既設鋼床版に広く適用されている²⁾. この工法は, SFRCを接着材によりデッキと一体化させることで, デッキの局部変形を抑制し, 主にデッキとUリブの溶接部の応力を低減することにより, 当該溶接部の疲労き裂の発生を防止し, 進展を抑制することを目的としている.

一方, 当初より SFRC 舗装のひび割れ発生後の応力低減効果の持続性や, ひび割れや舗装端部からの水の浸入の影響も含めた舗装体及び接着材接合面の強度, 耐久性に係る懸念が課題として挙げられている. 疲労対策としての同工法の適用性については輪荷重走行試験等により検討が行われているが, 現場における様々な条件に対して, 十分な耐久性を有していることを検証することは

容易ではなく, 耐久性に関する性能評価試験結果に基づき, 技術的知見を蓄積していくことが重要と考えられる.

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, SFRC 舗装の耐久性評価に関する各種の実験的・解析的検討を進めてきた. また, それらの試験結果や既往の調査研究, 施工事例等の技術的知見を踏まえ, 同工法を適用する場合の基本的な考え方, 概ね妥当と考えられる材料, 構造細目, 及び個別橋梁の構造・施工条件に応じた設計・施工上の留意点を技術資料²⁾としてとりまとめている. また, 文献³⁾において, 接着材接合面の耐久性の評価を目的として小型試験体を用いた強度試験と SFRC 舗装を施工した実大鋼床版試験体を用いた輪荷重走行試験の試験結果について報告している. 接着材に関しては温水負荷を与えた場合や高温時に破壊形態が SFRC 内の材質破壊から界面破壊に変化する可能性があることを示している.

本稿では, 接着材接合面の強度及び耐久性について, 接着材接合面を模擬した小型試験体を用いて, 過年度の試験とは異なる環境負荷条件下で実施した強度試験の概要及び試験結果について報告する.

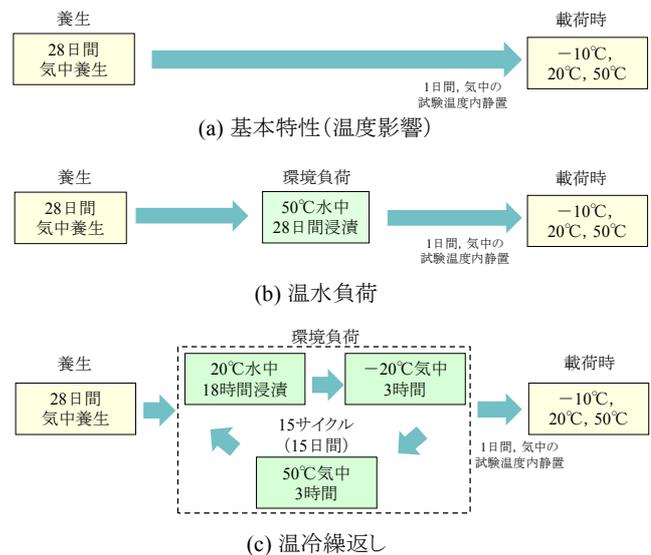
2. 試験項目と環境負荷条件

(1) 試験項目

表-1 に接着材接合面の試験項目とその概要を示す. また, 図-1 に環境負荷による試験条件をまとめる. 接

表一 接着材接合面の試験項目とその概要

試験項目		試験概要
基本特性 (温度影響)	せん断強度 引張強度	【養生】 28日間気中養生
		【試験時温度】 -10℃, 20℃, 50℃ (養生後, 恒温室に1日静置)
温度変化と 水に対する 耐久性	せん断強度 引張強度	【養生】 28日間気中養生
		【環境負荷】 ・温水負荷 ・温冷繰返し 【試験時温度】 -10℃, 20℃, 50℃ (環境負荷後, 恒温室に1日静置)



図一 環境負荷条件

着材接合面には、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、ひび割れ発生部では引張力が作用する。本研究では、過年度の調査研究²⁾³⁾を踏まえて、接合面の引張試験とせん断試験を行うこととした。

(2) 試験における環境負荷条件

せん断及び引張試験における環境負荷の条件設定の考え方について示す。

1) 温度の影響

接着材の強度特性は使用温度により変化すると考えられることから、載荷試験時の温度をパラメータとした。試験時の温度は、標準的な温度(20℃)に、高温側50℃と低温側-10℃を加えた3ケースとした³⁾。影響の大きいと考えられる高温側の試験温度については、都市内高速道路のSFRC舗装内部での計測結果(デッキ面から10mm上位置)より、50℃と設定した²⁾。また、接合面の温度変化と水に対する耐久性に対する試験時においても、同様に試験時の温度を3ケースとした。

2) 温度変化と水による環境負荷の影響

接着材の付着性能の低下には、温度変化と水の存在が影響を与える³⁾ことから、載荷試験前に両者の同時作用による環境負荷を与えることとした。環境負荷の条件としては、実橋でのSFRC舗装内部の温度やひび割れからの水の浸入の影響を考慮して、以下に示す2ケースとした。

一つは、文献²⁾に示される、50℃の水中の28日間の完全浸漬とし、その後、1日間は気中の試験温度内で静置させるという環境負荷(以下、温水負荷)である³⁾。もう一つは、20℃水中18時間、-20℃気中3時間、50℃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日間は気中の試験温度内で静置させるという環境負荷(以下、温冷繰返し)である。この温冷繰返しは、首都高速道路において、コンクリート構造物の剥落防止工法の性能評価試験(層間付着性能試験)の際の環境負

荷条件⁴⁾である。文献⁴⁾では、20℃気中養生や20℃半水中養生の場合と比較して、温冷繰返しによりコンクリート面と主材料である保護シート間の付着強さが低下する結果が得られている。SFRC舗装の接合面とは環境負荷条件は異なるが、より実橋に近い厳しい条件と考えられることから比較対象とした。環境負荷期間については本来接合面の条件を踏まえて設定すべきであるが、期間設定に関する知見が十分でないため、文献⁴⁾を参考に15日間とした。

3. 試験方法

(1) 試験体及び使用材料

図一に接着材接合面のせん断及び引張試験に用いた試験体の寸法形状を、表二にSFRCの配合条件を示す。既設橋の場合、交通規制を伴う場合が多いことから、急速施工を前提として超速硬セメントを使用した。表三に接着材の性状及び硬化樹脂の物性を示す。

せん断試験では、デッキ表面を模擬した鋼板上面に接着材を塗布し、75mm厚のSFRCを打設することにより、接合面を模擬した試験体とした。引張試験でも、同様に鋼板上にSFRCを打設し、φ100mmのコアカッターを用いて鋼板部分まで切り込みを入れることによりコア抜き引張試験体を製作した。いずれの試験体においても、水中浸漬時には側面から接着面に水が浸入することを想定している。

接着材は表三に示す強度特性を有するエポキシ樹脂系とし、鋼床版上のSFRC舗装の接合への使用実績がある2種類(以下、接着材A、B)を対象とした。なお、接着材Aについては過年度に同様の試験を実施しているが³⁾、接着材Bについては今回新たに追加したものである。塗布量は標準的な使用量10/m²(平均塗布厚1mmに相当)とした。製作時には、素地調整した鋼板上に所定量を垂らし、へらで厚さが均一になるようにした。な

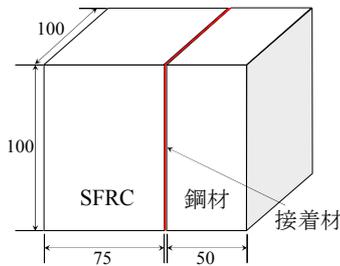
表-2 SFRCの配合条件

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	φ0.6×30mm	100

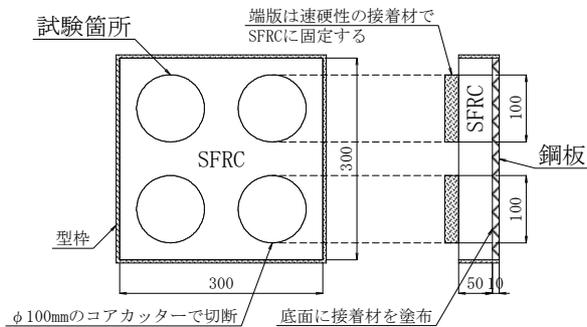
表-3 接着材の性状及び硬化後の材料物性

項目	接着材A		接着材B	
	主 剤	硬化剤	主 剤	硬化剤
主 成 分	エポキシ樹脂	脂肪族ポリアミン	エポキシ樹脂	変形脂環式ポリアミン, 変性脂肪族ポリアミン
外 観	白色ペースト状	青色液状	白色粘稠液状	淡黄色液状
混 合 比	主剤:硬化剤=5:1(質量比)		主剤:硬化剤=3:1(質量比)	
硬 化 物 比 重	1.40±0.20(JIS K 7112)		1.20±0.10(JIS K 7112)	
圧 縮 強 さ	50 N/mm ² 以上(JIS K 7181)		50 N/mm ² 以上 (JIS K 7208*)	
圧 縮 弾 性 係 数	1.0×10 ³ N/mm ² 以上(JIS K 7181)		1.0×10 ³ N/mm ² 以上 (JIS K 7208*)	
曲 げ 強 さ	35 N/mm ² 以上 (JIS K 7171)		35 N/mm ² 以上 (JIS K 7203*)	
引張せん断接着強さ	10 N/mm ² 以上(JIS K 6850)		10 N/mm ² 以上(JIS K 6850)	

注) 各社の技術資料をもとに作成。 ※印は廃止規格を表す。



(a) せん断試験用



(b) 引張試験用

図-1 小型試験体の寸法形状

表-4 試験ケース

試験項目	接着材	環境負荷条件	試験温度	試験体数
せん断試験	A	なし	-10℃, 20℃, 50℃	9
		温水負荷	-10℃, 20℃, 50℃	9
		温冷繰返し	-10℃, 20℃, 50℃	9
	B	なし	-10℃, 20℃, 50℃	9
		温水負荷	-10℃, 20℃, 50℃	9
		温冷繰返し	-10℃, 20℃, 50℃	9
引張試験	A	なし	-10℃, 20℃, 50℃	9
		温水負荷	-10℃, 20℃, 50℃	9
		温冷繰返し	-10℃, 20℃, 50℃	9
	B	なし	-10℃, 20℃, 50℃	9
		温水負荷	-10℃, 20℃, 50℃	9
		温冷繰返し	-10℃, 20℃, 50℃	9



写真-1 せん断試験状況

写真-2 引張試験状況

お、接着材のガラス転移点は、ガラス転移点温度試験 (JIS K7121) の結果、接着材 A では 56.3℃、接着材 B では 52.5℃であった。

鋼繊維は、φ0.6mm、長さ 30mm の両端フック型のファイバーで、混入率は 1.27vol.% (100kg/m³) とした。

試験体は、文献2)に従い製作した。素地調整は、鋼板の接着面に対して、プラスト工法 (投射密度 150kg/m²) により行い、素地調整後は表面の鉄粉等の汚れを溶剤でふき取った。また、接着材 A、B の試験体ともに、同一バッチの SFRC を使用して製作した。表-4 に試験ケースを示す。

(2) 試験方法

試験体製作後、2章に示した環境負荷を与えてから、せん断及び引張強度試験を実施した。なお、試験時の温度影響に関する試験では、試験前に試験温度に設定した恒温室に1日間静置している。試験は各ケースについて3体ずつ実施した。

1) せん断試験

写真-1に試験状況を示す。試験体の鋼板部分を載荷治具に固定し、万能試験機を用いて、所定の温度条件で SFRC 部分を載荷速度 1mm/min で破壊するまで載荷し、その際の最大荷重を計測した。

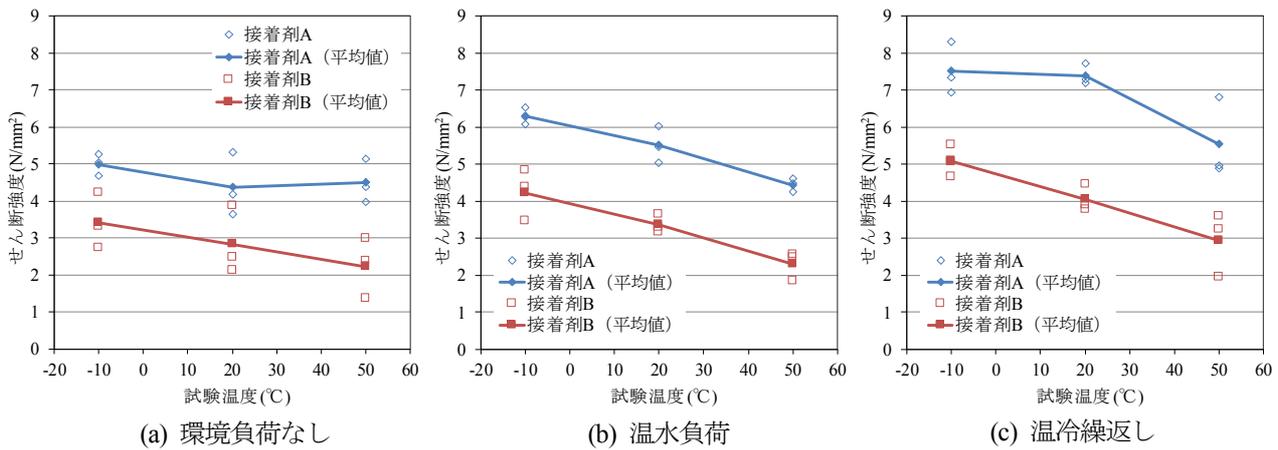


図-2 接着材接合面のせん断試験結果

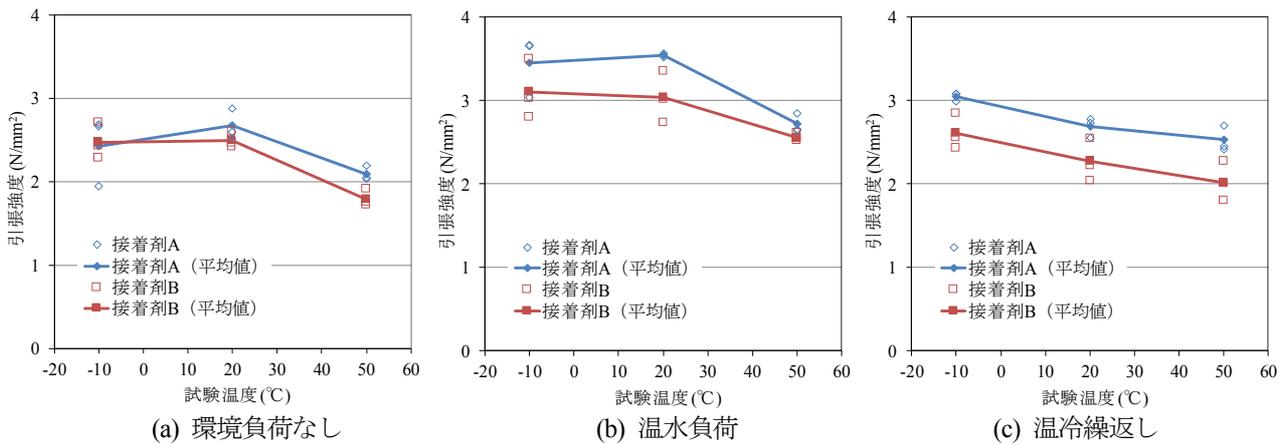


図-3 接着材接合面の引張試験結果

2) 引張試験

写真-2 に試験状況を示す。建研式接着力試験機により、約 0.1N/mm²/sec の速度で鉛直方向に破壊するまで載荷し、その際の最大荷重を計測した。

3) 破壊性状の観察

破壊性状については、目視で破断面を観察した。なお、接着材 A については、試験結果を踏まえ、SFRC 内での破壊と、接着材内での破壊の 2 種類に区分し、面積割合を算出した。接着材 B については未計測である。

4. 試験結果と考察

図-2, 3 に接着材接合面のせん断及び引張試験結果を、表-5 にせん断試験後の破断面の状況 (SFRC 側) を示す。せん断及び引張試験における破壊性状は、全ての試験体において概ね SFRC 内での材質破壊であった。なお、試験時 (20°C) の SFRC の圧縮強度は、負荷無しでは 75.5N/mm² (材齢 29 日)、温水負荷では 83.9N/mm² (材齢 57 日) であった (温冷繰返しは未計測)。また、著者らが、同一配合条件の SFRC について別途実施した圧縮試験結果を図-4 に示す。

1) 破断面の状況

表-5 の破断面の状況写真より、SFRC 側に概ねコンクリート面が観察できる。接着材 A の試験体では、ほとん

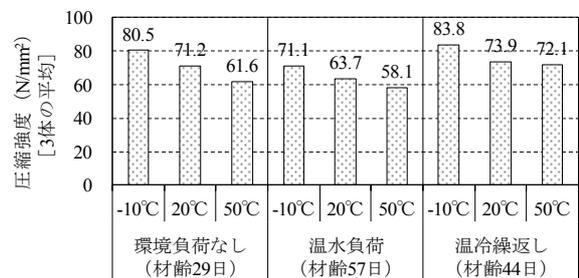


図-4 SFRC の圧縮試験結果

どの破断面に接着材 (青色) 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) で破壊していることを確認している。破断面のコンクリート部分の面積割合は、接着材 A の試験体では 92~95% であった。

また、試験直後の破断面において、写真に見られるように、水の浸入の痕跡とみられる黒みがかかった部分 (しみ) が見られた。このしみは、温水負荷と温冷繰返しの両者の試験体に見られたが、温冷繰返しの方が顕著であった。以上より、接合面への水の影響という点では、温冷繰返しの方が相対的に厳しい環境負荷条件であったと推測される。後述するが、今回の環境負荷の期間では、環境負荷なしの場合に対して、むしろ養生として SFRC の強度が相対的に増加してしまい、温冷繰返しと温水負荷の条件差は明確ではなかった。ただし、環境負

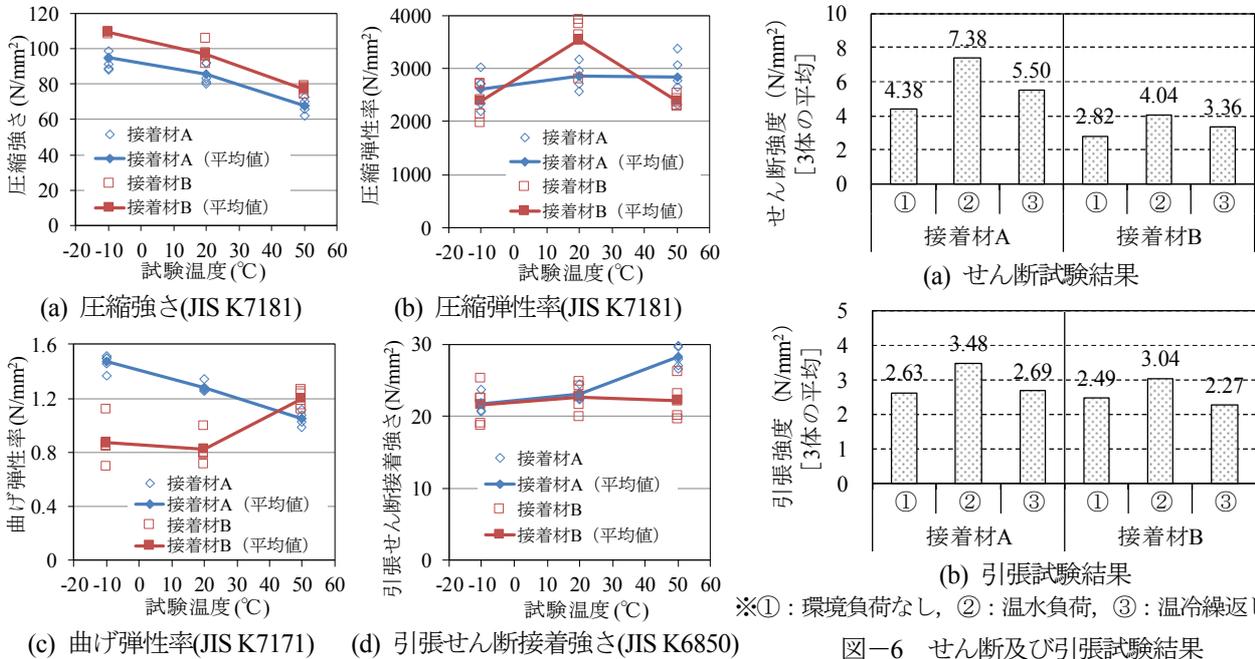
表-5 せん断試験による破断面の状況 (試験時温度 20°C)

環境負荷条件	環境負荷なし	温水負荷		温冷繰返し	
	試験後	試験直後	試験後	試験直後	試験後
接着材A					
	93% (92, 95%)	94% (94, 95%)		93% (93, 94%)	
接着材B					

※1.試験直後：試験終了後20°C恒温室内で速やかに撮影した試験体

※2.試験後：試験終了後20°C恒温室内で24時間以上乾燥させた後撮影した試験体

※3.図中の数値は破断面のコンクリート部分の面積割合であり、括弧内は他の同一試験ケース2体の値を示す。



※①：環境負荷なし，②：温水負荷，③：温冷繰返し

図-6 せん断及び引張試験結果 (環境負荷に着目：試験温度 20°C)

図-5 接着材単体の強度・材料特性試験結果

荷の期間を長くした場合には、接合面への水の浸入の影響により、温冷繰返しの方が接着性能の低下をより短期間で確認することが出来る可能性があると考えられる。

2) 試験時の温度の影響

図-2、図-3より、環境負荷条件や接着材の種類により、強度の差異が見られるが、総じて、50°Cでは20°Cに対してせん断強度、引張強度ともに小さくなる傾向が見られた。また、-10°Cでは強度が大きくなる傾向が見られたが、その要因としては、コンクリート中の水分の凍結の影響によりコンクリート強度が若干増加したことが考えられる。強度の絶対値は、接着材Aに比べて接着材Bの方が小さい値となった。なお、文献3)では、接着材Aについて、今回の試験と同様に試験時温度のせん断強度への影響を検討しているが、温度変化に対する低下傾

向は、今回の試験結果と同じであった。

図-5に、別途JIS規格に基づき実施した接着材単体の試験結果(圧縮強さ、圧縮弾性率、曲げ弾性率、引張せん断接着強さ)を示す。圧縮強さの温度依存性については図-3と同様の傾向を示しているが、他の強度・材料特性については、接着材毎に必ずしも傾向は一致していない。ただし、引張せん断接着強さは50°Cまでは低下していないことや、SFRC内での破壊であることから、今回の試験条件では接着材としての強度への影響については小さいことが考えられる。一方、例えば、曲げ弾性率には変化が見られており、接合面の応力集中の変化が強度に多少なりとも影響を与えている可能性が考えられる。

これに対して、試験時温度を変えた場合のSFRCの圧

縮強度（図-4 参照）は、温度増加とともに低下している。圧縮強度の比率は 20℃に対して 50℃では負荷なしで 87%、温水負荷で 91%、温冷繰返しで 98%となっている。図-2,3 の強度の全体的な傾向はコンクリートの強度変化の影響を受けているものと推測される。

3) 環境負荷の影響

図-6 に、図-2, 3 より試験時温度 20℃の場合の環境負荷影響の結果を抽出して比較する。せん断及び引張強度の大小関係では、概ね、環境負荷なし<温冷繰返し<温水負荷となっており、環境負荷により強度が増加する結果となっている。

環境負荷なしと温水負荷における SFRC の圧縮強度は前述のとおり、それぞれ 75.5, 83.9N/mm²であり、11%程度の増加であったにもかかわらず、接着材 A の場合のせん断・引張強度は、温水負荷ではそれぞれ 68%, 32%と大幅に増加している。環境負荷条件（水の侵入や温度変化の影響）が、破断面の強度の発現に何らかの影響を及ぼしたものと考えられる。

4) せん断強度と引張強度の関係

図-7 に、同一条件でのせん断強度と引張強度の関係を示す。両者には一定の相関性が見られており、引張強度が増加すればせん断強度も大きくなる傾向にある。ここで、SFRC の割裂引張強度は圧縮強度の 1/10 程度であり⁹⁾、今回の SFRC では 8N/mm²前後と推測されるが、これに対して引張強度は小さい値を示している。また、引張強度はせん断強度と比較して、接着材 A,B ともに 1.8~3.5N/mm²の範囲にあり、せん断応力（2.2~7.5N/mm²）と比較すると変化が小さい。これらの理由は現時点では明確ではないが、引張試験時の接合面の応力分布（応力集中の影響）や、接合面でのコンクリート中の骨材や SF の状態が影響している可能性が考えられる。

以上、接着材接合面の強度特性及び強度発現に及ぼす要因については不明な点が多いが、今回の環境負荷条件下では接着材自体の強度や耐久性は確保されており、むしろ接着材に接した SFRC 部分の強度に着目すべき結果が得られた。環境負荷条件（特に負荷期間）と実際の供用期間との対応関係や、接着材に接した SFRC 部分の強度特性について、接着材単体の特性とともに引き続き検討していく予定である。

5. まとめ

SFRC 舗装と鋼床版デッキを接合する接着材に関して、現在適用されている 2 種類の接着材 A, B を対象として、接合面を模擬した小型試験体のせん断・引張試験を行い、試験時の温度や環境負荷の影響について検討を行った。主な結果を以下にまとめる。

- 1) 接着材 A, B では、試験時温度や環境負荷条件に対する強度特性が異なっていたが、その破断箇所は、いずれも接着材内ではなく接合面からわずかに SFRC

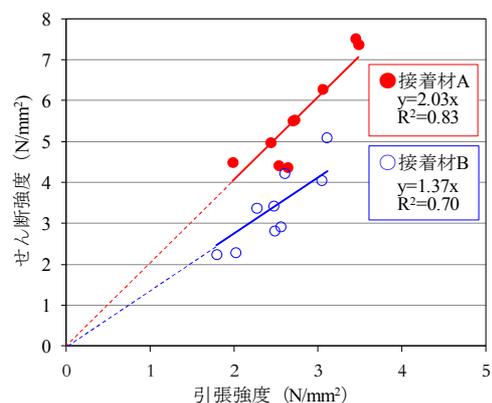


図-7 せん断強度と引張強度の関係

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)であった。

- 2) 環境負荷条件により、せん断・引張強度の値に相違が見られたが、総じて、温度が高い場合には、せん断強度、引張強度ともに小さくなる傾向が見られた。
- 3) 温水負荷と温冷繰返しでは、環境負荷なしの場合と比較して、環境負荷により強度が増加する結果となった。ただし、接合面への水の影響という点では、温冷繰返しの方が相対的に厳しい環境負荷条件であったと推測される。

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.
- 4) 井戸功誠，友清剛，繪嶋武史，河合康統：新材料を用いたコンクリート構造物の補修方法に関する性能評価試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1571-1576，2003.
- 5) (独)土木研究所，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 4）報告書—SFRC の基本物性と接着材接合部における強度特性に関する検討—，共同研究報告書，第 413 号，pp.55-56，2011.2.

(2016 年 7 月 18 日受付)