

多軸繊維シートによる RC 梁のせん断補強に関する実験的研究

Experimental study on shear reinforcement properties of RC beam with multiaxial fiber sheets

堀本歴*, 上原子晶久**, 宮里心一***

Wataru Horimoto, Akihisa Kamiharako, Shinichi Miyazato

*倉敷紡績株式会社 技術研究所 (〒572-0823 大阪府寝屋川市下木田町 14 番 5 号)

**弘前大学大学院 理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町 3 番地)

***金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科 (〒921-8501 石川県野々市町扇が丘 7-1)

The multiaxial fiber sheet has features to arrange the continuous fiber in parallel with angling variously. This paper is to conduct experimental study on shear reinforcement of RC beam with the sheet. About 3-types carbon fiber multiaxial sheets (uni-axial, bi-axial, tri-axial), the effects of shear reinforcement is confirmed by U-shaped (3-side adhesive) and closed-shaped examination. The carbon fiber / polyethylene fiber hybrid multiaxial sheets enable to improve the ductility in addition to shear reinforcement.

Key Words: multiaxial fiber sheet, shear reinforcement, RC beam

キーワード: 多軸繊維シート, せん断補強, RC 梁

1. はじめに

連続繊維シートによる鉄筋コンクリート構造物の補修・補強は、狭小空間での作業が可能であり施工に重機が不要であるなどの作業性の優位性や、構造物自重の増加が小さいことなどが特徴であり、これまでに多くの研究がなされ、その研究成果をもとに様々な工法が確立されている。それらは、梁や柱の曲げやせん断耐力、曲げ疲労、床版の押し抜きや柱の靱性補強など、広範囲にわたっており、それぞれの目的に応じた評価設計手法が提案されている。

筆者らは、繊維の編成方向をある程度任意に設定できる「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な実験的研究を行ってきた。¹⁾「多軸繊維シート」は、例えば図-1 に示すような構成とした場合には、繊維の軸方向が 4 方向であり、面内では擬似的な等方性材料として扱うことができる。一方で、繊維の編成方向、量を必要性に応じて設定することにより、補強対象物に最適な繊維シートとして設計することも可能である。

本論文では、「多軸繊維シート」による梁部材のせん断補強に関する実験的研究を行った。これは、梁部材のせん断補強において、繊維シートに作用する部材軸直行方向の引張力に加えて、斜めせん断ひび割れに対して「多軸繊維シート」の斜め方向に編成した繊維が有効に働くことを期待したものである。

2. 実験概要

実験概要として、実験に供した多軸繊維シートの種類、および梁部材の設計条件を述べる。

2.1 多軸繊維シート編成条件

実験に供した多軸繊維シートの編成条件（繊維の方向および各層の繊維量）を表-1 に示す。本研究では、炭素繊維（CF）および高強度ポリエチレン繊維（PeF）を用いた。炭素繊維に関しては、1 軸、2 軸、3 軸の 3 タイプの編成において、それぞれ各層の繊維量を 110g/m^2 , 220g/m^2 としたケースを編成した。また、PeF による 1 軸シート（PeF0(145)）および 2 軸シート（PeF±45(145)）を編成した。さらに、CF と PeF を組み合わせ合わせたハイブリッドシートを 2 タイプ編成した。このハイブリッドシートは、その構成が CF シートと PeF シートの積層となるように設計したものである。なお、繊維の編成角度は RC 梁部材の軸直交方向を 0°

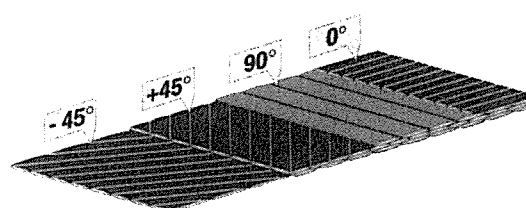


図-1 多軸繊維シート模式図

表-1 多軸繊維シート編成条件

繊維種類	繊維方向	Name	編成条件
炭素繊維	1 軸	CF0(110)	0°(110g/m ²)
		CF0(220)	0°(220g/m ²)
	2 軸	CF±45(110)	+45°(110g/m ²)/-45°(110g/m ²)
		CF±45(220)	+45°(220g/m ²)/-45°(220g/m ²)
	3 軸	CF0/±45(110)	0°(110g/m ²)/+45°(110g/m ²)/-45°(110g/m ²)
		CF0/±45(220)	0°(220g/m ²)/+45°(220g/m ²)/-45°(220g/m ²)
有機繊維	1 軸	PeF0(145)	0°(145g/m ²)
	2 軸	PeF±45(145)	+45°(145g/m ²)/-45°(145g/m ²)
ハイブリッド	3 軸	CF0/PeF±45	CF 0°(220g/m ²)/PeF +45°(145g/m ²)/PeF -45°(145g/m ²)
		PeF0/CF±45	PeF 0°(145g/m ²)/CF +45°(220g/m ²)/CF -45°(220g/m ²)

方向として表記する(図-2)。すなわち, CF0/PeF±45 は, CF を 0° 方向に 220g/m², PeF を +45° および -45° 方向に 各々 145g/m² 編成した 3 軸シートである。また, 補強対象物への貼付けは, 呼称の先頭側がコンクリートに接するように, 例えば CF0/±45(110) の場合は CF0° (110g/m²) 層がコンクリートに接するように貼り付けた。なお, 使用した繊維の諸物性は表-2 に示す通りである。

2.1 供試体概要

コンクリートの示方配合を表-3 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。載荷試験時のコンクリート強度は 36.0~43.0N/mm² であった。

図-3 に供試体の形状寸法, 配筋を示す。梁高さ 300mm, 幅 150mm の単純梁とし, 引張鉄筋は D25 を かぶり 50mm の位置に 2 本配置した。主筋比は 2.84% である。なお, せん断ひび割れの発生する半スパンをコントロールする目的で, 片側半スパンにはスターラップを配筋した。コンクリート, 鉄筋の機械的特性は表-4 に示す通りである。

本供試体のコンクリートの負担するせん断耐力 (V_c) は式 (1) から 61.8kN~66.0kN である。コンクリ

ート強度の差がもたらす V_c の差は約 4kN であり, この

差は比較検討の妨げにはならないと判断した。なお, 試験は支点間距離 1200mm の 2 等分 3 点静的載荷で行

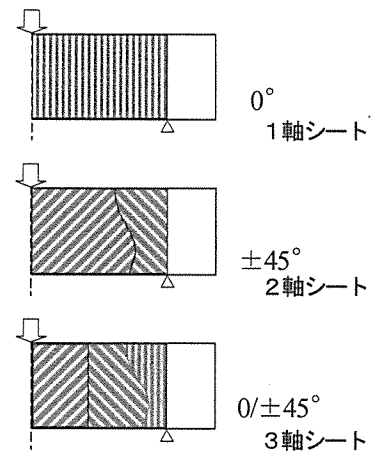


図-2 繊維シート編成概要図

表-2 繊維の諸物性

	引張弾性率 (GPa)	引張強度 (MPa)	破断 ひずみ (%)	密度 (g/cm ³)
CF	240	4,900	2.0	1.82
PeF	88.2	2,700	3~5	0.97

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~132.0kN である。

表-3 コンクリート示方配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (AE 減水材)
25	8	50.5	44.4	155	307	801	1021	3.377

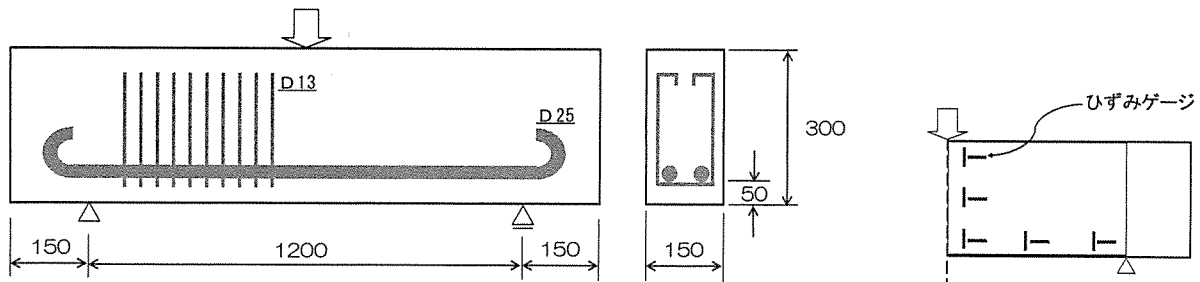


図-3 供試体形概要図

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

f'_c : コンクリート強度

P : 主筋比

d : 梁有効高さ

a : 載荷スパン

b : 梁幅

本供試体の設計せん断破壊荷重と設計曲げ降伏荷重を表-5 に示すとおりである。

繊維シートの貼付けは載荷スパン内とし、供試体上縁でラップ（ラップ長さ 150mm）させた閉合巻きと、3面巻き（U字）の2ケースとした（図-4）。3面巻きは、実構造物への適用の際に支承物などの影響により全面閉合巻きや、機械的な端部定着が困難となる場合を想定したケースである。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含浸接着した。貼付け後、7日間の養生の後、載荷試験を行った。繊維シートが接する隅角部は半径約 20mm で面取りを施した。なお、プライマー、含浸接着樹脂のメーカー公称値は表-6 に示す通りである。

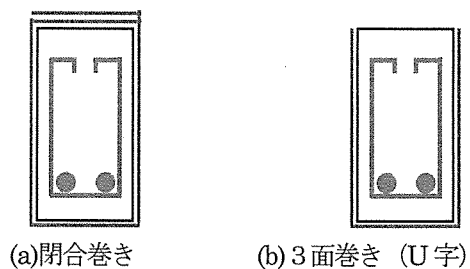
載荷試験中は、供試体スパン中央部に設置した変位計および、図-3 に示す位置に貼り付けたひずみゲージによるデータをモニタした。また、供試体が負担する荷重はロードセルから得られるデータをモニタした。

表-4 コンクリート、鉄筋の機械的特性

コンクリート	圧縮強度	
	36.0～43.0 N/mm ²	
鉄筋	降伏強度	弾性率
	345 N/mm ²	200 kN/mm ²

表-5 供試体の設計破壊荷重

せん断破壊荷重	123.6～132.0 kN
曲げ降伏荷重	239.6 kN



(a)閉合巻き

(b)3面巻き（U字）

図-4 繊維シート貼付け図

表-6 プライマー、含浸接着樹脂の力学特性

プライマー	曲げ強さ	40 N/mm ² 以上
	引張強さ	20 N/mm ² 以上
含浸接着樹脂	曲げ強さ	40 N/mm ² 以上
	引張強さ	30 N/mm ² 以上

表-7 実験ケースと載荷試験結果

シート種類	補強方法	項目		
		最大荷重 (kN)	終局時変位 (mm)	終局時におけるシートの破壊状態
CF0(110)	3面	333	6.76	せん断ひび割れ付近で繊維シート破断
CF0(220)	閉合	351	15.34	シートはく離後、上縁部繊維破断
	3面	339	8.87	定着端部はく離破壊
CF±45(110)	閉合	338	4.76	せん断ひび割れ付近で繊維シート破断
	3面	346	4.59	せん断ひび割れ付近での繊維破断
CF±45(220)	閉合	415	19.93	全面はく離破壊
	3面	370	6.54	定着端部はく離破壊
CF0/±45(110)	閉合	350	7.74	シートはく離後、片側上縁部、片側せん断ひび割れ付近での繊維破断
	3面	360	7.16	定着端部はく離破壊
CF0/±45(220)	3面	394	6.83	定着端部はく離破壊
無補強	—	127	1.32	—

3. 実験結果と考察

3.1 補強方法の違いがせん断耐力に及ぼす影響

本節では、炭素繊維を用いて編成した多軸繊維シート補強における補強方法（繊維シートの貼付け方法）の違い、すなわち閉合巻き補強と3面巻き補強との違いが、せん断耐力に及ぼす影響について比較検討を行う。

実験ケースおよび載荷試験結果を表-7 に示す。載荷試験により得られた結果として、最大荷重、終局時の鉛直方向変位、および終局時における繊維シートの破壊状態を記した。なお、本研究では曲げ載荷により耐力を完全に失った状態を終局状態として定義した。

まず、終局時における繊維シートの破壊状態に着目し、特徴的なケースの破壊状態を写真-1 に示す。CF0(220) と CF0/±45(110) は3面巻きでは定着端部からのはく離によって破壊したのに対し、閉合巻きでは繊維シートの破断が耐力の低下を誘発した。これは、繊維シート端部の定着状態の違いが破壊性状に現れたケースである。一方、CF±45(110) は閉合巻き、3面巻き共にせん断ひび割れ付近にて繊維が破断することにより終局に至った。これは、繊維シートの破断強度よりも、3面巻きにおける繊維シート定着端部の付着強度の方が強いことを示している。繊維シート破断により終局に至る状態は、従来の繊維シート補強の考え方からすると繊維量が不足しており、適切な繊維量での補強がなされていないとされる。

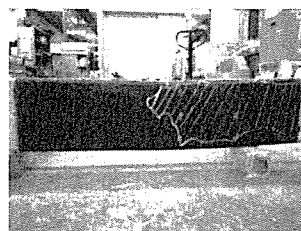
ここで、CF0(220) 3面巻きとCF±45(110) 3面巻きを比較すると、シート破壊性状は異なるが最大荷重はほぼ同じである。つまり、本実験結果によると、補強



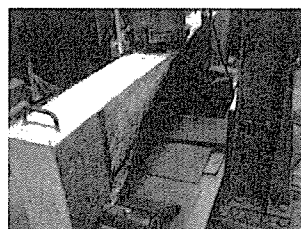
CF0(110)
3面巻き



CF0/±45(110)
閉合巻き



CF±45(220)
閉合巻き



CF±45(220)
3面巻き

写真-1 繊維シート破壊性状

方法の違いや繊維シートの破壊状態の違いがその最大強度に与える影響はほとんどないといえる。

次にCF±45(220) は、CF±45(110) に対して繊維量を多く設計したタイプであるが、繊維シートが破断せず、閉合巻きでは半スパン全面のはく離破壊、3面巻きでは定着端部のはく離破壊がみられた。このケースでは図-5 に示す荷重－鉛直変位の関係のように、閉合巻き補強において鉛直方向変位が非常に大きくなった。これは、載荷試験中に、繊維シートのはく離が徐々に進展する様子が観察されたことから、はく離面積の拡大とともに鉛直変位が増加し、最終的にはく離面積が半スパン全面に到達した時点で耐力を失ったと考えられる。また、鉛直変位が大きくなったため、コンクリートの圧縮による影響が大きくなり、破壊荷重が高くなったと考えられる。

次にせん断補強効果として、最大荷重に着目する。繊維シート補強を施していない無補強供試体の実験値が127kNであり、設計値と一致していることを確認した。また、主鉄筋に設置したひずみゲージの値から、いずれの供試体も250kN付近で鉄筋が降伏ひずみに達することを確認した。繊維シート補強を施した供試体の最大荷重は、CF±45(220) の閉合巻きを除き、約350kNであった。

以上は、端部定着を考慮した閉合巻きと、定着端部を自由端とした3面巻きとの補強効率を明確にする当初の目的を満足できない結果である。また、先に触れたように繊維シートがひび割れ近傍で破断することで終局に至るような繊維量が不足している状態や、3面巻きによる補強効率は閉合巻きの0.6倍程度であるとする研究成果²⁾に反し、繊維シートの積層数や補強方法に依らずせん断補強効果がほぼ同等であることを示す結果となった。このように繊維シートのはく離破壊、繊維シートの破断に関係なく最大荷重が同等となった点については、次のように考察する。

1軸シートCF0(220) について、土木学会の指針³⁾に従って検討する。指針では繊維シートが負担するせん断耐力 V_f を次式により評価する。なお、多軸繊維シート

によるせん断補強については、評価式(2)による算定の適合性に疑問があるため⁴⁾論じていない。

表-8 に式(2)により算出した、繊維シート補強による設計せん断耐力を示す。3面巻きの場合は、閉合巻きの0.6倍とした。また、実験から求めたせん断耐力も併せて示した(繊維補強供試体の破壊荷重から無補強供試体の破壊荷重を減じ、半スパンの耐力とするため、1/2倍した)。さらに、繊維補強後の供試体のせん断余裕度を、閉合巻き、3面巻き双方について、設計耐力および実験耐力から算出した。

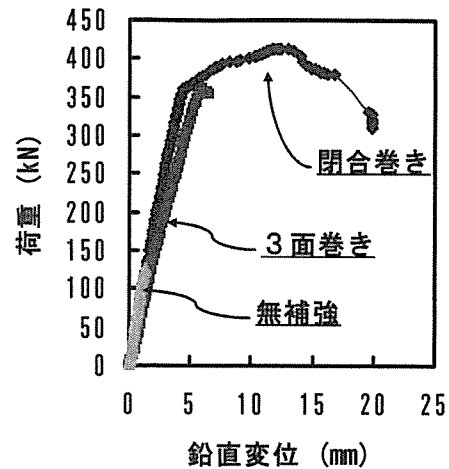


図-5 荷重－変位曲線 (CF±45(220))

表-8 せん断耐力とせん断余裕度

		せん断耐力 (kN)		せん断余裕度	
		設計	実験	設計	実験
CF0(220)	閉合	158.7	112.0	1.87	1.46
	3面	95.2	106.0	1.35	1.41

$$V_f = K \cdot [A_f \cdot f_{fu} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s_f] \cdot z / \gamma_b \quad (2)$$

K : せん断補強効率

$$K = 1.68 - 0.67R \quad (0.4 \leq K \leq 0.8)$$

$$R = (\rho_f \cdot E_f)^{1/4} \left(\frac{f_{fu}}{E_f} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{f^{1cd}} \right)^{1/3}$$

$$\rho_f = A_f / (b_w \cdot s_f)$$

既往の研究においては、繊維シートが負担するせん断耐力を正確に評価するため、繊維補強後のせん断余裕度が1.0を下回るよう設計されることが主流であった。一方で、実構造物への適用を考えた場合、せん断耐力の不足している被補強構造物に繊維シート補強を施すことでせん断余裕度を改善する。

表-8 によると、閉合巻きによる設計せん断余裕度は1.87、3面巻きは1.35である。一方、実験結果から求めたせん断余裕度は閉合、3面ともに1.4程度である。3面巻きは精度良く評価できているが、閉合巻きでは危険側の評価となっている。本実験ケースの結果のみで論ずるのは早急であるが、本供試体条件のような、せ

ん断スパン比が2.5となるような梁部材においては、繊維シートによってせん断補強される上限が、せん断余裕度1.4程度となる可能性が考えられる。つまり、供試体条件によっては、せん断耐力を向上させるための繊維シートの積層数の増加が期待されるほどの効果を発揮することができない可能性がある。被補強構造物を適切に評価し、最適な繊維量を定めることが、効率的な繊維補強を行う上で重要であることを示していると思われる。

ただし、本実験供試体ではせん断破壊を誘発させる半スパンにはせん断補強筋を配しておらず、そのため繊維シートの負担するせん断耐力が大きいことを留意する必要があると思われる。また、本研究における繊維シート補強を施した供試体の曲げ載荷では、曲げひび割れが先行し、最終的にせん断破壊により終局に至る破壊性状となっている。また鉛直変位が大きいケースでは、供試体上縁部のコンクリート圧壊による影響も受けていると思われる。このように、複数の破壊モードが混在した点も、留意すべき点と思われる。

3.2 炭素繊維／有機繊維ハイブリッド繊維シートによるせん断補強性能

ここでは、CFおよびPeFにより編成した繊維シートによるせん断補強性能について、実験的に得られた結果を述べる。

ハイブリッド繊維シートの構成要素をCFシートとPeFシートに分割し、各構成シートによるせん断補強実験もあわせて行った。なお、本節では閉合巻きによる補強を採用した。これは、定着端部を自由端とした場合、繊維シート端部からのはく離破壊を引き起こす可能性があり、繊維シートの特徴を十分に発揮できないまま終局に至る可能性を懸念したためである。

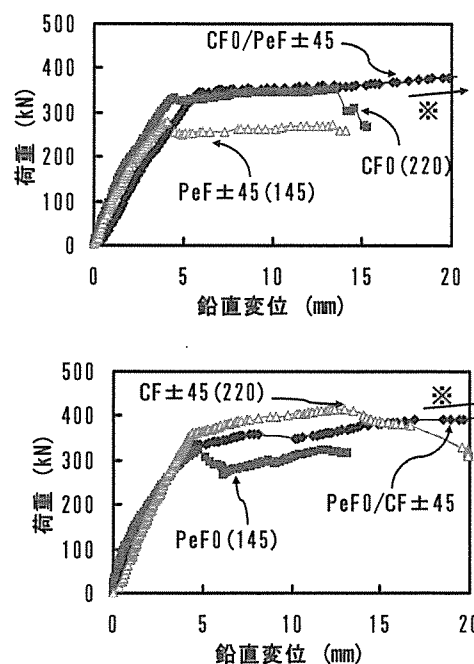
実験ケース、結果を表-9に示す。また、荷重-変位曲線を図-6に示す。破壊荷重とは、荷重-変位曲線において、荷重の増加割合が著しく変化した、あるいは荷重が一旦低下した時点の値である。PeFシートによる補強は比較的耐荷重が低い傾向がみられるが、前節で述べたように、各ケースの耐力は概ね同レベルであると言える。

荷重-変位曲線から見て取れるように、ハイブリッドタイプによるせん断補強では、鉛直方向変位が著しく大きく、靱性的な挙動を示した。なお、本実験で利用した変位計の測定限界が20mmであり、それ以上の計測ができていない。CF0/PeF±45については、供試体スパン中央部の鉛直変位が20mmを超えても載荷を継続し、試験中の目視による観察にて変位40mm程度まで載荷を行った。鉛直変位40mmの時点で、供試体上縁部が圧壊の様相を示していたが、実験における安全上の理由により載荷を中止し、供試体を破壊に至らしめる

表-9 ハイブリッドシートのせん断実験結果

	破壊荷重* (kN)	破壊荷重 時変位 (mm)	終局変位 (mm)
CF0/PeF±45	347	5.91	20 以上
CF0(220)	331	4.47	15.34
PeF±45(145)	280	4.10	14.08
PeF0/CF±45	341	4.33	20 以上
PeF0(145)	322	4.75	13.14
CF±45(220)	361	4.61	19.93

※鉛直変位が急増あるいは荷重が一旦低下した荷重



※ 鉛直変位が測定限界を超える

図-6 荷重-変位曲線（ハイブリッド繊維シート）

ことができなかった。一方、PeF0/CF±45も鉛直変位が20mmを超える結果ではあったが、20mmを超えて間もない時点で圧壊に起因すると思われる耐力の低下がみられた。靱性的な挙動に着目した場合、CF0/PeF±45の方が優れている結果であった。これは、コンクリートに接するように鉛直方向への引張剛性の高いCFを配し、外層にPeFを編成することによって、繊維シートの破断が起因となる面外変形を靱性の高いPeFが抑制するように働いたためと考えられる。

繊維シート補強によるせん断補強効果が耐力の増加であると考えた場合、CF単独編成とハイブリッド編成による顕著な有意差はみられない。これは、前述した

ように、本供試体条件においては繊維シートによるせん断補強に限界があることによると思われる。特筆すべきは、鉛直変位の劇的な増加、すなわちせん断耐力の向上に加えて靱性的な挙動を示した点である。先に、せん断補強において適切な繊維量を定めることが重要であると述べたが、加えて繊維シートの編成条件を検討することにより、コンクリート構造物のポストピーク挙動に重要な役割を果たすことの可能性を示す結果であると考えられる。

ここで、 $CF0/PeF\pm45$ の破壊性状を写真-2 に示す。繊維シートのはく離範囲が、せん断ひび割れ発生側の半スパンに留まらず、スパン間全域に広がっている様子がわかる。繊維シートのはく離箇所は、健全部と比較して白っぽく変色しており、このことは打音に頼らず目視にて繊維シートの浮きを調査できる可能性を示唆するものである。また、繊維シートを引き剥がしてコンクリート面を観察すると、明らかなせん断ひび割れを確認することができず、曲げひび割れおよび圧壊によるひび割れを確認することができた。前節で述べた炭素繊維多軸繊維シートによるケースではいずれも終局はせん断破壊であり、ハイブリッドタイプは靱性能力が向上したことによって、特徴的な破壊性状、補強効果が現れたものと言える。

また、 PeF のみで編成した $PeF0(145)$ では、载荷試験中の観察において特徴的な現象がみられた。写真-3 に示すように、载荷中にひび割れの発生箇所が白く変色し、ひび割れの発生状況を観察することができた点である。繊維シートを貼り付けることによるコンクリート構造物の補強工法においては、補強後のコンクリートの変状を目視観察できないことが欠点とされる場合がある⁹⁾。本ケースの実験結果によって、被補強対象物の下地コンクリートの変状をモニタリングできる繊維シート補強の新たな可能性に言及することができる。ただし、本研究においては、このような現象を予測していなかったため、コンクリートに発生したひび割れの幅や $PeF0(145)$ シートのひずみなどと、変状を示唆する繊維シートに現れる模様との関係については評価できていない。これらの関係を調査研究することで、繊維シート補強のあらたな可能性を見いだすことに繋がると期待される。

なお、炭素繊維およびハイブリッド多軸繊維シートともに定量的なせん断補強効果の検証には至っていない。コンクリートとの付着特性を的確に評価し、せん断補強の定量評価を行うことが今後の課題である。

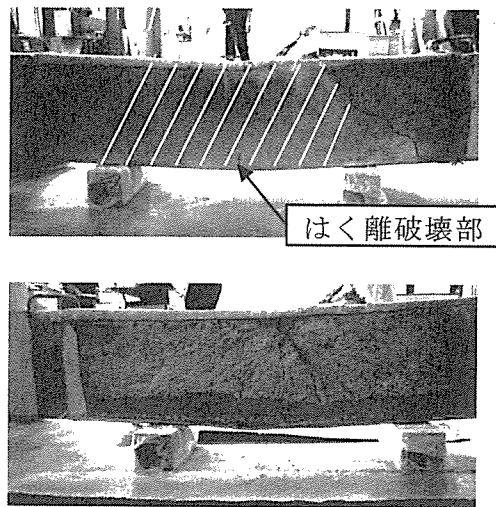


写真-2 繊維シート破壊性状 ($CF0/PeF\pm45$)

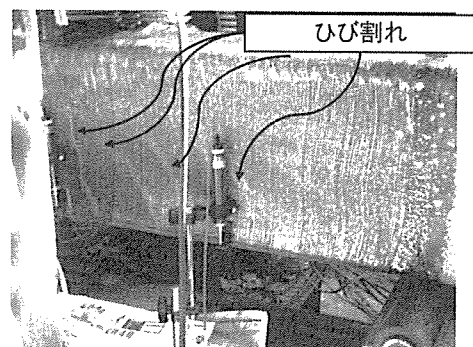


写真-3 繊維シートに現れたひび割れ模様 ($PeF0(145)$)

4. まとめ

本研究では、多軸繊維シートによる鉄筋コンクリート梁部材のせん断補強に関する実験的検討を行った。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 炭素繊維により編成した多軸繊維シート補強により、RC梁のせん断耐力が向上する。
- 2) 炭素繊維とポリエチレン繊維を組み合わせたハイブリッド多軸シートについても、せん断補強効果を有する。
- 3) ハイブリッド多軸シートは、せん断補強に加えて靱性の向上にも寄与する。
- 4) 多軸繊維シートによるせん断補強の定量評価を確立するため、コンクリートとの付着性状を適正に評価することが今後の課題である。

謝辞

本研究は、星野章仁氏（現 ㈱奥村組，元 金沢工業大学大学院）の博士前記課程における研究成果です。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 星野章仁，堀本 歴，宮里心一，上原子晶久：多軸繊維シートの貼付け位置がRC梁のせん断補強効果に及ぼす影響，土木学会第63回年次学術講演概要集，pp.691-692, 2008
- 2) 宮島秀樹，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
- 3) 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
- 4) 堀本 歴，星野章仁，宮里心一，上原子晶久：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30, No.3, pp.1513-1518, 2008
- 5) 独立行政法人土木研究所，清水建設株式会社，昭和高分子株式会社，倉敷紡績株式会社：新コンクリート剥落防止工の開発に関する共同研究報告書，共同研究報告書，第327号，独立行政法人土木研究所，平成18年3月