

## 論文 超高強度コンクリートの諸性状に及ぼす鋼繊維の影響

吉田 理紗\*1・神代 泰道\*2

**要旨:** かぶりコンクリートの剥落や飛散を防ぐことを目的として、超高強度コンクリートを用いた柱部材に鋼繊維が混入されているが、鋼繊維の適切な選定方法については不明な点が多い。そこで、鋼繊維の種類と混入量、組み合わせが、ポリプロピレン短繊維を混入した設計基準強度  $120\text{N/mm}^2$  の超高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、曲げ靱性係数は鋼繊維強度と混入量の積に概ね比例し、低強度鋼繊維を  $80\text{kg/m}^3$  混入して得られる曲げ靱性係数を、高強度鋼繊維を用いた場合には  $30\text{kg/m}^3$  で得られることがわかった。

**キーワード:** 鋼繊維, 曲げ靱性係数, 曲げタフネス試験, 超高強度コンクリート, ポリプロピレン短繊維

## 1. はじめに

近年、建物の高層化に伴い、部材断面の縮小化が図られる超高強度コンクリートの適用が増えている。しかし、コンクリート強度が高いほど破壊性状が脆性的であるため、超高強度コンクリートの靱性確保が望まれる。一般に、鋼繊維を混入することで靱性を高められることが知られており、近年では超高強度コンクリートを用いた柱部材に、鋼繊維が混入されている<sup>1)</sup>。鋼繊維を混入することによって、かぶりコンクリートの剥落や飛散を防ぐことができ、脆性破壊を防止できるため、高い水準で安全な建物を提供できる。

既往の研究<sup>2)~4)</sup>では、鋼繊維の種類と混入量が超高強度コンクリートの材料試験における影響について検討されており、混入量に比例して曲げ靱性が高くなることが報告されている。しかし、柱部材の圧壊時における脆性破壊を防ぐことができる鋼繊維の適切な選定方法や混入量については不明であった。コンクリートの曲げ靱性が、鋼繊維の強度や形状、混入量によって予測できれば、鋼繊維を合理的に選定できる。一方、超高強度コンクリートの火災時の爆裂対策としてポリプロピレン短繊維が混入されているが、鋼繊維とポリプロピレン短繊維を併用した超高強度コンクリートの諸性状については、不明な点が多い。

そこで、本報では超高強度コンクリートを用いた柱部材の圧壊時における脆性破壊を防ぐことができる鋼繊維種類と混入量の合理化を目的として、鋼繊維がポリプロピレン短繊維を混入した超高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響について実験的に検討した。実施した試験は、フレッシュ試験と圧縮強度試験、曲げタフネス試験である。なお、対象としたコンクリートの設計基準強度は  $120\text{N/mm}^2$  とし、5種類の鋼繊維を各々使用した場合と2種類の鋼繊維を組み合わせの場合について検討した。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料およびコンクリート調査

実験に用いた鋼繊維の形状と仕様を写真-1と表-1に示す。鋼繊維 HF は F と同様の両端フック型の形状で、長さが同じだが、F よりも引張強度が高く、アスペクト比が大きい。鋼繊維 Sa, Sb, Sc はストレート型で、引張強度が同等であるが、径と長さ、アスペクト比が異なる。また、鋼繊維 F と比べて、繊維長は短い、引張強度が高く、アスペクト比が大きい。

ここで、鋼繊維 F を  $40\text{kg/m}^3$  以上混入すれば、設計基準強度  $120\text{N/mm}^2$  の超高強度コンクリートの柱載荷試験において、脆性的な破壊を防ぐことを確認している<sup>5)</sup>。既往の研究<sup>2)~3)</sup>では、曲げ靱性について鋼繊維量  $40\text{kg/m}^3$  ~  $160\text{kg/m}^3$  の範囲で検討しており、鋼繊維量と繊維強度の積、鋼繊維量とアスペクト比の積で評価されている。

そこで、本報では鋼繊維 F を  $40\text{kg/m}^3$  用いた際の曲げ靱性を基準とし、鋼繊維 F と比べて繊維強度が高く、アスペクト比が大きい4種類の鋼繊維(HF, Sa, Sb, Sc)を各々使い、少量で同等以上の曲げ靱性を期待し、 $20\text{kg/m}^3$  ~  $40\text{kg/m}^3$  の鋼繊維量で評価した。また、さらなる高靱性を期待して、鋼繊維 HF と Sc を組み合わせ、合計鋼繊維量  $40\text{kg/m}^3$  ~  $80\text{kg/m}^3$  としたハイブリッド型について検討した。

使用材料を表-2、設計基準強度  $120\text{N/mm}^2$  の超高強度コンクリート調査を表-3、鋼繊維量を表-4に示す。粗骨材については、最大寸法が  $20\text{mm(G)}$  と  $15\text{mm(Gs)}$  を用いた。なお、ポリプロピレン短繊維と鋼繊維は表-3のコンクリート調査に対して外割で混入した。

鋼繊維 F, HF の長さは  $30\text{mm}$  であり、鋼繊維 Sa, Sb, Sc の長さは  $20\text{mm}$  以下である。そこで、表-4に示すように、No. 1~No. 7については最大寸法  $20\text{mm}$  の粗骨材を用い、No. 8~No. 16については最大寸法  $15\text{mm}$  の粗骨

\*1 大林組技術研究所 工修 (正会員)

\*2 大林組技術研究所 工博 (正会員)

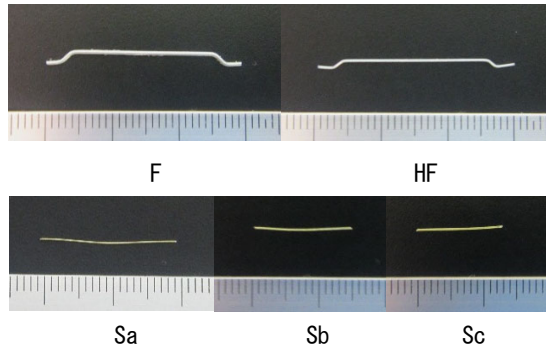


写真-1 鋼繊維の形状

表-1 鋼繊維の仕様

記号	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	径 d (mm)	長さ L (mm)	アスペクト比 L/d	比表面積 (m <sup>2</sup> /kg)	形状
F	1190	0.62	30	48	0.8	両端
HF	3070	0.38	30	79	2.2	フック
Sa	2798	0.22	20	91	9.9	ストレート
Sb	2798	0.22	15	68	13.2	
Sc	2798	0.16	13	81	28.8	

表-2 使用材料

分類	記号	概要
水	W	水道水
結合材	B	シリカフェームを含有したセメント, 密度 3.04 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	砕砂, 硬質砂岩(茨城県桜川産), 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石 2005, 最大寸法 20mm, 硬質砂岩(茨城県桜川産), 表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 実積率 61.1%
	Gs	砕石 1505, 最大寸法 15mm, 硬質砂岩(茨城県桜川産), 表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 実積率 60.8%
混和剤	SP	高性能減水剤 ポリカルボン酸系化合物
繊維	PP	ポリプロピレン短繊維, 密度 0.91 g/cm <sup>3</sup>
	SF	鋼繊維, 密度 7.85 g/cm <sup>3</sup>

表-4 鋼繊維量と粗骨材種類, SP添加率

No.	case.	鋼繊維量(kg/m <sup>3</sup> )					粗骨材種	SP (B×%)
		F	HF	Sa	Sb	Sc		
1	PP2	-	-	-	-	-	G (20mm)	1.6
2	F40	40	-	-	-	-		
3	F60	60	-	-	-	-		
4	F80	80	-	-	-	-		
5	HF20	-	20	-	-	-		
6	HF30	-	30	-	-	-		
7	HF40	-	40	-	-	-		
8	HF20s	-	20	-	-	-	Gs (15mm)	1.5
9	HF30s	-	30	-	-	-		2.0
10	Sa30s	-	-	30	-	-		
11	Sb30s	-	-	-	30	-		
12	Sc30s	-	-	-	-	30		
13	HF20-Sc20s	-	20	-	-	20		1.5
14	HF20-Sc40s	-	20	-	-	40		
15	HF40-Sc20s	-	40	-	-	20		
16	HF40-Sc40s	-	40	-	-	40		

表-3 コンクリート調合

W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					PP(kg/m <sup>3</sup> )
	W	B	S	G	Gs	
17	155	912	593	789	-	2
			597	-	785	

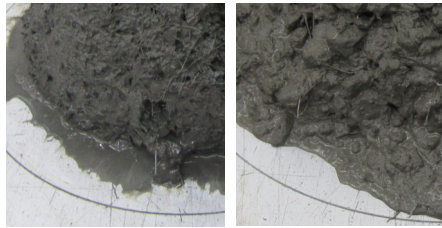
材を用いた。ここで、表-4 の No.2~No.4 を F Series, No. 5~No. 7 を HF Series, No. 8~No.9 を HF's Series とした。なお、No. 5 と No. 8, No. 6 と No. 9 をそれぞれ比較し、粗骨材寸法の影響を検討した。鋼繊維 Sa, Sb, Sc の混入量は、いずれも 30kg/m<sup>3</sup> とし、形状の違いによる影響を検討した。高性能減水剤(以下, SP)添加率は、各調合において繊維とセメントペーストが分離しない上限値とした。

コンクリートの練混ぜは、水平2軸強制練りミキサーを用いて、モルタル先行練りとし、粗骨材、ポリプロピレン短繊維、鋼繊維の順に投入して、計10分間練混ぜた。

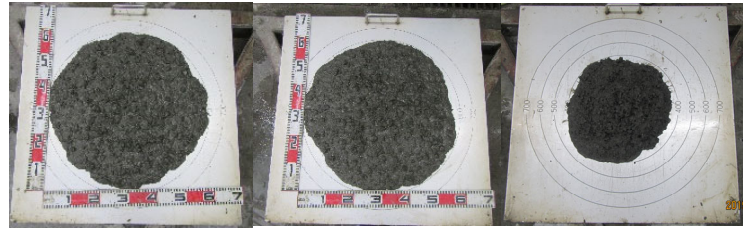
## 2.2 試験方法

フレッシュコンクリートの測定は、スランプフローを JIS A 1150, 空気量を JIS A 1128 にしたがって行った。施工性を考慮して、スランプフローの目標値は 42.5cm 以上かつ材料分離していないこととした。材料分離の判定は、写真-2 に示すように、スランプフローの外周における材料分離したセメントペーストの有無による。空気量の目標値は 2±1% とした。

圧縮強度試験は JIS A 1108, ヤング係数は JIS A 1149 にしたがって行った。φ100×200mm 円柱供試体を各3体用い、材齢28日まで標準水中養生とした。



材料分離あり 材料分離なし  
写真-2 材料分離の判定



No. 4 F80 No. 6 HF30 No. 14 HF20-Sc40s  
写真-3 スランプ試験後の状況

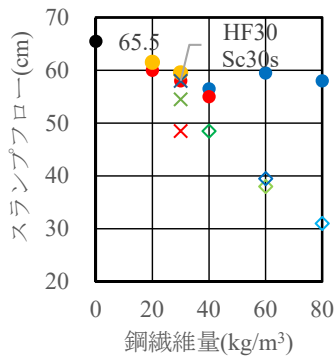


図-1 鋼繊維量の影響

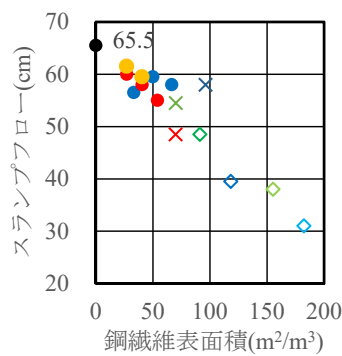


図-2 鋼繊維表面積の影響

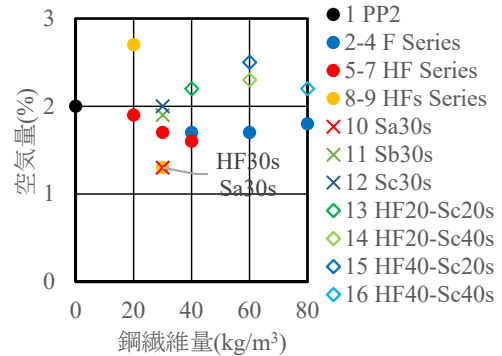


図-3 空気量

曲げタフネス試験は JSCE-G 552 にしたがって行い、材齢 28 日まで標準水中養生とした 100×100×400mm 角柱供試体を各 3 体用いて行った。

いずれも供試体はテーブルバイブレータを用いて締め固めて作製した。なお、鋼繊維が沈まないことを確認したうえで、振動時間は30秒間とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 フレッシュ試験結果

一例として、F80 および HF30、HF20-Sc40s のスランプフロー試験後の状況を写真-3 に示す。すべてのケースにおいて、写真-3 のように鋼繊維と粗骨材が均一に拡がっており、繊維同士が絡み合っただけでファイバーストックや材料分離は生じなかった。

スランプフローと鋼繊維量、鋼繊維表面積との関係を図-1、図-2、空気量と鋼繊維量の関係を図-3に示す。ポリプロピレン短繊維のみを混入したNo.1のスランプフローは65.5cmであった。ポリプロピレン短繊維と鋼繊維を混入したNo.2～No.13のスランプフローは、鋼繊維の混入によっていずれも低下したが、48.5cm～60.0cmの範囲にあり、目標の42.5cm以上を確保できた。鋼繊維HFとScを組み合わせて、合計鋼繊維量を60kg/m³～80kg/m³としたNo.14～No.16のスランプフローは、31.0cm～39.5cmの範囲にあり、目標値を下回った。

繊維量と繊維表面積の増加に伴い、スランプフローが低下することが示されている。図-1および図-2から、

HF SeriesとHF Series、鋼繊維HFとScのハイブリッド型については、鋼繊維量および鋼繊維表面積の増加に伴いスランプフローが低下した。一方、F Seriesについては相関性が認められなかった。これは、鋼繊維FはHFに比べて繊維径が太く、アスペクト比が小さいことから、鋼繊維量および鋼繊維表面積の増加による流動性への影響が緩慢になったものと推察される。ストレート型鋼繊維を用いたSa30s、Sb30s、Sc30sについては、図-2から鋼繊維表面積とスランプフローの相関性は認められなかった。これは、繊維長とアスペクト比などの影響と考えられるが、本検討範囲では原因が明確にはならなかった。

空気量については、鋼繊維の混入によって、空気量が増大することではなく、いずれのケースにおいても2±1%と目標値を満足した。

#### 3.2 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験後の供試体破壊状況を写真-4に示す。ポリプロピレン短繊維のみ混入したPP2の破壊性状は脆性的であったのに対して、鋼繊維を混入したケースについては表層のコンクリートの爆裂を抑制していることが確認できた。

圧縮強度の3体平均値を図-4に、ヤング係数の3体平均値を図-5に示す。本検討範囲では、鋼繊維を混入したケースの圧縮強度とヤング係数は、鋼繊維を混入していないPP2よりも高くなる場合と低くなる場合があった。圧縮強度とヤング係数への影響は定かでないが、ばらつきが大きくなる原因となることが推察される。

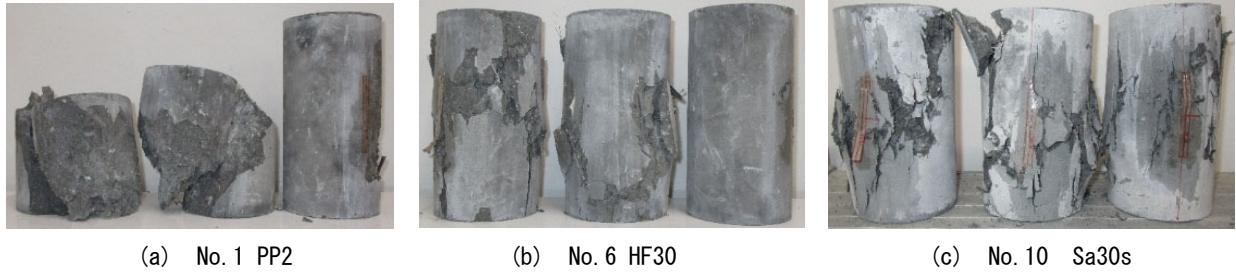


写真-4 圧縮強度試験後の供試体破壊状況

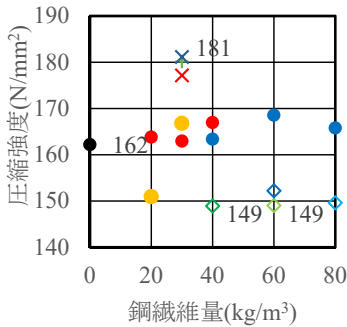


図-4 圧縮強度

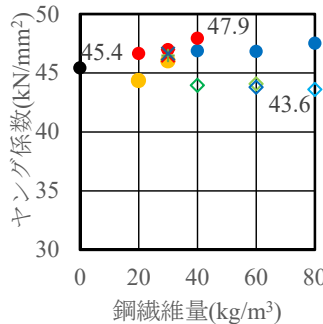


図-5 ヤング係数

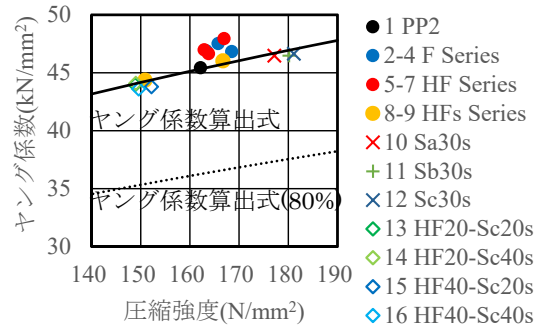


図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

圧縮強度とヤング係数の関係を図-6に示す。図中の実線は鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>7)</sup>のヤング係数の算出式であり、破線で示すように算出式で計算される値の80%以上の範囲にあることが規定されている。本実験結果は算出式と同等であり、80%以上の範囲にあることが分かった。

### 3.3 曲げタフネス試験結果

#### (1) 荷重-たわみ曲線

荷重と載荷点鉛直変位の関係を図-7(a)～(e)に示す。供試体を各3体用いて行ったが、代表として1体の試験結果を示した。ポリプロピレン短繊維のみ混入したPP2は、最大荷重に到達した直後から荷重が急激に低下した。鋼繊維を混入したケースは、いずれも最大荷重に到達した後、緩やかに荷重が低下した。特に、鋼繊維Fを60kg/m<sup>3</sup>以上、鋼繊維HFを30kg/m<sup>3</sup>以上用いたケースについては、ストレート型鋼繊維を30kg/m<sup>3</sup>用いたケースに比べて、ひび割れ発生後に載荷荷重が緩やかに上昇し、最大荷重に到達した後も緩やかに荷重が低下した。これは、鋼繊維FおよびHFの繊維長が長く、形状が両端フック型であることから、短いストレート型鋼繊維に比べて、ひび割れが進化した際の引き抜き抵抗が大きく、架橋効果が高いためと考えられる。また、鋼繊維HFとScを組み合わせたハイブリッド型は、複合効果によって高靱性な破壊現象を示した。なお、等曲げモーメント区間内のひび割れ本数については、鋼繊維を混入していないNo.1で1本、鋼繊維を混入したNo.2～15で1～2本であったが、鋼繊維HFと

Scを40kg/m<sup>3</sup>ずつ組み合わせたNo.16では4本であった。

#### (2) 曲げ強度

初期ひび割れ発生時における強度と曲げ強度の各3体平均値を図-8に示す。鋼繊維のひび割れ架橋効果により、ひび割れ発生強度と曲げ強度との間に差が生じて、曲げ強度が高くなることが期待できる。鋼繊維Fは60kg/m<sup>3</sup>以上、HFは30kg/m<sup>3</sup>以上、ストレート型鋼繊維は30kg/m<sup>3</sup>で、ひび割れ発生強度と曲げ強度との間に差が生じ、曲げ強度が高くなることが確認できた。鋼繊維HFとScのハイブリッド型における差は大きく、特にHF40-Sc40の曲げ強度はひび割れ発生強度よりも6.1N/mm<sup>2</sup>増大した。

HF20とHF20s, HF30とHF30sをそれぞれ比較すると、ひび割れ発生強度と曲げ強度との差は粗骨材の最大寸法が小さいHF Seriesの方が若干大きい。曲げ強度は同等であった。

#### (3) 曲げ靱性係数

たわみがスパンの1/150となるまでの荷重-たわみ曲線下の面積を曲げタフネス $T_b(N \cdot mm)$ とし、曲げ靱性係数 $f_b(N/mm^2)$ を式(1)より求めた。曲げ靱性係数が大きいほど、曲げ靱性が高い評価となる。

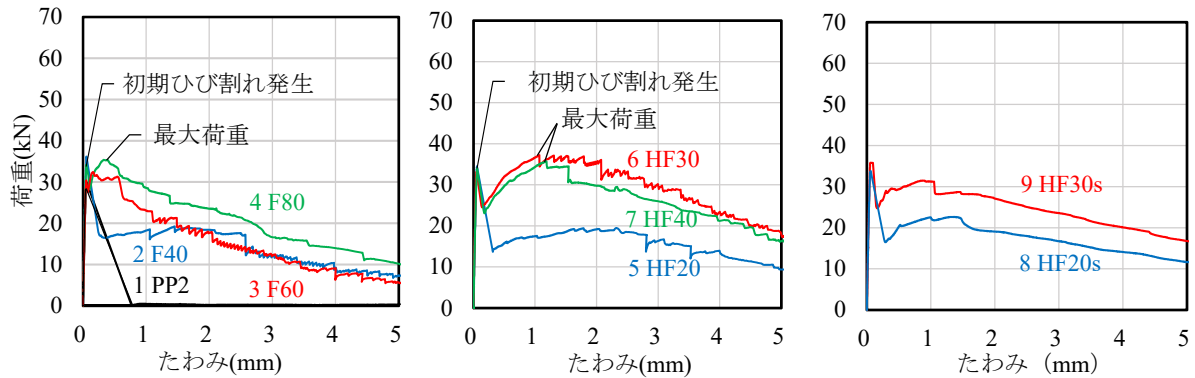
$$f_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{1}{bh^2} \quad (1)$$

$\delta_{tb}$ : たわみ 2mm

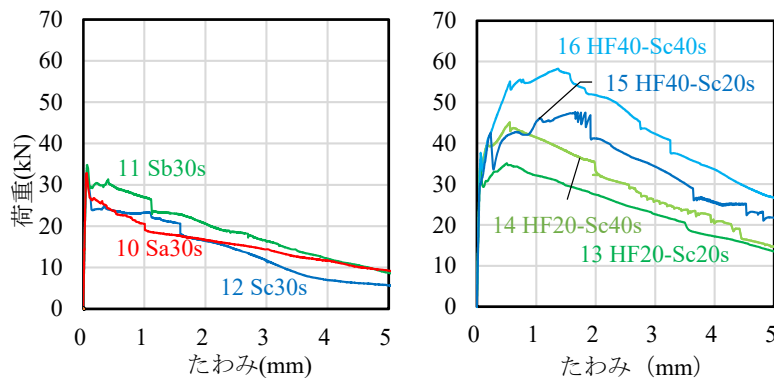
l: スパン 300mm

b: 破壊断面の幅(mm)

h: 破壊断面の高さ(mm)



(a) PP2 と F Series (b) HF Series (c) HFs Series



(d) ストレート型鋼繊維 (e) 鋼繊維ハイブリッド型

図-7 曲げタフネス試験結果

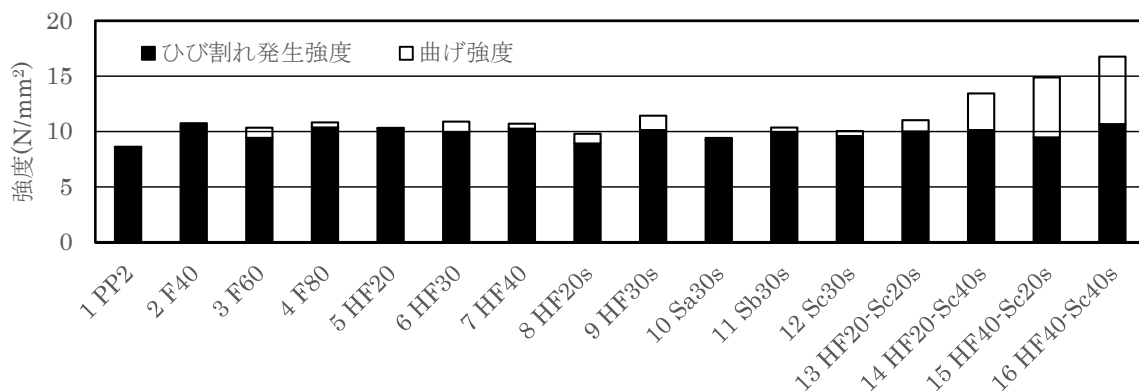


図-8 ひび割れ発生強度と曲げ強度

曲げ靱性係数および鋼繊維量の関係を図-9(a)に示す。いずれも鋼繊維を混入したケースの曲げ靱性係数は、鋼繊維を混入していないPP2よりも大きい結果となった。文献<sup>2)</sup>によれば、鋼繊維のアスペクト比が大きいほど、曲げ靱性係数が大きくなる。しかし、図-9(a)のSa30sとSb30sを比較すると、アスペクト比が小さいSbを用いた方が曲げ靱性係数が大きい値となった。本検討範囲においてはアスペクト比による影響がみられなかった。

本実験では、HF SeriesとHF Seriesの曲げ靱性係数は同等であった。よって、粗骨材の最大寸法の違いによる

曲げ靱性係数への影響は限定的であることが示唆された。

鋼繊維を1種類用いたNo.2～No.12の中で、鋼繊維強度が高いHFは鋼繊維量30kg/m<sup>3</sup>において最も高い靱性能を有することがわかった。よって、鋼繊維の引張強度が曲げ靱性係数に及ぼす影響は大きいと推察される。

そこで、鋼繊維の引張強度と混入量の積が曲げ靱性係数の関係に着目すると、図-9(b)に示すように概ね比例関係を示した。両端フック型鋼繊維FとHFを用いた場合には、既往の研究<sup>3)</sup>と同様に、曲げ靱性係数は鋼繊維の引張強度と混入量の積で評価できた。一方、ストレート型

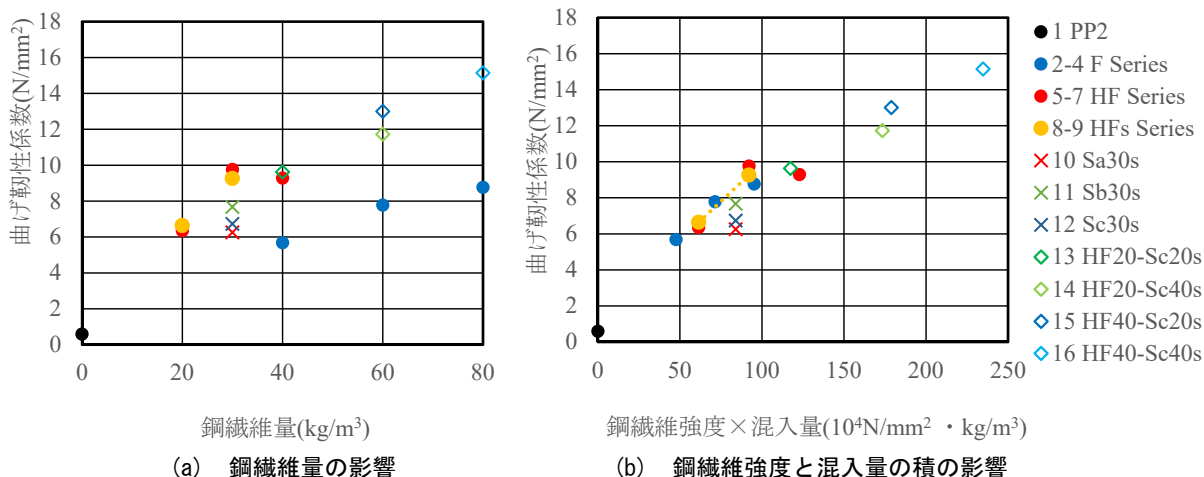


図-9 曲げ靱性係数

鋼繊維(Sa, Sb, Sc)を用いたケースの曲げ靱性係数については、HF Seriesによりも相対的に小さかった。

高い靱性が得られることを期待して、鋼繊維HFとScのハイブリッド型を検討し、各1種類用いたケースと比べて、大きい曲げ靱性係を得ることができた。これは、図-10に示すように、HFがひび割れ架橋する際に破碎される部分をScが補強し、靱性が向上したと考える。

以上より、鋼繊維Fよりも引張強度が高い鋼繊維を用いることで、40kg/m<sup>3</sup>よりも少ない量で、F40よりも高い曲げ靱性が得られることを確認した。また、曲げ靱性については、鋼繊維長が長く、両端フック型の鋼繊維が有効であると考えられる。

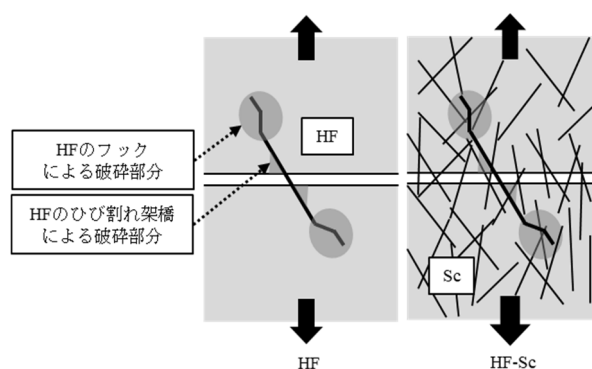


図-10 繊維の複合効果

#### 4. まとめ

鋼繊維の種類と混入量が、ポリプロピレン短繊維を混入した超高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響を実験的に検討した。結果を以下にまとめる。

- 1) 鋼繊維混入によりスランプフローは低下するが、鋼繊維と粗骨材は均一に拡がることを確認した。
- 2) 鋼繊維混入により圧縮強度とヤング係数はばらつきが大きくなり、曲げ強度は高く、曲げ靱性係数は大きくなった。
- 3) 曲げ靱性係数は、鋼繊維強度と混入量の積に概ね比例することがわかった。
- 4) 両端フック型鋼繊維を用いたケースの曲げ靱性係数は、ストレート型鋼繊維を用いたケースよりも大きい傾向にあった。
- 5) 2種類の鋼繊維を組み合わせることで高靱性を得られたが、流動性の確保に課題が残る。

#### 参考文献

- 1) 三井健郎, 小島正朗, 米澤敏男, 菅田昌宏, 三橋博三: 設計基準強度 150~200N/mm<sup>2</sup> 超高強度繊維補

- 2) 佐々木亘: 種々の短繊維を用いた高強度繊維補強コンクリートの材料特性と配合設計に関する研究, 京都大学博士論文, 2014
- 3) 西岡由紀子, 本間大輔, 小島正朗: 鋼繊維形状と混和量が超高強度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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.297-302, 2018
- 4) 井戸康浩, 菊田繁美, 梅本宗宏, 端直人: 鋼繊維補強した超高強度コンクリートの基礎的研究, 日本建築学会大会(中国)梗概集, pp.527-528, 2008
- 5) 鈴木彩夏, 増田安彦, 吉田理紗, 神代泰道: Fc120N級鋼繊維補強コンクリートを用いたRC造柱の曲げ性状に関する研究コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.601-606, 2019
- 6) 吉田理紗, 川西貴士, 平田隆祥: ポリプロピレン短繊維を混入したセグメント用コンクリートの流動性向上に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.291-296, 2018
- 7) 日本建築学会大会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018