

動的荷重作用下で貼付された CFRP 板の接着特性と疲労き裂進展の抑制効果

西日本旅客鉄道 正会員 ○北章太郎

首都大学東京 正会員 中村一史*・フェロー 前田研一・学生員 林 帆・孫 継 光

明星大学 正会員 鈴木博之 東京鐵骨橋梁 正会員 入部孝夫 新日本石油 福田欣弘

1. はじめに

炭素繊維強化樹脂板（以下、CFRP 板と呼ぶ）の接着による鋼構造物の補修・補強が各方面で検討されている。工法として現場へ適用する場合、車両通行の供用下、すなわち動的な荷重の作用下で補修することが望ましい。本研究では、既往の検討結果¹⁾を踏まえ、動的荷重作用下で貼付された CFRP 板の接着特性と疲労き裂進展の抑制効果を実験的に検討した。

2. 試験片と実験条件

検討対象としたき裂モデルは有限幅板中の中心にき裂を有するケースであり、用いた試験片を図-1に示す。平鋼板の中央部に直径 2mm の円孔を設け、予き裂として長さ 4mm、幅 0.2mm のソーカットを両側に導入した。

表-1 に、鋼板、CFRP 板、エポキシ樹脂接着剤の機械的性質を示す。また、表-2 に示す実験条件に基づいて、次の 4 つのシリーズについて疲労試験を行った。

- (a) FBN：補修を行わないもの。
- (b) FBS：無負荷の状態での補修を行ったもの。
- (c) FBD：動的な荷重作用下で補修を行ったもの。
- (d) FBMS:平均荷重を保持した状態で補修を行ったもの。

ここでは、活荷重の作用に伴う応力振幅を想定して、応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}$ を 70MPa と設定した。また、FBS、FBD については養生温度を室温、約 40℃の 2 ケースを設定した。

まず、FBD については、初期き裂長さ $2a$ が約 25mm となるまで繰返し載荷を行った (step1)。CFRP 板をエポキシ樹脂接着剤で接着すると同時に、接着剤の硬化中に 24 時間動的な荷重を作用させた (step2d)。載荷速度は、実橋の振動計測の事例²⁾を参考に、3Hz とし、応力範囲は step1 と同様に、70MPa とした。CFRP 板の固定には、マグネットスタンドに固定治具を取り付けたものを用い温度養生を行ったものについては、投光器で CFRP 板の接着範囲を約 40℃で保温養生した。この状態で 24 時間疲労試験を行った後、固定治具を取り外し、試験片が室温と同じ温度となるまで放置した (step3d)。次に、応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}$ を 70MPa とし、左右どちらかの面が破断まで繰返し載荷を行った (step4d)。

また、FBS については、FBD と同様に所定の初期き裂を発生 (step1) させた後、無負荷の状態での CFRP 板を接着し、7 日間 40℃、もしくは室温で養生を行った (step2s)。その後、破断まで疲労試験を行った (step3s)。

疲労き裂の進展状況を比較するために、補修を行わない FBN ではクラックゲージを貼付した。また、補修を行う FBS、FBD、FBMS においては 10 万回ごとにビーチマークを導入した。ビーチマークの一例として、図-3 に、FBD-2 における破断面を示す。

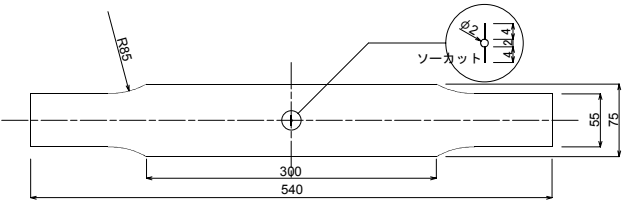


図-1 試験片図

表-1 機械的性質

	鋼板SM400	CFRP板	エポキシ樹脂接着剤
降伏点 (MPa)	282	-	-
引張強度 (MPa)	428	2808	30
破断伸び (%)	28.5	-	-
弾性係数 (GPa)	205.8	165	2.3(圧縮)

表-2 実験条件

実験シリーズ	実験条件						備考
	載荷速度 f (Hz)	最大応力 σ_{max} (MPa)	最小応力 σ_{min} (MPa)	応力範囲 $\Delta\sigma$ (MPa)	温度 T (℃)		
FBN	18	75	5	70	室温		疲労試験で破断まで
FBS-1	step1	18	75	5	70	室温	疲労試験で初期き裂発生まで
	step2s	-	-	-	40	室温	過剰的養生
	step3s	18	75	5	70	室温	疲労試験で破断まで
FBS-2	step1	18	75	5	70	室温	疲労試験で初期き裂発生まで
	step2s	-	-	-	-	室温	過剰的養生
	step3s	18	75	5	70	室温	疲労試験で破断まで
FBD-1	step1	18	75	5	70	室温	疲労試験で初期き裂発生まで
	step2d	3	75	5	70	40	24時間動的養生
	step3d	-	-	-	-	室温	治具撤去、室温へ
FBD-2	step4d	18	75	5	70	室温	疲労試験で破断まで
	step1	18	75	5	70	室温	疲労試験で初期き裂発生まで
	step2d	3	75	5	70	室温	24時間動的養生
FBD-2	step3d	-	-	-	-	室温	治具撤去、室温へ
	step4d	18	75	5	70	室温	疲労試験で破断まで
FBMS	step1	18	75	5	70	室温	疲労試験で初期き裂発生まで
	step2ms	-	40	40	0	室温	一定荷重載荷中24時間養生
	step3ms	-	-	-	-	室温	治具撤去
FBMS	step4ms	18	75	5	70	室温	疲労試験で破断まで

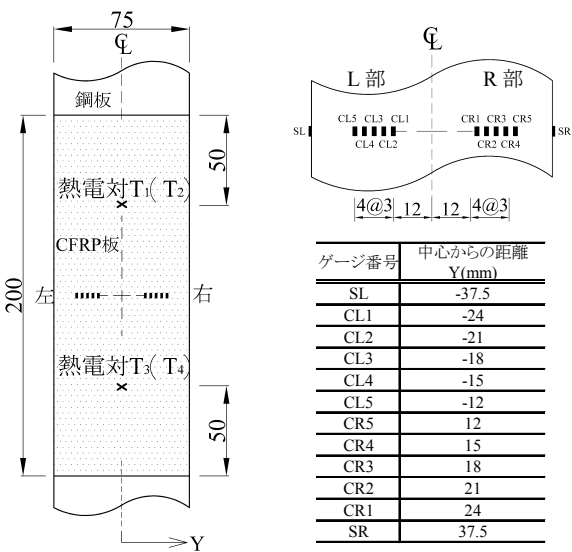


図-2 ひずみゲージの設置位置

Key Words : CFRP 板, 補修, 疲労き裂, 供用下, 接着特性

連絡先* 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL. 042-677-1111 内線(4564) FAX. 042-677-2772

3. 実験結果と考察

接着剤硬化中における FBD-1 の最大ひずみの変化を図-4 に示す。き裂の進展は左右で大きくばらついたため、き裂進展の速かった R 部に着目して示している。図中には、計測された CFRP 板表面の温度を併記した。補修後の繰返し回数 N_p が、約 15,000 回 (1.4 時間) で強度が発現し、約 40,000 回 (3.7 時間) でほぼ一定値となったため、この時点で硬化が完了したと判断された。

次に、接着直後から 24 時間、繰返し载荷を行った後に静的载荷を行った。FBS, FBD における静的载荷結果を比較して図-5 に示す。FBS では応力とひずみの関係は通常のゼロを基準としたものであるのに対して、FBD の CFRP 板では、平均応力付近でひずみがゼロになり、また、完全に除荷した際、鋼板にはわずかに残留ひずみが生じることが解った。

図-6 に、各シリーズの補修後の繰返し回数とき裂長さ $2a$ の関係を示す。FBN については、き裂長さ $2a$ が 25mm から破断までの繰返し回数を示している。また、表-3 には、各実験シリーズの初期き裂長さとき裂進展までの繰返し回数を示す。これらの図表より、それぞれのき裂進展の傾向が多少異なっているものの、補修によって余寿命が大幅に改善されることが解る。また、FBD では、接着剤硬化中におけるき裂の進展は小さかった。補修後の繰返し回数 N_p は FBS, FBD において、約 170 万回～230 万回とばらつきが見られたが、き裂進展の様子からは明確な違いが見られなかった。さらに、FBMS では、かなり寿命が延びることも解る。FBMS の補修効果については、試験片数が 1 体であるため、接着状態のばらつきなどの影響を考慮する必要もあるが、平均荷重下で、き裂開口部に接着剤が充填されることにより、き裂進展が遅延された可能性も考えられる。

4. まとめ

以上のことから、動的な荷重作用下では、平均荷重を基準として硬化し接着され、また、除荷時には鋼板に引張応力が導入されることが解った。さらに、CFRP 板の硬化中に動的な荷重作用を受けても、硬化そのものには影響はなく、補修効果も無負荷で補修した場合と同程度であることが確かめられた。したがって、CFRP 板の接着補修は、交通荷重を受ける供用下でも十分に可能であるといえた。

本研究の一部は(財)海洋架橋・橋梁調査会の橋梁技術に関する研究開発助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 北章太郎, 山谷佑介, 姜 威, 中村一史, 前田研一, 鈴木博之, 入部孝夫, 伊原啓裕: 動的な荷重作用下における CFRP 板の接着特性と疲労き裂の補修効果, 土木学会, 第 63 回年次学術講演会, 1-457, pp.913-914, 2008.9
- 2) 日本鋼構造協会編: 供用下にある鋼構造物の溶接による補強・補修指針 (案), JSSC レポート No.8, 1988.2

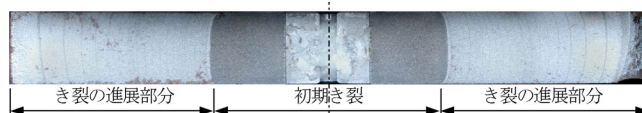


図-3 FBD-2 における破壊断面のピーチマーク

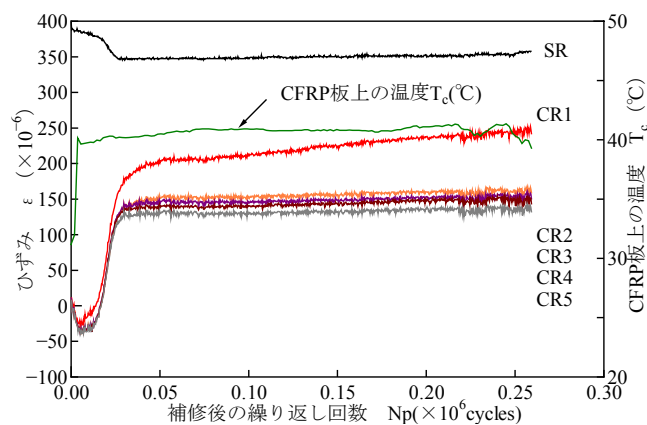


図-4 接着剤硬化中の CFRP 板のひずみ変化 (FBD-1)

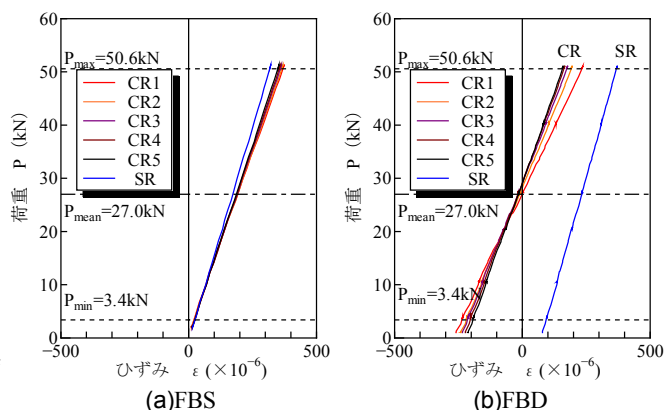


図-5 接着から 24 時間経過後における静的载荷結果の比較

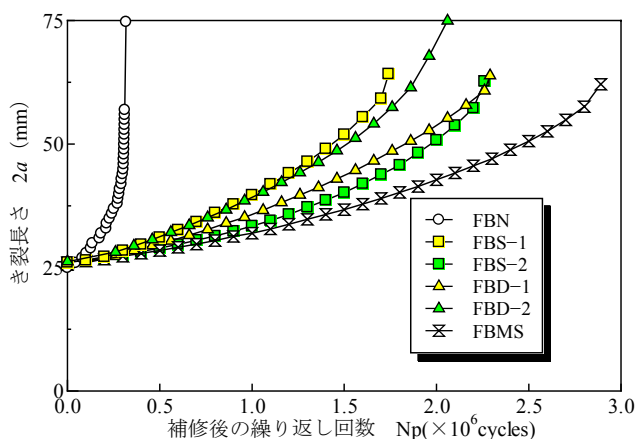


図-6 補修後の繰返し回数とき裂長さの関係

表-3 初期き裂長さとき裂進展までの繰返し回数

実験 シリーズ	初期き裂長さ a (mm)			養生温度 T (°C)	繰返し回数 N_p (cycles)
	L部	R部	$2a$		
FBN	—	—	—	—	524,112
FBS-1	13.12	12.88	26.00	40	1,744,303
FBS-2	12.64	12.22	24.86	室温	2,264,391
FBD-1	12.76	12.35	25.11	40	2,292,502
FBD-2	13.05	13.15	26.20	室温	2,061,320
FBMS	12.97	12.06	25.03	室温	2,891,618