

板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板のはく離挙動

名古屋大学大学院 学生会員 ○佐々木 裕 正会員 石川 敏之 正会員 山田 健太郎

1. はじめに

鋼橋において、疲労き裂の発生が多く報告されている．一般に疲労き裂の補修には、大掛りな足場の設置や交通の一部遮断等が行われる．しかし、交通ネットワークの確保の観点から、簡易な疲労き裂の補修・補強法が必要とされている．疲労き裂の補修・補強方法の 1 つとして、疲労き裂をまたいで CFRP 板を接着する方法がある．

CFRP 板接着による補修方法の問題点として、CFRP 板のはく離が挙げられる．本研究では、鋼床版の CFRP 板接着補修を目的として、板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板の力学的特性を明らかにする．そして、CFRP 板接着鋼板を製作し、板曲げを作用させ、CFRP 板のはく離に対する抵抗強度を明らかにする．

2. 断面力に対する基礎微分方程式の導出

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．

$$\tau = G_a \frac{u_s - u_c}{t_a} \quad (1) \quad \sigma_y = E_a \frac{v_s - v_c}{t_a} \quad (2)$$

ここに、 G_a と E_a : 接着剤のせん断弾性係数とヤング率、 u_s と u_c : 鋼板と CFRP 板の水平方向の変位、 v_s と v_c : 鋼板と CFRP 板の鉛直方向の変位、 t_a : 接着剤の厚さ．

微小区間の力の釣り合いから、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⁾．

$$\frac{d^2 N_s}{dx^2} - c^2 N_s = -HM \quad (3) \quad \frac{d^4 V_s}{dx^4} + 4\omega^4 \frac{d^2 V_s}{dx^2} = J \frac{dN_s}{dx} + \frac{E_a b_a}{t_a} \frac{Q}{E_c I_c} \quad (4)$$

ここに、 $c = \sqrt{\frac{G_a b_a}{t_a} \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right) + \frac{a^2}{E_s I_s + E_c I_c}}$ 、 $H = \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{a}{E_s I_s + E_c I_c} \right)$ 、 $\omega = \sqrt[4]{\frac{1}{4} \frac{E_a b_a}{t_a} \left(\frac{1}{E_s I_s} + \frac{1}{E_c I_c} \right)}$ 、 $J = \frac{E_a b_a}{t_a} \frac{1}{2} \left(\frac{t_s}{E_s A_s} - \frac{t_c}{E_c A_c} \right)$ 、

$a = t_a + t_s/2 + t_c/2$ 、 $M = P(L+l)$ 、 E_s と E_c : それぞれ鋼板と CFRP 板のヤング率、 A_s と A_c : 鋼板と CFRP 板の断面積、 I_s と I_c : 鋼板と CFRP 板の断面 2 次モーメント、 P : 載荷荷重、 Q : せん断力．

3. 接着層に生じる応力の導出

$x=0, l$ において、 $N_s = 0$ となる条件から N_s が次式で与えられる．

$$N_s = A_1 \cosh(cx) + A_2 \sinh(cx) - \frac{H}{c^2} PL \left(1 + \frac{x}{L} \right) \quad (5)$$

ここに、 $A_1 = -\frac{H}{c^2} PL$ 、 $A_2 = \frac{H}{c^2} PL \left\{ \frac{1}{\tanh(cl)} - \frac{1+l/L}{\sinh(cl)} \right\}$ ．

$x=0, l$ において $V_s = 0$ および鋼板に生じる曲げモーメントが M となる条件から V_s が次式で与えられる．

$$V_s = e^{\alpha x} (B_1 \cos \alpha x + B_2 \sin \alpha x) + e^{-\alpha x} (B_3 \cos \alpha x + B_4 \sin \alpha x) + \left(\frac{J}{\omega^4} \right) \frac{dN_s}{dx} - \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_c I_c} P \quad (6)$$

ここに、 $B_1 = -\left\{ Z_3 (\cos \omega l - \sin \omega l) - Z_4 \sin \omega l / 2\omega^3 \right\} / e^{\omega l}$ 、 $B_2 = -\left\{ Z_3 (\cos \omega l + \sin \omega l) + Z_4 \sin \omega l / 2\omega^3 \right\} / e^{\omega l}$ 、 $B_3 = -Z_1 - B_1$ 、

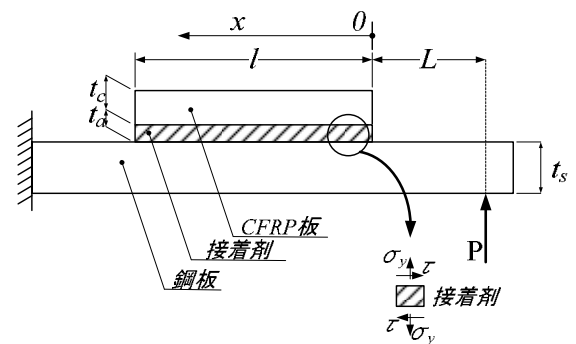


図-1 CFRP 板接着鋼板のモデル

$$B_4 = B_1 - B_2 - B_3 - Z_2/2\omega^3, \quad Z_1 = -\frac{E_s I_s P}{E_s I_s + E_c I_c} + \frac{J}{\omega^4} \left\{ cA_2 + \frac{H}{c^2} \right\} + P, \quad Z_2 = J \left(\frac{c}{\omega} \right)^4 A_1 + \frac{E_a b_a}{t_a} \frac{PL}{E_s I_s},$$

$$Z_3 = \frac{J}{\omega^4} \left\{ cA_1 \sinh(cl) + cA_2 \cosh(cl) + \frac{H}{c^2} P \right\} + P, \quad Z_4 = J \left(\frac{c}{\omega} \right)^4 \{ A_1 \cosh(cl) + cA_2 \sinh(cl) \} + \frac{E_a b_a}{t_a} \frac{P(L+l)}{E_s I_s}.$$

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

$$\tau = \frac{1}{b_a} \frac{dN_s}{dx} \quad (7) \quad \sigma_y = \frac{1}{b_a} \frac{dV_s}{dx} \quad (8)$$

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(700×300×12mm, SM400)の片面にCFRP板(200×50×2mm)を2枚接着したものである。片持ちされた試験体の自由端近傍に、荷重を載荷した。荷重の向きを変えることで、CFRP 板接着鋼板に正曲げ、または負曲げを与えた。

CFRP 板がはく離したときの、CFRP 板中央位置での曲げモーメントを表-1 に示す。負曲げを受ける場合、すなわちCFRP 板が引張を受ける場合、CFRP 板がはく離したときの曲げモーメントの絶対値は正曲げの場合よりも小さい。

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、材料定数を用い、式(7)、(8)からCFRP 板がはく離したときのCFRP 板附着端の接着剤に生じるせん断応力 τ 、垂直応力 σ_y 、および主応力 σ_p を計算した。 τ 、 σ_y および σ_p を図-3 に示す。

正曲げと負曲げの比較において、 τ と σ_y に対してCFRP 板がはく離したときの τ の値あるいは σ_y の値はそれぞれ異なる。しかし正曲げの σ_p と負曲げのそれがほぼ等しい。

したがって、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、接着剤に生じる主応力を用いて評価できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、板曲げを受けるCFRP 板接着鋼板の、接着剤に生じる応力を導出し、CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験を行った。CFRP 板のはく離に対する抵抗強度が、接着剤の主応力を用いて評価できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 西田貴裕・石川敏之・大倉一郎 (2007)：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，pp.535-536。
- 2) 中村一史・諸井敬嘉・鈴木博之・前田研一・入部孝夫 (2005)：溶接継手に発生した疲労き裂の積層CFRP 板による補修効果，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.89-96。

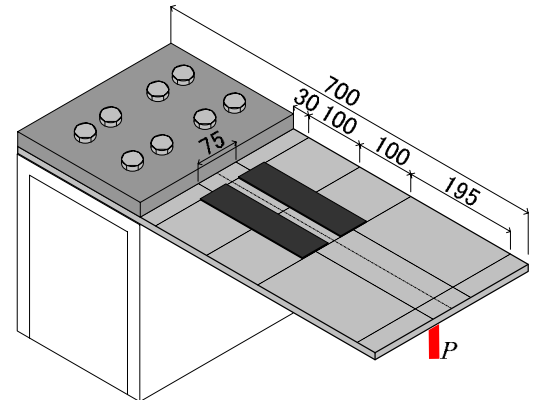


図-2 CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験

表-1 CFRP 板のはく離モーメント

試験体	曲げモーメント(kN・mm)
正曲げ	1 1918
	2 2070
負曲げ	1 -1120
	2 -1255

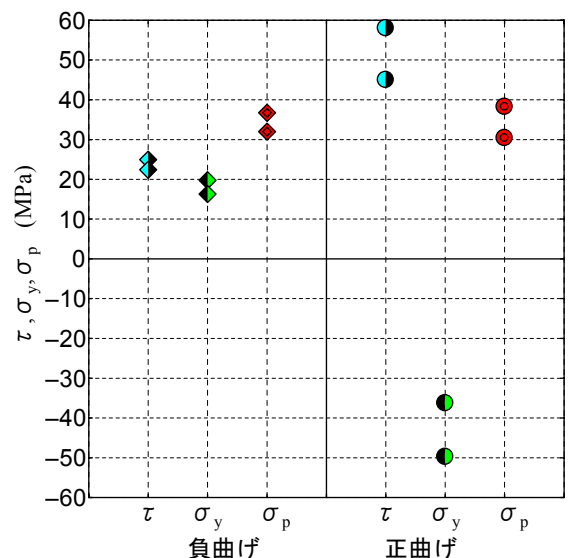


図-3 CFRP 板端部の接着剤に生じる応力