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

首都大学東京大学院 学生員〇北章太郎・山谷佑介・姜 威 首都大学東京 正会員 中村一史*・フェロー 前田研一 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 伊原啓裕

1. はじめに

現在,多くの鋼橋で,交通量の増加,老朽化などの影響による疲 労損傷が発生しており,効果的な補修工法が求められている.その 中で,著者らは炭素繊維強化樹脂板(以下,CFRP板と呼ぶ)を用 いた補修に関する検討を行ってきた¹⁾.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でき ることが望ましい.そのためには,接着剤の硬化中に動的な荷重の 作用を受けた場合の接着特性,補修効果についても検討しておく必 要がある.そこで,本研究では動的な荷重の作用下におけるCFRP 板の接着特性と疲労き裂の補修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両側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. 平鋼板の中心に両側から 長さ10mm,幅0.2mmのソーカットを導入した.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3 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. ここでは,活荷重の作用による応力振幅を想定して,応力範囲 $\Delta \sigma_{sn}$ を 50MPa と設定した.

まず,FBD については,初期き裂長さ 2a が約 35mm となるまで 繰り返し載荷を行った (step1). CFRP 板をエポキシ樹脂接着剤で貼 付すると同時に接着剤の硬化中に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³⁾を参考に 3Hz とし,応力範囲 は step1 と同様に 50MPa とした. CFRP 板の固定には,写真-1 に示 すような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, 投光器で CFRP 板の接着域が約 40℃となるように 24 時間保温養生 した.この状態で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,この間に 進展したき裂長さを確認するために,ビーチマークを導入した.こ こでは,応力振幅の上限を固定した半振幅とし,20 万回繰り返し載 荷を行った (step4d).最後に,応力範囲Δ σ_{sn} を 50MPa とし,破断ま で繰り返し載荷を行った (step5d).

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, CFRP 板を貼付し, 7 日間 40℃ で養生を行った(step2s). その後, 破断まで疲労試験を行った(step3s).

ここで, CFRP 板 (200mm×1.2mm×37.5mm×4 枚)の接着には エポキシ樹脂接着剤を用い,接着層厚についてはガラスビーズを用 いて 0.4mm に管理した.

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 シリ ーズではクラックゲージを貼付した.また、補修を行う FBS, FBD においてはき裂の進展が予測される CFRP 板上にひずみゲージを設

 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)





表-1 機械的性質

\square	鋼板(SM400)	CFRP板	エポキシ樹脂 接着剤
降伏点(MPa)	309	-	-
引張強度(MPa)	456	2990	30
破断伸び(%)	29	1.9	-
弾性係数(GPa)	206	165	2.3(圧縮)

表-2 実験条件

実 シリ	<い ーズ	応力範囲 Δσ _n (MPa)	最大応力 σ _{max} (MPa)	最小応力 σ _{nin} (MPa)	載荷速度 f(Hz)	試験片の 温度(℃)	備考
FBN		50	55	5	18	室温	破断まで
	step 1	50	55	5	18	室温	初期き裂発生まで
FBS	step2s		-	-	-	40	養生(1週間)
	step3s	50	55	5	18	室温	破断まで
FBD	step1	50	55	5	18	室温	初期き裂発生まで
	step2d	50	55	5	3	40	24時間
	step3d	-	-	-	-	室温	治具撤去,室温へ
	step4d	25	55	30	18	室温	ビーチマーク導入
	step5d	50	55	5	18	室温	破断まで



写真-1 FBD における CFRP 板の接着状況



置して、CFRP 板貼付域におけるき裂進展のモニタリング³を試みた. CFRP 板の貼付域とひずみゲージの設置位置を図-2 に示す.動ひずみ 測定器を用いて、疲労試験中の最大ひずみを1秒間隔で計測した.

3.実験結果と考察

まず,FBDの接着剤硬化中に疲労試験を実施した際のCFRP板上の 最大ひずみの変化を図-3に示す.き裂の進展は左右で大きくばらつい たため,進展の速かった右側に着目して示したものである.図中には, 室温とCFRP板の温度を併記したが,初期温度T_{Co}は33.1℃であり, 光量の調整などでほぼ40℃となるまでに約1時間要した.この時生じ た負のひずみは温度差による見かけのひずみと判断された.その後, 全てのひずみが徐々に増加することから接着剤の硬化によってCFRP 板が力を伝達し始めたと考えられる.約3時間(N_pで約3万回)でほ ぼ一定値となり,この時点でCFRP板がほぼ硬化したと判断された.

次に、FBD の CFRP 板の接着特性を確認するために、接着開始から 24 時間繰り返し載荷 (step2d) を行った直後に静的載荷を行った.FBS, FBD における静的載荷試験の結果の比較を図-4 に示す.FBD につい ては、温度差に伴う見かけのひずみ値を差し引いて評価した.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 では、平均応力付近でひずみがゼロになることが解った.こ れは接着剤の硬化中に動的な荷重を受けたため、CFRP 板にとっては 平均応力を中心にほぼ両振りの応力状態になったものと考えられた.

また、図-5 に各シリーズの繰り返し回数 N_f とき裂長さ 2aの関係を示す. FBN の結果から、今回補修を行った時のき裂長さは進展速度がかなり速い段階にあるといえるが、補修によって余寿命が大幅に改善されることが解る. FBS、FBD について、補修後の繰り返し回数 N_p で評価した場合、FBD で約 401 万回、FBS で約 825 万回であり、余寿命は半減した. FBD の場合、ビーチマークの計測から接着剤の硬化中にき裂が両側の合計で約 4.7mm 進展したこと、また、図を略したが、FBD と FBS の両者で左右のき裂進展特性が異なることなどがその要因と考えられた.また、き裂長さ 2a が約 47mm から破断までのき裂進展速度は FBS とほぼ同様の傾向を示すことが解る.

さらに、FBS、FBD シリーズともに、き裂が進展して鋼板を貫通し たが、CFRP 板ははく離しなかった.そこで、引張試験を行い、残存 強度を確認した. 図-6 に公称応力と、CFRP 板上のひずみ (C01~C10) の平均値の関係を示す. 図中には、過去に行った幅 50mm の接着継手 試験結果⁴⁾も併記している.FBS は、これらの比較より、残存強度の 低下がないこと、FBD は約 18%低下したものの十分な残存強度を有し ていることが確かめられた.

4. まとめ

今回検討した範囲からは、動的な荷重作用下においても CFRP 板を 接着することが可能であること、また、補修後も十分なき裂進展を抑 制する効果や残存強度があることが確かめられた. 今後は、振動数な どを変えて実験データを蓄積することで、実構造物へ適用性を検討す る上での基礎資料としたい.

400 45 40 CFRP板上の温度(4箇所平均) 2 35 × 200 =33. 1°C C08 30 Ç 25 板上のひずみ C07 100 20 20 頭 C06 0 15 家温 100 -100 10 ←N_p=32,400(cycles) -200 0 0 50,000 100,000 150,000 200,000 繰り返し回数 N_n(cycles) 250,000 300,000





図-6 公称応力と CFRP 板上のひずみの関係

参考文献

- 1) 中村一史,諸井敬嘉,鈴木博之,前田研一,入部孝夫:溶接継手部に発生した疲労き裂の積層 CFRP 板による補修効 果,鋼構造年次論文報告集,第13巻,日本鋼構造協会,pp.89-96,2005.11.
- 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.
- 3) 中村一史,山谷佑介,前田研一,鈴木博之,入部孝夫:ひずみゲージを用いた CFRP 板貼付域の疲労き裂のモニタリ ング,鋼構造年次論文報告集,第15巻,日本鋼構造協会,pp.439-446,2007.11.
- 4) 姜 威,中村一史,鈴木博之,前田研一,入部孝夫:CFRP 板と鋼板の接着特性に関する実験的研究,鋼構造年次 論文報告集,第14巻,日本鋼構造協会,pp.595-602,2006.11.