

## CFRP 接着された鋼板の弾性座屈荷重

関西大学 正会員 ○石川 敏之, 五味 亨介, 正会員 堂垣 正博  
日鉄ケミカル&マテリアル(株) 正会員 秀熊 佑哉

## 1. はじめに

鋼構造物の補修・補強工法の一つとして炭素繊維強化プラスチック(以下, CFRP と呼ぶ)を接着する方法が適用されている. 圧縮部材へも CFRP 接着補修・補強が行われており, はく離防止のため, 鋼部材と CFRP の間に, 弾性係数が小さく伸び性能が高い高伸度弾性パテ材(以下, 弾性パテ材と呼ぶ)が挿入されている<sup>1)</sup>. 弾性パテ材を挿入すると, CFRP に完全に力が伝達されるための接着長(定着長)が長くなるが, CFRP 接着鋼板の座屈荷重は, 弾性パテ材を挿入していない場合と同程度向上する場合があることが報告されている<sup>1)</sup>.

本研究では, 弾性パテ材を挿入した場合の CFRP 接着鋼板の座屈荷重向上効果を解明するために, 有限要素を用いた CFRP 接着鋼板の座屈固有値(弾性座屈荷重)を調べ, 弾性パテ材の挿入の有無による弾性座屈荷重向上効果の違いを評価する. そして, 接着剤および弾性パテ材の影響を考慮した弾性座屈荷重の推定方法を提案する.

## 2. 有限要素を用いた CFRP 接着鋼板の座屈固有値

汎用の有限要素解析プログラムMARCにより, 有限要素を用いた固有値解析(Lanczos法)を行い, CFRP 接着鋼板の弾性座屈荷重を算出する. 幅 $b_s = 50\text{mm}$ , 厚さ $t_s = 9\text{mm}$ , 長さ $2l = 400\text{mm}$ , 弾性係数 $E_s = 2.00\text{ kN/mm}^2$ , ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ の鋼板の両面に, 長さ $2l_{cf}$ の1層のCFRPが対称に貼り付けられたモデルの固有値解析を行った. CFRPは2種類(ストランドシートCP, 繊維シートCU)を想定しており, 寸法と材料特性は, それぞれ, 厚さ $t_{cf} = 0.286, 0.121\text{ mm}$ , 弾性係数 $E_{cf} = 640, 240\text{ kN/mm}^2$ としている. 幅は $b_s$ と同じである. 接着樹脂は文献1)を参照して, エポキシ樹脂( $h_e = 0.6, 1.6\text{ mm}$ ,  $E_e = 2500\text{ N/mm}^2$ ,  $\nu_e = 0.34$ ), 弾性パテ材( $h_p = 0.5h_e\text{ mm}$ ,  $E_p = 54.7\text{ N/mm}^2$ ,  $\nu_p = 0.40$ )とし, 弾性パテ材を用いる場合は鋼板とエポキシ樹脂の間に弾性パテ材を設けている. 鋼板長さ $2l = 400\text{ mm}$ に対して,

CFRP接着長さ $2l_{cf}$ を50~400 mmまで50 mmごとに変化させ, 弾性パテ材の有無に対する座屈荷重向上効果を調べた. 有限要素として, 鋼板とエポキシ樹脂, 弾性パテ材は4節点平面応力要素を用い, CFRPは2節点BEAM要素を用い, 1/2モデルとした.

CFRP 接着鋼板の固有値解析結果の一例を図-1に示す. 縦軸は $P_{cr(\text{FE})}$ を, 鋼板単体の弾性座屈荷重 $P_{cr} (= \pi^2 E_s b_s t_s^3 / (48l^2))$ で除した値である. 横軸は CFRP 接着長さ $2l_{cf}$ を, 鋼板長さ $2l = 400\text{ mm}$ で無次元化している. 図-1より, 弾性パテを挿入した場合の $P_{cr(\text{FE})}$ は, 弾性パテ未挿入の場合と比べて小さくなる傾向であるが, CFRP の剛性が低い場合, 弾性パテ材の厚さの分, CFRP 接着鋼板の断面2次モーメントが弾性パテ材を挿入しない場合よりも高くなるため, 弾性パテ材を挿入した場合の方が,  $P_{cr(\text{FE})}$ が大きくなる場合があった.

## 3. 固有値解析による CFRP 接着鋼板の座屈固有値

文献1)で示されている CFRP 接着鋼板の弾性座屈荷重を算出する. 図-2示の beam  $i$  ( $i = 1, 2$ )に対して, 変位 $w_i$ に関する微分方程式は, 次式で与えられる<sup>1)</sup>.

$$\frac{d^4 w_i}{dx^4} - \alpha_i^2 \frac{d^2 w_i}{dx^2} = 0 \quad (1)$$

ここに,  $\alpha_i = \sqrt{P/(EI_i)}$ ,  $EI_i$  は梁(beam)  $i$  の曲げ剛性,  $P$  は載荷荷重である.

式(1)の一般解は, 次式で与えられる.

$$w_i = C_{1i} \sin \alpha_i x + C_{2i} \cos \alpha_i x + C_{3i} x + C_{4i} \quad (2)$$

ここに,  $C_{ji}$  は未定係数( $j = 1 \sim 4$ )である.

未定係数の条件は, 行列形式で次式となる.

$$[B]C = 0 \quad (3)$$

$C$  は未定係数  $C_{ji}$  をまとめたベクトルであり, 鋼板の両面に1層のCFRPが貼り付けられた場合, 式(3)が自明でない解をもつための条件は次式となる.

$$\begin{aligned} & \alpha_1 \cos \alpha_1 x_1 \cos(\alpha_2 x_1 - \alpha_2 x_2) \\ & + \alpha_2 \sin \alpha_1 x_1 (\alpha_2 x_1 - \alpha_2 x_2) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)を満たす最小の $P$  ( $\neq 0$ )が弾性座屈荷重 $P_{Vcr}$ と

キーワード CFRP, 圧縮部材, 弾性座屈

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 TEL.06-6368-0926

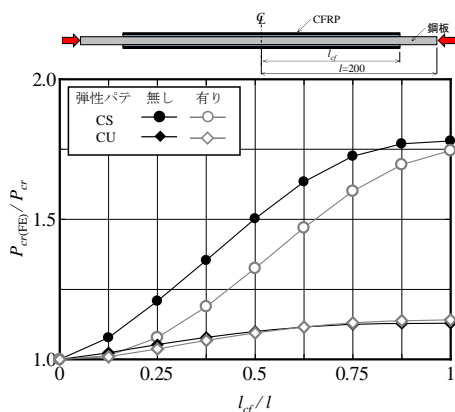
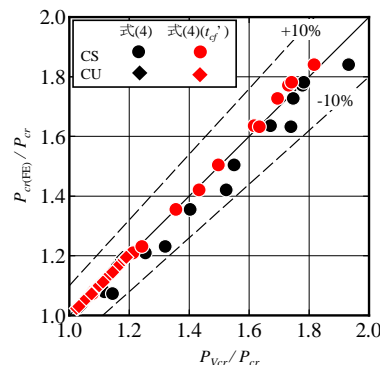
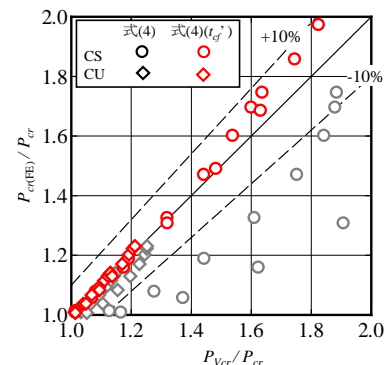


図-1 有限要素を用いた座屈固有値

図-3  $P_{cr(FE)}$ - $P_{Vcr}$  関係(パテ無)図-4  $P_{cr(FE)}$ - $P_{Vcr}$  関係(パテ有)

なる．有限要素を用いた固有値解析では，接着樹脂も平面応力要素でモデル化しているため，本研究では接着樹脂および弾性パテ材の断面 2 次モーメントを考慮し，CFRP 接着鋼板の弾性座屈荷重を算出した．

固有値解析の  $P_{cr(FE)}$  と，式(4)から得られた  $P_{Vcr}$  の関係を図-3, 4に示す．これらの図から，弾性パテ材を挿入しない場合，式(4)から得られた  $P_{Vcr}$  は， $P_{cr(FE)}$  と近い値が得られた．しかし，弾性パテ材を挿入した場合は，式(4)から得られた  $P_{Vcr}$  は， $P_{cr(FE)}$  よりも大きな値となり，危険側に評価されている．

#### 4. 換算 CFRP 厚さを用いた座屈固有値の評価

CFRP 接着鋼板では，接着端近傍の CFRP の全厚さが有効になっていないため，CFRP を完全合成とした場合の軸方向変位よりも大きな変位になる．この CFRP 接着鋼板の軸方向変位と同じ値になるような完全合成 CFRP 接着鋼板とした換算 CFRP 厚さ  $t_{cf}'$  を用い，CFRP 接着鋼板の弾性座屈荷重を評価する．軸力を受ける CFRP 接着鋼板に対する，鋼板に生じる軸力  $N_s(x)$  は次式( $x$  は CFRP 接着中央からの距離)で与えられる<sup>2)</sup>．

$$N_s(x) = \left\{ (1 - \xi_0) \cosh(cx) / \cosh(cl_{cf}) + \xi_0 \right\} P \quad (5)$$

ここに，

$$c = \sqrt{\frac{b_{cf} G_e}{h_e} \cdot \frac{2}{1 - \xi_0} \cdot \frac{1}{E_s A_s}}, \quad \xi_0 = \frac{1}{1 + 2E_{cf} A_{cf} / (E_s A_s)}$$

$G_e$  は接着樹脂のせん断弾性係数である．

CFRP 接着された部分の鋼板の軸方向変位  $\delta_s$  は， $\delta_s = \int_0^{l_{cf}} N_s(x) / (E_s A_s) dx$  から計算できる．

一方，CFRP の有効断面積(換算断面積)  $A_{cf}'$  を用いて CFRP と鋼板の完全合成部材の変位は次式となる．

$$\delta_s = Pl_{cf} / \left( E_s A_s + 2E_{cf} A_{cf}' \right) \quad (6)$$

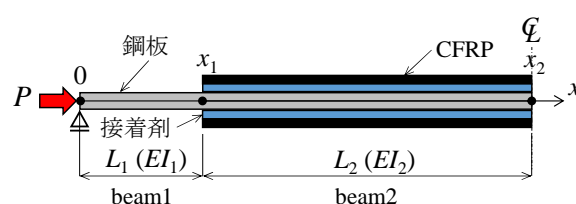


図-2 鋼板 CFRP 接着鋼板の弾性座屈荷重算出モデル

したがって，CFRP 接着鋼板の変位に着目した換算 CFRP 厚さ  $t_{cf}'$  が次式で与えられる．

$$t_{cf}' = \frac{E_s A_s}{2E_{cf} b_{cf}} \left\{ \frac{(1 - \xi_0)(cl_{cf} - \tanh(cl_{cf}))}{(1 - \xi_0)\tanh(cl_{cf}) + \xi_0 cl_{cf}} \right\} \quad (7)$$

固有値解析の  $P_{cr(FE)}$  と，式(7)より得られる換算 CFRP 厚さ  $t_{cf}'$  を用いて，式(4)から算出された  $P_{Vcr}$  との関係を図-3, 4に示す．これらの図から，弾性パテ材の有無に関わらず，式(7)の  $t_{cf}'$  を用いて得られた  $P_{Vcr}$  は，固有値解析の  $P_{cr(FE)}$  に近い値となっていることがわかる．また， $P_{cr(FE)}$  より小さい値が多いため，安全側に評価出来ることがわかる．

#### 5. まとめ

本研究では，有限要素を用いた CFRP 接着鋼板の座屈固有値を調べ，弾性パテ材の挿入の有無による弾性座屈荷重向上効果とその推定方法を示した．

#### 参考文献

- 1) 奥山雄介，宮下剛，緒方辰男，藤野和雄，大垣賀津雄，秀熊佑哉，堀本歴，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，構造工学論文集，Vol.57A，pp.735-746，2011．
- 2) 石川敏之，宮下剛，László Gergely VIGH：一軸引張を受ける CFRP 板接着鋼板に生じる応力の高精度解法，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.1，p.89-100，2013．