板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板のはく離強度

Debonding strength of CFRP strips glued to steel plate subjected to bending

石川敏之*・佐々木裕**・山田健太郎*** Toshiyuki Ishikawa, Yu Sasaki and Kentaro Yamada

* 博士(工) 名古屋大学助教,環境学研究科都市環境学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
 ** 修士(工) 三菱重工鉄鋼エンジニアリング(前名古屋大学大学院)(〒730-8642 広島市中区江波沖町5番1号)
 *** Ph.D 名古屋大学教授,環境学研究科都市環境学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

For rapid repair and strengthening of steel members, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips can be conveniently used. However, their deboding mechanism and design parameters are still to be clarified to prevent any debonding problem. Bending tests of steel plates with bonded CFRP strips are carried out to see the debonding stresses and failure mechanism. Then, differential equations are derived to express axial and shear forces in CFRP strip and steel plate, as well as shear and normal stresses in adhesive. It is shown that the debonding strength of CFRP bonded to steel plate in bending can be evaluated by the maximum principal stress developed in adhesive at the end of the CFRP strips.

Key Words: CFRP strip, debonding strength, adhesive, bending moment キーワード: CFRP 板, はく離独度, 接着剤, 曲げモーメント

1. 序論

炭素繊維強化樹脂板(CFRP 板)の接着による鋼部材の補 修が行われ始めている^{1), 2)}. これは、CFRP 板の質量が鋼 やコンクリートと比べて軽いため死荷重の増加が小さい こと、CFRP 板を鋼部材に接着するだけで補修が行えるた め鋼部材への加工が必要なく簡易に補修が行えるなどの 利点があるためである. しかし、作用する荷重の状態によ っては CFRP 板がはく離することが問題として挙げられ る. CFRP 板接着補修の効果を明らかにするために、これ までに、CFRP 板接着鋼板の引張試験³⁾⁻⁶⁾、CFRP 板が接 着されたき裂を有する板の疲労試験^{7), 8)}、下フランジの下 面へCFRP 板が接着された鋼桁の載荷試験^{9),10)}などが行わ れている.

本研究では、鋼床版のように板曲げを受ける鋼部材への CFRP 板接着補修を目的として、CFRP 板接着鋼板の板曲 げ試験を行う. さらに、板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板 の力学挙動を解明し、板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板の はく離強度を明らかにする.

2. CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験

CFRP 板が接着された鋼板の板曲げ試験を行い, CFRP 板接着によって鋼板に生じる応力が低減されることおよび CFRP 板がはく離するときの曲げモーメントを明らか

にする.

2.1 試験体

試験体は、図-1に示すように、幅300 mm、厚さ12 mm および長さ700 mmの鋼板の片面に、幅50 mm、厚さ2 mmお よび長さ200 mmのCFRP板が2枚接着されている.鋼板の 接着面を#60のサンドペーパーで粗く仕上げ、アセトンで 脱脂し、エポキシ樹脂接着剤を塗布したCFRP板を鋼板へ 接着した.CFRP板接着後、試験室において48時間以上



表-1 材料特性

(a)	鋼材(ミルシー	ト値)
-----	-----	------	----	---

鋼材	SM400A
板厚t _s [mm]	12.0
降伏応力 σ_{γ} [MPa]	315
引張強さ[MPa]	431
伸び率[%]	34

(b) CFRP 板

厚さ t_c [mm]	2.00
ヤング係数 <i>E_c</i> [GPa]	169
引張強さ[MPa]	2838
繊維含有率V _f [%]	70

(c) 接着剤

ヤング係数 E_e [GPa]	2.33
ポアソン比 μ_e	0.39
せん断弾性係数 G_e [GPa]	0.84
引張せん断接着強さ[MPa]	10~29*

*カタログ値



養生期間を設けた. 試験体に用いた材料特性を表-1に示 す. CFRP 板が曲げの圧縮を受ける場合(試験体 C)と引張 を受ける場合(試験体 T)に対して各2体,合計4体の試験 体を用意した.各試験体の接着剤の厚さhを表-2に示す. 接着剤の厚さは, CFRP 板がはく離した後に計測した.

2.2 試験方法

図-1に示すように、試験体の一端を固定し、自由端側の下側から荷重を載荷し、試験体に板曲げを与えた.荷重の載荷には、ネジ式ジャッキを用いた.図-2に示すように、試験体のCFRP板が接着されている面を上下反転させて、試験体Cと試験体TのCFRP板がそれぞれ曲げの圧縮側および引張側になるようにした.試験体のひずみの計測位置が図-1に示されている.載荷中の荷重とひずみを、

表-2 h, cl およびはく離モーメントの値

試験体		<i>h</i> [mm]	cl	はく離モーメント M _{d,end} [kN・mm]
С	-1	0.22	22.6	1918
	2	0.15	23.7	1951
Т	1	0.24	17.8	-1179
	2	0.39	28.4	-1255





(b) 試験体 T 図-3 CFRP 板の付着中央の断面に生じるひずみ

サンプリング速度 10msec で計測した.

2.3 試験結果

(1) CFRP 板鋼板の断面に生じるひずみ

CFRP 板の付着中央の位置の曲げモーメント M_{center} (図 – 2 参照)が 500kN・mmのときの CFRP 板の付着中央の断面 に生じるひずみ分布を図–3 に示す. 図の縦軸は鋼板の板 厚中央からの距離を示している. 図には、CFRP 板が接着 されていない場合の鋼板に生じるひずみ分布および CFRP 板と鋼板が完全に合成された場合に生じるひずみ分布が







それぞれ破線および一点鎖線で示されている. これらのひ ずみの計算には、鋼板のヤング係数 E_s =200GPa を用いて いる. 完全合成理論に対しては、接着剤の剛性を CFRP 板 接着鋼板の曲げ剛性に考慮していないが、表-2の接着剤 の厚さを考慮して、鋼板と CFRP 板との間に 0.2mm の距 離を設けて断面のひずみ分布を算出している.

図-3から分かるように、CFRP板の付着中央の断面に 生じるひずみは、試験体C、T共に完全合成理論によるひ ずみとほぼ一致しており、CFRP板が接着されることより 鋼板に生じるひずみが低下していることが分かる.

(2) CFRP 板のはく離モーメント

固定端側の CFRP 板の端の位置の曲げモーメント *M_{end}* (図-2 参照)と CFRP 板の端近傍のひずみゲージか ら計測されるひずみの関係を図-4 に示す.この図から, 試験体C, T 共に, *M_{end}* の小さい範囲においては, *M_{end}* と CFRP 板の端近傍のひずみの関係は線形であるが, *M_{end}* の増加に伴い非線形になり,その後,急激にひずみ が低下している.図-4に黒丸で示される CFRP 板端部の ひずみが急激に低下したときの CFRP 板の端の位置の曲 げモーメントをはく離モーメント*M_{d,end}* と定義する.



図-5 CFRP 板のはく離の範囲

 M_{end} がはく離モーメントに達したときに CFRP 板のはく 離音が生じた.全ての試験体において,固定端側の CFRP 板の端部の,CFRP 板と接着剤の界面から CFRP 板がはく 離した.鋼板のみの場合の CFRP 板の端に相当する位置の 降伏曲げモーメント M_Y は、 ± 2270 kN・mm であるので, 全ての試験体において,鋼板が降伏する前に CFRP 板がは く離したことが分かる.

各試験体のはく離モーメント $M_{d,end}$ を表-2に示す.こ の表から,試験体Cの2体の $M_{d,end}$ の差および試験体T の2体の $M_{d,end}$ の差はそれぞれ小さいが,試験体Cと試 験体Tの $M_{d,end}$ の絶対値の差は大きいことが分かる. CFRP板が曲げの圧縮を受ける試験体Cの $M_{d,end}$ の絶対 値は,CFRP板が曲げの引張を受ける試験体Tのそれの約 1.6倍であった.

(3) CFRP 板のはく離の範囲

CFRP 板のはく離の範囲を確認するために,はく離音が 生じた際に載荷を停止し,CFRP 板端のはく離が生じてい る範囲へ,浸透性の良い罫書用インクを塗布した.その後, CFRP 板を鋼板からはがすために,試験体の固定端の鋼板 の応力が降伏に達する直前まで荷重を載荷したが,CFRP 板のはく離の進行は見られたものの CFRP 板が完全に鋼 板からはがれなかった.試験終了後に,CFRP 板が完全に鋼 板からはがれなかった.試験終了後に,CFRP 板をはがし て確認したインクが浸透している範囲を図-5 に示す.右 側の白色の部分が鋼板に残った接着剤であり,左側にはが した CFRP 板の接着面が示されている.この図から,イン クの浸透している範囲が,CFRP 板の極端部だけであるこ とが分かる.全ての試験体において,ほぼ同様な範囲にイ ンクが浸透していた.したがって,Mend がはく離モーメ ントM_{d,end} に達した際,CFRP 板の極端部のみがはく離し ていると考えられる.

3. 板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板の理論解析

3.1 基礎微分方程式とその解

CFRP 板接着鋼板の接着剤に生じるせん断応力 τ と垂直 応力 σ_v をそれぞれ次式で仮定する.

$$\tau = G_e \frac{u_s - u_c}{h} \tag{1}$$

(2)

$$\sigma_{y} = E_{e} \frac{\nu_{s} - \nu_{c}}{h}$$

 u_s , u_c : それぞれ鋼板と CFRP 板の水平方向の変位

 v_s , v_c : それぞれ鋼板と CFRP 板の鉛直方向の変位

 h: 接着剤の厚さ

図-6 に示されるように、鋼板と CFRP 板には、軸力, せん断力および曲げモーメントがそれぞれ作用し,接着剤 にはせん断応力と垂直応力のみが作用すると仮定し, CFRP 板が接着されている範囲の微小区間の鋼板および CFRP 板の断面力のつり合いから、次式に示される鋼板に 生じる軸力 N_s とせん断力 V_s に対する2 階と4 階の微分方 程式がそれぞれ導出される¹¹⁾⁻¹³.

$$\frac{d^2 N_s}{dx^2} - c^2 N_s = -HM \tag{3}$$

$$\frac{d^4 V_s}{dx^4} + 4\omega^4 \frac{d^2 V_s}{dx^2} = J \frac{dN_s}{dx} - 4\omega^4 \frac{E_s t_s^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} P(4)$$

$$\Box \subseteq V_c,$$

$$c = \sqrt{k \frac{G_e}{h} \left\{ \frac{1}{E_s t_s} + \frac{1}{k E_c t_c} + \frac{12a_1 a_2}{E_s t_s^3 + k E_c t_c^3} \right\}}$$
(5)

$$H = k \frac{G_e}{h} \cdot \frac{12a_2}{E_s t_s^3 + k E_c t_c^3} \tag{6}$$

$$\omega = 4\sqrt{3k\frac{E_e}{h}\left(\frac{1}{E_s t_s^3} + \frac{1}{kE_c t_c^3}\right)}$$
(7)

$$J = 6k \frac{E_e}{h} \left(\frac{1}{E_s t_s^2} - \frac{1}{k E_c t_c^2} \right)$$
(8)

$$k = \frac{b_e}{b_s} \tag{9}$$

$$a_1 = \frac{t_s}{2} + \frac{t_c}{2} + h \tag{10}$$

$$a_2 = \frac{t_s}{2} + \frac{t_c}{2} \tag{11}$$
$$M = P(L+x) \tag{12}$$

$$E_s, E_c$$
:それぞれ鋼板とCFRP板のヤング係数
 $t = t$:それぞれ鋼板とCFRP板のヤング係数

$$b_s$$
, b_c : それぞれ鋼板と CFRP 板の板幅

- L : 図-6 に示される載荷点から CFRP 板の付 着端までの距離
- x : 図-6 に示される CFRP 板の付着端からの 距離

CFRP 板の接着の両端すなわちx=0, *l*において $N_s=0$ になる条件から N_s が次式で与えられる.



図-6 CFRP 板接着鋼板の微小区間に生じる断面力

$$N_s = A_1 \cosh(cx) + A_2 \sinh(cx) + \frac{H}{c^2} M$$
(13)

$$\Xi \subseteq l\Xi,$$

$$A_1 = -\frac{H}{c^2} PL$$
(14)

$$A_2 = \frac{H}{c^2} P\left\{\frac{L}{\tanh(cl)} - \frac{L+l}{\sinh(cl)}\right\}$$
(15)

$$x=0, 1$$
において $V_s=0$ および鋼板の曲げモーメント
 M_s が M になる条件から V_s が次式で与えられる.ここで
 $x=1$ に対して,式(16)の右辺の第2項は $e^{-\omega l}$ を含み,他
の項と比べて非常に小さくなるので, $x=1$ に対して右辺
の第2項を無視した.

・CFRP 板の接着長さ

$$V_{s} = e^{\omega x} \{B_{1} \cos(\omega x) + B_{2} \sin(\omega x)\}$$

+ $e^{-\omega x} \{B_{3} \cos(\omega x) + B_{4} \sin(\omega x)\}$
+ $\frac{cJ}{4\omega^{4} + c^{4}} \{A_{1} \sinh(cx) + A_{2} \cosh(cx)\}$ (16)
+ $\left(\frac{JH}{4\omega^{4}c^{2}} - \frac{E_{s}t_{s}^{3}}{E_{s}t_{s}^{3} + kE_{c}t_{c}^{3}}\right)P$

1

$$B_{1} = -e^{-\omega l} \left[Z_{1} \{ \cos(\omega l) - \sin(\omega l) \} - Z_{2} \sin(\omega l) \right]$$
(17)
$$B_{1} = -e^{-\omega l} \left[Z_{1} \{ \cos(\omega l) + \sin(\omega l) \} - Z_{2} \sin(\omega l) \right]$$
(18)

$$B_{2} = -e^{-\omega l} \left[Z_{1} \{ \cos(\omega l) + \sin(\omega l) \} + Z_{2} \cos(\omega l) \right]$$
(18)
$$B_{2} = e^{-\omega l} \left[Z_{1} \{ \cos(\omega l) - \sin(\omega l) \} - Z_{2} \sin(\omega l) \right] - Z_{2} (19)$$

$$B_4 = -e^{-\omega l} \left[Z_1 \{ \cos(\omega l) - 3\sin(\omega l) \} - Z_2 \{ \cos(\omega l) - 2\sin(\omega l) \} \right] + Z_3 - Z_4$$
(20)

$$Z_{1} = \frac{J}{4\omega^{4} + c^{4}} \cdot \frac{H}{c} P\left\{\frac{L}{\sinh(cl)} - \frac{L+l}{\tanh(cl)}\right\} + \left(\frac{JH}{4\omega^{4}c^{2}} + \frac{kE_{c}t_{c}^{3}}{E_{s}t_{s}^{3} + kE_{c}t_{c}^{3}}\right)P$$
(21)

$$Z_{2} = -\left(\frac{c^{2}JH}{4\omega^{4} + c^{4}} - 4\omega^{4}\frac{kE_{c}t_{c}^{3}}{E_{s}t_{s}^{3} + kE_{c}t_{c}^{3}}\right)\frac{P(L+l)}{2\omega^{3}} (22)$$

$$Z_{3} = \frac{J}{4\omega^{4} + c^{4}} \cdot \frac{H}{c}P\left\{\frac{L}{\tanh(cl)} - \frac{L+l}{\sinh(cl)}\right\} + \left(\frac{JH}{4\omega^{4}c^{2}} + \frac{kE_{c}t_{c}^{3}}{E_{s}t_{s}^{3} + kE_{c}t_{c}^{3}}\right)P$$
(23)

$$Z_{4} = -\left(\frac{c^{2}JH}{4\omega^{4} + c^{4}} - 4\omega^{4} \frac{kE_{c}t_{c}^{3}}{E_{s}t_{s}^{3} + kE_{c}t_{c}^{3}}\right) \frac{PL}{2\omega^{3}}$$
(24)

さらに、接着剤に生じるせん断応力 τ , 垂直応力 σ_y は 次式で与えられる.

$$\tau = \frac{1}{b_c} \cdot \frac{dN_s}{dx} \tag{25}$$

$$\sigma_y = \frac{1}{b_c} \cdot \frac{dV_s}{dx}$$
(26)

鋼板に生じる軸力 N_s および曲げモーメント M_s は、CFRP板に生じる軸力 N_c および曲げモーメント M_c とそれぞれ次式の関係にある.

$$N_s = -N_c \tag{27}$$

$$M_s = M - M_c - N_s a_1 \tag{28}$$

式(2)から分かるように、接着剤に生じる垂直応力 σ_y は CFRP 板および鋼板の鉛直方向の変位差によ り生じると仮定している.この式に、鋼板および CFRP 板のそれぞれに対する鉛直方向変位と曲げモ ーメントの関係を適用して、 σ_y 、 M_s および M_c の 関係は次式で与えられる.

$$\frac{d^2\sigma_y}{dx^2} = 12\frac{E_a}{h} \left(-\frac{M_s}{E_s b_s t_s^3} + \frac{M_c}{E_c b_c t_c^3} \right)$$
(29)

上式に,式(26),(28)を代入し,*M*_cを消去して次 式を得る.

$$M_{s} = \frac{E_{s}t_{s}^{3}}{E_{s}t_{s}^{3} + kE_{c}t_{c}^{3}} (M - N_{s}a_{1}) + \frac{1}{4\omega^{4}} \frac{d^{3}V_{s}}{dx^{3}}$$
(30)

式(13)および(30)からそれぞれ与えられる N_s と M_s を用いて, CFRP 板が接着されている範囲の鋼板に生じる応力 σ_s は次式で与えられる.

$$\sigma_s = \frac{N_s}{b_s t_s} + 12 \frac{M_s}{b_s t_s^3} y_s \tag{31}$$

ここに,

ys: : 鋼板中央からの板厚方向の距離

さらに、CFRP 板に生じる応力は次式で与えられる.

$$\sigma_c = \frac{N_c}{b_c t_c} + 12 \frac{M_c}{b_c t_c^3} y_c \tag{32}$$

ここに,

y_c : CFRP 板中央からの板厚方向の距離

3.2 鋼板に生じる応力

図-1 に示す試験体の寸法と表-1 に示す材料定数を用 いて、P=1kNの場合について、式(31)へy_s=±6mm を代



入して算出した、鋼板の上下面に生じる応力の分布を図-7 に示す. 縦軸は鋼板の上下面に生じる応力が示されてお り、横軸は図-6に示すx軸が示されている. 試験体には 幅 50mm の CFRP 板が2枚接着されているので $b_c = 100 \&$ し、鋼板のヤング係数 $E_s = 200$ GPa,接着剤の厚さ h=0.2mm としている. 図には、次式で与えられる CFRP 板が接着されていない場合の鋼板の上下面に生じる応力 $\sigma_{plate} \& CFRP$ 板と鋼板が完全に合成されている場合の鋼 板の上下面に生じる応力 σ_{comp} もそれぞれ示されている.

$$\sigma_{plate} = \pm 6 \frac{M}{b_s t_s^2} \tag{33}$$

$$\sigma_{comp} = \frac{M}{I_{\nu}} y_{\nu}$$
(34)

ここに,

$$I_{\nu} = \frac{b_s t_s^3}{12} + \frac{E_c b_c t_c^3}{12 E_s} - A_{\nu} a_1 e^{-\frac{1}{2}}$$
(35)

$$A_{\nu} = b_s t_s + \frac{E_c b_c t_c}{E_s} \tag{36}$$

$$e = -\frac{E_c b_c t_c a_1}{E_s A_v} \tag{37}$$

 y_v: CFRP 板と鋼板の合成断面の中立軸から,鋼板

 の上面あるいは下面までの距離

この図から分かるように、CFRP 板の両付着端近傍では、 鋼板の応力が σ_{comp} まで低下しないが、それ以外の範囲で は、 σ_s が σ_{comp} まで低下している.

CFRP 板の付着中央において、 σ_{comp} に対する σ_s の比 と CFRP 板の接着長さに関するパラメータ cl との関係を 図-8に示す. cl は、鋼板の応力を CFRP 板へ伝達する度 合いを示す無次元パラメータであり、この値が大きいほど、 鋼板の応力が CFRP 板へ伝わりやすい. 図-8から cl が約 10になると、鋼板の上下面ともに σ_s/σ_{comp} がほぼ1にな ることが分かる. したがって、CFRP 板の付着中央の応力 を σ_{comp} まで低下させるためには、 cl の値が 10以上にな るような長さの CFRP 板を接着する必要がある. 第2章の 各試験体の cl の値が **3** とに示されている. 全ての試験体 の cl の値が 10 よりも大きいので、試験体では、CFRP 板 の付着中央の鋼板応力 σ_s が σ_{comp} まで低下する条件を満 足していることが分かる.

3.3 接着剤に生じる応力

(1) せん断応力

図-1に示す試験体の寸法と表-1に示す材料定数を用 いて、CFRP板が曲げの圧縮を受ける場合(P = lkN)と引張 を受ける場合(P = - lkN)の両方について、式(25)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-9に示す. この図から分かるように、接着剤に生じるせん断応力 τ は、 CFRP板が曲げの圧縮を受ける場合(P = lkN)、CFRP板の 付着端x = 0において最大になり、もう一方のCFRP板の 付着端x = 200mmで最小になる. CFRP試験体の両付着端 以外の範囲では、 τ の値はほぼ0である. CFRP板が曲げ の引張を受ける場合の τ は、CFRP板が曲げの圧縮を受け る場合の τ と符号が異なるだけで、その絶対値は等しい. τ の絶対値は、曲げモーメントが大きい方のCFRP板の付 着端(x = 200mm)で最大になることが分かる.

式(25)から, x = lの位置の接着剤に生じるせん断応力 τ_e は次式で与えられる.

$$\tau_e = \left\{ \frac{L}{(L+l)\sinh(cl)} - \frac{1}{\tanh(cl)} + \frac{1}{c(L+l)} \right\} \frac{H}{b_c c} M_{end}$$
(38)

$$\sum_{mend} E P(L+l)$$
(39)

図-1に示す試験体の寸法と表-1に示す材料定数を用いて、式(38)の $\tau_e \ge cl$ の関係を図-10に示す.この図の縦軸は、 τ_e の値を $HM_{end}/(b_cc)$ で除して無次元化した値が示されている. clの値が大きくなる $\ge b_cc/(HM_{end})\tau_e$



図-10 $b_c c/(HM_{end})\tau_e \geq cl$ の関係

が一定の値に収束することが分かる.

*cl*の値が大きくなると、 $1/\sinh(cl)$ は0に、 $\tanh(cl)$ は1にそれぞれ収束するので、 τ_e は次式に収束する.

$$\tau_e = -\left\{1 - \frac{1}{c(L+l)}\right\} \frac{H}{b_c c} M_{end} \tag{40}$$

(2) 垂直応力

せん断応力の場合と同様に、CFRP 板が曲げの圧縮を受 ける場合(P = 1kN)と引張を受ける場合(P = -1kN)の両方 について、式(26)から計算される接着剤に生じる垂直応力 σ_y の分布を図-11に示す.この図から分かるように、接 着剤に生じる垂直応力 σ_y は、CFRP 板が曲げの圧縮を受 ける場合(P = 1kN)、CFRP 板の付着端x = 0において大き な圧縮が生じ、xの値が増加するにつれて一度引張になり、 その後ほぼ0となっている.さらにCFRP 板の他端に近づ くにつれて σ_y は再び引張になり、x = 200mmの位置で圧 縮が最大になる.この図から分かるように接着剤に生じる σ_y は、CFRP 板の両端近傍の小さな範囲にのみ生じてい る.CFRP 板が曲げの引張を受ける場合の σ_y は、CFRP 板が曲げの圧縮を受ける場合の σ_y と符号が異なるだけで、 その絶対値は等しい. σ_y の絶対値は、せん断応力の場合 と同様に、曲げモーメントが大きい方の CFRP 板の付着端 (x=200mm)で最大になることが分かる.

式(26)から、x = lの位置の接着剤に生じる垂直応力 σ_{ye} は次式で与えられる.

$$\sigma_{ye} = -\left[\frac{J}{4\omega^4 + c^4} \left[2\left\{\frac{L}{(L+l)\sinh(cl)} - \frac{1}{\tanh(cl)}\right\} + \frac{1}{2}\left(\frac{c}{\omega}\right)^3 - \frac{c}{\omega}\right] + Z_5 \left]\frac{\omega H}{b_c c} M_{end}\right]$$
(41)

ここに,

$$Z_5 = \frac{J}{2\omega^4 c(L+l)} + \frac{2kE_c t_c^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \cdot \frac{c}{H} \left\{ \omega + \frac{1}{L+l} \right\} \quad (42)$$

図-1に示す試験体の寸法と表-1に示す材料定数を用いて、式(41)の σ_{ye} とclの関係を図-12に示す、縦軸は、 σ_{ye} を $HM_{end}/(b_cc)$ で除した値が示されている.この図から、clの値が大きくなると、 $b_cc/(HM_{end})\sigma_{ye}$ が一定の値に収束することが分かる.

clの値が大きくなると、l/sinh(cl)が0に、tanh(cl)が1にそれぞれ収束するので、 σ_{ve} は次式に収束する.

$$\sigma_{ye} = \left[\frac{J}{4\omega^4 + c^4} \left\{ 2 + \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^3 - \frac{c}{\omega} \right\} - Z_5 \right] \frac{\omega H}{b_c c} M_{end}$$
(43)

4. 板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板のはく離強度

第2章で述べたように、板曲げを受ける CFRP 板接着鋼 板では、曲げモーメントが大きい方の CFRP 板付着端から CFRP 板がはく離した. 試験体の寸法とその材料特性およ びCFRP板がはく離したときのCFRP板の端の位置に生じ るはく離モーメントM_{d.end}を式(40)と(43)のM_{end}へ代入 して計算される各試験体の CFRP 板がはく離したときの CFRP 板の付着端の接着剤に生じるせん断応力τ。と垂直 応力 σ_{ve} を図-13に示す.この図では、せん断応力 τ_e は その絶対値が示されている. 図-13 から分かるように, CFRP 板がはく離したときの τ_a の絶対値は、試験体 T と 比べて,試験体Cが2倍程度高い.一方,CFRP板がはく 離したときの σ_{ve} は、試験体 C では圧縮、試験体 T では 引張である. 試験体C, T共に, モーメントが大きいほう のCFRP板の付着端の接着剤からCFRP板がはく離したに も関わらず、CFRP 板がはく離したときの τ_o の絶対値およ

図-13 から、 τ_e の絶対値は、 σ_{ye} が引張の場合(試験体 T)よりも圧縮の場合(試験体 C)が高いことがわかる. この ように CFRP 板のはく離に対する抵抗強度は、 σ_{ye} の影響 を受けていると考えられる.

次に, 次式で与えられる CFRP 板の付着端の接着剤に生じる最大主応力σ_{ne} を図-13 に示す.



図-13から、CFRP 板がはく離したときの σ_{pe} は、試験 片 C と T でほぼ同じ値になることが分かる. したがって 板曲げを受ける CFRP 板のはく離婚度は、式(44)で与えら れる CFRP 板の付着端の接着剤に生じる最大主応力で評価できると考えられる.

5. 結論

本研究では、板曲げを受ける鋼部材へのCFRP 板接着補 修を目的として、CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験および板 曲げを受ける CFRP 板接着鋼板の理論解析を行った.主な 結論を以下に示す.

- (1) 板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板では, CFRP 板が曲 げの圧縮を受ける場合の CFRP 板のはく離モーメント は, CFRP 板が曲げの引張を受ける場合のそれよりも 高い.
- (2) 板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板に対して,曲げモー メントが大きい方の CFRP 板の付着端の接着剤に生じ るせん断応力と垂直応力をそれぞれ式(40),(43)で与え た.
- (3) 板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板の CFRP 板のはく離 強度は、CFRP 板の付着端の接着剤に生じる最大主応 力で評価できる.

謝辞

本研究では、日鉄コンポジット(株)の小林朗氏から CFRP 板と接着剤をご提供頂いた.また、CFRP 板接着鋼板の載 荷試験では、伊藤工務店の吉田悠生氏(当時、名城大学学 生)のご協力を頂いた.ここに記して謝意を表します.

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.
- 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) 野阪克義, 金子大昨, 古川喬朗, 鈴木研二, 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.

- 4) 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.
- 5) 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, pp.595-602, 2006.
- 6) Mohammad Al-Emrani and Robert Kliger : Experimental and Numerical Investigation of the Behaviour and Strength of Composite Steel-CFRP Members, Advances in Structural Engineering, Vol.9 No.6, pp.819-831, 2006.
- 7) 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.
- 中村一史,諸井敬嘉,鈴木博之,前田研一,入部孝夫: 溶接継手に発生した疲労き裂の積層 CFRP 板による 補修効果,鋼構造年次論文報告集,第13巻,pp.89-96, 2005.
- 9) 渡邊憲市,板垣一也,鈴木博之:炭素繊維強化樹脂板 による鋼橋の補強,鋼構造年次論文報告集,第8巻, pp.679-682,2000.
- 10)松村政秀,北田俊行, 久部修弘:高弾性 CFRP 板を I 形断面鋼桁に貼付する補強効果に関する研究,構造工 学論文集, Vo.54A, pp.834-841, 2008.
- 11)S.T. Smith, J.G. Teng : Interfacial stresses in plated beams, Engineering Structures, 23, pp.857-871, 2001.
- 12)J. Deng, M. M.K.Lee, S. S.J.Moy : Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate, Composite Structures, 65, pp.205-215, 2004.
- 13)西田貴裕・石川敏之・大倉一郎:曲げを受ける CFRP 板接着鋼部材の力学特性,土木学会第 62 回年次学術 講演会概要集 第1部,第 62 巻, I-270, pp.535-536, 2007.

(2008年4月14日 受付)