

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04024

研究課題名(和文) 繊維補強コンクリートのひび割れ発生前の繊維の効果の定量化と耐久性設計への反映

研究課題名(英文) Evaluation of effect of short fiber on durability of FRC structures before cracking

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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：繊維補強コンクリート(FRC)のひび割れ発生前の短繊維の役割を明確にし、FRCの新たな優位性を見出すことを目的として、1)中身が分からないコンクリート中の短繊維の空間分布を把握する方法の提案、2)鉄筋周辺のFRCにおける繊維分布の予測方法の提案、3)時間依存性のクリープ挙動に与える影響の評価、4)鋼繊維の内部の鉄筋の防食効果、を明らかにし、FRC構造物の高耐久化に資する知見を蓄積した。

研究成果の概要(英文)：In this study, following new findings related to the roles of short fiber in FRC before cracking were obtained; 1) nondestructive method to clarify the fiber distribution in the specimen was developed. 2) method to estimate fiber distribution and orientation was proposed. 3) creep behavior of FRC in compression was assessed. 4) corrosion protection function provided by steel fibers for rebar inside of FRC was clarified.

研究分野：土木材料学

キーワード：繊維補強コンクリート ひび割れ 耐久性 防食 繊維分布 クリープ

### 1. 研究開始当初の背景

繊維補強コンクリート(以後、FRC 呼ぶ)はひび割れ発生後に架橋し、ひび割れ幅の低減や部材の靱性向上に寄与することが知られている。一般の鉄筋コンクリート構造物では、ひび割れの発生を許容して設計されているものの、実用上ひび割れの発生を前提とした FRC の積極利用にまでいたっておらず、繊維が分担する引張力の効果を陽な形で構造利用するための設計方法などについて議論がなされている。

一方で、ひび割れ発生前における短繊維の効果を定量化できれば、ひび割れ発生前後において FRC に付加価値が付与でき、更なる利用拡大が期待できる。

### 2. 研究の目的

ひび割れ発生前の FRC における短繊維の役割を明確にし、FRC の新たな優位性を見出すとともに、そのモデル化までを目的としている。本研究では以下の点を明らかにする。

- 1) コンクリート中の短繊維の空間分布の現状を把握し、少量のサンプルから全体の分布を予測する手法を提案する。施工後の繊維の分布を確認し、品質保証に役立つ手法を提案する。
- 2) コンクリート表面やかぶりを含む鉄筋周辺の繊維分布の特殊性についても検討し、数値解析手法を開発する。
- 3) コンクリートの体積変化(収縮、クリープ)の低減への短繊維の寄与を明らかにする。
- 4) リサイクル炭素繊維を使用して、FRC の電気的な特性も含めた改質効果を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 統計的手法を用いた繊維分布の評価

コア採取によって得られたコア表面の繊維本数を用いて対象とする範囲の繊維分布を観測位置の間隔を変更しながら一次元的な繊維本数を推定した。本研究では繊維本数の推定に Kriging と呼ばれる地球統計学分野で使用される手法を用いた。Kriging は重み付き平均にバリオグラムによって得られる自己相関距離を用いることで、ある領域内の少ない観測データから全体を推定することが可能な手法である。

繊維分散の推定にあたり繊維混入率の異なる繊維補強モルタル供試体を用いた。繊維混入率は 0.5% および 1.0%、繊維は両端フック付き、長さ 30mm、直径 0.6mm の鋼繊維を用いた。供試体の寸法は長さ 1800mm、幅 200mm、高さ 100mm とし、パイプレーターを用いて充填した。図 - 3.1.1 に示す位置から径 32mm のコアを長さ方向に抜き取った。

Kriging では任意の領域内から観測値を得る必要があるため、任意に何点か選び観測位置とし、それ以外のコアの抜き取りの位置を推定位置とした。観測位置の間隔による観測

値と推定値の差を比較するためそれぞれの列の観測位置の間隔を 100mm および 300mm の 2 ケースとした。それぞれ Case100 および Case300 とし、観測位置を図 - 3.1.1 に示す。

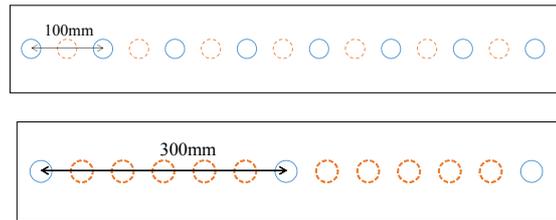


図 - 3.1.1 コア採取位置の例(観測位置:実線丸,推定位置:破線丸)

#### (2) 鉄筋周辺の繊維分布の評価

鉄筋周辺での短繊維の状況を検証するため、鉄筋を配置した 100×100×1800mm の型枠内に、FRCC を流し込み、X 線 CT で供試体を透視した。鉄筋 φ13 を 1 本配置するケースと 2 本配置するケースを分けて、繊維混入率は 0.1% とした。鉄筋を 2 本配置するケースは鉄筋の中心間隔を 40mm (鉄筋あきが約 27mm) とした。打設側から 400mm 長さの状況を対象とし、さらにそれを 200mm ずつに切断した。図 - 3.2.1 にモルタル流動前の状態を示す。

流動状況の予測手法を確立するために、3次元個別要素法を用いて数値解析も行った。

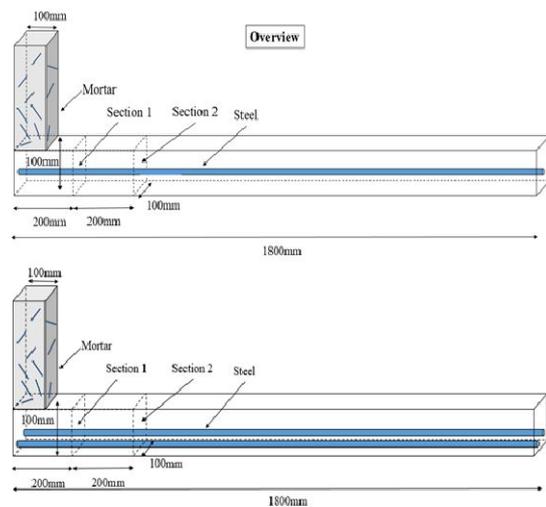


図 - 3.2.1 対象としたモデル(上:鉄筋 1 本,下:鉄筋 2 本)

#### (3) 繊維補強コンクリートの圧縮クリープ性状の評価

FRC の圧縮クリープ性状を評価するために、図 - 3.3.1 に示すような試験により圧縮クリープ試験を実施した。供試体寸法は 100×100×400mm とし、3 本を直列に並べて PC 鋼棒で圧縮力を与えた。

短繊維には鋼繊維を用い、繊維混入率を 0.5、1.0、1.5% の 3 種類とした。また各コンクリー

トの圧縮強度に対して、10、30、50%の持続荷重を載荷した。

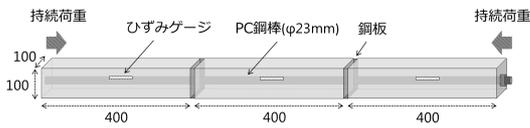


図 - 3.3.1 供試体の概要

(4) 繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果

図 - 3.4.1 に供試体の形状・寸法を示す。供試体の寸法は、100×100×400mmとした。鉄筋の腐食状態を把握するために、鉄筋にはφ13のみがき丸鋼を30mmのかぶりを設け、供試体中に1本配置した。みがき丸鋼には、自然電位を測定するための導線をはんだ付けし、鉄筋両端からの腐食を防ぐためにエポキシ樹脂による保護を行った。短繊維には、亜鉛メッキ無の両端フック付き鋼繊維に加えて、亜鉛メッキを施した鋼繊維ならびにリサイクル炭素繊維を用いた。なお、リサイクル炭素繊維は、CFRPを約600℃で焼成し、所定の長さで裁断したものである。

供試体シリーズは繊維未混入のNCに加えて、亜鉛メッキ無の鋼繊維(以下SFBG)、亜鉛メッキ有の鋼繊維(以下SFGG)、リサイクル炭素繊維(以下ReCF)の3種類とし、それぞれの繊維混入率は0.5%と1.0%の2種類とした。なお、鉄筋の腐食を促進させるためにそれぞれの供試体には塩化ナトリウムを塩化物イオン量換算で10 kg/m<sup>3</sup>混入させた。

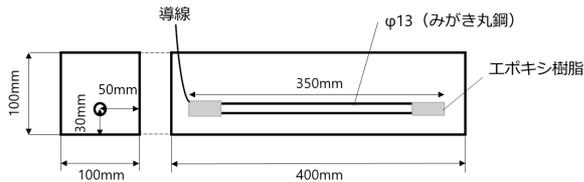


図 - 3.4.1 供試体概要

4. 研究成果

(1) 統計的手法を用いた繊維分布の評価

図 - 4.4.1 に繊維混入率0.5%の推定結果を示す。観測位置の間隔が小さいCase100では比較的観測値に近い推定結果が得られ、対象とした区間の繊維の分散がおおよそ推定できているが、繊維の分散が大きく、不連続的に変化しているため観測値と推定値の差が大きくなる箇所も見られた。一方、Case300ではほとんどの推定位置で観測値と推定値の差が大きくなり、繊維の分布の推定が困難であった。

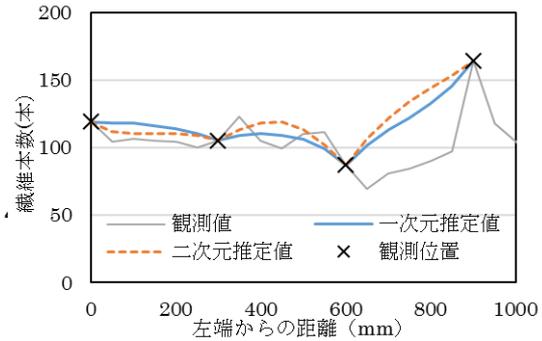
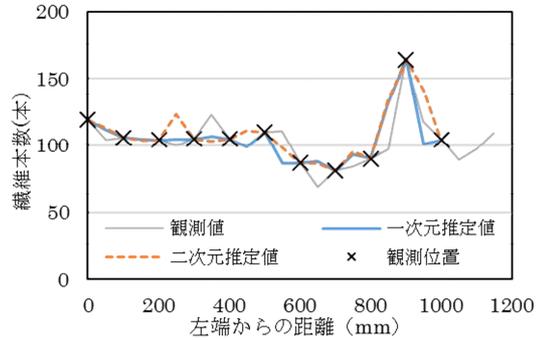


図 - 4.4.1 観測値と推定値の比較(上: Case100, 下: Case300)

(2) 鉄筋周辺の繊維分布の評価

鉄筋を1本配置したケースと2本を配置したケースにおけるX線CTによる透視画像を図 - 4.2.1 および 4.2.2 に示す。両ケースにおいて繊維はモルタルの流動方向に配向することが分かった。

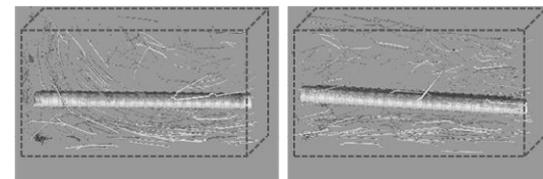
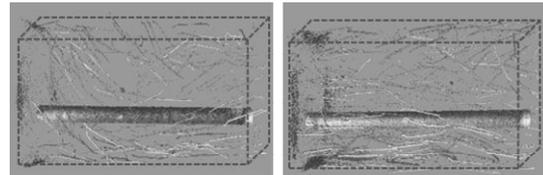


図 - 4.2.1 X線CTによる側面の透視画像(上: 鉄筋1本, 下: 鉄筋2本)

図 - 4.2.3 に数値解析の結果を示す。短繊維が流動方向に向くという定性的な傾向は再現されている。

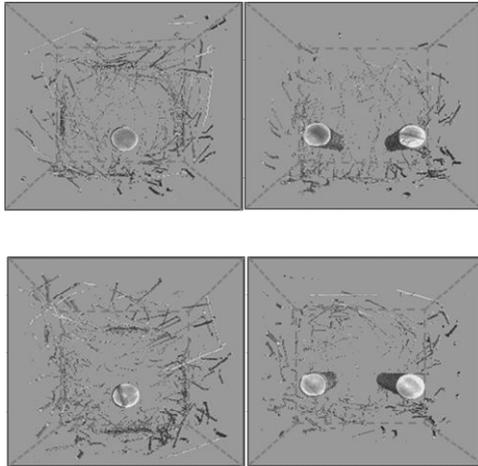


図 - 4.2.2 X 線 CT による断面の透視画像 (上: 投入口から 200mm 断面, 下: 投入口から 400mm 断面)

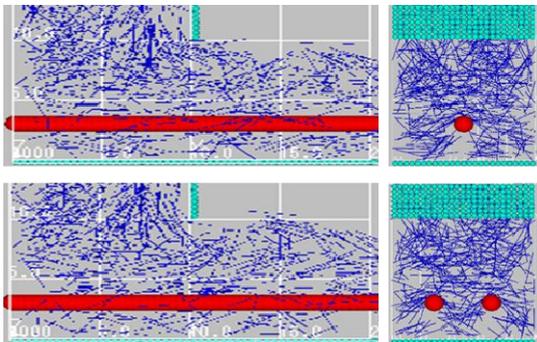


図 - 4.2.3 数値解析の結果

### (3) 繊維補強コンクリートの圧縮クリープ性状の評価

図 - 4.3.1 から 4.3.3 に、各載荷応力比におけるクリープひずみを示す。実験結果から、今回用いた FRC は、同一配合の通常のコンクリートと比較してクリープひずみが大きくなること、繊維の混入率がクリープひずみに与える影響は小さいことが明らかとなった。

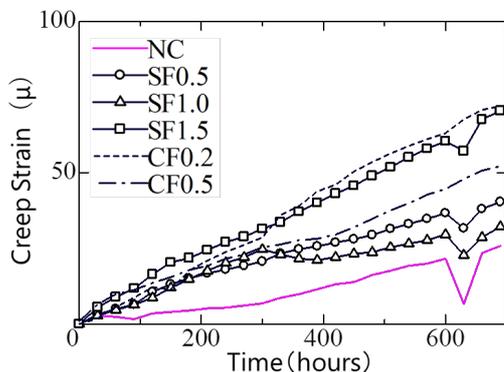


図 - 4.3.1 クリープひずみ (応力比 10%)

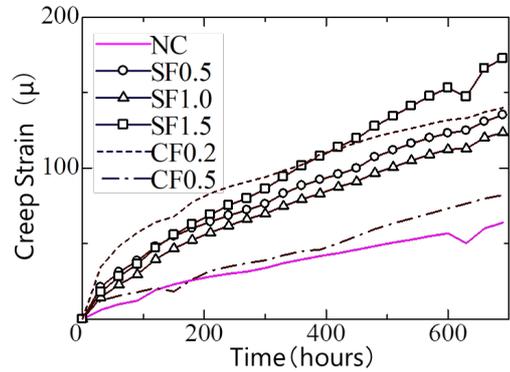


図 - 4.3.2 クリープひずみ (応力比 30%)

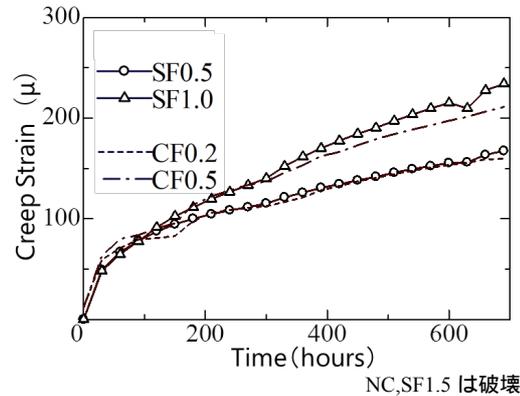


図 - 4.3.3 クリープひずみ (応力比 50%)

### (4) 繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果

表 - 4.4.1 に比抵抗の測定結果ならびに各シリーズの比抵抗の平均値を示す。

表 - 4.4.1 比抵抗の測定結果

シリーズ	平均値 (kΩ・cm)
NC	7.2
SFBG-0.5	5.7
SFBG-1.0	3.5
ReCF-0.5	0.5
ReCF-1.0	0.2

すべてのシリーズにおいて、繊維混入率が増加するほど比抵抗が小さくなり、電気伝導性が向上していることが確認できる。ReCF シリーズにおいて著しく比抵抗が低下している理由として、ReCF シリーズに用いられている炭素繊維は繊維径が小さいため、繊維混入率が同じであっても、繊維本数が多いことから、混入した繊維同士が接触し、連続的な回路を形成している可能性が考えられる。これらの結果より、体積比で 1%程度以下であっても鋼繊維や炭素繊維を混入させることにより電気伝導性が向上することが明らかとなった。

図 - 4.4.1 に測定開始から 6 ヶ月までの自然電位の測定結果を示す。図中には ASTM C 876 による鉄筋腐食の評価基準に値する  $-200 \text{ mV vs CSE}$  および  $-350 \text{ mV vs CSE}$  を点線によって示した。すべてのシリーズにおい

て、材齢の増加とともに電位が増加(貴な方向)している。これは、材齢初期の水和ならびに養生中にコンクリート内部の乾燥が進行し、腐食電流が流れにくくなったこと、鉄筋の表面で不導態被膜が形成され、腐食電流が流れにくくなったためと考えられる。したがって、現段階では腐食に関して不確定な領域と判定される結果となっており、今後も測定を行っていく予定である。

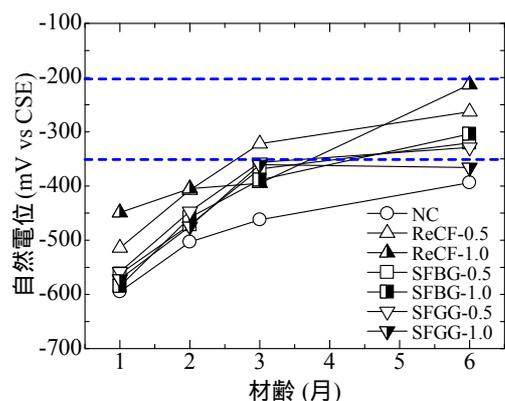


図 - 4.4.1 自然電位の経時変化

すべてのシリーズに対して供試体 1 本ずつから鉄筋を取り出してその状態を観察した。NC, SFBG, SFGG の供試体ではほとんど腐食が確認されなかったが、ReCF シリーズにおいては繊維の混入率が大きくなるほど、腐食が進行していた(図 - 4.4.2 参照)。SFBG シリーズと SFGG シリーズを比べると、SFGG シリーズの方が鉄筋の腐食が抑制されている。これは、鋼繊維に施された亜鉛メッキによって犠牲陽極作用が向上し、腐食が抑制されていると考えられる。

また、前節までの自然電位測定結果より、ReCF シリーズの自然電位は、他のシリーズの自然電位と同様な挙動を示していた。しかし、実際には鉄筋の腐食が他のシリーズの供試体より進行していることから、ReCF シリーズは自然電位の測定結果と腐食状況との関係に対して、普通コンクリートの評価基準が適用できないことを示している。



図 - 4.4.2 ReCF-1.0 の鉄筋の腐食状況

## 5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 2 件)

國枝稔, 北川大希: 短繊維補強コンクリート中の鉄筋の腐食性状, 日本材料学会コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.15, 2018 (投稿中)(査読有)

井戸翼, 國枝稔, 大竹雄: 統計的手法を用いた繊維補強コンクリートの繊維分布の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, 2016 (査読有)

〔学会発表〕(計 8 件)

N.H.Long, 國枝稔: 繊維補強コンクリートにおける鉄筋周辺の繊維分布の評価, 日本材料学会東海支部第 12 回学術講演会, 岐阜大学サテライトキャンパス, 2018 年 3 月

北川大希, 國枝稔: 繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果, 日本材料学会東海支部第 12 回学術講演会, 岐阜大学サテライトキャンパス, 2018 年 3 月

N.H.Long, 國枝稔: 3 次元個別要素法による繊維補強モルタル部材中の流動解析, 日本材料学会東海支部第 11 回学術講演会, 名古屋大学, 2017 年 3 月

T.Ido, M.Kunieda, Y.Otake: Stochastic approach to evaluation of fiber distribution in FRC, 9<sup>th</sup> Rilem International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, Vancouver, 2016 年 9 月

加藤貴裕, 國枝稔: 炭素繊維または鋼繊維の鉄筋防食効果の評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 九州大学, 2016 年 9 月

井戸翼, 國枝稔: コア採取による繊維補強コンクリートの繊維分布の評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 九州大学, 2016 年 9 月

加藤貴裕, 國枝稔: リサイクル炭素繊維を用いたモルタルの基礎物性, 日本材料学会東海支部第 10 回学術講演会, 岐阜大学サテライトキャンパス, 2016 年 3 月

井戸翼, 國枝稔: 確率・統計的手法を用いた繊維補強コンクリートの繊維分布の推定, 平成 27 年度土木学会中部支部研究発表会, 豊田高専, 2016 年 3 月

## 6. 研究組織

### (1) 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