

板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板のはく離強度

名古屋大学 正会員 ○石川 敏之 正会員 山田健太郎
三菱重工橋梁エンジニアリング(株)(元名大院生) 正会員 佐々木 裕

1. 序論

CFRP 板接着による鋼部材の補修法では, CFRP 板の鋼部材からの剥離の防止が課題とされている. 本研究では, 鋼床版のように板曲げを受ける鋼部材の CFRP 板接着補修に着目し, その力学特性を明らかにする. さらに, CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験を行い, CFRP 板が剥離したときの曲げモーメントから CFRP 板のはく離に対する抵抗強度を明らかにする.

2. 基礎微分方程式

板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板を図-1 に示す. 接着剤に生じるせん断応力 τ と垂直応力 σ_y をそれぞれ次式で仮定する.

$$\tau = G_e(u_s - u_c)/h \quad (1), \quad \sigma_y = E_e(v_s - v_c)/h \quad (2)$$

ここに, G_e と E_e はそれぞれ接着剤のせん断弾性係数とヤング係数, u_s と u_c はそれぞれ鋼板と CFRP 板の水平方向の変位, v_s と v_c はそれぞれ鋼板と CFRP 板の鉛直方向の変位および h は接着剤の厚さである.

図-1 に示す CFRP 板接着鋼板の微小区間の断面力のつり合いから, 次式に示される鋼板に生じる軸力 N_s およびせん断力 V_s に対する基礎微分方程式が導出される¹⁾.

$$\frac{d^2 N_s}{dx^2} - c^2 N_s = -HM \quad (3), \quad \frac{d^4 V_s}{dx^4} + 4\omega^4 \frac{d^2 V_s}{dx^2} = J \frac{dN_s}{dx} - 4\omega^4 \frac{E_s t_s^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} P \quad (4)$$

$$\text{ここに, } c = \sqrt{k \frac{G_e}{h} \left\{ \frac{1}{E_s t_s} + \frac{1}{kE_c t_c} + \frac{12a_1 a_2}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \right\}}, \quad H = k \frac{G_e}{h} \cdot \frac{12a_2}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3}, \quad \omega = 4 \sqrt{3k \frac{E_e}{h} \left(\frac{1}{E_s t_s^3} + \frac{1}{kE_c t_c^3} \right)}, \quad k = \frac{b_e}{b_s},$$

$$J = 6k \frac{E_e}{h} \left(\frac{1}{E_s t_s^2} - \frac{1}{kE_c t_c^2} \right), \quad a_1 = \frac{t_s}{2} + \frac{t_c}{2} + h, \quad a_2 = \frac{t_s}{2} - \frac{t_c}{2}, \quad M = P(L+x), \quad E_s \text{ と } E_c \text{ はそれぞれ鋼板と CFRP 板のヤ}$$

ング係数, t_s と t_c はそれぞれ鋼板と CFRP 板の板厚, b_s と b_c はそれぞれ鋼板と CFRP 板の板幅, P は載荷荷重, L は図-1 に示される, 載荷点から CFRP 板の付着端までの距離, および x は図-1 に示される CFRP 板の付着端からの距離である.

3. 接着剤に生じる応力

CFRP 板の接着の両端すなわち $x=0, l$ において $N_s = 0$ になる条件から N_s が次式で与えられる.

$$N_s = A_1 \cosh(cx) + A_2 \sinh(cx) + HP(L+x)/c^2 \quad (5)$$

$$\text{ここに, } A_1 = -\frac{H}{c^2} PL, \quad A_2 = \frac{H}{c^2} P \left\{ \frac{L}{\tanh(cl)} - \frac{L+l}{\sinh(cl)} \right\} \text{ である.}$$

$x=0, l$ において $V_s = 0$ および鋼板のみの曲げモーメントが M になる条件から V_s が次式で与えられる.

$$V_s = e^{\alpha x} \{B_1 \cos(\alpha x) + B_2 \sin(\alpha x)\} + e^{-\alpha x} \{B_3 \cos(\alpha x) + B_4 \sin(\alpha x)\} + \frac{cJ}{4\omega^4 + c^4} \{A_1 \sinh(cx) + A_2 \cosh(cx)\} + \left(\frac{JH}{4\omega^4 c^2} - \frac{E_s t_s^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \right) P \quad (6)$$

$$\text{こ こ に, } B_1 = -e^{-\omega l} [Z_1 \{\cos(\omega l) - \sin(\omega l)\} - Z_2 \sin(\omega l)], \quad B_2 = -e^{-\omega l} [Z_1 \{\cos(\omega l) + \sin(\omega l)\} + Z_2 \cos(\omega l)], \\ B_3 = e^{-\omega l} [Z_1 \{\cos(\omega l) - \sin(\omega l)\} - Z_2 \sin(\omega l)] - Z_3, \quad B_4 = -e^{-\omega l} [Z_1 \{\cos(\omega l) - 3\sin(\omega l)\} - Z_2 \{\cos(\omega l) - 2\sin(\omega l)\}] + Z_3 - Z_4, \\ Z_1 = \frac{J}{4\omega^4 + c^4} \cdot \frac{H}{c} P \left\{ \frac{L}{\sinh(cl)} - \frac{L+l}{\tanh(cl)} \right\} + \left(\frac{JH}{4\omega^4 c^2} + \frac{kE_c t_c^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \right) P, \quad Z_2 = - \left(\frac{c^2 JH}{4\omega^4 + c^4} - 4\omega^4 \frac{kE_c t_c^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \right) \frac{P(L+l)}{2\omega^3},$$

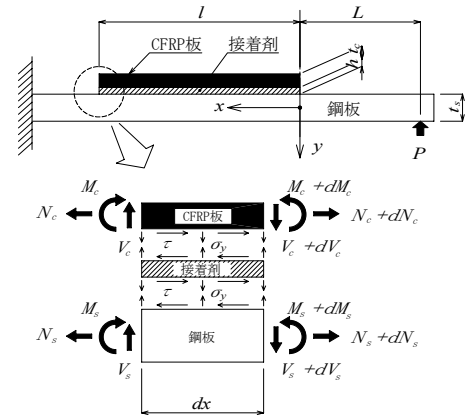


図-1 CFRP 板接着鋼板

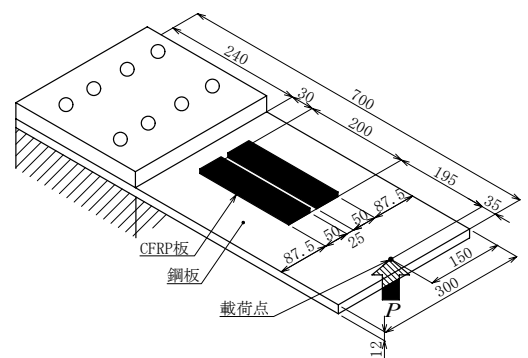


図-2 CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験

キーワード: CFRP 板, はく離強度, 接着剤, 曲げモーメント

連絡先: 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 C1-2(651) TEL 052-789-4514 FAX 052-789-1674

$$Z_3 = \frac{J}{4\omega^4 + c^4} \cdot \frac{H}{c} P \left\{ \frac{L}{\tanh(cl)} - \frac{L+l}{\sinh(cl)} \right\} + \left(\frac{JH}{4\omega^4 c^2} + \frac{kE_c t_c^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \right) P, \quad Z_4 = - \left(\frac{c^2 JH}{4\omega^4 + c^4} - 4\omega^4 \frac{kE_c t_c^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \right) \frac{PL}{2\omega^3} \text{である.}$$

さらに、接着剤に生じるせん断応力 τ 、垂直応力 σ_y はそれぞれ次式で与えられる。

$$\tau = 1/b_c \cdot dN_s/dx \quad (7), \quad \sigma_y = 1/b_c \cdot dV_s/dx \quad (8)$$

表-1 材料定数

鋼板	ヤング係数(GPa)	200
CFRP板	ヤング係数(GPa)	165
接着剤 (エポキシ樹脂)	ヤング係数(GPa)	2.3
	せん断弾性係数(GPa)	0.8

4. CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験

試験体は、図-2 に示すように、鋼板(300×12×700mm, SM400A)の片面に、エポキシ樹脂接着剤を用いて CFRP 板(50×2×200mm)が 2 枚接着されている。鋼板、CFRP 板および接着剤の材料定数を表-1 に示す。接着剤の実測厚さは、0.15～0.39 mmであった。

試験体の一端を固定し、自由端近傍に鉛直上向きに荷重を載荷させて、試験体に曲げモーメントを与えた。試験体の上下を反転させることにより、CFRP 板が曲げの圧縮を受ける場合(試験体 C)および CFRP 板が曲げの引張を受ける場合(試験体 T)の両方について試験を行った。

CFRP 板の付着中央($x=100$ mm)の曲げモーメント M_{center} が±500kN・mmのときの CFRP 板付着中央の断面のひずみ分布を図-3 に示す。縦軸は図-1 に示される鋼板中央からの距離を示す。この図には CFRP 板が接着されていない鋼板のみによるひずみ分布および鋼板と CFRP 板が完全に合成されている場合のひずみ分布も示されている。試験体 C, T 共に、試験結果は合成理論を与えるひずみ分布とほぼ一致している。

全ての試験体において、鋼板の応力が降伏応力に達する前に、固定端側の CFRP 板の付着端から CFRP 板がはく離した。CFRP 板がはく離したときの、CFRP 板付着端($x=200$ mm)の位置の曲げモーメントすなわちはく離モーメント $M_{d,end}$ を表-2 に示す。CFRP 板が曲げの圧縮を受ける試験体 C の $M_{d,end}$ の絶対値は、CFRP 板が曲げの引張を受ける試験体 T のそれよりも 1.63 倍大きい。

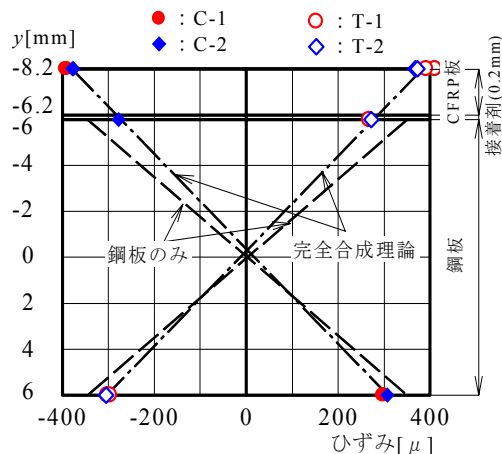


図-3 CFRP 板接着鋼板の断面のひずみ分布

表-2 はく離モーメント $M_{d,end}$

試験体	$M_{d,end}$ (kN・mm)
C-	1 1918
	2 2070
T-	1 -1120
	2 -1255

5. CFRP 板のはく離に対する抵抗強度

試験で使用した CFRP 板接着鋼板の寸法、材料定数およびはく離モーメント $M_{d,end}$ ($=P(L+l)$)を用い、式(7)、(8)から CFRP 板がはく離したときの CFRP 板付着端($x=200$ mm)の接着剤に生じるせん断応力 τ_e 、垂直応力 σ_{ye} および最大主応力 σ_{pe} を計算した。 σ_{pe} の算出には次式を用いた。

$$\sigma_{pe} = \sigma_{ye}/2 + \sqrt{(\sigma_{ye}/2)^2 + \tau_e^2} \quad (9)$$

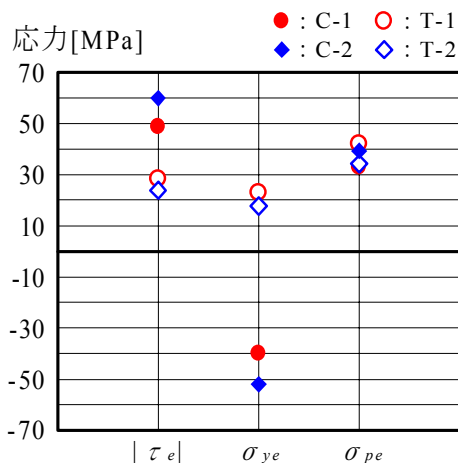
各試験体の τ_e 、 σ_{ye} および σ_{pe} の値を図-4 に示す。図では、 τ_e に対して絶対値が示されている。図から、 τ_e と σ_{ye} の値は、CFRP 板が曲げの圧縮を受ける場合と引張を受ける場合でそれぞれ異なることが分かる。しかし σ_{pe} の値は、試験体 C, T に関わらずほぼ等しい。以上より、板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板における CFRP 板のはく離に対する抵抗強度は、CFRP 板付着端の接着剤に生じる最大主応力を用いて評価できるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板について、接着剤に生じるせん断応力と垂直応力を導出した。さらに、CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験を行い、CFRP 板のはく離に対する抵抗強度が、CFRP 板付着端の接着剤に生じる最大主応力を用いて評価できることを示した。

参考文献

- 1) 西田貴裕・石川敏之・大倉一郎：曲げを受ける CFRP 板接着鋼部材の力学特性，土木学会第 62 回年次学術講演会概要集 第 1 部，第 62 巻，I-270，pp.535-536，2007。

図-4 CFRP 板がはく離したときの τ_e 、 σ_{ye}