

FRP による鋼部材補強効果の数値的評価に関する基礎的検討

Fundamental study on numerical evaluation for performance of retrofit of steel members by FRP

高橋一生*

Kazuki TAKAHASHI

*構造強度学研究室（指導教員：京谷 孝史 教授，研究指導教員：齊木 功 准教授）

Recently, the fiber reinforced polymer (FRP) has been used for repairing or strengthening of steel structures. Since FRP sheets or plates are bonded onto steel members with the adhesive, it is necessary to prevent debonding of FRP members. In order to investigate the behavior and the failure of retrofitted member by FRP, a lot of experimental works have been done and reported. However, it is difficult to conduct experiment steel structures in service. Therefore, this paper proposes a finite element method that is able to simulate debonding of retrofitted steel members with FRP. To this end, a finite element contact analysis considering energy release rate of interface is developed. The feasibility of proposed method is examined through a couple of simulation of debonding experiment of retrofitted steel members.

Key Words: FEM, contact, steel I-beam, FRP plate, bond, peeling, energy release rate

1. はじめに

鋼橋において、経年劣化による耐荷力低下への対策、あるいは交通荷重増加への対応による設計活荷重変更のため、耐荷性能向上が必要になるケースがしばしば発生する。こうした場合の補強には、主に鋼板の溶接や高力ボルト接合が行われてきた。これらの工法では、溶接やボルト孔穿孔といった鋼構造への大掛かりな加工を要し、また補強材である鋼板の重量が大きく施工時に重機が必要となる。

これに対して近年、繊維強化プラスチック (FRP) 素材を鋼構造に接着し耐荷力を向上させる補修・補強法が活用されている¹⁾。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。特徴として、FRP 材が軽量であることと、また接着時に鋼部材の加工が下地処理程度で済むことから、簡易な施工法で補強を実施できることが挙げられる。かつ、FRP 材は引張強度が大きく、高い補強効果が期待できる。

複合構造は、異種材料が一体となって荷重に抵抗することで成立する。よって FRP 接着による補修・補強においては、鋼部材の変形に対し FRP 材が剥離しないことを保証する必要がある。このことについて、FRP 材接着部の破壊形態を解明するため試験体による載荷実験²⁾がなされている。また最近の設計指針³⁾でも、載荷試験によって FRP 材接着部の破壊を実験的に評価する方法が提案されている。

一方、補強された既設建造物の性能を実際に照査するにあたっては、載荷試験による評価は現実的に不可能である。したがって、有限要素解析により FRP 材接着部の耐荷力を確認することが有効な照査手段になると考えられる。しかし、通常の有限要素解析では FRP がはく離するといった挙動は表現できない。このため、接着剤層をふくめ構造全体を連続体としてモデル化する

るか、あるいは鋼-FRP 界面にジョイント要素など特殊な要素を適用してモデル化する必要がある。また、接着剤層を連続体として陽にモデル化する場合、要素分割が問題になる。接着剤層は構造全体に対し著しく小さいため、接着剤部分によって要素寸法が決定されると構造全体で要素数・節点数が膨大になってしまううえ、モデル化の作業にかかる労力も多大なものとなる。

これらに対し、接触解析により異種材料界面の付着破壊と摩擦力を表現する数値モデルが提案されている。そこで本研究では、この界面モデルを応用して、接着剤層の陽なモデル化に代えて接着剤による鋼材への FRP 材接着とはく離を表現することを試みる。

このとき、接着剤部分のはく離は脆性的な挙動になる。こうした破壊を計算する際、要素寸法を小さくすると最大耐力が低下する、いわゆる要素寸法依存性が現れることが知られている。この課題についても、界面モデルにエネルギー解放率に基づく破壊基準を組み込み、要素寸法依存性を低減させる改良を試みる。

2. はく離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。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。

接触力は界面の面内方向と垂直方向に分解して計算するものとする。面内方向においては、界面の接触節点ペアの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

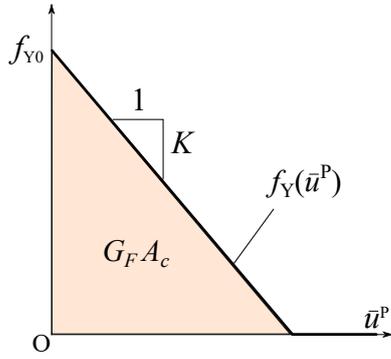


図-1 軟化曲線・軟化係数とエネルギー解放率

ベクトル f は

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

となる。降伏関数を

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

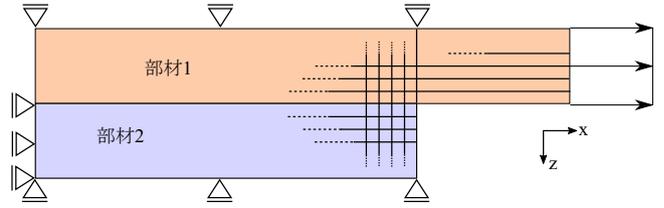


図-2 「2面せん断モデル」概略図

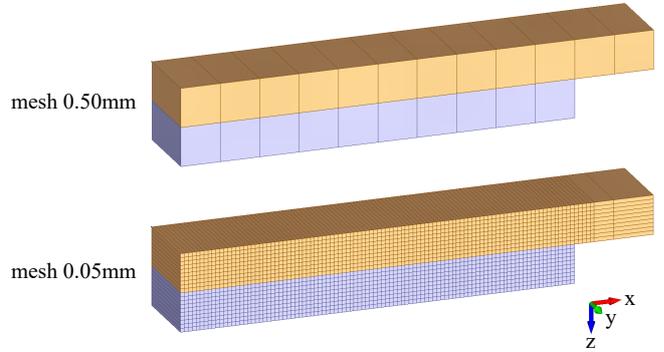


図-3 「2面せん断モデル」有限要素モデル

3. 要素寸法依存性の検証

(1) 計算モデル

検証用の例題として、2面せん断の1/2モデルを想定した単純なモデルを用意し解析を行った。これは、部材1(Young率210GPa)と部材2(Young率21GPa)からなるモデルであり、概略図を図-2に示す。両部材はいずれも幅1.0mm、厚さ0.5mmとし、また部材2の貼付長を5mmとした。なお両部材ともに等方弾性で、Poisson比は0とした。同図中において、部材2左端を固定し、部材1右端に右方向への強制変位を与えた。

有限要素モデルは8節点6面体要素で生成した。 x 、 z 方向にのみ要素分割し、要素寸法は0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.05mmの4パターンとした。それら有限要素モデルの例を図-3に示す。

接着面に適用する界面モデルは、エネルギー解放率に基づく破壊基準(エネルギー解放率基準)と、応力による破壊基準(応力基準)の2種類とした。両モデルとも摩擦係数を0、付着強度を23MPaとし、エネルギー解放率を0.1N/mmとした。

(2) 解析結果

荷重-載荷点変位関係を図-4に示す。応力基準では要素寸法により荷重-変位曲線の変化がみられた。対してエネルギー解放率基準では、4モデルの曲線がほぼ一致した。

荷重の最大値と、モデルの終局変位を表-1に示す。ここで終局変位とは、図-4において荷重が0Nまで落ち込んだ時点の変位とする。応力基準では、要素の細分化に伴い最大荷重ならびに終局変位が低下していた。これに対しエネルギー解放率基準では、最大荷重で0.75%、終局変位で1.27%程度の変動に留まった。

以上により、要素寸法依存性が解消されていると判断される。

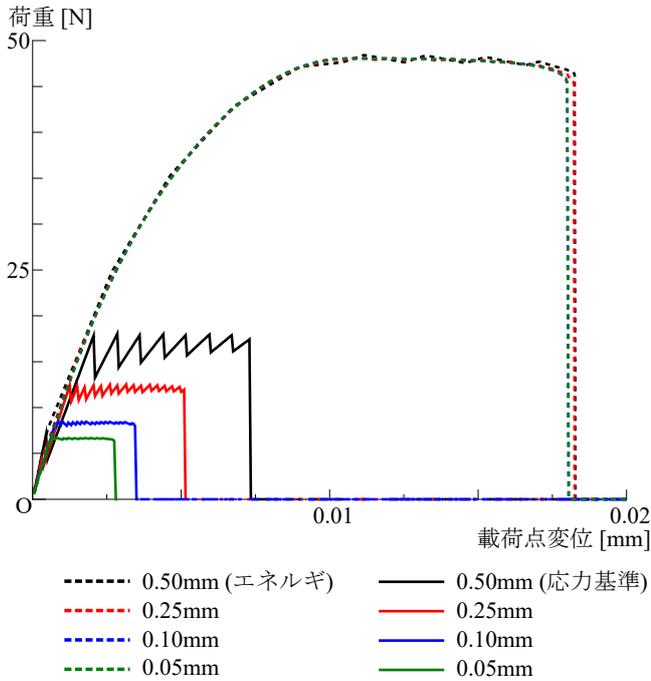


図-4 「2面せん断モデル」 荷重点荷重-変位 曲線

表-1 「2面せん断モデル」 最大荷重ならびに終局変位

mesh	最大荷重 [N]	終局変位 [mm]
0.50 mm (エネルギー)	48.413	0.01828
0.25 mm (エネルギー)	48.135	0.01825
0.10 mm (エネルギー)	48.059	0.01805
0.05 mm (エネルギー)	48.051	0.01805
0.50 mm (応力基準)	18.023	0.00735
0.25 mm (応力基準)	12.521	0.00515
0.10 mm (応力基準)	8.504	0.00350
0.05 mm (応力基準)	6.712	0.00285

4. FRP 貼付鋼板引張試験の再現

試験体への荷重試験の再現計算を行い、提案モデルによる計算精度の検証と、界面パラメータとして入力した値の変動による計算結果への影響を検討する。

(1) 参照実験の概要

石川らが実施した炭素繊維プレート接着鋼板の引張試験⁴⁾の再現を行った。解析対象とした試験片は、鋼板の両面に炭素繊維プレート(以下、FRP プレート)を接着した試験片で、その概略図を図-5 に示す。両面のFRP プレートの両端部付近、計4点でFRP プレート表面のひずみが測定されている。

(2) 引張試験モデル

参照実験の試験片を、図-6 に示すように対称性を考慮した1/8モデルとして有限要素モデル化した。

実験では、鋼板の降伏やFRP プレートの破断に至る前にFRP プレートのはく離が発生したため、両材料とも弾性体とした。鋼材は等方性材料とし、Young 率

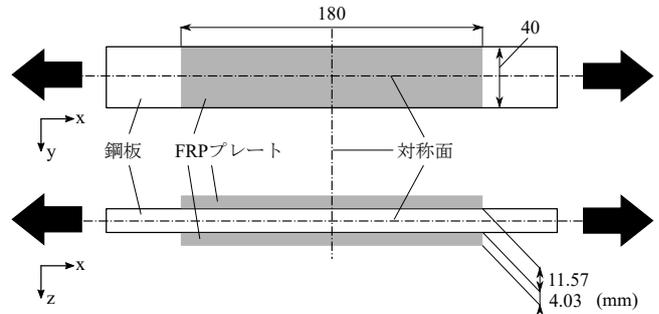


図-5 引張試験片概略図

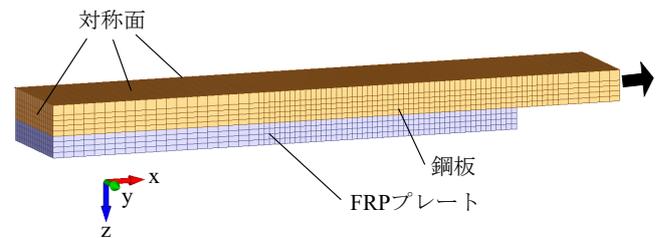


図-6 「引張試験モデル」有限要素モデル

表-2 FRP プレートの材料特性

Young 率 [GPa]	x	141.4
	y, z	9.25
Poisson 比	xy, xz	0.021
	yx, zx	0.320
	yz, zy	0.359
せん断弾性係数 [GPa]	xy, zx	4.00
	yz	3.40

203.5 GPa, Poisson 比 0.28 とした。FRP プレートは、x 方向に沿って繊維が配置されていることから、y-z 面内において等方性を有する横等方性材料とした。FRP 材の各方向の物性値は文献⁵⁾を参考に、表-2 の通りとした。

接触力計算に用いる penalty 係数は、接着剤の弾性を考慮して決定した。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。エネルギー解放率は、界面の法線方向(モード I)へ G_F^I を接線方向(モード II)へ G_F^H をそれぞれ与えた。文献⁶⁾を参考に $G_F^I = 0.2 \text{ N/mm}$, $G_F^H = 0.1 \text{ N/mm}$ とした。

なお、モデルはすべて8節点6面体要素で作成した。要素寸法は最小で1 mm とし、要素数は14,000、節点数は18,165 とした。荷重は、鋼板の端面への強制変位として与えた。

(3) 解析パラメータ

界面の初期付着強度を、参照実験の接着剤の強度に基づき 22.2, 37, 77.5 MPa より選択した。以上の計算ケース名を順に「付着 22 MPa」「付着 37 MPa」「付着 77 MPa」と称する。

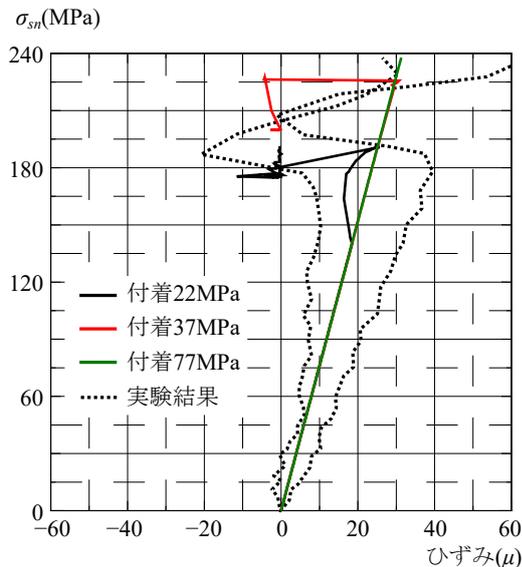


図-7 鋼材応力-FRP ひずみ関係

(4) 解析結果

荷重位置の鋼板に生じる応力 σ_{sn} と FRP プレートの付着端付近のひずみの関係を図-7 に示す。

図中の破線は、参照実験での代表的なひずみ推移である。参照実験では、ひずみが最初に急落した $\sigma_{sn} = 180$ MPa 前後の時点で FRP プレート端部がはく離したものと判断されている。本手法による計算結果では、付着 22 MPa の計算ケースで、実験結果に最も近い $\sigma_{sn} = 190.9$ MPa で FRP プレート端部のはく離が見られ、それに伴いひずみが急落した。付着 37 MPa のケースでは、ひずみ急減が起きる鋼板応力は $\sigma_{sn} = 225.7$ MPa まで上昇した。また付着 77 MPa では、荷重範囲内でひずみ急減は発生しなかった。

付着 22 MPa のケースでの、FRP プレート端部のはく離直前の変形図と応力分布図を図-8 に示す。図中では、対称面からの距離 90 mm の位置が FRP プレートの端部であり、また変形図と応力分布図の位置は一致させている。界面せん断応力は距離 83 mm の位置で付着強度に達し、以降は端部に向かうにつれ低下する様子が見られた。同ケースでの、FRP プレート端部のはく離直後の変形図と応力分布図を図-9 に示す。距離 74 mm の位置より端部側で界面せん断応力・直応力ともにゼロとなり、変形図でも同区間で FRP プレートがはく離している様子が確認された。

5. まとめ

本研究では、節点間接触による界面モデルを応用し、接着剤による鋼材への FRP 材接着とはく離を表現した。そして、FRP 接着された鋼部材の有限要素解析について、鋼材-FRP 材接着部を接着剤の陽なモデル化に代えて界面モデルで再現し、計算を試みた。

- 界面モデルにエネルギー解放率に基づく破壊基準を組み込むことで、結果が要素寸法に依存しないことを確認した。

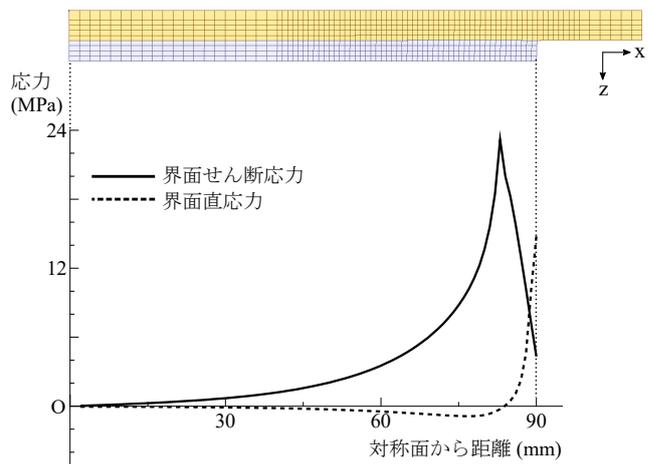


図-8 はく離直前の変形図・界面応力分布

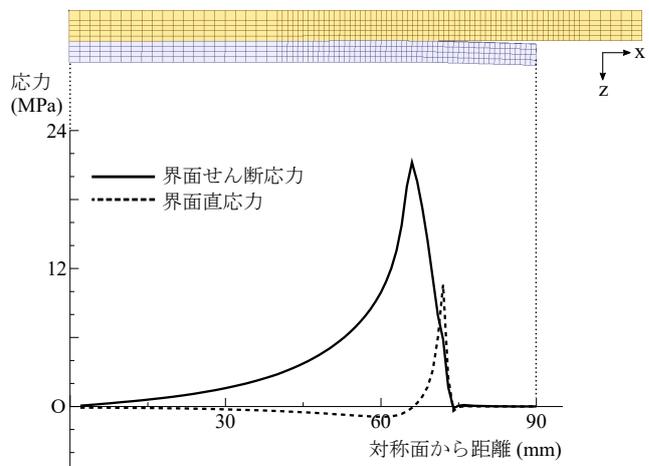


図-9 はく離直後の変形図・界面応力分布

- FRP プレートを貼り付けた鋼板の引張試験を、提案する界面モデルを使用した有限要素解析で再現した。実験結果との比較により、提案する界面モデルで FRP 材の接着とはく離を表現可能であると確認した。

参考文献

- 1) 公益社団法人 土木学会 複合構造委員会: 複合構造レポート 05 FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端, pp.15-21, 2005.
- 2) 宮下剛, 長井正嗣: 一軸引張りを受ける多層の 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.
- 3) 公益社団法人 土木学会 複合構造委員会: 複合構造シリーズ 09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案), 2018.
- 4) 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, 土木学会, Vol.52A, pp.1317-1326, 2006.
- 5) 小山茂, 岩熊哲夫, 浦野 仁美: 3 相森・田中平均化手法のハイブリッド FRP 梁への応用, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.17, pp.I.375-I.383, 2014.
- 6) 三橋博三, 六郷恵哲, 国枝稔 著: コンクリートのひび割れと破壊の力学—現象のモデル化と制御—, 技報堂出版, 2018.

(2019 年 2 月 1 日 提出)