

## 論文

# コンクリート材料・接着剤の異なる鋼床版 SFRC 舗装の 接合部におけるせん断疲労挙動

白河拓丈\*, 村越潤\*\*, 小野秀一\*\*\*

\* 東京都立大学大学院博士前期課程, 都市環境科学研究科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

\*\* 博(工), 東京都立大学大学院教授, 都市環境科学研究科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

\*\*\* 博(工), (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)

既設鋼床版橋の疲労損傷への対策として, 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。同工法では, 接着剤によりデッキプレートと舗装を一体化させるが, 接着剤接合部における疲労挙動や, 同挙動へのコンクリート材料や接着剤の種類の影響については未だに知見が少ない。本論文では, 早強セメントと2種類の接着剤による接合部に着目し, 同接合部を模擬した小型試験体を用いてせん断疲労試験を実施し, 過年度の超速硬セメント使用時の結果との比較分析も踏まえ, 接合部の静的強度と疲労強度の関係性や破壊性状を明らかにした。

キーワード: 鋼床版, SFRC 舗装, 接着剤接合部, 疲労耐久性

## 1. はじめに

近年, 交通条件の厳しい鋼床版橋において, 輪荷重直下の様々な溶接部位に疲労損傷が報告されている<sup>1)</sup>。このうち, 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主たる対策として, 既存のアスファルト舗装を, 比重がほぼ同じで, 剛性の高い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補強工法が提案され, 現在, 既設鋼床版に広く適用されている。この工法は, 鋼床版とSFRC舗装をエポキシ樹脂系接着剤により接合し合成挙動させることで, デッキプレートの局部変形を抑え, 溶接部の局部応力の低減を図るものである。

SFRC舗装の適用性については, これまで実大試験体を用いた輪荷重走行試験により検討が行われ, 接着剤接合部の疲労耐久性も確認されている<sup>2),3),4)</sup>。第三著者ら<sup>2)</sup>は, 舗装後の鋼床版溶接部とSFRC舗装自体の疲労耐久性の向上効果を確認するために, 輪荷重走行試験(輪荷重69kN, 440万回載荷)を実施し, 接着剤接合部に関して部分的に付着強度の低下がみられたものの鋼床版の補強効果は維持されたとしている。第二著者ら<sup>3)</sup>は, SFRC舗装にデッキプレート表面までの貫通ひび割れを導入させた後, 舗装面を水張り状態にして輪荷重走行試験(輪荷重150kN, 200万回載荷)を実施し, 接着強度の低下はみられず供用安全性に支障を来すような変状は生じなかったとしている。その後, 接着剤接合部に関して, 第二著者らにより, 輪荷重載荷時の主たる作用であるせん断応力

に着目し, せん断疲労強度の検討が行われている。松本・第二著者ら<sup>4)</sup>は, 超速硬セメントと耐久性の異なる2種類のエポキシ樹脂系接着剤(後述の表-2 参照)を対象に, 接合部を模擬した小型試験体によるせん断疲労試験を実施している。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, 疲労強度と破壊形態との関係性について考察している。具体的には, 静的せん断試験ではSFRC内での材料破壊が支配的であっても, 疲労試験では接着剤の種類によっては破壊形態が部分的に界面破壊に移行するとともに, 疲労強度の低下に影響を与えている可能性があることを示している。一方で, 接着剤接合部の疲労強度特性については, 試験データは少なく依然として知見が少ない状況である。

そこで, 文献4)の継続研究として, セメント材料の疲労強度への影響を把握するために, 早強セメントと, 先行研究と同一の2種類のエポキシ樹脂系接着剤による接合部に着目し, 接合部を模擬した小型試験体によるせん断疲労試験を実施した。本論文では, 同試験の結果に基づき, 疲労挙動を分析するとともに, 超速硬セメントの場合の疲労強度との関係性について考察した。

## 2. 試験体

### 2.1 使用材料

#### (1) SFRC

表-1にSFRCの示方配合を示す。参考として, 先行研究<sup>4)</sup>で使用した超速硬セメントについても併記した。材

表-1 SFRC の示方配合

セメント種	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位使用料 (kg/m <sup>3</sup> )					減水剤 (C×%)	遅延剤 (C×%)
			水 W	セメント C	細骨材	粗骨材	鋼繊維		
早強セメント	39.8	53.9	170	427	891	788	100	1.5	0.004
超速硬セメント	38.2	53.9	153	401	934	840	100	1.5	0.3

表-2 接着剤の性状および硬化後の特性

項目	接着剤A		接着剤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	ポリチオール, 脂肪族ポリアミン
外観	白色 ペースト状	青色液状	乳白色粘稠液	黄色透明液
混合比 (質量比)	主剤:硬化剤=5:1		主剤:硬化剤=4:1	
硬化物比重	1.40±0.20 (JIS K 7112)		1.35±0.05 (JIS K 7112)	
圧縮強さ	50N/mm <sup>2</sup> 以上 (JIS K 7181)		60N/mm <sup>2</sup> 以上 (JIS K 7208 <sup>※</sup> )	
圧縮弾性 係数	1.0×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> 以上 (JIS K 7181)		2.0×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> 以上 (JIS K 7208 <sup>※</sup> )	
曲げ強さ	35N/mm <sup>2</sup> 以上 (JIS K 7171)		40N/mm <sup>2</sup> 以上 (JIS K 7203 <sup>※</sup> )	
引張せん断 接着強さ	10N/mm <sup>2</sup> 以上 (JIS K 6850)		10N/mm <sup>2</sup> 以上 (JIS K 6850)	
ガラス転移 温度	56℃		54℃	

注)表中の※印は廃止規格を示す。

料及び配合は、文献5)を参考に設定し、施工時に数日間の交通規制が可能である場合を想定して早強セメントを使用した。20℃の恒温室内で保管した SFRC の圧縮強度(各3体平均値)は、67.1N/mm<sup>2</sup>(材齢7日)、80.3N/mm<sup>2</sup>(材齢28日)である。先行研究<sup>4)</sup>で用いた超速硬セメントの圧縮強度(各3体平均値)は、33.8N/mm<sup>2</sup>(材齢3時間)、64.6N/mm<sup>2</sup>(材齢28日)であり、養生後の強度は早強セメントの方が高い。なお、早強セメントは材齢7日以降での車両荷重の载荷を想定している。同材齢では強度発現途中であるが、強度発現途中の輪荷重载荷の影響は小さいと考え、疲労試験は材齢28日以降に実施した。

## (2) 接着剤

表-2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、現在広く使用されている。接着剤Bは性能の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、現在では本工法には使用されていない。

## 2.2 試験体

図-1に横置きにした試験体の寸法形状と、ひずみ計測位置および変位計測位置(後述)を示す。試験体のSFRC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、先行研究<sup>4)</sup>と同一とした。試験体の製作手順を以下に示す。

1) 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)の黒皮を除去した。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/m<sup>2</sup>で粒径1.4mmの研掃鋼による吹き付けとした。

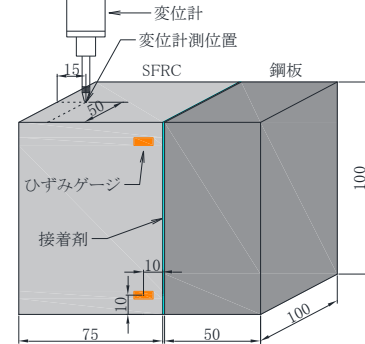


図-1 試験体の寸法形状と計測位置

表-3 試験体一覧

試験種別	接着剤	セメント 種類	試験体 番号	試験体数
静的試験	A	早強	AES1~3	3
	B		BES1~3	3
疲労試験	A		AEF1~9	9
	B		BEF1~9	9

- 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た。塗布量は接着剤A、Bそれぞれの標準的な使用量1.4kg/m<sup>2</sup>、1.35kg/m<sup>2</sup>(平均塗布厚1mmに相当)とした。
- 接着剤の可使時間(120分)内にSFRCを打設し、締固め後、試験体をビニールシートで覆い、20℃の恒温室内で材齢28日まで養生を行った。締固めは、突き棒で突いた後にバイブレーターを型枠側面に数秒間当てることにより行った。
- 養生後はビニールシートを撤去し、引き続き20℃の恒温室内に保管した。

表-3に試験体一覧を示す。試験体名称は、AES、BES、AEF、BEFと付けており、順に接着剤の種類(接着剤A、B)、早強セメントを使用(本論文ではEのみ)、試験方法(S:静的载荷試験、F:疲労試験)を表す。試験体の内訳は、接着剤A、Bに対して、静的载荷試験では各3体(AES1~3、BES1~3)、疲労試験では各9体(AEF1~9、BEF1~9)である。

## 3. 試験方法

試験方法は、先行研究<sup>4)</sup>と同様とした。図-2に試験体とせん断試験用载荷治具による試験方法を示す。100kN疲労試験機を用いて静的载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、一面せん断に近い载荷条件とした。試験時には、

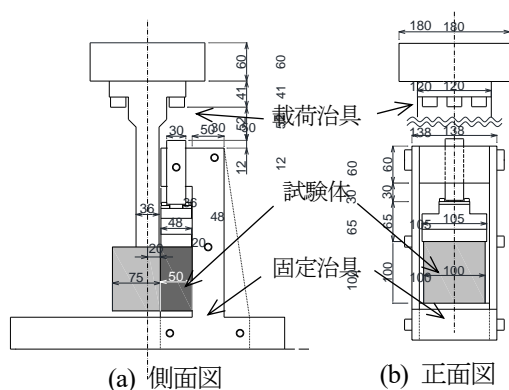


図-2 固定治具及び載荷治具

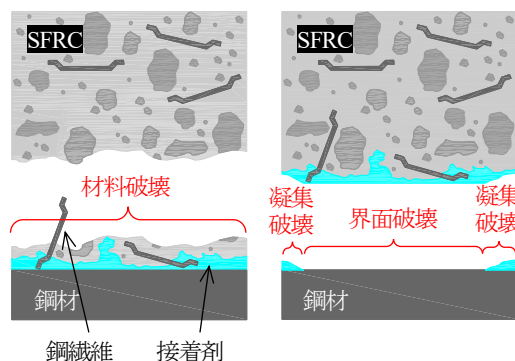


図-3 破壊形態の分類

荷重の載荷状態や疲労試験時の挙動の経時変化を確認するために、図-1 に示すように、弾性 1 軸ひずみゲージ(ゲージ長:10mm)を 4 箇所(上下面・表裏面の接合面から 10mm 位置)に貼付するとともに、シリンダ型変位計を試験体の左端から 15mm、奥行き方向の中央部に設置し、それぞれひずみ、鉛直変位の計測を行った。

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。なお、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を敷いた。また、予め載荷面に感圧紙を敷いて接触圧分布を調査し、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。

疲労試験では荷重制御により最長 10<sup>7</sup> 回まで載荷を実施した。一部の試験体では、試験工程の都合上、10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup> 回で破壊に至る前に一旦終了し、荷重範囲を増加させたうえで再度疲労試験を実施した。破壊前に終了した試験体は未破壊(表-5 中の破壊回数欄に※を記載)として扱い、後述の図-4 では矢印付きでプロットしている。各試験体の試験時の荷重範囲は、破壊回数  $N_f$  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、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 とした。載荷速度は 10Hz を基本とした。なお、一連の試験は 3~7 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。この温度内での試験結果への温度の影響はほとんど無いと考えている。静的載荷試験結果は式(1)の静的せん断強度  $\sigma_s$  により、疲労試験結果は式(2)のせん断応力範囲  $\Delta\sigma_r$  と、式(3)のせん断強度比  $S_R$  を用いて整理した。

$$\sigma_s = \frac{P}{A} \quad (1)$$

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

$$S_R = \frac{\Delta\sigma_r}{\bar{\sigma}_s} \times 100 \quad (3)$$

ここで、

$\sigma_s$  : 静的せん断強度(N/mm<sup>2</sup>)

$\bar{\sigma}_s$  : 静的せん断強度の平均値(N/mm<sup>2</sup>)

$P$  : 破壊時の荷重値(N)

$A$  : 試験体の接合部断面積(=10000mm<sup>2</sup>)

$\Delta\sigma_r$  : せん断応力範囲(N/mm<sup>2</sup>)

$P_{\max}$  : 疲労試験時における最大荷重(N)

$P_{\min}$  : 疲労試験時における最小荷重(N)

$S_R$  : せん断強度比(%)

図-3 に接合部の破壊位置の分類を模式的に示す。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、鋼材面側の画像を CAD 上に読み込んで、それぞれの破壊形態部分の面積より算出した。目視観察により SFRC 付着部分は材料破壊に、接着剤部分は凝集破壊(SFRC 側の接着剤付着も合わせて確認)に、鋼材面露出部分は界面破壊に分類した。なお、接着剤 B では、目視での判別が困難な場合にはブラックライトを照射し撮影した画像も用いて分類を行った。

## 4. 試験結果と考察

### 4.1 静的せん断強度

表-4 に静的せん断試験結果を示す。静的せん断強度(各 3 体の平均値)は、接着剤 A では 6.49N/mm<sup>2</sup>、接着剤 B では 7.62N/mm<sup>2</sup> であり、B の方が若干大きい。また、接着剤 A、B とともに、超速硬 SFRC を用いた場合(接着剤 A : 4.79 N/mm<sup>2</sup>、接着剤 B : 5.34N/mm<sup>2</sup>)<sup>4)</sup> と比較して強度は大きかった。両者の破壊形態はともに材料破壊が主体であり、強度差については、SFRC の圧縮強度(材齢 28 日)が、超速硬 SFRC (64.6N/mm<sup>2</sup>) よりも早強 SFRC (80.3N/mm<sup>2</sup>) の方が大きいことによるものと考えられる。

### 4.2 疲労強度

表-5 及び図-4 にせん断疲労試験の結果を示す。図-4 には、異なる材料を用いたことによる疲労性状の違いを比較するために、超速硬 SFRC の試験結果<sup>4)</sup> を併記した。縦軸のせん断強度比  $S_R$  は、静的せん断強度に対する疲労強度の変化傾向を把握するために静的強度の平均値によ

表-4 静的せん断試験結果

接着剤種類	セメント種類	試験体番号	破壊時荷重 P (kN)	静的せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )			破壊面の分類と面積割合 (%)			
				算出値σ <sub>s</sub>	平均値	標準偏差	材料破壊	凝集破壊	界面破壊	接着剤中の空隙部
A	早強	AES1	68.6	6.86	6.49	0.33	94.0	4.4	1.6	0.0
		AES2	65.7	6.57			96.2	3.0	0.9	0.0
		AES3	60.5	6.05			96.3	3.7	0.0	0.0
B	早強	BES1	70.5	7.05	7.62	0.56	69.4	17.0	12.9	0.7
		BES2	74.3	7.43			30.4	22.4	47.2	0.0
		BES3	83.7	8.37			71.9	20.2	7.0	0.9

表-5 せん断疲労試験結果

接着剤種類	セメント種類	試験体番号	載荷荷重			せん断応力範囲 Δσ <sub>r</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度比 S <sub>R</sub> (%)	破壊回数 N <sub>f</sub> (回)	破壊面の分類と面積割合 (%)			
			最大荷重 P <sub>max</sub> (kN)	最小荷重 P <sub>min</sub> (kN)	荷重範囲 (kN)				材料破壊	凝集破壊	界面破壊	接着剤中の空隙部
A	早強	AEF1	42.9	2.2	40.7	4.07	62.7	214,869	96.9	2.8	0.3	0.0
		AEF2	43.5	0.9	42.5	4.25	65.5	745,484	97.1	2.7	0.2	0.0
		AEF3	43.3	1.6	41.7	4.17	64.2	515	98.0	1.7	0.3	0.0
		AEF4	39.8	1.2	38.5	3.85	59.3	800,548	96.9	2.4	0.8	0.0
		AEF5	39.5	1.3	38.3	3.83	58.9	6,872,371	98.8	1.2	0.0	0.0
		AEF6	38.5	0.5	38.0	3.80	58.5	※ 10,000,000	98.6	1.4	0.0	0.0
		AEF7	44.8	1.1	43.7	4.37	67.3	130,275	98.3	1.6	0.0	0.1
		AEF8	48.5	1.0	47.5	4.75	73.1	24,413	98.3	1.6	0.0	0.1
		AEF9	41.4	1.6	39.9	3.99	61.4	189	98.8	1.2	0.0	0.0
B	早強	BEF1	41.2	2.1	39.1	3.91	60.2	2,035	98.4	1.3	0.3	0.0
		BEF2	39.8	1.3	38.4	3.84	50.5	66,414	75.6	15.8	3.6	4.9
		BEF3	38.5	0.5	38.0	3.80	49.9	※ 7,023,741	38.8	16.5	44.7	0.1
		BEF4	44.6	0.6	44.0	4.40	57.7	215,320	54.3	11.1	34.5	0.0
		BEF5	44.5	0.5	44.0	4.40	57.7	※ 2,462,000	59.6	19.5	19.8	1.1
		BEF6	51.4	1.3	50.1	5.01	65.7	128,418	71.9	23.6	4.4	0.1
		BEF7	55.8	2.0	53.8	5.38	70.6	640	55.5	26.2	18.1	0.2
		BEF8	51.3	1.2	50.0	5.00	65.7	19,687	25.0	19.2	55.1	0.7
		BEF9	39.7	1.3	38.4	3.84	50.4	646,450	36.9	32.2	30.8	0.1
							※ 10,000,000	76.1	21.9	2.0	0.0	
							313,697					
							※ 10,000,000					
							4,016					
							2,667,150					

注)破壊回数の※印は、未破壊であることを示す。

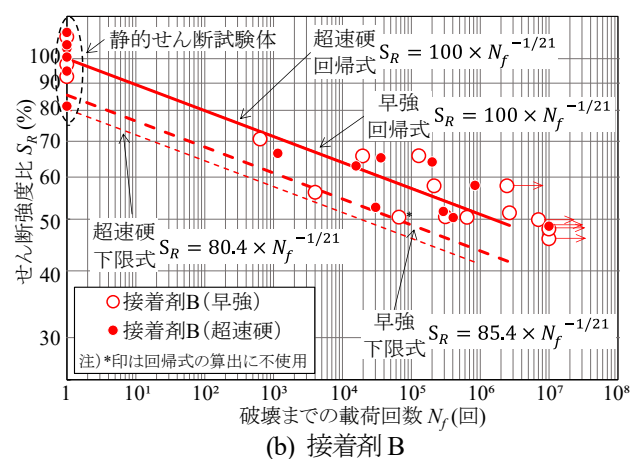
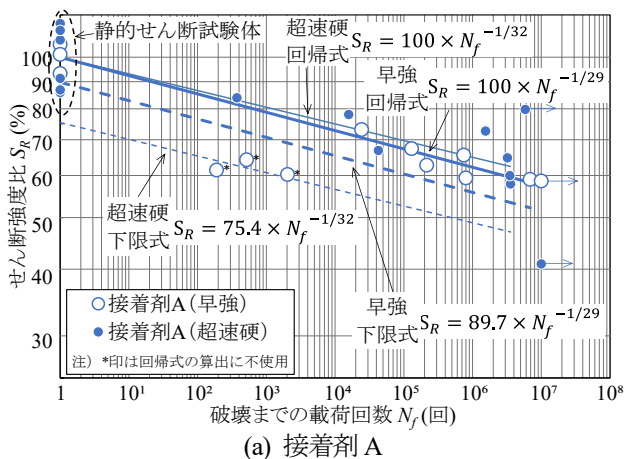


図-4 せん断疲労試験結果 (S-N 関係)

り無次元化した疲労強度である。図中の実線は、 $N_f = 1$  で  $S_R = 1$  となると仮定して求めた一次回帰式であり、破線はこの回帰式を 2×標準偏差だけ下方にずらした下限式である。回帰式及び下限式について、早強 SFRC を太

実線及び太破線で、超速硬 SFRC<sup>4)</sup> を細実線及び細破線で示した。なお、試験時の表裏面のひずみ差が継続的に大きくみられ、相対的に強度が低い傾向を示した試験体 (AEF3, 8, 9 及び BEF1) の試験結果については、回帰式及

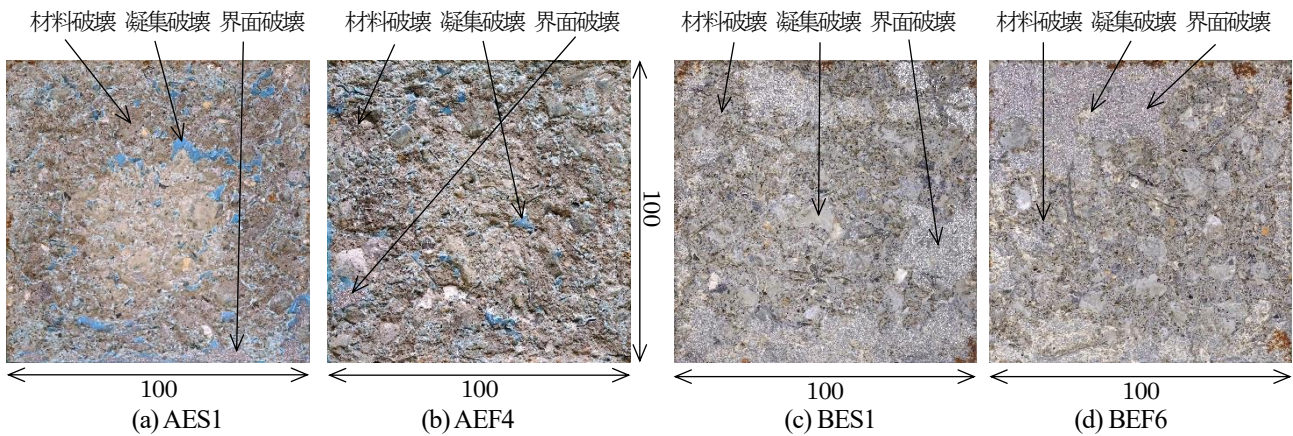


図-5 破壊面の状況 (100mm×100mm の破断面を撮影)

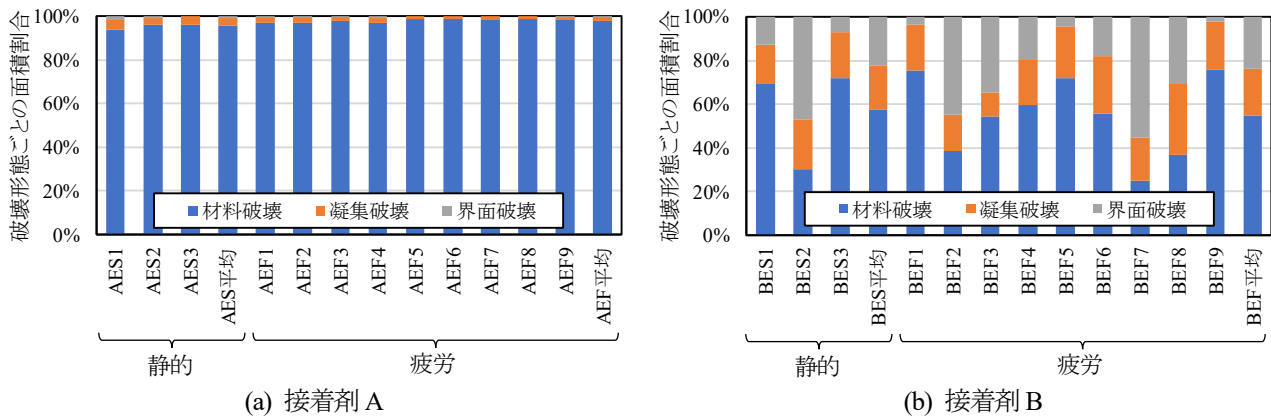


図-6 破壊面における破壊形態別の面積割合

び下限式の算出に使用していない。

早強 SFRC の試験体の場合、 $S-N$  曲線のべき乗数は接着剤 A では約 29、接着剤 B では約 21 であり、曲線の勾配に相違がみられる。一次回帰式に従えば、200 万回荷重時の疲労強度比は接着剤 A では 61% (3.94 N/mm<sup>2</sup>)、接着剤 B では 49% (3.72 N/mm<sup>2</sup>) であり、接着剤 A の方が高い。超速硬 SFRC の試験体の場合、接着剤 A では 64%、接着剤 B では 50% となっており<sup>4)</sup>、せん断強度比で整理した疲労試験結果は SFRC 材料の種類によらず概ね近い値を示している。また、破壊性状 (4.3 に述べる) の傾向は、超速硬 SFRC の試験体の場合と類似している。すなわち、同一の接着剤を用い、接着剤接合部の破壊性状が材料破壊主体である場合には、材料の種類によらず、同一の無次元化  $S-N$  曲線で整理することが可能であると考えられる。

### 4.3 破壊面の状況

図-5 に試験後の破壊面 (鋼板側、図の上側から荷重) の状況を、図-6 に各試験体の破壊面における破壊形態別の面積割合を示す。

接着剤 A の場合、材料破壊が支配的となり、面積割合では凝集破壊は 1~5%、界面破壊は 0~2% である。超速硬 SFRC の試験体で確認された接着剤中の空隙<sup>4)</sup>については、ほとんど確認できなかった (空隙部は凝集破壊に分

類)。接着剤 B の場合、材料破壊が主体となったものの、界面破壊の割合は接着剤 A (平均 0.4%) と比較して、平均 23% と大きい。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であり、界面破壊は強度のばらつきが大きいため信頼性が低く、接着剤の性能としては不十分とされている<sup>例えは、6)</sup>。前述のとおり、静的せん断強度は接着剤 B の方が大きい<sup>4)</sup>が、無次元化した疲労強度としては接着剤 A の方が大きくなっており、この理由として、界面破壊の面積割合が影響している可能性が考えられる。

### 4.4 疲労破壊までの挙動

図-7 に両接着剤の試験体 AEF4, BEF6 を例に、荷重時における荷重と試験体の鉛直変位 (図-1 中の計測位置) の関係の経時変化を示す。荷重回数に応じて残留変位が徐々に増加していくこと、破壊の直前には単位荷重あたりの変位が大きくなり、疲労試験の初期と比べて荷重に対する変位量 (荷重-変位関係の勾配) が増加していることが確認された。

図-8 に最大荷重時の変位の経時変化を示す。横軸は破壊回数  $N_f$  に対する繰り返し回数比であり、同比 0.01 毎に前後 10 回分の最大変位の平均値をプロットした。なお、図-8 の左上には、破壊直前の荷重 10 回分の荷重最大時変位の経時変化を付記した。変位は荷重回数に応じて緩やかに増加したが、破壊直前には急増した。変位が漸増

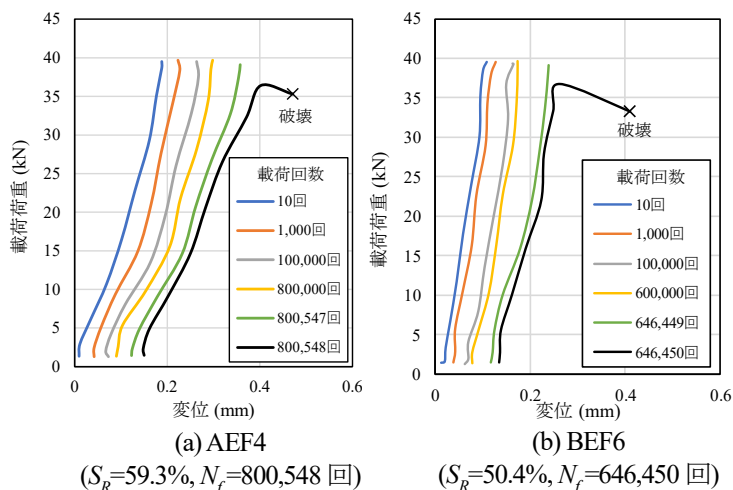


図-7 荷重-変位関係の経時変化

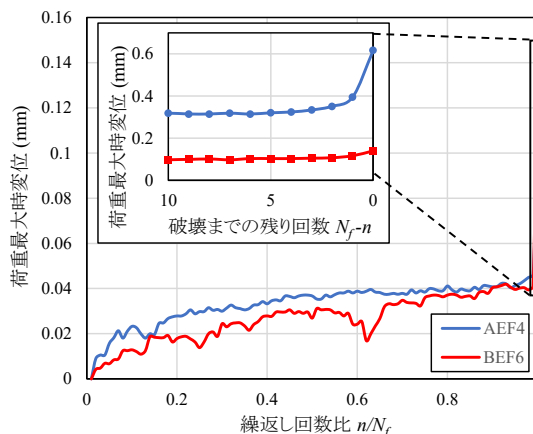


図-8 荷重最大時変位の経時変化

する段階では、接合部外周の外観に変化は見られなかったが、破壊直前でひび割れが発生し、急速に進展する状況が確認された。

以上のように、繰り返し荷重とともに接着剤接合部の剛性低下・ずれ変形が徐々に進行し、破壊直前の数回～十数回の荷重でひび割れが急速に進展し、破壊に至っていると考えられる。

## 5. 結論

SFRC 舗装の接着剤接合部の疲労耐久性に着目し、早強 SFRC と 2 種類の接着剤の組合せによる接合部を模擬した小型試験体のせん断疲労試験を実施し、同接合部の疲労挙動について検討するとともに、過年度の超速硬 SFRC の場合の試験結果との比較分析を行った。以下に、接合部の疲労挙動に関して得られた主な結果をまとめる。

- 1) 静的せん断強度では接着剤 B (7.62N/mm<sup>2</sup>) の方が接着剤 A (6.49N/mm<sup>2</sup>) よりも大きいのに対し、200 万回せん断強度比では接着剤 A (61%) の方が接着剤 B (49%) よりも大きくなる傾向がみられた。
- 2) 1)の接着剤別のせん断強度比は、過年度に実施した超速硬 SFRC の場合の試験結果においても概ね同等の値であり、静的せん断強度(平均値)により無次元化することで、SFRC 材料によらず接着剤接合部に対し同程度のべき乗数の S-N 曲線で疲労強度を整理できる可能性がある。
- 3) 接合部の破壊形態は、接着剤 A では材料破壊が主体(材料破壊面積割合:平均 97%)であるのに対し、接着剤 B では破壊面の一部に界面破壊(界面破壊面積割合:平均 23%)がみられた。接着剤 B では、界面破壊が部分的に発生したことで、疲労強度が低下した可能性がある。
- 4) 接合部の破壊に至るまでの残留変形の経時変化より、繰り返し荷重回数に応じて接着剤接合面の損傷が徐々に進行していること、破壊直前の数回～十数回の

荷重でひび割れが急速に進展し破壊に至ることを確認した。

本論文で得られた S-N 曲線に対して、接着剤接合部への水や温度の影響はないことを前提とした場合、実鋼床版での輪荷重載荷時の接着剤接合部に作用するせん断応力を解析的に求めることにより、接合部の疲労耐久性を概略評価できるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 土木学会:鋼床版の疲労, 鋼構造シリーズ 19, pp.63-75, 2010.12.
- 2) 小野秀一, 平林泰明, 下里哲弘, 稲葉尚文, 村野益巳, 三木千尋:既設鋼床版の疲労性状と鋼繊維補強コンクリート敷設工法による疲労強度改善効果に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.335-347, 2009.4.
- 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の構造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) 松本稔将, 村越潤, 小野秀一, 高橋実, 森猛:鋼床版 SFRC 舗装における接着剤接合部のせん断疲労挙動に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.5, pp.II\_72-II\_83, 2020.5.
- 5) (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)一, 土木研究所共同研究報告書, 第 395 号, 2009.10.
- 6) 原賀康介:信頼性の高い接着設計のための基本条件と耐久性評価法, 日本接着学会誌, Vol.43, No.8, pp.20-25, 2007.8.

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)