

# 単純支持された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 ○水谷 壮志  
関西大学 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、FRP や鋼板を用いた当て板接着補修が適用され始めている<sup>1)</sup>。この工法では、当て板を接着剤で貼り付けるだけでよく、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。しかし、当て板端部の接着剤に高いせん断応力および垂直応力が生じるため、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<sup>1)</sup>。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やエネルギー開放率について 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。

本研究では、鋼板のウェブ片面への当て板接着等を想定し、単純支持された一軸引張を受ける片面当て板接着鋼板に対して、接着剤に生じるせん断応力および垂直応力を数値解析により算出する方法を示す。さらに、はく離指標であるエネルギー開放率について評価する。

## 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

片面当て板接着鋼板を図-1 に示す。主板、当て板および接着剤の微小区間の力のつり合いより、各部材に生じる断面力および応力の導出を行う。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、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)のみが生じると仮定する。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。

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

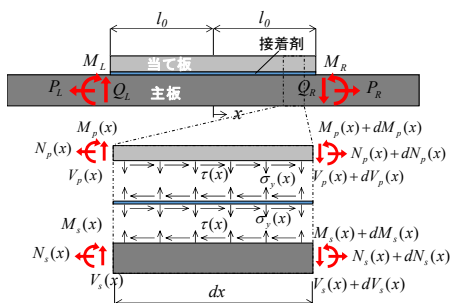


図-1 片面当て板接着鋼板と微小区間の力のつり合い

ここに、

$$a_{18} = \frac{G_e b}{E_s A_s}, \quad a_{27} = \frac{E_e b}{G_s A_s}, \quad a_{32} = \frac{G_s A_s}{E_s I_s} d_s, \quad a_{38} = -\frac{G_e b}{E_s I_s} d_s \left( d_s + \frac{h}{2} \right),$$

$$a_{48} = -\frac{G_e b}{E_p A_p}, \quad a_{57} = -\frac{E_e b}{G_p A_p}, \quad a_{65} = \frac{G_p A_p}{E_p I_p} d_p, \quad a_{68} = -\frac{G_e b}{E_p I_p} d_p \left( d_p + \frac{h}{2} \right),$$

$$a_{79} = 1, \quad a_{81} = \frac{1}{h}, \quad a_{83} = -\frac{d_s + h/2}{d_s h}, \quad a_{84} = -\frac{1}{h}, \quad a_{86} = -\frac{d_p + h/2}{d_p h},$$

$$a_{93} = -\frac{1}{d_s h}, \quad a_{99} = -\frac{1}{d_p h}$$

$a_{ij}$  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およびせん断係数である。 $A_s$ 、 $A_p$ 、 $I_s$ 、 $I_p$  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をひずみに変換した境界条件ベクトルを次式で与える。

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

ここに、 $P_L$ 、 $Q_L$ 、 $M_L$ 、 $P_R$ 、 $Q_R$ 、 $M_R$  はそれぞれ当て板両端部 ( $x = \pm l_0$ ) の主板に生じる軸力、せん断力および曲げモーメントである。

単純支持された片面当て板接着鋼板において一軸引張荷重  $P$  を作用させると、当て板両端部の主板に作用する断面力は  $P_L = P_R = P$ 、 $Q_L = Q_R = M_L = M_R = 0$  となる。

## 3. 数値解析および FEM 解析

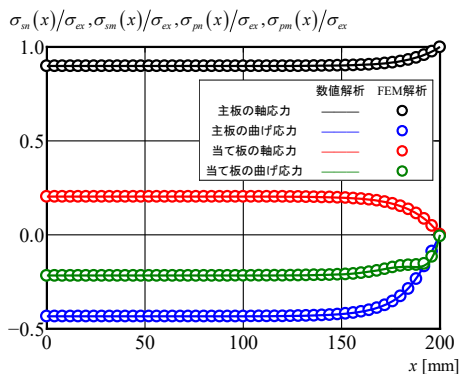
数値解析の妥当性を FEM 解析により確認する。主板および当て板は図心のオフセットを考慮した直線梁要素、接着剤は四節点平面応力要素を用いた平面弾性解析を行った。

計算例として示すモデルの材料定数として、主板および当て板のヤング係数およびポアソン比をそれぞれ 200GPa および 0.3、接着剤のヤング係数およびポアソン比をそれぞれ 2.0GPa および 0.35 とする。主板および当て板の板厚はそれぞれ 12mm および 6mm、接着剤の厚さ  $h$  および幅  $b$  はそれぞれ 0.6mm および 50mm とし、接着半長さ  $l_0$  は

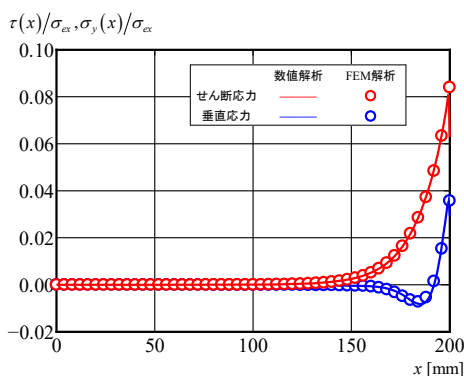
200mmとする. 一軸引張荷重として, 無補強部の端で主板的の図心位置に  $x$  軸方向の荷重  $P$  を与えた.

数値解析および FEM 解析から得られる主板と当て板の軸応力と曲げ応力および接着剤に生じるせん断応力と垂直応力の分布を図-2 に示す. 図-2 では各応力を作用応力  $\sigma_{ex} = P/A_s$  で除した値を縦軸に示している. 横軸  $x$  はモデル中央からの距離を示す.

図-2 から数値解析および FEM 解析の応力分布はよく一致していることがわかる.



(a) 主板および当て板



(b) 接着剤  
図-2 応力分布

#### 4. 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, 単純支持された一軸引張を受ける片面当て板接着鋼板において利用できるかを検討する. 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に対するエネルギー開放率はモード別に次式で与えられる<sup>1)</sup>.

$$G_I = \frac{K_I^2}{E_e} = \begin{cases} \frac{h}{2E_e} \sigma_{yer}^2 & (\sigma_{yer} \geq 0) \\ 0 & (\sigma_{yer} < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E_e} = \frac{h}{2G_e} \tau_{cr}^2 \quad (4)$$

ここに,  $\tau_{cr}$  および  $\sigma_{yer}$  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. 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  $G_T$  は各モードのエネルギー開放率の和 ( $G_T = G_I + G_{II}$ ) で与えられる.

式(3)および式(4)の  $\tau_{cr}$  および  $\sigma_{yer}$  は, 数値解析により算出し,  $K_I$  および  $K_{II}$  は, はく離(長さ 5mm)をモデル化した FEM 解析により求める. この FEM 解析では, 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.

エネルギー開放率には系全体のひずみエネルギーから算出する方法(簡易式と呼ぶ)もあり, 単純支持された一軸引張を受ける片面当て板接着鋼板の場合, 次式で表される.

$$G = \frac{P^2}{2bE_s} \left( \frac{1}{A_s} - \frac{1}{A_v} - \frac{a^2}{I_v} \right) \quad (5)$$

ここに,  $A_v$  および  $I_v$  は当て板補強部の合成断面に対する断面積および断面 2 次モーメントであり,  $a$  は主板的の図心と合成断面に対する図心との差である.

図-3 に各方法で算出したエネルギー開放率を示す. 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.

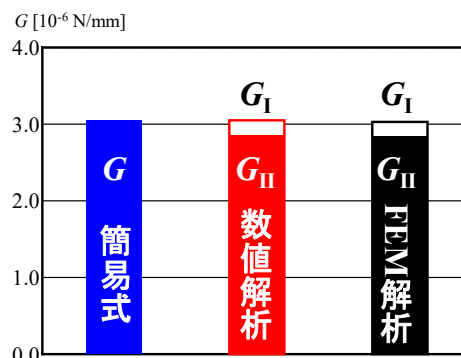


図-3 エネルギー開放率

#### 5. まとめ

本研究では単純支持された一軸引張を受ける片面当て板接着鋼をモデルとして, 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算出した. また, 同モデルに対して, はく離指標として提案されているエネルギー開放率を算出した. これらの結果は 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.