

面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂の CFRP 板接着補修後の疲労寿命予測

大林組 正会員○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 福田欣弘

1. はじめに

既往の研究¹⁾では、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が長寿命化に及ぼす効果大きいことを実験的に明らかにしたが、補修後の疲労寿命を事前に予測できれば、維持管理の上で有用である。そこで、本研究では、提案した補修方法¹⁾より面外ガセット溶接ビードから発生した疲労き裂を補修したものをモデル化し、FEM 解析により応力拡大係数を求め、Paris のき裂伝播則に基づいた疲労き裂進展解析を行って、補修後の疲労寿命の推定を試みた。

2. 解析モデルと解析方法

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。数値解析の容量の制約があるため、実験モデルを簡易化したモデルより解析を行った。なお、簡易モデルの妥当性は別途、確認されている。簡易モデルの様子を図-1 に示す。鋼板の半幅を 125mm、半長を 150mm、半厚さを 4.5mm とした。また、積層 CFRP 板で補修した M シリーズのモデル化については、積層 CFRP 板の半幅は 25mm、半長は 100mm とし、積層数は 1、5 層と変化させて解析モデルを作成した。なお、単層 CFRP 板部の寸法は半長 50mm、幅 25mm、厚さ 1.2mm とした。5 層積層する M5 シリーズのモデルを図-2 (a) に示す。また、単層 CFRP 板で補修した S シリーズについては、図-2 (b) に示すようにモデル化し、CFRP 板の寸法は M シリーズの単層部と同様の大きさとした。また、エポキシ接着剤の厚さは、0.4mm とした。CFRP 板は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。各部材の材料特性を表-1 に示す。き裂長さは 15~50mm まで 5mm の間隔で変化させて、検討を行った。作用応力については、一様な 100MPa の引張応力を载荷した。

また、実験結果¹⁾から、補修直後には、繰返し荷重の载荷より、積層 CFRP 板と溶接ビードコバ面との接着層が、部分的にはく離する可能性があることが判明したため、コバ面のはく離の程度が疲労寿命の予測精度に及ぼす影響についても検討することとした。表-2 に解析モデルを作成する際に考慮した積層 CFRP 板と溶接ビードコバ面とはく離状態を示す。なお、応力拡大係数は、エネルギー解放率から算出した。

疲労寿命の推定には、Paris のき裂伝播則より、数値積分して、以下の式で求めた。

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)} da \tag{1}$$

ここで、 N_p は推定した疲労寿命、 a_i は初期き裂長さ、 a_f は任意の

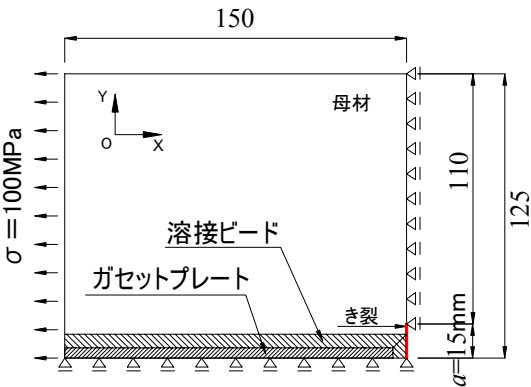
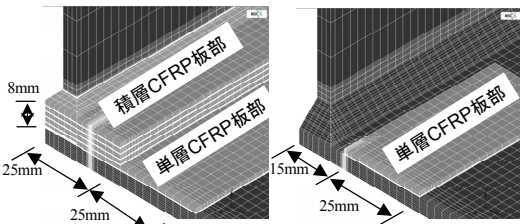


図-1 簡易モデルの平面図
(き裂長さ $a=15\text{mm}$ の例)



(a) M シリーズ (M5) (b) S シリーズ

図-2 補修したモデルの例

表-1 各部材の材料特性

鋼板		
ヤング係数(GPa)	E_s	204.5
ポアソン比	ν_s	0.3
CFRP板		
ヤング係数(GPa)	E_{cx}	188
	E_{cy}	8
	E_{cz}	8
せん断弾性係数(GPa)	G_{xy}	5.2
	G_{yz}	4
	G_{zx}	5.2
ポアソン比	ν_{cxy}	0.34
	ν_{cyz}	0.005
	ν_{czx}	0.005
接着剤		
ヤング係数(GPa)	E_b	1.5
ポアソン比	ν_b	0.3

表-2 溶接ビードコバ面とはく離状態

コバ面のはく離状態	M1	M5
はく離なし	○	○
半分はく離	—	○
完全はく離	○	○

Key Words : CFRP 板, 疲労き裂, 面外ガセット, 応力拡大係数, き裂伝播則, 疲労寿命

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

き裂長さである。材料定数 C 、 m および下限界応力拡大係数 ΔK_{th} については、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」の平均設計曲線を準用することとし、それらの値を表-3 に示す。なお、CFRP 板接着より補修した場合についても同一の値を適用した。

3. 解析結果および考察

応力拡大係数とき裂長さの関係を図-3 に示す。まず、 N については、面外ガセットの影響により、有限幅平板の理論値に比べて、FEM による解析値の方が若干大きくなる。 S については、き裂長さ a が 15mm の時（補修時）には、 N の解析値と比べて、応力拡大係数の値はほぼ同じであるが、き裂長さが長くなるとその値は低下し、疲労き裂が CFRP 板の接着範囲を貫通した後（40mm 以上）では増加することが解る。また、 $M1$ については、はく離を考慮した場合、考慮しない場合に比べて、応力拡大係数の値はかなり増加することから、コバ面の接着状態の影響が大きいといえた。一方、 $M5$ についても同様に、完全にはく離した場合には、応力拡大係数がかなり高くなること、また、はく離範囲の程度を比較した場合、完全にはく離と半分はく離の応力拡大係数の差異はわずかであることが解る。 $M1$ の解析結果からも予測されたように、下層 CFRP 板のコバ面の接着状態の影響が大きいことが確かめられた。

疲労寿命を評価するにあたっては、数値積分を実施するため、き裂長さ a と応力拡大係数 K の関係を連続関数で表示するとした。ここでは、用いる式の簡便さから、最小二乗法による直線近似を原則としたが、図-3 から解るように、 S では、CFRP 板の接着範囲の貫通後、応力拡大係数の値が上昇する挙動が見られることから、2 次関数でカーブフィットすることとした。近似曲線の係数を式(2)のように定義して、それらの係数を表-4 に示す。

$$K = A \cdot a^2 + B \cdot a + C \tag{2}$$

図-4 に、疲労寿命の推定結果を示す。図-4 (a) は、まず、 N と S における疲労寿命の推定値は、実験値とよく一致していることが解る。また、 $M1$ では、はく離を考慮しない場合、疲労寿命の推定値は実験値を過大に評価していること、また、完全にはく離した場合、推定値と実験値はよく一致を示すことが解り、コバ面の接着状態が疲労寿命の推定にも大きな影響を与えるといえた。一方、図-4 (b) に示した $M5$ の結果からは、完全にはく離した場合には、疲労寿命の推定値がかなり低くなり、実験値を下回ることが解る。また、はく離範囲の程度を比較した場合、完全にはく離と半分はく離の場合における疲労寿命の推定値の差異はわずかであった。

4. まとめ

本研究では、面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂に対して、CFRP 板接着補修後の応力拡大係数を求め、疲労寿命を推定した。その結果、単層 CFRP 板接着により補修した場合、疲労寿命の推定値と実験値とはよく一致すること、また、積層 CFRP 板接着により補修した場合では、面外ガセット溶接ビードのコバ面でののはく離が 50%の範囲に生じているとしてモデル化した場合でも、補修後の疲労寿命を実験値に対して安全側に評価できることが確かめられた。

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

表-3 設計 da/dN - ΔK 曲線の係数

$C(\times 10^{-11})$	1.5
m	2.75
$\Delta K_{th}(MPa\sqrt{m})$	2.9

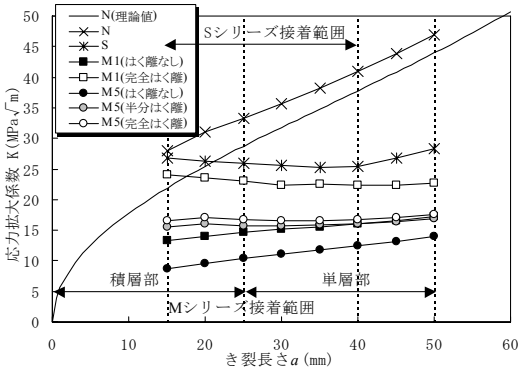
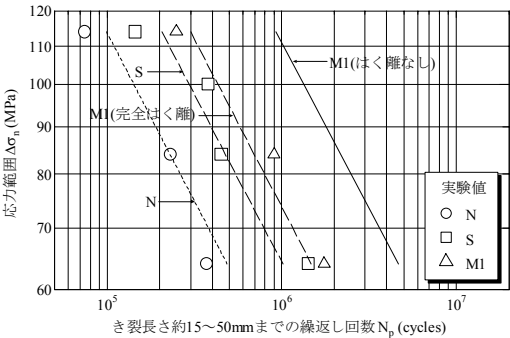


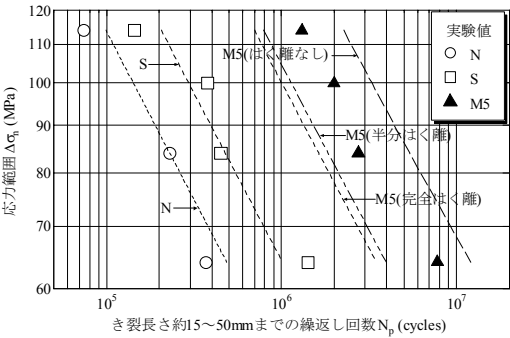
図-3 応力拡大係数とき裂長さの関係

表-4 近似曲線の係数表

補修シリーズ		A	B	C
N	—	—	6.30×10^{-1}	17.0
S	はく離なし	6.42×10^{-3}	-3.76×10^{-1}	31.0
M1	はく離なし	—	-1.08×10^{-1}	11.8
	完全はく離	—	-3.88×10^{-2}	24.1
M5	はく離なし	—	1.48×10^{-1}	6.58
	半分はく離	—	2.99×10^{-2}	15.1
	完全はく離	—	1.55×10^{-2}	16.3



(a) M1



(b) M5

図-4 疲労寿命の推定結果