

## 切断鋼板に接着された CFRP 板のはく離挙動の理論解析

Theoretical Analysis of Debonding Behavior of CFRP Plates Adhered to Butted Steel Plates

石川敏之\*, 大倉一郎\*\*

Toshiyuki ISHIKAWA and Ichiro OKURA

\*博(工), 大阪大学特任研究員 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)

\*\*工博, 大阪大学助教授 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)

Recently, research reports on application of CFRP plates to repair of fatigue cracks initiated in steel structures are published. CFRP plates are often separated from steel plates, due to high shear stress produced in the adhesive at the end of CFRP plates and at the edge of fatigue cracks. The debonding behavior of CFRP plates from the steel plate which is divided into two by a fatigue crack can be given by that for butted steel plates. In this research, the debonding behavior of CFRP plates adhered to butted steel plates is theoretically investigated. Then, the debonding behavior is also analyzed for the case that a fiber sheet is inserted between steel and CFRP plates.

Key Words: CFRP plate, fiber sheet, debonding shear stress, butted steel plates

キーワード: CFRP 板, 繊維シート, はく離せん断応力, 切断鋼板

## 1. 序論

炭素繊維強化樹脂板(以下, CFRP 板と呼ぶ)は, その重量が鋼やコンクリートと比べて軽いこと, CFRP 板を接着する際に, 特別な機材や大掛かりな足場を必要とせず施工が簡易になるなどの利点があるため, 鋼構造物の補修・補強に用いられ始めている<sup>1), 2)</sup>. そして近年, 鋼構造物に生じる疲労亀裂に対して, CFRP 板による補修に関する研究が行なわれている<sup>3)~7)</sup>.

CFRP 板による鋼構造物の疲労亀裂の補修を考えた場合, 図-1 に示すように, 二つに切断された鋼板を跨いで接着された CFRP 板のはく離挙動の解明が, CFRP 板による疲労亀裂補修の可能性の基礎を与える. 以後, 図-1 に示すモデルを CFRP 板接着・切断鋼板と呼ぶ.

引張力を受ける CFRP 板接着・切断鋼板では, CFRP 板付着端の接着剤および鋼板切断縁の接着剤に高いせん断応力が生じる<sup>5), 8)</sup>. したがって, CFRP 板接着・切断鋼板では, CFRP 板付着端と鋼板切断縁の両者に対して, 高いせん断力による CFRP 板のはく離を防止しなければならない.

他方, 一枚の鋼板に CFRP 板が接着された場合に対して, 著者らはこれまでに, CFRP 板と鋼板との間に, CFRP 板の剛性よりかなり小さい剛性を持つ繊維シートを挿入することにより, 繊維シートが未挿入の場合より, CFRP 板付着端のせん断応力を低下できることを示した<sup>9), 10)</sup>.

以上より, 本研究では, 引張力を受ける CFRP 板接着・切断鋼板に対して, 繊維シートが未挿入の場合と繊維シートが挿入された場合の両者について, CFRP 板のはく離挙動を理論解析によって明らかにし, CFRP 板のはく離が防止される条件を与える.

## 2. はく離せん断応力

## 2. 1 基礎微分方程式とその解

## (1) 繊維シート未挿入の場合

CFRP 板接着・切断鋼板の側面図を図-2 に示す. CFRP 板付着長さの中央の位置で鋼板が切断されており, CFRP 板は鋼板の上下面に対称に接着されている. 接着剤がせん断力のみを伝達すると仮定して, 鋼板応力 $\sigma_s$ に対して, 次の 2 階微分方程式が与えられる<sup>8)</sup>.

$$\frac{d^2 \sigma_s}{dx^2} - c^2 \sigma_s = -c^2 \xi_0 \sigma_{sn} \quad (1)$$

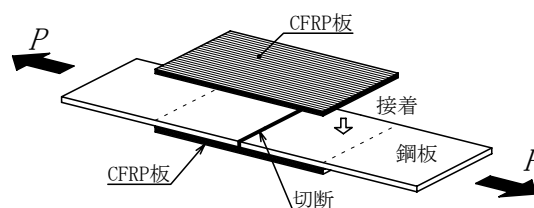


図-1 CFRP 板接着・切断鋼板

ここに,

$$c = \sqrt{\frac{G_{e1}}{h_1}} \sqrt{\frac{2}{1-\xi_0}} \frac{1}{\sqrt{E_s t_s}} \quad (2)$$

$$\xi_0 = \frac{E_s t_s}{E_s t_s + 2E_c t_c} = \frac{1}{1 + 2\frac{E_c t_c}{E_s t_s}} \quad (3)$$

$\sigma_s$  : CFRP 板が接着されている範囲の鋼板に生じる応力,

$\sigma_{sn}$  : CFRP 板が接着されていない位置の鋼板に生じる応力,

$E_s, t_s$  : それぞれ, 鋼板のヤング率と鋼板の板厚,

$E_c, t_c$  : それぞれ, CFRP 板のヤング率と片面の厚さ,

$G_{e1}, h_1$  : それぞれ, 接着剤のせん断弾性係数と片面の厚さ,

$x$  : 鋼板切断縁からの距離.

図-2 を参照して, 鋼板切断縁  $x=0$  において  $\sigma_s=0$ , CFRP 板付着端  $x=l$  において  $\sigma_s=\sigma_{sn}$  の境界条件に対して式(1)を解くことにより, 鋼板に生じる応力  $\sigma_s$  および CFRP 板に生じる応力  $\sigma_c$  ならびに接着剤に生じるせん断応力  $\tau_0$  が, それぞれ次式で与えられる<sup>8)</sup>.

$$\sigma_s = \xi_0 \left[ \left\{ \frac{1}{\tanh(cl)} + \frac{1-\xi_0}{\xi_0} \frac{1}{\sinh(cl)} \right\} \sinh(cx) - \cosh(cx) + 1 \right] \sigma_{sn} \quad (4)$$

$$\sigma_c = \frac{-t_s \xi_0}{2t_c} \left[ \left\{ \frac{1}{\tanh(cl)} + \frac{1-\xi_0}{\xi_0} \frac{1}{\sinh(cl)} \right\} \sinh(cx) - \cosh(cx) - \frac{1-\xi_0}{\xi_0} \right] \sigma_{sn} \quad (5)$$

$$\tau_0 = \frac{ct_s \xi_0}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{\tanh(cl)} + \frac{1-\xi_0}{\xi_0} \frac{1}{\sinh(cl)} \right\} \cosh(cx) - \sinh(cx) \right] \sigma_{sn} \quad (6)$$

ここに,  $l$  : CFRP 板の付着半長さ.

## (2) 繊維シート挿入の場合

繊維シートが挿入された場合の CFRP 板接着・切断鋼板の側面図を図-3 に示す. 接着剤 1 のせん断弾性係数と厚さは, 繊維シート未挿入の場合の接着剤のそれらと同じである. CFRP 板付着長さの中央の位置で鋼板が切断されており, CFRP 板と繊維シートは鋼板の上下面に対称に接着されている. 接着剤 1 と 2 が共にせん断力のみを伝達すると仮定して, 鋼板応力  $\sigma_s$  に対して, 次の 4 階微分方程式が与えられる<sup>9)</sup>.

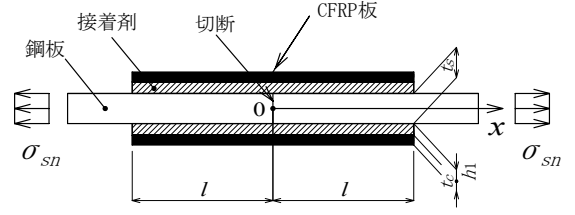


図-2 CFRP 板接着・切断鋼板の側面図

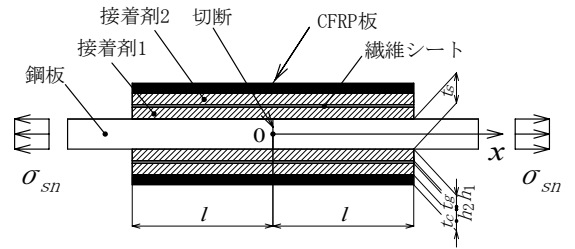


図-3 繊維シートが挿入された CFRP 板接着・切断鋼板の側面図

$$\frac{d^4 \sigma_s}{dx^4} - 2(cr)^2 \frac{d^2 \sigma_s}{dx^2} + (cs)^4 \sigma_s = \frac{\xi_0}{1+F} (cs)^4 \sigma_{sn} \quad (7)$$

ここに,

$$r = \sqrt{\frac{1-\xi_0}{2F} \left\{ \xi_0 + F + \frac{(1+F-\xi_0)\xi_0}{D(1-\xi_0)} \right\}} \quad (8)$$

$$s = \left\{ \frac{\xi_0(1-\xi_0)(1+F)}{DF} \right\}^{0.25} \quad (9)$$

$$F = \frac{2E_g t_g}{E_s t_s + 2E_c t_c} = \frac{E_g t_g}{E_c t_c} (1-\xi_0) \quad (10)$$

$$D = \frac{h_2}{h_1} \frac{G_{e1}}{G_{e2}} \quad (11)$$

$E_g, t_g$  : それぞれ, 繊維シートのヤング率と片面の厚さ,

$G_{e2}, h_2$  : それぞれ, 接着剤 2 のせん断弾性係数と片面厚さ.

図-3 を参照して, 鋼板切断縁  $x=0$  において,  $\sigma_s=0$  および CFRP 板と繊維シートのひずみが等しいという条件, すなわち  $\sigma_g/E_g = \sigma_c/E_c$  (ここに,  $\sigma_g$  は繊維シートに生じる応力), ならびに CFRP 板付着端  $x=l$  において  $\sigma_s=\sigma_{sn}$  および  $\sigma_g=0$  の境界条件に対して式(7)を解くことにより, 鋼板に生じる応力  $\sigma_s$ , CFRP 板に生じる応力  $\sigma_c$ , 繊維シートに生じる応力  $\sigma_g$  ならびに接着剤 1 と 2 に生じるせん断応力  $\tau_1$  と  $\tau_2$  が, それぞれ次式で与えられる.

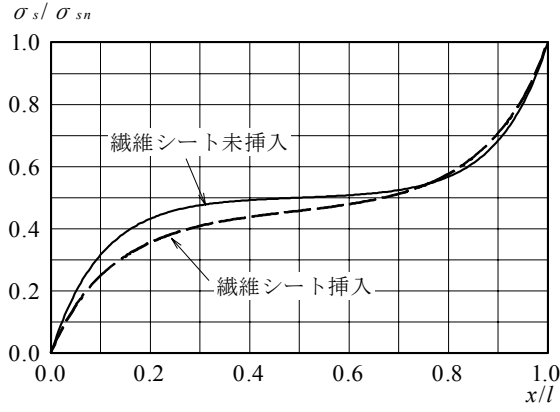


図-4 鋼板応力の分布

$$\sigma_s = \left\{ A_1 \cosh(\alpha cx) + A_2 \sinh(\alpha cx) + A_3 \cosh(\beta cx) + A_4 \sinh(\beta cx) + \frac{\xi_0}{1+F} \right\} \sigma_{sn} \quad (12)$$

$$\sigma_c = \frac{-t_s}{2t_c \xi_0} \left\{ A_1 H_\alpha \cosh(\alpha cx) + A_2 H_\alpha \sinh(\alpha cx) + A_3 H_\beta \cosh(\beta cx) + A_4 H_\beta \sinh(\beta cx) - \frac{(1-\xi_0)\xi_0}{1+F} \right\} \sigma_{sn} \quad (13)$$

$$\sigma_g = \frac{t_s}{2t_g \xi_0} \left\{ A_1 (H_\alpha - \xi_0) \cosh(\alpha cx) + A_2 (H_\alpha - \xi_0) \sinh(\alpha cx) + A_3 (H_\beta - \xi_0) \cosh(\beta cx) + A_4 (H_\beta - \xi_0) \sinh(\beta cx) + \frac{\xi_0 F}{1+F} \right\} \sigma_{sn} \quad (14)$$

$$\tau_1 = \frac{ct_s}{2} \left\{ A_1 \alpha \sinh(\alpha cx) + A_2 \alpha \cosh(\alpha cx) + A_3 \beta \sinh(\beta cx) + A_4 \beta \cosh(\beta cx) \right\} \sigma_{sn} \quad (15)$$

$$\tau_2 = \frac{ct_s}{2\xi_0} \left\{ A_1 H_\alpha \alpha \sinh(\alpha cx) + A_2 H_\alpha \alpha \cosh(\alpha cx) + A_3 H_\beta \beta \sinh(\beta cx) + A_4 H_\beta \beta \cosh(\beta cx) \right\} \sigma_{sn} \quad (16)$$

ここに,

$$A_1 = \frac{-1}{\alpha^2 - \beta^2} \left\{ \frac{(1-\xi_0)\xi_0}{1+F-\xi_0} - \frac{\xi_0}{1+F} \beta^2 \right\} \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{-1}{(\alpha^2 - \beta^2) \sinh(\alpha cl)} \left[ \left( 1 - \frac{\xi_0}{1+F} \right) \beta^2 - 1 + \xi_0 - \left\{ \frac{(1-\xi_0)\xi_0}{1+F-\xi_0} - \frac{\xi_0}{1+F} \beta^2 \right\} \cosh(\alpha cl) \right] \quad (18)$$

$$A_3 = \frac{1}{\alpha^2 - \beta^2} \left\{ \frac{(1-\xi_0)\xi_0}{1+F-\xi_0} - \frac{\xi_0}{1+F} \alpha^2 \right\} \quad (19)$$

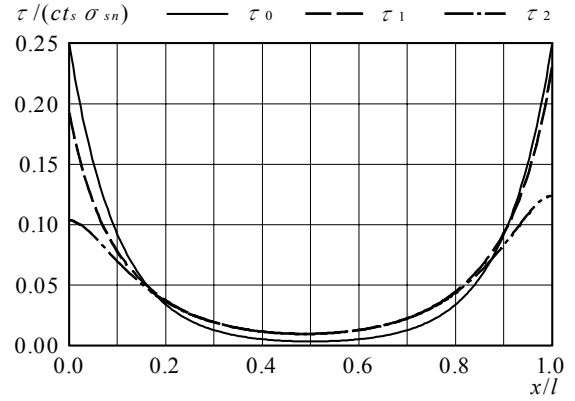


図-5 接着剤に生じるせん断応力の分布

$$A_4 = \frac{1}{(\alpha^2 - \beta^2) \sinh(\beta cl)} \left[ \left( 1 - \frac{\xi_0}{1+F} \right) \alpha^2 - 1 + \xi_0 - \left\{ \frac{(1-\xi_0)\xi_0}{1+F-\xi_0} - \frac{\xi_0}{1+F} \alpha^2 \right\} \cosh(\beta cl) \right] \quad (20)$$

$$H_\alpha = F + \xi_0 - \frac{F}{1-\xi_0} \alpha^2 \quad (21)$$

$$H_\beta = F + \xi_0 - \frac{F}{1-\xi_0} \beta^2 \quad (22)$$

$$\alpha = \sqrt{r^2 + \sqrt{r^4 - s^4}} \quad (23)$$

$$\beta = \sqrt{r^2 - \sqrt{r^4 - s^4}} \quad (24)$$

## 2. 2 鋼板に生じる応力

繊維シート未挿入の場合と、繊維シート挿入の場合について、それぞれ式(4)と式(12)から計算される鋼板応力  $\sigma_s$  の分布を図-4に示す。図には、例として、上下面に接着された CFRP 板の剛性の合計が鋼板の剛性と等しくなる場合すなわち  $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$  で、 $cl=10$  に対する  $\sigma_s$  の分布が示されている。繊維シート挿入の場合、繊維シートの剛性が CFRP 板の剛性の 0.2 倍で、接着剤 1 と 2 の材料定数と厚さがそれぞれ等しいとき、すなわち  $E_g t_g / (E_c t_c) = 0.2$ 、 $D=1.0$  の場合に対する結果が示されている。縦軸は、鋼板応力  $\sigma_s$  を  $\sigma_{sn}$  で除した値を示し、横軸は鋼板切断縁からの距離  $x$  を、CFRP 板の付着半長さ  $l$  で除した値を示す。この図から分かるように、 $x/l$  がおよそ 0.8~1.0 の間で、繊維シート挿入の場合の  $\sigma_s / \sigma_{sn}$  は、繊維シート未挿入の場合のそれより大きい。 $x/l$  がより小さい範囲では、繊維シート挿入の場合の  $\sigma_s / \sigma_{sn}$  が、繊維シート未挿入の場合のそれより低くなる。

## 2. 3 はく離せん断応力

### (1) 接着剤に生じるせん断応力

例として、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$ 、 $cl=10$  に対して、式(6)

から計算される接着剤に生じるせん断応力 $\tau_0$ の分布および、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$ ,  $E_g t_g / (E_c t_c) = 0.2$ ,  $D = 1.0$ ,  $cl = 10$ に対して、式(15), (16)から計算される、接着剤1と2に生じるせん断応力 $\tau_1$ と $\tau_2$ の分布を図-5に示す。縦軸は、せん断応力 $\tau$ を $ct_s \sigma_{sn}$ で除した値を示し、横軸は鋼板切断縁からの距離 $x$ を、CFRP板の付着半長さ $l$ で除した値を示す。この図から分かるように、鋼板切断縁 $x/l = 0$ とCFRP板付着端 $x/l = 1$ で、接着剤に高いせん断応力が生じる。これらの高いせん断応力がCFRP板のはく離挙動を支配するので、それらをはく離せん断応力と呼ぶ。

## (2) CFRP板付着端のはく離せん断応力

繊維シート未挿入の場合、CFRP板付着端のはく離せん断応力 $\tau_{0e}$ は、式(6)へ $x = l$ を代入して与えられる。同様に、繊維シート挿入の場合、CFRP板付着端の接着剤1と2のはく離せん断応力 $\tau_{1e}$ と $\tau_{2e}$ は、式(15), (16)へ $x = l$ を代入して与えられる。

例として、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$ ,  $E_g t_g / (E_c t_c) = 0.2$ に対して、CFRP板付着端のはく離せん断応力 $\tau_e / (ct_s \sigma_{sn})$ と $cl$ の関係を図-6に示す。この図から、 $\tau_{1e}$ は $\tau_{0e}$ より小さく、 $\tau_{2e}$ は $\tau_{1e}$ より小さいことが分かる。 $D$ が大きくなるに従って、 $\tau_{1e}$ と $\tau_{2e}$ は、共に低下する。

繊維シート未挿入の場合、 $cl$ がおおよそ6を超えると、 $\tau_{0e}$ は次に収束する。

$$\tau_{0e} = ct_s \frac{1 - \xi_0}{2} \sigma_{sn} \quad (25)$$

繊維シート挿入の場合、 $cl$ がおおよそ8を超えると、 $\tau_{1e}$ と $\tau_{2e}$ はそれぞれ次に収束する。

$$\tau_{1e} = \frac{ct_s}{2\sqrt{2(r^2 + s^2)}} \left\{ \left( 1 - \frac{\xi_0}{1+F} \right) s^2 + 1 - \xi_0 \right\} \sigma_{sn} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \tau_{2e} = & \frac{ct_s}{2\xi_0\sqrt{2(r^2 + s^2)}} \left\{ \frac{F}{1 - \xi_0} \left( 1 - \frac{\xi_0}{1+F} \right) s^4 \right. \\ & + (F + \xi_0) \left( 1 - \frac{\xi_0}{1+F} \right) s^2 - F(2r^2 + s^2) \\ & \left. + (F + \xi_0)(1 - \xi_0) \right\} \sigma_{sn} \quad (27) \end{aligned}$$

式(25), (26), (27)は、鋼板が切断されていない、一枚板にCFRP板が接着された場合のはく離せん断応力<sup>8), 9)</sup>にそれぞれ一致する。

例として、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$ に対して、式(26)と(27)から導かれる、 $\tau_e / (ct_s \sigma_{sn})$ と $E_g t_g / (E_c t_c)$ の関係を図-7に示す。この図には、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$ に対して、式(25)から計算される繊維シート未挿入の場合の $\tau_{0e}$ の値も示されている。この図から分かるように、 $E_g t_g / (E_c t_c)$ が小さくなると、 $\tau_{1e}$ は $\tau_{0e}$ より小さくなる。すなわち、剛性の小さな繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合と比べ、CFRP板付着端のはく離せん断応力が

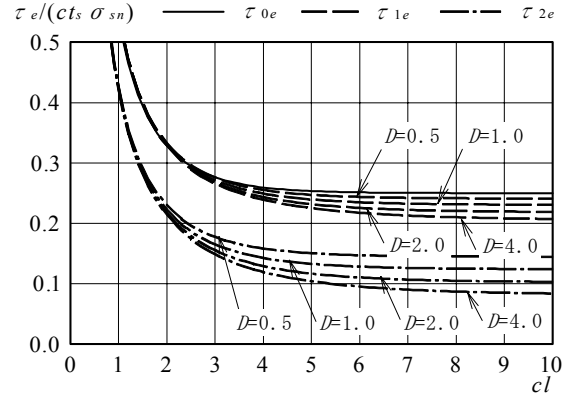


図-6  $\tau_e / (ct_s \sigma_{sn})$ と $cl$ の関係

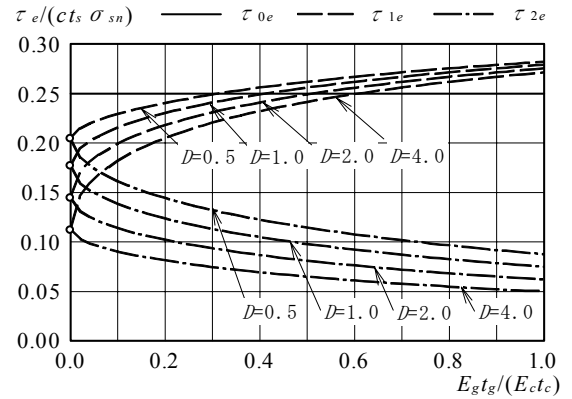


図-7  $\tau_e / (ct_s \sigma_{sn})$ と $E_g t_g / (E_c t_c)$ の関係

低減される。さらに、 $D$ が大きくなるに従って、 $\tau_{1e}$ は低下する。他方 $E_g t_g / (E_c t_c)$ が小さくなると、 $\tau_{2e}$ は大きくなる。 $E_g t_g / (E_c t_c)$ が0に近づくとき、 $\tau_{1e}$ および $\tau_{2e}$ は共に次式に近づく。

$$\tau_{12e} = ct_s \frac{1 - \xi_0}{2\sqrt{1 + D}} \sigma_{sn} \quad (28)$$

## (3) 鋼板切断縁のはく離せん断応力

繊維シート未挿入の場合、鋼板切断縁のはく離せん断応力 $\tau_{0d}$ は、式(6)へ $x = 0$ を代入して与えられる。同様に、繊維シート挿入の場合、鋼板切断縁の接着剤1と2のはく離せん断応力 $\tau_{1d}$ と $\tau_{2d}$ は、式(15), (16)へ $x = 0$ を代入して与えられる。

例として、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$ ,  $E_g t_g / (E_c t_c) = 0.2$ に対して、鋼板切断縁のはく離せん断応力 $\tau_d / (ct_s \sigma_{sn})$ と $cl$ の関係を図-8に示す。この図から、 $\tau_{1d}$ は $\tau_{0d}$ より小さく、 $\tau_{2d}$ は $\tau_{1d}$ より小さいことが分かる。 $D$ が大きくなるに従って、 $\tau_{1d}$ と $\tau_{2d}$ は、共に低下する。

繊維シート未挿入の場合、 $cl$ がおおよそ6を超えると、鋼板切断縁のはく離せん断応力 $\tau_{0d}$ は次に収束する。

$$\tau_{0d} = ct_s \frac{\xi_0}{2} \sigma_{sn} \quad (29)$$

繊維シート挿入の場合、 $cl$ がおおよそ8を超えると、鋼

板切断縁のはく離せん断応力  $\tau_{1d}$  と  $\tau_{2d}$  はそれぞれ次に収束する。

$$\tau_{1d} = \frac{ct_s \xi_0}{2\sqrt{2(r^2 + s^2)}} \left( \frac{1}{1+F} s^2 + \frac{1-\xi_0}{1+F-\xi_0} \right) \sigma_{sn} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \tau_{2d} = & \frac{ct_s}{2\sqrt{2(r^2 + s^2)}} \left\{ \frac{F}{(1-\xi_0)(1+F)} s^4 \right. \\ & + \frac{F+\xi_0}{1+F} s^2 - \frac{F}{1+F-\xi_0} (2r^2 + s^2) \\ & \left. + \frac{(F+\xi_0)(1-\xi_0)}{1+F-\xi_0} \right\} \sigma_{sn} \end{aligned} \quad (31)$$

例として、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$  に対して、式(30)と(31)から導かれる、 $\tau_d / (ct_s \sigma_{sn})$  と  $E_g t_g / (E_c t_c)$  の関係を図-9に示す。この図には、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$  に対して、式(29)から計算される繊維シート未挿入の場合の  $\tau_{0d}$  も示されている。この図から、繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合と比べ、鋼板切断縁のはく離せん断応力が低減されることが分かる。 $D$  が大きくなるに従って、 $\tau_{1d}$  はさらに低下する。他方  $E_g t_g / (E_c t_c)$  が大きくなると、 $\tau_{2d}$  は小さくなる。 $E_g t_g / (E_c t_c)$  が 0 に近づくと、 $\tau_{1d}$  および  $\tau_{2d}$  は共に次式に近づく。

$$\tau_{12d} = ct_s \frac{\xi_0}{2\sqrt{1+D}} \sigma_{sn} \quad (32)$$

### 3. CFRP 板のはく離防止条件

#### 3. 1 繊維シート未挿入の場合

##### (1) CFRP 板付着端

繊維シート未挿入の場合、CFRP 板付着端の接着剤に生じるのはく離せん断応力  $\tau_{0e}$  が次式を満足するとき、CFRP 板付着端で、鋼板から CFRP 板のはく離を防止することができる。

$$\tau_{0e} \leq T_{0e} \quad (33)$$

ここに、

$T_{0e}$  : CFRP 板付着端における、接着剤と鋼板との界面の引張せん断接着強さ、および接着剤と CFRP 板との界面の引張せん断接着強さのうち、小さい方の引張せん断接着強さ。(ここで、本研究で定義する“引張せん断接着強さ”は、JIS K 6850 で規定される“接着剤-剛性被着材の引張せん断接着強さ”と違うことに注意されたい。)

式(33)へ式(25)を代入して次式を得る。

$$\sqrt{\frac{1-\xi_0}{2}} \leq K_{0e} \quad (34)$$

ここに、

$$K_{0e} = \sqrt{E_s h_1 / (G_{el} t_s)} \cdot T_{0e} / \sigma_{sn} \quad (35)$$

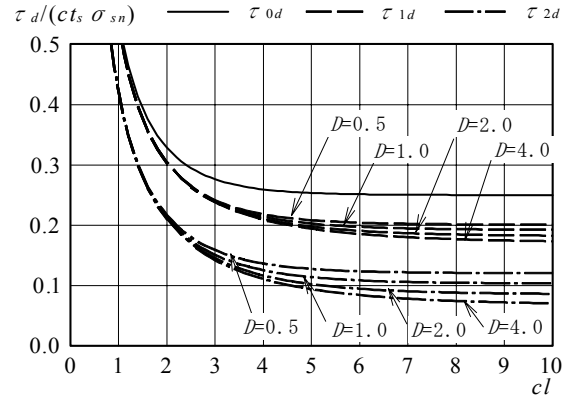


図-8  $\tau_d / (ct_s \sigma_{sn})$  と  $cl$  の関係

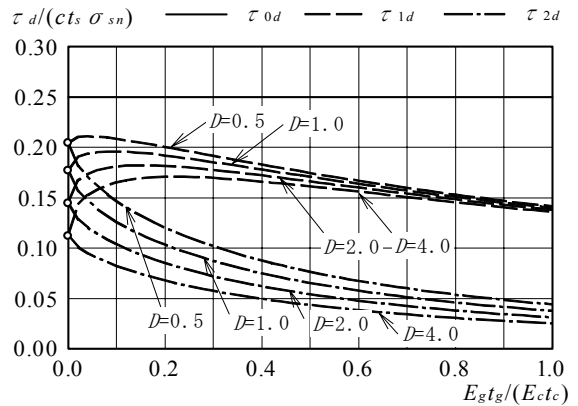


図-9  $\tau_d / (ct_s \sigma_{sn})$  と  $E_g t_g / (E_c t_c)$  の関係

#### (2) 鋼板切断縁

繊維シート未挿入の場合、鋼板切断縁の接着剤に生じるのはく離せん断応力  $\tau_{0d}$  が次式を満足するとき、鋼板切断縁で、鋼板から CFRP 板のはく離を防止することができる。

$$\tau_{0d} \leq T_{0d} \quad (36)$$

ここに、

$T_{0d}$  : 鋼板切断縁における、接着剤と鋼板との界面の引張せん断接着強さ、および接着剤と CFRP 板との界面の引張せん断接着強さのうち、小さい方の引張せん断接着強さ。

式(36)へ式(29)を代入して次式を得る。

$$\frac{\xi_0}{\sqrt{2(1-\xi_0)}} \leq K_{0d} \quad (37)$$

ここに、

$$K_{0d} = \sqrt{E_s h_1 / (G_{el} t_s)} \cdot T_{0d} / \sigma_{sn} \quad (38)$$

#### 3. 2 繊維シート挿入の場合

##### (1) CFRP 板付着端

繊維シート挿入の場合、CFRP 板付着端の接着剤 1 と 2 に生じるのはく離せん断応力  $\tau_{e1}$  と  $\tau_{e2}$  がそれぞれ次式を満足するとき、CFRP 板付着端で、鋼板から CFRP 板のはく

離を防止することができる。

$$\tau_{1e} \leq T_{1e} \quad (39)$$

$$\tau_{2e} \leq T_{2e} \quad (40)$$

ここに、

$T_{1e}$  : CFRP 板付着端において、接着剤 1 と鋼板との界面の引張せん断接着強さ、および接着剤 1 と挿入材との界面の引張せん断接着強さのうち、小さい方の引張せん断接着強さ。

$T_{2e}$  : CFRP 板付着端において、接着剤 2 と挿入材との界面の引張せん断接着強さ、および接着剤 2 と CFRP 板との界面の引張せん断接着強さのうち、小さい方の引張せん断接着強さ。

式(26)を式(39)および式(27)を式(40)へ代入することより次式を得る。

$$\frac{1}{2\sqrt{(r^2+s^2)(1-\xi_0)}} \left\{ \left( 1 - \frac{\xi_0}{1+F} \right) s^2 + 1 - \xi_0 \right\} \leq K_{1e} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\xi_0\sqrt{(r^2+s^2)(1-\xi_0)}} \left\{ \frac{F}{1-\xi_0} \left( 1 - \frac{\xi_0}{1+F} \right) s^4 \right. \\ & + (F + \xi_0) \left( 1 - \frac{\xi_0}{1+F} \right) s^2 - F(2r^2 + s^2) \\ & \left. + (F + \xi_0)(1 - \xi_0) \right\} \leq K_{2e} \end{aligned} \quad (42)$$

ここに、

$$K_{1e} = \sqrt{E_s h_1 / (G_{e1} t_s)} \cdot T_{1e} / \sigma_{sn} \quad (43)$$

$$K_{2e} = \sqrt{E_s h_1 / (G_{e1} t_s)} \cdot T_{2e} / \sigma_{sn} \quad (44)$$

## (2) 鋼板切断縁

繊維シート挿入の場合、鋼板切断縁の接着剤 1 と 2 に生じるはく離せん断応力  $\tau_{1d}$  と  $\tau_{2d}$  がそれぞれ次式を満足するとき、鋼板の切断縁で、鋼板から CFRP 板のはく離を防止することができる。

$$\tau_{1d} \leq T_{1d} \quad (45)$$

$$\tau_{2d} \leq T_{2d} \quad (46)$$

ここに、

$T_{1d}$  : 鋼板切断縁における、接着剤 1 と鋼板との界面の引張せん断接着強さ、および接着剤 1 と挿入材との界面の引張せん断接着強さのうち、小さい方の引張せん断接着強さ。

$T_{2d}$  : 鋼板切断縁における、接着剤 2 と挿入材との界面の引張せん断接着強さ、および接着剤 2 と CFRP 板との界面の引張せん断接着強さのうち、小さい方の引張せん断接着強さ。

式(30)を式(45)および式(31)を式(46)に代入することより次式を得る。

$$\frac{\xi_0}{2\sqrt{(r^2+s^2)(1-\xi_0)}} \left( \frac{1}{1+F} s^2 + \frac{1-\xi_0}{1+F-\xi_0} \right) \leq K_{1d} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\sqrt{(r^2+s^2)(1-\xi_0)}} \left\{ \frac{F}{(1-\xi_0)(1+F)} s^4 \right. \\ & + \frac{F+\xi_0}{1+F} s^2 - \frac{F}{1+F-\xi_0} (2r^2 + s^2) \\ & \left. + \frac{(F+\xi_0)(1-\xi_0)}{1+F-\xi_0} \right\} \leq K_{2d} \end{aligned} \quad (48)$$

ここに、

$$K_{1d} = \sqrt{E_s h_1 / (G_{e1} t_s)} \cdot T_{1d} / \sigma_{sn} \quad (49)$$

$$K_{2d} = \sqrt{E_s h_1 / (G_{e1} t_s)} \cdot T_{2d} / \sigma_{sn} \quad (50)$$

## 4. CFRP 板のはく離挙動

CFRP 板接着・切断鋼板に対して、引張せん断接着強さ  $T_{0e}$ ,  $T_{1e}$ ,  $T_{2e}$ ,  $T_{0d}$ ,  $T_{1d}$ ,  $T_{2d}$  が互いに等しいと仮定して CFRP 板のはく離挙動を解明する。このとき、 $K_{0e}$ ,  $K_{1e}$ ,  $K_{2e}$ ,  $K_{0d}$ ,  $K_{1d}$ ,  $K_{2d}$  は互いに等しくなるので、これらの変数を改めて  $K$  で表す。 $K$  は、CFRP 板が接着されていない鋼板に生じる応力  $\sigma_{sn}$  に対する引張せん断接着強さの比から成る無次元パラメータである。鋼板応力  $\sigma_{sn}$  が大きくなると  $K$  は小さくなる。

### 4. 1 繊維シート未挿入の場合

繊維シート未挿入の場合に対して、式(34)と(37)を満足する、 $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の領域を図-10 に示す。網掛された部分が式(34)と(37)の両方を満足する領域である。式(34)が与える曲線と式(37)が与える曲線の交点 A は、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.50$ ,  $K = 0.50$  であり、交点 A において  $K$  の値が最も小さくなる。したがって、CFRP 板がはく離するときの鋼板応力  $\sigma_{sn}$  は、CFRP 板付着端と鋼板切断縁の両方から同時に CFRP 板のはく離が生じる場合が最も高くなる。

$E_c t_c / (E_s t_s) \leq 0.5$  では、鋼板切断縁で CFRP 板のはく離が早く発生するので、式(37)を満足することにより CFRP 板のはく離が防止され、 $E_c t_c / (E_s t_s) \geq 0.5$  では、CFRP 板付着端で CFRP 板のはく離が早く発生するので、式(34)を満足すれば、CFRP 板のはく離が防止される。

### 4. 2 繊維シート挿入の場合

繊維シート挿入の場合に対して、 $K_{1e} = K_{2e} = K$  のとき、式(42)を満足する  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の領域は、式(41)を満足する  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の領域を包含する。同様に、 $K_{1d} = K_{2d} = K$  のとき、式(48)を満足する  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の領域は、式(47)を満足する  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の領域を包含する。そこで、式(41)と(47)を満足する  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の領域を図-11 に示す。図には、例として、 $E_g t_g / (E_c t_c) = 0.2$ ,  $D = 1.0$  に対する結果が示されている。この図で、網掛された部分が式(41)と(47)の両方を満足す

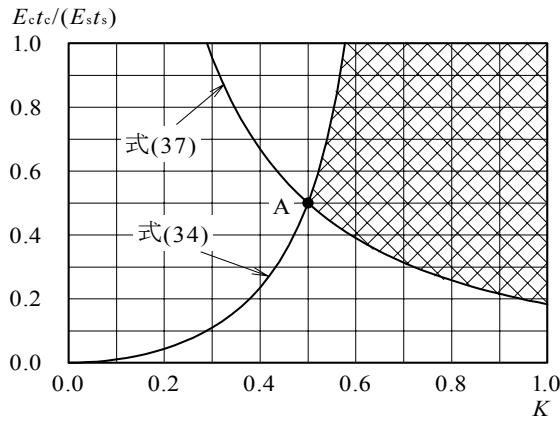


図-10 CFRP 板のはく離が防止される  $E_{ctc}/(E_s t_s)$  と  $K$  の領域 [繊維シート未挿入]

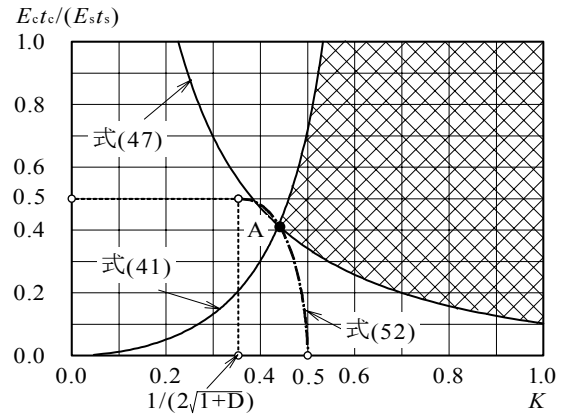


図-11 CFRP 板のはく離が防止される  $E_{ctc}/(E_s t_s)$  と  $K$  の領域 [繊維シート挿入]

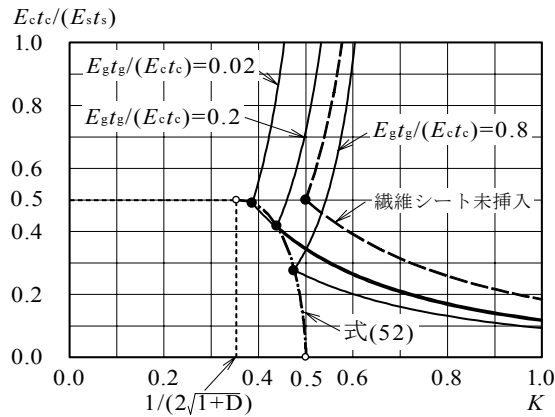


図-12 CFRP 板のはく離が防止される  $E_{ctc}/(E_s t_s)$  と  $K$  の領域 [ $D=1$ ]

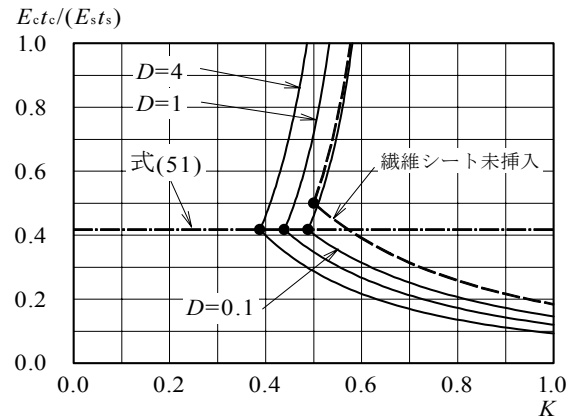


図-13 CFRP 板のはく離が防止される  $E_{ctc}/(E_s t_s)$  と  $K$  の領域 [ $E_{gtg}/(E_{ctc})=0.2$ ]

る領域である。繊維シート未挿入の場合と同様に、式(41)が与える曲線と式(47)が与える曲線の交点Aにおいて、 $K$ の値が最も小さくなる。交点Aの $E_{ctc}/(E_s t_s)$ の値は、式(41)の左辺と式(47)の左辺を等値して次式で与えられる。

$$\frac{E_{ctc}}{E_s t_s} = \frac{1}{2\{E_{gtg}/(E_{ctc})+1\}} \quad (51)$$

さらに交点Aの $K$ の値は、式(51)を式(41)に代入して次式で与えられる。

$$K = \frac{1}{2\sqrt{(r_{ed}^2 + s_{ed}^2)(1-\xi_0)}} \left\{ \frac{s_{ed}^2}{2} + 1 - \xi_0 \right\} \quad (52)$$

ここに、

$$r_{ed} = \sqrt{\frac{(1-3D)\xi_0^2 + 4D\xi_0 - D}{2D(2\xi_0 - 1)}} \quad (53)$$

$$s_{ed} = \left\{ \frac{2(1-\xi_0)\xi_0^2}{D(2\xi_0 - 1)} \right\}^{0.25} \quad (54)$$

式(52)が与える $E_{ctc}/(E_s t_s)$ と $K$ の関係、すなわち交点Aの奇跡が図-11に一点鎖線で示されている。式(51)から、 $0 < E_{ctc}/(E_s t_s) < 0.5$ であるので、式(52)より $1/(2\sqrt{1+D}) < K < 0.5$ となる。したがって繊維シート挿入の場合、 $K$ が $1/(2\sqrt{1+D})$ まで、CFRP板のはく離を防止できる。

$E_{ctc}/(E_s t_s) \leq 1/(2\{E_{gtg}/(E_{ctc})+1\})$ では、鋼板切断縁でCFRP板のはく離が早く発生するので、式(47)を満足すれば、CFRP板のはく離が防止され、 $E_{ctc}/(E_s t_s) \geq 1/(2\{E_{gtg}/(E_{ctc})+1\})$ では、CFRP板付着端でCFRP板のはく離が早く発生するので、式(41)を満足すれば、CFRP板のはく離が防止される。

図-11は、 $E_{gtg}/(E_{ctc})=0.2$ 、 $D=1.0$ に対する結果であった。次に、 $E_{gtg}/(E_{ctc})$ または $D$ を変化させた場合に対して、CFRP板のはく離が防止される $E_{ctc}/(E_s t_s)$ と $K$ の領域を調べる。

$D=1$ のとき、 $E_{gtg}/(E_{ctc})=0.02, 0.2, 0.8$ に対する、CFRP板のはく離が防止される $E_{ctc}/(E_s t_s)$ と $K$ の領域を図-12示す。図中の各実線の右側がCFRP板のはく離

が防止される領域である。破線は、繊維シート未挿入の場合の、CFRP 板のはく離が防止される  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の限界である。この図から分かるように、 $E_g t_g / (E_c t_c)$  が小さくなるに従って、 $K$  が  $1/(2\sqrt{1+D})$  に近づく。すなわち、 $E_g t_g / (E_c t_c)$  の値が小さくなるに従って、繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合と比べて、CFRP 板のはく離するときの鋼板応力  $\sigma_{sn}$  が高くなる。

他方、図-12 から分かるように、 $E_g t_g / (E_c t_c) = 0.8$  のとき、 $E_c t_c / (E_s t_s)$  がおよそ 0.46 より大きな範囲において、繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合よりも CFRP 板のはく離しやすくなる。すなわち、 $E_g t_g / (E_c t_c)$  が大きくなると、繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合よりも CFRP 板のはく離するときの鋼板応力  $\sigma_{sn}$  が低くなる場合がある。

$E_g t_g / (E_c t_c) = 0.2$  のとき、 $D = 0.1, 1, 4$  に対する、CFRP 板のはく離が防止される  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の領域を図-13 示す。図中の各実線の右側が CFRP 板のはく離が防止される領域である。破線は、繊維シート未挿入の場合の、CFRP 板のはく離が防止される  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の限界である。一点鎖線は、式(51)が与える  $E_c t_c / (E_s t_s)$  の値である。この図から分かるように、 $D$  が大きくなるに従って、 $K$  は小さくなり、繊維シート未挿入の場合と比べて、CFRP 板のはく離が防止される  $E_c t_c / (E_s t_s)$  と  $K$  の領域が増える。すなわち、 $D$  が大きくなるに従って、繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合と比べて、CFRP 板のはく離するときの鋼板応力  $\sigma_{sn}$  が高くなる。

他方、図-13 から分かるように、 $D = 0.1$  のとき、 $E_c t_c / (E_s t_s)$  がおよそ 0.48 より大きな範囲において、繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合よりも CFRP 板のはく離しやすくなる。すなわち、 $D$  が小さくなると、繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合と比べて、CFRP 板のはく離するときの鋼板応力  $\sigma_{sn}$  が低くなる場合がある。

## 5. 結論

本研究では、CFRP 板接着・切断鋼板に対して、CFRP 板付着端と鋼板切断縁の CFRP 板のはく離挙動を理論解析によって明らかにした。本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

- 1) 繊維シート未挿入の場合、 $E_c t_c / (E_s t_s) \leq 0.5$  では、鋼板切断縁で CFRP 板のはく離が早く発生するので、式(37)を満足することにより CFRP 板のはく離が防止され、 $E_c t_c / (E_s t_s) \geq 0.5$  では、CFRP 板付着端で CFRP 板のはく離が早く発生するので、式(34)を満足すれば、CFRP 板のはく離が防止される。
- 2) 繊維シート挿入の場合、 $E_c t_c / (E_s t_s) \leq 1/(2\{E_g t_g / (E_c t_c) + 1\})$  では、鋼板切断縁で CFRP 板のはく離が早く発生する

ので、式(47)を満足すれば、CFRP 板のはく離が防止され、 $E_c t_c / (E_s t_s) \geq 1/(2\{E_g t_g / (E_c t_c) + 1\})$  では、CFRP 板付着端で CFRP 板のはく離が早く発生するので、式(41)を満足すれば、CFRP 板のはく離が防止される。

- 3)  $E_g t_g / (E_c t_c)$  の小さい繊維シートを挿入することにより、繊維シート未挿入の場合と比べて CFRP 板のはく離するときの鋼板応力  $\sigma_{sn}$  が高くなる。 $D$  を大きくすることにより、繊維シート未挿入の場合と比べて CFRP 板のはく離するときの鋼板応力  $\sigma_{sn}$  が高くなる。

## 参考文献

- 1) 板垣一也，渡邊憲市，鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板（カーボン板）による鋼橋補強の事例，第 8 回鋼構造の補修・補強技術報告論文集，2002。
- 2) 玉井宏章，高松隆夫，服部明生，灰谷徳治，櫻庭 誠：炭素繊維プレートによる化学プラント架構小ばり補剛の施工例，鋼構造年次論文報告集，第 13 巻，pp.545-552，2005。
- 3) 鈴木博之，永崎央輔，遠藤勇一，池田圭一：き裂を有する材の炭素繊維強化樹脂板による補強，鋼構造年次論文報告集，第 8 巻，pp.683-688，2000。
- 4) 大倉一郎，福井唯夫，中村圭吾，松上泰三，祝 賢治：炭素繊維シートの鋼板疲労亀裂補修への適用，鋼構造年次論文報告集，第 8 巻，pp.689-696，2000。
- 5) 野阪克義，古川喬朗：CFRP 板接着による鋼板亀裂補修効果への板厚の影響に関する解析的研究，鋼構造論文集，第 11 巻，第 43 号，pp.41-48，2004。
- 6) Nozaka, K., Shield C. K. and Hajjar J. F. : Design of a Test Specimen to Assess the Effective Bond Length of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strips Bonded to Fatigued Steel Bridge Girders, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, pp. 304-312, 2005.
- 7) Matta, F., Rizzo, P., Karbhari, V. M. and Lanza di Scalea, F. : Acoustic Emission Damage Assessment of Steel/CFRP Bonds for Rehabilitation, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, pp. 265-274, 2006.
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 石川敏之，小村啓太，大倉一郎：はく離せん断応力を低減させる挿入繊維シートの剛性，鋼構造年次論文報告集，第 14 巻，pp.611-616，2006。

(2006 年 9 月 11 日受付)