

## CFRP 板接着により補修された疲労き裂の応力拡大係数の算定について

首都大学東京大学院 学会員○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 フェロー 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）の接着による疲労き裂の補修について各方面で検討が行われている。本研究では、補修後の疲労寿命を評価するための基礎的な検討として、FEM 解析による応力拡大係数の算定方法を検証するとともに、CFRP 板貼付域における応力拡大係数を算出して補修効果を比較検討した。

### 2. 解析方法

解析には、20 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用い、汎用有限要素解析プログラム MARC により線形弾性解析を行った。これまでの実験的な検討結果<sup>1)</sup>を踏まえて、鋼板中央部における貫通き裂両側の先端を CFRP 板で補修するケースを解析対象とし、対称性を考慮して全体の 1/8 をモデル化した。解析モデルの一例を図-1 に示す。鋼板の幅を 125mm、長さを 150mm とし、CFRP 板の幅を 25mm、長さを 50mm とした。また、鋼板、CFRP 板およびエポキシ接着剤の厚さは、それぞれ 4.5、1.2 および 0.4mm とした。き裂先端の最小メッシュのサイズを 0.05mm とし、また、き裂先端の応力の特異場を精度よく評価するために、特異要素を用いた。き裂長さは 5~75mm まで 5mm の間隔で変化させて、検討を行った。き裂先端近傍のモデル化の様子を図-2 に示す。CFRP 板は繊維方向に卓越した材料特性を有する異方性材料であるため、その繊維方向を引張方向とし、その異方性も考慮してモデル化した。作用応力については、一様な 100MPa の引張応力を載荷した。各部材の寸法と材料特性を表-1 に示す。また、応力拡大係数の算定には、J 積分法によるもののほか、算定方法を検証するために、き裂の開口変位分布およびき裂先端の応力分布より推定する変位外挿法および応力外挿法によるものとした<sup>2)</sup>。比較検討のために補修しない場合についても応力拡大係数を求めることとし、CFRP 板は鋼板の表面に接着されるため、板厚方向に対する応力拡大係数についても評価することとした。

### 3. 解析結果および考察

まず、J 積分法により算出された厚さ方向に対する応力拡大係数を図-3 に示す。き裂長さが 15、27.5 および 40mm について比較したものである。図より、CFRP 板で補修した場合、補修しない場合より応力拡大係数が低くなるのが解る。板厚方向に対する応力拡大係数は、板厚中心ほど大きくなる傾向があり、特に補修した場合で、き裂長さが 27.5 および 40mm では、表面と中心部の応力拡大係数の差が大きくなる。

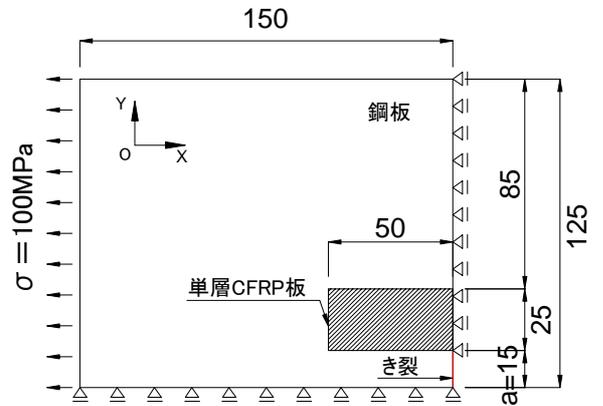


図-1 解析対象と境界条件 (a=15mm)

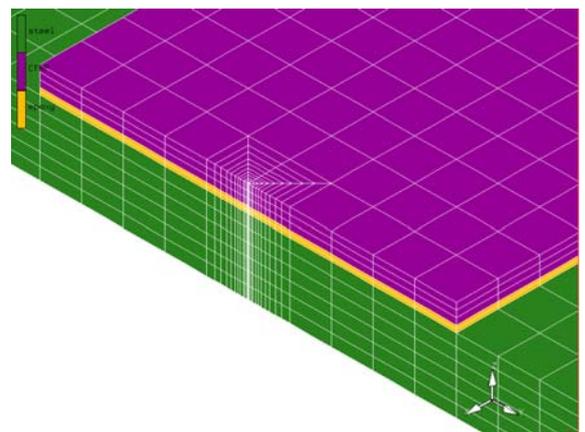


図-2 き裂先端近傍のモデル化の例 (a = 27.5mm)

表-1 各部材の寸法と材料特性

鋼板(Ws250xLs300xts9mm : 全体)		
ヤング係数(GPa)	Es	204.5
ポアソン比	vs	0.3
CFRP板(Wc25xLc100xtc1.2mm : 全体)		
ヤング係数(GPa)	Ecx	188
	Ecy	8
	Ecz	8
せん断弾性係数(GPa)	Gxy	5.2
	Gyz	4
	Gzx	5.2
ポアソン比	vcxy	0.34
	vcyz	0.005
	vczx	0.005
接着剤(Wc25xLc100xtc0.4mm : 全体)		
ヤング係数(GPa)	Eb	1.5
ポアソン比	vb	0.3

Key Words : CFRP 板, 疲労き裂, 応力拡大係数, FEM 解析, J 積分

連絡先 : 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL. 0426-77-1111 FAX. 0426-77-2772

なることが解った。これは、表面のき裂先端は CFRP 板で貼付されているため、補修効果が最も高くなるためと考えられる。

図-4 には、同様に J 積分法により求めた応力拡大係数とき裂長さの関係を示す。板厚方向に分布する応力拡大係数の影響を考察するために、最大値と最小値を図に併記した。まず、補修しない場合の応力拡大係数は、き裂が長くなるほど差が大きくなるものの、有限幅板中の貫通き裂の理論解とよく一致することが解る。また、補修した場合では、CFRP 板に覆われたき裂長さ 15~40mm の範囲では、図-3 からも明らかなように、最大と最小値の差が大きくなること、また、この範囲では、き裂の進展とともに応力拡大係数が若干低下する傾向があることも解る。

また、J 積分法、応力外挿法、変位外挿法により求めた応力拡大係数を図-5 に比較して示す。各手法による算定値は板厚方向の 7 点の平均値で評価したものである。図より、補修の有無に関わらず、各方法で求めた値が J 積分法により求めた値とよく一致することが確かめられた。したがって、き裂先端の応力や開口変位を精度よく評価できれば、いずれの算定方法でも応力拡大係数を求められることが解った。

最後に、過去に行われた実験結果<sup>1)</sup>を参照し、算定された応力拡大係数を用いて疲労寿命の推定を行った。き裂がおよそ 20~50mm まで進展する場合について、Paris のき裂伝播則に基づいて数値積分を行い、疲労寿命を計算した。材料定数  $C$  および  $n$  は補修しない場合の疲労実験結果より同定した結果、それぞれ  $2.0 \times 10^{-11}$  および 2.76 となり、ここでは補修した場合にもこれらの値を仮定して検討を試みた。また、応力拡大係数はき裂長さが 20~40mm まで、40~50mm までの 2 つ領域で多項式による近似曲線でそれぞれ評価した。図-6 に疲労寿命の推定結果を示す。図より、補修した場合の推定値は実験値を過大に評価していることが解る。この要因として、面外ガセットによる応力集中や残留応力の影響などが考えられ、今後はこれらの影響を考慮して検討を行う予定である。

4. まとめ

以上のことから、CFRP 板を貼付した領域や板厚方向に対する応力拡大係数の分布特性や応力拡大係数の評価手法が明らかになった。今後は実験結果を精度よく評価するために、詳細な検討を行う予定である。

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) 中村一史, 諸井敬嘉, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫: 溶接継手に発生した疲労き裂の積層 CFRP 板による補修効果, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.89-96, 2005.11
- 2) 岡本弘之: 線形破壊力学入門, 培風館, 1976.

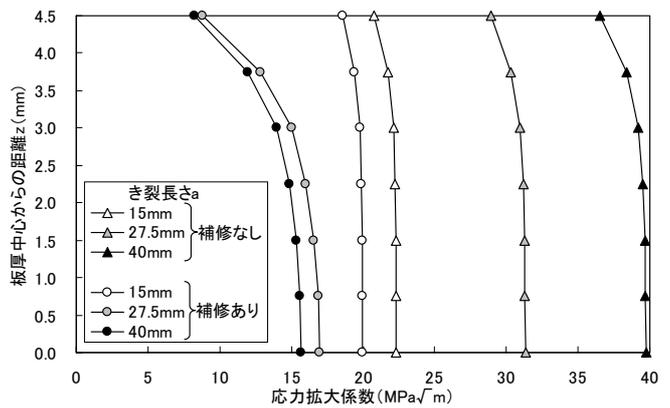


図-3 各シリーズの板厚方向の応力拡大係数

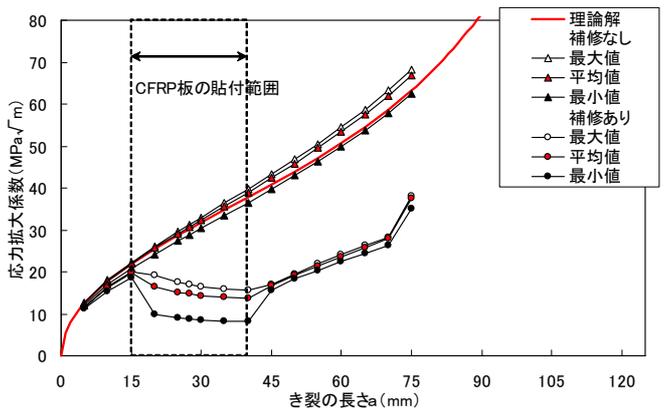


図-4 J 積分法により求めた応力拡大係数

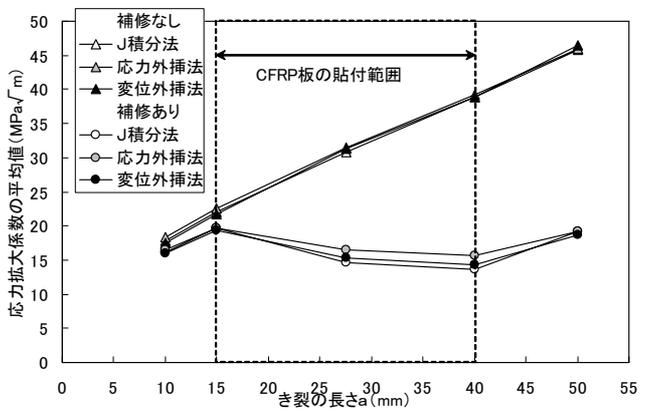


図-5 各方法により求めた応力拡大係数の比較

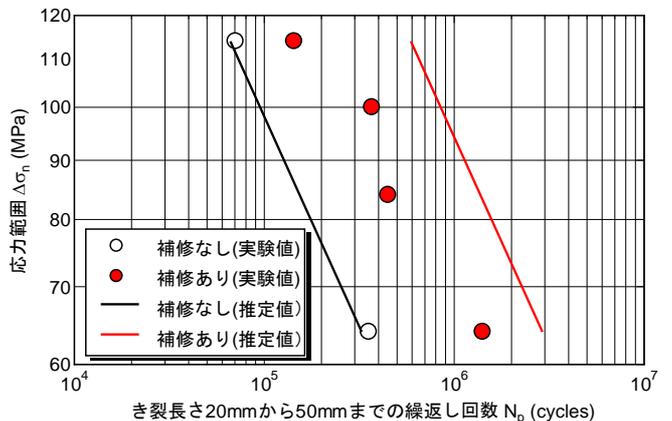


図-6 疲労寿命の推定結果