

軸引張を受ける片面接着接合部材の理論解析

セントラルコンサルタント(株) 正会員 ○坂本 貴大
 関西大学 学生員 水谷 壮志, 正会員 石川 敏之

1. はじめに

損傷した鋼部材に対する当て板工法として、炭素繊維強化樹脂成形板(CFRP板)や鋼板を接着する工法が用いられ始めている。当て板接着工法は、ボルト孔等を設けなため、部材への応力集中やそれに伴う断面欠損が生じないといった利点がある。一方で、当て板端部における接着剤には、高いせん断応力と垂直応力が生じることが知られており、当て板端部から脆性的なはく離破壊が生じる場合がある。そのため、当て板端部からのはく離破壊に対して、事前に照査する必要がある。種々の断面力を受ける接着接合の接着剤に生じるせん断応力や垂直応力の理論的解法に関する研究が行われおり、その理論解析結果の妥当性が報告されている¹⁾。本研究では、これまでに理論解析が行われていない、軸力を受ける主板の片面に当て板が接着された条件に着目し、接着剤に生じる応力を導出することを目的とする。さらに、接着長さが長い場合に、接着剤に生じるせん断応力と垂直応力の収束式を導出する。

2. 片面接着接合の理論解析

2.1 接着剤に生じるせん断応力と垂直応力の理論解

片面接着接合の理論解析モデルを図1に示す。本研究では接着端部の主板に断面力を与え、接着区間では外力を作用させていない。主板が軸力を受ける条件としているため、当て板端の主板にはせん断力が生じない($Q=0$)。また、接着剤は主板および当て板と比べて剛性が低いため、断面力を受け持たないと仮定する。接着剤に生じるせん断応力 $\tau(x)$ および、垂直応力 $\sigma_y(x)$ は図1に示す微小区間の力のつり合いと、応力と変位の関係より次式で表される。

$$\tau(x) = -\frac{1}{b} \frac{dN_s(x)}{dx} = G_e \frac{u_p(x) - u_s(x)}{h} \quad (1) \quad \sigma_y(x) = -\frac{1}{b} \frac{dV_s(x)}{dx} = E_e \frac{v_p(x) - v_s(x)}{h} \quad (2)$$

ここに、 b は接着幅(当て板の幅)、 $u_s(x)$ 、 $u_p(x)$ は接着剤の主板側と当て板側の水平方向の変位、 $v_s(x)$ 、 $v_p(x)$ は接着剤の主板側と当て板側の変位、 E_e は接着剤の弾性係数、 G_e は接着剤のせん断弾性係数である。

式(1)、(2)から主板の軸力 $N_s(x)$ およびせん断力 $V_s(x)$ に関する2階および4階の微分方程式を導出することができ、それぞれの微分方程式の一般解は次式で与えられる。

$$N_s(x) = B_1 \sinh(\lambda x) + B_2 \cosh(\lambda x) + (1-K)(1/Z_2)P - (K/a)M \quad (3)$$

$$V_s(x) = \cosh(\omega x) \{C_1 \sin(\omega x) + C_2 \cos(\omega x)\} + \sinh(\omega x) \{C_3 \sin(\omega x) + C_4 \cos(\omega x)\} + (W_1/\lambda Z_1) dN_s(x)/dx \quad (4)$$

ここに、 $\lambda = \sqrt{(bG_e/h) \{a(a-h)/(E_s I_s Z_1 K)\}}$ 、 $K = 1/[1 + (Z_1 Z_2 r_s^2)/\{a(a-h)\}]$ 、 $Z_1 = 1 + I_p/(nI_s)$ 、 $Z_2 = 1 + nA_s/A_p$ 、 $r_s = \sqrt{I_s/A_s}$ 、 $n = E_s/E_p$ 、 $\omega = \sqrt[4]{\{bE_e/(4h)\} \{Z_1/(E_p I_p)\}}$ 、 $J = t_p/2 - (Z_1 - 1)t_s/2$ 、 $W_1 = 4\lambda J/(4 + \lambda^4/\omega^4)$

E_s 、 E_p は主板および当て板の弾性係数、 I_s 、 I_p は主板および当て板の断面二次モーメント、 b は接着幅、 h は接着剤厚さ、 t_s 、 t_p は主板および当て板の厚さ、 A_s 、 A_p は主板および当て板の断面積、 a は主板および当て板の図心間距離である。

未定係数 B_1 、 B_2 、 $C_1 \sim C_4$ は、図1に示す接着端部の断面力($B_{1,2}$ に対しては $N_s(0)=P$ 、 $N_s(l)=P$ 、 C_{1-4} に対しては $V_s(0)=0$ 、 $V_s(l)=0$ 、 $M_s(0)=M$ 、 $M_s(l)=M$)を境界条件として与えることにより、求められる。

軸力 $N_s(x)$ 、せん断力 $V_s(x)$ を式(1)、(2)にそれぞれ代入することにより、接着剤に生じるせん断応力 $\tau(x)$ 、垂直応力 $\sigma_y(x)$ が求められる。

2.2 理論解とFEM解析結果の比較

2.1節で導出した理論解と汎用の有限要素解析プログラムMARCを用いた解析結果を比較する。比較に用いるモデルの寸法と材料定数を表1に示す。FEM解析モデルでは、主板・当て板部材に直線梁要素、接着剤に四辺形平面応力要素を用いる。図2に理論解とFEM解析の結果を示す。軸引張力($M=0$)を受ける片面接着接合は接着中央に対して線対称な応力分

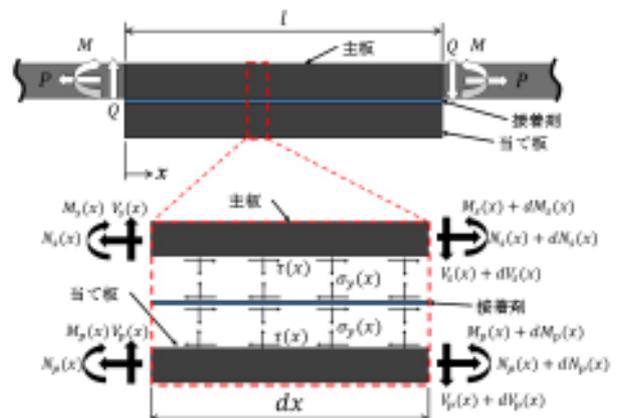


図1 片面接着接合の理論解析モデル

キーワード 片面接着接合, 理論解析, 収束値

連絡先 〒460-0003 名古屋市中区錦1丁目18番22号 TEL.052-223-0378

表1 解析モデルの寸法と材料定数

解析モデル	幅 [mm]	主板と当て板					接着剤			
		弾性係数 [kN/mm ²]	ポアソン比	主板厚 [mm]	当て板厚 [mm]	非接着長さ [mm]	弾性係数 [kN/mm ²]	ポアソン比	接着厚さ [mm]	接着長さ [mm]
	50	200	0.3	12.0	4.0	100	2.0	0.35	0.6	200

布となるため、接着中央から片側の応力分布を示している。縦軸は作用引張応力 σ_{sn} で、横軸は接着中央からの距離を接着半長さ($l/2$)で正規化している。導出した接着剤に生じるせん断応力および垂直応力は FEM 解析結果とよく一致していることがわかる。

3. 当て板端部のせん断応力と垂直応力の収束値

当て板の端部($x=0, l$)で、接着剤に生じるせん断応力と垂直応力が高くなり、 $x=0, l$ を代入してそれらの位置の接着剤に生じるせん断応力、垂直応力は次式で与えられる。

$$\tau(l) = -(\lambda/b)B_1 \quad (5)$$

$$\sigma_y(l) = -(\omega/b)(C_1 + C_4) - (W_1 \lambda/b)B_2 \quad (6)$$

接着長が十分長くなると、当て板端部のせん断応力と垂直応力がある値(τ_c, σ_{yc})に収束し、その際の未定係数は次式となる。

$$B_1 = -B_2 = -(1 - \frac{1}{Z_2} + \frac{K}{Z_2})P - \frac{K}{a}M \quad (7)$$

$$C_1 = -C_3 = \frac{W_1}{Z_1} \left\{ (1 - \frac{1}{Z_2} + \frac{K}{Z_2})P - \frac{K}{a}M - \frac{\lambda^3}{2\omega^3} \right\} - \frac{2\omega}{Z_1}M \quad (8)$$

$$C_2 = -C_4 = -\frac{W_1}{Z_1} \left\{ (1 - \frac{1}{Z_2} + \frac{K}{Z_2})P - \frac{K}{a}M \right\} \quad (9)$$

当て板端部の接着剤のせん断応力と垂直応力の収束値(τ_c, σ_{yc})と接着長 l との関係を図3に示す。縦軸は $x=l$ における理論値と収束値の比($\tau(l)/\tau_c, \sigma_y(l)/\sigma_{yc}$)を示している。

比較に用いるモデルの材料定数は表1と同様で、当て板厚(t)が2, 4, 6mmの場合で比較した。せん断応力が収束する接着長さは、垂直応力のそれと比べて長くなるが、接着長 l が100mm程度以上であれば理論値と収束値がほぼ一致することがわかる。

4. 接着剤のせん断応力と垂直応力を用いたエネルギー解放率

接着剤のはく離破壊の評価方法の一つとして、エネルギー解放率が用いられる。接着剤に微小なはく離が生じることにより変化するポテンシャルエネルギーの変化は、接着剤のひずみエネルギーの変化に等しい。はく離によるエネルギー解放率はモード別に次式で与えることができる。

$$G_I = K_I^2 / E_e = (h/2E_e) \sigma_{ycr}^2 \quad (10)$$

$$G_{II} = K_{II}^2 / E_e = (h/2G_e) \tau_{cr}^2 \quad (11)$$

ここに、 K_I, K_{II} はそれぞれモードI, IIの応力拡大係数である。式(8), (9)の α_{cr}, τ_{cr} は、当て板のはく離先端の接着剤に生じる応力であるため、本研究で導出した理論式の値を利用することができる。

5. 結論

- 1) 接着剤に生じる応力分布が理論解と FEM 解析結果でよく一致した。
- 2) 接着長 l が長い場合($l=100$ 以上)の収束式を与えた。

参考文献

- 1) 清水優, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆: 軸力を受ける当て板接着鋼板のはく離によるエネルギー解放率, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2, I_899-I_908, 2014.
- 2) 坂本貴大, 石川敏之: シングルラップ接着接合の理論解析とはく離によるエネルギー解放率, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.72, No.2, I_653-I_662, 2016.

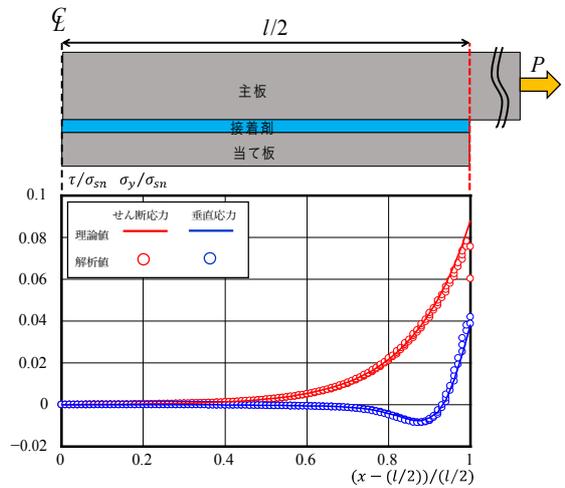


図2 理論解と FEM 解析結果の比較

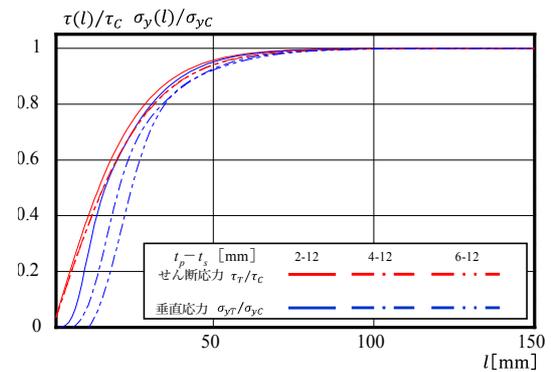


図3 $\tau(l)$ および $\sigma_y(l)$ と接着長 l との関係