

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18756

研究課題名（和文）配筋作業の省力化を可能にするSFRC杭と耐力保証のためのX線自動検査システム

研究課題名（英文）SFRC Piles Enabling Labor-Saving Reinforcement Work and X-ray Automated Inspection System for Ensuring Load-Bearing Capacity

研究代表者

秋山 充良（Akiyama, Mitsuyoshi）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00302191

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実用的な条件下での遠心成形中空円形鋼繊維補強コンクリート（HSFRC）杭のせん断強度を調査し、せん断強度の算定式までを提案した。せん断強度と寸法効果を、せん断補強鉄筋の有無にかかわらず、HSFRC杭と従来の中空鉄筋コンクリート（HRC）杭について評価した。X線可視化により、成形後に鋼繊維が均等に分布し、円周方向に再配向され、せん断強度が向上することを明らかにした。0.5%の鋼繊維量でも、HSFRC杭はせん断補強HRC杭と同等のせん断強度を持つことを明らかにした。繊維の配向を考慮したせん断強度式は、既存式よりもHSFRC杭のせん断強度をより正確に予測することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究は、遠心成形鋼繊維補強コンクリート（HSFRC）杭のせん断性能を向上させることを目的としている。HSFRC杭は、従来の中空鉄筋コンクリート杭（HRC）に比べ、少ない鋼繊維の使用量で優れたせん断強度と脆性破壊の緩和をもたらすことができる。本技術により、せん断補強鉄筋の配筋作業の大幅な削減が可能となり、昨今の建設分野における人手不足を補う効果が期待される。またX線技術とデジタル画像処理によりHSFRC杭内の鋼繊維を可視化することにも成功しており、鋼繊維の分布と配向を出荷前にX線により事前確認することにより、せん断強度に係るHSFRC杭の品質保証が自動化できる可能性も示している。

研究成果の概要（英文）：This study examines shear performance and proposes an equation for assessing shear strength of centrifugal forming hollow circular steel fiber reinforced concrete (HSFRC) piles in practical conditions. Optimized concrete mixes with different steel fibers enhanced the centrifugal forming process. Shear performance and size effects of HSFRC and conventional hollow reinforced concrete (HRC) piles, with/without stirrups, were evaluated. X-ray visualization revealed that after forming, steel fibers were evenly distributed and reoriented, improving shear performance. Even at 0.5% steel fiber content, HSFRC piles matched the shear performance of HRC piles with a 0.27% shear reinforcement ratio, with less brittleness. Higher steel fiber content could replace stirrups to avoid flexural failure. SFRC reduced the size effect on HSFRC piles. An equation considering fiber orientation more accurately predicts the shear strength of HSFRC piles than existing ones.

研究分野：構造工学

キーワード：SFRC 遠心成形 せん断強度 寸法効果 X線撮影 デジタル画像処理 省力化

1. 研究開始当初の背景

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) には、鋼繊維の架橋効果によりコンクリートが引張力を負担し、引張鉄筋量の削減など、曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の配筋作業の省力化をもたらすことが期待されてきた。しかしながら、鋼繊維分布が一様ではない、あるいは、鋼繊維の向きがコントロールできないなどの理由により、SFRC 部材の曲げ耐力は大きなばらつきを有する。極めて良好な曲げ挙動を呈するものもあれば、鋼繊維が全く機能せず、極めて脆性的な破壊が生じることがある。結果として、国内外の規準において、安全側の配慮として、鋼繊維の効果は期待せず、かぶりコンクリートの剥落防止など、万が一に備えたフェールセーフとして混入しているのが実情である。

研究代表者は、この背景のもと、自己充填コンクリートを流し込む際の打設方法を工夫するなどして、一様な鋼繊維分布を確保し、かつ、部材軸に平行な鋼繊維配向を持つ SFRC 部材の製造方法を模索してきた。打設方法の工夫→部材の X 線撮影→曲げ載荷実験、を繰り返しながら、鋼繊維分布と配向をコントロールし、安定した曲げ性能を確保する方策を実験的に検証してきた。しかし、曲げ性能のばらつきを小さくすることは可能であったが、自重のみでコンクリート中の鋼繊維の配向を変えることは極めて困難であり、鋼繊維の混入で SFRC 部材の製造にかかる労力を省力化することは全くできていない。

2. 研究の目的

少子高齢化の進展に伴い、建設産業における人手不足が深刻化している。この解決策の一つとして、コンクリート部材を事前に工場で製作するプレキャスト工法の積極的採用があげられており、その中でも本研究は、プレキャスト杭部材の製作工程の省力化とその品質管理体制の自動化に貢献することを目的とする。具体的には、遠心成形工法の活用により、せん断補強鉄筋の配筋作業を不要にした鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 杭を製造し、かつ、X 線とデジタル画像処理により、その部材耐荷力の品質を自動で管理する一連のシステムの構築を目指すものである。

引張に対する抵抗力の小さいコンクリートの弱点を補うため、鋼繊維がコンクリートに混入されてきた。一方で、鋼繊維の分布や配向の偏りをコントロールすることは困難なため、前記したように、構造性能の評価においては鋼繊維の効果を見込むことは少なく、フェールセーフの役割にとどまっているのが一般である。本研究では、型枠に遠心力を与え、型枠内面から周面摩擦を介してコンクリートに与えられる周方向の流れにより、鋼繊維を杭軸直角方向に強制的に配向させ、せん断力に確実に抵抗させることにより、せん断補強鉄筋の配筋を不要にし、省力化を実現する。

一方、提案工法の中で種々の工夫を施しても、鋼繊維の分布と配向には一定のばらつきが残ることになるため、鋼繊維量が極端に少ない、あるいは、多くの鋼繊維の向きが杭軸方向に沿ったものとなる領域が生まれる可能性は排除できない。そこで、目視により行われている配筋検査に代わるものとして、X 線技術とデジタル画像処理を組み合わせ、SFRC 杭内の鋼繊維の 3 次元可視化、およびそれを踏まえた杭耐荷力の推定までを自動化することで、安定して曲げ破壊を呈する SFRC 杭の出荷を可能にするシステムを構築する。

3. 研究の方法

パイル工場の実機を用いた場合に効果的にせん断力を負担する鋼繊維分布・配向を有する SFRC 杭を製造するため、配合や遠心成形の回転パターン、および鋼繊維形状などを変えた杭体を作製し、X 線撮影により可視化した鋼繊維情報を基に最適な製造法の同定を試みる。

(1-1) 良好な鋼繊維分布と配向を得るためのコンクリート配合および製造方法の検討のための基礎実験：実験供試体

コンクリート配合を表-1 に示す。既往研究の知見に基づき、高性能 AE 減水剤 (SP) の量が異なる N1 と N2 を定め、鋼繊維量 0.5vol% の使用を前提に、SP を増減させている。鋼繊維には、その直径、長さ、およ

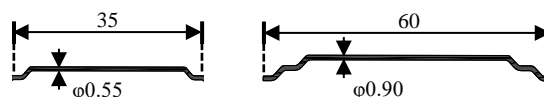
表-1 コンクリートの配合

配合	鋼繊維量 (vol%)	単位量 (kg/m ³)					
		水	セメント	細骨材	粗骨材	SP	AE 剤
N1	0	175	438	1000	662	6.56	0.88
N2	0	175	438	1000	662	8.75	0.88
N3	0.50	175	438	1000	674	7.00	0.88

SP：高性能 AE 減水剤

表-2 使用した鋼繊維の形状

鋼繊維	鋼繊維のフック	長さ (mm)	直径 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
3D 鋼繊維	シングル	35	0.55	1.15 × 10 ³	2.1 × 10 ⁵
5D 鋼繊維	ダブル	60	0.9	2.30 × 10 ³	2.0 × 10 ⁵



(a) 3D 鋼繊維 (b) 5D 鋼繊維

図-1 鋼繊維の形状と寸法 (単位: mm)

び端部のフックが異なる 3D 鋼繊維と 5D 鋼繊維を候補とした (表-2・図-1)。供試体諸元を図-2 に示す。SFRC 杭の製造法の検討を行う際に用いた杭体の直径は 200 mm, 目標肉厚は 40 mm, そして杭長は 300 mm である。

鋼製の型枠に目標肉厚が得られる重量のフレッシュコンクリートを投入した後, 図-3 に示す遠心成形装置を使用した。遠心成形の回転パターンは, 遠心力を 0.5 G, 3 G, 9 G, そして 25 G (G は重力加速度) と徐々に増加させるのを基本パターンとした。低速回転は, コンクリートを杭体内に均し, 鋼繊維の均一な分布および配向の改善に寄与する。一方, 高速回転は, 遠心成形終了後も中空円形断面が保持されるまでコンクリートを締固める役割を果たす。遠心成形時に杭体内部に残留するスラッジは, 型枠中央部から排出した。

遠心成形後は, 通常のコンクリートパイプと同様の蒸気養生を行っている。蒸気養生後に脱型し, その後は X 線撮影を行うまで気中養生とした。

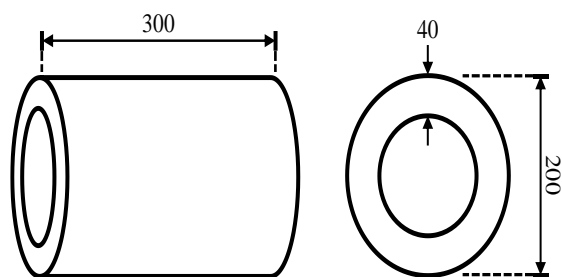


図-2 供試体諸元 (単位: mm)



図-3 遠心成形装置

(1-2) 鋼繊維を可視化する X 線撮影

供試体断面を四分分割するようにコンクリートカッターを用いて切断した後, X 線撮影を行い, コンクリート内の鋼繊維を可視化した。図-4 に使用した X 線装置を示す。四分分割後の各試料に対して, 円弧の中心位置に X 線を照射している。1 回の X 線撮影では, 供試体の高さを 80 mm とし, 部分的に同じ個所を撮影しながら, 5 回に分けて各試料の全体画像を得ている。なお, 得られた X 線画像は, 画像処理ソフトウェアを用いることで, 鋼繊維とコンクリート部の差別化を行っている (図-5)。

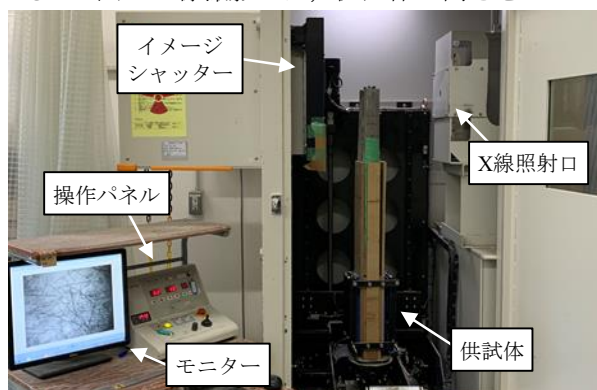
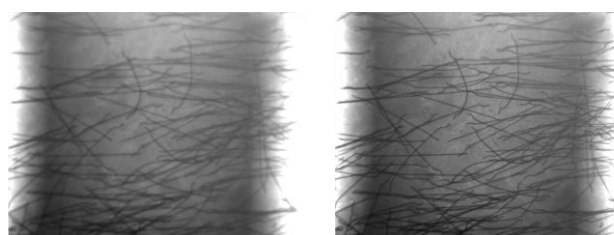


図-4 X 線装置

(2-1) 遠心成形 SFRC 杭のせん断実験: 実験供試体

本実験に用いた供試体一覧を表-3 に示す。主な実験パラメータは, 鋼繊維の有無 (0% と 0.50 vol%), 杭径 (200 mm と 350 mm), および鋼繊維を含まない供試体のせん断補強鉄筋の量 (間隔) である。遠心成形を用いていても, 鋼繊維の配向にはある一定のばらつきが生じることから, その影響を確認するため, 条件が全く同じ供試体を直径 200 mm (F50-200) と 350 mm (F50-350) の場合でそれぞれ 2 体を作製している。本研究では, 鋼繊維量を 0.50 vol% に抑えることにより, 確実にせん断破壊を生じさせ, この鋼繊維量がせん断補強鉄筋としてどの程度の量に相当するのかを確認する。直径 350 mm の場合の SFRC 杭供試体の構造諸元を図-6 に示す。直径 350 mm の杭体の軸方向鉄筋は D22 であり, 8 本を断面内に均等に配置した。せん断補強鉄筋には D6 鉄筋を使用し, せん断スパン内に 2 本または 5 本を配筋した。直径 200 mm と 350 mm の目標肉厚はそれぞれ 50 mm と 70 mm であり, せん断スパン比はともに 2.5 である。



(a) 強調処理前 (b) 強調処理後

図-5 X 線画像の例

コンクリートの圧縮強度試験に用いるテストピースは, JIS A 1136 に従い, 直径 200 mm, 目標肉厚 40 mm, 長さ 300 mm の円筒供試体を使用している。これは, 遠心成形により製造する供試体は, その過程でスラッジがコンクリート内から排出されてくるため, 一般に用いられる直径 100 mm, 高さ 200 mm のテストピースでは正しく杭体の圧縮強度を測定できないためである。テストピースは, せん断実験に使用する供試体と同じ回転速度・時間を与えた遠心成形により打設し, 蒸気養生を行っている。

表-3 供試体概要と載荷試験結果

供試体	鋼繊維量 (vol%)	せん断補強鉄筋		肉厚 (mm)	コンクリート	最大荷重 (kN)	せん断強度 (N/mm ²)	破壊形態	
		本数 (本)	間隔 (mm)		圧縮強度 (N/mm ²)				
S2-350	0	2	220	70.6	65	492	7.98	斜め引張破壊	
S5-350		5	110	72.8		550	8.93		
S0-350		0	0	0	68.4	70	349		5.67
F50-350-1	0.50				68.4	71	496		8.05
F50-350-2					67.7		500		8.13
S0-200	0	0	0	49.5	76	152	6.45		
F50-200-1	0.50			48.3	74	192	8.13		
F50-200-2				48.3		187	7.93		

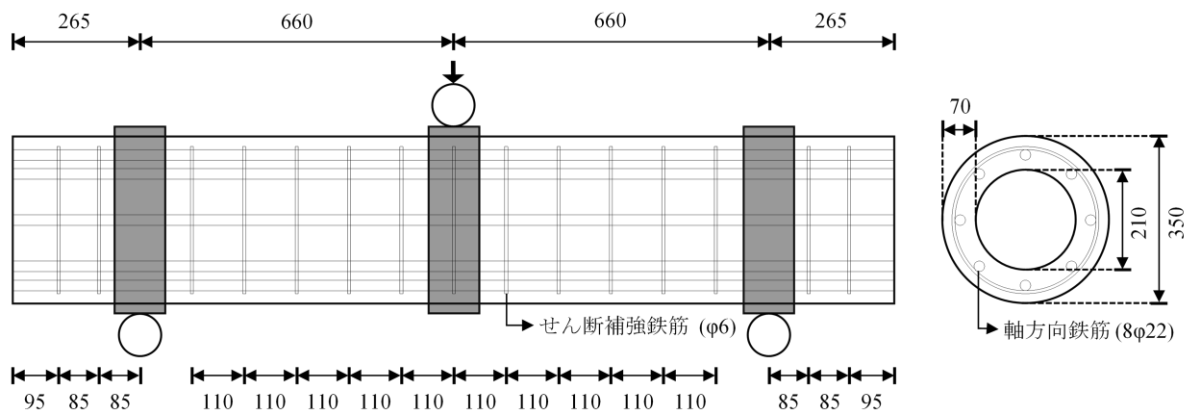


図-6 供試体諸元の例 (S5-350 の場合) (単位 : mm)

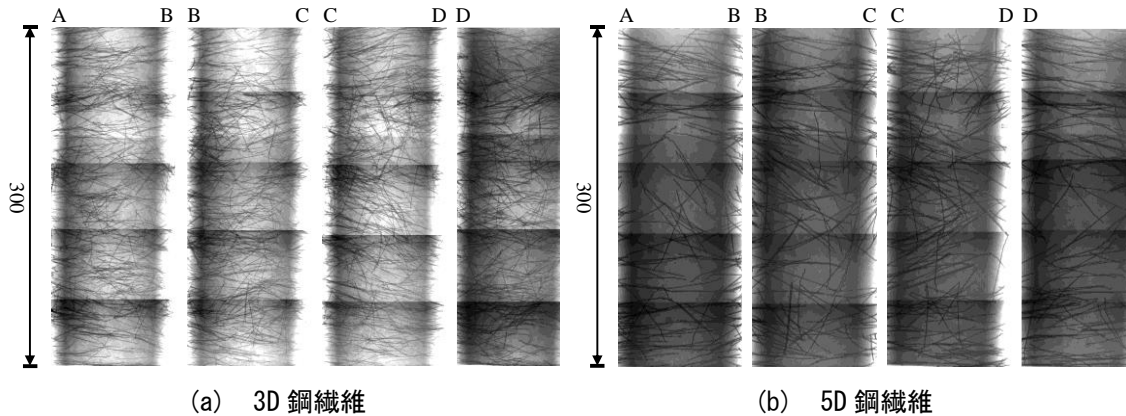


図-7 X線画像

(2-2) せん断実験 (載荷実験)

図-6 に示す 3 点載荷によりせん断力を与え、載荷荷重と中央変位を測定した。軸方向鉄筋に沿ったひび割れ、および断面変形を防ぐため、せん断実験時にはすべての供試体において、載荷点および支点に鋼製のバンドを取り付けている。バンドの内径は供試体外径よりも 4 mm 程度大きいので、バンドと供試体の間に生じる隙間は石膏により埋めている。

4. 研究成果

(1) 3D 鋼繊維と 5D 鋼繊維を用いた杭体から得られた X 線画像の一例を図-7 に示す。両供試体において、鋼繊維形状以外の条件は同じである。図-7 より、3D 鋼繊維を用いた場合には、コンクリート中に鋼繊維が概ね偏りなく存在し、優れた分布が得られた。一方、5D 鋼繊維では鋼繊維が偏り、その結果として鋼繊維が存在しない領域が確認された。これは、鋼繊維量が同じ場合、5D 鋼繊維の方が鋼繊維 1 本あたりの重量が大きく、3D 鋼繊維と比較してコンクリート中に含ま

れる鋼繊維本数が少ないことが影響したと考えられる。鋼繊維の配向は、遠心成形により、両者ともに杭軸直角方向に多くの鋼繊維が配向することが確認された。

後述するせん断実験供試体は、鋼繊維量を 0.50 vol% に固定していることから、本実験では、3D 鋼繊維を使用することにした。なお、別途行った実験において、鋼繊維量を 1.0 vol% まで増やした場合には、5D 鋼繊維を用いた場合であっても、3D 鋼繊維と同等の鋼繊維分布と配向が安定して得られることを確認している。5D 鋼繊維はダブルフックを有することから、後述するせん断ひび割れに対する架橋効果は 3D 鋼繊維よりも優れていると予想される。今後、鋼繊維量を大きくし、かつ、5D 鋼繊維を用いた場合の実験も行い、鋼繊維形状の違いがせん断強度に及ぼす影響について、検討する必要がある。

このように X 線撮影とデジタル画像処理を施すことにより、鋼繊維の可視化は可能である。本研究により構築された手法に基づき製造された杭体を X 線撮影し、鋼繊維の分布と配向を確認しておくことで、極端にせん断強度の低い杭を出荷前に同定することができる。なお、品質管理の手法、特に、どのような鋼繊維の分布と配向のときに出荷を止めるべきであるのかなどの閾値の設定は今後の課題である。

(2) せん断実験により得られた荷重－変位関係を図-8 に示す。鋼繊維とせん断補強鉄筋を共に有しない S0-350 供試体の最大荷重は 349 kN であった。曲げひび割れが発生した後、荷重の増加に伴い斜めひび割れが発生し、それが載荷点と支点を結ぶ大きな斜めひび割れとなり、典型的な斜め引張破壊を呈することで最大荷重を発現した。その後、急激に荷重が低下したため、載荷を終了した。

鋼繊維はなく、せん断補強鉄筋を使用した S2-350 と S5-350 供試体では、S0-350 供試体の最大荷重近くになった、変位約 2.4 mm 程度に達すると、大きな斜めひび割れが生じ、剛性が低下した。しかし、その後も荷重は増加し、どちらの供試体でも、変位が約 7.1 mm 程度に達したときに、最大荷重を発現した。S2-350 と S5-350 供試体の最大荷重は、それぞれ 492 kN と 550 kN であり、せん断補強鉄筋量の増加に伴い、せん断強度は増加している。破壊性状から、斜め引張破壊したと判断する。

せん断補強鉄筋がなく、0.50 vol% の鋼繊維量を与えた F50-350-1 および F50-350-2 供試体では、同じく、S0-350 供試体の最大荷重近くになり、変位が約 2.4 mm 程度に達すると斜めひび割れが観察されたが、その後も荷重は単調に増加し、最大荷重はほぼ同じ 496 kN と 500 kN であった。その破壊性状から、どちらの供試体も斜め引張破壊したと判断する。両供試体では、最大荷重のみならず、その荷重－変位関係も図-8 に示されるようにほぼ等しい。遠心成形 SFRC 杭では、鋼繊維分布と配向のばらつきが抑えられ、鋼繊維により、一定、かつ安定したせん断補強効果を得られる可能性が示された。

F50-350 供試体の最大荷重は、せん断補強鉄筋を 2 本持つ S2-350 供試体と同等である。本実験では、SFRC 杭のせん断性状を確認するため、軸方向鉄筋量を増やし、一方で、鋼繊維量を 0.5 vol% に抑えていたが、同径の市販 PHC 杭が有する曲げ耐力で、かつ鋼繊維量を増やせば、曲げ破壊型となる SFRC 杭の製造は十分に可能であることが示唆された。なお、遠心成形は、高強度プレレストレストコンクリート杭に見られるように、粘性が高く、打設が困難なコンクリートに対しても、高品質な杭体の製造を容易にする。鋼繊維量が増えた場合には、ワーカビリティの確保が課題となるが、遠心成形 SFRC 杭では、この点はそれほど大きな問題にならないと考えている。

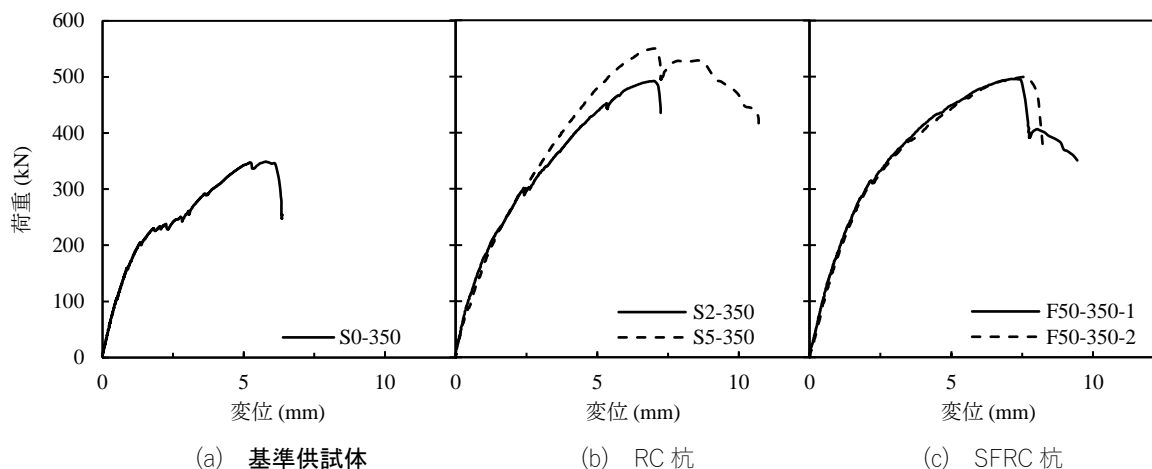


図-8 荷重－変位関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Raju Ramiz Ahmed, Akiyama Mitsuyoshi, Lim Sopokhem, Kakegawa Tatsuya, Hosono Yuka	4. 巻 303
2. 論文標題 A novel casting procedure for SFRC piles without shear reinforcement using the centrifugal forming technique to manipulate the fiber orientation and distribution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 124232 ~ 124232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2021.124232	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 細野悠花, 秋山充良, 掛川達矢, 宇野洋志城	4. 巻 43(2)
2. 論文標題 せん断補強鉄筋を必要としない遠心成形SFRC杭の開発とそのせん断強度に関する実験的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 931-936
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 掛川達矢, 秋山充良, Lim Sopokhem, Raju Ramiz Ahmed	4. 巻 43(2)
2. 論文標題 X線画像に基づき定量化された鋼繊維分布と配向のばらつきを考慮したSFRCはりの曲げ挙動解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 787-792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li Yue, Ruan Xin, Akiyama Mitsuyoshi, Zhang Mingyang, Xin Jiyu, Lim Sopokhem	4. 巻 223
2. 論文標題 Modelling method of fibre distribution in steel fibre reinforced concrete based on X-ray image recognition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part B: Engineering	6. 最初と最後の頁 109124 ~ 109124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesb.2021.109124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Chi, Akiyama Mitsuyoshi, Lim Sopokhem, Kondo Soichiro, Hosono Yuka, Lai Yudan, Aoki Koki	4. 巻 409
2. 論文標題 Shear performance of centrifugal forming hollow circular SFRC piles: Feasibility study of replacing stirrups with steel fibers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 134140 ~ 134140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2023.134140	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 細野悠花, 陳馳, 近藤壮一郎, 秋山充良	4. 巻 45
2. 論文標題 遠心成形により鋼繊維配向を改善したSFRC杭のせん断強度に関する実験的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 775-780
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Raju, R.A., Akiyama, M., Lim, S., Kakegawa, T., Hosono, Y., and Uno, Y.
2. 発表標題 Shear strength of SFRC piles without shear reinforcement using the centrifugal forming technique
3. 学会等名 2021 International Civil Engineering and Architecture Conference (CEAC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細野悠花, 秋山充良, 宇野洋志城, 弘光太郎, Raju Ramiz Ahmed, 掛川達矢, Lim Sopokhem
2. 発表標題 遠心成形により鋼繊維分布・配合を改善したSFRC杭のせん断強度に関する実験的研究
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海崎真穂, 秋山充良, 近藤壮一郎, 細野悠花, Lai Yudan, Chen Chi, Lim Sopokhem
2. 発表標題 遠心成形により鋼繊維配向のばらつきを低減した SFRC 杭の開発とそのせん断実験
3. 学会等名 令和 5年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023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
研究分担者	リム ソーポーケム (Lim Sopokhem) (60801305)	早稲田大学・理工学術院・講師(任期付) (32689)	

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
---------	---------