

溶接継手に生じた疲労き裂に対する CFRP 接着補修の効果に関する研究

名古屋大学 学生会員 ○金山由布子 正会員 判治剛 フェロー会員 舘石和雄
正会員 清水優 学生会員 服部真未子 学生会員 牛田健友

1. はじめに

鋼部材に生じた疲労損傷に対する炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の適用は限られており, その理由として補修後のき裂進展の定量的評価が難しいことが挙げられる. 本研究では, CFRP 接着補修下のき裂周辺部のモデル化方法, および表面き裂に対する補修効果を有限要素解析と疲労試験により検討した.

2. 接着補修された疲労き裂のモデル化方法

接着補修後のき裂進展を評価するためには, き裂先端の応力拡大係数, 言い換えればき裂の開口挙動を精度良く求める必要がある. 本研究では, 両面に CFRP 板が接着された突合せ鋼板の引張試験を行い, き裂周辺部の開口挙動を確認し, そのモデル化方法を検討した. 試験体を図-1 に示す. 突合せ部をき裂と考え, その開口変位を画像計測により測定した.

解析による突合せ部周辺のモデル化の概念図を図-2 に示す. 試験体の突合せ部の初期開口幅 (0.1mm) を考慮し, 実験中に観察された片面の CFRP 板の局部的なはく離もモデル化した. これは, はく離領域 (4mm) 上の鋼板と接着剤の界面位置の節点を二重節点とすることで再現した.

開口変位の比較を図-3 に示す. 初期開口幅およびはく離を考慮することにより両者はよく一致している. 一方, 初期開口幅 0mm の場合でも, はく離を考慮した面の開口変位は, 実測値と 8%程度の差であった.

3. 炭素繊維シートによる補修効果の検討

半楕円形き裂 (幅 41.4mm, 深さ 9.9mm) が導入された鋼板に対して有限要素解析を実施し, き裂先端での応力拡大係数範囲の変化から接着補修の効果を検討した. 解析モデルの例を図-4 に示す. これは後述する疲労試験体の主板のみを取り出したものである. 炭素繊維シートによる補修を考え, シート (厚さ 0.167mm, 繊維方向弾性係数 230kN/mm^2) と接着剤 (層厚 0.7mm, 弾性係数 2.724kN/mm^2) は層別にモデル化している. 前章での検討を踏まえ, き裂線直上におけるはく離を二重節点により仮定し, 初期開口幅は 0mm とした. 応力拡大係数は変位外挿法により算出した.

積層数, 接着長 (き裂直交方向), 接着幅 (き裂平行方向) を

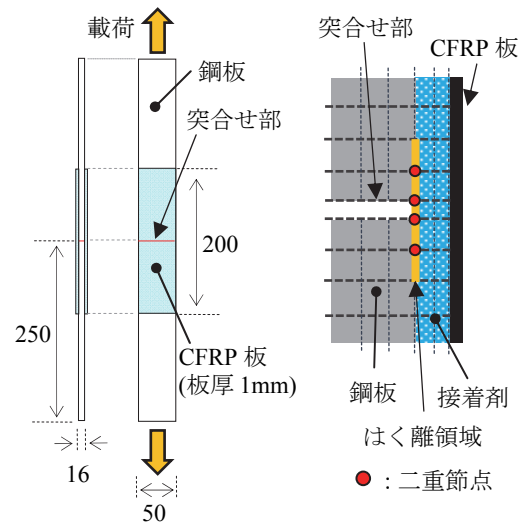


図-1 試験体
(単位: mm)

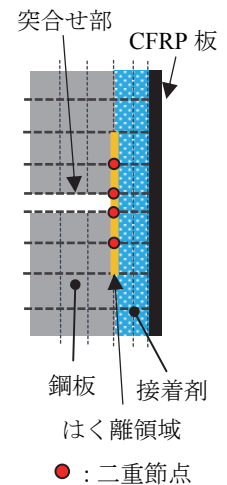


図-2 モデル化の概念図

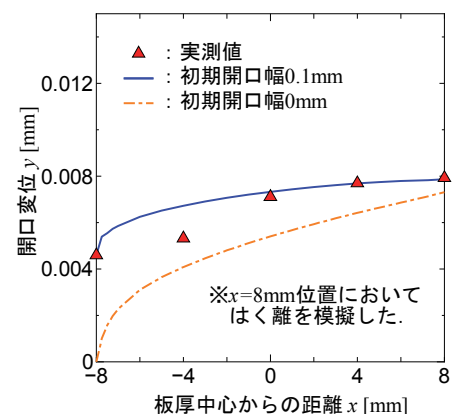


図-3 開口変位の比較

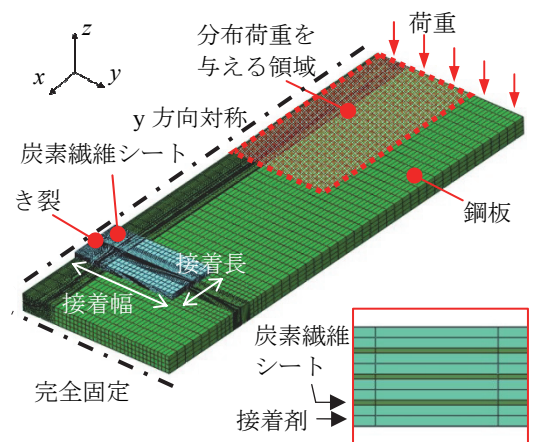


図-4 解析モデルの例

キーワード 炭素繊維強化プラスチック, 炭素繊維シート, 溶接継手, 疲労き裂, 応力拡大係数

連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院 工学研究科 TEL: 052-789-4620

変化させて解析を行った。板表面の応力拡大係数を図-5に示す。縦軸は、求めた応力拡大係数範囲を無補修の結果により除した値 ΔK_{nor} である。積層数が増加すると ΔK_{nor} は徐々に減少するが、接着長によっては効果が収束する。また、接着長が50mmと比較的短い場合でも効果が得られ、100mm以上ではほぼ収束する。接着幅の結果は省略するが、幅の増加に伴い ΔK_{nor} は単調に減少した。

次にき裂長を変化させ、き裂進展抑制に対する公称応力低減効果と架橋効果の割合を検討した。その結果を図-6に示す。Newman-Rajuの式により算出した無補修時の ΔK_1 、鋼板と補強材を完全合成と考えて同式により算出した ΔK_2 、有限要素解析により求めた補修後の ΔK_3 を用い、図中に示すように各効果を定義した。図より、き裂長の増加とともに架橋効果の占める割合が大きくなっている。これは、き裂の伸びに伴って大きくなるき裂開口変位をシートが抑制するためであると考えられる。

4. 炭素繊維シートによりき裂補修した溶接継手の疲労試験

面外ガセット溶接継手を対象に疲労試験を実施し、補修効果を検討した。試験体および炭素繊維シートの貼付領域を図-7に示す。供試鋼材はSM490YBである。载荷には板曲げ振動疲労試験機を用いた。溶接止端部に予き裂（主板上約10mm）を導入した後、炭素繊維シートを接着した。積層数を5層、接着幅を200mmとし、接着長を50mm（Sシリーズ）と150mm（Lシリーズ）の2ケースとした。応力比は $R=0$ 、 $-\infty$ とした。シートは溶接形状に合わせて加工し、主板上にのみ貼付した。き裂進展量はビーチマークから測定した。

補修後からき裂長が約90mmに達するまでの繰返し数を図-8に示す。無補修に比べ、Lシリーズでは大幅な寿命改善が確認できる。Sシリーズでは大きな改善はみられないが、これは試験中にガセット近傍のシート端において接着剤の凝集破壊が生じたことが一因であると考えられる。応力比により補修効果が異なるが、この理由は不明であり、今後の課題である。

5. まとめ

本研究では、疲労き裂に対するCFRP接着補修の効果を解析および実験により検討した。結果として、解析モデル化の際には接着剤のはく離を考慮する必要があること、き裂が長くなると架橋効果の割合が増加すること、接着補修により面外ガセット継手の寿命を大幅に改善できることを示した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、名古屋高速道路公社より多大なるご支援をいただきました。ここに記して深謝いたします。

参考文献 1) 中村ら：構造工学論文集 Vol.57A, pp.842-851, 2011. 2) 奥山ら：土木学会論文集 A, Vol.68, No.3, pp.635-654, 2012. 3) Newman, et al. : NASA Technical Memorandum 85793, 1984.

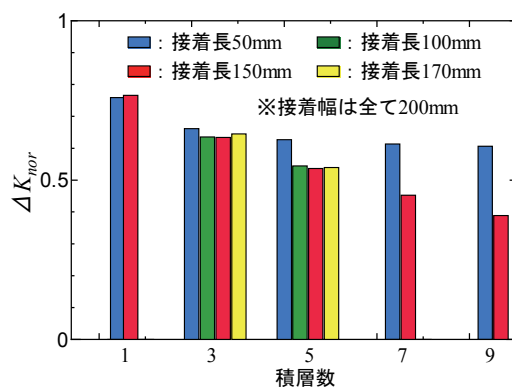


図-5 各解析ケースでの応力拡大係数範囲

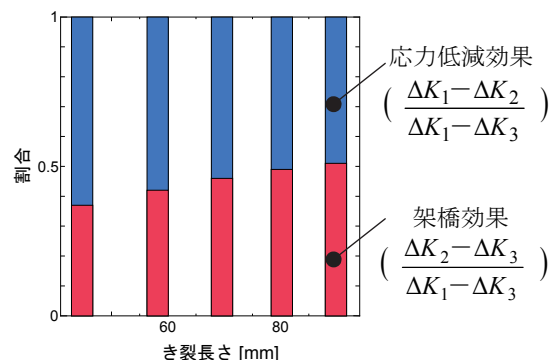


図-6 補修効果の割合

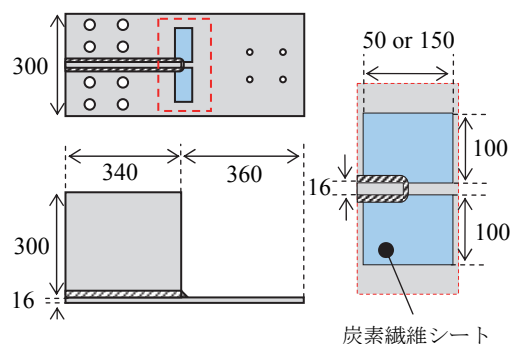


図-7 試験体と貼付領域（単位：mm）

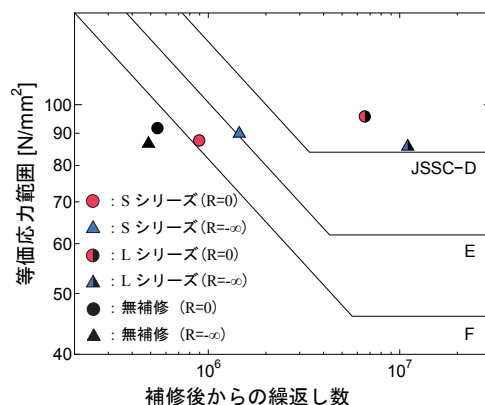


図-8 補修後からの繰返し数