

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：57601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15143

研究課題名（和文）混入繊維により形成される導電経路を利用したFRCCの欠陥評価に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Study on the Defect Evaluation of FRCC Using Conductive Paths Connected by Mixed Fibers

研究代表者

浅野 浩平（ASANO, KOHEI）

都城工業高等専門学校・建築学科・准教授

研究者番号：90735119

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、鋼繊維補強セメント系複合材料(SFRCC)の内部で、接触し合う繊維が形成する導電経路を利用し、ひび割れによって導電経路が分断されて生じる電気抵抗値により、材料そのものをひび割れセンサとして利用することを検討したものである。数値計算によるシミュレーションおよび実験結果から、導電経路が形成され、且つ1～2mmのひび割れに対して顕著な電気抵抗値の上昇がみられる繊維混入率が特定できた。しかしながら、実験結果の再現性が低く、更なる検討が必要であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

長寿命な建築物を実現するには、高性能な材料はもちろんの事、定期的なメンテナンスが必要不可欠である。将来的に鋼繊維補強セメント系複合材料(SFRCC)といった繊維補強系材料が建築構造物に適用される事例は増加していく事が考えられるため、これらの材料に対応した非破壊性能評価手法の確立の準備が必要である。本研究で得られた、SFRCCを導電経路として利用するための体積繊維混入率や、ひび割れに対する電気抵抗率としての応答性は、非破壊性能評価の基礎的情報として資するものである。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the use of steel fiber reinforced cementitious composites (SFRCC) as crack sensors by utilizing the conductive paths formed by contacting fibers inside the composite. From numerical simulation and experimental results are able to identify the fiber content at which a conductive path is formed and a significant increase in electrical resistance is observed for crack width of 1 to 2 mm. However, the reproducibility of the experimental results was low, indicating that further investigation is needed.

研究分野：建築構造材料

キーワード：繊維補強 ひび割れ幅 電気抵抗率 導電経路 パーコレーション転移 繊維配向性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

環境負荷軽減やライフサイクルコスト削減の観点からコンクリート構造物の長寿命化に関する研究が近年行われている。長寿命な構造物を実現するためには、生じた損傷に対して放置することなく迅速な補修が必要不可欠である。セメント系材料に導電体としての性質を付与させることが可能であれば、材料そのものがセンサとして機能し、構造物に別途センサ等を取り付けなくとも、ひび割れ等損傷を電気抵抗として検知することが可能になるのではないかと考えた。そこで、研究代表者が以前より研究対象としている繊維補強セメント系複合材料の中でも、導電性が期待できる鋼繊維補強セメント材料（以下、SFRCC：Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites）を本研究の主な対象とした。

2. 研究の目的

例えば、電気の通らない材料に導電物質を混ぜ続け、ある濃度に達した途端に通電するといった、材料の性質が急変するような現象はパーコレーション転移として知られている。したがって、モルタル中に鋼繊維を混入させる SFRCC においても、同様にパーコレーション転移が生じ、接触し合う鋼繊維によって導電経路が形成される可能性がある。本研究では、SFRCC を用いた試験体内部でパーコレーション転移が生じる、即ち、多数の導電経路が形成される様な体積繊維混入率を導電試験によって明らかにする。さらに、導電時における SFRCC の一軸引張試験を行い、ひび割れ幅-抵抗率関係を明らかにすることを目的とする。また、試験体を模した三次元空間内の導電経路の形成、およびひび割れ幅に応じた導電経路の断線の程度について、数値計算によるシミュレーションを行い、実験結果との比較検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 導電経路のシミュレーション

SFRCC が電氣的なパーコレーション転移を生じる体積繊維混入率を数値計算によるシミュレーション解析によって、明らかにする。後述する導電試験に用いる試験体と同寸法である $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ の角柱形の空間内に、太径繊維（径 0.16mm 、長さ 13mm ）の 1 種のみ、または、太径繊維と細径繊維（径 0.05mm 、長さ 2.5mm ）の 2 種について、任意の体積繊維混入率に相当する繊維本数をランダムに分散させる。これによって、接触し合う繊維によって、角柱形の空間の軸方向（長辺方向）に導電経路（クラスター）が形成される体積繊維混入率の見込みを立てる。また、ひび割れが導電経路に与える影響についても検討を行う。

(2) 導電試験

セメント系材料の電気抵抗値を測定する一般的な方法は、大きく分けて 2 端子法と 4 端子法が知られている。本研究では、土木学会規準「四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法」（引用文献①）に準拠しながら実験を行う。しかしながら、4 端子法は試験体の任意に電位差電極を設けるため、測定の主対象である鋼繊維が形成する導電経路の電気抵抗値を測定するには適していない。したがって、本研究では LCR メータを用いた電位差電極と電流電極を共有する 2 端子法を採用した。SFRCC の導電試験対象となる試験体は $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ の角柱形とし、導電試験は図 1 に示すような固定装置に試験体を入れて行う。電極が接する両端面については、導電経路となる繊維の断面が露出するように、予め研磨を行っている。測定の際には、ゲル状電解質を含浸させたガーゼを試験体両端に貼付し、電極となる銅板を、絶縁体であるアクリル板を介して固定装置の両端に設けたネジによって圧着させ、接触抵抗の影響が極力小さくなるように配慮した。また、試験体に直流電流を供給した場合、電流電極や電位差電極の表面において過大な分極が生じることで測定結果に誤差を生じさせる可能性があり、測定結果に誤差を生じさせる可能性があることから、本研究においても交流電流とし、安全面を考慮して交流電流は 5V 印加するものとした。また、試験体の含水率が抵抗値に大きな影響を与えることが既往の研究（引用文献②）でも明らかになっているため、 105°C に保った乾燥炉で 24 時間乾燥させ、絶乾状態とした。

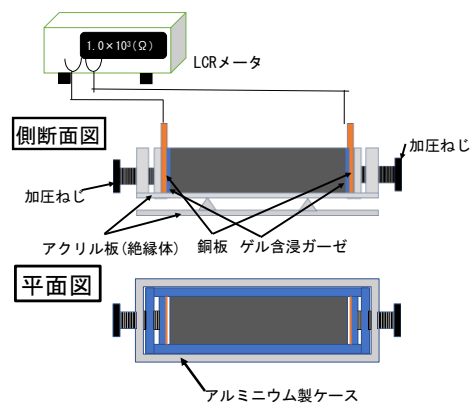


図 1 導電試験装置

(3) 導電下における一軸引張試験

SFRCC の一軸引張試験によって、ひび割れに伴う抵抗率の変化を測定する。引張試験体は図 2 に示す形状とし、試験体の中央部周囲にはひび割れを誘発させるために、深さ 3mm の切り欠きを設けている。加力には図 3 に示す治具に試験体を取り付け、導電試験と同様に電極を

圧着し、LCRメータと接続する。試験体と治具が接触しないように、亚克力板およびゴム板で絶縁し、ひび割れ幅を測定するパイ型変位計設置用の取り付けコマも塩化ビニル樹脂で作製した。引張試験の支持条件はピンー固定とし、载荷速度は 0.5mm/min とした。測定項目は試験体中央部の両面に取り付けたパイ型変位計により測定される、ひび割れ幅および LCRメータによって測定される抵抗値である。また、前述した導電試験と同様、試験体の端面処理と乾燥処理を施している。

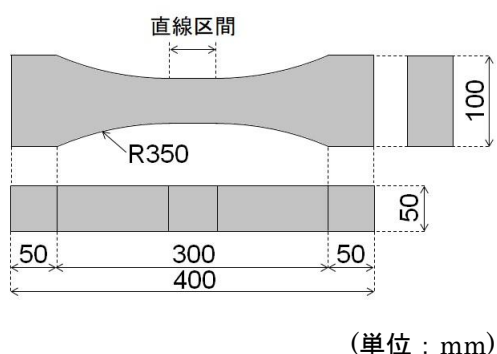


図 2 引張試験体形状

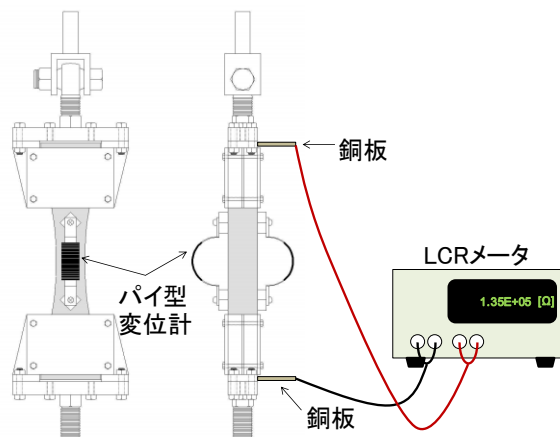


図 3 引張試験加力装置

4. 研究成果

(1) 導電経路のシミュレーションによるパーコレーション転移が生じる体積繊維混入率および、ひび割れ幅に伴う抵抗率の挙動の推定

図 4 は $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱形試験体を想定した空間内に太径繊維（径 0.16mm 、長さ 13mm ）を分散させたシミュレーション結果の一例であり、接触し合う繊維で形成されるクラスターの内、最大のもを抽出して画像に示している。クラスターの大きさは体積繊維混入率が 1.30% を境に急激に大きくなり、体積繊維混入率が 1.75% の場合には、空間全体にクラスターが波及し、導電経路の形成が見取れ、パーコレーション転移が生じていると判別できる。それに対し、 1.30% の場合は導電経路の形成が不十分となっている。この結果から、太径繊維 1 種のみ SFRCC の場合、パーコレーション転移が生じる閾値である体積繊維混入率をより詳しく解析したところ、 1.70% で十分に導電経路が形成されることがわかった。ここで、ひび割れに伴い繊維が引き抜かれる事で、ひび割れ面における見かけの繊維混入率が閾値を下回った場合、導電経路が分断される事が考えられるため、形成された導電経路がひび割れによって失われる挙動を把握するために、空間内の中央に疑似的にひび割れを発生させた。図 5 にひび割れシミュレーションの結果を示す。図中の青いクラスターは、赤いクラスターと分断されていることを示している。まず太径繊維

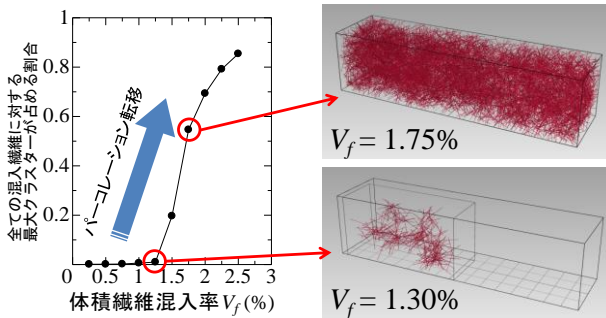


図 4 パーコレーション転移の一例

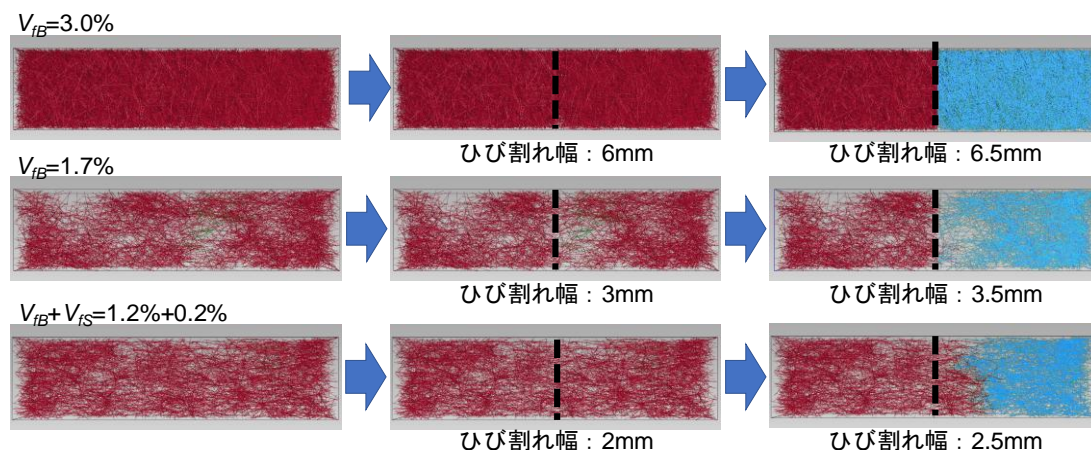


図 5 ひび割れシミュレーションの結果

維1種の場合、閾値よりも十分に大きい $V_{FB}=3.0\%$ であれば、繊維の長さ13mmの半分である6.5mmまでひび割れが拡大し導電経路であるクラスターが分断されることがわかった。 $V_{FB}=1.70\%$ の場合、導電経路が形成される閾値ということもあり、ひび割れ幅がより小さい3.5mmでクラスターが分断された。また、閾値よりも小さい $V_{FB}=1.20\%$ に細径繊維を $V_{FS}=0.2\%$ 添加させたところ、導電経路を形成することがわかった。この場合、ひび割れ幅が2.5mmでクラスターが分断された。以上より各パラメータにおける、ひび割れ幅-引抜繊維本数関係を図6に示す。なお、縦軸は引抜繊維本数を、ひび割れ位置における健全時の繊維本数で除すことで基準化している。抵抗値がひび割れを架橋する繊維本数に依存すると仮定すれば、抵抗値-ひび割れ幅関係も概ね同様の傾向であると考えられるため、太径繊維と細径繊維を組み合わせたハイブリッドSFRCCが、ひび割れセンサとして適している結果となった。

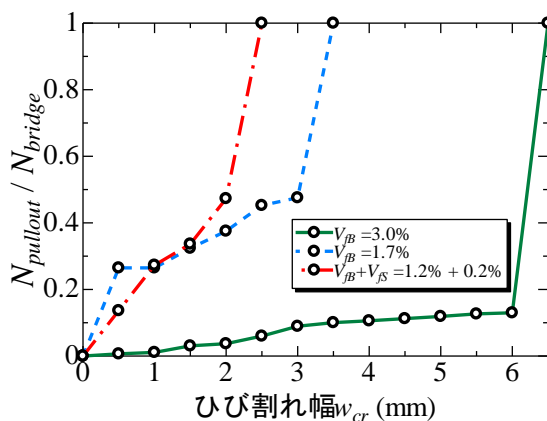


図6 ひび割れ幅-引抜繊維本数関係

(2) 導電試験の結果

前述したシミュレーションの結果を踏まえて、導電試験により得られた太径繊維1種のみを混入したSFRCCの抵抗率-体積繊維混入率関係を図7に示す。体積繊維混入率が大きくなるほど、抵抗率が小さくなる傾向が見られるが、体積繊維混入率が2.25~2.75%において、ばらつきが特に大きい結果となっている。0~2%については、導電経路の形成に依らずに、単純に体積中に占める鋼繊維の割合が増えるにつれて、抵抗率が小さくなったと考えられ、抵抗率の値自体も導電体と呼べるレベルではない。2.25~2.75%では導電経路の形成がされるか否かの境目であり、抵抗率が安定しなかったものと考えられる。3%以降は抵抗率が小さく、かつ安定して測定できていることから、太径繊維1種の場合では導電経路が形成される閾値である体積繊維混入率は2.25~2.75%の範囲に存在するとわかった。図8は、太径繊維の体積繊維混入率を1.2%に固定し、細径繊維を加えた場合の抵抗率-体積繊維混入率関係である。細径繊維を0.3%以上加えると、急激に抵抗率が小さくなっていることが見て取れる。0.5%以降は抵抗率が小さく、かつ安定して測定できていることから、本研究では太径繊維1.2%に加えて細径繊維を0.5%以上混入した場合に確実に導電経路が形成されると判断した。どちらの場合も、シミュレーションにおける閾値を上回る結果となったが、これについてはシミュレーションと実際の繊維の分散状態の差異が起因していると考えられる。

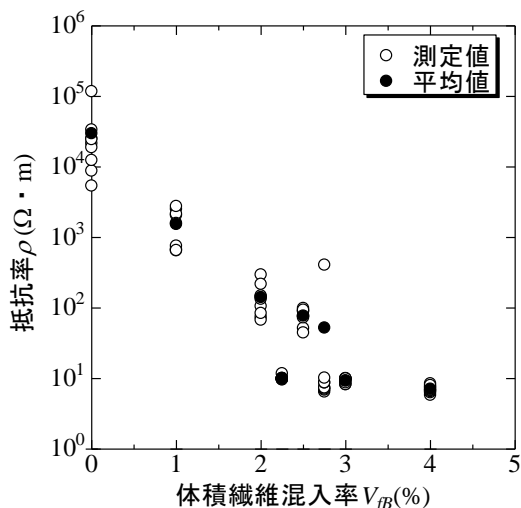


図7 体積繊維混入率-抵抗率関係 (太径繊維のみ)

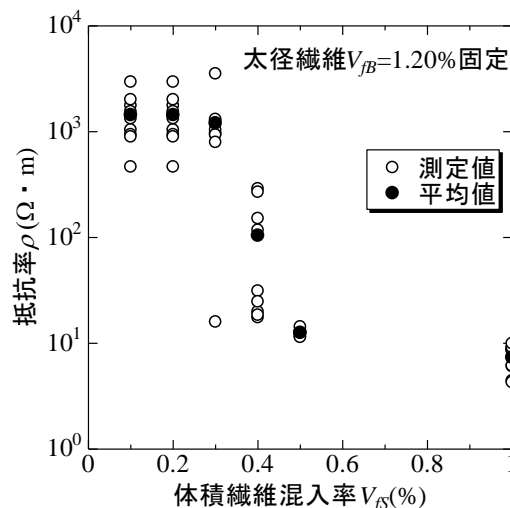


図8 体積繊維混入率-抵抗率関係 (太径繊維+細径繊維)

(3) 導電下における一軸引張試験の結果

シミュレーション結果および導電試験の結果を踏まえて、体積繊維混入率を、太径繊維3.0%、太径繊維1.7%、太径繊維1.2%+細径繊維0.2%、太径繊維1.2%+細径繊維0.5%の4つのパラメータについて、導電下における一軸引張試験を行った。ひび割れ幅-抵抗率関係を図9に示す。全てのパラメータにおいて、図6のひび割れ幅-引抜繊維本数関係との傾向が概ね一致し

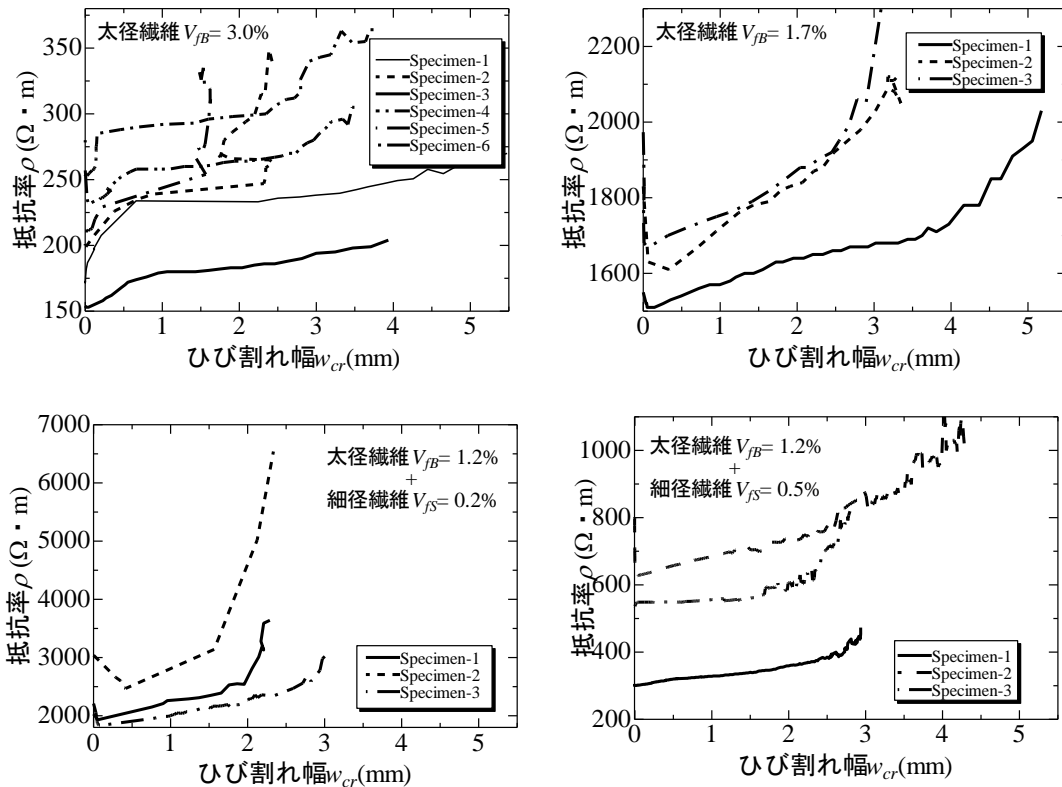


図9 ひび割れ幅－抵抗率関係

ている。太径繊維 3.0%の場合、十分な繊維量であるため、健全時抵抗率が小さいが、ひび割れ幅の拡大に伴う抵抗率の上昇は小さく、あまり変化が見られなかった。太径繊維 1.7%の場合についても、3.0%と比べて抵抗率の上昇は大きいものの、健全時抵抗率が大きく、ひび割れ幅が3～5mm程度に拡大しなければ抵抗率としての変化を掴むことは難しい。太径繊維 1.2%+細径繊維 0.5%の場合についても、ほぼ同様の結果となっている。太径繊維 1.2%+細径繊維 0.2%の場合、健全時抵抗率はかなり大きいですが、試験体によってはひび割れに伴い急激な抵抗率の上昇が見られ、ひび割れセンサと見做せるような結果が得られた。しかしながら、現状では実験の再現性が低いことが課題である。ひび割れに対して敏感に抵抗率が上昇するためには、より少ない繊維量で導電経路を形成することが肝であるが、それに反して繊維の物理的な自由度が大きくなるのが原因と考えられ、ビニロン等の化学繊維との併用を検討し、今後の課題としたい。

<引用文献>

- ① 土木学会規準「四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法 (JSCE-G 581-2018)」の制定 土木学会論文集 E2, Vol. 74 No.4, P460(2018)
- ② 高井伸一郎, 熊野知司, 陰山恵子, 井上正一「導電性の高い炭素粒子を添加したモルタルの各種物性に関する研究」コンクリート工学年次論文集 Vol.34, No.1, p1396-p1401, 2012

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤雅臣, 浅野浩平
2. 発表標題 混入繊維により形成される導電経路を利用した FRCC の欠陥評価に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会研究報告 九州支部 第61号
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------