

プレテンションを導入したCFRP板接着による溶接継手部の疲労き裂の補修に関する検討

首都大学東京大学院 学生員○伊藤寛弥 向田大翼*
 首都大学東京 正会員 中村一史 雲南大学 林 帆

1. はじめに

疲労き裂の簡便かつ効率的な補修工法として、炭素繊維強化樹脂板（以下、CFRP板と呼ぶ）の接着による工法が検討されている。しかしながら、十分な補修効果を得るためには、CFRP板の高剛化あるいは積層化が必要となり、コストが増大し、はく離の対策も課題となる。そこで、プレテンションを導入したCFRP板を接着し、解放することで、鋼板に圧縮のプレストレスを導入する方法が提案されている。疲労き裂の補修に用いた場合、疲労寿命の大幅な向上が示されているものの、実用化に向けて、応力比が相対的に高くなる溶接接合部への適用性などが課題とされている。本研究では、面外ガセット溶接継手部から発生する疲労き裂に対して、それらの補修効果を明らかにすることを目的として、疲労試験によって検討を行った。

2. 実験方法と解析方法

2.1 面外ガセット溶接継手試験体の概要

図-1に、面外ガセット溶接継手試験体を示す。鋼板(1350×400×9mm)の両面に面外ガセット(500×300×9mm)がすみ肉溶接で接合されている。片側のみからの疲労き裂に着目するため、反対側には半円孔(R=50)を設け、完全溶け込み溶接としている。

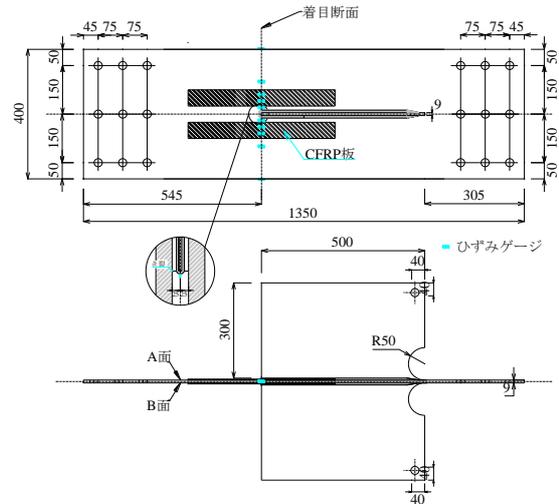


図-1 面外ガセット溶接継手の試験体図

2.2 補修方法と疲労試験条件

まず、疲労試験によって、面外ガセットの板厚中心部から長さ25mmまで疲労き裂を進展させ、この時の疲労き裂をCFRP板接着により補修した。補修方法は、疲労き裂を有する試験体に、CFRP板(450×1.2×50mm)をエポキシ樹脂接着剤で接着するケース(PWGC)、および、引張力を与えたCFRP板を接着し、硬化後に解放することで、圧縮のプレストレスを導入したケース(PWGP)である。図-2に、プレストレス導入装置¹⁾を示す。本研究では、CFRP板に2500×10⁶の引張ひずみを導入した。表-1に、材料物性値を、表-2に、疲労試験の条件をそれぞれ示す。無補修の試験体(PWGN)を加え、3ケースについて疲労試験を行った。

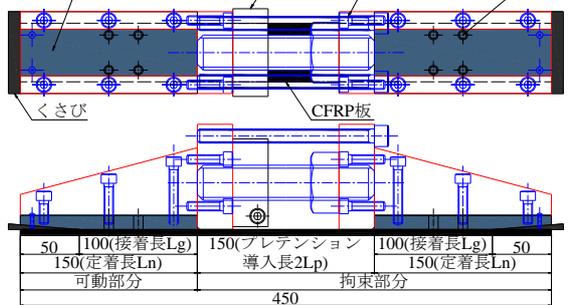


図-2 プレストレス導入装置の概念図

表-1 材料物性値

	鋼板(SM400)	CFRP板	エポキシ樹脂接着剤
弾性係数(GPa)	202	150	1.5
降伏点(MPa)	292	—	—
引張強度(MPa)	420	2808	30
破断伸び(%)	37	1.9	—

表-2 疲労試験の条件

補修条件	試験体番号	応力範囲 Δσ(MPa)	最大応力 σ _{max} (MPa)	最小応力 σ _{min} (MPa)	応力比 R	載荷速度 f(Hz)
無補修	PWGN_01	100	111.1	11.1	0.1	3
	PWGN_02	80	88.9	8.9	0.1	3
	PWGN_03	60	66.7	6.7	0.1	3
CFRP板 (PSあり)	PWGP_04	100	111.1	11.1	0.1	3
	PWGP_05	100	111.1	11.1	0.1	3
CFRP板	PWGP_07	80	88.9	8.9	0.1	3
	PWGC_06	100	111.1	11.1	0.1	3

2.3 解析モデルと解析条件

数値解析には、汎用有限要素解析プログラム Marc2013を適用した。き裂先端の最小要素サイズは0.04×0.04mmであり、ソリッド要素を用いて、対称性により全体の1/4をモデル化した。圧縮のプレストレスは、CFRP板の軸方向に等価な初期応力(375MPa)を与えることで考慮した。軸方向に一樣に100MPaを作用させ、線形弾性解析を行った。

き裂は二重節点でモデル化し、き裂先端にクラック要素を定義す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。パリズ則に基づいた応力拡大係数 K_I とき裂進展速度 da/dN の関係 ($da/dN = C \cdot K_I^m$) より疲労寿命を推定した。材料定数 C , m は、JSSCの疲労設計平均設計曲線の推奨値 ($m=2.75$, $C=1.5 \times 10^{-11}$) とした。

Key Words : CFRP板, プレストレス導入装置, プレテンション, プレストレス, 疲労き裂, 補修
 連絡先 : 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線 (4564) ※研究当時

3. 実験結果と考察

3.1 試験体に導入される圧縮応力の評価

PWGP_05において、4枚のCFRP板の軸方向ひずみは、接着剤の硬化後 2450×10^{-6} であった。プレテンション解放後 2250×10^{-6} となり、解放前後のひずみ差が鋼板に導入された圧縮のプレストレス量となる。解析では、前述した手順でCFRP板に等価な初期応力(375MPa)を導入して計算している。図-3に、プレストレス導入による着目断面(図-1)の応力分布を示す。実験結果によれば、着目断面には一様に-21.4MPa、CFRP板接着範囲には-39MPaの圧縮応力が導入された。解析結果によれば、それぞれ-23.2MPa、-34.2MPaとなり、ほぼ理論通りであることがわかった。ただし、面外ガセット付近($X=0\text{mm}$)においてプレストレス導入量に大きな差がみられた。これは、回し溶接止端部に生じている残留応力の影響によるものと考えられる。

3.2 公称引張応力と応力拡大係数の関係

図-4に、解析結果の一部として、引張応力100MPaにおける応力拡大係数とき裂長さの関係を示す。無補修であるPWGNはき裂長さに比例して応力拡大係数が増加するのに対し、CFRP板による補修をしたPWGC、プレストレスを導入したPWGPでは、き裂の長さに対して、応力拡大係数の増加の割合が小さいことがわかる。

3.3 き裂長ささと繰返し数の関係

図-5に、応力範囲100MPaにおけるき裂長ささと繰返し数の関係を示す。実験結果からは、プレストレスの導入により無補修に対して7.7倍、CFRP板の接着に対して4.8倍の延命効果があることがわかった。解析結果においては、無補修では実験結果を精度よく予測できたのに対し、補修した場合は実験結果より、繰返し回数が少なく算出され、安全側に評価されることが確かめられた。

3.4 き裂進展寿命の推定

図-6に、応力範囲とき裂長さ25~150mmまでの繰返し回数の関係を示す。図中には、き裂進展解析による推定値(実線)および実験値の回帰曲線(破線)を併記している。実験データが少ないものの、プレストレスを導入した場合、疲労寿命はき裂進展解析によって、概ね評価できていることがわかった。

4. まとめ

以上のことから、溶接止端部から発生したき裂に対し、圧縮のプレストレスが導入されることが実験的、解析的に確認できた。また、プレストレス導入により応力拡大係数の低減、き裂進展速度の低下が確かめられた。さらに、き裂進展解析による結果から、プレストレス導入時の疲労寿命は安全側に評価された。

参考文献 1) 伊藤寛弥, 中村一史, 林帆: プレテンションを導入したCFRP板接着による疲労き裂の補修に関する研究, 第5回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 土木学会, pp.105-113, 2014.11

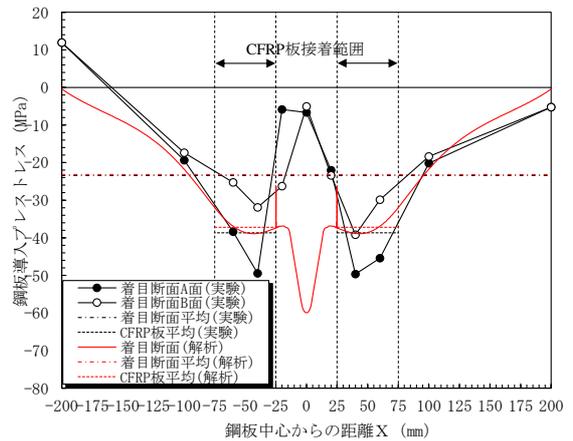


図-3 プレストレス導入による着目断面の応力分布

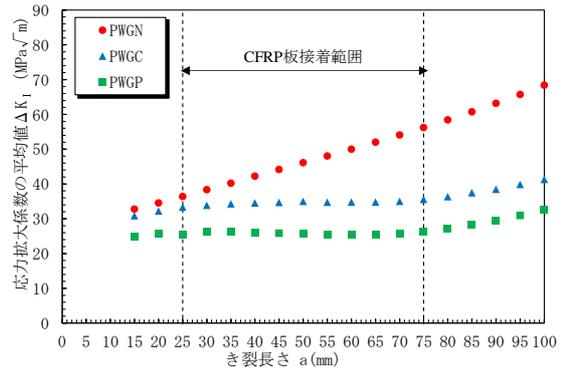


図-4 応力拡大係数とき裂長さの関係

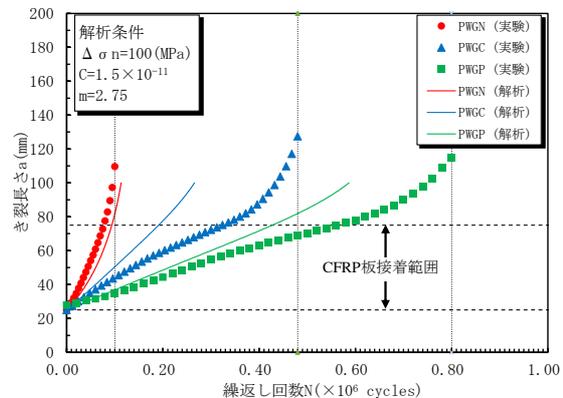


図-5 き裂長さ a と繰返し数 N の関係

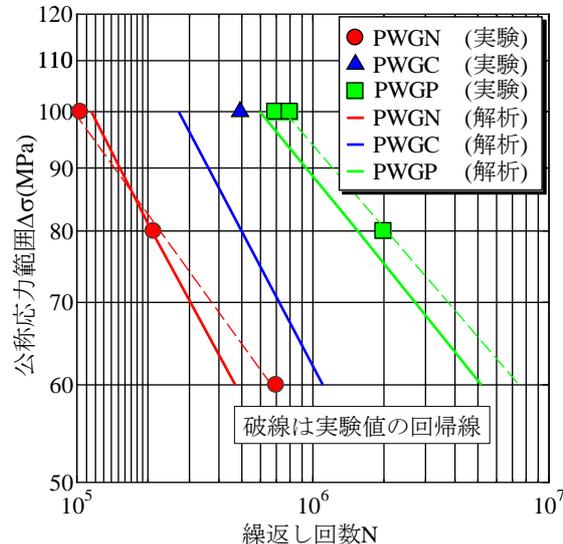


図-6 応力範囲と繰返し数の関係