

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月19日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2011

課題番号：22686042

研究課題名（和文） 多軸疲労応用場に頑健な繊維補強コンクリート材料の体系化と構造部材への応用

研究課題名（英文） A development of robust fiber reinforced cementitious composites under multi directional stress field and its application

研究代表者

長井 宏平（NAGAI KOUHEI）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：00451790

研究成果の概要（和文）：

複数ひび割れ型セメント系複合材料（HPFRCC）の一種である ECC の主応力軸回転下に頑健な材料の開発と構造への適用可能性の検証を目的とし、実験と数値解析を実施した。ひび割れ発生後のせん断性能を向上させるため粗骨材や鋼繊維を混入し、その混入率を変数とした実験を行うことで効果的な混入率を材料レベルの実験から探り、提案した混入率の材料を用いた構造試験と数値解析から、その適用性を示した。

研究成果の概要（英文）：

This research was conducted to develop a new robust fiber reinforced cementitious material under the multi directional stress field based on HPFRCC that shows high ductility in tension with multiple cracking. Coarse aggregate and steel fiber were put in the HPFRCC to improve the shear performance after the cracking. Through the experimental investigations at the material scale, appropriate ratio of the inclusions was proposed. To apply this material to structure, static and fatigue tests of beam were carried out to verify the applicability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2011年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
年度			
年度			
年度			
総計	19,900,000	5,970,000	25,870,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：セメント系複合材料，繊維補強，多方向ひび割れ，せん断特性，空間平均構成則，頑健材料，構造応答，疲労特性

## 1. 研究開始当初の背景

30年以上に及ぶ繊維補強コンクリートに関する研究の成果の実社会への適用が進んでいる。複数微細ひび割れ型繊維補強セメント系複合材料（HPFRCC）は、一軸引張応力下に

において複数ひび割れを発生させることで高いじん性能を発揮する材料であり、剥落対策、補修補強材料として主に用いられてきた。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、数十年耐用で設計されたにも関わらず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ため、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静的、疲労、水中における主に材料レベルの試験に限定されていたためであり、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。また、構造レベルの実験においても、交番載荷試験では2方向のひび割れはほぼ直行しており、ひび割れ面でのせん断特性が全体挙動に影響を及ぼさず、その影響は明らかでない。近年、床版への水中移動輪載荷試験が実施され、疲労性能の低下が示されたが、そのメカニズムは明らかでなく、更になお、上述の実構造物の急速な劣化を再現するに至っていない。

## 2. 研究の目的

セメント系新材料である繊維補強コンクリートの用途を構造部材へと拡張すべく、ひび割れ発生後の複雑な応力履歴下における挙動を新たに考案した材料レベルでの実験により明確にするとともに、明らかにした弱点を克服する新材料の開発を行うことが本研究の目的である。これを部材レベルでの実験と解析を通し検証することで、繊維補強コンクリートを構造部材として使用することが可能となる。

繊維補強コンクリートは社会基盤構造物の補修補強材料として有用であり、新規構造物への用途も広がっているが、その用途は剥落防止を目的とするなど限定的である。特に、ひび割れ発生後の一軸応力下での研究と、それを基にした実用化が進む中、多方向にひび割れが発生した際の静的及び疲労挙動は未解明であり、国内で橋梁床版に甚大な損傷が早期に発見される例が起こるなど、複雑な応力履歴を受ける構造部材への応用は限定的であり、これを克服することが繊維補強コンクリートの適用範囲を飛躍的に広げる期待される。

## 3. 研究の方法

複数ひび割れ型セメント系複合材料 (HPFRCC) の一種である Engineered Cementitious Composite (ECC) の主応力軸回転下において性能低下を示す特異点を解消する材料を開発することを目的に、剛性の高い鋼繊維と骨材を混入することでひび割れ面でのせん断性能を向上させることの効果を検証する実験を行った。実験には研究代表者の研究グループで考案した、試験体に初期

損傷を与えた後に主応力軸を回転し、その材料力学性能を確認する試験法を用い、通常の ECC に鋼繊維を体積比で 0~2.0% 混入した際の引張、せん断性能とひび割れ性状の変化を確認した。また、実用化を念頭に施工性の確認もあわせて行った。

また、既に行った実験と本実験の結果をもとに数値モデルを構築しその妥当性を確認するとともに、有限要素解析を材料レベル、構造レベルにて行い、ひび割れ面のせん断性能が部材全体の性能に与える影響について検証している。

最後に、材料レベルでの検討から導いた構造に適した材料を用いた梁のせん断載荷試験を実施し、構造レベルでの有用性を確認した。ここでは、鋼繊維に加え、粗骨材も用い効果を検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 頑健材料の開発に関する研究

ECC (Engineered Cementitious Composites) は、通常のセメント材料に PVA や PE、鋼繊維など様々な種類の繊維を混合し、繊維の形状、長さ、直径、セメント部との付着強度を適切に設定することで、複数ひび割れを発生させ、高い引張変形性能を実現するよう設計された HPFRCC のひとつである。研究代表者らによって行われたこれまでの研究において、ECC はその高い引張変形性能に対して、ひび割れ発生後のせん断性能が小さいことが確認され、これに対しひび割れ発生後のせん断性能を向上させるために粗骨材を混合した実験を実施しその性能を評価したが、引張後のせん断性能は向上する一方、引張性能は低下する傾向が確認された。そこでここでは、引張変形性能を保ちつつ引張変形後のせん断性能を向上させることを目的とし、鋼繊維を混合した ECC を用いた実験を実施した。

実験ではまず、鋼繊維混合 ECC の基礎材料特性 (施工性能、圧縮特性、単一のひび割れの挙動) を、スランプフロー試験、圧縮試験、一軸引張試験の結果より分析した。施工性能は鋼繊維混合比率が増加に伴い低下し、混合比率 1% 程度までが理想的な施工性能を持つことが分かった。また、圧縮試験から、圧縮耐力・変形能は混合比率増加とともに若干増加するということが分かった。さらに Dog bone 供試体を用いた一軸引張試験の結果、各混合比率の荷重と変位の関係から、ひび割れ発生時及び破壊時の変位は混合比率増加に伴い増加し、1% で共に最大値を取ったあと、混合比率増加に伴い減少すること、またひび割れ発生時及び破壊時の荷重は、混合比率増加に伴い増加することを確認した。

次に鋼繊維混合 ECC の引張性能と、引張変形時の複数ひび割れの挙動を確認した。まず、

曲げ荷重を与えたプレートの荷重-変位曲線を分析することでマクロの引張性能を評価した。混合比率 0~1%において、変形性能、耐力ともに低下し、1~2%において変形性能はほぼ一定であるのに対し耐力は比率上昇に伴い向上することが分かった。次に、複数ひび割れの挙動を考察した。複数ひび割れのうちの1つのひび割れが、単一のひび割れの挙動に従うと仮定し、ひずみとひび割れの数から算出した複数ひび割れ1つあたりのひび割れ幅の平均から、ひび割れ1つにかかる耐力の平均を算出すると、確かにプレートの耐力と相関があることが確認され、プレートのマクロの挙動とミクロの挙動が一致することが分かった。しかし、ひび割れ分散性が向上する一方変形性能が向上しない点と、単一のひび割れの挙動の2点が解明できなかったため、プレートの挙動の完全な解明には至らなかった。また、混合比率 1~2%において、鋼繊維が荷重のほとんどを受け持ち、PVA が全く機能していないという疑問が生じたため、確認の追加の実験も実施した。

次に、鋼繊維混合 ECC の引張変形後のせん断性能を検証するために、初期損傷を与えたうえで試験体の荷重方向を変化させることで主応力軸を回転させた実験を実施し、ひび割れ方向制御と変形性能と耐力について確認した。荷重-変位曲線から損傷がある場合の耐力、変形性能を、無損傷の結果との耐力比、変形性能比を求めることで、マクロなひび割れ発生後のせん断性能を評価した。耐力から引張変形後のせん断性能を評価すると、鋼繊維を混合することでせん断性能が向上していることが確認された。また変形性能から評価すると、混合比率 0.5%で性能が低下するが、以降混合比率増加と共に性能が回復しほぼ一定となる。次に、計測されたひずみから、複数ひび割れ一つあたりのミクロのせん断性能を評価した。混合比率増加により、同じ直ひずみ  $\epsilon_{xx}$  に対するせん断ひずみ  $\gamma_{xy}$  が低下したことが確認されたため、ひび割れのせん断抵抗性が向上したことが分かった。また、混合比率増加に伴い、同じ kinematics (せん断ひずみを直ひずみで正規化した値) に対する荷重が増加したことから、ひび割れのせん断性能が上昇したことが分かった。更に、プレート破壊時の kinematics、剛性(最大荷重を kinematics で割った値)からミクロのせん断性能を評価した。kinematics は混合比率 0.5%で低下するが以降混合比率増加と共に性能が回復しほぼ一定となり、剛性は混合比率増加に伴い上昇した。よって、ミクロとマクロの挙動が一致していることも確認された。

さらに、初期損傷ひび割れと2度目の荷重に対するひび割れの角度を調べ、鋼繊維混合による角度の変化を観察した。既存の研究に

よると混合物のない ECC は2度目の荷重に対するひび割れの角度が  $45^\circ$  である。実験の結果、鋼繊維を混合することでひび割れの角度が小さくなり、 $10^\circ$  程度で安定した。したがって、ひび割れ角度のコントロールに成功したといえる。

ここでは先に生じた、鋼繊維混合 ECC 内の PVA の必要性に対する疑問に対して、ECC から PVA を除去し、鋼繊維のみを混入した試験体を作成し曲げ試験を実施した。打設時にフレッシュコンクリートの流動性が非常に高くなり、混合比率が想定した比率以下となり、また、プレート底部に鋼繊維が溜まったまま硬化した。したがって PVA はフレッシュコンクリートの過度の流動化を防止し、鋼繊維を部材内に均一に分布させる効果があることが分かった。また、断面の鋼繊維の数から混合比率を補正し、荷重、変位、混合比率の関係を確認した結果、PVA を除去すると耐力と変形性能は著しく低下することが分かった。これは、プレート破壊時複数ひび割れが生じなかったという結果と矛盾しなかった。したがって、PVA は複数ひび割れを生じさせ耐力と変形性能を向上させる役割があり、鋼繊維と共存するときも荷重を受け持つことが分かった。

最後に、実験の結果全体を俯瞰し、鋼繊維が性能に及ぼす影響を耐力、変形性能から相対的に評価し、さらに混合物なし、粗骨材混合、鋼繊維混合それぞれの場合のひび割れ分散性の違いを比較した。耐力から評価すると、鋼繊維を混合した場合、混合物なしの ECC に対し、引張性能は同程度をとり、引張変形後のせん断性能は向上した。さらに粗骨材混合時に対し、引張変形後のせん断性能は同程度である一方、引張性能は向上した。変形性能から評価すると、鋼繊維を混合した場合、混合物なしの ECC に対し、引張性能は低下し、引張変形後のせん断性能は同程度であった。さらに粗骨材混合時に対し、引張変形後のせん断性能、引張性能は共に同程度であった。最後に、耐力、変形性能の性能曲線から、総合的に評価して 1.0~1.5% が最も適切な混合比率であるとした。更に今後、更に性能の高い材料を作り出すために、鋼繊維の付着強度や規格を変更し、実験することが必要であると考えられる。

## (2) 開発した頑健材料の構造への適用に関する研究

開発した材料の実構造物への適用を見据えて、構造レベルでの実験検証が必要であることから、ここでは梁の静的及び疲労試験を主応力軸回転を模擬した場合を含め実施し、部材の挙動を検証した。梁の試験に適用する材料として、既往の研究と本研究の材料レベルでの実験結果から、粗骨材の場合は体積比

で10%、鋼繊維の場合は体積比で1.0%をECCに混入したものをを用いた。

まず、単純梁での静的荷重試験により各混合材料の静的耐力を実施し、また材料の引張特性を曲げ試験により確認した。単純梁試験の結果では、せん断圧縮破壊に近い破壊に至ったため引張せん断耐力を得ることは出来なかったものの、材料間での大きなせん断耐力差は見られなかった。また、曲げ試験により粗骨材及び鋼繊維混入による引張特性の低下が確認されたことから、引張性能が低下している一方でせん断耐力に大差がない、という事実を得ることが出来た。次に、粗骨材及び鋼繊維混入が疲労寿命に与える影響を確認するため、単純梁での疲労荷重試験を行った。結果、数オーダーが変わるほどの劇的なものではないが、粗骨材及び鋼繊維混入による疲労寿命へのある程度の効果が確認された。ここまでの結果から、粗骨材及び鋼繊維の混入により、材料の引張性能は低下する一方、単純梁の部材レベルでの実験においては、静的せん断耐力は同程度、疲労寿命は同程度かそれ以上であることが確認された。

次に、ひび割れ部分での主応力軸が変化し、より大きなせん断応力がひび割れ面に発生した場合の挙動を調べるために、逆対称4点曲げ試験を応用した実験方法を考案し、初期損傷を与えた後に載荷条件を変えることで損傷部分での主応力軸の回転を実現した。静的荷重下において初期損傷あり・なしの2パターンでの試験を行い、初期損傷が耐力に与える影響等について考察した。結果、通常のECCと粗骨材を混入したECCでは初期損傷による耐力の低下が確認されたのに対し、鋼繊維を混入したECCでは耐力の低下が見られず、初期損傷部分でのせん断抵抗において鋼繊維が効果を発揮したことがわかった。また、試験後のひび割れ性状の確認から、粗骨材及び鋼繊維を混入したECCでは、初期損傷でのせん断抵抗が見て取れるようなひび割れの存在が多く確認された。さらに、供試体表面に設置したひずみゲージから得たひずみを座標変換することによって破壊面の「開き」と「せん断ずれ」の関係を考察したが、静的荷重下においては粗骨材及び鋼繊維の混入による「せん断ずれ」の顕著な制御機構は確認されなかった。

この実験に引き続き、初期損傷ありでの疲労荷重試験を行った。粗骨材及び鋼繊維の混入による疲労寿命への効果が確認された。また、供試体表面のひび割れ発生部分でのひずみ計測により、ひび割れの「開き」と「せん断ずれ」の挙動を確認したところ、通常のECCは他の混合材料に比べて「せん断ずれ」の挙動がより大きいという結果が得られた。つまり、粗骨材及び鋼繊維の混入により疲労荷重下ではひび割れ部の「せん断ずれ」に対する

抵抗力が高まったという結果が得られた。さらに、マイクロスコブを用いて破壊面を観察したところ、通常のECCと粗骨材を混入したECCでは、ひび割れの「開き」と「せん断ずれ」の挙動が最も大きかったと考えられる部分においてPVA繊維がほとんど破壊されなくなってしまうのに対し、鋼繊維を混入したECCではPVA繊維が残存していることが観察された。つまり、鋼繊維が疲労荷重下においてひび割れ部の抵抗力に大きく寄与していることが解明された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

1. Benny SURYANTO, Mahyarudin DALIMUNTHER, Kohei NAGAI, Koichi MAEKAWA: Shear Fatigue Performance and Crack Surface Observations in PVA-ECC Beams without Web Reinforcement, コンクリート工学年次論文集, 33, 2, pp.1279-1284, 2011. (査読有り)
2. Mahyarudin DALIMUNTHER, Benny SURYANTO, Kohei NAGAI: Pre- and Post-Yielding Tensile Behaviors of R/HPFRCC, コンクリート工学年次論文集, 33, 2, pp.1231-1236, 2011. (査読有り)
3. Kohei NAGAI, Benny SURYANTO, Koichi MAEKAWA, Tetsushi KANDA: Control of Cracking Direction of SHCC under Principal Stress Rotation with Coarse Aggregate, Proceedings of Second Rilem International Conference on Strain Hardening Cementitious Composites, 2011. (in CD-ROM) (査読無し)
4. Kohei NAGAI, Benny SURYANTO, Koichi MAEKAWA: Space-averaged Constitutive model for HPFRCC with Multi-directional Cracking, ACI Material Journal, 108, 2, pp.139-149, 2011. (査読有り)
5. Benny SURYANTO, Kohei NAGAI, Koichi MAEKAWA "Smear-crack modeling of R/ECC membranes incorporating an explicit shear transfer model", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.3, pp.315-326, 2010. (査読有り)
6. Benny SURYANTO, Kohei NAGAI, Koichi MAEKAWA "Modeling and Analysis of Shear-critical ECC Members with Anisotropic Stress and Strain Fields" Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.2, pp.239-258, 2010. (査読有り)

[学会発表] (計2件)

1. 長井宏平, Role of Coarse Aggregate in a Cement-based Material with Strain-hardening Subjected to Stress-field Rotation, 10th International

Symposium on New Technology for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA), 2011年10月13日, チェンマイ (タイ)

2. 長井宏平, Numerical Simulation of Damaged HPFRCC Plates with Multi-directional Cracking , 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures (ICDCS2010), 2010年11月25日, 札幌

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長井 宏平 (NAGAI KOUHEI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：00451790