

CFRP を接着貼付した軸力を受ける鋼部材の非線形解析に関する検討

長岡技術科学大学 学生会員 ○高森敦也
長岡技術科学大学 正会員 宮下 剛

1. はじめに

現在、CFRP 接着工法により補修または補強した鋼部材の有限要素解析（以下、FEA）は応力分布の確認を目的とした弾性解析が一般的に行われている。一方で、道路橋示方書の改定により CFRP 積層鋼部材を対象に、限界状態設計法の適用も想定される。そこで、シートのはく離等の CFRP 積層鋼材の非線形挙動を再現できる FEA 手法の確立が求められている。

2. 研究目的

鋼部材の CFRP 接着工法では、高応力下や座屈が生じた場合に CFRP シートのはく離が生じる。これを抑制するために、鋼材と CFRP シートの接着層に低弾性で伸び性能が高いポリウレアパテ樹脂製パテ材（以下、パテ材）を挿入する工法が一般的に用いられている¹⁾。パテ材を用いた場合、鋼部材から CFRP への応力伝達に遅れが生じ、さらに、パテ材の非線形性に起因して応力の増大とともに鋼部材の応力低減効果がさらに低下する¹⁾。本研究では、CFRP 積層鋼部材が有する非線形のうち、上述したパテ材の使用による応力低減効果の変化とシートのはく離を再現することが可能な FEA モデルの構築を目的とする。

3. 検討方法

本研究では、(1) パテ材に生じる応力度を正確に評価するモデル化、(2) 非線形性を再現可能なパテ材の材料特性、について検討する。

(1) パテ材の応力度を評価可能なモデル化方法

一般的に FRP 材と部材の接着層である樹脂材料は、FEA において応力特異点となり、要素サイズの依存性を受け、応力度の正確な評価が困難となる。そこで、CFRP 接着鋼板に引張力を载荷する弾性解析を樹脂材料であるパテ材と含侵接着樹脂（以下、エポキシ樹脂）の使用要素をパラメータとし、要素サイズの依存性を有さないモデル化方法について検討した。

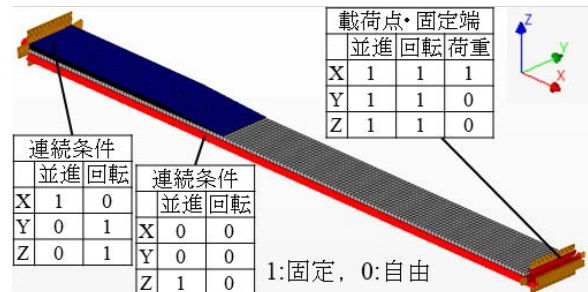


図-1 一軸引張試験解析モデル

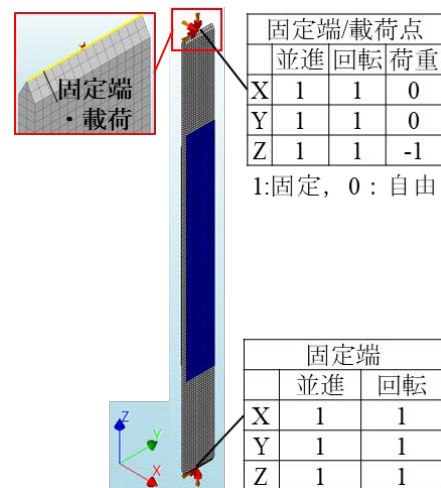


図-2 一軸圧縮試験解析モデル

(2) 非線形性を再現可能なパテ材の材料特性

a) 応力低減効果変化の再現性検討

パテ材の材料特性を検討するために、文献(1)で実施された CFRP 接着鋼板の一軸引張試験を図-1 に示すようにモデル化し非線形解析を実施した。ここでは、式(1)より求まる応力低減係数 c_n を実験結果と比較することでモデルの妥当性を検討した。

$$c_n = \frac{P/\varepsilon - E_s A_s}{E_s A_{cf,s}} \quad (1)$$

ここで、 P : 荷重、 ε : 鋼材ひずみ、 E_s : 鋼材弾性係数、 A_s : 鋼板断面積、 $A_{cf,s}$: CFRP 鋼換算断面積

b) シートはく離の再現性検討

シートのはく離発生とその後の挙動の再現性を有

キーワード 炭素繊維シート, 有限要素解析, 界面要素, 応力低減効果, はく離

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 TEL: 0258-47-9641

するパテ材の材料特性を検討するために、文献(2)で実施された CFRP 積層鋼板の一軸圧縮試験を図-2 に示すようにモデル化し非線形解析を実施した。

4. 検討結果

(1) モデル化方法

検討の結果、図-3 と表-1 に示すとおり、樹脂材料であるパテ材とエポキシ樹脂を界面要素、炭素繊維をシェル要素でモデル化することで、要素サイズの依存性を有さないモデルとなる事がわかった。

(2) パテ材の材料特性

a) 応力低減効果変化の再現性

界面要素でモデル化したパテ材の材料特性は法線・せん断方向の応力-相対変位関係を用いて導入する。図-4 にシート 10 層、定着長 200mm、ずらし 10mm のモデルにおける応力低減係数 C_n の解析値と実験値の比較を示す。まず、法線方向の剛性成分に弾性係数 E を塗布厚さ t で除した値、せん断方向にせん断弾性係数 G を t で除した値を用いた 3 角形分布の結果を見る。低応力下で、解析値は実験値と概ね一致するが、実験値で 150 N/mm^2 以降に生じる C_n の低下が再現できていない。そこで、せん断方向の応力-相対変位関係を、鋼材応力 150 N/mm^2 において FEA モデルの定着長端部で生じた応力 τ_e で剛性が低下する 4 角形分布とた上で、剛性低下率をパラメータとして検討した。この結果、剛性低下率が 90% であるモデルが実験結果の再現性を有することがわかった。

b) シートはく離の再現性

a) で得た応力-相対変位関係をもとに、各方向の応力の最大値 (最大付着応力 σ_y, τ_y) とその後の軟化挙動を一軸圧縮試験のモデル化から検討した。この結果、図-5 に示すモデルを得た。法線方向においては最大付着応力を材料成績表に示される鋼材付着強度とし材料試験結果を参考に初期剛性の 1.3 倍の傾きを有する軟化挙動とする分布を得た。また、せん断方向は最大付着応力を 2.46 N/mm^2 とし軟化挙動が傾きを有さないカットオフとする分布を得た。このモデルを用いた解析結果と実験結果の比較を図-6 に示す。解析値と実験値は概ね一致する結果となった。

5. まとめ

本研究では、パテ材の挿入による応力低減効果の変化とシートのはく離を再現可能な FEA モデルを提案した。

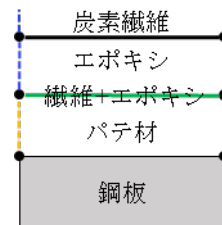


図-3 モデル概念図

表-1 使用要素

材料	使用要素
炭素繊維	シェル
エポキシ樹脂	界面要素
パテ材	界面要素
鋼板	ソリッド

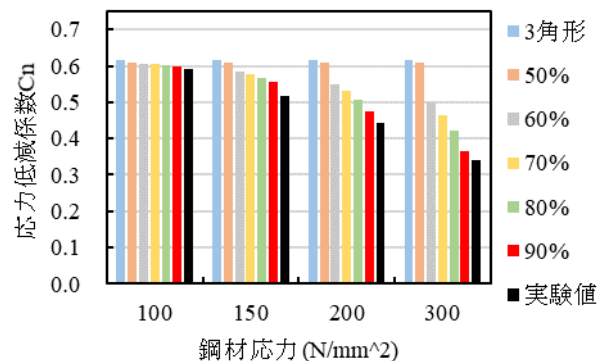


図-4 応力低減係数 C_n の比較 (n=10, 定着 200mm, ずらし 10mm)

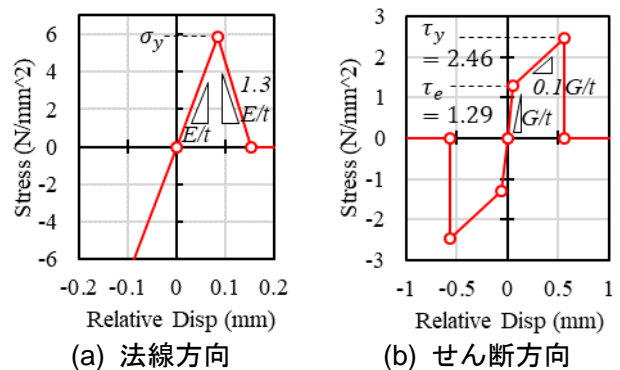


図-5 検討より得たパテ材の応力-相対変位関係

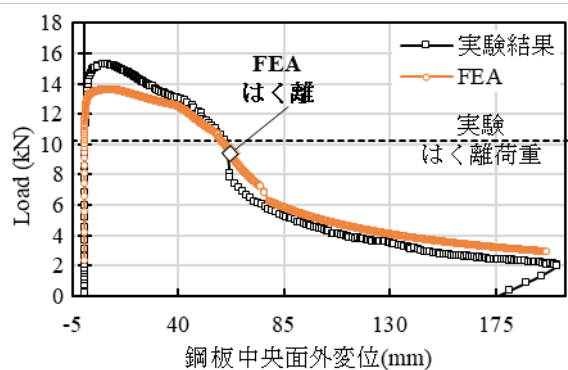


図-6 荷重-面外変位関係 (実験値との比較)

参考文献

- 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 塚本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案, 土木学会論文集 F4, Vol.71, No.1, 44-63, 2015.
- 奥山雄介, 宮下剛, 緒方辰男, 藤野和雄, 大垣賀津雄, 秀熊佑哉, 塚本歴, 長井正嗣: 鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けた FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験, 土木学会 構造工学論文集 Vol.57A, 2011.3