

第I部門 ガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板の力学特性

大阪大学大学院 正会員 石川 敏之  
 大阪大学大学院 学生員 小村 啓太  
 大阪大学大学院 正会員 大倉 一郎

1. はじめに

近年、炭素繊維プレートが鋼構造物の補修・補強に用いられ始めている。この工法では、構造物に大きな応力が作用すると、炭素繊維プレートが鋼構造物からはく離する場合がある。著者らは、炭素繊維プレートの鋼板からはく離の原因となる、接着剤に生じる高いせん断応力（以後、これをはく離せん断応力と呼ぶ）を低減させるために、図-1 に示す鋼板と炭素繊維プレートとの間にガラス繊維シートを挿入する方法を考え、ガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着連続鋼板の力学特性を明らかにした。さらにガラス繊維シートを挿入することにより、はく離せん断応力が低減することを示した<sup>1)</sup>。次に、この方法を、亀裂を跨いで炭素繊維プレートを接着する補修へ適用することを考えて、炭素繊維プレートを用いた亀裂補修の基本となる、図-2 に示すガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板について、その力学特性を明らかにする。そして、ガラス繊維シートを挿入することにより、鋼板切断位置のはく離せん断応力が低減することを示す。

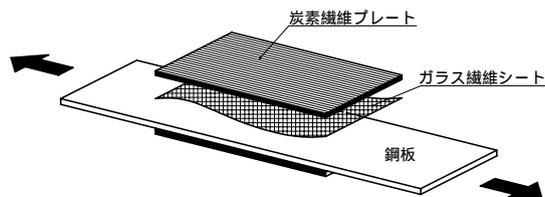


図-1 繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着工法

2. 微分方程式とその解

図-3 に示す微小長さ  $dx$  の力のつりあいから、次の4階微分方程式を得る。

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

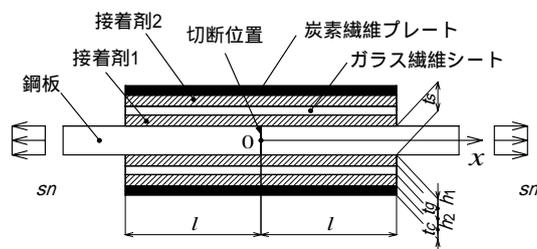


図-2 繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板

ここに、 $c = \sqrt{G_{e1}/h_1} \sqrt{2/(1-\xi)} / \sqrt{E_s t_s}$ 、 $r = \sqrt{(1-\xi)[\xi + F + (1-\xi + F)\xi / \{D(1-\xi)\}] / 2F}$ 、 $s = \{\xi(1-\xi)(1+F) / (DF)\}^{0.25}$ 、 $\xi = E_s t_s / (E_s t_s + 2E_c t_c)$ 、 $F = 2E_g t_g / (E_s t_s + 2E_c t_c)$ 、 $D = h_2 G_{e1} / (h_1 G_{e2})$ 、 $r = \sqrt{(1-\xi)[\xi + F + (1-\xi + F)\xi / \{D(1-\xi)\}] / 2F}$ 、 $t_s$ 、 $t_c$ 、 $t_g$ ：それぞれ鋼板の板厚、炭素繊維プレートの片面の厚さとガラス繊維シートの片面の厚さ、 $\sigma_s$ 、 $\sigma_c$ 、 $\sigma_g$ ：それぞれ、鋼板、炭素繊維プレートとガラス繊維シートに生じる応力、 $E_s$ 、 $E_c$ 、 $E_g$ ：それぞれ、鋼板、炭素繊維プレートとガラス繊維シートのヤング率、 $x$ ：炭素繊維プレート付着中心を原点とする荷重方向の位置、 $G_{e1}$ 、 $G_{e2}$ ：それぞれ、接着剤1と2のせん断弾性係数、 $h_1$ 、 $h_2$ ：それぞれ、接着剤1と2の片面厚さ。

式(1)の4階微分方程式の一般解に対して、 $x=0$ において $\sigma_s = 0$ および炭素繊維プレートとガラス繊維シートのひずみの適合条件 $\sigma_g / E_g = \sigma_c / E_c$ 、 $x=l$ において $\sigma_s = \sigma_{sn}$ および $\sigma_g = 0$ となる条件を満たす係数 $A_1 \sim A_4$ を導出して、鋼板に生じる応力 $\sigma_s$ および接着剤1と2に生じるせん断応力 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ がそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_s = \{A_1 \cosh(\alpha x) + A_2 \sinh(\alpha x) + A_3 \cosh(\beta x) + A_4 \sinh(\beta x) + \xi / (1+F)\} \sigma_{sn} \quad (2)$$

$$\tau_1 = \{A_1 \alpha \sinh(\alpha x) + A_2 \alpha \cosh(\alpha x) + A_3 \beta \sinh(\beta x) + A_4 \beta \cosh(\beta x)\} c t_s \sigma_{sn} / 2 \quad (3)$$

$$\tau_2 = \{Y_\alpha A_1 \alpha \sinh(\alpha x) + Y_\alpha A_2 \alpha \cosh(\alpha x) + Y_\beta A_3 \beta \sinh(\beta x) + Y_\beta A_4 \beta \cosh(\beta x)\} c t_s \sigma_{sn} / 2 \quad (4)$$

ここに、 $Y_\alpha = (\xi + F) / \xi - F \alpha^2 / \{(1-\xi)\xi\}$ 、 $Y_\beta = (\xi + F) / \xi - F \beta^2 / \{(1-\xi)\xi\}$

$l$ ：炭素繊維プレートの付着半長さ、

$$A_1 = \frac{-1}{\alpha^2 - \beta^2} \left\{ \frac{(1-\xi)\xi}{1+F-\xi} - \frac{\xi}{F+1} \beta^2 \right\} \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{-1}{(\alpha^2 - \beta^2) \sinh(\alpha l)} \left[ \left(1 - \frac{\xi}{F+1}\right) \beta^2 - 1 + \xi - \left\{ \frac{(1-\xi)\xi}{1+F-\xi} - \frac{\xi}{F+1} \beta^2 \right\} \cosh(\alpha l) \right] \quad (6)$$

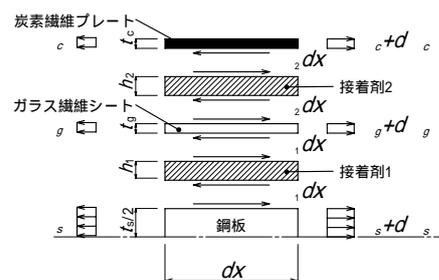


図-3 微小区間  $dx$  の力のつりあい

$$A_3 = \frac{1}{\alpha^2 - \beta^2} \left\{ \frac{(1-\xi)\xi}{1+F-\xi} - \frac{\xi}{F+1} \alpha^2 \right\} \quad (7)$$

$$A_4 = \frac{1}{(\alpha^2 - \beta^2) \sinh(\beta cl)} \left[ \left(1 - \frac{\xi}{F+1}\right) \alpha^2 - 1 + \xi - \left\{ \frac{(1-\xi)\xi}{1+F-\xi} - \frac{\xi}{F+1} \alpha^2 \right\} \cosh(\beta cl) \right] \quad (8)$$

### 3. はく離せん断応力

#### 3.1 接着剤に生じるせん断応力

式(5)~(8)を式(3)と式(4)へ代入して、接着剤に生じるせん断応力  $\tau_1$  および  $\tau_2$  が与えられる。  $\xi=0.5$ ,  $F=0.05$ ,  $D=1.0$ ,  $cl=10$  に対する、  $\tau_1/(ct_s \sigma_{sn})$  および  $\tau_2/(ct_s \sigma_{sn})$  の分布を図-4に示す。

この図には、ガラス繊維シート未挿入の場合の接着剤に生じるせん断応力  $\tau/(ct_s \sigma_{sn})$  の分布<sup>2)</sup>も示されている。この図から分かる

ように、 $\tau_1$ ,  $\tau_2$  とともに、鋼板が切断されている位置( $x=0$ )と炭素繊維プレートの付着端( $x=l$ )の接着剤に大きなせん断応力が発生する。さらに、鋼板が切断されている位置ならびに炭素繊維プレートの付着端において、 $\tau_1$  が  $\tau_2$  よりも大きいことが分かる。炭素繊維プレートの付着長さが十分長い場合、炭素繊維プレート付着端のはく離せん断応力  $\tau_{e1}$  と  $\tau_{e2}$  は、連続鋼板において、炭素繊維プレート付着端の接着剤1と2に生じるのはく離せん断応力<sup>2)</sup>とそれぞれ一致する。

#### 3.2 鋼板切断位置のはく離せん断応力

$\alpha cl$  と  $\beta cl$  の値が3以上になると、 $\tanh(\alpha cl) \cong 1$ ,  $\tanh(\beta cl) \cong 1$  となり、鋼板切断位置の接着剤1と2に生じるせん断応力  $\tau_{o1}$  と  $\tau_{o2}$  は、それぞれ次式となる。

$$\tau_{o1} = \frac{ct_s \xi}{2\sqrt{2(r^2 + s^2)}} \left( \frac{1}{1+F} s^2 + \frac{1-\xi}{1+F-\xi} \right) \sigma_{sn} \quad (9)$$

$$\tau_{o2} = \frac{ct_s}{2\sqrt{2(r^2 + s^2)}} \left\{ \frac{F}{(1-\xi)(1+F)} s^4 + \frac{F+\xi}{1+F} s^2 - \frac{F}{1+F-\xi} (2r^2 + s^2) + \frac{(F+\xi)(1-\xi)}{1+F-\xi} \right\} \sigma_{sn} \quad (10)$$

これらの式から、 $\tau_{o1}/(ct_s \sigma_{sn})$  および  $\tau_{o2}/(ct_s \sigma_{sn})$  が、無次元パラメータ  $\xi$ ,  $F$  および  $D$  で表されることが分かる。 $\xi$  は鋼板と炭素繊維プレートの引張剛性の和に対する鋼板の引張剛性の比を示している。 $D$  は接着剤1と2に関する無次元パラメータである。

$F$  は、鋼板と炭素繊維プレートの引張剛性の和に対するガラス繊維シートの引張剛性の比を示している。3.1節で述べたように、鋼板切断位置において  $\tau_{o1}$  は  $\tau_{o2}$  よりも大きい。そこで、ガラス繊維シートの挿入が  $\tau_{o1}$  に与える影響に着目して、 $\xi=0.5$  の場合、式(9)から導かれる、 $\tau_{o1}/(ct_s \sigma_{sn})$  と  $E_g t_g / (E_c t_c)$  の関係を図-5に示す。この図には、ガラス繊維シート未挿入の場合の鋼板切断位置のはく離せん断応力  $\tau_o$  の値も示している<sup>2)</sup>。図-5から、ガラス繊維シートを挿入することによりガラス繊維シート未挿入の場合よりもはく離せん断応力が低下することが分かる。挿入するガラス繊維シートの引張剛性が炭素繊維プレートの引張剛性と比べて非常に小さい場合、はく離せん断応力  $\tau_{o1}$  は小さくなる。ガラス繊維シートの引張剛性が大きくなると、 $\tau_{o1}$  の値は大きくなるが、極値を迎えた後、低下することが分かる。さらに、 $D$  の値が大きくなるほど、 $\tau_{o1}$  は小さくなる。

#### 4. まとめ

本研究では、ガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板の力学特性を解明し、ガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板の鋼板切断位置のはく離せん断応力が、ガラス繊維シート未挿入の場合のはく離せん断応力よりも常に小さくなることを明らかにした。

#### 参考文献

- 1)大倉一郎, 喜多伸明, 石川敏之: ガラス繊維シートが挿入された炭素繊維プレート接着鋼板の応力とはく離せん断応力, 土木学会第60回年次学術講演会概要集 第1部, I-494, pp.985-986, 2005.
- 2)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.689-696, 2000.

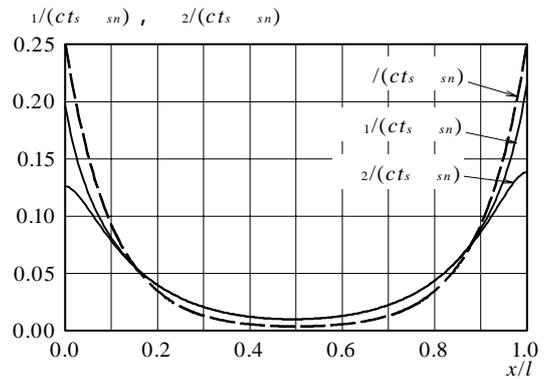


図-4 接着剤1と2に生じるせん断応力の分布

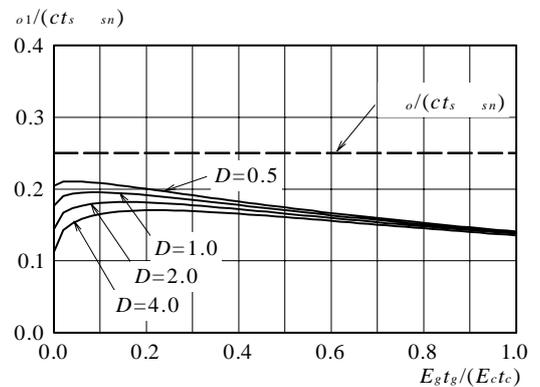


図-5  $\tau_{o1}$  と  $E_g t_g / (E_c t_c)$  の関係