

GFRP を貼付した疲労き裂の進展速度

明星大学 正会員 鈴木 博之

1. はじめに

本研究では、鋼部材に発生した疲労き裂に GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）をプライマー（2 液混合常温硬化型プライマー）を用いて貼付したときのき裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係を調査し、GFRP およびプライマーの効果について検討することとする。

2. 解析方法

最初に、き裂部に GFRP を貼付した鋼部材の応力拡大係数範囲を解析により求める。解析は 8 節点ソリッド要素を用いた弾性 FEM 解析である。実験に使用した試験片の対称性を考慮し、解析モデルは試験片の 1/8 モデルとした。解析モデルの一例として GFRP 貼付モデルを図-1 に示す。GFRP 及びプライマーの幅 W は、き裂長さに等しい 50mm とし、GFRP 及びプライマーの長さ L は、100mm とした。また、GFRP 及びプライマーの厚さは、それぞれ 0.3mm, 0.6mm とした。解析におけるき裂長さ $2a$ は実験結果を参考に 50mm から 78mm までとし、応力範囲 $\Delta \sigma$ は実験条件に従った。解析モデルにおける疲労き裂は、GFRP 及びプライマーを荷重方向に拘束し、鋼板は荷重方向に拘束しないことで表現することとした。解析ケースを表-1 に示す。表-1 の GN は無補強、GP はプライマーを一層塗布、GF は GFRP を二層貼付したモデルである。

3. 応力拡大係数の算出方法

次に、応力拡大係数 K_I の求め方について述べる。ここでは応力範囲 $\Delta \sigma = 110\text{MPa}$ 、き裂長さの半長 $a = 25.0\text{mm}$ の GF-1 を例に取り、説明する。図-2 に示すように、疲労き裂先端の着目範囲はき裂先端からき裂進展方向に 3mm (要素番号 U1～U6, M1～M6, L1～L6) とした。着目要素の大きさは $0.5 \times 1.5 \times 0.5 (W \times T \times L)$ mm である。FEM 解析の結果から得られた着目要素 U1 の要素中心の応力 σ_r は、535.4MPa であった。き裂先端から U1 の中心までの距離 r は $2.5 \times 10^{-4}\text{m}$ であるので、これらを応力拡大係数 K_I を求める次式に代入すると

$$K_I = \sigma_r \sqrt{(2 \pi r)} \quad (1)$$

ここに、 π : 円周率

$K_I = 21.22\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ が得られる。同様の方法で、U1～U6, M1～M6, L1～L6 について応力拡大係数 K_I を求めた。図-3 に GF-1 の着目要素全てに関する応力拡大係数 K_I とき裂先端からの距離 r の関係を示す。U1～U6, M1～M6, L1～L6 の回帰線は以下の通りである。

$$\text{U1} \sim \text{U6}: K_I = 349146r^2 + 244.03r + 20.858 \quad (2)$$

$$\text{M1} \sim \text{M6}: K_I = 80463r^2 + 809.85r + 23.319 \quad (3)$$

$$\text{L1} \sim \text{L6}: K_I = -39278r^2 + 1406.8r + 23.134 \quad (4)$$

以上より、GF-1 のき裂長さ 25.0mm の時の応力拡大係数 K_I は、式(2)～(4)の y 切片を平均した値 $K_I = 22.437\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ として求められる。

図-3 に示す回帰線の選定にあたっては、GN シリーズについて線形近似直線、多項式近似曲線（2 次から 5 次）の 5 種類について理論値との誤差を比較し、理論値との誤差が最も小さかった 2 次の多項式近似曲線を用いることとした。

図-4 に上記の方法で求めた $\Delta \sigma = 90\text{MPa}$ のときの GF-1 のき裂長さの半長 $a = 25 \sim 39\text{mm}$ に対する応力拡大係数 K_I を示す。図には回帰線も示した。回帰線は以下の通りである。

キーワード 応力拡大係数, き裂, 補強, き裂進展速度

連絡先 〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1 明星大学理工学部建築学科 TEL042-591-9645

$$K_I = 21156a^2 - 376.68a + 18.577$$

(5)

式(5)にき裂長さの半長 a を代入することにより、GF-1 における応力拡大係数 K_I が求められる。

同様の方法で、他の解析ケースについても応力拡大係数 K_I を求めた。本解析の妥当性を検討するため、理論値の知られている GN-1 について理論値と解析値を比較したところ、理論値と解析値は良く一致しており、全ての理論値と解析値の誤差を求め、それらを平均したところ誤差は 0.97% であった。

4. 実験結果への適用

解析で求めた応力拡大係数範囲 ΔK_I と実験で得られたき裂進展速度 da/dN を整理すると図-5 となる。き裂長さの半長 $a=32.6\text{mm}$ の時のき裂進展速度 da/dN を図-5 から求めると GN: $4.27 \times 10^{-6}\text{m/cycle}$, GP: $4.31 \times 10^{-6}\text{m/cycle}$, GF: $1.23 \times 10^{-6}\text{m/cycle}$ となり、き裂部に GFRP を貼付することによりき裂進展速度は無補強の場合及びプライマー塗布の場合の約 29% に低減されることが理解される。

5. まとめ

GFRP 貼付及びプライマー塗布により補強されたき裂を有する鋼部材の応力拡大係数範囲 ΔK_I を求め、実験結果を整理した。その結果、GFRP 貼付による補強はき裂進展速度を遅延させる効果があるが、プライマー塗布による補強はき裂進展速度を遅延させる効果がないことが分かった。

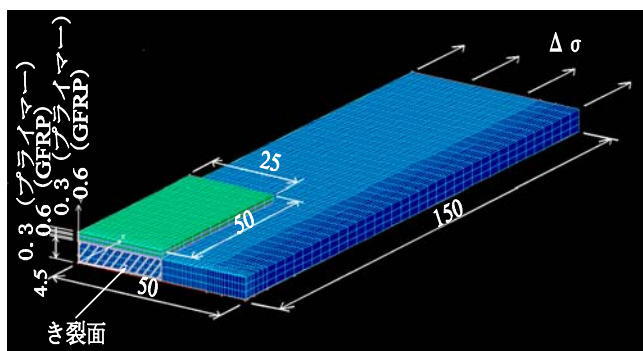


図-1 解析モデル (GFRP 貼付モデル)

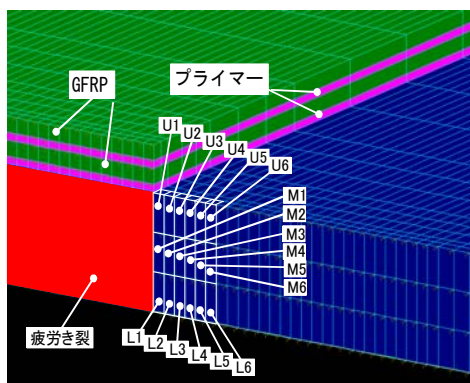


図-2 着目要素

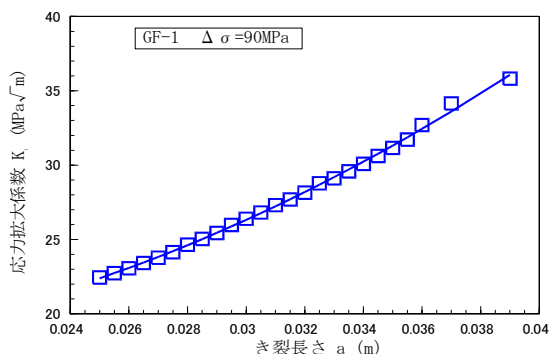


図-4 K_I と a の関係

表-1 解析ケース

	$\Delta \sigma$ (MPa)	W (mm)
GN-1	90	0.0
GN-2	100	0.0
GN-3	130	0.0
GP-1	110	50.0
GP-2	130	50.0
GP-3	130	50.0
GF-1	110	50.0
GF-2	110	50.0
GF-3	120	50.0

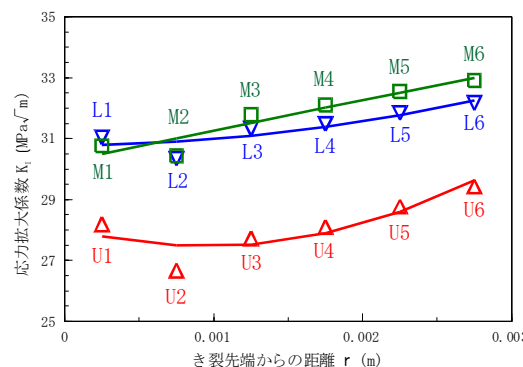


図-3 K_I と r の関係 (GF-1, $a=25\text{mm}$)

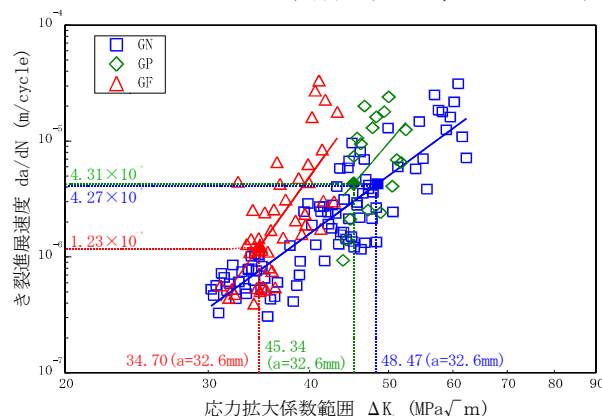


図-5 da/dN と ΔK_I の関係