

## CFRP 板と鋼板の接着接合部の疲労強度とはく離進展挙動の評価

中日本高速道路 正会員 ○手塚渉太  
 首都大学東京 正会員 中村一史  
 雲南大学 林帆

### 1. はじめに

近年、我が国における鋼構造物の老朽化に伴い、それらの効率的な補修・補強対策が求められている。従来の工法では、重機を用いる規模の大きな作業が必要となり、効率的ではない場合がある。そのような中、現在注目されているのが、炭素繊維強化樹脂板(以下、CFRP 板と呼ぶ)を用いた接着工法である。施工は、対象部位に軽量の CFRP 板を接着するだけであるため、非常に簡便であり、耐腐食性にも優れることから、厳しい環境にも適用できる。しかし、CFRP 板の接着接合における、はく離強度の評価や、疲労耐久性が十分に明らかにされていないことが、実用化を妨げる一つの要因として考えられる。そこで本研究では、CFRP 板接着による補修設計法の確立に向けて、CFRP 板と鋼部材の接着接合部の疲労耐久性を明らかにすることを目的として、実験的、解析的な検討を行った。

### 2. 接着接合部の評価方法と実験条件

図-1 に示すように、平鋼板(500×50×9)の両面に、1層、5層、7層のCFRP板(1層当たり 300×50×1.2)を、エポキシ樹脂接着剤で接着接合したものを試験片として、接着端部からのはく離挙動に着目した疲労試験を実施する。次に、FEM 解析により接着端部近傍の応力を算出して、接着接合部の疲労耐久性の評価を行うために、応力拡大係数を求め、疲労試験結果に基づいて、はく離進展寿命の推定式を提案する。

#### 2.1 疲労試験の条件

図-2 にセットアップ状況を示す。図-2 に示すように、片方の接着端部を治具により固定することで、はく離計測箇所を上半分に限定し、はく離の発生と進展を制御した。また、クラックゲージを接着端部から中心側に向かって、2mm の位置に設置することで、初期はく離および端部から 27mm までのはく離の進展を 1mm 間隔で計測した。

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、表-2 に、試験条件を示す。CFRP 板の層数により剛性が変わるため、海外の設計ガイドラインを参考に、接着剤の厚さ方向の中心部に生じる最大主応力  $\sigma_p$  をパラメータとして評価した<sup>1)</sup>。接着剤に生じる種々の応力においては、FEM 解析により線形弾性解析を行い、評価を行った。载荷速度は、応力範囲に合わせ 10~18Hz とした。

#### 2.2 解析モデルと解析条件

FEM 解析には、汎用有限要素解析プログラム Marc2013 を適用して、要素サイズを全て 0.1×0.1mm でモデル化し、平面解析を行った。また、疲労試験によると、はく離形式は、鋼

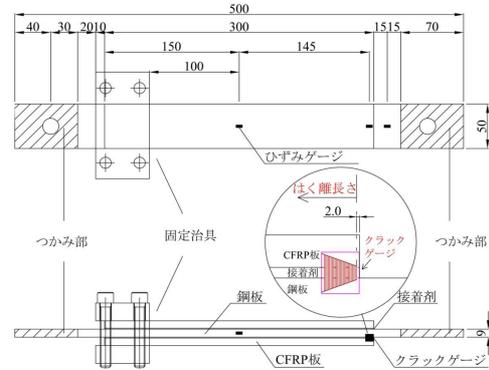


図-1 試験片図

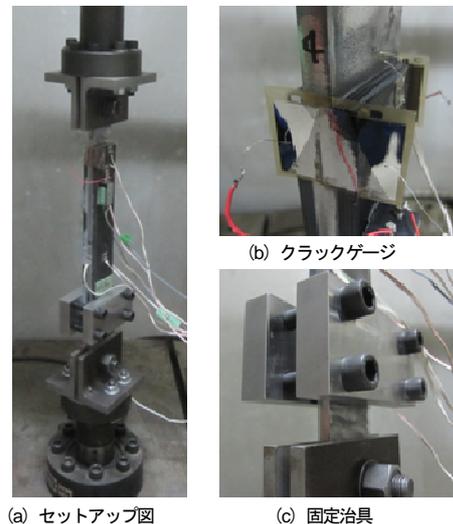


図-2 試験片のセットアップ図

表-1 機械的性質

	鋼板(SS400)	CFRP 板	エポキシ樹脂接着剤
弾性係数(GPa)	200	150	1.5
降伏点(MPa)	320	-	-
引張強度(MPa)	453	2680	30

表-2 試験条件

実験シリーズ	公称応力 $\sigma_n$ (MPa)			主応力 $\sigma_p$ (MPa)		
	最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲
CL1N180	200.0	20.0	180	13.9	1.4	12.5
CL5N100	111.1	11.1	100	18.5	1.8	16.6
CL5N120	133.3	13.3	120	22.2	2.2	20.0
CL5N140	155.6	15.6	140	25.9	2.6	23.3
CL5N160	177.8	17.8	160	29.6	3.0	26.6
CL5N180	200.0	20.0	180	33.3	3.3	29.9
CL7N100	111.1	11.1	100	20.7	2.1	18.6
CL7N120	133.3	13.3	120	24.8	2.5	22.3
CL7N140	155.6	15.6	140	29.0	2.9	26.1
CL7N160	177.8	17.8	160	33.1	3.3	29.8
CL7N180	200.0	20.0	180	37.2	3.7	33.5

**Key Words** : CFRP 板, 接着接合, はく離, はく離進展, 疲労, 応力拡大係数, 主応力  
 連絡先\* : 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線(4564)

板の界面に極めて近い層で、接着剤の凝集破壊であったことから、FEM解析では鋼板の界面から0.1mmの位置に二重節点を設けることでエネルギー解放率を求め、応力拡大係数を算出した。なお、はく離モードは、開口型(モードI)と面内せん断型(モードII)の複合モードであったため、文献2)をもとに式(1)より等価応力拡大係数 $K_v$ を算出した。加えて、式(2)にパリス則に基づくはく離進展速度 $da/dN$ と等価応力拡大係数の関係を示す。

$$K_v = K_I \cos^3\left(\frac{\delta\theta}{2}\right) - 3K_{II} \cos^2\left(\frac{\delta\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta\theta}{2}\right) \quad (1)$$

$$\delta\theta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} - \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8}\right)$$

$$da/dN = C(K_v)^m \quad (2)$$

ここで、 $C$ と $m$ は実験から得られる材料定数である。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 接着接合部の疲労耐久性

図-3に、試験結果として、初期はく離寿命のS-N線図を示す。1層のCFRP板を接着した試験片では、 $\Delta\sigma_{sn}=180\text{MPa}$ で疲労限となることが確かめられた。さらに、5層と7層の試験片による比較から、初期はく離における疲労強度を、実験式 $\sigma_p=77.877N^{0.099}$ で評価することができた。また、図-3に併記した、開始から27mmまでの繰返し回数から、はく離進展に要する回数に比べて、初期はく離(2mm)までに要する回数の方が多いたことが明らかになった。

#### 3.2 接着端部近傍におけるはく離進展速度

図-4に、試験結果として、初期はく離後の繰返し回数とはく離長さの関係を示す。どのケースにおいてもはく離長さと繰返し回数は、ほぼ線形関係であることがわかる。図-5に等価応力拡大係数とはく離長さの関係を示す。接着端部近傍を除き、値が一定であることから、式(2)よりはく離長さと繰返し回数が比例関係にあることを示唆していることがわかる。

#### 3.3 はく離進展寿命の推定

図-5における等価応力拡大係数と、式(2)から、はく離長さ2~27mmに要する進展寿命の予測式を、 $\Delta\sigma_p=165.82N^{0.162}$ と提案する。材料定数は、 $m=6.25$ 、 $C=2.00 \times 10^{-11}$ であった。図-6に、横軸をはく離長さ2~27mmに要した繰返し回数、縦軸を主応力範囲としたS-N線図を示す。また、実験から得られた回帰式(実線)とはく離進展解析から得られた予測式(点線)を併記する。図-6に示すように、実験値のばらつきがあるものの、平均的なはく離の進展寿命を推定できるといえる。

### 4. まとめ

以上のことから、接着接合部の疲労耐久性について実験的に検討を行った結果、初期はく離が発生するまでの疲労寿命を明らかにした。また、実験値から得られた回帰式を提案し、はく離進展寿命推定が可能であることを示した。

参考文献

- 1) National Research Council: Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures - Metallic Structures, 2007.
- 2) 田中啓介, 秋庭義明, 加藤拓也, 高橋弘樹: 繰返しねじり・引張複合荷重下での予き裂からの疲労き裂進展経路の予測, 日本機械学会論文集(A編), 第74巻, 704号, 2005-4

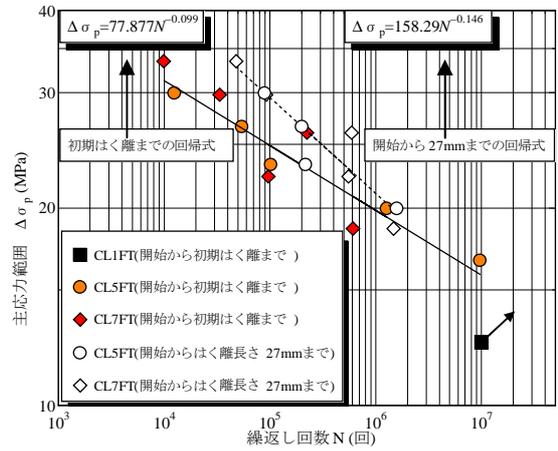


図-3 接着剤のS-N線図

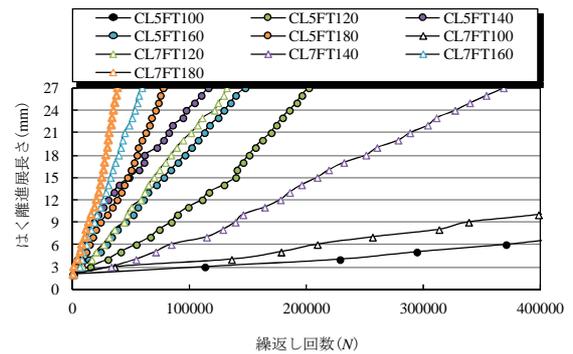


図-4 繰返し回数とはく離進展長さの関係

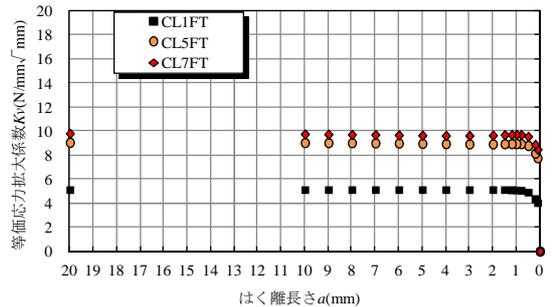


図-5  $\sigma_{sn}=100\text{MPa}$  時の等価応力拡大係数

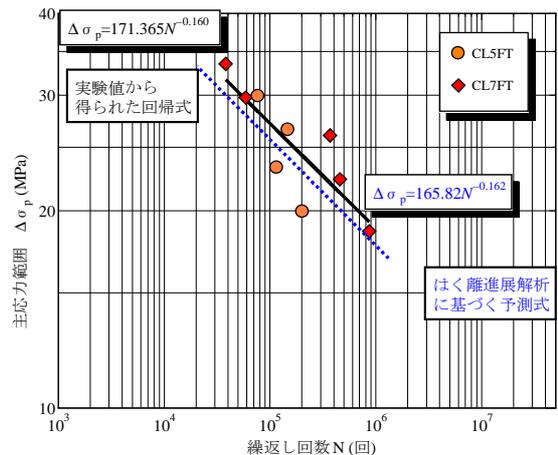


図-6 はく離進展寿命の推定