

論文 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

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、直径の小さいポリプロピレン短繊維を混入すると、流動性が大きく低下するが、繊維を混入する際の配合設計方法に関する知見は少ない。そこで、直径の小さいポリプロピレン短繊維を混入したコンクリートの練混ぜ実験を行い、繊維の混入がコンクリートの流動性や材料分離抵抗性に及ぼす影響を確認した。その結果、ポリプロピレン短繊維の混入率の増加に伴い、単位水量と、単位粗骨材量に対する単位細骨材量の割合を増加させることで、流動性と材料分離抵抗性を確保できることを確認し、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。

キーワード: ポリプロピレン短繊維, 配合設計, 爆裂, 単位水量, 細骨材率, 単位粗骨材絶対容積

1. はじめに

道路トンネル内で、車両事故により火災が発生した場合、閉鎖された空間で可燃物が燃焼するため、覆工コンクリートは、急速に 1000℃以上の高温に晒される。特に、都市部の大深度地下に建設される道路トンネルには高強度のコンクリートが使用されることが多く、1000℃以上の高温履歴を受けると爆裂が発生し、トンネル内の覆工コンクリートが損傷を受け、避難救助の妨げとなるため、爆裂の抑制対策が必要となる。

爆裂の発生要因の一つとして、コンクリート中の自由水が水蒸気に変化する際の急激な膨張圧が、表層部のコンクリートを剥離させることが挙げられる。この爆裂の抑制対策として、一般にポリプロピレン短繊維（以下、PP 繊維と呼称）が使用されており、高温に晒された際に、PP 繊維が熔融・気化して水蒸気圧を逃がす経路を形成する方法が取られている¹⁾。近年では、コストダウンの観点からトンネル内の二次覆工を省略するため、PP 繊維の混入によりコンクリート自体に爆裂に対する抵抗性を付与したシールドセグメントや現場打ちコンクリートの適用が進められている^{1),2)}。

一方で、PP 繊維は化学的に安定であり、素材も柔らかく、比較的安価で入手しやすいことから、曲げ靱性の向上、ひび割れの低減および剥離剥落の防止など、幅広い用途で使用されている。PP 繊維の混入によりコンクリートの流動性が低下するが、これまでは、比較的直径が大きい PP 繊維を使用し、PP 繊維の混入率も小さかったため、流動性に及ぼす影響が少なく、大きな課題となっていなかった。

しかし、火災時の爆裂の抑制を目的として使用する PP 繊維は、水蒸気圧を逃がす経路を多数形成することが目的であり、一般の PP 繊維より直径が小さくかつアスペクト比が大きくなり、本数が何 100 倍にもなる場合があ

る。そのため、PP 繊維の混入によりコンクリートの流動性が大きく低下する。

これまでの研究により、所要の流動性を確保するには、PP 繊維を混入する前にベースコンクリートの流動性を高めておく必要があることを確認している²⁾。しかし、PP 繊維の混入がコンクリートの流動性や材料分離抵抗性に及ぼす影響については、十分に把握されていないのが現状である。直径が小さくかつアスペクト比の大きい PP 繊維を混入する場合の、合理的な配合設計方法の確立が課題となっている。

そこで、爆裂の抑制を目的とした直径の小さい PP 繊維の混入が、コンクリートの流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響について実験的に検討した。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、その実験により得られた結果について報告する。

2. 現状の配合設計方法

普通コンクリートの一般的な配合設計は、以下の手順で行われる。

- (1) 配合条件の設定
- (2) 単位水量の設定
- (3) 単位セメント量の設定
- (4) 細骨材率もしくは単位粗骨材かさ容積の設定

最初に設定する配合条件として、主に水セメント比と目標スランプが挙げられる。水セメント比は、設計基準強度および耐久性の確保の観点から必要な値を設定し、目標スランプは、各種施工条件よりワーカビリティを考慮して設定する。配合条件が決まると、単位水量、単位セメント量を設定した後、細骨材と粗骨材の割合を設定することとなる。

*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副部長 工博 (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究院社会環境空間部門教授 工博 (正会員)

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、以下の各基準類に標準的な値が示されている。a) 土木学会より発行されているコンクリート標準示方書〔施工編〕には、水セメント比 55%、スランブ 8cm の配合条件を基本とした単位水量および細骨材率の概略値が設定されており、使用材料やコンクリートの品質の違いに応じてこの値を補正する方法が示されている³⁾。また、b) 日本建築学会より発行されている建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事には、スランブに応じた単位水量および単位粗骨材かさ容積の標準値が示されている⁴⁾。

一方、高流動コンクリートについては、c) 土木学会から高流動コンクリートの配合設計・施工指針が発行されており、配合設計方法が示されている。普通コンクリートと概ね同じ手順で行うが、施工条件に応じて自己充填性のランクを設定し、そのランクに応じた流動性、材料分離抵抗性および間隙通過性を確保するために、単位粉体量や単位粗骨材絶対容積が設定されている⁵⁾。d) 日本建築学会からも同様に高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説が発行されており、流動性や材料分離抵抗性を確保するために、単位結合材量、単位ペースト量および単位粗骨材かさ容積等を適切に設定するよう記述されている⁶⁾。

しかし、各基準類には、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、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、小林らの研究⁷⁾により、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おり、e) 土木学会より発行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)の中に配合設計方法として示されている。この SFRC 指針では、所要のワーカビリティを得るために、鋼繊維の混入率、スランブおよび鋼繊維のアスペクト比などの増加に伴い、単位水量や細骨材率を所定の割合で増加するよう示されている⁸⁾。

この SFRC 指針に示されている鋼繊維は、断面の 1 辺が 0.5mm でかつアスペクト比が 60 の鋼繊維が用いられており、断面の 1 辺が 0.3~0.6mm の範囲の場合に適用できるとされている。また、配合条件として、水セメント比は 50% でスランブ 8cm のコンクリートを基準としている。一方、爆裂を抑制するには、直径が 0.02~0.05mm と小さく、アスペクト比が 410~570 と大きい PP 繊維が使用されることが多い²⁾。さらに、都市部の大深度地下に構築される道路トンネルには、設計基準強度が 40N/mm² 以上で、一般のコンクリートよりも高強度のコンクリートが使用されている。さらに、コンクリートの流動性は、スランブ 15cm 以上が必要とされることが多

い。この SFRC 指針に従って PP 繊維の混入による補正を行うと、単位水量は 500kg/m³ 程度増加し、細骨材率は 100% を超えてしまう場合があり、実用的ではなくそのまま準用することが難しい。そのため、直径が小さくかつアスペクト比の大きい PP 繊維を混入したコンクリートの練混ぜ試験を実施し、所要の流動性や材料分離抵抗性を確保するための配合の修正方法に関する基礎的な検討を行うこととした。

3. 実験概要

実験は 2 つのシリーズに大別して実施した。シリーズ 1 では、PP 繊維を混入する前のベースコンクリートの配合を同一とし、PP 繊維を外割で混入する場合のコンクリートのスランブおよびスランブフローに及ぼす影響を確認した。シリーズ 2 では、PP 繊維を混入した場合に、目標とするスランブおよびスランブフローを確保するために必要な単位水量と、最適な細骨材率もしくは単位粗骨材絶対容積について検討した。最初に、目標とするスランブおよびスランブフローが確保できるまで単位水量を増加し、PP 繊維の混入率と単位水量の増加量の関係を確認した。次に、その確認した単位水量を固定し、単位細骨材量と単位粗骨材量との割合を変化させて、コンクリートの状態を確認した。

シリーズ 1 およびシリーズ 2 ともに、コンクリートの種類は、覆工コンクリートへの実施工を想定して、スランブで管理する普通コンクリート(以下、スランブタイプと呼称)と高流動コンクリート(以下、高流動タイプと呼称)の 2 種類について検討した。スランブタイプの目標スランブは 15cm とし、高流動タイプの目標スランブフローは 60cm とした。空気量の目標値は、スランブタイプは 4.5% とし、高流動タイプは 2.0% とした。PP 繊維は外割で添加し、混入率は容積比で 0.1、0.2 および 0.3% の 3 水準で実験を行った。

実験に使用した材料を表-1 に示す。PP 繊維は、これ

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 2.62g/cm ³ , 粗粒率 2.60
粗骨材	G	碎石, 最大寸法 20mm 密度 2.65g/cm ³ , 粗粒率 6.61
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	PP1	PP 繊維, 密度 0.91g/cm ³ , アスペクト比 410 直径 0.05mm(織度 17dtex) × 長さ 20mm
	PP2	PP 繊維, 密度 0.91g/cm ³ , アスペクト比 570 直径 0.02mm(織度 2.2dtex) × 長さ 10mm

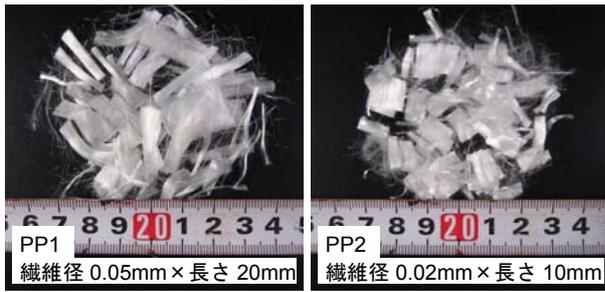


写真-1 PP 繊維

表-2 ベースコンクリートの配合

コンクリートの種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (B×%)
			W	C	BS	S	G	
スランプタイプ	35.0	46.0	155	221	221	787	935	1.00
高流動タイプ	35.0	48.4	175	250	250	811	875	1.15

※B: 結合材(C+BS)

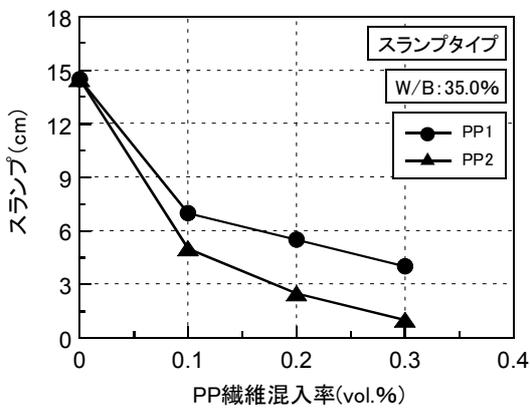


図-1 PP 繊維の増加に伴うスランプの低下

までの知見²⁾から、爆裂の抑制効果の高い繊維で、直径が小さくかつアスペクト比の大きい繊維径と長さの異なる2種類の繊維を選定した。使用したPP繊維の外観を写真-1に示す。結合材には、環境配慮と耐久性向上の観点から、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を50%ずつ混合して使用した。

PP繊維を混入する前のベースコンクリートの配合を表-2に示す。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、実績から水結合材比は35%とした。今回の実験は、水結合材比一定のもとで配合検討を行った。

単位水量は、目標とする流動性や材料分離抵抗性が確保できる範囲内でできるだけ低減することとした。単位水量を補正する際には、水結合材比は一定とした。混和剤の添加率は、スランプタイプは標準添加率とし、結合材質量の1%で一定とした。高流動タイプは、混和剤の過剰な添加による分離や凝結遅延が認められない範囲内で多量に添加し、単位水量をできるだけ低減した。両タイプとも高性能AE減水剤を用いた。単位細骨材量と単

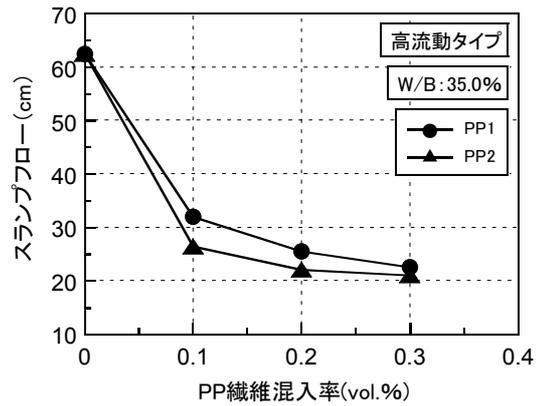


図-2 PP 繊維の増加に伴うスランプフローの低下

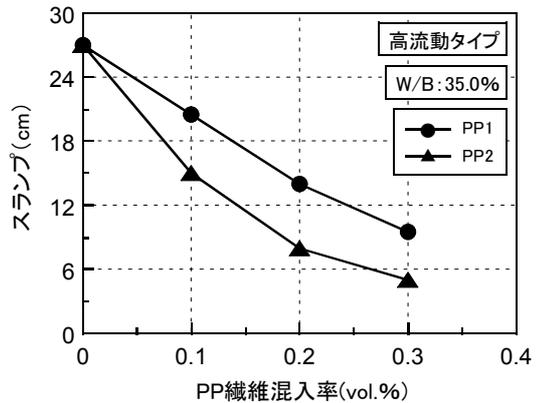


図-3 PP 繊維の増加に伴うスランプの低下

位粗骨材量との割合は、スランプタイプは細骨材率で設定し、ベースコンクリートの細骨材率を46%とした。高流動タイプは単位粗骨材絶対容積で設定し、ベースコンクリートの単位粗骨材絶対容積を330L/m³とした。

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサーを用いて行い、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、さらに1分間練り混ぜた。試験項目はスランプおよびスランプフローとし、それぞれ、JIS A 1101 および JIS A 1150 に準拠して試験を行った。

4. 実験結果および考察 (シリーズ1)

シリーズ1では、ベースコンクリートにPP繊維を混入し、コンクリートのスランプおよびスランプフローに及ぼす影響を確認した。その試験結果を図-1~図-3に示す。高流動タイプについては、スランプフローだけでなくスランプも測定した。スランプタイプおよび高流動タイプともに、PP繊維の混入率の増加に伴い、流動性が低下した。これは、小林らの鋼繊維の知見⁷⁾と同様となった。繊維の表面にセメントペーストが拘束され、流動性に寄与するセメントペースト量が低減すること、繊維と骨材の拘束が原因と考えられる。アスペクト比が大きいPP2の方がPP1よりも流動性の低下量が大きかった。

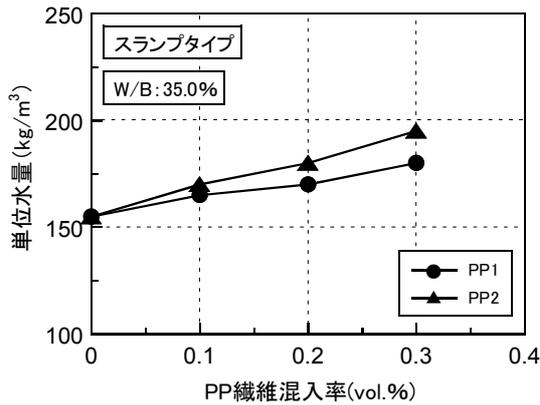


図-4 PP 繊維の混入率と単位水量の関係

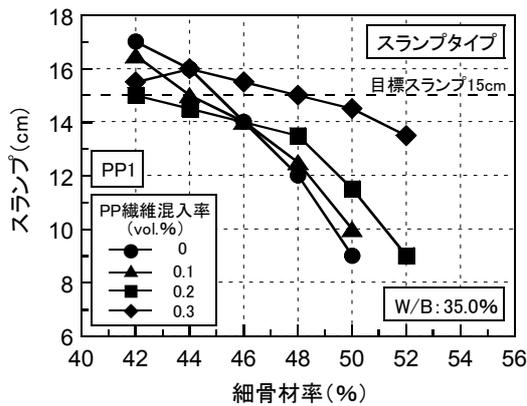


図-5 細骨材率とスランブの関係

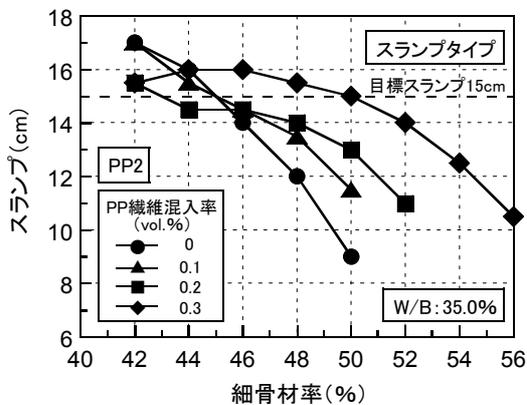


図-6 細骨材率とスランブの関係

5. 実験結果および考察 (シリーズ 2)

4章のシリーズ1の実験結果より、爆裂の抑制を目的としたPP繊維の混入率の増加に伴い、流動性が低下することを確認した。そこで、シリーズ2では、目標とするスランブおよびスランブフローを確保するために必要な単位水量と、単位細骨材量と単位粗骨材量との割合について検討を行った。

5.1 スランブタイプの実験結果

スランブタイプのPP繊維の混入率と、目標スランブを確保するために必要な単位水量の関係を図-4に示す。PP繊維の混入率の増加に伴い、必要な単位水量が増加し、SFRC指針と同様の傾向を示した。アスペクト比の大き



写真-2 スランブ形状の比較例

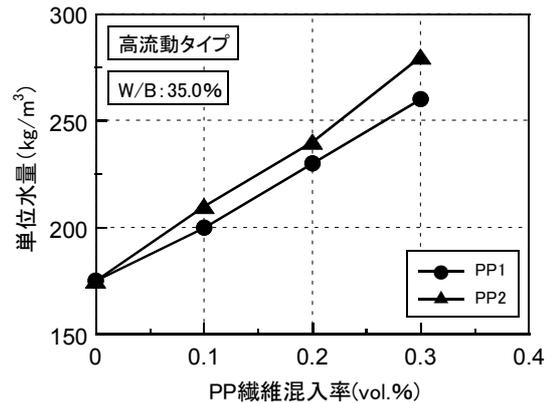


図-7 PP 繊維の混入率と単位水量の関係

いPP2の方が、PP1に比べて単位水量を増加する必要があることが判った。

細骨材率とスランブの関係を図-5および図-6に示す。スランブタイプは、細骨材率の増加に伴い、スランブが低下する傾向が認められた。また、細骨材率の減少に伴い、粗骨材が目立って荒々しい状態となり、一部でスランブの崩れが認められた。良好な状態と崩れて分離した状態のスランブ形状の比較例を写真-2に示す。小林らの実験⁷⁾によると、細骨材率とスランブの関係は上に凸の曲線となり、最適な細骨材率が明確に判断できるが、今回の実験では、細骨材率を低くしても、必ずしもスランブの低下が認められず、最適な細骨材率を明確に判断できなかった。ただし、PP繊維の混入率が増加すると、適用可能な細骨材率の範囲が広がる傾向があることが確認できた。

5.2 高流動タイプの実験結果

高流動タイプのPP繊維の混入率と目標スランブフローを確保するために必要な単位水量の関係を図-7に示す。スランブタイプと同様に、PP繊維の混入率の増加に伴い、必要な単位水量が増加した。アスペクト比の大きいPP2の方が、PP1に比べて単位水量を増加する必要があることが判った。また、単位水量と混和剤の添加率の関係を図-8に示す。PP繊維の種類によらず、単位水量と混和剤の添加率の間に相関関係が認められ、混和剤の添加率を増加すると単位水量を低減できることが判った。

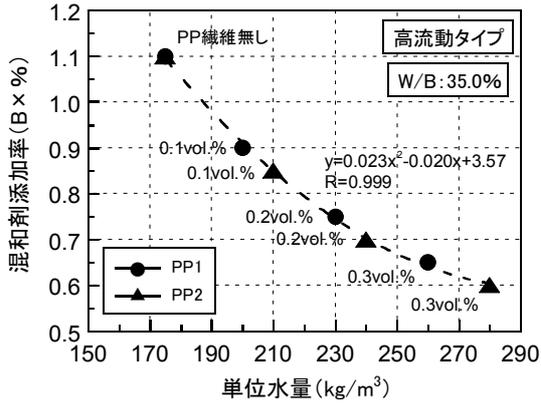


図-8 単位水量と混和剤添加率の関係

単位粗骨材絶対容積とスランプフローの関係を図-9 および図-10 に示す。高流動タイプは、スランプタイプと同様に、単位粗骨材絶対容積を低減し、細骨材の割合を増加させるほど、スランプフローが低下した。また、いずれのケースについても、単位粗骨材量を増加していくと、高性能 AE 減水剤の添加量を増加しても目標とするスランプフローは得られず、逆にセメントペーストの分離が認められた。図中の白抜きのデータは、分離が認められたケースを示す。良好な状態と分離した状態のスランプフローの比較例を写真-3 に示す。PP 繊維の混入率の増加に伴い、単位粗骨材絶対容積を低減する必要があることが確認できた。また、アスペクト比の大きい PP2 の方が、PP1 と比べて単位粗骨材絶対容積をより低減する必要がある。セメントペーストが分離することなく、目標とする流動性が確保できる最大の単位粗骨材絶対容積を決定できることが判った。

6. PP 繊維の混入による配合の修正方法の検討

5 章のシリーズ 2 の実験結果より、PP 繊維の混入率の増加に伴い、目標とする配合条件を満足するには、単位水量と、単位粗骨材量に対する単位細骨材量の割合を増加する必要があることが判った。そこで、SFRC 指針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検討した。今回の実験の範囲から、スランプタイプは最適な細骨材率の判断がつかなかったため、補正量は算出してない。

スランプタイプについて、図-4 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一次式で近似したグラフを図-11 に示す。PP 繊維の混入率が 0.1vol% 増加するのに比例して、PP1 の単位水量の補正量は 8.2kg/m³ となり、PP2 は 13.2kg/m³ であった。

高流動タイプについて、図-7 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一次式で近似した

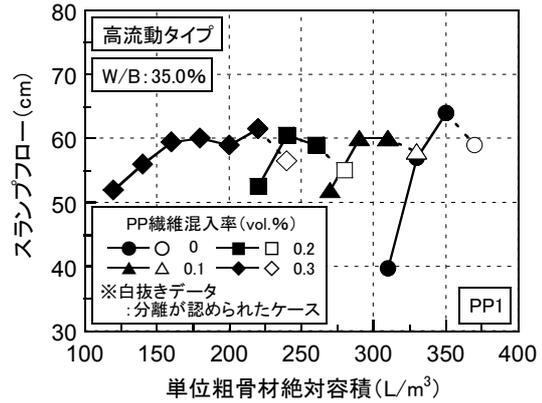


図-9 単位粗骨材絶対容積とスランプフローの関係

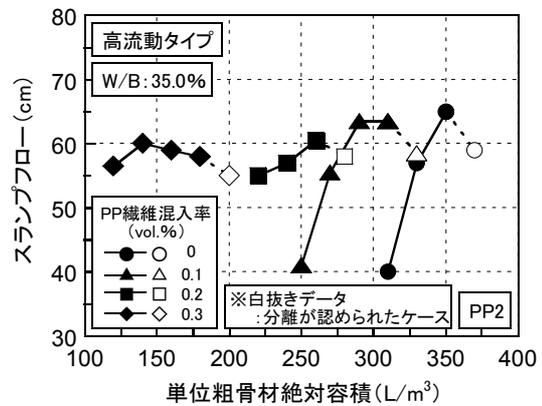


図-10 単位粗骨材絶対容積とスランプフローの関係



写真-3 スランプフローの状態の比較例

グラフを図-11 にスランプタイプと併せて示す。PP 繊維の混入率が 0.1vol% 増加するのに比例して、PP1 の単位水量の補正量は 27.9kg/m³ となり、PP2 は 34.3kg/m³ であった。次に、PP 繊維の増加に伴う単位粗骨材絶対容積の低減量を一次式で近似したグラフを図-12 に示す。PP 繊維の混入率が 0.1vol% 増加するのに比例して、PP1 の単位粗骨材絶対容積の補正量は 43.6L/m³ の低減となり、PP2 は 52.1L/m³ の低減となった。

今回の実験結果から、爆裂の抑制を目的とした直径の小さい PP 繊維を混入する場合のベースコンクリート配合の修正方法を表-3 にまとめた。この表には、PP1 を使用する場合の補正量を標準として記載した。

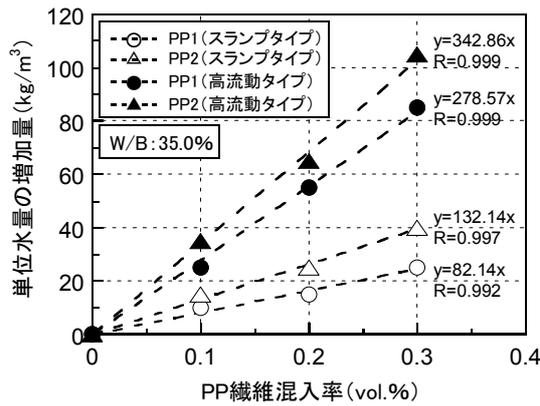


図-11 単位水量の補正量

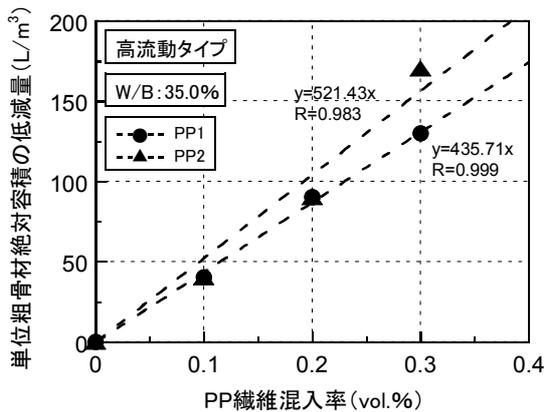


図-12 単位粗骨材絶対容積の補正量

表-3 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
スランプタイプ	単位水量 (kg/m³)	+8.2	0.038倍
高流動タイプ	単位水量 (kg/m³)	+27.9	0.014倍
	単位粗骨材絶対容積 (L/m³)	-43.6	0.013倍

(基本条件)

- PP繊維の形状寸法:アスペクト比410(繊維17dtex×長さ20mm)アスペクト比の適用範囲(上限):570(繊維2.2dtex×長さ10mm)
- PP繊維の混入率:0.3vol.%以下
- 水結合材比:35.0%
- スランプタイプ:目標スランプ15cm
高流動タイプ:目標スランプフロー60cm

7. まとめ

ポリプロピレン繊維の混入に伴い、どちらの種類のコングリートも単位水量を大きく補正する必要がある。そのため、実適用では、別途、耐久性、収縮、ひび割れ等に関する検討が必要となる。単位水量を低減するために、混和剤の添加率を増加したり、単位粉体量の増加により流動性を確保するなど配慮が求められる。

爆裂の抑制を目的とした直径が小さくかつアスペク

ト比の大きいポリプロピレン短繊維の混入が、普通コングリートや高流動コングリートの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。

今回の実験では、ポリプロピレン繊維の混入率は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。過剰なポリプロピレン繊維の混入は、単位水量の増加を招くため、適切な混入率とすることが望ましい。

- 同一のベースコングリートにポリプロピレン繊維を混入する場合、繊維の混入率の増加に伴い、スランプやスランプフローが低下する。
- 目標とする流動性を確保するには、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、目標とするスランプやスランプフローが大きいほど、繊維のアスペクト比が大きいほど増加する。
- 高流動コングリートにポリプロピレン繊維を混入する場合、ポリプロピレン繊維の混入率の増加に比例して、単位粗骨材絶対容積を低減する必要がある。
- スランプで管理する普通コングリートの単位水量の補正量と、高流動コングリートの単位水量および単位粗骨材絶対容積の補正量の目安を定量化し、ポリプロピレン繊維を混入する際のベースコングリートの配合の修正方法の考え方を示した。

参考文献

- 日本コングリート工学会：コングリートの高温特性とコング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
- 川西貴士，平田隆祥，屋代勉：都市部に構築される道路トンネルの総合的な耐火工構築技術，大林組技術研究所報，Vol.79，2015.12
- 土木学会：2012年制定コングリート標準示方書〔施工編〕，2013.3
- 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コングリート工事 2015，2015.7
- 土木学会：高流動コングリートの配合設計・施工指針〔2012年版〕，コングリートライブラリー136，2012.6
- 日本建築学会：高流動コングリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説，1997.1
- 小林一輔，岡村雄樹：所要のコンシステンシーを得るための鋼繊維補強コングリートの配合設計方法，土木学会論文集，Vol.296，pp.111-119，1980.4
- 土木学会：鋼繊維補強コングリート設計施工指針(案)，コングリートライブラリー第50号，1983.3