

1. はじめに

炭素繊維強化樹脂板(以後、CFRP板と呼ぶ)による鋼部材の補修・補強が行われている¹⁾。補修・補強において、CFRP板を複数枚接着する場合がある。しかし、CFRP板が複数枚接着された鋼板に生じる応力および接着剤に生じるせん断応力と、剛性が等しい1枚のCFRP板が接着された鋼板に生じる応力および接着剤に生じるせん断応力は、接着剤のせん断遅れ現象のために異なる。そこで本研究では、図-1に示すような、鋼板に接着された2枚のCFRP板を1枚CFRP板に置換することの可能性を明らかにすることを目的とする。

2. CFRP板接着鋼板に生じる応力および接着剤に生じるせん断応力

CFRP板2枚接着鋼板の側面図を図-1に示す。接着剤はせん断応力を伝達し、鋼板とCFRP板は引張応力のみを伝達すると仮定して、CFRP板2枚接着鋼板に生じる応力 σ_s および接着剤1に生じるせん断応力 τ_1 がそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_s = \{A_1 \cosh(\alpha cx) + A_2 \cosh(\beta cx) + \xi\} \sigma_{sn} \quad (1)$$

$$\tau_1 = ct_s \{ \alpha A_1 \sinh(\alpha cx) + \beta A_2 \sinh(\beta cx) \} \sigma_{sn} / 2 \quad (2)$$

ここに、 $\xi = 1 / \{1 + 2(E_{c1}t_{c1} + E_{c2}t_{c2}) / E_s t_s\}$ 、 $J = 2E_{c2}t_{c2} / (E_s t_s + 2E_{c1}t_{c1})$ 、 $\alpha = \sqrt{r^2 + \sqrt{r^4 - s^4}}$ 、 $\beta = \sqrt{r^2 - \sqrt{r^4 - s^4}}$ 、 $s = \left[(1+J)^2 \xi (1-\xi) \lambda^2 / (DJ) \right]^{0.25}$ 、 $r = \sqrt{\lambda^2 \{1 + (1+J)^2 \xi (1-\xi) / (DJ)\} / 2}$ 、 $A_1 = (1-\xi)(1-\beta^2) / \{ \cosh(\alpha cl) (\alpha^2 - \beta^2) \}$ 、 $A_2 = -(1-\xi)(1-\alpha^2) / \{ \cosh(\beta cl) (\alpha^2 - \beta^2) \}$ 、 $D = h_2 G_{e1} / (h_1 G_{e2})$ 、 $\lambda = \sqrt{(1-\xi) / \{1 - (1+J)\xi\}}$ 、 $c = \sqrt{G_{e1} / h_1} \sqrt{2 / (1-\xi)} / \sqrt{E_s t_s}$ 、 E_s と t_s はそれぞれ、鋼板のヤング係数とその厚さ、 E_{c1} と t_{c1} はそれぞれ、CFRP板1のヤング係数とその厚さ、 E_{c2} と t_{c2} はそれぞれ、CFRP板2のヤング係数とその厚さ、 σ_{sn} は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 はそれぞれ、接着剤1のせん断弾性係数とその厚さ、 G_{e2} と h_2 はそれぞれ、接着剤2のせん断弾性係数とその厚さである。

CFRP板1枚接着鋼板に生じる応力と接着剤に生じるせん断応力はそれぞれ次式で与えられる²⁾。

$$\sigma_s = \{ \xi + (1-\xi) \cosh(cx) / \cosh(cl) \} \sigma_{sn} \quad (3)$$

$$\tau_1 = \{ ct_s (1-\xi) \sinh(cx) / 2 / \cosh(cl) \} \sigma_{sn} \quad (4)$$

2枚のCFRP板を剛性の等しい1枚のCFRP板に置換するので、次式が成立する。

$$E_c t_c = E_{c1} t_{c1} + E_{c2} t_{c2} \quad (5) \quad t_c = t_{c1} + t_{c2} \quad (6)$$

3. CFRP板接着鋼板に生じる応力

$\xi = 0.5$ 、 $E_{c1}t_{c1} / (E_s t_s) = E_{c2}t_{c2} / (E_s t_s) = 0.25$ 、 $cl = 4$ に対して、式(1)と(3)から算出される鋼板応力を図-2に示す。CFRP板2枚接着鋼板に生じる応力はCFRP板1枚接着鋼板に生じる応力まで低下しない。式(1)と(3)に $x = 0$ を代入して、CFRP板付着中央のCFRP板2枚接着鋼板に生じる応力とCFRP板1枚接着鋼板に生じる応力がそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_s = \{ A_1 + A_2 + \xi \} \sigma_{sn} \quad (7)$$

$$\sigma_s = \{ \xi + (1-\xi) / \cosh cl \} \sigma_{sn} \quad (8)$$

4. 接着剤に生じるせん断応力

$\xi = 0.5$ 、 $E_{c1}t_{c1} / (E_s t_s) = E_{c2}t_{c2} / (E_s t_s) = 0.25$ 、 $cl = 4$ に対して、式(2)と(4)から算出される接着剤1に生じるせん断応力を図-3に示す。接着剤に生じるせん断応力はCFRP板付着端で最大となる。これをはく離せん断応力と呼ぶ。式(2)と(4)に $x = l$ を代入して、CFRP板2枚接着鋼板の接着剤1に生じるはく離せん断応力 τ_e とCFRP板1枚接着鋼板の接

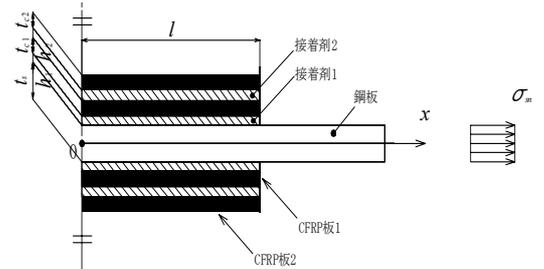


図-1 CFRP板2枚接着鋼板の側面図

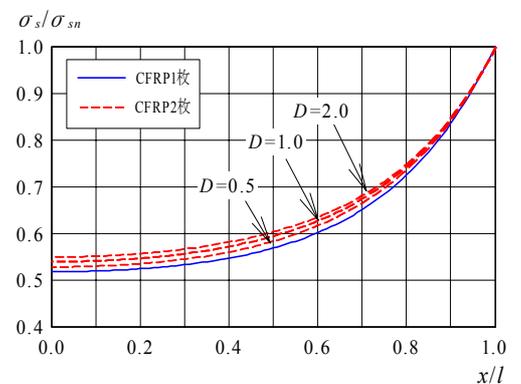


図-2 鋼板応力

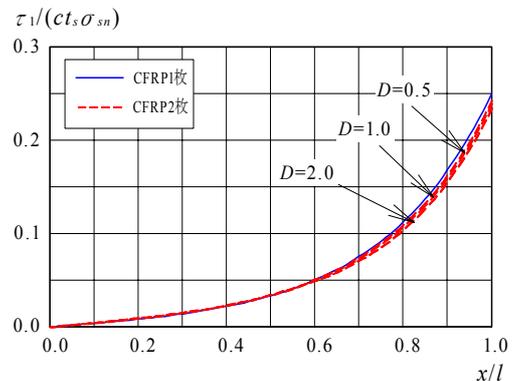


図-3 せん断応力

着剤に生じるはく離せん断応力 τ_e がそれぞれ次式で与えられる。

$$\tau_e = ct_s \{ \alpha A_1 \sinh(\alpha cl) + \beta A_2 \sinh(\beta cl) \} \sigma_{sn} / 2 \quad (9)$$

$$\tau_e = ct_s (1 - \xi) \tanh(cl) \sigma_{sn} / 2 \quad (10)$$

5. CFRP 板付着中央の鋼板に生じる応力

式(7)と(8)を等しくするような CFRP 板 1 枚接着鋼板の等価接着厚 h_{1e} が次式で与えられる。

$$\frac{h_{1e}}{h_1} = \left[\frac{cl}{\cosh^{-1} \left\{ \frac{(\alpha^2 - \beta^2) \cosh(\alpha cl) \cosh(\beta cl)}{(1 - \beta^2) \cosh(\beta cl) - (1 - \alpha^2) \cosh(\alpha cl)} \right\}} \right]^2 \quad (11)$$

式(11)から算出される h_{1e}/h_1 と cl の関係を図-4に示す。この図から分かるように、 cl が大きくなると h_{1e}/h_1 は一定値に収束する。この収束値に対応する等価接着厚 h_{1e} は次式で与えられる。

$$h_{1e} = h_1 / \beta^2 \quad (12)$$

式(8)の h_1 に式(12)を代入して、等価接着厚を用いた CFRP 板 1 枚接着鋼板の CFRP 板付着中央に生じる応力が次式で与えられる。

$$\sigma_s / \sigma_{sn} = \xi + (1 - \xi) / \cosh(c_e l) \quad (13)$$

$$c_e = \sqrt{G_{el} / h_{1e}} \sqrt{2 / (1 - \xi)} / \sqrt{E_s t_s}$$

式(7)を(13)で除して算出される $\sigma_s(2)/\sigma_s(1)$ と cl の関係を図-5に示す。 $\sigma_s(2)/\sigma_s(1)$ は常に1より小さい値をとる。

6. 接着剤に生じるはく離せん断応力

式(10)の h_1 に式(12)を代入して、等価接着厚を用いた CFRP 板 1 枚接着鋼板のはく離せん断応力が次式で与えられる。

$$\tau_e = c_e t_s (1 - \xi) \tanh(c_e l) \sigma_{sn} / 2 \quad (14)$$

式(9)を(14)で除して算出される $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ と cl の関係を図-6に示す。 cl が大きくなると $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ は次式で与えられる R に収束する。

$$R = (1 + \alpha\beta) / \{ (\alpha + \beta)\beta \} \quad (15)$$

したがって、式(14)に補正係数として R を乗じて、CFRP 板 1 枚接着鋼板のはく離せん断応力が次式で与えられる。

$$\tau_e / \sigma_{sn} = R c_e t_s (1 - \xi) \tanh(c_e l) / 2 \quad (16)$$

式(9)を(16)で除して算出される $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ と cl の関係を図-7に示す。式(16)は、 $c_e l$ が次の範囲で、 $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ が η 以下の収束度で成立する。

$$c_e l \geq \tanh^{-1} \left\{ \frac{(1 - \beta^2) \alpha}{\eta (\alpha - \beta) (1 + \alpha\beta) + (1 - \alpha^2) \beta} \right\} \quad (17)$$

ここに、 $\eta \geq 1$ 。

7. 結論

- (1) 式(12)で与えられる等価接着厚 h_{1e} を用いることによって、2枚接着鋼板の中央応力は式(13)で推定できる。
- (2) 式(12)で与えられる等価接着厚 h_{1e} と式(15)で与えられる補正係数 R を用いることによって、2枚接着鋼板のはく離せん断応力は式(16)で推定できる。

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回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集，pp.49-54，2002。
- 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.689/1-57，pp.239-249，2001。

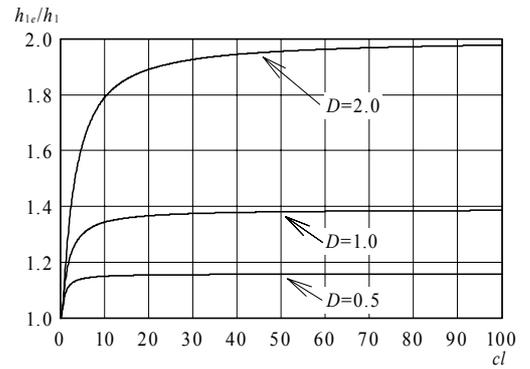


図-4 h_{1e}/h_1 と cl の関係

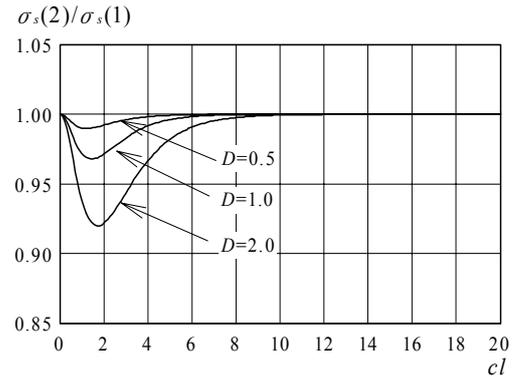


図-5 $\sigma_s(2)/\sigma_s(1)$ と cl の関係

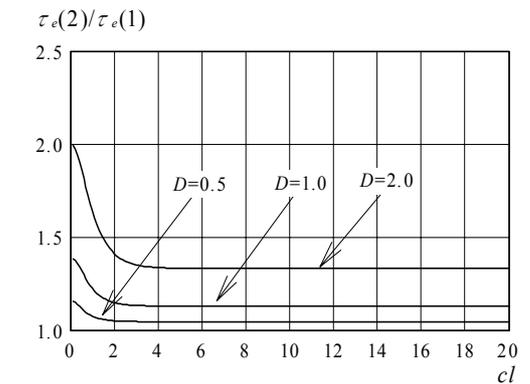


図-6 $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ と cl の関係

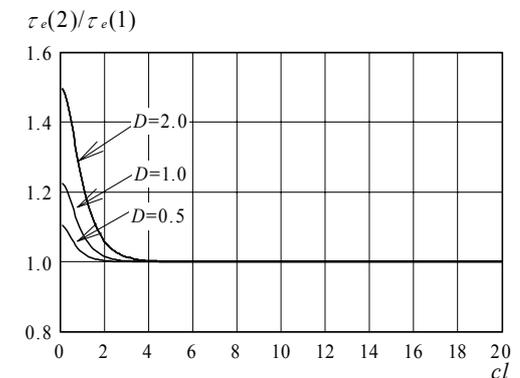


図-7 $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ と cl の関係