

# 炭素繊維シート接着工法における付着性状 および剥離耐力向上方法に関する研究

佐川康貴<sup>1</sup>・松下博通<sup>2</sup>・岳尾弘洋<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究科建設システム工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>正会員 博士 (工学) ショーボンド建設 (株) 技術本部技術部 (〒101-8468 東京都千代田区神田錦町3-18)

既存のコンクリート構造物に対する補修、補強が注目されている中で、炭素繊維シートを用いた接着工法が数多く研究され、適用事例も増加している。鉄筋コンクリート部材を炭素繊維シートで補強した場合、補強効果は面接着による付着応力に依存し、その破壊性状は鉄筋コンクリート部材とは異なる性状を示すものと考えられる。本研究では炭素繊維シートとコンクリートの付着性状を明らかにするとともに、補強効果に影響を与える因子として特に炭素繊維シートの引張剛性に着目した。さらに、コンクリートに損傷を与えることなく補強後の部材の耐力を高めることができる方法として、炭素繊維シート接着端部のみを積層する「増し貼り定着」を提案した。

*Key Words* : carbon fiber sheet, bond, debonding, bond stress, effective bond length, stress concentration, tension stiffness, multi-layering anchorage system

## 1. はじめに

我が国はこれまで大量生産、大量消費型の経済社会を築いてきたが、現状のままでは将来、資源の枯渇を招き、環境へ多大なる負荷を与えかねないことが危惧されている。土木分野においても、従来のスクラップ・アンド・ビルド的な概念は近年では修正されており、耐久性に富むとされていたコンクリート構造物の劣化が顕在化していることから、土木学会によりコンクリート構造物の維持管理指針(案)<sup>1)</sup>が作成され、維持管理の重要性が指摘されている。また、供用期間中における社会のニーズの変化に伴い、既存構造物に対する要求性能が建設当時とは異なるものも少なくなく、何らかの方法による補修・補強の必要性にせまられている。

このように、コンクリート構造物の補修・補強手法が要求されている中で、従来からコンクリート構造物を補強する場合、鋼板接着工法のように補強材をコンクリート構造物に接着する工法が用いられてきた。これは、既存構造物に補強材を接着するという施工の簡便性が主な理由であると考えられ、接着工法はコンクリート構造物の補強工法として必要不可欠な工法であると言える。しかしながら、補強材

として鋼板を用いた場合、補強材自体の重量が大きくなり、取り扱いが困難であるという欠点を有するため、今日では補強材として炭素繊維シートをはじめとするシート状連続繊維補強材を用いた工法が注目されており、既に施工例も数多く見られる。炭素繊維シート接着工法は布状の軽量な炭素繊維シートを使用することにより、補修・補強工事に特有の狭小な作業空間においても施工が容易となる。また、炭素繊維シートは耐食性に優れており、コンクリート表面に施工することによりコンクリートの劣化因子の進入を抑制する効果も期待できる。さらに、補強材である炭素繊維シートを積層して使用することにより、対象部材の要求性能に応じた施工が可能である。

本工法において、炭素繊維シートは鉄筋コンクリート構造における引張鉄筋と同様に部材の引張力を受け持つ要素であるが、鉄筋と炭素繊維シートはそれぞれ付着メカニズムが異なる<sup>2)</sup>。すなわち、異形鉄筋では主にコンクリートと鉄筋表面との摩擦作用と節による機械的作用によって付着応力に抵抗するが、本工法の補強効果は面接着による付着応力に依存している。また、柱部材等に対してせん断耐力あるいは靱性の向上を図る場合には炭素繊維シートを

密着させて巻き付けることによって補強効果が得られる。本工法を曲げ補強として使った場合の破壊形態として炭素繊維シートの破断と炭素繊維シートの剥離が考えられるが、剥離現象は接着工法特有の破壊形式であり、そのメカニズムについては十分に解明されていないため、本研究では後者の破壊形式を検討の対象とした。

本研究では、炭素繊維シートとコンクリート間の付着性状およびそれに影響を与える因子について検討した上で、炭素繊維シートで補強したコンクリート部材の剥離耐力をさらに高める方法を提案した。

まず、炭素繊維シートでコンクリート部材を補強した場合における炭素繊維シートの付着性状、剥離の挙動、破壊性状等の基礎的事項を把握することを目的とし、炭素繊維シートを接着したコンクリート棒部材の両引き試験を行った。

次に、弾性体モデルによる付着応力分布基礎式の誘導、および鋼板による引張せん断接着強さ試験 (JIS K 6850) により、補強部材の終局耐力を決定する炭素繊維シートの剥離に影響を与える因子として、特に炭素繊維シートの弾性係数と断面積との積である引張剛性に着目した。

最後に、炭素繊維シート接着端部のみを積層する「増し貼り定着」を提案し、実験的検証を行った。本定着方法は定着部の炭素繊維シートの引張剛性を大きくし、付着応力集中を緩和することにより剥離耐力を向上させるものである。

## 2. コンクリートに接着した炭素繊維シートの付着性状の検討

炭素繊維シートをコンクリート部材に接着した場合、コンクリートに発生する応力を炭素繊維シートに伝達することによりその補強効果を発揮する。しかしその応力伝達メカニズムは、異形鉄筋とコンクリートの場合に見られるような節による機械的抵抗とは異なるものである。よって、炭素繊維シートとコンクリートの付着性状および破壊性状について検討することは本研究にとって非常に重要であると言える。そこで、軸方向引張力のみが作用する場合における炭素繊維シートの付着性状を把握するために両引き試験を行った。本試験をはじめとする引張試験は、連続繊維シートとコンクリートとの付着性能を試験する方法として提案されている<sup>9)</sup>。

### (1) 実験方法 (シリーズ1)

図-1に供試体の形状寸法を示す。本実験で使用し

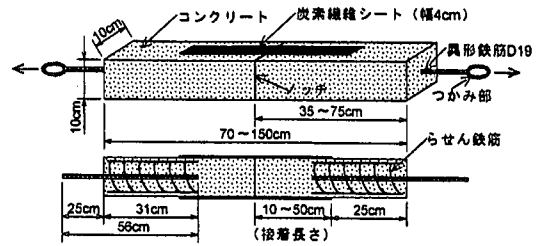


図-1 供試体形状寸法 (シリーズ1)

表-1 コンクリートの配合 (シリーズ1, 2)

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (g/m <sup>3</sup> )
66.7	44.3	175	262	806	1154	819

表-2 炭素繊維シートの物性値

タイプ	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	設計厚さ (mm)	破断伸度
高強度タイプ	300	230	3480	0.167	1.5%
高強度タイプ	200	230	3480	0.111	1.5%
高弾性タイプ	300	373	2942	0.165	0.8%

表-3 含浸接着剤の物性値

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	93.1
圧縮弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	2490
曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	77.4
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	43.2
引張せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	15.0
ポアソン比	0.34
混合粘度 (mPa·s)	4130

た供試体は、断面を10cm×10cmとし、長さを70cmから150cmと変化させた炭素繊維シート補強コンクリート棒部材である。コンクリート強度は25N/mm<sup>2</sup>を目標とした。コンクリートの配合を表-1に示す。試験時のつかみ部として異形鉄筋D19を31cm埋め込み、さらにコンクリートの割裂破壊を防ぐためにらせん鉄筋を配置している。異形鉄筋の先端には、試験機に取り付けるためにリング状の金具をあらかじめ溶接してある。供試体中央にはコンクリートカッターで深さ約2cmの切り込み (ノッチ) を入れ、ひび割れの発生を誘導する。

炭素繊維シートはコンクリートの材料分離の影響を小さくするため、打設面と直交する二側面にエポキシ樹脂含浸接着剤を用いて接着した。いずれの供試体も1層補強で、接着幅は4cmとし、接着長さを10cmから50cmまで5通りに変化させた。ここで接着長さとは、ノッチから接着端部までの長さを指す (図-1)。炭素繊維シートの繊維方向は供試体軸方

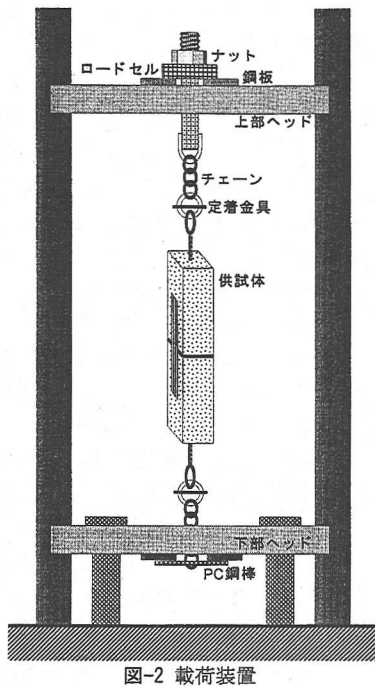


図-2 載荷装置

表-4 試験結果 (シリーズ1)

試験体 No.	接着長さ (cm)	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	剥離発生 荷重 (kN)	終局荷重 (kN)
1-1	①	23.4	17.5	17.5
	②	21.6	17.7	17.7
1-2	①	23.4	18.6	18.6
	②	21.6	17.2	17.0
1-3	①	23.4	18.6	18.6
	②	21.6	17.2	16.6
1-4	①	23.4	17.0	16.1
	②	21.6	17.0	16.1
1-5	①	26.8	15.0	16.9
	②	26.8	16.9	14.9

向と同じである。使用した炭素繊維シートおよび含浸接着剤の物性をそれぞれ表-2、表-3に示す。含浸接着剤は炭素繊維シート接着工法で一般的に用いられているものを使用した。本研究においては3種類の炭素繊維シートを用いているが、ここでは高強度タイプ、目付量300g/m<sup>2</sup>のものを使用した。

供試体は打設後噴霧養生を3日間行い、その後は気中養生を行い、材齢28日で試験を行った。また、材齢13日でコンクリート表面をディスクサンダーで下地処理するとともにプライマーを塗布し、24時間経過後、含浸接着剤を用いて炭素繊維シートを接着した。すなわち、含浸接着剤の養生期間は2週間である。炭素繊維シート表面には載荷荷重毎のひずみ分布を測定するために、ノッチから10cmの区間は2cm間隔で、それ以外の区間は5cm間隔で検長30mmのひずみゲージを取り付けた。試験は図-2に

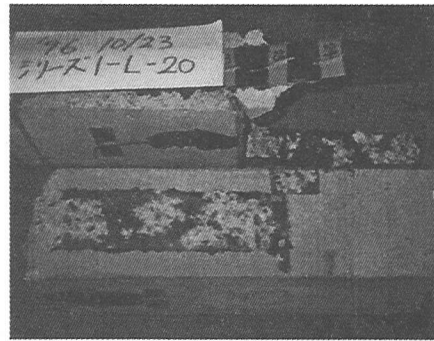


写真-1 破壊状況 (No.1-2 ①)

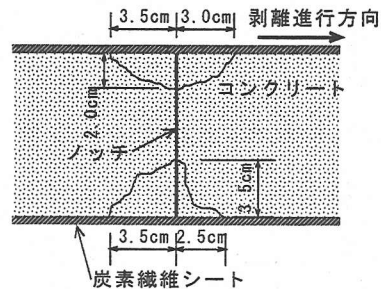


図-3 ノッチ部ひび割れ状況 (No.1-4 ②)

示すような試験機を用い、変位制御 (0.03mm/min.) で行った。荷重は試験機に取り付けたロードセルから読み取った。試験機と供試体の連結は鎖を介しており、偏心による影響を小さくしている。なお、実験時の温度は15~20℃であった。

## (2) 実験結果および考察

### a) 破壊性状

実験結果を表-4に示す。供試体に接着した炭素繊維シートは破断せず、全てノッチ位置から剥離が接着端部まで進行し、全面剥離により終局に至った。供試体No.1-2①の破壊状況を写真-1に示す。全ての供試体において、中央ノッチ部には図-3に示すような斜めひび割れが発生していた。斜めひび割れ発生過程および終局に至る破壊パターンは以下の通りである。

- ① 軸方向引張力により、供試体中央ノッチ部にひび割れが発生した。
- ② ノッチ部付近に、載荷軸に対して45°方向の斜めひび割れ (図-3) が発生した。同時に炭素繊維シートの剥離が、衝撃的な破壊音と共に供試体中央部から発生した。剥離が発生した部分は炭素繊維シートと周りの樹脂が浮き上がり、樹脂に亀裂が入り、白く変色した。
- ③ 発生した剥離は中央より両端に順次進行し、その間荷重の伸びはほとんど見られなかった。



- ①: 被着材の凝集力
- ②: 被着材と接着剤の界面結合力
- ③: 接着剤の凝集力
- ④: 接着剤と母材の界面結合力
- ⑤: 母材の凝集力

図-4 Five Links Theory 概念図

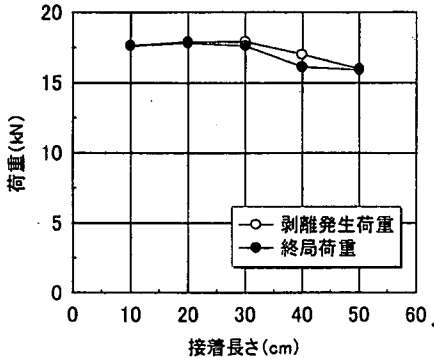


図-5 接着長さと剥離発生荷重および終局荷重の関係

- ④ ノッチを挟む4つの接着領域のうち、1つの領域において剥離が接着端部に達し、終局に至った(全面剥離)。

#### b) 剥離形態

一般的な接着理論では、接着状態を図-4に示すようなFive Links Theory<sup>4)</sup>で表現している。結合の破壊は、(被着材、接着剤、母材のいずれかの)材料そのものが壊れる「凝集破壊」と接着界面が壊れる「界面破壊」の大きく2つのタイプに分けられる。さらに接合が壊れる箇所の違いで図-4のように①～⑤の5つのタイプに分けられる。

供試体は炭素繊維シートの剥離によって破壊したが、剥離形態として、コンクリート表層部の凝集破壊(図-4中の⑤)、含浸接着剤とプライマー間の界面破壊(図-4中の④)の2種類が観察された。各供試体とも凝集破壊が大部分を占めていたことより、使用した含浸接着剤は接着性能を満足していると言える。

#### c) 接着長さの影響

接着長さと剥離発生荷重、終局荷重の関係を図-5に示す。ノッチにひび割れが入った後、接着端部に向かって剥離が進行するが、剥離発生荷重は剥離音発生時の荷重とひずみ分布に等ひずみ区間が現れる荷重により判断した。剥離発生荷重と炭素繊維シートが全面剥離する直前の荷重である終局荷重とはほ

ぼ同一であり、一度炭素繊維シートの剥離が発生すると引張荷重は増加しないことが分かる。また、接着長さを10cm以上の範囲で供試体No.1-1からNo.1-5まで増加させても剥離発生荷重および終局荷重は増加しておらず、むしろ低下する傾向が見られる。これは剥離区間の増大および剥離時の衝撃に伴い、供試体に偏心荷重が作用したことが原因であると考えられる。

#### d) 炭素繊維シートのひずみ分布

供試体No.1-5の炭素繊維シート表面に取り付けたひずみゲージより測定した各荷重毎のひずみ分布の推移を図-6に示す。図-6中、ひずみ測定位置の原点は中央のノッチ部を示す。13.2kNでノッチ部にひび割れが発生し、変位制御載荷のため荷重は一時12.6kNに低下するが、再び上昇し始め16.2kNで右側6～10cmの位置に等ひずみ区間が現れ、炭素繊維シートの剥離が発生し始めていることが分かる。その後、等ひずみ区間は供試体右側へ進展していき、全面剥離に至る状況がうかがえる。既往の研究において、付着応力は20～100mmの限られた区間に分布し、剥離区間が接着端部に向かって拡大することが報告されており<sup>9)</sup>、これらと本実験の結果は一致していると言える。図-6において、剥離時の炭素繊維シート表面のひずみは $4,300 \times 10^{-6}$ 程度である。他の供試体も同様の剥離進展状況を示した。本研究では剥離発生後の炭素繊維シートのひずみ分布の変化を図-7に示すようにモデル化した。炭素繊維シートのひずみの変化が大きい箇所はコンクリートとの付着に寄与している部分(有効付着域)であり、その長さ(有効付着長)は10cm程度である。

#### e) 付着応力分布

供試体No.5-1①の各荷重毎の付着応力分布を図-6にひずみ分布と併せて示してある。軸方向引張力のみが作用する場合、位置xにおける付着応力 $\tau_{0x}$ は炭素繊維シートに作用する力の釣り合いから式(1)のように求めることができる。すなわち、隣接するひずみゲージ間のひずみ差と炭素繊維シートの弾性係数、厚さの積をゲージ間の間隔で除した値である。

$$\tau_{0x} = \frac{\Delta \epsilon \cdot E_f \cdot t_f}{\Delta L} \quad (1)$$

ここで、

$\Delta \epsilon$ : 測点間の炭素繊維シートのひずみ差

$E_f$ : 炭素繊維シートの弾性係数

$t_f$ : 炭素繊維シートの厚さ

$\Delta L$ : 測点間距離

式(1)から分かるように付着応力は炭素繊維シートの引張ひずみの勾配で表されるため、図-7のように表現でき、同じ形状の付着応力分布が移動するこ

### 3. 炭素繊維シートの剥離耐力に影響を与える因子の検討

2. において、炭素繊維シートで補強したコンクリート部材の両引き試験を行った結果、炭素繊維シートは破断することなく剥離が進展することによって破壊に至り、引張耐力は炭素繊維シートの付着耐力（付着耐力は剥離耐力と等価であることより、以下では剥離耐力と表現する）によって支配されることが分かった。さらに、炭素繊維シートの剥離は付着応力が最大付着応力に達したときに起こることが分かった。

ここではまず、炭素繊維シートによって補強されたコンクリート棒部材をモデル化し、付着応力分布の基礎式を導き、炭素繊維シートの剥離耐力に影響を与える因子を理論的に特定する。その上で、鋼板を用いた引張せん断接着強さ試験（JIS K 6850）を行うことにより特定された因子の影響を確認し、さらにコンクリート供試体の両引き試験を行うことにより剥離耐力との関係を明らかにした。

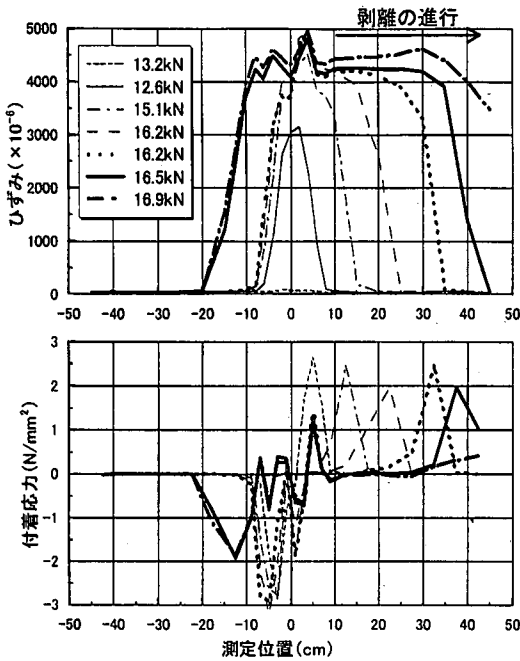


図-6 炭素繊維シートのひずみ分布および付着応力分布 (No.1-5 ①)

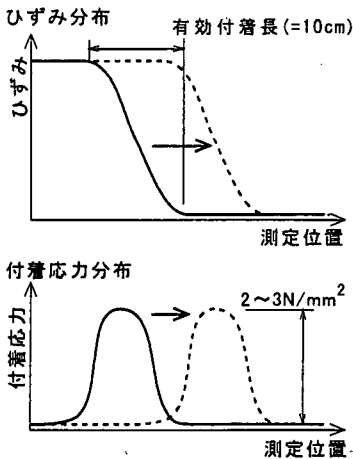


図-7 炭素繊維シートひずみ分布および付着応力分布モデル図

とが分かる。図-6より、実験においても同じ形状の付着応力分布が移動していることが分かる。このことより、炭素繊維シートの接着長さを変化させても剥離発生荷重、終局荷重は変化しないことが説明される。各荷重時の付着応力分布は底辺が10cm程度で、高さ（付着応力）が $2\sim 3\text{N/mm}^2$ の山型の曲線である。本実験の範囲内、すなわち炭素繊維シートを1層接着した場合、有効付着長は10cm程度であり、付着応力が最大値 $2\sim 3\text{N/mm}^2$ に達したときに剥離が生じることが言える。

#### (1) 弾性体モデルによる付着応力分布基礎式の誘導

炭素繊維シートが剥離する前における炭素繊維シートとコンクリートとの間に働く付着応力分布を得るため、図-8のような弾性体モデル<sup>5)</sup>を考える。有限要素法によって炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリート部材の解析を行った既往の研究では、炭素繊維シートの付着応力-相対変位関係として、バイリニア型モデル<sup>6)</sup>や引張軟化を考慮したモデル<sup>7)</sup>、カットオフ型モデル<sup>8)</sup>が用いられている。しかしここで用いるモデルでは、剥離耐力に影響を与える因子を特定することのみを目的とし、炭素繊維シートとコンクリート間の付着応力-相対変位関係を直線関係で表した。炭素繊維シートの接着長さ、接着幅はそれぞれ $L$ 、 $b$ であり、炭素繊維シートおよび接着層の厚さはそれぞれ $t_f$ 、 $t_a$ である。なお、添え字 $f$ 、 $c$ 、 $a$ はそれぞれ炭素繊維シート、コンクリート、接着剤を表す。有効付着長 $L_e$ の範囲内にある $x=x$ と $x=x+\Delta x$ で囲まれた微小要素を各材料に分割したものを図-9に示す。基礎式を導くにあたり、次の仮定を設けた。

- ・モデル内の応力は横断面内で一様である。
- ・力の釣り合いは $x$ 方向のみを考える。
- ・接着剤の層は、せん断力のみを伝達する。
- ・有効付着長 $L_e$ 内の微小区間 $\Delta x$ 内で付着応力は一定である。

まず、微小区間 $\Delta x$ の炭素繊維シートに作用する力の釣り合いより次式が得られる。

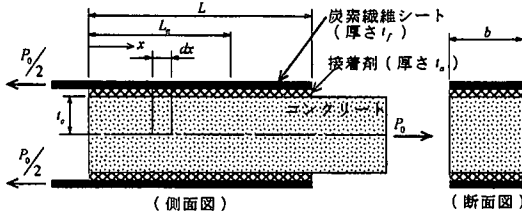


図-8 コンクリート棒部材モデル

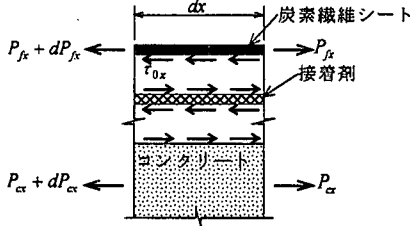


図-9 微小要素

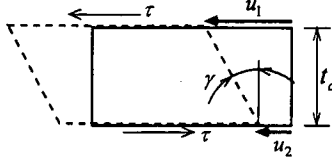


図-10 接着剤層の変形

$$P_{fx} + dP_{fx} + \tau_{0x} \cdot b \cdot dx - P_{fx} = 0 \quad (2)$$

$$\therefore \tau_{0x} = -\frac{1}{b} \cdot \frac{dP_{fx}}{dx} \quad (3)$$

ここで、

$P_{fx}$ : 位置  $x$  において炭素繊維シートに作用する力

$\tau_{0x}$ : 微小区間内での付着応力

また、断面に作用する力と外力  $P_0$  との釣り合いより、

$$P_{fx} + P_{\alpha x} = P_0/2 \quad (4)$$

ここで、

$P_{\alpha x}$ : 位置  $x$  においてコンクリートに作用する力

次にフックの法則およびひずみと変位との関係より、

$$P_{fx} = E_f \cdot b \cdot t_f \cdot \varepsilon_f = E_f \cdot b \cdot t_f \cdot \left( -\frac{\partial u_1}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$P_{\alpha x} = E_c \cdot b \cdot t_c \cdot \varepsilon_c = E_c \cdot b \cdot t_c \cdot \left( -\frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \quad (6)$$

ここで、 $E_f$ 、 $E_c$  はそれぞれ炭素繊維シート、コンクリートの弾性係数、 $\varepsilon_f$ 、 $\varepsilon_c$  はそれぞれ炭素繊維シート、コンクリートに発生するひずみである。 $u_1$ 、 $u_2$  は図-10に示すように炭素繊維シートおよびコンクリートの変位である。

接着剤層の変形条件より

$$\tau_{0x} = G \cdot \gamma = G \frac{u_1 - u_2}{t_a} \quad (7)$$

ここで、 $G$  は接着剤のせん断弾性係数である。

式(3)から式(7)を用いて  $u_1$ 、 $u_2$  を消去することにより  $P_{fx}$  に関する次の微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2 P_{fx}}{dx^2} - \alpha^2 P_{fx} + \frac{\beta}{2} P_0 = 0 \quad (8)$$

ここで、

$$\alpha^2 = \frac{G}{t_a} \left( \frac{1}{E_f \cdot t_f} + \frac{1}{E_c \cdot t_c} \right) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{G}{t_a} \cdot \frac{1}{E_c \cdot t_c} \quad (10)$$

$x=0$  で  $P_{fx} = P_0/2$  および  $x=L_e$  で  $P_{fx} = 0$  という境界条件を用いると、式(8)の解として

$$\frac{P_{fx}}{(P_0/2)} = (1-\eta) \cosh \alpha x - \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L_e + \eta \sinh \alpha x + \eta}{\sinh \alpha L_e} \quad (11)$$

を得る。ここで

$$\eta = \frac{\beta}{\alpha^2} \quad (0 < \eta < 1) \quad (12)$$

さらに式(3)の関係から  $\tau_{0x}$  を求めると次のようになる。

$$\tau_{0x} = \frac{P_0}{2} \cdot \alpha \left\{ \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L_e + \eta}{\sinh \alpha L_e} \cosh \alpha x - (1-\eta) \sinh \alpha x \right\} \cdot \frac{1}{b} \quad (13)$$

$\tau_{0x}$  は  $x=0$  のとき最大値

$$\tau_{\max} = \frac{P_0}{2} \cdot \alpha \cdot \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L_e}{\sinh \alpha L_e} \cdot \frac{1}{b} \quad (14)$$

をとる。ここで、平均せん断力  $\tau_{ave}$  を

$$\tau_{ave} = \frac{P_0/2}{b \cdot L_e} \quad (15)$$

と定義し、応力集中係数  $\zeta$  として付着応力の最大値  $\tau_{\max}$  と平均せん断力  $\tau_{ave}$  との比を考えると

$$\zeta = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{ave}} = \alpha \cdot L_e \cdot (1-\eta) \cdot \frac{\cosh \alpha L_e}{\sinh \alpha L_e} \quad (16)$$

となる。2. で用いたコンクリート供試体では  $\alpha L_e$  の値が30程度となっているので、 $\zeta$  は次のように近似できる。

$$\zeta \approx \alpha \cdot L_e \cdot (1-\eta) = \alpha \cdot L_e \cdot \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha^2} \right) \quad (17)$$

式(17)より  $\alpha$  を小さくすることで  $\zeta$  も小さくなり、応力集中が緩和され、耐力が向上すると考えられる。付着耐力に影響を及ぼす要因として接着剤のせん断弾性係数  $G$ 、接着剤層の厚さ  $t_a$ 、炭素繊維シートの引張剛性  $E_f \cdot b \cdot t_f$ 、コンクリートの引張剛性  $E_c \cdot b \cdot t_c$  があげられるが、実際の工法上可能であると考えられるのは  $t_a$  と炭素繊維シートの引張剛性  $E_f \cdot b \cdot t_f$  ( $=E_f$

A<sub>p</sub>)を大きくする方法である。2. の実験において炭素繊維シートの剥離はコンクリート表層部の凝集破壊であったことから $\tau_{max}$ は主にコンクリート強度、表面処理方法に依存すると考えられ、 $t_0$ あるいは $E_f \cdot b \cdot t_f$ を大きくする方法は $\tau_{max}$ を一定と見なし、 $\tau_{ave}$ を大きくすることで $\zeta$ が小さくなることを期待するものである。

これらの要因が接着強度に及ぼす影響を調べるために、鋼板を用いた引張せん断接着強さ試験(JIS K 6850)およびコンクリート供試体による両引き実験を行った。

## (2) 鋼板を用いた引張せん断接着強さ試験<sup>9)</sup>

### a) 実験方法

供試体は図-11に示すように、幅25mm×長さ100mmの鋼板2枚を炭素繊維シート接着工法で使用するものと同様の含浸接着剤により接着長さ12.5mmで接着した。鋼板の材質はSS400とし、接着面はサンドブラスト処理している。また、できるだけ純粋なせん断応力場を形成するために鋼板のつかみ部には同じ厚さの支持体を取り付けている。

実験要因は表-5に示すように、応力集中に影響を与えると考えられる鋼板の厚さ、接着剤の厚さ、試験時温度、および載荷速度である。なお、接着剤厚さは、樹脂塗布の際に離型フィルムを2枚の鋼板の間に挟み込むことにより調整した。標準の実験条件であるが、鋼板厚さと載荷速度はJIS K 6850に従ってそれぞれ1.6mm、1mm/min.とし、接着剤の厚さは60 $\mu$ mに、実験時温度はJIS K 6848に従って23 $\pm$ 2 $^{\circ}$ Cに統一した。

実験は25tf万能試験機により行い、接着面の破壊に至るまでの最大荷重を測定した。引張せん断強度は破断時最大荷重を接着面積で除したものとし、各々5つの供試体の平均値により実験結果を整理した。引張せん断強度の算定式を以下に示す。

$$S = \frac{P}{A} \quad (18)$$

ここに、

S: 引張せん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

P: 最大荷重 (N)

A: 供試体のせん断面積 (すなわち接着面積, mm<sup>2</sup>)

### b) 実験結果及び考察

供試体の破壊は、全て接着剤と鋼板表面の界面破壊によって起こった。各実験要因とせん断接着強度の関係を図-12(a)から(d)に示す。ただし、図-12(d)のみ横軸を対数目盛表示している。

図-12(a)より、鋼板の厚さが大きくなると引張せん断強度が大きくなる

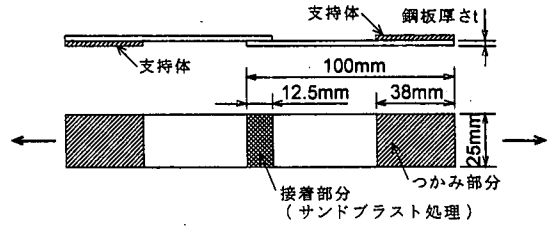


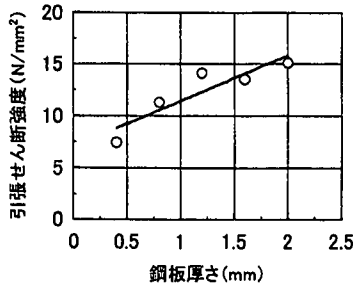
図-11 引張せん断接着強さ試験 (JIS K 6850) 試験体

表-5 実験要因 (引張せん断強さ試験)

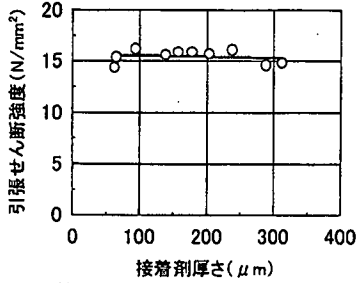
実験要因	水準
鋼板厚さ	0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0mm
接着剤厚さ	60~310 $\mu$ mの間で10種類
試験時温度	-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 $^{\circ}$ C
載荷速度	0.5~50mm/min.の間で6種類

ん断強度が大きくなる事が分かる。これは被着材の引張剛性が大きくなると引張せん断強度が大きくなるという3. (1)で得られた結果と一致する。実験を行った範囲において鋼板厚さと引張せん断強度の関係は直線関係で表すことができる。一方、3. (1)では接着剤の厚さを増すと剥離耐力も大きくなるという結果が得られたが、図-12(b)より接着剤の厚さを変化させても引張せん断強度は変化しない事が分かる。接着剤厚さと引張せん断強度との関係も、試験を行った範囲については直線で近似できるものとした。

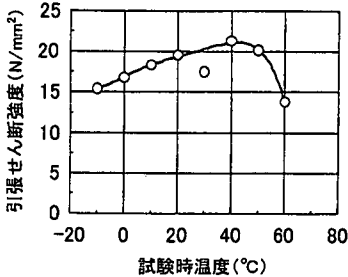
図-12(c)は試験時温度を変化させた場合の結果であるが、-10 $^{\circ}$ Cから40 $^{\circ}$ Cまでは温度上昇に伴い引張せん断強度が増加するが、40 $^{\circ}$ Cを境に引張せん断強度は低下した。ここで用いた含浸接着剤をはじめとする高分子材料は一般的に試験环境温度の上昇に伴いせん断弾性係数が徐々に小さくなり、ガラス転移点を境にせん断弾性係数が1/100~1/1000に急激に低下することが知られている<sup>10)</sup>。本実験で用いた含浸接着剤の主成分であるエポキシ樹脂のガラス転移点は50 $^{\circ}$ C前後であり、40 $^{\circ}$ Cまではせん断弾性係数の低下により応力集中が緩和され、引張せん断強度が上昇したものの、40 $^{\circ}$ Cを越えるとせん断弾性係数の急激な低下により引張せん断強度も低下したものと考えられる。3. (1)では接着剤のせん断弾性係数が小さいほど、応力集中は緩和され、剥離耐力が大きくなるという結果が得られている。これに関しては曳村らの実験<sup>11)</sup>において同様の傾向が示されている。ただし、接着剤のせん断弾性係数が小さいほど剥離耐力が大きくなるという関係はガラス転移点を超える温度に対しては適用できない。



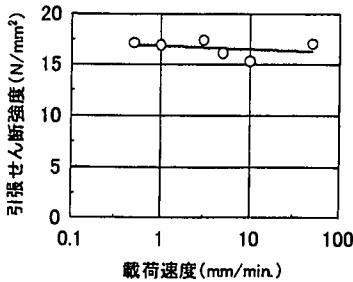
(a) 鋼板厚さと引張せん断強度の関係



(b) 接着剤厚さと引張せん断強度の関係



(c) 試験時温度と引張せん断強度の関係



(d) 載荷速度と引張せん断強度の関係

図-12 試験結果 (引張せん断接着強さ試験)

載荷速度を変化させた場合における結果を図-12 (d) に示しているが、載荷速度を0.5mm/min.から50mm/min.まで変化させても引張せん断強度は変化せず、試験を行った載荷速度の範囲内では載荷速度が引張せん断強度に与える影響は小さいものと言える。

### (3) コンクリート供試体における炭素繊維シートの引張剛性の影響

#### a) 実験方法 (シリーズ2)

実験に用いた供試体の形状寸法、表面処理方法、含浸接着剤の物性および載荷方法は2. の実験と同様とし、炭素繊維シートの接着長さは各供試体とも10cmとした。実験要因は炭素繊維シートの引張剛性およびコンクリート強度とした。供試体の種類を実験結果とともに表-6に示す。コンクリートの目標強度は25N/mm<sup>2</sup>とした。コンクリートの配合は2. と同じである (表-1)。炭素繊維シートの引張剛性は炭素繊維シートの種類を高強度タイプと高弾性タイプ、目付量を200g/m<sup>2</sup>と300g/m<sup>2</sup>と使い分けることにより変化させた。用いた炭素繊維シートの物性は表-2にすでに示してある。なお、試験時の温度は15~20°Cであった。

#### b) 実験結果および考察

各供試体の終局は全て炭素繊維シートの剥離によって起こり、コンクリート表層部の凝集破壊と含浸接着剤とプライマー間の界面破壊が混在して認められた。2. の実験と同様に、炭素繊維シートの剥離発生後荷重はほとんど増加せず、剥離発生荷重と剥離耐力とがほぼ等しい結果が得られたので、剥離耐力について述べる。

炭素繊維シートの引張剛性と剥離耐力の関係を図-13に示す。引張剛性を算出する際に、炭素繊維シートの断面積は2面の合計の値を用いた。図-13より、積層数を変化させた供試体No.2-1, No.2-2, No.2-3の剥離耐力は炭素繊維シートの引張剛性に比例していることが分かる。また、高弾性タイプを用いたNo.2-4と目付量の小さいNo.2-5も含めて、剥離耐力と引張剛性はほぼ直線関係にあると言える。

著者らはコンクリートの圧縮強度が約50N/mm<sup>2</sup>の場合についても実験を行ったが、終局荷重に明確な差異は見られなかった<sup>12)</sup> (表-6)。このような結果となった理由として次のようなことが考えられる。炭素繊維シートの剥離状況が全ての接着範囲においてコンクリート表層部の凝集破壊であるならば、理論的には母材であるコンクリートの引張剛性が剥離耐力に影響を与える。しかしながら、圧縮強度が約50N/mm<sup>2</sup>の供試体も含浸接着剤とプライマー間の界面破壊が混在しており、コンクリートの圧縮強度を変化させたことによる影響が明確には現れなかったものと考えられる。

一方、母材であるコンクリートの圧縮強度が炭素繊維シートの剥離耐力に影響を与えるとした研究成果は、出雲ら<sup>10)</sup>によって報告されている。出雲らは、



表-6 実験結果 (シリーズ2)

供試体 No.	要因	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	炭素繊維シート				剥離耐力 (kN)
			弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	層数	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張剛性 (×10 <sup>3</sup> kN)	
2-1	① ② ③ ④ 1層	25.3	2.30×10 <sup>5</sup> (高強度タイプ)	1	0.167	3.07	17.5
							17.7
		15.5					
		15.3					
2-2	① ② 2層	25.3		2	0.334	6.15	24.0
							21.6
2-3	① ② 3層	25.3		3	0.501	9.22	25.3
							28.7
2-4	① 炭素繊維シート 高弾性タイプ ② 炭素繊維シート	24.7	3.73×10 <sup>5</sup> (高弾性タイプ)	1	0.165	4.92	23.1
		25.3					22.0
2-5	① 炭素繊維シート ② 目付量 200g/m <sup>2</sup>	25.3	2.30×10 <sup>5</sup> (高強度タイプ)		0.111	2.04	15.4
		26.5					13.9
2-6	① コンクリート強度 ② 50N/mm <sup>2</sup>	50.6	0.167		3.07	15.5	
						16.1	

コンクリートの圧縮強度を12.5kN、25kN、45kNの3種類に変化させ、両引き試験体を用いて実験を行い、その結果から有効付着長を10cmとし、炭素繊維シートの剥離耐力が $(a \cdot f_c^{2/3} + b)$ に比例する( $a, b$ は定数)ことを実験的に導き、有効付着長内の剥離耐力 $B_{cal}$ を式(19)で与えている。

$$B_{cal} = (3.8f_c^{2/3} + 15.2) \cdot L \cdot E_f \cdot b_f \cdot t_f \cdot 10^{-6} \quad (19)$$

ここに、

- $B_{cal}$ : 炭素繊維シートの剥離耐力 (kN)
- $L$ : 炭素繊維シートの付着長 (mm) (100mm以上の場合は $L=100$ とする)
- $f_c$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_f$ : 炭素繊維シートの弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)
- $b_f$ : 炭素繊維シートの幅 (mm)
- $t_f$ : 炭素繊維シートの厚さ (mm)

図-13には式(19)によって得られる剥離耐力の範囲を示している。著者らはコンクリート強度が約25N/mm<sup>2</sup>の供試体で実験を行ったが、式(19)により剥離耐力を求めると14.7kNとなり、著者らが得た実験結果とほぼ一致する。しかしながら、式(19)は炭素繊維シート1層補強供試体を用いた実験結果のみに基づいたものであり、炭素繊維シートの引張剛性と炭素繊維シートの剥離耐力の関係が取り入れられていない。また、1層補強以外でのコンクリート強度と剥離耐力との関係は明らかになっていない。

そこで、2.で炭素繊維シートの接着長さを10cm以上長くしても剥離発生荷重、および終局荷重は変化しないという知見が得られたこと、剥離耐力に与える影響はコンクリート強度よりも炭素繊維シートの引張剛性の方が大きく、引張剛性と終局荷重の関係が直線関係で表されることが実験より示されたことから、炭素繊維シートの引張剛性 $E_f \cdot A_f$ のみをパラメータとして取り入れ、コンクリート圧縮強度が

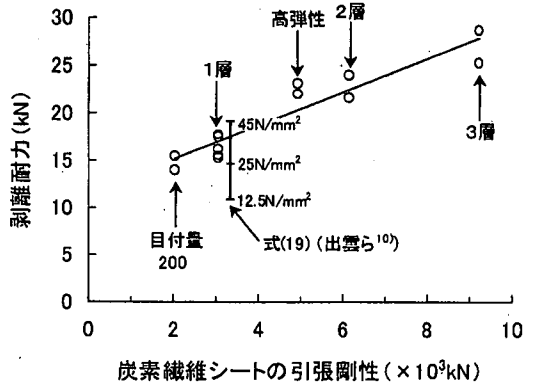


図-13 炭素繊維シートの引張剛性と剥離耐力の関係

約25N/mm<sup>2</sup>の供試体に対して単位幅当たりの剥離耐力 $P$  (kN/mm)を算出すると、式(20)のようになる。ただし、式(20)の本研究において実験を行った $E_f \cdot A_f$ の範囲 ( $2.04 \times 10^3 \text{kN} \leq E_f \cdot A_f \leq 9.24 \times 10^3 \text{kN}$ )を適用範囲とする。

$$P = 3.54 \cdot E_f \cdot t_f \cdot 10^{-3} + 0.29 \quad (20)$$

ここに、

- $E_f$ : 炭素繊維シートの弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)
- $t_f$ : 炭素繊維シートの厚さ (mm)

なお、式(20)の関係は図-13に右上がりの直線で示している。

#### 4. 剥離耐力向上方法の検討

3.では炭素繊維シートで補強したコンクリート部材の破壊が炭素繊維シートの剥離によって決定される場合、炭素繊維シートの引張剛性と剥離耐力とが直線関係にあることが示された。2.で行った実験において、剥離時の炭素繊維シートのひずみは

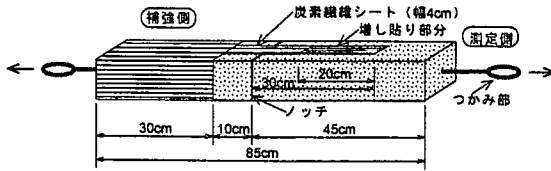


図-14 供試体形状寸法 (シリーズ3)

表-7 コンクリートの配合 (シリーズ3)

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (g/m <sup>3</sup> )
55.0	48.0	175	318	867	1049	994

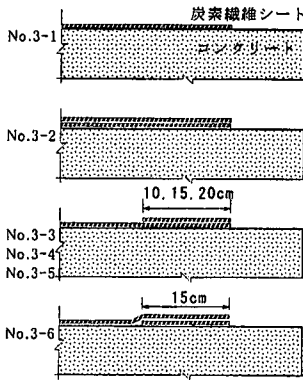


図-15 各供試体増し貼り定着状況

4,300×10<sup>6</sup>程度であり、公称破断ひずみ15,000×10<sup>-6</sup>に対して大幅に余裕があった。これらの結果より、炭素繊維シート接着端部を定着部と見なし、炭素繊維シート接着端部の引張剛性を大きくすることによって炭素繊維シート全面剥離時の剥離耐力を大きくすることが可能であると考えられる。そこで、炭素繊維シート接着端部の積層数を増やすことにより定着部の引張剛性を大きくした「増し貼り定着」の剥離耐力向上効果を今までと同様のコンクリート供試体の両引き実験により実験的に検証する。

### (1) 実験方法 (シリーズ3)

実験に用いた供試体の形状寸法、表面処理方法および含浸接着剤の物性は2., 3.と同様である。使用した炭素繊維シートは高強度タイプで目付量は300g/m<sup>2</sup>である。また、炭素繊維シートがノッチを挟んで供試体の片側で剥離するように、供試体を測定側と補強側に区別し、補強側には軸方向、軸直角方向の2方向に繊維が配列されるよう炭素繊維シートを重ね貼りした。供試体の形状寸法を図-14に示すコンクリートの圧縮強度は30N/mm<sup>2</sup>を目標とした。コンクリートの配合を表-7に示す。

表-8 実験結果 (シリーズ3)

供試体 No.	試験要因	コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	剥離発生荷重 (kN)	剥離耐力 (kN)
3-1	1層	30.7	21.4	27.3
3-2	全体2層	33.0	28.3	37.7
3-3	増し貼り定着	上10cm	30.7	21.6
3-4		上15cm	30.7	20.8
3-5		上20cm	30.7	20.3
3-6		下15cm	33.0	18.3

接着端部を増し貼りすることにより炭素繊維シートの引張剛性を大きくし、付着応力集中緩和効果を期待することにより炭素繊維シートの剥離耐力を向上させることを目的とし、実験要因は表-8に示すように決定した。また、増し貼り領域を有効に使うため、増し貼り長さは炭素繊維シートが1層の場合の有効付着長(10cm)以上の10cm, 15cm, 20cmとした。増し貼りに用いた炭素繊維シートの繊維方向は供試体軸方向と同じである。炭素繊維シートの接着方法を図-15に示す。

供試体No.3-1は炭素繊維シートを1層貼り付けたもの、供試体No.3-2は炭素繊維シートを全体に2層貼り付けたものである。供試体No.3-3からNo.3-5は増し貼り定着したもので、供試体No.3-3は1層目の上に10cm, No.3-4は15cm, No.3-5は20cm増し貼りしたものとした。また、No.6はあらかじめコンクリート面に炭素繊維シートを15cm貼り付けておき、その上に供試体全体に渡って1層接着したものである。

試験は変位制御で行い、載荷速度はノッチ部にひび割れが発生するまでは0.06mm/min.とし、それ以降、供試体の破壊に至るまで0.03mm/min.で載荷を行った。炭素繊維シート表面には検長30mmのひずみゲージを2cm間隔で取り付けた。載荷時の室温は15~20℃であった。

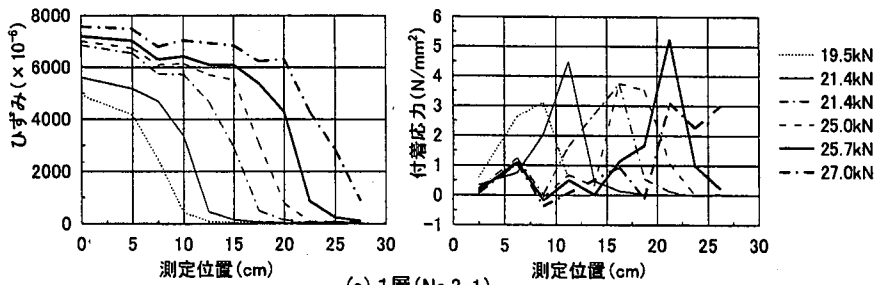
### (2) 実験結果および考察

#### a) 破壊性状

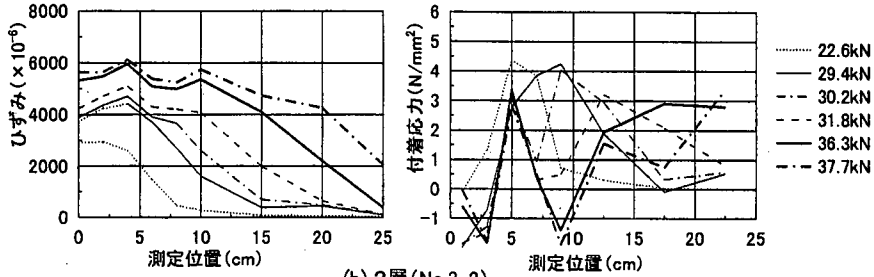
実験結果を表-8に示す。2., 3.と同様に、終局は全て炭素繊維シートの剥離によって起こり、コンクリート表層部の凝集破壊とプライマーと含浸接着剤間の界面破壊が混在していた。

#### b) 剥離進行抑制効果

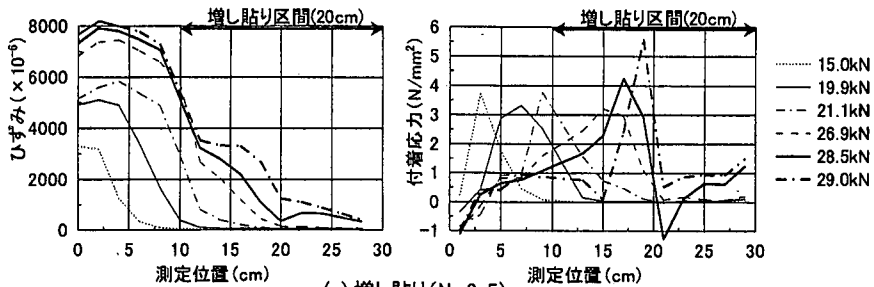
増し貼りを行った供試体No.3-3~No.3-5の剥離耐力はいずれも全面2層とした供試体No.3-2よりも小さいものの、供試体No.3-1より大きく、剥離進行抑制効果が表れている。よって増し貼りを行う



(a) 1層 (No.3-1)



(b) 2層 (No.3-2)



(c) 増し貼り (No.3-5)

図-16 ひずみ分布および付着応力分布 (シリーズ3)

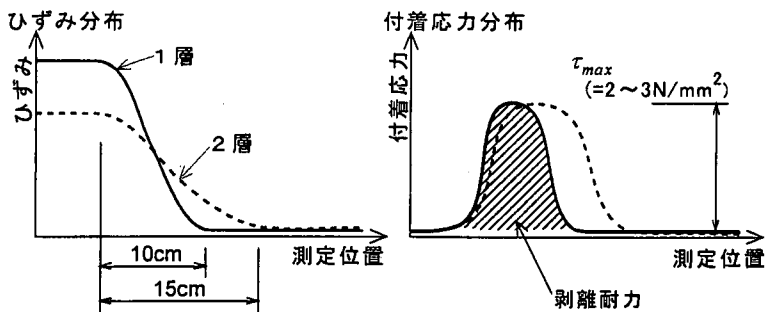


図-17 炭素繊維シートひずみ分布および付着応力分布の比較

こと、すなわち接着端部の炭素繊維シートの引張剛性を増すことにより、剥離耐力が増加すると言える。

しかしながら、あらかじめコンクリート面に長さ15cmの炭素繊維シート (増し貼り用) を接着した後で供試体全体に渡って接着した供試体No.3-6の剥離耐力は、No.3-1とほぼ等しいことより、増し貼り用の炭素繊維シートを前もって接着した場合の

補強効果は小さいと言える。

### c) ひずみ分布および付着応力分布

供試体No.3-1, No.3-2, No.3-5について各荷重毎の炭素繊維シートのひずみ分布と付着応力分布を図-16にまとめて示す。いずれの供試体においても、荷重の増加に伴い炭素繊維シートの剥離がノッチ部

より接着端部（右側）の方に進行し、全面剥離に至る過程がうかがえる。図-16より、有効付着域のひずみ分布の傾き ( $\Delta\epsilon/L$ ) を比較すると、供試体No.3-2の傾きは供試体No.3-1の傾きの2分の1程度であるが、供試体No.3-2の引張剛性 ( $E_f A_f$ ) は供試体No.3-1の2倍であるため、1層補強供試体、2層供試体共に、式(1)により求められるコンクリートと炭素繊維シートの付着応力の最大値（最大付着応力） $\tau_{max}$ はほぼ等しい。実際、図-16よりそれぞれの供試体の炭素繊維シート剥離時の $\tau_{max}$ は3~5N/mm<sup>2</sup>と読み取ることができる。2. (シリーズ1) で得られた結果 ( $\tau_{max}=2\sim3\text{N/mm}^2$ ) よりも大きい値を示した原因としては表面処理状況の差異が考えられ、不変的な $\tau_{max}$ の値を求めるにはさらなる検討が必要である。

実験によって得られたひずみ分布および付着応力分布は包括的なものであり、詳細に比較することはできないが、1層供試体、2層供試体の炭素繊維シートのひずみ分布は図-17に示すようにモデル化できる。有効付着域における2層供試体のひずみ分布の傾きは1層供試体の2分の1であるが、有効付着長は1層供試体が10cm程度、2層供試体は15cm程度となっている。

付着耐力、すなわち剥離耐力は付着応力分布における積分値で表される（図-17）。最大付着応力は1層供試体と2層供試体で等しいので、有効付着長が1.5倍であることは剥離耐力が1.5倍になることと等価である。表-8より実際の2層供試体の剥離耐力は1層供試体の1.4倍であり、これは2層供試体の有効付着長が1層供試体の1.5倍であることとほぼ一致する。

さらに、増し貼りしたものについては、1層貼りの区間に有効付着域が存在する状態では、1層貼り供試体No.3-1と同じひずみ分布形状を示し、さらに炭素繊維シートの剥離が進行し、有効付着域が2層貼りの区間に達した時点からは2層貼り供試体No.3-2と同じひずみ分布形状を示すことが分かる。以上のことより、有効付着域が剥離の進行に伴って増し貼り区間に到達すると、増し貼り区間の炭素繊維シートの引張剛性が大きいので付着応力集中緩和効果が現れ、有効付着域が大きくなり、剥離耐力が増加することが説明される。ただし、増し貼り定着長さは15cm以上必要である。

著者らによる炭素繊維シートで曲げ補強したRCはり部材の曲げ載荷実験において、炭素繊維シートはスパン中央部から接着端部（支点方向）に向かって進行することが確認されている<sup>14)</sup>。これは本研究において観察された剥離メカニズムと同様の現象で

あり、「増し貼り定着」ははり部材に対しても剥離耐力向上効果が期待できる。

## 6. 結論

本研究は、コンクリート部材を炭素繊維シートで補強した場合の付着性状、および剥離耐力に影響を及ぼす因子を明らかにすることを目的に行ったものである。本研究の範囲内で得た結論は以下の通りである。

- (1) 本研究では炭素繊維シート接着工法により補強したコンクリート部材の破壊形式として剥離モードについて取り扱った。炭素繊維シートで補強したコンクリート棒部材の両引き試験を行った結果、終局は炭素繊維シートの進行性剥離が接着端部まで達することによって起こり、剥離進行中は引張荷重の増加は見られない。
- (2) 剥離進行中の炭素繊維シートのひずみ分布で傾きが大きく変化する部分は炭素繊維シートがコンクリートとの付着に寄与する部分（有効付着域）で、積層数が同一の場合、炭素繊維シートの接着長さを有効付着長以上にしても、剥離発生荷重、終局荷重は変化しない。有効付着長は1層補強の場合、有効付着長は10cm程度、2層補強の場合、15cm程度である。
- (3) 弾性体モデルにより、剥離耐力に影響を及ぼす要因として接着剤のせん断弾性係数、接着剤厚さ、炭素繊維シートの引張剛性、コンクリートの引張剛性が導き出された。しかしながら、鋼板を用いた引張せん断強さ試験では接着剤厚さは引張せん断強度に影響を与えず、鋼板厚さと接着剤のせん断弾性係数が支配的であるという結果が得られた。また、コンクリート供試体を用いた両引き試験により、コンクリート強度一定の場合、炭素繊維シートの引張剛性と剥離耐力は直線関係で表されることが示された。
- (4) 両引き試験において、1層補強、2層補強いずれの場合もコンクリートと炭素繊維シートとの最大付着応力は等しいにもかかわらず、有効付着長は2層補強の方が大きいため、応力集中が緩和され、2層補強の方が剥離耐力が大きくなる。
- (5) 両引き試験体で炭素繊維シート接着端部を増し貼りする、すなわち接着端部の炭素繊維シートの引張剛性を大きくすることにより、付着応力集中が緩和され、剥離耐力が増加することが説明された。これらのことより、「増し貼り定

着」は剥離耐力向上方法として有効であると言える。

謝辞：実験で用いた材料は日鉄コンポジット（株）に提供していただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針（案），コンクリート・ライブラリー，No.81，1995.10.
- 2) 例えば，宇治公隆：既設構造物の補強におけるシート状連続炭素繊維の付着特性，土木学会第47回年次学術講演概要集，pp.812-813，1992.4.
- 3) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），pp.7-13，1998.5
- 4) 芝崎一郎：接着百科（上），新高分子文庫，1976.
- 5) 岳尾弘洋，松下博通，矢原輝政，佐川康貴：CFRP接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.431-436，1998.
- 6) 佐藤裕一，木村耕三，小島克郎：CFRPシートとコンクリートの付着挙動（その1），日本建築学会構造系論文集，第500号，pp.75-82，1997.10.
- 7) 劉玉擎，彦坂照，亀山好秀，原田拓也：炭素繊維シートで補強されたRC部材の破壊挙動の有限要素解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.1-6，1998.
- 8) Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y., Ueda, T. and Kakuta, Y. : A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet, Proceedings of Third International Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol.1, pp.279-286, Oct., 1997.
- 9) 松下博通，岳尾弘洋，鶴田浩章：炭素繊維接着工法の炭素繊維シート剥離耐力向上方法に対する一考察，コンクリート構造物の補強設計に関するシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ28，土木学会，pp.Ⅱ69-76，1998.4.
- 10) 例えば，新保正樹：接着剤の分子設計Ⅰ，日本接着学会誌，Vol.12，No.8，pp.296-309，1976.
- 11) 曳村俊貴，佐野正：CFRPによるRC床版の上面補強設計について，コンクリート技術シリーズ28，土木学会，pp.Ⅱ119-124，1998.4.
- 12) 岳尾弘洋，松下博通，牧角龍憲，長島玄太郎：CFRP接着工法における炭素繊維シートの付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1599-1604，1997.
- 13) 出雲健司，朝水俊博，佐伯昇，志村和紀：アラミドおよび炭素連続シートの付着特性，コンクリート工論文集，Vol.9，No.2，pp.1-7，1998.7.
- 14) 岳尾弘洋，松下博通，佐川康貴，牛込敏幸：せん断スパン比を変化させたCFRP補強梁の曲げ載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.205-210，1999.

(1999.11.16 受付)

## A STUDY ON BOND CHARACTERISTICS AND IMPROVEMENT OF ULTIMATE STRENGTH IN CARBON FIBER SHEET ADHESION METHOD

Yasutaka SAGAWA, Hiromichi MATSUSHITA and Koyo TAKEO

Recently the use of carbon fiber sheet (CFS) to strengthen and rehabilitate existing reinforced concrete has increased. Reinforced concrete member strengthened with CFS is different from reinforced concrete member without strengthening in failure characteristics, because bond mechanism of CFS is different from that of reinforcing bar. In this study, bond characteristics of CFS clarified, and it is indicated that tension stiffness of CFS is a principal factor which influences effectiveness of strengthening. Moreover, "multi-layering anchorage system", in which CFS is multi-layered on the only end of adhesion area, is proposed to develop maximum load.