

氏名（本籍）	稲熊唯史（愛知県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 327 号
学位授与日付	平成 20 年 3 月 25 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	複数微細ひびわれ型繊維補強セメント複合材料の引張特性と合成部材の挙動 (Tensile properties of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks and behavior of composite members)
学位論文審査委員	(主査) 教授 六郷 惠 哲 (副査) 教授 森本 博 昭 教授 内田 裕 市

論文内容の要旨

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC：high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks）は、引張ひずみの増加とともに引張応力が増加する疑似ひずみ硬化特性と微細なひび割れが複数に分散するひび割れ特性を有する材料である。HPFRCC を適用した部材を設計する場合には、単に引張強度特性のみならず、ひび割れ強度や塑性域のひずみ硬化特性、引張終局ひずみなど非常に多くの特性値を引張試験によって評価することが必要となる。

本研究では HPFRCC を実構造物へ適用することを念頭に置き、前半では HPFRCC の引張特性の評価方法、引張評価試験方法や構造形態による評価結果の相違やその機構、引張応力下において発生する複数微細ひび割れの分散性状を決定づける要因、長期引張応力下における挙動など、HPFRCC 材料の引張特性の評価を行った。後半では HPFRCC と鉄筋とを組み合わせた構造体について、一軸引張応力下と曲げ応力下における部材特性、さらには脆性的なコンクリート構造物と組み合わせた合成部材の特性を明らかにした。

第2章と第3章では引張特性の評価方法について検討した。その結果 HPFRCC の引張特性を評価する試験法として一般的なダンベル型の一軸引張試験法では、評価区間の曲げ変形を抑制しても材料の持つばらつきからひび割れ発錆以降の2次曲げが回避できないこと、またその2次曲げには寸法効果が存在し、ダンベル型試験体の評価区間の断面積が大きくなるほど2次曲げの影響が大きくなり引張特性の評価値は減少することを明らかにした。HPFRCC では繊維の架橋応力とその引張特性を支配しており、マトリックスにおける繊維の分散及び配向のばらつきの影響を受ける。これらのばらつきの影響で HPFRCC の引張特性評価を困難にしており、評価検長区間の長さが長くなると評価される引張強度評価値が減少しひび割れ分散性も低下する。これらの特性は HPFRCC のひび割れ強度と引張強度との強度差とそれぞれの強度の持つばらつきを合わせた確率的検討で関連づけられることを明らかにした。

第4章と第5章では一軸引張と曲げにける評価の相違について検討し、その結果材料特性の評価として、一軸引張試験では構造の要素モデルが最弱リンクモデルに示される直列系の構造となっており、終局時において最も弱い要素の架橋応力で引張強度が決定されるモデ

ルであることに對して、曲げ応力下では引張側断面の大部分が引張応力下で塑性化しており、中立軸より引張縁側の全段面で不静定構造となって軸方向引張力に抵抗する直列一並列系モデルであると考えられること。それゆえに曲げ構造体ではHPFRCCの材料性能のばらつきが緩和されることを明らかにした。HPFRCCにおいても曲げの寸法効果が存在し、断面寸法に反比例して引張特性が小さくなることを明らかにした。

第6章では長期引張応力を受けるHPFRCCのひび割れ発生後におおけるクリープ挙動を評価し、使用する繊維の種類により引張クリープ特性が異なること、引張クリープひずみの進展としては初期に発生したひび割れ幅が2~3倍に増加するひび割れ幅の拡大に加えて新たなひび割れ発生を伴うこと、繊維の種類や混入量によってはクリープ破壊の可能性があることを示した。

第7章と第8章ではHPFRCCと鉄筋を複合させた部材の性能評価を行った。その結果、HPFRCCの終局ひずみまでは、鉄筋の引張力に加えてHPFRCCも引張力を負担できること、HPFRCCの終局ひずみ以降で軟化域に達して局所的なひび割れが発生しても、HPFRCCの優れたテンションスティフニング特性により局所化したひび割れ部で鉄筋が荷重を再配分する構造特性を明らかにした。HPFRCCの優れたテンションスティフネス効果により、通常のコンクリートによるRC構造では引き出すことの出来ない鉄筋の高いひずみ硬化領域まで鉄筋の性能を引き出すことが可能で、高い耐力とともに非常に大きなエネルギー吸収性能が発揮できることを明らかにした。均一な合成を持つ鉄筋と合成することで、HPFRCCのひび割れ分散が安定的となり良好な分散が得られることを確認した。

第9章では既設のRC構造体への補強技術への展開を検討した。コンクリートRC構造梁に対してHPFRCCで下面増厚補強した部材の性能評価を行った。その結果、HPFRCCを引張補強材として無筋で増厚する場合は、部材の終局時においてHPFRCCがひずみ硬化域になければならないことから、HPFRCCの靱性性能によって補強効果が得られない場合があることが明らかにした。HPFRCCの増厚部に鉄筋を配筋して下面増厚する場合は、HPFRCCのテンションスティフニング効果によって比較的引張靱性の小さいHPFRCCであっても十分な補強効果が得られることを明らかにした。

第10章では本研究の結果を総括した。一軸引張試験法と曲げ試験法によって得られる評価結果の特長を比較し、試験作業が簡易で難易度及び要求される試験精度が比較的低い曲げ試験と非線形解析を併用してHPFRCCの引張応力ひずみ特性を評価することを提案した。HPFRCCと鉄筋を組み合わせたRC構造は、HPFRCCの材料のばらつきによる不安定さを緩和し、またコンクリートのRC構造では利用できない鉄筋のひずみ硬化領域の性能を引き出すことが可能であり、HPFRCCの実構造物への有効な適用形態として最も高性能化が期待できる構造であり、他の材料に代え難いHPFRCCの優れた適用方法の一つであることを強調した。

論文審査結果の要旨

この論文においては、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) を対象として、引張応力ひずみ曲線とひび割れ挙動の評価方法を提案している。曲げ試験から解析により求めた引張応力ひずみ曲線と引張試験で計測したそれとの差異を、脆弱部の分布と断面内での応力の再配分の視点で説明し、曲げ作用下でのこの材料の挙動の寸法効果のメカニズムを解明している。長期曲げ作用下において、この材料のひび割れ幅は、載荷開始直後の2~3倍となることを指摘している。この材料を鉄筋と組み合わせて用いると、鉄筋の降伏領域を上げ、部材全体としてのエネルギー吸収量を増加させることを明らかにしている。この材料に鉄筋を配置した場合や、この材料を既存のコンクリート部材に被覆して用いた場合のひび割れ挙動を明らかにしている。この論文は、次に詳しく示すように重要な研究結果を含

んでおり、新規性、有用性の点で優れている。したがって、審査の結果、この論文を学位論文に値するものと判定した。

- (1) HPFRCCでは繊維の架橋応力とその引張特性を支配しており、マトリックスにおける繊維の分散及び配向のばらつきの影響を受ける。これらのばらつきの影響でHPFRCCの引張特性評価を困難にしており、評価検長区間の長さが長くなると評価される引張強度評価値が減少しひび割れ分散性も低下する。これらの特性はHPFRCCのひび割れ強度と引張強度との強度差とそれぞれの強度の持つばらつきを合わせた確率的検討で関連づけられることを明らかにしている。
- (2) 一軸引張試験では構造の要素モデルが最弱リンクモデルに示される直列系の構造となっており、終局時において最も弱い要素の架橋応力で引張強度が決定するモデルであるのに対して、曲げ応力下では引張側断面の大部分が引張応力下で塑性化しており、中立軸より引張縁側の全断面で不静定構造となって軸方向引張力に抵抗する直列-並列系モデルであると考えられること、それゆえに曲げ構造体ではHPFRCCの材料性能のばらつきが緩和されることを明らかにしている。HPFRCCにおいても曲げの寸法効果が存在し、断面寸法に反比例して引張特性が小さくなることを明らかにしている。
- (3) 期引張応力を受けるHPFRCCのひび割れ発生後におけるクリープ挙動を定量化し、使用する繊維の種類により引張クリープ特性が異なること、引張クリープひずみの進展としては初期に発生したひび割れ幅が2~3倍に増加するひび割れ幅の拡大に加えて新たなひび割れ発生を伴うこと、繊維の種類や混入量によってはクリープ破壊の可能性のあることを明らかにしている。
- (4) HPFRCCと鉄筋を複合させた部材の性能評価を行っている。その結果、HPFRCCの優れたテンションスティフネス効果により、通常のコンクリートによるRC構造では引き出すことの出来ない鉄筋の高いひずみ硬化領域まで鉄筋の性能を引き出すことが可能で、高い耐力とともに非常に大きなエネルギー吸収性能が発揮できることを明らかにしている。均一な合成を持つ鉄筋と合成することで、HPFRCCのひび割れ分散が安定的となり良好な分散が得られることを確認している。
- (5) 既設のRC構造体への補強技術への展開を検討している。その結果、HPFRCCを引張補強材として無筋で増厚する場合は、部材の終局時においてHPFRCCがひずみ硬化域になければならないことから、HPFRCCの靱性性能によって補強効果が得られない場合があることを明らかにしている。HPFRCCの増厚部に鉄筋を配筋して下面増厚する場合は、HPFRCCのテンションスティフニング効果によって比較的引張靱性の小さいHPFRCCであっても十分な補強効果が得られることを明らかにしている。

最終試験結果の要旨

- (1) 公表論文
この論文の主要部分は、審査付き論文 10 編と国際会議論文 1 編として既に発表済みである。この論文が学位論文として完成された内容を有することを確認した。
- (2) 修得単位
指定された単位を修得していることを確認した。
- (3) 公聴会
公聴会を開催して審査を行った。学位審査委員会で審議の結果、最終試験に合格と判定した。