

動的な荷重作用下における鋼板と CFRP 板の接着特性に関する実験的検討

首都大学東京大学院 学生員○北章太郎・林 帆・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

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．現場で適用する場合，車両通行の供用下，すなわち動的な荷重の作用下でも施工できることが望ましい．本研究では，既往の検討¹⁾を踏まえ，接着剤の硬化中に動的な荷重作用を受けた場合の接着特性や，硬化後の接着強度について検討した．

2. 試験片と実験条件

本研究では，動的な荷重作用を受ける際の接着特性に着目して検討を行うことから，幅 50mm，厚さ 9mm の平鋼板（SM400A）の両側に CFRP 板（50×1.2×200mm）をエポキシ樹脂接着剤で接着するケースを対象とした．試験片図とひずみゲージの設置位置を図-1 に，また，鋼板，CFRP 板，エポキシ樹脂接着剤の機械的性質を表-1 にそれぞれ示す．

荷重条件については，公称応力 σ_{sn} の最大値が 100MPa となるように最大荷重を 45kN とし，応力比 R を 0.5 と設定した．表-2 に実験条件を示す．表より，(a) N：無負荷の状態，(b) S：最大荷重を一定とした状態で，(c) DH：3Hz の載荷速度の条件で，(d) DL：0.01Hz の載荷速度の条件で，それぞれ CFRP 板を接着して検討を行った．

また，硬化中の養生条件として，養生温度と硬化時間の関係を把握するために，鋼板と CFRP 板の引張せん断接着強さ試験（JIS K 6850）を実施した．10，20，40℃に設定した温度に対して，養生時間（3h，6h，12h，1d，3d，7d，14d，28d，h：時間，d：日）をパラメータとして，各 3 体，合計 72 体の引張せん断試験を室温で行った．引張せん断強さと養生日数の関係を図-2 に示す．70℃で 3 時間養生したものを収束値とすれば，40℃では 24 時間で完全に硬化すること，また，20℃では，1 週間程度で十分な強度が得られることが解る．なお，10℃では，4 週間経過しても十分な強度は得られなかったが，4 週間経過後の試験片を 40℃で 3 時間養生して実験を行ったところ，十分な強度発現が確認された．以上のことから，本研究では 40℃で 24 時間養生することとした．

実験方法については，まず，試験片を疲労試験機に組み込んだ後，CFRP 板を固定するための治具を取り付けた．さらに，エポキシ樹脂接着剤を塗布して，CFRP 板を所定の位置に固定した後，直ちに，所定の荷重を作用させた．温度養生については，投光器を用いて CFRP 板の接着範囲が約 40℃となるように設定した．このような条件で，24 時間，載荷を行った後，接着強度を把握するために，室温下において万能試験機により静的引張試験を行った．動的な荷重作用下においては，動ひずみ測定器を用いて各部のひずみと荷重を計測した．また，CFRP 板接着による鋼板のひずみの低減効果は，次式の剛性比 SR で評価した．

$$SR = E_s A_s / (E_s A + E_c A_c)$$

ここに， $E_s A_s$ および $E_c A_c$ は鋼板および CFRP 板の伸び剛性であり，本検討での SR は 0.79 であった．

3. 実験結果と考察

実験結果の一部として，図-3 に，DL シリーズにおける繰り返し回数とひずみの関係を示す．図中には，試験片中心部における鋼板（S1）と CFRP 板（C1）の最大，最小，平均ひずみについて，CFRP 板が接着されていない鋼板（S6）のひずみと各部の温度を比較して

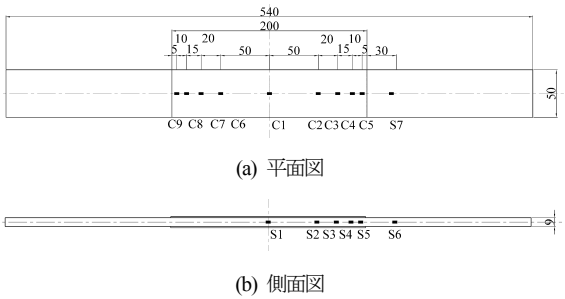


図-1 試験片図とひずみゲージの設置位置

表-1 機械的性質

部位	鋼板 (SM400A)	CFRP 板	エポキシ樹脂 接着剤
降伏点 (MPa)	296.6	—	—
引張強度 (MPa)	440.8	3195	30
破断のび (%)	29	—	—
弾性係数 (GPa)	193.2	185	2.3 (圧縮)

表-2 実験条件

実験 シリーズ	養生条件	荷重負荷条件			
		載荷速度	最大荷重	最小荷重	荷重範囲
N	40℃, 24 時間	無負荷	—	—	—
S	約 40℃, 24 時間	一定荷重	33.75kN	—	—
DH	約 40℃, 24 時間	3.0Hz	45.0kN	22.5kN	22.5kN
DL	約 40℃, 24 時間	0.01Hz	45.0kN	22.5kN	22.5kN

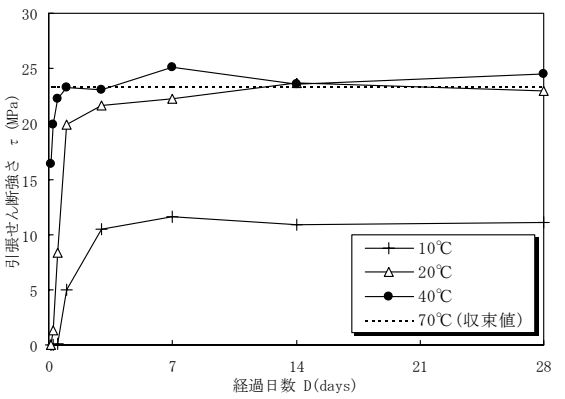


図-2 養生温度と引張せん断強度の関係

Key Words : CFRP 板，補修・補強，動的荷重，接着特性，養生温度
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線(4564)

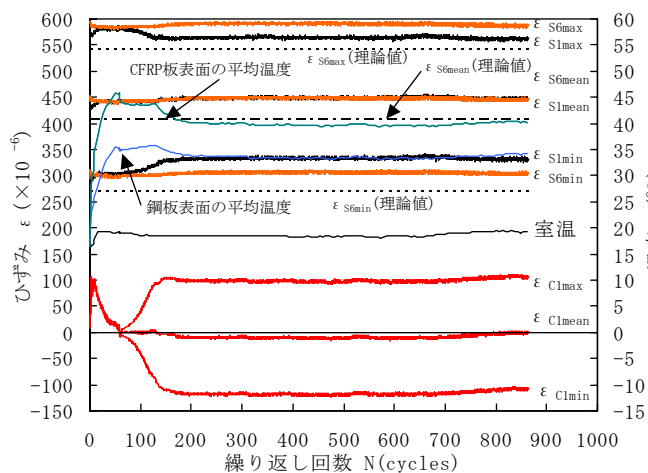


図-3 DLにおける繰返し回数とひずみの関係

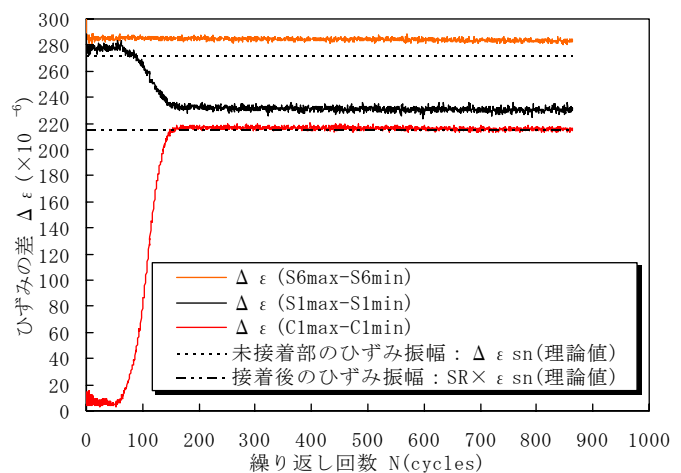


図-4 DLにおける繰返し回数とひずみの差の関係

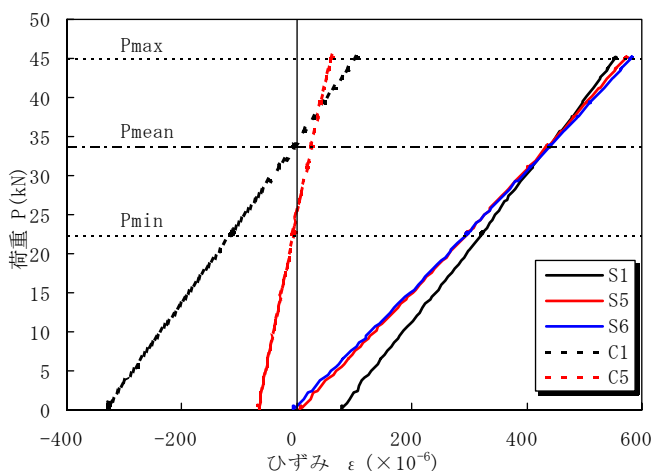


図-5 DLにおける硬化直後の荷重とひずみの関係

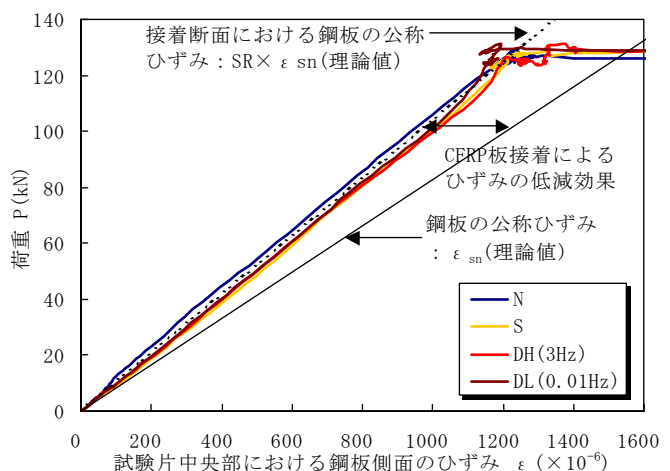


図-6 硬化後の引張試験における荷重とひずみの関係

示したものである。図より、接着直後では、S1とS6は同じ応力振幅特性であるが、接着剤の硬化とともに、S1の最大、最小ひずみが平均ひずみ側へ徐々に移行して、ほぼ一定となることが解る。CFRP板上のC1では、硬化とともにひずみが徐々に増大して、正負交番ひずみが作用することから、動的な繰返し荷重を受ける場合、CFRP板と鋼板は平均荷重を基準として硬化することが確かめられた。

図-4に、DLにおける繰返し回数とひずみの差の関係を示す。縦軸は、最大、最小ひずみの差を示したものである。図より、CFRP板では剛性比から算出された値と同じであり、鋼板では、若干、ひずみが高くなるもののほぼ理論値よりであるといえた。また、接着剤は、繰返し回数が約60回で硬化が始まり、約170回でほぼ定常状態となることから十分に硬化ものと考えられた。これは時間に換算して、それぞれ1.7時間、4.7時間程度であり、CFRP板の温度が約45℃であり、図-2から判断して、初期強度を発現するための硬化時間としては十分妥当であるといえた。

図-5に、DLにおける硬化直後の荷重とひずみの関係を示す。図より、CFRP板端部では、応力がほとんど伝達されないこと、また、荷重を完全に除荷した場合、鋼板には引張ひずみが、CFRP板には圧縮ひずみが発生することが解る。なお、これら一連の挙動は、載荷速度を変えたDHでも同様であった。一方、Sでは、図を略したが、平均荷重33.75kNで一定に保持した状態で接着状態を確認したものであり、同じ挙動となることが確かめられた。

最後に、図-6に、硬化後の引張試験における荷重とひずみ(S1)の関係を比較して示す。図中には、接着断面における鋼板の公称ひずみも併記している。図より、Nに比べて、S、DH、DLでは、僅かにひずみの低減効果が小さくなるものの、全てのケースではほぼ同じ挙動を示すことが解り、CFRP板のはく離荷重も同程度であった。

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ること、また、除荷時には鋼板に引張応力が導入されることが解り、この接着特性が硬化後の強度に及ぼす影響はほとんどないことも確かめられた。

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。

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回年次学術講演会講演概要集, 1-457, pp.913-914, 2008.9