

端部ステップ接着工法における CFRP 板の最小付着長と段差長

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、CFRP 板のはく離を防止するためには、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 板の付着端に段差を設ける方法（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、CFRP 板がはく離するときの荷重が大きくなる。しかし、はく離荷重が大きくなるときの CFRP 板の付着端部の段差長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おいて、鋼板応力を所定の値まで低減させ、かつはく離荷重を大きくさせる CFRP 板の付着長および段差長を理論解析により明らかにする。

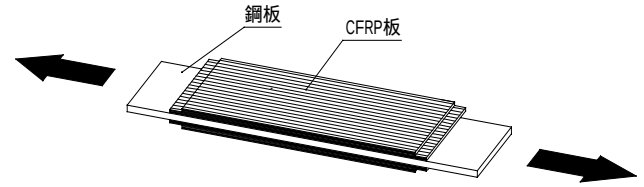


図 - 1 端部ステップ接着工法

図 - 1 に示す CFRP 板の付着端に段差を設ける方法（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、CFRP 板がはく離するときの荷重が大きくなる。しかし、はく離荷重が大きくなるときの CFRP 板の付着端部の段差長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おいて、鋼板応力を所定の値まで低減させ、かつはく離荷重を大きくさせる CFRP 板の付着長および段差長を理論解析により明らかにする。

2. 基礎微分方程式とその解

付着端に段差を設けた CFRP 板接着鋼板の側面を図 - 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 に関する基礎微分方程式が次式で与えられる^{1), 2)}。

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

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の鋼板に生じる応力、 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。

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。

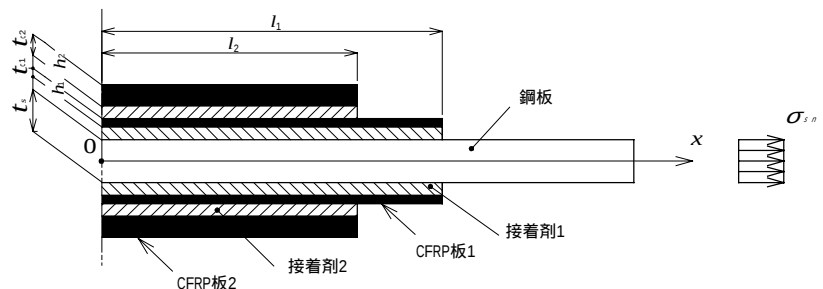


図 - 2 付着端部に段差を設けた CFRP 板接着鋼板

キーワード CFRP 板 はく離せん断応力 端部ステップ接着工法 最小付着長 段差長

連絡先 大阪大学 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

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

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

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

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, 定数.

3. 鋼板応力と接着剤に生じるはく離せん断応力

鋼板に生じる応力は鋼板の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1の付着長さが長くなるに従って, σ_s/σ_{sn} はCFRP板1, 2および鋼板が完全に合成された場合の鋼板中央の応力の低下率 $\xi_0 (=1/(1+2E_c t_c/E_s t_s))$ に近づく.

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. したがって, 式(4)および式(5)へ $x=l_1$, l_2 をそれぞれ代入し, 接着剤1と2のはく離せん断応力 τ_{1e} と τ_{2e} が与えられる. これらのはく離せん断応力と cl_1 の関係を図-4に示す. この図は $E_c t_c/(E_s t_s)=0.5$, $\varphi_c=2.0$, $D=1.0$ に対するものである. 図-4から分かるように, cl_1 が無限の場合, 接着剤1と2のはく離せん断応力 τ_{1e} と τ_{2e} はそれぞれ次式となる.

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

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

端部ステップ接着工法ではCFRP板1と2が同時にはく離する場合, 最もCFRP板のはく離荷重が大きくなる. 式(6)と式(7)の右辺を等値して, τ_{1e} と τ_{2e} が等しくなるときのCFRP板1と2の剛性比 φ_{c0} が次式で与えられる.

$$\varphi_{c0} = D\{2E_c t_c/(E_s t_s) + 1\} \quad (8)$$

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

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

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

τ_{0e} は $l_1=l_2$ および $h_2=0$ の場合の接着剤1のはく離せん断応力¹⁾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.

4. CFRP板の最小付着長と段差長

鋼板中央の応力が ξ_0 となるようなCFRP板の付着長さを算出する場合, σ_s/σ_{sn} が ξ_0 となる cl_1 は無限となるので, $\sigma_s/\sigma_{sn}=1.01\xi_0$ および $\tau_{1e}=1.01\tau_{se}$ を満足する l_1 の最小値 l_{1s} をCFRP板の最小付着長とする. $\sigma_s/\sigma_{sn}=1.01\xi_0$ および $\tau_{1e}=1.01\tau_{se}$ を満足する l_{1s} および l_2/l_1 はそれぞれ次式で与えられる.

$$l_{1s} = [1.6 \ln\{E_c t_c/(E_s t_s)\} + 9.8] / c \quad (11) \quad l_2/l_1 = 0.32 \ln(cl_{1s}) - 0.02 \quad (12)$$

ここに, $0.125 < E_c t_c/(E_s t_s) < 1.0$, $l_1 \geq l_{1s}$.

- 参考文献 1) 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.
- 2) 石川敏之, 大倉一郎, 喜多伸明: 繊維シートが挿入された炭素繊維プレート接着鋼板のはく離せん断応力, 構造工学論文集 Vol.52A, pp.1317-1326, 2006.

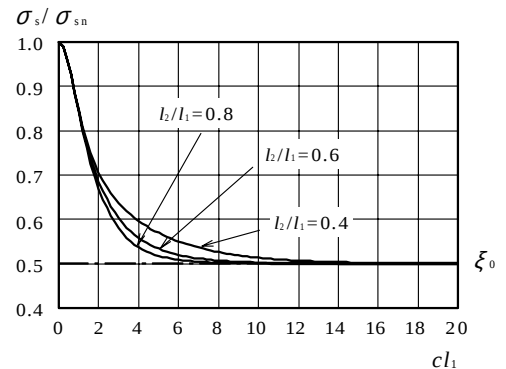


図-3 σ_s/σ_{sn} と cl_1 の関係

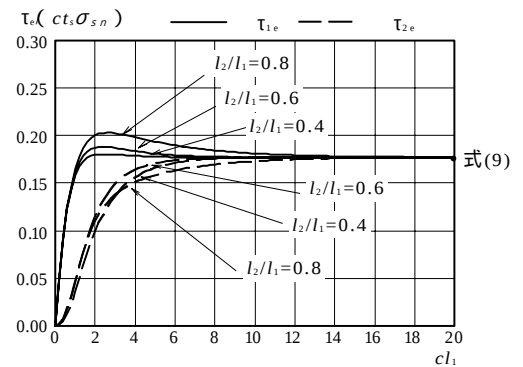


図-4 $\tau_e/(ct_s \sigma_{sn})$ と cl_1 の関係