

板曲げを受ける面外ガセット継手に生じるき裂への 当て板接着による応力拡大係数低減効果

京都大学大学院 正会員 ○松本 理佐, 河本 隆史, 服部 篤史, 河野 広隆
関西大学 正会員 石川 敏之

1. はじめに

疲労き裂の簡易な補修法の一つとして、鋼板や炭素繊維強化樹脂成型板(CFRP 板)をき裂に接着する補修が注目されており、試験施工が実施されている。当て板接着補修の実用化に向けて、様々な条件下での補修効果を定量的に把握することが不可欠である。ここで、疲労き裂の進展速度は応力拡大係数に依存するので、補修効果を評価するには、応力拡大係数を評価すればよいといえる。そこで本研究では、板曲げ荷重を受ける面外ガセット継手に当て板接着補修を施した場合の応力拡大係数を線形破壊力学に基づいて定式化し、補修効果の定量的評価を行う。

2. 当て板接着補修された溶接部材の応力拡大係数の推定

(1) 応力拡大係数の算出方法の概要

CFRP 板接着による応力拡大係数 K の低減要因の模式図を図-1に示す。CFRP 板が接着された鋼板に曲げモーメント M_0 が作用する(状態 0)と、一般部は CFRP 板と鋼板の合成断面とみなせるので、鋼板に曲げモーメント M_n と軸力 N_n が作用し、公称応力が低減する(状態 1)。一方、き裂直上では CFRP 板が鋼板の応力を負担するため、無補強の場合よりもき裂の開口が抑制される。この CFRP 板に伝達された応力 σ_{br} (架橋応力とする)がき裂を閉口する方向に作用する(状態 1)と仮定する。以上より、CFRP 板が接着された鋼板の $K^{(0)}$ は状態 2 の $K^{(2)}$ と状態 3 の $K^{(3)}$ の重ね合わせで計算できる。

$$K^{(0)} \cong K^{(1)} = K^{(2)} - K^{(3)} \quad (1) \quad K^{(2)} = (\sigma_t F_t F_{gweld-t} + \sigma_b F_b F_{gweld-b}) \quad (2) \quad K^{(3)} = (\sigma_{br-t} F_t F_{g-t} + \sigma_{br-b} F_b F_{g-b}) \sqrt{\pi b} \quad (3)$$

ここに、 b はき裂長さ、 σ_t , σ_b , σ_{br-t} , σ_{br-b} はそれぞれ引張および曲げの公称応力と架橋応力である。 F_t , F_b はそれぞれ引張および曲げを受ける場合のき裂形状の影響を表す補正係数、 $F_{gweld-t}$, $F_{gweld-b}$ はそれぞれ引張および曲げを受ける場合に溶接部による応力集中の影響を考慮する補正係数¹⁾、 F_{g-t} , F_{g-b} はそれぞれ引張および曲げを受ける場合に当て板接着範囲に架橋応力が作用することを表す補正係数である²⁾。

本研究では、半楕円き裂(図-2)を想定し、表面・深さ方向のき裂進展に対して応力拡大係数を導出する。

(2) 公称応力・架橋応力の算出

き裂を有する鋼板に当て板を接着し、曲げモーメントを与えた場合、各部材に曲げモーメントだけでなく軸力も生じる。合成断面に対して、健全部の当て板と母材に生じる軸力 N_{dp} , N_{db} 、健全部の母材に作用する曲げモーメント M_{hb} は、それぞれ次式で与える。

$$N_{hp} = -\frac{A_p a_{hp} E_p}{E_v I_{hv}} M_0 \quad (4)$$

$$N_{hp} = -N_{hb} \quad (5)$$

$$M_{hb} = \frac{E_b I_{hb}}{E_p I_p + E_b I_{hb}} \{M_0 + N_{hp} (a_{hp} + a_{hb})\} \quad (6)$$

ここに、 M_0 は作用曲げモーメント、 A_p は当て板の断面積、 E_b , E_p は母材と当て板の弾性係数、 $E_v I_{hv}$ は健全部の合成断面の曲げ剛性、 a_{dp} は健全部の合成断面の中立軸と当て板の中立軸の距離、 I_{hb} , I_p は健全部母材と当て板の断面二次モーメント、 a_{hb} は健全部の合成断面の中立軸と母材の中立軸の距離である。公称応力は、健全部母材の断面積を A_{hb} 、母材の板厚を t_b とおくと、 $\sigma_t = N_{hp} / A_{hb}$, $\sigma_b = M_{hb} / I_{hp} \cdot t_b / 2$ で算出される。

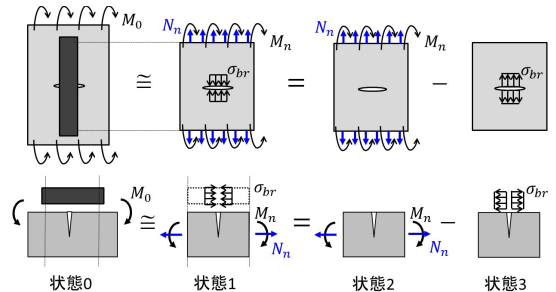


図-1 重ね合わせの原理

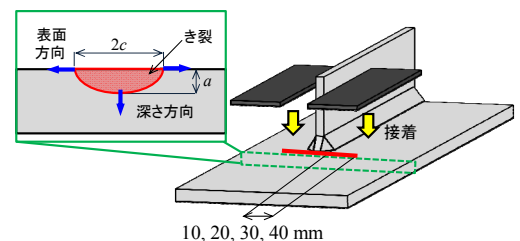


図-2 き裂形状・進展方向

キーワード 板曲げ荷重, 面外ガセット継手, CFRP 板, 応力拡大係数, 線形破壊力学

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-220 TEL 075-383-3321

同様の手順で、き裂部の当て板および母材の軸力 N_{dp} , N_{db} , 曲げモーメント M_{db} も算出される。

架橋応力 σ_{br} は、図-1 に示すように、当て板の板厚中央で作用する。したがって、母材には軸力 N_{br} と曲げモーメント M_{br} が作用する。

$$N_{br} = N_{dp} - N_{hp} \quad (7)$$

$$M_{br} = N_{br}(t_p/2 + h + t_b/2) \quad (8)$$

ここに、 t_p は当て板の板厚、 h は接着剤厚である。架橋応力は、当て板接着範囲の母材の断面積と断面二次モーメントをそれぞれ A_{hp} , I_{hb} とおくと、 $\sigma_{br-t} = N_{br}/A_{hp}$, $\sigma_{br-b} = M_{br}/I_{hb} \cdot t_b/2$ で算出される。

(3) 補正係数の算出

補正係数 F_t , F_b は Newman and Raju の解であり、 F_{weld-t} , F_{weld-b} は文献 1) を参考に、表面方向の応力拡大係数 K_t の算出時に用いる補正係数 F_{g-t} , F_{g-b} は、文献 1, 2) を参考に算出することができる。しかし、深さ方向の K_t の算出時に用いる補正係数 F_{g-t} , F_{g-b} の算出法は明らかでない。そこで、図-3 に示すように、当て板接着範囲に応力が作用したときの開口変位 u_1 とき裂全面に応力が作用したときの開口変位の u_2 比が、それぞれの状態の応力拡大係数 K_{D1} , K_{D2} の比と一致する ($u_1 : u_2 = K_{D1} : K_{D2}$) とし、次式によって深さ方向に対する補正係数 F_g を与えた。

$$F_g = \frac{u_1}{u_2} F_{g_{weld}} \quad (9) \quad u = \sum_{j=1}^N \{ SCF_j \sigma_j g(x_i, x_j) \} \quad (10)$$

ここに、 $g(x_i, x_j)$ はき裂が存在している区間を N 個の微小区間に分割し、位置 x_j に単位応力 σ_j が作用するときの位置 x_j のき裂開口変位を表す関数²⁾、 SCF_j は微小区間の各位置 x_j に対する板表面の応力集中係数である。

(4) 応力拡大係数の推定

溶接止端からのき裂の進展距離(図-2)と面外ガセット継手に CFRP 板を接着した場合の応力拡大係数 K_t の推定値の関係を図-4 に示す。図-4 には、無補修の場合の K の計算値と FEM 値、CFRP 接着時の K の FEM 値も示している。図-4(a)より、き裂表面方向では推定値と FEM 値の値が概ね一致している。図-4(b)では、深さ方向では推定値と解析値に誤差がみられるが、傾向は概ね一致している。

3. き裂進展解析

CFRP 板接着によるき裂進展遅延効果を明らかにするため、Paris 則を用いてき裂進展解析を行った。き裂進展解析結果を図-5 に示す。この図には面外ガセット継手を用いて、応力比 0, 公称応力範囲 80N/mm^2 で板曲げ疲労試験を行った結果も示している。図-5 より、CFRP 板を接着した試験体 $N_{10}+\text{CFRP}$ は、無補強の試験体 AW と比べてき裂の進展が遅延している。また、表面・深さ方向ともに、き裂進展解析による計算値が実験値とよく一致した。したがって、提案した応力拡大係数の推定式(式(1)~(3))によって、当て板接着によるき裂進展遅延効果を定量的に評価することができた。

4. 結論

本研究では、曲げモーメントを受ける溶接部に CFRP 板を接着した場合の応力拡大係数を、線形破壊力学に基づいて定式化した。提案した推定式を用いてき裂進展解析を実施した結果、CFRP 板を接着した場合のき裂進展遅延効果を定量的に評価することができた。

参考文献

- 1) P. Albrecht. and K. Yamada : Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Proc. of ASCE, Vol.103, No.ST2, pp.377-389, 1977.
- 2) 松本他：当て板接着補修されたき裂を有する鋼板の応力拡大係数，構造工学論文集，Vol.59A, pp798-807, 2013.

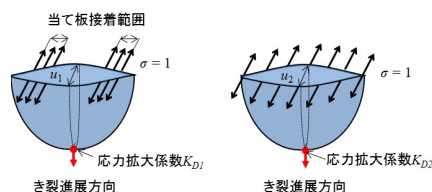
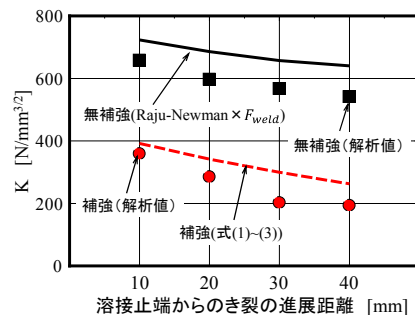
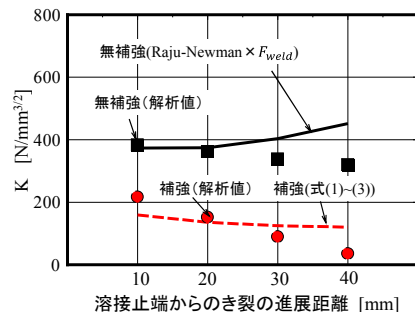


図-3 き裂の開口変位と応力拡大係数



(a) 表面方向



(b) 深さ方向

図-4 応力拡大係数とき裂形状の関係

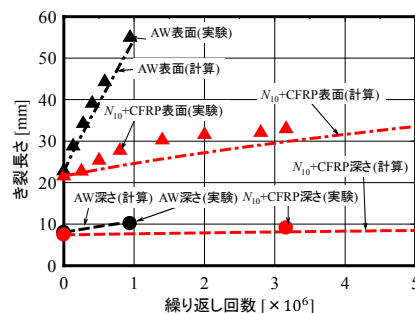


図-5 き裂長さとき裂進展回数の関係