(47) 鋼床版SFRC舗装における 接着剤接合部のせん断疲労挙動

松本 稔将1・村越 潤2・小野 秀一3・高橋 実4・森 猛5

 ¹学生会員 首都大学東京大学院都市環境科学研究科博士前期課程 (〒192-0397東京都八王子市南大沢 1-1)
 E-mail: matsumoto-toshimasa@ed.tmu.ac.jp

2正会員 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)

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 静岡県富士市大渕 3154) E-mail: ono@cmi.or.jp

⁴正会員 (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) E-mail: mtakahas@pwri.go.jp

⁵フェロー会員 法政大学客員教授 デザイン工学研究科 (〒184-8584 東京都新宿区市谷田町 2-33) E-mail: mori@hosei.ac.jp

既設鋼床版橋の溶接部の疲労損傷に対する効果的な対策工法として,既存のアスファルト舗装を剛性の 高い SFRC 舗装に置き換える工法が挙げられる.この工法は,鋼床版と場所打ち SFRC を接着剤により接 合し一体化させ,鋼床版の局部変形・応力の低減を図るものであるが,輪荷重載荷時の繰返し応力作用や 水や温度による環境作用に対する接着剤接合部の耐久性に関しては,依然として知見が少ない.本研究で は,接合用の2種類のエポキシ樹脂系接着剤による接合部を模擬した小型試験体を用いて,1面せん断に よる静的試験と疲労試験を行い,接合部の疲労挙動を分析した.その結果,静的せん断強度で無次元化し た疲労強度曲線を得るとともに,疲労強度と接合面の破壊形態との関係について明らかにした.

Key Words: orthotropic steel deck, fatigue, SFRC, adhesively bonded joint, shear fatigue test

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 部に疲労損傷が報告されている¹⁾. このうち,鋼床版の 閉断面リブとデッキプレート間の溶接部に発生する疲労 き裂の対策として,既存のアスファルト舗装を,剛性が 高くかつ比重がほぼ同じである鋼繊維補強コンクリート (以下,SFRC)舗装に置き換えデッキプレートと一体 化させる工法が提案されており,既設鋼床版に広く適用 されている.この工法は,鋼床版と場所打ちSFRCをエ ポキシ系接着剤により接合し一体化させることで,鋼床 版溶接部の局部変形・応力の低減を図るものであるが, 輪荷重載荷時の応力の繰返し作用や,水や温度による環 境作用に対する接着剤接合部の耐久性に関しては依然と

して知見が少ない状況である. SFRC 舗装の適用性については輪荷重走行疲労試験等 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 とは容易ではない.また,実大鋼床版試験体による輪荷 重走行試験では,各種条件下での負荷の影響の検討には 多大な労力を要し,試験条件の制約もあることから,性 能を検証する観点からすれば,接合面を対象とした疲労 及び環境作用による負荷の影響に着目した要素試験を組 み合わせて行うことも検討の余地はあると考えられる.

そこで、本研究では、輪荷重載荷による接合部の応力 の繰返しに対する疲労耐久性を把握するために、これま で接合に使用されている2種類のエポキシ樹脂系接着剤 (本工法用に開発された高耐久性の接着剤と工法適用当 初に使用されていた接着剤)による接合部を模擬した小 型試験体を用いて、1面せん断による静的試験及び疲労 試験を行い、接合部の疲労挙動について検討した。

表-1 SFRC の示万配合									
水セメント比	勿鸟社安	単位使用量(kg/m³))다 가 제	1日本 刘	
W/C (%)	細骨材率 (%)	水 W	セメント C	細骨材	粗骨材	鋼繊維	<u></u> 佩 小 剤 (C×%)	達延剤 (C×%)	
38.2	53.9	153	401	934	840	100	適時	調整	

表-2 SFRCの使用材料

材料		仕様等				
セメント	超速硬セメント					
	材質	JIS G3532適合の鉄線				
谷図 約44 約44	寸法・形状	φ 0.6mm×長さ30mm				
亚門 利以 市田		両端フック型				
	引張強度	600N/mm ² 以上				
細骨材		川砂				
粗骨材	石灰岩砕石					

表-3 SFRCの品質規格値

圧縮強度	粗骨材	スランプの
(材齢3時間)	最大寸法	範囲
24N/mm ²	13	

デッキプレート面と SFRC 舗装の接合面を模擬



図-1 横置きにした試験体の寸法形状とひずみ計測

表4 接着剤の性状及び硬化後の特性

百日	接着	「剤A	接着剤B			
項目	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	ポリチオール, 変性脂肪族ポリアミン		
外観	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	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)		1.35±0.10	(JIS K7112)			
圧縮強さ	50N/mm²以上	(JIS K 7181)	70N/mm²以上(JIS K 7208 [※])			
圧縮弾性係数	1.0×10 ³ N/mm²以。	上(JIS K 7181)	2.0×10 ³ N/mm ² 以上(JIS K 7208 [※])			
曲げ強さ	35N/mm²以上	(JIS K 7171)	40N/mm ² 以上 (JIS K 7203 [※])			
引張せん断接着強さ 10N/mm ² 以上(JIS K 6850)		(JIS K 6850)	10N/mm ² 以上 (JIS K 6850)			
		注) 名	各社の技術資料をもとに任	「成. ※印は廃止規格を表す.		

2. 試験体

(1) 使用材料

a) SFRC

表-1~3 にそれぞれ SFRC の示方配合,使用材料,品 質規格値を示す.材料及び配合は,文献2)を参考にした. 既設橋への急速施工を想定して超速硬セメントを使用し た.なお,SFRC の圧縮強度は,33.8N/mm²(材齢3時 間),64.6N/mm²(材齢28日)である.

b) 接着剤

表4に SFRC 舗装の接合に使用した2種類の2液混合型のエポキシ樹脂系接着剤の性状及び硬化後の材料物性を示す. 接着剤Aは本工法用に開発された高耐久性接着剤であり,広く使用されている. 接着剤Bは比較用とした接着剤であり,十数年前の SFRC 舗装適用当初に使用されていたが,現在では舗装には使用されていない.

(2) 試験体

図-1に横置きにした試験体の寸法形状とひずみ計測位

置(後述)を示す. 試験体の SFRC 舗装の厚さは実際の 舗装厚に合わせて 75mm とした. 鋼材の厚さは試験時の 治具への固定を考慮して 50mm とした. 試験体の製作方 法は,実施工を模擬することとし,既往の研究²³³と同 ーとした. 図-2に試験体の製作状況を示す. 試験体の接 合面の製作手順⁴を以下に示す.

- ショットブラストにより鋼材の接合面(デッキプレート上面を模擬)の黒皮を除去する.ショットブラストは、除錆度 Sa2.5 程度を目標に、投射密度 150kg/m²で 粒径 1.4mmの研掃鋼による吹き付けを行った.
- 2) 鋼材を並べて上面に接着剤をへらで膜厚が均一となる ように塗布(図-2(a))した後,鋼材の側面に SFRC を打 設するための型枠を取り付ける.塗布量はそれぞれ標 準的な使用量1.4kg/m², 1.35kg/m²(平均塗布厚 1mm に 相当)とした.
- 3) 接着剤の可使時間(120分)内に SFRC を打設(図-2(b))し, 締め固め後,試験体をビニールシートで覆い,材齢 28 日まで養生を行った.

(a) 接着剤の塗布状況



(b) SFRCの打設状況図-2 試験体の製作状況

晋培 台 带 冬 仲	计影话口	接着剤種類			
泉境負何未忤	武	А	В		
	塩的ナノ断対験	6体	6体		
負荷無し	肝りせん四試験	(AS1~AS6)	$(BS1 \sim BS6)$		
(試験時まで20℃恒温)	上, 账店出款	8体	9体		
	ゼん町波方武映	$(AF1 \sim AF8)$	$(BF1 \sim BF9)$		
	±2,64,1℃,1kC→4,E公	2体	2体		
● 目前日り (50℃ 泪水に 169日 問浸清	静的せん町試験	(ADS1,ADS2)	(BDS1,BDS2)		
(50℃温水に106日間没債) ※ 試驗時まで20℃ 恒温)	止/ 账店 兴 段	3体	3体		
し、 戦 戦 戦 戦 戦 戦 戦 戦 戦	ゼル町波力武映	$(ADF1 \sim ADF3)$	$(BDF1 \sim BDF3)$		
試験体数量	計	19体	20体		
		注)括弧内は各条(牛での試験体 No.		

表-5 試験体の数量と環境負荷条件

180 120 άψτ 試験機 22 ~~138 30 _50 載荷板 8 30 試験体 36 _48 105 65 鋼材 SFRC舗装 鋼材部分の _50 75 100 固定治具 Ċ (a) 側面図 (b) 正面図

図-3 試験体とせん断試験用治具による試験方法

新材部立の 武験機 載荷板 試験体

図-4 試験状況(側面)

3. 試験方法

(1) 試験条件

表-5に試験体の数量と環境負荷条件を示す.負荷の有 無に関わらず,打設後は 20℃の恒温室内で 28 日間養生 している.その後,表中の負荷無しの試験体については, 試験時まで 20℃に調整された恒温室内に保管した.負 荷有りの試験体については,保温水槽を用いて 50℃の 温水中(実橋での舗装内部の計測温度やひび割れからの 水の浸入の影響を想定)に 168 日間(24 週間)浸漬し,そ の後,試験時まで 20℃に調整された恒温室内に保管し た.

試験体は、表に示すとおり、AS, BS, AF, BF, ADS, BDS, ADF, BDF と名付けた. 1番目の文字は接着剤の種類を、 最後の文字は試験方法(静的試験: S, 疲労試験: F)を, D は環境負荷有りであることを表す. 試験体の内訳は、負 荷無しでは静的試験 12体、疲労試験 17体、負荷有りで は、静的試験4体、疲労試験6体である.

(2) 載荷方法と計測内容

載荷方法は,既往の研究^{2,3}と同一とした. 図-3 に試 験体と製作したせん断試験用載荷治具による試験方法を, 図-4 に試験状況を示す. 100kN 疲労試験機を用いて静的 載荷試験及び疲労試験を行った.試験体を横置きにし, 50mm の鋼材部分を接合面まで固定し,一面せん断に近 い載荷条件とした.なお,曲げの影響を極力小さくする ために接合面に直交する方向の拘束も考えたが,拘束力 の制御が難しいため,図-3に示すとおり鋼材部分を固定 する方法とした.試験時には前掲の図-1に示す位置(上 下面・表裏面に,接合面から10mm位置)に弾性1軸ひ ずみゲージ(ゲージ長:10mm)を貼付し,荷重状態等を 確認するために,SFRC部のひずみを計測した.

静的せん断試験では載荷速度 1mm/min の変位制御とし, 試験体の鋼材部と SFRC 部の接着接合部が破壊するまで 載荷板により載荷した.荷重を極力均等に載荷するため, 載荷板と試験体の接触する載荷面に 1.5mm 厚さの硬質ウ レタンゴム (ポリエーテル系)を敷いた.予め,載荷面 に感圧紙を敷いて接触圧を調査するとともに,ひずみの 計測データも踏まえて,載荷面の接触圧に極端な偏りが ないことを確認している.疲労試験では載荷速度 10Hz を基本とし最長 10⁷回まで載荷を実施した.各試験体の 試験時の荷重範囲は,破壊回数 Nを確認しつつ疲労強度 の傾向がつかめるように適宜調整した.最小荷重は試験 体と試験機の接触状態を確保するため,0.5~1.4kN の範 囲で設定した.なお,一連の試験は 6~1 月に室内で実 施しており試験時の温度は 10~30℃前後である.

衣-0 肝中リビん肉 砂硬結米									
環境 負荷	接着剤 種類	試験体	破壊時の 荷重	静的せん断強度 (N/mm ²)					
条件		INO.	P (kN)	算出值 σ_s	平均值 $\overline{\sigma_s}$	標準偏			
		AS1	41.137	4.11		0.59			
		AS2	43.698	4.37					
	٨	AS3	55.428	5.54	1 70				
	А	AS4	41.620	4.16	4.79				
		AS5	51.555	5.16					
負荷		AS6	53.778	5.38					
無し	В	BS1	43.494	4.35		0.52			
		BS2	55.788	5.58	5.24				
		BS3	59.820	5.98					
		BS4	50.582	5.06	5.54				
		BS5	56.687	5.67					
		BS6	53.816	5.38					
		ADS1	42.230	4.22	2.00				
負荷	A	A ADS2 31.570 3.16		3.16	3.09	-			
有り	В	BDS1	37.870 3.79 4.20		4 20				
	В	BDS2	46.180	4.62	4.20	-			

表-6 静的せん断試験結果

静的試験結果は式(1)の静的せん断強度で,疲労試験 結果は式(2)のせん断応力範囲と,式(3)のせん断強度比 を用いて整理した.

$$\sigma_s = \frac{P}{A} \tag{1}$$

$$\Delta \sigma_r = \frac{\left(P_{max} - P_{min}\right)}{A} \tag{2}$$

$$S_{R} = \frac{\Delta \sigma_{r}}{\sigma_{s}} \times 100 \tag{3}$$

ここで,

 $\sigma_s:静的せん断強度(N/mm^2)$

ōs:静的せん断強度の平均値(N/mm²)

P:破壊時の荷重値(N)

A: 試験体の接合部断面積(=10000mm²)

△or: せん断応力範囲 (N/mm²)

Pmax:疲労試験時における最大荷重(N)

Pmin:疲労試験時における最小荷重(N)

SR: せん断強度比(%)

破壊面の状態については、材料破壊(SFRC内),凝 集破壊(接着剤内),界面破壊(鋼材と接着剤の境界) の3種類と、接着剤中の空隙部に分類し、それぞれの面 積割合を調べた.面積割合は、破壊面を写真撮影し、そ の画像を用いて、それぞれの破壊形態の面積より算出し た.

4. 静的せん断試験結果

(1) 静的せん断強度

表-6と図-5に静的せん断試験結果を示す. 負荷無し試



験体の静的せん断強度の各 6 体平均値は, 接着剤 A が 4.79N/mm² (標準偏差 0.64N/mm²), 接着剤 B が 5.34N/mm² (標準偏差 0.57N/mm²) であり, B の方が若干 大きい. 負荷有り試験体の静的せん断強度の各 2 体平均 値は, 接着剤 A が 3.69N/mm², 接着剤 B が 4.20N/mm²で あり, 負荷無し試験体と同様, B の方が大きい. また, 負荷有り試験体は負荷無し試験体に対して,強度は接着 剤 A で 77%, 接着剤 B で 79%に低下している.

(2) 破壊面の状況

図-6 に接着剤 A, B の試験後の破壊面の状況を示す. これらは鋼材側の写真であり,各写真の上側が載荷側で ある.これらの写真を用いて,材料破壊,凝集破壊,界 面破壊,接着剤内の空隙部が占める面積割合を算出した. 図-7 に破壊面の分類と面積割合を示す.ここで,負荷無 しの接着剤 B 及び負荷有りの両接着剤の試験体に関して は,目視観察では接着剤と SFRC との判別が難しかった ため,ブラックライト(紫外線)を照射して接着剤部分を 特定した.

負荷無し試験体の場合,接着剤 A, B ともに概ね材料 破壊が支配的であるが,接着剤 Bの方が,界面破壊の面 積が若干大きい傾向にある.接着剤の破壊形態に関して, 接着性能の信頼性の観点から望ましい破壊形態は材料破 壊とされ,界面破壊は強度のばらつきが大きくなるため に信頼性が低下し,接着剤の性能としては不十分である とされている.前述のとおり静的強度は接着剤 Bの方が 大きいが,破壊面からは接着剤 Aの方が望ましい破壊形 態と考えられる.

一方,負荷有り試験体の場合,接着剤A,Bともに強度が低下し,界面破壊が主体の破壊となっており破壊形態の違いはみられない.界面破壊部分には錆が多くみられており,接合部の内部まで水が浸透していたことがうかがわれる.このような界面破壊への移行は,SFRCの強度が負荷後においても大きく変わらない中,温水の影響により接着剤の界面付着強度が低下したことが主な要因と考えられる.なお,図-6中で錆がみられず鋼材界面



図-7 静的せん断試験における破壊面の分類と面積割合

のようにみえる箇所は、ブラックライトの照射により、 その大半が界面破壊部分であり、一部接着剤の凝集破壊 部分であることを確認している.

なお,破壊面には,接着剤間に線状の空隙が散見され ているが,試験体製作時に何らかの要因で接合部に空気 が混入した可能性が考えられる.

5. せん断疲労試験結果

(1) 疲労強度

表-7 にせん断疲労試験結果を示す.図-8 に S-N 関係を 示す.ここで,縦軸は、図-8(a)では式(2)のせん断応力 範囲、図-8(b)では式(3)のせん断強度比 S₆である.横軸の Nは破壊時の繰返し回数である.図中には、静的せん断 強度との関係を踏まえ、せん断強度比 S₆=100%(せん断 応力範囲 Δα,が静的せん断強度 αの平均値と同値)のと きに N₇=1 を通ると仮定した一次回帰式を接着剤別に実 線で示す.また、この一次回帰式を 2×標準偏差だけ下 方にずらした下限式を破線で示す.いずれも、負荷無し の破壊した試験体のみを対象としている.繰返し回数が 10⁷回となった試験体と、載荷途中で試験機の不具合等 により疲労破壊前に終了した試験体については未破壊扱 いとし、矢印付でプロットした.なお、10⁷回載荷した 試験体 AF6, ADF1 については, せん断応力範囲を大き くして再度疲労試験を行った. 図中には, 参考に横リブ 部を模擬した SFRC 舗装試験体の既往の疲労試験結果⁷

(せん断応力範囲は FEM 解析により算出)を並記した. また,負荷無し試験体及び負荷有り試験体のせん断強度 比は,いずれも負荷無し試験体の静的せん断強度 のの平 均値に対するせん断応力範囲の比率とした.

負荷無し試験体について,接着剤A,BではSN曲線の勾配に相違がみられる.SN曲線のべき乗数は,接着剤Aは32,接着剤Bは21であり,疲労強度としては接着剤Bの試験体より接着剤Aの試験体の方が高い.例えば,実線の一次回帰式に従えば,200万回時せん断疲労強度は静的せん断強度に対して,接着剤Aでは64%,Bでは50%となっている.

負荷有り試験体について,データ数が少なく引き続き 検討が必要であるが,負荷無し試験体の SN 曲線に対し て明確な強度低下はみられない結果となっている.

(2) 破壊面の状況

図-9に接着剤A,Bの試験後の破壊面の状況を,図-10 に破壊面の分類と面積割合を示す.面積割合の算出方法 は前述の静的せん断試験の場合と同様である.

負荷無し試験体について,接着剤Aでは材料破壊が支 配的であるが,接着剤Bでは鋼材表面の露出が多く見ら

環境	接着剤 種類	試験体 No.	載荷荷重 最大荷重 最小荷重		せん断 も応力範囲 専	せん断 強度比 破壊回数	破壊回数	破壊面の分類と面積割合(%) (鋼材側)				
負荷 条件			P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	荷重範囲 (kN)	$\Delta \sigma_r$ (N/mm ²)	S_R (%)	N_f (回)	材料破壊	凝集破壊	界面破壊	接着剤中 の空隙部
		AF1	28.4	0.7	27.7	2.77	57.9	3,553,655	93.2	4.5	0.4	1.9
		AF2	31.5	0.5	31.0	3.10	64.8	3,210,834	90.9	5.2	0.2	3.7
		AF3	35.8	1.0	34.8	3.48	72.7	1,544,985	91.1	5.3	0.3	3.3
		AF4	40.8	0.6	40.2	4.02	84.0	374	92.5	4.8	0.2	2.5
	A	AF5	37.9	0.5	37.4	3.74	78.1	15,819	90.3	6.0	0.2	3.5
		4 56	20.1	0.5	19.6	1.96	40.9	(未破壊)10,000,000	04.9	2.1	0.2	1.8
		AF6	33.0	1.0	32.0	3.20	66.8	42,637	94.0	5.1	0.5	
		AF7	39.0	0.8	38.2	3.82	79.8	(未破壊) 5,841,432	-	-	-	-
負荷		AF8	29.2	0.5	28.7	2.87	60.0	3,485,468	81.6	6.6	6.7	5.1
無し	В	BF1	34.5	0.9	33.6	3.36	63.0	15,751	52.0	10.8	33.9	3.3
		BF2	36.8	1.3	35.5	3.55	66.5	1,153	45.0	8.7	43.8	2.5
		BF3	35.6	1.4	34.2	3.42	64.1	200,759	33.0	8.9	52.5	5.6
		BF4	32.3	1.4	30.9	3.09	57.9	843,419	34.2	8.2	52.5	5.1
		BF5	29.2	1.1	28.1	2.81	52.7	30,415	40.9	8.2	48.3	2.6
		BF6	35.9	1.1	34.8	3.48	65.2	36,205	68.7	6.7	18.4	6.2
		BF7	27.4	0.5	26.9	2.69	50.4	405,805	58.0	9.9	23.8	8.3
		BF8	28.6	1.0	27.6	2.76	51.7	292,272	31.4	3.8	54.8	10.0
		BF9	26.4	0.5	25.9	2.59	48.5	(未破壊)10,000,000	-	-	-	-
		ADF1	29.5	0.5	29.0	2.90	0 60.6 (未破壊)10,000,000	0.2 7.5	00.1	2.1		
	А		31.6	0.5	31.1	3.11	65.0	1,536,155	0.5	1.5	90.1	2.1
点 世		ADF2	31.6	0.5	31.1	3.11	65.0	(未破壊)4,371,164	-	-	-	-
目前		ADF3	36.4	0.5	35.9	3.59	75.0	1,665	0.4	3.4	94.4	1.8
1 1		BDF1	27.2	0.5	26.7	2.67	50.0	(未破壊)9,196,218	-	-	-	-
	В	BDF2	32.5	0.5	32.0	3.2	60.0	9,457,891	3.7	12.0	80.6	3.7
		BDF3	35.2	0.5	34.7	3.47	65.0	203	0.5	10.6	86.0	2.9

表-7 せん断疲労試験結果











図-8 せん断疲労試験結果(S-N関係)







れ界面破壊が生じている. ここで、純粋な一面せん断の

載荷条件ではないため接合面上側には若干の引張力が作 用するが,破壊形態との関係性は破壊面からは特にみら れなかった.

図-11 に負荷無し試験体における,接着層の厚さと破壊面高さの頻度分布の例を示す.また,図-12 に参考として接着層の形成状況(ブラックライト照射)を示す. 図-11 の横軸の高さは,試験体の鋼材と接着剤の接合面を基準としている.接着層の厚さは,せん断試験体と同時に製作した試験体(300×300×12mmの鋼板上に75mm厚のSFRCを施工)を対象に,300mmの一辺を切断した断面を写真撮影し,1mm間隔で計測したもの(データ数は300)である.破壊面高さは,二次元レーザー変位計(KEYENCE 社製レーザー変位計 LJ-V7300,スポット

図-13 ぜん研想度比と介面破壊の面積割合の関係

形状240mm×610µm, 計測間隔300µm) で計測した頻度分 布(データ数は約33000)である.以上のように破壊面 と接着層は同一試験体ではないが、概ねそれらの関係は 把握できると考える. 接着剤 A, B ともに平均接着層厚 は1mm程度であるが、接着剤とSFRCの界面は打設時に それらが混合するため、図-12 に示すとおり凹凸が生じ ている.図-11より,層厚としては高さ 0.2~0.3mm にピ ークがみられ, 最大 4~6mm 程度まで SFRC 中に混入し ている. 破壊面の高さについて, 接着剤Aの場合, 静的 せん断試験と疲労試験ともに, 全試験体の平均値は 1.5mm 程度であった. すなわち, 材料破壊部分について も接着層に非常に近い位置で破壊していることがわかる. 一方、接着剤Bの場合、疲労試験では界面破壊が支配的 となったことから、静的せん断試験(平均 1.1mm) に対 して、疲労試験では平均0.6mmであり、破壊面の高さは 接着層の平均厚以下であった.

負荷有り試験体については、接着剤A、Bともに界面 破壊が支配的である.界面破壊部分の面積割合は、負荷 無し試験体と比較して、接着剤Aでは平均1%から平均 86%、接着剤Bでは平均29%から80%と増加している. これは、静的せん断試験結果と同様に接着剤の界面付着 の疲労強度が低下したことが主な要因と考えられる.

(3) せん断強度比と界面破壊面積の関係

図-13 に負荷無し試験体のせん断強度比 Sa と界面破壊の面積割合の関係を示す.ここで、疲労試験結果のSa は一次回帰式のべき乗数を用いて、200万回時のせん断強度比Sa に換算して示している.静的せん断試験の場合、両接着剤ともに材料破壊が支配的(界面破壊部分の面積割合は、接着剤Aでは平均1%,Bでは平均12%)である.一方、疲労試験の場合、接着剤Bでは前述のとおり界面破壊に移行(界面破壊部分の面積割合は、接着剤Aでは平均1%,Bでは平均41%)しており、接着剤によっては破壊形態が信頼性の低い界面破壊に移行する傾向がみられる.すなわち、接着剤接合部の性能評価の観点からは、静的せん断強度のみでは、接合部の応力の繰返

図-14 接着剤 B の混合破壊の例と線形累積損傷則の 仮定,及び界面破壊 SN曲線のべき乗数 m'

し作用に対する接着性能を適切に評価できない可能性が ある.

6. 破壊形態による疲労強度の違いに関する考察

負荷無し試験体について、両接着剤の SN 曲線とその 破壊形態を踏まえて、破壊形態による疲労強度の違いに ついて考察する.既往研究 %を参考に、SFRC 内の材料 破壊部分について、繰返しひずみに対する線形累積損傷 則が成り立つと仮定し、接合面の SFRC の微小要素の損 傷度に面積割合を考慮することにより、破壊までの損傷 度を表現できると考える.ここで接着剤 A、B ともに材 料破壊であれば接着剤の種類に依存しないと考える.同 様に接着剤 Bの界面破壊部分についても線形累積損傷則 が成立すると考える.その上で、図-14 に示すように、 接着剤 A (材料破壊による S-N 曲線による損傷度とする) と接着剤 B (材料破壊部分の S-N 曲線とよる損傷度とする) と接着剤 B (材料破壊部分の S-N 曲線と素面破壊部分の S-N 曲線による損傷度の和とする)の破壊形態を踏まえ、 両者の関係を以下の式(4)で表した.

$$\beta \cdot D + (1 - \beta) \cdot D' = D'' \tag{4}$$

ここで,

- β: 材料破壊部分の面積割合
- D: 材料破壊における損傷度(接着剤 A の結果を用い て N_f・S_R^mとする.ここで, m=32)
- $D': 界面破壊における損傷度(N_f \cdot S_R^m'とする)$
- D": 混合破壊における損傷度(接着剤 B の結果を用 いて N_f・S_Rとする.ここで, m[~]=21)

式(4)に接着剤Bの各試験体の結果(Nr及びSr)を代入し、

未知数である,接着剤Bの界面破壊における損傷度のべき乗数 m'を求めた.

図-14 中に接着剤 B の m'の計算結果を示す. 界面破壊 の面積割合は 18.4~54.8%である. m'は 20 程度の値とな り,界面破壊に対する S-N 曲線は,接着剤 B の S-N 曲線 (m["]=21)と大きく変わらない式となる. すなわち,接 着剤 B では鋼材との界面破壊に対する疲労強度特性が疲 労強度に大きく影響しているものと推測される.

7. 結論

SFRC舗装に関して、SFRCと鋼板との接着剤接合部を 模擬した試験体を用いた静的せん断試験とせん断疲労試 験を実施し、2 種類のエポキシ樹脂系接着剤接合部の疲 労挙動について検討した.以下に、得られた主な結果を まとめる.

- 負荷無しの試験体の場合,静的せん断強度では接着剤 B(平均 5.34N/mm²)の方が接着剤 A(平均 4.79N/mm²)よりも若干大きいのに対して,疲労強度では接着剤 Aの 方が接着剤 Bよりも大きくなる傾向がみられた.具体 的には、一次回帰式による載荷回数 200 万回時の疲労 強度では、静的せん断強度(平均値)に対して、接着剤 Aでは 64%、接着剤 Bでは 50%に低下した.
- 2)負荷無しの試験体の場合,接合部の破壊形態に関して、 静的せん断試験では2接着剤ともにSFRC内での材料 破壊が支配的であった.一方,疲労試験では,接着剤 Aでは静的せん断試験と同様に材料破壊が支配的であったが,接着剤Bでは界面破壊に移行する傾向がみられた.すなわち,接着剤によっては,疲労載荷では破壊形態が信頼性の低い界面破壊に移行する可能性があり,性能評価の観点からは,静的せん断強度のみでは, 接合部の応力の繰返し作用に対する接着性能を適切に評価できない可能性があることが確認された.
- 3) 負荷有り(50℃温水中への 168 日間浸漬)の試験体の場合、負荷無しの場合に対して、静的せん断強度は接着剤 A(平均 3.69N/mm²)では 77%、瀬着材 B(平均 4.20N/mm²)では 79%に低下した. 接合部の破壊形態に関して、静的載荷、疲労載荷ともに界面破壊への移行(接着剤 A:平均 1%から平均 86%,接着剤 B:平均 29%から 80%)が顕著にみられた. この理由としては、接合面に温水が浸入し、接着剤の界面付着強度が低下

したことによるものと考えられる.

謝辞:本研究は,国土交通省建設技術研究開発費補助 金(平成27~28年度)と(一財)首都高速道路技術セ ンターの研究開発助成(平成29~30年度)の一環とし て実施した.また,疲労試験の一部は松田季里子氏 (現パシフィックコンサルタンツ(株))の卒業研究とし て行われた.ここに記して関係各位に感謝の意を表す る.

参考文献

- 1) 土木学会:鋼構造シリーズ19鋼床版の疲労, pp.63-75, 2010.12.
- (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)-,(独) 土木研究所共同研 究報告書,第395号,2009.10.
- 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) (独) 土木研究所,(株) 鹿島道路,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-,(独)土木研 究所共同研究報告書,第413号,2011.2.
- 5) 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,日本鋼構造協会 第 25 回鋼構造年次論文報 告集, Vol.25, No.9, pp.63-70, 2017.11.
- 6) 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,pp.157-162,2016.11.
- 村越潤,森猛,幅三四郎,小野秀一,佐藤歩,高橋 実:デッキ進展き裂を有する鋼床版に対する SFRC 舗装のき裂進展抑制効果,土木学会論文集 A1(構 造・地震工学), Vol.75, No.2, pp.194-205, 2017.4.
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所,大阪工業大学, 九州工業大学,JFEエンジニアリング(株)他:共同研 究報告書 コンクリート系床版の疲労耐久性の解析 的評価手法の開発,国土技術政策総合研究所資料, 第 844 号, 2015.3.

(Received August 30, 2019)

SHEAR FATIGUE BEHAVIOR OF ADHESIVELY BONDED JOINT IN ORTHOTROPIC STEEL DECK OVERLAID WITH SFRC

Toshimasa MATSUMOTO, Jun MURAKOSHI, Shuichi ONO, Minoru TAKAHASHI and Takeshi MORI

As an effective countermeasure to prevent fatigue cracks at existing orthotropic steel deck (OSD) bridges, steel fiber reinforced concrete (SFRC) overlays with a high rigidity and almost same density were proposed, and it has been increasingly used for existing damaged OSDs. It has been confirmed that they can drastically decrease the out-of-plane deformation of the deck plate and greatly reduce the local stress of the weld route portion where the cracks initiate. However, there are not sufficient data to confirm its durability. It is important to investigate the durability performance under the effect of repeated wheel loading and environmental action. For the purpose of evaluating shear fatigue behavior, shear fatigue tests of epoxy adhesive layer at deck-to-overlay connection with small size specimens were carried out. This paper discusses fatigue strength and fatigue behavior of the adhesively bonded joints.