

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360167

研究課題名(和文) 頑健な繊維補強セメント系複合材料の実用化のための施工から構造性能までの統合評価

研究課題名(英文) Development of robust fiber reinforced cementitious composite for structural material

研究代表者

長井 宏平 (NAGAI, Kohei)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：00451790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：多軸応力履歴に頑健な繊維・骨材混合セメント系複合材料の多方向配筋時の施工性能と力学特性・定着性能を体系化することを目的に、材料レベルと構造レベルでの実験を行った。通常および粗骨材と鋼繊維入りの場合について主応力軸回転下を簡易的に再現した試験を行い、通常のPVA-ECCで見られるせん断耐力の低下が粗骨材の混入により抑制されることを確認した。また構造試験では、画像解析結果として、複数ひび割れを出力したコンタ一図から粗骨材により破壊時のせん断ひずみが小さくなること、また局所ひび割れを計算した結果からひび割れ面での「ずれ」挙動が粗骨材や鋼繊維によって抑制されることなどを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Experiments of fiber reinforced cementitious composite were conducted at both material and structural scale for a development of robust material for structural material. To improve the shear performance, aggregate and/or steel fiber are added to a conventional PVA/ECC. From the experimental results, it was observed that reduction of the capacity was controlled by adding these materials. The effect was confirmed by the image data analysis and calculation of shear strain obtained from the deformation locally measured. The shear sliding was restricted by the inclusion of aggregate and steel fibers.

研究分野：工学

キーワード：セメント系複合材料 繊維補強 多軸応力 頑健材料 数値解析

1. 研究開始当初の背景

30年以上に及ぶ繊維補強セメント系複合材料に関する研究の成果の実社会への適用が進んでいる。しかしながら、ひび割れ発生後のせん断特性は明らかでなく、国内で複雑な応力履歴を経験する床版上部構造へ適用された際に、供用後わずか数ヶ月で甚大な損傷が発見され供用停止に至る事態が発生し、この原因が現在も不明であるなど、構造部材としての適用は極めて限定的である。これは既往の研究が一軸応力下の主に材料レベルに限定され、主軸が回転した際の挙動についての研究が無く、高い引張性能を保持するために粗骨材を用いないことでひび割れ面が平滑となることに起因するせん断性能の低下を把握できていないことが原因である。これに対し研究代表者は、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント系複合材料(HPFRC)の多軸応力履歴による多方向ひび割れの発生を世界で初めて実験的に明らかにした上で、繊維補強コンクリートのひび割れ面でのせん断伝達性能を制御し、主応力軸回転により多方向にひび割れが発生した場合にも性能を保つ頑健な新材料の開発を実験及び数値解析を通し試み、構造部材における適用可能範囲を拡張することを目的に研究を進めている。

2. 研究の目的

多軸応力履歴に頑健な繊維・骨材混合セメント系複合材料の多方向配筋時の施工性能と力学特性・定着性能を体系化し合理的な定着評価法と構造細目設計法を提案したうえで、施工から構造的な性能までを通貫した統合評価を可能とすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

多軸応力下におけるせん断性能向上を確認するための実験を材料レベルと構造レベルで行い、ひび割れパターン、耐力、変形能などから検証を行い確認した。

4. 研究成果

(1) 材料レベルでの実験

引張ひずみ硬化型セメント複合材料(SHCC)の主応力軸回転下のせん断挙動に着目するにあたり、繊維量やひび割れ分散性の観点から、より効率的な配合によってせん断性能を確保するべく実験により検証を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

SHCCは非常に優れた引張性能を持つ繊維補強コンクリートの一種であり、これまでに多くの引張性能に関する研究や応用事例があるが、さらなる適用先の可能性を探るため、本研究グループにおいてせん断性能に着目した研究が進められてきた。SHCCの一種であるPVA-ECCを用いたこれまでの研究により、主応力軸回転下におけるPVA-ECCのひび割れ面でのせん断性能が低いこと、また

PVA-ECCに鋼繊維や粗骨材を混入することで、鋼繊維の剛性や粗骨材の噛み合い効果によりひび割れ面でのせん断性能が向上することが、主応力軸回転下を簡易的に再現した材料レベルおよび構造レベルの実験によって確認されてきた。しかし、これらの混入物によって、繊維量が過多となることや、ひび割れ分散性が低下することが確認されており、本研究ではそれらの弱点を改善した効率的な材料配合によって主応力軸回転下においてせん断性能を発揮する材料となる可能性を探る。

本研究では、これまで扱ってきた総繊維量3.5%の鋼繊維入りPVA-ECCについて、施工面やコスト面などを考慮し総繊維量2%(PVA繊維量と鋼繊維量を0.5%~1.5%で変動)とした材料を用いて、主応力軸回転下でのせん断性能を検証した。プレート供試体を曲げ載荷し、単純な曲げ載荷をしたもの(Control plate)と、初期損傷を与えた後に45°載荷軸を回転させ二次載荷することで主応力軸回転下を簡易的に再現したもの(Main plate)の二種類の試験を行い、耐力、変形能、ひび割れ性状、供試体底面で計測したひび割れの“開き”と“ずれ”挙動に関して考察を行った。これまでに鋼繊維の混入によって変形能は低下するもののひび割れ分散性が大きく向上するという知見が得られていたため、今回の材料についても同様の性能を期待した。

まず、打設時に計測されたスランプフローからは、PVA繊維を鋼繊維で置換することでフロー値が上昇していく傾向が見られ、これは材料の総繊維量が小さくなるためと考えられている。またすべての材料で、フローの目標値を大きくはずれるものはなく、施工性能や材料内での繊維の分散性については問題のない材料であることが確認された。

初期損傷がない場合の試験結果からは、PVA繊維1.5%：鋼繊維0.5%の材料では高い変形能とひび割れ分散性が確認されたが、PVA繊維が1%以下の材料では変形能およびひび割れ分散性が低下することが分かった。この原因として、各繊維の一本あたりの体積が大きく異なり、PVA繊維の現象が材料内の総繊維量の減少につながっていることを挙げ、またひび割れ架橋則からの考察の可能性も述べたが、実験的に検証する段階には至らず、今後の課題とした。

一方、損傷がある場合(主応力軸回転下)の試験結果からは、損傷なしの場合を基準として損傷ありの場合の耐力比を算出すると、鋼繊維が増加するにしたがって耐力の回復が見られること、およびひび割れ方向が制御される確認されたことから、主応力軸回転下のせん断性能に着目する場合は、鋼繊維で置換した材料の方が良い性能を示すと言えることが分かった。特に耐力の回復については、損傷がある場合の方が耐力が高いという直観と矛盾する結果が得られ、この現象を説明

としては仮説を立てるに留まったため、今後更なる検討・知見の蓄積が求められる。更には、通常の PVA-ECC では損傷がある場合に荷重-変位曲線内で初期剛性の低下が見られる一方で、鋼繊維が増加するにしたがって初期剛性の回復が見られた。この現象を検証するために、プレート底面で計測した底面ひずみから算出される初期損傷の「開き」と「ずれ」の観察を行い、鋼繊維が損傷部の「開き」と「ずれ」挙動の両方を抑制する傾向にあることが確認された。この初期損傷部での「開き」と「ずれ」挙動の抑制によって初期剛性が回復していると考えられる。

加えて、損傷の「開き」と「閉じ」挙動の観察においては、主応力軸が損傷と垂直方向である場合、鋼繊維が損傷部での開き-閉じ挙動に影響を与えないことが確認されたのに対し、本章で扱ったように主応力軸が損傷と斜め方向である場合には、鋼繊維が損傷部での開き-ずれ挙動を抑制することから、損傷に対する主応力軸角度の違いによって鋼繊維の働きが変化するという新たな視点について述べた。

これまで扱ってきた PVA-ECC に粗骨材を体積比 15.0% 混入することでせん断性能を高めた材料について、ひび割れ分散性が低下するという弱点があり、鋼繊維を混入するとひび割れ分散性が高まるという知見を元に、この弱点を補うように鋼繊維によってひび割れ分散性が保たれることを期待し、PVA 繊維を鋼繊維で置換し総繊維量を 2.0% とした材料に粗骨材を体積比で 15% および 30% 混入した材料に対して主応力軸回転下でのせん断性能の検証を行った。2 章と同様に、初期損傷のないプレート曲げ試験 (Control plate 試験) と初期損傷を導入し簡易的に主応力軸回転下を再現したプレート曲げ試験 (Main plate 試験) を行い、耐力、変形能、ひび割れ性状、供試体底面で計測したひび割れの「開き」と「ずれ」挙動に関して考察を行った。

初期損傷がない場合の試験結果では、特に PVA 繊維：鋼繊維 = 1.0% : 1.0% の状況下において、粗骨材が存在することによる引張性能 (耐力、変形能、ひび割れ分散性) の低下が抑制されることが確認された。また PVA 繊維：鋼繊維 = 0.5% : 1.5% の配合でも、粗骨材量が 15% であれば、ひび割れ分散性能の低下がある程度抑制されることが確認された。これらの結果から、引張挙動化の PVA 繊維と鋼繊維の複合効果としては PVA 繊維：鋼繊維 = 1.0% : 1.0% が良い性能を示すことが確認できた。

一方初期損傷がある場合 (主応力軸回転下) の試験結果では、粗骨材の存在により主応力軸回転下でのひび割れ方向の制御がより向上する傾向が見られたことから、粗骨材がひび割れ面において優れたせん断抵抗性能を示すことが再確認された。しかしながら、耐力や変形能については粗骨材の混入によって低くなることが確認された。また、底面

のひずみ計測で得られた初期損傷の「開き」と「ずれ」に関する考察からは、粗骨材および鋼繊維により初期損傷部での「開き」と「ずれ」挙動が抑制される傾向が見て取れたが、粗骨材と鋼繊維の共存がひび割れ挙動に及ぼす影響については見て取れなかった。

主応力軸回転下における引張性能とせん断性能のバランスを考えると、今回の材料はせん断性能に特化してしまっているため、材料配合に関する更なる検討が今後必要であると考えられる。

初期損傷を与えた後に載荷点を変え二次載荷することで簡易的に主応力軸回転下を再現するせん断梁試験において、通常の PVA-ECC と PVA 繊維：鋼繊維：粗骨材 = 0.5% : 1.5% : 15.0% の材料を比較し、耐力、ひび割れ性状について考察を行った。また画像解析手法を用いて面的ひずみ分布および局所ひび割れ挙動を観察した。

まず、画像解析の精度検証により、画像解析によって変位が良好に追えることが確認された。対して局所のひずみ計測については、画像解析結果にはおよそ 1000 μ 程度のばらつきが見られるものの、ひずみの伸展についても傾向を比較的良好に追えることが確認された。

次に実験結果から、耐力については、通常の PVA-ECC で見られる主応力軸変化による耐力の低下が、鋼繊維および粗骨材入り PVA-ECC では耐力の低下が抑制されることが確認された。またひび割れ性状については、初期損傷がある場合に通常の PVA-ECC では初期損傷が伸展し破壊面を形成する一方で、鋼繊維および粗骨材入り PVA-ECC では初期損傷とは別に破壊面が生じ、この理由として初期損傷部においてひび割れ面でのせん断抵抗性能が発揮されることを挙げた。

また画像解析結果としては、面的ひずみ分布の考察からは明確な材料間のせん断挙動の違いは見られなかったが、局所的なひび割れの「開き」と「ずれ」の考察からは、初期損傷がない場合には、鋼繊維および粗骨材入り PVA-ECC がひび割れ開口に抵抗する架橋性能が低いためにピーク荷重付近で破壊面の伸展が一気に進んだのに対し、初期損傷がある場合には損傷部の「開き」と「ずれ」挙動が抑制されることが確認された。これは 3 章でのプレートによる材料試験から得られた結果を一致する挙動であり、鋼繊維と粗骨材の混入によって、主応力軸が損傷に対して斜め方向である場合にひび割れの「開き」と「ずれ」挙動が抑制されることが構造レベルにおいても確認された。

PVA-ECC のひび割れ挙動の解明の一環として、主応力軸回転下で想定されるひび割れの「閉じ」挙動について、既往の研究で使用されてきた材料 (通常の PVA-ECC, 鋼繊維を体積比 1.5% 混入したもの、粗骨材を体積比 15.0% 混入した物) を用いて、角柱供試体の曲げ試験の除荷パスにてひび割れの「閉

じ」挙動の検証を行った。鋼繊維の剛性や粗骨材によるひび割れ面の凹凸がひび割れ閉じ挙動に影響を与えることを予想し、通常の角柱供試体によって複数ひび割れ状況下を、またノッチを導入した角柱供試体によって局所ひび割れ状況下を作りだし、それぞれについて曲げ繰り返し載荷による実験を行った。さらに、繰り返し載荷中の再載荷のパスに着目し、ひび割れの「開き」挙動に関しても考察を加えた。この実験の背景として、小島ら[4]により行われた主応力軸を簡易的に再現したせん断梁試験の結果から、鋼繊維入りPVA-ECCでは、初期損傷がある場合のせん断耐力の低下の抑制が小さいことが確認され、この原因として鋼繊維の剛性が初期損傷部の閉じ挙動を阻害している可能性があるという考察がなされたことを述べた。

結果、複数ひび割れ状況下においては、損傷度合いに関わらず、材料間でのひび割れの閉じ挙動に違いは見られず、鋼繊維や粗骨材の混入による影響は観察されなかった。

また局所ひび割れ状況下においても、ポストピークを含めた損傷レベルに関わらず、ひび割れの「閉じ」挙動に材料間の違いは見られず、今回の実験結果からは鋼繊維や粗骨材の混入によってはひび割れの閉じ挙動に影響がないことが確認された。

さらに繰り返し載荷内の再載荷のパスに着目した際には、材料間での挙動の差は見られず、このことから鋼繊維や粗骨材がひび割れが「開く」挙動にも影響を与えないことが確認された。

これらの結果より、曲げ試験のような主応力軸が損傷部に対し垂直である状況下では、鋼繊維や粗骨材が損傷部の「開き」や「閉じ」挙動に影響を与えないことが確認された。

今回は曲げ試験での除荷パスにて「閉じ」現象を扱ったが、曲げひび割れを導入した後に逆向きに再載荷することで、より大きなひび割れの「閉じ」現象を扱うことができると考え、今後の課題として提示した。

本研究は、SHCCがより効率的な材料配合下において主応力軸回転下でのせん断性能を発揮することを期待し、材料試験や構造試験により検証したものである。鋼繊維や粗骨材がひび割れ面でのせん断成功性能に大きく寄与することが改めて確認された一方で、これまでの知見から得られた鋼繊維によるひび割れ分散性の向上という特徴が、適量のPVA繊維との複合効果によって発揮されていることが確認された。本研究はPVA繊維、鋼繊維、粗骨材の複合効果がもたらす引張挙動およびせん断挙動の現象の把握のための性能検証としての価値を持つと考える。

(2) 構造レベルでの実験

本研究では新しい計測手法として画像解析システムを導入することとした。また、これまでの研究者らの研究では試験体数が少ないこともあり、骨材と鋼繊維の混入の効果

が明確で無かったため、混入量を増やした実験によりその効果を画像解析の結果と合わせて確認することとした。

まず画像解析システムの開発を行った。HPFRCC梁の計測に画像解析を用いると、多方向に分散して入るひび割れを領域として捉えることができ、さらにどこに入ったひび割れでも「開き」と「せん断ずれ」の挙動を追跡することができるという利点がある。画像処理と有限要素によるひずみ計算からなる画像解析システムの構成について順を追って説明し、撮影環境についても記した。最後に、画像解析から得た結果を、変位計及びひずみゲージから得た結果と比較し、計測値にばらつきがあるものの、平均値としては測定精度に問題がないことを確認した。

曲げ試験、圧縮試験、静的載荷試験を行い、結果を材料ごとにまとめた。静的載荷試験では、通常のECC、粗骨材混入ECC、鋼繊維混入ECC、普通コンクリートの4材料を用いた。載荷の方法は、初期損傷をせん断破壊させる二次載荷より短いスパンの載荷を導入することで、せん断スパン内にある角度でひび割れが入った状態でのせん断特性を検証する。試験体のシリーズとして、初期損傷を与えずにせん断破壊させる梁(Series 1)、初期損傷を荷重レベルで350kN導入した後せん断破壊させる梁(Series 2)、初期損傷を破壊寸前まで導入した後せん断破壊させる梁(Series 3)、初期損傷を破壊寸前まで導入した後、他の梁よりせまいスパンでせん断破壊させる梁(Series 4)、の4シリーズをそれぞれの材料ごとに用意し、載荷試験を実施した。結果は使用材料ごとに荷重変位曲線と画像解析結果をまとめた。ECC梁では損傷導入によりせん断耐力の低下が確認された。粗骨材混入梁では、ECC梁と比較して無損傷でも耐力が低下したものの、損傷を導入しても耐力が無損傷からほぼ低下をしなかった。また、スパンを短くしたSeries 4では、無損傷梁より耐力が増加した。鋼繊維を導入した梁では、損傷により耐力の低下が確認された。RC梁では、Series 1と4のみの試験であったがSeries 4はSeries 1より耐力は低かった。このように、使用材料によって、初期損傷の状態により耐力の低下が異なることが確認された。画像解析によって得られたコンター図では、鋼繊維を混入したECCの梁で高ひずみを示す領域の幅が比較的狭いという結果が得られた。これはひび割れの分散性が低下したのか、細かく分散しすぎて画像解析で追いつけなかったのかは、現段階では不明である。また、普通コンクリート梁の画像解析結果では、分散せずに局所化したひび割れを確認することができた。

得られた結果を材料間で比較した。曲げ試験では、鋼繊維混入により引張性能は向上し、粗骨材混入により低下した。以前の研究者らの実験では鋼繊維混入でも引張性能が低下していたが、鋼繊維の混入率を増加させたこ

とで、強度と靱性が上がったと考えられる。また粗骨材の混入率も増やしたため、引張性能の低下率がより大きくなっていった。次に、静的載荷試験の荷重変位曲線を材料間で比較した。初期損傷なしの純粋なせん断耐力は、通常の ECC と比較して、粗骨材混入により低下し、鋼繊維混入により上昇した。その他の初期損傷ありの載荷シリーズについても、鋼繊維を混入した ECC は他の材料に比べ最大の耐力を示しており、鋼繊維のせん断抵抗性を確認できた。次に、初期損傷なしの耐力を基準に正規化して比較を行った。結果、ECC は初期損傷を導入すると初期損傷のレベルに関わらず耐力が大きく低下し、鋼繊維を混入した ECC は初期損傷のレベルを大きくするにつれて耐力の低下率も上がっていった。しかし粗骨材を混入した ECC は耐力が低下せず、初期損傷部分での粗骨材の抵抗を確認できた。さらに画像解析によって、粗骨材入り ECC が初期損傷部分でひび割れの「開き」と「せん断ずれ」の挙動を抑制していることを確認し、初期損傷部分での粗骨材の働きを裏付けられた。初期損傷が本研究のように比較的大きな角度で導入された場合は、粗骨材のせん断ずれを抑制する効果が発揮されると考えられる。一方、同様の効果があると予想される普通コンクリートでは初期損傷への抵抗が見られず、耐力も低下していたので、単に粗骨材だけでなく、PVA 繊維と粗骨材が共存することによって、新たな効果を生み出しているのではないかと、という仮説も導いた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

高野芳行, 小島梨恵子, 長井宏平: 画像解析システムを用いた粗骨材入り PVA-ECC 梁のせん断特性の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1141-1146, 2014.

<http://data.jci-net.or.jp/search.shtml>

Benny SURYANTO, Koichi MAEKAWA, Kohei NAGAI: Predicting the Creep Strain of PVA-ECC at High Stress Levels based on the Evolution of Plasticity and Damage, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, No.2, pp.35-48, 2013

<http://www.j-act.org/>

〔学会発表〕(計 3 件)

Reiko KOJIMA, Yoshiyuki TAKANO, Kohei NAGAI: Application of Image Analyzing System to Shear Tests of HPFRCC Beams, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.105-106, 2013.

2013 年 9 月 10 日 大阪

Yoshiyuki TAKANO, Reiko KOJIMA, Kohei NAGAI: Shear Performance of Pre-damaged PVA-Aggregate Mixed ECC Beam, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.125-126,

2013.

2013 年 9 月 10 日 大阪

Yoshiyuki TAKANO, Benny SURYANTO, Kohei NAGAI "Shear Performance of PVA-Coarse Aggregate-ECC Beams Under a Rotating Stress Field" Proceedings of 11th International Symposium on New Technology for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA), 2012

2012 年 10 月 ウランバートル(モンゴル)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長井 宏平 (NAGAI, Kohei)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号: 00451790

(2) 研究分担者

藤山 知加子 (FUJIYAMA, Chikako)

法政大学・デザイン工学部・准教授

研究者番号: 60613495