

温度変化によってCFRP板接着鋼板に生じるはく離せん断応力

Debonding Shear Stress in Steel Plates with CFRP Strips Induced by Temperature Change

石川敏之*・大倉一郎**・横田季彦***・斉藤 誠****

Toshiyuki Ishikawa, Ichiro Okura, Suehiko Yokota and Makoto Saito

*正会員 博士(工) 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 特任研究員 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**正会員 工博 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 准教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

***正会員 工博 日本国土開発(株) 技術事業センター 部長 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1)

****正会員 日鉄コンポジット(株) 技術部 部長 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

In CFRP bonded steel members, the shear stress is caused in the adhesive by temperature change, due to difference in coefficients of thermal expansion between steel and CFRP. CFRP strips are often separated from steel plates by the debonding shear stress, which is the high shear stress developed in the adhesive at the ends of the CFRP strips. In this research, the debonding shear stress induced by temperature change is theoretically analyzed for CFRP bonded steel plates and also for the case a glass fiber sheet is inserted under CFRP strips. The analytical results are confirmed by the measurements of the strains created by temperature change in CFRP bonded steel plates.

Key Words: CFRP Strip, Steel Plate, Temperature Change, Debonding Shear Stress

キーワード: CFRP 板, 鋼板, 温度変化, はく離せん断応力

1. 序論

近年, 劣化や損傷した構造物へ, 炭素繊維強化樹脂板 (以後, CFRP 板とよぶ) を接着することによる補修・補強が行なわれ始めている^{1) 2)}. CFRP 板を接着する際, 特別な機材が不用であり, CFRP 板の質量が鋼やコンクリートと比べて軽いため, 大掛かりな足場を必要としない. このような利点から, CFRP 板の接着に関する研究が数多く行なわれている^{3) 4)}.

CFRP 板が接着された鋼板では, CFRP 板と鋼の線膨張係数が異なるため, 温度が変化すると鋼板と CFRP 板のひずみ差によって, CFRP 板と鋼板の間の接着剤にせん断応力が生じる. 引張力を受ける CFRP 板接着鋼板において, CFRP 板付着端の近傍の接着剤に高いせん断応力が生じ, このはく離せん断応力によって, CFRP 板が鋼板からはく離する場合がある. わが国では, 冬季と夏季の気温の差が 20°C 以上である地域が多く⁵⁾, 直射日光を受ける構造物ではさらに温度が上昇するために大きな温度変化を受けることが予想される. したがって, CFRP 板を鋼構造物へ接着する場合, 温度変化によって生じるはく離せん断応力の大きさを明らかにする必要がある.

他方, 著者らはこれまでに図-1 に示すように, 引張力を受ける場合について, CFRP 板と鋼板の間にガラス繊維シート (以後, GF シートとよぶ) を挿入することにより, GF シートが未挿入の場合よりも, CFRP 板付着端の接着剤

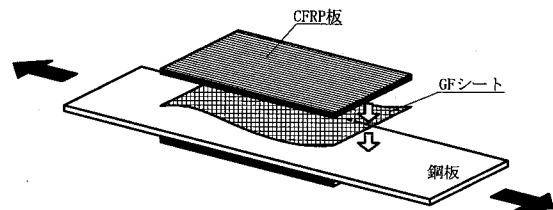


図-1 GF シートが挿入された CFRP 板接着鋼板

に生じるはく離せん断応力を低減できることを明らかにした^{6) 7)}.

本研究では, 温度変化によって CFRP 板接着鋼板に生じる応力および接着剤に生じるはく離せん断応力を, GF シート未挿入の場合と GF シート挿入の場合の両者に対して解析的に明らかにする. さらに, CFRP 板接着鋼板を製作し, 解析結果と試験結果の比較により, 解析結果の妥当性を明らかにする.

2. 基礎微分方程式の誘導とその解

最初に, GF シート未挿入の場合に対して, 温度変化によって CFRP 板接着鋼板に生じる応力に関する基礎微分方程式を誘導し, その解を導出する. 次に GF シート挿入の場合に対する基礎微分方程式とその解を与える.

2.1 GF シート未挿入の場合

GF シート未挿入のCFRP 板接着鋼板の側面を図-2に示す。接着剤はせん断力のみを伝達し、CFRP 板および鋼板は引張力のみを伝達すると仮定して、CFRP 板接着鋼板の内力のつりあいから次式を得る。

$$\sigma_s t_s b + 2\sigma_c t_c b = 0 \quad (1)$$

ここに、

σ_s, t_s : それぞれ、鋼板に生じる応力と厚さ、
 σ_c, t_c : それぞれ、CFRP 板に生じる応力と片面厚さ、
 b : CFRP 板接着鋼板の幅。

接着剤に生じるせん断応力 τ_0 を次式で仮定する。

$$\tau_0 = G_{el} \frac{u_s - u_c}{h_1} \quad (2)$$

ここに、

G_{el} : 接着剤のせん断弾性係数、
 u_s, u_c : それぞれ、鋼板、CFRP 板に生じる水平変位、
 h_1 : 接着剤の片面厚さ。
 さらに、 G_{el} は、次式で与えられる。

$$G_{el} = \frac{E_{el}}{2(1 + \mu_{el})} \quad (3)$$

ここに、

E_{el}, μ_{el} : それぞれ接着剤のヤング率とポアソン比。
 式(2)を x で微分して次式を得る。

$$\frac{d\tau_0}{dx} = \frac{G_{el}}{h_1} \left(\frac{du_s}{dx} - \frac{du_c}{dx} \right) \quad (4)$$

鋼板に生じる応力 σ_s 、温度変化によって鋼板に生じるひずみ ε_{st} および鋼板の水平変位 u_s の関係は次式で与えられる。

$$\frac{du_s}{dx} = \frac{\sigma_s}{E_s} + \varepsilon_{st} \quad (5)$$

ここに、

$$\varepsilon_{st} = \alpha_s \Delta T \quad (6)$$

E_s, α_s : それぞれ、鋼板のヤング率と線膨張係数、
 ΔT : 温度変化量。

同様に、CFRP 板に生じる応力 σ_c 、温度変化によってCFRP 板に生じるひずみ ε_{ct} およびCFRP 板の変位 u_c の関係は次式で与えられる。

$$\frac{du_c}{dx} = \frac{\sigma_c}{E_c} + \varepsilon_{ct} \quad (7)$$

ここに、

$$\varepsilon_{ct} = \alpha_c \Delta T \quad (8)$$

E_c, α_c : それぞれCFRP 板のヤング率と線膨張係数。
 式(5)、(7)を式(4)へ代入して次式を得る。

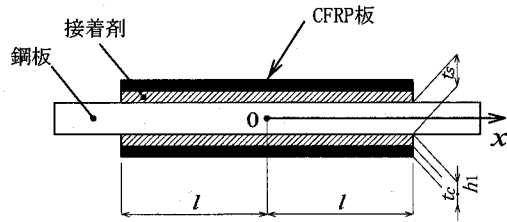


図-2 GF シート未挿入のCFRP 板接着鋼板

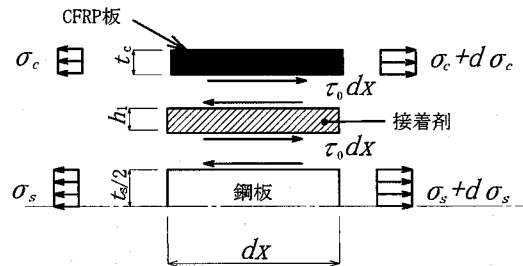


図-3 GF シート未挿入のCFRP 板接着鋼板の微小区間の力のつりあい

$$\frac{d\tau_0}{dx} = \frac{G_{el}}{h_1} \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_c}{E_c} + \Delta\varepsilon_t \right) \quad (9)$$

ここに、

$$\Delta\varepsilon_t = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{ct} = (\alpha_s - \alpha_c) \Delta T \quad (10)$$

鋼板の板厚中央から上側のCFRP 板接着鋼板の微小区間の力のつりあいを図-3に示す。このつりあいから次式を得る。

$$\tau_0 = \frac{t_s}{2} \frac{d\sigma_s}{dx} \quad (11)$$

この式を x で微分し、これに式(9)を代入して次式を得る。

$$\frac{t_s}{2} \frac{d^2\sigma_s}{dx^2} = \frac{G_{el}}{h_1} \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_c}{E_c} + \Delta\varepsilon_t \right) \quad (12)$$

式(1)と式(12)より、 σ_c を消去して、次の2階微分方程式を得る。

$$\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} - c^2\sigma_s = c^2(1 - \xi_0)E_s\Delta\varepsilon_t \quad (13)$$

ここに、

$$c = \sqrt{\frac{G_{el}}{h_1} \frac{2}{1 - \xi_0} \frac{1}{\sqrt{E_s t_s}}} \quad (14)$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + 2E_c t_c / (E_s t_s)} \quad (15)$$

図-2を参照して、 $x=0$ の位置で、鋼板応力が対称となる条件および $x=l$ の位置で、 $\sigma_s=0$ となる条件に対して式(13)を解くことにより、鋼板に生じる応力 σ_s 、CFRP 板に生じる応力 σ_c および接着剤に生じるせん断応力 τ_0 がそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_s = (1 - \xi_0) E_s \Delta \varepsilon_t \left\{ \frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)} - 1 \right\} \quad (16)$$

$$\sigma_c = -\frac{1 - \xi_0}{2} \frac{t_s}{t_c} E_s \Delta \varepsilon_t \left\{ \frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)} - 1 \right\} \quad (17)$$

$$\tau_0 = \frac{1 - \xi_0}{2} c t_s E_s \Delta \varepsilon_t \frac{\sinh(cx)}{\cosh(cl)} \quad (18)$$

ここに,

l : CFRP 板の半長さ.

2.2 GF シート挿入の場合

GF シートが挿入された CFRP 板接着鋼板の側面を図-4 に示す. 接着剤 1 および 2 は, それぞれ, 鋼板と GF シートの間および GF シートと CFRP 板の間の接着剤である. 接着剤 1 のヤング率, ポアソン比および片面厚さは, GF シート未挿入の場合の接着剤のそれらと同じである. GF シートが引張力のみを伝達すると仮定して, GF シートが挿入された CFRP 板接着鋼板の内力のつりあいより次式を得る.

$$\sigma_s t_s b + 2\sigma_g t_g b + 2\sigma_c t_c b = 0 \quad (19)$$

ここに,

σ_g, t_g : それぞれ, GF シートに生じる応力と片面厚さ.

接着剤 1 に生じるせん断応力 τ_1 および接着剤 2 に生じるせん断応力 τ_2 をそれぞれ次式で仮定する.

$$\tau_1 = G_{e1} \frac{u_s - u_g}{h_1} \quad (20)$$

$$\tau_2 = G_{e2} \frac{u_g - u_c}{h_2} \quad (21)$$

ここに,

G_{e2} : 接着剤 2 のせん断弾性係数,

u_g : GF シートに生じる水平変位,

h_2 : 接着剤 2 の片面厚さ.

さらに, G_{e2} は, 次式で与えられる.

$$G_{e2} = \frac{E_{e2}}{2(1 + \mu_{e2})} \quad (22)$$

ここに,

E_{e2}, μ_{e2} : それぞれ, 接着剤 2 のヤング率とポアソン比.

式(20), (21)を x で微分してそれぞれ次式を得る.

$$\frac{d\tau_1}{dx} = \frac{G_{e1}}{h_1} \left(\frac{du_s}{dx} - \frac{du_g}{dx} \right) \quad (23)$$

$$\frac{d\tau_2}{dx} = \frac{G_{e2}}{h_2} \left(\frac{du_g}{dx} - \frac{du_c}{dx} \right) \quad (24)$$

GF シートに生じる応力 σ_g , 温度変化によって GF シー

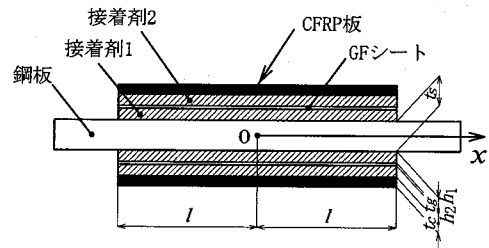


図-4 GF シートが挿入された CFRP 板接着鋼板

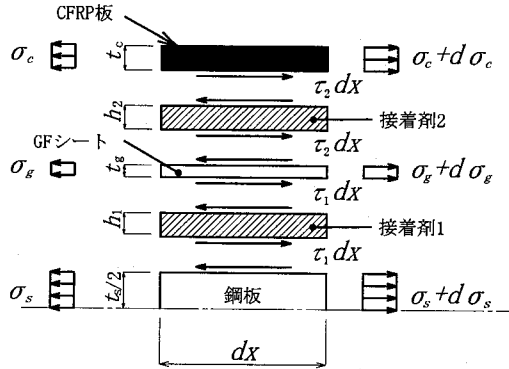


図-5 GF シートが挿入された CFRP 板接着鋼板の微小区間の力のつりあい

トに生じるひずみ ε_{gt} および GF シートの水平変位 u_g の関係は次式で与えられる.

$$\frac{du_g}{dx} = \frac{\sigma_g}{E_g} + \varepsilon_{gt} \quad (25)$$

ここに,

$$\varepsilon_{gt} = \alpha_g \Delta T \quad (26)$$

E_g, α_g : それぞれ GF シートのヤング率と線膨張係数. 式(5), (25)を式(23)へ代入して次式を得る.

$$\frac{d\tau_1}{dx} = \frac{G_{e1}}{h_1} \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_g}{E_g} + \Delta \varepsilon_{t1} \right) \quad (27)$$

ここに,

$$\Delta \varepsilon_{t1} = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{gt} = (\alpha_s - \alpha_g) \Delta T \quad (28)$$

同様に, 式(7), (25)を式(24)へ代入して次式を得る.

$$\frac{d\tau_2}{dx} = \frac{G_{e2}}{h_2} \left(\frac{\sigma_g}{E_g} - \frac{\sigma_c}{E_c} + \Delta \varepsilon_{t2} \right) \quad (29)$$

ここに,

$$\Delta \varepsilon_{t2} = \varepsilon_{gt} - \varepsilon_{ct} = (\alpha_g - \alpha_c) \Delta T \quad (30)$$

鋼板の板厚中央から上側に対して, GF シートが挿入された CFRP 板接着鋼板の微小区間の力のつりあいを図-5 に示す. このつりあいから次式を得る.

$$\tau_1 = \frac{t_s}{2} \frac{d\sigma_s}{dx} \quad (31)$$

$$\tau_2 - \tau_1 = t_g \frac{d\sigma_g}{dx} \quad (32)$$

$$\tau_2 = -t_c \frac{d\sigma_c}{dx} \quad (33)$$

式(32)を x で微分し、これに式(27)および式(29)を代入し、整理して次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d^2\sigma_g}{dx^2} = & \left(\frac{G_{e2}t_s}{2h_2E_c t_c t_g} - \frac{G_{e1}}{h_1E_s t_g} \right) \sigma_s \\ & + \left(\frac{h_2G_{e1} + h_1G_{e2}}{h_1h_2E_g t_g} + \frac{G_{e2}}{h_2E_c t_c} \right) \sigma_g \\ & - \frac{G_{e1}}{h_1t_g} \Delta\varepsilon_{11} + \frac{G_{e2}}{h_2t_g} \Delta\varepsilon_{12} \end{aligned} \quad (34)$$

他方、式(31)を式(27)に代入して次式を得る。

$$\frac{\sigma_g}{E_g} = -\frac{h_1t_s}{2G_{e1}} \frac{d^2\sigma_s}{dx^2} + \frac{\sigma_s}{E_s} + \Delta\varepsilon_{11} \quad (35)$$

式(34)と式(35)より、 σ_g を消去して、次の4階微分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d^4\sigma_s}{dx^4} - 2(cr)^2 \frac{d^2\sigma_s}{dx^2} + (cs)^4 \sigma_s = \\ - (cs)^4 \frac{1-\xi_0}{1+F} E_s \left\{ \left(1 + \frac{F}{1-\xi_0} \right) \Delta\varepsilon_{11} + \Delta\varepsilon_{12} \right\} \end{aligned} \quad (36)$$

ここに、

$$r = \sqrt{\frac{1-\xi_0}{2F} \left\{ \xi_0 + F + \frac{(1+F-\xi_0)\xi_0}{D(1-\xi_0)} \right\}} \quad (37)$$

$$s = \left\{ \frac{\xi_0(1-\xi_0)(1+F)}{DF} \right\}^{0.25} \quad (38)$$

$$F = \frac{2E_g t_g}{E_s t_s + 2E_c t_c} = \frac{E_g t_g}{E_c t_c} (1-\xi_0) \quad (39)$$

$$D = \frac{h_2 G_{e1}}{h_1 G_{e2}} \quad (40)$$

図-4を参照して、 $x=0$ の位置で鋼板応力が対称となる条件および $x=l$ において $\sigma_s=0$ 、 $\sigma_g=0$ となる条件に対して、 $r>s$ であることを考慮して、式(36)を解き次式を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_s = & A_1 \cosh(\alpha x) + A_2 \cosh(\beta x) \\ & - \frac{1-\xi_0}{1+F} E_s \left\{ \left(1 + \frac{F}{1-\xi_0} \right) \Delta\varepsilon_{11} + \Delta\varepsilon_{12} \right\} \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \sigma_g = & \frac{t_s}{2t_g \xi_0} \left[\left(F - \frac{F}{1-\xi_0} \alpha^2 \right) A_1 \cosh(\alpha x) \right. \\ & + \left. \left(F - \frac{F}{1-\xi_0} \beta^2 \right) A_2 \cosh(\beta x) \right. \\ & \left. + E_s \frac{F}{1+F} \left\{ \xi_0 \Delta\varepsilon_{11} - (1-\xi_0) \Delta\varepsilon_{12} \right\} \right] \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \sigma_c = & \frac{-t_s}{2t_c \xi_0} \left[\left(F + \xi_0 - \frac{F}{1-\xi_0} \alpha^2 \right) A_1 \cosh(\alpha x) \right. \\ & + \left. \left(F + \xi_0 - \frac{F}{1-\xi_0} \beta^2 \right) A_2 \cosh(\beta x) \right. \\ & \left. - E_s \frac{1-\xi_0}{1+F} \left\{ \xi_0 \Delta\varepsilon_{11} + (F + \xi_0) \Delta\varepsilon_{12} \right\} \right] \end{aligned} \quad (43)$$

$$\tau_1 = \frac{ct_s}{2} \left\{ A_1 \alpha \sinh(\alpha x) + A_2 \beta \sinh(\beta x) \right\} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \frac{ct_s}{2\xi_0} \left\{ \left(F + \xi_0 - \frac{F}{1-\xi_0} \alpha^2 \right) A_1 \alpha \sinh(\alpha x) \right. \\ & + \left. \left(F + \xi_0 - \frac{F}{1-\xi_0} \beta^2 \right) A_2 \beta \sinh(\beta x) \right\} \end{aligned} \quad (45)$$

ここに、

$$\alpha = \sqrt{r^2 + \sqrt{r^4 - s^4}} \quad (46)$$

$$\beta = \sqrt{r^2 - \sqrt{r^4 - s^4}} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} A_1 = & \frac{E_s}{(\alpha^2 - \beta^2) \cosh(\alpha cl)} \frac{1-\xi_0}{1+F} \\ & \left[\left\{ 1 + F - \left(1 + \frac{F}{1-\xi_0} \right) \beta^2 \right\} \Delta\varepsilon_{11} - \beta^2 \Delta\varepsilon_{12} \right] \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} A_2 = & \frac{-E_s}{(\alpha^2 - \beta^2) \cosh(\beta cl)} \frac{1-\xi_0}{1+F} \\ & \left[\left\{ 1 + F - \left(1 + \frac{F}{1-\xi_0} \right) \alpha^2 \right\} \Delta\varepsilon_{11} - \alpha^2 \Delta\varepsilon_{12} \right] \end{aligned} \quad (49)$$

3. 温度変化を受けるCFRP板接着鋼板の力学特性

3.1 鋼板に生じる応力

鋼の線膨張係数 $\alpha_s=12\mu/^\circ\text{C}$ 、CFRP板の線膨張係数 $\alpha_c=0.7\mu/^\circ\text{C}$ 、温度変化量 $\Delta T=20^\circ\text{C}$ および -20°C に対して、式(16)から計算されるCFRP板接着鋼板に生じる応力分布を図-6に示す。この図には、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$ 、 $cl=10$ に

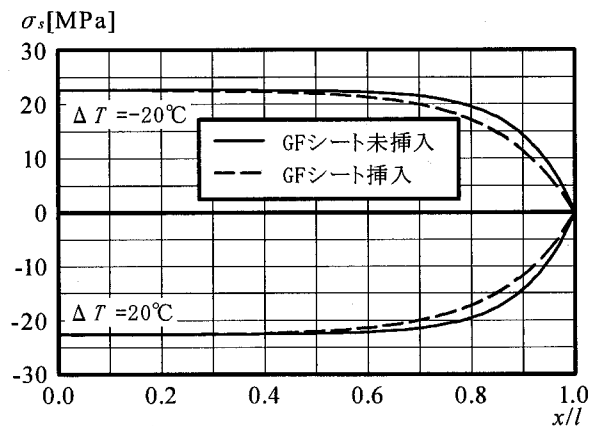


図-6 鋼板応力の分布

対する結果が示されている。さらに GF シートの線膨張係数 $\alpha_g = 5 \mu / C$, $E_{gtg} / (E_c t_c) = 0.02$, $D = 1.0$ に対して式(41)から計算される GF シート挿入の場合の CFRP 板接着鋼板に生じる応力分布が破線で示されている。横軸は CFRP 板付着長さの中央からの距離 x を CFRP 板付着半長さ l で除した値を示している。

図-6 から分かるように, $\Delta T = 20^\circ C$ に対して, 鋼板に圧縮応力が生じ, $\Delta T = -20^\circ C$ に対して, 鋼板に引張応力が生じている。 x/l が 0.6~1.0 の間で, GF シート挿入の場合の鋼板応力 σ_s の値は, GF シート未挿入の場合のそれより小さいが, $x/l = 0$ では, GF シート挿入の場合の σ_s の値は, GF シート未挿入の場合のそれとほぼ等しい。

GF シート未挿入の場合と挿入の場合について, 鋼板中央の位置 ($x=0$) に生じる σ_s は, 式(16)および式(41)~それぞれ $x=0$ を代入して次式で与えられる。

$$\sigma_s = (1 - \xi_0) E_s \Delta \varepsilon_t \left(\frac{1}{\cosh(cl)} - 1 \right) \quad (50)$$

$$\sigma_s = A_1 + A_2 - \frac{1 - \xi_0}{1 + F} E_s \left\{ \left(1 + \frac{F}{1 - \xi_0} \right) \Delta \varepsilon_{t1} + \Delta \varepsilon_{t2} \right\} \quad (51)$$

さらに, cl が大きくなると, $1/\cosh(cl)$, $1/\cosh(\alpha cl)$ および $1/\cosh(\beta cl)$ は 0 に収束するため, 式(50), (51) はそれぞれ次式に収束する。

$$\sigma_s = -(1 - \xi_0) E_s \Delta \varepsilon_t \quad (52)$$

$$\sigma_s = -\frac{1 - \xi_0}{1 + F} E_s \left\{ \left(1 + \frac{F}{1 - \xi_0} \right) \Delta \varepsilon_{t1} + \Delta \varepsilon_{t2} \right\} \quad (53)$$

3.2 はく離せん断応力

3.1 節と同じ線膨張係数と温度変化量に対して, 式(18)から計算される接着剤に生じるせん断応力の分布を図-7に示す。さらに, 式(44)と式(45)から計算される接着剤1と2に生じるせん断力の分布が破線で示されている。図-7に

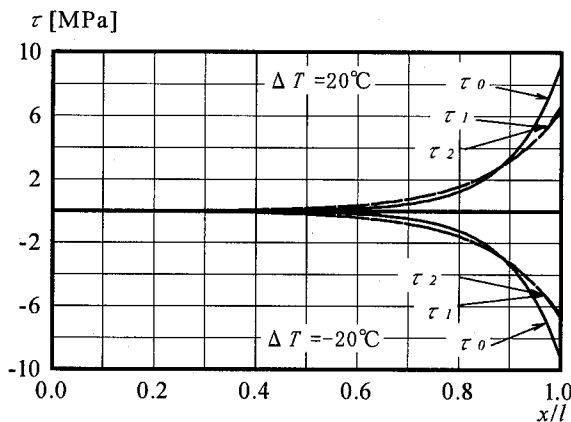


図-7 接着剤に生じるせん断応力の分布

において, τ_1 と τ_2 はほぼ重なっている。この図から, 温度変化によって CFRP 板接着鋼板の接着剤に生じるせん断応力は CFRP 板付着端 ($x=l$) で最大となることが分かる。GF シート挿入の場合の CFRP 板付着端の接着剤に生じる τ_1 と τ_2 の値は, GF シート未挿入の場合のそれよりも小さい。

GF シート未挿入の場合と挿入の場合について, CFRP 板付着端の接着剤に生じるせん断応力, すなわちはく離せん断応力は, 式(18), 式(44)および式(45)~それぞれ $x=l$ を代入して次式で与えられる。

$$\tau_{0e} = \frac{1 - \xi_0}{2} c t_s E_s \Delta \varepsilon_t \tanh(cl) \quad (54)$$

$$\tau_{1e} = \frac{c t_s}{2} \{ B_1 \alpha \sinh(\alpha cl) + B_2 \beta \sinh(\beta cl) \} \quad (55)$$

$$\tau_{2e} = \frac{c t_s}{2 \xi_0} \left\{ \left(F + \xi_0 - \frac{F}{1 - \xi_0} \alpha^2 \right) A_1 \alpha \sinh(\alpha cl) + \left(F + \xi_0 - \frac{F}{1 - \xi_0} \beta^2 \right) A_2 \beta \sinh(\beta cl) \right\} \quad (56)$$

さらに, cl が大きくなると, 式(54), 式(55)および式(56)はそれぞれ次式に収束する。

$$\tau_{0e} = \frac{1 - \xi_0}{2} c t_s E_s \Delta \varepsilon_t \quad (57)$$

$$\tau_{1e} = \frac{1 - \xi_0}{2(1 + F) \sqrt{2(r^2 + s^2)}} c E_s t_s \quad (58)$$

$$\left[\left\{ 1 + F + \left(1 + \frac{F}{1 - \xi_0} \right) s^2 \right\} \Delta \varepsilon_{t1} + s^2 \Delta \varepsilon_{t2} \right]$$

$$\tau_{2e} = \frac{(1 - \xi_0) c E_c t_c}{2 \xi_0 \sqrt{2(r^2 + s^2)}} \left[\left[-\frac{F}{1 - \xi_0} (2r^2 + s^2) + \frac{1 - \xi_0 + F}{(1 - \xi_0)(1 + F)} \left\{ \xi_0 + F + \frac{F}{1 - \xi_0} s^2 \right\} s^2 + \xi_0 + F \right] \Delta \varepsilon_{t1} + \frac{1}{1 + F} \left\{ \xi_0 + F + \frac{F}{1 - \xi_0} s^2 \right\} s^2 \Delta \varepsilon_{t2} \right] \quad (59)$$

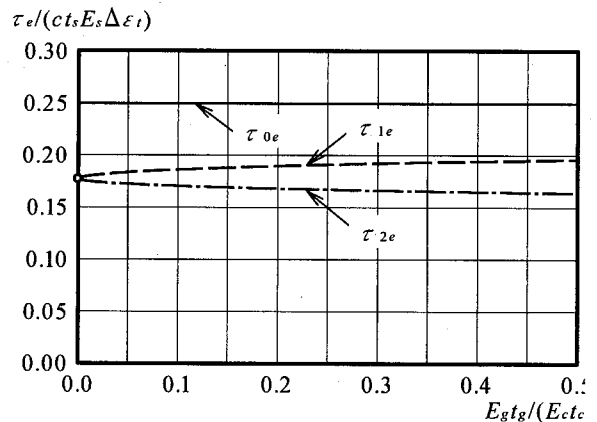


図-8 $\tau_e / (c t_s E_s \Delta \varepsilon_t)$ と $E_{gtg} / (E_c t_c)$ の関係

$\Delta T = 20^\circ\text{C}$ の場合について、 $\alpha_s = 12 \mu\text{/}^\circ\text{C}$ 、 $\alpha_c = 0.7 \mu\text{/}^\circ\text{C}$ 、 $\alpha_g = 5 \mu\text{/}^\circ\text{C}$ 、 $E_c t_c / (E_s t_s) = 0.5$ および $D = 1.0$ に対して、式(57)、式(58)および式(59)から計算される $\tau_e / (c t_s E_s \Delta \varepsilon_s)$ と $E_g t_g / (E_c t_c)$ の関係を図-8に示す。この図から分かるように、 τ_{1e} と τ_{2e} はともに τ_{0e} よりも小さく、 τ_{1e} と τ_{2e} の値の差は小さいことが分かる。

$E_g t_g / (E_c t_c)$ が小さくなると、 τ_{1e} と τ_{2e} は共に次式に収束する。

$$\tau_{12e} = \frac{1 - \xi_0}{2\sqrt{1+D}} c t_s E_s \Delta \varepsilon_s = \frac{\tau_{0e}}{\sqrt{1+D}} \quad (60)$$

この式から、挿入される GF シートの剛性が CFRP 板のそれと比べて非常に小さくなると、CFRP 板接着鋼板の接着剤に生じるはく離せん断応力は、GF シート未挿入の場合のはく離せん断応力の $1/\sqrt{1+D}$ 倍まで低減できることが分かる。

4. 解析結果と試験結果の比較

4.1 試験片

試験片の種類を図-9に示す。図-9(a)の試験片 C は GF シート未挿入の CFRP 板接着鋼板であり、図-9(b)の試験片 CG は GF シートが挿入された CFRP 板接着鋼板である。試験片 CG では、GF シートの端が CFRP 板の端より 10 mm 長くしてある。これは、GF シートの端の仕上げによる CFRP 板のはく離荷重のばらつきを小さくするためである¹⁰⁾。

試験片は、図-10に示すように、幅 50 mm、長さ 470 mm の鋼板の中央の両面に、幅 50 mm、長さ 280 mm の CFRP 板が接着されている。所定の剛性を得るために、鋼板の各面に、それぞれ1枚の厚さが 2.07 mm の CFRP 板を3枚接着している。CFRP 板および GF シートの繊維方向は、鋼板の長さ方向と同じである。CFRP 板が接着される鋼板の表面は、#60 の褐色アルミナ研磨剤(JIS R 611)でブラスト処理されている。室温 20°C、湿度 65% の恒温恒湿状態で約 2 週間、試験片を養生した。

4.2 材料特性

鋼板、GF シート、CFRP 板および接着剤の材料特性を表-1に示す。接着剤にはエポキシ樹脂を用いた。接着剤 1 と 2 は同じ材料である。接着剤の引張り強さ、ヤング率およびポアソン比は 5 本の JIS K 7113 の 1 号試験片の平均値、せん断強さは 5 本の JIS K 6850 の試験片の平均値である。

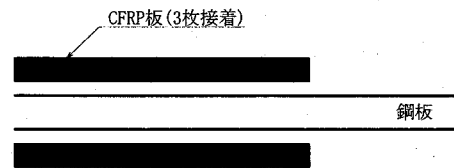
GF シート未挿入の場合、接着剤の厚さ h_1 は、次式を用いて算出した。

$$h_1 = (t_a - t_s - 2t_c) / 2 \quad (61)$$

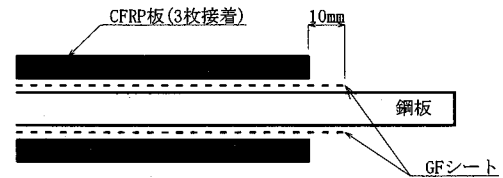
ここに、

t_a : 計測した全厚さ。

GF シート挿入の場合、接着剤 1 と 2 の厚さ h_1 と h_2 は、接着剤の塗布質量の比より、次式から算出した。

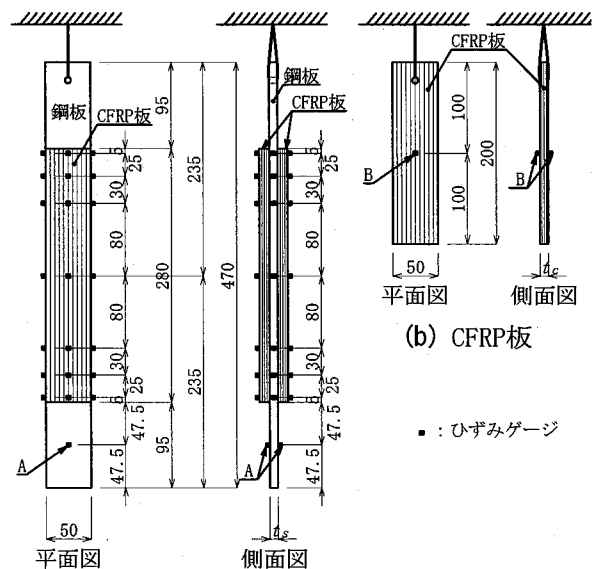


(a) 試験片 C



(b) 試験片 CG

図-9 試験片の種類



(a) 試験片

(b) CFRP板

・ : ひずみゲージ

図-10 試験方法とひずみゲージの貼付け位置

$$h_1 + h_2 = (t_a - t_s - 2t_c - 2t_g) / 2 \quad (62)$$

$$h_1 / h_2 = 14w_1 / (15w_2) \quad (63)$$

ここに、

w_1, w_2 : それぞれ接着剤 1 と 2 の塗布質量。

$t_a, w_1/w_2$ および算出した接着剤 1 と 2 の厚さ h_1 と h_2 を表-2に示す。この表には、試験片の ξ_0 、 $E_c t_c / (E_s t_s)$ 、 $E_g t_g / (E_c t_c)$ 、 D 、 cl の値も示されている。

4.3 試験方法

図-10(a)に示すように、試験片を鉛直に吊るした状態で、15°C から 35°C へ温度を上昇させた場合と 35°C から 15°C へ温度を低下させた場合について試験を行った。

ひずみの計測位置も図-10(a)に示す。鋼板の両側面と、CFRP 板の両表面のひずみを 3 線式リード線付きひずみゲージ(鋼材用)で計測した。さらに、図-10(a)において CFRP 板の拘束を受けない点 A の位置の鋼板のひずみ、および図-10(b)に示すように、鉛直に吊るされた CFRP 板の点 B

表-1 材料特性

(a) 鋼材

鋼材	SM490Y	
実測板厚 t_s [mm]	8.66	
ヤング率 E_s [GPa]	209.3	
降伏応力 σ_Y [MPa]	上降伏点	383.2
	下降伏点	378.9
引張強さ [MPa]	543.4	
ポアソン比 μ	0.28	
伸び率 [%]	27.0	

(b) CFRP 板

1枚の厚さ t_{c1} [mm]	2.07
1枚のヤング率 E_{c1} [GPa]	147.3
1枚の引張強さ [MPa]	2590
3枚の厚さ t_c [mm]	6.47
3枚のヤング率 E_c [GPa]	141.5

(c) 接着剤 1 と 2

引張強さ [MPa]	52.0
ヤング率 E_e [GPa]	2.70
ポアソン比 μ_e	0.36
せん断強さ [MPa]	22.0

(d) GF シート

ガラス繊維目付け [g/m ²]	310
密度 [g/m ³]	2.55×10 ⁶
ガラス繊維 1 層の換算厚さ t_g [mm]	0.122
ヤング率 E_g [GPa]	87
引張強さ [MPa]	1944

表-2 試験片の t_a , w_1/w_2 , h_1 , h_2 , ξ_0 , $E_{ctc}/(E_s t_s)$, $E_g t_g/(E_c t_c)$, D および cl の値

試験片	t_a [mm]	w_1/w_2	h_1 [mm]	h_2 [mm]	ξ_0	$E_{ctc}/E_s t_s$	$E_g t_g/E_c t_c$	D	cl
C	22.21	—	0.30	—	0.497	0.505	—	—	11.85
CG	23.64	1.02	0.44	0.46	0.497	0.505	0.012	1.050	9.88

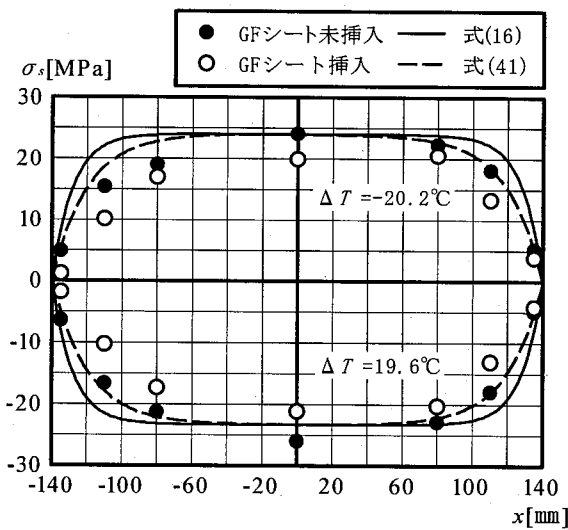


図-11 鋼板応力の分布

の位置のひずみを計測した。CFRP 板接着鋼板の鋼板と CFRP 板の温度を熱伝対により計測した。

4.4 試験結果

(1) 鋼板に生じる応力

計測された試験片の温度変化 ΔT は温度上昇に対して 19.6°C 、温度降下に対して -20.2°C であった。温度上昇および降下に対して、計測された鋼板応力 σ_s の分布を図-11

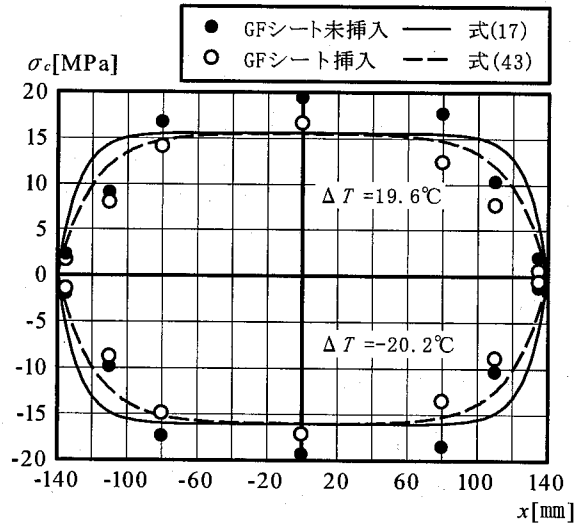


図-12 CFRP 板に生じる応力の分布

に示す。鋼板応力 σ_s は、次式から算出した。

$$\sigma_s = E_s (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{Am}) \quad (64)$$

ここに、

ε_{sm} : CFRP 板接着鋼板の鋼板両側面の計測ひずみの平均値、

ε_{Am} : 図-10(a)において点 A の CFRP 板の拘束を受けない鋼板の計測ひずみの平均値。

鋼板のヤング率 E_s は表-1 の値を用いた。式(64)のよう

に、 ε_{sm} から ε_{Am} を引くことにより、温度によるひずみの影響が完全に除去される。図-11には、 $\Delta T = 19.6$ および -20.2°C に対して、表-2 の値を式(16)および式(41)へ代入して計算される σ_s の分布も示されている。鋼板、CFRP 板および GF シートの線膨張係数はそれぞれ $\alpha_s = 12 \mu/\text{C}$ 、 $\alpha_c = 0.7 \mu/\text{C}$ および $\alpha_g = 5 \mu/\text{C}$ である。図の横軸は、CFRP 板付着長さの中央からの距離 x が示されている。

図-11 から分かるように、試験結果と式(16)あるいは式(41)から算出される応力分布は、全体的な傾向が合っている。試験結果においても、GF シートが挿入された試験片 CG の鋼板応力が、GF シート未挿入の試験片 C のそれよりも小さい。しかし詳細に見ると、試験結果は解析結果から少し離れている。この原因は、試験片と解析モデルとの相違に起因するものと考えられ、今後の検討課題である。

(2) CFRP 板に生じる応力

CFRP 板に生じる応力 σ_c の分布を図-12 に示す。CFRP 板に生じる応力 σ_c は、次式から算出した。

$$\sigma_c = E_c (\varepsilon_{cm} - \varepsilon_{Bm}) \quad (65)$$

ここに、

ε_{cm} : CFRP 板接着鋼板の CFRP 板両表面の計測ひずみの平均値、

ε_{Bm} : 図-10(b) の点 B の拘束を受けない CFRP 板の計測ひずみの平均値。

CFRP 板のヤング率 E_c は、表-1 の値を用いた。鋼板応力の算出の場合と同様に、 ε_{cm} から ε_{Bm} を引くことにより、温度によるひずみの影響が完全に除去される。図-12 には、式(17)および式(43)から算出される CFRP 板の応力分布も示されている。

この図から分かるように、試験結果と式(17)あるいは式(43)から算出される応力分布は、全体的な傾向が合っている。しかし詳細に見ると、鋼板応力の分布の場合と同様に、試験結果は解析結果から少し離れている。

5. 結論

本研究で得た主な結論を以下に示す。

- 1) ガラス繊維シート未挿入の場合と挿入の場合の両者に対して、温度変化によって CFRP 板接着鋼板に生じる応力の基礎微分方程式を誘導し、その解を与えた。さらに、CFRP 板接着鋼板に生じるはく離せん断応力を導出した。
- 2) ガラス繊維シートを CFRP 板と鋼板の間に挿入することにより、温度変化を受ける CFRP 板接着鋼板に生じ

るはく離せん断応力が、ガラス繊維シート未挿入の場合のそれよりも低下する。

- 3) 温度変化によって CFRP 板接着鋼板に生じる鋼板応力の分布と CFRP 板応力の分布に対して、全体的な傾向は、試験結果と解析結果で合う。

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, pp.49-54, 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, 永崎央陽, 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: 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.
- 5) 野坂克義, 金子大昨, 古川喬朗, 鈴川研二, 西出 靖: CFRP 板接着補強において被着体厚さが補強効果に与える影響に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 10 巻 第 38 号, pp.61-68, 2003.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 姜 威, 中村一史, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫: CFRP 板と鋼板の接着特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, 2006.
- 9) 自然科学研究機構 国立天文台: 年理科年表平成 19 年, 丸善, 2006.
- 10) 石川敏之, 小村啓太, 大倉一郎, 横田季彦, 斉藤 誠: ガラス繊維シートの端部仕上げが CFRP 板接着鋼板のはく離せん断応力に与える影響, 平成 19 年度土木学会関西支部年次学術講演会 講演概要集, I-68, 2007.

(2007 年 4 月 12 日 受付)