

論文 鋼繊維形状と混和量が超高強度繊維補強コンクリートのフレッシュ性状と曲げ性能に及ぼす影響

西岡 由紀子*1・本間 大輔*1・小島 正朗*2

要旨: 本研究では、筆者らが開発している設計基準強度 150~200N/mm² の超高強度と、高流動性・高耐火性・高靱性を合わせ持つ超高強度繊維補強コンクリートについて、鋼繊維種類と混和量を変化させてフレッシュ性状と曲げ性能に与える影響の検討を行った。曲げ試験と J-Ring 試験等のフレッシュ試験により、超高強度鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度が使用する鋼繊維の強度と混和量の積に比例すること、また、アスペクト比の大きいフック型の鋼繊維がコンクリートの流動性を低下させるが、フック型とストレート型の繊維を適量混合することでワーカビリティが改善されること等を確認した。

キーワード: 高強度コンクリート, 鋼繊維, 曲げ強度, 曲げタフネス, J-Ring 試験, 繊維補強

1. はじめに

近年、建築物の高層化に伴い、設計基準強度 150N/mm² を超えるコンクリートが実用化されおり、筆者らは設計基準強度 150~200N/mm² の超高強度と、高流動性・高耐火性・高靱性を合わせ持つ超高強度繊維補強コンクリートを開発している(例えば¹⁾)。靱性向上のためには引張強度の大きな鋼繊維を多量に混和することが有効であるが、鋼繊維量が増えるとスランプフローが低下し、施工性が悪くなることが報告されている²⁾。

本研究では、まずシリーズ I として、複数種類の鋼繊維を用いて超高強度繊維補強コンクリートを作成し、フレッシュ試験、曲げ試験を行って、鋼繊維種類と混和量が超高強度繊維補強コンクリートのフレッシュ性状と曲げ性能に及ぼす影響について検討を行った。また、シリーズ II として J-Ring 試験^{3), 4)}により、鋼繊維種類と混和量、またベースコンクリートの調合が超高強度繊維補強コンクリートのフレッシュ性状(流動性・間隙通過性等)に与える影響について検討を行った。

2. シリーズ I

—鋼繊維がフレッシュ性状と曲げ性能に及ぼす影響

2.1 実験概要

(1) 使用材料・調合・練り混ぜ

使用した材料を表-1 に示す。また、使用した鋼繊維の形状と引張強度を表-2 に、繊維形状の比較を図-1 に示す。コンクリートの調合を表-3 に示す。フック型で繊維が長く、アスペクト比の大きい S, HH を混和する調合では、流動性が悪くなることが予想されたため、混和量に応じて粗骨材かさ容積を小さく計画した。

表-1 使用材料

材料	記号	種類・物性
セメント	C	シリカフェームセメント 密度 3.08g/cm ³
細骨材	S	砕砂 表乾密度 2.58g/cm ³
粗骨材	G	砕石 1505 表乾密度 2.61g/cm ³
高性能減水剤	SP1・SP2	ポリカルボン酸系高性能減水剤
有機繊維	PP	ポリプロピレン繊維
鋼繊維	F	(表 2 参照)

表-2 鋼繊維の形状と引張強度

記号	種類	形状	長さ (mm)	直径 (mm)	アスペクト比 (長さ/直径)	引張強度* (N/mm ²)
N	普通強度	フック	30	0.62	48	1283
Z	亜鉛メッキ	フック	30	0.62	48	1410
S	ステンレス	フック	30	0.38	80	2084
HH	高強度	フック	30	0.38	80	2815
SH	高強度	ストレート	13	0.20	65	3312

※試験成績書の値



(a) フック型 (b) ストレート型

図-1 繊維形状の比較

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 研究員 (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 主任研究員 (正会員)

表-3 コンクリートの調合

No.	W/C (%)	空気量 (%)	スランプフロー (cm)	s/a (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	鋼繊維		単位量(kg/m ³)						SP1 添加量 (C×%)	
						種類	混和量 (vol.%)	W	C	S	G	PP	F	同時添加	後添加
1-1	15.4	2.0 ±1.0	60±10	40.8	0.5	N	1.0	155	1006	524	770	1.0	78.5	1.1	0.3
1-2				40.8	0.5	Z	1.0	155	1006	524	770	1.0	78.5	1.8	-
1-3				64.5	0.3	S	1.0	155	1006	828	462	1.0	78.5	2.0	-
1-4				64.5	0.3	HH	1.0	155	1006	828	462	1.0	78.5	2.0	-
1-5				46.6	0.45	HH	0.5	155	1006	599	694	1.0	39.25	1.8	-
1-6				64.5	0.3	SH	0.5	155	1006	828	462	1.0	39.25	2.0	-
	HH	0.5	39.25												

練り混ぜは強制二軸ミキサを用いた。セメント、細骨材を投入後、30 秒間空練りを行い、練り混ぜ水および化学混和剤を投入し、120 秒間練り混ぜた。その後、粗骨材を投入して120 秒間練り混ぜ、繊維の投入完了後さらに180 秒間練り混ぜた。練り混ぜ後、スランプフローが目標値に達しなかったものについては高性能 AE 減水剤の後添加を行い、後添加後さらに60 秒間練り混ぜを行った。

(2) 試験体および養生方法

試験体はφ100×200mmと100×100×400mmを作成し、封緘養生を2日行った後、最高温度75℃として図-2に示す通り24時間の蒸気養生を行った。蒸気養生後は各試験材齢まで室内にて気中養生を行った。

(3) 試験項目

フレッシュコンクリート試験は、空気量 (JIS A 1128) とスランプフロー (JIS A 1150) の測定を行った。

また蒸気養生後、材齢2週頃に圧縮強度試験と3等分点曲げ試験、切欠きはりを用いた荷重-変位曲線試験を行った。圧縮強度試験はφ100×200mmの試験体を用い、JIS A 1108に準拠して行った。圧縮強度試験体の側面にひずみゲージを張り付けて載荷時のひずみを測定し、ヤング率を算出した。3等分点曲げ試験は100×100×400mmの試験体を用い、JIS A 1106に準拠して試験を行った。またJCI-S-002-2003 (切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法)に準拠して、切欠きを設けた100×100×400mmの試験体にて荷重-変位曲線試験を行った。曲げタフネスはCMOD (ひび割れ肩口開口変位) 2mm までの荷重-CMOD 曲線下の面積として算出した。

2.2 実験結果と考察

(1) フレッシュ試験

フレッシュ試験の結果を図-3 示す。空気量・スランプフローともに目標値が得られた。鋼繊維 S を混和した No.1-3, HH を混和した No.1-4 では、粗骨材かさ容積を

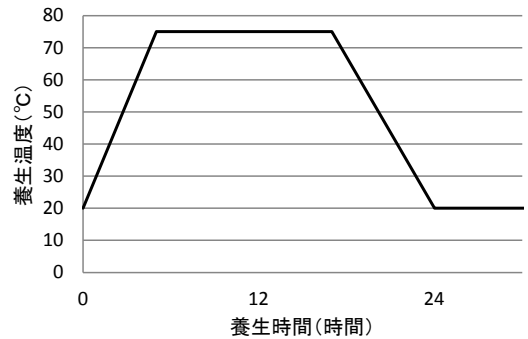


図-2 蒸気養生温度

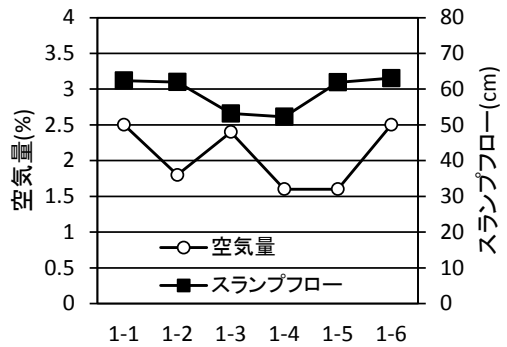


図-3 フレッシュ試験結果

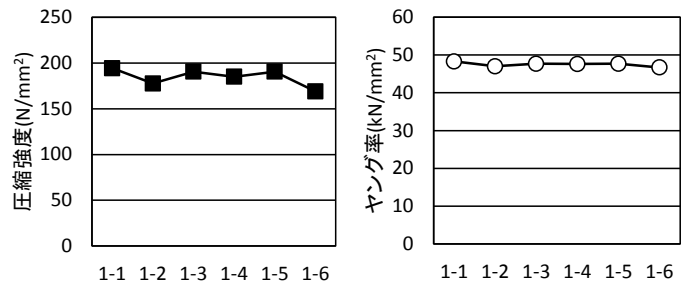


図-4 圧縮強度とヤング率

小さくし、SP1の混和量を比較的多くしているにも関わらず、スランブフローが50cm程度と小さくなった。SやHHのようにフック型で繊維長が大きく、アスペクト比が大きい鋼繊維を多量に入れると繊維が絡みやすくなり、流動性が低下すると推察される。NとZについては同様にフック型であるが、SとHHに比べて繊維径が大きくてアスペクト比が小さいため、同重量をコンクリートに混和しても繊維本数は4割以下であり、フレッシュ性状に与える影響が少ないと推察される。フレッシュ性状(流動性・間隙通過性)については、シリーズIIのJ-Ring試験によって詳細に検討する。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を図-4に示す。いずれも170~195N/mm²程度の強度発現が確認でき、ヤング率は47kN/mm²程度と、いずれも鋼繊維の影響は少なかった。

(3) 3等分点曲げ試験結果

3等分点曲げ試験における荷重変位関係を図-5に示す。なお、3体ずつの試験を行ったが、図-5の荷重変位関係には代表としてそれぞれ1体の結果を示す。繊維種類と混和量によって曲げ性能が異なり、特にNo.1-4、No.1-6が曲げ性能が高いことが分かる。

鋼繊維引張強度と混和量の積と、曲げ強度(ここでは最大荷重時の縁応力度とし、3体の平均値とする)の関係を図-6(a)に、鋼繊維引張強度・比表面積・混和量の積と曲げ強度の関係を図-6(b)示す。図中の寄与率を比較すると、曲げ強度は鋼繊維の引張強度と混和量の積によく比例していることが分かる(図-6(a))。通常、鋼繊維コンクリートのひび割れ拡大時には、ひび割れを架橋する鋼繊維が引張力を受け、コンクリートと鋼繊維の付着を介してせん断応力が伝えられるため、界面の付着が弱いと鋼繊維自体の強度が発揮されにくくなると考えられる。しかし本研究で用いた両端にフック型を有する鋼繊維では、フック形状が支持点となり鋼繊維の引き抜き抵抗性が向上する。よって、鋼繊維の比表面積によらず鋼繊維自体の強度が発揮されやすく、曲げ強度が鋼繊維引張強度と混和量の積に比例したと推察される。

(4) 切欠きはりを用いた荷重-変位曲線試験結果

切欠きはりを用いた荷重-変位曲線試験による、荷重-CMOD関係を図-7に示す。3体ずつの試験を行ったが、図には代表としてそれぞれ1体の結果を示す。載荷初期の挙動を見ると、フック型繊維のみを用いたNo.1-1~5では荷重12~15kN付近でコンクリートにひび割れが発生した際に、数kNの荷重低下がみられる。一方でストレート型繊維のSHを混和したNo.1-6では、同様の挙動はほとんど見られない。これはストレート型繊維SHがその他のフック型繊維に比べ単位重量当たりの表面積が大きいいため、付着力が大きくなり、載荷初期のひび割

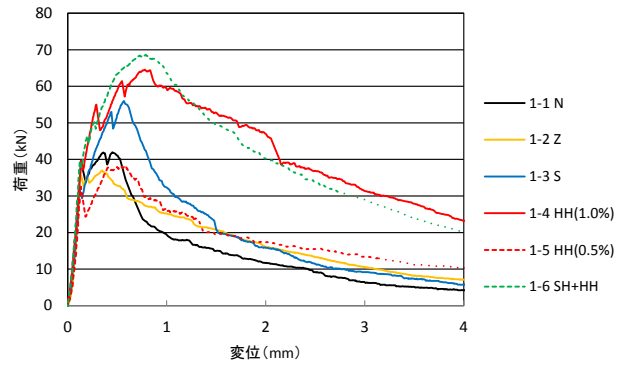
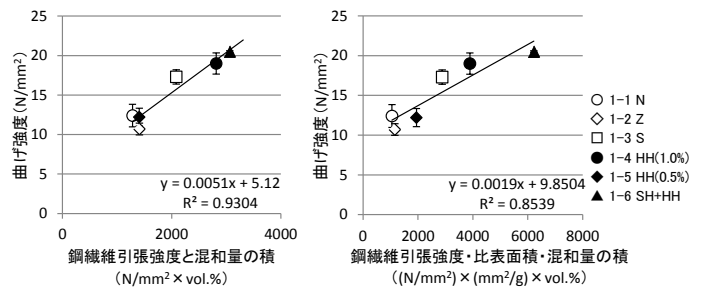
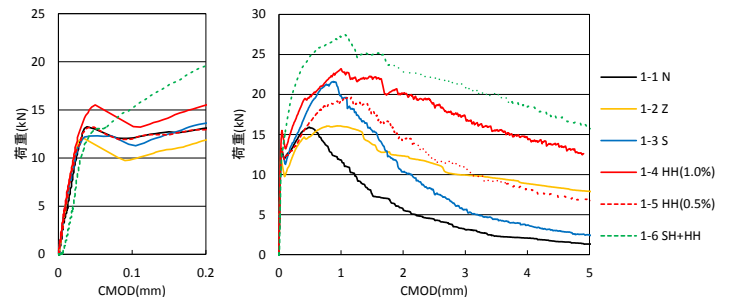


図-5 3等分点曲げ試験における荷重変位関係



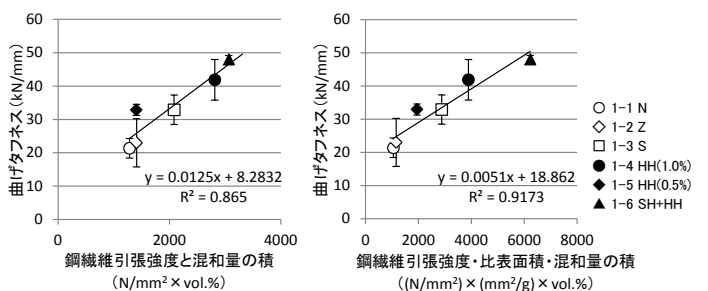
(a) 鋼繊維引張強度と混和量の積との関係 (b) 鋼繊維引張強度・比表面積・混和量の積との関係

図-6 鋼繊維条件と曲げ強度の関係



(a) 載荷初期 (b) 全域

図-7 切欠きはりを用いた荷重-変位曲線試験の荷重-CMOD関係



(a) 鋼繊維引張強度と混和量の積との関係 (b) 鋼繊維引張強度・比表面積・混和量の積との関係

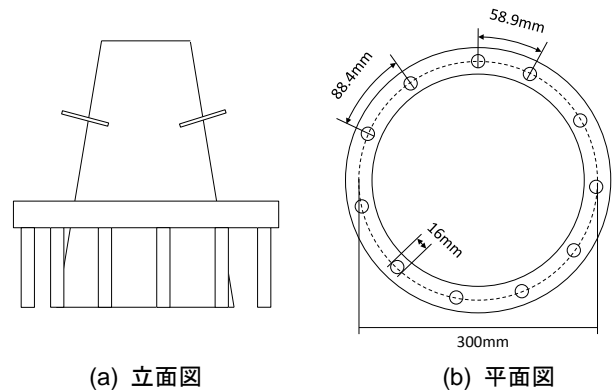
図-8 鋼繊維条件と曲げタフネスの関係

表-4 コンクリートの調合

No.	W/B (%)	空気量 (%)	スランブフロー (cm)	s/a (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	鋼繊維		単位量(kg/m ³)						SP2 添加量 (B×%)		
						種類	混和量 (vol.%)	W	C	SF	S	G	PP	F	同時添加	後添加
2-1	15.4	2.0 ±1.0	60±10	64.5	0.3	N	1.0	155	1006		828	462	1.0	78.5	2.8	0.2
2-2				40.8		HH	1.0	155	1006		828	462	1.0	78.5	3.0	0.1
2-3				64.5		SH	1.0	155	1006		828	462	1.0	78.5	3.0	-
2-4				64.5		SH	0.5	155	1006		828	462	1.0	39.25	2.8	0.15
	HH	0.5	39.25													
2-5	16.0	±1.0	60±10	65.3	0.3	SH	0.5	155	969		859	462	1.0	39.25	2.1	-
				HH		0.5	39.25									
2-6				64.9		SH	0.5	155	916	53	843	462	1.0	39.25	2.1	-
	HH	0.5	39.25													

れ拡大への抵抗性が大きいと推察される。

鋼繊維引張強度と混和量の積と曲げタフネス（3体の平均値）との関係を図-8(a)に、鋼繊維引張強度・比表面積・混和量の積と曲げタフネスの関係を図-8(b)に示す。両者を比較すると、比表面積を考慮しない図-8(a)では、No.1-5の実験値をうまく捉えられていないことが分かる。曲げ強度は比表面積によらず鋼繊維引張強度と混和量の積に比例したが、曲げタフネスについては、フック形状による支持点が一部破壊して鋼繊維が抜け出す過程も評価しているため、曲げ強度に比べて鋼繊維比表面積の影響が大きいと推察される。



(a) 立面図
(b) 平面図
(スランブコーンを設置した状態)

図-9 J-Ring 試験装置概要

3. シリーズII

—J-Ring 試験によるフレッシュ性状の検討

シリーズ I で曲げ性能の良好であった高強度鋼繊維 (HH・SH) を中心に、J-Ring 試験による流動性・間隙通過性の比較検討を行った。

3.1 実験概要

(1) 使用材料・調合・練り混ぜ

使用した材料は前章の実験と同様とした (表-1, 表-2 参照)。セメントはシリカフェウムセメントを用いたが、一部調合 (No.2-6) では流動性を向上させる目的で、シリカフェウムセメントに加えてシリカフェウム微粉末 (記号 SF・密度 2.2g/cm³) を混和材として追加添加した。

鋼繊維は N, HH, SH を用いた。調合を表-4 に示す。練り混ぜ方法は調合 No.2-1~4 は前章の実験と同様とした。No.2-5~6 は容量 1.5m³ の実機パッチャープラントでそれぞれ 0.3m³ 練り混ぜを行い、セメント、細骨材、練り混ぜ水および化学混和剤を投入して 120 秒間練り混ぜた後、粗骨材を投入して 120 秒間練り混ぜ、繊維を投入してさらに 180 秒間練り混ぜた。

(2) 試験項目

フレッシュコンクリート試験は、空気量 (JIS A 1128) とスランブフロー (JIS A 1150)、フロー時間 (50cm 到達時と停止時) の測定を行った。また、J-Ring 試験も合わせて行った。J-Ring 試験は ASTM C 1621, EN12350-12 において高流動コンクリートの間隙通過性評価試験法として規定されており^{3), 4)}、近年、日本国内でも高流動コンクリートのワーカビリティ評価方法として検討が行われている⁵⁾。試験器具の寸法は規格によって異なるが、本試験では、図-9 に示す試験装置を用いた。バー間隔 (バー中心間の円周長さ) は ASTM 規格の 58.9mm の 1.5 倍の 88.4mm を基本とし、障害バーの本数は 11 本とした。これは本実験では最大で長さ 30mm の鋼繊維を混和しており、高流動コンクリートを対象とする ASTM 規格や EN 規格による試験装置ではバー間隔が狭い為いずれの調合でも閉塞傾向となり、繊維による間隙通過性・流動性の比較が難しいことが予想されたためである。なお装置の都合上、一か所バー間隔が 58.9mm と狭い箇所があり、これにより流動性の異方性が生じるが、各調合の流動性を相互比較するうえでは誤差の範囲内であり、支

障はないと考えた。また、ASTM 規格ではスランブコーンの置き方（上下反転）で A 法（正置）と B 法（倒置）が規定されているが、本実験では図-9 に示す通り A 法（正置）により試験を行った。

J-Ring 試験では、フロー値とフロー時間（50cm 到達時と停止時）、ブロッキング値、PJ 値の測定を行った。

ブロッキング値は ASTM 規格においてコンクリートの間隙追加性を測る指標として定められており³⁾、以下の式(1)により算出する。

$$B = SF - SF_j \quad (1)$$

ここで、B：ブロッキング値（mm）、SF：スランブスロー（mm）、SF_j：J-Ring フロー（mm）である。ASTM 規格におけるブロッキング値の評価区分を表-5 に示す。

また、PJ 値は EN 規格においてコンクリートの間隙追加性を測る指標として定められており⁴⁾、PJ 値が小さい程、間隙通過性が良いと判断できる。PJ 値は以下の式(2)により算出する。

$$PJ = (\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}) / 4 - \Delta h_0 \quad (2)$$

ここで、PJ：PJ 値（mm）、Δh：スランブ測定高さ（mm）である。Δh の測定点を図-10 に示す。EN 規格では Δh_{x1} と Δh_{x2}、Δh_{y1} と Δh_{y2} は対角線上の点で測定を行うが、本実験では障害バーの間隔が広がるように J-Ring 試験装置の形状を変更しているため、障害バーの裏側を測定できるように、図-10 に示す点で測定を行った。

3.2 実験結果

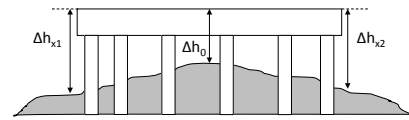
(1) フレッシュ試験

フレッシュ試験の結果を表-6 に示す。また、フロー値・J-Ring フロー値の比較を図-11 に、ブロッキング値と PJ 値の比較を図-12 に示す。ブロッキング値を見ると、鋼繊維 N を用いた No.2-1 が最も小さく J-Ring の有無でフロー値がほとんど変わらなかった。

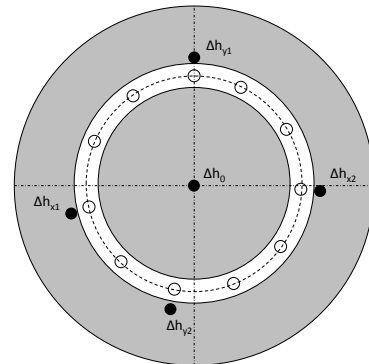
N と同じフック型でも HH を用いた No.2-2 はブロッキング値、PJ 値ともに大きい。これは N に比べ HH は繊維径が小さくてアスペクト比が大きく、同じ混和量(重量)でもコンクリート中の鋼繊維の本数が増えるためだと

表-5 ASTM 規格のブロッキング値の評価区分

ブロッキング値	ブロッキング評価
$0 \leq X \leq 25\text{mm}$	明らかなブロッキングなし
$25\text{mm} < X \leq 50\text{mm}$	軽度から顕著なブロッキング
$50 < X$	顕著なものから極端なブロッキング



(a) 立面図



(b) 平面図

図-10 PJ 値算出のためのスランブ測定位置

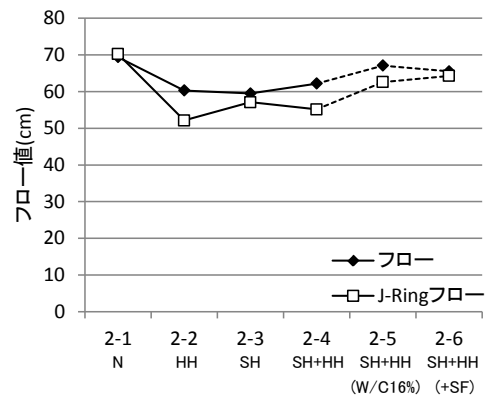


図-11 フロー値・J-Ring フロー値

表-6 フレッシュ試験結果

No.	鋼繊維種類	W/B (%)	SF 単位量 (kg/m ³)	SP2 添加量 (B×%)		空気量 (%)	スランブフロー (cm)	フロー時間 (秒)		J-Ring フロー (cm)	PJ 値 (mm)	ブロッキング値 (mm)	J-Ring フロー時間(秒)	
				同時添加	後添加			50cm	最終				50cm	最終
2-1	N	15.4	0	2.8	0.2	2.3	70.3×68.5	8.1	95.7	72.2×68.3	11	-8	18.3	168.0
2-2	HH			3.0	0.1	1.7	61.0×59.6	29.5	91.5	53.0×51.3	42	81	91.4	139.4
2-3	SH			3.0	-	2.6	60.5×58.5	23.6	146.7	59.1×55.1	33	24	48.2	111.2
2-4	SH+HH			2.8	0.15	2.5	64.0×60.4	10.3	160.3	57.9×52.4	44	70	56.6	176.0
2-5	SH+HH	16.0	53	2.1	-	1.3	68.9×65.3	6.5	63.9	64.8×60.4	29	45	12.3	63.1
2-6	SH+HH			2.1	-	1.8	67.5×63.5	9.5	66.5	66.6×62.0	18	12	10.1	64.4

推察される。なお、鋼繊維断面を円形として概算すると、繊維本数は2.7倍程度となる。SHを用いたNo.2-3はHHを用いたNo.2-2に比べて間隙通過性が良好であった。これは鋼繊維がストレート形状で引っかかりが少なく、繊維長さも短いためだと推察される。HHとSHを半量ずつ混合したNo.2-4はHHを単体で用いたNo.2-2に比べると、ブロッキング値が少し小さいが、PJ値は同等であり、間隙通過性は同程度であった。

フロー時間（50cm到達・停止）の比較を図-13に示す。50cmフロー到達時間を比べると、HHのみを用いたNo.2-2、SHのみを用いたNo.2-3より、HHとSHを混合したNo.2-4の50cmフロー到達時間が早く、フローの初速が大きいことが分かる。すなわち比較的粘性が小さいことが分かる。SHとHHを単体で用いるよりも半量ずつ混合する方が、ワーカビリティが良かった。

またNo.2-4と比較して水結合材比を大きくしたNo.2-5と更にシリカフューム微粉末を追加したNo.2-6はPJ値、ブロッキング値、フロー時間共に小さく、流動性、間隙通過性が良くなった。ただし、No.2-6はフロー試験後のコンクリートを観察すると、鋼繊維と粗骨材が若干中央に集まり分離気味であった。コンクリートが適度に粘性を有することで、鋼繊維の分離が抑制されると推察され、調合の決定には目視による分離判定も重要である。

4. 結論

本検討により得られた知見を以下に示す。

- 1) 繊維長が大きく、アスペクト比が大きいフック型鋼繊維を多量に入れることがコンクリートの流動性を低下させる要因であると推察される。
- 2) 混和した鋼繊維の引張強度と混和量の積に比例して、超高強度繊維補強コンクリートの曲げ強度・曲げタフネスは大きくなる。
- 3) 単位重量当たりの表面積が大きく付着力が大きい鋼繊維を用いた方が、載荷初期のひび割れ拡大への抵抗性が大きいと推察される。
- 4) ストレート型で長さの短い鋼繊維（SH）を用いた超高強度繊維補強コンクリートは、間隙通過性が比較的良好である。
- 5) フック型鋼繊維（HH）とストレート型鋼繊維（SH）を混合することで、HHを単体で用いたコンクリートと同等の曲げ性能を持ちながら、ワーカビリティが改善することを確認した。
- 6) 水結合材比を大きくし、シリカフューム微粉末を増やした方が流動性・間隙通過性が向上するが、コンクリートの粘性が少なすぎると鋼繊維の分離が起りやすいため目視による分離判定が重要である。

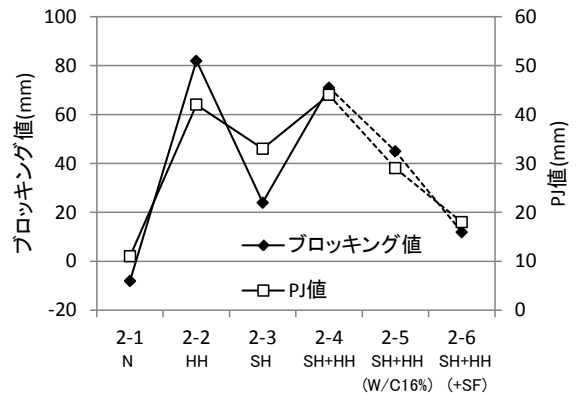


図-12 ブロッキング値・PJ値

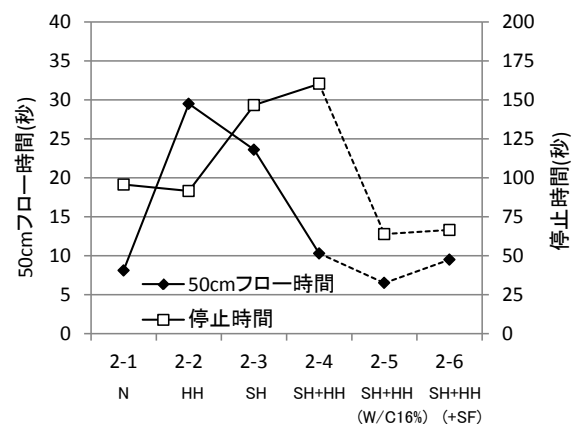


図-13 フロー時間（50cm到達・停止）

謝辞

本実験の実施にあたり、株式会社ダイワに多大なる協力を頂きました。末尾ながら記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 三井健郎ほか：設計基準強度 150～200N/mm² 超高強度繊維補強コンクリートの開発と実建物への適用，日本建築学会技術報告集，Vol.16, No.32, pp.21-26, 2010
- 2) 西岡由紀子，本間大輔，小島正朗：鋼繊維種類と混和量が超高強度繊維補強コンクリートのフレッシュ性状と曲げ性能に及ぼす影響に関する基礎的研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.147-148, 2017
- 3) ASTM C 1621, Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring
- 4) BS EN12350-12, Testing fresh concrete Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test
- 5) 鈴木澄江他：増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートのワーカビリティに関する基礎的検討 その 1～5 日本建築学会学術講演梗概集，pp.519-528, 2016