幾何学的非線形を考慮したシングルラップ接着 接合継手のはく離強度評価

谷口 賢斗¹・石川 敏之²・堀井 久一³

¹ 日本構造橋梁研究所 (前関西大学) (〒532-0004 大阪府大阪市淀川区西宮原 1-4-13)

E-mail: k-taniguchi@jbsi.co.jp

² 正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: t-ishi@kansai-u.ac.jp

³ 正会員 コニシ 土木建設営業本部 (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町2-3)

E-mail: horii-hisakazu@bond.co.jp

損傷した鋼構造物の当て板接着補修が適用され始めているが、一方で、脆性的なはく離破壊が懸念されている。一般に接着剤の品質管理として、1.6mmの薄い鋼板を用いて、接着によるラップ長が12.5mmのシングルラップ接着接合の引張せん断強さ試験が行われ、平均せん断応力(引張せん断接着強さ)が利用されている。しかし、この試験では幾何学的非線形状態となること、平均せん断応力では、はく離破壊が適切に評価できないなどの課題がある。そこで、本研究では、幾何学的非線形を考慮したシングルラップ接着接合継手の接着端部に生じるせん断応力と垂直応力を数値解析により算出し、はく離破壊時のそれらの値が、これまでに提案されているはく離に対する破壊基準に適用できる可能性があることを示した。

Key Words: single lap joint, eigenvalue analysis, geometric nonlinear, debonding

1. はじめに

損傷した鋼部材への補修の方法として、炭素繊維や鋼板を用いた当て板接着補修が適用され始めている¹⁾。一般的な当て板を高力ボルト接合するような機械式接合では、ボルト孔を設けることにより断面欠損が生じるため引張部材に対しては断面欠損を設計で考慮する必要がある、また大掛かりな施工になる。一方、接着接合は、施工が容易になり、施工時間の短縮が可能であることが報告されている¹⁾。しかし、当て板端部の接着剤に生じる応力集中により、当て板が脆性的にはく離する場合があるため、当て板接着補修の設計では、当て板のはく離を生じさせないように、はく離破壊に対する照査が必要とされる²⁾。

他方、接着剤の品質管理には、一般的にシングルラップ接着接合の引張試験結果が用いられている。JISで定められた引張せん断接着強さ試験(JIS K6850³⁾)では、板幅25mm、板厚1.6mmの2枚の鋼板が、接着ラップ長12.5mmとなるシングルラップ接着接合試験片を用い、一軸引張試験によりシングルラップ接着接合のはく離したときの荷重を接着面積で除した平均せん断応力(引張

せん断接着強さ)が指標として用いられている。しかし、一軸引張のシングルラップ接着接合試験では、鋼板に軸力だけでなく、曲げモーメントやせん断力も生じるため、それらも影響してはく離が生じる。一方、実構造部材の接着接合では、軸力だけでなく曲げモーメントやせん断力が作用するため、接着剤に生じる応力に対してもそれらを考慮した値を用いてはく離破壊に対する照査を行う必要があり、引張せん断接着強さを実構造物の当て板のはく離破壊の照査指標に適用できない²⁾。

既往の研究⁴⁾では、シングルラップ接着の接着部を対象として、接着部の部材に生じる軸力に関する2階の微分方程式とせん断に関する4階の微分方程式を解くことにより、近似的に接着部に生じる応力を与えている。この方法では、シングルラップ端部の断面力を与えることで、接着剤に生じるせん断応力と垂直応力の分布が算出できる。しかし、微分方程式を2つに分けて解を簡易に導出するために、上下部材の曲率が等しいという条件を設けており、実際の接着の端部の近傍で上下部材の曲率が異なっている状態が考慮できておらず、上下部材の板厚が異なる場合に、近似解とFEM解析解に違いが生じることが明らかにされている⁴⁾。さらに、シングルラッ

ブ接着接合試験では、試験体の定着部の支持条件によっても部材の断面力や接着剤に生じる応力の値が変化すること、板厚 1.6mm のような薄い鋼板が使用されると、幾何学的非線形の影響があることも明らかにされている⁹⁾。このような理由から引張せん断接着強さ試験の結果を、実構造物のはく離評価に用いることは困難となっているのが現状である。

本研究では、まず、文献4)で与えられる近似解と比べて高精度な解が得られる固有値解析^{6)~8)}を利用してシングルラップ接着接合の接着剤に生じる応力を導出する。そして、接着剤に生じる応力の導出に必要なシングルラップ接着接合端部の断面力を、幾何学的非線形を考慮した骨組構造解析によって与える。さらに、幾何学的非線形を考慮した骨組解析と固有値解析によって計算した接着端部の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力を用い、はく離破壊の評価を検討する。

2. 固有値解析によるシングルラップ接着接合の接着剤に生じる応力の導出

シングルラップ接着接合部の微小区間の力のつり合いを図-1に示す。接着剤は上下部材に比べヤング係数が小さく、接着厚さが非常に薄いため伸び剛性、曲げ剛性が非常に小さくなることから軸力と曲げモーメントを受け持たないと仮定し、図-1のせん断応力および垂直応力のみが作用すると仮定している。接着部の微小区間での上部材あるいは下部材の力のつりあいより次式を得る。

$$\frac{dN_u(x)}{dx} = -b_e \tau(x) \quad (1)$$

$$\frac{dV_u(x)}{dx} = -b_e \sigma(x) \quad (2)$$

$$\frac{dM_u(x)}{dx} = V_u(x) - b_e d_u \tau(x) \quad (3)$$

$$\frac{dN_l(x)}{dx} = b_e \tau(x) \quad (4)$$

$$\frac{dV_l(x)}{dx} = b_e \sigma(x) \quad (5)$$

$$\frac{dM_l(x)}{dx} = V_l(x) - b_e d_l \tau(x) \quad (6)$$

ここに、

- b_e : 接着幅(上下部材幅)
- d_u, d_l : それぞれ上下部材の図心から下面あるいは上面までの距離
- $N_u(x), N_l(x)$: それぞれ上下部材に生じる軸力
- $V_u(x), V_l(x)$: それぞれ上下部材に生じるせん断力
- $M_u(x), M_l(x)$: それぞれ上下部材に生じる曲げモーメント

図-1 シングルラップ接着接合部の微小区間の力のつり合い

ーメント

x : 上部材の接着端からの距離(図-1)

上下部材の水平変位と垂直変位を用いて、接着剤のせん断応力と垂直応力をそれぞれ次式で仮定する。

$$\tau(x) = \frac{G_e}{h} \{u_l(x) - u_u(x)\} \quad (7)$$

$$\sigma(x) = \frac{E_e}{h} \{v_l(x) - v_u(x)\} \quad (8)$$

ここで、

- h : 接着厚さ
- $u_u(x), u_l(x)$: それぞれ上下部材の接着面の水平変位
- $v_u(x), v_l(x)$: それぞれ上下部材の接着面の垂直変位
- E_e : 接着剤の弾性係数
- G_e : 接着剤のせん断弾性係数

上下部材それぞれの水平変位を x について 1 階微分することで、上部材下面および下部材上面のひずみがそれぞれ次式で与えられる。

$$\varepsilon_u(x) = \frac{du_u(x)}{dx} = \frac{N_u(x)}{E_u A_u} + \frac{M_u(x)}{E_u I_u} d_u \quad (9)$$

$$\varepsilon_l(x) = \frac{du_l(x)}{dx} = \frac{N_l(x)}{E_l A_l} + \frac{M_l(x)}{E_l I_l} d_l \quad (10)$$

ここに、

- A_u, A_l : それぞれ上下部材の断面積
 - I_u, I_l : それぞれ上下部材の断面 2 次モーメント
 - E_u, E_l : それぞれ上下部材の弾性係数
- 上下部材それぞれに対して曲げモーメントと曲率の関係より次式を得る。

$$\frac{d^2 v_u(x)}{dx^2} = -\frac{M_u(x)}{E_u I_u} \quad (11)$$

$$\frac{d^2 v_l(x)}{dx^2} = -\frac{M_l(x)}{E_l I_l} \quad (12)$$

式(7), (8)をそれぞれ x について 1 階微分, 2 階微分し、

式(9)~(12)を代入して整理すると次式を得る。

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_e}{h} \left[\left\{ \frac{N_l(x)}{E_l A_l} - \frac{M_l(x)}{E_l I_l} d_l \right\} - \left\{ \frac{N_u(x)}{E_u A_u} + \frac{M_u(x)}{E_u I_u} d_u \right\} \right] \quad (13)$$

$$\frac{d^2\sigma(x)}{dx^2} = \frac{E_e}{h} \left\{ \frac{M_u(x)}{E_u I_u} - \frac{M_l(x)}{E_l I_l} \right\} \quad (14)$$

式(1)~(6)および式(13), (14)から, 上部材(あるいは下部材)に作用するせん断力に対する 6 階の微分方程式が導出されるが, 文献 4)では, 式(11)と(12)の上下部材の曲率が等しいと仮定して, 解を容易に導出できるように上部材の軸力に関する 2階の微分方程式と上部材のせん断力に関する 4階の微分方程式に分けて, 近似解を与えている。

式(14)の微分階数を 1 階とする次の変数を導入する。

$$\sigma'(x) = \frac{d\sigma(x)}{dx} \quad (15)$$

式(15)を式(14)に代入し次式を得る。

$$\frac{d\sigma'(x)}{dx} = \frac{E_e}{h} \left\{ \frac{M_u(x)}{E_u I_u} - \frac{M_l(x)}{E_l I_l} \right\} \quad (16)$$

式(1)~(6), (13), (15), (16)をまとめて行列形式とすると次式になる。

$$\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}(x)}{dx} = \mathbf{A} \boldsymbol{\varepsilon}(x) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{au} & \mathbf{A}_0 & \mathbf{A}_{bu} \\ \mathbf{A}_0 & \mathbf{A}_{al} & \mathbf{A}_{bl} \\ \mathbf{A}_{cu} & \mathbf{A}_{cl} & \mathbf{A}_1 \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}(x) \quad (17)$$

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{O}_{3 \times 3} \quad \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{au} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_u A_u}{E_u I_u} d_u & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_{al} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_l A_l}{E_l I_l} d_l & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{bu} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{G_e b_e}{E_u A_u} & 0 \\ -\frac{E_e b_e}{G_u A_u} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{G_e b_e}{E_u A_u} d_u (d_u + h/2) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{bl} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{G_e b_e}{E_l A_l} & 0 \\ \frac{E_e b_e}{G_l A_l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{G_e b_e}{E_l A_l} d_l (d_l + h/2) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{cu} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{h} & 0 & -\frac{d_u + h/2}{h d_u} \\ 0 & 0 & 1/(h d_u) \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_{cl} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{h} & 0 & -\frac{d_l + h/2}{h d_l} \\ 0 & 0 & -1/(h d_l) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(x) = \begin{bmatrix} \frac{N_u(x)}{E_u A_u} & \frac{V_u(x)}{G_l A'_u} & \frac{M_u(x) d_u}{E_u I_u} & \frac{N_l(x)}{E_l A_l} & \frac{V_l(x)}{G_l A'_l} & \frac{M_l(x) d_l}{E_l I_l} \\ \frac{\sigma(x)}{E_e} & \frac{\tau(x)}{G_e} & \frac{\sigma'(x)}{E_e} \end{bmatrix}^T$$

ここに,

A'_u, A'_l : それぞれ上下部材のせん断に対する有効断面積(本研究では $A'_u = A_u, A'_l = A_l$ として計算する)

文献 8)では, 鋼部材に対し接着厚さが非常に薄いため接着厚さを無視しているが, 本研究では板厚が薄く上下部材の図心間の距離が接着剤の厚さの影響を受けるため, 式(17)において接着厚さが考慮された式となっている。

式(17)の一般解は, 次式で与えられる^{9~8)}。

$$\boldsymbol{\varepsilon}(x) = \mathbf{Y}(x) \mathbf{C} \quad (18)$$

$$\mathbf{Y}(x) = \mathbf{T} \mathbf{e}^{\mathbf{A}(x)x} \mathbf{T}^{-1} \quad \mathbf{C} = \{C_1 \quad \cdots \quad C_j\}^T$$

$$\mathbf{e}^{\mathbf{A}(x)} = \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 x} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & e^{\lambda_j x} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = [\mathbf{v}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{v}_j]$$

ここに,

λ_j : 行列 $\mathbf{A}$ の j 番目の固有値

$\mathbf{v}_j$: j 番目の固有値に対する固有ベクトル

j : 1から9までの整数。

未定係数ベクトル $\mathbf{C}$ は, 境界条件(図-1の断面力)をひずみへ変換した外力ベクトル $\boldsymbol{\zeta}_0$ を与えて次式で与えられる。

$$\mathbf{C} = \mathbf{B}^{-1} \boldsymbol{\zeta}_0 \quad (19)$$

ここに,

$$\boldsymbol{\zeta}_0 = \left(\frac{P}{E_u A_u} \quad \frac{Q}{G_u A'_u} \quad \frac{M_2 d_u}{E_u I_u} \quad 0 \quad 0 \quad \frac{P}{E_l A_l} \quad \frac{Q}{G_l A'_l} \quad \frac{M_1 d_l}{E_l I_l} \right)^T \quad (20)$$

$\mathbf{B}$: 係数行列

係数行列 $\mathbf{B}$ は, 式(18)のひずみ成分に対して, 境界条件を与えて得られる行列 $\mathbf{Y}(x)$ の行ベクトル成分で構成される行列である。本研究では, シングルラップ接着接合の断面力を境界条件として与え, 1~5行目は, $x=l$ の境界条件(上部材の軸方向ひずみ, 上部材のせん断ひずみ, 上部材の曲げひずみ, 下部材の軸ひずみ, 下部材の曲げひずみ), 6~9行目は, $x=0$ の境界条件(上部材の軸方向ひずみ, 下部材の軸方向ひずみ, 下部材のせん断ひずみ, 下部材の曲げひずみ)となる外力ベクトル $\boldsymbol{\zeta}_0$ に対応した係数行列 $\mathbf{B}$ を与えた。

なお, 連立微分方程式の固有値解析解が, 6 階の微分方程式の解と一致することは, 文献 7)で明らかにされて

いる。

本研究では、固有値解析による解法に、数値解析プログラム **scilab** を用いた。

3. 幾何学的非線形を考慮した骨組解析

本研究では、第2章のシングルラップ接着接合の接着剤に生じる応力の導出に必要な接着端部の断面力を、幾何学的非線形を考慮した骨組解析(固有値解析と同様に数値解析プログラム **scilab** を利用)により算出する。せん断変形を考慮した剛性マトリクス **D** および幾何剛性マトリクス **D_g** は次式を用いた。

$$\mathbf{D} = \frac{E}{\Delta_0} \begin{bmatrix} \frac{A\Delta_0}{L} & 0 & 0 & -\frac{A\Delta_0}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12I}{L^3} & \frac{6I}{L^2} & 0 & -\frac{12I}{L^3} & \frac{6I}{L^2} \\ 0 & \frac{6I}{L^2} & \frac{(4+12\alpha_T)I}{L} & 0 & -\frac{6I}{L^2} & \frac{(2-12\alpha_T)I}{L} \\ -\frac{A\Delta_0}{L} & 0 & 0 & \frac{A\Delta_0}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12I}{L^3} & -\frac{6I}{L^2} & 0 & \frac{12I}{L^3} & -\frac{6I}{L^2} \\ 0 & \frac{6I}{L^2} & \frac{(2-12\alpha_T)I}{L} & 0 & -\frac{6I}{L^2} & \frac{(4+12\alpha_T)I}{L} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{D}_g = \frac{N}{\Delta_0^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6\Delta_1}{5L} & \frac{1}{10} & 0 & -\frac{6\Delta_1}{5L} & \frac{1}{10} \\ 0 & \frac{1}{10} & \frac{(2+\Delta_2)L}{15} & 0 & -\frac{1}{10} & -\frac{(1+\Delta_2)L}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6\Delta_1}{5L} & -\frac{1}{10} & 0 & \frac{6\Delta_1}{5L} & -\frac{1}{10} \\ 0 & \frac{1}{10} & -\frac{(1+\Delta_2)L}{30} & 0 & -\frac{1}{10} & \frac{(2+\Delta_2)L}{15} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\Delta_0 = 1 + 12\alpha_T \quad \Delta_1 = 1 + 20\alpha_T + 120\alpha_T^2 \quad \Delta_2 = 2\alpha_T + 12\alpha_T^2$$

$$\alpha_T = \frac{E}{G\lambda^2} \quad \lambda^2 = \frac{L^2}{I/(K_T A)}$$

ここに、

L, A, I, G : 各部材の長さ、断面積、断面 2 次モーメントおよびせん断弾性係数

K_T : 部材断面の形状から求まる形状係数(本研究では 1 としている)

幾何学的非線形の繰り返し計算には **Updated Lagrange** 法を用い、次式の ξ の値で収束判定を行った。

$$\xi = \frac{|R_{\max}|}{|F|} \quad (23)$$

ここで

R, F : それぞれ残差力と分割荷重

本研究では ξ の値が 0.005 以下となるまで繰り返し計算を行った。

骨組解析の試験体全体を 1 本の折れ梁とした解析モデルを図-2 に示す。非接着部の上下部材は部材図心を通

図-2 骨組解析モデル

図-3 接着剤のせん断変形モデル

る梁とし、接着部は上下部材が完全合成(E_a, I_a, A_a)された図心を通る梁とする。上下部材と接着部をつなぐ部材は剛体として剛結させるのが一般的であるが、接着剤のせん断変形を考慮するために、上下部材と接着部をつなぐ部材の伸び剛性および曲げ剛性を大きくし、せん断剛性を小さくする必要がある。

本研究では、図-3(a)の変形を図-3(b)の変形に置換することを考える。上下部材と接着部をつなぐ部材のせん断変形 d_{yl}, d_{yr} はそれぞれ次式で与えられる。

$$d_{yl} = \frac{P}{GA'} \left(d_u + \frac{h}{2} \right) \quad (24)$$

$$d_{yr} = \frac{P}{GA'} \left(d_l + \frac{h}{2} \right) \quad (25)$$

ここに、

A' : 上下部材と接着部をつなぐ部材の断面積
接着部の平均せん断変形 d_{ye} は次式で与えられる。

$$d_{ye} = \frac{P}{G_e b_e l} h \quad (26)$$

上下部材と接着部をつなぐ部材のせん断変形で接着剤のせん断変形を模擬するために、 $d_{yl} + d_{yr} = d_{ye}$ となるようなせん断弾性係数 G を次式で与える。

$$G = G_e \frac{b_e l}{A'} \cdot \frac{d_l + d_u + h/2}{h} \quad (27)$$

ただし、上下部材と接着部をつなぐ部材の断面積 A' は任意に与え、断面 2 次モーメントを大きく設定する必要がある。

図-4 にせん断変形を考慮した場合の部材端に生じるモーメント M_1 (図-1) と接着剤のせん断変形に影響を与えるパラメータ h/G_e との関係を示す。図では、 $b_e = 25\text{mm}$, $l = 125\text{mm}$, $d_t = d_u = 1.6\text{mm}$ としている。縦軸は、せん断変形時に生じるモーメント M_1 をせん断変形のない剛な状態のモーメント M'_1 で除した値を示している。接着剤が厚い場合や、接着剤のせん断弾性係数が小さい場合、接着剤端部の曲げモーメントが低下することがわかる。

図-4 せん断変形の影響

4. 幾何学的非線形を考慮したシングルラップ接着接合部に生じる応力

幾何学的非線形を考慮した骨組解析により接着端部に生じる断面力を導出し、固有値解析の境界条件として与えた場合の接着剤に生じる応力の算出を行う。表-1に解析に用いた部材の寸法を示す。上下部材ともに、接着長さは12.5mm、非接着長さは50mmとした。図-5に上下部材の板厚を1.6mmとした場合、図-6に、上部材の板厚を1.6mm、下部材の板厚を4.5mmとした場合の接着

表-1 部材寸法と材料定数

		幅×厚 (mm)	弾性係数 (kN/mm²)	ポアソン比
1	上部材	25×1.6	200	0.3
	下部材	25×1.6	200	0.3
	接着剤	25×0.6	2	0.35
2	上部材	25×1.6	200	0.3
	下部材	25×4.5	200	0.3
	接着剤	25×0.6	2	0.35

(a) せん断応力

(b) 垂直応力

図-5 同板厚の場合の接着剤に生じる応力

(a) せん断応力

(b) 垂直応力

図-6 板厚が異なる場合の接着剤に生じる応力

剤に生じる応力を示す。同図では幾何学的非線形を考慮した固有値解析による解を「固有値解析解」、FEM解析による解を「FEM解析解」、既往の研究⁴⁾の近似式による解を「近似解」として示している。せん断応力図には引張荷重を接着面積で除した平均せん断応力も示している。FEM解析は汎用有限要素解析ソフトMARCを用いて、線形有限変位解析を行った結果である。図-7にFEM解析モデルを示す。解析モデルの板幅が狭いので、FEM解析のモデル化では文献4)と同様にして接着剤に平面応力要素、上下部材に直線梁要素を用いた。直線梁要素は平面応力要素と節点を共有しているが、Beam offset機能により図心位置を上下部材それぞれの図心位置と一致させている。接着剤のサイズは0.1×0.1mmであり、直線梁要素の長さを0.1mmとして接着剤と接点を共有している。支点条件は単純支持として、上部材の端部に集中荷重を与えた。

図-5、6の縦軸は上部材の接着端部に作用する軸応力 σ_{xt} 、横軸は接着長さ l で除して無次元化している。上下部材の板厚が同じ場合(図-5)、文献4)の近似解、固有値解析解、FEM解析解の応力分布は同様であった。ただし、FEM解析では、接着端部近傍でせん断応力が最大となり接着端部ではせん断応力が急激に小さくなることが知られており⁹⁾、本解析でも同様な傾向が見られた。

一方、上下の板厚が異なる場合、図-6に示すように文献4)の近似解の応力分布はFEM解析解と異なった。しかし、固有値解析解、FEM解析解はせん断応力、垂直応力ともに大きな差は見られなかった。したがって、本研究の幾何学的非線形を考慮して与えた断面力を用いた固有値解析によって、シングルラップ接着接合の接着部に生じる応力の算出ができると考える。

5. シングルラップ接着接合の引張試験

最大荷重50kNのオートグラフを用いてシングルラップ接着接合の引張試験を行った。接着剤の材料特性を表-2に示す。鋼板の鋼種はSS400(1.6mm： $\sigma_T = 304\text{N/mm}^2$ 、4.5mm： $\sigma_T = 307\text{N/mm}^2$)を用いた。接着長さは12.5mm、非接着長さは50mmである。試験体の寸法や接着厚さを表

図-7 FEM解析モデル

表-2 接着剤の材料特性

主剤	エポキシ樹脂
可使時間	60分以上
弾性係数(kN/mm ²)	6.50
せん断弾性係数(kN/mm ²)	2.39

図-8 ひずみゲージ位置

図-9 骨組解析モデル

-3に示す。ひずみゲージの位置を図-8に示す。ゲージは部材幅中央に貼付した。試験体の定着部にはJIS試験と同様に上下部材と同厚の鋼板をあて、接着部の図心と引張荷重の図心位置が合致するようにした。荷重試験で得られた最大荷重を表-3に示す。最大荷重は、はく離が生じた時の引張荷重である。

試験結果と幾何学的非線形を考慮した骨組解析の値との比較を行う。骨組解析のモデルを図-9に示す。骨組解析では、実験の際と同様になる様に上下部材の定着部が荷重治具で固定されていることを模擬し、その要素の剛性を高くした。また、支点条件は、実際の荷重条件と合わせて、荷重治具の片端を固定、片端をピン・ローラーとした。各試験体の接着端から10mmの位置での荷重とひずみの関係を図-10に示す。試験体AC1.6-1、2で、

表-3 試験体寸法および試験結果

試験体	上下部材厚さ (mm)	部材幅 (mm)	接着厚さ (mm)	最大荷重 (kN)
AC1.6	1.6	25	0.34	4.78
			0.31	5.31
AC4.5	4.5	25	0.33	7.80
AC4.5-1.6	上 1.6, 下 4.5	25	0.34	6.77

最大荷重以外は大きな違いが見られなかったためAC1.6-1を図-10(a)に示している。この図から、全ての試験体において幾何学的非線形を考慮した解析値は実験値と良く一致していることがわかる。試験体AC1.6-1に対して、荷重が2kNの際の応力分布を図-11に示す。この図からも幾何学的非線形を考慮した解析結果と実験値が良く一致していることがわかる。

6. はく離強度評価

本章では、第4章と同様な方法で接着剤に生じる応力を算出し、第5章の載荷試験結果のはく離評価を行う。接着接合部のはく離の評価として、海外の鋼部材のFRP接着補修・補強ガイドラインでも採用されている主応力を用いた評価およびエネルギー解放率を用いた評価²⁾の両者を用いる。

接着端の接着剤の主応力 σ_p は次式により与えられる。

$$\sigma_p = \frac{\sigma_e}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_e}{2}\right)^2 + \tau_e^2} \quad (28)$$

ここで、

σ_e : 接着端部の接着剤に作用する垂直応力

τ_e : 接着端部の接着剤に作用するせん断応力

エネルギー解放率は接着剤に生じるポテンシャルエネルギーの変化より与えられる^{10) 11)}。接着剤の垂直方向のひずみエネルギーを δU_I 、せん断ひずみエネルギーを δU_{II} とし、微小はく離 δ_{cr} が進展するときモード別のエネルギー解放率 G_I 、 G_{II} は次式で与えられる。

$$G_I = \lim_{\delta_{cr} \rightarrow 0} \frac{\delta U_I}{b \delta_{cr}} = \begin{cases} \frac{h}{2E_e} \sigma_e^2 & (\sigma_{cr} \geq 0) \\ 0 & (\sigma_{cr} \leq 0) \end{cases} \quad (29)$$

$$G_{II} = \lim_{\delta_{cr} \rightarrow 0} \frac{\delta U_{II}}{b \delta_{cr}} = \frac{h}{2G_e} \tau_e^2 \quad (30)$$

ここで、

G_I は接着剤に生じる垂直応力が圧縮方向に作用し、はく離が閉口する場合 0 となる。また、接着剤の全エネルギー解放率 G_T はモード別のエネルギー解放率の和として次式で与えられる。

$$G_T = G_I + G_{II} \quad (31)$$

接着剤の主応力およびエネルギー解放率の算出の際の接着端部の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力を、試験結果の最大荷重を用いて第4章で示した方法と同様にして算出した。板厚が異なるシングルラップ接着接合では、接着の両端に生じるせん断応力と垂直応力の値がそれぞれ異なるため、主応力あるいはエネルギー解放率が大きくなる値を用いる。

(a) AC1.6-1

(b) AC4.5

(c) AC4.5-1.6

図-10 接着端から 10mm での荷重とひずみの関係

図-11 試験片 AC1.6-1(P=2kN)に生じる応力分布

表-4 各試験体のはく離指標

試験体		引張せん断 接着強さ (N/mm ²)	τ_e (N/mm ²)	σ_e (N/mm ²)	σ_p (N/mm ²)	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	G_T (N/mm)	G (N/mm)
AC1.6	1	15.29	38.63	45.18	67.34	0.0534	0.1054	0.1588	0.1418
	2	17.00	44.08	51.66	76.92	0.0636	0.1251	0.1887	0.1686
AC4.5		24.96	44.18	55.72	80.09	0.0788	0.1338	0.2126	0.1845
AC4.5-1.6		21.66	40.30	35.89	62.06	0.0337	0.1147	0.1484	0.1537

他方、エネルギー解放率 G は試験片全体のひずみエネルギーの変化からも算出でき、次式で与えられる 4)。

$$G = \frac{1}{2bE_u} \left\{ \left(\frac{M_{cr}^2}{I_u} - \frac{M_{cr}'^2}{I_v} \right) + \left(\frac{1}{A_u} - \frac{1}{A_v} \right) P^2 \right\} \quad (32)$$

ここに、

M_{cr} : はく離先端に作用する曲げモーメント

M_{cr}' : はく離先端に作用する曲げモーメント
(合成断面部)

A_v : 接着部の合成断面の断面積

式(32)を用いたエネルギー解放率 G の算出では、載荷試験の最大荷重を P 、最大荷重時の曲げモーメントを、第3章の幾何学的非線形を考慮して算出した。

表-4 に、はく離荷重と幾何学的非線形を考慮した解析結果から得られた各はく離指標の値を示す。引張せん断接着強さは、JIS K6850⁹⁾で定められているはく離荷重を接着面積で除した値である。

式(32)から断面力を用いて算出したエネルギー解放率 G は、式(31)で接着端部の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力を用いて算出したエネルギー解放率 G_T の値と1割程度の違いであった。したがって、幾何学的非線形を考慮した断面力を用いて式(32)からエネルギー解放率 G_T を推定できる可能性があると言える。

表-4 からわかるように、引張せん断接着強さは板厚により値が異なっている。AC1.6 の引張せん断接着強さの平均値を1とすると、AC4.5 は1.52、AC4.5-1.6 は1.34となった。一方、当て板のはく離時の接着端部の接着剤に生じる主応力の値は、AC1.6 の平均値を1とすると、AC4.5 で1.11、AC4.5-1.6 で0.86であり、引張せん断接着強さの場合と比べて、板厚の違いによる差が小さくなっている。エネルギー解放率 G_T も、AC1.6 の平均値を1とすると、AC4.5 で1.22、AC4.5-1.6 で0.85であるので、引張せん断接着強さの場合と比べて、板厚による差が小さくなっている。このように、引張せん断接着強さ試験に用いられる寸法であっても、接着端部の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力を用いて算出した主応力あるいはエネルギー解放率は、板厚などの差によらない指標となっている可能性がある。

図-12 はく離時の接着剤の垂直応力とせん断応力の関係

文献 4)の近似解から算出した AC4.5-1.6 の主応力 σ_p とエネルギー解放率 G_T は、それぞれ 52.16 N/mm²、0.1072 N/mm となり、固有値解析解と比べて、それぞれ 0.72、0.84 倍であった。したがって、シングラップ接着接合で、上下部材の板厚の差がある場合、近似解を用いると2、3割程の差が出る可能性がある。

本研究と同じ接着剤を用いて、文献 5)ではシングラップ接着接合継手での引張試験および曲げ試験、文献 10)ではダブルラップ接着接合継手(当て板端はく離)での引張試験、文献 11)では片持ち状態の当て板接着鋼板の曲げ試験が実施されているので、それらの結果と引張せん断接着強さ試験で得られた結果を比較する。文献 5)の試験体寸法は、板幅 50 mm×板厚 4.5、12 mm であり、接着長さは 50mm である。文献 10)の試験体寸法は、主板幅 50 mm×板厚 12mm、当て板幅 25～50mm×板厚 4.5～12mm、接着半長さが 125、150mm である。文献 11)の試験体の寸法は主板幅 90×板厚 12mm、当て板幅 25～90mm×板厚 4.5～12mm、接着長さは 250mm であり、全て本研究の試験体の鋼板の寸法より大きく、接着長さも長い。

図-12 に、はく離時の接着剤の垂直応力とせん断応力の関係を示す。図中に示す曲線は、全試験体に対して式(28)で算出したはく離破壊時の主応力 σ_p を平均して与えた破壊基準線である。したがって、試験結果は主応力 σ_p に対する破壊基準線を中心にばらつくことになる。このことは、文献 10)、11)においても示されている。さらに、図-12 には、本試験結果の引張せん断接着強さの値も

プロットしている。引張せん断接着強さは、はく離時の接着剤の平均せん断応力 τ であるため、 $\sigma_y = 0$ の y 軸上にプロットされる。図-12 から明らかなように、引張せん断接着強さを用いて、主応力 σ_p の破壊基準を適用できないため、参考文献 4)、10)、11)のはく離破壊の評価に用いることができない。しかし、本研究で示した方法で算出したはく離荷重時の接着端の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力の値は、参考文献 4)、10)、11)の結果と同様に、はく離破壊基準線の周りにプロットされている。したがって、JIS で定められた引張せん断強さ試験の結果から、幾何学的非線形を考慮して算出した接着端の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力は、はく離破壊基準の評価に利用できる可能性がある。

7. まとめ

本研究では、引張せん断強さ試験に用いられる薄板のシングルラップ接着接合を対象として、幾何学的非線形を考慮した接着剤に生じる応力の導出を行った。本研究により得られた結果を以下に示す。

- 1) 幾何学的非線形を考慮して得られた断面力と固有値解析によって、シングルラップ接着接合に生じる応力の算出方法を与え、線形有限変位解析結果から与えられる値とほぼ一致することを示した。
- 2) シングルラップ接着接合を用いたはく離試験から得られた引張せん断接着強さは、主応力やエネルギー解放率などのこれまで提案されている破壊基準に利用できないが、幾何学的非線形を考慮して算出したはく離荷重時の接着端の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力は、はく離破壊基準の評価に利用できる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 土木学会 複合構造委員会：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，複合構造レポート 05，丸善，2012。
- 2) 土木学会複合構造委員会：FRP 部材の接合及び鋼と FRP の接着接合に関する先端技術，複合構造レポート 09，丸善，2013。
- 3) 日本工業規格：JIS K6850，1999。
- 4) 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(応用力学論文集 Vol.18)，pp.L653-L662，2017。
- 5) 坂本貴大，石川敏之：シングルラップ接着接合のはく離破壊評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.63A，pp.483-492，2017。
- 6) 宮下 剛，長井正嗣：一軸引張を受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析，土木学会論文集 A，Vol.66，No.2，pp.378-392，2010。
- 7) 石川敏之，宮下 剛，László Gergely VIGH：一軸引張を受ける CFRP 板接着鋼板に生じる応力の高精度解法，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.1，pp.89-100，2013。
- 8) 宮下 剛，石川敏之：多層の CFRP が積層された曲げを受ける鋼部材の応力解析，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.1，pp.26-39，2013。
- 9) 宮入裕夫：機械接着技術者のための接着設計入門，日刊工業新聞社，2000。
- 10) 清水 優，石川敏之，堀井久一，服部篤史，河野広隆：当て板接着された突合せ鋼板のはく離強度の評価，鋼構造論文集，Vol.22，No.86，pp.1-11，2015。
- 11) Shimizu, M., Ishikawa, T., Hattori, A., and Kawano, H., Failure Criteria for Debonding of Patch Plate Bonded on-to Steel Members Subjected to Bending, *Journal of JSCE*, Vol.2, pp.310-322, 2014.

(2017.6.23 受付)

EVALUATION FOR DEBONDING OF SINGLE-LAP BOND JOINT WITH CONSIDERATION OF GEOMETRIC NONLINEAR

Kento TANIGUCHI, Toshiyuki ISHIKAWA and Hisakazu HORII

Recently, patch bonding repair method has been applied to the deteriorated steel structures. However, the bonding patch repair method is still concerned about the brittle debonding of patch plate. Generally, a tensile shear bond strength given by the single-lap bonded specimen with 1.6mm steel plates is often used for the quality control of adhesives. However, it is known that the tensile shear bond strength of single-lap joint cannot be applied for the evaluation of debonding of patch plate.

In this study, to employ the single-lap joint used for the quality control of adhesives for the evaluation of debonding of patch plate, stresses introduced in the adhesive of single-lap joint were given by using the eigenvalue analysis and the geometric nonlinear beam theory. Furthermore, it was revealed that the test results are scattered in the same region of that given by the large size specimens by the applying the principal stress of adhesive ends.