

論文 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

細野 悠花*1・陳 馳*2・近藤 壮一郎*3・秋山 充良*4

要旨：著者らは、小型モーターを用いた遠心成形装置を製作し、遠心成形の過程で生じる型枠とコンクリート間の摩擦力により鋼繊維を部材軸直角方向に配向させ、鋼繊維補強コンクリート（SFRC）杭のせん断強度を高める基礎実験を行ってきた。本研究では、遠心成形装置の実機を使用し、X線撮影で鋼繊維を可視化しながら、せん断力に効果的に抵抗する配向を得るための鋼繊維形状などを検討した。次いで、鋼繊維やせん断補強鉄筋の有無が異なる杭体のせん断実験を行い、せん断補強鉄筋のない SFRC 杭でも曲げ破壊型部材は製作できる可能性があり、また、SFRC 杭ではせん断強度の寸法効果は相当に小さくなること、などを示した。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート杭、遠心成形、せん断強度、せん断補強鉄筋、X線撮影

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート（SFRC）は、引張に対する抵抗力が小さいコンクリートの弱点を補うため、鋼繊維をコンクリートに混入した材料である¹⁾。コンクリートのひび割れ位置に存在する鋼繊維の架橋効果により、ひび割れ発生後でも脆性的に引張抵抗を失わず、その軟化勾配が緩やかなものとなる。一方、SFRC 部材は、鋼繊維の配向をコントロールすることが困難であり、結果として部材の耐荷力にばらつきが生じる。著者らは、自己充填コンクリートが持つ流動性を利用した打設を行うことで鋼繊維を部材軸方向に配向させ、SFRC 部材の曲げ耐荷力の改善とそのばらつきを低減する方法を提案した²⁾。しかし、鋼繊維はその長さが短く、曲げを受ける部材で軸方向鉄筋の代替とするためには、相当量の鋼繊維を用いる必要があり、その製作は極めて困難なものとなる。

そこで、次に、曲げモーメントは軸方向鉄筋により負担させる一方で、せん断ひび割れの発生と進展の抵抗に鋼繊維を利用し、せん断補強鉄筋の代替とする検討を試みた。特に、杭体への適用を念頭に置いている。その理由は、i) 杭体は、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橋脚などに比べて大幅に少ないこと³⁾、さらに、ii) 遠心成形工法⁴⁾で製造される杭体では、遠心成形の過程で鋼製型枠とコンクリート間に摩擦力が発生し、コンクリート内に周方向の流れが発生するため、これを利用して鋼繊維を部材軸直角方向に配向させられれば、せん断力に効果的に抵抗することが期待できる、である。

既に、実験室内で小型モーターを用いた遠心成形装置を製作し、コンクリートの配合や遠心成型時の回転速度

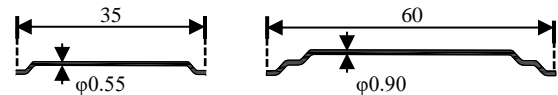
表-1 コンクリートの配合

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)

や回転時間が鋼繊維の配向に及ぼす影響などの基礎検討、および、同定された最適な条件で製作した SFRC 杭のせん断実験を行った⁵⁾⁶⁾。その結果、鋼繊維量の変化に対するせん断強度の増加割合は、既往の SFRC 部材の曲げ実験²⁾で得られた終局曲げモーメントの増加割合よりも相当に大きいものであり、鋼繊維はせん断補強鉄筋の代替として用いる方が効果的であることを確認した。

しかし、既往の SFRC 杭の実験⁵⁾⁶⁾では、トルクモーターを使用しており、そのトルク性能の限界から杭体の直径は 154 mm に固定されており、また、コンクリートパイルの製造に用いられる実機を用いた遠心成形工法

*1 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)

*2 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻

*3 日本コンクリート工業 (株) 技術開発部基礎構造グループ

*4 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)

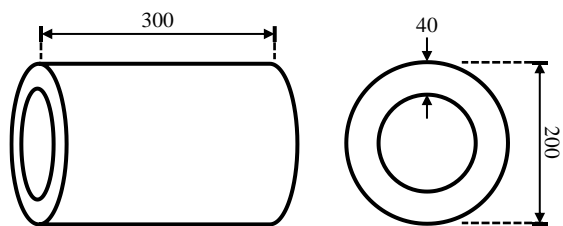


図-2 供試体諸元 (単位: mm)



図-3 遠心成形装置

表-3 回転速度と回転時間

遠心力 (G)	0.5	3	9	25
回転時間 (分)	5	3	3	7

表-4 養生条件

前置時間 (h)	昇温速度 (°C/h)	最高温度 (°C)	保持時間 (h)	降温速度 (°C/h)	後養生方法
2	20	70	4	6	気中

とはコンクリートの投入法や遠心力の与え方が異なっている。そこで、本研究では、直径 200 mm と 350 mm の SFRC 杭をパイル工場内の実機を用いて製造する。まず、X 線撮影を行いながら、鋼繊維を部材軸直角方向に配向させる条件（鋼繊維形状や遠心成形法）を整理する。次いで、せん断実験を行い、鋼繊維の有無や杭径がせん断強度に及ぼす影響を検討し、鋼繊維によるせん断補強鉄筋の代替可能性を検討する。特に、SFRC 部材では、鋼繊維の効果によりせん断ひび割れが分散して発生するため、鋼繊維を使用しない通常の RC 部材に比べて、寸法効果の影響が低減される可能性が指摘されている⁷⁾。本研究でも杭径によるせん断強度の違いを考察し、SFRC 杭における寸法効果の基礎資料を得る。

2. 遠心成形 SFRC 杭の製造法の検討

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。

2.1 供試体諸元および打設方法

コンクリート配合を表-1 に示す。参考文献^{5), 9)}の知見に基づき、高性能 AE 減水剤 (SP) の量が異なる N1 と

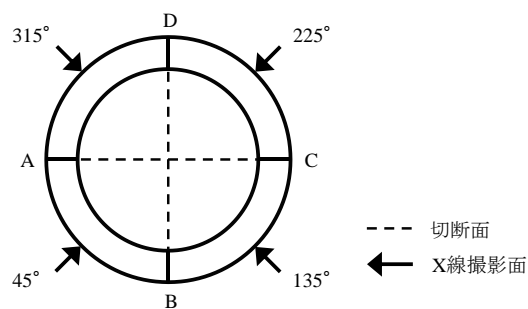


図-4 X線撮影方法

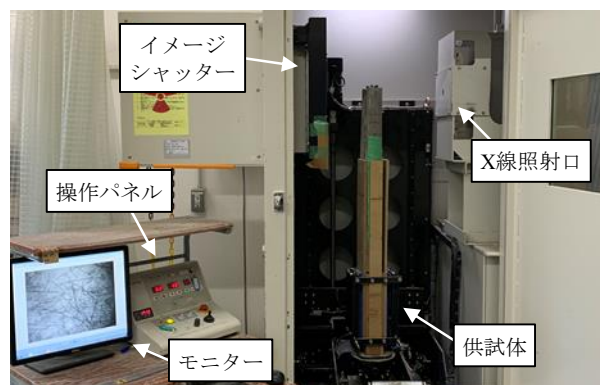
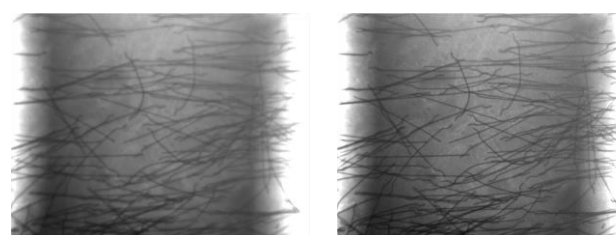


図-5 X線装置



(a) 強調処理前 (b) 強調処理後

図-6 X線画像の例

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、表-3 に示すように遠心力を 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ルと同様の蒸気養生を表-4 の条件で行っている。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。

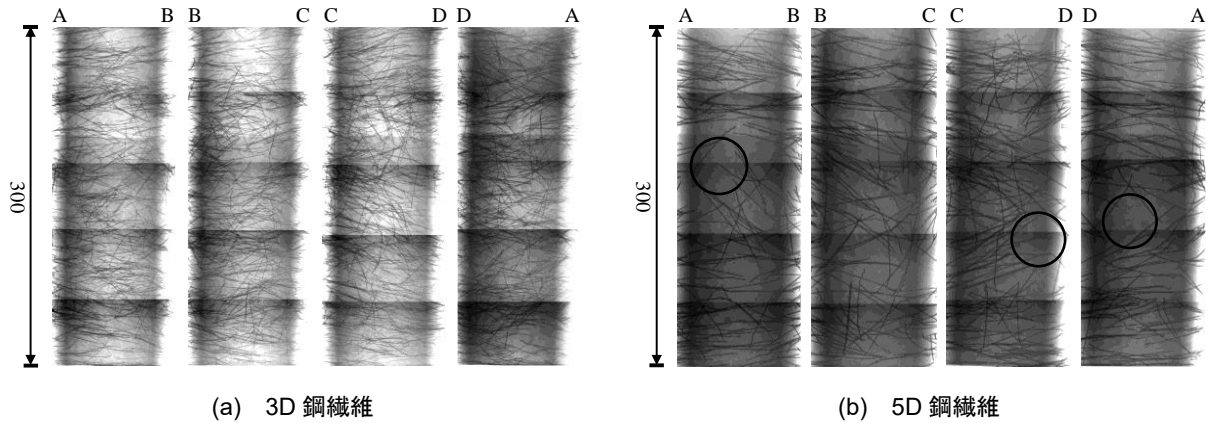


図-7 X線画像

表-5 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 P_m (kN)	せん断強度 (P_m /断面積) (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		

2.2 鋼繊維を可視化するためのX線撮影

図-4に示すように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-5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(図-4参照)。1回のX線撮影では、供試体の高さを80mmとし、部分的に同じ箇所を撮影しながら、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-6)。

2.3 実験結果

コンクリートの配合(表-1のN3)、および遠心成形のパターン(表-3)は、参考文献5)と6)に示したものと同等であり、それが実機を用いた場合にも適用できることが確認されたので、ここでは、鋼繊維形状の違いが鋼繊維の分布と配合に及ぼした影響を中心に述べる。

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(図-7(b)の丸枠内)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0.50vol%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1.0vol%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。

3. 遠心成形SFRC杭のせん断実験

2.3で同定した製造法により、直径200mmと350mmの遠心成形SFRC杭を作製し、そのせん断実験を行った。

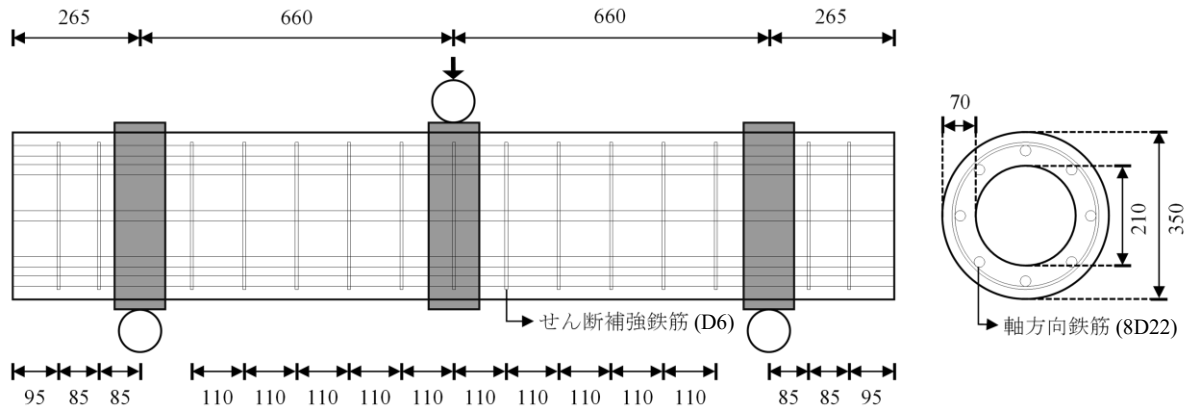


図-8 供試体諸元の例 (S5-350 の場合) (単位 : mm)

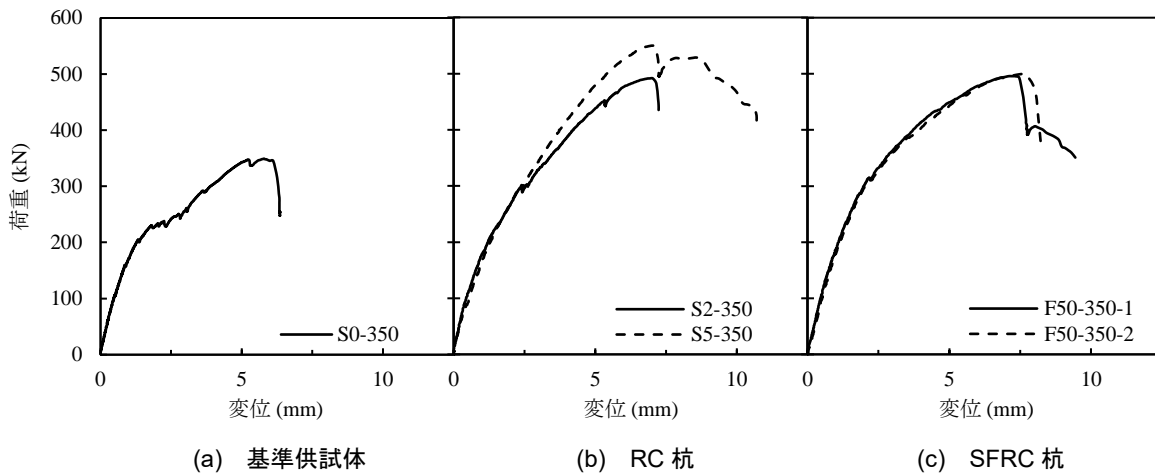


図-9 荷重-変位関係

そして、せん断強度やひび割れ性状、あるいはせん断強度に及ぼす断面直径 (有効高さ) の影響などを考察する。

3.1 供試体諸元, 材料特性および載荷方法

本実験に用いた供試体一覧を表-5 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-8 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。なお、軸方向鉄筋と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、 392 N/mm^2 と 312 N/mm^2 である。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 (有効高さの定義は参考文献⁸⁾)。脱型後に実測した各供試体の肉厚は表-5 に示している。

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。得られた圧縮強度を表-5 に示す。供試体は数回に分けて製作しているが、供試体毎の圧縮強度は、鋼繊維量の有無に関わらず、概ね同じ値が得られたため、以降のせん断強度に関する杭体毎の差を考察する際には、表-5 の圧縮強度の大きさの違いは考慮しない。

図-8 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 程度大きいため、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。

3.2 実験結果

せん断実験により得られた荷重－変位関係を図-9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-10に示す。なお、図-10では、載荷終了時に卓越していた斜めひび割れを太線で強調している。紙面の都合上、寸法効果の考察をする場合を除いて、以降では、直径350mmの供試体から得られた結果を中心に述べる。

(1) 荷重－変位関係

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-9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。

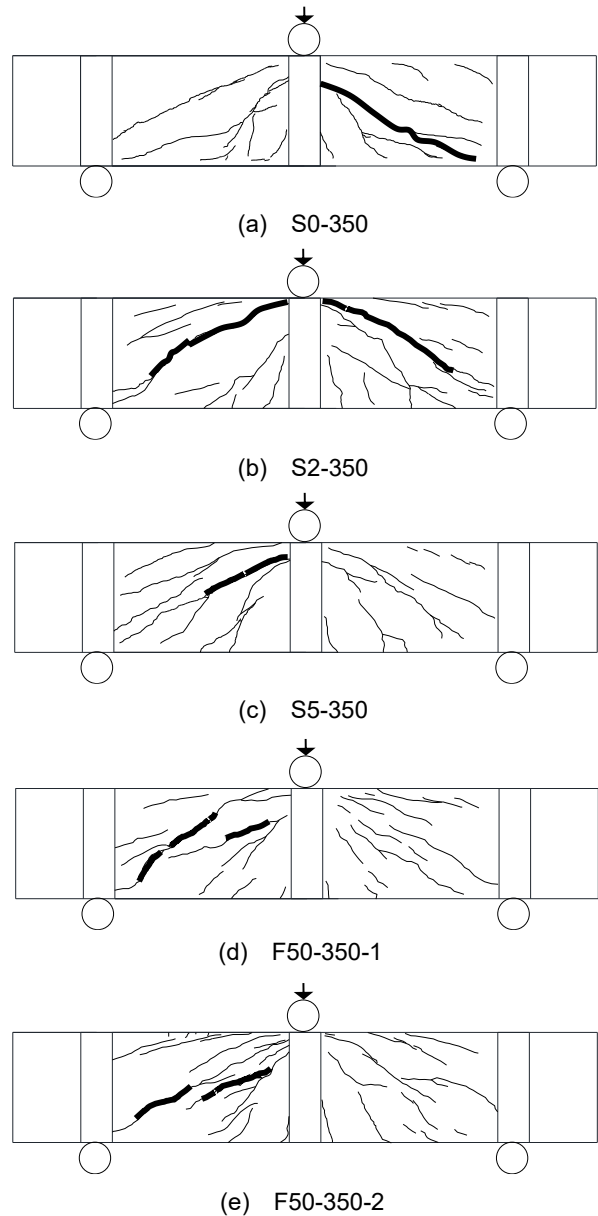
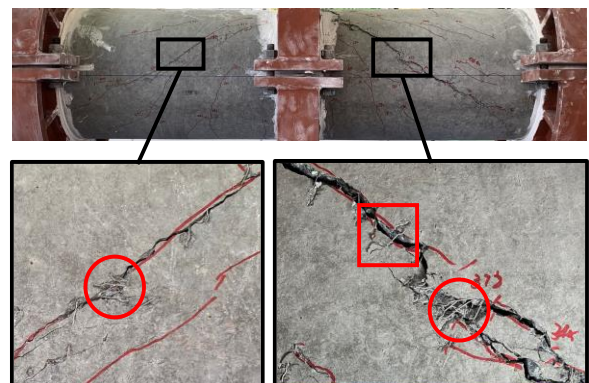


図-10 供試体のひび割れ状況（載荷終了時）



○：鋼繊維量が多い □：鋼繊維量が少ない

図-11 斜めひび割れ位置の拡大写真

(2) ひび割れ性状

S0-350 供試体では、せん断スパン内に一本の卓越した斜めひび割れが発生し、斜め引張破壊をもたらした。一方、図-10(a)と、図-10(d)および(e)の比較に示される

ように、SFRC 杭 (F50-350 供試体) では、荷重の増加に伴い、斜めひび割れが分散して発生した。微細な斜めひび割れも含めると、せん断補強鉄筋を持つ S5-350 よりも、より多くのひび割れが観察されている。

さらに、鋼繊維を与えた F50-350 供試体では、図-11 に示されるように、斜めひび割れを跨ぐ鋼繊維の架橋効果が確認された。なお、この写真は、載荷終了後に撮影したものである。鋼繊維が多く分布している箇所では、ひび割れを跨ぐ鋼繊維の架橋効果により、ひび割れ幅の拡大が抑制されている。一方、鋼繊維の分布が少ない箇所では、ひび割れ幅が拡大していた。前記したように、鋼繊維量を増やし、かつ、ダブルフックの 5D 鋼繊維を使用すると、このような斜めひび割れの拡大を防ぎ、さらなるせん断強度の増加が期待される。

3.3 SFRC 杭で生じるせん断強度の寸法効果

参考文献 5)と 6)で報告した SFRC 杭の直径は 154 mm であるが、そのコンクリート圧縮強度は 45 MPa であり、また、せん断実験の際に本実験で用いたような鋼製リングを使用していない。この鋼製リングのせん断強度に与える影響が現時点では不明であることから、ここでは、表-5 に示す直径 200 mm と直径 350 mm のせん断実験結果の比較のみを行う。なお、表-5 に示すせん断強度は、最大荷重を断面積で除した値である。

表-5 より、鋼繊維とせん断補強鉄筋が共にない S0-200 と S0-350 を比較すると、径が増加するのに伴い、せん断強度は 10%以上低下しており、通常の RC 部材で報告されているのと同様のせん断強度の寸法効果が確認される。一方、SFRC 杭である F50-200 と F50-350 では、せん断強度の大きさは同程度である。鋼繊維が含まれることにより、斜めひび割れが分散して発生し、かつ、杭体では円周方向に均一に軸方向鉄筋が配筋されるため、寸法効果が生じ難い構造になっているためと思われる。これについては、今後、他の口径を有する杭体のせん断実験や、あるいは解析的検討を行い、SFRC 杭における寸法効果を定量的に明らかにしたい。

4. まとめ

本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 遠心成形により鋼繊維を杭軸直角方向に配向させることにより、せん断力に効果的に抵抗する SFRC 杭の製造方法を検討した。本研究で提示したコンクリートの配合や遠心成形の回転速度・時間、また、径と長さが短い鋼繊維形状を用いることにより、望ましい鋼繊維分布、および配向が得られることを示した。
- 2) 提案した方法で製造した SFRC 杭のせん断実験から、鋼繊維は効果的にせん断力に抵抗しており、また、通常の SFRC 部材の構造実験結果と異なり、供試体毎のばら

つきがなく、ほぼ同等の荷重-変位関係が得られた。今後、鋼繊維量を増やすことにより、せん断補強鉄筋を用いることなく、曲げ破壊型の SFRC 杭を製造できる可能性を示した。

3) SFRC 杭では、斜めひび割れが分散して多数発生することにより、通常の RC 部材と異なり、せん断強度の寸法効果が大きく低減されることを示した。

謝辞

コンクリート配合の検討、実験供試体の製作、およびせん断実験の実施にあたり、NC 東日本コンクリート工業 (株) 川島工場の皆様に多大なるお力添えを頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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, pp. 119963, 2020.
- 3) 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
- 4) 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
- 5) Raju, R. A, Akiyama, M., Lim, S., Kakegawa, T. and Hosono, Y.: A novel casting procedure for SFRC piles without shear reinforcement using the centrifugal forming technique to manipulate the fiber orientation and distribution, Construction and Building Materials, Vol. 303, 124232, 2021.
- 6) 細野悠花, 秋山充良, 掛川達矢, 宇野洋志城: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp.931-936, 2021
- 7) Minelli F., and Plizzari G. A.: Shear strength of FRC members with little or no shear reinforcement, Proceedings of the 3rd International fib congress, 2010.
- 8) 渡辺健, 大石峻也, 米花萌, 二羽淳一郎: 中実円形断面鉄筋コンクリートはりのせん断耐力評価に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 67, No. 2, pp. 200-212, 2011.