

# 論文 ガラス繊維を用いた簡易耐震補強による付着割裂強度増大効果の検証

松野 一成<sup>\*1</sup>・小宮 巖<sup>\*2</sup>

要旨：著者等が提案した簡易耐震補強法には、高レベルでせん断補強筋された部材への適応，3本以上の鉄筋群への適応可能性等の検証が不十分であるという問題があった。その影響を検証し，耐震補強法としての有用性を高めることを目的に，24体の簡易型試験体を用いた付着試験を実施した。また実部材への適応を考慮し，部材レベルで補強法の有用性を検証するために，付着割裂破壊先行型のはり型試験体を用いて付着試験を実施した。その結果，せん断補強筋比が大きい場合でも簡易耐震補強法は併用できることが確認された。また補強効果を定量的に把握するための問題点が明らかとなった。

キーワード：簡易耐震補強法，FRP，付着割裂強度，ガラス繊維

## 1. はじめに

著者等は一貫して連続繊維シート(FRP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い，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<sup>1)</sup>，付着せん断耐力を算定する手法を提案した<sup>2)</sup>。その後シート型あるいはプレート型といった各種形態の連続繊維に対応できるように付着割裂強度算定式の修正を行った<sup>3),4)</sup>。また紫外線硬化樹脂を使用した簡易耐震補強法を提案<sup>5)</sup>し，せん断補強筋が簡易耐震補強法にどのような影響を与えるかを検証し，耐震補強法としての有用性を検討した。しかしながらせん断補強筋比が小さかったため，検証結果は必ずしも十分とはいええず，補強材として使用するガラス繊維プレートの厚さを十分に評価できていないという問題点も残った。加えて，補強効果の検証実験に用いた試験体は試験鉄筋に直接引張力を付加する簡易型試験法であったため，部材レベルでの検証も必要である。

そこで本研究では，簡易型試験法を用いてせん断補強筋比の大きい場合の検証実験を行い，付着割裂強度の増大効果を検討するとともに，付着割裂強度算定式の有用性を検討すること，またはり型試験体を用いて，実部材に近い形態で耐震補強法を検証することを目的とした。

## 2. 簡易型付着試験

簡易型試験は2シリーズで構成されており，シリーズ1は部材実験でのせん断補強筋比に近い状態での補強効果の検証を目的とし，シリーズ2は鉄筋群に対しての補強効果を検証し，ガラス繊維プレート(以下GFRP)の厚さと補強効果の関係を明確にすることを目的とした。

### 2.1 試験体

試験体一覧を実験結果の概要と併せて表-1に示す。表中の補強法Aは紫外線硬化樹脂によるGFRP成型を，GFRPを補強個所にあてがった状態で行い，貼付する補強法で，補強法BはGFRP成型を試験体から直接型取りせず，プレート状に加工する方法で，GFRPの厚さの計測を容易にするためにシリーズ2で採用した。

図-1にシリーズ1の試験体図を，図-2にシリーズ2の試験体図を示す。なおシリーズ1のGFRP補強位置は図-2の位置と同様である。試験鉄筋には載荷の際の利便性を考慮し，D19のネジ式異形鉄筋を用いた。以下に共通項目を述べる。付着長さ200mm，側面かぶり40mm，鉛直かぶり57mm(本論でのかぶりは試験鉄筋中央からコンクリート縁までの距離とした)，載荷に際しての曲げ引張破壊を防ぐため，D10の普通強度異形鉄筋を配した。載荷による反力が試験区間に影響を与えないよう，試験体にはスリットにより付着領域(試験区間)と非付着領域

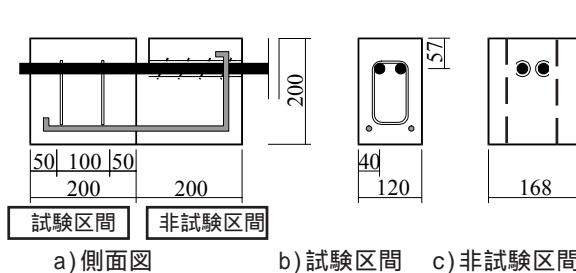


図-1 試験体図(シリーズ1)

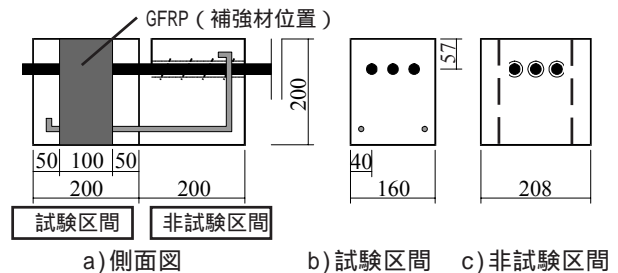


図-2 試験体図(シリーズ2)

\*1 呉工業高等専門学校 建築学科 准教授 博士(工学)(正会員)

\*2 福井ファイバテック 博士(工学)(非会員)



表 - 2 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> )
65.0	317	206	854	758	1.90

表 - 3 コンクリートの力学的性質

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1	28.09	1.98 × 10 <sup>4</sup>	2.60
2	27.83	2.13 × 10 <sup>4</sup>	2.75
3	28.57	2.22 × 10 <sup>4</sup>	2.72
Ave.	28.16	2.11 × 10 <sup>4</sup>	2.69

タログ値を記載した。繊維は一方方向に配し、試験鉄筋に直交するよう貼付した。補強法Bを採用したGFRPの厚さはこの表の値とは異なっている。これはプレート厚さの影響を把握するために、プレート状に加工する際に薄く、あるいは厚みを増して加工したため、その厚さを計測し、補強比を算出している。補強法Aに関しては特別に配慮していないため、表の値を用いた。

2.3 実験結果

2.3.1 実験結果の概要

表 - 1 に実験結果の概要を示す。表中の付着強度は、試験区間の平均付着強度で表し、プレート補強による付着強度の増分の実験値は、無補強試験体との差で表した。すべての試験体が想定通りのサイドスプリット型付着割裂破壊を呈した。なお表中の網掛部のNo.23は、GFRP接着の不備により、以後の考察から除外した。

シリーズ1の付着強度をみると、せん断補強筋比が0.53%と文献<sup>5)</sup>とは異なり、補強筋比が大きい補強であるためせん断補強筋による付着割裂強度の増大がみとれる。さらにGFRP補強を施すことで、さらに付着強度は増大している。せん断補強筋を配した場合にも付着に対して補強効果が確認できたことにより、簡易耐震補強法はせん断補強筋を配した実部材においても、付着に対しての補強効果は十分に期待できる。

シリーズ2で試験鉄筋が2本から3本に増えた場合においても、GFRP補強を施すことで、付着強度の増大が確認できたが、破壊形態には試験鉄筋の増加にともなう差異も確認できた。GFRP補強を施した9体の試験体のうちの約半数の4体が、GFRPの剥離による破壊を呈した。これはすべての試験鉄筋が抜け出す破壊を呈した試験鉄筋が2本の場合にはみられなかった破壊形態であった。

2.3.2 破壊形状

写真 - 1 ~ 6 に最終破壊形態の代表例を示す。いずれも無補強の試験体は、極めて脆性的な破壊であった。

シリーズ1では、せん断補強筋の有無により大きな差異が生じた。せん断補強を施していない試験体は極めて脆性的な破壊を呈したのに対し、せん断補強筋を配した

表 - 4 鉄筋の機械的性質

種類	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
D19 (主筋)	570	370	1.76 × 10 <sup>5</sup>
D6(せん断補強筋)	430	305	1.79 × 10 <sup>5</sup>
D10 (補強筋)	410	305	1.79 × 10 <sup>5</sup>

表 - 5 ガラス繊維の機械的性質

	ガラス繊維プレート	ガラス繊維シート
繊維目分量 (g/m <sup>2</sup> )	1,732	1,732
設計厚さ (mm)	1.50	0.68
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	442	1,888
引張弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	0.27 × 10 <sup>5</sup>	0.96 × 10 <sup>4</sup>

試験体、GFRP補強を施した試験体は、かぶり部コンクリートが割落することなく、試験鉄筋が抜け出す形態で載荷を終了した。せん断補強筋とGFRP補強の両者を施した場合は、同じく試験鉄筋が抜け出した場合でも、付着ひびわれ幅を抑制することができている。

シリーズ2では脆性破壊を、GFRPの接着不良であったNo.23を除く8体中の半数の4体で抑止できた。補強法Aを用いた場合、2体は主筋の抜け出しでの破壊を呈したが、残りの1体ではGFRPが剥離した。補強法BではNo.23を除く5体中の3体がGFRPの剥離で破壊を迎えた。試験鉄筋が増加したことでGFRPが拘束するかぶり部コンクリートは増大するが、GFRPを固定するための接着部は試験鉄筋が2本の場合と差異はない。そのため接着部への負荷は増大しており、試験鉄筋が3本の場合にはGFRPの剥離が発生したと判断できる。

2.3.3 付着応力度 - 主筋のすべり量関係

図 - 4 ~ 9 に付着応力度と主筋のすべり量関係を示す。縦軸の付着応力度は実験で得られた引張力を試験鉄筋の表面積で除した試験区間の平均応力度で、横軸の主筋す



シリーズ1 主筋2本  
せん断補強 無 GFRP繊維 無 写真 - 1 最終破壊状況 No.1  
シリーズ1 主筋2本  
せん断補強 有 GFRP繊維 無 写真 - 2 最終破壊状況 No.6  
シリーズ1 主筋2本  
せん断補強 有 GFRP繊維 有 写真 - 3 最終破壊状況 No.12



シリーズ2 主筋3本  
ガラス繊維 無 写真 - 4 最終破壊状況 No.13  
シリーズ2 主筋3本  
補強法B 主筋抜け出し 写真 - 5 最終破壊状況 No.20  
シリーズ2 主筋3本  
補強法B GFRP剥離 写真 - 6 最終破壊状況 No.21



べり量は試験体のスリット位置で計測した試験鉄筋のすべり量を表している。また履歴曲線上の×印は、極めて脆性的な破壊を呈した箇所である。両シリーズともGFRP補強による強度面での補強効果が顕著に現れていることが付着応力度と主筋のすべり量関係からもみてとれる。また強度面のみならず、付着強度時のすべり量、付着強度に達した以降の挙動等の変形性能もあわせて向上していることもわかる。

シリーズ1ではせん断補強筋を配することで脆性的破壊を抑止できたことが図-4より明らかである。またせん断補強筋とGFRP補強を組み合わせることで、強度面のみならず変形性能も向上していることが図-6からみてとれる。これにより比較的せん断補強筋比が大きい場合においても、著者等の提案する簡易耐震補強法は効果があるといえる。

シリーズ2では試験鉄筋が3本に増え、拘束すべきかぶり部コンクリートが増大したために、表-1の付着強度の増大分を比較すると、試験鉄筋が2本の場合と比較して増大分は減少しているが、強度面においては確実に効果があるといえる。GFRP補強したすべての試験体で、付着強度に達した以降もある程度の付着応力度を保持したまま、主筋が抜け出す履歴曲線の様相が見受けられるが、図-9に示すNo.21のようにGFRPが剥離し、脆性破壊を呈したものもあった。試験鉄筋が2本の場合にはみられなかった様相のため、GFRP貼付を接着剤のみに依存する場合、シリーズ2で用いた試験体の程度のかぶり部コンクリートの大きさが、GFRPによる付着強度増大効果を担保できる限界ではないかと推測できる。

### 2.3.4 ガラス繊維による付着強度増分

図-10, 11に付着強度増分の実験値と計算値の比較を示す。付着強度の増分は、プレート補強を施した試験体と無補強の試験体の付着強度の差で表した。

シリーズ1ではせん断補強筋を配さない場合において、実験値が計算値をわずかに下回っているもののGFRPによる付着強度増分の様相を捉えている。これによりGFRPによる付着強度増大分の算定式の信頼性は高いと判断できる。せん断補強筋を配した場合には実験値が計算値を大きく上回っている。せん断補強筋とGFRPを組み合わせることで、相乗効果が期待できる結果であった。またシリーズ2においても、補強法の差異に関わらず実験値と計算値が適合しているから、この点からも強度算定式の信頼性は高いと判断できる。

## 3. はり型付着試験

### 3.1 試験体

はり型付着試験に使用した試験体を図-12に示す。試験体全長1300mm、試験区間を320mm、荷点間を260mm

とした2点荷重を採用した。主筋は4-D16( $f_y=357\text{N/mm}^2$ )とし、付着割裂破壊を誘発する配筋とした。試験区間のせん断補強筋は2-D6@70( $f_y=305\text{N/mm}^2, p_w=0.6\%$ )とした。加えて支点付近の反力による影響を除外するため、支点位置から試験体中央部に50mmの箇所から試験端部までスリーブ管を配し、コンクリートと主筋の付着を絶つ非付着区間とし、端部は直線定着とした。試験体一覧を表-6に示す。試験体総数は4体とし、GFRP無補強のもの1体(No.1)、前述した補強法Bを1体(No.2( $p_{wf}=1.0\%$ )), 補強箇所にプライマーを塗布し、紫外線硬化樹脂の接着力のみでGFRPを接着したものを1体(No.3( $p_{wf}=1.0\%$ )), GFRPをコ型に成型せず、シート状のGFRP自体を樹脂で試験体に直接貼付するもの1体(No.4( $p_{wf}=0.5\%$ ))とし

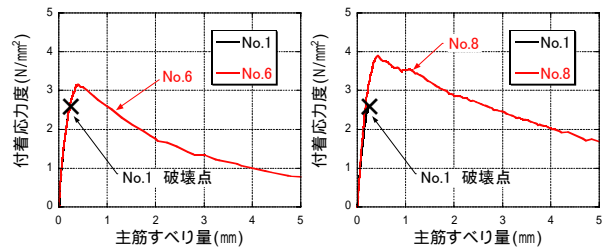


図-4 付着応力度-すべり量関係(シリーズ1 せん断補強筋無)

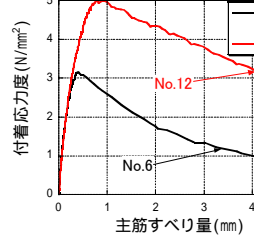


図-6 付着応力度-すべり量関係(シリーズ1 GFRP有無 せん断有)

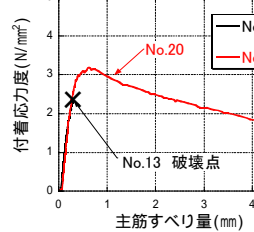


図-8 付着応力度-すべり量関係(シリーズ2 GFRP剥離無 補強法B)

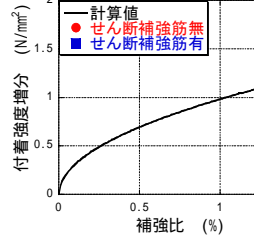


図-10 付着強度増分(シリーズ1)

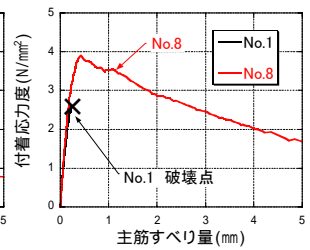


図-5 付着応力度-すべり量関係(シリーズ1 GFRP有無 せん断無)

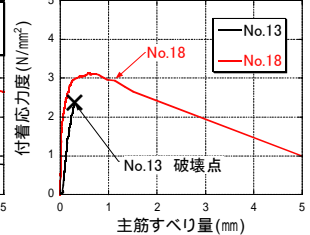


図-7 付着応力度-すべり量関係(シリーズ2 GFRP有無 補強法A)

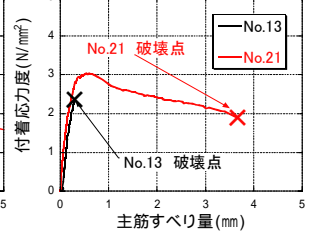


図-9 付着応力度-すべり量関係(シリーズ2 GFRP剥離有 補強法B)

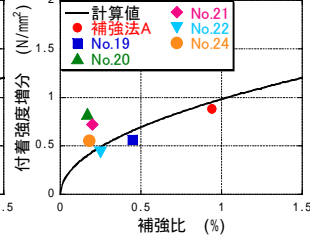


図-11 付着強度増分(シリーズ2)

表 - 6 試験体一覧

試験体名	試験区間断面(mm)	鉄筋		連続繊維		コンクリート実強度(N/mm <sup>2</sup> )
		主筋	せん断補強筋	補強比(%)	補強方法	
No.1	150 × 200	4-D16	2-D6 @70	-	-	25.34
No.2				1.0	コ型+エポキシ樹脂	
No.3				1.0	プライマー+紫外線硬化樹脂	
No.4				0.5	シート+エポキシ樹脂	

表 - 10 実験結果の概要

試験体名	計算値				実験値		
	曲げ終局時のせん断力(kN)	FRP無補強時せん断耐力(kN)	付着割裂強度(N/mm <sup>2</sup> )	付着割裂破壊時のせん断力(kN)	最大せん断力(kN)	付着強度(N/mm <sup>2</sup> )	GFRPによる増分
No.1	116.30	102.90	2.28	69.11	44.20	1.46	-
No.2			3.11	94.35	57.60	1.90	0.44
No.3					55.05	1.82	0.36
No.4			2.80	84.76	59.25	1.96	0.50

た。補強方法および補強箇所を図 - 13 に示す。No.4 は試験体隅角部を D=20mm に面取りし、GFRP を試験体に巻付ける方法で、試験体腹部で重ね合わせて貼付した。

### 3.2 使用材料の性質

コンクリート強度は18N/mm<sup>2</sup>を目標とし、表 - 7 にコンクリートの調合を、表 - 8 にコンクリートの力学的性質を示す。また主筋には D16、せん断補強用に D6 普通強度異形鉄筋を使用した。表 - 9 に使用鉄筋の主な機械的性質を示す。GFRP は前章で記述したものを使用した。

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 実験結果の概要

表 - 10 に実験結果の概要を示す。表中の付着割裂破壊時のせん断力は、以下の手順で算出した。

$$T = \tau_{bu} \cdot \sum \psi \cdot lb \quad (5)$$

$$M = T \cdot j \quad (6)$$

$$Q = \frac{M}{a} \quad (7)$$

但し、 $\tau_{bu}$ : 付着割裂強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\psi$ : 鉄筋の周長(mm)、 $lb$ : 付着長さ(mm)、 $a$ : せん断スパン(mm)、 $j$ : 主筋間距離(mm)。なお本実験の付着長さ  $lb$  は、曲げひびわれ等の影響を考慮せず、鋼管から載荷点までの320mmとした。また主筋間距離  $j$  には150mmを採用した。GFRP で補強された場合の付着割裂破壊時のせん断耐力算定式は日本建築学会の連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案<sup>7)</sup>で定義されているが、試験鉄筋の定着が確保されていないという試験体の特殊性を考慮し、上述の手順で算定した。曲げ終局時のせん断力は、曲げ終局モーメントの値からせん断力を算定、FRP 無補強時のせん断耐力は文献<sup>7)</sup>に従って算出した。

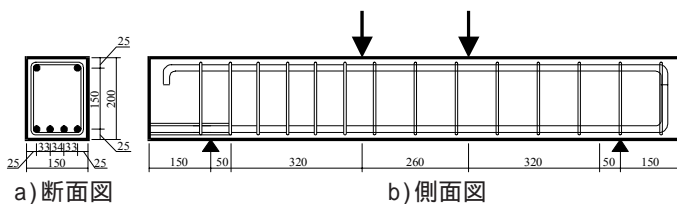


図 - 12 試験体図

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> )
65.0	293	190	961	811	2.93

表 - 8 コンクリートの力学的性質

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1	24.29	2.22 × 10 <sup>4</sup>	2.30
2	25.43	2.23 × 10 <sup>4</sup>	2.40
3	26.35	2.22 × 10 <sup>4</sup>	2.34
Ave.	25.34	2.22 × 10 <sup>4</sup>	2.35

表 - 9 使用鉄筋の機械的性質

種類	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
D16 (主筋)	550	357	1.76 × 10 <sup>5</sup>
D6 (補強筋)	430	305	1.79 × 10 <sup>5</sup>

表 - 10 の実験時の最大せん断力をみると、GFRP で補強することで、格段に付着割裂破壊時のせん断耐力が増大していることがわかる。補強方法で比較すると、試験体外周を GFRP シートで拘束する No.4 が本実験でのせん断力の最大値を記録し、実験計画の段階からの推測通りであった。実験値と計算値の比較ではすべての試験体において大きく計算値を下回る結果となった。その最大の要因は無補強の段階で大きく下回ったことだと考えられ、その差異が補強時にも直接影響している。

#### 3.3.2 破壊形態

写真 7 ~ 10 に各試験体の最終破壊状況を示す。無補強の試験体 No.1 では主筋に沿った付着ひびわれとせん断ひびわれの両者が確認できたが、破壊経過を観察したところ、最大耐力を記録した時点で支配的であったひびわれは付着ひびわれであったため、この点からサイドスプリット型の付着割裂破壊を呈したと判断した。

GFRP で補強した試験体は、ガラス繊維を貼付した箇所以外で付着ひびわれが確認できた。中でも最も明確に付着ひびわれを確認できた試験体は No.2 であった。No.3, No.4 では付着ひびわれに加えて、GFRP に沿う形状で縦方向にひびわれが発生した。付着ひびわれ発生後、試験体の変形し横方向に膨張する作用をガラス繊維が抑えることで、主筋とコンクリートの付着応力度が失われず、せん断ひびわれが進行したと思われる。縦方向のひびわれは、GFRP で補強することでせん断ひびわれの

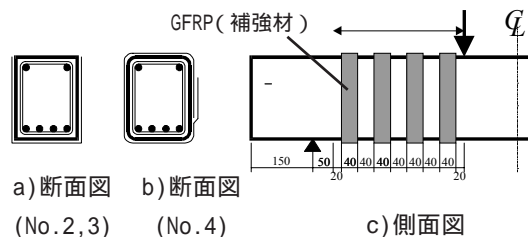


図 - 13 補強箇所および方法

方向が変化したものと推測できるが、表 - 10 の FRP 無補強時のせん断耐力の半分ほどのせん断力で破壊に至っているため、付着割裂破壊を呈したことは間違いないと思われる。

### 3.3.3 せん断力 - 部材変形角関係

図 - 14 にせん断力 - 部材変形角関係の履歴曲線を示す。GFRP で補強することで最大せん断力も変形性能も向上していることがみてとれる。すべての履歴曲線にせん断力が大きく低下する箇所があり、すべての試験体でほぼ同等のせん断力であったため、この時点で主筋がすべったと判断できる。その後は主筋が拔出して変形が進行したが、GFRP 補強により変形を拘束できたため、以降のせん断力が上昇した。

GFRP 補強により主筋がすべった後のせん断力低下にはさほど差異はなく、せん断耐力の向上がみられた。変形角 0.015rad を超える変形時にも GFRP が剥離することなく、コンクリートと一体になってせん断力に抵抗したためと判断できる。しかしながら紫外線硬化樹脂の接着力のみで貼付した No.3 は、変形角 0.018rad 付近で GFRP の剥離がみられ、他の補強法を用いた試験体よりも早い段階で耐力が低下した。(No.2 も最終的には剥離した。)

### 3.3.4 ガラス繊維による付着強度増分

図 - 15 に付着強度増分の実験値と計算値の比較を示す。付着強度の実験値は、実験で得られたせん断耐力を(7)式に代入し、(5)式の付着強度を逆算し算出した。シートを外周に巻き付けた No.4 は実験値と計算値にある程度の適合性がみられるが、プレート状の GFRP をコ型に貼付した No.2, No.3 は実験値が計算値を大きく下回る危険側の算定結果となった。著者等の算定式はせん断補強筋比が大きい場合と GFRP 補強の併用は想定していないため、現時点での適応は困難と判断でき、その点を修正する必要がある。しかしながら両者を併用した場合においても、確実に付着割裂強度は増大していることから、両者の併用は可能であると判断できる。

## 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) せん断補強比が大きい場合においても、簡易耐震補強は効果があり、併用できると思われる。
- 2) 拘束できるかぶり部コンクリートの大きさが明らかとなり、簡易耐震補強法の適応範囲の指標が得られた。
- 3) GFRP 補強の付着強度算定式を部材への補強に対しても対応できるよう修正する必要がある。

## 謝辞

三菱樹脂株式会社には GFRP を貼付する樹脂をご提供いただいた。ここに記し、深甚の謝意を表す。



写真 - 7 最終破壊  
状況 No.1



写真 - 8 最終破壊  
状況 No.2



写真 - 9 最終破壊  
状況 No.3



写真 - 10 最終破壊  
状況 No.4

写真中の は試験区間側の支点位置を示している

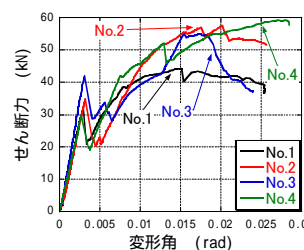


図 - 14 せん断力 -  
部材変形角関係

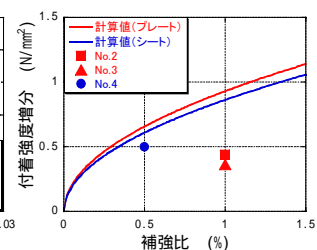


図 - 15 付着強度増分

## 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, pp.95-100, 2001.10
- 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, pp.117-122, 2002.8
- 3) 松野一成・角徹三：プレート型に成型した FRP 連続繊維を用いた RC 部材の付着割裂強度, 日本コンクリート工学年次論文集, 第 28 巻, 第 2 号, pp.709-714, 2006.7
- 4) 松野一成・角徹三：FRP 連続繊維で補強された RC 部材の付着割裂強度, 日本コンクリート工学年次論文集, 第 29 巻, 第 2 号, pp.1135-1140, 2007.7
- 5) 松野一成・小宮巖：ガラス繊維を用いた簡易耐震補強法による RC 部材の付着割裂強度, 日本コンクリート工学年次論文集, 第 35 巻, 第 3 号, pp.691-696, 2013.7
- 6) 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, 1982.10
- 7) 日本建築学会：連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 2002.3