

第 部門

端部ステップによる CFRP 板接着工法の開発

大阪大学 学生員 ○小村 啓太, 正会員 石川 敏之, 正会員 大倉 一郎
日本国土開発(株) 正会員 横田 季彦 日鉄コンポジット(株) 正会員 斉藤 誠

1. はじめに

近年, 炭素繊維強化樹脂板 (以後, CFRP 板と呼ぶ) による鋼構造物の補修・補強が行われ始めている. 鋼構造物に剛性の高い CFRP 板が接着されると, CFRP 板の付着端近傍の接着剤に生じるはく離せん断応力が高くなり, CFRP 板が鋼構造物からはく離する場合がある. し

たがって, はく離せん断応力を低減させる方法が必要とされる. 図 - 1 に示す CFRP 板の付着端部に段差を設けて鋼板に接着する方法 (以後, 端部ステップ接着工法と呼ぶ) では, 段階的に CFRP 板に力が伝達されるため, はく離せん断応力が低減される. しかし, はく離せん断応力が低下するような CFRP 板の付着端部の段差は明らかにされていない. 本研究では, 端部ステップ接着工法について, 鋼板応力を所定の値まで低減させる CFRP 板の付着長さ, およびはく離せん断応力を理論解析により明らかにする.

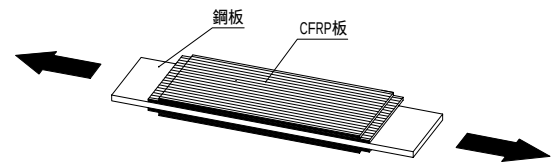


図 - 1 端部ステップ接着工法

2. 基礎微分方程式とその解

端部ステップによる CFRP 板接着鋼板の力学モデルを図 - 2 に示す. この図に示すように, CFRP 板 1 と 2 は鋼板の両面に対称に接着されており, CFRP 板 1 と 2 の付着半長さはそれぞれ l_1 , l_2 である. 接着剤はせん断応力のみを伝達し, 鋼板と CFRP 板は引張応力のみを伝達すると仮定して, 鋼板応力 σ_s に対する基礎微分方程式がそれぞれ次式で与えられる.

$$\frac{d^4 \sigma_s}{dx^4} - 2(cr)^2 \frac{d^2 \sigma_s}{dx^2} + (cs)^4 \sigma_s = \xi_0 (cs)^4 \sigma_{sn} \quad (0 \leq x \leq l_2) \quad (1) \quad \frac{d^2 \sigma_s}{dx^2} - (c\lambda)^2 \sigma_s = -(1+J)(c\lambda)^2 \xi_0 \sigma_s \quad (l_2 \leq x \leq l_1) \quad (2)$$

ここに, $c = \sqrt{G_{e1}/h_1} \sqrt{2/(1-\xi_0)} / \sqrt{E_s t_s}$, $r = \sqrt{\lambda^2 \{1 + (1+J)^2 \xi_0 (1-\xi_0)/(DJ)\} / 2}$, $s = \left[(1+J)^2 \xi_0 (1-\xi_0) \lambda^2 / (DJ) \right]^{0.25}$, $D = h_2 G_{e1} / (h_1 G_{e2})$, $\lambda = \sqrt{(1-\xi_0) / \{1 - (1+J)\xi_0\}}$, $\xi_0 = 1 / (1 + 2E_c t_c / E_s t_s)$, $E_c t_c = E_{c1} t_{c1} + E_{c2} t_{c2}$, $\varphi_c = E_{c2} t_{c2} / (E_{c1} t_{c1})$, $J = \{2\varphi_c E_c t_c / (E_s t_s)\} / \{2E_c t_c / (E_s t_s) + \varphi_c + 1\}$, E_s と t_s : それぞれ鋼板のヤング係数と板厚, E_{c1} と t_{c1} : それぞれ, CFRP 板 1 のヤング係数および板厚, E_{c2} と t_{c2} : それぞれ, CFRP 板 2 のヤング係数および板厚, σ_{sn} : CFRP 板が接着されていない位置で鋼板に生じる応力, G_{e1} と h_1 : それぞれ, 接着剤 1 のせん断弾性係数と片面厚さ, G_{e2} と h_2 : それぞれ, 接着剤 2 のせん断弾性係数と片面厚さ.

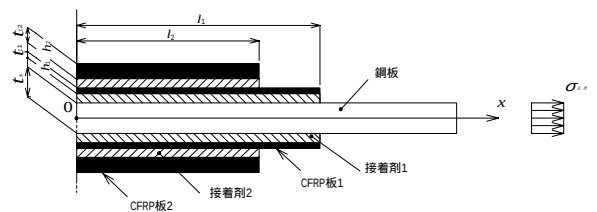


図 - 2 端部ステップによる CFRP 板接着鋼板

式(1)および式(2)の基礎微分方程式の一般解に対し

て, $x = l_2$ において, 鋼板の引張応力が等しいこと, 接着剤 1 に生じるせん断応力が等しいこと, および CFRP 板 2 の引張応力が 0 であること, ならびに $x = l_1$ において, 鋼板の引張応力が σ_{sn} になることを考慮して, 鋼板に生じる応力 σ_s および接着剤 1 と 2 に生じるせん断応力 τ_1 , τ_2 がそれぞれ次式で与えられる.

$$\sigma_s = \begin{cases} \{A_1 \cosh(\alpha cx) + A_2 \cosh(\beta cx) + \xi_0\} \sigma_{sn} & (0 \leq x \leq l_2) \\ [B_1 \sinh\{\lambda c(x-l_2)\} + B_2 \cosh\{\lambda c(x-l_2)\} + (1+J)\xi_0] \sigma_{sn} & (l_2 \leq x \leq l_1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\tau_1 = \begin{cases} \{\alpha A_1 \sinh(\alpha cx) + \beta A_2 \sinh(\beta cx)\} ct_s \sigma_{sn} / 2 & (0 \leq x \leq l_2) \\ [B_1 \cosh\{\lambda c(x-l_2)\} + B_2 \sinh\{\lambda c(x-l_2)\}] \lambda ct_s \sigma_{sn} / 2 & (l_2 \leq x \leq l_1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_2 = \left\{ (\lambda^2 - \alpha_s^2) \beta_s A_{1s} \sinh(\alpha_s cx) + (\lambda^2 - \beta_s^2) \beta_s A_{2s} \sinh(\beta_s cx) \right\} ct_s \sigma_{sn} / \{2(1+J)\xi_0 \lambda^2\} \quad (5)$$

ここに, $\alpha = \sqrt{r^2 + \sqrt{r^4 - s^4}}$, $\beta = \sqrt{r^2 - \sqrt{r^4 - s^4}}$, A_1 , A_2 , B_1 , B_2 : それぞれ, l_1 , l_2 が支配する未定係数.

3. 鋼板応力と接着剤のはく離せん断応力

鋼板に生じる応力は中央で最も低下する．鋼板中央の応力の低下率 σ_s/σ_{sn} は式(3)へ $x=0$ を代入し，両辺を σ_{sn} で除して与えられる． $E_c t_c/(E_s t_s)=0.5$ ， $\varphi_c=2.0$ ， $D=1.0$ に対して，鋼板中央の σ_s/σ_{sn} と cl_1 の関係を図-3に示す．この図から分かるように，CFRP板2の接着長さが長くなるに従って， σ_s/σ_{sn} は低下する．

接着剤に生じるせん断応力は CFRP 板の付着端で最大となる．式(4)および式(5)へ $x=l_1$ ， l_2 をそれぞれ代入し， cl_1 が大きい場合，接着剤1と2のはく離せん断応力 τ_{1e} と τ_{2e} はそれぞれ次式で与えられる．

$$\tau_{1e} = \sqrt{(1-\xi_0)\{1-(1+J)\xi_0\}} ct_s \sigma_{sn} / 2 \quad (6)$$

$$\tau_{2e} = \sqrt{J(1-\xi_0)\xi_0/D} ct_s \sigma_{sn} / 2 \quad (7)$$

接着剤1と2のはく離せん断応力 τ_{1e} と τ_{2e} が等しくなる条件は式(6)と式(7)の右辺を等値して，次式となる．

$$\varphi_c = D\{2E_c t_c/(E_s t_s) + 1\} \quad (8)$$

式(8)を満足する場合， τ_{1e} と τ_{2e} は共に次式となる．

$$\tau_{se} = \tau_{0e} / \sqrt{1+D} \quad (9)$$

$$\text{ここに，} \tau_{0e} = (1-\xi_0) ct_s \sigma_{sn} / 2 \quad (10)$$

τ_{0e} は厚さ t_c ($=t_{c1}+t_{c2}$) の付着長さが無限の CFRP 板を鋼板に接着した場合の接着剤のはく離せん断応力である．式(9)より τ_{se} は τ_{0e} と比べて $1/\sqrt{1+D}$ 小さくなる． $E_c t_c/(E_s t_s)=0.5$ ， $D=1.0$ に対して，式(8)を満足する場合， $\tau_e/(ct_s \sigma_{sn})$ と cl_1 の関係を図-4に示す．この図から分かるように， cl_1 が小さいとき， τ_{1e} は τ_{2e} より大きいが， cl_1 が大きくなると， τ_{1e} と τ_{2e} は共に式(9)に近づく．

4. CFRP 板の接着長さ

σ_s/σ_{sn} および τ_{1e} をそれぞれ ξ_0 および τ_{se} に近づけるためには付着長さが無限の CFRP 板を鋼板に接着しなければならない．そこで，式(8)を満足する場合， $\sigma_s/\sigma_{sn}=1.01\xi_0$ および $\tau_{1e}=1.01\tau_{se}$ となる l_2/l_1 と cl_1 の関係を算出し， $E_c t_c/(E_s t_s)=0.5$ ， $D=1.0$ に対して， l_2/l_1 と cl_1 の関係を図-5に示す．図の斜線部分では，鋼板中央の応力は $1.01\xi_0$ より低減し，はく離せん断応力は $1.01\tau_{se}$ より小さい．図-5から分かるように，図の斜線部分において $\sigma_s/\sigma_{sn}=1.01\xi_0$ を満足する曲線と $\tau_{1e}=1.01\tau_{se}$ を満足する曲線の交点 A で cl_1 が最小となる．交点 A は $E_c t_c/(E_s t_s)$ によって変化する． $0.125 < E_c t_c/(E_s t_s) < 1.0$ の範囲において，交点 A の l_2/l_1 と cl_1 の関係，および交点 A の cl_1 と $E_c t_c/(E_s t_s)$ の関係はそれぞれ次式で近似できる．

$$l_2/l_1 = 0.32 \ln(cl_1) - 0.02 \quad (11) \quad cl_1 = 1.6 \ln(E_c t_c/(E_s t_s)) + 9.8 \quad (12)$$

5. まとめ

本研究では，端部ステップ接着工法の力学特性を理論解析により解明し，以下の結論を得た．

1. 接着剤1と2のはく離せん断応力 τ_{1e} ， τ_{2e} は付着端部に段差を持たない CFRP 板を鋼板に接着した場合はく離せん断応力より $1/\sqrt{1+D}$ 小さくなる．
2. 鋼板中央の応力が $1.01\xi_0$ まで低減し，はく離せん断応力が $1.01\tau_{se}$ となる CFRP 板1と2の接着長さを式(11)および式(12)で与えた．

参考文献 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，pp.239-249，2001．

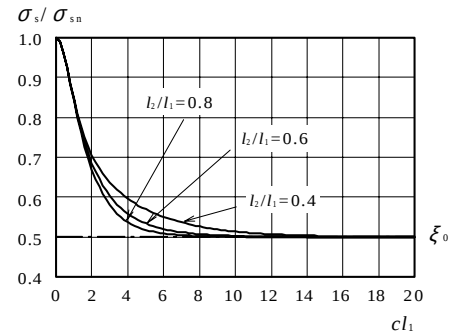


図-3 σ_s/σ_{sn} と cl_1 の関係

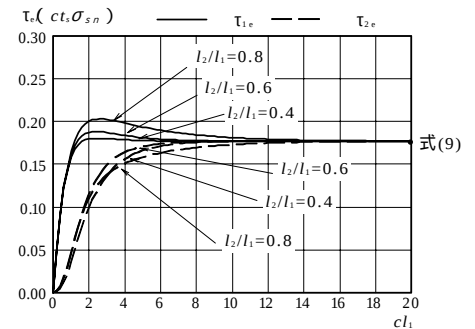


図-4 $\tau_e/(ct_s \sigma_{sn})$ と cl_1 の関係

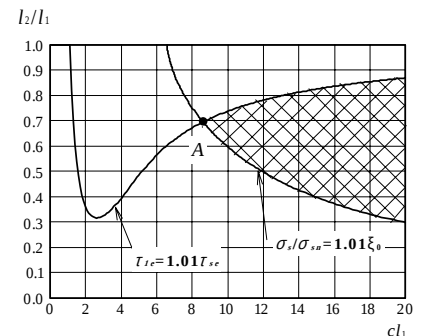


図-5 $\tau_e/(ct_s \sigma_{sn})$ と cl_1 の関係