

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

長岡技術科学大学大学院 学生員 ○奥山 雄介

長岡技術科学大学大学院 正会員 宮下 剛, 長井 正嗣

日鉄コンポジット株式会社 正会員 小林 朗, 秀熊 佑哉

1. はじめに

鋼構造の部材に対する補修方法として, CFRPの適用を検討した研究が積極的に行なわれている. この中では, 鋼部材が弾性範囲内にあるにも関わらず, CFRPにはく離が発生することが問題とされている. その対策として, はく離荷重を上昇させるために, CFRP端部に段差を設ける工法が提案されている¹⁾.

これまでに, はく離荷重を最大とする条件を明らかにすることを目的として, 一軸引張りを受ける2枚のCFRP板が段差を設けて接着された鋼板に対する理論解析が行われている²⁾. そこでは, 鋼板の応力に関する4次の微分方程式が導出されている. しかし, これまで, 3層以上の多層のCFRPが接着された鋼板に対する理論解析は行われていない.

そこで, 本研究では, 一軸引張りを受ける3層以上のCFRPが接着された鋼板の新たな応力解析手法を提案する. 具体的には, 各層のひずみを状態変数とみなし, 微小区間における力の釣合いから, 1次のベクトル形式の同次微分方程式を導出する. 次に, このとき構成される行列に対して, 固有値解析を数値的にを行い, ひずみの一般解を求める. 一般解に含まれる未定係数は, 各層のひずみに関する連続条件ならびに境界条件より決定する.

また, 従来の理論解析^{2), 3)}では, 鋼板, CFRPの幅が等しいとして定式化を行っている. 本研究では, これらの幅が異なる場合も取り扱えるようにする.

2. 定式化

解析対象は, 図-1に示す一軸引張りを受ける多層のCFRPが接着された鋼板とする. 図-1のモデル化を図-2に示す. 図-2は, 対称性を考慮した1/4モデルである.

ここでは, 接着剤はせん断応力のみを伝達し, 鋼板とCFRPは引張応力のみを伝達すると仮定する.

領域*i*の微小区間における力の釣合いについて考え

る. ただし, $\sigma_{c0} = \sigma_s$, $E_{c0} = E_s$ とする. ここで, 領域間における物理量の連続性をひずみで考えるため, 次のようにひずみの関係として表す.

$$\frac{d}{dx} \varepsilon_i = A_i \varepsilon_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

ここで,

$$\varepsilon_i = \{\varepsilon_s, \varepsilon_{ci}, \gamma_1, \dots, \varepsilon_{ci}, \gamma_i\}^T \quad (2)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{2G_{ei}}{E_s t_s} \frac{b_{ci}}{b_s} \\ 0 & 0 & -\frac{G_{ei}}{E_{ci} t_{ci}} \\ \frac{1}{h_i} & -\frac{1}{h_i} & 0 \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} A_i & \begin{matrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & \dots & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & \frac{G_{ei}}{E_{c(i-1)} t_{c(i-1)}} \frac{b_{ci}}{b_{c(i-1)}} \\ 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & \dots & \frac{1}{h_i} & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & -\frac{G_{ei}}{E_{ci} t_{ci}} \\ -\frac{1}{h_i} & 0 \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (i=2, \dots, n) \quad (3b)$$

であり, σ_s , E_s , u_s , σ_{ci} , E_{ci} , u_{ci} , τ_i , G_{ei} は, それぞれ, 鋼板の応力, 鋼板の弾性係数, 鋼板の変位, CFRP *i*層の応力, CFRP *i*層の弾性係数, CFRP *i*層の変位 (ただし, $u_{c0} = u_s$), 接着剤*i*層のせん断応力, 接着剤*i*層のせん断弾性係数, ε_s , ε_{ci} , γ_i は, それぞれ, 鋼板のひずみ, CFRP *i*層のひずみ, 接着剤 *i*層のせん断ひずみを表す.

式(1)の解は, 行列・ベクトル表示された連列同次1次微分方程式の解として, 次のように与えられる⁴⁾.

$$\varepsilon_i = e^{A_i x} C_i = T_i e^{\Lambda_i x} T_i^{-1} C_i = T_i B_i T_i^{-1} C_i \quad (4)$$

$$\therefore \varepsilon_i = Y_i C_i$$

ここで,

$$C_i = \{C_{i1} \dots C_{ij} \dots C_{ij}\}^T \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (5)$$

$$Y_i = T_i e^{\Lambda_i x} T_i^{-1} \quad (6)$$

キーワード CFRP, 鋼板, 一軸引張, 応力解析, 微分方程式, 固有値解析, 有限要素解析

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1903-1 長岡技術科学大学 建設構造研究室 0258-47-9641

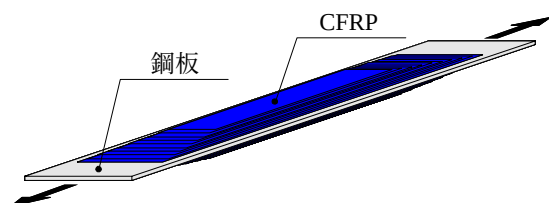


図-1 解析対象

$$B_i = e^{\lambda_i x} \quad (7)$$

$$e^{\lambda_i x} = \begin{bmatrix} e^{\lambda_{i1}x} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & e^{\lambda_{ij}x} & \\ 0 & & & \ddots \\ & & & & e^{\lambda_{in}x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_i = [v_{i1} \cdots v_{ij} \cdots v_{in}] \quad (9)$$

であり、式(5)の C_i は境界条件ならびにひずみの連続性から得られる未定係数ベクトルである。また、式(8)、(9)の λ_{ij} , v_{ij} ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, i$) は A_i の固有値および固有ベクトルである。 A_i の固有値および固有ベクトルは、数値計算により求める。

3. 提案手法の検証 (FEAとの比較)

解析解が得られていない3層以上の場合の本手法の妥当性を検証するため、有限要素法による解析を行なう。計算モデルは、両面に10層のCFRPが接着された鋼板とする。また、対称性を考慮して1/4モデルとし、8節点平面応力要素を使用した。厚さ方向の分割数は、鋼板、各接着剤、各CFRPそれぞれを10分割とした。長さ方向の分割数は、各CFRP端部を8分割、鋼板中央から275mmまでを44分割とした。節点数ならびに要素数は、それぞれ57,445, 18,920である。荷重は、代表値として鋼板の先端に100kN (185.2MPa)を加えた。

提案手法とFEAによる応力分布を図-4に示す。FEAにおける応力の評価位置は、鋼板ならびに各CFRPの中央とした。

図-5より、鋼板と各CFRPの垂直応力を見ると、提案手法とFEAが良好に一致している。よって、提案手法は、FEAにおけるモデル化の手間を大幅に低減し、FEAと同等の解を与える手法であると言える。

4. まとめ

本研究では、一軸引張りを受ける多層のCFRPが接着された鋼板に対する新たな応力解析手法を提案した。

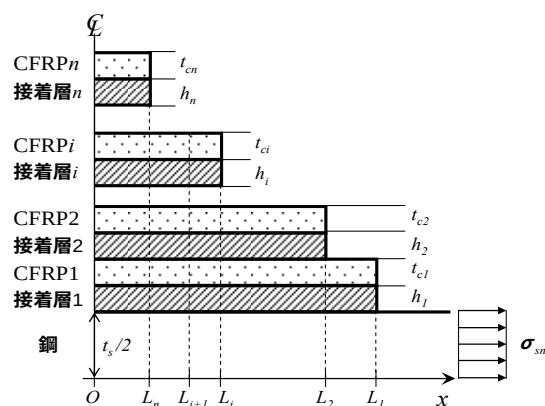


図-2 モデル化 (1/4 モデル)

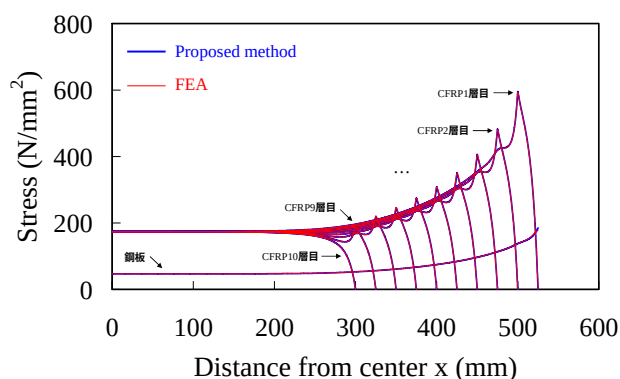


図-4 FEA と提案手法の比較

提案手法の妥当性を有限要素法により検証したところ、解析解が存在していない3層以上の多層のCFRPが接着された鋼板の応力解析を可能とすることが確認された。

今後の課題として、一軸引張りを受ける多層のCFRPが接着された鋼板に対して、はく離の発生する条件を提案手法から解明することが挙げられる。

参考文献

- 1) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, 土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp806-813, 2008.11.
- 2) 石川敏之, 大倉一郎, 小村啓太: CFRP板の端部に段差を設けることによるはく離荷重上昇の理論解析, 土木学会論文集A, Vol.65, No.2, pp362-367, 2009.4.
- 3) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三: 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp239-249, 2001.10.
- 4) 稲見武夫: 理工系の基礎数学3・常微分方程式, 岩波書店, 1998.