

論文 多軸炭素繊維シートによるRC梁のせん断補強に関する実験的研究

堀本 歴^{*1}・星野 章仁^{*2}・宮里 心一^{*3}・上原子 晶久^{*4}

要旨：所定の方向に連続繊維を引き揃え、各層を積層して1枚の繊維シートとして編成することを特徴とする「多軸繊維シート」によるRC梁のせん断補強に関する実験を行った。単純梁にU字3面巻き補強し、3点曲げ載荷試験によるせん断補強性能を評価した。繊維シートの編成条件の違い、すなわち繊維の方向性が荷重-変位関係におけるポストピーク挙動の違いに現れることを明らかにした。また、終局時における繊維シートの定着端部のはく離性状が編成条件によって異なることをつかみ、さらに繊維シートに生ずるひずみを測定することで、多軸繊維シートの特徴を見いだした。

キーワード：多軸繊維シート, 炭素繊維, せん断補強

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・補強工法は、施工が比較的容易であり、重機や機械が使用できない作業環境下でも人手での作業が可能であることや、また補強後の構造物重量や断面寸法変化が小さく構造物や周辺への影響が小さいことなどから、適用実績が広がっている¹⁾。

筆者らは、連続繊維の配列方向を任意に設定することができ、さらに異なる方向性を与えた連続繊維層を2層以上積層して一枚の繊維シートとして編成することができる「多軸繊維シート(図-1参照)」による、鉄筋コンクリート部材の補強性能に関する基礎的な実験を行ってきた^{2),3)}。これは、連続繊維の配列方向を設計できることを活かし、斜め方向に編成することにより、合理

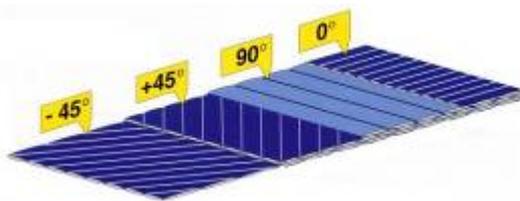


図-1 多軸繊維シート概念図

的に部材の補強効果を引き出すことを目的としている。

本研究では、炭素繊維により編成した多軸繊維シートを用い、繊維の方向性がせん断補強性能に及ぼす影響を検討するとともに、評価手法を検討することを目的として、梁部材のせん断補強実験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリートの示方配合を表-1に示す。普通ポルトランドセメント、最大寸法25mmの粗骨材を用い、細骨材率44.4%、W/Cを50.5%とした。載荷試験時は材齢6ヶ月で、強度36.0N/mm²であった。

図-2(a)に供試体の形状寸法と配筋を示す。高さ300mm、幅150mmの単純梁とし、引張鉄筋はD25をかぶり50mmで2本配筋した。なお、せん断破壊をコントロールするため、片側にはスターラップを配筋した。主筋比は2.84%である。

本供試体での、コンクリートの負担する計算せん断耐力(V_c)は式(1)より61.8kNである。また、載荷は支点間距離1200mmの2等分3点単調載荷で行っており、無補強供試体の計算上のせん断破壊荷重は123.6kNとなる。

また、図-2(b)に示すように同一箇所に向きの異なるようにひずみゲージを貼付け、ひずみの測定を行った。

表-1 コンクリート示方配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (AE 減水剤)
25	8	50.5	44.4	155	307	801	1021	3.377

*1 倉敷紡績(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻

*3 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科 准教授 工博 (正会員)

*4 弘前大学 大学院理工学研究科 助教 工博 (正会員)

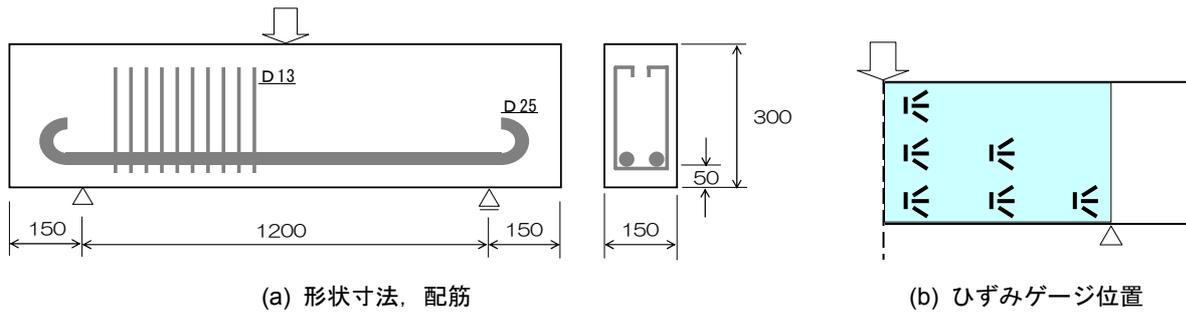


図-2 供試体概要図

表-2 多軸繊維シート編成条件

Name	編成条件 (角度・目付)	模式図
Sheet 0	0° (110 g/m ²) (Total 繊維量 : 110 g/m ²)	
Sheet +45/-45	+45° (110 g/m ²) /-45° (110 g/m ²) (Total 繊維量 : 220 g/m ²)	
Sheet 0/+45/-45	0° (110 g/m ²) /+45° (110 g/m ²) /-45° (110 g/m ²) (Total 繊維量 : 330 g/m ²)	

表-3 使用材料の機械的性質

コンクリート	圧縮強度	
	36.0 N/mm ²	
鉄筋	降伏強度	弾性係数
	345 N/mm ²	200 kN/mm ²
炭素繊維	引張弾性率	引張強度
	240 kN/mm ²	4900 N/mm ²

$$V_c = 0.2 \cdot (f_c \cdot P)^{1/3} \cdot (d/1000)^{-1/4} \cdot [0.75 + 1.4(a/d)] \cdot b \cdot d \quad (1)$$

- f_c : コンクリート強度 (=36.0 N/mm²)
- P : 鉄筋比 (=2.84%)
- d : 梁有効高さ (=237.5mm)
- a : 載荷スパン (=600mm)
- b : 梁幅 (=150mm)

これは、多軸繊維シートの編成繊維の方向とひずみの関係を検討することを目的としている。

2.2 実験ケース

多軸繊維シートの編成条件を表-2に示す。炭素繊維を所定量、所定の方向に引き揃えた、1軸、2軸、3軸の3水準の多軸繊維シートを準備した。繊維の編成角度は、鉛直方向を0°、水平方向を90°として表記した。

繊維シートの貼付けは、載荷スパン内の3面巻き(U字補強)とした。実構造物への適用を想定した場合、支承などにより全面閉合巻き補強が困難であることが予測されることから、本実験では3面巻き補強を適用した。貼付けに際し、グラインダーによる表面処理の後、エポキシ樹脂プライマーを塗布した。翌日まで静置養生の後、エポキシ樹脂により繊維シートを貼り付けた。その後、

7日間の養生の後、載荷試験を行った。なお、繊維シートが接する隅角部は半径約20mmで面取りした。

ここで、本実験に使用した各材料の機械的性質を表-3に示す。コンクリート強度は36.0N/mm²、鉄筋の降伏強度は345N/mm²である。炭素繊維は引張弾性率240kN/mm²、引張強度4900N/mm²のものを使用した。

3. 結果と考察

3.1 荷重-変位の関係

図-3に載荷試験により得られた荷重-変位曲線を示す。変位は供試体中央部下部の変位を測定した。また表-4に、最大荷重と最大荷重時の変位、および終局時の

表-4 試験結果

Name	最大荷重時		終局時	
	最大荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)
基準 (無補強)	127	1.32	—	—
<i>Sheet 0</i>	330	5.06	320	7.10
<i>Sheet +45/-45</i>	340	4.35	336	4.59
<i>Sheet 0/+45/-45</i>	360	5.27	361	7.32

荷重と変位をまとめた。なお、供試体がせん断破壊により耐力を失った時点で載荷を終了した。また、いずれの供試体もスターラップを配筋していない側で斜めひび割れの発生を伴うせん断破壊により終局した。

基準である無補強供試体が127kNでせん断破壊により終局に至ったのに対し、繊維補強を施した供試体はいずれも300kNを超える荷重でせん断破壊により終局した。各ケースの最大荷重は、*Sheet 0*が330kN、*Sheet +45/-45*が340kN、*Sheet 0/+45/-45*が360kNとなり、繊維シート編成条件で異なる結果が得られた。

最大荷重時の変位量は、*Sheet +45/-45*がもっとも小さく、次に*Sheet 0*、*Sheet 0/+45/-45*の順であった。*Sheet +45/-45*が脆性破壊するのに対し、*Sheet 0*、*Sheet 0/+45/-45*に関しては、最大荷重に達した後にほぼ一定の耐荷重を保った状態で変位量が增大する様子が観察された。このように、ポストピーク挙動が繊維シートの編成条件によって異なることは、多軸繊維シートによるせん断補強性能を評価する上で、興味深い項目になると考えられる。しかし、実験場の不備で集金のひずみデータが取得出来なかったため、*Sheet 0*と*Sheet 0/+45/-45*でみられたようなポストピーク以降の挙動を合理的に説明できなかった。また、*Sheet +45/-45*の剛性が高くなっている点について、本実験の範囲では説明することができなかった。以上については、追試を行い明らかにしていく予定である。

3.2 破壊性状

写真-1に載荷試験後の繊維シートのはく離状況を示す。ここでは、両側面の状況を示す。繊維シートに記した白色斜線部分が繊維シートのはく離箇所を示している。また、赤色点線はひび割れ位置を示し、点線で囲んだ部分は定着端部のはく離した部分を示す。*Sheet 0*では、両側ともにひび割れ上端部で定着はく離しており、定着端部のはく離破壊することで終局に至ったものと思われる。*Sheet +45/-45*については、片側面がひび割れから上側全体がはく離破壊したのに対し、反対側面はひび割れに沿って繊維が破断する破壊性状となった。これは、補強繊維が有効に働いている理想的な破壊性状と考え

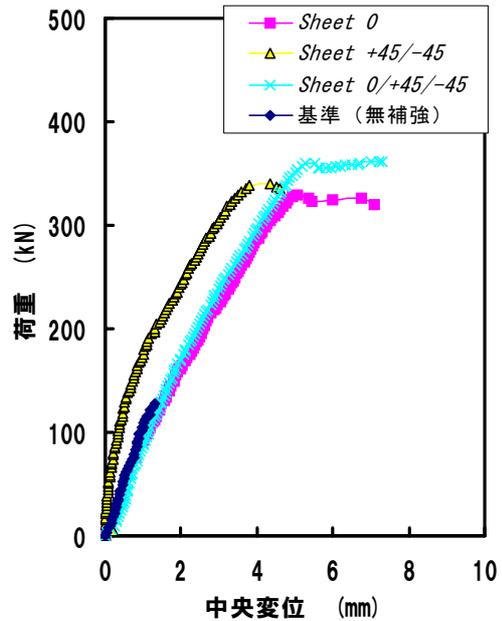


図-3 荷重-変位曲線

られる。*Sheet 0/+45/-45*は両側ともに定着端部のはく離破壊により終局に至った。なお、*Sheet +45/-45*、*Sheet 0/+45/-45*の両ケースは最大荷重時での変位は観察されず、終局時に前述した繊維シートのはく離/破断を伴い耐力が低下した。定着端部のはく離破壊と繊維の破断による破壊の違いは、繊維シートとコンクリートとのせん断付着強さと繊維の引張強さの関係に因ると考えられる。従って、多軸繊維シートのコンクリートせん断付着特性を明らかにすることで、定着端部のはく離破壊を引き起こさないせん断補強に最適な多軸繊維シートが設計できるものと期待できる。前述のポストピーク挙動と考え合わせると、3軸タイプの多軸繊維シートにおいて補強繊維を有効に活用し、かつ脆性的な破壊を抑制する補強が可能になると考えられる。なお、本実験は3面巻き補強であり、閉合巻きや機械定着を施す場合には異なる結果となると推測される。

3.3 せん断補強性能

表-5に、載荷試験により明らかとなった補強耐力と、

計算により算出した繊維シートの負担するせん断耐力 V_f を示す。実験により得られた補強耐力は、各ケースの最大荷重から、基準となる無補強供試体の最大荷重を減じた値とした。また、補強せん断耐力は、反力 (P) とせん断耐力 (V_u) の関係 ($V_u = P/2$) から算出した。

また、繊維シートの受け持つ設計計算耐力は式(2)により算出した。**Sheet +45/-45** については、斜めせん断ひび割れと交差する片層のみが効いていると仮定した。**Sheet 0/+45/-45** は、**Sheet 0+Sheet +45/-45** の構成であると考え、 0° 方向層と一方の斜め 45° 層が効いていると仮定した。なお、式(2)は閉合巻き補強時のシートが負担するせん断耐力の設計式⁴⁾であり、既往の研究⁵⁾から3面巻き補強のせん断耐力を閉合巻き補強の60%として算出した。

$$V_f = K \cdot f_{fu} \cdot 2t_f (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot Z \quad (2)$$

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

$$R = (\rho_f \cdot E_f)^{1/4} \left(\frac{f_{fu}}{E_f} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{f_c'} \right)^{1/3} \quad (0.5 \leq R \leq 2.0)$$

$$\rho_f = 2 \cdot t_f / b$$

$$Z = d / 1.15$$

f_{fu} : 炭素繊維引張強度 (=4900 N/mm²)

t_f : 繊維シート厚さ (=0.056mm)

α : 繊維の編成が部材軸となす角度
(=90° (0° 方向編成))
(=45° (45° 方向編成))

E_f : 炭素繊維弾性率 (=240 kN/mm²)

f_c' : コンクリート強度 (=36.0 N/mm²)

b : 梁幅 (=150 mm)

d : 梁有効高さ (=237.5 mm)

設計値に比べ、実験値から算出したせん断補強耐力が大きく上回る結果となった。特に **Sheet 0** に関しては、既往の設計式(2)に良く一致するとの推測であったが、予想外の結果となった。無補強供試体の破壊荷重からの増分が既往の研究^{5),6)}と比較して高く、供試体の設計(形状、配筋)を含め更なる検討を行う必要があると考えられる。

斜め方向に編成した繊維シートについて、ここでは斜

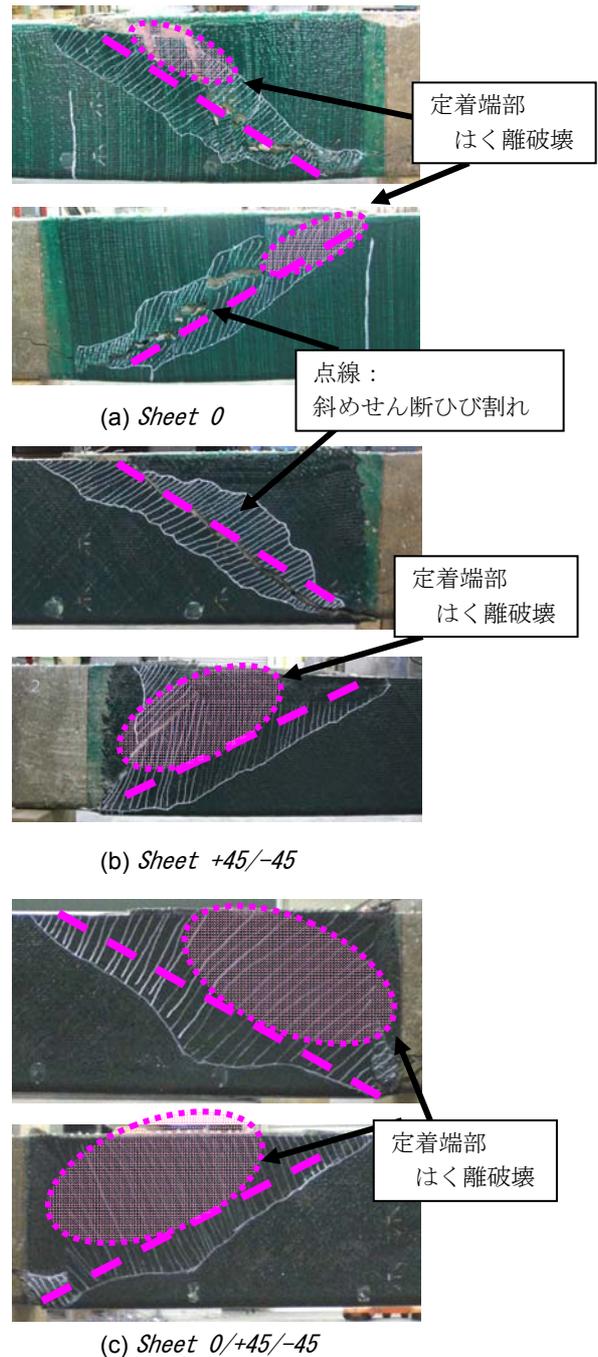


写真-1 繊維シートはく離状況

表-5 せん断補強性能

Name	実験値		計算値 V_f (kN)
	補強耐力 (kN)	補強せん断耐力 (kN)	
Sheet 0	203	101.5	47.6
Sheet +45/-45	213	106.5	67.3
Sheet 0/+45/-45	233	116.5	114.9

* 無補強供試体：破壊荷重 127 kN (設計せん断破壊荷重 123.6 kN)

めひび割れと交差する方向の繊維のみが効いているとの仮定で算出した。しかし、写真-1 に示した繊維シートの破壊性状において、ひび割れに沿って繊維が破断したケースと、定着端部のはく離を引き起こしたケースが混在していることから、繊維の編成方向によるせん断補強への効果に関しては、さらなる検討の必要性があると考えられる。

ここで表-6 に本実験の補強効率の実験値を示す。補強効率は実験値から算出した補強せん断耐力を、式(2)における係数 K を $K=1$ とした場合の計算値で除した値とした。3面巻きにもかかわらず既往の研究⁵⁾に比べ補強効率の実験値が非常に高くなっており、既往の計算式

(2)による評価では一致しない結果となった。一方で、このような高い補強効率を発現した原因について、本実験の範囲内で検討することは困難であるとする。引き続き、せん断付着特性の検討や材料試験を行い、評価手法の検討を行う。

表-6 せん断補強効率の実験値

Name	補強効率の実験値
Sheet 0	0.90 (=101.5/113.3)
Sheet +45/-45	0.66 (=106.5/160.3)
Sheet 0/+45/-45	0.43 (=116.5/273.6)

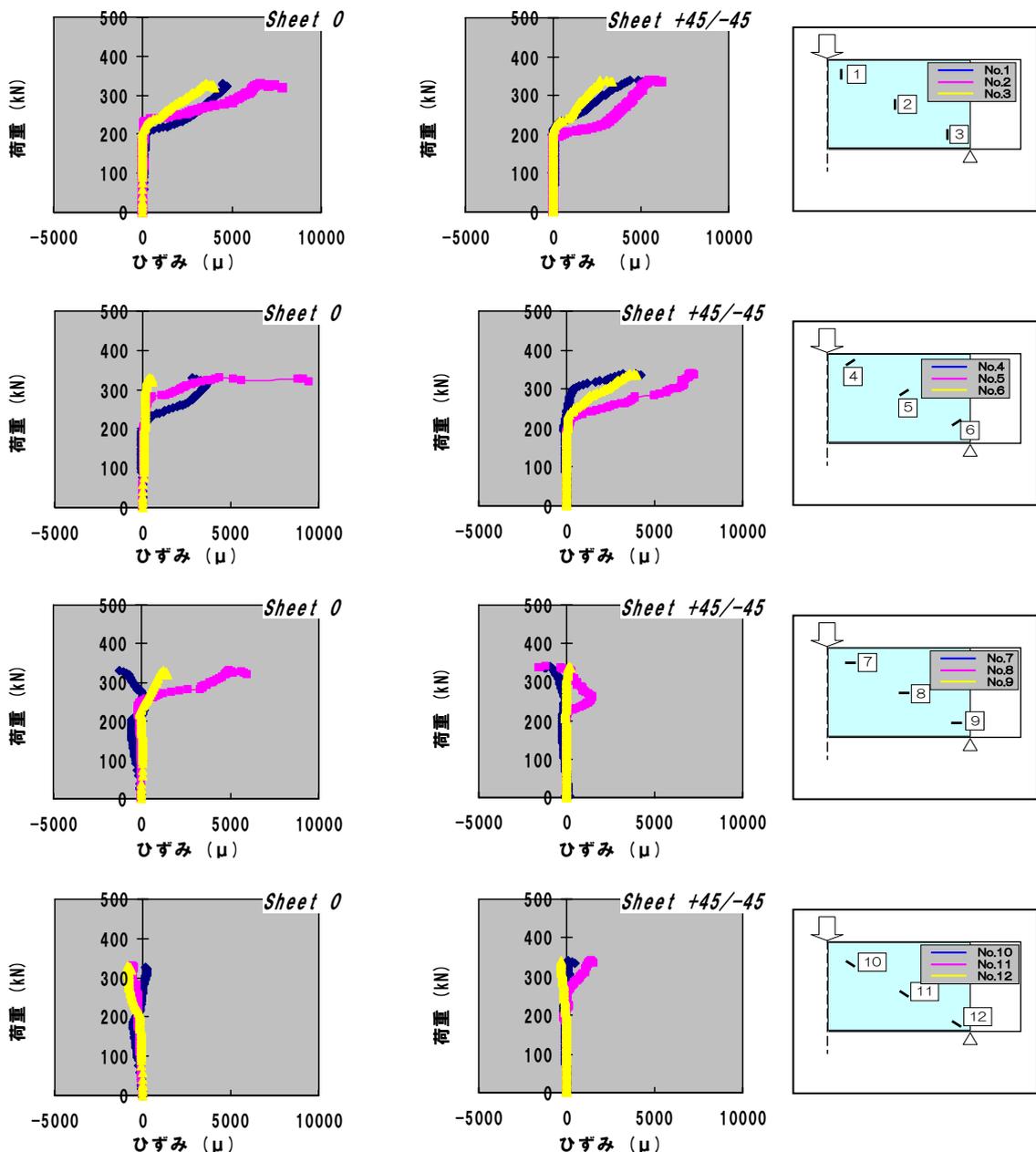


図-4 荷重-ひずみの関係

また、連続繊維がひび割れと直交あるいは斜交するケースや、直交と斜交が相互に作用するケースなど、各層がどのように応力を負担するか力学特性を検討することも必要と考えている。

3.4 荷重－繊維シートひずみ関係

図－4 にせん断ひび割れ発生近傍に取り付けたひずみゲージにより得られたひずみと荷重の関係を示す。ここでは、繊維シートの編成条件の違いが、各方向に貼り付けたひずみゲージの値にどのように反映されるかを比較検討することを目指した。なお、*Sheet 0* の繊維はゲージ No.1, 2, 3 と平行、*Sheet +45/-45* の外層側の繊維はゲージ No.4, 5, 6 と平行である。また、せん断ひび割れは載荷点と支点を結んで発生しており、ひずみゲージの貼り付け位置とほぼ合致している。なお、図－4 では *Sheet 0* と *Sheet +45/-45* について図示する。*Sheet 0/+45/-45* に関しては紙面の都合上割愛する。

ひずみ量が急激に変化している荷重でせん断ひび割れが発生したと考えると、せん断ひび割れ発生荷重は両ケースともに 200kN を超えるものであった。なお、ひずみゲージ No.3 に着目すると、ひずみが 1000 μ を超える荷重は、*Sheet 0* が 250kN、*Sheet +45/-45* が 248kN であり、同等であった。

次に、支点近傍のせん断ひび割れと直交する方向のひずみ（ゲージ No.6）をみると、*Sheet 0* ではひずみに大きな変化が見られないのに対し、*Sheet +45/-45* では 200kN を超えたあたりで大きくなっているのがわかる。繊維シートのひずみが小さいことは、繊維シートが負担する応力が小さいためと考えられ、*Sheet 0* の支点近傍はせん断補強に対し有効に働いていないと推測される。

圧縮縁の 90° 方向ひずみ（ゲージ No.7）では、荷重 280kN 付近からひずみがマイナス側となっている。これにより、荷重の増加につれて中立軸が上昇し、コンクリートが圧縮力を受けている様子が推察される。また、*Sheet +45/-45* のゲージ No.8 をみると、250kN 付近から圧縮側に転じている。同箇所の異なる方向のゲージ（No.2, 5, 11）も 250kN 付近でひずみが急激に変化しており、ひび割れが開口したか、あるいは近辺の繊維シートのはく離が発生したものと考えられる。

さらに、せん断ひび割れと同方向のゲージ No.10, 11, 12 は、予想通りひずみの変化が小さく、他のひずみゲージと比較すると、繊維の方向性による違いが顕著に現れない結果となった。

このように、ひずみデータにおいても各繊維シートの特徴が現れることを掴んだが、測定するひずみの方向と繊維の方向の関係をよく加味して検討する必要のあることがわかった。また、多軸繊維シートに作用するせん断付着応力とひずみの関係については明らかにできて

おらず、今後の検討課題であるとともに、この関係を明確にすることで本実験により得られたデータをより詳細に検討できるものとする。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 多軸繊維シートの 3 面巻き補強により、RC 梁のせん断補強効果があることがわかった。
- (2) 載荷試験の荷重－変位関係から、多軸繊維シートの編成条件によってポストピーク挙動が異なることをつかんだ。
- (3) せん断ひび割れに直交する方向に繊維を編成することにより、繊維シートの定着端部のはく離破壊を引き起こさず、繊維を有効に活用できる可能性を見いだした。
- (4) 繊維シートの負担するせん断耐力に関する既往の設計式では、斜め方向に編成した多軸繊維シートのせん断耐力を試算するには適していないと考えられる。
- (5) コンクリート付着特性などの検討を行い、既往の評価手法への適合性の検討と、新たな評価手法を検討することが課題と考える。

参考文献

- 1) 例えば、村橋久弘ほか：連続繊維による補修／補強－炭素繊維・アラミド編一，理工図書，2000
- 2) 堀本 歴，宮里心一，保倉 篤：多軸繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.343-348，2005
- 3) 堀本 歴，星野章仁，宮里心一：多軸炭素繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.483-488，2007
- 4) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000
- 5) 宮島英樹，幸左賢二，杉岡弘一，富松康秀：RC 梁の炭素繊維シート 3 面巻き補強に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1435-1440，2005
- 6) 中島規道，三上 浩，田村富雄，平井正雄：RC 梁のせん断耐力に与えるアラミド繊維シートの貼付形状の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1411-1416，2002