

# 論文 連続繊維シートとコンクリートとの付着特性

西田 浩之\*1・上原子 晶久\*2・下村 匠\*3・丸山 久一\*4

**要旨:** 本稿は、一軸引張試験による連続繊維シートとコンクリートとの付着試験を行い、実測のシートひずみ分布より得られる連続繊維シート-コンクリート間の付着応力と相対変位関係を用いて、付着特性に及ぼす各種の影響要因の検討をした。その要因は、コンクリート強度、シート幅、シートの弾性係数、含浸樹脂の弾性係数である。その結果、シートとコンクリートとの付着特性の重要な要因は、シートとコンクリート間の接着層で、コンクリート強度とシートの弾性係数が与える影響は小さいことが分かった。

**キーワード:** 連続繊維シート,  $\tau-\delta$  関係, 付着試験, 接着層

## 1. はじめに

近年、連続繊維シートを用いて補強したコンクリート構造の力学性状に関する研究が活発に行なわれている。連続繊維シートにより補強したコンクリート部材の曲げおよびせん断耐力は、シートとコンクリートとの剥離により支配される場合がある。補強効果を適切に評価するために、シートとコンクリートとの付着特性を定量的に評価することの重要性が指摘されている<sup>1), 2)</sup>。シートを接着したコンクリートの付着特性の評価方法として、JCI 連続繊維補強コンクリート研究委員会により「引張試験による連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法(案)」が提案されている<sup>3)</sup>。

著者らは既往の研究<sup>4)</sup>で、実測のシートひずみ分布よりシート-コンクリート間の付着応力と相対変位関係(以下、 $\tau-\delta$  関係)を導く方法を提案した。本稿は、試験方法の詳細な検討、ひずみ分布より求めた $\tau-\delta$  関係のモデル化、ならびに付着特性( $\tau-\delta$  関係)に及ぼす各種影響要因の検討について述べるものである。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料

樹脂の物性値を表-1、シートの力学特性を表-2 に示す。プライマーと含浸樹脂は共にエポキシ系の樹脂で、含浸樹脂には弾性係数が 1470MPa の標準含浸樹脂と 713MPa の低弾性含浸樹脂の 2 種類を使用した。シートには炭素繊維シートとア

表-1 樹脂の特性

項目	プライマー	含浸樹脂	
		標準	低弾性
比重	1.10	1.10±0.05	1.17
引張強度(Mpa)	-	50.3	12.5
曲げ強度(Mpa)	-	81.6	8.9
引張弾性係数(Mpa)	-	1470	713

表-2 FRP シートとしての力学特性

シート	炭素繊維シート		アラミド繊維シート
	標準	低弾性	標準
含浸樹脂			
強度(MPa)	3317	3163	2753
弾性係数(GPa)	266.3	250.6	85.5
目付量(g/m <sup>2</sup> )	200	200	235
シート厚さ(mm)	0.111	0.111	0.169

表-3 コンクリート配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位量 (g/m <sup>3</sup> )		圧縮強度 (MPa)
		W	C	S	G	AE	SP	
55	43.0	155	282	769	1062	0.70	-	34.9~42.4
35	39.0	155	443	646	1053	1.11	-	54.2
20	36.0	165	825	475	880	-	21.5	75.5

\*1 オリエンタル建設(株) 工修 (正会員)

\*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 工修 (正会員)

\*3 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 博士(工学) (正会員)

\*4 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 Ph.D (正会員)

ラミド繊維シートを使用した。共に1方向に補強されたものである。シートの引張試験は JIS K 7073 に基づき、幅 30mm、検長 120mm で行った。

コンクリート配合と、圧縮強度を表-3 に示す。使用した材料は早強セメント(比重:3.14)、川砂(表乾比重:2.64、粗粒率:2.78)、碎石(表乾比重:2.68、粗粒率:6.60、Gmax:20mm)である。

## 2.2 試験体

シートを接着する前のコンクリートブロックを図-1 に示す。コンクリートブロックの寸法は断面 100×100mm、全長 500mm である。試験体には下地処理工(ハンドグラインダーによるコンクリート表面のレイタンス層の除去)を施した。定着シート側では隅角部に曲面を設けた。引張伝達材には鋼ボルト(径 12mm)を使用し、中央部位置でこの鋼ボルトを切断し、力を伝達しないようにした。中央部では、ひび割れ誘発を目的として、シートを貼る面に直交する 2 面に幅 15mm、深さ 7.5mm の切り欠きを設けた。

シートを貼り付けた試験体を図-2 に示す。試験体は、片側でのみシートの剥離が生じるようにするため、一方を定着用シートで補強した。シートはコンクリート打設面と直交する 2 面に貼り付けた。シート層数は 1 層で、貼り付け長さは中央部から 175mm である。試験体を試験機に取り付ける前に、切り欠き部に初期ひび割れをハンマーで打撃して導入した。

付着試験では、中央のひび割れ位置付近でシートにコンクリート塊が付着し、これが原因でシートの応力不均一性を招き、破断する場合のあることが著者らの既往の研究で明らかにされている<sup>5)</sup>。よって今回は不安定なシート破断を防ぐため、ひび割れ位置付近のシートとコンクリートとの間に未付着区間を設けた試験体を作製した。ひび割れ位置近傍のシートとコンクリートとの付着を無くする方法として、中央部前後 25mm にアルミテープを貼る方法を採用した。アルミテープを使用した理由は、①アルミテープの厚さは薄くシートへの影響がない、②樹脂硬化時の発熱による影響を受け難い、ためである。

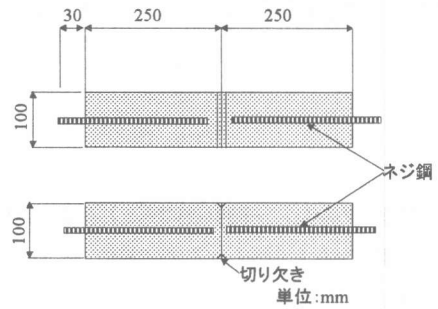


図-1 コンクリートブロック

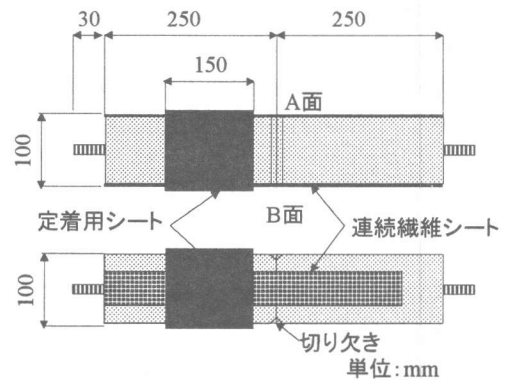


図-2 シートを貼り付けた試験体

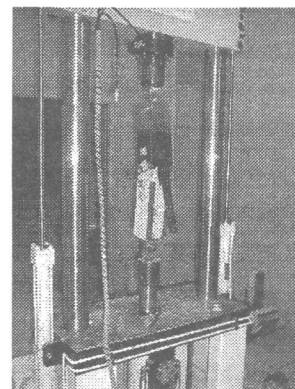


図-3 荷重状況

連続繊維シートのひずみを測定するため、検長 5mm のひずみゲージを使用した。ゲージの貼り付け間隔は中央部から 20mm ピッチである。シート接着後の養生期間は 20℃以上の屋内に 1 週間以上とした。

## 2.3 荷重方法

使用した試験機は変位制御型試験機(最大荷重

50kN)である。載荷状況を図-3に示す。載荷速度は0.05mm/minとした。

## 2.4 実験パラメータ

実験パラメータは表-4に示したように、コンクリート強度、シート幅、含浸樹脂の弾性係数、シートの弾性係数である。

## 3. $\tau$ - $\delta$ 関係の導出方法<sup>4)</sup>

付着試験により図-6,8に示す各ステップごとのシートのひずみ分布が得られる。シートひずみ分布から、シート-コンクリート間の付着応力 $\tau$ と相対変位 $\delta$ の関係を導出する方法を以下に示す。

試験体加力端においてシートとコンクリートの相対変位がゼロであると仮定すると、シートのひずみを加力端から任意の位置 $x$ まで積分した値は、その位置におけるシートの変位である。

$$u_s(x) = \int_0^x \varepsilon_s(x) dx \quad (1)$$

ここに、 $u_s(x)$ ：位置 $x$ におけるシートの変位、 $\varepsilon_s(x)$ ：位置 $x$ におけるシートひずみである。

コンクリートは剛体であると仮定すると、シートとコンクリートの相対変位 $\delta(x)$ はシートの変位 $u_s(x)$ に一致する。

$$\delta(x) = u_s(x) \quad (2)$$

ここに、 $\delta(x)$ ：位置 $x$ における相対変位である。

図-4は試験体における微小区間における力の釣り合いを示したものである。

シートを弾性体と仮定すると、微小区間 $dx$ における、シートに作用する力の釣り合いから、付着応力に関する以下の式が得られる。

$$\tau(x) = t_s \cdot E_s \frac{d\varepsilon_s(x)}{dx} \quad (3)$$

ここに、 $\tau(x)$ ：位置 $x$ における付着応力、 $t_s$ ：シートの厚さ、 $E_s$ ：シートの弾性係数である。

実験結果より得られた各荷重ステップにおけるシートひずみ分布から、式(1)(3)を数値的に計算する。すべてのシートひずみ測定位置について計算を行いプロットすれば、各荷重ステップにおけるシートとコンクリート間の付着応力 $\tau$ と相対変位 $\delta$ の関係が得られる。

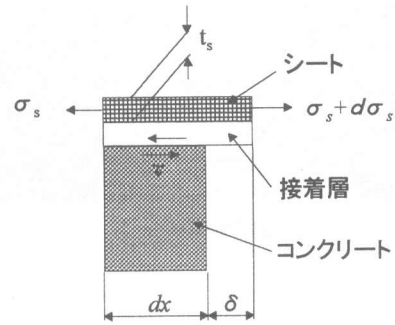


図-4 微小区間における力の釣り合い

## 4. 実験より得た基準供試体の $\tau$ - $\delta$ 関係とそのモデル化

### 4.1 基準供試体のひずみ分布と $\tau$ - $\delta$ 関係

各供試体の実験結果を表-4に示す。以下、基準供試体の結果について詳細に検討する。破壊形式はシート剥離破壊で、シートにコンクリート表層部が付着して破壊に至っている(図-5)。図より、シート幅以上にコンクリートが付着していないことが分かる。

実測のA面におけるシートひずみ分布を図-6に、B面を図-8に示す。各面のひずみ分布から、3章で示した方法に基づき各荷重ステップにおける $\tau$ - $\delta$ 関係を計算した結果を図-7、図-9に示す。図より、 $\tau$ - $\delta$ 関係は概ね弾性、および軟化の2つの領域で表されることが分かる。その形状は両面においてほぼ等しい。図中では $\tau$ が負の値をとっている。この原因は、剥離後のシートに付着したコンクリートのために、図-6、8に示したひずみ分布において、シートが剥離した部分が一定の値を示していないためである。現実には、シートが剥離していることを考慮すれば、この部分の実際の付着応力はゼロとなる。よって、本研究ではこの部分の付着応力を以降のモデル化に用いないことにした。また、試験体では材軸方向位置140mmが末端のひずみゲージの位置である。ゲージ貼付位置140mmより外側のシートひずみをゼロとして $\tau$ - $\delta$ 関係を求めることとした。

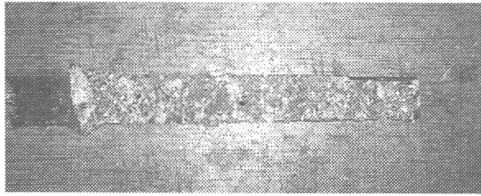


図-5 試験後のシート

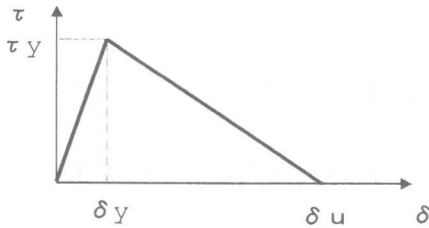


図-10  $\tau - \delta$  関係のモデル化

#### 4.2 $\tau - \delta$ 関係のモデル化

4.1 節より、ひずみ分布から求めた基準供試体の  $\tau - \delta$  関係の形状は概ね弾性、および軟化の 2 領域で表されることが分かった。本論文では紙面の都合上割愛するが、他の供試体についても同様の傾向の結果が得られた。そこで、図-7,9 を図-10 のように 2 直線でモデル化することにする。弾性領域での付着応力の最大値を  $\tau_y$ 、 $\tau_y$  に相当する相対変位を  $\delta_y$ 、軟化領域で付着応力がゼロに相当する相対変位を  $\delta_u$  とする。本稿では、実験で得た  $\tau - \delta$  関係を平均化してこの 2 直線を同定する。以下に、 $\tau_y$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_u$  の決定方法を述べる。また、1 つの試験体では、2 面の  $\tau - \delta$  関係が得られるが、以降では 2 面を平均した値を用いている。

##### ・ $\tau_y$ 、 $\delta_y$ の決定方法

$\tau_y$  は各载荷ステップ毎の最大値を平均化し、 $\delta_y$  は  $\tau_y$  に対応する相対変位を平均化する。平均化では、载荷ステップごとに求まる  $\tau - \delta$  関係のうち、シートの剥離（中央部に最も近いゲージ位置で  $\tau$  の値がゼロとなる）開始以降のデータを採用する。

##### ・ $\delta_u$ の決定方法

$\delta > 0$ 、 $\tau > 0$  の範囲で  $\tau$  がゼロに漸近した値 ( $\delta$ 、 $\tau$ ) を平均する。次に上で求めた ( $\delta_y$ 、 $\tau_y$ ) と

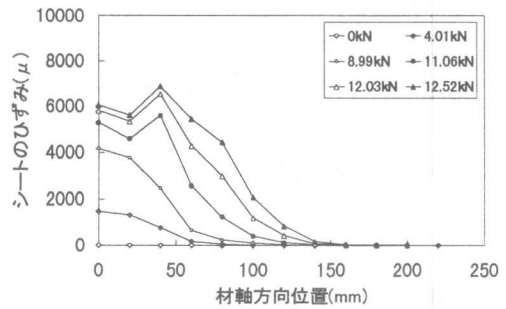


図-6 ひずみ分布 (A面)

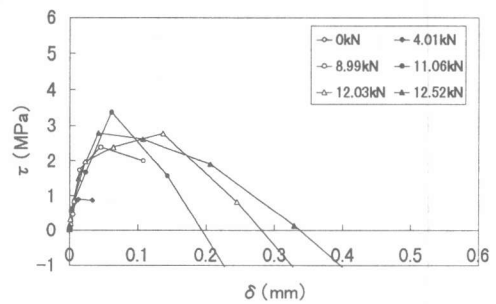


図-7  $\tau - \delta$  関係 (A面)

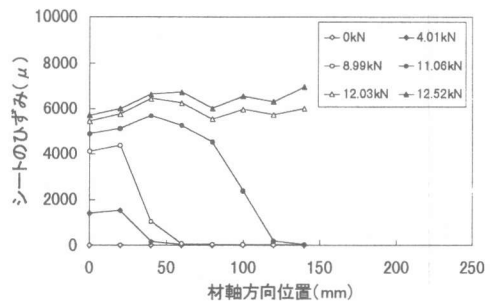


図-8 ひずみ分布 (B面)

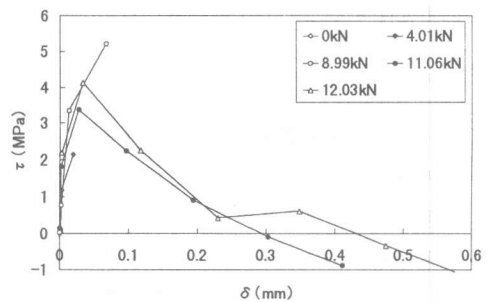


図-9  $\tau - \delta$  関係 (B面)

表-4 試験結果一覧

実験パラメータ	試験体名	コンクリート 強度 Mpa	シート		含浸樹脂 種類	荷重		剥離の有無	破壊形式	τ-δ関係		
			種類	幅 mm		剥離発生 KN	最大 KN			τy MPa	δy mm	δu mm
基準	基準	34.9	炭素	30	標準	10.99	13.57	○	B剥離	3.355	0.032	0.226
コンクリート強度	FC53.4	53.4	炭素	30	標準	11.49	17.45	○	A破断	3.340	0.034	0.232
	FC75.5	75.5	炭素	30	標準	9.76	15.36	○	B剥離	4.157	0.042	0.240
シート幅	B10	34.9	炭素	10	標準	3.19	6.25	○	B破断	5.051	0.034	0.232
	B50	38.8	炭素	50	標準	17.59	22.30	○	B破断	3.751	0.039	0.288
	B70	41.5	炭素	70	標準	22.86	29.84	○	B剥離	3.151	0.032	0.242
	B90	41.5	炭素	90	標準	26.29	29.44	○	A剥離	3.151	0.031	0.154
シート	アラミド	36.5	アラミド	30	標準	8.88	14.70	○	A剥離	3.290	0.057	0.404
含浸樹脂	低弾性	42.4	炭素	30	低弾性	-	12.72	×	A破断	4.277	0.058	-

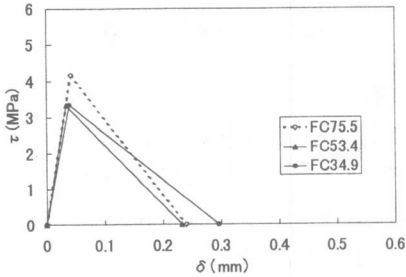


図-11 τ-δモデル(コンクリート強度)

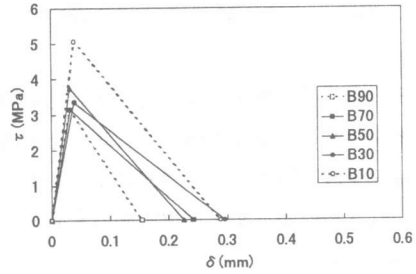


図-12 τ-δモデル(シート幅)

の傾きから付着応力がゼロとなる点を外捜し、 $\delta u$ を決定する。採用するデータは $\tau y$ 、 $\delta y$ と同じである。

### 5. 各種要因がτ-δ関係に及ぼす影響

各実験パラメータごとの試験結果(剥離発生荷重、最大荷重、破壊形式)と4.2節でモデル化したτ-δ関係(以下、τ-δモデル)の $\tau y$ 、 $\delta y$ 、 $\delta u$ を表-4に示す。低弾性の含浸樹脂を用いた試験体の破壊形式は、シート剥離が生じる前のシート破断であり、それ以外の試験体はシート剥離している。以下の検討には、4.2節の方法に基づいて得られたτ-δモデルを用いる。

#### 5.1 コンクリート強度

コンクリートの圧縮強度を実験パラメータとしたシリーズのτ-δ関係の結果を図-11に示す。コンクリート強度を34.9から53.4MPaに変化させても、τ-δ関係の形状は概ね等しくなった。75.5MPaでは、基準試験体(34.9MPa)と比較すると $\tau y$ は約1MPa大きくなった。よって、付着特性に対するコンクリート圧縮強度の影響は小さいと考えられる。

#### 5.2 シート幅

シート幅を実験パラメータとしたシリーズのτ-δ関係の結果を図-12に示す。シート幅が10mm以外では $\tau y$ 、 $\delta y$ はほぼ等しい。シート幅が10mmの場合に $\tau y$ が大きくなった原因は、剥離後にシート幅以上に付着するコンクリートの影響が、シート幅に対して相対的に大きくなったためと推測される。

#### 5.3 シートの弾性係数

シートの種類を実験パラメータとしたシリーズのτ-δ関係の結果を図-13に示す。炭素繊維シート( $E_s=266.3\text{GPa}$ )とアラミド繊維シート( $E_s=85.5\text{GPa}$ )の違いによる変化はなく、τ-δ関係はほぼ等しい。

#### 5.4 含浸樹脂の弾性係数

低弾性の含浸樹脂を用いた試験体のτ-δ関係を図-14に示す。この図はモデル化せず、実験値をそのまま示したものである。破壊形式はシート剥離以前のシート破断であり、低弾性の含浸樹脂を用いることで破壊モードが変化した。図より、 $\tau y$ が最大値以降、一定になっていることが分かる。これは、含浸樹脂を低弾性に変えた結果、付

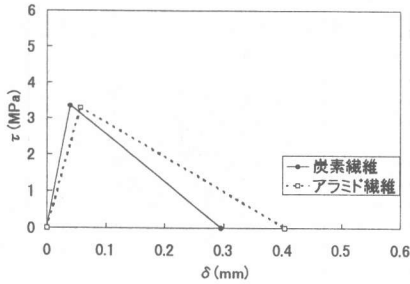


図-13 τ-δモデル(シートの種類)

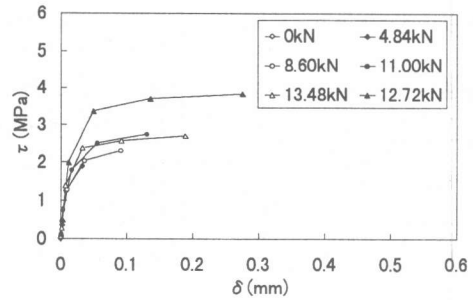


図-14 τ-δ関係(樹脂)

着応力が分布する区間が広がったためと考えられる。剥離を生じさせることができなかつたため、 $\tau$ - $\delta$ 関係全域を描くことはできなかつたが、附着特性には含浸樹脂、および樹脂層の影響が大きいことが示唆される。

## 6. まとめ

シートとコンクリートとの附着試験を行い、実測のシートひずみ分布より得られる $\tau$ - $\delta$ 関係を用いて、附着特性を検討した結果以下のことが分かった。

- (1) 極端にシート幅を狭くする(10mm以下)と、附着性状が変化する。
- (2) コンクリートの圧縮強度、およびシートの弾性係数が附着性状に及ぼす影響は小さい。
- (3) (2)に対して含浸樹脂、および樹脂層の影響は大きい。

今後は、附着特性( $\tau$ - $\delta$ 関係)についての検討を進めるとともに、これを用いてシート補強した部材のせん断耐力、曲げ耐力、ひび割れ幅等を予測する一般的な方法についても検討を進める予定である。

本研究で使用したシートは三菱化学(株)、帝人(株)に、樹脂は三菱化学(株)、東邦天然ガス(株)に提供して頂きました。ここに記して謝意を表わす。

## 参考文献

- 1) 出雲健司, 浅水俊博, 佐伯昇, 志村和紀: アラミドおよび炭素連続繊維シートの附着特性, コンクリート工学論文集, Vol. 9, No. 2, pp. 1-7, 1998. 7
- 2) 佐藤裕一, 木村耕三, 小島克朗: CFRPシートとコンクリートの附着挙動(その1), 日本建築学会構造系論文集, Vol. 500, pp. 75-82, 1997. 10
- 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) 上原子晶久, 西田浩之, 下村匠, 丸山久一: 連続繊維シートの附着挙動に関する研究, 第16回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, Vol. 16, pp. 11-14, 1998. 11
- 5) 西田浩之, 上原子晶久, 下村匠, 丸山久一: 連続繊維シートのコンクリートとの附着試験, 第16回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, Vol. 16, pp. 15-18, 1998. 11