

論文 ポリプロピレン短繊維を混入したコンクリートの流動性および材料分離抵抗性に関する研究

川西 貴士*1・平田 隆祥*2・河合 研至*3

要旨：火災を受けるコンクリートの爆裂の抑制を目的として、直径が小さくアスペクト比の大きい綿状のポリプロピレン短繊維をコンクリートに混入する場合、流動性の低下が課題となる。そのため、綿状の繊維を混入する場合の配合の修正方法が求められる。そこで、スランプ値で管理するコンクリートを対象とし、綿状のポリプロピレン短繊維の混入がフレッシュコンクリートの品質に与える影響について確認した。その結果、ポリプロピレン短繊維の混入率の増加に伴い、単位水量を増加し、かつ単位粗骨材量を低減することで、流動性と材料分離抵抗性を確保できることを確認し、配合の修正方法の考え方を示した。

キーワード：ポリプロピレン短繊維、配合設計、スランプ試験、スプレッド試験、流動性、材料分離抵抗性

1. はじめに

都市部に構築される道路トンネルでは、車両事故による火災に備えて耐火性が求められる。特に、火災時に覆工コンクリートが高温履歴を受けると爆裂を生じる可能性が高く、万が一に備えて爆裂の抑制対策が求められる。この爆裂を抑制するために、一般にポリプロピレン短繊維（以下、PP 繊維と呼称）を 0.2vol.%程度混入する対策が取られる¹⁾。これまでに、直径が 0.02~0.05mm と小さく、アスペクト比の大きい綿状の PP 繊維を使用することで、効率的に爆裂を抑制できることが分かっている²⁾。

一方、この綿状の PP 繊維をコンクリートに 0.2vol.%程度混入すると、コンクリートの流動性が大きく低下することが課題となる。これまでに、所要の流動性を確保するには、PP 繊維の混入率の増加に応じて単位水量の増加が必要であることや、高流動コンクリートについては単位粗骨材量を低減する必要があることを確認している³⁾。しかし、スランプ値で管理するコンクリートの材料分離抵抗性についてはまだ十分に確認されていない。

コンクリートの一般的な配合設計の手順は、最初に目標スランプ、水セメント比など配合条件を設定する。次に、所要の流動性を確保するための単位水量を設定し、単位セメント量を設定する。最後にワーカビリティを満足できる最適な細骨材率あるいは単位粗骨材かさ容積を設定し、単位細骨材量や単位粗骨材量を決定する。

単位水量と、細骨材率もしくは単位粗骨材かさ容積の設定については、土木学会および日本建築学会の規準（以下、規準類と呼称）に標準的な値が示されているが⁴⁾⁵⁾、PP 繊維を混入する場合のコンクリートの配合設計方法に関しては、ほとんど記述がない。短繊維を混入したコンクリートの配合設計方法は、土木学会より発刊された

鋼繊維補強コンクリートの設計施工指針（案）（以下、SFRC 指針と呼称）の中で、鋼繊維の混入がコンクリートの流動性に及ぼす影響や、鋼繊維を混入する際の単位水量および細骨材率の補正方法が示されている⁶⁾。しかし、綿状の PP 繊維を混入する場合には補正量が過大となってしまう、適用が困難であり、配合の修正方法が必要となっている³⁾。

そこで、道路トンネルの覆工を対象として、スランプ値で管理するコンクリートに爆裂の抑制を目的とする綿状の PP 繊維を混入した場合の流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響について、練混ぜ試験により実験的に検討した。また、PP 繊維を混入する場合に、所要の流動性および材料分離抵抗性を確保するためのベースコンクリートの配合修正方法の確立に向けて、基礎的データの収集を行った。本稿では、実験により得られた配合修正方法について提案する。

2. 実験概要

使用するコンクリートは、道路トンネルの覆工に一般に用いられる材料や配合とした。実験に使用した材料を表-1に示す。結合材には、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の2種類を50%ずつ混合して使用した。爆裂の抑制を目的として、直径と長さの異なる2種類の市販のPP繊維を使用した。PP繊維の外観を写真-1に示す。

実験水準として、PP繊維の種類、PP繊維の混入率および細骨材率を変化させた。スランプの目標値は15cmとし、空気量の目標値は4.5%とした。爆裂を抑制するには一般に0.1~0.2vol.%のPP繊維を混入することが多い²⁾⁷⁾。そのため、PP繊維の混入率は、この範囲を包含

*1 (株)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)

*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部首席技師 工博 (正会員)

*3 広島大学 大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻教授 工博 (正会員)

するように 0, 0.1, 0.2 および 0.3vol.%の 4 水準とし, PP 繊維は外割で添加した。都市部の大深度地下に構築される道路トンネルでは, 高強度のコンクリートが求められるため, 水結合材比は 35%とした。細骨材率は, 38, 42, 46, 50, 54 および 58%の 6 水準とした。最初に, PP 繊維を混入しないベースのコンクリートの実績から, 細骨材率を 46%と設定し, PP 繊維の混入率に応じて, スランプを 15cm 確保するために必要な単位水量を決定した。高性能 AE 減水剤の混入率は結合材に対して 1%で一定とした。次に, PP 繊維の種類や混入率ごとに決定した単位水量を一定として細骨材率を変化させ, コンクリートのフレッシュ性状の確認を行った。細骨材率 46%の場合の配合の一覧を表-2 に示す。

コンクリートの練混ぜは, 二軸強制練りミキサを用いて行い, ベースコンクリートを 2 分間練り混ぜた後, PP 繊維を混入して, さらに 1 分間練り混ぜた。試験項目は JIS A 1101 のスランプ試験および DIN 1048 のスプレッド試験を行った。流動性は, スランプ試験の結果から評価した。材料分離抵抗性は, スランプ試験時のコンクリートの状態およびスプレッド試験の結果から評価した。スプレッド試験は, 高さ 15cm のスランプコーンに試料を詰め, コーンを引抜き, コンクリートの拡がりであるスプレッド値を測定した。測定は, コーンの引抜き直後と, スランプ板の落下回数 5 および 15 回の段階で実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 スランプ試験結果

PP 繊維の混入率と, 目標スランプ 15cm を確保するために必要な単位水量の関係を図-1 に示す。これまでの知見と同様に^{3),6)}, PP 繊維の混入率の増加に伴い, スランプ 15cm を確保するために必要な単位水量は増加した。また, アスペクト比の大きい PP2 の方が, PP1 に比べて単位水量が増加した。

スランプ試験結果の例を表-3 に示す。また, 細骨材率とスランプの関係を図-2 および図-3 に示す。既往の知見と同様に, 細骨材率の増加に伴い, スランプが低下する傾向が認められた³⁾。一方, 細骨材率の減少に伴い, 粗骨材が目立って表面が荒々しい状態となり, 一部でスランプの崩れや割れが認められた。また, PP 繊維の混入率の増加に伴い, スランプの低下量が減少した。細骨材率が 46%より小さい範囲では PP 繊維の混入率の増加に伴いスランプが小さい値を示し, 46%より大きい範囲では PP 繊維の混入率の増加に伴いスランプの低下量が低下した。PP 繊維の混入率の増加に伴い, 単位水量が増加し, コンクリートの流動に必要な単位ペースト量が增大したため, 骨材の粒度がスランプに及ぼす影響が小さくなったと考える。PP1 と PP2 は同様の傾向を示した。

表-1 使用材料

種類	記号	各材料の種類および物性
練混ぜ水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
混和材	BS	高炉スラグ微粉末, 密度2.89g/cm ³
細骨材	S	砂, 密度2.61g/cm ³ , 粗粒率2.68
粗骨材	G	碎石, 最大寸法20mm 密度2.65g/cm ³ , 粗粒率6.58
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系化合物)
短繊維	PP	PP繊維 (PP1), 密度0.91g/cm ³ , アスペクト比410 直径0.05mm(繊度17dtex) × 長さ20mm
		PP繊維 (PP2), 密度0.91g/cm ³ , アスペクト比570 直径0.02mm(繊度2.2dtex) × 長さ10mm

表-2 配合の一覧 (細骨材率 46%)

PP繊維の種類	PP繊維の混入率 (vol.%)	W/B [*] (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (kg/m ³)	PP (kg/m ³)
				W	C	BS	S	G		
無し	0	35.0	46.0	155	221	221	784	935	4.42	-
PP1	0.1	35.0	46.0	165	236	236	762	906	4.72	0.9
	0.2	35.0	46.0	170	243	243	749	893	4.86	1.8
	0.3	35.0	46.0	180	257	257	726	865	5.14	2.7
PP2	0.1	35.0	46.0	170	243	243	749	893	4.86	0.9
	0.2	35.0	46.0	180	257	257	726	865	5.14	1.8
	0.3	35.0	46.0	195	279	279	690	824	5.58	2.7

※B: 結合材 (C+BS)

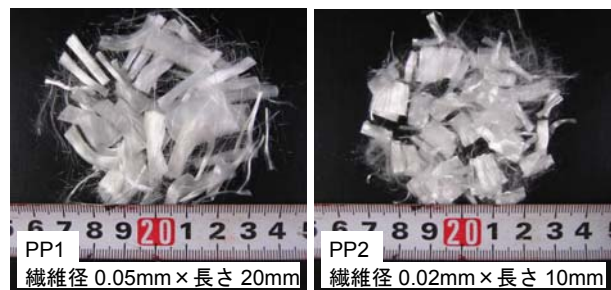


写真-1 PP 繊維

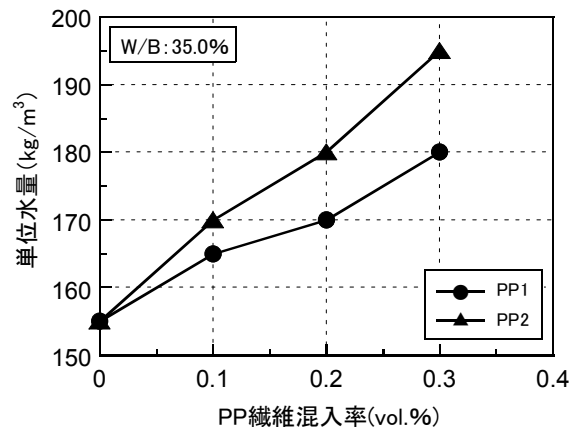


図-1 PP 繊維の混入率とスランプ 15cm の確保に必要な単位水量の関係

表-3 スランプ試験結果の例

PP繊維の種類および混入率	細骨材率 (%)				
	38	42	46	50	54
無し					
PP2 (0.1vol.%)					
PP2 (0.3vol.%)					

3.2 スプレッド試験結果

スプレッド試験結果の例を表-4に示す。また、細骨材率とスプレッド値の関係を図-4および図-5に示す。PP 繊維を混入していないベース配合は細骨材率の増加とともにスプレッド値が低下した。しかし、細骨材率の増加によるスプレッド値の低下量は、PP 繊維の混入率の増加に伴い低下する傾向が認められ、スランプ試験と同様の結果となった。特に PP 繊維を 0.3vol.%混入した配合については、細骨材率 58%の配合においても顕著なスプレッド値の低下は認められなかった。

3.3 材料分離抵抗性の評価

規準類によると、材料分離抵抗性に関して、細骨材率あるいは単位粗骨材かさ容積を調整し、適切な単位細骨材量と単位粗骨材量を設定する必要がある。しかし、具体的な設定方法は記載されていない⁴⁾⁵⁾。土木学会より発行されている施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（以下、配合設計指針と呼称）には、材料が分離傾向にある場合、スランプ試験後の試料の上面にフラット面がなく、あばた、割れ、崩れが認められるなど外観形状より判断が可能である旨記載されている⁸⁾。また、石井らも、試験後の試料に衝撃を与えるタンピング試験で、試料上部の円形が保持できている確認することで材料分離抵抗性を評価している⁹⁾。そこで、本実験では、スランプ試験およびスプレッド試験の試料の状態から3つの指標で材料分離抵抗性を評価することとした。

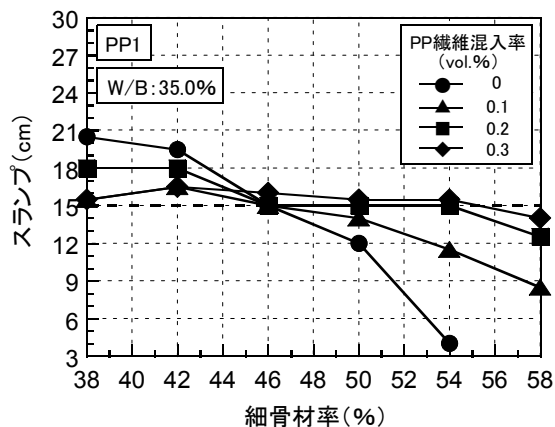


図-2 細骨材率とスランプの関係 (PP1)

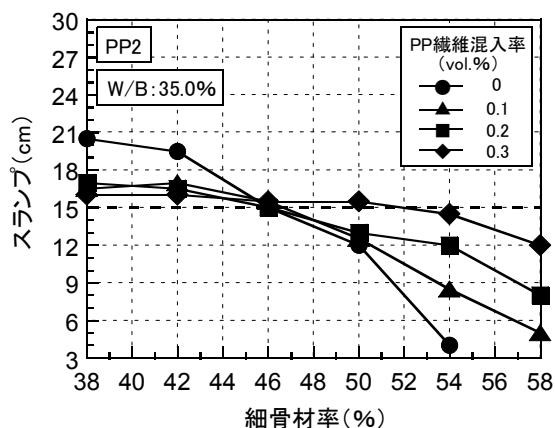


図-3 細骨材率とスランプの関係 (PP2)

表-4 スプレッド試験結果の例

細骨材率	38%			54%		
落下回数	0回	5回	15回	0回	5回	15回
PP繊維無し						
PP2 0.1vol.%						
PP2 0.3vol.%						

(a) スランブの形状と粗骨材の状態を観察する。粗骨材が目立って表面が荒々しく、表面にあれ、崩れ、割れなどが認められる場合は材料分離を生じているとし、荒々しさが少なく、十分にモルタルが満たされている場合を良好な状態と判断した。

(b) スランブ試験後の試料の上面に円形が保たれている場合を良好な状態とし、円形が保たれずフラット面が認められない場合に材料分離が生じているものと判断した。

(c) スプレッド試験の落下回数が5回の段階で、上部の円形が保たれておりフラットな面が認められる場合を良好な状態とし、円形が保たれておらずフラットな面が認められない場合に材料分離が生じているものと判断した。3つの指標による評価結果の一覧を表-5に示す。3つの評価手法すべてを満足する配合を良好な材料分離抵抗性を有する配合と判断した。PP繊維を混入しない配合と、PP1を0.1および0.2vol.%混入した配合は細骨材率46%以上、PP1を0.3vol.%混入した配合およびPP2を混入した配合は細骨材率50%以上で良好な材料分離抵抗性を有することを確認した。

3.4 最適な細骨材率および単位粗骨材絶対容積の評価

図-2および図-3の結果から、細骨材率の増加に伴いスランブが低下するため、所要のスランブを確保するための単位水量は増加する。そこで、流動性と材料分離抵抗性の両者を満足する最適な細骨材率は、材料分離抵抗性が得られる範囲でできるだけ小さく設定することが望ましい。規準類や配合設計指針にもその旨が記載されている^{4),5),8)}。そこで、最適な細骨材率は、PP1を混入する場合(0.2vol.%以下)で46%程度、PP2を混入する場合で50%程度となると判断した。

実験では、配合設計上、細骨材率の水準を変えて実験を行ったが、材料分離抵抗性の評価については、最適な

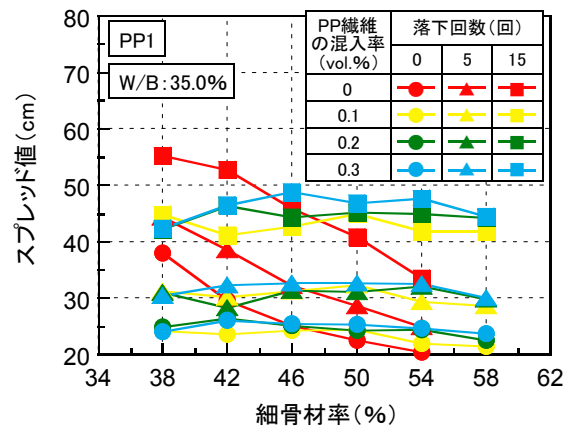


図-4 細骨材率とスプレッド値の関係 (PP1)

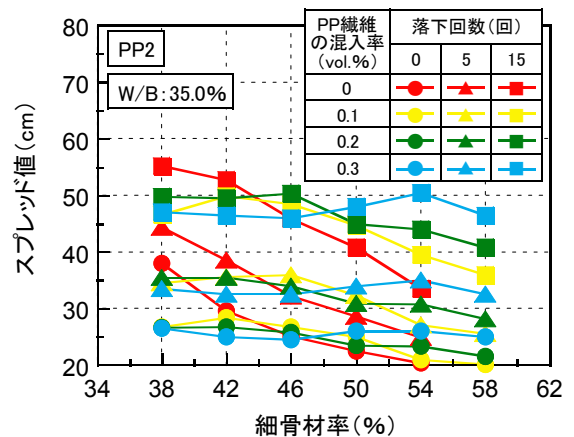


図-5 細骨材率とスプレッド値の関係 (PP2)

細骨材率から単位粗骨材絶対容積を算出し、最適値として再整理した。PP繊維の混入率と材料分離抵抗性を確保できる最適な単位粗骨材絶対容積の関係を図-6に示す。PP繊維の混入率の増大に伴い、単位粗骨材絶対容積を低減することで、材料分離抵抗性を確保できると考える。

表-5 材料分離抵抗性の評価

PP繊維の種類	PP繊維の混入率 (vol.%)	細骨材率(%)																				
		38			42			46			50			54			58					
		(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)			
無し	0	x	x	x	x	x	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PP1	0.1	x	x	x	x	x	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.2	x	x	x	x	x	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.3	x	○	x	x	○	x	○	○	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PP2	0.1	x	x	x	x	x	x	○	○	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.2	x	x	x	x	x	x	○	○	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.3	x	○	x	x	○	x	x	○	x	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※ 3つの指標すべてを満足する配合

(a) スランプ試験結果

「○」荒々しさが少なく、モルタルが満たされている。

(b) スランプ試験結果

「×」粗骨材が荒々しく、表面に穴、崩れ、割れなどが認められる。

「○」上部の円形が保たれており、フラットな面が認められる。

(c) スプレッド試験結果(5回落下後)

「×」上部の円形が保たれておらず、フラットな面がない。

「○」上部の円形が保たれており、フラットな面が認められる。

「×」上部の円形が保たれておらず、フラットな面がない。

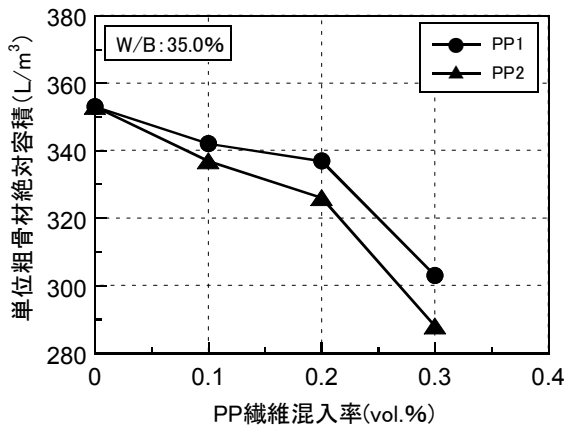


図-6 PP 繊維の混入率と単位粗骨材絶対容積の関係

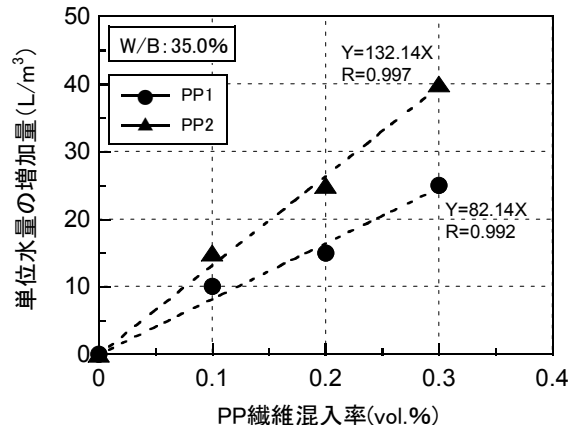


図-7 PP 繊維の混入率と単位水量の増加量の関係

4. PP 繊維の混入による配合の修正方法の検討

3章の結果より、PP 繊維の混入率の増加に伴い、目標とする流動性を確保するには単位水量を増加し、材料分離抵抗性を確保するには単位粗骨材絶対容積を低減する必要があることを確認した。そこで、SFRC 指針⁹⁾の中に記載されている配合設計方法を参考に、ベースコンクリートの配合の補正方法の考え方について整理した。単位水量および単位粗骨材絶対容積の補正量として、SFRC 指針を参考に実用性を考えて一次式で近似した。

図-1をもとに、PP 繊維の混入率の増加に伴う単位水量の増加量を近似したグラフを図-7に示す。PP 繊維の混入率 0.1vol.%の増加に比例して、PP1 の単位水量の増加量は 8.2kg/m³、PP2 の補正量は 13.2kg/m³であり、これまでの研究と同様の結果となった³⁾。また、PP 繊維の増加に伴う単位粗骨材絶対容積の低減量を近似したグラフを図-8に示す。PP 繊維の混入率 0.1vol.%の増加に比例して、PP1 の単位粗骨材絶対容積の低減量は 13.8L/m³と

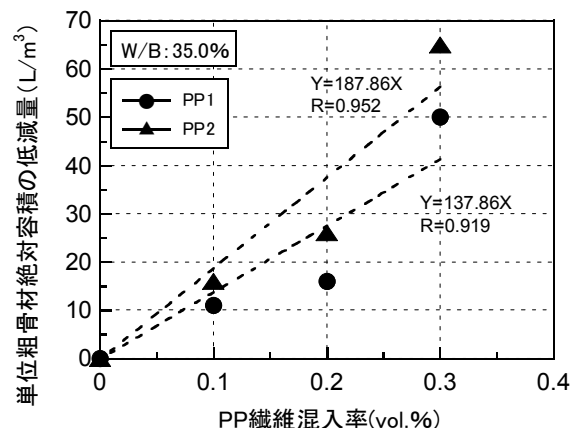


図-8 PP 繊維の混入率と単位粗骨材絶対容積の低減量の関係

なり、PP2 の低減量は 18.8L/m³となった。

今回の実験結果から、爆裂の抑制を目的とした綿状のPP 繊維をスランプ値で管理するコンクリートに混入する場合の配合の修正方法を表-6にまとめた。この表は、

表一6 PP 繊維の混入による配合の修正方法の考え方

条件の変化	PP繊維の混入率を0.1vol.%増加する場合の各補正量	PP繊維のアスペクト比を10増加する場合の各補正量の割増し量
単位水量 (kg/m ³)	+8.2	0.038倍
単位粗骨材絶対容積 (L/m ³)	-13.8	0.023倍

(基本条件)

- 1) PP繊維の形状寸法:アスペクト比410(織度17dtex×長さ20mm)
アスペクト比の適用範囲(上限):570(織度2.2dtex×長さ10mm)
- 2) PP繊維の混入率:0.3vol.%以下
- 3) 水結合材比:35.0%
- 4) 目標スランブ:15cm

PP1 を使用する場合の補正量を標準として記載した。

スランブ 15cm, 水結合材比 35%の配合条件で, PP1 を 0.3vol.%混入する場合は, SFRC 指針に従って補正すると, 単位水量は約 357kg/m³増加し, 細骨材率は約 98%増加させることになる。このように, SFRC 指針に従うと過大な補正量となってしまう現実的ではない。一方, 表一6 に従って補正すると, PP1 を 0.3vol.%混入する場合, 単位水量を約 25kg/m³増加し, 単位粗骨材絶対容積を約 41L/m³低減することとなり, 細骨材率に換算すると約 2%の増加量となる。提案した方法は現実的な配合の修正方法であると考ええる。

5. まとめ

道路トンネルの覆工に用いるスランブ値で管理するコンクリートを対象として, 爆裂の抑制を目的とした直径が小さくかつアスペクト比の大きい綿状のポリプロピレン短繊維の混入が, 流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響を検討した結果, 以下の知見が得られた。

- (1) 所要のスランブを確保するには, ポリプロピレン繊維の混入率の増加に比例して, 単位水量を増加する必要がある。その増加量は, 繊維のアスペクト比が大きいほど増加する。
- (2) 流動性と材料分離抵抗性の両方を満足する最適な単位粗骨材絶対容積は, ポリプロピレン繊維の混入率の増加に比例して, 低減する必要がある。その低減量は, 繊維のアスペクト比が大きいほど増加する。

- (3) 目標スランブ 15cm の普通コンクリートの単位水量や単位粗骨材絶対容積の補正量の目安を定量化し, 綿状のポリプロピレン短繊維を混入する際のベースコンクリートの配合の修正方法の考え方を示した。

今回の実験では, ポリプロピレン短繊維の混入率は 0.3vol.%まで実験を行ったが, 0.1vol.%程度で爆裂を抑制できる知見も得られている⁷⁾。過剰なポリプロピレン繊維の混入は, 所定の流動性を得るための単位水量の増加を招く。そのため, 加熱条件や要求される耐火性能に応じて適切な混入率とすることが望ましいと考える。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会:コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書, 2012.5
- 2) 川西貴士, 屋代勉, 田中義広, 小林一博:ポリプロピレン短繊維による鋼繊維補強コンクリートの耐火性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.333-338, 2008.6
- 3) 川西貴士, 平田隆祥, 河合研至:短繊維を混入したコンクリートの配合設計方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.265-270, 2017.6
- 4) 土木学会:2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2013.3
- 5) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015, 2015.7
- 6) 土木学会:鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), コンクリートライブラリー第50号, 1983.3
- 7) 春日清志, 遠藤啓一郎, 藤井剛, 屋代勉, 川西貴士:シールドトンネルにおける現場打ち耐火コンクリートの適用検討, トンネル工学報告集, Vol.24, II-10, 2014.12
- 8) 土木学会:施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針[2016年版], コンクリートライブラリー第145号, 2017.6
- 9) 石井佑大, 宇治公隆, 上野敦:タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008.6