

# 論文 バサルト繊維プリプレグシートによるコンクリート柱のせん断補強効果に関する実験的研究

青山 裕之\*1

**要旨:** コンクリートポール・パイルに対するバサルト繊維シート接着補強効果を実験的に検証することを目的として、シートの種類、層数、接着面積、コンクリートの事前損傷を考慮したバサルト繊維シート接着補強中空コンクリート柱の試験を行い、せん断補強効果を実験的に検討した。その結果、補強量や接着面積、事前損傷の有無に関わらず、バサルト繊維シートを用いた場合でもアラミド繊維シートや炭素繊維シートと概ね同等のせん断補強効果が得られる傾向が見られた。また、従来の簡易算定式により評価できる可能性が示唆された。

**キーワード:** バサルト繊維シート, プリプレグシート, せん断耐力, 中空断面

## 1. はじめに

連続繊維シートによる既設鉄筋コンクリート構造物の補修・補強方法に関しては、せん断補強、靱性補強などについて多くの研究がなされており、適用事例も多くみられ、土木学会が発刊する「FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)」<sup>(1)</sup>により補強用繊維シートにより補修・補強された棒部材のせん断耐力が考案されている。しかし、指針(案)に示される繊維シートのせん断耐力は、アラミド繊維シートおよび炭素繊維シートの実験結果から求められたもので、2つの材料と比べると引張強度・弾性係数が低い天然のバサルト(玄武岩)を溶融して射出して製造されるバサルト繊維シートに関する研究は少なく<sup>(2)(3)(4)</sup>、適用できるかは確認されていない。また、研究の多くは繊維シートを角柱や円柱、梁部材の全面もしくは限定した面に貼付けた場合の補強効果を評価しているものであり、補強効果を研究する上での繊維シート材料の貼付けは、連続繊維シート補強工法に倣い部材に対して含浸接着する方法のものが多く、中空コンクリート柱による検討、使用する繊維シートでプリプレグ繊維シートを用いコンクリートに対し含浸接着せずに貼付けられたものの検討は見られない。

そこで、本研究は、コンクリートポール・パイルを模した中空コンクリート柱に、バサルト繊維シートを含浸接着した場合、バサルト繊維シートをプリプレグ化して使用した場合、繊維シートの接着面を簡便化した場合のせん断耐力試験を行い、バサルト繊維シートのせん断補強効果を実験的に検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体の概要図を図-1に示す。中空円筒で本体径

φ200mm、壁厚 40mm、全長 2m の円柱状の柱とし、軸方向鉄筋をかぶり厚 20mm の位置に円管状に配置し、最大せん断荷重が作用する部分に繊維シートを貼付けた。また、せん断破壊をコントロールするため、繊維シート貼付け部の外側にはせん断補強筋を配筋した。

せん断耐力試験は、JIS A 5363 に則り張出し形式載荷形式で、供試体には断面変形の影響を防止するため幅 40mm の鋼製バンドを取り付け実施し、載荷直下位置にひずみゲージを貼付けひずみの測定、載荷直下位置および荷重作用点位置で変位の測定を行った。なお、鋼製バンドはせん断耐力に寄与しないものである。

供試体のコンクリート配合、製造条件を表-1に示す。普通ポルトランドセメント、骨材には最大寸法 13mm の砕石及び砕砂、ナフタレン系の減水剤を用い、W/C=47.5%、細骨材率 47.0%とした。製造は遠心力締めで中空円筒形状とし、打設後に蒸気養生(最高温度 70°Cを 4 時間保持)を実施した。

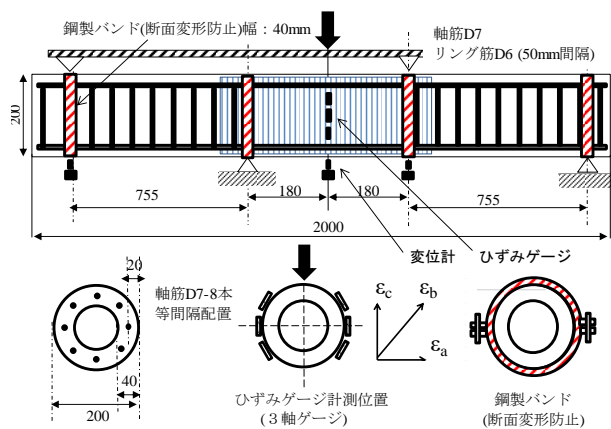


図-1 供試体の概要図

\*1 日本コンクリート工業(株) 青山 裕之 (正会員)

表-1 コンクリート示方配合, 製造条件

Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	減水剤
13	2	47.5	47.0	154	324	901	1016	1.78
成形条件		遠心成形						
養生条件		蒸気養生 前置き20°C-3時間 昇温20°C/h、保持70°C-4時間						

2.2 材料特性

本実験に使用した材料の性能を表-2, 3, 4に示す。補強材に使用した繊維シートはバサルト製繊維シートであり、繊維が一方向で編まれた繊維シート(以下、BFRP)、繊維の目付量がタテヨコに同じ量で織られた織物材で熱硬化樹脂材料よりなるプリプレグ繊維シート(以下、プリプレグBFRP)の2種類とした。

表-2 コンクリート設計強度

圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>
45	4.5	35000

表-3 使用鋼材の機械的性質

鉄筋種類	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>
軸筋 D7	1275	1420	200
せん断補強筋 D4	440	540	—

表-4 バサルト繊維シートの材料特性(ミルト値)

繊維シート種類	目付量 g/m <sup>2</sup>	繊維数 本/m	繊維の向き	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>
BFRP	300	354	1方向	1900	90
プリプレグBFRP	600*	354	2方向	1900	90

\*タテ方向の目付量300, ヨコ方向の目付量300

2.3 繊維シートに関する条件

繊維シートの貼付条件を表-5に示す。供試体Nは繊維シートを使用しない無補強試験体とし、供試体AはBFRP, 供試体BはプリプレグBFRPによる補強とした。貼付けに関して、貼付け前の表面処理はサンドペーパーで擦る程度とし、プライマーを塗布した後、BFRPの貼付けは連続繊維シート補強工法に倣う含浸接着で、供試体に対し巻き付ける形で載荷直下位置の部分で10cmラップさせ貼付け、プリプレグBFRPの貼付けは、供試体に対し半円状のプリプレグBFRPを予め熱加工で成形しておき、エポキシ樹脂接着剤で成形したプリプレグBFRPを両端10cmのラップ長で貼り合わせることで貼付けた。

貼付け条件として、試験A1, A3, A4はBFRPを1層, A2はBFRPを2層貼りとし, A3, A4は貼り付けるコンクリートの損傷状態を模して、グラインダーでコンクリートに水平にスリット状の切れ込みを入れBFRPを貼付けたものをA3, 入れたスリットを補修材で埋めBFRPを貼付けたものをA4とした。試験Bは、プリプレグBFRPを1層貼りとし, B2はA4と同様にスリットを補修材で埋めたものにプリプレグBFRPを貼付け, B3, B4はプリプレグBFRPをコンクリートに対し全面接着とはせずラップする部分だけコンクリートに貼付けるようにし, 載荷直下位置でラップする形としたものをB3, B3よりラップ位置を90°ずらした形としたものをB4とした。

繊維の配向角度は、軸方向に対し鉛直方向を90°、水平方向を0°として表記する。

2.4 せん断耐力に関する簡易算定

FRP接着により補強されたコンクリート部材の設計せん断耐力は「FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)<sup>(1)</sup>」が定める検討式(1)により算定した。

表-5 繊維シート貼付条件

試験No	貼付条件		No	模式図	No	模式図
	繊維シート種類	貼付枚数 繊維の向き				
N	シートなし		N	シートなし	B1	プリプレグBFRP1層
A1	BFRP	1層 軸方向直角	A1	BFRP 1層	B2	プリプレグBFRP1層 スリットあり スリット補修
A2		2層 軸方向直角	A2	BFRP 2層	B3	プリプレグBFRP1層 貼付け部限定1
A3		1層 軸方向直角	A3	BFRP 1層 スリットあり	B4	プリプレグBFRP1層 貼付け部限定2
A4		1層 軸方向直角	A4	BFRP 1層 スリットあり スリット補修	BFRP貼付(A1~A4)ラップ部分 巻き終り 熱加工 形成済	
B1	プリプレグBFRP	1層 軸方向直角	B1	プリプレグBFRP1層	プリプレグBFRP貼付(例B4) ラップ部分 巻き終り 熱加工 形成済	
B2		1層 軸方向直角	B2	プリプレグBFRP1層 スリットあり スリット補修		
B3		1層 軸方向直角	B3	プリプレグBFRP1層 貼付け部限定1		
B4		1層 軸方向直角	B4	プリプレグBFRP1層 貼付け部限定2		

$$V_{fyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} \quad (1)$$

ここに、 $V_{cd}$ ：コンクリートが負担するせん断耐力、 $V_{sd}$ ：せん断補強鉄筋が負担するせん断耐力、 $V_{fd}$ ：補強用 FRP が負担するせん断耐力である。 $(V_{cd} + V_{sd})$  は補強前の部材のせん断耐力となり、本試験の供試体はコンクリートポール・パイルを模した中空コンクリート柱の棒部材であるので「コンクリートパイル建設技術協会<sup>(5)</sup>」が定めるせん断終局強度式(2)に準じて算定し、 $(V_{fd})$  は「FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案)」が定める検討式(3)により算定した。

上記に倣い、本供試体を、設計数値で計算した場合の $(V_{cd} + V_{sd})$  は式(2)より 51.0kN であり、 $(V_{fd})$  は式(3)より、BFRP を 1 層貼付けたもの場合は 34.4kN、2 層貼付けたもの場合は 56.9kN、プリプレグ BFRP を貼付けたもの場合は 56.0kN である。

$$V_{cd} + V_{sd} = 0.80 \times 10^{-3} \times b_e \times j \times \tau_{\max} \quad (2)$$

ここで、 $b_e = (-1.24 \times t/D + 1.19) \times A_c / D$

$$j = 7/8 \times D - t/2$$

$$\tau_{\max} = 0.115 \times K_u \times K_p \times (\sigma_B + 17.7) / M / (Q \times d) + 0.115$$

- $K_u$  : 断面寸法による補正係数 (=0.95)
- $K_p$  : 引張鉄筋比による補正係数 (=0.704)
- $\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度 (=45N/mm<sup>2</sup>)
- $M / (Q \times d)$  : 計算上のシアスパン比 (=1.0)
- $A_c$  : 供試体の断面積 (=20106mm<sup>2</sup>)
- $t$  : 供試体の壁厚 (=40mm)

D : 供試体の外径 (=200mm)

$$V_{fd} = K \times \{A_f \times f_{fud} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / S_f\} \times z / \gamma_b \quad (3)$$

ここで、 $K = 1.68 - 0.67R$  ( $0.4 \leq K \leq 0.8$ )

$$R = (p_f \times E_f)^{1/4} (f_{fud} / E_f)^{2/3} (1 / f'_{cd})^{1/3} \quad (0.5 \leq R \leq 2.0)$$

$$p_f = A_f / (b_w \times s_f)$$

$$f_{fudf} = f_{fu} / 1.2$$

- $f_{fu}$  : 補強用 FRP の引張強度 (=1900 N/mm<sup>2</sup>)
- $E_f$  : 補強用 FRP の繊維弾性率 (=90 kN/mm<sup>2</sup>)
- $f'_{cd}$  : コンクリートの圧縮強度 (=45N/mm<sup>2</sup>)
- $Z$  : 応力中心間距離 式(2)の  $j$  と同様
- $b_w$  : 有効断面幅 式(2)の  $b_e$  と同様
- $A_f$  : 区間  $S_f$  における FRP シートの総断面積
- $\alpha$  : 補強用 FRP の繊維方向と部材軸のなす角

表-6  $A_f$ ,  $\alpha$  設計数値

繊維シート種類		$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	$\alpha$
BFRP	1層貼り	215	90°
	2層貼り	431	90°
プリプレグ BFRP	タテ繊維	215	90°
	ヨコ繊維	135	0°

区間  $S_f$  間による

### 3. 試験結果

#### 3.1 破壊状況

荷重試験後の供試体の終局破壊後の状況を図-2 に示す。終局破壊後に、繊維シートを引き剥がしてコンクリートに発生したひび割れ状況を確認した。赤色点線はひび割れ

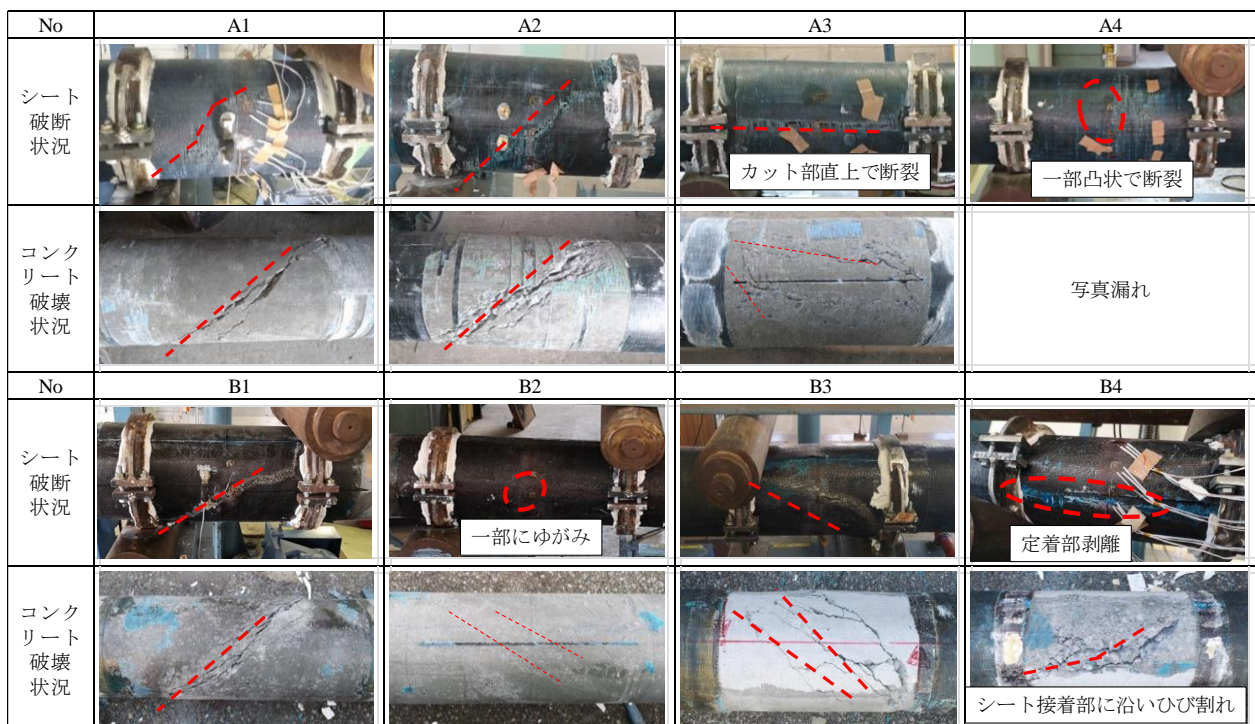


図-2 荷重試験後の破壊状況

び割れ位置を示し、点線で囲んでいる部分は変形が生じた箇所を示している。

コンクリートには、全ての試験でせん断ひび割れが発生し、繊維シートの変形・破断に至ったが、その変形・破断に至る経緯には試験条件により違いが見られた。試験 A1, A2, B1, B3 ではコンクリートのせん断破壊部に沿い繊維シートが破断する結果となっていることから、繊維シートがひび割れ箇所において局所的に卓越した引張力を受け、破断に至ったと考えられる。試験 A4, B2 では終局時にコンクリートに押しこまれる形でシート的一部分にゆがみが生じた。これは、繊維シートの剛性がコンクリートに比べ小さいことから、スリット部に繊維シートの変形が集中したことが考えられる。試験 A3 ではスリットの直上、すなわち水平方向で繊維シートが破断した。試験 B4 では、コンクリートのひび割れが繊維シートを接着している部分内のみで生じ、繊維シートは破断に至らず接着部分が剥離する結果となった。他の供試体と異なり、せん断ひび割れが入る箇所繊維シートをラップさせているため、その箇所のせん断耐力は大きいことが想定されたが、ラップしている部分の繊維シートと繊維シートの接着部分にすべりが生じたことで、付着強さの限界で終局に至る結果を示した。

### 3.2 載荷試験結果

載荷試験結果を表-7 に示す。試験結果のせん断耐力の計算値は供試体の壁厚、コンクリート圧縮強度、ヤング係数の実測値により計算した結果を示している。また、載荷試験により得られた荷重-変位曲線を図-3, 4, 5 に、荷重-ひずみ曲線を図-6, 7, 8 に示す。変位は載荷直下位置に設置した変位計から得られた値であり、ひずみは計測した3軸のひずみゲージの値よりロゼット解析の計算方の式(4)によりせん断ひずみ ( $\gamma_{max}$ ) を算定し、せん断ひずみが最大値をとった箇所のデータである。

$$\gamma_{max} = \sqrt{2\{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 - (\epsilon_b - \epsilon_c)^2\}} \quad (4)$$

表-7 載荷試験結果

No.	供試体壁厚 (mm)	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断耐力 (kN)			変位 (mm)	
				計算	実測	実測/計算	最大荷重時	終局時
N	40.0	45.3	34600	—	40.7	—	2.0	2.8
A1	40.0	50.0	35800	89.4	88.5	0.99	2.9	6.8
A2	41.0	49.7	35800	114.7	121.4	1.06	5.6	5.8
A3	41.0	45.9	34800	86.3	60.1	0.70	4.1	8.8
A4	41.0	51.6	36200	91.3	90.9	1.00	3.5	3.5
B1	41.0	55.7	37300	115.8	127.4	1.10	5.9	5.9
B2	39.0	54.4	37000	114.1	117.8	1.03	6.4	6.4
B3	39.0	48.6	35500	110.1	108.5	0.99	6.4	6.9
B4	42.0	50.3	35900	111.6	108.5	0.97	4.9	5.3

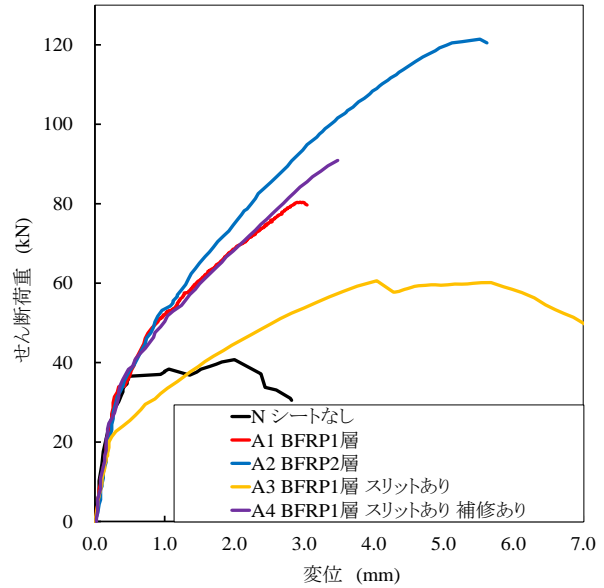


図-3 荷重-変位曲線 (BFRP)

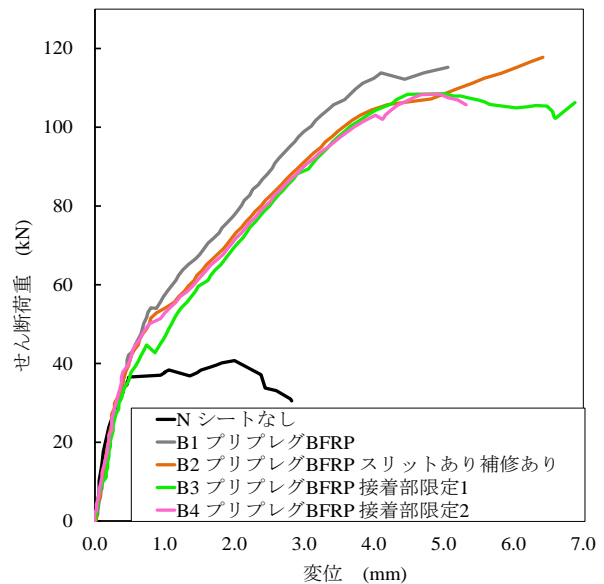


図-4 荷重-変位曲線 (プリプレグ BFRP)

繊維シートを使用しない無補強供試体が 40.7kN でせん断破壊により終局に至ったのに対し、繊維シートで補強した供試体は試験 A3 のスリット直上で繊維シートが水平に破断したものを除き、最大せん断荷重は計算耐力に近似する結果を示した。また、プリプレグ BFRP に関して、繊維シートとコンクリートの接着面を限定した B3、B4 のものは全面接着した B1 と比較すると実測値を計算値で除した値は小さくなる結果を示すものの、最大せん断耐力は計算耐力に近似する結果を示した。

せん断荷重-変位の関係では、試験 A3 のスリット直上で繊維シートが水平に破断したものを除き、繊維シートによる補強効率の違いにより終局時の変位に違いは見られるものの、終局以前のグラフの傾き、すなわちせん

断剛性には繊維シートの総数及び種類による影響はほとんど見られない結果を示した。

せん断荷重-せん断ひずみの関係では、試験 A3 はスリット直上のひずみが他の試験のコンクリートと接着している箇所のひずみに対し、卓越している。コンクリートに接着していない箇所では剛性が比較的小さい繊維シートに直接荷重がかかるため早期に破断したことが考えられる。または、スリットのエッジ部に二次応力が発生し、擦り切れた可能性も考えられる。試験 A4、B2 のスリット補修したものに関しては、他の試験のスリットが入っていない状態のものに比べ、繊維シートに生じたひずみがせん断ひび割れ発生前後まで多少大きくなっているが、終局時には同程度となっており、終局耐力には影

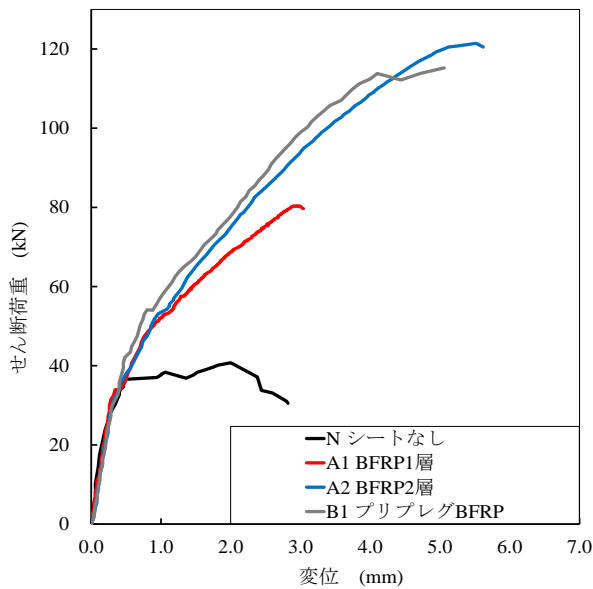


図-5 荷重-変位曲線 (BFRP とプリプレグ BFRP)

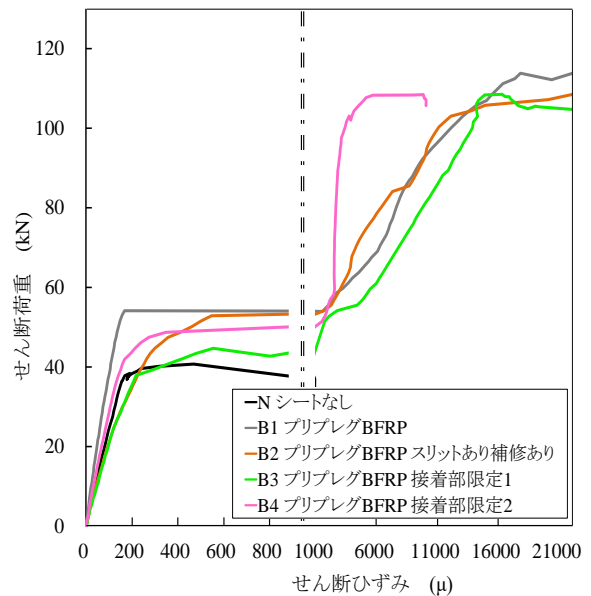


図-7 荷重-ひずみ曲線 (プリプレグ BFRP)

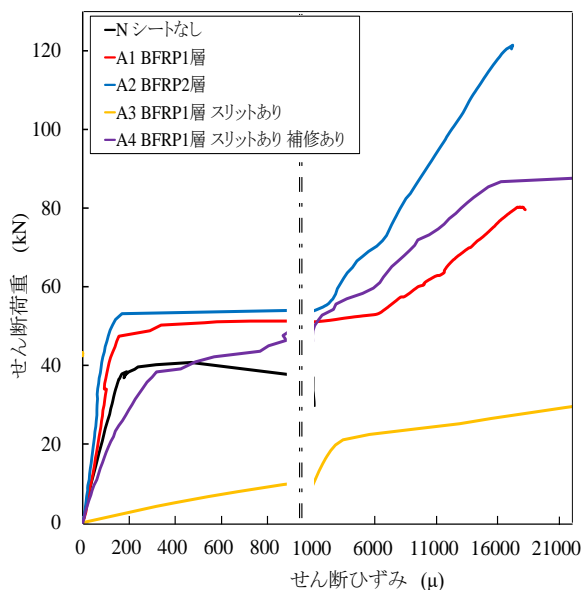


図-6 荷重-ひずみ曲線 (BFRP)

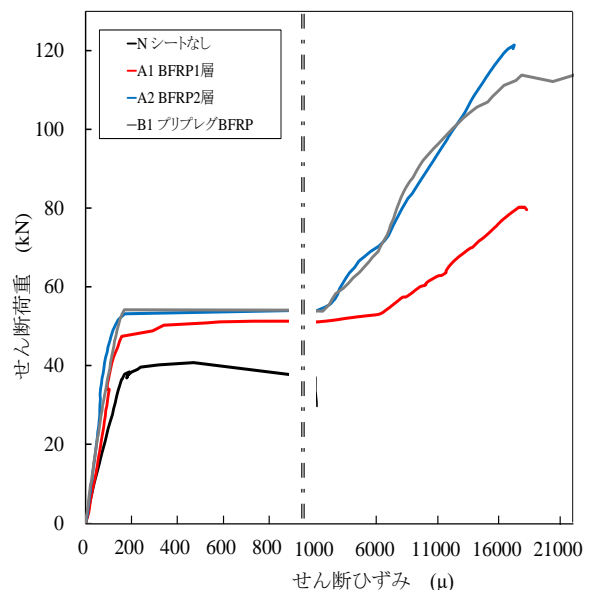


図-8 荷重-ひずみ曲線 (BFRP とプリプレグ BFRP)

響がなかったと考えられる。このことより、部材が損傷している場合の補修、平滑化が重要であることが伺える結果であった。

試験 B3 のプリプレグ BFRP の接着面を載荷直下位置でラップした部分だけに限定したものでは、試験 B1, B2, B4 に比べ、せん断ひび割れ発生荷重が低く、またひずみが大きくなる傾向が見られる。このことより、せん断ひび割れが生じる部分でコンクリートと接着していないプリプレグ FRP シートには、全面接着されたプリプレグ FRP シートに比べ、局所的に大きなひずみがかかりやすくなり、全面接着した試験体より終局耐力が低下したと考えられる。

#### 4.まとめ

コンクリートポール・パイルを模した中空コンクリート柱に対する、バサルト BFRP 接着によるせん断補効果を、バサルト BFRP の種類、層数、接着状態、およびコンクリート柱への事前損傷を考慮して実験的に検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 従来のアラミド繊維や炭素繊維と同様に「FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)」で考案されている補強効率に近い補強効果に関する結果が得られた。
- (2) プリプレグ BFRP を使用し、部材に貼付ける前に熱加工を施し成形したシートを、下塗り接着剤に対し貼り付ける従来より簡便な方法を導入しても、従来の繊維シート接着補強による方法と同程度の補強効率で補強効果が得られる傾向が見られた。
- (3) コンクリートに事前に損傷(スリット)の有無を考慮した場合の補強効果を検討した結果、損傷を補修しない場合では損傷部直上での応力集中により繊維シートが早期に破断し想定される補強効果が得られないのに対し、損傷を事前に補修することで、従来の繊維シート補強と同程度の補強効果が得られる結果を示した。ただし、スリットが無い場合はコンクリートのせん断破壊部に沿い繊維シートが破断する結果となっているのに対し、スリットが有りの場合

は破壊繊維シートの一部に局所ひずみが発生し、これに伴い破断する結果と状況が異なるケースが見られた。

- (4) プリプレグ BFRP をラップ箇所以外に接着しない場合、接着する部分の条件によっては、ラップしている繊維シートと繊維シートの接着部分にすべりが生じやすくなることや、コンクリートと繊維シートが接着していない部分では局部的に大きなひずみがかかりやすくなっていることが考えられ、全面接着するケースと比較すると補強効率は低下する結果は見られるものの、補強効率は十分確保できる結果が得られた。よって、作業効率の省力化を目的として、今後、接着面積を限定した場合に関する補強効率の評価を検討することが課題と考えられる。

#### 謝辞

本研究を遂行する上で、榎屋ティスコ株式会社よりバサルト繊維材料を、名城大学理工学部 社会基盤デザイン工学科 岩下健太郎准教授より貴重な意見を頂いた。また、実験を行うにあたって、NC 東日本コンクリート工業株式会社に協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) (社)FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案), 土木工学, 2018.7
- 2) 岩下 他: バサルト繊維シートとコンクリートの付着特性, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.1912-1917, 2014
- 3) 岩下 他: BFRP シートを接着したコンクリート梁の高速荷重下での曲げ挙動, コンクリート工学, Vol.37, No.1, pp.1621-1626, 2015
- 4) 盛岡 他: RC 梁へのバサルトメッシュ接着によるせん断補強効果に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.71, No.5, pp.1001-1002, 2016
- 5) 既製コンクリート杭-基礎構造設計マニュアル, 社団法人コンクリートパイル建設技術協会, 2002.5