

氏名（本籍）	高田 浩夫（岐阜県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 384 号
学位授与日付	平成 22 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	膨張型の複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料を用いた RC はりのひび割れと破壊の制御 (Control of cracking and failure of RC beams made of expansive HPRCC)
学位論文審査委員	(主査) 内田 裕市 (副査) 森本 博昭 六郷 恵哲

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）は、一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を示し、微細で高密度の複数のひび割れを形成する高靱性材料である。ひび割れ幅の制御を材料自身が行う点にこの材料の大きな特徴がある。引張抵抗を利用した適用、コンクリートへの劣化因子浸入抑制を目的とした適用や、大変形性能を活かした適用など、1990 年代初頭に HPFRCC の一種である ECC がミシガン大学の Li 教授らによって考案されて以来研究が進み、HPFRCC は黎明期を経て発展期を迎えその利用分野が広まってきている。

そこで、本論文では第 2 章で「HPFRCC の引張性能」として、HPFRCC の製造コスト、施工性の改善を目的として、繊維の混入量を減らしたり、引張強度や弾性係数の力学的特性の劣る繊維を用いたりした HPFRCC について、一軸引張応力下で擬似ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ性状ひび割れ性状を確認し、ひび割れに対する要求性能に応じて、繊維混入率や繊維の力学特性を変化させることにより、材料の使用目的、施工性、経済性等を総合的に考慮して HPFRCC を使用することを提案した。また、HPFRCC のひび割れ性状を確認する汎用試験機を用いた試験方法として、円筒供試体に鋼球を詰めて圧縮試験機で内圧を与えることにより材料に引張応力を作用させる方法を提案するとともに、HPFRCC に人工軽量粗骨材を混合した材料についてこの試験方法によりひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れを確認し、HPFRCC の技術を応用したひび割れ幅を制御できるセメント系材料開発の可能性を示した。

次に、コンクリートのひび割れは、使用状態での外力によるものだけではなく、初期ひび割れとして収縮によるものがあり、セメントの水和に起因する自己収縮、コンクリート組織の細孔やセメントゲル粒子からの水分の移動に起因する乾燥収縮、セメント水和熱によるコンクリートの温度変化に起因する体積変化がその要因として挙げられる。

そこで、本論文第 3 章では「セメント系材料の長さ変化挙動」として、まずコンクリートの乾燥収縮について、コンクリート高架橋に過大なひび割れの発生した原因として骨材のコンクリートの収縮特性への影響が指摘されたことから、骨材の乾燥収縮特性をその地質学的成因から考察すると共に、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響を確認した。粗骨材を用いない HPFRCC の収縮は、コンクリートより大きい事が想定され、特に単位結合材量が多いことにより自己収縮が大きいと考えられる。これらは、既設コンクリートに補修材として HPFRCC を用いた場合、界面での初期欠陥に繋がる可能性があるため、HPFRCC の自己収縮と乾燥収縮についてその挙動を明らかにすると共にマトリックスモルタルの収縮挙動と比較することにより、繊維が自己収縮を抑制することにより全体の収縮を抑える効果があることを明らかにした。

最後に、鉄筋コンクリートのひび割れを抑制する手段として、膨張材が古くから使用されているが、昨今、従来の使用量の約 2/3 で安定的な膨張効果が得られるエトリンナイト・石灰複合系膨張材が開発され、低添加型膨張材として、低レベル放射性廃棄物処理施設のコンクリートピット処理施設における鉄筋コンクリート壁のひび割れ抑制に従来型の膨張材が効果を発揮したことを踏まえ、現在計画が進んでいる余裕深度処理施設においても使用される見込みである。

そこで、本論文第 4 章から第 6 章では、「膨張型 HPFRCC」に関する研究として、高度に水密性の維持が求められる構造物などに HPFRCC を鉄筋と組み合わせて用いる場合のひび割れ抵抗性を高めることを目的として、膨張材を添加した HPFRCC を膨張型 HPFRCC とし、材料単体の長さ変化特性、力学的特性、

ひび割れ性状について膨張材の影響を確かめ、鉄筋比 1.42%の複鉄筋 RC はりを用いて膨張材添加率を変化させた場合のケミカルプレストレスの状況とひび割れ性状について確認した。膨張材をセメントの内割りで 6, 8, 10%と添加したとき、ひび割れ荷重は膨張材を用いないはりに対して 4, 6, 7 倍大きくなり、鉄筋降伏に至るまでのひび割れ本数が減少した。また、膨張材添加率を 6, 8, 10%とした膨張型 HPFRCC を用いて鉄筋比を 1.4%, 2.2%, 3.2%と変化させた RC はりを同時に 2 体ずつ作製し、材齢 2 週と 11 週で曲げ載荷試験を行った結果、収縮が進行してケミカルプレストレスが緩和されていたり、はりが収縮しているにもかかわらず、材齢の経過した全てのはりにおいてひび割れ荷重が顕著に高くなる傾向を確認した。この傾向は、同時期に作製した普通コンクリート、高強度コンクリートには見られなかった。次に、せん断スパン比を 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5 と変化させた膨張型 HPFRCC を用いた鉄筋比 3.4%のせん断補強筋を配置しない RC はりのひび割れ性状と破壊形態を調べた。同断面のせん断スパン比を 1.5, 2.0, 2.5 と変化させた普通コンクリートを用いた RC はりと比較を行い、普通コンクリートではせん断破壊が先行し、HPFRCC を用いたはりは曲げ破壊が先行し大きなせん断ひび割れが発生しないことを確認した。

HPFRCC と鉄筋を組み合わせて用いた場合、弾塑性材料として両者は融和して変形することが可能であり、今後、HPFRCC の材料特性の幅を広げることで、鉄筋の変形性能とバランスの取れた合理的で経済的なコンクリート部材の研究開発に繋げたいと考える。

論文審査結果の要旨

この論文では、一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を示し、複数の微細なひび割れを形成する複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) を取り上げ、HPFRCC に鉄筋を配置して鉄筋コンクリート (RC) 部材として用いる場合のひび割れ耐力を高めることを目的とし、膨張材を混入した膨張型 HPFRCC を提案している。HPFRCC の収縮性状、膨張型 HPFRCC の膨張性状、鉄筋を配置した場合の収縮・膨張性状、ひび割れ性状、破壊性状などを実験的に明らかにしている。繊維による HPFRCC の収縮の抑制効果を定量的に明らかにするとともに、繊維の引張強度や弾性係数の違いが HPFRCC の引張性能に及ぼす影響を定量的に明らかにしている。さらに、HPFRCC のひび割れ性状を確認する方法として、円筒供試体を用いた簡便な引張試験方法を提案している。

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 の材料特性と試験方法に関する研究

繊維の性能や混入率が引張性能やひび割れ性状に及ぼす影響について確認している。力学特性が小さいポリエチレン繊維 (引張強度 54%, 弾性係数 63%) を用いると、終局ひずみは小さくなり、応力ひずみ曲線の形状のばらつきは大きくなるものの、複数ひび割れ挙動を示すことを明らかにしている。

HPFRCC の複数微細ひび割れ性状を確認する試験方法として、円筒供試体に充填した鋼球を圧縮試験機を用いて圧縮し、内圧により円筒供試体にひび割れを導入する方法を提案している。軽量骨材を混合した HPFRCC の引張性状をこの試験方法により確認し、その有用性を検証している。

(2) セメント系材料の長さ変化挙動に関する研究

各種コンクリート用骨材の乾燥収縮特性とコンクリートの乾燥収縮との関係を明らかにしている。HPFRCC の自己収縮ならびに乾燥収縮の確認を行い、収縮抑制を目的として膨張材を混入した膨張型 HPFRCC を提案し、その力学特性を明らかにしている。HPFRCC では、繊維の拘束効果により、マトリクスモルタルの自己収縮が 60%に抑制されていることを確認している。

(3) 膨張型 HPFRCC を用いた RC 部材に関する研究

膨張型 HPFRCC に鉄筋を配置した RC はりのひび割れ性状に及ぼすケミカルプレストレスの効果を確認している。膨張型 HPFRCC を用いた RC はりの鉄筋比を変化させ、曲げならびにせん断区間のひび割れ性状について、湿潤養生直後と乾燥収縮を受けた後に RC はりの載荷試験を行い、比較検討している。鉄筋比を 1.4%~3.3%変化させたはりにおいて、HPFRCC に膨張材を 0%~10%添加するに従ってひび割れ荷重が顕著に増加することを確認している。ひび割れ本数が減少することで、はりの剛性低下の程度が小さくなり鉄筋降伏

時のはりのたわみが減少することを確認している。この研究の範囲（引張鉄筋比：1.4～3.3%，拘束鉄筋比：2.25～5.09%）では、膨張材を8%添加すると材齢10週でもケミカルプレストレスが残り、6%添加では消失することを確認している。膨張材添加率6%の場合には、RC部材の収縮あるいは膨張の値の絶対値が最も小さくなることから、本実験の範囲では、HPFRCCへの膨張材添加率は6%程度が望ましいと提案している。鉄筋を配置したHPFRCCはりのひび割れ荷重は、膨張材を添加していない場合には材齢10日で10kN以下の小さな値であったが、材齢が10週では10日に比べ1.8～2.8倍に増加し、膨張材を6%添加すると2.9～3.3倍、10%添加すると4.5倍となることを確認している。

せん断スパン比を変化させ、膨張型HPFRCCを用いたRCはりの破壊モードの確認とひび割れ性状の確認を行っている。せん断スパン比が1.5～2.5の範囲にある鉄筋比3.4%のRCはりでは、普通コンクリートを用いた場合には脆性的なせん断圧縮破壊が生じるのに対し、膨張型FPFRCCを用いた場合には靱性に富む曲げ引張破壊が生じることを確認している。

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4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。

発表論文リスト（学位論文に直接関係する論文）

審査付き論文

- 1) 高田浩夫, 飯塚貴洋, 浅野幸男, 六郷恵哲: HPFRCCのひび割れ性状を確認するための円筒供試体を用いた引張試験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 297-302, 2008. 7.
- 2) 飯塚貴洋, 水田武利, 高田浩夫, 六郷恵哲: PE繊維の性能ならびに混入率がHPFRCCのひび割れ性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 267-272, 2008. 7.
- 3) 高田浩夫, 高橋祐二, 浅野幸男, 六郷恵哲: 膨張型HPFRCCでケミカルプレストレスを導入したRC梁のひび割れ特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 337-342, 2009. 7.
- 4) 糟屋守, 樋渡一輝, 高田浩夫, 森本博昭: 各種コンクリート用骨材の乾燥収縮特性について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 559-564, 2009. 7.
- 5) H. TAKADA, Y. TAKAHASHI, Y. YAMADA, Y. ASANO & K. ROKUGO: Cracking properties of steel bar-reinforced expansive SHCC beams with chemical prestress, Advanced Concrete Materials, Stellenbosch South Africa, Nov. 2009.

(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。

