

Fc200N/mm² 級超高強度コンクリートの実用化に向けた基礎検討

李 曉赫* 高橋 祐一*
鶴見 淳也*

要 旨

近年、設計基準強度 200N/mm² 級の超高強度コンクリートが超高層 RC 造建築物の下部柱に適用されている。このような強度が高く、水セメント比が小さいコンクリートは脆性的な破壊を起しやすく、火災時に爆裂しやすいといった課題がある。対策として、前者には鋼繊維、後者にはポリプロピレン製短繊維を使用することが多い。しかし、既往の研究では、鋼繊維の使用が強度に影響を及ぼすとの報告がされている。また、ポリプロピレン製短繊維を使用すると流動性が低下する傾向にあるものの、鋼繊維とポリプロピレン製短繊維を併用した事例についての報告は少ない。

そこで、本研究は設計基準強度 200N/mm² 級の超高強度コンクリートの実用化に向けた基礎検討として、鋼繊維とポリプロピレン製短繊維をそれぞれ単独で使用した調合および併用した調合を対象に、フレッシュ性状と力学特性に及ぼす各種繊維の影響を室内実験で確認した。また、繊維の形状と混入量が設計基準強度 200N/mm² 級超高強度コンクリートの爆裂抑制効果に及ぼす影響を簡易耐火試験で確認した。本報では、その結果について報告する。

1. はじめに

近年、設計基準強度 200 N/mm²(以下、Fc200)級の超高強度コンクリートが超高層 RC 造建築物の下部柱に適用されている。このようなコンクリートの使用によって、低層階にある柱部材の断面積を小さくすることが可能となり、設計上の自由度が高くなる。Fc200 級のコンクリートは強度が高く、水セメント比が小さい、コンクリートは脆性的な破壊を起しやすい、火災時にコンクリート内部の圧力と水蒸気が抜けずに爆裂しやすいといった課題がある。脆性的な破壊の抑制対策として、高い靱性を持つ鋼繊維を使用することが多い。また、火災時に発生する爆裂の抑制対策として、ポリプロピレン製短繊維(以下、PP 繊維)を使用することが多い。PP 繊維は、火災時に高温によって熔融し、形成された空隙からコンクリート内部の圧力と水蒸気が放出されるため、爆裂が抑制できるとされている。しかし、既往の研究では、鋼繊維の混入はコンクリート圧縮強度に影響を及ぼすとの報告がされている¹⁾。また、PP 繊維を使用すると、流動性が低下する傾向にある。さらに、火災時の爆裂を抑制する効果を高める目的で鋼繊維と PP 繊維を併用した事例²⁾もあるものの、その報告は少ない。

そこで、本研究は、Fc200 級の超高強度コンクリートの実用化に向けて、鋼繊維および PP 繊維の形状や混入量がコンクリートのフレッシュ性状と力学特性に及ぼす影響を確認する目的で室内実験を行った。また、各種繊維の混入が Fc200 級の超高強度コンクリートの爆裂抑制効果に及ぼす影響を簡易耐火試験で確認した。本報では、その結果について報

告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1に示す。また、表中に各材料の記号も併せて示す。鋼繊維の形状がコンクリートのフレッシュ性状および力学特性に及ぼす影響を比較するために、φ0.20mm、長さ13mm、直線型の STF1 およびφ0.62mm、長さ30mm、波形の STF2 の2種類とした。PP 繊維はφ41μm、長さ12mm のものを使用した。

2.2 調合

表-2に調合の概要を示す。各種繊維は外割で混入した。また、高性能減水剤の添加率は全ての調合において B×1.90%とした。

表-1 使用材料

名称	種類	記号	備考
セメント	シリカフェウム混合セメント	SFC	シリカフェウム混合率:10%
細骨材	砕砂(硬質砂岩)	S	茨城県桜川市産
粗骨材	碎石 2005(硬質砂岩)	G	茨城県桜川市産
混和材(結合材)	シリカフェウム	SF	電融ジルコニア
混和材	鋼繊維	STF1	φ0.20mm・長さ13mm 直線
		STF2	φ0.62mm・長さ30mm 波形
	ポリプロピレン製短繊維	PP	φ41μm・長さ12mm
化学混和剤	高性能減水剤	SP	—
	収縮低減剤	SR	—

* 技術研究所 建築技術開発部

表-2 調合

調合名*1	W/B (%)	単位量(kg/m ³)						混入量 (vol%)		SP (B×%)
		W	C	SF	S	G	SR	STF	PP	
BASE								—		1.90
STF1-05								0.50		
STF1-075								0.75		
STF1-10								1.00	—	
STF2-05								0.50		
STF2-10	12.5	140	1080	120	317	824	10	1.00		
STF2-125								1.25		
PP-025								—	0.25	
PP-030								—	0.30	
PP-035								—	0.35	
STF2-PP								1.0	0.30	

*1: BASE: 繊維無混入のコンクリート、STF1・STF2・PP: 繊維の種類、025～125: 繊維の混入量 0.25～1.25 (vol%)。

2.3 練混ぜ

練混ぜは、強制二軸練りミキサにより実施した。手順および時間は図-1に示す通りとした。

2.4 試験項目および試験体の養生

試験項目および試験方法を表-3に示す。スランブフローの目標値(許容差)は繊維無混入のコンクリート(以下、BASE)で 75cm(±10cm)、繊維を混入したコンクリートで 70cm(±10cm)とした。各調合の空気量の目標値(許容差)は 1.0%(+1.0%、-0.5%)とした。

硬化コンクリート試験に使用する供試体は打込み後から材齢 2 日まで 20℃の室内で静置した。材齢 2 日で脱型後、供試体を 40℃に設定した恒温水槽にて材齢 28 日まで養生した。

簡易耐火試験の対象は、BASE、STF2-010、PP-025、PP-030、PP-035 および STF2-PP の 6 調合(各 n=2)とした。供試体の養生は、材齢 28 日まで硬化コンクリート試験用供試体と同一方法で養生した後、20℃の室内にて試験日(材齢 243 日)まで水に触れないように注意して気中養生を行った。なお、簡易耐火試験の前に高周波容量式コンクリート水分計で供試体表面の含水率を測定した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート

3.1.1 スランブフロー

各種繊維の混入量とスランブフローの関係を図-2に示す。なお、STF2-PP の繊維混入量は鋼繊維と PP 繊維の混入量を合計した値とした(以降、同様である)。鋼繊維の形状が及ぼす影響をみると、径の太い STF2 を混入した調合よりも、径の細い STF1 を混入した調合のフローロスがやや大きい。これは、STF1 の径が細く、鋼繊維に付着するペーストの量が多くなり、流動性に寄与するペーストが少なくなるためと考えられる。また、鋼繊維の混入量が及ぼす影響をみると、どちらの鋼繊維を使用しても、混入量の増加に伴ってスランブフローが低下する傾向にあった。

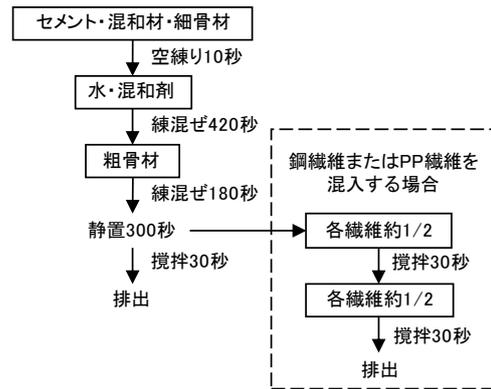


図-1 練混ぜ手順

表-3 試験項目および試験方法

試験名	試験項目	試験方法	備考
フレッシュコンクリート試験	スランブフロー	JIS A 1150	—
	空気量	JIS A 1128	—
	コンクリート温度	JIS A 1156	5℃以上、35℃以下
硬化コンクリート試験	圧縮強度	JIS A 1108	φ 100mm×H200mm 材齢 28 日まで 40℃水中養生
	静弾性係数	JIS A 1149	
	曲げ強度 曲げタフネス	JCI-SF4	□100mm×L400mm 材齢 28 日まで 40℃水中養生
簡易耐火試験	供試体による加熱試験	1 時間加熱 2 時間冷却	φ 150mm×H300mm 試験日まで気中養生 加熱は ISO-834 標準温度曲線による

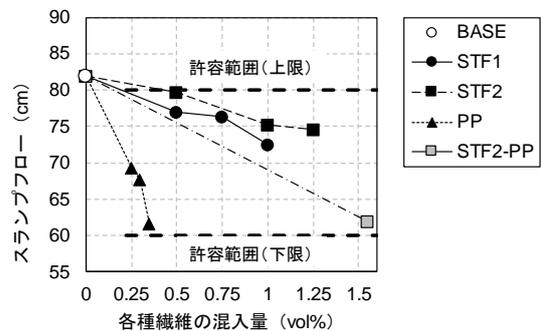


図-2 各種繊維の混入量とスランブフローの関係

PP 繊維の混入が及ぼす影響をみると、混入量が増加するほど、スランブフローが低下する傾向にあった。また、PP 繊維の混入量が鋼繊維よりも少ないにも関わらず、フローロスが大きかった。これは、PP 繊維の径が STF1 よりも細く、繊維に付着するペーストの量が STF1 よりも多くなり、流動性に寄与するペーストもさらに少なくなるためと考えられる。

鋼繊維と PP 繊維の併用が及ぼす影響をみると、STF2-PP のスランブフローは、PP 繊維を同等の量で混入した PP-030 と同程度であった。このため、両繊維が併用する場合、コンクリートのスランブフローに及ぼす影響は鋼繊維よりも PP 繊維の方が大きいといえる。

3. 1. 2 空気量

図-3に各種繊維の混入量と空気量の関係を示す。各調合の結果は 1.0% (-0.5%, +1.0%)に収まったが、BASE の結果(1.2%)に対して、繊維を混入した調合では、空気量が増加する傾向にあった。この原因は、繊維を混入した調合では攪拌の時間が、BASE よりも 30 秒長いため、コンクリートに巻き込まれるエンラップトエアが多くなったことが考えられる。

鋼繊維の形状が及ぼす影響をみると、形状が異なっても、空気量の結果には大きな差はみられなかった。これに対して、PP 繊維を混入した調合の結果をみると、混入量が鋼繊維よりも少ないが、空気量が増加する傾向は顕著であった。このため、鋼繊維よりも PP 繊維の混入が空気量に及ぼす影響は大きいことがいえる。これは、鋼繊維よりも PP 繊維の径が細いため、繊維をコンクリートに混入する際、攪拌によってコンクリートに巻き込まれるエンラップトエアが多くなったことが考えられる。

鋼繊維と PP 繊維の併用が及ぼす影響をみると、STF2-PP の空気量が BASE と同程度であったことから、両繊維の併用が空気量に及ぼす影響は確認できなかった。過去の実験においても、繊維を混入しても空気量が増加しないケースがあったことから、この結果はばらつきのある範囲内にあるものと考えられる。

3. 2 硬化コンクリート

3. 2. 1 圧縮強度

各種繊維の混入量とBASEを基準とした材齢28日圧縮強度の比の関係を図-4に示す。なお、本実験で得られた結果の妥当性を検証するために、硬化コンクリートの試験結果を考察する際、コンクリートの骨材には本研究と同一産地のものを使用し、ほかの使用材料、水セメント比、強度レベルおよび養生方法が本実験と類する文献 1) および文献 3) の結果を用いて、本実験の結果との比較を試みた。各文献の調合概要を表-4に、文献1)に使用している繊維の概要を表-5に示す(以降、同様である)。また、図中に文献1)の結果も併せて示している。

鋼繊維の種類が及ぼす影響をみると、直線状の STF1 を混入した各調合の結果は BASE の圧縮強度と概ね同等であった。波形の STF2 を混入した調合の結果は、混入量 0.5vol% で BASE の圧縮強度と同等、1.0vol% で下回った。

鋼繊維の混入量が及ぼす影響をみると、STF1 を混入した調合では、ばらつきがあるが、混入量 1.0vol% まで、圧縮強度が大きく変わらなかった。一方、STF2 を混入した調合では、混入量が増加するほど、圧縮強度が低下する傾向にあった。

文献 1) の結果をみると、STF1 と同じ直線状で、径と長さが異なる STF4 を混入した調合では、BASE の圧縮強度を大きく上回ったが、繊維の混入量が増加しても、圧縮強度が大きく変わらない傾向は本実験 STF1 を混入した調合の結果とほ

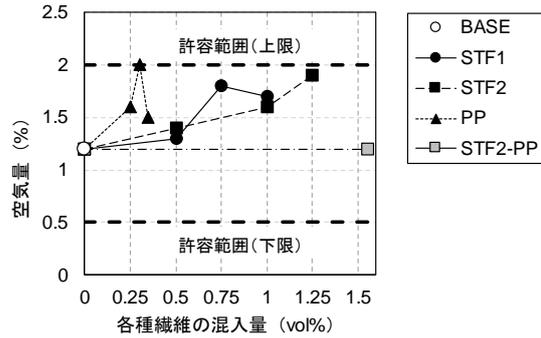


図-3 各種繊維の混入量と空気量の関係

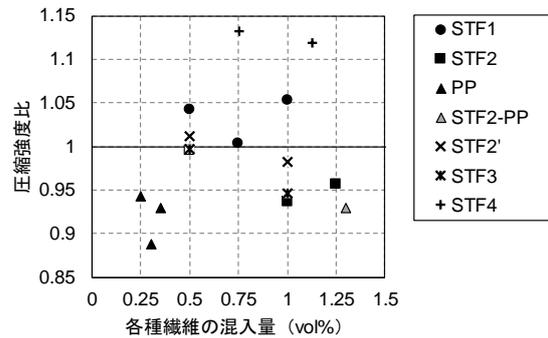


図-4 各種繊維の混入量と BASE を基準とした材齢 28 日圧縮強度の比の関係

表-4 各文献の調合概要

文献番号	調合名	W/B (%)	単位量(kg/m ³)					STF 混入量 (vol%)	SP*2 (B×%)
			W	SFC	SF	S	G		
1)	BASE'	13	155	1192	-	368	811	-	-
	STF2'-05								0.50
	STF2'-10								1.00
	STF3-05								0.50
	STF3-10								1.00
	STF4-075								0.75
STF4-113	1.13								
3)	BASE''	13	155	1074	119	326	808	10	-
		12.5		1116	124	287			
		12		1163	129	238			

*1: SR の銘柄が不詳である。

*2: SP の添加量および銘柄が不詳である。

表-5 本実験と文献 1) に用いられた鋼繊維の概要

記号	引張強度*1 (N/mm ²)	直径 φ (mm)	長さ L (mm)	表面積 S (mm ²)	体積 V (mm ³)	比表面積 S _v =S/V (×10 ³ m ² /m ³)	形状
STF1	2000	0.20	13	8.23	0.408	20.2	直線
STF2 (STF2')	1080	0.62	30	59.0	9.05	6.52	波形
STF3	1000	0.60	30	57.1	8.48	6.73	波形
STF4	2000	0.16	13	6.57	0.261	25.2	直線

*1: 各鋼繊維の引張強度はカタログ値である。

ぼ同様であった。また、波形の STF2' および STF3 を混入した調合の結果も、本実験 STF2 を混入した調合同様の傾向にあった。

PP 繊維の混入が及ぼす影響をみると、混入量が鋼繊維より少ないにもかかわらず、BASE の圧縮強度を下回った。また、混入量が増加するほど、圧縮強度が低下する傾向にあった。鋼繊維と PP 繊維の併用が及ぼす影響をみると、STF2-PP の圧縮強度は PP 繊維を同等の量で混入した PP-030 の結果とほぼ同程度であった。

繊維を混入したコンクリートの強度が低下する原因として、繊維の混入によってコンクリートに巻き込んだ空気が増加した影響と考えられる。そこで、BASE を基準とした空気量の差と材齢 28 日圧縮強度の比の関係を確認した(図-5)。本実験の結果をみると、STF1 を混入した調合で、空気量が増加しても BASE の圧縮強度と同等以上であった。一方、STF2 および PP 繊維を混入した調合の圧縮強度は、BASE を下回る傾向にあった。ばらつきがあるが、STF2 および PP 繊維を混入した調合の空気量が増加するほど、圧縮強度が低下する傾向がみられた。

文献 1)の結果をみると、鋼繊維を混入した各調合の空気量が BASE より大きくなるように、消泡剤を用いて調整した結果、STF4 を混入した調合で、BASE の圧縮強度を上回った。一方、STF2 と同じ波形の STF2' および STF3 を混入した調合では、ほぼ同等であった。

以上のことから、繊維を混入したコンクリートでは、空気量の増加が原因と思われる圧縮強度の低下を抑制するためには、消泡剤を使用する対策が有効と考えられる。

3. 2. 2 静弾性係数

材齢 28 日における圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6 に示す。また、図中には強度レベルが本実験と同程度で、繊維無混入の文献 3)の結果も示している。それに、NewRC 式で求められる圧縮強度と静弾性係数の関係およびその $\pm 5\%$ 、NewRC 式 $\times 80\%$ の範囲を併せて示している。なお、コンクリートの単位容積質量を表す係数 γ の値は BASE の調合上の値 ($2.49t/m^3$) および文献 4)を参考に $\gamma=2.5$ とした。本実験の結果をみると、圧縮強度 $200N/mm^2$ 程度で、各種繊維を混入したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係は NewRC 式で表せるといえる。このことから、繊維の混入が静弾性係数に及ぼす影響は小さく、構造設計上、繊維を混入した調合であっても、NewRC 式で推定した静弾性係数を使用しても差し支えないと考えられる。

3. 2. 3 曲げ特性

1) 曲げ強度

図-7に各鋼繊維の混入量と BASE を基準とした材齢 28 日の曲げ強度比の関係を示す。なお、図中には文献1)の結果も併せて示している。鋼繊維の形状が及ぼす影響をみると、径の太い STF2 よりも径の細い STF1 を混入した調合の曲げ強度が大きい。また、鋼繊維の混入量が増加するほど、曲げ強度が増加する傾向にあった。文献 1)の結果においても本

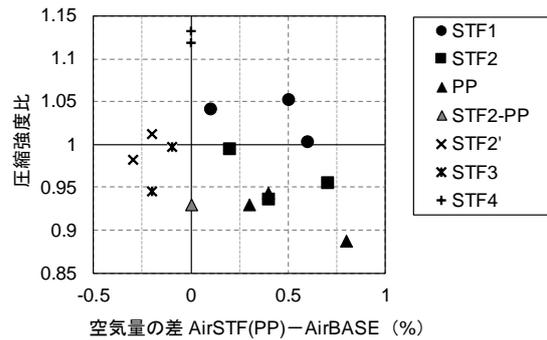


図-5 BASE を基準とした空気量の差と材齢 28 日圧縮強度の比の関係

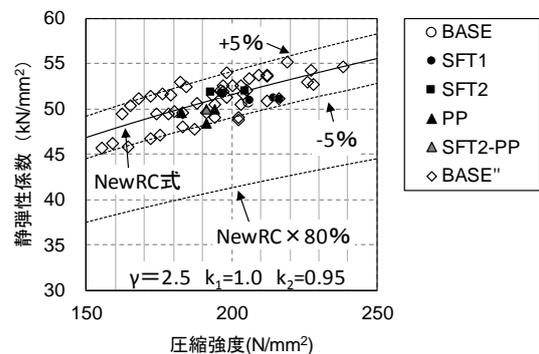


図-6 材齢 28 日における圧縮強度と静弾性係数の関係

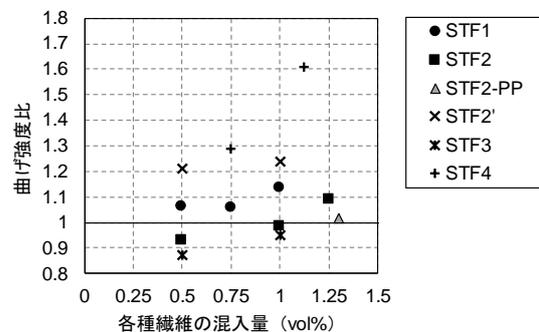


図-7 各鋼繊維の混入量と BASE を基準とした曲げ強度比の関係

実験と同様に、混入した鋼繊維が細く、混入量が多くなるほど、曲げ強度が増加する傾向にあった。

鋼繊維と PP 繊維を併用した調合の結果をみると、STF2-PP の曲げ強度は BASE と同程度であった。このため、本実験で使用した両繊維の併用は、曲げ強度に及ぼす影響が小さいと思われる。

材齢 28 日における圧縮強度と曲げ強度の関係を図-8 に示す。図中に文献 1)の結果および式①⁹⁾で求められる圧縮強度と曲げ強度の関係およびその実測値の 95%信頼限界(上限・下限)を併せて示している。

$$\sigma_t = 7.2 \times \left[\frac{\sigma_B}{60} \right]^{2/3} \quad \dots \text{式①}$$

ここに、 σ_t : 曲げ強度 (N/mm²)
 σ_B : 圧縮強度 (N/mm²)

本実験の結果をみると、圧縮強度と曲げ強度の関係は式①よりもやや下回るが、95%信頼限界内に収まった。文献1)の結果においても、本実験と同様に各調合の結果が95%信頼限界内にあった。以上のことから、各種繊維の混入量が本実験の範囲内であれば、コンクリートの曲げ強度は圧縮強度で概ね推定できる。

2) 曲げタフネス

各鋼繊維の混入量と材齢 28 日における曲げタフネスの関係を図-9に示す。なお、図中に文献1)の結果も併せて示している。鋼繊維を混入した各調合の結果をみると、BASE よりも曲げタフネスが大幅に増加した。鋼繊維の形状が及ぼす影響をみると、径が太い STF2 を混入した調合よりも径の細い STF1 を混入した調合の曲げタフネスが大きい傾向にあった。また、ばらつきがあるが、鋼繊維の混入量が多くなるほど、曲げタフネスが増加する傾向にあった。文献1)の結果をみると、本実験と同様に、混入した繊維の径が細く、混入量が多くなるほど、曲げタフネスが増加する傾向にあった。これは、鋼繊維の径が細く、混入量が多くなるほど、鋼繊維とコンクリートとの付着力が大きくなるためと考えられる。

一方、鋼繊維と PP 繊維の併用が及ぼす影響をみると、STF2-PP の曲げタフネスは、STF2 を同等の量で混入した他の調合とほぼ同程度であったため、PP 繊維を混入しても曲げタフネスに及ぼす影響が小さいと考えられる。

以上より、鋼繊維の形状および混入量が曲げタフネスに影響を及ぼすことを確認したが、形状と混入量のいずれも異なる鋼繊維が及ぼす影響を比較することは難しい。過去の研究⁹⁾では、形状の違う鋼繊維がコンクリートの曲げ靱性に及ぼす影響を検討する際、コンクリート 1m³ あたりに混入した鋼繊維の総表面積が指標として提案されている。本実験においても、鋼繊維の総表面積と曲げタフネスの関係について検討を試みた。また、鋼繊維の総表面積を算出するには式②を用いた。各調合における鋼繊維の総表面積と曲げタフネスの関係を図-10に示す。なお、図中に文献1)の結果も併せて示している。

$$S_{tot} = S_V \times V \quad \dots \text{式②}$$

ここに、 S_{tot} : コンクリート 1m³ あたりに混入した鋼繊維の総表面積 (m²/m³)

S_V : 混入した鋼繊維の比表面積 (m²/m³)

V : コンクリート 1m³ あたりの鋼繊維の混入量 (vol%)

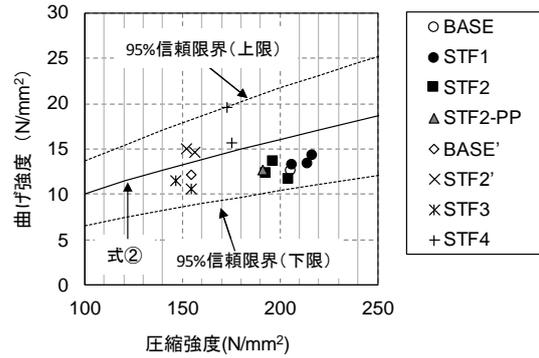


図-8 材齢 28 日における圧縮強度と曲げ強度の関係

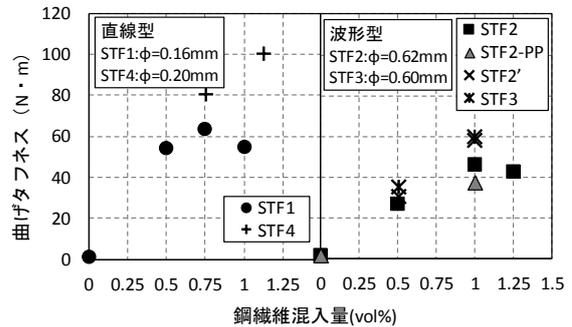


図-9 各鋼繊維の混入量と材齢 28 日における曲げタフネスの関係

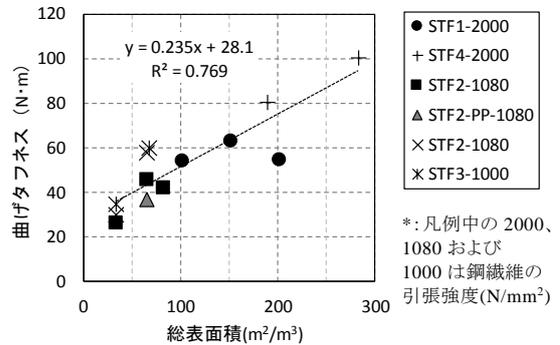


図-10 各調合における鋼繊維の総表面積と曲げタフネスの関係

文献1)の結果も含め、各調合の結果をみると、鋼繊維の総表面積が増加するほど、曲げタフネスが増加する傾向にあり、両者の関係は密であった。また、鋼繊維の引張強度が及ぼす影響をみると、引張強度が異なる調合においても、鋼繊維の総表面積と曲げタフネスの関係は概ね一致している。

以上のことから、フレッシュ性状に支障のない範囲内で混入する鋼繊維の径が細く、混入量が多いほど、コンクリートの靱性が高くなる傾向にある。また、同程度の靱性を確保するためには径の細い鋼繊維を使用することで、鋼繊維の

混入量を減らすことができると考えられる。

3. 3 簡易耐火試験

簡易耐火試験の1週間前に、各供試体の表面含水率を測定した。その結果、各試験体の含水率は 4.0～5.5%であり、大きな差はなかった。供試体の加熱は ISO-834 標準加熱曲線によって 1 時間行い、その後、2 時間の冷却を行った。簡易耐火試験の観察結果および爆裂評価⁷⁾を表-6に示す。また、試験終了後の供試体の状況を写真-1に示す。

各種繊維を混入した調合の結果をみると、鋼繊維のみ混入した供試体 STF2-10 は崩壊しなかったものの、爆裂評価としては大破となった。これに対して、PP 繊維を混入した各調合の結果をみると、鋼繊維よりも混入量が少なくても、爆裂の規模が小さかった。また、PP 繊維の混入量が増加するほど、爆裂の規模が小さくなる傾向にあった。一方、鋼繊維と PP 繊維を併用した結果をみると、PP 繊維のみ同等の量で混入した供試体の爆裂の規模とほぼ同程度であった。

以上の結果から、フレッシュ性状に支障のない範囲内で、PP 繊維の混入量が多くなるほど、爆裂を抑制する効果が大きくなる。また、鋼繊維と PP 繊維を併用する場合、爆裂抑制効果は同等の量で PP 繊維のみ混入した方と同程度である。

4. まとめ

本実験では Fc200 級の超高強度コンクリートを対象として室内実験を実施した。その結果を以下に示す。

- (1) コンクリートのスランプフローに及ぼす影響は、鋼繊維よりも PP 繊維の方が大きい。
- (2) 繊維を混入する調合は攪拌時間が長くなる影響で、エントラップトエアが多くなるため、空気量が増加する傾向にある。
- (3) 各種繊維を混入した調合では空気量の増加が原因と思われる圧縮強度の低下を抑制するために、消泡剤を使用する対策が有効と考えられる。
- (4) 各種繊維の混入量が本実験の範囲内であれば、コンクリートのヤング係数と曲げ強度は圧縮強度で推定できる。フレッシュ性状に支障のない範囲内で混入する鋼繊維の径が細く、混入量が多いほど、コンクリートの靱性が高くなる傾向にある。また、同程度の靱性を確保するためには径の細い鋼繊維を使用することで、鋼繊維の混入量を減らすことができると考えられる。
- (5) フレッシュ性状に支障のない範囲内で、PP 繊維の混入量が多くなるほど、爆裂抑制効果が大きくなる。また、鋼繊維と PP 繊維を併用する場合、爆裂抑制効果は同等の量で PP 繊維のみ混入した方と同程度である。

表-6 簡易耐火試験の観察結果および爆裂評価

調合名	加熱開始からの経過時間				爆裂評価*1
	爆裂開始		崩壊		
	1 本目	2 本目	1 本目	2 本目	
BASE	8	8	40	45	崩壊
STF2-10	8	8	—	—	大破
PP-025	13	13	—	—	小
PP-030	16	17	—	—	小
PP-035	37	37	—	—	軽微
STF2-PP	13	26	—	—	小

*1:爆裂評価の基準は文献 7)を参考した。



写真-1 加熱試験終了後の供試体

【参考文献】

- 1) 井戸, 他 3 名: 鋼繊維補強した超高強度コンクリートの基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.527-528, 2008.9.
- 2) 三井, 他 3 名: 設計基準強度 80~200N/mm² 超高強度コンクリート柱の耐火性能に及ぼす有機繊維および鋼繊維の影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻第 648 号 pp.461-468, 2010.2.
- 3) 井戸, 他 3 名: Fc200N/mm² 級超高強度コンクリートの構造体コンクリートに関する研究(その 2 硬化コンクリートの性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.773-774, 2012.9.
- 4) 野口, 友澤: 高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.1-10, 1995.8.
- 5) 野口, 友澤: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.11-16, 1995.6.
- 6) 佐々木, 他 3 名: 高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.277-282, 2013.
- 7) 澤田, 他 6 名: 超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究(その 8 ポリプロピレン繊維混入による爆裂対策の加熱実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.99-100, 2004.9.