

論文

[1180] もしゃ織り成形のピッチ系炭素繊維ネットで補強したモルタルの引張特性

正会員○南 英明 (九州大学大学院)

正会員 牧角龍憲 (九州大学工学部)

岡田慎一郎 (大阪ガス㈱)

1. まえがき

炭素繊維等の新素材は、軽量で比強度・比弾性係数が高くかつ耐久性にも優れた素材であり、建設材料とくにコンクリート部材の補強材としての可能性を有する素材である。しかしながら、それらをコンクリート補強材としてそのまま用いる場合には、コンクリートと繊維間ですべりが生じ、各繊維の破断強度に至らしめるまでの十分な定着を得ることができないことが報告されている。そのため、新素材をより線、組紐、ネット状もしくは3次元織物などに成形することで、各素材の素線強度を効率よく用いるための付着特性の改善が試みられている。

その一方法として著者らは、炭素繊維をネット状（以降、ネットと呼ぶ）に成形することで、ネット横線による機械的定着効果が確実に得られる方法について一連の研究を行っている¹⁾²⁾。

本研究では、コンクリート補強材に適すると考えられるネットの成形方法の中からもしゃ織りしたネット状補強材について、成形品の状態での引張り特性を把握するために、炭素繊維ネットで補強した薄肉平板モルタルならびに炭素繊維積層板の各引張試験を行い、もしゃ織りで成形したネットの補強効率について検討した。その結果、いずれの供試体についても十分な定着効果（繊維破断）が得られており、これらの引張強度についても炭素繊維積層板強度と比較して差異は認められなかった。

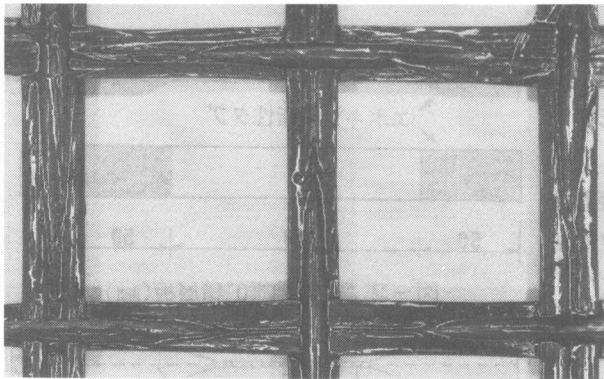


写真-1 もしゃ織りにより成形したネット

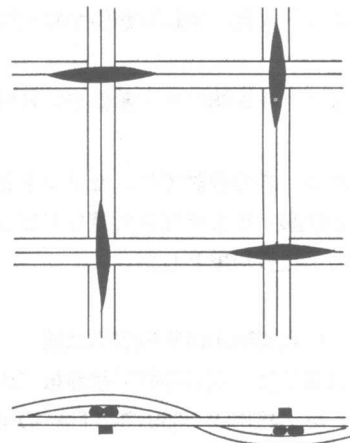


図-1 もしゃ織り構成図

2. 実験概要

2.1 炭素繊維ネット

使用した炭素繊維はピッチ系(Hi-grade)連続繊維で、素線の直径は $10\mu\text{m}$ 、弾性係数 18000kgf/mm^2 、引張強度 $\sigma_f=200\text{kgf/mm}^2$ (JIS R 7601による)である。

炭素繊維ネット：ネットの織り方は、写真-1に示すように、炭素繊維集束線2Kもしくは4K(1Kは素線1000本)の集束線を、縦横2本ずつ交互に交差させた外側に残りの1本をさらに交差させて織った後に、それをエポキシ樹脂(ビスフェノールA、硬化剤ジシアマジアミド)に含浸して成形したもので、ネット交点の位置のいずれも波状になるもしくは織りである(図-1参照)。なお、エポキシ樹脂の含浸率は $V_m=57\%$ であり、ネットのメッシュ間隔は $15\times 15\text{mm}$ である。

本研究では、縦線および横線の繊維本数や枚数などの構成を変化させることにより、以下のことについて検討した。なお、試験に供したネットの条件を表-1に示す。

- ①引張強度および変形状について炭素繊維積層板特性との比較
- ②ネット枚数、素線数が引張特性に及ぼす影響
- ③ネット横線剛性が定着効果に及ぼす影響

なお、③の検討では、セメントとの接着性および耐アルカリ性を考慮してビニロン繊維を用い比較対象とした。

2.2 炭素繊維積層板引張試験

試験では、炭素繊維 0° 積層板(図-2を参照)を「ASTM D 3039-76 CFRP の引張方法」に準じ、インストロン10tf万能試験機を用いて載荷速度 1.3mm/分 のひずみ制御により行った。(写真-2)

表-1 ネット構成

供試体No.	補強枚数	縦繊維(K) ×本数	横繊維(K) ×本数
1	1	2×3	2×3
2	2		
3	3		
4	1	4×3	4×3
5	1	4×3	2×3
6	1	4×3	ビニロン×3

(注)繊維1Kは、素線1000本

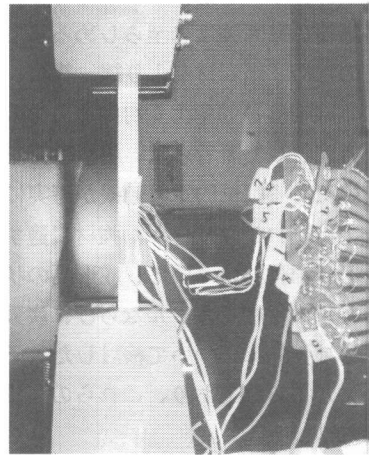


写真-2 0° 積層板の引張試験状況

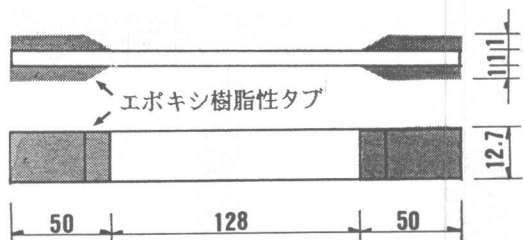


図-2 炭素繊維 0° 積層板(mm)

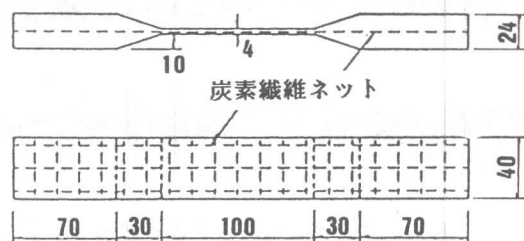


図-3 引張試験供試体(mm)

2.3 ネット補強モルタルの引張試験³⁾

供試体形状および寸法を図-3に示す。マトリックスは、豊浦標準砂を細骨材とするモルタルとした。セメントには、早強ポルトランドセメントを用い、 $W/C=34\%$ 、 $S/C=1.5$ で、高性能減水剤を用いた。引張試験は変位速度0.1mm/分の漸増载荷で行い、任意の荷重下でひずみを測定した。

なお、両試験ともに引張ひずみの測定は供試体中央部に貼付したひずみゲージにより測定した。

3. 実験結果

3.1 炭素繊維積層板

引張試験結果を表-2に示す。引張強度の算出に際し、本研究で使用したエポキシ樹脂の破断伸度(0.6%)が炭素繊維素線のそれ(1.1%)より小さいことから、繊維強度 σ_{ft} を $\sigma_{cu}=V_f \cdot \sigma_{ft}$ より算出した。ただし、 σ_{cu} は複合材強度、 V_f は炭素繊維体積率である。

表-2にみられるように、0°積層板の引張強度は、炭素繊維素線強度の約8割程度に減少した。この平均値をプリプレグ成形品として用いるときの基準強度と考え、 $\sigma_{rp}=165\text{kgf/mm}^2$ として以後の検討に用いた。次に、図-4にNo.3供試体の荷重-ひずみ図を示す。荷重-ひずみ曲線は、ほぼ直線的な傾きを示しているが荷重の増加にともない、その傾きがやや増加する。JIS-R7601に準じて破断荷重の20% および60% 区間の割線弾性係数を表-2に示すが、素線の弾性係数にほぼ近似している。このことから、成形加工による影響は強度特性に対して大きいと考えられる。

3.2 ネット補強モルタル

いずれの供試体においても、その破断に至るまでネット縦線のすり抜けは認められず、写真-3に示すようにネットの破断により引張破壊した。その破断時の荷重から求めた補強モルタル引張強度 σ_{exp} を表-3に示す。この実験値と前述のプリプレグ基準強度から算定した引張強度 σ_{cal} の比を補強効率 α とし、その値を表中に示している。ここで σ_{cal} は、繊維断面積とモルタル断面積との比を繊維断面積比 p_f として、 $\sigma_{cal}=p_f \cdot \sigma_{rp}$ より算出した。

補強効率 α は、縦線6Kのネットで補強したモルタルの場合、 $\alpha=0.92\sim 1.00$ の値となっており、補強効率が極めて高いことが認められた。縦線12Kのネットの場合には、 $\alpha=0.80\sim 0.95$ と6Kのものよりやや低い値であった。

図-5および図-6に、各供試体の変形性状を示す。図では、供試体モルタル部にひびわれが発生した後は引張荷重をネット補強材のみが受持つこと、ならびに繊維断面積比 p_f がそれぞれ

表-2 0°積層板試験結果

No	σ_{ft} (kgf/mm ²)	σ_{fu} (kgf/mm ²)	σ_{ft}/σ_{fu}	E_f (tf/mm ²)
1	151	200	0.76	18.2
2	167	200	0.83	—
3	178	200	0.89	18.8

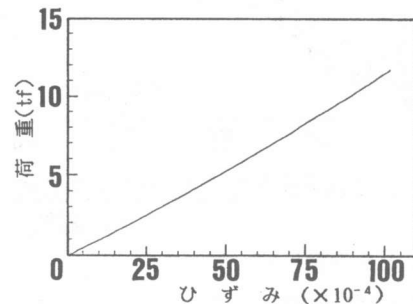


図-4 0°積層板の荷重-ひずみ曲線



写真-3 供試体破断状況

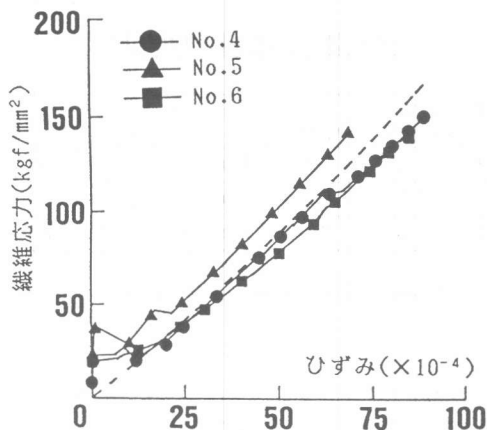


図-5 補強モルタルの応力-ひずみ曲線
ネット縦線6K

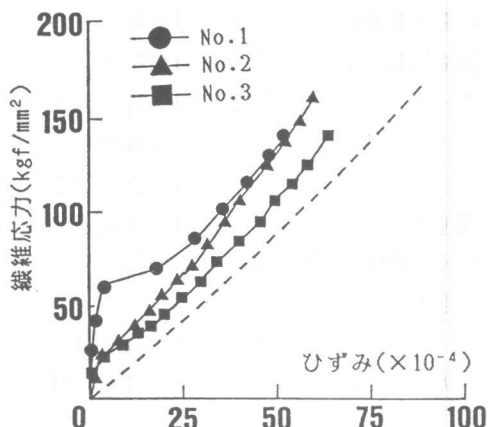


図-6 補強モルタルの応力-ひずみ曲線
ネット縦線12K

異なることを考慮して、ネット縦線の繊維応力とひずみの関係を描いている。また、図中の破線は、前述の0°積層板の応力-ひずみ曲線である。図-5は、縦線6Kのネット で補強したモルタルにおいて、ネットの枚数を変化させて比較したものを示している。いずれの場合もひびわれ発生後の挙動は、積層板のひずみ性状とほぼ同じであることがわかる。また、図-6は、縦線12Kのネット で補強したモルタルの性状を示しているが、いずれの変形性状にも顕著な違いは認められなかった。

表-3 ネット補強モルタル試験結果

供試体No	p_f^* (%)	$\sigma_{exp.}$ (kgf/cm ²)	$\sigma_{cal.}$ (kgf/cm ²)	補強効率 α $\sigma_{exp.} / \sigma_{cal.}$
1	0.71	115	117	0.98
	0.72	119	119	1.00
	0.74	116	122	0.95
2	1.27	209	210	1.00
	1.35	212	223	0.95
3	1.68	254	277	0.92
	1.80	273	297	0.92
4	1.55	237	256	0.93
	1.52	237	251	0.95
	1.44	216	238	0.91
5	1.42	205	234	0.88
	1.30	184	215	0.86
	1.41	204	233	0.88
6	1.57	219	259	0.85
	1.55	206	256	0.80
	1.59	244	262	0.93

*繊維断面積比=縦方向繊維断面面積/モルタル断面積

4 考察

4.1 もしゃ織りしたネットの定着効果

図-7に縦線6Kのネットを用いた補強モルタルにおける繊維断面積比 p_f と引張強度との関係を示す。一般に、短繊維補強モルタルでは、繊維体積率が增加するに伴って補強効率は低下するとされている⁴⁾。これに対してネット補強モルタルでは、図にみられるように、引張強度は p_f に比例して増加しており、補強繊維量にかかわらず一定の補強効率が得られることがわかる。

これは、ネットで補強した場合、作用応力に対する繊維の配向性が高いことならびに横線の定着効果が確実であることによると考えられる。これらの点は、図-5において、ネット枚数2および3枚の供試体の変形状がいずれも積層板の性状と同じ傾向を示したことが裏付けられる。また、縦線12Kのネットにおいても、同様の傾向が認められた。これらのことから、もしや織りで成形したネットでは、繊維の力学特性を十分に活用できる定着効果が得られるといえる。

しかしながら、縦線12Kのネットの場合、その補強効率 α は縦線6Kのものとは比べて、7%程度低下している。これは、もしや織りしたネットでは横線径が太径になると、ネット交点部の屈曲（クリンプ）が増加するため、その結果として交点近傍の繊維の応力状態（応力集中や残留応力の影響など）が変化することによると考えられる。すなわち、ほとんどの供試体において、写真-2に示すようにネット補強材の縦線と横線の交点かまたはその近傍で繊維が破断しており、交点近傍の繊維の応力状態が強度に影響するといえる。

この繊維の織り込みによる応力集中について、西村は⁵⁾、PAN系炭素繊維の織物構造を図-8上に示すようにモデル化して有限要素解析を行っている。その結果、縦線と横線の交差部で応力集中が最大となり、モデル図中のA点での応力集中係数はわずかな繊維角度で急増することを報告している。すなわち、本実験で使用したもしや織りネットにおいて、縦線12Kのものでは繊維角 θ は $4^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 、横線6Kのそれは $2^{\circ} \sim 4^{\circ}$ であり、この差が破断強度に影響したと考えられる。しかしながら、図-8にみられるような極端な応力集中が生じることはネットの補強効率が0.9前後と高いことから考えにくい。これは、西村の解析が密な織物（クロス）を対象としており、ネット補強材のように交点間にある程度の間隔がある場合には、織り込み時の繊維角度の影響が緩和されるためと考えられる。したがって、ネット状に成形した場合のネット交点の応力状態については、その定着効果も含めて独自の解析を行う必要があると考えられる。

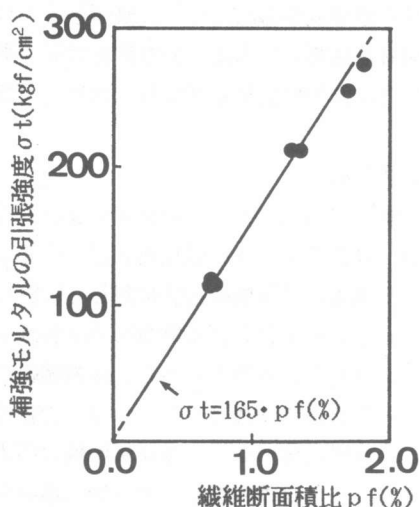


図-7 引張強度-繊維断面積比 pf

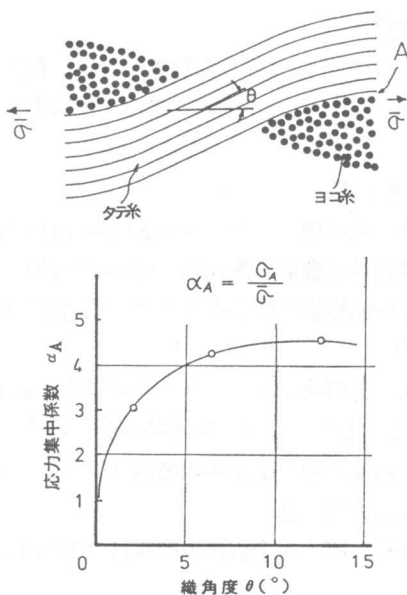


図-8⁵⁾ 繊維角度と応力集中
(西村による)

4.2 横線の剛性が定着効果に及ぼす影響

横線にビニロン繊維を用いた供試体No.6の補強効率の平均値は0.86であり、No.5の値とほぼ同

じとなっている。また、図-6にみられるように変形状も同じ傾向が認められた。すなわち、弾性係数が炭素繊維の1/7、破断強度が6割程度であるビニロン繊維を横線に用いた場合でも炭素繊維を破断させるに十分な定着効果が得られることが認められる。したがって、横線に炭素繊維以外の比較的安価な新素材の利用が可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲で得られた結果をまとめるとつぎのようになる。

- (1) 補強モルタルの破壊形式は、縦線のすり抜けを伴わない繊維の破断であった。それらの強度は、0°積層板強度に対して0.8~1.0の範囲内であった。すなわち、もしや織りで成形したネットは、炭素繊維の力学特性を十分活用できる定着効果を有していることが認められる。これらのことから、炭素繊維積層板とネットの引張強度は、ほぼ同等とみなすことができ、積層板強度からネットの終局耐力の推定ができる。
- (2) 各供試体とも炭素繊維積層板の応力-ひずみ関係に近似した性状が認められた。
- (3) ネット補強枚数すなわち補強繊維量を変化させても、炭素繊維断面積比 p_f - 引張強度の関係は、線形性が保たれる。
- (4) ビニロンなどの比較的安価な素材をネット横線に適用することは可能である。

[謝辞]

実験装置作成に際して協力いただいた九州大学工学部手島義純技官、赤嶺雄一助手および実験に協力してくれた土木第4講座入江浩志・中村茂両君に深く謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 南 英明他：コンクリート補強材としてのビッチ系炭素繊維ネットの引張特性、土木学会第44回学術講演会概要集1989、pp.292~293
- 2) 牧角龍憲他：炭素繊維ネットで補強した薄肉部材の曲げ特性、セメント技術年報 42、pp.467~470
- 3) 南 英明他：コンクリート補強材としての炭素繊維ネットの引張性状に及ぼす織込み方法の影響、土木構造・材料論文集第5号、1990、pp.123~133
- 4) 秋浜繁幸他：炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の実験研究(その2)、鹿島建設技術報告年報、1982、pp.57~68
- 5) 西村 明：炭素繊維中間基材-その1、日本複合材料学会誌、1988、pp.173~180