

氏名（本籍）	山 本 基 由（大阪府）
学 位 の 種 類	博 士（工学）
学位授与番号	甲第 305 号
学位授与日付	平成 18 年 9 月 13 日
専 攻	環境エネルギーシステム専攻
学位論文題目	セメント系複合材料の破壊を抑制する短繊維の効果 (Role of short fibers in control of fracture of Fiber Reinforced Cementitious Composites)
学位論文審査委員	（主査）教 授 六 郷 恵 哲 （副査）教 授 棚 橋 光 彦 教 授 森 本 博 昭 教 授 内 田 裕 市

論文内容の要旨

一般に、コンクリート構造物の劣化は、ひび割れの発生により始まり進行する。コンクリートのひび割れには、アルカリ骨材反応によるひび割れのようにコンクリートそのものの原因により引き起こされるものと、鉄筋の発錆によるひび割れのように他の材料の変状により二次的に引き起こされるものがある。ひび割れの拡大を防ぐには、ひび割れ発生後にひび割れを跨いでマトリックス間を架橋し、引張力を分担させる材料を配置することが有効である。引張力を分担させる材料の例として、鉄筋コンクリート部材における鉄筋が挙げられる。同様の役割を果たす材料として、コンクリート中に混入される短繊維が挙げられる。短繊維は、ひび割れを跨いでマトリックス間を架橋し、引張応力を伝達し、ひび割れ幅の拡大を抑えることができる。

コンクリート中に短繊維を混入する際には、硬化前のコンクリートの施工性を低下させないことと、硬化後のコンクリートの品質を低下させないことが特に重要である。具体的には、減水剤や流動化剤などを使用して、硬化前のコンクリートの施工性を確保し、硬化後に密実となるコンクリートを製造することが大切である。

①短繊維の選択に役立てるために 短繊維のどのような特徴が補強性能に寄与するかを明らかにすること、②より効果の高い補強繊維を開発するための方向を明確にすること、③短繊維で補強された材料の破壊挙動の特徴を明らかにすることの3点を目的として、この研究を行った。

第1章では、研究の背景と目的、既往の研究、補強繊維の現状についてまとめた。

第2章では、補強用短繊維の素材としての性能を文献調査と測定によって調べ、各繊維材料の特徴を集計し比較した。繊維の外観についてはデジタルマイクロスコープで観察し比較した。繊維の物性の測定値に及ぼす測定方法の違いの影響について検討した。

第3章では、繊維素材、繊維長、繊維断面寸法、混入率、マトリックスの特徴を変えた供試体を作製し、引張試験ならびに曲げ試験を行い、これらの要因が短繊維の補強効果に及ぼす影響について検討した。引張試験では、繊維が完全に引き抜けるまでの挙動

を観察するための簡便な方法として、供試体の両面から曲げ作用を与え貫通ひび割れを生じさせた供試体を用いることを提案した。引張試験時の除荷曲線の観察から、繊維が引き抜ける塑性挙動と抜けずに伸縮する弾性挙動とを分けて定量化し、除荷曲線には繊維の弾性係数が影響することを明らかにした。

第4章では、繊維の弾性係数が繊維の引抜き挙動に与える影響を調べるため、弾性係数を変えた繊維をマトリックスに埋め込み、繊維の引抜き試験を行い、荷重と引抜き変位の関係を測定するとともに繊維の根本の変形をデジタルマイクロスコープで観察した。その結果、弾性係数が低い繊維に比べ高い繊維では、同じ荷重に対応する伸び量が小さいため、引き抜ける際の繊維の断面寸法の変化が小さくなることを観察した。

第5章では、中型寸法の供試体を用い、引張試験と曲げ試験により荷重と変形の関係を測定し、小型寸法の供試体の結果と比較した。また、引張軟化曲線（開口するひび割れの幅と伝達される引張応力との関係）の測定値を用いて、曲げ荷重－たわみ曲線を計算で求め、実験結果と比較した。計算では、ひび割れ部の圧縮縁に回転中心があり、それを中心に剛体回転すると仮定したモデルを用いた。たわみから計算した開口変位を引張軟化曲線の変位として与え、モーメントを計算することによって、曲げ荷重－変位曲線を精度よく推定できた。この方法により、小型供試体の引張軟化曲線から求めた曲げ荷重－たわみ曲線の推定値と、中型寸法の供試体の実験値との間に差が認められた。引張試験後の小型供試体に熱を与えて繊維を溶かし、供試体の側面を観察すると、厚さ方向（型枠面に直角な方向）に繊維が少なく、平面方向（型枠面の方向）に多く繊維が配向していた。これらのことから、中型供試体に比べ小型供試体では繊維の配向の影響が大きいことを明らかにした。

第6章では、気泡モルタルの脆性的挙動を改善するために、繊維（高強度ポリエチレン、ビニロン、ポリプロピレンの3種類）を混入して、複数ひび割れ型材料（引張力下において、引張変形の増加にともなってひび割れ幅が拡大するのではなく微細な幅のひび割れ本数が増加する材料）を作製した。短繊維補強モルタルへの気泡の混入率を高める方法により、空気量の異なる供試体を作製した。その結果、高強度ポリエチレン繊維の補強効果ならびに靱性改善効果が高く、さらに少量の気泡を混入することで複数ひび割れ挙動が顕著に表れた。ビニロン繊維では、気泡が少量の場合、繊維の破断が観察されたが、気泡を増すことによって最大荷重は低下するものの、たわみが増し靱性が大となった。

第7章では、ポリプロピレン繊維補強モルタルの曲げ挙動に及ぼすオートクレーブ養生の影響について検討した。ポリプロピレン繊維には、異なる製法で製造され物性の異なる3種類の繊維を用いた。その結果、養生温度が165℃から180℃へ変わると、低融点の繊維の場合には熔融し補強効果が低下していくことを観察した。オートクレーブ養生を行っても繊維の補強効果を保持するためには、融点の高い繊維を選択し、繊維の熔融ピーク温度近く（本実験では170から175℃）に養生温度を設定するのがよいことを明らかにした。

第8章では、本研究の結論と今後の課題を述べた。

論文審査結果の要旨

この論文では、モルタルやコンクリート等のセメント系複合材料の脆性的な破壊の制御に適した短繊維の特性を明らかにすることを目的として、繊維の引抜き挙動やセメント系複合材料の破壊性状について検討するとともに、気泡混入やオートクレーブ養生が繊維やセメント系複合材料の破壊性状に及ぼす影響について検討しており、新規性と有用性が認められる。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いる。微細な寸法の気泡を混入してセメント系複合材料を軽量化するとともにマトリックスの強度を低下させて複数微細ひび割れ挙動が生じやすくする方法を提案している。曲げ試験を行ってひび割れを導入した供試体の引張試験を行うことにより、繊維の抜出しや破断の挙動を明確に定量化する方法を提案している。これらの点が高く評価される。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) 繊維素材、繊維長、繊維断面寸法、混入率、マトリックスの特徴が、短繊維の補強効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、これらの条件を変えた供試体を作製し、引張試験ならびに曲げ試験を行った。その結果、引張試験では、繊維が完全に引き抜けるまでの挙動を観察するための簡便な方法として、供試体の両面から曲げ作用を与え貫通ひび割れを生じさせた供試体を用いることを提案した。引張試験時の除荷曲線の観察から、繊維の引き抜ける塑性挙動と抜けずに伸縮する弾性挙動とを分けて定量化し、除荷曲線には繊維の弾性係数が影響することを明らかにした。
- (2) 繊維の弾性係数が繊維の引抜き挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、弾性係数を変えた繊維をマトリックスに埋め込み、繊維の引抜き試験を行い、荷重と引抜き変位の関係を測定するとともに繊維の根本の変形をデジタルマイクロスコープで観察した。その結果、弾性係数が低い繊維に比べ高い繊維では、同じ荷重に対応する伸び量が小さいため、引き抜ける際の繊維の断面寸法の変化が小さくなることを明らかにした。
- (3) 繊維補強モルタルの破壊性状に及ぼす供試体寸法の影響を明らかにすることを目的として、小型供試体ならびに中型供試体の引張試験と曲げ試験を行い、荷重と変形の関係を測定した。引張軟化曲線（開口するひび割れの幅と伝達される引張応力との関係）の測定値を用いて、曲げ荷重－たわみ曲線を計算で求め、実験結果と比較した。計算では、ひび割れ部の圧縮縁に回転中心があり、それを中心に剛体回転すると仮定したモデルを用いた。この方法により、小型供試体の引張軟化曲線から求めた曲げ荷重－たわみ曲線の推定値と、中型寸法の供試体の実験値との間に差が認められた。引張試験後の小型供試体に熱を与えて繊維を溶かし、供試体の側面を観察すると、厚さ方向（型枠面に直角な方向）に繊維が少なく、平面方向（型枠面の方向）に多く繊維が配向していた。これらのことから、中型供試体に比べ小型供試体では繊維の配向の影響が大きいことを明らかにした。
- (4) 脆性的挙動を改善することを目的として、気泡モルタルに繊維（高強度ポリエチレン、ビニロン、ポリプロピレンの3種類）を混入して、複数ひび割れ型材料（引張力下において、引張変形の増加に伴ってひび割れ幅が拡大するのではなく微細な幅のひび割れ本数が増加する材料）を作製した。短繊維補強モルタルへの気泡の混入率を高める方法により、空気量の異なる供試体を作製した。その結果、高強度ポリエチレン繊維の補強効果ならびに靱性改善効果が高く、さらに少量の気泡を混入することで複数ひび割れ挙動が顕著に表れた。ビニロン繊維では、気泡が少量の場合、繊維の破断が観察されたが、気泡を増すことによって最大荷重は低下するものの、たわみが増し靱性が大となった。

- (5) ポリプロピレン繊維補強モルタルの曲げ挙動に及ぼすオートクレーブ養生の影響について検討した。ポリプロピレン繊維には、異なる製法で製造され物性の異なる3種類の繊維を用いた。その結果、養生温度が165℃から180℃へ変わると、低融点の繊維の場合には溶融し補強効果が低下していくことを観察した。オートクレーブ養生を行っても繊維の補強効果を保持するためには、融点の高い繊維を選択し、繊維の溶融ピーク温度近くに養生温度を設定するのがよいことを明らかにした。

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4編、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。