

CFRP 板接着補修された中央貫通き裂を有する鋼板のき裂進展解析

首都大学東京 学生員 ○林 帆・孫 継光
西日本旅客鉄道 正会員 北章太郎
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 福田欣弘

1. はじめに

著者らは、炭素繊維強化樹脂板（以下、CFRP 板と呼ぶ）を用いた鋼構造物の補修に関する実験的な検討を行ってきたが、疲労き裂を CFRP 板で補修する場合、補修後の疲労寿命を評価する必要がある。本研究では、FEM 解析プログラムを用いて応力拡大係数を求め、線形破壊力学に基づいたき裂進展解析によって、CFRP 板接着補修後の疲労寿命の予測を試みた。また、既往の実験結果¹⁾と比較して、その妥当性を検証した。

2. 検討対象と解析方法

検討対象としたき裂モデルは、一様引張りを受ける中央貫通き裂を有する帯板（平鋼板）であり、き裂モードはモード I（開口型）である。

まず、CFRP 板接着補修された中央貫通き裂を有する鋼板をモデル化し、汎用有限要素解析ソフト Marc 2005r3 を適用して、応力拡大係数を算定した。さらに、パリス則に基づいた式 (1) にしたがって、き裂進展解析を行った。ここに、 C 、 m は、材料パラメータであり、無補修時の疲労試験結果¹⁾から、 C を 7.5×10^{-12} 、 m を 2.75 とした。

$$da/dN = C \cdot \Delta K^m \cdots \cdots (1)$$

解析モデルについては、図-1 に示すように、中央貫通き裂を有する鋼板（75×400×9mm）に CFRP 板（50×200×1.2mm）をエポキシ樹脂接着剤で接着されたケースを解析対象とし、試験片の対称性を利用して、図の斜線部分（1/8 モデル）を 20 節点アイソパラメトリックソリッド要素でモデル化した。接着層の厚さは 0.4mm とし、2 層でモデル化した。また、図-2 に、き裂近傍の要素分割図を示す。き裂先端近傍の応力の特異場を精度良く評価するため、き裂先端周辺の要素については、8 面体要素を 6 面体要素に縮退した。さらに、き裂先端では、辺長の中点積分点をき裂先端に近づけた特異要素を適用した。ここで、図-3 に示すよう

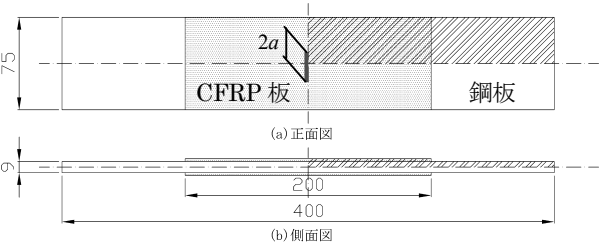


図-1 解析対象

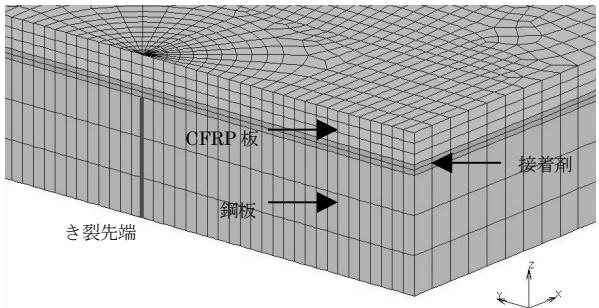


図-2 き裂先端近傍の要素分割

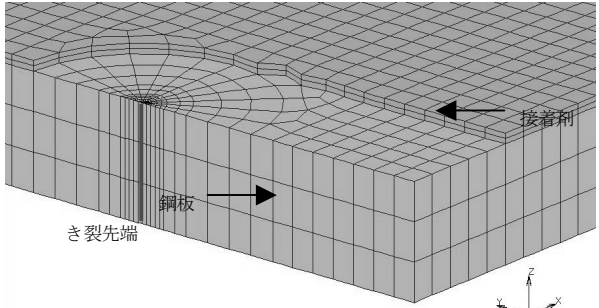


図-3 接着剤のはく離を考慮するために除去する要素

表-1 解析に用いた材料物性値

CFRP板		
弾性係数 (GPa)	E_{cx}	165
	E_{cy}	8
	E_{cz}	8
ポアソン比	ν_{cxy}	0.34
	ν_{cyz}	0.005
	ν_{czx}	0.005
せん断弾性係数 (GPa)	G_{xy}	5.2
	G_{yz}	4
	G_{zx}	5.2
エポキシ樹脂接着剤		
弾性係数 (GPa)	E_b	1.5
ポアソン比	ν_b	0.3
鋼板(SM400)		
弾性係数 (GPa)	E_s	205.8
ポアソン比	ν_s	0.3

Key Words : CFRP 板, 補修, 疲労き裂, 応力拡大係数, 疲労寿命, はく離

連絡先* 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL. 042-677-1111 内線(4564) FAX. 042-677-2772

に、き裂の進展に伴う接着剤のはく離の程度を考慮するために、き裂先端近傍とき裂進展部分におけるエポキシ樹脂接着剤を、5mm、10mm の範囲で除去して検討を行った。さらに、き裂長さに応じて、解析モデルを作成して検討を行った。

荷重条件については、既往の疲労実験結果¹⁾を参考に、一様な引張応力 σ_{sm} を作用させ、応力範囲を70MPaとした。解析モデルに用いた材料物性値を表-1に示す。

3. 解析結果と考察

解析結果の一部として、図-4 に、応力拡大係数範囲とき裂長さの関係を示す。比較のために、補修後の公称応力の低減を考慮した簡便な提案式²⁾によって算出された値も併記している。図より、無補修では、有限幅を考慮した理論式による値と FEM 解析値はよい一致を示している。また、補修後には大幅に応力拡大係数範囲が低減されていることがわかる。接着剤のはく離を考慮しない場合、応力拡大係数範囲は低めに評価されること、また、はく離の範囲を5mm 以上としても、その値はほとんど変化しないことがわかる。一方、提案式では、き裂長さが長くなると、適用は困難になるものの、安全側の評価となることが予測される。

図-5 に、き裂長さ $2a$ と繰返し回数の関係を、実験結果と比較して示す。2つの実験値は、き裂長さ $2a$ と繰返し回数の関係が異なり、ばらつくことがわかる。また、実験結果では、き裂長さ $2a$ が約60mm を超えると、き裂進展速度が急激に速くなることから、検討対象の限界き裂長は約60mm であると考えられる。

まず、簡便な提案式による推定結果は、き裂進展速度が最も速く、実験結果のほぼ下限値を与え、安全側に評価されることがわかる。したがって、CFRP 板接着によって、作用力の一部が CFRP 板に分担され、き裂近傍の公称応力が低減されることが、主な補修効果であるといえる。

一方、はく離を考慮しない場合の推定結果からは、補修効果が高めに評価され、5mm の範囲ではく離を考慮した場合、実験結果とほぼ一致することがわかる。この実験結果のばらつきは、き裂進展にともなうはく離範囲の影響が一つの要因と考えられた。このはく離範囲の影響は、き裂の開口変位の抑制効果に関するものと考えられることから、今後より詳細に検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、FEM 解析および提案されている簡便式から補修後の応力拡大係数を算出して、き裂進展解析を行った。疲労試験結果と比較することで、接着剤のはく離の範囲がき裂進展挙動に及ぼす影響を明らかにした。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, 中村一史, 前田研一, 林 帆, 孫 継光, 鈴木博之, 入部孝夫, 福田欣弘: 動的荷重作用下で貼付された CFRP 板の接着特性と疲労き裂進展の抑制効果, 土木学会, 第 65 回年次学術講演会講演概要集, 投稿中
- 2) Hongbo Liu, Zhigang Xiao, Xiao-Ling Zhao, Riadh Al-Mahaidi: Prediction of fatigue life for CFRP-strengthened steel plates, Thin-Walled Structures, Vol.47 pp.1069-1077, 2009.

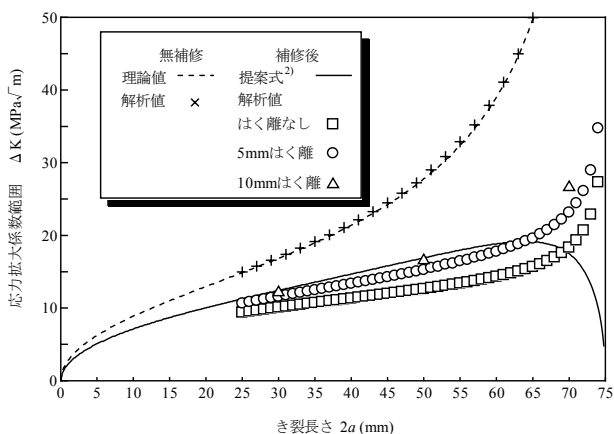


図-4 応力拡大係数範囲とき裂長さの関係

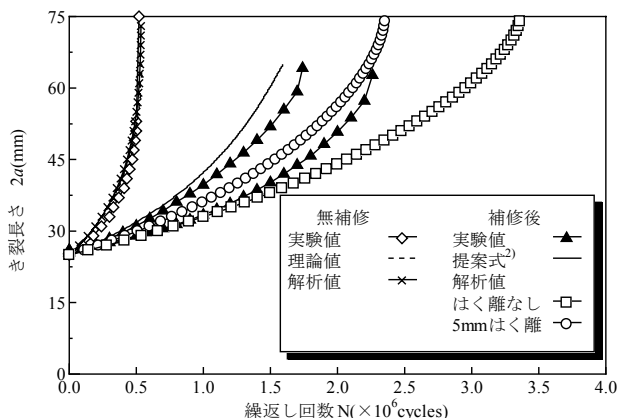


図-5 き裂長さ $2a$ と繰返し回数の関係