

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360190

研究課題名(和文) 離散化された繊維補強材料のライフスパン解析手法の構築と新材料開発への応用

研究課題名(英文) Development of Life-span Simulation Method for Fiber Reinforced Composites Considering Discretized Short Fibers and Its Application to Material Development

研究代表者

國枝 稔(KUNIEDA, Minoru)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：60303509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円、(間接経費) 4,440,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートのひび割れを低減したり、破壊する際に粘り強さを付与する短繊維を混入した繊維補強コンクリートは、短繊維の位置や配向の評価が重要である。本研究では、まだ固まらない繊維補強コンクリート中の短繊維の位置情報を予測する解析手法を構築するとともに、その情報を固まった後の性能評価にフィードバックして解析する破壊解析手法を構築することで、繊維補強コンクリートのライフスパンを予測する手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：Fiber Reinforced Concrete (FRC) can be used to reduce crack width and to increase ductility of structural members in concrete structure. Fiber orientation and fiber distribution that affect those improvement should be estimated appropriately. This research develops numerical analysis method, which is namely life-span simulation method, for estimating the performance of FRC from fresh state to hardened one.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：繊維補強コンクリート 配向性 破壊 数値解析

1. 研究開始当初の背景

近年、高靱性セメント系複合材料にみられるように、高性能化された短繊維補強材料が開発され、利用に向けての検討が進められている。しかし、例えば以下のような理由により、その利用が飛躍的に伸びていないのが現状である。

- ・材料の力学性能が繊維の配向性に依存しやすく、両者の関係が定量化されていない。(非破壊試験などでも確認できない)
- ・繊維補強材料の特徴の一つであるひび割れの分散およびひび割れ幅の低減を定量的に予測できる数値解析手法が皆無であり、材料の性能が定量的に予測できない。

以上の背景から、まだ固まらない段階での繊維補強コンクリート(FRC)中の繊維の配向性や分散状況の予測とその影響(ひび割れ幅など)を予測する数値解析手法の開発が急務である。

2. 研究の目的

本研究では、短繊維を1本1本離散化したメゾスケール数値解析手法を構築し、材料特性を定量化するとともに、新たな構造材料を開発することを目的とする。

流動解析手法を用いた施工解析による短繊維の配置の定量化

引張、せん断力下での力学挙動を再現できる構造解析手法の構築と高精度化

3. 研究の方法

本研究では、主に以下の内容について解析的および実験的に検討した。

まだ固まらないFRC中の繊維の配向を3次元個別要素法(DEM)を用いて予測する手法を構築する。

硬化したFRCの引張りおよびせん断力下でのひび割れ挙動を定量的に評価す

る手法を3次元剛体ばねモデル(RBSM)を用いて構築する。

ひび割れが生じていないFRC中の繊維の耐久性(特にクリープ)への寄与を定量的に評価する。

4. 研究成果

4.1 研究成果の概要

本研究における成果の概要は以下の3つに大別できる。

FRCの流動解析手法の構築

まだ固まらないFRC中の繊維の配向を3次元個別要素法(DEM)を用いて予測する手法を構築した。

- ・繊維とモルタルの相互作用の定量化
 - ・モデルモルタルを用いた配向性の確認
 - ・FRC合流部での架橋効果の予測
- などを実施した。

FRCの破壊解析手法の構築

硬化したFRCの引張りおよびせん断力下でのひび割れ挙動を定量的に評価する手法を3次元剛体ばねモデル(RBSM)を用いて構築した。

- ・繊維の引抜きを考慮したモデルの構築
- ・埋込み角の異なる単繊維の引抜き試験による架橋力の定量化とそのモデル化
- ・ひび割れ面のせん断ずれにおける架橋力の評価

などを行った。

FRCのクリープ挙動の評価

ひび割れが生じていないFRC中の繊維がFRCのクリープに及ぼす影響について実験的に検討した。特に、繊維の種類や混入率によっては、FRCのクリープが低減できることを明らかにした。

以下では、主に、 の内容について概説する。

4.2 FRCの流動解析手法の構築

4.2.1 単繊維の構成モデルに関する検討

(1) 解析概要

モルタルマトリクスと繊維の相互作用を定量評価することを目的として、モルタルマトリクス中で繊維を上下に動かす実験を再現する解析を行った。解析手法としては3次元個別要素法を用いた。

長さ100mm、直径0.85mmの鋼線を等間隔に5×5本配置した供試体を作製し、フレッシュモルタルの中に繊維を出し入れする実験を対象とした。実験を模擬し、85×100×100mmの解析領域の中に、モルタルをモデル化した要素をランダムに発生させた。モルタルは直径5mmの球形要素であり、8150個を使用した。次に、繊維を供試体と同様の間隔で初期条件の位置に配置した。繊維1本は、直径0.85mmの球形要素を長さ100mmとなるよう120個直列に剛結したものである。図-1に解析モデルを示す。水色の球体がモルタル、赤色の線分が繊維を表す。

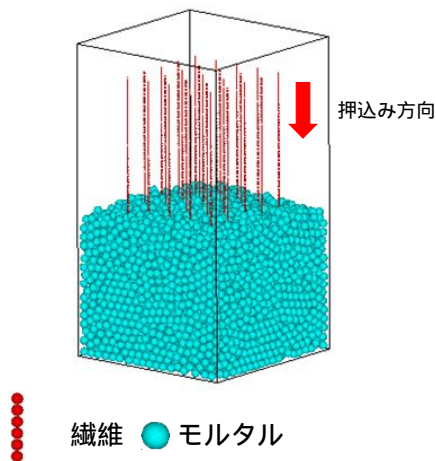


図-1 要素解析モデル

(2) 解析結果

図-2に引抜きと押込みを合わせた荷重-変位曲線を示す。実験結果と同様の挙動を定性的に確認することができた。なお、実験と解析では荷重値について解析値が実験値を大きく下回っており、定量評価のためのパラ

メータの設定が今後の課題である。

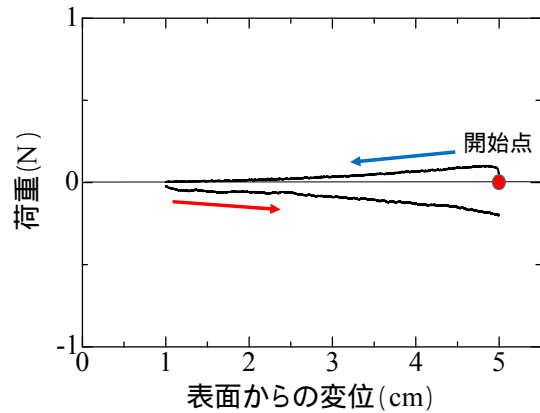


図-2 得られた荷重-変位曲線

4.2.2 部材解析

(1) 解析概要

図-3に示すように、小型Lフローの実験を対象に解析手法の妥当性を検証した。

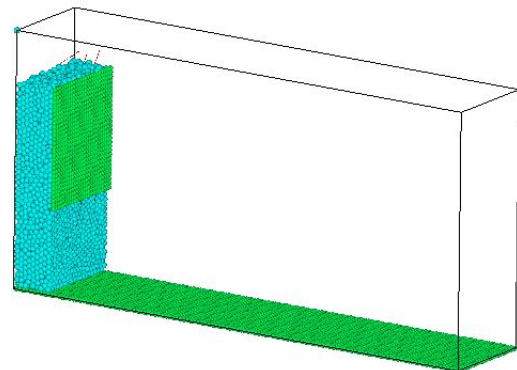
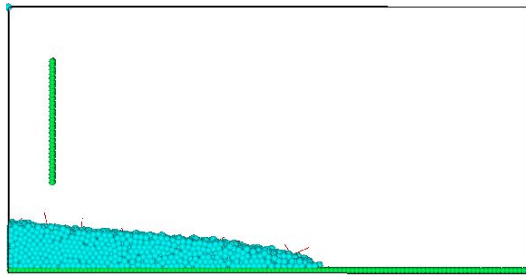


図-3 解析対象(小型Lフロー試験)

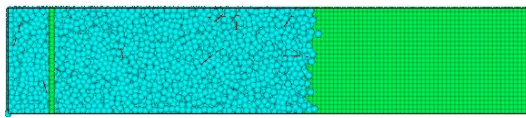
初期状態の200×100×40mmの解析領域の中にモルタルと短繊維をモデル化した要素を、所定の繊維混入率となるようランダムに発生させた。モルタルは、要素解析と同様の球形要素を7400個を使用した。また、短繊維1本は、直径0.5mmの球形要素を60個直列に剛結したもので、長さは30mmである。全体の体積の0.1%の繊維混入率とするために、当該繊維を132本を使用した。なお、解析モデルにおいて、水色の球体がモルタル、赤色の線分が短繊維、緑色の領域は仕切り板と底面を表す。

(2) 解析結果

流動開始から 0.5 秒後の短繊維の流動性状を図 - 4 に示す。実験結果と類似した流動性状を示していることがわかる。



(a)側面図



(b)平面図

図 - 4 FRC の流動性状

4.2.3 FRC 合流部の解析

(1) 解析概要

FRC の打込み時の合流部での繊維の架橋状態を解析的に評価するにあたり、まずはモルタルのみの解析を実施するとともに、FRC の解析も実施した。

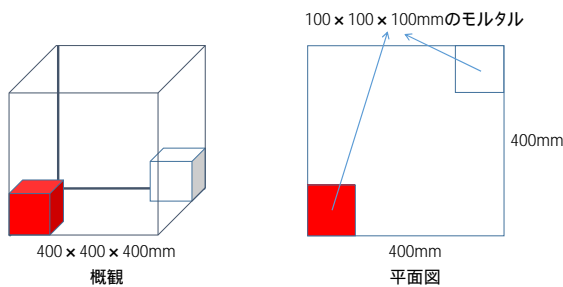


図 - 5 試験概要

図 - 5 に解析対象を示す。400×400×400mm の外枠の両端の 100×100×100mm の解析領域にモルタル要素を合計 25210 個配置した。なお、2 種類のモルタルを認識させるため、直径が 5.0mm と 4.9mm の 2 種類の球形要素を用いた。

(2) 解析結果

図 - 6 に、解析結果のうち、モルタルと短繊維、図 - 7 に繊維のみを表示させた解析結果を示す。図より、中央の合流部において、短繊維がモルタル間を越えることなく混合しない挙動が確認できる。

以上より、モルタルの 2 方向からの流動実験と解析により、モルタルは合流部において、流動性や量の違いに関係なく混合しないことを定量的に示した。また、モルタル中に混入した短繊維も合流部において混合しないことを解析的に示した。これは、実施工上、短繊維補強モルタルを 2 方向から流した際、合流部で混合しないため短繊維が架橋効果を発揮できず、硬化後の強度や耐久性の低下につながることを示している。

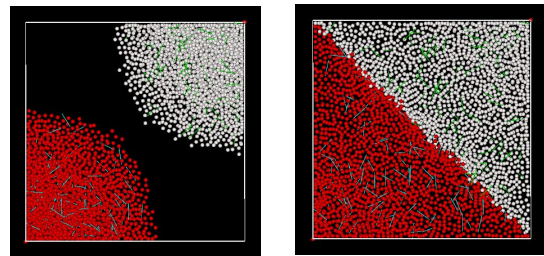


図 - 6 流動性状 (マトリクス + 単繊維)

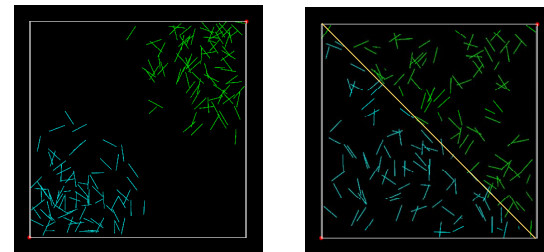


図 - 7 流動性状 (単繊維のみ)

4.3 FRC の破壊解析手法の構築

4.3.1 実験概要

繊維には、長さ 48mm のポリプロピレン繊維 (PP 繊維)、および長さ 30mm の両端フック付き鋼繊維 (SF) を使用した。なお、鋼繊維はフック無しの場合の引抜け挙動を見るために、図 - 8 に示すようにマトリクスに埋め込む側のフックを切除し、繊維長を 25mm とした。

配向角度に配慮した検討ケースを図 - 9 に

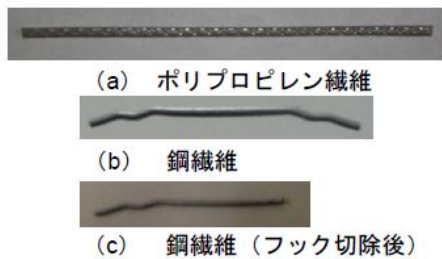


図 - 8 使用した短繊維

示す．この検討ケースはずれ型（モード）の破壊モードにおける繊維の引抜き挙動を想定している．試験体を試験機のつかみ具に固定し，試験体に埋め込まれた繊維を繊維固定用板に固定し，0.01mm/sec の載荷速度を目安に変位制御にて載荷を行うことで，繊維の引抜き荷重および変位（試験機のストローク）を測定した．

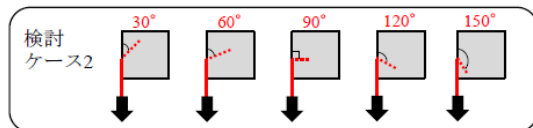
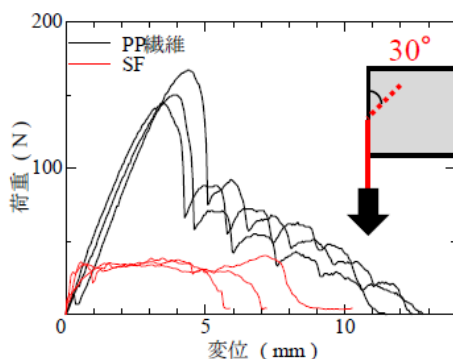
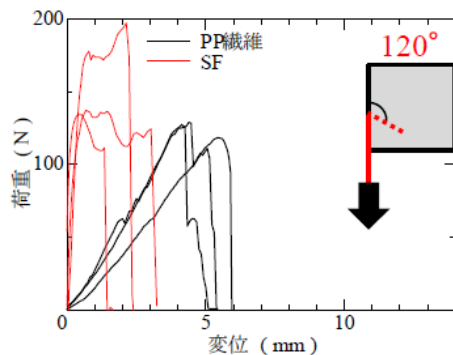


図 - 9 検討ケース



(a)配向角度 30°



(a)配向角度 120°

図 - 10 荷重 - 変位曲線

4.3.2 実験結果

引抜き試験によって得られた引抜き荷重 - 変位関係について，配向角度 30°と 120°のものを図 - 10 に示す．黒線で示したものが PP 繊維，赤線で示したものが SF の引抜き試験結果である．また，どちらの繊維も結果は試験を行った 5 体の試験体のうち計測出来たものの結果である．

PP 繊維の試験結果については，配向角度が 30°と 60°の試験体全てで繊維が完全にマトリクスから抜け出し，90°と 120°，150°の試験体全てで繊維が破断した．SF の試験結果については，配向角度が 30°と 60°，90°の試験体全てで繊維が完全にマトリクスから抜け出し，120°と 150°の試験体全てで繊維が破断した．

4.3.3 引抜きモデルの開発

(1) 解析概要

図 - 11 に示すように，2 個のコンクリートブロック (100×100×200mm) を突き合わせた形状の供試体において，ひび割れを模擬した中央部界面に複数短繊維を配置したモデルを考え，せん断破壊解析を行った．繊維配向は(a)配向角度 90°，(b)配向角度 60°，(c)ランダム配向の 3 パターンとした．埋込長(短い方)は(a)，(b)では 10mm と設定した．下側の繊維が引き抜けるモデルとなっており，繊維本数 36 本の場合で解析を行った．

(2) 解析結果

図 - 12 に荷重 - 変位曲線を示す．最大荷重値は(a)が最も大きく，次いで(b)，(c)となった．既往の研究で示されている通り，繊維の配向角度が大きくなるほど，繊維の引抜き抵抗性が向上していることが推察できる．(a)，(b)は埋込長 10mm としているため，10mm のせん断ずれが生じた際に，全ての繊維が引抜かれていることを解析により表現した．(c)については，繊維が界面にランダム配向されているため，埋込長にばらつきが生じ，繊維の架橋効果について(a)，

(b)と違いが生じたものと考えられる．この結果より，複数繊維の引抜き抵抗力の評価が可能なモデルが構築できた．

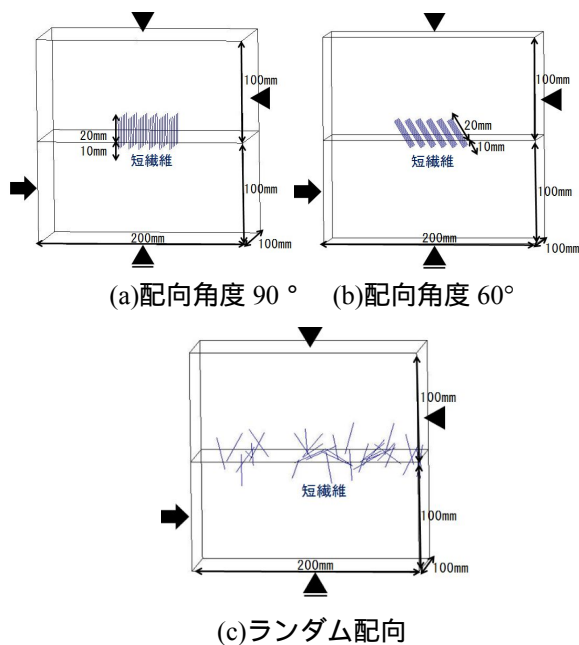


図 - 11 解析対象

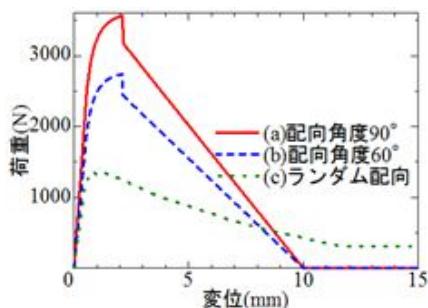


図 - 12 荷重 - 変位曲線（解析結果）

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- (1)杉本勝哉，国枝稔，上田尚史，中村光：ひび割れの開口・ずれを想定した短繊維引抜き試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.283-288，2013（査読有）
- (2)加藤勝秀，国枝稔，上田尚史，中村光：3次元個別要素法による短繊維補強材料の流動解析モデルの構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1228-1233，2012（査読有）
- (3)杉本勝哉，国枝稔，上田尚史，中村光：ひび割れの開口・ずれを想定した短繊維引抜き

試験，繊維補強セメント系複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.287-296，2012（査読無）

- (4)国枝稔，加藤勝秀，上田尚史，中村光：短繊維を離散化した繊維補強コンクリートの流動解析とその利用法，繊維補強セメント系複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.311-318，2012（査読無）

〔学会発表〕(計5件)

- (1)土屋剛毅，佐藤諒一，国枝稔：短繊維とモルタルのフレッシュ時の相互作用に関する解析的検討，平成25年度土木学会中部支部研究発表会，岐阜大学，2014年3月7日
- (2)三井智樹，川口潤，国枝稔：ひび割れのずれに対する抵抗挙動のモデル化，平成25年度土木学会中部支部研究発表会，岐阜大学，2014年3月7日
- (3)M. Kunieda：Challenges to Evaluation of FRC by Means of Numerical Analysis，Japan-Korea Joint Seminar on Fiber Reinforced Concrete，Gifu University，2014/2/6
- (4)神田剛，国枝稔，上田尚史，中村光：フレッシュモルタルと短繊維の相互作用に関する基礎的研究，土木学会第68回年次学術講演会，日本大学，2013年9月4-6日
- (5)松本侑士，国枝稔，上田尚史，中村光：短繊維補強コンクリートの圧縮クリープ特性の評価，日本材料学会東海支部第7回学術講演会講演論文集，名城大学名駅サテライト，2013年3月4日

6．研究組織

(1)研究代表者

国枝 稔 (KUNIEDA, Minoru)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：60303509

(2)研究分担者

上田 尚史 (UEDA, Naoshi)

関西大学・環境都市工学部・助教

研究者番号：20422785