

FRP 接着により補強された鋼部材の接着部耐荷力の数値的評価に関する基礎的検討

東北大学大学院工学研究科 学生員 ○高橋一生
 東北大学大学院工学研究科 正員 齊木 功
 東北大学大学院工学研究科 正員 山本剛大

1. まえがき

近年、鋼構造の補修・補強のための手段として FRP 接着の採用例がみられる。この工法は既存鋼構造へ、シート状や板状の FRP 材を接着剤によって貼付けて複合構造化するものである。

こうした補強部の性能照査にあたっては、鋼部材への FRP 材の確実な接着を担保することが必要となる。接着部の耐荷力評価は主に模型実験¹⁾により行われているが、構造物全体を対象とする場合など大規模な模型を製作することが不適当な場合、有限要素解析による試算が有効な手段となる。

有限要素解析によって耐荷力評価を行うにあたっては、接着部の力学的特性をよく反映したモデル化が必要となる。接着剤層を陽にモデル化することもその手段であるが、接着剤層は構造全体に対して非常に薄く、細かな要素分割が必要になることから計算負荷の増大を招く。そこで本研究では、接着剤層の陽なモデル化に代えて、異種材料の接着と破壊を表現する界面数値モデルを提案することを目的とする。

2. 接着の破壊を考慮した接触解析手法

提案する界面モデルは、鋼-FRP 界面の付着により両材料の接着を表現し、また、その破壊の進展をエネルギー解放率を考慮し再現するものである。界面モデルにおける接触力計算には penalty 法を用いた節点間接触を採用した。鋼-FRP 接着面に設けた弾塑性の penalty ばねにより接触力を伝達し、接着の破壊はその降伏により表現した。

接触力の更新は return mapping 法により行う。界面の接触節点ペアの接線方向相対変位ベクトルを $\mathbf{u}$ とし、これを弾性成分 $\mathbf{u}^e$ と塑性成分 $\mathbf{u}^p$ に分解する。接触部の剛性を面内で等方とし penalty 係数を ϵ とすると、接線方向の接触力ベクトル $\mathbf{f}$ は

$$\mathbf{f} = \epsilon \mathbf{u}^e = \epsilon(\mathbf{u} - \mathbf{u}^p) \quad (1)$$

となる。降伏関数を

$$\phi = |\mathbf{f}| - f_Y(\bar{u}^p) \quad (2)$$

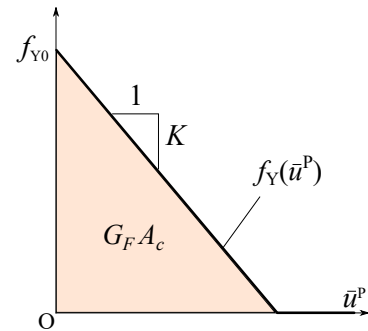


図-1 軟化曲線・軟化係数とエネルギー解放率

とする。付着強度 f_Y は図-1 に示すような累積塑性変位 $\bar{u}^p$ の線形関数と仮定し

$$f_Y(\bar{u}^p) = \begin{cases} f_{Y0} + \bar{u}^p K & (\text{if } f_{Y0} + \bar{u}^p K > 0) \\ 0 & (\text{if } f_{Y0} + \bar{u}^p K \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

とする。ここで、 f_{Y0} は初期付着強度、 K は負の硬化係数であり、 $\bar{u}^p$ は累積塑性変位で

$$\bar{u}^p \equiv \int |\dot{\mathbf{u}}_p| dt \quad (4)$$

と定義した。 $f_Y - \bar{u}^p$ 直線で囲まれた面積が、エネルギー解放率 G_F に接触節点ペアあたりの接触面積 A_c を乗じた値となるように、 K を

$$K = -\frac{(f_{Y0})^2}{2 \cdot G_F A_c} \quad (5)$$

とする。

関連流れ則を仮定し

$$\dot{\mathbf{u}}^p = \dot{\gamma} \mathbf{t} \quad (6)$$

とする。ここで、 $\dot{\gamma}$ は非負の塑性乗数、 $\mathbf{t} = \frac{\mathbf{f}}{|\mathbf{f}|}$ は流れベクトルである。整合条件 $\dot{\phi} = 0$ により、 $\dot{\gamma}$ は

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{\partial |\mathbf{f}|}{\partial \mathbf{f}} \cdot \dot{\mathbf{f}} - \dot{f}_Y(\bar{u}^p) \\ &= \epsilon \mathbf{t} \cdot (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\gamma} \mathbf{t}) - \dot{\gamma} K \\ &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \dot{\gamma} = \frac{\epsilon}{\epsilon + K} \mathbf{t} \cdot \dot{\mathbf{u}} \quad (\text{if } f_{Y0} + \bar{u}^p K > 0) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \epsilon \mathbf{t} \cdot (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\gamma} \mathbf{t}) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Rightarrow \dot{\gamma} = \mathbf{t} \cdot \dot{\mathbf{u}} \quad (\text{if } f_{Y0} + \bar{u}^p K > 0) \quad (10)$$

と決定される。これを用いて $\dot{\mathbf{u}}^p$ および $\dot{\mathbf{f}}$ が求められる。

Key Words: 有限要素接触解析, FRP 接着, エネルギー解放率, 耐荷力評価

〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学工学研究科土木工学専攻社会基盤構造学講座構造強度学研究室

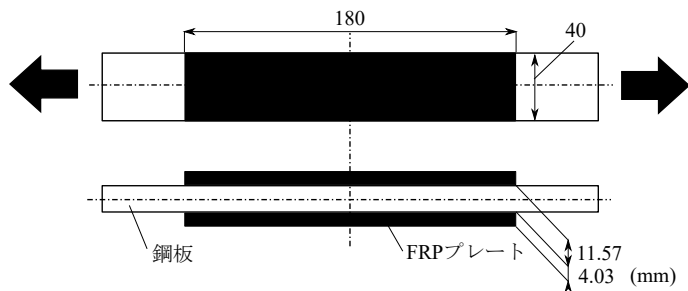


図-2 FRP 接着鋼板引張試験片モデル

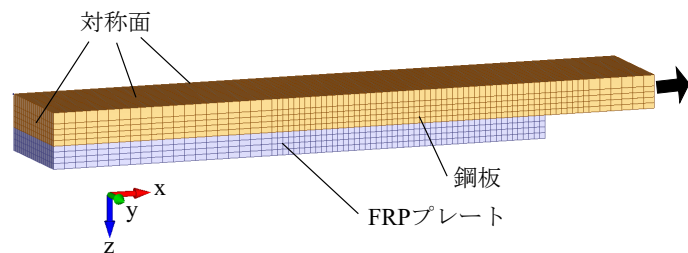


図-3 FRP 接着鋼板引張試験片モデル

3. 引張試験による検証

(1) 対象実験

炭素繊維プレートが両面に接着された鋼板の引張試験²⁾を本手法により解析した。試験片の概略図を図-2に、また、これを基に作成した有限要素モデルを図-3に示す。試験片の対称性を考慮した1/8モデルとし、鋼材料はYoung率203.5 GPa, FRPプレートはYoung率141.4 GPaとした。FRPプレートの層はモデル化せず、厚さ4.03 mmが1層とした。荷重は、鋼板の端面への強制変位として与えた。なお、モデルはすべて8節点6面体要素で作成し、要素数は14,000、節点数は18,165とした。

界面の初期付着強度の計算に用いる接着剤の強度は、接着剤の引張強さ77.5 MPa, せん断強さ22.2 MPa, もしくは実験により得られた「はく離せん断抵抗強度」²⁾の37 MPaの3通りとした。接触力計算に用いるpenalty係数は、接着剤弾性の考慮の有無でケース分けを行った。これを考慮するケースでは、penaltyばねの変形が接着剤層の弾性変形と等価になるよう、接着剤のYoung率を接着剤層厚で除した値 $1.24 \times 10^4 \text{ N/mm}^3$ とした。考慮しないケースでは係数を100倍し、剛なpenaltyばねであるとした。なおエネルギー解放率は $G_F = 0.1 \text{ N/mm}$ とした。

(2) 解析結果

载荷位置の鋼板に生じる応力 σ_{sn} に対する、FRPプレートの付着端付近のひずみを図-4, 5に示す。

参照実験では、ひずみは $-20\mu \sim 60\mu$ 程度の範囲内で

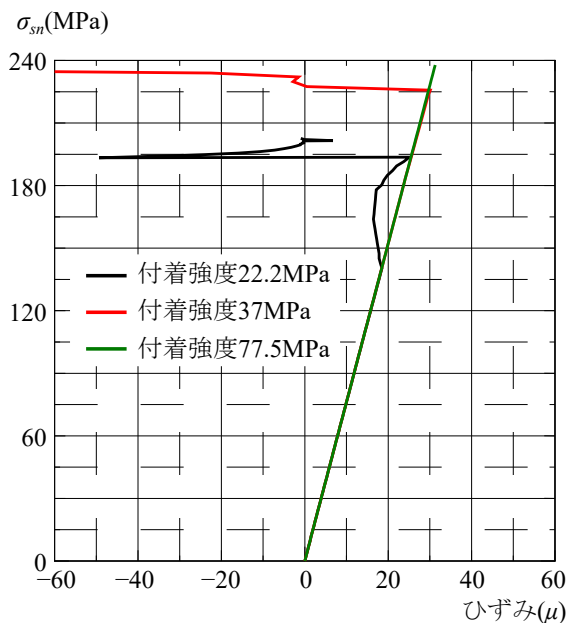


図-4 FRP 端部付近のひずみ (接着剤弾性を考慮)

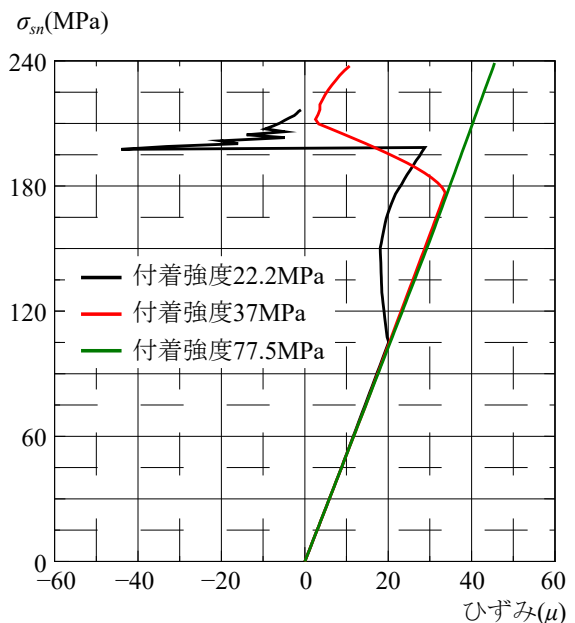


図-5 FRP 端部付近のひずみ (接着剤弾性を未考慮)

推移し、また $\sigma_{sn} = 180 \text{ MPa}$ 程度でFRPプレートが端部からはく離した。本手法による計算結果では、接着剤の強度を接着剤のせん断強さに基づいた22 MPaとしかつ接着剤弾性を考慮した場合に、 $\sigma_{sn} = 193.3 \text{ MPa}$ でひずみが急落、すなわちFRPプレートが端部からはく離した。

参考文献

- 1) 松村政秀, 北田俊行, 久部修弘: 高弾性CFRP板をI形断面鋼桁に貼付する補強効果に関する研究, 構造工学論文集 Vol.54A, pp.834-841, 2008.
- 2) 石川敏之, 大倉一郎, 喜多伸明: 繊維シートが挿入された単層繊維プレート接着鋼板のはく離せん断応力, 構造工学論文集 Vol.52A, pp.1317-1326, 2006.