

鋼板と CFRP 板の接着継手の疲労強度と繰返し载荷後の残存強度に関する実験的検討

清水建設 正会員○山谷佑介

首都大学東京大学院 正会員 中村一史*・フェロー 前田研一・学生員 姜 威・林 帆
明星大学 正会員 鈴木博之 東京鐵骨橋梁 フェロー 入部孝夫 新日本石油 伊原啓裕

1. はじめに

炭素繊維強化樹脂板(以下, CFRP 板と呼ぶ)の接着による鋼部材の補修, 補強に関する研究が各方面で行われ¹⁾, その効果と適用範囲が明らかにされつつある. 特に, 疲労き裂の補修を対象とした場合, 補修材料も繰返し荷重の作用を受けることから, その疲労耐久性も把握しておく必要がある. そこで本研究では, CFRP 板による接着継手試験片を用いて, 接合部の疲労強度とその疲労破壊のメカニズムを明らかにするとともに, 繰返し载荷を与えた後の残存引張強度を検討した.

2. CFRP 板の接着継手試験片と実験方法

疲労き裂の補修を想定して, 図-1 に示すように, 2 枚の鋼板(240×50×9 SM400)を長手方向に並べ, CFRP 板(200×50×1.2)を添接板としてエポキシ樹脂接着剤で両面に接合したものを試験片とした. 表-1 に鋼板, CFRP 板およびエポキシ樹脂接着剤の機械的性質を示す. CFRP 板の接着後, 気温 20℃, 相対湿度 60%の恒温恒湿状態で 1 週間養生した.

作用応力は, 鋼板に一樣に作用する応力で整理し, 最小応力を 10MPa 一定として, 最大応力を変化させて応力範囲を 60, 70, 80, 90MPa の 4 ケース設定した. 写真-1 に示すように, 疲労試験機にセットアップして, 载荷速度 f を 15Hz とし, 室温で疲労試験を行った. 動ひずみ測定器を用い, 図-1 に示した位置で, 最大ひずみ, 最大開口変位を 1 秒間隔で測定した. また, 応力範囲 70MPa においては, ビーチマーク法を適用し, 破断面にマーキングを行うことで, 疲労破壊の進展の様子を検討した. ここでは, 全振幅で 50 万回ごとに, 上限を固定した半振幅で 20 万回とした. さらに, 繰返し载荷後の残存引張強度を把握するために, 疲労試験結果から得られた疲労寿命の半分程度までの繰返し载荷を与えた後, 万能試験機により载荷速度 1mm/min で引張せん断試験を行った.

3. 実験結果と考察

図-2 に, 接着継手の S-N 線図を示す. 最も小さい応力範囲では, 10^7 回を大きく超えても疲労限は得られなかった. 図中の直線は, 最小二乗法を用いて算出した回帰線であり, 今回対象とした接着継手の疲労強度は $\Delta \sigma_n = 218.72(N)^{-0.077}$ と評価された. 図-3 に, 開口変位と繰返し回数 N の関係を破断時回数 N_f で無次元化して示す. 図より, 繰返し载荷を受けると接合部の開口変位が徐々に増大し, 開口変位の抑制効果が低下することが解った. 図-4 に, 70MPa の応力範囲で疲労破壊した試験片の破断面を示す. この試験片については, ビーチマーク法を適用しており, 繰返し回数 50 万回ごとにはく離した位置に縞模

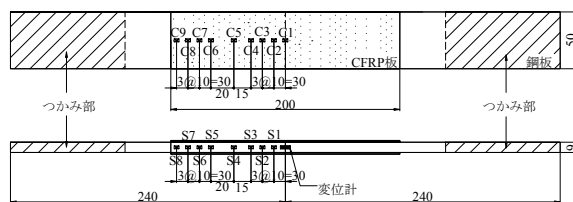


図-1 試験片図

表-1 機械的性質

	鋼板	CFRP板	エポキシ樹脂 接着剤
降伏点 (MPa)	289	-	-
引張強度 (MPa)	442	3195	30
破断伸び (%)	62.3	-	-
弾性係数 (GPa)	204.5	185	2.3 (圧縮)



写真-1 疲労試験状況

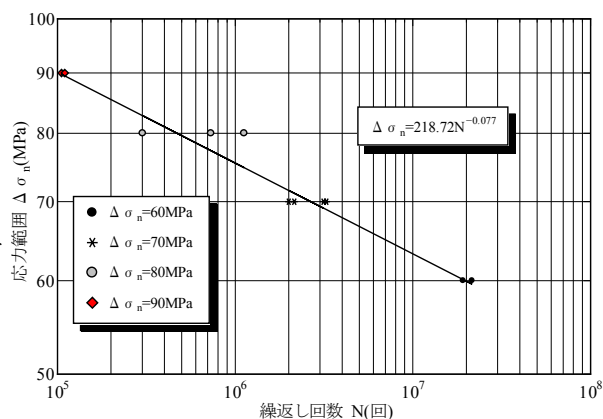


図-2 接着継手の S-N 線図

Key Words : CFRP 板, 接着継手, 疲労強度, 層間せん断力, 残存接着強度

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

様が確認された。破断面の観察から、継目部から端部へ向かって、エポキシ樹脂接着剤の凝集破壊が進行すること、また、A側の接着面積の90%程度まではく離が進展した段階で破壊し、ほぼ同時にB側の残りの接着面がCFRP板の層間で破断することが解った。また、鋼板にCFRP板が貼付された面は4面あり、そのうち2面ではく離が進展し、残りの2面はく離しなかった。このはく離挙動は全ての試験片で同じであった。図-5に、ビーチマークから得られた、繰返し回数Nとはく離長さの関係を示す。図より、繰返し载荷を受けると徐々にはく離が進展すること、繰返し回数200万回からはく離の進展速度が増加することが解った。図-6に、繰返し回数50万回ごとの層間せん断力分布を示す。図より、繰返し载荷を受けると、荷重を負担する面が継目部から端部へ移行することが解る。また、この層間せん断力分布は、図-4のB側に対応し、図-5のB側と図-6を比較すると、繰返し回数250万回において、層間せん断力のピーク位置とはく離長さがほぼ一致していることが解る。したがって、CFRP板上のひずみ変化からも接着面のはく離進展の様子をとらえることができた。

図-7に、繰返し载荷後の引張試験結果を繰返し回数Nと最大引張強度の関係で示す。図より、残存接着強度は、繰返し荷重を与えない試験片の引張強度と比較した場合、全寿命の半分程度の繰返し载荷ではほとんど低下しないことが解った。また、図を略したが、破断面の観察から、疲労により破壊した範囲と引張せん断により破壊した範囲を確認することができた。全寿命の約半分の繰返し载荷によってはく離した面積は、僅かなものから最大30%程度であり、データの蓄積も必要であるが、残存強度の低下はほとんどないことが解った。

4. まとめ

以上のことから、CFRP板接着継手の疲労耐久性について実験的に検討した結果、接着継手の疲労強度を実験式で評価することができた。さらに、疲労はく離の進展挙動や繰返し载荷後の残存接着強度の特性が明らかとなった。

なお、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。

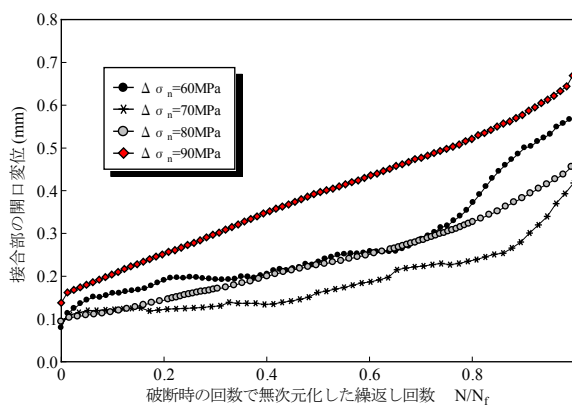


図-3 開口変位と繰返し回数の関係

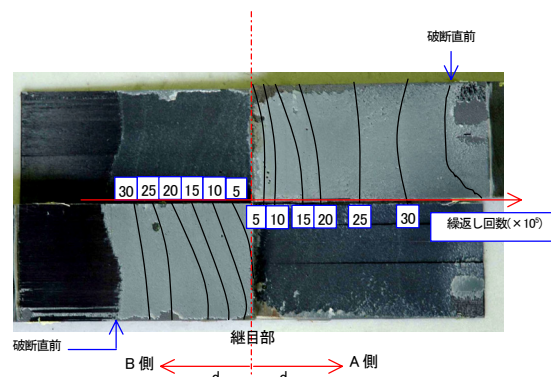


図-4 応力範囲 70MPaにおいて疲労破壊した試験片の破断面

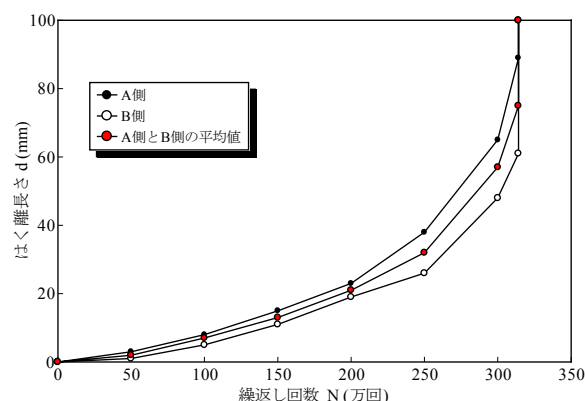


図-5 繰返し回数とはく離長さの関係

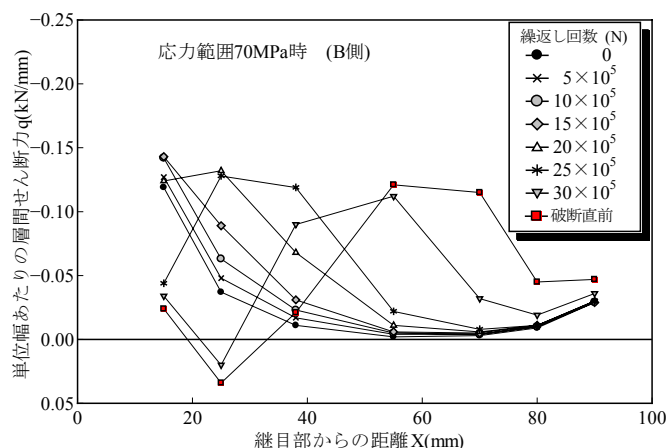


図-6 繰返し回数 50 万回ごとの層間せん断力分布

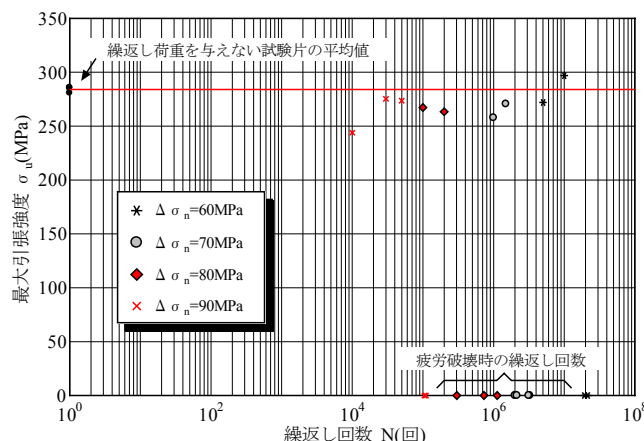


図-7 繰返し回数 N と最大引張強度の関係

参考文献 1) Zhao XL and Zhangrube L.: State-of-the-art Review on FRP Strengthened Steel Structures, Engineering Structures, pp.1808-1823, 2007.