

プレストレス導入 CFRP 板接着鋼部材のはく離曲げモーメント向上法

京都大学 学生員 ○清水 優, 正会員 石川 敏之
京都大学 正会員 服部 篤史, 正会員 河野 広隆

1. はじめに

現在, 実構造物への炭素繊維強化樹脂板 (以下, CFRP 板とする) 接着による補修, 補強が行われ始めている. さらに鋼部材の耐荷力向上のため, プレテンションを導入した CFRP 板を接着し, 接着剤が硬化した後プレテンションを開放して鋼部材にプレストレスを導入する工法が提案されている. しかし, CFRP 板の付着端部に定着体を設けずにプレストレス導入工法を用いる場合, 付着端部において接着剤に生じるせん断応力および垂直応力がプレテンションを導入しない場合と比べて大きくなるため, CFRP 板がはく離するときの曲げモーメント (以下, はく離曲げモーメントとする) が低下する¹⁾. そこで本研究では, CFRP 板の端部にプレテンション未導入部を設けることで, はく離曲げモーメントを向上させる工法を提案し, その有効性を明らかにした.

2. 接着剤に生じるせん断応力と垂直応力

図-1 に示す CFRP 板接着鋼部材に等曲げモーメント M が作用する場合, 微小区間における水平方向のつり合いから, 鋼部材の軸力 N_s に関する 2 階の微分方程式が次式で与えられる.

$$d^2 N_s / dx^2 - c^2 N_s = c^2 K \{ M + Z_1 E_s I_s \varepsilon_{pre} / a \} / a \quad (0 \leq x \leq l_p) \quad (1)$$

$$d^2 N_s / dx^2 - c^2 N_s = c^2 K M / a \quad (l_p \leq x \leq l) \quad (2)$$

ここに, $c = \sqrt{a^2 b G_e / (h K Z_1 E_s I_s)}$, $K = 1 / (1 + Z_1 Z_2 r_s^2 / a^2)$, $Z_1 = 1 + I_f / (n I_s)$, $Z_2 = 1 + n A_s / A_f$, $r_s = \sqrt{I_s / A_s}$, $a = d_s + d_f$, $n = E_s / E_f$, x は CFRP 板付着中央からの距離, E_s , E_f はそれぞれ鋼部材および CFRP 板のヤング率, I_s , I_f はそれぞれ鋼部材および CFRP 板の断面二次モーメント, A_s , A_f はそれぞれ鋼部材および CFRP 板の断面積, d_s は鋼部材の図心から鋼部材下縁までの距離, d_f は CFRP 板の図心から CFRP 板上縁までの距離, b は CFRP 板の幅, h , G_e はそれぞれ接着剤の厚さおよびせん断弾性係数, ε_{pre} は CFRP 板に導入されたプレテンションひずみである. 式(1), (2)に対して, $x=0$ で接着剤に生じるせん断応力 τ_e が 0 になる条件, 接着端 ($x=l$) で N_s が 0 となる条件および $x=l_p$ で N_s が左右で等しくなる条件を与えて, 鋼部材の軸力 N_s の解が得られる. また, 接着剤に生じるせん断応力 τ_e は, N_s を x について 1 回微分し, CFRP 板の幅 b で除して得られる.

他方, CFRP 板接着鋼部材の微小区間における鉛直方向のつり合いおよび曲げモーメントのつり合いから, 鋼部材に生じるせん断力 V_s に関する 4 階の微分方程式が次式で与えられる¹⁾.

$$d^4 V_s / dx^4 + \omega^4 V_s = 4\omega^4 \{ Q + J(dN_s / dx) \} / Z_1 \quad (3)$$

ここに, $J = d_f - (Z_1 - 1)d_s$, $\omega = \sqrt[4]{b E_e Z_1 / (4 h E_f I_f)}$, Q は CFRP 板接着鋼部材に生じるせん断力, E_e は接着剤のヤング率である. 式(3)に対して, $x=0$ で鋼部材のたわみ角が 0 となる条件および V_s が 0 となる条件, 接着端で V_s が 0 となる条件および鋼部材に生じる曲げモーメント M_s が M となる条件, $x=l_p$ で V_s , M_s および接着剤に生じる垂直応力 σ_{ye} が左右で等しくなる条件, ならびに σ_{ye} が連続する条件を用いて, 鋼部材に生じるせん断力 V_s の解が得られる. また, 接着剤に生じる垂直応力 σ_{ye} は, V_s を x について 1 回微分し, CFRP 板の幅 b で除して得られる.

3. プレテンション開放によって接着剤に生じる応力

図-2 は, CFRP 板のプレテンションを開放することによって接着剤に生じるせん断応力および垂直応力である. 鋼部材, CFRP 板および接着剤の寸法と材料特性は表-1 の値を用いた. 図-2 より, プレテンション未導入部を設けた場合, プレテンション未導入部を設けない場合と比べて, τ_e および σ_{ye} の最大値が低減していることがわかる. また, $l_n = 100$ mm の場合, $x=l$ では τ_e と σ_{ye} はほぼ 0 であるが, $x=l_p$ では τ_e が高い値を示している. l_p と l_n が十

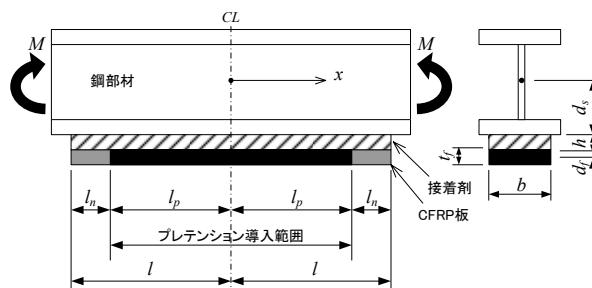


図-1 プレテンション未導入部を設けた CFRP 板接着鋼部材の側面と断面

表-1 鋼部材, CFRP 板および接着剤の寸法と材料特性

(a) 鋼部材		
上下フランジ	幅×板厚[mm]	100×8.0
ウェブ	高さ×板厚[mm]	184×5.5
ヤング率 E_s [GPa]		200
(b) CFRP 板		
幅 b ×板厚 t_f [mm]		100×4.0
ヤング率 E_f [GPa]		300
プレテンションひずみ ε_{pre} [μ]		300
プレテンション導入部の半長さ l_p [mm]		500
(c) 接着剤		
厚さ h [mm]		0.5
ヤング率 E_e [GPa]		2.0
せん断弾性係数 G_e [GPa]		0.74
はく離に対する抵抗強度 σ_p [MPa]		50

キーワード CFRP 板, はく離, プレストレス, 鋼部材

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター 構造物マネジメント工学講座 TEL 075-383-3321

分に長い場合、式(1), (2)から得られる τ_e に対して $l_p \cong \infty$, $l_n \cong \infty$ とすることで, $x = l_p$ におけるせん断応力の収束値が次式で与えられる.

$$\overline{\tau_{ep}} = -cKZ_1E_sI_s\varepsilon_{pre}/(2a^2b) \quad (4)$$

4. 作用曲げモーメントによって接着剤に生じる応力

図-3 は, $l_n = 100$ mm としたとき, 作用曲げモーメントによって接着剤に生じるせん断応力および垂直応力を示している. 図-3 より, $x = l_p$ では τ_e と σ_{ye} の値は非常に小さいが, $x = l$ では共に高い値を示している. $x = l$ におけるせん断応力および垂直応力の収束値は次式で与えられる¹⁾.

$$\overline{\tau_{em}} = -cKM/(ab) \quad (5)$$

$$\overline{\sigma_{yem}} = 4cJKM \left\{ 2 - (c/\omega) + (c/\omega)^3/2 \right\} / \left[abZ_1 \left\{ 4 + (c/\omega)^4 \right\} + 2\omega^2(Z_1 - 1)M/(bZ_1) \right] \quad (6)$$

5. はく離曲げモーメントおよび導入プレテンションの範囲

接着剤のはく離に対する抵抗強度を σ_p としたとき, CFRP 板のはく離を防止できる条件として次式が与えられている²⁾.

$$\sigma_{ye}/2 + \sqrt{(\sigma_{ye}/2)^2 + \tau_e^2} \leq \sigma_p \quad (7)$$

3, 4 章より, 接着剤に生じる応力は, $x = l_p$ において $\overline{\tau_{ep}}$, $\sigma_{ye} = 0$ であり, 接着端において $\overline{\tau_{em}}$, $\overline{\sigma_{yem}}$ である. 式(4), (5)および(6)を式(7)に代入し, $(c/\omega)^4 \cong (c/\omega)^3 \cong 0$, $Z_1 \cong 1$ とすると, CFRP 板のはく離を防止できる条件としてそれぞれ次式が得られる.

$$M \leq 2ab\sigma_p / \left\{ c_1K_1 \left(\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4} \right) \right\} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{pre} \leq 2a^2b\sigma_p / (c_1K_1E_sI_s) \quad (9)$$

ここに, $c_1 = \sqrt{a^2bG_e/(hK_1E_sI_s)}$, $K_1 = 1/(1 + Z_2r_s^2/a^2)$, $\alpha = d_f(2\omega_1 - c_1)$, $\omega_1 = \sqrt{bE_e/(4hE_fI_f)}$ である.

図-4 は, CFRP 板のはく離を防止できる作用曲げモーメントおよび導入プレテンションの範囲であり, 表-1 の条件に対して式(8), (9)を用いて与えられた. 図-4 において, 領域Ⅰはプレテンション未導入部を設けない場合にはく離を防止できる範囲, 領域Ⅱ(領域Ⅰを含む)はプレテンション未導入部を設けた場合にはく離を防止できる範囲をそれぞれ示している. プレテンション未導入部を設けない場合, 作用曲げモーメントおよびプレテンション開放によって接着剤に生じる応力は共に端部に集中する¹⁾. そのため, 図-4 の青線で示すように, 導入プレテンションの増加に伴ってはく離曲げモーメントが低下する. 一方, プレテンション未導入部を設けると, 接着端では作用曲げモーメントによる応力のみが生じる. そのため, 図-4 の赤線で示すように, 導入プレテンションを増加してもはく離曲げモーメントは低下しない.

6. まとめ

本研究ではプレテンションを導入した CFRP 板を鋼部材に接着する際に CFRP 板の付着端部にプレテンション未導入部を設ける工法を提案した. この工法を用いると, CFRP 板の付着端部において, プレテンションの開放によって接着剤に生じるせん断応力および垂直応力がほぼ 0 となるため, はく離曲げモーメントが向上する.

参考文献

- 1) 石川敏之: プレストレスが導入された CFRP 板接着鋼部材のはく離曲げモーメント, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.991-998, 2010.
- 2) Schnerch, D., Dawood, M., Rizkalla, S. and Sumner, E.: Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials, Construction and Building Materials 21, pp.1001-1010, 2007.

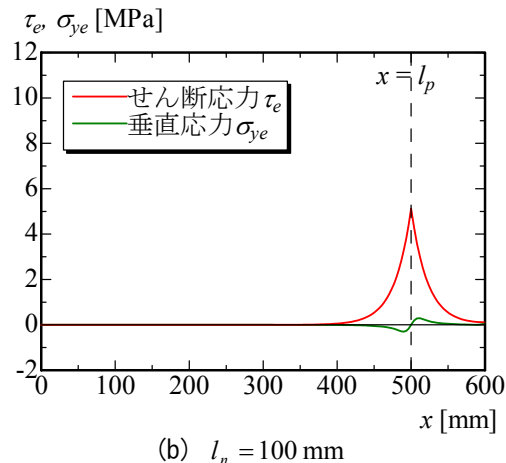
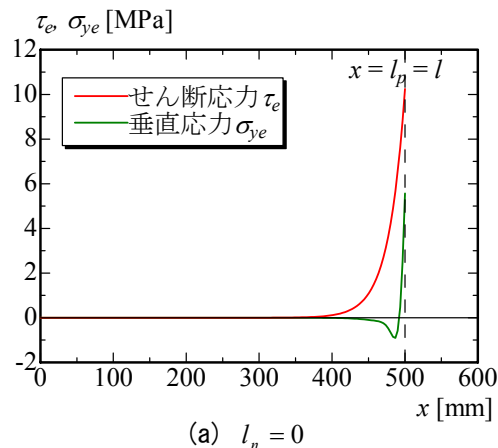


図-2 プレテンション開放によって接着剤に生じるせん断応力と垂直応力

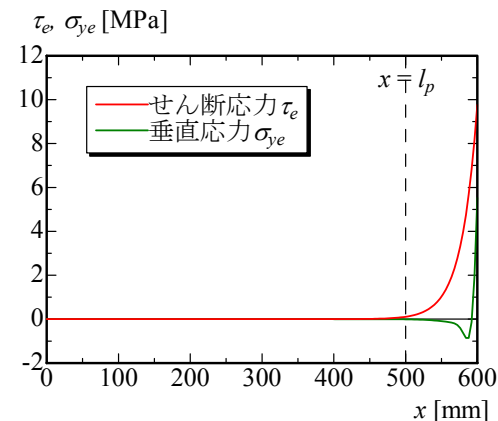


図-3 作用曲げモーメントによって接着剤に生じるせん断応力と垂直応力

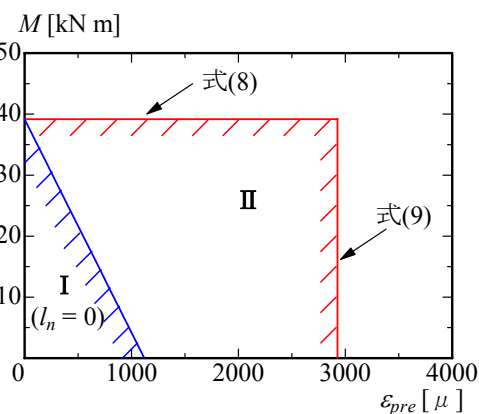


図-4 M と ε_{pre} の範囲