

# 論文 CFRP シートの定着特性およびその性能向上対策に関する実験的研究

呉 智深\*1 邑山 大悟\*2 吉沢 弘之\*3

**要旨:** 本研究では、コンクリート平板に、様々な端部処理を有する炭素繊維シートを、エポキシ樹脂で接着し、引張りせん断試験を行い、定着特性およびその定着強度の向上対策に関する検討を行った。また実験から得られたデータにより平均付着強度、接着界面における局所的付着・せん断変形モデルに関する局所付着強度・付着破壊エネルギーの算定に試みた。

**キーワード:** 炭素繊維シート、平均付着強度、最大付着応力、付着破壊エネルギー

## 1. はじめに

連続繊維シートを用いた鉄筋コンクリート構造物の補強工法は、近年数多くの研究成果によってその有効性がかなり確認され、適用範囲はますます広がっている。その中でも連続繊維シート補強材、とりわけ炭素繊維シート（以下 CFRP シート）は通常の補強材に比べ、強度・弾性・耐久性において優れた材料特性を有し、施工性も良く、補強材として非常に適していると言えよう。今では曲げ、せん断、圧縮、靱性補強や劣化防止といった既存コンクリート構造物への補修・補強に使われるようになっており、今後、様々な目的・用途とした構造部材への適用が考えられる。一方、連続繊維シート補強材とコンクリートとの付着特性および接着界面の接着剥離による構造物の破壊メカニズムなどに関して、未解明の部分がかなり多く残されており、今後の研究開発に大きく期待されている。その中で、連続繊維シート補強材の剥離に対する設計を行うために、接着面の剥離の有無に関する判定手法の確立は、一つの大きな課題になっている。また、連続繊維シート補強材による接着工法において、シート端部の定着特性は、構造物の補修・補強効果を確保するための重要な役割を持っているため、シートの定着特性の把握と評価およびその性能向上に関する検討も重要な課題になると思われる。

コンクリート表面にエポキシ樹脂で接着されている連続繊維シート補強材とコンクリートとの接着機構および剥離メカニズムは、鉄筋とコンクリートの付着機構とは大きく異なっており、既存の鉄筋コンクリート理論の適用性をよく検討するとともに、連続シート補強材の接着により補強された構造物の新しい設計や解析理論の構築も期待されている。

そこで本研究は、CFRP シートの定着特性に着目し、幾つかの定着手法を考案したものに対して、CFRP シートの付着試験を行い、その定着特性の向上効果を確認する。また、実験で得られた基本データを使い、定着特性や一般界面の接着に関する材料パラメーターを同定した。

## 2. 実験

### 2.1 実験概要

図-1 に実験装置・実験供試体の詳細を示す。今回の実験には、縦 30cm、横 30cm、幅 6cm のコンクリート平板を使用する。そしてエポキシ樹脂で CFRP シートをコンクリート平板に接着し、供試体を作成する。接着実験の載荷実験は 200t の万能試験機を用いて実施され、各荷重レベルの CFRP シート上のひずみ分布の測定を行った。

### 2.2 材料特性

実験で使用したコンクリート平板と CFRP シ

\*1 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 工博（正会員）

\*2 茨城大学 工学部都市システム工学科（正会員）

\*3 日鉄コンポジット（株）トウシート事業部 主任技師（正会員）

ート（高強度タイプ炭素繊維シート）およびエポキシ樹脂の材料特性を表-1に示す。

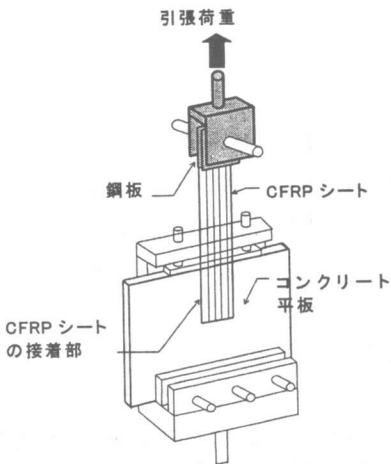


図-1 実験装置の概要図

表-1 材料特性

材 料	特 性	特性値
コンクリート	圧縮強度【MPa】	29.4
	ヤング係数【GPa】	27.5
炭 素 繊 維	引張強度【Gpa】	3.30
	ヤング係数【Gpa】	230.4
	破断伸び【%】	1.50
	繊維目付【g/m <sup>2</sup> 】	200
	設計厚さ【mm】	0.111
エポキシ樹脂	ヤング係数【GPa】	3.40
	ポアソン比	0.35

### 2. 3 実験供試体の詳細

今回の実験では、CFRPシートとコンクリートの付着および定着に及ぼす各種要因の影響を検討するため、表-2に示すように貼り付け長さ、貼り付け手法等の各種要因を変化させ、実験を行った。下地処理などにより実験結果が左右されないように、今回の実験の下地処理としては必要最小限とした。

炭素繊維シートの接着長さは、15、20cmの2種類とした。そして、接着したシート端部の処理方法としては、A)通常貼り付け、B)シートの定着端部にさらに同じ幅のシートを重ねて接着する先端貼り付け、C)シート先端ばらしの3種類とした(図-2参照)。先端ばらしというのは、CFRPシートの材料特性を利用した施工であり、

繊維直角方向に付着させたシートの一部をばらすことにより、接着面積を増やすとともに、接着端部の応力状態を改善する手法であり、付着強度を高めることを目的としている。しかし、CFRPシートをばらしたことで接着面積は増加したように見えるが、繊維シートの繊維量は変化しない、面積の増加がないという考え方もあろう。本研究においては、接着面積が増加した分を考慮したものと考慮しないものの両方で接着性状の評価を試みる。また先端貼付けは、貼付けたCFRPシートの端部のある接着領域の上に、それと同幅のCFRPシートを同方向か、90°交差によって重ねて貼付けることにより、CFRPシート端部の接着性状を改善し、付着強度の増加を期待するものである。

表-2 供試体詳細

供試体種類 No	CFS 貼り付け長さ (cm)	接着面積 (cm <sup>2</sup> ) 【増加面積】	貼付け接着端部状況
1	15	150	通常
2	20	200	通常
3	15	150【+14.0】	先端ばらし, 5cm
4	15	150【+32.5】	先端ばらし, 7.5cm
5	15	150【+57.7】	先端ばらし, 10cm
6	20	200【+14.0】	先端ばらし, 5cm
7	20	200【+32.5】	先端ばらし, 7.5cm
8	20	200【+57.7】	先端ばらし, 10cm
9	15	150	先端貼付け (7.5×10cm) 既存貼付けCFSの繊維向きと同方向
10	15	150	先端貼付け (7.5×10cm) 既存貼付けCFSの繊維向きと90°交差

【】内は、先端をばらすことにより、接着面積が増加を考慮した時の増加値

### 2. 3 実験結果

以下に、破壊荷重・平均付着強度・破壊形式などの実験結果を表-3に示す。また、供試体 No. 1における荷重とシートひずみの関係を図-3に示す。なお、各種類の供試体の最大荷重、平均付着強度は、同じ条件で試験した2本の供試体の結果の2本ずつの平均値となっている。

供試体の典型的な最終破壊形状は、以下に示す。通常の破壊は写真-1、2に示されるように、シートとコンクリート界面の近傍に、表面コンクリートの剥離による層間剥離破壊となってい

る。供試体 No. 5 の CFRP 先端ばらしの場合(写真-3)は、ばらした長さを 10cm にした関係で、残された通常付着領域は 5cm とかなり短いので、最終的に先端ばらし部分の CFRP シートの破断となった。

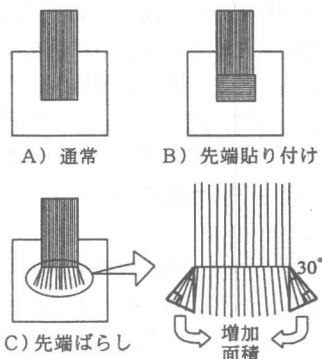


図-2 接着端部状況図

表-3 実験結果一覧

供試体種類 No	最大荷重 (kN)	接着面積 (cm <sup>2</sup> )	平均付着強度 $\tau$ (Mpa)	破壊形式
1	15.4	150.0	1.03	A
2	21.0	200.0	1.05	A
3	18.6	164.0 [150.0]	1.13 [1.24]	A
4	20.1	182.5 [150.0]	1.10 [1.34]	A
5	17.5	207.7 [150.0]	0.84 [1.16]	B
6	25.6	214.0 [200.0]	1.19 [1.28]	A
7	28.1	232.5 [200.0]	1.21 [1.41]	A
8	34.1	257.7 [200.0]	1.32 [1.70]	A
9	27.3	150.0	1.82	A
10	19.3	150.0	1.29	A

【 】内は、接着面積の増加を考慮しない時の接着面積

A: 剥離破壊 B: CFRP シートの破断

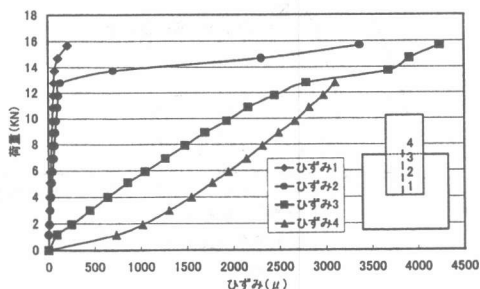


図-3 荷重-ひずみ曲線 (供試体種類 No. 1)

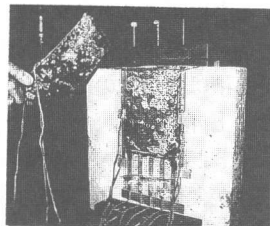


写真-1 破壊状況 (供試体種類 No. 1)  
剥離破壊

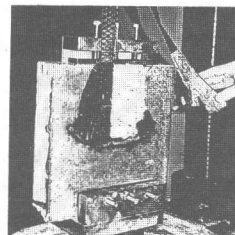


写真-2 破壊状況 (供試体種類 No. 3)  
剥離破壊

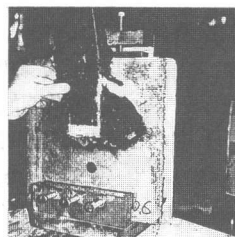


写真-3 破壊状況 (供試体種類 No. 5)  
先端ばらしの CFRP 破断

## 2. 4 実験結果に関する考察

### (1) 端部の定着効果の向上について

今回の各種実験結果から、CFRP シートを一層通常どおりに貼付ける場合よりも、シートの先端ばらしや先端貼付けをした方が付着強度が上がり、端部の定着性状の向上が存在する事が確認された。これらの手法により、接着界面の応力状態が変化し、付着強度が改善された。CFRP シートの定着領域に関して、ばらし部分の長さの割合が大きくなり、残りの通常の定着長さが後述の有効接着長さよりも極端に短くなると、結果的に CFRP シート端部のばらし部の繊維破断が起こることもあった(供試体 5)。したがって、CFRP シート端部のばらしによって付着性状を向上するには、一定の通常定着領域

を確保する必要があると考えられる。一方、定着端部のシート接着法については、通常貼り付けと接着面積は同じなのにもかかわらず、平均付着強度の上昇が見られた。また、再接着したCFRPシートと既存シートの繊維方向によっても接着性状が変化した。これは、CFRPシートが引張られる時に先端にあらたに貼付けたCFRPシートが接着界面付近のコンクリートせん断層の剥離の違いの現れと思われる。さらに、多層貼り付けにより、定着領域のシート剛性が大きくなる。そして、後述の式(3)の理論式に示されたように、シート剛性が大きくなるにつれ、接着耐力も大きくなる。これらのCFRPシートの端部ばらしやCFRPシートの再接着による接着性状を向上させる方法は、限られた接着面積しか取ることができない場合には、有効な付着強度増加方法として考えられる。

## (2) 有効接着長さについて

図-4は、各荷重レベルにおけるシートひずみの分布を示している。荷重開始から12.8kNまでは、シート中のひずみが荷重端から約10cmまでの範囲にのみ生じ、荷重が増加してもせん断応力の伝達範囲はほとんど変化が見られなかった。そして荷重が13.3kNのとき、約4cm程度の界面剥離が見られ、破壊荷重直前の15.7kNでは、シートにおいて接着領域の14cmまでにひずみが現れている。このような結果から、シートとコンクリート界面にせん断応力が生じる範囲は、約10cm程度である推定され、したがって、これは通常貼り付けの場合の有効接着長さとして考えられる。図-5は、コンクリートとシートの界面に発生しているせん断応力を積分して求めた荷重の関係を模式的に示したものであり、界面剥離発生により、荷重曲線が移動している。

## 3. 実験データによる破壊力学手法に基づいた接着剥離モデルの評価

### 3.1 接着モデルに関するパラメータの算定

現在、FRPシートによるコンクリート構造物の補強設計を行なうため、通常の平均付着強度の概念が用いられている。近年の研究成果により、脆性的な剥離を有する接着界面に対する合

理的な設計を行なうため、破壊力学の有効性が重要視されつつある<sup>1),2),3)</sup>。また、シートの剥離性状を含む構造物の破壊性状を解明するため、接着メカニズムに関する適切な計算モデルの構築が期待されている。図-6は、接着界面のせん断応力とせん断すべりとの関係を図に表したものである。ここでは、実験結果から得られたデータをもとに、図-6に示したモデルを用いて、CFRPシートの付着性状に関する評価を行うと同時にモデルに関するパラメータの同定を行なう。

界面剥離が発生した後、軟化領域を考慮するかしないかによって、図-6に示すように二つのモデルが考えられる。今回は、引張り軟化曲線を考慮したモデルとしないモデルの両方で評価を試みる。

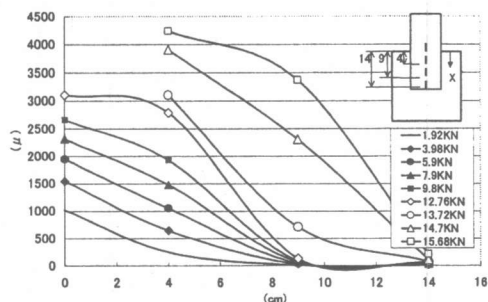


図-4 各荷重におけるシートひずみ分布

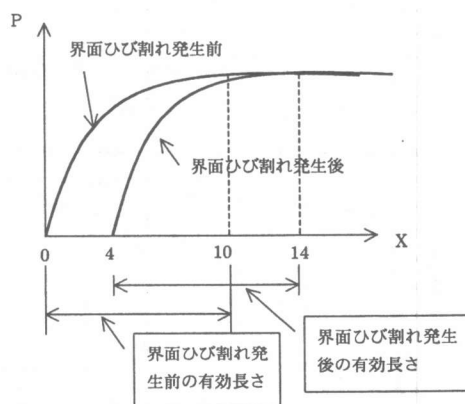


図-5 界面ひび割れ発生による接着長さに対する界面コンクリートのせん断応力の積分値Pの関係図

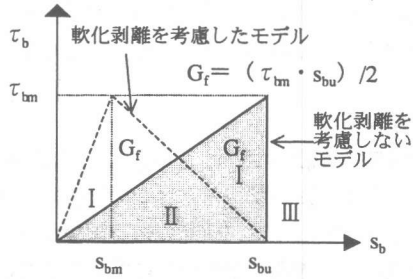


図-6 τ-s 関係曲線

(1) せん断剥離軟化曲線を考慮しないモデル

図-7 に界面せん断軟化曲線を考慮しない場合の接着界面のせん断応力分布図を示す。図-7 に示すように、軟化曲線を考慮しない場合は、弾性変形域のみが現われ、剥離した領域はせん断抵抗をまったく持たなくなる。

このようなモデルを用いて、Tajsten<sup>2)</sup>は式(1)のような接着長さに対する耐力Pの関係式を導いている。

$$P(l) = \frac{b_b \sqrt{2G_f E_b h_b}}{\sqrt{1 + m_b \gamma_b}} \tanh \frac{\tau_{bm}^2 l^2}{2G_f E_b h_b} \quad (1)$$

$$G_f = \frac{\tau_{bm} s_{bu}}{2} \quad (2)$$

- l : CFRPシートの接着長さ
- s<sub>b</sub> : せん断付着すべり
- m<sub>b</sub> : 剛性率 (m<sub>b</sub> = E<sub>b</sub>/E<sub>c</sub>)
- γ<sub>b</sub> : シートとコンクリートの断面積比 (γ<sub>b</sub> = A<sub>b</sub>/A<sub>c</sub> = 0)
- E<sub>b</sub> : CFRPシートのヤング係数
- E<sub>c</sub> : コンクリートのヤング係数
- h<sub>b</sub> : CFRPシートの厚さ
- b<sub>b</sub> : CFRPシートの接着幅
- G<sub>f</sub> : 界面剥離破壊エネルギー
- τ<sub>bm</sub> : 最大せん断付着応力
- s<sub>bu</sub> : 最大せん断付着すべり
- s<sub>bm</sub> : 最大せん断付着応力に対応するせん断付着すべり (軟化剥離を考慮しないモデルでは s<sub>bu</sub> = s<sub>bm</sub>)

式(1)において、CFRP シートの厚さはコンクリートのそれに比べるととても薄いので、シートとコンクリートの断面の面積率γ<sub>b</sub>は0に近くなり、したがって m<sub>b</sub>γ<sub>b</sub>=0 と仮定できる。また CFRP シートの接着長さ l が有効接着長さよりも大きいとした時、式(1)は

$$P_{max} = b_b \sqrt{2G_f E_b h_b} \quad (3)$$

と表せられ、接着長さに無関係になる。この関係より界面剥離破壊エネルギーは次式のように表される。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{2E_b h_b b_b^2} \quad (4)$$

式(2)および式(4)より、最大せん断付着応力、即ち、局所付着強度は次式のように求められる。

$$\tau_{bm} = \frac{P_{max}^2}{E_b h_b b_b^2 s_{bu}} \quad (5)$$

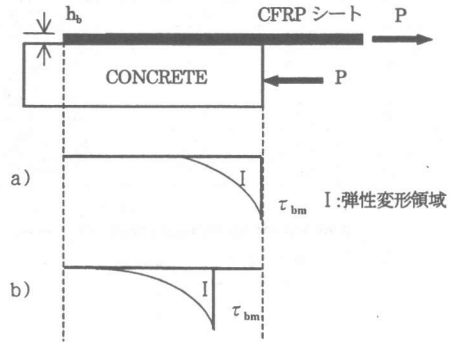


図-7 せん断軟化を考慮しない界面せん断応力分布図

ここで式(5)において、最大付着すべり s<sub>bu</sub> が計測できれば、付着すべりモデルにおける最大せん断応力 τ<sub>bm</sub> が求めることができる。しかしながら、実験より s<sub>bu</sub> を求めることは困難であり、また数少ない報告の中、計測された値に関して 1 桁違いの数字がそれぞれ示されている。そこで本研究においては、最大せん断すべり s<sub>bu</sub> = 0.03~0.3mm をパラメータとして考えることにした。以下に式 (4)、式 (5) から求められた界面破壊エネルギー G<sub>f</sub> と最大せん断応力 τ<sub>bm</sub> を示す。なお、ここでは、E<sub>b</sub>=230.4GPa、h<sub>b</sub>=0.01cm、b<sub>b</sub>=10cm とする。同定された結果によると、剥離破壊エネルギー G<sub>f</sub> は、通常の 0.51N/mm から最大で 2.47 になっている。また、最大せん断応力 τ<sub>bm</sub> (局所付着強度) に関しては、最大付着すべり s<sub>bu</sub> の値によって大きく変化されている。したがって、今後、最大せん断付着すべりに関して、より精度の高い実験計測、または最

大付着応力に関する直接計測を行う必要がある。  
う。

## (2) せん断軟化曲線を考慮したモデル

せん断軟化曲線を考慮した場合、図-8 に示すように、Ⅰ（弾性変形領域）、Ⅱ（軟化変形領域）、Ⅲ（せん断応力が0になっている領域）と順次現れるせん断分布図を示すようになる。

表-4 せん断軟化曲線を考慮しない時の破壊エネルギー $G_f$ と最大せん断応力 $\tau_{bm}$

供試体 No	$P_{max}$ (kN)	$G_f$ (N/mm)	$\tau_{bm}$ (Mpa)
1	15.4	0.51	3.4~33.7
2	21.0	0.94	6.3~62.5
3	18.6	0.73	4.9~49.1
4	20.1	0.86	5.7~57.3
5	17.5	0.65	4.3~43.2
6	25.6	1.39	9.3~92.7
7	28.1	1.68	11.2~112.0
8	34.1	2.47	16.5~164.6
9	27.3	1.59	10.6~105.8
10	19.3	0.79	5.3~52.7

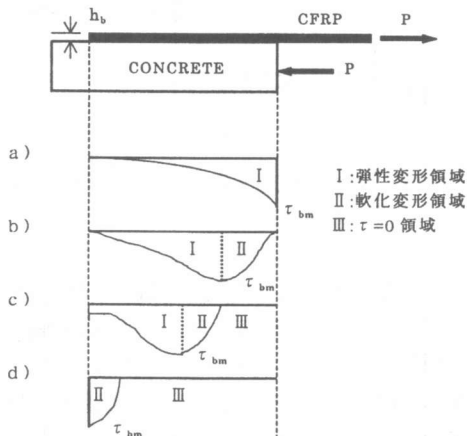


図-8 せん断軟化曲線を考慮したせん断応力分布図

このようなモデルはよく非線形破壊力学を用いた有限要素数値解析において用いられる。しかし、このモデルを導入し、接着長さに対する耐力 $P$ の関係式を理論的に求めるには陽的に取り扱えないことになる。Brosensら<sup>3)</sup>はその関係式を陰的に求め、接着長さ $l$ が十分に長いとした時は、式(3)と同じ表現されている。

したがって、CFRP シートの接着長さ $l$ が十分に長いとした時、せん断軟化曲線を考慮するかしないかにかかわらず破壊エネルギーが同じ

値となることになり、同定されたパラメータの値は両モデルにおいて使われるようになる。

## 4. 結論

本研究は実験を中心に CFRP シートの接着・定着メカニズムの解明およびその性能向上を図ることを目的として、一連の付着実験から平均付着強度 $\tau_b$ 、破壊力学モデルに関する二つのパラメータである、最大せん断応力 $\tau_{bm}$ 及び界面破壊エネルギー $G_f$ の算定を行った。また、端部定着性状に関する検討を行ない、以下のような結果が得られた。

- 1) 通常に CFS を貼付けるよりも、CFRP シート端部の先端ばらまきを行うことにより平均付着強度は通常 30%位まで増加することが確認できた。また、端部の再接着により 25%~76%まで増加することが確認できた。
- 2) 破壊力学モデルのパラメータである剥離破壊エネルギーは、通常の 0.51N/mm から最大で 2.47N/mm であることが実験的に同定した。
- 3) パラメータの最大せん断応力（局所付着強度）に関しては、最大せん断付着すべり $s_{bu}$ によるところが大きいので、これに対応して、最大接着応力値も広い範囲になっている。

**謝辞：**本実験や本論文を作成するにあたり、茨城大学工学部都市システム工学科構造研究室の袁鴻氏、市川聖芳氏にご協力を頂いた。ここに記して関係各位に謝辞を表す次第である。

## 参考文献

- 1) 呉 智深ほか：炭素繊維シートによる既存コンクリート構造物の耐震補強法の確立、1997~198 文部省科学研究費補助金（基盤研究（A））研究成果報告書、1998。
- 2) Björn Tälsten : Strengthening of concrete prisms using the plate-bonding technique, International of Fracture 82, pp. 253-266, 1996.
- 3) K. Brosens and D. Van Gemert : Plate End Shear Design For External CFRP Laminates, Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceeding FRAMCOS-3