

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360247

研究課題名（和文） ECCの寸法効果と構造性能の評価に関する研究

研究課題名（英文） Study on Scale Effect and Structural Performance of ECC

研究代表者

金久保 利之(KANAKUBO TOSHIYUKI)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号：90261784

研究成果の概要（和文）：ECCとは、均質なモルタルに高性能な短繊維を練り混ぜ、マルチプルクラックを伴いながら疑似歪硬化性状を示すセメント系複合材料である。本研究では、ECCの一軸引張試験、曲げ試験およびひび割れの発生性状、繊維の可視化と配向性の評価を通して実験的および解析的な研究を行った。その結果、一軸引張性状および曲げ性状において顕著な寸法効果が見られた一方、ひび割れ幅は試験体寸法にあまり影響を受けないことが明らかとなった。また、繊維の可視化により、試験体の打設方向により繊維配向性が影響を受けることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：ECC shows the pseudo strain-hardening behavior with multiple cracks by mixing high performance short fibers into homogeneous mortar. The experimental and analytical studies were carried out through uni-axial tension and bending test, investigations of crack behavior and visibility of fiber orientation. The remarkable scale effect can be recognized by the test results of uni-axial tension and bending test, while crack width is not largely affected by the specimen scale. The fiber orientation has the tendency to flow along the direction of casting.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：寸法効果、ひび割れ幅、引張試験、テンションスティフニング

1. 研究開始当初の背景

ECC（Engineered Cementitious Composites）とは、粘性の高い均質なモルタルに高性能な短繊維を1～2%程度練り混ぜ、硬化後、純引張応力下で微細な複数ひび割れ（マルチプルクラック）を伴いながら数%の歪に至るまで引張応力が増大する（疑似歪硬化）性状を示す、セメント系複合材料である。ECCを構造部材に適用して有効利用するためには、その特長である引張性能を適切に評価し、構造設計に反映させることが重要な課題

である。セメント系材料であるECCの引張性能を構造設計に陽な形で取り込むことは、コンクリート構造の可能性を広げる革新的な試みといえる。この試みの基礎となるのがECCの引張性能の評価方法の確立であり、またその評価法により得られた材料性能を用いた構造設計方法の確立である。

ECCの引張性能の評価方法に関しては、力学的に明解な方法として一軸引張試験が考えられる。しかしながら、一軸引張試験では、試験体の形状、寸法、境界条件が結果に大き

な影響を与える。また、曲げ試験により得られる特性値は、いわば「構造性能」であり、純粋な材料の性能とは異なる。応力勾配の存在は、ひび割れ間隔およびひび割れ幅に大きな影響を与え、いわゆる寸法効果を引き起こす。さらにはECCの引張性能、言い換えればひび割れ発生挙動の寸法効果が定量的に把握されていないため、実際の適用におけるECC活用の有効性が明確になっていないと言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ECCの一軸引張性状と曲げ性状との関連を寸法効果に着目して検討し、さらにそれらの検討から得られるECCの引張特性値と部材の特性値との関連を、部材レベルの実験および解析、材料レベルの試験、ミクロレベルの観察により明らかにすることである。

まずは、材料試験レベルおよび部材実験レベルでの寸法効果の存在を、実験により定量的に把握する。寸法効果を定量的に表現するためには、マルチプルクラックの間隔および開口幅が非常に重要な情報となる。画像解析手法によりそれらを十分な精度で把握する。次に、繊維補強セメント複合材料特有の寸法効果を支配すると考えられる繊維配向性を、X線CTを用いて可視化することにより評価する。また、ECCのひび割れ間隔は鉄筋の有無により影響を受け、この現象はECCと鉄筋との相互作用、すなわち付着特性によるものと考えられる。付着特性に支配されるテンションスティフニング効果を一軸引張試験より求め、材料の構成則および付着構成則をモデル化することにより、解析的に実験結果を追跡する。

3. 研究の方法

本研究で行った実験的および解析的研究のうち、本報で報告する次の3項目について記述する。

- (1) 試験体の寸法を主たる変動要因とした一軸引張試験および曲げ試験と、ひび割れ性状の画像解析による追跡
- (2) X線CTを用いたECC内部の繊維の三次元的可視化と繊維配向性の定量的評価
- (3) 主筋を配した試験体の一軸引張試験と、材料の構成則および付着構成則をモデル化したテンションスティフニング効果確認のための付着解析

4. 研究成果

- (1) ECCの一軸引張試験、曲げ試験および画像解析によるひび割れ性状の把握

曲げ試験に用いた試験体は、断面寸法が40~400mmの角柱試験体であり、三等分点载荷を行った。実験より得られた最大荷重時の曲

げ応力-断面せい関係および曲げ歪-断面せい関係を、図1および図2にそれぞれ示す。断面寸法の増加とともに最大荷重時の曲げ応力、曲げ歪ともに顕著に低下している。

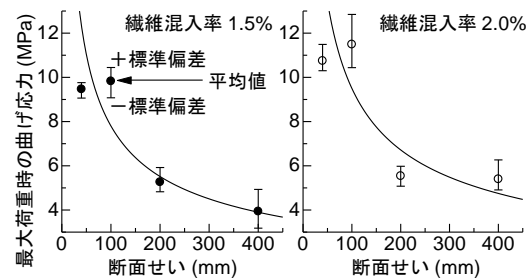


図1 最大荷重時の曲げ応力-断面せい関係

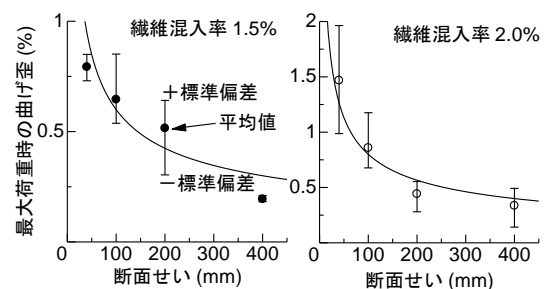


図2 最大荷重時の曲げ歪-断面せい関係

一軸引張試験には、ダンベル型の試験体を用い、断面寸法は20~100mmである。実験より得られた引張強度および終局歪を、表1および表2にそれぞれ示す。引張強度は、ほとんどの試験体において初期ひび割れ発生荷重にて決定しているため断面寸法による大きな差異は見られないが、終局歪に関しては大きな差がある。

表1 引張強度の平均値と変動係数

試験体断面	平均値 (MPa)	変動係数 (%)
20mm	4.33	15.4
50mm	4.35	26.8
100mm	4.32	10.0

表2 終局歪の平均値と変動係数

試験体断面	平均値 (%)	変動係数 (%)
20mm	0.60	17.5
50mm	0.20	61.6
100mm	0.04	19.0

ECCの引張性能を決定づける要因は繊維の架橋能力であり、繊維の架橋性能は試験体のひび割れ性状となって表現される。本試験では、曲げ試験において、荷重値等のデータの計測ステップと同調させ、連続的にデジタルカメラにより画像撮影を行い、その後、画像

処理を行って、ひび割れ幅の計測を行った。

処理方法として、まず画像処理ソフト HALCON のカメラキャリブレーション機能を利用してレンズによるデジタル画像の歪曲収差を除去、また同時にピクセル単位の画像座標系をメートル単位の世界座標系に変換する。その後、ひび割れ幅を算出したい範囲をデジタル画像内で決定し、カラー画像をグレースケール変換、二値化、しきい値処理、エッジの検出等を行い、ひび割れ幅を得る。

代表的な試験体の曲げ応力とひび割れ幅の関係を、図3に示す。ひび割れが複数発生した試験体に関しては、ひび割れ幅の平均値と最大値を示した。全般的な傾向として、最大応力に到達するまでのひび割れ幅の最大値と平均値の差異は小さく、応力の軟化域においてひび割れ幅の平均値と最大値の差が大きくなり、終局時にひび割れ開口が局所化する実験結果と対応している。

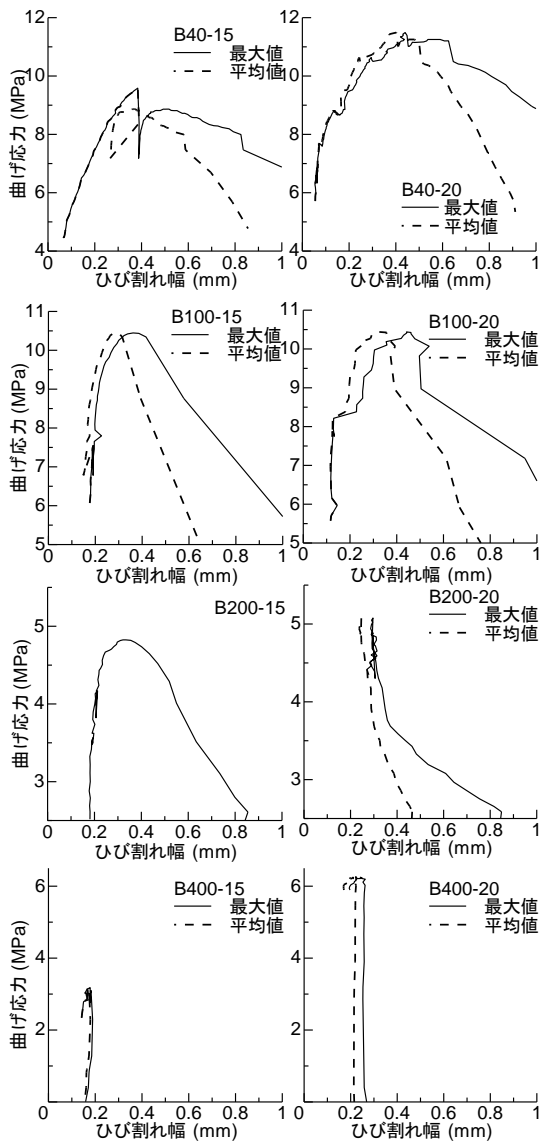


図3 曲げ応力-ひび割れ幅関係

最大応力時のひび割れ幅の平均値は、試験体の寸法に依らず 0.3~0.4mm 程度である。すなわち、繊維の架橋性能における変形能（繊維の拔出し量）に関しては、寸法効果の影響は大きくないと考えることができる。一方、最大曲げ応力に関して試験体寸法の影響は大きいため、繊維の架橋応力は寸法効果の影響が大きく、型枠に沿って繊維が2次元状に配向するウォールエフェクトがあると思われる。

(2) X線CTを用いたECC内部の繊維の三次元的可視化と繊維配向性の定量的評価

CTスキャン撮影用コアは、曲げ試験体より採取をした。コア採取をした曲げ試験体寸法は断面寸法 40、100、240mm の3種類、軸方向長さは断面寸法の4倍である。

採取したコア試験体に対してX線CTスキャンを用いた透過撮影を行った。撮影されたコアのXY平面画像の例として断面寸法40mmの試験体中央部(B40VC-XY)の画像を図4に示す。撮影された画像から空隙、ひび割れを除去し、モルタルマトリクス部分の透過処理を行い、画像を2値化することで繊維を明確にする。X線CTスキャンで取得した画像を積み重ねるイメージで、得られた2次元画像を3次元情報へと構築した。繊維配向角を定量的に表現するために、図5に示すように、繊維検出後の画像に対して任意の正方形メッシュで分割し、各要素内の繊維座標に対して、各座標との距離の和が最小になるような回帰直線の傾きを繊維配向角と定義した。

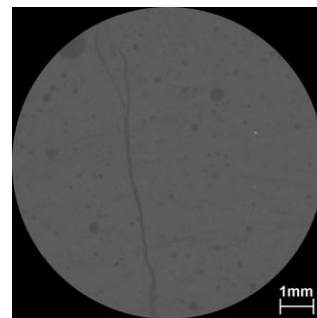


図4 平面画像の例

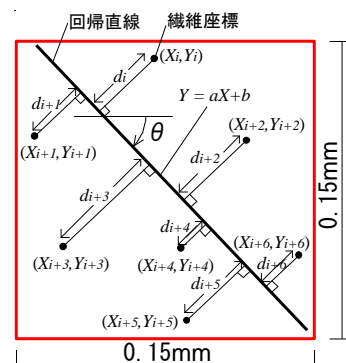


図5 繊維配向角の算出方法

繊維座標情報検出後の画像の例および繊維配向角の相対度数分布を図 6 に示す。X 軸に繊維が沿う傾向が見られ、相対度数分布のピークも 0° 付近であることから検出方法の妥当性が確認できる。コア採取位置、コア採取元の試験体寸法に依らず繊維配向角は 0° 付近が卓越する結果となった。試験体軸方向に沿って繊維が流れやすいことが推定できる。また、試験体表面側と内部側での特徴に明確な差異は確認できなかった。

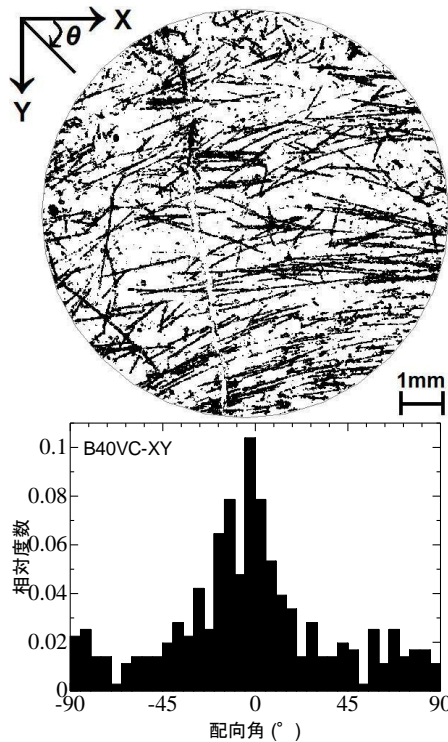


図 6 繊維抽出画像と配向角の相対度数分布

(3) 主筋によるテンションスティフニング効果確認

テンションスティフニング効果は、図 7 に示すような鉄筋とコンクリートからなる鉄筋コンクリート部材の両引き試験において、部材の剛性が鉄筋単体の剛性より高くなる挙動である。通常のコンクリートの場合、鉄筋に作用した引張力が鉄筋とコンクリートの境界面に作用する付着応力を介して鉄筋周辺のコンクリートに伝わり、コンクリートが引張力を負担することでテンションスティフニング効果が生じる。同様に ECC を用いた場合について考えると、ECC ではひび割れ箇所において繊維の架橋効果による引張力が作用する。未ひび割れ区間ではコンクリート同様、鉄筋の引張力が付着応力により分配され、ECC の負担引張力はひび割れ箇所の引張力より増大する。便宜上、架橋効果による引張力は未ひび割れ区間において一定とすると、図 7 右図に示すような引張力分布になると考えられる。架橋効果による引張力は

ECC の材料特性であるから、ECC の引張力分布において ECC と鉄筋の付着性状に依る部分は図 7 右図に斜線で示した部分となる。

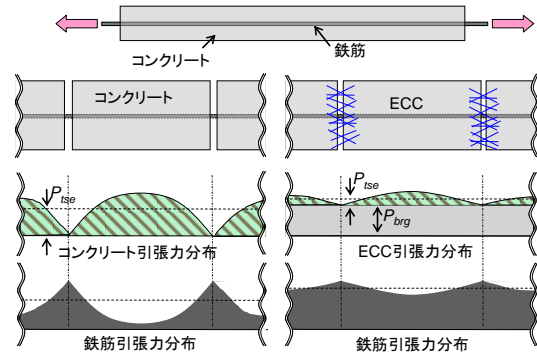


図 7 ECC のテンションスティフニング

ECC はひび割れ発生後、ひび割れを架橋した繊維による架橋応力が作用する。この架橋応力はマトリクスや繊維の性能、繊維の配向角、繊維とマトリクスの付着性状に依存しており、ひび割れ幅の関数として与えられる。架橋応力ーひび割れ幅関係を与え、ひび割れ部分において ECC の受け持つ引張力をその他の内力との釣合条件に加えることで、ひび割れ発生以降の ECC と鉄筋の状態を表現する。また、その際には ECC と鉄筋の局所付着応力ーすべり量関係を仮定し、ひび割れ箇所でのすべり量とひび割れ幅の変形適合条件を考慮する。

解析に用いた ECC と異形鉄筋の付着応力ーすべり量モデルを図 8 に示す。また、ECC の架橋応力ーひび割れ幅関係のモデルを図 9 に示す。

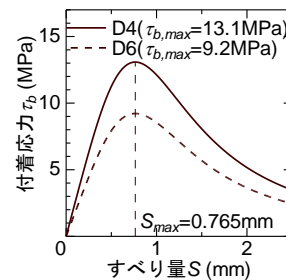


図 8 付着応力ーすべり量モデル

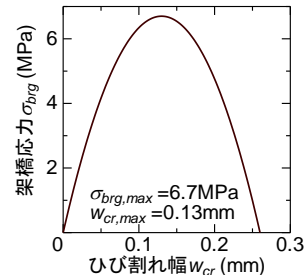


図 9 架橋応力ーひび割れ幅モデル

解析対象 450mm を初期解析区間とし、解析上 ECC にひび割れが発生した時点でひび割れ

間隔を1/2として、再度付着解析を行い、その後、順次新たなひび割れが発生した時点でひび割れ間隔を1/2にし、繰返し解析を行った。解析により得られた荷重-全体変形関係を図10に示す。実験結果と解析結果はよく対応しており、本解析の妥当性が確認できる。ひび割れ間隔を比較すると、実験においては鉄筋降伏時の平均ひび割れ間隔が30~40mm、終局時においてはD4試験体では約10mm、D6試験体では約8mmであったのに対し、解析ではどちらの試験体も鉄筋降伏時のひび割れ間隔が約28mm、終局時(全体変形量8.0mm時)においては約1.7mmと解析の方がひび割れ間隔は小さくなる傾向にあった。解析上、ECCのひび割れ強度は常に一定値としているため、着目解析区間の中央部にひび割れが生じるが、実際にはひび割れ強度には空間的ばらつきがあるため、ひび割れ本数が異なると考えられる。

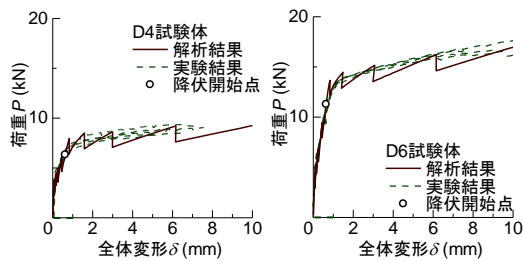


図10 両引き試験体の解析結果

実験および解析によって得られた荷重-全体変形関係とECCの負担引張力-全体変形関係を図11に示す。ECCの負担引張力は、全荷重と鉄筋単体の引張力の差分から算出した。実験結果より、ECCの負担引張力は全体変形が0.2mmから0.4mm程度の変形が小さい領域においてもっとも大きく、その後一定値に近づく。

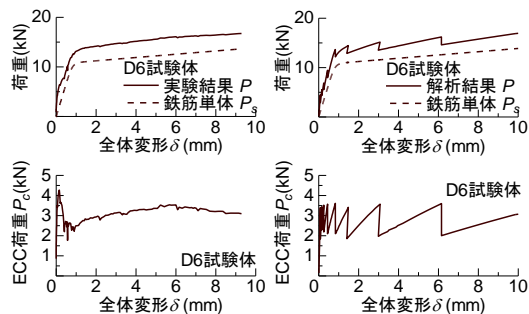


図11 鉄筋とECCの負担割合
(左図：実験結果 右図：解析結果)

ECCの負担応力のうち、架橋応力の占める割合が大きいことから、テンションスティフニング相当応力は大きくても0.2MPa程度となり、全体変形が大きくなるにつれて0に近づく。解析においてはひび割れ間隔が小さい

ほど同一荷重における全体変形が大きくなるため、ひび割れが複数生じひび割れ間隔が小さくなるにつれて、ECCと鉄筋の付着長が短くなり、テンションスティフニング相当応力が小さくなると考えられる。すなわち、ECCと鉄筋の付着によるテンションスティフニング効果は、ひび割れ箇所において繊維の架橋力が存在すること、ひび割れ間隔が普通コンクリートに比べて小さいことから、コンクリートより小さいと言える。

また、架橋応力は解析上必ずひび割れ強度以下の値を示すが、ひび割れ箇所ではさらに架橋応力の減少を伴うため、平均的に見ると小さい架橋応力を示すようになる。変形に関しては、ECC単体の引張試験結果と比較して、顕著に大きな歪を示す。これは、付着応力の存在によりひび割れ幅の増大が抑制され、ひび割れの局所化が非常に起こりにくくなるためと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① 重水法弘, 金久保利之, 細矢博: 鉄筋あき間隔を小さくしたSHCC部材の付着割裂強度, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第37号, 2011.10 (掲載決定)
- ② 鬼塚由佳, 金久保利之: ECCのテンションスティフニング効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第653号, 2010, pp.1327-1333
- ③ T. Kanakubo, K. Shimizu, et.al.: Shear Transmission on Crack Surface of ECC, Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 査読有, Vol.3, 2010, pp.1623-1630
- ④ K. Asano, T. Kanakubo, T. Matsushima: Study on Size Effect in Bending Behavior of ECC, Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 査読有, Vol.3, 2010, pp.1617-1622
- ⑤ T. Fukuhara, T. Kanakubo, et.al.: Study on the Influence of the Fiber Orientation to the Mechanical Performance of HPRFCC, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 査読無, Conference Proceedings DVD, 05-03, 2009, p.157
- ⑥ 平野雄大, 浅野浩平, 金久保利之: ECCの曲げおよび一軸引張性状における寸法効果, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 第31巻, 2009, pp.283-288
- ⑦ 鬼塚由佳, 金久保利之: DFRCCの曲げ性能

に及ぼす繰返し載荷の影響評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 第 31 巻, 2009, pp. 1315-1320

[学会発表] (計 7 件)

- ① 金久保利之, 鬼塚由佳: 鉄筋補強 ECC 部材の曲げ性能に及ぼす繰返し載荷の影響, 日本建築学会大会, 2010. 9. 11, 富山大学
- ② 浅野浩平, 金久保利之: 高性能繊維補強セメント複合材料における短繊維の付着性状に関する研究, 日本建築学会大会, 2010. 9. 11, 富山大学
- ③ 金久保利之, 平野雄大, 浅野浩平: 主鉄筋を有する ECC の曲げ性状における寸法効果, 土木学会年次学術講演会, 2010. 9. 3, 北海道大学
- ④ 福原哲夫, 金久保利之, 小川敦久: HPRCC の曲げ性状に及ぼす型枠面の影響, 日本建築学会大会, 2009. 8. 28, 東北学院大学
- ⑤ 浅野浩平, 金久保利之: ECC の曲げ性状における寸法効果の考察, 日本建築学会大会, 2009. 8. 28, 東北学院大学
- ⑥ 平野雄大, 浅野浩平, 金久保利之: ECC の曲げ性状における寸法効果, 土木学会年次学術講演会, 2009. 9. 4, 福岡大学
- ⑦ 鬼塚由佳, 金久保利之: 軸方向鉄筋を有する DFRCC の曲げ性状に及ぼす繰返し載荷の影響に関する解析的検討, 土木学会年次学術講演会, 2009. 9. 4, 福岡大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/page2.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金久保 利之 (KANAKUBO TOSHIYUKI)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・
准教授
研究者番号: 90261784

(2) 研究分担者

松島 亘志 (MATSUSHIMA TAKASHI)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・
准教授
研究者番号: 60251625