

# 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

大倉一郎<sup>1</sup>・福井唯夫<sup>2</sup>・中村圭吾<sup>3</sup>・松上泰三<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大阪大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 三菱重工業株式会社神戸造船所 鉄構部構造設計課 (〒658-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

<sup>3</sup>学生員 大阪大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

<sup>4</sup>ショーボンド建設株式会社 技術本部 大阪試験室 (〒536-0022 大阪市城東区永田 3-12-15)

本論文は、炭素繊維シートによる鋼板応力の低下と炭素繊維シートのはく離せん断応力を明らかにすることを研究目的としている。炭素繊維シートが付着された鋼板の引張試験を行い、鋼板応力の低下と炭素繊維シートの付着長さの関係および、炭素繊維シートのはく離するときの荷重と炭素繊維シートの付着長さの関係を与える。さらに鋼板とエポキシ樹脂の界面の応力性状をFEM解析で調べ、エポキシ樹脂に生じる最大せん断応力すなわち、はく離せん断応力を明らかにする。最後に鋼板応力の低下と炭素繊維シートのはく離せん断応力の推定式を与える。

**Key Words :** CF sheet, adhesive, steel plate, epoxy resin, debonding shearing stress, FEM

## 1. 序論

コンクリート構造物の補修・補強に炭素繊維シートが適用された事例は既にあるが<sup>1),2)</sup>、鋼構造物の補修・補強に炭素繊維シートが適用された事例は著者らが知る限りではまだない。しかし炭素繊維シートを鋼板に付着させることに特別な技術や大掛りな作業足場等を必要としないので、炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強は、溶接、高力ボルト、添接板を用いるこれまでの補修・補強法<sup>3)</sup>と比べて非常に経済的であると予想される。

このような状況で、最近、鋼構造物の補修・補強に炭素繊維シートまたは炭素繊維強化樹脂板の適用の可能性を調べた研究が発表されるようになった<sup>4)-8)</sup>。炭素繊維シートが付着された鋼管の曲げ挙動に関する研究<sup>4)</sup>、炭素繊維強化樹脂板が接着された鋼桁の曲げ挙動に関する研究<sup>5)</sup>、亀裂を有する鋼板に炭素繊維強化樹脂板が接着されたときの鋼板の引張り挙動に関する研究<sup>6)</sup>、亀裂を有する鋼板に炭素繊維シートが付着されたときの鋼板の疲労挙動に関する研究<sup>7),8)</sup>である。

他方、炭素繊維と鋼線とで構成されるハイブリッド・ケーブル素線に関する研究<sup>9)</sup>で、炭素繊維による鋼線の電池作用腐食が指摘されている。したがって、炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強の実用化の際には、炭素繊維シートが付着された鋼板部分の防水対策が必要であろう。

本研究では、炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強の実用化を目指して、次の2つの問題を扱う。

- (1) 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下を評価できること。
- (2) 炭素繊維シートが鋼板からはく離するときの荷重を評価できること。

最初に、炭素繊維シートが付着された鋼板の引張試験を行い、鋼板応力の低下と炭素繊維シートの付着長さの関係および、炭素繊維シートのはく離するときの荷重と炭素繊維シートの付着長さの関係を与える。さらに鋼板とエポキシ樹脂の界面の力学性状をFEM解析で調べ、エポキシ樹脂に生じる最大せん断応力すなわち、はく離せん断応力を明らかにする。最後に鋼板応力の低下と炭素繊維シートのはく離せん断応力の推定式を与える。

表-1 材料特性

(a) 鋼板

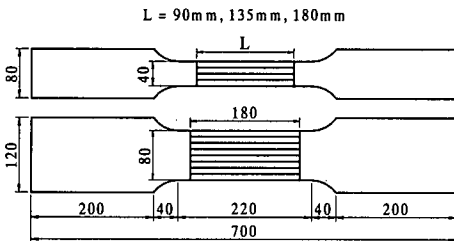
試験片	付着枚数	材質	実測板厚 (mm)	降伏応力(MPa)		引張強さ (MPa)	伸び (%)	ヤング率 (GPa)
				上降伏点	下降伏点			
連続試験片	2, 6, 10	SS400	8.7	300.6	279.8	428.2	31	209.2
切断試験片	2, 10							
切断試験片	6	SS400	9.0	298.3	291.0	427.9	29	207.6

(b) 炭素繊維シート

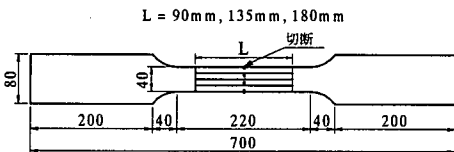
炭素繊維目付け (g/m <sup>2</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	炭素繊維シート1枚の換算厚さ (mm)	引張強さ (MPa)	ヤング率 (GPa)
309.5	1.83	0.169	4020	437.3

(c) エポキシ樹脂

試験片	付着枚数	付着長さ (mm)	引張強さ (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	せん断強さ(MPa) (JIS K 6850)
連続試験片	2, 10	90, 135, 180	40.0	3.174	0.35	15.8
切断試験片	2, 10	180				
連続試験片	6	90, 135, 180	47.6	3.264	0.41	16.0
切断試験片	2, 10	90, 135	37.9	3.300	0.37	15.6
	6	90, 135, 180				



(a) 連続試験片



(b) 切断試験片

図-1 試験片

2. 引張試験

(1) 試験片

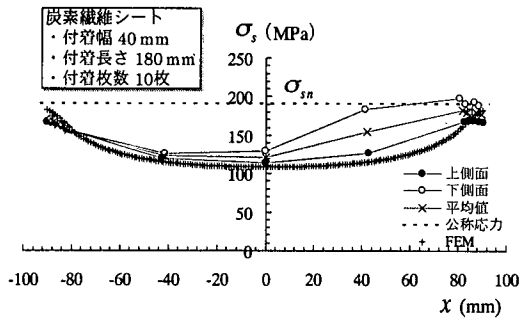
炭素繊維シートが付着された鋼板の試験片を図-1に示す。図-1(a)の連続試験片では、炭素繊維シートが付着された鋼板の応力の低下および炭素繊維シートがはく離するときの荷重を調べる。図-1(b)の切断試験片では試験片の中央で鋼板が切断されている。これは、実構造物において疲労亀裂を跨いで炭素繊維シートが鋼板に付着された場合を想定している。この試験片では、炭素繊維シートがはく離するときの荷重を調べる。

連続試験片、切断試験片とも、付着幅 40mm、付

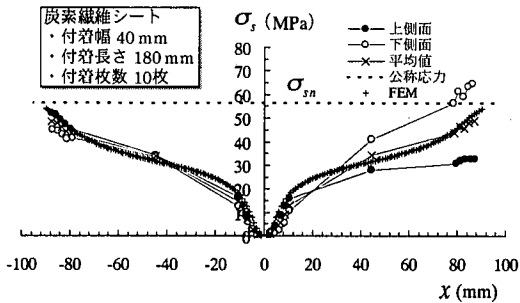
着長さ 90mm, 135mm, 180mm の試験片を用意して、付着長さの影響を調べる。さらに連続試験片に対しては、付着幅 80mm、付着長さ 180mm の試験片を用意して、付着幅の影響を調べる。炭素繊維シートの付着枚数は、試験片の各面に 2枚、6枚、10枚の 3 ケースである。

炭素繊維シートの繊維方向は、荷重の作用方向と同じである。#60の褐色アルミナ研削材(JIS R 6111)で鋼板表面をブラスト処理した後、エポキシ樹脂を炭素繊維シートに含浸させながら 1 枚ずつ炭素繊維シートを鋼板に付着させた。これを室温 20℃、湿度 65%で 1 ヶ月間養生した。鋼板、炭素繊維シートおよびエポキシ樹脂の材料特性および鋼板の実測板厚を表-1に示す。表-1(c)のエポキシ樹脂の材料試験は 20℃で行なわれた。表-1(b)で、炭素繊維目付けとは炭素繊維シート 1m<sup>2</sup>当りの炭素繊維の質量である。炭素繊維シート 1 枚の換算厚さとは、この炭素繊維目付けを密度で除したものである。

図-1の試験片の引張試験が行なわれたときの試験温度は記録されていない。しかし試験は 9月16日から11月18日の間で行なわれたので、そのときの試験温度は 15℃から 25℃の間であったと想像する。本研究で使用したエポキシ樹脂と同種のエポキシ樹脂に関して、20℃のヤング率に対して、5℃と 40℃のヤング率がそれぞれ 1.14 倍、0.79 倍という結果が得られている<sup>10)</sup>。またポアソン比とせん断強さ(JIS K 6850)は 5℃と 40℃の間でほとんど変化しないという結果が得られている<sup>10)</sup>。



(a) 連続試験片



(b) 切断試験片

図-2 鋼板の応力分布

## (2) 鋼板の応力分布

連続試験片と切断試験片の鋼板の応力分布を図-2に示す。σ<sub>s</sub>は鋼板側面の応力、xは試験片中央からの距離、σ<sub>sn</sub>は鋼板の公称応力（荷重を鋼板の断面積で除した値）である。鋼板の各側面に貼付されたひずみゲージが与える応力および両者の平均値が図に示してある。図には後で述べるFEM解析が与える鋼板の応力分布も載せてある。

連続試験片の場合、鋼板応力は鋼板中央で最も低下し、炭素繊維シート端に向かって徐々に増加し公称応力になる。切断試験片の場合、鋼板応力は鋼板の切断縁の近傍で急増し、その後炭素繊維シート端に向かって徐々に増加し公称応力になる。

## (3) 鋼板応力の低下

連続試験片の鋼板の公称応力σ<sub>sn</sub>と鋼板の中央のひずみε<sub>s0</sub>の関係を図-3に示す。ε<sub>s0</sub>は鋼板の両側面に貼付されたひずみゲージが与えるひずみの平均値である。σ<sub>sY</sub>とε<sub>sY</sub>はそれぞれ鋼板の降伏応力と降伏ひずみである。σ<sub>sn</sub>がσ<sub>sY</sub>より低い領域において、炭素繊維シートの付着枚数が増えるに従ってσ<sub>sn</sub>の傾きが大きくなる。すなわち、鋼板の弾性域において炭素繊維シートの付着枚数が増えるに従って鋼板応

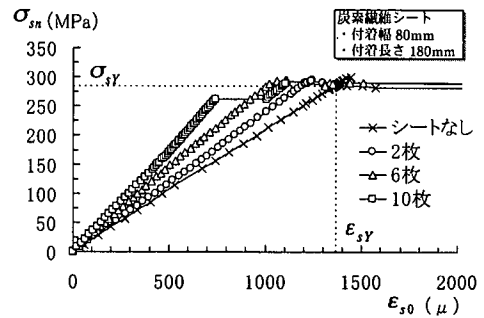


図-3 公称応力とひずみの関係〔連続試験片〕

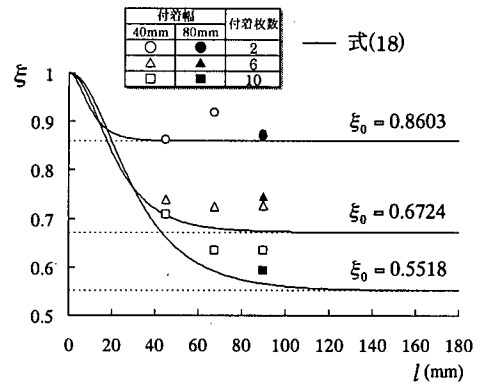


図-4 鋼板応力の低下率ξと炭素繊維シートの付着半長さlの関係

力の低下が大きくなる。しかし、付着枚数が6枚と10枚の場合、σ<sub>sn</sub>がσ<sub>sY</sub>に近づくとき、炭素繊維シートがはく離するため、ε<sub>s0</sub>が急激に増加する。そして付着枚数が2枚の場合、鋼板の降伏棚で炭素繊維シートがはく離する。したがって、炭素繊維シートの付着枚数にかかわらず、鋼板の塑性域では炭素繊維シートの効果はない。

鋼板の弾性域における、炭素繊維シートによる鋼板応力の低下を、次式で定義されるξで評価する。

$$\xi = \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{sn}} \quad (1)$$

ここに、σ<sub>s0</sub>は試験片中央の鋼板応力（図-2(a)においてx=0に対するσ<sub>s</sub>の値）である。ξを鋼板応力の低下率と呼ぶ。

鋼板応力の低下率ξと炭素繊維シートの付着半長さlの関係を図-4に示す。炭素繊維シートが完全合成で鋼板に付着されていると仮定した場合の鋼板応力の低下率ξ<sub>0</sub>が次式で与えられる。

$$\xi_0 = \frac{E_s f_s}{2E_c t_c + E_s f_s} \quad (2)$$

試験片	付着幅		付着枚数 $m$
	40mm	80mm	
連続試験片	○	△	6
	□	◇	10
切断試験片	●	▲	2
	■	◆	6
	●	▲	10
	■	◆	10

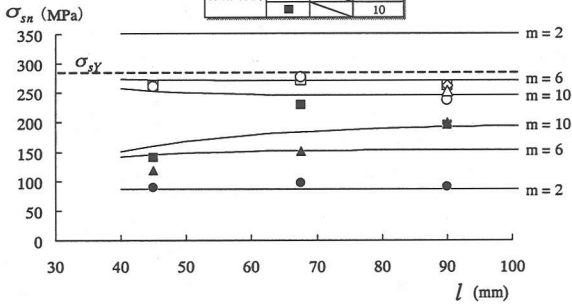


図-5 炭素繊維シートがはく離したときの  $\sigma_{sm}$  と  $l$  の関係

$$t_c = mt_{c0} \quad (3)$$

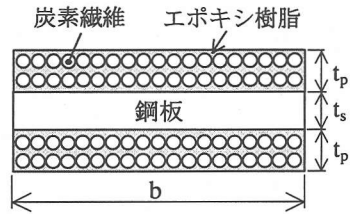
ここに、 $E_s$  と  $E_c$  はそれぞれ鋼板と炭素繊維シートのヤング率、 $t_s$  は鋼板の厚さ、 $t_c$  は鋼板片面の炭素繊維シートの全厚、 $m$  は炭素繊維シートの付着枚数、 $t_{c0}$  は炭素繊維シート1枚の換算厚さである。2枚付着、6枚付着、10枚付着に対して、 $\xi_0$  はそれぞれ0.8603、0.6724、0.5518である。図には後で述べる  $\xi$  と  $l$  の関係に対する理論曲線も載せてある。

付着枚数が2枚の場合、試験結果の  $\xi$  は  $\xi_0$  にほぼ達しているが、付着枚数が6枚と10枚の場合、試験結果の  $\xi$  は各付着枚数に対する  $\xi_0$  に達していない。 $l = 90 \text{ mm}$  における炭素繊維シートの付着幅40mmと80mmの比較から分かるように、付着幅による  $\xi$  の違いは小さい。

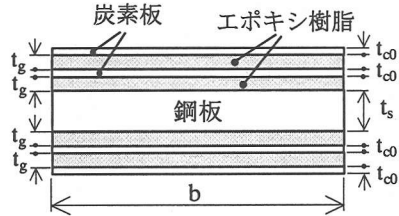
#### (4) 炭素繊維シートのはく離

引張試験において、ある荷重に達すると炭素繊維シートは鋼板から瞬時にはく離した。鋼板あるいは炭素繊維シートに貼付されたひずみゲージが与えるひずみの変化から、連続試験片では炭素繊維シートの付着端からはく離が始まり、切断試験片では鋼板の切断縁からはく離が始まった。炭素繊維シートがはく離したときの  $\sigma_{sm}$  と  $l$  の関係を図-5に示す。連続試験片で炭素繊維シートの付着枚数が2枚の場合、鋼板の降伏棚で炭素繊維シートがはく離したので、これに対する試験結果は図にない。図には後で述べる、炭素繊維シートがはく離したときの  $\sigma_{sm}$  と  $l$  の関係に対する理論曲線も載せてある。

図-5 から次のことが分かる。連続試験片の付着枚数が6枚と10枚において、付着幅と付着長さにかかわらず、炭素繊維シートがはく離したときの  $\sigma_{sm}$  は



(a) 実際の状態



(b) 解析モデル

図-6 炭素繊維シートのモデル化

ほぼ同じである。切断試験片の炭素繊維シートがはく離したときの  $\sigma_{sm}$  は連続試験片のそれより低い。切断試験片においては、試験結果に多少のばらつきが見られるが、炭素繊維シートがはく離したときの  $\sigma_{sm}$  は、付着枚数が2枚、6枚、10枚と多くなるに従って大きくなる。

切断試験片の試験結果にばらつきが生じたのは、鋼板の切断縁で、板厚方向に試験片が折れ曲がっていたためである。特に  $m=6$  で  $l=90$  の試験片と  $m=10$  で  $l=67.5$  の試験片は、一見して試験片が鋼板の切断縁で、板厚方向に折れ曲がっていることが確認できた。この鋼板の切断縁での板厚方向への折れ曲がりには、炭素繊維シートを鋼板にエポキシ樹脂で貼付けた後、エポキシ樹脂が固まる過程で生じた。

### 3. FEM解析

連続試験片と切断試験片に対してFEM解析を行い、鋼板とエポキシ樹脂の界面の応力性状を調べる。そして炭素繊維シートのはく離を支配するパラメータとして、はく離せん断応力を明らかにする。

#### (1) 解析モデル

解析モデルを図-6に示す。図は試験片の横断面を示している。図-6(a)に示すように、炭素繊維シートが付着された実際の鋼板では、炭素繊維シート

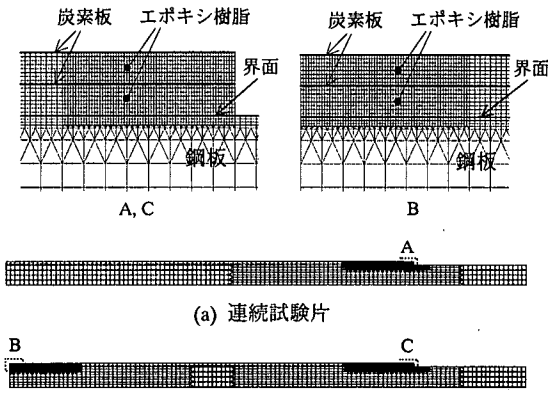


図-7 要素分割

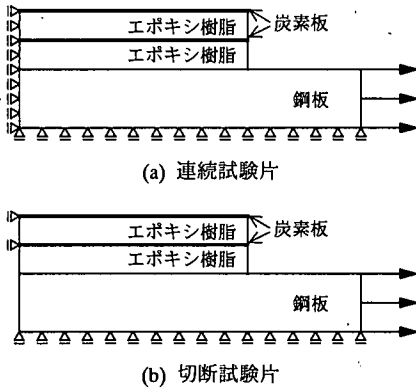


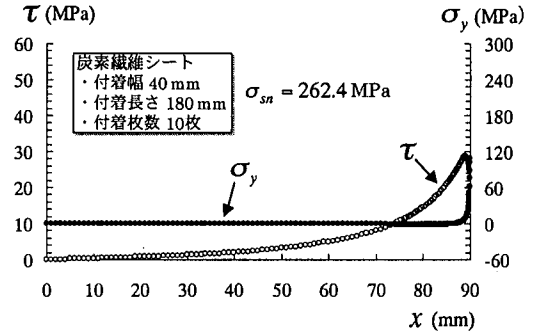
図-8 FEM 解析の境界条件

と炭素繊維シートとの間にエポキシ樹脂が含浸している。図-6(b)に示すように、解析モデルでは、炭素繊維シート1枚の換算厚さを持つ炭素板に炭素繊維シートをモデル化し、この炭素板と炭素板の間にエポキシ樹脂が存在していると仮定する。図-6(b)のエポキシ樹脂の厚さ $t_g$ は次式で計算される。

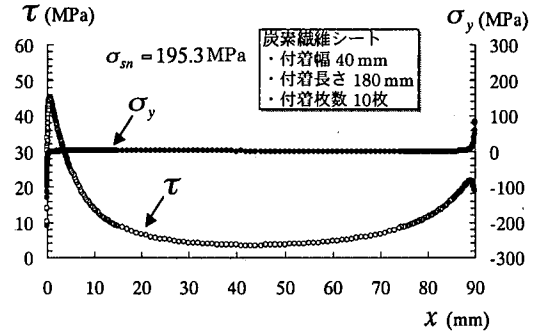
$$t_g = \frac{t_p - t_c}{m} \quad (4)$$

ここに、図-6(a)に示すように、 $t_p$ は鋼板の片面の炭素繊維シート硬化樹脂の厚さである。 $t_p$ は測定された試験片の全厚から鋼板の板厚 $t_c$ を差し引いて2で除して求めた。試験片の $t_g$ は平均値が0.3645 mm、その変動係数が0.102であった。FEM解析では $t_g$ にこの平均値を用いる。

図-6(b)の解析モデルに対する要素分割を図-7に示す。解析モデルは2次元の弾性体で、対称性を考慮して1/4を解析対象としている。FEM解析には汎用FEM解析プログラムMARC<sup>(1)</sup>を用いる。鋼板とエ



(a) 連続試験片



(b) 切断試験片

図-9 界面上のせん断応力と垂直応力

ポキシ樹脂には4節点平面応力要素(MARCの要素タイプ3)、炭素繊維シートにはトラス要素(MARCの要素タイプ9)を用いる。引張試験において、ひずみゲージにより鋼板側面の表面ひずみを測定したので、解析は平面応力状態で行なう。要素分割に関する解析精度を検討した結果、エポキシ樹脂の最も小さい要素は0.0455625 mm×0.0625 mmである。

FEM解析の境界条件を図-8に示す。図-8(b)の切断試験片においては、鋼板の切断線において炭素板の水平変位のみ拘束する。エポキシ樹脂の水平変位を拘束すると、エポキシ樹脂の引張強度より大きい応力がエポキシ樹脂に発生するので、エポキシ樹脂は自由としている。

FEM解析が与える鋼板の応力分布を図-2に示す。連続試験片、切断試験片とも、FEM値と試験値の分布傾向は一致している。FEM値は試験結果のうちの平均値に近い。

## (2) はく離せん断応力

鋼板とエポキシ樹脂の界面で、エポキシ樹脂に生じるせん断応力 $\tau$ と鋼板に垂直に作用する直応力 $\sigma_y$ の解析結果を図-9に示す。 $x$ は試験片中央からの距離である。連続試験片の場合、図-9(a)に示す

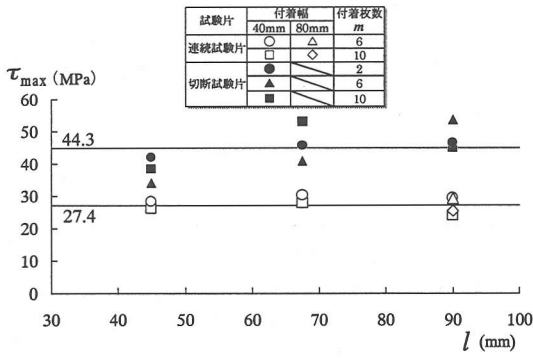


図-10 はく離せん断応力 $\tau_{max}$ と付着半長さ $l$ の関係

ように、 $\tau$ は炭素繊維シートの付着端 ( $x=90$ ) の少し内側で最大値を取り、その後付着端 ( $x=90$ ) に向かって急激に減少する。 $\sigma_y$ は、 $\tau$ が最大値を取る位置までゼロで、 $\tau$ が急激に減少する領域で急激に増加する。ここで $\sigma_y$ は引張応力である。

切断試験片の場合、図-9(b)に示すように、 $\tau$ は鋼板の切断縁 ( $x=0$ ) の少し内側で最大値を取り、その後切断縁 ( $x=0$ ) に向かって急激に減少する。 $\sigma_y$ は、 $\tau$ が最大値を取る位置までゼロで、 $\tau$ が急激に減少する領域で急激に増加する。ここで $\sigma_y$ は圧縮応力である。

前述の $\tau$ の最大値を $\tau_{max}$ で表し、引張試験で炭素繊維シートがはく離したときの荷重に対して $\tau_{max}$ を計算する。炭素繊維シートがはく離したときの $\tau_{max}$ と炭素繊維シートの付着半長さ $l$ の関係を図-10に示す。図-5と図-10の比較から分かるように、 $\tau_{max}$ を用いると、連続試験片と切断試験片の各場合において、炭素繊維シートの付着枚数 $m$ によるばらつきが小さくなる。さらに連続試験片と切断試験片の各場合において、炭素繊維シートの付着半長さ $l$ に係わらず $\tau_{max}$ はほぼ一定である。したがってエポキシ樹脂に生じる最大せん断応力 $\tau_{max}$ が、炭素繊維シートが鋼板からはく離するときの支配パラメータであるといえる。本論文では、エポキシ樹脂に生じる最大せん断応力 $\tau_{max}$ をはく離せん断応力と呼ぶ。そして炭素繊維シートが鋼板からはく離するときのはく離せん断応力の値をはく離せん断強度と呼ぶ。

図-10から分かるように、はく離せん断強度 $\tau_{max}$ は連続試験片と切断試験片とで異なる。連続試験片の $\tau_{max}$ は平均値で27.4MPa、切断試験片の $\tau_{max}$ は平均値で44.3MPaである。このように連続試験片と切断試験片とで、はく離せん断強度が異なるのは、図-9に示したように、連続試験片の場合、炭素繊維

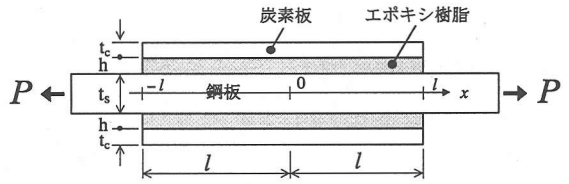


図-11 接着2重重ね継手

シートの付着端の近傍で $\sigma_y$ が引張り、切断試験片の場合、鋼板の切断縁の近傍で $\sigma_y$ が圧縮になっていることが原因であると考えられる。すなわち引張の $\sigma_y$ は、はく離せん断強度を下げる方向に働き、圧縮の $\sigma_y$ は、はく離せん断強度を上げる方向に働く。

はく離せん断強度は、鋼板の表面処理の仕方、エポキシ樹脂の種類、炭素繊維シートの種類とエポキシ樹脂の含浸の仕方によって変動するであろう。今後の課題として、これらの因子とはく離せん断強度の関係が明らかにされねばならない。

#### 4. 鋼板応力の低下と炭素繊維シートのはく離せん断応力の推定式

接着2重重ね継手の微分方程式<sup>12)</sup>が与える解をFEM解析の結果で修正することにより、鋼板応力の低下と炭素繊維シートのはく離せん断応力の推定式を与える。

##### (1) 接着2重重ね継手の微分方程式<sup>12)</sup>とその解

図-11に示すように、1枚の炭素板が鋼板の各面にエポキシ樹脂で付着されている場合を考える。エポキシ樹脂はせん断応力のみを伝達し、鋼板と炭素板は引張応力のみを伝達すると仮定する。この鋼板が引張力 $P$ を受けるとき、次式が成立する。

$$\sigma_s t_s b + 2\sigma_c t_c b = P \quad (5)$$

ここに、 $\sigma_s$ と $\sigma_c$ はそれぞれ鋼板と炭素板に生じる応力、 $t_s$ と $t_c$ はそれぞれ鋼板と1枚の炭素板の厚さ、 $b$ は接着2重重ね継手の幅である。

$\sigma_s$ と変位の関係および $\sigma_c$ と変位の関係がそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_s = E_s \frac{du_s}{dx} \quad (6)$$

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

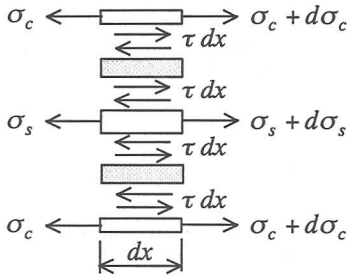


図-12 力の釣合い

ここに、 $E_s$ と $E_c$ はそれぞれ鋼板と炭素板のヤング率、 $u_s$ と $u_c$ はそれぞれ鋼板と炭素板の変位である。

エポキシ樹脂に生じるせん断応力 $\tau$ は次式で与えられる。

$$\tau = G_g \frac{u_s - u_c}{h} \quad (8)$$

ここに、 $G_g$ はエポキシ樹脂のせん断弾性係数、 $h$ はエポキシ樹脂の厚さである。さらに $G_g$ は次式で与えられる。

$$G_g = \frac{E_g}{2(1+\nu_g)} \quad (9)$$

ここに、 $E_g$ と $\nu_g$ はそれぞれエポキシ樹脂のヤング率とポアソン比である。

式(8)を $x$ で微分して次式を得る。

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{G_g}{h} \left( \frac{du_s}{dx} - \frac{du_c}{dx} \right) \quad (10)$$

接着2重重ね継手の微小長さ $dx$ に生じる力の釣合いを図-12に示す。鋼板に対して力の釣合いを考えて次式を得る。

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

式(10)の右辺に式(6)、(7)、左辺に式(11)を代入し、さらに式(5)の関係をを用いて次の微分方程式を得る。

$$\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} - c^2\sigma_s = -\frac{G_g}{hbt_sE_c t_c} P \quad (12)$$

ここで、

$$c = \sqrt{\frac{G_g}{E_s}} \sqrt{\frac{2}{1-\xi_0}} \frac{1}{\sqrt{ht_s}} \quad (13)$$

#### a) 鋼板が連続している場合

$x = \pm l$ で $\sigma_s$ が公称応力 $\sigma_{sn}$ に等しくなるという境界条件の下で式(12)を解くと、

$$\sigma_s = \left\{ \xi_0 + (1-\xi_0) \frac{\cosh cx}{\cosh cl} \right\} \sigma_{sn} \quad (14)$$

表-2 計算対象

ケース	$E_s$ (GPa)	$t_s$ (mm)	$E_g$ (GPa)	$t_g$ (mm)	$E_c$ (GPa)	$t_{c0}$ (mm)
A	209.2	8.7	3.174	0.3645	437.3	0.169
B	209.2	18	3.174	0.3645	437.3	0.169
C	209.2	8.7	1.587	0.3645	437.3	0.169
D	209.2	8.7	3.174	0.18225	437.3	0.169
E	209.2	8.7	3.174	0.54675	437.3	0.169
F	209.2	8.7	3.174	0.3645	218.65	0.169
G	209.2	8.7	3.174	0.3645	218.65	0.0845

エポキシ樹脂に生じるせん断応力 $\tau$ は式(14)を式(11)に代入して次式で与えられる。

$$\tau = ct_s \frac{1-\xi_0}{2} \frac{\sinh cx}{\cosh cl} \sigma_{sn} \quad (15)$$

#### b) 鋼板が切断されている場合

$x=0$ で $\sigma_s=0$ 、 $x=l$ で $\sigma_s=\sigma_{sn}$ の境界条件の下で式(12)を解くと、

$$\sigma_s = \xi_0 \left\{ \left( \frac{1}{\tanh cl} + \frac{1-\xi_0}{\xi_0} \frac{1}{\sinh cl} \right) \sinh cx - \cosh cx + 1 \right\} \sigma_{sn} \quad (16)$$

エポキシ樹脂に生じるせん断応力 $\tau$ は式(16)を式(11)に代入して次式で与えられる。

$$\tau = ct_s \frac{\xi_0}{2} \left( \frac{\cosh cx}{\tanh cl} - \sinh cx + \frac{1-\xi_0}{\xi_0} \frac{\cosh cx}{\sinh cl} \right) \sigma_{sn} \quad (17)$$

#### (2) 鋼板応力低下の推定式

連続試験片に対して式(1)で定義された鋼板応力の低下率 $\xi$ が、式(14)において $x=0$ とおくことによって次式で与えられる。

$$\xi = \xi_0 + \frac{1-\xi_0}{\cosh cl} \quad (18)$$

鋼板の各面に炭素繊維シートが1枚付着された場合、式(18)が与える $\xi$ と $l$ の関係はFEM解析の結果に一致する。ここで式(18)の $c$ の中の $h$ に対してエポキシ樹脂の厚さ $t_g$ を用いる。

鋼板の各面に炭素繊維シートが2枚以上付着された場合、式(3)で与えられる、鋼板片面の炭素繊維シートの全厚 $t_c$ を、図-11の炭素板の厚さ $t_c$ に用いる。しかし、この場合、式(18)の $c$ の中の $h$ に対して $t_g$ を用いても、式(18)が与える $\xi$ と $l$ の関係はFEM解析の結果と一致しない。

そこで反対に式(18)がFEM解析の結果に一致するような $h$ を求める。式(13)と(18)から $c$ を消去し、 $h$ について解いて次式を得る。

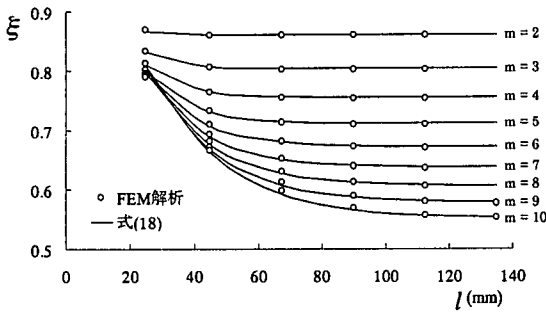


図-13 ξとlの関係〔ケースA〕

$$h = \frac{2G_g l^2}{E_s t_g} \frac{1}{(1-\xi_0) \left( \cosh^{-1} \frac{1-\xi_0}{\xi-\xi_0} \right)^2} \quad (19)$$

FEM解析が与えるξとlの関係を表(19)に代入してhの変動を調べる。FEM解析の計算対象を表-2に示す。ケースAは本研究の試験片に対するものである。他のケースで、鋼板、炭素繊維シート、エポキシ樹脂の任意の組合せに対してhの変動を調べる。各ケースにおいてl=25, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 190, 200, 220mmに対してFEM解析を行なう。

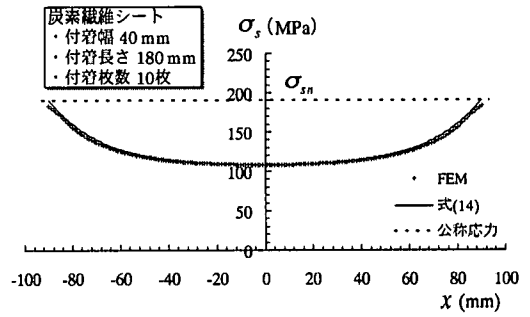
FEM解析の結果を表(19)に代入してhの変動を調べた結果、hは炭素繊維シートの付着枚数mとエポキシ樹脂の厚さt<sub>g</sub>によって変動し、他の変数による変動は小さく、hは次式で表される。

$$h = (0.3m + 0.7) t_g \quad (20) \quad (1 \leq m \leq 10)$$

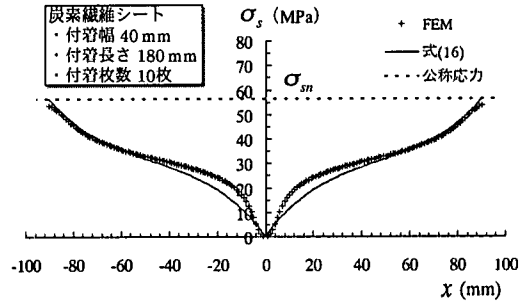
式(18)がFEM解析の結果をどの程度近似しているかを示すために、ケースAの場合に対して、式(18)のξとlの関係とFEM解析の結果の比較を図-13に示す。ここで式(18)のcの中のhに式(20)を用いている。他のケースについても、図-13に示す程度で式(18)はFEM解析の結果を近似する。

連続試験片の鋼板側面の応力分布に対して、式(14)とFEM解析の結果の比較を図-14(a)、切断試験片の鋼板側面の応力分布について、式(16)とFEM解析の結果の比較を図-14(b)に示す。式(14)と(16)のcの中のhに式(20)を用いている。図-14(a)に示すように、連続試験片においては、式(14)はFEM解析の結果に一致している。図-14(b)に示すように、切断試験片においては、式(16)はFEM解析の結果と鋼板の切断線の近くで一致していないが、炭素繊維シートの付着端の近くでは一致している。

式(18)が与えるξとlの関係と引張試験の結果の



(a) 連続試験片



(b) 切断試験片

図-14 鋼板側面の応力分布〔ケースA〕

比較を図-4に示す。式(18)は引張試験の結果の下限値あたりを通過している。lが増加するに従って、ξはξ<sub>0</sub>に漸近する。すなわち炭素繊維シートの付着長さが長くなるに従って、鋼板応力の低下率は完全合成の低下率に近づく。

### (3) はく離せん断応力の推定式

#### a) 連続試験片

鋼板とエポキシ樹脂の界面に生じるせん断応力に関して、式(15)とFEM解析の結果の比較を図-15に示す。xは試験片中央からの距離である。式(20)が与えるhを式(15)のcの中のhに用いている。炭素繊維シートの付着端の近傍で式(15)が与えるτはFEM解析の結果と異なる。これは、接着2重重ね継手の理論においては、炭素板の端でエポキシ樹脂が自由表面を持つことが考慮されていないからである。

式(15)においてx=lに対するせん断応力τ<sub>x=l</sub>が次式で与えられる。

$$\tau_{x=l} = c f_s \frac{1-\xi_0}{2} \tanh cl \cdot \sigma_{sn} \quad (21)$$

FEM解析の結果の最大せん断応力すなわち、はく離せん断応力τ<sub>max</sub>とτ<sub>x=l</sub>の関係を明らかにするために、



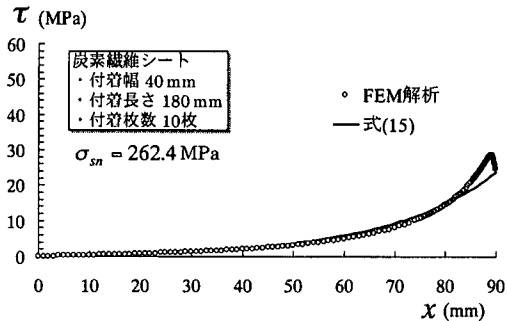


図-15 界面上のせん断応力〔連続試験片，ケースA〕

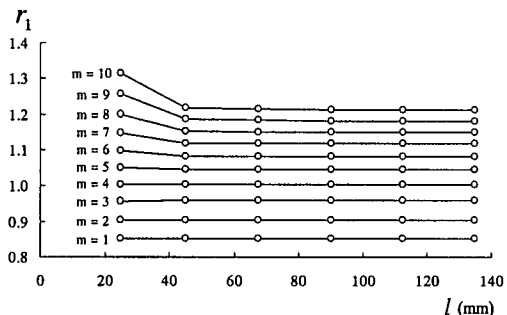


図-16  $r_1$ と $l$ の関係〔連続試験片，ケースA〕

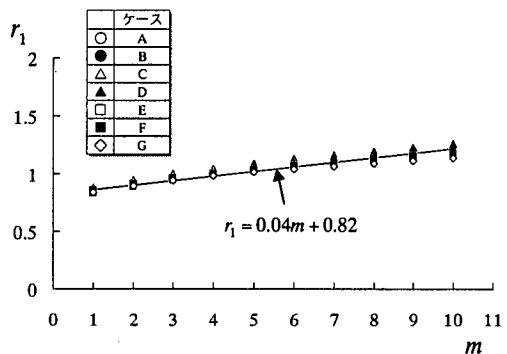


図-17  $r_1$ と $m$ の関係〔連続試験片〕

次式で定義される変数 $r_1$ の変化を調べる。

$$r_1 = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{x=l}} \quad (22)$$

ケースAの場合の $r_1$ と $l$ の関係を図-16に示す。 $l$ が45mm以上で、各付着枚数において $r_1$ はほぼ一定になる。この $r_1$ の値と付着枚数 $m$ の関係を図-17に示す。この図には他のケースの $r_1$ と $m$ の関係も示してある。各ケースの $r_1$ と $m$ の関係は直線分布を示す。全てのケースのプロット点に最小2乗法を適用して、 $r_1$ と $m$ の関係が次式で与えられる。

$$r_1 = 0.04m + 0.82 \quad (23)$$

式(21)，(22)，(23)より，連続試験片の炭素繊維シートのはく離せん断応力の推定式が次式で与えられる。

$$\tau_{\max} = (0.02m + 0.41)(1 - \xi_0)ct_s \tanh cl \cdot \sigma_{sn} \quad (24)$$

式(24)のはく離せん断応力 $\tau_{\max}$ が連続試験片のはく離せん断強度27.4MPaに達したとき炭素繊維シートのはく離が起こる。このときの $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係と試験結果の比較を図-5に示す。 $m=2$ に対する $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係は鋼板の降伏応力 $\sigma_{sY}$ より上に位置している。このことは，引張試験において， $m=2$ の場合，鋼板の降伏棚で炭素繊維シートがはく離したことに呼応している。 $m=6, 10$ に対する $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係は引張試験の結果の近くを通過している。 $m$ が大きくなるに従って $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係は下降する。すなわち連続試験片の場合，炭素繊維シートの付着枚数が増えるに従って，炭素繊維シートが鋼板からはく離するときの荷重は低下する。

図-5から分かるように， $l$ が大きくなると $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係は水平になり， $l$ に関係なくなる。これは，式(24)において， $l$ が大きくなると $\tanh cl$ が1に近づくからである。すなわち $l$ が大きくなると，はく離せん断応力は次式で与えられる。

$$\tau_{\max} = (0.02m + 0.41)(1 - \xi_0)ct_s \sigma_{sn} \quad (25)$$

#### b) 切断試験片

鋼板とエポキシ樹脂の界面に生じるせん断応力に関して，式(17)とFEM解析の結果の比較を図-18に示す。 $x$ は試験片中央からの距離である。式(20)が与える $h$ を式(17)の $c$ の中の $h$ に用いている。鋼板の切断縁の近傍で式(17)が与える $\tau$ はFEM解析の結果と異なる。式(17)において $x=0$ に対するせん断応力 $\tau_{x=0}$ が次式で与えられる。

$$\tau_{x=0} = ct_s \frac{\xi_0}{2} \left( \frac{1}{\tanh cl} + \frac{1 - \xi_0}{\xi_0} \frac{1}{\sinh cl} \right) \sigma_{sn} \quad (26)$$

連続試験片の場合と同様に，次式で定義される変数 $r_2$ の変化を調べる。

$$r_2 = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{x=0}} \quad (27)$$

ここで， $\tau_{\max}$ はFEM解析が与える， $x=0$ の近傍のはく離せん断応力である。ケースAの場合の $r_2$ と $l$ の関係を図-19に示す。 $l$ が45mm以上で，各付着枚数において $r_2$ はほぼ一定になる。この $r_2$ の値と付着枚数 $m$ の関係を図-20に示す。この図には他のケースの $r_2$ と $m$ の関係も示してある。各ケースの $r_2$ と $m$ の関係は直線分布を示す。全てのケースのプロット

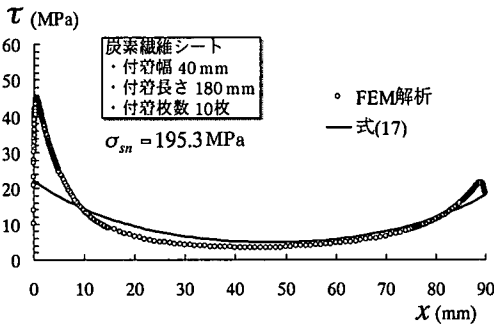


図-18 界面上のせん断応力〔切断試験片、ケースA〕

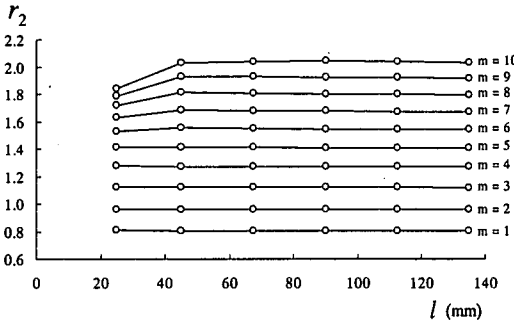


図-19  $r_2$ と $l$ の関係〔切断試験片、ケースA〕

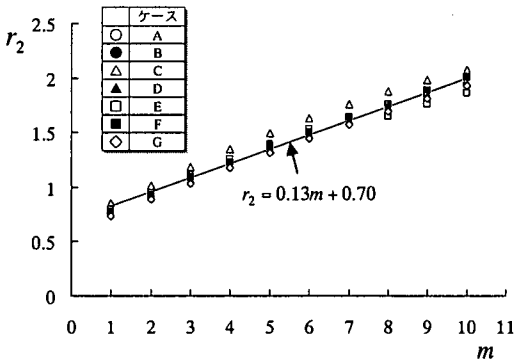


図-20  $r_2$ と $m$ の関係〔切断試験片〕

点に最小2乗法を適用して、 $r_2$ と $m$ の関係が次式で与えられる。

$$r_2 = 0.13m + 0.70 \quad (28)$$

式(26), (27), (28)より、切断試験片の炭素繊維シートのはく離せん断応力の推定式が次式で与えられる。

$$\tau_{\max} = (0.065m + 0.35)\xi_0 c f_s \left( \frac{1}{\tanh cl} + \frac{1 - \xi_0}{\xi_0} \frac{1}{\sinh cl} \right) \sigma_{sn} \quad (29)$$

式(29)のはく離せん断応力 $\tau_{\max}$ が切断試験片のはく離せん断強度44.3MPaに達したとき炭素繊維シート

のはく離が起こる。このときの $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係と試験結果の比較を図-5に示す。 $m=2$ の場合、 $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係の上に試験値が乗っている。 $m=6, 10$ の場合、 $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係から離れた位置に試験値がプロットされている。しかし $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係は試験値の全体的な傾向を表している。 $m$ が大きくなるに従って $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係は上昇する。すなわち切断試験片の場合、炭素繊維シートの付着枚数が増えるに従って、炭素繊維シートが鋼板からはく離するときの荷重は増加する。

連続試験片の場合と同じように、切断試験片の場合も $l$ が大きくなると $\sigma_{sn}$ と $l$ の関係は水平になり、 $l$ に関係なくなる。これは、式(29)において、 $l$ が大きくなると $\tanh cl$ が1に近づき、 $1/\sinh cl$ が0に近づくからである。すなわち $l$ が大きくなると、はく離せん断応力は次式で与えられる。

$$\tau_{\max} = (0.065m + 0.35)\xi_0 c f_s \sigma_{sn} \quad (30)$$

図-18に示すように、切断試験片の場合、炭素繊維シートの付着端( $x=l$ )の近傍にも大きなせん断応力が発生している。切断試験片の場合、鋼板、炭素繊維シート、エポキシ樹脂の組合せによっては、鋼板の切断縁より早く炭素繊維シートの付着端ではく離が始まる可能性がある。切断試験片の炭素繊維シートの付着端の近傍のはく離せん断応力 $\tau_{\max}$ は次式で与えられる。

$$\tau_{\max} = (0.02m + 0.41)(1 - \xi_0) c f_s \left( \frac{1}{\tanh cl} + \frac{\xi_0}{1 - \xi_0} \frac{1}{\sinh cl} \right) \sigma_{sn} \quad (31)$$

この式は、式(17)において $x=l$ とおいた式(23)を乗じたものである。式(31)がFEM解析の結果をよく近似することを確認している。 $l$ が大きくなると、式(31)は式(25)になる。式(31)のはく離せん断応力に対応するはく離せん断強度は27.4 MPaである。

## 5. 結論

本論文で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 炭素繊維シートの付着枚数が多くなるに従って鋼板応力の低下が大きくなる。炭素繊維シートの付着長さが長くなるに従って、鋼板と炭素繊維シートは完全合成に近づく。鋼板応力の低下と炭素繊維シートの付着長さの関係を式(18)で与えた。

- (2) 連続試験片の場合、炭素繊維シートのはく離は炭素繊維シートの付着端から始まる。そして炭素繊維シートの付着枚数が増えるに従って、炭素繊維シートが鋼板からはく離するときの荷重は低下する。切断試験片の場合、炭素繊維シートのはく離は鋼板の切断縁で始まる。そして炭素繊維シートの付着枚数が増えるに従って、炭素繊維シートが鋼板からはく離するときの荷重は増加する。
- (3) 鋼板とエポキシ樹脂の界面で、エポキシ樹脂に生じる最大せん断応力が、炭素繊維シートが鋼板からはく離するときの支配パラメータであることを明らかにした。本論文ではこの最大せん断応力をはく離せん断応力と呼び、炭素繊維シートが鋼板からはく離するときのはく離せん断応力の値をはく離せん断強度と定義した。
- (4) はく離せん断強度は連続試験片と切断試験片とで異なることを明らかにした。本研究では、前者が 27.4MPa、後者が 44.3MPa であった。
- (5) 炭素繊維シートのはく離せん断応力の推定式を与えた。はく離せん断応力は、連続試験片の場合式(24)で推定され、切断試験片の場合式(29)と式(31)で推定される。炭素繊維シートの付着長さが長くなると、はく離せん断応力は付着長さに関係なくなる。

- 補修・補強工法技術研究会：コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ)―炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)、第235号、1999.
- 3) (社)日本道路協会：鋼橋の疲労、丸善、pp.56-68、1997.
  - 4) 小野紘一、杉浦邦征、佐々木敦、若原直樹、小牧秀之：CFRPにより補強された鋼管の曲げ挙動、鋼構造年次論文報告集、第8巻、pp.671-678、2000.
  - 5) 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.
  - 6) 鈴木博之、永崎央輔、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.
  - 7) 大倉一郎、福井唯夫、松上泰三：炭素繊維シート of 鋼板疲労亀裂補修への適用、日本材料学会、第29回FRPシンポジウム講演論文集、pp.133-136、2000.
  - 8) 大倉一郎、福井唯夫、中村圭吾、松上泰三、祝賢治：炭素繊維シート of 鋼板疲労亀裂補修への適用、鋼構造年次論文報告集、第8巻、pp.689-696、2000.
  - 9) 中井博、北田俊行、稲山正幸、三田村武、小林剛、島本明：新素材と鋼線とで構成されるハイブリッド・ケーブル素線 of 特性、材料、Vol.48、No.6、pp.623-628、1999.
  - 10) ショーボンド建設(株)：エポキシ樹脂 of 温度依存性、内部資料、2001.
  - 11) 日本マーク(株)：MARC、K.6、1994.
  - 12) 林毅：複合材料工学、日科技連出版社、pp.840-843、1971.

#### 参考文献

- 1) (財)鉄道総合研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針、(財)研友社、1996.
- 2) 建設省土木研究所 構造橋梁部 橋梁研究室、炭素繊維

(2001.1.25 受付)

## DECREASE IN STRESS IN STEEL PLATES BY CARBON FIBER SHEETS AND DEBONDING SHEARING STRESS

Ichiro OKURA, Tadao FUKUI, Keigo NAKAMURA and Taizo MATSUGAMI

The aim of this research is to make clear the decrease in stress in steel plates by carbon fiber (CF) sheets and their debonding shearing stress. The tensile tests of steel plates with CF sheets adhered are carried out. They present the relation between the decrease in stress in the steel plates and the adhesion length of the CF sheets and the relation between the load at the debonding of the CF sheets and their adhesion length. The characteristics of the stresses on the interface of a steel plate and an epoxy resin are investigated by FE analysis. It is shown that the maximum shearing stress created in the epoxy resin is the governing stress for the debonding of the CF sheet. The equations to estimate the decrease in stress in steel plates and the debonding shearing stress of CF sheets are provided.