

複数枚 CFRP 板を 1 枚の CFRP 板に置換することの可能性

大阪大学院工学研究科 学生員 ○長井 和樹

大阪大学院工学研究科 学生員 西田 貴裕

大阪大学院工学研究科 正会員 大倉 一郎

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⁾. 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 枚の 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.

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

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

$$\text{ここに, } \xi = 1 / \{1 + 2(E_{c1}t_{c1} + E_{c2}t_{c2}) / E_s t_s\}, J = 2E_{c2}t_{c2} / (E_s t_s + 2E_{c1}t_{c1}),$$

$\alpha = \sqrt{r^2 + \sqrt{r^4 - s^4}}$, $\beta = \sqrt{r^2 - \sqrt{r^4 - s^4}}$, $s = \left[(1+J)^2 \xi (1-\xi) \lambda^2 / (DJ) \right]^{0.25}$, $r = \sqrt{\lambda^2 \{1 + (1+J)^2 \xi (1-\xi) / (DJ)\} / 2}$, $A_1 = (1-\xi)(1-\beta^2) / \{ \cosh(\alpha cl) (\alpha^2 - \beta^2) \}$, $A_2 = -(1-\xi)(1-\alpha^2) / \{ \cosh(\beta cl) (\alpha^2 - \beta^2) \}$, $D = h_2 G_{e1} / (h_1 G_{e2})$, $\lambda = \sqrt{(1-\xi) / \{1 - (1+J)\xi\}}$, $c = \sqrt{G_{e1} / h_1} \sqrt{2 / (1-\xi)} / \sqrt{E_s t_s}$, 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.

$$\sigma_s = \{A_1 + A_2 + \xi\} \sigma_{sn} \quad (7) \quad \sigma_s = \{ \xi + (1-\xi) / \cosh(cl) \} \sigma_{sn} \quad (8)$$

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.

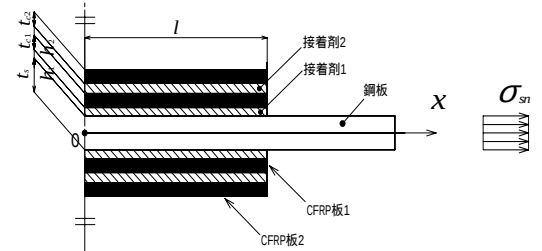


図 - 1 CFRP 板 2 枚接着鋼板の側面図

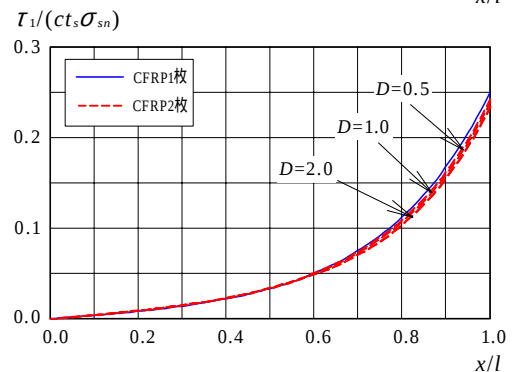
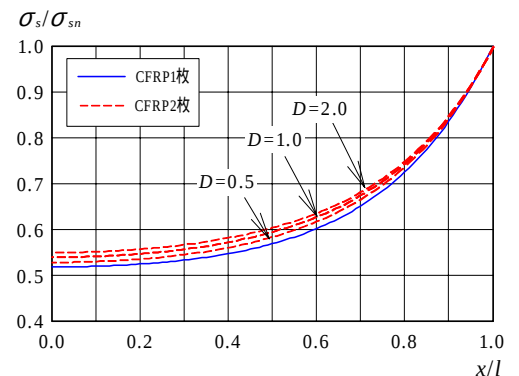


図 - 3 せん断応力

キーワード CFRP 板, せん断遅れ, 等価接着厚, はく離せん断応力

〒565-0871 吹田市山田 1-1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 TEL06-6879-7618

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

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

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} が次式で与えられる。

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

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。

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

ここに、 $c_e = \sqrt{G_{e1}/h_{1e}} \sqrt{2/(1 - \xi)} / \sqrt{E_s t_s}$

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)を式(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)を式(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、 η は 1 より大きい数値で、 η が 1 に近づくとき $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ は 1 に近づく。

特に、CFRP 板 1 と CFRP 板 2 の剛性が等しい場合、等価接着厚および補正係数を構成するパラメータ α および β は次に示すように簡単な表現になる。

$$\alpha = 2/\sqrt{a-b} \quad (18) \quad \beta = 2/\sqrt{a+b} \quad (19)$$

ここに、 $a = D \{ (1 + E_c t_c / (E_s t_s)) \} + 2$, $b = \sqrt{(a-4)^2 + 4D}$

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。

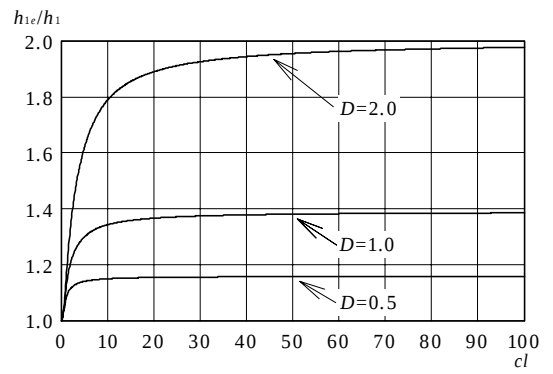


図 - 4 h_{1e}/h_1 と cl の関係

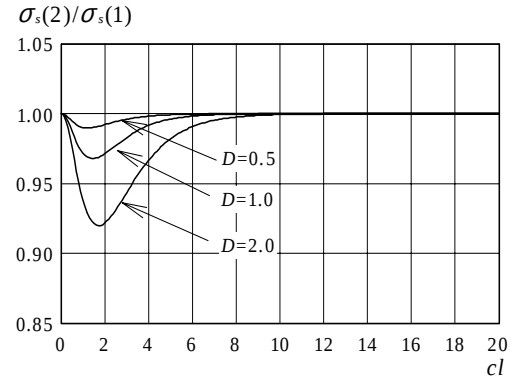


図 - 5 $\sigma_s(2)/\sigma_s(1)$ と cl の関係

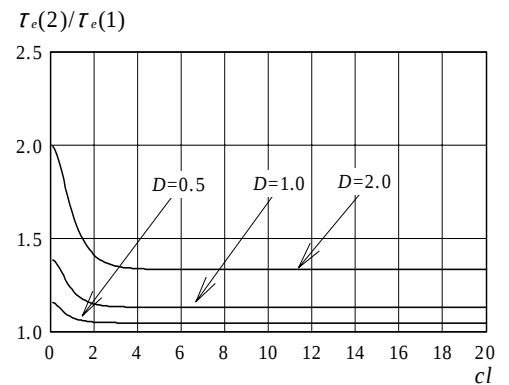


図 - 6 $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ と cl の関係

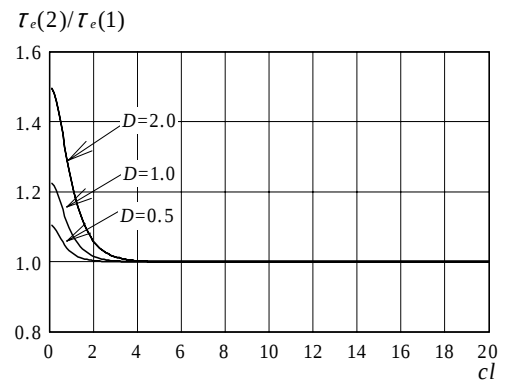


図 - 7 $\tau_e(2)/\tau_e(1)$ と cl の関係