

	かわまた あつし		
氏名	川 又 篤		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成15年3月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)都市・建築学専攻		
学位論文題目	多段階補強型高靱性セメント系複合材料の開発に関する基礎的研究		
指導教官	東北大学教授 三橋博三		
論文審査委員	主査 東北大学教授 三橋博三	東北大学教授 杉村義広	
	東北大学教授 井上範夫	東北大学助教授 金子佳生	

論文内容要旨

第1章 序論、及び第2章 既往の研究

今日、コンクリート・モルタルといったセメント系材料は高い圧縮強度を得ることができ、更に、型枠によって自由な形状を形成することができることから、世界中で使用される土木・建築構造物の代表的な構成材料の一つとなっている。しかしながら、コンクリートの引張強度は低く、更に歪み限度も小さいため、長期的観点からすると耐久性・安全性を損ねるひび割れが発生しやすい脆性的な材料である。構造物の脆性的な崩壊は前触れもなく突然起こるため、多くの物的・人的被害をもたらすことから、部材もしくは構造物に適切な靱性を付与することが必要となる。特に耐震を目的とする構造物では構造物が損害を受けても崩壊を免れることにより、二次被害を軽減できるのみならず、崩壊の程度が大きくならなければ事後の補修と補強によって、再度構造物の機能を回復することも可能である。セメント系材料を変形能力に富んだ高靱性材料に変える方法の一つに、セメント系材料を繊維によって補強する繊維補強セメント系複合材料(Fiber Reinforced Cementitious Composites、以下、FRCCと記述する)が挙げられる。

Liによる材料設計法¹⁾により、FRCCの高靱性化のための因子は明らかになりつつある。ここでは高靱性挙動を得るためには、アスペクト比の高い(細長い)繊維を用いるのが有効とされている。しかしながら、アスペクト比の高い繊維はからまり易く、繊維の分散及びワーカビリティを大幅に低減する原因となる。更に、Rossiは鋼繊維を使用した場合において、ひび割れのレベルによって最適な形状の繊維により補強すべきだというマルチスケールコンセプトを提案している。そこでは、二つのひび割れのレベルにおいて述べられており、繊維がマイクロクラックに働くためには、大量の繊維が必要とされ、それらの直径は小さくなくてはならないとされている。一方、繊維がマクロクラックに働くためには、繊維はマトリッ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とされている²⁾。このように、ある現象を考えると、巨視的な挙動をマクロレベル、微視的な挙動をミクロレベル、そしてその中間の挙動をメゾレベルとレベル分けをすることは有効とされている³⁾。

以上のような背景から、本論文では、異なる繊維を混合して用いる所謂ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料により、ひび割れのレベルに応じて異なる補強材が作用する多段階補強型セメント系複合材料の基礎的検討を行う。ここでは、多段階補強の第一段階として、合成繊維によりミクロレベルのひび割れを補強する。第二段階では、合成繊維でも補強しきれないメゾレベルのひび割れを特殊加工された鋼繊維(スチールコード)を使用して補強する。そして第三段階では、スチールコードでも補強しきれないマクロレベルのひび割れを鉄筋により補強するというように、三段階での多段階補強について実験的検討を行った。このような多段階補強を施すことにより局所ひび割れは遅延されると考えられ、エネルギー吸収性能に優れた部材の製造が期待できる。又、局所ひび割れの遅延は同時に微細な複数ひび割れを発生させるため、高耐久性にも繋がると考えられる。そこで本論文では、各章で合成繊維、スチールコード、そして鉄筋による補強効果を検討することにより、ミクロレベルからマクロレベルにステップアップする形で多段階補強型高靱性セ

メント系複合材料について検討を行った。

第3章 合成繊維補強セメント系複合材料の高靱性化の検討

本章では多段階補強の第一段階として、小さなひび割れを架橋すると考えられる合成繊維のみを使用したFRCCについて高靱性化に向けての実験的な検討を行った。FRCCのマトリックス（セメント系母材）は破壊靱性値が低い方が望ましい。破壊靱性値とはひび割れが単位面積進行するときに解放されるエネルギーであり、破壊靱性値が低いとひび割れが発生し易い傾向にある。そのため、破壊靱性値が低いマトリックスを使用したFRCCでは初期ひび割れ及び複数ひび割れが発生し易くなる。本章では、マトリックスの破壊靱性値 G_{fc} を動かすパラメータとして水結合材比及び空気量を使用して、図1に示すような切り欠き梁の3点曲げ試験を行い、マトリックスの破壊靱性値を測定すると共に、FRCCの靱性能をductility indexとして定量的に評価した。ductility indexは、曲げ試験で得られた荷重-CMOD（切り欠き開口変位）曲線の曲線下の面積を最大荷重及び評価CMODで除することにより算出している。ここでは、図2に示すように、ばらつきは大きいもののおおよそ $G_{fc}=7\sim 8\text{N/m}$ のときにductility indexは最大値を示していることから、本実験における調合では破壊靱性値には最適値があることが明らかとなった。又、ductility indexの高いシリーズでは切り欠き先端に微細な複数ひび割れが確認できた。

第4章 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料に関する基礎的検討

本章では、多段階補強の第二段階としてスチールコードを使用した。スチールコードとは、5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生じるため引き抜け抵抗性能の向上にも期待が持てる。スチールコードを混入したFRCCの切り欠き梁の3点曲げ試験を行ったところ、図3に示すようなマトリックスの脆性的な破壊が見られた。しかしながら、靱性的な曲げ挙動を示したことから、スチールコードはメゾレベルのひび割れが形成されても有効に働くことが明らかとなった。ここで、スチールコードと共に合成繊維を混入したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料（HFRCC:Hybrid FRCC）について曲げ試験を行ったところ、図4に示すように微細なひび割れが形成された。更に、HFRCCでは、スチールコードと合成繊維の補強効果を単純に足し合わせただけでなく相乗効果が得られることが確認できた。ここで、合成繊維が混入されたマトリックス及び混入されていないマトリックスにおいて、スチールコード一本を傾斜させて配し引き抜くというスナッピング試験を行ったところ、合成繊維が混入されたマトリックスでは、Spallingが起らず高い荷重を維持しながら引き抜けることが確認できた。このことから、HFRCCではスチールコード周辺の合成繊維がスチールコードの引き抜け抵抗性能を高めるために相乗効果が発現したと考えられた。

第5章 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の性能評価

本章では、第4章で取り上げたHFRCCを更に実用的な材料にするために水結合材比や合成繊維の種類・形状など様々な因子をパラメ

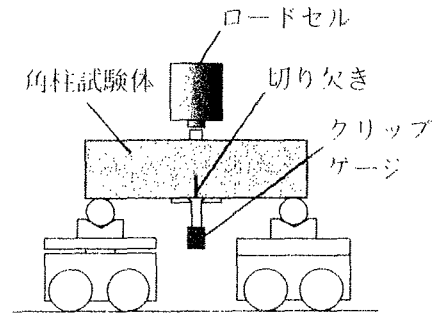


図1 切り欠き梁の3点曲げ試験

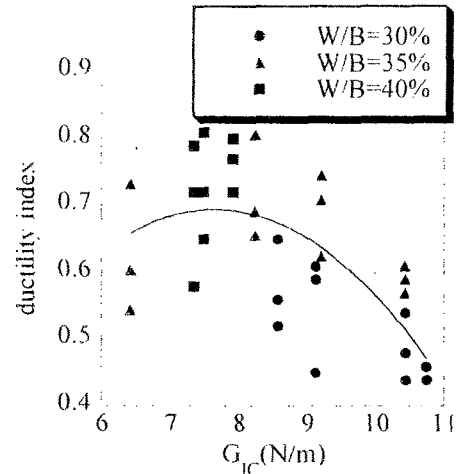


図2 ductility index と破壊靱性値 G_{fc} の関係



図3 スチールコード混入FRCCのひび割れ状況

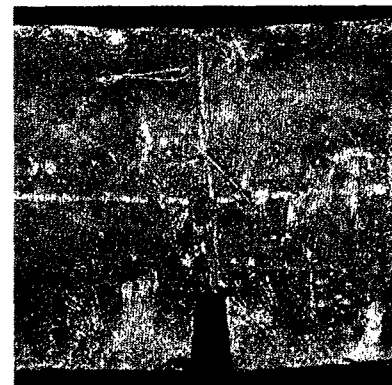


図4 HFRCCのひび割れ状況

一タにとり、その影響を曲げ試験により比較検討した。その結果、低い水結合材比において短いポリエチレン繊維を使用したHFRCCが高強度・高靱性を示すことが明らかとなった。更に、この調合のHFRCCを用いて一軸引張試験を行ったところ1.5%の引張歪まで歪硬化する(図5)と共に試験体全体に複数ひび割れ(図6)が観察されたことからHPFRCC(High Performance FRCC)として位置付けられるほどの高い引張性能を持っていることが明らかとなった。

第6章 多段階補強型高靱性セメント系複合材料の基礎的検討

本章では、多段階補強の第三段階として合成繊維、スチールコード及び鉄筋による多段階補強型高靱性セメント系複合材料について検討を行った。ここでは、合成繊維のみが混入されたFRCC及び合成繊維とスチールコードが混入されたHFRCCに埋め込んだ鉄筋の両引き試験を行い、鉄筋周辺のひび割れの進展状況を観察するためにX線透過撮影により試験体内部を観察した。両引き試験の結果、FRCCとHFRCCの何れの場合でもテンションスティフニング効果が得られたが、HFRCCの方がより高い効果が得られた。HFRCCの負担引張応力を算出したところ一軸引張試験で得られた引張応力よりも高い値を示すことが確認できた。これは鉄筋の節による支圧力と外周のHFRCCによる拘束力により内部で圧縮応力が作用して、たが効果が発現したためと考えられる。更に、X線透過撮影による鉄筋周辺の写真(図7)を見ると、HFRCCをマトリックスとした試験体では鉄筋の節々から微細なひび割れが発生していることが確認できた。

第7章 結論

本論文では、多段階補強型高靱性セメント系複合材料の開発を目的として、その基礎的な実験的検討を行った。結論として、合成繊維とスチールコードを使用した二段階補強であるHFRCCでは、引張応力下において1.5%程度の歪硬化及び微細な複数ひび割れを示し、HPFRCCとして位置付けられるほどの高い性能を示した。更に、鉄筋を加えた多段階型補強型高靱性セメント系複合材料では高いテンションスティフニング効果が得られると共に、鉄筋周辺には微細なひび割れが鉄筋の節々から発生していることが確認できた。ひび割れの微細化は鉄筋の降伏領域を拡大するため、多段階補強型高靱性セメント系複合材料を使用した構造部材では高いエネルギー吸収性能が得られると考えられる。

[参考文献]

- 1) V. C. Li, D. K. Mishra and H. C. Wu : Matrix Design for Pseudo-Strain-Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites, *Materials and Structures*, 28, pp.586-595, 1995.
- 2) P. Rossi : Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes (HPFRC) -An overview, *Fiber-Reinforced Concrete (FRC) BEFIB' 2000, RILEM*, pp.87-100, 2000.
- 3) F. H. Wittmann : Structure of Concrete with Respect to Crack Formation, in *Fracture Mechanics of Concrete*, Elsevier, pp.43-74, 1983.

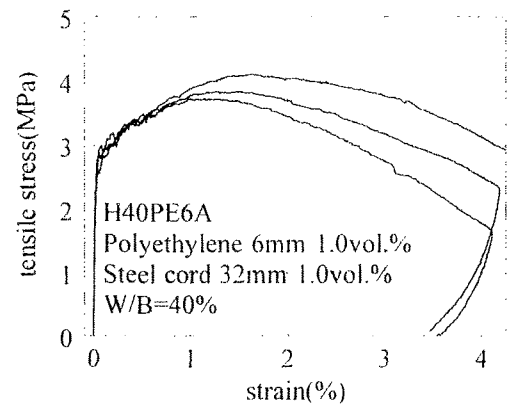


図5 HFRCCの引張応力-歪曲線

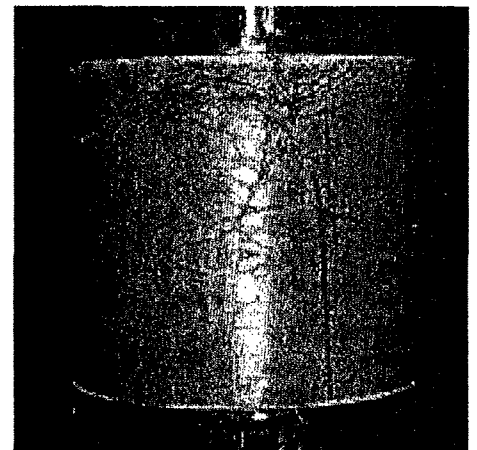


図6 HFRCCのひび割れ状況

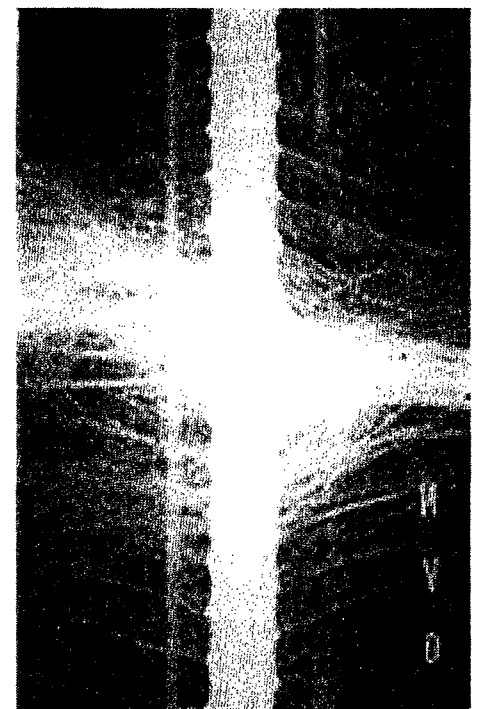


図7 鉄筋周辺のひび割れ状況 (HFRCC、歪1.1%)

論文審査結果の要旨

コンクリートは、建設材料の中で最も代表的なものの一つである。しかしながら、圧縮強度に比較して引張強度が極端に低く、ひび割れを生じて脆性的に破壊することから、より高い安全性・耐久性を付与するために高靱性化が求められている。本研究は、種々の異なる繊維を用いて複合化することにより、従来には見られない程の優れた高靱性セメント系複合材料を開発するための基礎的な研究で、全文7章よりなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的および論文の構成について述べている。

第2章は、高靱性セメント系複合材料の既往の研究成果について、特に本研究に関連の深いものを中心に考察している。

第3章では、補強材として合成繊維のみを用い、マトリックスの破壊靱性を制御することによってセメント系複合材料の高靱性化を図る方法について実験的に検討している。

第4章では、スチールコードと合成繊維のハイブリッド複合化により、セメント系複合材料が高靱性化されるメカニズムについて考察している。その結果、ハイブリッド複合によってスチールコード周囲のマトリックス破壊が抑制され、高い強度と変形性能が引き出されることを明らかにしている。

第5章ではハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の水結合材比や合成繊維の種類・形状などの様々な因子が、強度や変形性能に及ぼす影響について実験により検討している。その結果、実用化可能な施工性と材料の選択による調合において、引張応力下でも安定した歪硬化と靱性に富んだ変形挙動並びに試験体全体に亘る複数ひび割れを観察している。

第6章では、多段階補強型高靱性セメント系複合材料を構造要素に使用する場合の基礎的検討として、セメント系複合材料に埋め込まれた異形鉄筋の両引き試験を実施し、鉄筋周りのひび割れ挙動をX線透過撮影により観察している。その結果、合成繊維のみの補強よりはハイブリッド型繊維補強の方が、ひび割れの分散と成長抑制により有効に働くことから、鉄筋コンクリート構造の高性能化につながるものであることを明らかにしている。

第7章は、結論である。

以上要するに本論文は、高靱性セメント系複合材料の開発を目的としてハイブリッド複合機構の基礎的な検討を行い、高靱性の材料を実現すると共にその材料が鉄筋まわりのひび割れ挙動を制御する能力に富むことを実証し、鉄筋コンクリート構造の高性能化につながることを明らかにしたもので、建築材料学並びに建築構造学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。