論文 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

細野 悠花*1・秋山 充良*2・掛川 達矢*3・宇野 洋志城*4

要旨: 杭の製造時に用いられる遠心成形とその過程で生まれるコンクリートと型枠間の周面摩擦力を利用し, 鋼繊維を杭軸直角方向に配向させた鋼繊維補強コンクリート(SFRC)杭を提案した。コンクリートの配合や 遠心成形時の回転パターンを検討し,X線撮影で可視化される鋼繊維の情報に基づき,効果的にせん断力を 負担する鋼繊維分布と配向を有するSFRC杭の製造法を同定した。また,提案工法を用いたSFRC杭のせん 断実験から,せん断補強鉄筋を与えなくても,鋼繊維のみで曲げ破壊型の杭体を設計できる可能性を示した。 キーワード:鋼繊維補強コンクリート杭,遠心成形,X線撮影,せん断強度,せん断補強鉄筋

1. はじめに

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 ¹⁾。一 方で、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) では、鋼繊維の 分布や配向の偏りをコントロールすることが難しく,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²⁾。著者らは,過去,X線撮影とディジタル画像 処理を併用することで、SFRC はり内部の鋼繊維を可視 化し、その分布と配向を考慮した構造性能評価法を提案 したり、自己充填コンクリートを用いることで、打設時 に生み出される部材軸方向の流れで鋼繊維を部材軸方向 に配向させ、曲げ引張に抵抗させたりすることを試みて きた ^{3), 4), 5), 6)}。これにより構造性能の評価精度は改善さ れ、また、既存の SFRC はりよりも高い曲げ強度を得る ことができるようになったが、軸方向鉄筋の代替として の役割を鋼繊維に期待するまでには至っていない。

本研究では、プレキャストコンクリート杭の製造に用 いられる遠心成形工法 ⁷に着目し、遠心成形過程で生ま れるコンクリートと型枠間の摩擦力により鋼繊維を強制 的に周方向(杭軸直角方向)に配向させることで、せん 断補強鉄筋を必要としない SFRC 杭の開発に挑むもので ある。多くの鋼繊維を帯鉄筋と同じく杭軸直角方向に一 律に配向させることができれば、ランダムに鋼繊維が配 向する場合と比べて、鋼繊維は一定のせん断補強効果を 発揮できると期待される。既往研究において、SFRC 部 材のせん断強度や、遠心成形を用いないで製造された SFRC 杭の耐震性が実験的に検討されているが ^{8,9,10}, 通常の製造方法では、鋼繊維の分散性と配向性のばらつ きのため、せん断補強鉄筋の代替となるほどまでに鋼繊

表-1 供試体一覧

供試体	R1-SC	R1-N1	R1-N2	R2-N1	R0-N1
形状		板状			
回転パターン		1	2		
コンクリート種別	SC	N1	N2	N1	

表-2 コンクリートの配合

副ム	鋼繊維量	単位量 (kg/m³)							
HC.F	(vol%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	SP	AE 剤		
SC		175	318	853	708	7.86	1.08		
N1	0.50	175	350	950	789	3.50	0.70		
N2	2		350	1036	701	5.25	0.70		

SP:高性能 AE 減水剤

維はせん断力を負担することができない。一方で、プレ ストレストコンクリート杭をはじめ、杭体は本来、せん 断に対して曲げが卓越する部材であり、曲げ破壊を確保 するために必要となるせん断補強鉄筋量は、相対的にせ ん断スパン比の小さい橋脚などに比べて大幅に少ない¹¹⁾。 遠心成形とそれにより生まれる周方向の摩擦力を利用す れば、せん断補強鉄筋を与えなくても、鋼繊維のみで曲 げ破壊型となる SFRC 杭の製造は可能であると考える。

この背景のもと、まず、効果的に鋼繊維を杭軸直角方 向に配向させることができるコンクリートの配合や遠心 成形打設時の回転パターンなどを検討する。その際、X 線撮影により SFRC 杭内にある鋼繊維を可視化し、その 分布や配向から最適な製造法を同定する。次に、実際に SFRC 杭をその製造法でつくり、せん断実験を行うこと で、鋼繊維量が杭体のせん断強度に及ぼす影響や、鋼繊 維によるせん断補強鉄筋の代替可能性などを検証する。

*1 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科 (学生会員) *2 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士(工学) (正会員) *3 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 (学生会員) *4 佐藤工業(株) 技術センター技術研究所所長 博士(工学) (正会員)

表-3 回転速度と回転時間

遠心力 (G)	0.6	3	9	20	30
回転速度 (rpm)	83	183	323	481	590
回転パターン1(分)	5	3	3	3	5
回転パターン2(分)	10	3	3	2	2



図-1 遠心成形を行う供試体(左)と遠心成形を行わ ない供試体(右)の諸元(単位:mm)



図-2 遠心成形装置

2. 遠心成形 SFRC 杭の製造方法に関する基礎検討 2.1 供試体諸元

供試体一覧を表-1に示す。コンクリート種別として, 自己充填コンクリート「SC」,およびスランプ値を変えた 2 種類の普通コンクリート「N1」と「N2」を使用した。 各配合を表-2 に示す。「SC」のスランプフロー値は 525 mm であり、「N1」および「N2」のスランプ値はそれ ぞれ4 cm および10 cm であった。なお,スランプフロー 値,およびスランプ値は,鋼繊維を0.50 vol%混入したコ ンクリートから得られた値である。粗骨材の最大寸法は 10 mm とした。製造方法を検討する際に用いた供試体は 小型であるため,鋼繊維には全長35 mm,直径0.55 mm, アスペクト比 64 のものを用いた。

遠心成形時の回転パターンは掛川ら¹²⁾の実験を参考 に設定し,**表-3**に示す5段階の回転速度を連続的に変 化させた。遠心成形効果を確認するため,遠心成形を行 わない供試体「R0」も作製した。遠心成形を行う供試体 については,回転パターン1,および回転パターン2の 2通りを使用し,それぞれ「R1」,および「R2」とした。

供試体諸元を図-1 に示す。遠心成形を行う供試体は 円筒形となる。一方,遠心成形を行わない供試体は,遠 心成形を行う供試体の円周の半分にあたる 242 mm の幅 を持ち,円筒形供試体の肉厚と同じ厚さを与えた。



図-3 X線装置



図-4 鋼繊維情報の抽出方法

2.2 打設方法

SFRC 杭の型枠には、硬化ポリ塩化ビニル管を使用し、 図-2 に示す遠心成形装置を用いて打設した。遠心成形 にはブラシレスモーターを使用し、回転速度値 (rpm) に 基づき回転を制御した。打設後は、気中養生としている。 遠心成形を行わない供試体は、一般のコンクリート型枠 用合板を用いて製作した。鋼繊維分布・配向への影響を 最小限に抑えるため、図-1の平板(154π/2 × 200 mm) を平らな床上に置き、平板の中心位置にフレッシュコン クリートを流し込んでいる。その際、型枠の外側から木 槌により振動を与えることで締め固めており、打設後、 ある一定の時間を置いた後、表面仕上げを行った。養生 は、杭供試体と同じく、気中養生とした。

2.3 X 線撮影および鋼繊維情報の抽出

各供試体に対して、図-3 に示す X 線装置を用いて、 杭軸周りに 45° ずつ回転させ、合計 8 面から X 線撮影 をした。撮影された X 線画像の一例と鋼繊維情報(位置 および角度)の抽出方法を図-4 に示す。

また,各X線画像は,29.5 × 45 mm のメッシュに分割し,それぞれのメッシュに含まれる鋼繊維の本数を求めることで,鋼繊維量のメッシュ毎の偏りを調査した。 なお,複数のメッシュに跨る鋼繊維は,その中心点があるメッシュ側の本数に加えている。鋼繊維量の偏りを表



図-7 供試体諸元 (P-S2)

す指標として、各メッシュの鋼繊維本数から変動係数を 求めた。変動係数が小さいほど、メッシュごとの鋼繊維 数のばらつきが小さいため、鋼繊維量が極端に多い、あ るいは少ないメッシュがなく、鋼繊維量の偏りが少ない 供試体と言える。また、鋼繊維の配向について検討する ため、各鋼繊維が杭軸方向となす角度αを0°から180° まで10°ごとに分割し、それぞれの角度に存在する鋼繊 維の本数が全数に占める割合を算出した。杭軸直角方向 を表す 90°付近に配向する鋼繊維量の割合を高める製 造法を同定することが本実験の目的となる。

2.4 実験結果

(1) コンクリート種別の影響

図-5に、R1-SC、R1-N1、およびR1-N2の各供試体か ら得られた鋼繊維角度 αの分布を示す。図中には、併せ て、鋼繊維量の偏りを表す変動係数の算定結果も示して いる。図-5より、R1-N2を用いると、遠心成形の過程 で生まれるコンクリートと型枠間の周面摩擦により、効 果的に鋼繊維が杭軸直角方向(α=90°)に配向され、か つ、変動係数の値から、鋼繊維が比較的、均一に分布し ていることが確認される。普通コンクリートを用いる場 合には、スランプ値が大きい方が理想的な鋼繊維分布・ 配向を得られていると言える。

一方,自己充填コンクリートは硬化速度が速く,型枠 内へのコンクリートの充填,および低速での遠心成形過 程で硬化が生じてしまい,SFRC 杭の製造には不適と思 われた。R1-SC の鋼繊維の角度の分布,および変動係数

- は, R1-N2 よりも悪い結果となっている。
 - (2) 回転パターンの影響

R0-N1, R1-N1, および R2-N1 を比較し,回転パターン が鋼繊維量の分布および配向に及ぼす影響を確認する。 結果を図-6 に示す。N1 のコンクリートを使用した検討 のため,図-5 の結果からも推測されるように,遠心成 形を与えた場合には,変動係数が大きくなっている。一 方,遠心成形を与えない場合には,R0-N1 の結果に示さ れるように,ある特定の角度に分布が偏ることはなく, 遠心成形を与えることで,鋼繊維が杭軸直角方向に効果 的に配向されていることを確認できる。

R1-N1 と R2-N1 では,配向には大きな違いは見られな いが,変動係数は R1 の回転パターンの方が小さくなっ ている。遠心成形の初期に低速回転を与えることで,杭 軸方向に均等な肉厚を有する杭体を製造できるが,一方 で,その継続時間を長くとり過ぎると鋼繊維量の分布に 偏りが生じることが確認された。

2.5 優れた鋼繊維分布・配向を得るための諸条件

図-5および図-6の結果に基づき,「N2」のコンクリートの配合,また,「R1」の回転パターンによりSFRC 杭を製造する。遠心成形を行う場合,遠心成形を行わない場合に比べて鋼繊維量に偏りが生じ易いが,「N2」のコンクリート配合を使用し,回転パターンを「R1」にすることで,その改善が期待できると考えた。これらは,鋼繊維量の分布の偏りと鋼繊維の配向によるほか,打設の容易さなども勘案した結果である。一方で,より大型の供

供試体	鋼繊維量	せん断	し断補強鉄筋		コンクリート		初期ひび割れ	县十世毛		
		本数	間隔	內厚	圧縮強度	割裂強度	強度	取八彻里	破壊形態	
	(vol%)	(本)	(mm)	(mm)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN)	(kN)		
P-S1	- 0	1	142.5	50.3			27	86		
P-S2		2	95	53.5	177	2.92	24	99		
P-F0-1	- 0 - 0.50			55.2	47.7	3.83	34	76	北ノド	
P-F0-2		0			56.1			30	84	CNA
P-F50-1		0.50	0	0	49.9	17.5	1 19	21	107	
P-F50-2			0	0	54.5	47.5	47.5 4.48	4.40	29	90
P-F100-1	1.00			50.5	17.6	5 47	25	129	手でも	
P-F100-2				49.1	47.0	5.47	25	118	四()	

表-4 供試体概要と載荷試験結果



試体を製造する際には,最適な配合および回転パターン は異なる可能性があり,今後の課題である。

3. 遠心成形 SFRC 杭のせん断実験

3.1 供試体諸元

せん断実験に用いた SFRC 杭の構造諸元を図-7 に示 す。SFRC 杭は外径 154 mm,目標肉厚 50 mm,そしてせ ん断スパン 285 mm (せん断スパン比 2.59) である。2 章 の結果から,コンクリートの配合は「N2」を使用した。 また,表-4 には実験に用いた SFRC 杭の供試体の一覧 をその実験結果とともに示す。鋼繊維を使用した SFRC 杭については,鋼繊維量の分布と配向のばらつきを考慮 して,同条件の供試体を2体製作している。

全ての供試体の軸方向鉄筋は D13 であり,8 本を断面 内に均等に配置した。各供試体はそれぞれ異なる量のせ ん断補強鉄筋および鋼繊維を有している。せん断補強鉄 筋には D4 鉄筋を使用し,せん断スパン内に 0~2 本を配 筋した。なお,軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋の引張 試験により得られた降伏強度は,それぞれ 369 N/mm², および 327 N/mm²である。鋼繊維量は,0.50 vol%,およ び 1.00 vol%とした。また,基準供試体としてせん断補強 鉄筋と鋼繊維をどちらも持たない供試体も製作した。

3.2 載荷方法

図-7 に示す3 点載荷によりせん断力を与え,載荷荷 重,中央変位,軸方向鉄筋ひずみ,およびせん断補強鉄 筋ひずみを測定した。8 本の軸方向鉄筋のうち,引張側 に位置する3本にひずみゲージを貼付した。せん断補強 鉄筋には,せん断スパン内の最も載荷点に近い2本にひ ずみゲージを貼付した。

3.3 実験結果

せん断実験により得られた荷重-変位関係を図-8 に, また各供試体の載荷終了時のひび割れ状況の一例を 図 -9に示す。図-9では,載荷終了時に卓越していたひび 割れを太線で示した。以下,各供試体の結果を考察する。

(1) RC 杭

基準供試体 P-F0-1 と P-F0-2 の最大荷重は, それぞれ 76 kN および 84 kN であった。図-9(a)に示されるよう に,最大荷重に到達後,支点と載荷点を結ぶように大き な斜めひび割れが発生し,荷重が急激に低下した。最大 荷重到達時でも軸方向鉄筋の降伏は確認されず, P-F0-1, および P-F0-2 ともに斜め引張破壊したと判断する。

せん断補強鉄筋を使用した P-S1 および P-S2 でも、変 位が 2 mm 程度に達すると、大きな斜めひび割れが発生 した。その後、特に P-S1 で剛性の顕著な低下が確認され たが、荷重はさらに増加し、両供試体ともに変位が 4 mm 程度に達したときに最大荷重を示した。P-S1 および P-S2 の最大荷重は、それぞれ 86 kN、および 99 kN であり、 せん断補強鉄筋の本数の増加に伴い、杭体のせん断耐力 は増加している。ただし、どちらの供試体でも、最大荷 重時に軸方向鉄筋の降伏は確認されておらず、また最大 荷重時でも載荷点付近のコンクリートに圧壊などは観 察されなかったことから、P-S1 および P-S2 ともに斜め 引張破壊したと判断する。

(2) SFRC 杭

0.50 vol%の鋼繊維量を与えた P-F50-1 および P-F50-2 では、図-8(c)に示されるように、変位が 2 mm 程度とな るまでは P-F0-1 および P-F0-2 と同様の挙動を示し、そ の後、曲げひび割れと斜めひび割れの進展に伴い剛性が 低下した。P-F50-1 および P-F50-2 の最大荷重は、それぞ れ 107 kN および 90 kN であり、荷重低下を伴いながら 斜めひび割れ幅が緩やかに拡大した。鋼繊維を持たない P-F0-1 や P-F0-2 と異なり、鋼繊維の架橋効果が斜めひび 割れ位置で発揮されたことの結果として、最大荷重後の 荷重低下が急激なものにならなかったと思われる。 図-9(a)と(d)の比較に示されるように、ひび割れ性状も、 鋼繊維を持つ供試体の方がひび割れが分散して多くの

鋼繊維を持つ供試体の方かひび割れか分散して多くの 位置に発生している。なお,最大荷重時にも軸方向鉄筋 の降伏は発生しておらず,そのひび割れ状況から,P-F50-1とP-F50-2 はどちらも斜め引張破壊したと判断する。











(d) P-F50-1



図-9 供試体のひび割れ状況(載荷終了時)

鋼繊維量を 1.00 vol%にまで増やした P-F100-1 と P-F100-2 では、図-8(d)に示されるように、変位が 2 mm 程度となるまでの挙動や剛性の緩やかな低下は、鋼繊維 量が 0.50 vol%の供試体と同様である。しかし、P-F100-1 と P-F100-2 の最大荷重は、それぞれ 129 kN および 118 kN であり、P-F50 と比較してせん断耐力が大きく増 加している。また、どちらの供試体においても最大荷重 発現後の荷重低下は緩やかであった。P-F100-1 では、軸 方向鉄筋は最大荷重発現前に降伏し、図-9(e)に示され るように、せん断スパン内には多数の微細な斜めひび割 れが発生した。また、曲げひび割れが大きく進展してお り、卓越した斜めひび割れの幅が P-F50-1 や P-F50-2 と 比較して小さかった。P-F100-2 では、製造過程でひずみ ゲージが破損し、軸方向鉄筋の降伏の有無を判定出来て いないが、ACI318-11¹³)に従い計算した曲げ耐力は 113 kN であり、ひび割れ性状や破壊時の状況で両供試体に大差 はない。つまり、P-F100-1 と P-F100-2 はともに、引張鉄 筋の降伏後、圧縮縁コンクリートの損傷を伴いながら曲 げ破壊したと判断する。鋼繊維量の増加に伴い、ひび割 れ分散性とひび割れ位置での鋼繊維の大きな架橋効果 が確認され、これが鋼繊維を持たない供試体よりも荷重 低下を緩やかにすることに貢献している。

提案工法では、鋼繊維が杭軸直角方向に配向される結 果として、効果的にせん断力に抵抗しており、鋼繊維量 の増加が杭体のせん断強度の増加に直結した。得られた 最大荷重は、せん断補強鉄筋2本を持つ P-S2よりも有 意に大きく、せん断補強鉄筋を必要としない SFRC 杭の 製造の可能性を示すことができた。

ただし、本研究では、直径 154mm の小型の杭体を用い た実験であり、今後、有効高さの大きな供試体を用いた せん断実験も実施し、本構造における寸法効果を確認す る必要がある。また、鋼繊維量とせん断強度の関係の理 解には、解析的な検討が必要であり、提案工法で製造さ れる SFRC 杭のせん断設計法の構築は今後の課題である。

4. 結論

本研究により得られた結論を以下に示す。

- 遠心成形により生まれるコンクリートと杭体の間の周面摩擦を利用し、鋼繊維を杭軸直角方向に配向させることで、せん断補強鉄筋が不要な SFRC 杭の 製造方法を提案した。
- 2) X線画像を用いることで、鋼繊維が杭体内で均一に、 かつ、杭軸直角方向に配向されるコンクリートの配 合や、遠心成形の回転パターンなどを検討した。た だし、同定された配合や回転パターンは、供試体寸 法に依存する可能性があり、今後の継続した実験的 検証が必要である。
- 3) 提案工法に従い製造した SFRC 杭のせん断実験を行い、鋼繊維によって杭体のせん断耐力を大きく増加させることができた。その増加の程度から、提案工法を用いれば、鋼繊維がせん断補強鉄筋の代替となり得ることを示した。

参考文献

 小林一輔,趙力采:鋼繊維補強コンクリートのひび われ拘束性能の試験方法,土木学会論文報告集, No.300, pp.109-119, 1980.8

- Stähli, P., Custer, R. and Mier, J. G. M. V.: On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behavior of FRC, Materials and Structures, Vol.41, pp.189-196, 2008
- Lim, S., Okamoto, T., Matsuda, M. and Akiyama, M.: Flexural behavior prediction of SFRC beams: A novel Xray technique, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.38, No.2, pp.83-91, 2016
- Raju, R.A, Lim, S., Akiyama, M., and Kageyama, T.: Effects of concrete flow on the distribution and orientation of fibers and flexural behavior of steel fiber-reinforced self-compacting concrete beams, Construction and Building Materials, Vol. 262, 119963, 2020.
- 5) 松田充弘, 岡本健弘, Lim Sopokhem, 秋山充良:鋼 繊維のX線撮影結果を用いたSFRCはりの曲げ挙動 解析に関する基礎的研究,構造工学論文集, Vol. 63A, pp.847-858, 2017.3
- 6) 佐々木一成,野村敏雄,田中翔,秋山充良:超高強 度繊維補強コンクリート供試体のX線撮影と鋼繊 維の分散・配向を考慮した曲げ強度評価に関する基 礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.39, No.2, pp.1093-1098, 2017.6
- 7) 綾亀一:遠心力鉄筋コンクリートクイに用いるコン クリートの遠心締固めに関する研究,土木学会論文 集, No.71, pp.1-16, 1960.11
- Kwak, Y. K., Eberhard, M. O., Kim, W. S. and Kim, J.: Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups, ACI Structural Journal, Vol.99, pp.530-538, 2002
- 9) 椿龍哉, Sumitro, S., 庄司宏臣:鋼繊維補強コンクリ ートの引張およびせん断特性とモデル化,コンクリ ート工学論文集, Vol.8, No.1, pp.233-241, 1997.1
- 10) 吉田祥二,牧剛史,和田望:繊維補強コンクリート 杭基礎の耐震性状に関する研究,コンクリート工学 年次論文集, Vol.27, No.2, pp.913-918, 2005
- 11) 袴田智之,鈴木慶吾,河野哲也,七澤利明:高強度せん断補強筋を配した遠心力高強度プレストレストコンクリート杭 (PHC 杭)の曲げ変形能,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.463-468, 2016
- 12) 掛川達矢, Raju Ramiz Ahmed, 影山卓己, 張雨月, 宇野洋志城, 秋山充良:遠心成形 SFRC 杭の開発と そのせん断強度に関する基礎的研究, 令和2年度土 木学会全国大会第75回年次学術講演会講演概要集, V-214, 2020
- ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11), American Concrete Institute, 2011.8