

論文 炭素繊維／有機繊維複合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・補強方法の一つに連続繊維シートを用いる方法があり、多くの研究、事例がみられる。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層積層可能であることを特徴とする「多軸繊維シート」を補強用繊維シートとして用いた。特に、「多軸繊維シート」の特徴を活かし、各繊維層で異なる繊維種を編成したハイブリッド型の「炭素繊維／有機繊維複合シート」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行った。せん断、圧縮試験を行い、シート編成条件（繊維種・繊維方向・繊維量）の違いが補強性能に及ぼす影響について明らかにした。

キーワード：炭素繊維／有機繊維複合多軸シート、繊維補強、せん断試験、圧縮試験

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、せん断補強効果などに関する多くの研究がなされている¹⁾。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ると考えられる。

筆者らは、配列する繊維の方向をある程度任意に設定することができ、さらに任意の角度に設定した繊維層を2層以上積層して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」による、コンクリート部材の補強に関して基礎的な研究を行い、斜め方向に配列した繊維の特徴を見いだしてきた^{2),3)}。

本研究では、多軸繊維シートの特徴をさらに活かし、2層以上積層している各繊維層のそれぞれを構成する繊維を炭素繊維（CF）または高強度ポリエチレン（PE）繊維とした、ハイブリッド型の複合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評価を目的として、せん断、圧縮試験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

図-1に多軸繊維シートの概念図を示す。また、実験ケースを表-1に示す。本研究では、90°層／±45°層の3軸シートとし、各層の繊維種をそれぞれ炭素繊維と高強度ポリエチレン繊維とした繊維シートを中心に検討した。さらに、各繊維シートの表裏、つまりコンクリート供試体への貼り付け面の影響についても検討を行った。表-1において、「内」とした繊維層をコンクリート供試体に接するように貼り付けた。尚、繊維シートの編成角度は、せん断試験においては主鉄筋方向、圧縮試験においては供試体の円周方向、即ちいずれも載荷方向に直交する方向を90°方向として表している。

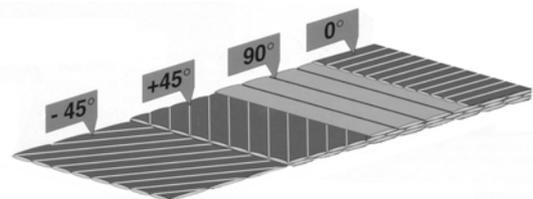


図-1 多軸繊維シート概念図

*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-1 実験ケース

実験ケース	繊維シート編成条件
CF90/PE45	内：CF90° (220 g/m ²) / 外：PE±45° (各 147 g/m ²)
PE45/CF90	内：PE±45° (各 147 g/m ²) / 外：CF90° (220 g/m ²)
CF45/PE90	内：CF±45° (各 222 g/m ²) / 外：PE90° (145 g/m ²)
PE90/CF45	内：PE90° (145 g/m ²) / 外：CF±45° (各 222 g/m ²)
CF90/PE45(L)	内：CF90° (220 g/m ²) / 外：PE±45° (各 73 g/m ²)
CF90(L)/PE45(L)	内：CF90° (110 g/m ²) / 外：PE±45° (各 73 g/m ²)
CF90/CF45	内：CF90° (220 g/m ²) / 外：CF±45° (各 222 g/m ²)
CF45/CF90	内：CF±45° (各 222 g/m ²) / 外 CF90° (220 g/m ²)
N (基準)	未補強供試体 (シート補強なし)

CF：炭素繊維，PE：高強度ポリエチレン繊維

2.2 セン断試験

コンクリートの示方配合を表-2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，W/Cを 50%とした。スランプ 3.5cm，空気量 2.0%であった。28 日間の水中養生の後，試験に供した。グラインダーによる表面研磨処理の後，繊維シート貼り付け面にエポキシ樹脂系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。7 日間の養生の後，載荷試験を行った。繊維シートは供試体側面の載荷スパン内に貼り付けた。

図-2(a)に供試体の形状寸法，配筋を示す。未補強の場合にせん断破壊により終局させるため，φ13mm の鉄筋をかぶり厚 20mm で3本配筋した。また，図-2(b)に示すように変位計，ひずみゲージ，π型変位計を取り付け，変位量，ひずみ量の測定を行った。載荷試験は，2等分中央点載荷にて実施した。

2.3 圧縮試験

供試体概要図を図-3に示す。繊維シートの貼り付けは，せん断試験の場合と同様にグラインダーによる表面処理を施した後に行った。尚，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。載荷試験は JIS A 1108 に準じて実施した。図-3に示すように，供試体側面中央部に

表-2 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

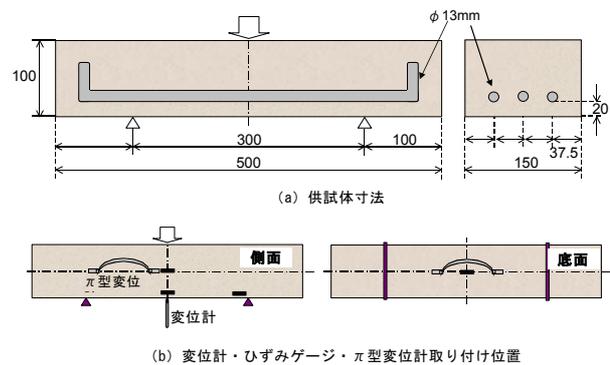


図-2 セン断試験供試体概念図

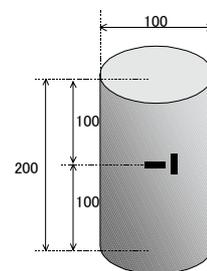


図-3 圧縮試験供試体概念図

にひずみゲージを貼り付け，円周方向のひずみ量を測定した。

ここで，本実験において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 せん断試験

(1) 試験結果

表-4 に試験結果をまとめる。最大荷重に関して、ほとんどの供試体で 150kN 強となった。これは、全ての供試体において繊維シートの破断はみられず、シートの剥離によって終局に至る様子が観察できた事から、最大荷重値についてはコンクリートとシートの付着特性が影響している結果と考えられる。尚、何れも母材破壊によりシート剥離しており、機械的定着を施していない本研究においては、コンクリートとシートとの接着は十分であると判断した。

また、変位・ひずみ特性については、後述するように繊維種や編成角度によって特徴のある結果となった。

(2) 破壊性状

載荷試験後の供試体の破壊状況を写真-1 に示す。ここでは、例として **CF45/PE90** と **CF45/CF90** を示す。白色斜線は繊維シートが剥離している箇所を示している。何れも、繊維シートの破断ではなく、剥離の進展によって終局に至ったことが確認できる。また、ひび割れの発生について、基準供試体ではせん断ひび割れのみ発生しているのに対し、シート補強を施した供試体では曲げひび割れを主とした複雑なひび割れの発生がみられた。このことから、シート貼り付けによるせん断補強効果により、破壊モードが曲げ破壊に移行していることがわかる。

繊維シートの剥離に着目すると、スパン中央部下側を起点に山形状に徐々に剥離が進展す

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
高強度 PE 繊維	引張強度	引張弾性率
	2.6~3.2 GPa	88~123 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	圧縮強度	弾性係数
	56.0 N/mm ²	33.1 kN/mm ²

表-4 せん断試験結果

実験ケース	最大荷重 (kN)	中央変位 (mm)	シート剥離
CF90/PE45	152	1.4	中央
	159	2.7	中央
	136	1.6	中央
PE45/CF90	154	2.6	端部
	165	2.4	中央
	149	1.9	中央
CF45/PE90	158	2.2	中央
	179	2.7	中央
	169	1.6	中央
PE90/CF45	143	2.6	中央
	145	2.6	中央
	162	2.5	中央
CF90/PE45(L)	148	1.3	端部
	146	1.6	端部
	117	0.9	端部
CF90(L)/PE45(L)	158	1.4	中央
	177	2.2	中央
	149	2.1	中央
CF90/CF45	183	2.0	端部
	142	1.7	端部
	167	1.2	端部
CF45/CF90	184	2.0	端部
	170	1.5	端部
	153	1.3	端部
N (基準)	96	1.8	—
	98	1.6	—
	100	1.2	—



CF45/PE90



CF45/CF90



N (基準)

写真-1 せん断試験 破壊状況

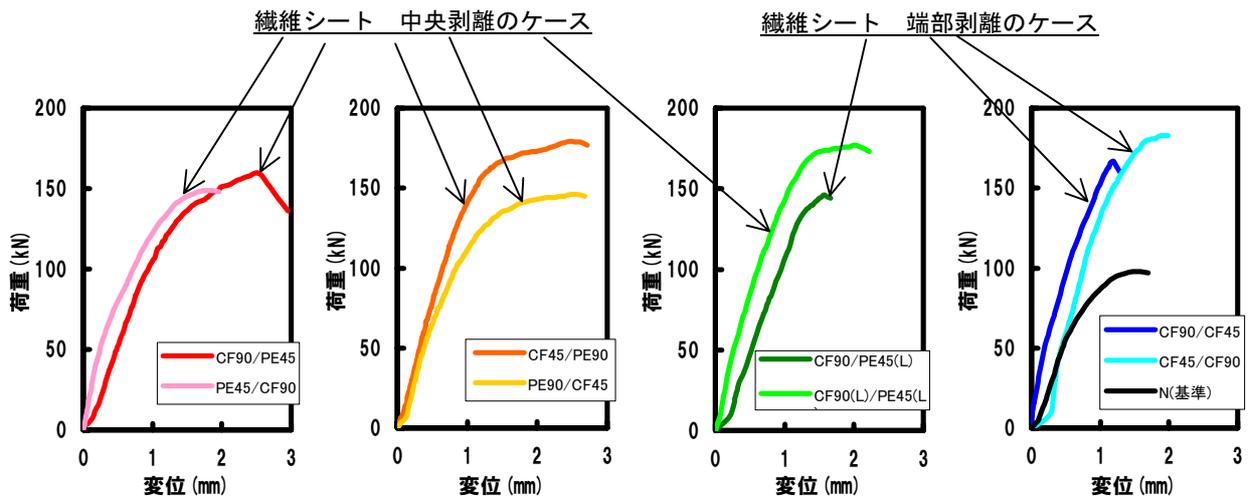


図-4 セン断試験 荷重-変位曲線

るタイプと、支点付近の端部より一気に剥離が発生するタイプが見られた(表-4)。中央部から剥離するタイプは比較的徐々に破壊に至るが、端部からの剥離が発生するタイプでは脆性的に破壊する様子が観察できた。

各ケースの特徴を比較すると、炭素繊維のみのケース(CF90/CF45, CF45/CF90)ではシート貼り付けの表裏に関係なく端部からの剥離によって終局に至った。一方、ハイブリッドタイプでは、編成条件、貼り付け表裏によって破壊状況の異なる結果を得た。具体的に、外層側を±45°としたCF90/PE45, PE90/CF45は、両者とも中央部からの剥離であるのに対し、外層が90°の場合、炭素繊維(PE45/CF90)では端部からの剥離も一部で見られ、PE繊維(CF45/PE90)では中央からの剥離となった。これは、両繊維の伸び特性、つまりPE繊維の伸びが高い(弾性率が低い)ために急激な剥離を抑制していると考えられる。CF90/PE45(L)が端部より剥離している点については、PE繊維層の目付量が小さく耐荷力が小さいために伸び特性が発揮されなかったものと考えられる。

(3) 荷重-変位特性

図-4 にせん断試験により得られた荷重-変位曲線を示す。縦軸を荷重、横軸を中央変位と

し、各ケース代表的な試験体のデータを用いている。これらを比較すると、荷重の増加が緩やかになった後に終局に至るケースと、急激に荷重が低下するケースのあることがわかる。ここで、前述の繊維シートの剥離性状と見比べると、端部からのシート剥離では荷重が急低下し、一方で中央部から徐々に剥離の進展するケースでは、変位量が大きく荷重の増加が緩やかになった後に終局に至る関係のあることがわかった。

シートの剥離性状にも現れたように、荷重-変位曲線にも編成条件(繊維種・角度)による特徴が現れている。つまり、脆性破壊を抑制する点に注目すると、炭素繊維とPE繊維を複合したハイブリッドタイプが有効であり、さらに炭素繊維を90°方向に編成したシートでは目付量のバランスにも依存するが、炭素繊維層を供試体側に貼り付けることで破壊性状をコントロールできると考えられる。また、弾性率の低いPE繊維を90°方向に編成したシートでは、シート貼り付けの表裏に関係なく脆性破壊しない結果となっている。

(4) 荷重-ひずみ特性

荷重-ひずみ曲線を図-5 に示す。ここでは、代表例として(a) PE90/CF45, (b) CF90(L)/PE45(L), (c) CF45/CF90の3例を挙げる。ひず

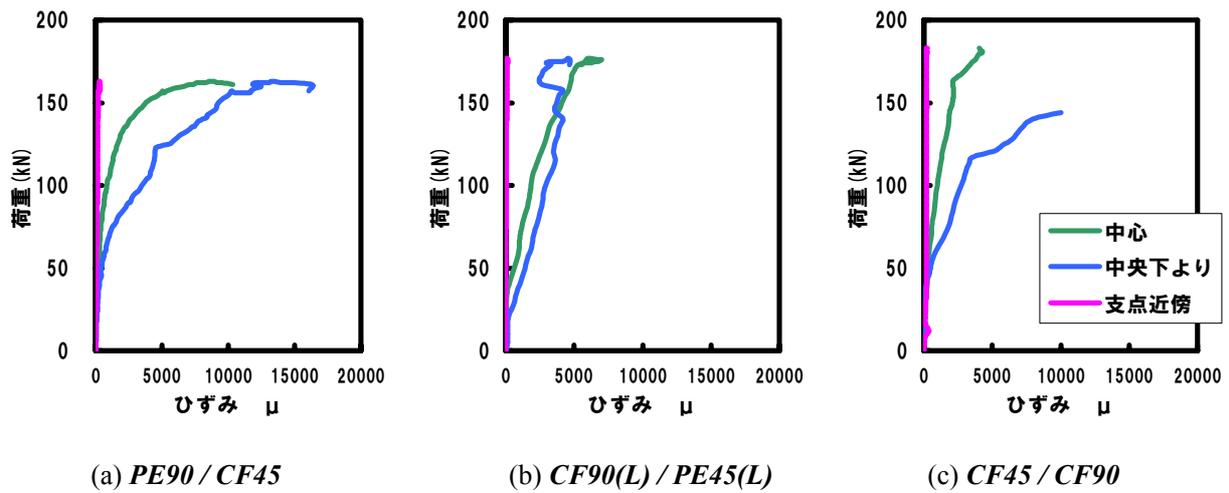
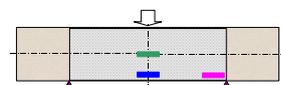


図-5 荷重-ひずみ曲線



みゲージは、「供試体中心」「スパン中央線下より」「支点近傍」の3箇所、いずれも繊維シートに取り付けた。シートの剥離性状に関係なく、いずれのケースにおいても「供試体中央下より」のひずみ量が最も大きく、次いで供試体中心、支点近傍の順であった。

支点近傍のひずみ量が小さい事について、シート端部であるために、供試体に働く引張応力が、シートとコンクリートとの接着界面に主に作用しているためと考えられる。「供試体中央下より」においては、载荷による引張応力が働くためにひずみ量も増大している。また、中立軸に近い供試体中心のひずみは、供試体下側から発生したひずみが伝播することにより発生することから、「供試体中央下より」に続いてひずみが増加する結果になったと考えられる。尚、ひずみゲージ貼り付け部分のシートが剥離して以降は、応力が主にシートの剥離の進展に作用するために、ひずみ量が不規則に増減するケースもみられた。

3.2 圧縮試験

(1) 試験結果

表-5 に試験結果をまとめる。いずれのケースも3体の試験結果の平均値を記した。最大強度の測定値から、繊維シートを貼り付けることで、

表-5 圧縮試験結果

実験ケース	最大強度 (N/mm ²)	円周方向 最大ひずみ μ
CF90/PE45	70.6	12,257
PE45/CF90	62.2	6,860
CF45/PE90	61.0	13,521
PE90/CF45	60.8	11,254
CF90/PE45(L)	70.5	3,552
CF90(L)/PE45(L)	59.8	4,499
CF90/CF45	74.7	7,826
CF45/CF90	73.7	6,467
N (基準)	56.0	1,094

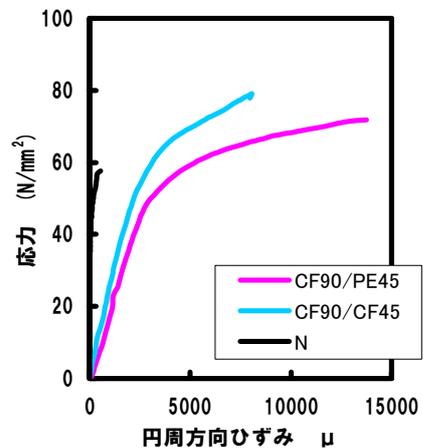


図-6 応力-ひずみ曲線

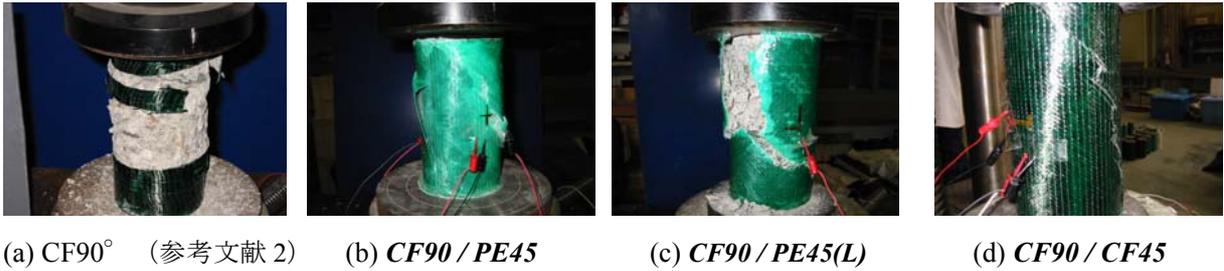


写真-2 圧縮試験 破壊状況

圧縮応力に対して補強効果のあることがわかった。図-6 に応力-ひずみ曲線を示す。ここでは、例として *CF90/PE45*, *CF90/CF45*, 基準供試体 *N* を示す。伸度の大きい PE 繊維を斜め方向に編成した層を外層に配することで、炭素繊維の場合よりもひずみが大きくなる現象が見られた。

(2) 破壊性状

載荷試験後の供試体の破壊状況を写真-2 に示す。既報論文²⁾において、炭素繊維シートによる補強の場合、破片の飛散を伴う爆裂破壊により終局に至ることを報告しているが、PE 繊維とのハイブリッドタイプでは PE 繊維が破断せず爆裂破壊を抑制する現象が見られた。これは、炭素繊維の場合は、破断伸度が PE 繊維よりも低いために、ひずみが限界に達して繊維が破断することにより載荷エネルギーが一気に解放されるためであり、PE 繊維を用いた場合にはその伸び特性により、エネルギーの急激な解放を防いでいると考えられる。しかし、PE 繊維の目付量の低いタイプ (*CF90/PE45(L)*) では、繊維シートの耐力が小さくなるために繊維が破断に至ったと考えられる。また、 $\pm 45^\circ$ 層を有する炭素繊維シート (*CF90/CF45*) では、荷重が急激に低下するものの、爆裂破壊には至らない結果であった。これについては、円周方向の膨張力が斜め方向の繊維に分散された結果と考えられる。

圧縮試験においても、繊維を斜めに編成する点、ハイブリッド化による各繊維の特徴が大きく現れる結果が得られた。

4. まとめ

炭素繊維/高強度ポリエチレン繊維ハイブリッド型の「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実験を行い、以下の知見を得た。

4.1 せん断試験

供試体側面にシートを貼り付けることにより、せん断補強できることがわかった。さらに、ハイブリッドタイプの特徴として、繊維シートの剥離が徐々に進展することで終局に至る、脆性破壊を抑制した補強性能のあることがわかった。

4.2 圧縮試験

PE 繊維の伸び特性により、脆性破壊を抑制した圧縮補強効果があることがわかった。炭素繊維のみのシートの場合でも、 $\pm 45^\circ$ 層の斜め方向繊維の効果により爆裂破壊に至らない結果を得た。

参考文献

- 1) 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—，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，宮里心一，保倉 篤：多軸繊維シートによるコンクリート梁の曲げ補強に関する基礎的研究，土木学会第 60 会年次学術講演会，pp.1039-1040, 2005