

竹中技術研究所 正会員 大野 定俊  
 正会員 米澤 敏男  
 敷島紡績中央研究所 井上 一宏

1.はじめに

最近、コンクリート部材の補強材としてFRPロッドやケーブルの研究開発が行われてきており、補強材の形態も棒状以外に格子状のものから3次元織物まで種々のタイプがある。3次元織物は繊維を立体的に織ることにより、立体のFRP補強材の加工組立を工場の生産ラインで一度にできるので、主方向ばかりでなくせん断補強も含めた部材全体の補強材の製造方法としては合理的であると考えられる。しかし、コンクリート系複合体部材の補強材はコンクリート打設や補強効率などの点を考えると、本来の3次元織物が持つ密度の高い織りパターンから、繊維束の間隔をあけた粗い織りパターンにせざるを得ないのが実状である。このような観点からは、粗なタイプの立体織物を3次元織機で製作するのは生産効率も低く、たとえ将来繊維の価格が安価になったとしてもロッドやケーブルの1次元補強材に対して優位性を示せない可能性がある。そのため、著者らは立体補強材の製造に関して、より工業的に連続生産し易い方法について検討してきた。本報告ではこの方法で試作した3次元補強材によって補強したモデル試験体の補強効果について報告している。

2.立体補強材の製造の概念

本方法による立体状補強材の製造は機械による連続的な製造を前提にしており、基本的には2つの工程からなっている。最も基本となるのは図-1に示すような2本の主方向の補強材（以後メンバーと記す）の周囲にトラス状に連続繊維束（以後、クロスバーと記す）を巻き付け接着剤で固定したモジュールの製作であり、このモジュールをさらに複数個合わせてその周囲を集束繊維束（コンバインドバー）で巻き付けて固定することにより立体状の補強材を製作している（図-1参照）。さらに、複雑な形状に対してはこのモジュールを複数個組合せることにより対処している。

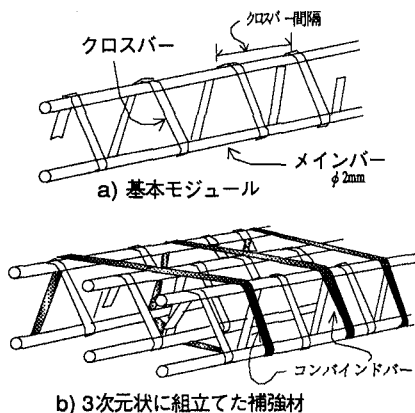


図-1 立体補強材の基本パターン

3.実験概要

3次元補強材の補強効果について検討するため、炭素繊維を用いて試作した3次元織物補強材で補強した小型のモルタル試験体について、クロスバーおよびコンバインドバーの間隔を主な実験要因として、付着、曲げ、圧縮の各試験を実施した。試験項目と試験体種別を表-1に示す。また、同時に補強材の繊維束の引張および付着強度試験も行った。なお、モルタル・マトリックスには  $w/c=0.35$ 、 $c/s=1$ （重量比）の高強度のものを用いた（材令28日平均強度：788 kgf/cm<sup>2</sup>）。

表-1 実験計画（試験体種別と試験項目）

試験項目	試験体名称	補強材の公称直径	クロスバー間隔	付着区間 (mm)	
付着試験	メンバー	φ=2mm	—	30	
	クロスバー	φ=1.3mm	—	30	
	基本モジュールA		20mm	40	
	基本モジュールB		40mm	40	
試験項目	補強材種類	クロスバー間隔	コンバインドバー間隔	載荷条件	
曲げ試験	Plane	補強材なし		曲げ試験体 30x30x400 mm	
	D-0-20	20mm	—	モルタルパン 60 mm	
	D-10-20	20mm	10mm	支間=300	
	D-10-40	40mm	10mm		
圧縮試験	D-20-20	20mm	20mm	圧縮試験体 30x30x60 mm	
	D-20-40	40mm	20mm		
	D-40-20	20mm	40mm		
	D-40-40	40mm	40mm		

4. 実験結果

**繊維束の引張強度:** メインバーおよびクロスバーの各5本の平均引張強度(樹脂を含む実断面積で除した値)はそれぞれ 145kgf/mm<sup>2</sup>と 117 kgf/mm<sup>2</sup>であるが、繊維強度に換算するとメインバーが260kgf/mm<sup>2</sup>、クロスバーが356kgf/mm<sup>2</sup>で、クロスバーの方が繊維の集束量が小さく樹脂量が多いために、繊維強度としては理想強度に近い値が得られている。

**炭素繊維束とモルタルの付着特性:** 表-2に付着試験の結果を示す。メインバー、クロスバーともほぼ同様な値を示しており、滑り量が0.25mm時で26~36kgf/cm<sup>2</sup>、最大付着強度が60~79kgf/cm<sup>2</sup>となっている。これらの繊維束を基本モジュールに加工したもので付着試験をすると、滑り量が0.25mmの時の付着応力は約2倍の値を示している、しかし最大付着応力では大きな差とはなっていない。一方、クロスバー間隔が20mmと40mmのものを比較すると、滑りが0.25mmの時には両者の付着応力に差がないのに対して、最大付着力で1割程度の差が生じている。これはクロスバーとメインバーの接合部の定着効果が滑りがある程度始まった所で機能したためと考えられた。

**曲げ特性:** 曲げ試験の結果を表-3に示す。曲げ試験体の荷重-変位曲線は図-3に示されるように、ひびわれ発生時に剛性低下による変曲点を示す bi-linear な曲線で表される。曲げ強度はいずれの試験体も同じ補強材比であるが、クロスバー、コンバインドバーの間隔が小さくなるほど高い値を示しており、破壊形式もせん断圧縮に近い破壊形式から圧壊タイプへと変化している。曲げ強度が高くなる理由としては、クロスバー、コンバインドバーの密度が高くなることによって圧縮域の拘束効果が現れること、またメインバーの機会的な付着力の増加の影響が考えられる。

**圧縮強度:** 補強材種別による強度差は見られないが、図-4に示されるように、コンバインドバーの存在による拘束効果によって、最大耐力以降の靱性の改善効果が認められる。

まとめ

本研究では、3次元状の連続繊維補強材の製造に関して、生産効率の高い製造方法について検討した。また、この3次元補強材で補強した高強度モルタル試験体について各種の力学的な試験をした結果、高強度で良好な力学特性を有する部材が得られることが明らかになった。本試験結果は小型のモデルのものであるが、補強材の製造に関しては補強材が数mm程度の細いタイプからメインバーの直径が25mm程度の太径のものまで製造可能であり、大型のはり部材やスラブ部材への適用も可能である。

表-2 付着試験結果

試験体名称	クロスバー間隔	付着面積 (cm <sup>2</sup> )	付着応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
			滑り量 0.25mm時	最大付着応力
メインバー	—	1.63	26.5	60.1
クロスバー	—	1.01	34.6	61.8
基本モジュールA	20mm	4.56	85.4	101.0
基本モジュールB	40mm	4.56	67.6	81.1

表-3 曲げおよび圧縮試験結果

試験体名称	クロスバー間隔	コンバインドバー間隔	曲げ試験		圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
			最大強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	終局たわみ (mm)	
Plane	なし	なし	95.6	0.27	758
D-0-20	20mm	なし	636	10.6	740
D-10-20	20mm	10mm	704	10.65	826
D-10-40	40mm	10mm	714	10.8	918
D-20-20	20mm	20mm	687	10.85	855
D-20-40	40mm	20mm	647	10.4	866
D-40-20	20mm	40mm	649	9.80	892
D-40-40	40mm	40mm	621	9.45	803

\* 終局モーメントを断面係数で除した値を最大強度として示した。

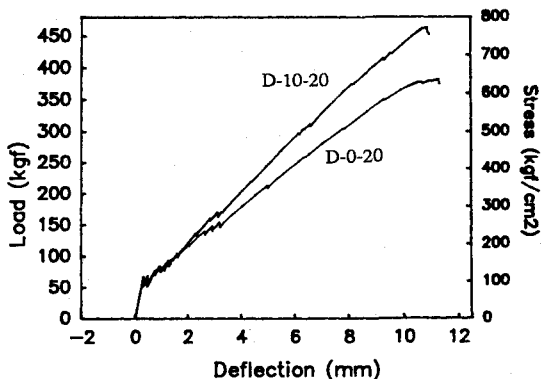


図-2 曲げ試験の荷重-変位曲線