

# 論文 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料におけるコード繊維の付着特性に関する研究

和地 正浩\*1・三橋 博三\*2・金子 佳生\*3・川又 篤\*4

**要旨:**セメント系複合材料の高靱性化を目的とし、ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料 (HFRCC) の繊維とマトリクスの付着性能を実験的に検討した。本研究では5本の鋼繊維を撚り合わせて作られたスチールコードと呼ばれる繊維を用い、スチールコード1本と合成繊維を混入したマトリクスの付着性能を実験から考察することにより、HFRCCの性能向上の可能性を検討した。その結果、合成繊維を混入したマトリクス、水結合材比、スチールコードの配向角がスチールコードの付着特性に与える影響を確認することができた。

**キーワード:**繊維補強, 鋼繊維, 合成繊維, 付着特性, スナッピング

## 1. はじめに

本来脆性的な破壊挙動を示すセメント系複合材料の高靱性化に関する研究が盛んに行われている。セメント系複合材料の高靱性化の手法の一つに繊維の混入が挙げられる。繊維補強セメント系複合材料 (FRCC: Fiber Reinforced Cementitious Composites) では繊維が、マトリクス (セメント系母材) に進展するひび割れに架橋し、その進展を抑制することで、より高い変形性能が得られる。高靱性 FRCC を創り出すためには、繊維とマトリクスの付着がよく、且つアスペクト比の大きい (細長い) 繊維を用いることが有効とされている<sup>1)</sup>。しかし、アスペクト比の大きい高分子繊維では、繊維の曲げ合成が小さいなどの理由から、一般に練り混ぜ、施工性はモルタルに比べ大きく低下し、配筋が施されている構造物への打設は困難とされている。又、このような繊維は、骨材を混入した際に付着性能が低下してしまう傾向がある。このような性質を改善する一つの方法として、太径で曲げ剛性が高く、且つ付着性能に優れている繊維を用いることが挙げられる。

このような背景から、本研究ではスチールコードと呼ばれる太径繊維を用いた。スチールコードは五本の鋼繊維を撚り合わせるにより太径化されており、且つ撚られることにより繊維表面に凹凸ができるため付着特性の向上にも期待が持て、又、その曲げ剛性の高さから練り混ぜ、施工にも有効であると考えられる。しかし、スチールコードの曲げ剛性の高さはマトリクスの破壊をも引き起こす<sup>2)</sup>。そこでマトリクスに合成繊維を混入してマトリクスの高靱性化を図り、それによるハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料 (HFRCC: Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites) の性能向上の可能性を検討した。

## 2. スチールコードとマトリクスの付着試験

### 2.1 実験の概要

セメント系複合材料に繊維を混入するとその繊維量は総体積の数パーセントになるため、繊維の配向はランダムとなる。しかし繊維のランダム配向は繊維とマトリクスの付着に関係する因子を多くし、付着特性の解明を困難なものにする。そこ

\*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (正会員)

\*2 東北大学大学院教授 工学研究科都市・建築学専攻 工博 (正会員)

\*3 東北大学大学院助教授 工学研究科都市・建築学専攻 PhD (正会員)

\*4 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (正会員)

で本論文では、スチールコード一本を埋め込んだひょうたん型試験体を用いることによって簡略化された付着試験を行い、付着特性及び繊維-マトリクス界面の破壊メカニズムについて検討した。又、スチールコードに配向を与えたスナッピング試験も行った。シリーズとして水結合材比 (W/B) : 27%, 34%, 42%, マトリクスに混入する合成繊維として、アラミド、二種類のポリビニールアルコール (PVA-R, PVA-U), ポリエチレンの計四種類、スチールコードの配向角として  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  の二種類を用意した。

## 2.2 使用材料

以下に本研究で使用した材料を示す。

- ・早強ポルトランドセメント (C)
- ・シリカフューム (SF)
- ・高性能 AE 減水剤 (SP) (主成分：芳香族アノスルホン酸系高分子化合物)
- ・増粘剤 (VA) (主成分：水溶性セルロースエーテル)
- ・スチールコード (カット長さ：32mm, コード径： $380\mu\text{m}$ , 破断荷重：230.5N, 単位重量：0.692g/m) 但し、スチールコードは5本の繊維を集束して撚ることにより製造されている。使用する合成繊維とその物性を表-1に示す。

表-1 合成繊維の物性

合成繊維の種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	繊維径 ( $\mu\text{m}$ )	引張強度 (MP)	引張弾性率 (GPa)
アラミド	1.39	12	3500	74
PVA-R	1.3	37.0	1620	42
PVA-U	1.3	38.2	1820	51.3
ポリエチレン	0.97	12	2770	88

## 2.3 調合

調合は表-2の通りである。W/B=42%の調合ではシリカフュームを加えずに増粘剤を加えた。それは、セメントペーストの粘性を高め繊維の分散を良くするためである。なお合成繊維の混入率は総体積の1.5%とした。

表-2 マトリクスの調合

W/B	粉体の混合割合 (wt.%)		減水剤 SP/B wt.%	増粘剤 VA/(W+SP) wt.%
	C	SF		
27%	80	20	2	0
34%	80	20	2	0
42%	100	0	0.7	0.8

※B=C+SF

## 2.4 試験体作製方法

練り混ぜにはオムニミキサー (容量：10 l) を用いた。混和材を1分間空練りし、その後、水及び減水剤を投入し3分間練り混ぜた。その後更に合成繊維を混入し5分間練り混ぜた。

練り混ぜ後、型枠に流し込み、突き棒でよく突き、気泡が含まれないよう振動を与えながら成型した。打ち込み後、養生室内 (温度  $20^\circ\text{C}$ , 相対湿度 94%以上) にて1日湿空養生を行い、その後脱型して6日間の標準養生を行った。そして打ち込み後7日目に試験を行った。

## 2.5 試験体

すべてのシリーズにおいて試験体を3体ずつ作製した。試験体の概略図を図-1に示す。

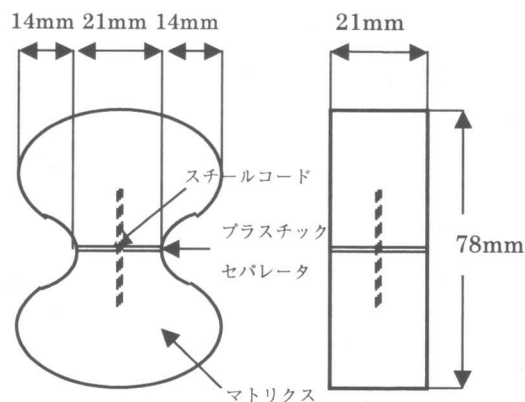


図-1 ひょうたん型試験体概略図

## 2.6 試験方法

インストロン製万能試験機 (最大能力 3tf) で  $0.2\text{mm}/\text{min}$  の変位制御による載荷速度で試験を行い、試験体両面に取り付けたクリップゲージ (最大能力 5mm) によって引張荷重-開口変位関係を測定した。

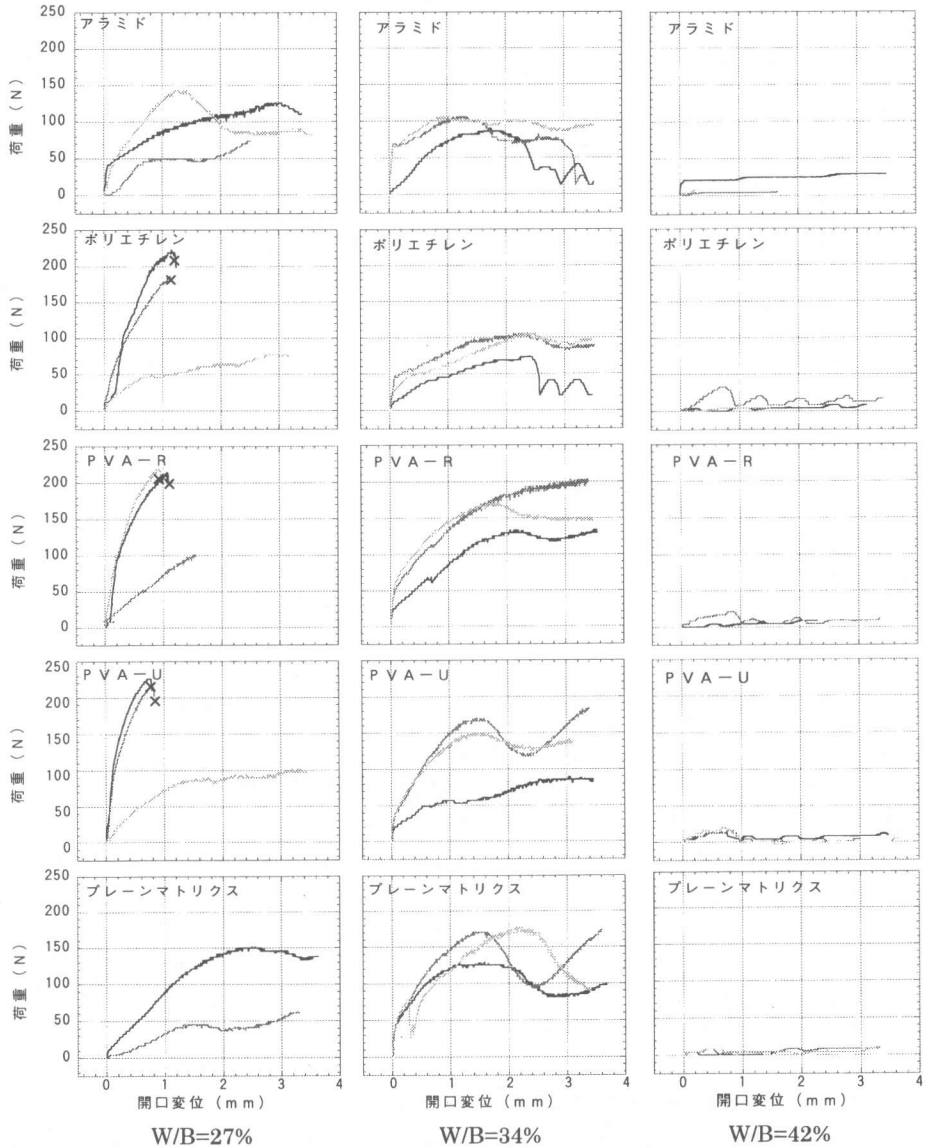


図-2 付着試験による荷重-開口変位曲線

※ ×はスチールコードの破断を示す

### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 付着試験結果

試験によって得られた荷重-開口変位曲線を図-2に示す。曲線が途中で途切れているのは開口変位がクリップゲージの測定限界を超えたからである。基本的には、マトリクスに合成繊維を混入してハイブリッド化した試験体は、合成繊維を混入してない試験体に対して、付着力は増大し、よ

り韌性に富んだ挙動が得られた。W/B=27%のシリーズにおいて、合成繊維を混入した試験体においては、スチールコードが破断するという結果も出ている。又、W/B=34%においては、荷重が増大しながら、比較的なだらかな曲線を描き、今回行った実験の中では比較的良好な結果が得られた。しかし、W/B=42%のシリーズにおいてはスチールコードとマトリクスの付着が充分に得られず、

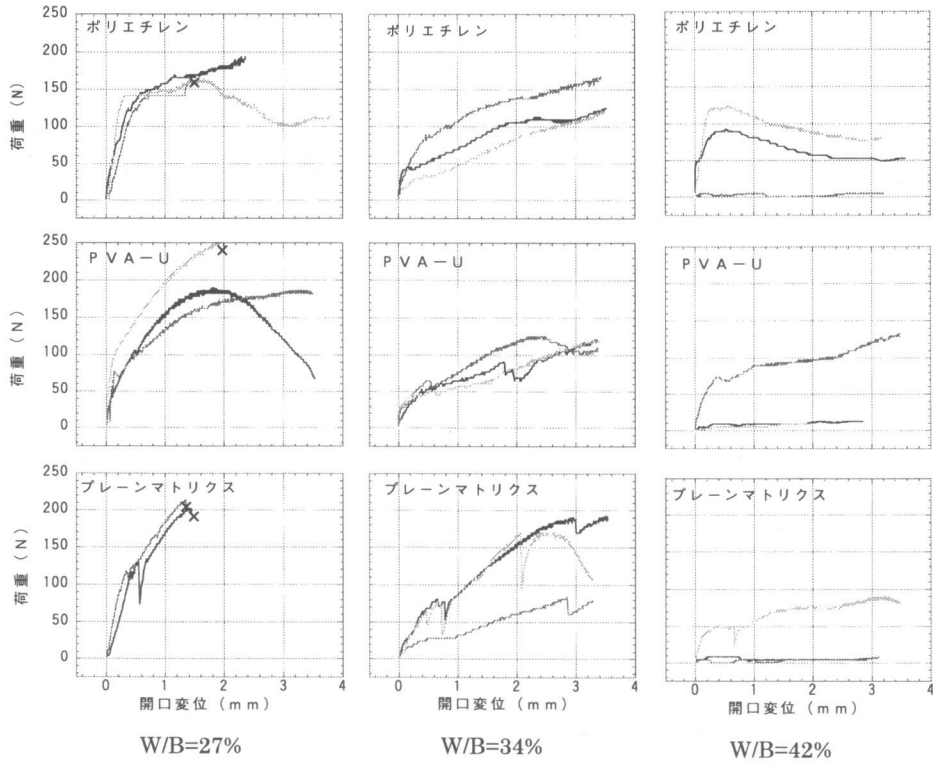


図-3 スナッピング試験による荷重-開口変位曲線

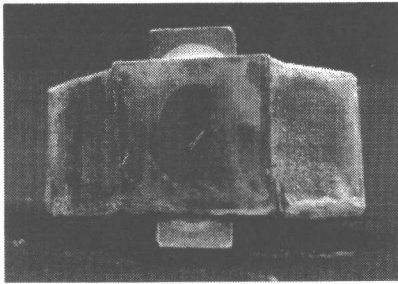
※ ×はスチールコードの破断を示す

荷重もほとんど上がらなかった。これは W/B=42%において W/Cが高いのみならず、シリカフェームが入ってなかった事もあいまって、マトリクスの充填率が低下し、スチールコードの表面の凹凸との付着が十分に得られなかったためと考えられる。スチールコードの表面の凹凸は小さいので、マトリクスの微細組織が緻密でないと付着力の向上は期待できず、また合成繊維の混入による効果もあまり期待できない。尚、グラフにばらつきがあるのは、試験体が細い繊維一本のみによりつながれているため初期状態における付着の劣化が起きている場合があるためだと考えられる。

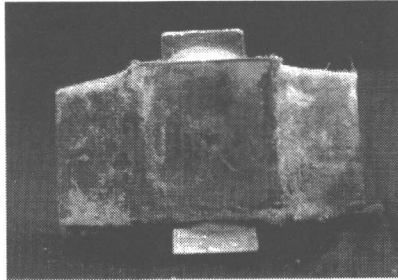
### 3.2 スナッピング試験結果

スナッピング試験によって得られた荷重-開口変位曲線を図-3に示す。スナッピングとはひび割れ面に対して繊維が傾斜して架橋する現象のことで、ひび割れ面付近で繊維が引き抜ける際にマ

トリクスに引っかかることにより架橋力が増大する現象のことである。しかしながら、時には繊維の破断を招くことになる。FRCCでは繊維の配向はランダムになるため、もしひび割れが発生したときにはほとんどの繊維はこのスナッピングを起こしていると考えることができ、FRCCの力学的性質を考える上で欠かせない問題である。今回の実験ではマトリクスに混入する繊維として、ポリエチレン、PVA-Uの2種類を取り上げ、それに合成繊維を混入しないシリーズを加えた計3シリーズでスチールコードに30°の配向角を与えて実験を行った。荷重-開口変位曲線を見ても基本的にはスチールコードを傾斜させていないシリーズに比べ架橋力は増大している。W/B=27%の合成繊維を混入したシリーズでは付着試験結果に比べて低い引張荷重でスチールコードが破断しているのが確認できる。これは合成繊維の混入によりマトリクスの靱性が向上しているため、ひび割れ



プレーンマトリクス



ポリエチレン

図-4 スナッピング試験による  
ひび割れ開口面の破碎図

面付近でスチールコードにかかる摩擦力が集中した結果だと考えられる。又、引張荷重が開口変位の増加に伴って更に増加し、優れた靱性挙動を示す傾向が確認できる。しかし合成繊維を混入していないシリーズでは、ピーク荷重到達後に荷重の低下が確認できる。合成繊維を混入したシリーズではその荷重の低下が見られないことが特徴的である。

次に、スナッピング試験による開口面におけるスチールコード周りのマトリクスの写真を図-4に示す。合成繊維を混入したシリーズではスチールコード周りが破碎していないが、合成繊維なしの試験体ではスチールコード周りが破碎していることがわかる。このことから傾斜したスチールコードによるマトリクスの破碎が、合成繊維の混入により抑えられたことが確認できる。合成繊維を混入していないシリーズではひび割れ面付近の破碎が生じた後、スチールコードは両端部を固定された直接引張と同様の形になり(図-5)、引張荷重に抵抗するようになるため見かけ上、合成繊維を混入したシリーズよりもより高耐力を示す。し

かし、靱性という意味ではピーク以降の挙動が脆性的なのは好ましい傾向ではない。ハイブリッド化を施したシリーズでは、クリップゲージの測定限界を超えてもなおマトリクスは破碎することなくスチールコードは連結したまま耐力は増大する。したがって三次元的にランダム配向を示す通常のHFRCCではこの合成繊維の混入による付加的抵抗が、スチールコードの抵抗力を充分引き出すのに重要な役割を果たす。逆を言えば、ハイブリッド化することによってスチールコードとマトリクスの一体性を保つことになり、これがHFRCCの一番の利点でもある。

### 3.3 靱性評価

靱性評価のパラメータの平均値を図-6、図-7に図示する。ここで、開口変位 2.5mm までの荷重-開口変位曲線下の面積を  $A_{2.5mm}$  とした(図-6)。又、 $A_{2.5mm}$  をそれぞれの最大荷重で除した値を  $A_{2.5mm} / P_{max}$  (図-7) とし、これを靱性評価のパラメータとした。 $A_{2.5mm}$  は変形性能と耐荷性能の積として靱性を評価するが、 $A_{2.5mm} / P_{max}$  はピーク荷重に対する耐荷性能を相対値で表すので変形性能によるエネルギー吸収性能をより良く評価できるものと考えられる。付着試験の結果から算出した  $A_{2.5mm}$  を見てみると  $W/B=34\%$  のシリーズが最も大きい吸収エネルギーを示すことが確認できる。スナッピング試験においては  $W/B=27\%$  の示す値が最も大きく、続いて  $34\%$ 、 $42\%$  となっている。次に  $A_{2.5mm} / P_{max}$  を見てみると、水セメント比が

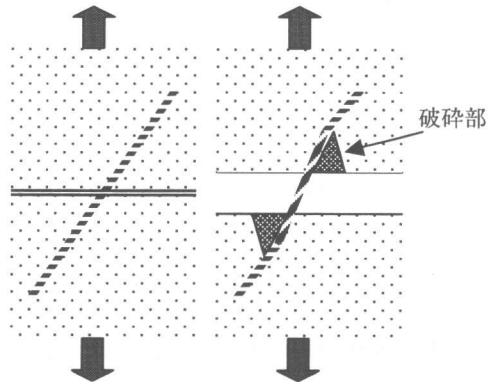


図-5 スナッピングによるモルタルの破碎

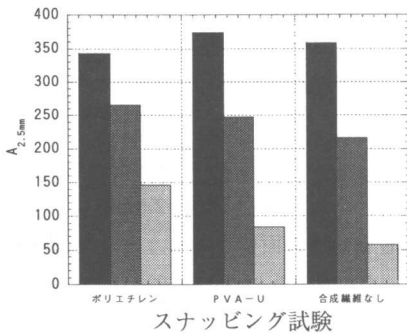
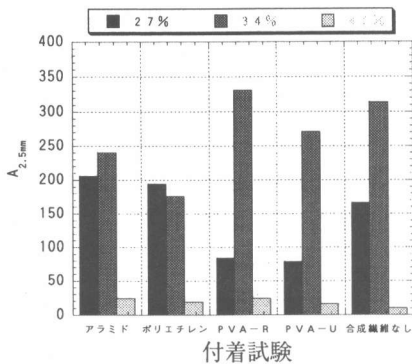


図-6 各試験による  $A_{2.5mm}$

27%では合成繊維を混入したシリーズの結果において明確な靱性の向上が確認できる。42%では  $A_{2.5mm}$  の値は小さいが、ピーク荷重も小さいためこのような結果になっている。この結果からも、合成繊維を混入したシリーズにおいて性能の向上が確認できる。

スナッピング試験による  $A_{2.5mm}/P_{max}$  はより安定した評価値を示す傾向になっている。又、この結果も僅かではあるがハイブリッド化を施したほうが大きい値を示している。

#### 4. 結論

本論文では、合成繊維種類、水セメント比、及びスチールコードの配向角がスチールコードとマトリクスの付着特性に及ぼす影響を実験から確認することができた。以下に結論をまとめる。

(1) 本論文で用いたスチールコードの付着強度特性及び抜け出し変形特性は、マトリクスそのものの微細構造の緻密さと、強度によって決まりマトリクスに合成繊維を加えてもあまり大きな効果は期待できない。

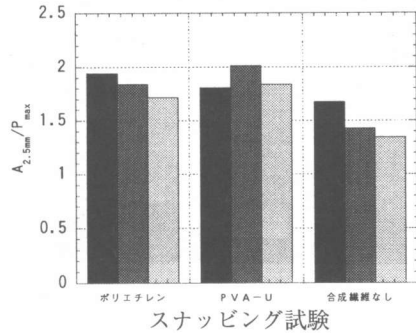
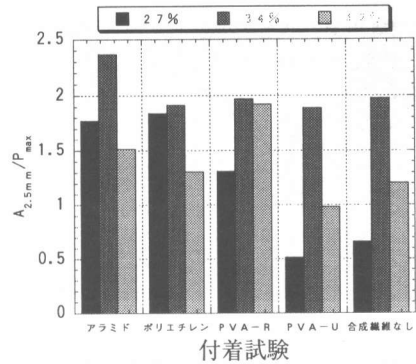


図-7 各試験による  $A_{2.5mm}/P_{max}$

(2) ひび割れに対して配向をもたせてマトリクス中に埋め込まれたスチールコードは、その曲げ剛性と強度の高さからひび割れ面のスチールコード周りのマトリクスを容易に破砕する。従って、マトリクスに合成繊維を混入することによって、その破砕を抑制し、靱性を大きく改善できる。

#### 謝辞

本研究は平成12年度科学研究補助金（基礎研究(B)）によるものである。

#### 参考文献

- 1) Li, V.C. and Leung, C.K.Y.: Steady-state and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.118, No.11, pp.2246-2264, 1992
- 2) 川又篤, 三橋博三, 福山洋: ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の曲げ破壊性状, 日本建築学会東北支部研究報告集 構造系, 第63号, pp.69-72, 2000.6