論文　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

吉田　理紗[*1]・川西貴士[*2]・平田　隆祥[*3]

要旨：耐火性を確保するためにコンクリートにポリプロピレン短繊維を混入すると，流動性が低下するという課題がある。そこで，繊維混入後も流動性を確保することを目的として，①増粘剤一液型高性能 AE 減水剤の使用効果と，②加熱時の爆裂防止効果が高い形状の細径繊維を用いて繊維混入率を低減した効果を実験的に検討した。モルタルフロー試験，コンクリートのスランプフロー試験および耐火試験を行った結果，①と②の相乗効果によって流動性の低下を抑え，かつ耐火性を確保できた。また，本検討範囲では，混入繊維の表面積の合計が流動性と耐火性に大きく影響することを示した。

キーワード：ポリプロピレン短繊維，ワーカビリティー，流動性，耐火性，セグメント

1. はじめに

近年，シールドトンネル工事において，セグメントに耐火用ポリプロピレン短繊維(以下，PP1)と剥落防止用ポリプロピレン短繊維(以下，PP2)を混入している。PP1 は約 165℃で溶融して空隙のネットワークを形成し，水蒸気を逃がしやすくする。これにより，コンクリートが加熱されるときの内部水蒸気圧の上昇を抑制し，爆裂を防止する働きがある。しかし，ポリプロピレン短繊維をフレッシュコンクリートに混入すると繊維表面にセメントペーストが付着し，流動性が低下して施工性が損なわれるという課題がある。

そこで，本報告では PP1 に着目して，繊維混入後も流動性を確保し，フレッシュ時の施工性を向上させることを目的として，以下の 2 つの効果を実験的に検討した。①増粘剤一液型高性能 AE 減水剤(以下，VSP)を用いて，流動性を向上させる。②加熱時の爆裂防止効果の高い形状の PP1 を用いて混入量を減らし，流動性の低下を抑える。従来の高性能減水剤(以下，SP)は，流動性を向上させるために添加率を高くすると，材料分離するリスクが高い。しかし，VSP に含まれる増粘成分によって，材料分離抵抗性の付与が期待できる。また，PP1 は細径であるほど繊維本数が増えるため，加熱時に水蒸気を逃がしやすくなることで，爆裂防止効果が期待できる。細径の PP1 を用いることで，混入率の低減を図り，流動性の低下を抑えることを目指した。

これら①と②の効果を確認するため，混和剤の種類と PP1 の形状の違いをパラメータとして，実験Ⅰではモルタルを用いて，実験Ⅱではコンクリートを用いてフレッシュ試験を行い，流動性の低下を抑える検討をした。さらに，加熱時の爆裂防止効果の高い形状の PP1 を用いて，従来よりも PP1 の混入量を減らしたコンクリート試験体を用いて耐火試験を行い，耐火性が確保されていることを確認した。

表－1　使用材料

使用材料	記号	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3，比表面積 3320cm^2/g
混和材	GGBF	高炉スラグ微粉末 密度 2.89g/cm^3，比表面積 3200cm^2/g
粗骨材	G	砕石　硬質砂岩　表乾密度 2.64g/cm^3， 吸水率 0.80%，粗粒率 6.68，実積率 60.7%
細骨材	S	陸砂 表乾密度 2.64g/cm^3， 吸水率 1.02%，粗粒率 2.62，実積率 70.2%
水	W	水道水
混和剤	SP	高性能減水剤
	VSP	増粘剤一液型高性能 AE 減水剤
短繊維	PP1	耐火用ポリプロピレン繊維 密度 0.91g/cm^3，円形断面，**表-2** 参照
	PP2	剥落防止用ポリプロピレン繊維 密度 0.91g/cm^3，円換算径 0.70mm， 繊維長 48mm，

表－2　PP1 の形状

繊維名	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)	アスペクト比
A10	10	10	1000
B18	18	10	556
C48	48	20	417

*1 大林組技術研究所　生産技術研究部　工修　(正会員)
*2 大林組技術研究所　生産技術研究部主任研究員　工修　(正会員)
*3 大林組技術研究所　生産技術研究部主席研究員　工博　(正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料および PP1 の形状を**表－1**，**表－2** に示す。**表－2** に示すように，繊維径と繊維長が異なる PP1 の形状をパラメータとして流動性と耐火性を比較した。

2.2 配合

モルタル配合とコンクリート配合を**表－3**，**表－4** に示す。SP および VSP の添加率は，繊維を混入しないベース配合において，材料分離を起こさない範囲で最大値とした。実験の結果から， SP の添加率はモルタル配合で 0.63%，コンクリート配合で 0.53%，VSP の添加率はいずれも 0.75%とした。PP1 を外割で 0, 0.05, 0.07, 0.10vol.%混入し，コンクリート配合には PP2 を 0，0.30 vol.%外割で混入した。SP を使用し，PP1 に C48 を 0.10vol.%混入したケースを従来の標準配合とし，C48(0.10)-SP と表記した。

2.3 試験方法

(1) モルタルのフレッシュ性状の検討(実験Ⅰ)

モルタルミキサで練混ぜを行い，1 回の練混ぜ量は 1L とした。モルタル試料を用いて 0 打フロー試験(JIS R 5201)を行った。SP あるいは VSP を用いたベースモルタルの 0 打フロー値を基準として，繊維混入によるフロー低下分を「0 打フローの低下量」と定義して評価を行った。

(2) コンクリートのフレッシュ性状および耐火性の検討(実験Ⅱ)

水平二軸強制練りミキサで練混ぜを行い，1 回の練混ぜ量は 70L とした。コンクリート試料を用いてスランプ試験 (JIS A 1101，JIS A 1150)，空気量の測定(JIS A 1128)を行った。なお，施工性の観点から，スランプフローの目標値を 50cm 以上と設定した。

耐火性が確保されていることを確認する目的で，コンクリートの耐火試験を行った。**図－3** に示すように，試験体形状は 500×500×200mm とし，気中養生とした。壁式耐火炉で，**図－4** に示すように最高温度 1200℃の RABT60 分火災温度時間曲線にしたがって一面加熱した。

耐火試験体の加熱表面に対して，加熱後に表面剥離せずに残存した表面積の割合を「残存面積率」と定義し，耐火性の指標は残存面積率および損傷深さを用いた。残存面積率は，**写真－1** に示すように，画像処理ソフトで表面剥離した部分を黒色，表面剥離せずに残存した表面積を白色に分けて，黒色および白色の全ピクセル数に対する白色ピクセル数の割合から求めた。損傷深さは，50mm 角でノギスを用いて計測し，損傷深さの平均と最大を求めた。

なお，耐火試験体と同材齢かつ同養生としたφ100mm の円柱供試体を用いて，圧縮強度試験(JIS A 1108) と含

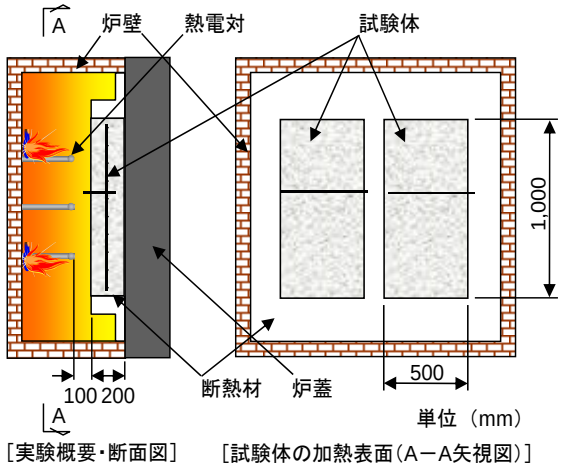
表－3　モルタル配合

W/B	単位容積質量(kg/m³)			
(%)	W	C	GGBF	S
35	245	350	350	1288

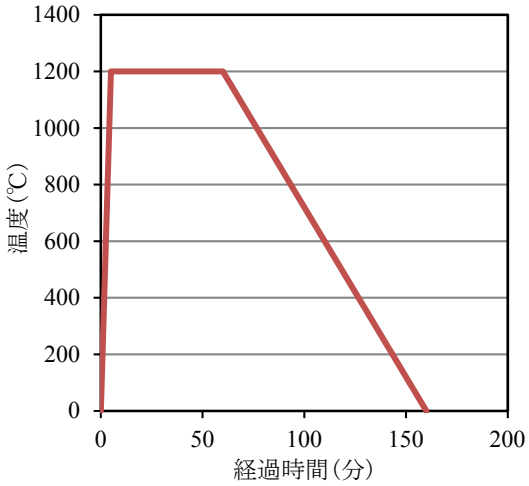
※結合材 B=C+BS

表－4　コンクリート配合

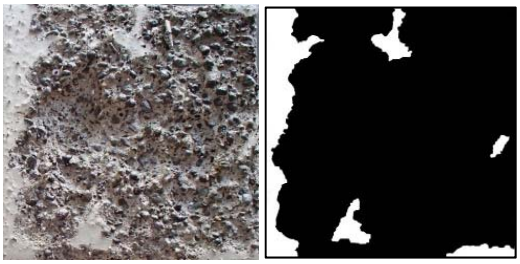
W/B	単位容積質量(kg/m³)					PP2
(%)	W	C	GGBF	S	G	(vol.%)
35	175	250	250	920	755	0, 0.3



図－3　耐火試験体



図－4　RABT 曲線



写真－1　耐火試験体写真の加工

水率の測定(JIS A 1476)を行った。含水率の測定に用いた供試体は水分の散逸を防ぐため，側面をエポキシ樹脂で覆った。測定直前に上部 50mm のエポキシ樹脂を除いた部分をコンクリートカッターで切り出して試料とした。

3. 実験 I の結果および考察

3.1 増粘剤一液型高性能 AE 減水剤の効果

0 打フロー値および 0 打フローの低下量を**表－3** に示す。VSP による効果を検討するため，**図－5** のように各配合にて SP と VSP の 0 打フローの低下量について比較を行った。**図－5** から， 各繊維や各混入率において VSP を用いた配合の方が 0 打フローの低下量は小さい傾向にあり，VSP による流動性の改善効果が認められた。

繊維径が細いほど，同一混入率での単位容積当たりの繊維表面積が大きいため，繊維に拘束されるペーストが多く，流動性が低下する。そのため，細径の A10 は最も厳しい条件であるが，VSP による流動性改善が顕著に認められた。C48 では，SP を用いた場合でも比較的流動性が高いため，0 打フローの低下量は小さいが，同様に流動性の改善効果が認められた。

3.2 PP1 の混入率が流動性に及ぼす影響

前述のように，細径の PP1 は高い耐火性能が期待でき，混入率を低減できる可能性があり，PP1 の混入率を低減することで流動性の低下を抑える効果が期待できる。

図－5 から，PP1 の混入率が低いほど，低下量が小さくなった。これは，繊維に拘束されるペーストが少なくなったためである。また，PP1 の径が細いほど，同混入率での低下量が大きくなった。これは，繊維径が細いほど，繊維表面積が増大し，繊維に拘束されるペーストが多くなるためと考える。

標準配合 C48(0.10)-SP と比較すると，同等の低下量とするためには，繊維混入率を A10-VSP では 0.05Vol.%程度，B18-VSP では 0.08Vol%程度まで低減する必要がある。したがって，耐火性能を担保した上で，繊維混入率をこれらの水準以下まで低減できれば，流動性を改善できる可能性がある。

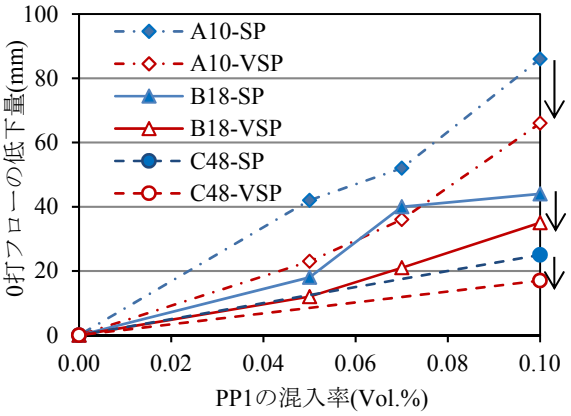
3.3 余剰ペースト膜厚が流動性に及ぼす影響

既往の研究[1), 2)]では，繊維補強セメント系複合材料に余剰ペースト膜厚理論を適用し，流動性について検討している。本検討においても，余剰ペースト膜厚 t_e を式(1)，式(2)から求めた。なお，本検討では細骨材に陸砂を用いており，細骨材の粒形を球体と仮定して，ふるい分け試験における各ふるい目の中間値を粒径とし，球体の表面積を算出し，細骨材の粒度分布をもとに，細骨材の表面積を求めた[5)]。また，繊維を混入した配合の実積率 G_A は，モルタルミキサで細骨材と繊維を撹拌した試料を用いて求めた。

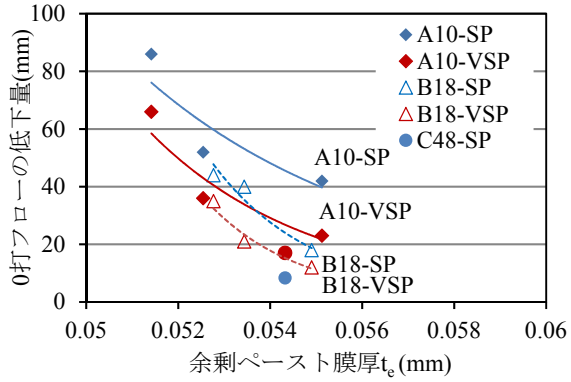
表－3　フロー試験結果

Case.	0 打フロー		Case.	0 打フロー	
	Ave.	低下量		Ave.	低下量
Base-SP	268	0	Base-VSP	281	0
A0(0.05)-SP	226	42	A10(0.05)-VSP	258	23
A10(0.07)-SP	216	52	A10(0.07)-VSP	245	36
A10(0.10)-SP	182	86	A10 (0.10)-VSP	215	66
B18 (0.05)-SP	250	18	B18 (0.05)-VSP	269	12
B18(0.07)-SP	228	40	B18 (0.07)-VSP	260	21
B18 (0.10)-SP	224	44	B18 (0.10)-VSP	246	35
C48(0.10)-SP	243	25	C48(0.10)-VSP	264	17

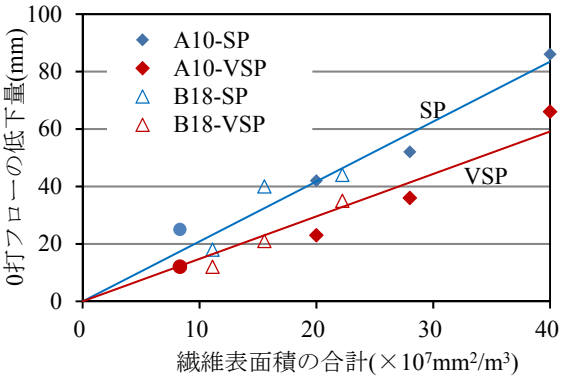
※繊維名(混入率)-混和剤(SP or VSP)　※単位(mm)



図－5　各配合のフロー低下量



図－6　余剰ペースト膜圧とフロー低下量の関係



図－7　繊維表面積の合計とフロー低下量の関係

$$t_e = V_e \div S_A \quad (1)$$

$$V_e = V_{total} - V_{solid} \times 100 \div G_A \quad (2)$$

ここで，t_e：余剰ペースト膜厚(mm)

V_e：余剰ペースト体積(mm^3)

S_A：固体(細骨材または繊維＋細骨材)表面積(mm^2)

V_{total}：総(モルタルまたは繊維+モルタル)体積 (mm^3)

V_{solid}：固体(細骨材または繊維＋細骨材)体積(mm^3)

G_A：固体(細骨材または繊維＋細骨材)の実績率(-)

余剰ペースト膜厚 t_e と低下量との関係を**図－6** に示す。図示した青色実線は A10-SP，赤色実線は A10-VSP，青色破線はB18-SP, 赤色破線はB18-VSP の回帰式である。**図－6** から，いずれのケースも余剰ペースト膜厚が大きいほど低下量は小さい関係を示し，混和剤と繊維種に影響されることが分かった。

同余剰ペースト膜厚 t_e での低下量は，SP よりも VSP が小さいことがわかった。これは，VSP に含まれる増粘成分よって，材料分離することなく減水成分の添加量を SP よりも VSP の方が増やすことができるため，セメントペーストの流動性が向上したと考える。

同余剰ペースト膜厚 t_e での低下量は，B18 よりも A10 が大きいことがわかった。これは，細径ほど繊維本数が多く，繊維同士の間隔が小さいため，繊維相互間の干渉を受けると推察され，本検討では余剰ペースト膜厚 t_e による定量的評価は難しいと考える。

同余剰ペースト膜厚 t_e での低下量について，B-SP と B-VSP の差よりも A10-SP と A10-VSP の差の方が大きくなっており，VSP による流動性向上効果は B18 よりも A10 において顕著であった。

3.4 繊維表面積の合計が流動性に及ぼす影響

繊維混入による流動性の影響を簡易的に把握するため，混入した繊維表面積の合計と低下量の関係を**図－7** に示す。**図－7** から，SP と VSP の両ケースともに，繊維表面積の合計が大きいほど，低下量は線形的に大きくなり，流動性が低下することが示された。よって，繊維表面積の合計が判れば，流動性の低下が予測できると考える。

4. 実験Ⅱの結果および考察

4.1 フレッシュ試験結果

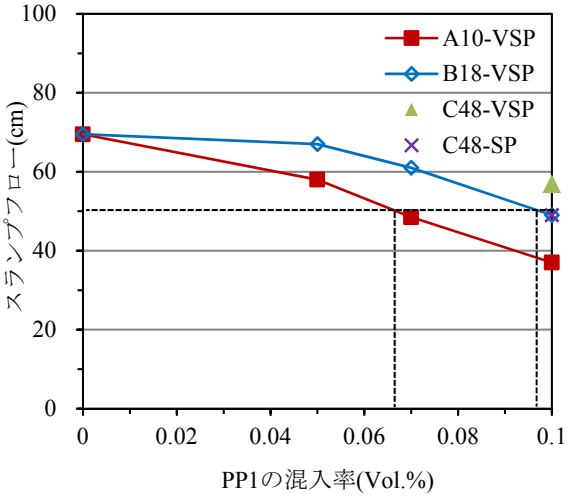
コンクリートのフレッシュ試験結果を**表－4** に，スランプフロー試験結果と繊維混入率あるいは繊維表面積の関係を**図－8**，**図－9** に示す。

(1) PP1 の混入率が流動性に及ぼす影響

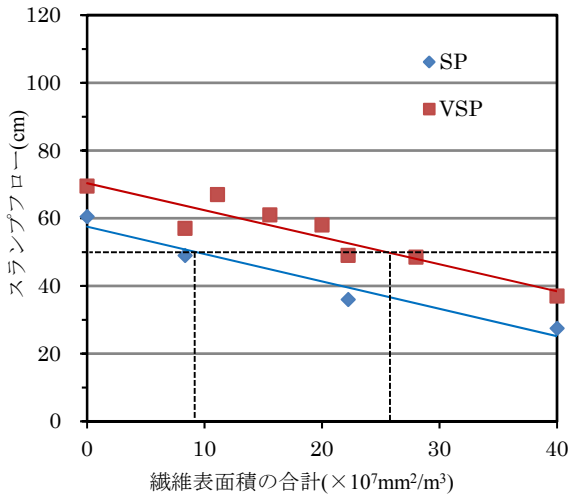
図－8 から，VSP を用いた場合には，A10 の混入率 0.07Vol.% 程度以下, B18 の混入率 0.10Vol.%程度以下で，スランプフローの目標値 50cm 以上となることがわかった。耐火性能を担保した上で，混入率をこれらの水準まで低減できれば，流動性の低下を抑制できる可能性が示

表－4　フレッシュ試験結果

Case.	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ (cm)	50cm 到達時間 (s)	ﾌﾛｰ停止時間 (s)	空気量 (%)
Base-SP	27.0	64.5	-	17.4	2.5
Base+PP2-SP	26.5	60.5	-	20.4	2.3
A10(0.10)-SP	17.5	27.5	-	6.3	2.1
B18(0.10)-SP	22.0	36.0	-	9.8	1.7
C48(0.10)-SP	24.0	49.0	-	18.5	3.4
Base-VSP	－	70.5	5.0	40.0	1.5
Base+PP2-VSP	－	69.5	6.6	40.2	1.9
A10(0.05)-VSP	－	58.0	10.6	41.5	3.2
A10(0.07)-VSP	－	48.5	-	40.0	3.8
A10(0.10)-VSP	21.5	37.0	-	30.0	1.6
B18(0.05)-VSP	－	67.0	7.3	44.5	2.9
B18(0.07)-VSP	－	61.0	10.1	43.2	3.3
B18(0.10)-VSP	23.5	49.0	-	46.0	1.6
C48(0.10)-VSP	24.5	57.0	-	35.1	1.6



図－8　スランプフロー試験結果



図－9　繊維表面積の合計とスランプフローの関係

された。

(2) 繊維表面積の合計が流動性に及ぼす影響

図－9 から，SP と VSP の両ケースともに，繊維表面積の合計が大きいほど，スランプフローは線形的に低くなり，流動性が低下することが確認できた。したがって，実験Ⅰのモルタルの場合と同様に，混入する繊維の表面積の合計が流動性に対して非常に影響が大きいことが確認できた。混入する繊維表面積の合計さえ算出できれば，同配合においては回帰式から流動性の影響を予測することができると考える。スランプフロー50cm を目標値と設定した場合には，繊維表面積の合計が SP では $9\times10^7 mm^2/m^3$ 程度以下，VSP では $25\times10^7 mm^2/m^3$ 程度以下であれば，目標値を達成できると予測される。

(3) 増粘剤一液型高性能 AE 減水剤の効果

SP と VSP を用いたケースを比較すると，**表－4** に示すように，VSP の効果によって，A10(0.10)シリーズではスランプフローが 9.5cm 向上し，同様に B18(0.10)シリーズでは 13.0cm，C48(0.10)シリーズでは 8.0cm 向上した。なお，いずれも材料分離は観察されなかった。

SP シリーズと VSP シリーズの回帰式は，**図－9** に示すように平行となっており，Base+PP2-SP あるいは Base+PP2-VSP のスランプフロー値を基準とした繊維混入によるスランプフローの低下量は，同程度と示唆される。実験Ⅰのモルタルでの検討では，SP シリーズと VSP シリーズの差が顕著であったが，コンクリートでは粗骨材の混入によって，混和剤の影響が緩慢になったと考えられる。

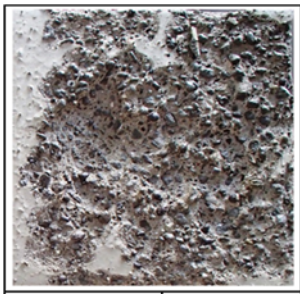
4.2　耐火試験結果

耐火試験結果を**表－5** に示す。Base-SP の試験体は 500～800℃で激しく爆裂し，残存面積率は 13.0%と低かった。それに対して，標準配合 C48(0.10)-SP の試験体は表面が多少剥離したものの，残存面積率は 98.1%と高い値を示した。

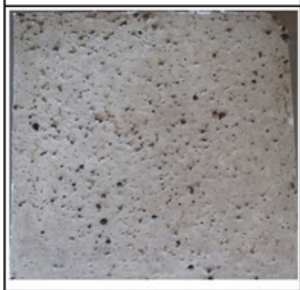
繊維混入率 0.10Vol.%のケースについて比較すると，標準配合に使用した C48 を用いた試験体は多少表面が剥落しているのに対して，より細径の A10，B18 を用いた試験体の残存面積率は 100%であった。したがって，細径の方が繊維本数を稼げるため，爆裂を防止する繊維同士のネットワークを形成しやすく，耐火性能が高いことが確認できた。

繊維混入率 0.05Vol.%に低減したケースにおいても，A10，B10 を用いた試験体の残存面積率は高かった。B18 を用いた場合の残存面積率は 97.4%で，より細径の A10 を用いた場合は 100%であった。したがって，A10，B18 を用いれば繊維混入率を 0.05Vol.%としても，C48 を 0.10Vol.%混入した場合と同程度の耐火性能が得られることが確認できた。

表－5　耐火試験結果



残存面積率(%)	13.0		残存面積率(%)	98.1	
損傷深さ(mm)	平均	3.2	損傷深さ(mm)	平均	0.0
	最大	25.0		最大	4.0
含水率(%)	4.7		含水率(%)	4.5	
Base-SP			C48(0.10)-SP		



残存面積率(%)	100.0		残存面積率(%)	97.4	
損傷深さ(mm)	平均	0.0	損傷深さ(mm)	平均	0.0
	最大	2.0		最大	1.0
含水率(%)	4.5		含水率(%)	4.3	
A10(0.05)-VSP			B18(0.05)-VSP		

残存面積率(%)	100.0		残存面積率(%)	100.0	
損傷深さ(mm)	平均	0.0	損傷深さ(mm)	平均	0.0
	最大	0.0		最大	0.0
含水率(%)	4.7		含水率(%)	5.2	
A10(0.10)-SP			B18(0.10)-SP		

表－6　圧縮強度試験結果

Case	単位容積質量	圧縮強度	材齢
	kg/m³	N/mm²	日
Base-SP	2363	60.5	53
A10(0.05)-VSP	2304	55.9	50
B18(0.05)-VSP	2325	60.3	50
A10(0.10)-SP	2362	57.5	53
B18(0.10)-SP	2352	57.2	53
C48(0.10)-SP	2318	53.6	53

耐火試験と同時に含水率の測定および圧縮強度試験を行った。含水率の測定結果を**表－5**，圧縮強度試験結果を**表－6** に示す。Base-SP の圧縮強度が 60.5N/mm^2 であるのに対して，C48(0.10)-SP の圧縮強度は 53.6 N/mm^2 と低くなっている。これは，フレッシュ試験において Base-SP の空気量が 2.5%であるのに対して，C48(0.10)-SP の空気量は 3.4%と高くなっており，繊維の混入によって空気量が変動したため，圧縮強度が低下したと考える。

4.3　まとめ

スランプフローから流動性，残存面積率から耐火性を評価し，**表－7** のような総合評価が得られた。標準配合 C48(0.10)-SP のスランプフローは 49.0cm で，残存面積率は 98.1%であった。それに対して，A10(0.05)-VSP のスランプフローは 58.0cm で，残存面積率は 100%であった。したがって，A10 を用いることで，標準配合と比べて少ない繊維混入量で耐火性能が向上した。さらに，VSP の使用と A10 による繊維混入率を低減できる効果によって，流動性を改善することができた。

実験Ⅰおよび実験Ⅱのフレッシュ試験から，PP1 の繊維表面積の合計が流動性に及ぼす影響が非常に高いことがわかった。実験Ⅱの耐火試験から，耐火性に対しては PP1 の径がより細く繊維本数が稼げるほど，爆裂防止効果が高いことが確認された。繊維本数と繊維表面積は相関性が高いため，**図－10** のように繊維表面積の合計とスランプフロー，残存面積率の関係式が得られる。

本検討範囲内において，流動性について繊維表面積の合計が SP では 9×10^{7}mm^2/m^3 程度以下，VSP では 25×10^{7}mm^2/m^3 程度以下であれば，スランプフロー50cm の目標値を達成できると予測される。耐火性ついて繊維表面積の合計が 10×10^7 程度 mm^2/m^3 以上であれば，高い耐火性能が担保できると予測される。

5.　結論

本実験の範囲でわかったことを次に示す。

(1) VSP の使用と耐火性能の高い細径繊維の混入率低減による相乗効果によって，流動性と耐火性を同時に向上させることができた。

(2) 本検討範囲では，流動性と耐火性は繊維表面積の合計と高い関係があることがわかった。そのため，予め混入する繊維表面積の合計を算出すれば，流動性と耐火性を予測できる可能性が示された。

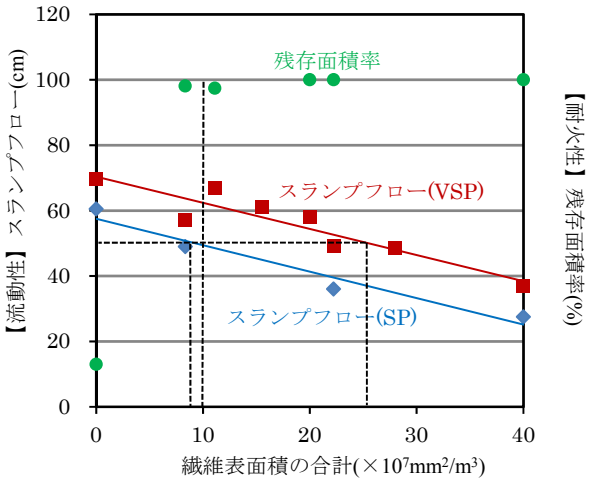
(3) 本条件では，繊維表面積の合計が 10×10^{7}mm^2/m^3 程度以上あれば，高い耐火性能が担保できることを確認した。

表－7　総合評価

混和剤	混入率 (Vol.%)	繊維名 A10		繊維名 B18		繊維名 C48	
VSP	0.05	◎		○			
		耐火性	◎	耐火性	○		
		流動性	◎	流動性	◎		
SP	0.1	×		○		○	
		耐火性	◎	耐火性	◎	耐火性	○
		流動性	×	流動性	○	流動性	○

※スランプフロー35cm 未満×，35cm 以上 50cm○，50cm 以上◎

※残存面積率 70%未満×，70%以上 100%未満○，100%◎



図－10　繊維表面積の合計と流動性・耐火性の関係

参考文献

1) V.K.Bui，M.R.Geiker，and S.P.Shah：Rheology of Fiber-Reinforced Cementitious Materials，High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC4)，RILEM，pp.221-231，2003

2) 石川直哉，三橋博三：ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料のフレッシュ性状及び力学特性に及ぼす材料および調合の影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集　第 76 巻　第 662 号，pp.729-736，2011 年 4 月

3) 土木学会：トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー143，pp.17-21，2014 年 6 月 3 日

4) 小山拓，Sungchul Bae，猪瀬亮，兼松学：高強度コンクリートにおける爆裂防止現象の要因及び PP 繊維添加の影響に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.243-244，2015 年 9 月

5) 山下彩，桜井邦昭，平田隆祥：細骨材表面が拘束する水量の算定方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.39，No.1，pp.49-54，2017