

# 論文 正負繰返し载荷を受ける連続繊維シート補強されたRC部材の付着割裂強度

松野 一成<sup>\*1</sup>・角 徹三<sup>\*2</sup>

要旨：繰返し载荷時のRC部材の付着性状の劣化に関して多くの知見が得られているが、連続繊維シート補強された場合の性能劣化は明らかにされていないため、連続繊維シートの繰返しによる性能劣化の有無に注目した付着実験を行った。その結果、シート補強無しの付着割裂強度の評価が的確であれば、シート補強したRC部材の付着割裂強度が評価できること、また、付着機構の保持のために使用される連続繊維シートに対して、繰返し载荷はほとんど影響を与えないことが確認できた。

キーワード：連続繊維シート，付着割裂強度，正負繰返し载荷

## 1. はじめに

著者等は一貫して連続繊維シート巻き付けによるRC部材の付着割裂破壊抑止効果についての検討を行っており、その成果として連続繊維シート補強による付着割裂強度増大分の算定式を提案するに至った<sup>1)</sup>。しかし、現実の柱・はりせん断力で評価すべきであり、強度(応力度表記)では実設計には適応できないため、付着割裂強度からRC部材の付着割裂破壊時のせん断力を算定することが重要であるため、付着割裂強度から付着せん断耐力を算定する手法を提案した<sup>2)</sup>。その結果、繰返し载荷を受けるRC部材の付着せん断耐力が若干ではあるが実験値を下回る危険側の算定となった。このことから、このままでは実設計に用いることはできず、何らかの修正を加える必要があると判断した。繰返し载荷時のコンクリートの付着性状の劣化に関しては多くの知見が得られているが、連続繊維シートに関しての性能劣化に関しての知見は少ない。そこで、連続繊維シートの性能把握を容易にするために曲げモーメントの影響等を除外した簡易型付着試験法を用いて、繰返し载荷時の付着割裂強度に注目した実験(シリーズ)と、連続繊維シートの性能劣化に注目した実験(シリーズ)の2シリーズの種類の実験を行なった。本論

文はそれらの実験結果の考察を行い、繰返し载荷時の連続繊維シート補強されたRC部材の付着性状を明らかにし、付着性能の劣化を定量的に把握することを目的としている。

## 2. 正負繰返し载荷を受ける連続繊維シート補強されたRC部材の付着実験(シリーズ)

### 2.1 実験目的

本シリーズは、繰返し载荷時における連続繊維シートで補強されたRC部材の付着性状を明らかにすることが最大の目的である。

### 2.2 試験体

表-1に試験体一覧を実験結果とあわせて示し、図-1に試験体図を示す。断面はすべて80mm×250mmとし、全長900mm、付着長さ300mm、側面かぶり40mmとした。主筋には、付着割裂破壊に先行しての曲げ降伏を生じさせないため、D19の高強度異形鉄筋を用いた。図-2に载荷装置の概略を示す。試験体両サイドにそれぞれセンターホールジャッキを装着し、試験鉄筋に直接

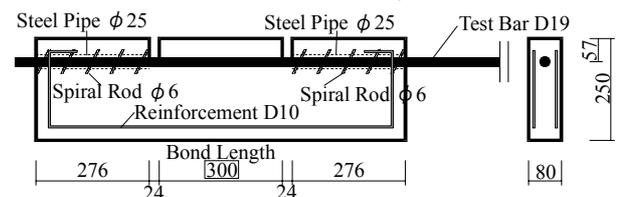


図-1 試験体図

\*1 呉工業高等専門学校 建築学科 助教授 博士(工学)(正会員)

\*2 豊橋技術科学大学 建設工学系 教授 工学博士(正会員)

表 - 1 試験体一覧および実験結果の概要

試験体名	断面 (mm)	付着長さ (mm)	連続繊維シート		荷重方法	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大引張力 (kN)	最大引張力時のすべり (mm)	付着強度											
			補強比 (%)	種類					実験値 (N/mm <sup>2</sup> )		計算値 (N/mm <sup>2</sup> )									
									付着強度	平均値	シートによる増分	f <sub>m</sub>	w <sub>f</sub>	b <sub>u</sub>						
No.1	80 × 250	300	0	-	一方向単調	30.54	90.91	0.682	5.05	5.21	-	2.65	-	2.65						
No.2					96.50		0.823	5.36												
No.3					81.20		0.574	4.51												
No.4					76.39		0.470	4.24												
No.5			0.21	炭素	一方向単調		120.33	1.160	6.69	6.96	1.75	2.65	1.16	3.81						
No.6					129.94		1.458	7.22												
No.7					140.14		1.792	7.78												
No.8					122.58		1.550	6.81												
No.9					0.42		炭素	一方向単調	150.29						1.872	8.35	3.17	2.65	1.38	4.03
No.10								正負繰返し	158.08						1.984	8.87				

u<sub>exp</sub>: 試験区間の平均付着応力度, f<sub>m</sub>: 藤井・森田による付着割裂強度, w<sub>f</sub>: シートによる付着割裂強度増分, b<sub>u</sub>: f<sub>m</sub> + w<sub>f</sub>

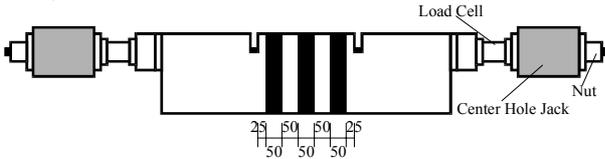


図 - 2 荷重装置

荷重を行った。一方向単調荷重の場合は、試験体右側にのみジャッキを装着し荷重を行った。正負交番繰返し荷重の場合は、右側のジャッキで荷重・除荷を行い、その後左側のジャッキで荷重・除荷を行った。荷重の制御は荷重漸増荷重とした。実験による荷重に際しての偏心圧縮応力による曲げ引張破壊を防ぐため、D10の普通強度異形鉄筋を配し曲げ補強を行った。試験体をスリットにより付着領域(試験区間)と非付着領域に分け、荷重による反力が試験区間に影響を与えないよう留意した。非付着領域には鋼管を配し、コンクリートと鉄筋間の付着を完全に断ち切った。非付着領域内でのコンクリートの破壊が先行するのを防ぐため、6普通強度鉄筋によりスパイラル補強を施した。また、正負繰返し荷重を行うために試験区間の両サイドに非付着領域を設けた。断面の寸法と試験筋の配置決定にあたっては、以下に示す藤井・森田式<sup>3)</sup>に従えばサイドスプリット型の付着割裂破壊が先行するよう留意されている。

$$\tau_{fm} = \tau_{co} + \tau_{st} \quad (1)$$

$$\tau_{co} = (0.117 \cdot bi + 0.163) \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (2)$$

$$\tau_{st} = \left( 9.51 \frac{p_{st} \cdot b}{N \cdot d_b} \right) \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (3)$$

但し、bi=bsi=b/(N・d<sub>b</sub>)-1.0, p<sub>st</sub>: 横補強筋比, b: 部材幅, N: 主筋本数, d<sub>b</sub>: 主筋径, s<sub>t</sub>: コ

W/C (%)	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	AE減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )
66.0	290	191	604	891	2.90

表 - 3 コンクリートの力学的性質

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
1	31.66	2.43	2.38 × 10 <sup>4</sup>
2	32.01	2.12	2.32 × 10 <sup>4</sup>
3	27.94	2.24	2.45 × 10 <sup>4</sup>
Ave.	30.54	2.26	2.38 × 10 <sup>4</sup>

表 - 4 鉄筋の機械的性質

種類	最大強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
D 19 (主筋)	840	720	2.00 × 10 <sup>5</sup>
D 10 (補強筋)	525	368	1.79 × 10 <sup>5</sup>

表 - 5 連続繊維シートの力学的性質

	炭素繊維シート
繊維目付 (gr/m <sup>2</sup> )	300
繊維比重	1.80
設計厚さ (mm)	0.167
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3400
引張弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	2.30 × 10 <sup>5</sup>
破断伸度 (%)	1.5

ンクリート強度。また、連続繊維シート補強による付着強度増分は以下の提案式<sup>1)</sup>で算出した。

$$\tau_{wf} = \frac{1}{6} \cdot \left( \frac{E_{wf}}{E_0} + 0.5 \right) \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{p_{wf}}{0.0035} - 1 \right)^2 \right\} \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (4)$$

但し、p<sub>wf</sub>: 連続繊維シート補強比, E<sub>wf</sub>: 連続繊維シートの弾性係数(N/mm<sup>2</sup>), E<sub>0</sub>=2.30 × 10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>とする。

### 2.3 使用材料の性質

連続繊維シートは既存のRC構造物を補修するために用いるので、コンクリート強度は既存の建物に近い24N/mm<sup>2</sup>を目標とした。表 - 2にコンクリートの調合を、表 - 3にコンクリートの力学的性質を示す。骨材の最大粒径は20mmとした。

試験鉄筋として、D19の高強度異形鉄筋(ネジ式鉄筋)を、補強用にD10の普通強度異形鉄筋を用いた。表 - 4に試験鉄筋の主な機械的性質を

示す。

連続繊維シートには、炭素繊維シートを使用した。表 - 5 に炭素の機械的性質を示す。

#### 2.4 実験変数

実験変数は連続繊維シート補強の有無と荷重方法の2種類とし、それらの組み合わせにより6種類の試験体を作製した。シート補強は無補強と補強比( $p_{wf}$ )が0.21%と0.42%、シート幅は50mmとし、図 - 2 に示すように試験区間をストライプ状に補強した。0.42%の場合は二重に貼付した。貼付状況を図 - 3 に示す。荷重方法は一方向単調荷重と正負交番繰返し荷重とした。それぞれの実験を2体ずつ( $p_{wf}=0.42%$ は1体のみ)の計10体の実験を行った。

#### 2.5 測定事項

実験においては主筋すべり量と試験鉄筋に作用する引張力の測定を行った。主筋のすべりは一方向荷重の場合は荷重端側のみ測定し、繰返し荷重の場合は試験区間両端で測定した。

#### 2.6 実験結果

##### 2.6.1 実験結果の概要

表 - 1 に実験結果の概要を示す。すべての試験体がサイドスプリット型の付着割裂破壊を呈した。いずれの試験体も計算値を大きく上回る付着強度が得られたが、シート無しの段階で差が生じていることに起因している。図 - 3 シート貼付状況

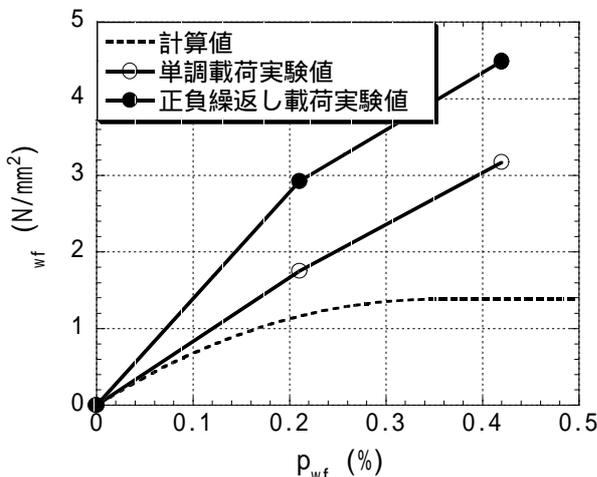
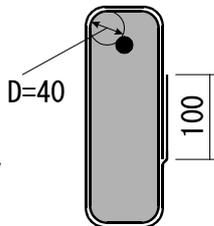


図 - 4 シートによる付着強度増分

度の増分の実験値と計算値の比較を示す。提案式の適応範囲は $p_{wf}=0.35%$ までであるため、0.35%以降はその強度を維持するとした。単調荷重の場合、適応範囲を考慮するとシートによる増分を安全側に評価できている。繰返し荷重時においては過大評価する傾向がみられるが、付着強度の増分はシート補強した試験体の付着強度とシート無しの試験体の強度の差を用いており、そのシート無しの試験体の付着強度が繰返しにより大きな劣化を生じていたために増分が大きく算定されたものと考えられる。また、付着強度全体では繰返し荷重の試験体の付着強度が、単調荷重の試験体をわずかに上回ったのは、繰返し荷重時においてもシートの性能が十分に発揮されたため、両者に同等の効果があつたと判断した。つまり、上回る効果はなく、同等の効果であり、試験体誤差と判断した。

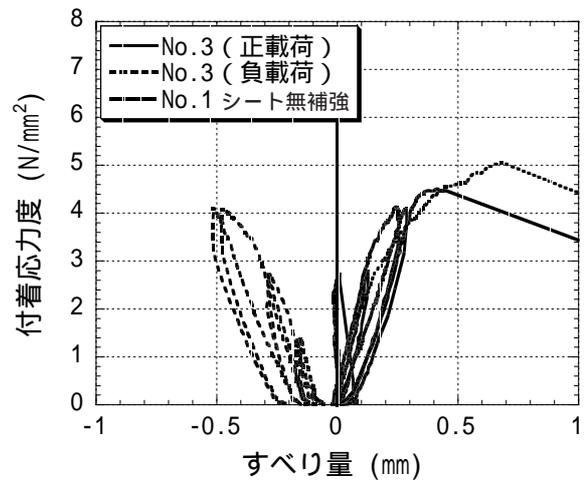


図 - 5 付着応力度 - すべり関係 (No.3)

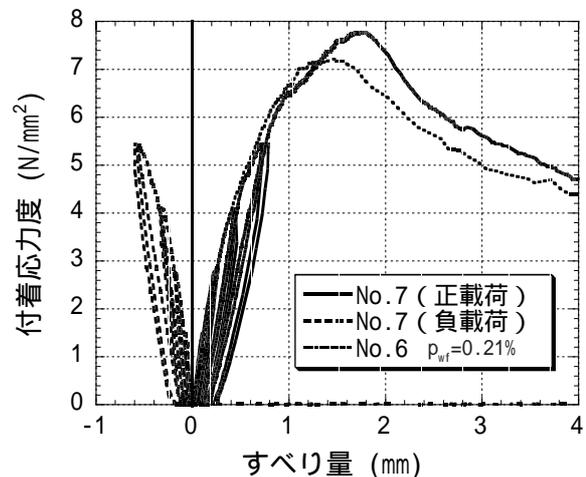


図 - 6 付着応力度 - すべり関係 (No.7)

### 2.6.2 付着応力度 - すべり量関係

図 - 5 に繰返し載荷を行った試験体 No.3 の付着応力度 - 主筋すべり量関係の履歴曲線を示す。比較のため単調載荷の曲線も加えている。シート無しの場合、繰返し載荷により付着割裂強度で約10%の強度低下がみられ、主筋のすべり量は最大付着応力時に約50%も落ち込んでいる。また、図 - 6 にシート補強した試験体 No.7 の履歴曲線を示す。シート補強したものは単調載荷を上回る付着強度、すべり量が得られた。また、剛性に関しても繰返しによる低下はまったくみられず、単調載荷の変位曲線上に履歴曲線が描かれている。試験体の誤差を考慮したとしても、試験体の付着性状に劣化が生じているとは考えにくい。

### 2.6.3 正負繰返し載荷による付着性状の劣化

付着強度の実験値は試験区間の平均付着応力度で示しているが、局所的にみると載荷点に近い区間がより大きな付着応力を負担している。これを考慮すると、試験区間の3カ所を連続繊維シートで補強しているが、付着機構の保持にもっとも貢献していると考えられるのは載荷点に最も近いシートである。それ以外のシートは試験体の最終破壊状況からほとんど抵抗していないとみられる。シートのひずみ測定を行っていないため確認できないが、正載荷時には正載荷点側のシートのみ、また負載荷時には負載荷点側のシートのみが抵抗し、それ以外の2カ所のシートは単調載荷時とほぼ同等の応力状態で

あったと考えられ、付着劣化が生じなかったものと推測できる。また、試験体が拘束する部材の幅が付着劣化がみられた試験体（部材幅300mm）<sup>2)</sup>と比較して小さく、連続繊維シートの試験体への拘束力が強すぎたことも一因であろう。

## 3. 付着補強に用いた連続繊維シートの付着

### 特性把握のための付着試験（シリーズ）

#### 3.1 実験目的

本シリーズも正負繰返し載荷時の挙動を明らかにすることを目的としている。なかでも、シリーズにおいて推測された連続繊維シートの付着性状保持機構をより正確に把握することを最大の目的としている。

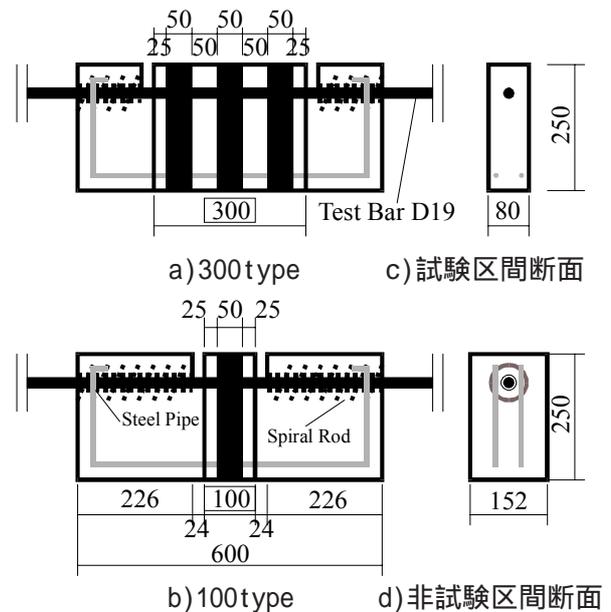


図 - 7 試験体図

表 - 6 試験体一覧および実験結果の概要

試験体名	断面 (mm)	付着長さ (mm)	連続繊維シート		載荷方法	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大引張力 (kN)	最大引張力時のすべり (mm)	付着強度							
			補強比 (%)	種類					実験値 (N/mm <sup>2</sup> )		計算値 (N/mm <sup>2</sup> )					
									付着強度	シートによる増分	f <sub>m</sub>	w <sub>f</sub>	bu			
No.11	80 × 250	300	0	-	一方単調	27.46	59.47	0.476	3.30	-	2.51	-	2.51			
No.12					正負繰返し		45.47	0.186	2.52	-						
No.13			0.21	炭素	一方単調		81.83	0.672	4.55	1.25	2.51	1.10	3.61			
No.14					正負繰返し		73.71	0.570	4.09	1.57						
No.15					一方単調		91.70	0.592	5.09	1.79						
No.16					正負繰返し		73.71	0.868	4.09	1.57						
No.17		100	0	-	一方単調		19.98	*1	3.30	-	2.51	-	2.51			
No.18					正負繰返し		18.15	0.620	3.02	-						
No.19			0.21	炭素	一方単調		22.76	0.498	3.79	0.49	2.51	1.10	3.61			
No.20					正負繰返し		24.84	*2	4.14	1.12						
No.21					一方単調		19.26	2.068	3.21	*3				2.51	1.31	3.82
No.22					正負繰返し		25.31	1.362	4.21	1.19						

u<sub>exp</sub>: 試験区間の平均付着応力度, f<sub>m</sub>: 藤井・森田による付着割裂強度, w<sub>f</sub>: シートによる付着割裂強度増分, bu: f<sub>m</sub> + w<sub>f</sub>  
 \*1, \*2: 変位計に不備により記録できず, \*3: 試験体の欠陥により考察から除外

表 - 7 コンクリート調合表

W/C (%)	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	AE 減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )
54.0	378	204	870	785	0.945

### 3.2 試験体

表 - 6 に試験体一覧を実験結果とあわせて示し、図 - 7 に試験体図を示す。試験体は付着長さの差異により2種類を作製した。試験区間の断面はすべて80mm × 250mmとし、全長600mm、側面かぶり40mmとする。試験体の配筋に関してはシリーズと同様に非試験区間での破壊を防ぐための配慮がなされている。載荷方法はシリーズと同様である。また、載荷による反力を負担する区間は、シリーズで反力による試験体の破壊が発生した反省から、断面を試験区間の約2倍の152mmとし、反力による破壊の防止策とした。本シリーズの断面決定にあたっては、藤井・森田式<sup>3)</sup>に従えばサイドスプリット型の付着割裂破壊が先行するよう留意されている。

### 3.3 使用材料

鉄筋、連続繊維シートは、シリーズと同様のものを使用した。目標コンクリート強度は24N/mm<sup>2</sup>としたが、骨材の最大粒径は15mmとした。表 - 7 にコンクリートの調合表を、表 - 8 にコンクリートの力学的性質を示す。

### 3.4 実験変数

実験変数は付着長さ、連続繊維シート補強の有無、載荷方法の3種類とし、それらの組み合わせにより12種類の実験を行うこととした。付着長さは100mmと300mm、シート補強は無補強と補強比( $p_{wf}$ )が0.21%と0.42%、シート幅は50mmとし、図 - 7 に示すように試験区間をストライプ状に補強した。0.42%の場合は二重に貼付した。300typeはシリーズと同様の補強であるが、100typeは試験区間を1カ所のみ補強とし、シリーズの仮説を検証に最適な補強とした。載荷方法は一方向単調載荷と正負交番繰返し載荷とした。

### 3.5 載荷方法および測定事項

実験においては主筋すべり量と試験鉄筋に作

表 - 8 コンクリートの力学的性質

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
1	28.41	2.26	$2.52 \times 10^4$
2	27.14	2.31	$2.23 \times 10^4$
3	26.83	2.37	$2.49 \times 10^4$
Ave.	27.46	2.31	$2.41 \times 10^4$

用する引張力の測定を行った。主筋のすべりは一方向載荷の場合は載荷端側のみ測定し、繰返し載荷の場合には試験区間両端のすべりを測定した。また、連続繊維シートの付着保持機構を明らかにするため、試験区間全てのシートのひずみ測定を行なった。

### 3.6 実験結果

#### 3.6.1 実験結果の概要

表 - 6 に実験結果の概要を示す。シリーズと同様に、すべての試験体がサイドスプリット型の付着割裂破壊を呈した。いずれの試験体も計算値を大きく上回る付着強度が得られたが、シート無しの段階で差が生じていることに起因している。図 - 8 にシートによる付着強度の増分の実験値と計算値の比較を示す。提案式の適応範囲は $p_{wf}=0.35\%$ までであるため、0.35%以降はその強度を維持するとした。付着長さ100mmの単調載荷の場合が計算値を下回っているが、100typeは連続シートの性能劣化の検証を行うためのものであり、付着長さ(L)/主筋径( $d_b$ )も5.26と特異であるため、強度面での考察は300typeのみで行うべきと思われる。これを考慮すると、提案式<sup>1)</sup>と非常によく適合しているといえる。本シリーズはシートの挙動を把握すること

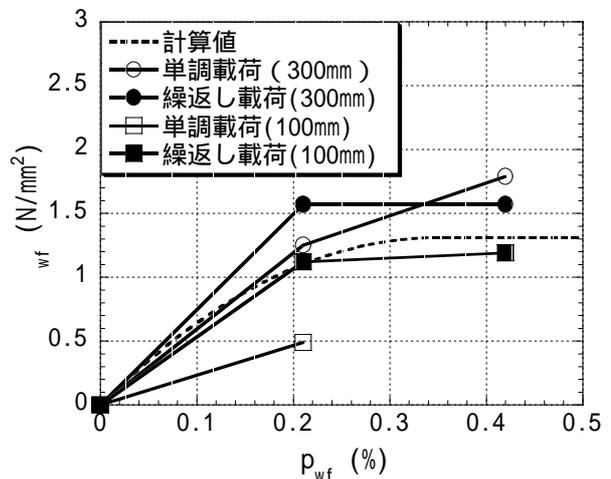


図 - 8 シートによる付着強度増分

が目的のため、以下の考察はシートひずみのみについて行なう。

### 3.6.2 連続繊維シートひずみ

図 - 9 に試験区間の3カ所をシート補強した No.13の付着応力度 - 連続繊維シートひずみ関係を示す。一方向単調載荷の場合、載荷端側からのひびわれの進行に合わせた形でシートのひずみが増大していく傾向が捉えられている。載荷端から最も離れている補強箇所では、付着強度に達するまでほとんどひずみがみられない。また、図 - 10 に繰返し載荷の場合のシートのひずみ分布を付着応力度の増大にあわせて示す。図中の黒塗りは正載荷時のひずみ分布を、白塗りは負載荷時の分布を示す。また、負載荷時の引張ひずみはマイナス方向に示した。繰返し載荷時も単調載荷時と同様、載荷端側の補強箇所のシートのみが抵抗する様相が明確に捉えられている。これらのことからシリーズでたてたシートの抵抗機構の仮説が裏付けられる。

図 - 11 に試験区間を1カ所のみ補強した No.20の付着応力度 - 連続繊維シートひずみ関係を示す。図のように1箇所のみを補強すると、正載荷、負載荷時にも付着機構の保持のために負担していることは明らかであるが、表 - 6 に示すようにシートによる付着割裂強度増大効果に関して1カ所補強の場合は単調載荷を上回る効果が得られるなど、シートの性能にまったく劣化はみられない。このことから、付着機構の保持に関して連続繊維シートを用いる場合には、繰返し載荷の影響は考慮する必要がないといえる。

## 4. まとめ

本実験により得られた知見を以下に示す。

1. 連続繊維シートの付着割裂破壊に対する抵抗機構の概要を把握することができた。
2. 付着機構の保持のために用いられる連続繊維シートに対して、繰返し載荷はほとんど影響を与えない。つまり付着割裂破壊時のせん断耐力の算定に関して、特に考慮する必要はないといえる。

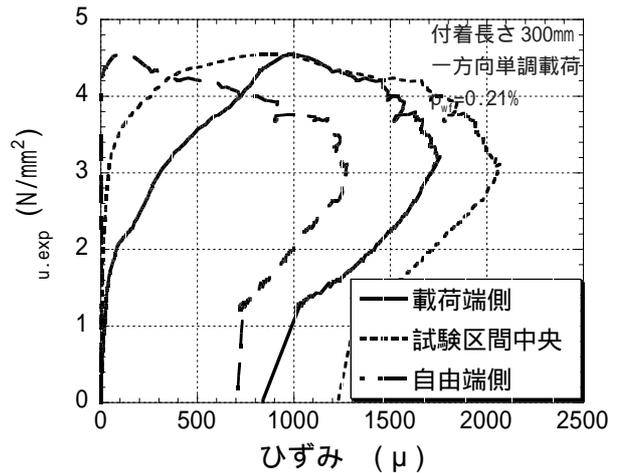


図 - 9 連続繊維シートひずみ (No.13)

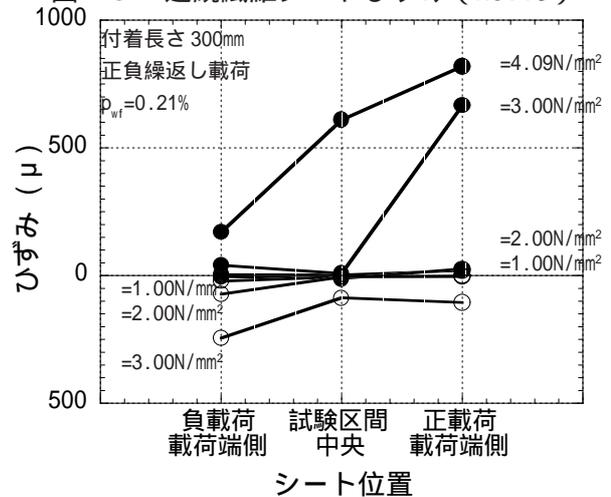


図 - 10 連続繊維シートひずみ分布 (No.14)

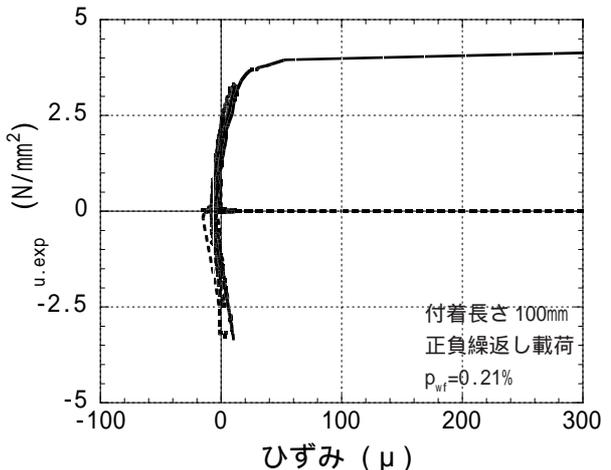


図 - 11 連続繊維シートひずみ (No.20)

### 参考文献

- 1) 松野一成・河野進・角徹三：連続繊維シートによるRC部材の付着割裂強度増大効果 - 第1報 付着強度式の提案 - , 日本建築学会構造系論文集, 第548号, 95-100, 2001
- 2) 松野一成・角徹三：連続繊維シートによるRC部材の付着割裂強度増大効果 - 第2報 部材実験による付着強度式の検証 - , 日本建築学会構造系論文集, 第556号, 117-122, 2002
- 3) 藤井栄・森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第319号, pp.47-55, 1982