CFRP 板付着端近傍への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の低減

Reduction of debonding shear stress by using a low elastic modulus adhesive around the ends of CFRP strips

石川敏之*, 大倉一郎**, 西田貴裕***, 横田季彦[†], 斉藤 誠^{††} Toshiyuki Ishikawa, Ichiro Okura, Takahiro Nishida, Suehiko Yokota, Makoto Saito

*博士(工)名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 助教(〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町) **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) ***大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1) [†]工博 日本国土開発㈱ 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) ^{††}日鉄コンポジット㈱ 技術部 部長(〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

Recently, many research reports have been published on the application of CFRP strips to repair and strengthening of steel members. CFRP strips often peel off from steel plates due to high shear stress, namely debonding shear stress, which is produced in the adhesive at the ends of CFRP strips. In this study, it is shown that the debonding shear stress is reduced by using a low elastic modulus adhesive around the ends of CFRP strips. Solving the differential equation regarding the stress of CFRP bonded steel plates with a low modulus adhesive around the ends of cFRP strips in steel plates and the debonding shear stress in steel plates and the debonding shear stress in the adhesive are clarified. The analytical results are confirmed by the tensile tests of steel plates with a low elastic modulus adhesive around the ends of CFRP strips.

Key Words: CFRP strip, steel plate, debonding shear stress, low elastic modulus adhesive キーワード: CFRP 板, 鋼板, はく離せん断応力, 低弾性接着剤

1. 序論

現在,鋼構造部材の補修・補強へ,炭素繊維強化樹脂 板(以下, CFRP 板と呼ぶ)が適用され始めている^{1),2)}. CFRP 板は鋼やコンクリートと比べて軽いので,大掛か りな足場等を必要としないため,簡易に補修・補強が行 なえる. CFRP 板による鋼構造部材の補修・補強では, CFRP 板付着端の接着剤に高いせん断応力すなわち,は く離せん断応力が生じるため,作用荷重の大きさによっ ては CFRP 板がはく離する場合がある.

著者らは、これまでに、CFRP 板と鋼板の間にガラス 繊維シートを挿入する方法³、CFRP 板の接着端に段差 を設ける方法⁴を提案し、はく離せん断応力が低減され ることを示している.

はく離せん断応力を低減させる方法の一つとして, CFRP 板付着端近傍に低弾性の接着剤を用いる方法があ る.2 枚の板の単純重合せ継手に対して,付着端近傍に 低弾性の接着剤を用いることにより,はく離せん断応力 が低減されることが理論解析および FEM 解析により明 らかにされている^{5,6}.この方法は,管の接着継手や CFRP 板の接着継手などへ適用することを目的に研究さ れている.しかし,継手ではなく,鋼板の補強として CFRP 板が接着されるような構造に対しては、はく離せん断応力が低減される接着剤のヤング率および接着剤の塗布範囲は明らかにされていない.

一方,はく離せん断応力が低減されると,CFRP 板の 接着長さが短い場合には,鋼板応力が所定の値まで低下 しない恐れがある.CFRP 板接着による鋼構造部材の補 修・補強においては,所定の値まで鋼板応力を低下させ る必要がある.

本研究では、CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板に対して、鋼板の応力を所定の値まで低下させる CFRP 板の接着長さおよびはく離せん断応力の低減率を理論的に明らかにする. さらに、 CFRP 板接着鋼板の引張試験を行い、CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が使用されることによりはく離せん 断応力が低減されることを示す.

2. 鋼板に生じる応力と接着剤に生じるせん断応力

2.1 基礎微分方程式とその解

2 種類の接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板の側面 を図-1 に示す. CFRP 板と鋼板は引張力のみを伝え, 接着剤はせん断力のみを伝えると仮定する. 微小区間の



図-1 2種類の接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板

鋼板, CFRP 板および接着剤の水平方向の力のつりあい を図-2 に示す. CFRP 板が鋼板の上下に対称に接着さ れているので, 鋼板の中央より上の部分が示されている. 図-2 を参照して, CFRP 板が接着剤1によって鋼板に 接着されている部分の微小区間の水平方向の力のつり あい,および CFRP 板が接着剤2(低弾性接着剤)によって 鋼板に接着されている部分の微小区間の水平方向の力 のつりあいから, それぞれ次の微分方程式が導出される.

$$\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} - c_1^2 \sigma_s = -c_1^2 \xi_0 \sigma_{sn} \quad (0 \le x \le l_1)$$
(1)

$$\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} - c_2^2\sigma_s = -c_2^2\xi_0\sigma_{sn} \quad (l_1 \le x \le l)$$

$$(2)$$

$$c_{1} = \sqrt{\frac{G_{e1}}{E_{s}}} \sqrt{\frac{2}{1 - \xi_{0}}} \frac{1}{\sqrt{ht_{s}}}$$
(3)

$$c_{2} = \sqrt{\frac{G_{e2}}{E_{s}}} \sqrt{\frac{2}{1 - \xi_{0}}} \frac{1}{\sqrt{ht_{s}}}$$
(4)

$$G_{e1} = \frac{E_{e1}}{2(1 + \mu_{e1})} \tag{5}$$

$$G_{e2} = \frac{E_{e2}}{2(1 + \mu_{e2})} \tag{6}$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + 2E_c t_c / (E_s t_s)} \tag{7}$$

$$l = l_1 + l_2$$
 (8)
 σ_{\circ} : 鋼板に生じる応力

- σ_s : 鋼板に生じる応力 σ_{sn} : CFRP 板が接着されていない部分の鋼板 に生じる応力
- E_s , t_s : それぞれ, 鋼板のヤング率と厚さ

$$E_a$$
, t_a : それぞれ, CFRP 板のヤング率と厚さ

- *E*_{el}, μ_{el} : それぞれ, 接着剤1のヤング率とポアソン比
- *E*_{e2}, μ_{e2}: それぞれ, 接着剤2のヤング率とポアソン比
- *l*1 : 接着剤1によって CFRP 板が接着される
 半長さ
- *l*2 :接着剤2によってCFRP板が接着される
 片側長さ

```
図-1 のx = 0において鋼板応力が対称となる条件,
x = l_1において、鋼板に生じるひずみが連続する条件お
```



よび接着剤に生じるせん断ひずみが連続する条件, さら にx=1において, $\sigma_s = \sigma_{sn}$ となる条件に対して式(1)と (2)を解き, 鋼板に生じる応力 σ_s , CFRP 板に生じる応 力 σ_c , 接着剤に生じるせん断応力 τ がそれぞれ次式で 与えられる.

$$\sigma_{s} = \begin{cases} \{A_{1}\cosh(c_{1}x) + \xi_{0}\} \sigma_{sn} & (0 \le x \le l_{1}) \\ B_{1}\sinh\{c_{1}(x-l_{1})\sqrt{n}\} & (l_{1} \le x \le l) \\ + B_{2}\cosh\{c_{1}(x-l_{1})\sqrt{n}\} + \xi_{0}]\sigma_{sn} & (l_{1} \le x \le l) \\ \sigma_{c} = \begin{cases} \frac{-t_{s}}{2t_{c}} \{A_{1}\cosh(c_{1}x) - (1-\xi_{0})\}\sigma_{sn} & (0 \le x \le l_{1}) \\ \frac{-t_{s}}{2t_{c}} [B_{1}\sinh\{c_{1}(x-l_{1})\sqrt{n}\} & (10) \\ + B_{2}\cosh\{c_{1}(x-l_{1})\sqrt{n}\} - (1-\xi_{0})]\sigma_{sn} & (l_{1} \le x \le l) \end{cases} \end{cases}$$

$$\tau = \begin{cases} \frac{c_1 t_s}{2} A_1 \sinh(c_1 x) \sigma_{sn} & (0 \le x \le l_1) \\ \frac{n c_1 t_s}{2} \left[B_1 \cosh\{c_1 (x - l_1) \sqrt{n} \} + B_2 \sinh\{c_1 (x - l_1) \sqrt{n} \} \right] \sigma_{sn} & (l_1 \le x \le l) \end{cases}$$
(11)

$$n = \frac{G_{e2}}{G_{e1}} = \left(\frac{c_2}{c_1}\right)^2$$
(12)

$$A_1 = \frac{1 - \xi_0}{Z \cosh\{c_1 l(1 - \omega)\} \cosh(c_1 l\omega \sqrt{n})}$$
(13)

$$B_1 = \frac{\sqrt{n(1-\xi_0)} \tanh\{c_1 l(1-\omega)\}}{Z \cosh(c_1 l \omega \sqrt{n})}$$
(14)

$$B_2 = \frac{1 - \xi_0}{\cosh(c_1 l \omega \sqrt{n})} \tag{15}$$

$$Z = \sqrt{n} \tanh\{c_1 l(1-\omega)\} \tanh(c_1 l\omega\sqrt{n}) + 1$$
(16)
$$\omega = l_2/l$$
(17)

2.2 CFRP板接着鋼板に生じる応力

例として ξ_0 =0.5, c_1l =5, n=0.25 に対して,式(9)から計算される鋼板応力の分布を図-3 に示す.縦軸は σ_s/σ_{sn} を示し、横軸はx/lを示している. 接着剤1の 部分の σ_s/σ_{sn} が実線で、接着剤2の部分の σ_s/σ_{sn} が 破線で示されている. $\omega = 0$ の場合、式(9)は、次式で与 えられる接着剤1によってCFRP板が全面にわたって接 着された場合の鋼板応力^のに一致する.



図ー3
$$\sigma_s/\sigma_{sn}$$
 と x/l の関係

$$\sigma_{s} = \left\{ \xi_{0} + (1 - \xi_{0}) \frac{\cosh(c_{1}x)}{\cosh(c_{1}l)} \right\} \sigma_{sn}$$
(18)

図-3から分かるように、接着剤1よりも弾性係数が 小さい接着剤2において、接着剤1の範囲と比べて、鋼 板応力の低下が緩やかになる.

x=0に対する σ_s/σ_{sn} の値, すなわち鋼板応力の低下 率が次式で与えられる.

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{sn}} = \xi_0 + A_1 \tag{19}$$

 $\xi_0 = 0.5$ に対する, $\sigma_s / \sigma_{sn} \ge c_1 l$ の関係を図ー4に示す. 図ー4(a)から, ω の値が大きくなると σ_s / σ_{sn} は低下しにくくなること, 図ー4(b)から, nの値が小さくなると σ_s / σ_{sn} は低下しにくくなることが分かる. $c_1 l$ の値が大きくなると, ω またはnの値に関わらず, σ_s / σ_{sn} の値は ξ_0 に近づく.

 ξ_0 に対する、鋼板中央の応力の低下率 σ_s/σ_{sn} すなわち鋼板応力の収束度 η が次式で定義される.

$$\eta = \frac{\sigma_s / \sigma_{sn}}{\xi_0} = 1 + \frac{A_1}{\xi_0}$$
(20)

理論では、 $\eta = 1.0 \text{ t} \text{ t} \text{ s} \text{ t} \text{ s}_{0} \text{ b} \text{ t} \text{ s}_{0} \text{ b} \text{ t} \text{ s}_{0} \text{ c} \text{ t} \text{ s}_{0} \text{ l} \text{ o}$ 値は無限になるので、 $\eta = 1.01$ に対するCFRP板の付着半 長さを算出する. $\xi_{0} = 0.5$ に対する $\omega \ b \ c_{1}l$ の関係を図ー 5に示す. この図において、各曲線の右側が $\eta \le 1.01$ を 満足する $\omega \ b \ c_{1}l$ の領域である. n = 1.0の場合、すなわ ち接着剤1によってCFRP板が全面にわたって接着され る場合、 $c_{1}l = 5.3$ である.

2.3 接着剤に生じるせん断応力

例として ξ_0 =0.5, c_1l =5, n=0.25 に対して,式(11)から計算される接着剤に生じるせん断応力 τ の分布を図 -6 に示す.縦軸は、 $\tau & c_1 t_s \sigma_{sn}$ で除した値を示している. 接着剤 1 の部分の $\tau/(c_1 t_s \sigma_{sn})$ が実線で,接着剤 2 の部分の $\tau/(c_1 t_s \sigma_{sn})$ が破線で示されている. $\omega = 0$ の場合,式(11)は、次式で与えられる接着剤1 によって CFRP 板が全面にわたって接着された場合の接着剤に生じる



図ー5
$$\eta = 1.01$$
を満たす $\omega \geq c_1 l$ の関係

せん断応力⁷に一致する.

$$\tau = c_1 t_s \frac{1 - \xi_0}{2} \cdot \frac{\sinh(c_1 x)}{\cosh(c_1 l)} \sigma_{sn}$$
(21)

図-6から分かるように,接着剤1のせん断応力は, 接着剤1と2の境界(x=l₁)で最大となり,接着剤2の せん断応力は,CFRP板の付着端(x=l)で最大となる. 接着剤1に生じるせん断応力の最大値_{t_l}は,式(11)



図ー6
$$\tau/(c_1 t_s \sigma_{sn}) \ge x/l$$
の関係
の上段の式へ $x = l_1$ を代入して次式で与えられる.

$$\tau_{1e} = c_1 t_s \frac{1 - \xi_0}{2} \cdot \frac{\tanh\{c_1 l(1 - \omega)\}}{Z \cosh(c_1 l \omega \sqrt{n})} \sigma_{sn}$$
(22)

他方,接着剤2に生じるせん断応力の最大値 τ_{2e} は,式(11)の下段の式へx = l s代入して,次式で与えられる。

$$\tau_{2e} = \sqrt{nc_1 t_s} \frac{1-\xi_0}{2} \cdot \frac{\sqrt{n} \tanh\{c_1 l(1-\omega)\} + \tanh(c_1 l\omega\sqrt{n})}{Z} \sigma_{sr}$$
(23)

 $\xi_0 = 0.5$ に対して、式(22)、(23)から算出される $\tau_{1e}/(c_1t_s\sigma_{sn}) \ge c_1l$ の関係および $\tau_{2e}/(c_1t_s\sigma_{sn}) \ge c_1l$ の 関係を図ー7に示す.

 $\omega = 0$ またはn = 1の場合,式(22),(23)は,式(21)~ x = lを代入して次式で与えられる,接着剤 1 によって CFRP 板が全面にわたって接着される場合のはく離せん 断応力 τ_{0e} と一致する.

$$\tau_{0e} = c_1 t_s \frac{1 - \xi_0}{2} \tanh(c_1 l) \sigma_{sn}$$
(24)

図-7 から、 τ_{1e} および τ_{2e} は共に τ_{0e} よりも常に小さいことが分かる. $\tau_{1e}/(c_l t_s \sigma_{sn})$ は $c_l l$ の値が増加すると極大値を迎えて低下し、 $\tau_{2e}/(c_l t_s \sigma_{sn})$ は $c_l l$ の値が大きくなると増加し、一定値に収束する.

CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が使用される CFRP 板接着鋼板では、 τ_{1e} または τ_{2e} によって CFRP 板 がはく離する.したがって、 τ_{1e} および τ_{2e} をはく離せん 断応力と呼ぶ.

3. CFRP 板の接着長さとはく離せん断応力の低減率

本章では、2種類の接着剤の弾性係数は異なるが、両 者の、CFRP板のはく離に対する抵抗強度が等しい場合 に対して、鋼板応力を所定の値まで低下させるCFRP板 の接着長さおよびはく離せん断応力の低減率を明らか にする.

3.1 CFRP板の接着長さ

CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板のはく離せん断応力は、 $図-7(a) \geq (b)$ の各図において、 $\tau_{1e} \geq \tau_{2e}$ の交点で最小になる.したが





(b) $\omega = 0.4$

図-7 $\tau/(c_1 t_s \sigma_{sn}) \geq c_1 l$ の関係





って、CFRP板のはく離に対する接着剤1の抵抗強度が、 接着剤2のそれと同じ場合、 $\tau_{1e} = \tau_{2e}$ の条件において CFRP板のはく離荷重が最大となる.そこで、式(22)の右 辺と式(23)の右辺を等値して、はく離せん断応力が最小 となる条件が次式で与えられる.

$$\tanh\{c_1 l(1-\omega)\} = \frac{\sqrt{n}\sinh(c_1 l\omega\sqrt{n})}{1-n\cosh(c_1 l\omega\sqrt{n})}$$
(25)

式(25)を満足する $\omega \geq c_1 l$ の関係を図-8 に実線で示 す. 各実線の下側の領域で $\tau_{1e} > \tau_{2e}$ であり,各実線の上 側の領域で $\tau_{1e} < \tau_{2e}$ である.

 $c_1 l(1-\omega)$ が3より大きくなると、 $\tanh \{c_1 l(1-\omega)\}$ はほぼ1になる、このとき式(25)は次式となる。

 $n \cosh(c_1 l \omega \sqrt{n}) + \sqrt{n} \sinh(c_1 l \omega \sqrt{n}) = 1$ (26) この式を $c_1 l \omega$ について解いて次式を得る.

$$c_1 l\omega = c_1 l_2 = \frac{\kappa}{\sqrt{n}} \tag{27}$$

ここに,

 $\kappa = \sinh^{-1}(1/\sqrt{n - n^2}) + \tanh^{-1}(\sqrt{n})$ (28)

接着剤のヤング率比nに対して、はく離せん断応力が 最小となる接着剤2すなわち、低弾性接着剤の塗布範囲 1,が式(27)より算出される.

 $\xi_0 = 0.5$ に対して、式(20)から算出される、 $\eta = 1.01$ を 満たす $\omega \ge c_1 l$ の関係が図-8に破線で示されている. 各破線よりも右側の範囲において鋼板応力が所定の値 まで低下する.

式(27)が与える $_{\omega}$ と $_{c_1l}$ の関係を図-8に一点鎖線で示す.式(20)が与える破線よりも右側の $_{\omega}$ と $_{c_1l}$ の領域において,式(27)と式(25)が重なっていることが分かる.

 $c_1l(1-\omega)$ が3より大きくなると、 $\tanh \{c_1l(1-\omega)\}$ はほぼ1になるので、式(16)は $Z = \sqrt{n} \tanh(c_1l\omega\sqrt{n}) + 1$ となる. これを式(20)に代入し、さらに式(27)の関係を用いて、 c_1l について解いて次式を得る.

$$c_1 l_{req} = \frac{\kappa}{\sqrt{n}} + \cosh^{-1} \left\{ \frac{1 - \xi_0}{(\eta - 1)\xi_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}\sinh(\kappa) + \cosh(\kappa)} \right\}$$
(29)

ここに,

l_{req}:はく離せん断応力が最小になり、鋼板の応力を 所定の値まで低下させるCFRP板の接着長さ

3.2 はく離せん断応力の低減率

CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が用いられる場合, 最小のはく離せん断応力 τ_{12e} は,式(25)を式(16)に代入し て得られたZを式(22)に用いて,次式で与えられる.

$$\tau_{12e} = c_1 t_s \frac{1 - \xi_0}{2} \cdot \frac{n \cosh(c_1 l \omega \sqrt{n}) - 1}{n - \cosh(c_1 l \omega \sqrt{n})} \tanh\{c_1 l (1 - \omega)\}\sigma_{sn}$$
(30)

接着剤1によって CFRP 板が全面に接着された場合の はく離せん断応力 τ_{0e} に対する、CFRP 板付着端近傍に 低弾性接着剤が用いられた場合の最小のはく離せん断 応力 τ_{12e} の比、すなわちはく離せん断応力の低減率が、 式(30)を式(24)で除すことにより次式で与えられる.

$$\frac{\tau_{12e}}{\tau_{0e}} = \frac{n\cosh(c_1\omega l\sqrt{n}) - 1}{n - \cosh(c_1\omega l\sqrt{n})} \cdot \frac{\tanh\{c_1(1-\omega)l\}}{\tanh(c_1l)}$$
(31)

 $ω \ge n$ が式(25)の関係を満す条件の下で、式(31)から 計算される $\tau_{12e}/\tau_{0e} \ge c_1 l$ の関係を図ー9に示す. nの



図-9 $\tau_{12e}/\tau_{0e} \geq c_1 l$ の関係

値が小さくなると、 τ_{12e}/τ_{0e} の値が小さくなることが分かる.

 $c_1 l(1-\omega) \ge c_1 l$ が3より大きくなると、それぞれ、 tanh $\{c_1(1-\omega)l\} \ge tanh(c_1 l)$ はほぼ1になる、さらに、 $c_1 l(1-\omega)$ が3より大きくなると、式(27)が成立するので、 これを式(31)に用いて、式(31)は次式になる。

$$\frac{\tau_{12e}}{\tau_{0e}} = \frac{n\cosh(\kappa) - 1}{n - \cosh(\kappa)}$$
(32)

式(32)は、図-9において、nの各値に対して、 $c_1 l$ が 大きくなった場合の τ_{12e}/τ_{0e} の収束値を与える.

4. CFRP板接着鋼板の引張試験

本章では、CFRP板接着鋼板の引張試験を行い、CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が使用されることにより はく離せん断応力が低減されることを示す.

4.1 試験片

試験片の種類を図-10 に示す. 図-10(a)の試験片 CE では、CFRP 板付着端近傍の接着剤 2 のせん断弾性係数 は接着剤 1 のそれよりも小さい. 図-10(b)の試験片 C は接着剤 1 によって CFRP 板が全面にわたって接着され た鋼板である.

試験片は、図-11 に示すように、幅 50 mmの鋼板の中 央に、幅 50 mmの CFRP 板が接着されている. $\xi_0 = 0.5$ と なるように1 枚の厚さが 2.07 mmの CFRP 板を3 枚接着し ている. CFRP 板の繊維方向は、荷重の載荷方向と同じ である.

試験片 CE に対して, 設計ではn=0.25 を仮定したので, 式(28)から $\eta=1.01$ を満たす最小付着半長さ l_{req} は 94 mm となった.ただし、本試験と同様な寸法の CFRP 板接着 鋼板において c_1 が 0.07~0.085⁸⁾であったので、 l_{req} の算 出には $c_1=0.07$ を用いた.したがって、 $l \ge l_{req}$ となるよ うに CFRP 板の付着半長さlを 140 mmとした.式(27)~ n=0.25、 $c_1=0.07$ およびl=140を代入して、接着剤 2 の塗布範囲は30 mmになった.

試験片 C の CFRP 板の付着半長さは1=140 mmとした. 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 6111)でブラスト処理されている.室温 25℃,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, CFRP 板, 接着剤1および2の材料特性を表-1 に示す. 接着剤1と2はともにエポキシ樹脂が用いられ ている. 接着剤1は, 試験片 CE の CFRP 板付着の中央 部分および試験片 C に用いられ, 接着剤2は, 試験片 CE の CFRP 板付着端近傍に用いられている. 接着剤の 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, 引張せん断接着強さは5本の JIS K 6850 の試験片の平均値である. 表-1から, 接着剤1と2の 引張せん断接着強さが同じであることが分かる.

接着剤の厚さhは、次式を用いて算出した.

 $h = (t_a - t_s - 2t_c)/2 \tag{33}$

t_a:計測した試験片の全厚さ

 t_a , t_s , t_c および算出した接着剤の厚さ $h \epsilon_{\mathbf{z}} - 2$ に示す. この表には,試験片の実測値による $E_c t_c / (E_s t_s)$, ξ_0 , n, ω および $c_1 l$ の値も示されている.

表-2から、接着剤1のせん断弾性係数に対する、接着剤2のそれの比nは、設計で仮定したn=0.25よりも大きいことが分かる.実測された材料特性と試験片の寸法では c_1 はおよそ0.1であった。それらを、式(27)へ代入して算出される接着剤2の塗布範囲 l_2 は9mmになる.このように、設計で仮定した接着剤2のせん断弾性係数と実際のそれとが異なったため、試験片CEのはく離せん断応力は最小となっていない.

4.3 試験結果

(1) 鋼板応力

引張試験が行われた間の試験片の平均温度が表-2 に 示されている. 試験時の温度は、試験片の養生温度とほ

(a) 鋼材

| 鋼材 | SM490 | | |
|-------------------------|-------|-------|--|
| 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 <i>µ</i> | 0.28 | | |
| 伸び率[%] | 27.0 | | |

| ヤング率E _{el} [GPa] | 2.70 |
|---------------------------|------|
| 引張強さ[MPa] | 52.0 |
| ポアソン比 μ_{el} | 0.36 |
| 引張せん断接着強さ[MPa] | 22.0 |





図-11 ひずみゲージの位置

表-1 材料特性

| (h) | CEDD #5 |
|-----|---------|
| (n) | |

| 1枚の厚さ[㎜] | 2.07 | | | | | | |
|----------------|-------|--|--|--|--|--|--|
| 1 枚のヤング係数[GPa] | 147.3 | | | | | | |
| 1 枚の引張強度[MPa] | 2590 | | | | | | |
| 3枚の厚さ[mm] | 6.47 | | | | | | |
| 3 枚のヤング率[GPa] | 141.5 | | | | | | |

(d) 接着剤2

| ヤング率 <i>E</i> _{e2} [GPa] | 1.23 |
|-----------------------------------|------|
| 引張強さ[MPa] | 20.0 |
| ポアソン比 μ_{e2} | 0.37 |
| 引張せん断接着強さ[MPa] | 22.0 |

表-2 t_a , t_s , t_c , h, $E_c t_c / (E_s t_s)$, ξ_0 , n, ω , $c_l l$, 試験時の試験片温度および σ_{sn} の値

| 試驗 | 針 | t _a [mm] | t _s [mm] | t _c [mm] | <i>h</i> [mm] | $\frac{E_c t_c}{E_s t_s}$ | ξ_0 | п | ω | $c_1 l$ | 試験片 温度[℃] | $\sigma_{_{SN}}$ [MPa] |
|----|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|---------------------------|---------|-------|-------|---------|--------------|---------------------------|
| CE | 1 | 22.14 | 8.57 | 6.58 | 0.20 | 0.52 | 0.491 | 0.451 | 0.214 | 14.5 | 29.5 | 378.9以上 |
| | 2 | 22.09 | 8.55 | 6.56 | 0.21 | 0.52 | 0.491 | 0.451 | 0.214 | 14.3 | 27.5 | 378.9以上 |
| С | 1 | 22.09 | 8.58 | 6.56 | 0.20 | 0.52 | 0.492 | — | — | 14.7 | 28.6 | 225.5 |
| | 2 | 22.01 | 8.58 | 6.53 | 0.19 | 0.51 | 0.493 | — | — | 15.2 | 27.1 | 219.5 |



図-12 鋼板の応力分布

ぼ同じである.

載荷荷重を鋼板の断面積で除した値 σ_{sn} が100MPaのときの鋼板応力 σ_s と鋼板中央からの距離xの関係を図ー12に示す、鋼板の両側面のひずみの平均値に表-1に示す鋼板のヤング率を乗じて σ_s を計算した、図には、表-2の値を用いて、式(9)および式(18)から計算される、 σ_s の分布も示されている。

図-12 から分かるように、CFRP 板付着端近傍では、 試験片 CE の σ_s は、試験片 C のそれまで低下しない. しかしx=0において、試験片 CE の σ_s と試験片 C のそ れは等しく、共にほぼ理論値まで低下している. 試験片 CE, C 共に、試験結果と式(9)あるいは式(18)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、試験結果は式(9)あるいは式(18)から算出さ れる応力分布から少し離れている. 試験片 CE の試験結 果と式(9)の差は、試験片 C の試験結果と式(18)の差より も小さい.

CFRP 板が 3 枚接着される場合, CFRP 板と CFRP 板 の間の接着材のせん断応力によって CFRP 板間で引張応 力が伝達される. したがって, CFRP 板付着端近傍にお いて, CFRP 板間で引張応力の伝達が充分になされない 現象すなわち CFRP 板間のせん断遅れが生じる. しかし, 式(9)および式(18)では, CFRP 板間のせん断遅れが考慮 されていないため, 試験結果が理論式から算出される応 力分布から少し離れたと考える. CFRP 板間の接着層に



図-13 試験片 CE-1 の CFRP 板のひずみ分布



図-14 試験片 C-1 の CFRP 板のひずみ分布

よるせん断遅れの定量的な評価は、今後の検討課題である.

(2) はく離荷重

全ての試験片において、鋼板と CFRP 板の間の接着剤の CFRP 板側の界面から CFRP 板がはく離した.

試験片 CE について、 σ_{sn} と CFRP 板両表面の付着端 近傍に貼付へされた8点のひずみゲージが与えるひずみ の関係を図-13 に示す. 接着剤2の部分の4点のひずみ の内、3 点のひずみの値がほぼ0であった. 試験片 CE では、鋼板の応力が降伏に達した後、CFRP 板がはく離 した.

試験片Cについて、 σ_{sn} とCFRP 板両表面の付着端近

傍の4点のひずみの関係を図-14に示す. これらのひず みの内,黒丸で示される最初にひずみの値が急激に変化 したときの荷重をはく離荷重とする. 試験片 C では、鋼 板の応力が降伏に達する前に CFRP 板のはく離が生じた. 試験片 C のはく離荷重を鋼板の断面積で除した値 σ_{sn}

を**表-2**に示す.

接着剤のヤング係数比nの値に関して、設計で仮定し た値と実際の値とが異なったので, 接着剤2の塗布範囲 30mm では、接着剤 1 に生じるはく離せん断 τ_{1e} と接着 剤 2 に生じるはく離せん断応力τ₂とは異なる. σ_{sn}=100MPa に対して, 表-1 の材料定数および表-2 の各試験片の平均の実測値を式(22)と(23)へ代入して, τ_{1e} と τ_{2e} はそれぞれ 3.2MPa と 15.6MPa になる. したが って τ_{2e} =15.6MPa を、 σ_{sn} =100MPa に対して式(24)か ら計算される τ_{0e} =22.8MPa で除して算出される試験片 C に対する試験片 CE のはく離せん断応力の低減率は τ_{2e}/τ_{0e} =0.68 となる. すなわち試験片 CE のはく離荷重 は試験片Cのはく離荷重の1.47倍になると予測される. 表-2から、試験片 Cのはく離荷重に対する試験片 CE のはく離荷重の比は 1.6 倍以上である. このように、試 験結果は理論値のはく離荷重の比よりも高い. この違い は、鋼板の応力分布の違いの場合と同様に、重ね貼りさ れた CFRP 板間の接着層の存在に起因するものと考えら れる.

以上より、試験結果が理論値のはく離荷重の比よりも 高かったが、CFRP板付着端近傍へ低弾性接着剤が使用 されることによって、はく離せん断応力が低減されるこ とが引張試験により示された.

5. 結論

本研究では、CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板について、CFRP 板のはく離に対する抵抗強度が接着剤の弾性係数に関わらず同じである場合に対する理論解析を行なった.さらに CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が塗布された CFRP 板接着 鋼板の引張試験を行った.主な結論を以下に示す.

 はく離せん断応力が最小となる低弾性接着剤の塗布 範囲を式(27)で与えた.

- 2) 鋼板の応力を所定の値まで低下させる CFRP 板の接着 長さを式(29)で与えた.
- 3) 従来のCFRP板接着鋼板のはく離せん断応力に対する, CFRP板付着端近傍に低弾性接着剤が用いられる場合 のはく離せん断応力の低減率を式(32)で与えた.
- 4) CFRP 板接着鋼板の引張試験の結果, CFRP 板付着端 近傍へ低弾性接着剤が使用されることによって, はく 離せん断応力が低減されることが示された.

参考文献

- 1) 板垣一也,渡邉憲市,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.
- 王井宏章,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) 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.
- 小村啓太,石川敏之,大倉一郎,横田季彦,斉藤誠: 端部ステップによる CFRP 板接着工法の開発,平成 19 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 1-67, 2007.
- 5) Coleman Raphael : Variable-Adhesive Bonded Joints, Applied Polymer Symposia, No.3, pp.99-108, 1966.
- M.D. Fitton and J.G. Broughton : Variable modulus adhesives: an approach to optimized joint performance, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol.25, pp.329-336, 2005.
- 7) 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.
- 石川敏之,大倉一郎,横田季彦,斉藤誠: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, 応用力学論文集, Vol.10, pp963-970, 2007.

(2007年9月18日受付)