

第 I 部門

一軸引張を受ける片面当て板接着鋼板の力学特性

関西大学 学生員 ○水谷 壮志

関西大学 正会員 石川 敏之

1. はじめに

近年、損傷した鋼部材への補修工法として、鋼板や FRP を用いた当て板接着補修が適用され始めている¹⁾。接着補修では、当て板を接着剤で貼り付けるだけでなく、場合によっては供用しながら短期間で施工できるなどの利点がある。

当て板接着補修の問題点として、鋼部材が降伏する前に当て板がはく離する場合があることが報告されている¹⁾。したがって、当て板のはく離に対する照査を行う必要がある。

これまでに、当て板のはく離に対する照査を行うために、多くの接着接合モデルに対して、接着剤に生じるせん断応力および垂直応力を FEM 解析、理論解析および数値解析を用いて明らかにされてきた。一方、接着接合モデルの一つである一軸引張を受ける片面当て板接着鋼板において実験的研究はあるが、はく離に対する照査に用いる接着剤に生じる応力に計算式は与えられていない。

本研究では、一軸引張を受ける片面当て板接着鋼板に対する力学特性を明らかにし、接着剤に生じるせん断応力および垂直応力を数値解析で求め、はく離に対する照査に用いるエネルギー開放率について示す。

2. 片面当て板接着鋼板に生じる断面力および応力の数値解析

主板、当て板および接着剤における微小区間の力のつり合いより接着剤に生じる応力の導出を行う。接着剤は鋼板に比べ剛性が低いことから断面力を受け持たず、接着剤に生じるせん断応力および垂直応力(荷重と垂直な y 軸方向の応力)が生じると仮定する。片面当て板接着鋼板の解析モデルを図 1 に示す。補強部の微小区間で力のつり合いより 9 元連立 1 次微分方程式を導出し、ひずみに関する微分方程式に変形し、行列・ベクトル形式でまとめることにより次式を得る。

$$\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}(x)}{dx} = \mathbf{A}_{9 \times 9} \boldsymbol{\varepsilon}(x) \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} a_{18} &= \frac{G_e b}{E_s A_s}, a_{27} = \frac{E_e b}{G_s A_s}, a_{32} = \frac{G_s A_s}{E_s I_s} d_s, a_{38} = -\frac{G_e b}{E_s I_s} d_s \left(d_s + \frac{h}{2} \right), \\ a_{48} &= -\frac{G_e b}{E_p A_p}, a_{57} = -\frac{E_e b}{G_p A_p}, a_{65} = \frac{G_p A_p}{E_p I_p} d_p, \\ a_{68} &= -\frac{G_e b}{E_p I_p} d_p \left(d_p + \frac{h}{2} \right), a_{79} = 1, a_{81} = \frac{1}{h}, a_{83} = -\frac{d_s + h/2}{d_s h}, \\ a_{84} &= -\frac{1}{h}, a_{86} = -\frac{d_p + h/2}{d_p h}, a_{93} = -\frac{1}{d_s h}, a_{99} = -\frac{1}{d_p h} \end{aligned}$$

a_{ij} は行列 A の i 行 j 列の成分であり、上記以外は $a_{ij} = 0$ である。また、 E_s 、 E_p 、 E_e 、 G_s 、 G_p 、 G_e はそれぞれ主板、当て板および接着剤のヤング係数またはせん断係数である。 A_s 、 A_p 、 I_s 、 I_p はそれぞれ主板および当て板の断面積および断面 2 次モーメントである。また、 b は接着幅、 h は接着剤の厚さ、 d_s および d_p は主板または当て板の図心から上面までの距離である。

式(1)の境界条件として、当て板端部に生じる主板の断面力から得られるひずみを次式で与える。

$$\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \begin{bmatrix} \frac{P_L}{E_s A_s} & \frac{Q_L}{G_s A_s} & \frac{M_L}{E_s I_s} d_s & \frac{P_R}{E_s A_s} & \frac{Q_R}{G_s A_s} & \frac{M_R}{E_s I_s} d_s & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

ここに、 P_L 、 Q_L 、 M_L 、 P_R 、 Q_R 、 M_R はそれぞれ $x = -l_0$ および $x = l_0$ の位置における主板に生じる軸力、せん断力または曲げモーメントである。

3. 一軸引張を受ける片面当て板接着鋼板に生じる断面力

第 2 章の数値解析に必要な断面力を補強部および無補強部の図心軸からなる折れ梁モデルにより導出する。この構造は 1 次不静定となる。力のつり合いおよび仮想力の原理により断面力($P_L = P_R = P$ 、 $Q_L = Q_R = 0$) は次式で与えられる。

$$M_L = M_R = -\frac{1}{1 + I_v l_1 / (I_s l_0)} P a \quad (3)$$

ここに、 I_v は補強部の合成断面に対する断面 2 次モーメントであり、 l_0 および l_1 はそれぞれ鋼板中央の右側における補強部および無補強部の長さである。また、 a は補強部および無補強部の図心軸の差である。式(3)

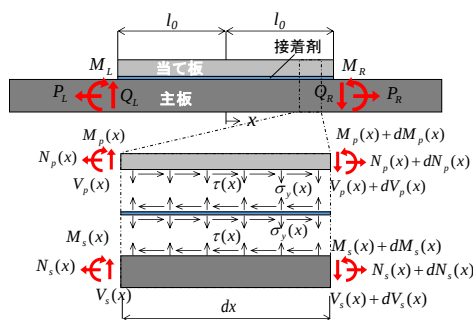


図1 片面当て板接着鋼板モデル

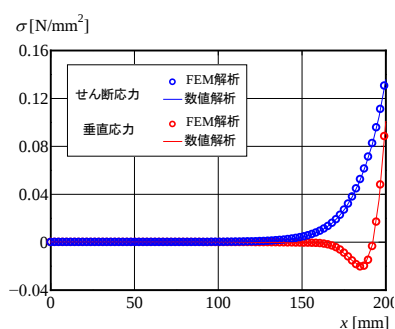


図2 接着剤に生じる応力分布

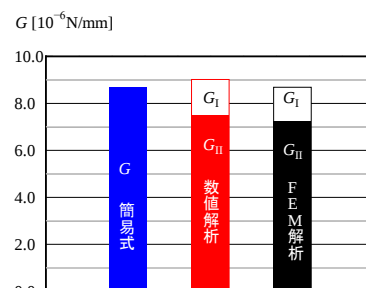


図3 エネルギー開放率

は完全合成を仮定した折れ梁モデルから導出しており、接着剤の影響が考慮されていない。そのため、FEM解析を用い逆解析的に求めた補強部の補正変数 Δl を用い、補強部の長さを $l_0 - \Delta l$ とすることで接着剤の影響を考慮できる。ここに、 $\Delta l = 6.79 t_s^3 l_0 / (t_v^3 \sqrt{l_1}) + 9.01$ である。また、 t_v および t_s はそれぞれ合成断面または主板的板厚である。

4. 数値解析とFEM解析の比較

第2章および第3章により得られる数値解析の妥当性を確認するためにFEM解析との比較を行う。

主板および当て板のヤング係数およびポアソン比はそれぞれ 200GPa および 0.3 であり、接着剤のヤング係数およびポアソン比はそれぞれ 2.0GPa および 0.35 である。主板および当て板の板厚はそれぞれ 12mm および 6mm であり、接着剤の厚さ h および幅 b はそれぞれ 0.6mm および 50mm である。また、補強部の長さ l_0 は 200mm、無補強部の長さ l_1 を 100mm としている。作用荷重は無補強部の主板に対して 1N/mm² の軸応力がかかる値とした。

FEM解析によって得られた接着剤に生じるせん断応力 τ および垂直応力 σ_y の分布を図2に示す。図から数値解析およびFEM解析による接着剤に生じる応力の分布は、せん断応力および垂直応力ともよく一致していることがわかる。

5. 片面当て板接着鋼板のエネルギー開放率

はく離に対する評価の手法として提案されているエネルギー開放率がある。

当て板端部の接着剤から微小なはく離が生じることによる接着剤のひずみエネルギーの変化から、エネルギー開放率はモード別に次式で与えられる。

$$G_I = \frac{K_I^2}{E_e} = \begin{cases} \frac{h}{2E_e} \sigma_{ycr}^2 & (\sigma_{ycr} \geq 0) \\ 0 & (\sigma_{ycr} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E_e} = \frac{h}{2G_e} \tau_{cr}^2 \quad (5)$$

ここに、 τ_{cr} および σ_{ycr} はそれぞれはく離先端に生じるせん断応力および垂直応力である。式(4)および式(5)の中辺はモード別の応力拡大係数から算出されるエネルギー開放率であり K_I および K_{II} はそれぞれモードIおよびIIの応力拡大係数である。全エネルギー開放率 G_T は各モードの和 ($G_T = G_I + G_{II}$) で与えられる。

τ_{cr} および σ_{ycr} は第2章および第3章から算出し、 K_I および K_{II} ははく離を模擬したFEM解析により求める。このFEM解析ははく離先端では放射状に退化要素を用い、はく離面は二重節点を用いている。また、部材の寸法、材料定数および作用荷重は第4章と同じとする。

図3に数値解析およびFEM解析で求めたエネルギー開放率を示す。図には系全体のひずみエネルギーから算出されるエネルギー開放率の簡易式¹⁾の値も示す。エネルギー開放率に対しても数値解析値はFEM解析および簡易式の結果とよく一致している。したがって、数値解析から得られる接着剤に生じるせん断応力および垂直応力は、エネルギー開放率に使用できると考える。

6. おわりに

本研究では片面当て板接着鋼を折れ梁モデルとして断面力を導出し、数値解析を用いて接着剤に生じるせん断応力および垂直応力を求めた。この結果はFEM解析の結果とよく一致しており、はく離評価に利用できると考える。

参考文献

- 1) 土木学会 複合構造委員会：FRP部材の接合および鋼とFRPの接着接合に関する先端技術、複合構造レポート 09, 2013.