

論文 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の靱性能に関する研究

川又 篤^{*1}・三橋 博三^{*2}・金子 佳生^{*3}・福山 洋^{*4}

要旨：本研究の目的は繊維補強セメント系複合材料(FRCC)の高靱性化である。スチールコードと呼ばれる特殊加工された鋼繊維を使用したFRCCの切り欠き梁の曲げ試験を行ったところ切り欠き先端に脆性的なmacrocrackの形成が確認できた。そのため、スチールコードと共にアスペクト比の小さい合成繊維を混入したハイブリッド型セメント系複合材料により多段階ひび割れの形成について検討した。その結果、合成繊維とハイブリッド化を施すことによりmicrocrackの形成が確認できた。又、ハイブリッド化によりマトリクスが靱性的になり、スチールコードの拘束力が向上したため、高強度・高靱性挙動を付与することができた。

キーワード：繊維補強、ハイブリッド、靱性、ひび割れ

1. はじめに

コンクリートやモルタルといったセメント系材料に関する研究は力学的強度、主に圧縮強度を高める方向性で行われてきた。しかしながら、高強度セメント系材料は緻密ではあるが、極めて脆性的な破壊性状を示す。このような脆性的な破壊挙動の改善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、マトリクス(セメント系母材)に進展するひび割れが抑制され、変形性能に富んだ挙動が得られる。繊維補強は単に引張強度を高めるためではなく、ひび割れを制御し、ひび割れ発生後はひび割れ間に介在する繊維が力を伝達することによる挙動改善のために施される。つまりFRCCは安全性を確保するための材料と言える。

本論文では、Rossi¹⁾により提案されたひび割れの定義を繊維補強セメント系複合材料に適用して、多段階のひび割れ過程を示すハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の可能性を検討すると共にその靱性の評価を定量的に行う。

2. 多段階ひび割れ過程

2.1 ひび割れの定義

Rossi¹⁾は繊維補強材料が靱性挙動を得るための指針をマイクロ及びマクロな視点から報告している。Rossiはまずひび割れについて以下のように定義している。

microcrack : 試験体や構造物のサイズと比較して微小とみなすことのできる長さのひび割れ

macrocrack : 試験体や構造物のサイズと比較して微小とみなすことのできない長さのひび割れ

active crack : ひび割れの縁が垂直方向又は接線方向に変位するひび割れ

critical active crack : コンクリート内で応力集中や局所歪に至るひび割れ

又、active macrocrackはcriticalになったactive microcrackとし、材料の挙動から構造物への挙動への移行はactive microcrackからactive macrocrackへの移行に相当するとしている。

2.2 ひび割れの大きさと繊維の架橋効果

繊維はひび割れ間を架橋して応力を分散させることによりひび割れの局所化を遅らせ靱性や

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 工修 (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 Ph. D. (正会員)

*4 国土交通省建築研究所 工博 (正会員)

変形性能を向上させるが、microcrackとmacrocrackとでは効果的な繊維の形状が異なることは明白である。つまり、microcrackにおいて繊維が効果的に働くためには、大量の短繊維が必要とされ、それらの直径は小さくしなければならない(表面積が大きい)。macrocrackにおいて繊維が効果的に働くためには、繊維はマトリクスにおいて十分に架橋できるように長くなければならない。

又、繊維のアスペクト比はワーカビリティにも影響を及ぼす。つまり、短繊維を混入したときの方が長繊維を混入したときよりもワーカビリティは良好である。

2.3 研究の目的

Liら²⁾はマイクロメカニクスに基づいたECC(Engineered Cementitious Composites)を開発した。このような高靱性FRCCを創り出すためには、繊維とマトリクスの付着が良く、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。しかしながら、アスペクト比の大きい高分子繊維では、繊維の曲げ剛性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て大きく低下し、配筋が施されている構造物への打設は困難と言われている。又、このような繊維は、界面において付着強度が過剰に高くなり破断する傾向が強い。このような性状を改善する一つの方法として、太径で曲げ剛性が高く、且つ付着特性が優れた繊維を用いることが考えられる。

このような背景から、本研究では太径繊維を用いたFRCCにおける靱性向上の可能性を検討した。ここで使用した繊維は、スチールコードと呼ばれる特殊加工された鋼繊維である。スチールコードは、5本の鋼繊維を撚り合わせることで太径化されており、且つ撚られることにより繊維表面に凹凸が生じるため付着特性の向上にも期待が持てる。又、その形状及び曲げ剛性理由から、練り混ぜ・施工性にも有効と考えられる。つまり、スチールコードは高強度・高靱性挙動を発現するFRCCの製造を可能にする繊維

であると期待されている。しかしながら、スチールコードを混入したFRCCの切り欠き梁の曲げ試験を行ったところ、切り欠き先端に脆性的且つマクロなひび割れ(critical macrocrack)が生じた。そこで、本研究では上記の結果を踏まえ、スチールコードと共にアスペクト比の小さい合成繊維を混入してハイブリッド型繊維補強を施すことにより、ひび割れの微細化(microcrackの形成)を追究し、更なる高靱性FRCCの可能性を検討した。本報ではその基礎的検討結果を報告する。

3. スチールコード混入FRCCの曲げ試験

3.1. 実験の概要

スチールコードを混入したFRCC切り欠き梁を用いて、3点曲げ試験を行った。

(1) 使用材料

以下に本実験で使用した材料を示す。

- ・早強ポルトランドセメント(C)(比重: 3.14)
- ・シリカフェーム(SF)(比重: 2.20)
- ・超高強度コンクリート用減水剤(SP)(比重: 約1.1, 主成分: 芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物)
- ・増粘材(比重: 1.2~1.3, 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 μ 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本のスチール繊維を集束して撚ることにより製造されている。

(2) 調合

調合は、次の通りである。W/B=30%, C:SF=79.3:20.7vol.%, SP/(C+SF)=2.0wt.%。又、スチールコードの分散性を向上させるにはマトリクスの粘性を高める必要がある。そこで増粘材を使用し、増粘材量は水と減水剤の総重量の0.6%とした。又、スチールコードの混入率は1.5vol.%とした。

(3) 試験体作製方法

練り混ぜにはオムニミキサー(容量: 10l)を用

いた。セメント及び混和材を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、スチールコードを投入して、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に振動を与え成形した。ここでは、40×40×160mmの角柱試験体を3体製作した。打ち込み後、養生室内（温度20℃、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後、打ち込み後7日目に試験を行った。

(4) 試験方法

曲げ試験は、角柱試験体中央部にコンクリートカッターを使用して深さ10mmの切り欠きを設けた試験体により行った。インストロン製万能試験機(最大能力3tf)にて0.2mm/minの変位制御で試験を行い、荷重-CMOD(Crack Mouth Opening Displacement) 曲線を測定した。

3.2. 実験結果及び考察

図-1に3点曲げ試験で得られた荷重-CMOD曲線を示す。スチールコードを混入した場合、合成繊維のみを混入した場合と比較して³⁾、強度・靱性に富んだ挙動が得られた。又、練り混ぜにおいても、増粘材を投入したため、スチールコードの分散性は良好であった。

しかしながら、切り欠き先端のひび割れ状況を観察した所、マトリクスには脆性的且つ大きなひび割れ(critical macrocrack)が多数見られた(図-2)。これは、スチールコードの曲げ剛性が高いがために生じた、スナッピングによるマトリクスの破砕が原因と考えられる。スナッピングとは、ひび割れ面に対して繊維が傾斜して介在している時に、ひび割れ面付近において繊維とマトリクスが引っ掛かることにより、架橋力が増大する現象のことである。スチールコードは強度・剛性が高いため、スナッピングによる応力集中によってマトリクスの方が脆性的に破損したのと考えられる。このようなマトリクスの脆性的な破砕を改善して、スチールコードの性能を可能な限り発現することにより、更に強

度・靱性に富んだ挙動が得られると考えられる。そこで、マトリクスにアスペクト比の小さい合成繊維を混入することにより、microcrackを示す靱性的なマトリクスへと改善する試みを行った。つまり、スチールコードと合成繊維によるハイブリッド型繊維補強である。

4. ハイブリッド型FRCCの曲げ試験

4.1. 実験概要

ここでは、スチールコードと共に合成繊維を混入して、更なる高強度化・高靱性化を目的とした基礎的な実験の検討を行った。

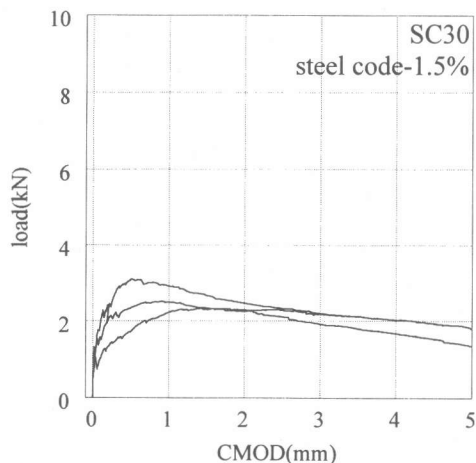


図-1 スチールコード混入FRCC切り欠き梁の3点曲げ試験により得られた荷重-CMOD曲線

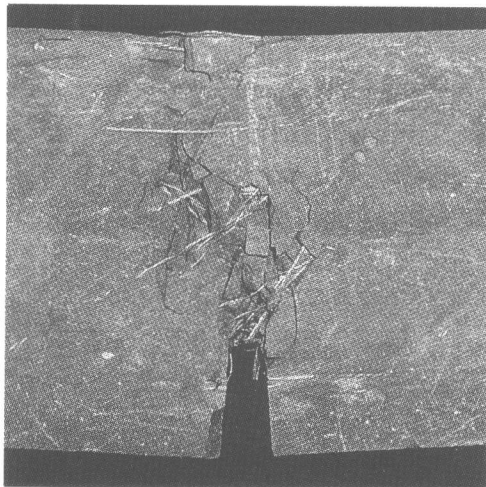


図-2 スチールコード混入FRCCの切り欠き先端のひび割れ状況

(1) 使用材料

マトリクスにおける使用材料及びスチールコードは前章と同様である。又、ここではスチールコードより先に合成繊維を投入することでスチールコードを分散するために十分な粘性を確保したため、増粘材は使用しなかった。又、合成繊維には、アスペクト比が同程度であるアラミド、ビニロン、ポリエチレンの3種類を用意した。更に、ポリエチレンについては物性の異なるものを2種類用意した。表-1に各合成繊維の物性を示す。

(2) 調合

本実験におけるマトリクスの調合は増粘材を除いて前節と同様である。又、各繊維の混入量を表-2に示す。尚、スチールコードとアラミド繊維とのハイブリッド型FRCCではアラミド繊維の混入量を変化させた。

(3) 試験体作製方法

練り混ぜにはオムニミキサーを用いた。セメント及び混和材を1分間空練りし、水及び減水剤を投入し3分間練り混ぜ、その後合成繊維を投入し5分間練り混ぜ、更に、スチールコードを投入して、5分間練り混ぜた。

ここでは、40×40×160mmの角柱試験体を各シリーズにつき3体製作した。又、養生方法及び試験方法は前節と同様である。

4.2 実験結果及び考察

(1) 荷重-CMOD曲線

図-3にハイブリッド型FRCC切り欠き梁の3点曲げ試験で得られた荷重-CMOD曲線を示す。概して言えば、ハイブリッド化により強度・靱性は大幅に向上したことが確認できた。アラミド繊維とのハイブリッドを施したhyA1~3では、合成繊維量を増すことにより、ピーク荷重が増大しており、強度の面での向上が見られる。一方、ビニロン繊維とのハイブリッド化(hyV)、及びポリエチレン繊維とのハイブリッド化(hyP1及びhyP2)においても、ハイブリッド化による強度及び靱性の向上が確認できる。特に、ポリエチレン繊維によるハイブリッド化では、靱性にお

表-1 各合成繊維の物性

繊維種 (記号)	比重	繊維長さ (mm)	繊維径 (μm)	アスペ クト比	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)
アラミド(A)	1.39	6	12	500	3400	72.5
ビニロン(V)	1.3	18	37	486	1960	47
ポリエチレン(P1)	0.97	15	34	441	1650	42
ポリエチレン(P2)	0.97	30	12	2500	2580	73

表-2 各シリーズの略号と繊維混入量

略号	SC混入量 (vol.%)	合成繊維種	合成繊維混入量 (vol.%)
hyA1	1.5	A	1.5
hyA2	1.5	A	2.0
hyA3	1.5	A	2.5
hyV	1.5	V	1.5
hyP1	1.5	P1	1.5
hyP2	1.5	P2	1.5

いて大幅な向上が見られた。

(2) 切り欠き先端のひび割れ状況

図-4に各シリーズの曲げ試験後の切り欠き先端のひび割れ状況を示す。hyA1~3では、スチールコードのみを混入したSC30に見られたようなマトリクスの脆性的な破壊(critical macrocrack)は減少しており、合成繊維を混入することにより、スチールコード付近のマトリクスは靱性的になり、スナッピングによるマトリクス破砕が緩和されたと言える。

ビニロン繊維、及びポリエチレン繊維とのハイブリッド化では、多数の微細なひび割れ(microcrack)が確認できた。特に、ポリエチレン繊維とのハイブリッド化では、全ての試験体において多数のmicrocrackが確認できたことから、これにより靱性的な挙動を示したと考えられる。しかしながら、アラミド繊維とのハイブリッド化では、未だひび割れ幅は広く、microcrackはほとんど確認できなかった。そのため、ビニロン繊維及びポリエチレン繊維とのハイブリッド化と比較し、荷重-CMOD曲線においてピーク荷重後の降下勾配は急になったと考えられる。

5. 靱性評価

次に、各シリーズの靱性能の定量的な評価を

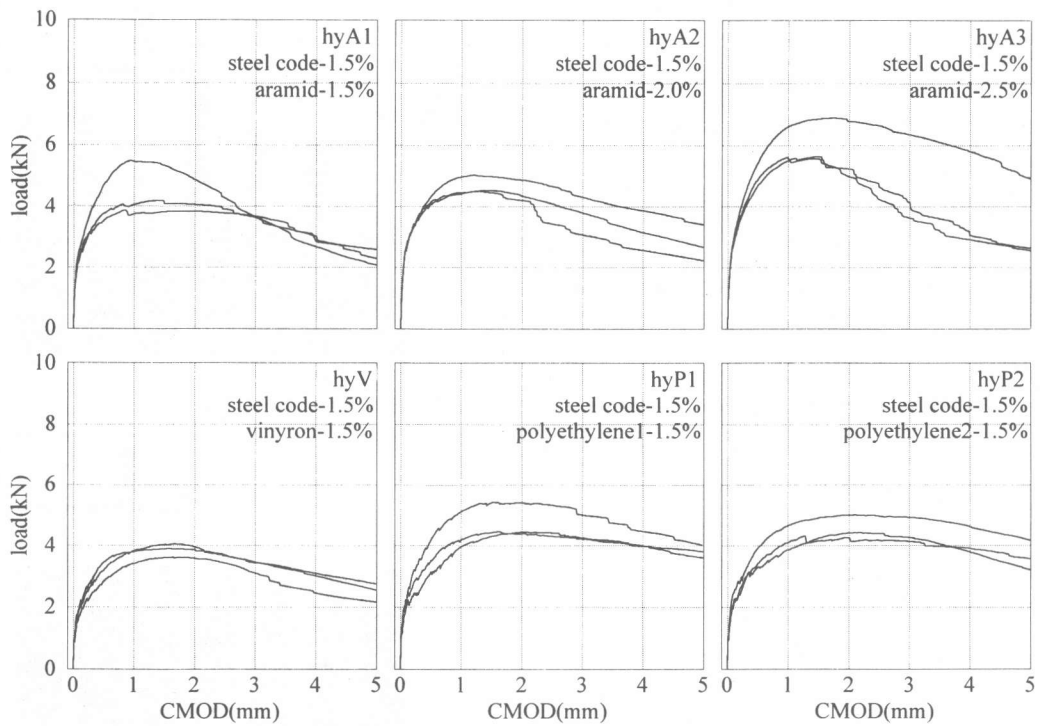


図-3 ハイブリッド型FRCC切り欠き梁の3点曲げ試験により得られた荷重-CMOD曲線

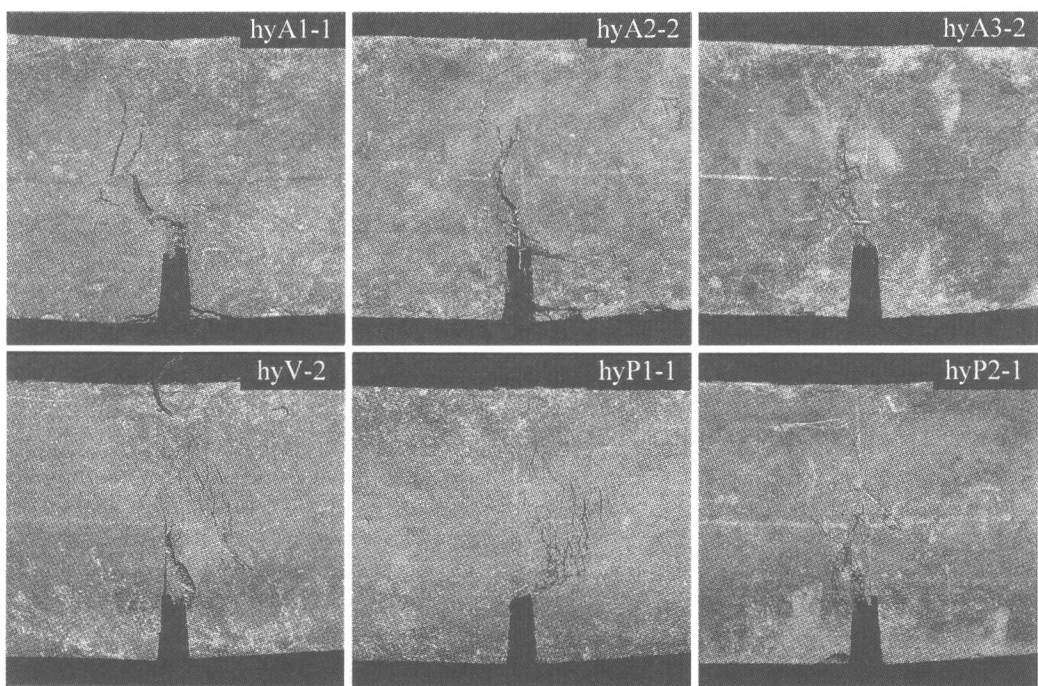


図-4 各シリーズの切り欠き先端のひび割れ状況

行った。ここで、CMOD=2.5mm及び5.0mmまでの荷重-CMOD曲線下の面積をそれぞれ $A_{2.5mm}$ 、 $A_{5.0mm}$ とした(図-5)。本実験における切り欠き梁の載荷点変位はCMODの約82%であったため、 $A_{2.5mm}$ 、 $A_{5.0mm}$ はそれぞれ梁が部材角1/37~1/36、1/19~1/18に変形するまでの吸収エネルギーと評価される。更に、 $A_{2.5mm}$ 及び $A_{5.0mm}$ をそれぞれの最大荷重及びCMOD(2.5mm及び5.0mm)で除して無次元化した値を靱性評価の指標とした(図-6)。これはピーク荷重後の変形によるエネルギー吸収特性を相対的に評価できるものと考えられる。

図-5を見ると、SC30と比較しハイブリッド化を施したシリーズでは値が増加しており、強度・靱性の面で向上したと言える。更に、hyA1~3では合成繊維量の増加に伴い、ピーク荷重が増加したことから値の上昇が見られる。又、 $A_{5.0mm}$ において同繊維量のもの进行比较すると、ポリエチレン繊維によるハイブリッド化されたシリーズが高い値を示していることから、大きな歪みにおいても高い抵抗力を示すことがわかる。

次に、図-6を見ると、SC30が比較的高い値を示している。これはSC30ではピーク荷重は低いものの、その後の降下度は緩やかであることを意味している。一方、hyA1~3を見ると、hyA3ではアラミド繊維量が増加したものの値が低下している。これは繊維量が増加して、ピーク荷重は高くなるものの、ピーク後の降下は急激になるからである。又、5.0mmまで評価を行った場合は、ポリエチレン繊維とのハイブリッド化を施したシリーズが高い値を示しており、この組み合わせが、スチールコードの性能を最大限に発現するために有効であると言える。

6. 結論

本研究ではハイブリッド型セメント系複合材料により多段階ひび割れの形成について検討した。以下に結論をまとめる。

(1)スチールコードのみを混入した場合はmacrocrackが発現したが、アスペクト比の小さい

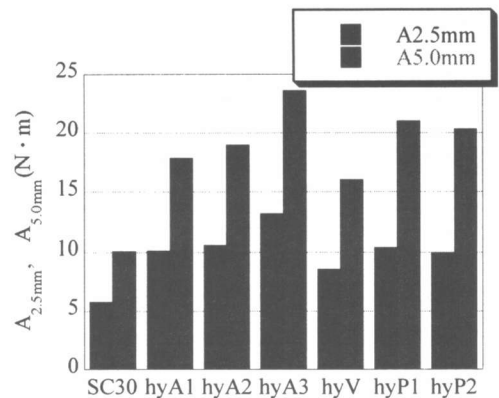


図-5 各シリーズの $A_{2.5mm}$ 及び $A_{5.0mm}$

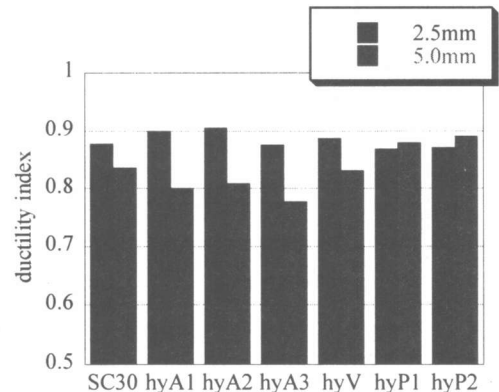


図-6 各シリーズの靱性指標

合成繊維とハイブリッド化を施すことによりmicrocrackの形成が確認できた。

(2)ハイブリッド化によりマトリクスが靱性的になり、マトリクスの破壊挙動は改善され、これにより高強度・高靱性挙動を付与することができた。

謝辞：本研究費の一部は、平成12年度科学研究費補助金によるものである。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Pierre Rossi : Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes(UHPFRC) : An overview, Fiber-Reinforced Concrete(FRC) BEFIB' 2000, RILEM, pp. 87-100, 2000
- 2) 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
- 3) 例えば、川又篤、三橋博三、金子佳生：空気量及び水粉体比が繊維補強モルタルの力学的特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、第22巻、第2号、pp. 301-306, 2000. 6