

論文 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

堀本 歴^{*1}・宮里 心一^{*2}・保倉 篤^{*3}

要旨：コンクリート構造物の補修・補強を行う方法の一つに連続繊維シートによる補強方法があり、多くの事例・研究がなされている。本研究では、繊維の方向を任意に設定でき、さらには任意の方向に設定した繊維層を最大4層積層することが可能な「多軸繊維シート」によるコンクリート部材の補強性能に関する基礎的研究を目的として、圧縮試験及び曲げせん断試験を行った。実験の結果、「多軸繊維シート」によるコンクリート補強の有用性を確認することができ、さらに「多軸繊維シート」の特徴の一つである斜め方向の繊維が破壊性状に及ぼす効果を明らかにした。

キーワード：多軸繊維シート，炭素繊維，繊維補強，圧縮試験，曲げせん断試験

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート構造物に対する連続繊維シートによる補修・補強工法の事例は多く、圧縮補強効果^{1),2)}、せん断補強効果^{3),4)}などに関する多くの研究がなされている。繊維シートによる補強については、多くの利点が挙げられるが、強度に方向性があることが長所でもあり短所にもなっている。つまり、一方向シートを複数層貼り付ける必要のある場合には工程数の増加に繋がり、また織物を繊維シートとする場合には繊維の方向が限定される。

そこで、繊維の方向をある程度任意に設定することが可能で、さらに角度を任意に設定した繊維層を最大4層積層し、1枚の繊維シートとして編成することが可能な「多軸繊維シート」を補強繊維とした場合には、例えば1枚の繊維シートで4方向の連続繊維を配することができ、有効な補強効果や工程数の低減に繋げることが期待できる。

本研究では、炭素繊維を用いた「多軸繊維シート」によるコンクリート部材の基礎的な補強性能を評価することを目的として、圧縮試験及び曲げせん断試験を実施し、「多軸繊維シート」

の特徴の一つである斜め方向の繊維の効果を明らかにした。

2. 実験概要

2.1 圧縮試験

供試体には、φ100X200mmの無筋円柱供試体を用いた。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20mmの粗骨材を用い、水/セメントを50%とした。スランプ3.5cm、空気量2.0%であった。28日間水中養生後、グラインダーによる表面処理を

表-1 コンクリート示方配合

Gmax (mm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
20	50	44.85	180	360	782	970

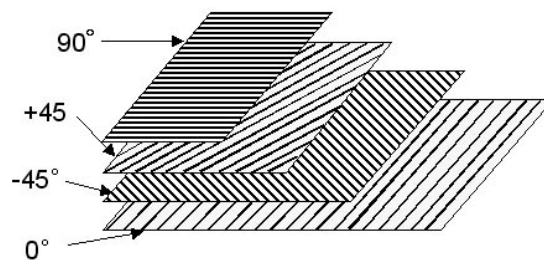


図-1 多軸繊維シート概念図

*1 倉敷紡績(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科 助教授 工博 (正会員)

*3 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻

表-2 実験ケース

供試体 No.	シート軸数	繊維方向 (繊維目付量(g/m ²))	貼付層数	圧縮試験	せん断試験
90-1	1	90° (220.5)	1	○	○
90-2	1	90° (220.5)	2	○	—
45/45-1	2	+45° (222.7)/-45° (222.7)	1	○	○
45+45-1	1	+45° (220.5) , -45° (220.5)	各 1 層	—	○
45/90/45-1	3	+45° (111.4)/90° (220.5)/-45° (111.4)	1	○	○
45/90/45-2	3	+45° (111.4)/90° (220.5)/-45° (111.4)	2	○	—
0-1	1	0° (220.5)	1	○	—
N	未補強供試体 (シート補強なし)		—	○	○

行い、エポキシ樹脂系プライマーを塗布した。翌日まで養生の後、エポキシ樹脂により繊維シートを貼り付けた。繊維シートは巻き始めと巻き終わりの端部を 100mm 重ね合わせるように、オーバーラップさせて貼り付けた。ここで、「多軸繊維シート」とは、複数の任意の角度に揃えた繊維層を 1 枚の繊維シートとして編成したものであり、例えば図-1 に示した概念図は、90° / +45° / -45° / 0° の 4 層を 1 枚のシート状に編成したものである。尚、圧縮試験では、供試体の円周方向を 90° 方向として表している。

実験ケースを表-2 に示す。例えば、供試体 45/45-1 の場合、+45° の方向に繊維量 222.7g/m² 揃えた層と、-45° の方向に繊維量 222.7g/m² 揃えた層を重ね合わせて 1 枚の 2 軸 (層) シートとしたものを補強シートとして貼り付けている。尚、圧縮試験の列に○印のあるケースについて試験を行った。載荷試験は JIS A 1108 に準じて実施した。また、図-2 に示すように供試体側面中央部に縦方向および横方向のひずみゲージを貼付け、軸方向圧縮ひずみおよび円周方向ひずみの測定を行った。

2.2 曲げせん断試験

コンクリートの配合、繊維シートの貼付手順は圧縮試験と同様の方法で行った。繊維シートは供試体の載荷スパン内の側面に貼付けており、供試体の鉄筋方向を 90° として表している。試験は表-2 のせん断試験の列に○印を記したケースについて実施した。図-3 に供試体の形状寸

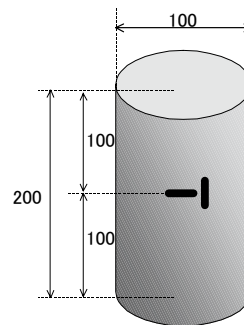


図-2 圧縮試験供試体概要

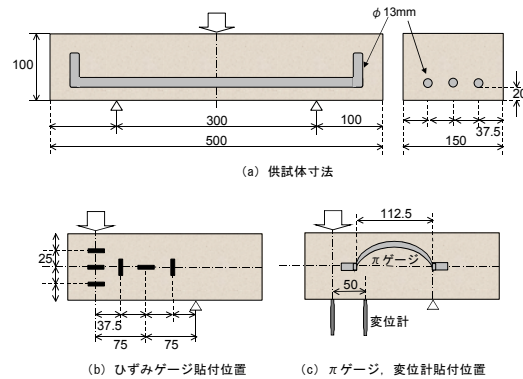


図-3 供試体概要図

表-3 使用材料の機械的性質

炭素繊維	引張強度	引張弾性率
	4.1 GPa	235 GPa
鉄筋	引張強度	降伏強度
	457 N/mm ²	330 N/mm ²
コンクリート	弾性率	
	33.1 kN/mm ²	

法、配筋およびひずみゲージの貼付け位置を示す。繊維シート中央部でのひずみ挙動を観察することを目的として、供試体高さの半分の位置にひずみゲージを貼り付けた。せん断補強についての評価試験であり、未補強供試体でせん断破壊させるため、φ13mmの鉄筋をかぶり厚20mmで3本配置した。載荷試験は、2等分中央点載荷にて実施した。また、図-3に示すように、ひずみゲージ、εゲージ、変位計を取り付け、ひずみ・変位の測定を行った。

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。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮試験

圧縮試験後の供試体の破壊状態を写真-1に示す。繊維シートの破断に着目すると、供試体90-1は繊維が円周方向のみであり、繊維に沿った水平方向に破断している。一方、45/45-1、45/90/45-1では斜め方向に破断しており、特に45/90/45-1については、円周方向の繊維量が多いのにも関わらず斜め方向に破断していることから、繊維シートの破断は最外層の繊維の方向に依存していることがわかる。尚、繊維シートの剥離部分は母材破壊しており、さらにオーバーラップ部分での集中的な剥離は観察されないことから、機械定着を施していない本研究においては、コンクリートとの接着、繊維シートの定着は十分であると判断した。

表-4に圧縮試験により得られた最大応力とひずみゲージにより得られた最大応力時のひずみを示し、図-4に応力-ひずみ曲線を示す。最大応力時のひずみに注目すると、軸方向ひずみにおいて特徴が現れており、円周方向に水平に繊維の在る供試体90-1、45/90/45-1でひずみが大きくなる傾向が見られる。次に、90-1と45/45-1の応力-ひずみ曲線を比較すると、円周方向・軸方向ともに45/45-1の方が傾きの緩やかな状態で終局に至っていることから、90-1と比較して破壊形態が緩やかになっていると推測できる。



No. 90-1 No. 45/45-1 No. 45/90/45-1
写真-1 圧縮破壊状態

表-4 圧縮試験結果

供試体 No.	最大応力 (N/mm ²)	最大応力時ひずみ (μ)	
		円周方向	軸方向
90-1	57.3	5,000	10,000
45/45-1	47.5	3,000	3,000
45/90/45-1	68.0	3,000	13,000
0-1	35.7	5,000	3,000
N	38.1	2,000	4,000

表-5 円周方向の拘束力(網目理論)

供試体 No.	円周方向拘束力*	最大応力 (N/mm ²)	応力増分** (N/mm ²)
90-1	2	57.3	20.5
90-2	4	104.9	68.1
45/45-1	2 (1+1)	47.5	10.7
45/90/45-1	3 (0.5+1+0.5)	68.0	31.2
N	—	36.8	—

* : 円筒形複合材料の網目理論を適用し、繊維量 111g/m²の円周方向の拘束力を1とした

** : 未補強供試体の最大応力を基準とした

0-1は繊維シートとコンクリート面の高さをあわせて貼り付けており、繊維シートが軸力を負担することになるが、円周方向の拘束力が働かないために補強効果が得られない結果となった。

ここで、圧縮試験の結果に円筒形複合材料の網目理論を適用した場合について、表-5にまとめた。網目理論とは、「外力は全て強化材の引張応力として分担される」とした解析方法⁵⁾である。網目理論によると、90-1と45/45-1が同等の拘束

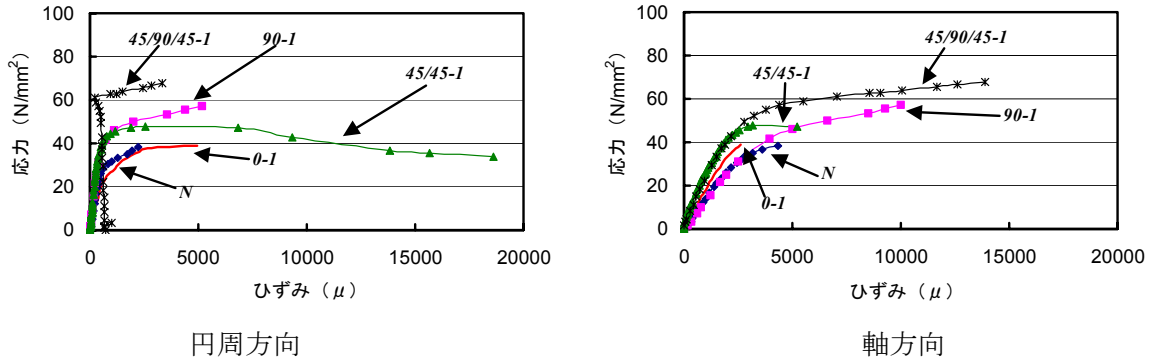


図-4 応力-ひずみ曲線（圧縮試験）

力となるが、コンクリート圧縮試験において未補強供試体からの応力増分をみた場合に、90-1を基準として考えると、45/45-1では小さく現れる算出結果となり、45/90/45-1に関しては、網目理論とよく一致する結果となった。また、90-1、90-2を比較すると、最大応力では約2倍となったが、未補強供試体からの応力増分では3倍以上の強度となっており、繊維補強コンクリートの圧縮強度への網目理論の適用については、さらに検討を進めていく必要があると考えている。

3.2 曲げせん断試験

表-6にせん断試験結果をまとめる。各ケース複数体の試験を行ったが、大きなバラツキはなく安定した物性を示した。繊維補強後の最大せん断応力は何れのケースについても約7N/mm²となったが、変位・ひずみに関しては、後述するように各ケースで特徴のある結果となった。ここで、45/45-1と45+45-1を比べると、45/45-1が+45°と-45°の層を併せ持つ一枚の繊維シートであるのに対し、45+45-1は+45°および-45°それぞれのシートを一枚ずつ施工しており、補強の形態としては最終的にほぼ同様になるように設定したケースである。変位やひずみについては後に図示するが、両ケースは同等の補強性能を持っているとの結果が得られていることから、45/45-1の方が少ない作業工程での施工が可能であり、コストの削減、施工不良発生の可能性の低減に繋がると考えている。

曲げせん断試験後の供試体の破壊状態を写真-2に示す。何れも、試験終了後に引張側を上面

表-6 曲げせん断試験結果

供試体 No.	n	最大荷重 (kN)	最大せん断応力 (N/mm ²)
90-1	1	152	7.42
	2	146	7.29
	3	132	6.59
	Av.	143	7.10
45/45-1	1	149	7.58
	2	133	6.68
	3	131	7.60
	Av.	138	7.29
45+45-1	1	140	6.99
	2	119	6.07
	3	141	7.69
	Av.	133	6.92
45/90/45-1	1	133	6.94
	2	162	7.64
	Av.	147	7.29
N	1	96	5.53
	2	98	5.65
	3	100	5.76
	Av.	98	5.65

にして観察したものであり、繊維シート部の白線は観察のために予め供試体書き込んだものである。未補強供試体Nではせん断破壊しているが、繊維シート補強することで、せん断破壊から曲げ破壊に破壊モードが移行していることがわかる。また、繊維シートの剥離状態について、90-1では支点近傍の繊維シート端部より剥離が進行し、45/45-1、45+45-1では写真-2の白色曲線で記すように引張側のスパン中央付近より山型に剥離し、45/90/45-1では目視観察による剥離は観察されなかった。つまり、今回のように端部での機械的な定着を行っていない場合には、45/45-1のような斜め方向に繊維を揃えた織

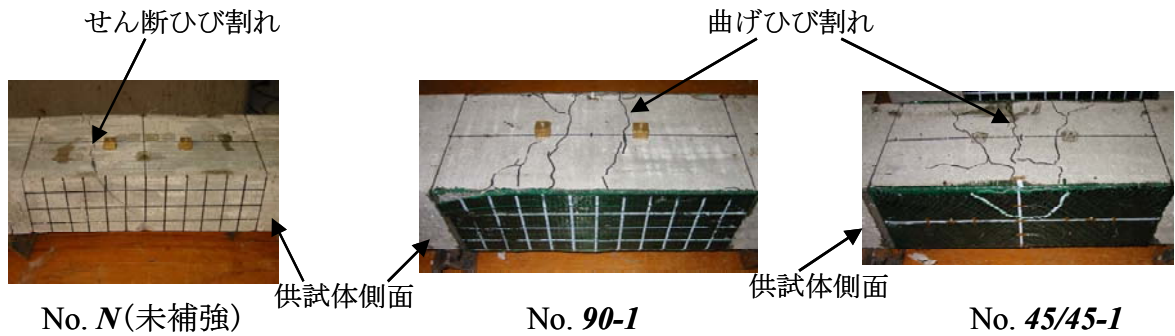


写真-2 せん断破壊状態

繊維シートの方が、シートの端部からの繊維方向に沿った剥離による急激な破壊には至らないと考えられる。

図-5 に荷重スパン中央下部に設置した変位計より得られた荷重-変位曲線を示す。45/45-1, 45+45-1 において、傾きの小さい曲線を描いた後に終局に至る点の特徴的である。この点について、供試体の破壊状態とあわせて考えると、繊維シートの剥離が徐々に進行することによりほぼ一定の荷重を保っているのではないかと推測できる。

次に図-6 に供試体側面のスパン中央部の下よりに貼り付けたひずみゲージにより得られたせん断応力-ひずみの関係を示す。図-5 の荷重-変位曲線に比べると、曲線の傾きの大きく変わる変曲点が明確に現れている。この変曲点に関して、繊維補強したケースでは2箇所確認できるが、これはそれぞれ低荷重側が「ひび割れの発生点」、高荷重側が「繊維シートの剥離開始点」と考えられる。高荷重側については、「鉄筋降伏」の影響とも考えられるが、破壊状態の観察や、90-1 での繊維シートの剥離状態と終局における急激な荷重の低下を考え合わせると、「シートの剥離」による変曲点と考えた方が適していると思われる。これらの結果から、斜め方向に繊維を編成したケースでは最大荷重付近で繊維シートの剥離が徐々に進行し、耐荷重をキープしていると考えられる。また、45/90/45-1 は斜め方向の繊維と横方向の繊維を併せ持っており、応力-ひずみの関係も、45/45-1

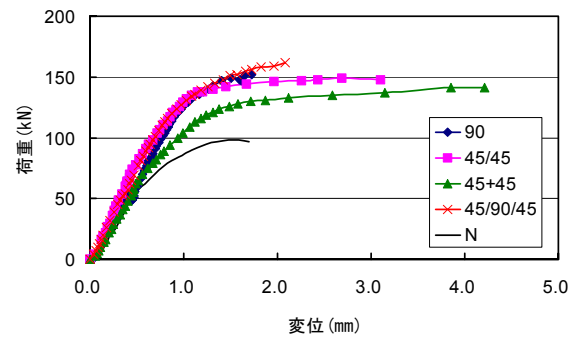


図-5 荷重-変位曲線 (せん断)

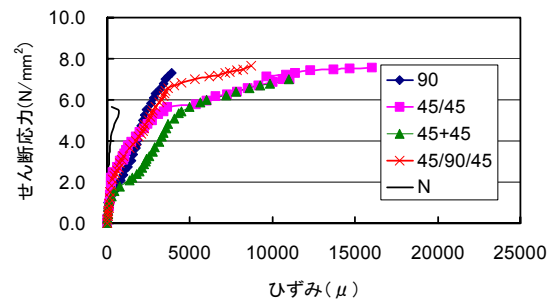


図-6 せん断応力-ひずみ曲線 (スパン中央部)

と 90-1 を併せたような形状になっている。繊維シートの剥離状態に関しても、90-1 の端部からの剥離と 90-1 の中央部からの剥離の、相反する性質を併せ持つために、繊維シートの明確な剥離が観察できなかったものと考えられる。

図-7 には荷重点～支点中間の横ひずみとせん断応力の関係を示す。90-1, 45/90/45-1 において、6.0N/mm² 付近でひずみが急に大きくなっていることが特徴的であり、荷重の増加と共に中

立軸の位置が上方に移動し、引張ひずみが発生したものと考えられる。**90-1**と**45/45-1**のひずみ量に差がみられることに関して、**90-1**は引張ひずみと繊維方向さらにはゲージ貼付けの向きが揃っているためにひずみ量が顕著に現れており、一方**45/45-1**では繊維方向が引張方向と異なるために、繊維シート上のひずみ量が小さくなっていると考えられる。

供試体側面におけるひずみ量（ ϵ ゲージ）とせん断応力の関係を図-8に示す。本実験ではシート上に ϵ ゲージを貼り付けており、ひずみゲージよりもマクロな視点で繊維シートのひずみを捉えている。90°方向の繊維がある**90-1**、**45/90/45-1**の数値が大きくでており、先の図-7で示したひずみゲージによる結果とよく一致している。

4. まとめ

任意の角度に繊維を配することを特徴の一つとした「多軸繊維シート」によるコンクリートの補強性能に関する検討を行い、以下の知見を得た。

4.1 圧縮試験

コンクリートと繊維シートとの付着は十分であり、繊維シートの破断は最外層の繊維の角度に依存していることが観察された。また、斜め方向に繊維を揃えたシートでは円周方向のみの一方向に繊維を揃えたシートよりも、急激な破壊に至らないことがわかった。

4.2 曲げせん断試験

供試体側面を「多軸繊維シート」補強することで、せん断破壊から曲げ破壊に破壊モードが変化しており、せん断補強していることがわかった。本研究では、斜め方向の繊維の在るシートの方が徐々に終局に至る、と推測できる結果となった。また、「多軸繊維シート」は複数の繊維層を1枚のシートとして施工できることが利点となる可能性があることを指し示している。

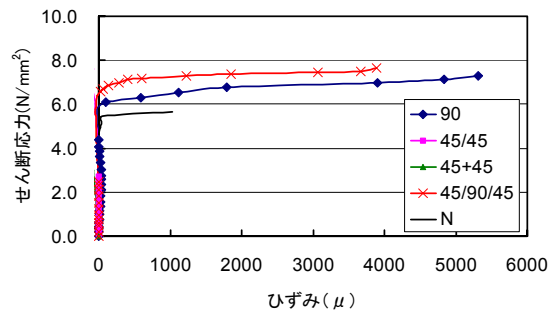


図-7 せん断応力-ひずみ曲線
(载荷点～支点間中央)

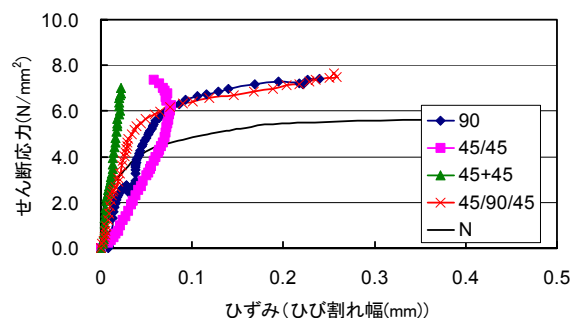


図-8 せん断応力-ひずみ量

参考文献

- 1) 須田康之, 三井雅一, 福澤公夫, 船川勲: FRPシートにより横方向補強されたコンクリートの圧縮性状に及ぼすハイブリッド効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.337-342, 2000.
- 2) 国枝邦由, 林 啓司, 横山博司, 石原良彦: 緊張力を導入した PBO 繊維シートにより横拘束された円形断面コンクリートの応力～ひずみ関係について, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 2004, pp.387-388
- 3) 篠崎裕生, 三上 浩, 中島規道, 田村富雄: アラミド繊維シートにより部分的にせん断補強した RC 梁の耐力について, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003, pp.273-274
- 4) 愛知五男, 下川和明: RC はり部材のせん断補強に関する実験的研究, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 2004, pp.103-104
- 5) 日本複合材料学会編集: 複合材料活用辞典, 産業調査会, 2001, p.426