

# 鋼繊維の種類と混入量および粗骨材寸法が 超高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響

吉 田 理 紗      神 代 泰 道

## Effects of Steel Fiber and Coarse Aggregate Size on Properties of Ultra-High-Strength Concrete Using Steel Fiber and Polypropylene Fiber

Risa Yoshida      Koshiro Yasumichi

### Abstract

Although ultra-high strength concrete is applied to high-rise buildings, it has the problem of brittle fracture properties. It is known that its toughness can be improved by steel fibers; however, an appropriate method for selecting steel fibers that can prevent brittle fracture is not known. There are numerous unclear points regarding the properties when steel fibers and polypropylene fibers are used in combination. The effects of the steel fiber and coarse aggregate size on the properties of ultra-high-strength concrete mixed with polypropylene fibers were experimentally investigated. Thus, we could develop an ultra-high strength concrete with excellent toughness and fire resistance by mixing steel fibers, ensuring high fluidity and strength characteristics. By applying this concrete to buildings, safety could be secured at a high level and an added value could be created.

### 概 要

建物の高層化に伴い、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は靱性確保という点で課題が残る。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いるが、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、ポリプロピレン短繊維を併用した場合の諸性状への影響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および粗骨材寸法が、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。その結果、鋼繊維を混入することによって靱性・耐火性に優れ、高い流動性・強度特性を確保した超高強度コンクリートを開発することができた。建物に適用することで、高い水準で安全性を確保でき、付加価値を創出することができる。

## 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は靱性確保という点で課題が残る。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<sup>例え1)</sup>、近年では超高強度コンクリートを用いた柱部材に、鋼繊維が混入されることもある<sup>2)</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)~5)</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曲げ靱性に及ぼす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、鋼繊維仕様のパラメータによって予測できれば、鋼繊維種類と混入量について合理的な選定が可能となる。

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おり、既報<sup>6) 7)</sup>ではポリプロピレン短繊維の繊維径が超高強度コンクリートの耐火性に及ぼす影響を検討した。しかし、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、5種類の鋼繊維と混入量および粗骨材寸法が、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。実施した試験は、フレッシュ試験および圧縮強度試験、曲げタフネス試験、耐火試験である。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料およびコンクリート調査

鋼繊維の形状と仕様をPhoto 1とTable 1に示す。既往の研究<sup>8) 9)</sup>では、設計基準強度120N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートの柱載荷試験を行い、鋼繊維Fを40kg/m<sup>3</sup>以上混入すれば、脆性的な破壊を防ぐことを確認している。また、

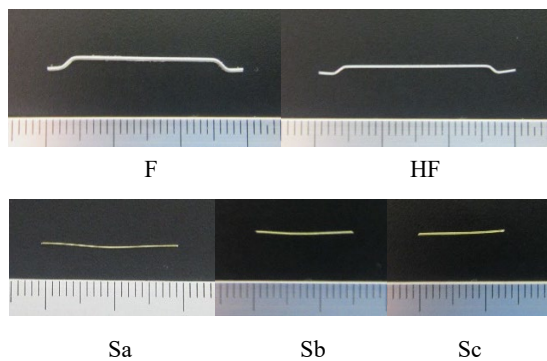


Photo 1 鋼繊維の形状  
Shape of Steel Fiber

Table 2 使用材料  
Concrete Material

| 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，<br>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)，<br>表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup>                            |
| 粗骨材 | G  | 碎石2005，最大寸法20mm，<br>硬質砂岩(茨城県桜川産)，<br>表乾密度2.64g/cm <sup>3</sup> ，実積率61.1% |
|     | Gs | 碎石1505，最大寸法15mm，<br>硬質砂岩(茨城県桜川産)，<br>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><br>繊維径2.2dtex(18μm)，繊維長10mm          |
|     | SF | 鋼繊維，密度7.85 g/cm <sup>3</sup>                                             |

Table 1 鋼繊維の仕様

Specification of Steel Fiber

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

Table 3 コンクリート調合

Concrete Recipe

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

Table 4 鋼繊維量と粗骨材種類，SP添加率  
Steel Fiber Content and Coarse Aggregate Type，  
SP Addition Rate

| No. | case.  | 鋼繊維量(kg/m <sup>3</sup> ) |    |    |    |    | 粗骨<br>材種     | SP<br>(B×%) |
|-----|--------|--------------------------|----|----|----|----|--------------|-------------|
|     |        | F                        | HF | Sa | Sb | Sc |              |             |
| 1   | PP2    | -                        | -  | -  | -  | -  | G<br>(20mm)  | 1.6         |
| 2   | F40    | 40                       | -  | -  | -  | -  |              |             |
| 3   | F60    | 60                       | -  | -  | -  | -  |              |             |
| 4   | F80    | 80                       | -  | -  | -  | -  |              |             |
| 5   | HF20   | -                        | 20 | -  | -  | -  |              |             |
| 6   | HF30   | -                        | 30 | -  | -  | -  |              |             |
| 7   | HF40   | -                        | 40 | -  | -  | -  |              |             |
| 8   | Sa30   | -                        | -  | 30 | -  | -  | Gs<br>(15mm) | 2.0         |
| 9   | HF30Gs | -                        | 30 | -  | -  | -  |              |             |
| 10  | Sa30Gs | -                        | -  | 30 | -  | -  |              |             |
| 11  | Sb30Gs | -                        | -  | -  | 30 | -  |              |             |
| 12  | Sc30Gs | -                        | -  | -  | -  | 30 |              |             |

鋼繊維量が多いほど柱部材の圧壊進展の抑制効果が高いことから，柱部材における靱性能は材料試験における曲げ靱性と相関性が高いことが推察される。

曲げ靱性について，既往の研究<sup>3),4)</sup>では，鋼繊維強度と混入量の積，鋼繊維量とアスペクト比の積で評価されており，鋼繊維量の検討範囲は40 kg/m<sup>3</sup>～120 kg/m<sup>3</sup>であった。

そこで，本報では鋼繊維Fを40 kg/m<sup>3</sup>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，アスペクト比と比表面積が大きい4種類の鋼繊維を用い，少量で同等以上の曲げ靱性が期待し，20 kg/m<sup>3</sup>～40 kg/m<sup>3</sup>の鋼繊維量で曲げ靱性を評価した。

使用材料をTable 2，設計基準強度120N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリート調合をTable 3，鋼繊維量をTable 4に示す。粗骨材については，最大寸法が20mmのGおよび15mmの

Gsを用いた。なお，ポリプロピレン短繊維と鋼繊維はTable 3のコンクリート調合に対して外割で混入した。

Table 4に示すように，鋼繊維Fを40 kg/m<sup>3</sup>～80 kg/m<sup>3</sup>混入したNo. 2～No. 4をF Seriesとした。Photo 1とTable 1に示すように，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よりも引張強度とアスペクト比が高く，比表面積が大きいことから，高い靱性が期待できる。そこで，鋼繊維HFの混入量をF Seriesと比べて少なくし，20 kg/m<sup>3</sup>～40 kg/m<sup>3</sup>としたNo. 5～No. 7をHF Seriesとした。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，引張強度とアスペクト比が高く，比表面積が大きいことから，高い靱性が期待できる。混入量はいずれも30 kg/m<sup>3</sup>とし，形状の違いに

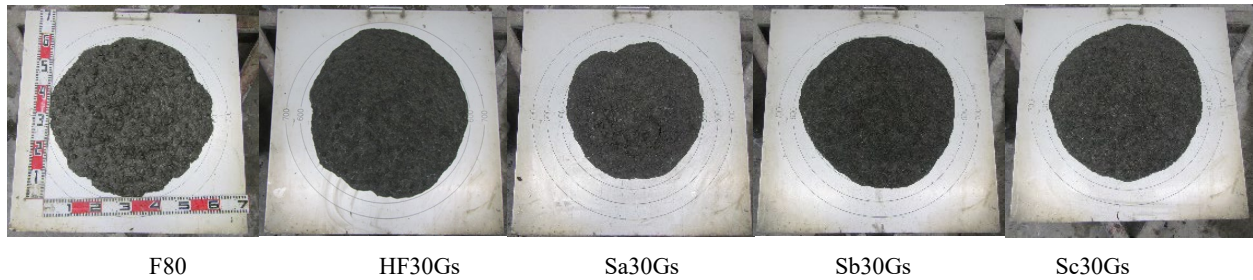


Photo 2 スランプフロー試験  
Slump Flow Test

よる影響を検討した。

鋼繊維F, HFの長さは30mmであるが, 鋼繊維Sa, Sb, Scの長さは20mm以下である。そこで, Table 4のNo. 1～No. 8については最大寸法20mmの粗骨材を用い, No. 9～No. 12については最大寸法15mmの粗骨材を用いた。また, No. 6とNo. 9, No. 8とNo. 10を比較し, 粗骨材寸法の影響を検討した。

コンクリートの練混ぜは, 水平2軸強制練りミキサを用いて, 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について, スランプフロー試験はJIS A 1150, 空気量の測定は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以上とした。空気量の目標値は $2 \pm 1\%$ とした。

圧縮強度試験はJIS A 1108, ヤング係数はJIS A 1149により, 材齢28日まで標準水中養生として,  $\phi 100 \times 200$ mm円柱試験体を各3体用いて行った。

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 $100 \times 100 \times 400$ mm角柱試験体を各3体用いて行った。

耐火試験はISO834に規定される標準加熱曲線にしたがって, 耐火炉で実施した。 $\phi 150 \times 300$ mm円柱試験体を各2体用いて, 材齢28日まで封かん養生とし, 材齢76日～143日まで気中養生とした。加熱継続時間は60分として,  $945^\circ\text{C}$ に達した後は自然冷却とした。また, コンクリートの含水率の測定はJIS A 1476にしたがい, 耐火試験体と同一養生かつ同一材齢の $\phi 100 \times 200$ mm円柱試験体を各1体用いて行った。

いずれも試験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

鋼繊維Fを $80\text{kg}/\text{m}^3$ 用いた最多のケースと, 鋼繊維量を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 一定として, HF, Sa, Sb, Scを用いたケースのスランプフロー試験後の状況をPhoto 2に示す。いずれも,

鋼繊維と粗骨材が均一に拡がっており, 繊維が絡み合っ  
てボール状になるファイバーボールや材料分離はみられ  
なかった。なお, 他ケースについても同様であった。

スランプフローについて, 鋼繊維の混入量, 表面積, 本数, 長さとの関係をFig. 1～Fig. 3, 空気量をFig. 4に示す。ポリプロピレン短繊維のみ混入したPP2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ケース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,  $48.5\text{cm} \sim 60.0\text{cm}$ の範囲にあり, 目標の42.5cm以上を確保できた。

一般に, 鋼繊維量が増えるほどコンクリートの流動性は低下する<sup>3), 5)</sup>。また, 既往の検討<sup>7)</sup>では, ポリプロピレン短繊維の表面積が増加するほどスランプフローが低下した。Table 4に示すように, 高性能減水剤(以下, SP)添加率と粗骨材最大寸法を同一としたNo.1～No.7において, Fig. 1～Fig. 2から, HF Series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が, 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, アスペクト比が低いことから, 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。

SP添加率と粗骨材最大寸法を同一として, ストレート型鋼繊維を用いたSa30Gs, Sb30Gs, Sc30Gsについては, Fig. 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, Scの鋼繊維表面積は大きい  
が, 繊維長が骨材の最大寸法よりも短いため, コンクリートの流動性の低下が小さいと考えられる。また, SaとSbを比較すると, 鋼繊維表面積は同等であるが, アスペクト比が大きいSaを用いた方がスランプフローは小さかった。

Table 4に示すように, SP添加率と粗骨材最大寸法, 鋼繊維量を同一としたNo. 9～No. 12について, Fig. 3から粗骨材最大寸法よりも繊維長が短いScを用いたケースと, 繊維長が長いHFを用いたケースのスランプフローは大きい傾向にあった。粗骨材最大寸法と同等あるいは5mm長いSaとSbを用いたケースはスランプフローが小さい傾向にあった。これは, 流動する際に鋼繊維と粗骨材が互いに噛み合っ  
て, 流動性が低下するためと考えられるが, 今後検証が必要である。

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 $2 \pm 1\%$

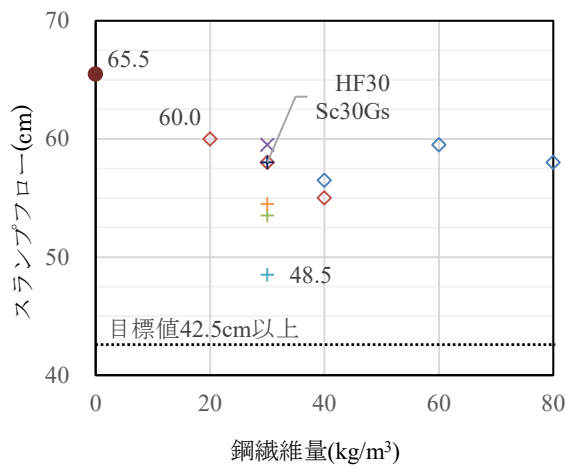


Fig. 1 鋼繊維量の影響  
Influence of the Amount of Steel Fiber

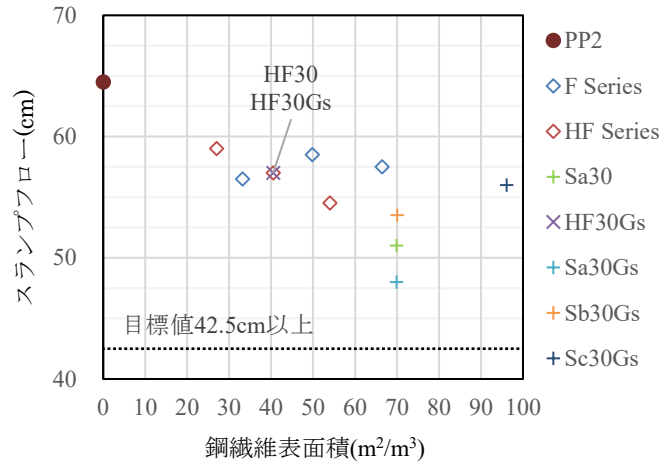


Fig. 2 鋼繊維表面積の影響  
Influence of steel fiber surface area

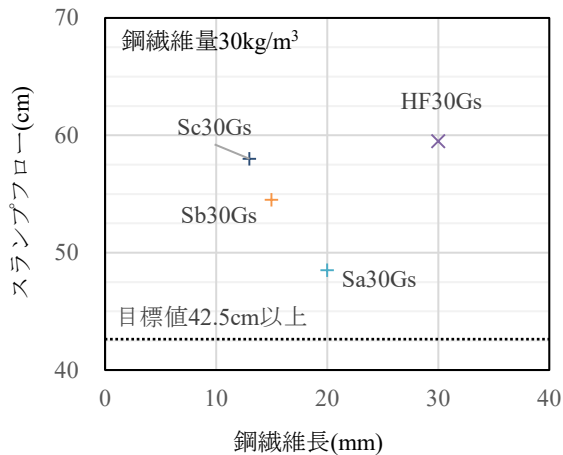


Fig. 3 鋼繊維長の影響  
Influence of Steel Fiber Length

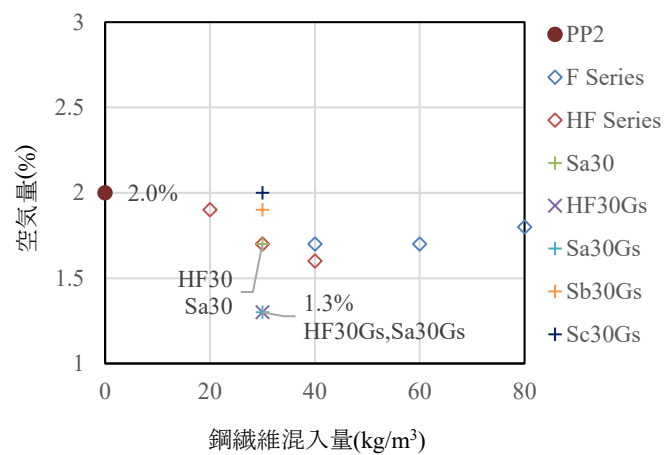


Fig. 4 空気量  
Air Volume

と目標値を満足した。

## 3.2 圧縮強度試験結果

3.2.1 圧縮強度 载荷後試験体をPhoto 3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、HF30とSa30Gsは鋼繊維によって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。なお、鋼繊維を混入した他ケースについても同様であった。

圧縮強度の3体平均値をFig. 5に示す。本検討範囲では、いずれも鋼繊維を混入したケースの圧縮強度は、鋼繊維を混入していないPP2よりも高い結果となった。特に、鋼繊維量30kg/m³におけるケースを比較すると、鋼繊維形状がストレート型で、繊維長が短いほど、圧縮強度が高い傾向にあった。既往の検討では、圧縮強度について鋼繊維F、HFを用いた場合には若干低下し<sup>3)</sup>、鋼繊維Scを用いた場合には高くなることが報告されている<sup>5)</sup>。本実験で

は、Scを用いた場合は既往の研究の傾向と一致したが、F、HFを用いた場合には異なる傾向を示した。圧縮強度への影響は定かでないが、ばらつきの原因になることが推察され、今後の更なる検討が必要である。

粗骨材の最大寸法が20mmのHF30と15mmのHF30Gs、20mmのSa30と15mmのSa30Gsをそれぞれ比較すると、最大寸法15mmの粗骨材を用いた方が、圧縮強度は高い傾向が認められた。

3.2.2 ヤング係数 Fig. 6にヤング係数の3体平均値を示す。本検討範囲では、いずれも鋼繊維を混入したケースのヤング係数は、PP2よりも高い結果となった。特に、鋼繊維F、HFを用いた場合については、鋼繊維量が多いほどヤング係数が高い傾向にあったが、既往の検討ではヤング係数が若干低下することが報告されており<sup>3)</sup>、異なる傾向を示した。このことから、鋼繊維F、HFがヤング係数に及ぼす影響は定かでないが、ばらつきの原因



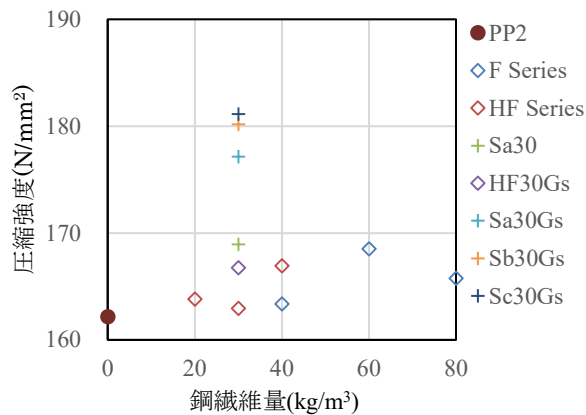


Fig. 5 圧縮強度試験結果  
Compressive Strength

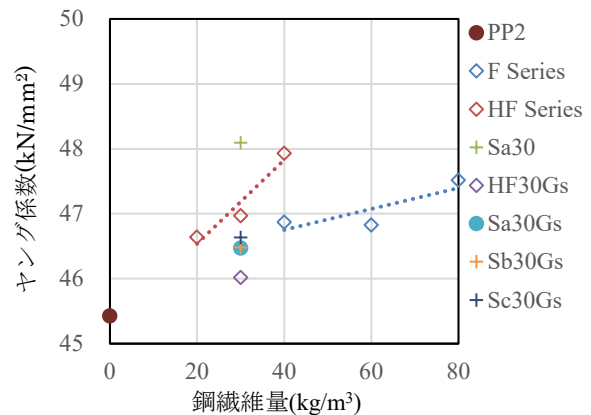


Fig. 6 ヤング係数  
Static Modulus of Elasticity

になると考えられ、今後の更なる検討が必要である。

粗骨材の最大寸法が20mmのHF30と15mmのHF30Gs、20mmのSa30と15mmのSa30Gsをそれぞれ比較すると、最大寸法20mmの粗骨材を用いた方が、ヤング係数は高い傾向が認められた。

### 3.3 曲げタフネス試験結果

曲げタフネス試験における荷重と載荷点鉛直変位の関係をFig. 7(a)～(e)に示す。鋼繊維を混入していない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/m³以上、鋼繊維HFを30kg/m³以上用いたケースでは、ストレート型鋼繊維を30kg/m³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、高靱性セメント系材料に特徴的な破壊現象を示した。これは、鋼繊維F、HFの繊維長が長く、形状が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、ひび割れが進展した際の引き抜き抵抗が高く、架橋効果が高いためと考えられる。

**3.3.1 曲げ強度** 初期のひび割れ発生強度と曲げ強度をFig. 8に示す。ひび割れ発生強度は、繊維を除くコンクリート強度に依存するが、鋼繊維のひび割れ架橋効果によって、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を用いた場合は混入量60kg/m³以上、鋼繊維HFを用いた場合は30kg/m³以上、ストレート型鋼繊維は30kg/m³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。

HF30とHF30Gs、Sa30とSa30Gsの曲げ強度をそれぞれ比較すると、HFを用いたケースでは粗骨材の最大寸法が小さいHF30Gsの方が高く、Saを用いたケースでは粗骨材の最大寸法が大きいSa30の方が高い結果となった。このことから、使用する鋼繊維により、粗骨材径の最大寸法の違いが曲げ強度に及ぼす影響は異なることがわかった。

**3.3.2 曲げ靱性係数** ここで、曲げ靱性係数は式(1)より算出し、値が大きいほど曲げ靱性が高い評価となる。

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

$f_b$  : 曲げ靱性係数(N/mm²)

$T_b$  : Fig.7のたわみ2mmまでの面積(N・mm)

$\delta_{tb}$  : 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)

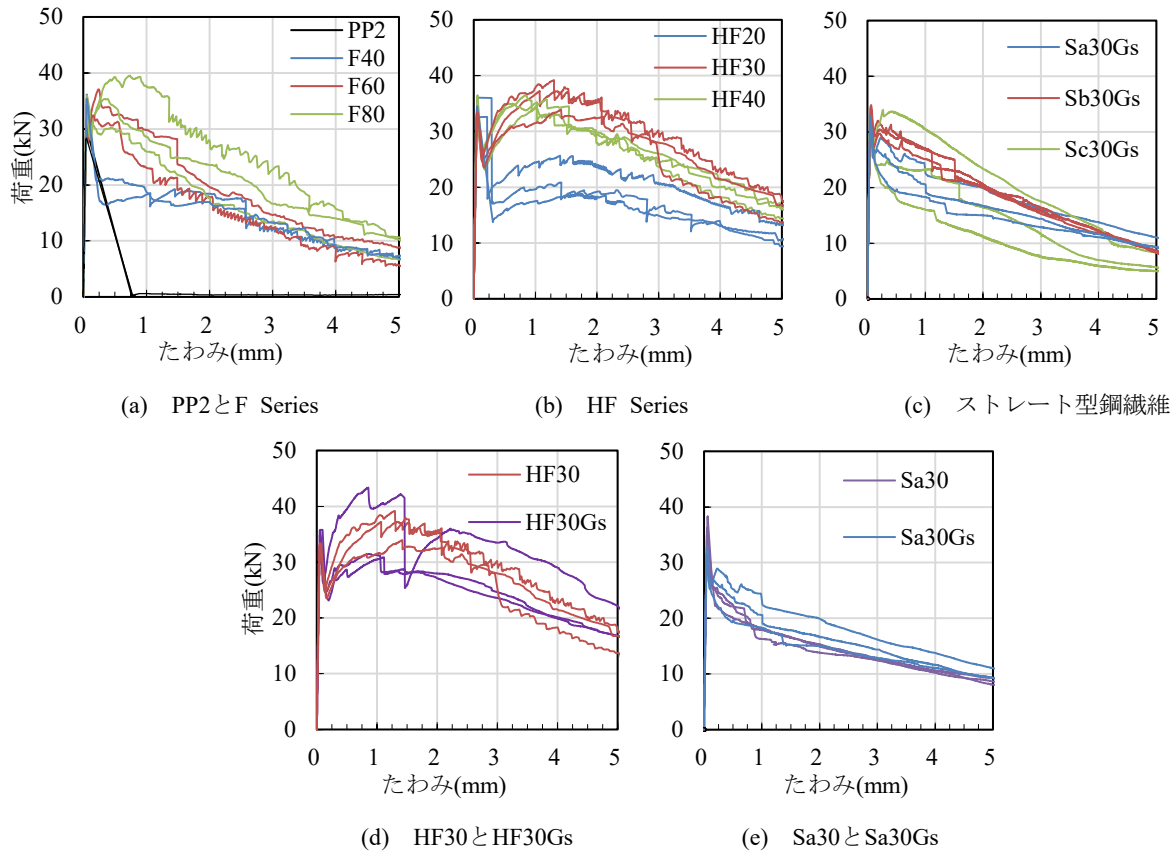


Fig. 7 曲げタフネス試験結果

Bending Toughness Test Results

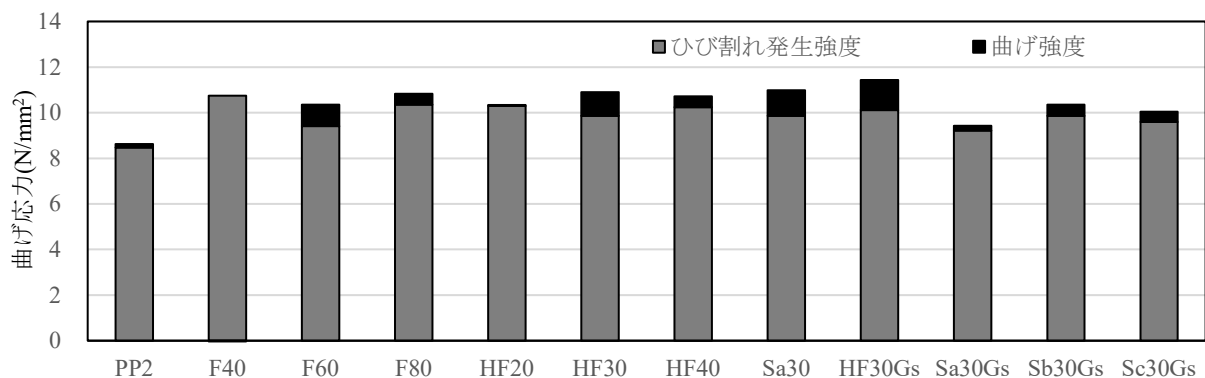


Fig. 8 ひび割れ発生強度と曲げ強度

Cracking Strength and Bending Strength

曲げ靱性係数をFig. 9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よりも高い結果となった。曲げ靱性係数と鋼繊維量の関係をFig. 10(a)に示す。F Seriesは鋼繊維量の増加に伴い、曲げ靱性係数が高くなる傾向を示した。一方で、HF Seriesは鋼繊維量30kg/m<sup>3</sup>で頭打ちとなったが、鋼繊維自体の引張強度が高いHFは鋼繊維量30kg/m<sup>3</sup>において、本検討範囲では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に及ぼす影響をFig. 10(b)に示す。Fig. 10(b)において、最小二乗法により算出したF SeriesとHF Seriesの各近似式は、Fig. 10(a)における近似式よりも近接しており、概ね比例関係にあることがわかった。したがって、フック型鋼繊維FとHFを用いた場合には、既往の研究<sup>4)</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ることがわかった。一方、ストレート型鋼繊維の引張強度と混入量の積は $84 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{kg/m}^3$ であるが、このときの曲げ靱性係数はF SeriesとHF Seriesによる近似式

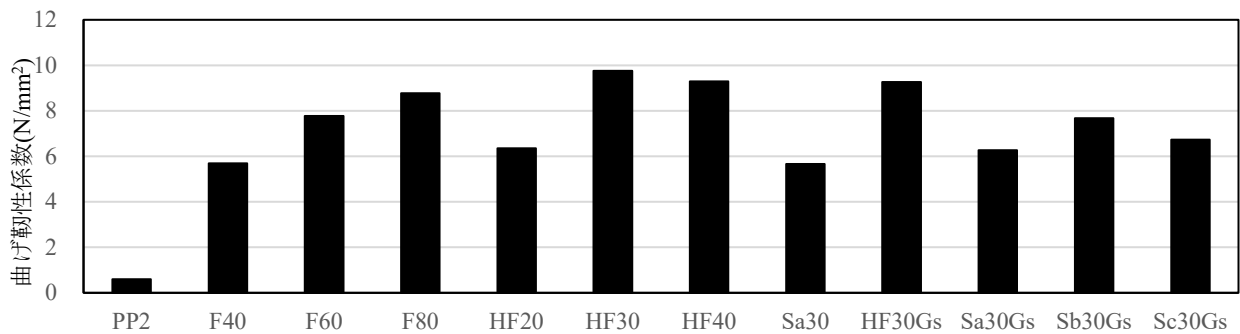


Fig. 9 曲げ靱性係数  
Bending Toughness Coefficient

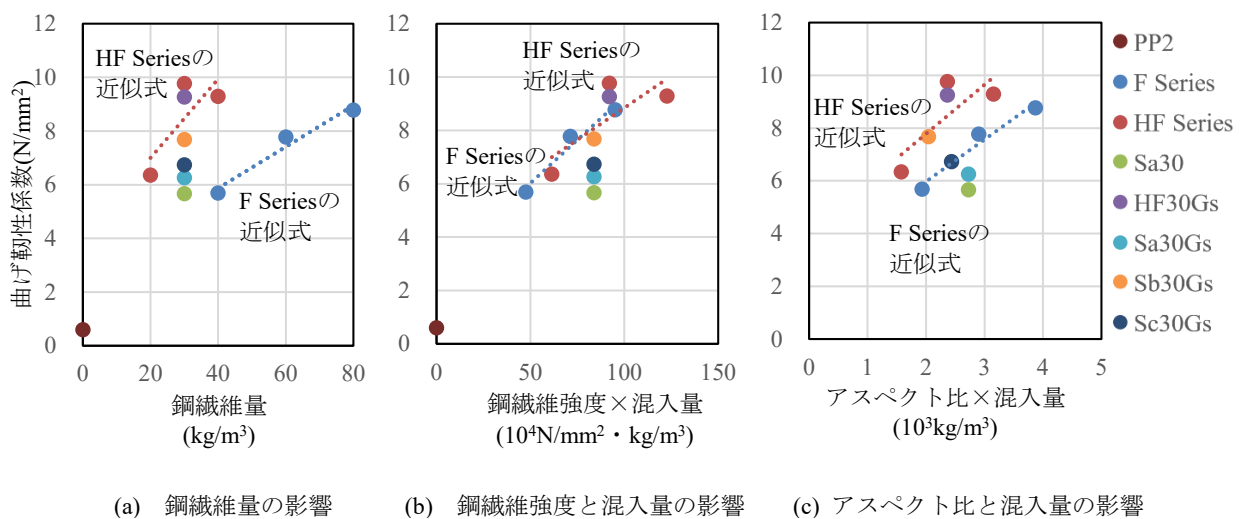


Fig. 10 曲げ靱性係数に及ぼす鋼繊維の影響  
Effect of Steel Fiber on Bending Toughness Coefficient

から求まる値よりも低くなっている。以上から、繊維長は長く、形状はフック型である方が、ひび割れ架橋効果が高く、曲げ靱性係数が高いと考えられる。

一般に、鋼繊維のアスペクト比が高いほどコンクリートの靱性が高くなることが知られており、既往の研究<sup>3)</sup>では、曲げ靱性係数を鋼繊維のアスペクト比と混入量の積で評価している。Fig. 10(c)のSa30GsとSb30Gsを比較すると、アスペクト比が低いSbを用いた方が曲げ靱性係数が高い値となり、本検討範囲ではアスペクト比と混入量の積と曲げ靱性係数の相関性は低かった。ここで、既往の研究<sup>3)</sup>で検討されるアスペクト比の範囲は48~79であるが、Saのアスペクト比は91と非常に高く、アスペクト比による影響が頭打ちとなった可能性がある。今後の検討課題としたい。

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/m³よりも少ない量で、F40と同等以上の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、フック型の鋼繊維が有効であると考えられる。

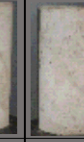
HF30とHF30Gs、Sa30とSa30Gsの曲げ靱性係数をそれぞれ比較した。鋼繊維長が粗骨材の最大寸法よりも長いHFを用いた場合には、粗骨材寸法が大きいHF30の方が若干大きく、鋼繊維長が20mmと短いSaを用いた場合には粗骨材寸法が小さいSa30Gsの方が若干大きかった。したがって、使用する鋼繊維により、粗骨材の最大寸法の違いが曲げ靱性係数に及ぼす影響は異なることが示唆された。

### 3.4 耐火試験結果

耐火試験結果をTable 5に示す。含水率については、鋼繊維の種類や混入量による影響はみられず、3.3%~4.2%であった。いずれのケースにおいても、コンクリート試験体表面層の爆裂を抑制できることを確認した。

特に、F80、HF30、HF40、Sa30は完全に爆裂防止することができた。本検討範囲においては、鋼繊維量が多く、粗骨材寸法が大きい方が、爆裂を抑える効果が高い傾向が認められた。

Table 5 耐火試験結果  
Fire Resistance Test Results

| No.    | 1                                                                                 | 2                                                                                 | 3                                                                                 | 4                                                                                 | 5                                                                                 | 6                                                                                 | 7                                                                                 | 8                                                                                  | 9                                                                                   | 10                                                                                  | 11                                                                                  | 12                                                                                  |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| case   | PP2                                                                               | F40                                                                               | F60                                                                               | F80                                                                               | HF20                                                                              | HF30                                                                              | HF40                                                                              | Sa30                                                                               | HF30Gs                                                                              | Sa30Gs                                                                              | Sb30Gs                                                                              | Sc30Gs                                                                              |
| 含水率(%) | 4.2                                                                               | 3.9                                                                               | 3.3                                                                               | 4.1                                                                               | 3.7                                                                               | 4.0                                                                               | 3.5                                                                               | 3.5                                                                                | 3.7                                                                                 | 3.6                                                                                 | 3.5                                                                                 | 3.5                                                                                 |
| 試験体1   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 試験体2   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

#### 4. まとめ

鋼繊維の種類と混入量および粗骨材寸法が、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、48.5～60.0cmを確保でき、鋼繊維と粗骨材は均一に拡がることを確認した。
- 2) 本検討範囲では、鋼繊維混入により、圧縮強度とヤング係数、曲げ強度は高くなり、曲げ靱性係数は大きくなった。
- 3) フック型鋼繊維を用いたケースの曲げ靱性係数は、鋼繊維強度と混入量の積に概ね比例し、鋼繊維強度が高い種類の繊維を用いれば、少ない混入量で所定の曲げ靱性係数を得られる。
- 4) 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高い傾向にあった。
- 5) 耐火試験結果より、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は爆裂を抑制できることを確認した。

以上から、鋼繊維の混入によって脆性破壊を防ぐことができ、流動性・強度特性・耐火性にも優れる超高強度コンクリートを開発することができた。建物に適用することで、高い水準で安全性を確保でき、付加価値を創出することができる。

#### 参考文献

- 1) 吉田理紗，菊田貴恒，西脇智哉，三橋博三：ハイブリッド型繊維補強セメント材料の引張性状に及ぼす繊維

維の複合効果に関する実験的検討，Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.552-559, 2012

- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 吉田理紗，神代泰道：ポリプロピレン短繊維の繊維径が超高強度コンクリートの耐火性に及ぼす影響，日本建築学会大会(東北)梗概集，pp.685-686, 2018
- 7) 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
- 8) 石川裕次，掛悟史，太田義弘，小倉史崇，麻生直木：高強度SFRC 柱の曲げ性能に関する実験的研究(その1-2)，日本建築学会大会(東北)梗概集，pp.305-308, 2018
- 9) 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