

シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工構築技術

川西 貴士 屋代 勉
(本社土木本部)

Fire Protection Measures for Lining Concrete of Shield Tunnel

Takashi Kawanishi Tsutomu Yashiro

Abstract

To construct the lining of road tunnels in urban areas using a shield construction method, fire protection measures against vehicle fires are required. This study is conducted to identify fire protection measures that can satisfy the explosive resistance and heat shielding required to ensure fire resistance. A fire resistance test using RABT curves simulating a tunnel fire is conducted, the optimum Polypropylene short fiber (PP fiber) shape for preventing explosive spalling is selected, and the amount of fiber is proposed according to the strength level. In addition, a method for modifying the mix proportion when mixing the PP fibers is proposed. Furthermore, fire protection measures that can be applied to a segment and a cast-in-place concrete are proposed; subsequently, the material quality and fire resistance are verified.

概 要

都市部のシールド工法で施工される道路トンネルの覆工では、トンネル内で発生する車両火災に備えて覆工自体に耐火性を付与する技術が求められている。そこで、耐火性の確保に必要な耐爆裂性と遮熱性の2つの性能を満たす耐火工の構築技術について検討を行った。トンネル火災を想定したRABT曲線を使用した耐火実験を行い、爆裂の抑制に効果的なポリプロピレン短繊維(PP繊維)を選定し、強度水準に応じた繊維の混入率の目安を提案した。また、PP繊維の混入により流動性や材料分離抵抗性が低下するため、PP繊維を混入する場合の配合の修正方法を提案した。そして、シールドトンネルにおけるセグメントや現場打ちコンクリートに適用できる耐火工の構築技術を提案し、その材料の品質や耐火性について検証した。

1. はじめに

都市部の地下にシールド工法にて構築される道路トンネル(以下、シールドトンネルと呼称)では、車両火災に備えた安全性に焦点が当てられている¹⁾。万が一可燃物を満載した車両による火災事故が発生すると、閉鎖された空間で可燃物が燃焼し、トンネル坑内の温度は急速に1000℃以上まで上昇する可能性が高い。このような高温下に覆工コンクリートが晒された場合、爆裂を生じたり、強度低下を引き起こすため、甚大な被害を招きかねない。そのため、これまでに覆工コンクリートを火害から保護するために、表面に耐火被覆を施す対策がとられてきた²⁾。しかしコストの低減、設置作業の省略およびメンテナンスフリーの観点から、近年では、覆工コンクリート自体に耐火性を付与する対策が求められている¹⁾。

耐火性の確保においては、耐爆裂性および遮熱性といった2つの性能が求められる。耐爆裂性については、ポリプロピレン短繊維(PP繊維)の混入による抑制対策が取られ、遮熱性については、鉄筋の受熱温度が許容値を超えないようにかぶりを確保する対策がとられてきた^{3),4)}。

建築分野では、耐火性を検証するために徐々に温度を上昇させるISO曲線による耐火実験が行われてきたが、シールドトンネルでは、トンネル火災を想定した厳しい加熱条件であるRABT曲線が使用される。これまでに、

RABT曲線による耐火実験が実施され、耐火工の種類、要求性能、耐火性の検証方法および維持管理の考え方などについて、基準や指針類で取りまとめられた^{1),5)}。しかし、具体的な使用材料、配合および施工方法については施工者の判断に任されており、体系的に整理されていない。

そこで、本研究ではシールドトンネルの一次覆工を対象として、耐火工構築技術の検討を行った。最初に、覆工コンクリートの耐爆裂性の確保に最適なPP繊維の種類や強度水準に応じた混入率を選定した。次に、選定したPP繊維を混入する際に、流動性および材料分離抵抗性を低下させないための配合の修正方法を検討した。そして、得られた知見を基に、耐火工の構築に向けて、耐火性を有するコンクリート系セグメント(以下、セグメントと呼称)および現場打ちコンクリートを提案し、その材料の品質、施工方法および耐火性について検証した。本稿では、その結果と得られた知見について報告する。

2. 耐爆裂性を確保するためのPP繊維の選定

2.1 概要

爆裂とは、コンクリートが加熱履歴を受けた場合に、自由水が蒸発する際の水蒸気圧や表層部の熱膨張により発生する圧縮応力によって、表層のコンクリートが剥離し、はじけ飛ぶ現象をいう¹⁾。この爆裂に対しては、PP織

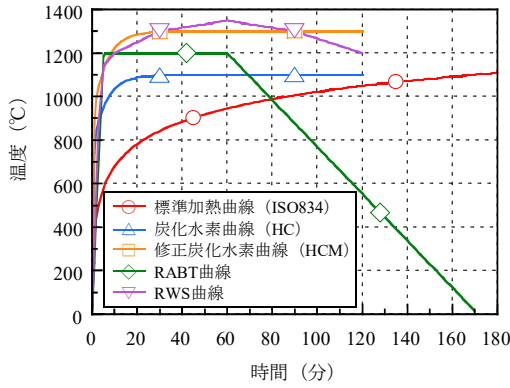


Fig. 1 耐火実験に用いられる加熱曲線
Heating Curves of Fire Resistance Test

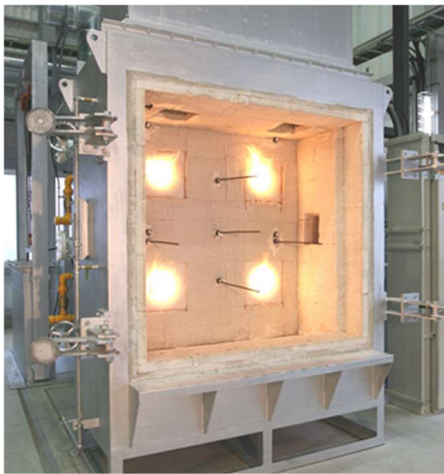


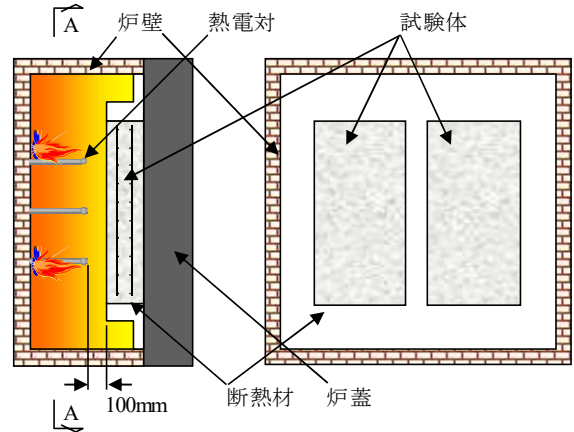
Photo 1 壁用耐火炉
Wall Test Furnace

維の混入による抑制対策がとられている。また、耐火性を評価するために、Fig. 1に示すような各種加熱曲線が規定されている。これまでに、建築分野を中心として、ISO曲線を用いた耐火実験により検討されてきた。しかし、シールドトンネルでは、トンネル火災を想定したRABT曲線が用いられる^{1),5)}。そこで、RABT曲線による耐火実験を行い、耐爆裂性について検討を行った。

耐火実験は、Photo 1に示す大林組の火災工学実験棟内の壁用耐火炉を用いて行った。耐火実験の概要をFig.2に示す。耐火実験に用いる試験体は幅500×長さ1,000×厚さ200mmとし、2体を同時に加熱した。試験体を作製後屋内にて保管し、材齢28日以降に耐火実験を実施した。耐火実験時は、CCDカメラを用いて炉内の状況を観察した。また、耐火実験後に、試験体の表面を50mm 間隔の格子に分割し、各交点 (231点)でノギスを用いて爆裂深さを測定した。試験体数は各ケース1体とした。

2.2 最適なPP繊維の選定

形状の異なる5種類のPP繊維を用いた耐火実験により、爆裂の抑制に効果的なPP繊維を選定した。PP繊維の一覧をTable 1に、実験ケースをTable 2に示す。PP繊維の直径は、繊維の断面を円形と仮定して、織度から換算した。



[実験概要・断面図] [試験体の加熱表面 (A-A矢視図)]

Fig. 2 耐火実験の概要
Outline of Fire Resistance Test

Table 1 PP繊維の一覧
Outline of Polypropylene Short Fiber

PP繊維の種類	織度* (dtex)	換算直径 (μm)	長さ (mm)	アスペクト比
A	3500	700	48	69
B	2.2	17.5	2	114
C	17	48.8	20	410
D	2.2	17.5	10	570
E	2.2	17.5	15	855

※ 織度：繊維の一定の長さに対する質量の割合
(dtex) 10,000m当たりの繊維の質量 (g)

Table 2 実験ケース
Experimental Case

鋼繊維の有無	コンクリートの種類	PP繊維の種類 (下段：アスペクト比)					
		A (69)	B (114)	C (410)	D (570)	E (855)	
無し	スランブタイプ	—	—	○	—	—	
	高流動タイプ 粉体系BS	○	○	○	○	—	
有り	スランブタイプ	—	○	○	○	—	
	高流動タイプ	粉体系LP	—	—	○	○	—
		粉体系FA	○	—	○	○	○
		粉体系BS	—	—	—	○	—
	増粘剤系	—	○	○	○	—	

併せて、繊維の長さとして換算直径の比率からアスペクト比を算出した。コンクリートの種類は、スランブで管理するコンクリート(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種類とし、高流動タイプは、粉体系と増粘剤系の2種類とした。粉体系の混和材には、高炉スラグ微粉末(以下、粉体系BSと呼称)、フライアッシュ(以下、粉体系FAと呼称)および石灰石微粉末(以下、粉体系LPと呼称)の3種類を使用した。増粘剤系にはセルロース系の増粘剤を使用した。鋼繊維の混入により爆裂を低減できるとの見解もあり、補強繊維

Table 3 配合
Mix Proportion

鋼繊維の有無	コンクリートの種類	繊維の種類	W/P (%)	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								繊維混入率 (vol%)	混和剤添加率 (kg/m ³)	混和剤添加率 (B×%)	圧縮強度 (N/mm ²)	
							W	C	BS	FA	LP	S	G	SF					
無し	スランプタイプ	C	36.0	36.0	36.0	55.7	170	472	—	—	—	949	764	—	0.2	—	0.750	75.6	
	高流動タイプ 粉体系BS	A	28.8	28.8	57.6	58.7	190	330	330	—	—	864	614	—	0.2	—	0.900	78.5	
		B	28.8	28.8	57.6	56.2	205	356	356	—	—	779	614	—	0.2	—	0.900	82.1	
		C	28.8	28.8	57.6	56.2	205	356	356	—	—	779	614	—	0.2	—	0.900	80.5	
		D	28.8	28.8	57.6	54.4	215	373	373	—	—	724	614	—	0.2	—	0.900	79.0	
有り	スランプタイプ	B	36.0	36.0	36.0	55.7	170	472	—	—	—	941	757	47	0.2	—	0.750	78.1	
		C	36.0	36.0	36.0	55.7	170	472	—	—	—	941	757	47	0.2	—	0.750	81.3	
		D	36.0	36.0	36.0	55.7	180	500	—	—	—	913	735	47	0.2	—	0.750	76.3	
	粉体系BS	D	28.8	28.8	57.6	53.8	215	373	373	—	—	708	614	47	0.2	—	0.900	76.1	
		粉体系FA	A	28.8	28.8	36.0	62.5	160	444	—	111	—	1010	614	47	0.2	—	0.900	86.0
	C		28.8	28.8	36.0	61.8	165	458	—	115	—	981	614	47	0.2	—	0.900	81.7	
	D		28.8	28.8	36.0	59.6	180	500	—	125	—	896	614	47	0.2	—	0.900	79.1	
	高流動タイプ	粉体系LP	E	28.8	28.8	36.0	57.2	195	542	—	135	—	811	614	47	0.2	—	0.900	77.6
			C	28.8	36.0	36.0	60.7	175	486	—	—	122	939	614	47	0.2	—	0.900	79.9
	増粘剤系	D	D	28.8	36.0	36.0	57.7	195	541	—	—	135	829	614	47	0.2	—	0.900	78.7
			B	36.0	36.0	36.0	61.2	195	542	—	—	—	958	614	47	0.2	0.3	0.900	73.8
			C	36.0	36.0	36.0	61.2	195	542	—	—	—	958	614	47	0.2	0.3	0.900	76.6
			D	36.0	36.0	36.0	59.3	210	583	—	—	—	885	614	47	0.2	0.3	0.900	76.6

※使用材料:水(W), 普通ポルトランドセメント(C), 高炉スラグ微粉末(BS), フライアッシュ(FA), 石灰石微粉末(LP), 細骨材(S), 粗骨材(G), 鋼繊維(SF),

PP繊維(PP), 増粘剤(VM), 高性能減水剤(SP)

※B:結合材(C, FA, BSの合計), P:粉体(BとLPの合計)

として、鋼繊維の有無についても併せて検討を行った。鋼繊維には、直径0.6mmで長さ30mmのものを使用した。スランプタイプと増粘剤系については、結合材として普通ポルトランドセメントを使用した。実験に用いたコンクリートの配合をTable 3に示す。覆工コンクリートには高強度コンクリートが使用されるため、水セメント比は36%とし、圧縮強度が80N/mm²程度とした。粉体系BSについては水結合材比を28.8%とし、結合材の50%を内割置換した。フライアッシュおよび石灰石微粉末については、水セメント比を36%とし、セメントの20%を外割で添加して水粉体比を28.8%とし、強度水準を同程度とした。PP繊維の混入率はいずれも0.2vol.%とした。

爆裂は、いずれも加熱開始後2~2分30秒程度経過し、炉内温度が500~600℃に達した時点で発生し、概ね5~10分経過した時点で収まり、その後は進行しなかった。CCDカメラで撮影した炉内の状況の一例をPhoto 2に示す。爆裂は、5~10cm位の円形で厚さ数mm~10mm程度のコンクリート片が表層から剥離して発生した。爆裂が軽微な試験体については、数か所剥離して収束したが、爆裂による損傷が大きい試験体については、コンクリート片が断続的に剥離し、爆裂範囲が重なり合って層状に損傷を受け、広範囲にわたって損傷を受けた。PP繊維のアスペクト比と爆裂深さの関係をFig. 3に示す。アスペクト比の増加に伴い、爆裂深さが低減する傾向が認められた。爆裂の抑制にはアスペクト比が400~600程度のPP繊維が効果的であることが判った。PP繊維のアスペクト比

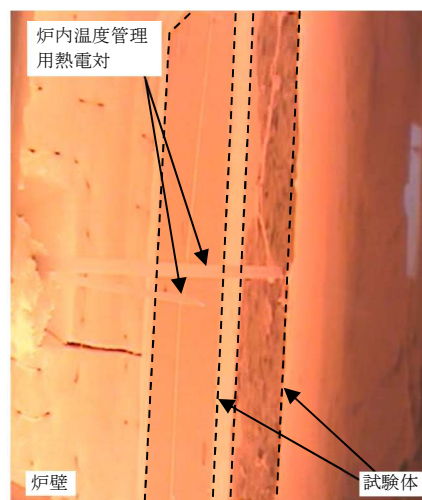


Photo 2 耐火実験状況
The State of Fire Resistance Test

の影響が大きく、混和材料の違いによって顕著な差異は認められなかった。スランプタイプに比べて高流動タイプの方が爆裂深さが大きい結果であった。また、鋼繊維を混入することで爆裂深さが低減された。

2.3 強度水準に応じたPP繊維の混入率

本節では、コンクリートの強度水準が爆裂に及ぼす影響や爆裂の抑制に必要なPP繊維の混入率を確認した。前節の結果から、PP繊維には、Photo 3に示す繊維17dtex×長さ20mmでアスペクト比410の繊維(PP1)および繊維度2.2dtex×長さ10mmでアスペクト比570の繊維(PP2)の2種

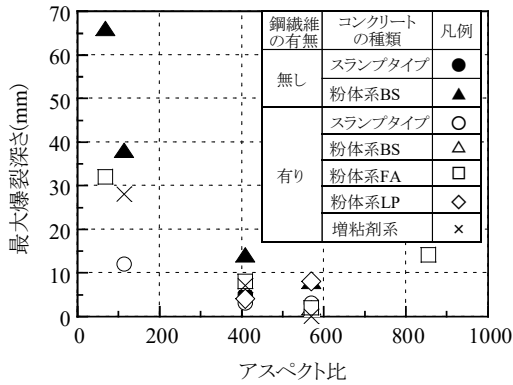


Fig. 3 PP繊維のアスペクト比と最大爆裂深さの関係
Max Explosive Spalling Depth to Aspect Ratio of Polypropylene Short Fiber

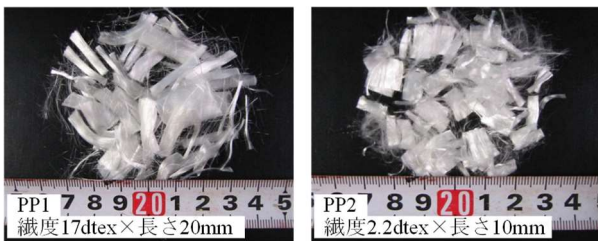


Photo 3 使用したPP繊維
Polypropylene Short Fiber

類の繊維を使用した。水結合材比を55.0, 45.0, 40.0, 35.0, 30.0および28.8%の6水準とし、強度レベルを変えて実験を行った。各水結合材比に対してPP繊維の混入率をそれぞれ変化させた。実験ケースをTable 4に示す。

実験に用いた配合をTable 5に示す。水結合材比40.0%以上のコンクリートは、スランブタイプとし、スランブ15cmを目標とした。水結合材比35.0%以下のコンクリートは、高流動タイプとし、スランブフロー60cmを目標とした。スランブタイプには高炉セメントB種を使用し、高流動タイプには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。

耐火実験の結果、爆裂の抑制に必要なPP繊維の混入率を結合材水比(水結合材の逆数)との関係で整理したグラフをFig. 4およびFig. 5に示す。最大爆裂深さが10mm未満のデータで、各結合材水比におけるPP繊維の混入率が最も小さいデータの近似線を付記した。結合材水比の増加に伴い強度水準が高くなると爆裂深さが増加するが、所要のPP繊維の混入により、爆裂深さを抑制できることを確認した。アスペクト比の大きいPP2を使用した方が爆裂の抑制効果が高いことを確認した。また、結合材水比と爆裂深さを10mm未満に抑制するために必要なPP繊維の混入率の間には線形関係が認められた。アスペクト比の大きい繊維度17dtex×長さ20mm(PP1)および繊維度2.2dtex×長さ10mm(PP2)のPP繊維を用いる場合、爆裂深さは結合材水比とPP繊維の混入量によって整理することができ、爆裂の抑制が可能である。強度水準に応じた爆裂の抑制に必要なPP繊維の混入率の目安を示した。

Table 4 実験ケース
Experimental Case

PP繊維の混入率 (vol.%)	水結合材比 (%)						
	スランブタイプ			高流動タイプ			
	55.0	45.0	40.0	35.0	30.0	28.8	
PP無し	0.00	○	○	○	○	○	—
PP1	0.05	○	○	○	○	○	—
	0.10	○	○	○	○	○	—
	0.15	—	—	—	○	—	○
	0.20	—	—	—	○	—	○
	0.25	—	—	—	—	—	○
	0.30	—	—	—	—	—	○
PP2	0.05	○	○	○	○	○	—
	0.10	○	○	○	○	○	—
	0.15	—	—	—	—	—	○
	0.20	—	—	—	—	—	○

Table 5 配合
Mix Proportion

コンクリートの種類	W/B (%)	繊維の種類	繊維の混入率	単位量 (kg/m ³)						混和剤添加率 (B×%)				
				W	C1	C2	BS	S	G	WR1	WR2	SP		
スランブタイプ	55.0	無し	無し								0.250	—	—	
			0.05								—	0.850	—	
		PP1	0.10	175	—	318	—	867	913		—	1.000	—	
			0.05								—	1.300	—	
		PP2	0.10								—	1.600	—	
			0.05								—	0.700	—	
	45.0	無し	無し									—	0.700	—
			0.05									—	1.000	—
		PP1	0.10	175	—	389	—	803	916		—	1.200	—	
			0.05									—	1.150	—
		PP2	0.10									—	1.400	—
			0.05									—	—	0.650
40.0	無し	無し									—	—	0.650	
		0.05									—	—	0.750	
	PP1	0.10	165	—	413	—	789	936		—	—	0.850		
		0.05									—	—	0.850	
	PP2	0.10									—	—	1.000	
		0.05									—	—	1.000	
高流動タイプ	35.0	無し	無し	175	250	—	250	811	875	—	—	—	1.000	
			0.05	200	286	—	286	735	822	—	—	—	0.875	
		PP1	0.10	200	286	—	286	735	822	—	—	—	0.900	
			0.15	215	307	—	307	724	755	—	—	—	0.700	
			0.20	230	329	—	329	712	689	—	—	—	0.700	
			0.05	210	300	—	300	684	822	—	—	—	0.825	
	PP2	0.10	210	300	—	300	684	822	—	—	—	0.850		
		0.05	175	292	—	292	738	875	—	—	—	1.000		
	30.0	無し	無し	175	292	—	292	738	875	—	—	—	1.000	
			0.05	190	317	—	317	708	822	—	—	—	0.950	
		PP1	0.10	190	317	—	317	708	822	—	—	—	1.025	
			0.05	200	333	—	333	653	822	—	—	—	0.900	
		PP2	0.10	200	333	—	333	653	822	—	—	—	0.925	
			0.15	200	347	—	347	836	611	—	—	—	1.000	
	28.8	PP1	0.20	200	347	—	347	836	611	—	—	—	1.025	
			0.25	210	365	—	365	820	543	—	—	—	1.000	
			0.30	215	373	—	373	885	477	—	—	—	1.000	
			0.15	215	373	—	373	752	611	—	—	—	0.950	
PP2		0.20	215	373	—	373	752	611	—	—	—	1.000		

※使用材料: 水(W), 普通ポルトランドセメント(C1), 高炉セメントB種(C2), 高炉スラグ微粉末(BS), 細骨材(S), 粗骨材(G), AE減水剤(WR1), AE減水剤高機能タイプ(WR2), 高性能AE減水剤(SP)
※B: 結合材 (C1, C2, BSの合計)

3. 耐火コンクリートの配合の修正方法

3.1 概要

2章の結果より、爆裂の抑制には直径が小さく、アスペクト比の大きいPP繊維が有効である。しかし、このような繊維を使用する場合、繊維の混入によって流動性が大きく低下する。比較的直径が大きく、アスペクト比の小さい鋼繊維を混入するコンクリートについては、土木学会より配合の修正方法が示されている⁶⁾。この指針では繊維の混入や繊維のアスペクト比により単位水量や細骨材率を補正する方法が示されている。しかし、この指針では繊維の断面寸法が0.3~0.6mmで、繊維の混入率が0.5~2.0vol.%が対象とされている。2章の結果より爆裂の抑制に必要なPP繊維の断面寸法は小さく、混入率も小さいため、この指針をそのまま準用することは難しい。そこで、本章では爆裂の抑制に用いるPP繊維を対象として、繊維の形状や混入率に応じて、ベースコンクリートの配合を修正する方法について検討した。

3.2 PP繊維が流動性や材料分離抵抗性に及ぼす影響

PP繊維には、2章で使用した繊維度17dtex×長さ20mm(PP1)と繊維度2.2dtex×長さ10mm(PP2)の2種類の繊維を使用した。コンクリートの種類はスランプタイプと高流動タイプの2種類とし、スランプの目標値は15±1cm、スランプフローの目標値は60±5cmとした。PP繊維の混入率は0、0.1、0.2および0.3vol.%の4水準とし、外割で添加した。細骨材率および単位粗骨材量の変化させる前の基準とするコンクリートの配合をTable 6およびTable 7に示す。水結合材比は35%とし、スランプタイプは細骨材率を38~58%、高流動タイプは単位粗骨材絶対容積を120~370L/m³の間で変化させた。

最初に目標とするスランプおよびスランプフローを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、細骨材率もしくは単位粗骨材絶対容積を変化させて、コンクリートの材料分離の状態を確認し、最適な単位細骨材量と単位粗骨材量の割合を決定した。試験項目はスランプ(JIS A 1101)およびスランプフロー(JIS A 1150)とし、スランプタイプについては、併せてスプレッド試験(DIN 1048)も行った。スランプタイプは、スランプ試験の結果、表面に穴、崩れ、割れなどが認められる場合や、スランプ試験およびスプレッド試験の落下回数5回の段階において、試料の上面の円形が保たれず平らな面が認められない場合に、材料が分離しているものと判断した。高流動タイプは、所定のスランプフローが得られるまで混和剤の添加率を増加し、セメントペーストの分離が認められる範囲を特定した。

単位水量の補正量をFig. 6に示す。スランプタイプ、高流動タイプともに、PP繊維の混入率の増加に伴い、所定の流動性の確保に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、増加量が大きい結果となった。

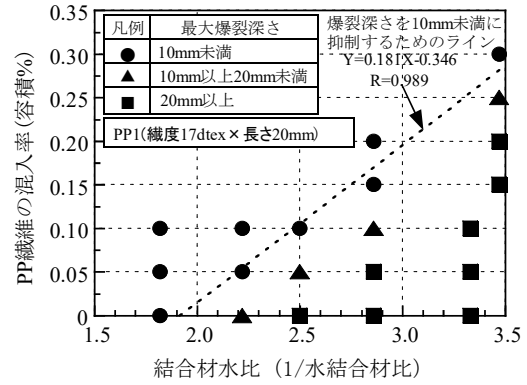


Fig. 4 結合材水比とPP繊維の混入率の関係 (PP1)
Ratio of Polypropylene Short Fiber to Binder-Water Ratio (PP1)

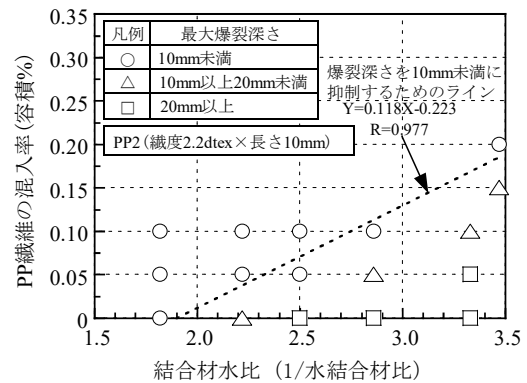


Fig. 5 結合材水比とPP繊維の混入率の関係 (PP2)
Ratio of Polypropylene Short Fiber to Binder-Water Ratio (PP2)

Table 6 配合 (スランプタイプ)
Mix Proportion (Slump Type)

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

※使用材料：水(W)、普通ポルトランドセメント(C)、高炉スラグ微粉末(BS)、細骨材(S)、粗骨材(G)、PP繊維(PP)、高性能AE減水剤(SP)
※B：結合材 (C, BSの合計)

Table 7 配合 (高流動タイプ)
Mix Proportion (High-Fluidity Type)

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (kg/m ³)
		W	C	BS	S	G	
35.0	48.4	175	250	250	811	874	5.50

※使用材料：水(W)、普通ポルトランドセメント(C)、高炉スラグ微粉末(BS)、細骨材(S)、粗骨材(G)、高性能AE減水剤(SP)
※B：結合材 (C, BSの合計)

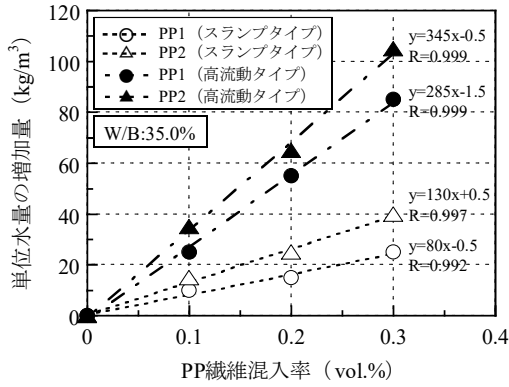


Fig. 6 PP繊維の混入率と単位水量の増加量の関係
Increasing Amount of Unit Water Content to Ratio of Polypropylene Short Fiber

材料分離抵抗性を確保するには、PP繊維の混入量の増加に伴い、スランブタイプは細骨材率の増加、高流動タイプは、単位粗骨材絶対容積の低減が必要であった。試験状況の一例をTable 8に示す。細骨材量の増加に伴い、流動性の確保に必要な単位水量が増加するため、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した。PP繊維の混入率の増加に伴う単位粗骨材絶対容積の補正量をFig. 7に示す。なお、スランブタイプは、配合設計上細骨材率を変化させて実験を行ったが、細骨材率では数値の変化が小さく評価しにくいので、高流動タイプと同様に単位粗骨材絶対容積で評価した。単位水量と同様にアスペクト比の大きいPP2の方が、補正量が大きい結果となった。

3.3 配合の修正方法の提案

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の配合の修正方法をTable 9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。PP繊維の混入に伴い、コンクリートの単位水量の増加が必要である。しかし、耐久性、収縮、ひび割れなどの観点からできるだけ単位水量は少ない方が望ましい。そのため、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の配慮が求められる。また、過剰なPP繊維の混入は、単位水量の増加を招くため、2章の結果をもとに適切な混入率とすることが望ましい。

4. 覆工への耐火工構築技術の適用

4.1 概要

本章では、2章および3章の結果を踏まえて、シールドトンネルの覆工への適用に向けた耐火工の構築技術について検証を行った。首都高速道路株式会社の設計要領では、耐火実験時の照査項目として、実際のセグメントと同等の試験体を用いて、設計断面力を導入して加熱することが望ましいとしている⁵⁾。シールドトンネルには土

Table 8 スランブおよびスランブフローの状態の例
Examples of Slump and Slump Flow Test

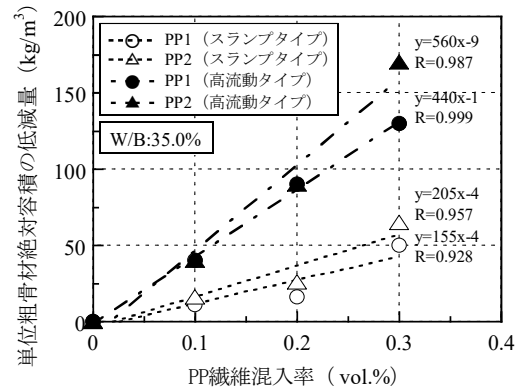
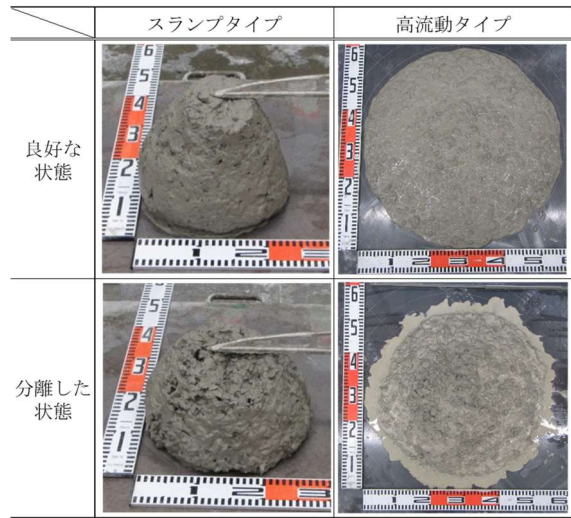


Fig. 7 PP繊維の混入率と単位粗骨材絶対容積の低減量の関係
Unit Coarse Aggregate Absolute Volume to Ratio of Polypropylene Short Fiber

Table 9 PP繊維の混入による配合の修正方法
Modify Method of Mix Proportion by Mixing Polypropylene Short Fiber

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/m³)	スランブタイプ	+8.2	0.038倍
	高流動タイプ	+27.9	0.014倍
単位粗骨材絶対容積 (L/m³)	スランブタイプ	-13.8	0.023倍
	高流動タイプ	-43.6	0.013倍

(基本条件)

- PP繊維の形状：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
- 水セメント比：35.0%
- スランブタイプ：目標スランブ15cm
高流動タイプ：目標スランブフロー60cm

圧や水圧などにより圧縮応力が作用するため、爆裂が生じやすいとの知見があり、圧縮応力が作用した場合の耐爆裂性について確認を行った。覆工コンクリートの耐火性には、耐爆裂性の他に遮熱性も必要であり、鉄筋の受熱温度を許容範囲に収めるために必要なかぶりについて確認を行う必要がある。そこで、実際の覆工を想定した実規模の試験体を用いて、設計で想定する圧縮応力を作用させた状態で、RABT曲線による耐火実験を行い、使用する耐火コンクリートの品質や耐火性の検証を行った。

また、シールドトンネルの覆工は、セグメントを用いてリング状に組み立てて構築するが、本線とランプが接続するトンネルの拡幅部においては、セグメントでシールドトンネルを構築した後にセグメントを切り開き、現場打ちのコンクリートで覆工を構築することも求められる。現場打ちコンクリートの場合、プラントにてベースコンクリートを製造し、打込み場所にてPP繊維を投入して打ち込む必要があり、施工に手間と時間を要する。そのため、現場打ちコンクリートについては、実際の施工を模擬した施工実験を行い、施工性の検証を行った。本章ではセグメントと現場打ちコンクリートの2種類について、耐火コンクリートの適用性の検討を行った。

4.2 セグメントへの適用検討

セグメントに用いる耐火コンクリートの目標性能をTable 10に示す。コンクリートの剥落防止、ひび割れの分散および耐久性の向上によりセグメントの品質を向上し、主鉄筋の低減や配力筋の省略によりコスト削減を図るために、鋼繊維を混入した耐火型の高機能SFRCセグメントとした。鋼繊維の分散性の向上やテーブルバイブレータの省力化の観点から高流動タイプを使用した。目標とするスランブフローは60cmとし、空気量は2.0%とした。通常セグメントには、高強度のコンクリートが使用されるため、設計基準強度を60N/mm²(管理材齢56日)とした。また、二次製品工場において一日一回の型枠の転用を考えて、材齢20時間で脱型時に必要な15N/mm²以上の圧縮強度が必要であるため、併せて確認を行った。セグメントに用いる配合をTable 11に示す。水結合材比は28.8%とし、2章の結果よりPP繊維には繊維度2.2dex×長さ10mmでアスペクト比570の繊維を使用し、混入率は0.2vol.%とした。鋼繊維の混入率は0.6vol.%とした。グリーン調達と塩害に対する耐久性を向上させるために、結合材に混和材として高炉スラグ微粉末を50%置換した。

覆工コンクリートの耐火性には、耐爆裂性と遮熱性の2項目が要求される。できるだけ爆裂を抑制するという観点から、最大爆裂深さを10mm未満に抑制することを目標とした。遮熱性については、設計要領には鉄筋の許容温度は300℃とされており⁵⁾、鉄筋の温度が300℃以下となるようかぶりを確保することを目標とした。

耐火性を検証した試験体の概要をFig. 8に示す。試験体の寸法は、実際のセグメントと同じ規模とし、幅1,700×長さ1,900×厚さ500mmとした。鉄筋についても実際のセ

Table 10 耐火コンクリートの目標性能
Target Performance of Fire Resistant Concrete

項目	準拠規格	目標値
スランブフロー	JIS A 1150	60±10cm
空気量	JSCE-F 513	2.0±1.5%
圧縮強度	JIS A 1108	(材齢20時間) 15N/mm ² 以上
		(材齢56日) 60N/mm ² 以上
耐爆裂性	RABT曲線による	最大爆裂深さが10mm以下
遮熱性	耐火実験	鉄筋の温度が300℃以下

Table 11 配合
Mix Proportion

W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						PP (vol.%)	SP (B×%)
		W	C	BS	S	G	SF		
28.8	55.0	215	373	373	738	612	47	0.20	0.800

※使用材料:水(W)、普通ポルトランドセメント(C)、高炉スラグ微粉末(BS)、細骨材(S)、粗骨材(G)、鋼繊維(SF)、PP繊維(PP)、高性能減水剤(SP)
※B: 結合材(C, BSの合計)

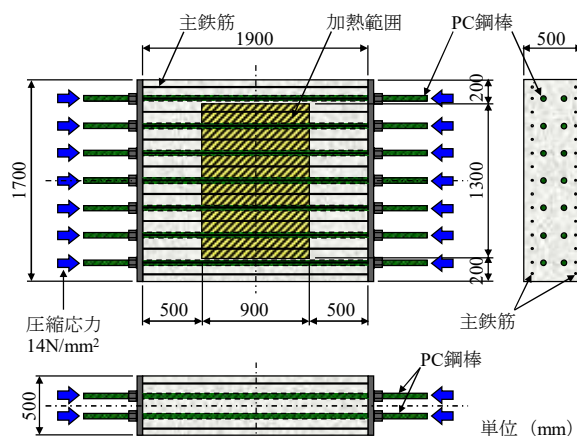


Fig. 8 試験体の概要
Outline of Test Specimen

グメントを想定して、主鉄筋にはD16を使用し、芯かぶりは75mmとした。設計で考慮している14N/mm²の圧縮応力を作用させるために、試験体の断面には14本のPC鋼棒を配置し、ポストテンション方式により圧縮応力を作用させた状態で耐火実験を実施した。試験体を作製後屋内にて保管し、材齢56日で耐火実験を実施した。

耐火実験の概要をFig. 9に示す。2章の耐火実験と同様に壁用耐火炉を使用し、加熱条件はトンネル火災を想定したRABT曲線とした。耐火実験後に試験体を取り出し、爆裂深さの測定を行った。また、遮熱性を確認するために、試験体内部に熱電対を埋め込み、コンクリートの温度履歴を測定した。熱電対の設置位置は、加熱面から0, 25, 50, 70, 100, 200および300mmの位置とした。コンクリートの品質試験および爆裂深さの測定結果をTable 12に示す。いずれの試験項目についても目標値を満足する結果が得られた。また、爆裂については、軽微な剥離程度に抑制でき、目標とする10mm未満に収まった。加熱面からの深さとコンクリートの最高温度の関係

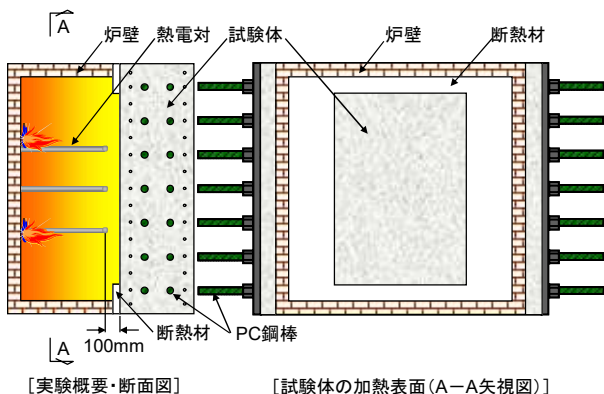


Fig. 9 耐火実験の概要
Outline of Fire Resistance Test

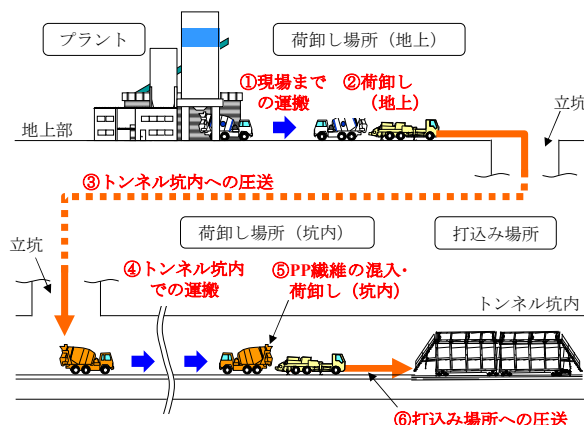


Fig. 11 コンクリートの運搬の流れ
Flow of Concrete Transportation

Table 12 品質試験および爆裂深さの測定結果
Results of Quality Test and Measurement of
Explosive Spalling Depth

コンクリートの品質試験結果					耐火実験結果 (爆裂深さ)		
スラン プ フロー (cm)	空気量 (%)	コンク リートの 温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)		最大爆 裂深さ (mm)	平均爆 裂深さ (mm)	爆裂 面積率 (%)
			材齢 20h	材齢 56日			
59.5	1.7	18	32.2	81.8	5	0.3	20.9

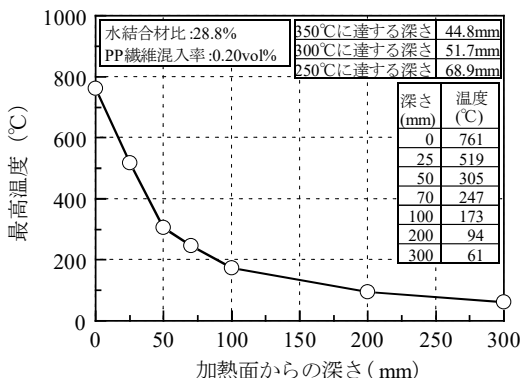


Fig. 10 加熱面からの深さと最高温度の関係
Maximum Temperature Distribution

をFig. 10に示す。鉄筋の許容温度を300°Cと仮定すると、その温度に達する加熱面からの深さは、52mmとなった。鉄筋の芯かぶりを最低でも52mm確保することで十分な遮熱性を担保できることが判った。

4.3 現場打ちコンクリートへの適用検討

4.3.1 施工性の検証 分合流拡幅部に使用する耐火コンクリートについて、製造から打込みまでの流れをFig. 11に示す。PP繊維の混入前のベースコンクリートをプラントから現場まで運搬し、地上にて荷卸しを行った後、立坑上からトンネル坑内へ圧送し、トンネル坑内を専用のトラックアジテータにて運搬する。さらに、荷卸し場所にてPP繊維をトラックアジテータのドラム内に投入し、コンクリートを攪拌した後に、打込み場所まで

Table 13 耐火コンクリートの目標性能
Target Performance of Fire Resistant Concrete

項目	準拠規格	目標値
スラン プ タイプ	スラン プ	JIS A 1101 (荷卸し時) 21±1.5cm (PP繊維混入後) 15±2.5cm
	空気量	JIS A 1128 (荷卸し時) 4.5±1.5% (PP繊維混入後) 4.5±1.5%
高流動 タイプ	スラン プ フロー	JIS A 1150 (荷卸し時) 70±5cm (PP繊維混入後) 62.5±7.5cm
	空気量	JSCE-F 513 (荷卸し時) 2.0±1.5% (PP繊維混入後) 2.0±1.5%
	充填高さ	JSCE-F 511 (PP繊維混入後) 300mm以上 (障害R2)
圧縮強度	JIS A 1108	(材齢56日) 40N/mm ² 以上
耐爆裂性	RABT曲線 による 耐火実験	最大爆裂深さが10mm以下
遮熱性		鉄筋の温度が300°C以下

Table 14 配合
Mix Proportion

コンク リートの 種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				WR (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	PP (kg/m ³)
			W	C	S	G			
スラン プ タイプ	39.6	44.0	172	434	733	935	5.21	—	0.91
高流動 タイプ	35.0	54.5	175	500	906	760	—	6.50	0.91

※使用材料:水(W), 高炉セメントB種(C), 細骨材(S), 粗骨材(G)

AE減水剤高機能タイプ(WR), 高性能AE減水剤(SP), PP繊維(PP)

※B: 結合材(C, BSの合計)

再度圧送する必要がある。そこで、これらの条件を模擬した施工実験を行うこととした。分合流拡幅部に使用する耐火コンクリートにもセグメント同様に、所要のフレッシュコンクリートや硬化コンクリートの品質およびRABT曲線に耐えうる耐火性が求められる。耐火コンクリートの目標性能をTable 13に示す。

使用したコンクリートの配合をTable 14に示す。想定する分合流拡幅部の覆工の設計基準強度は40N/mm²と設定

した。目標とする流動性については、トンネル坑内の打込み場所にて、PP繊維を混入した後のスランプおよびスランプフローを基準として設定した。スランプタイプは目標スランプを15cmとし、高流動タイプは目標スランプフローを62.5cm(自己充填性のランク2)とした。3章の結果より、PP繊維の混入により流動性が低下するため、ベースコンクリートの流動性をかさ上げすることとした。スランプタイプの目標スランプは21cmとし、高流動タイプの目標スランプフローは70cmとした。目標空気量は、PP繊維混入前と混入後で同一とし、高流動タイプは2.0%、スランプタイプは4.5%とした。セグメントに比べて現場打ちコンクリートの場合、先行して打ち込んだコンクリートの拘束を受けるため、水和熱に起因した温度応力や収縮によるひび割れの発生が懸念される。そこで、ひび割れの抑制の観点から、セメントには、低発熱・収縮抑制型の高炉セメントB種を使用することとした。また、できるだけ単位水量および単位セメント量を低減するために、単位水量は175kg/m³とした。水結合材比は、スランプタイプは39.6%、高流動タイプは35.0%とし、2章の結果よりPP繊維は織度17dtex×長さ20mmでアスペクト比410の繊維を使用し、繊維の混入率は0.1vol.%とした。

施工性を検証するために、Fig. 11に示す現場での施工条件を模擬した施工実験を行った。施工実験の概要をFig. 12に示す。実験では、現場までの運搬および現場内での運搬に伴うコンクリートの品質の変化を確認するために、各施工段階で品質を確認した。配管距離は、実際の現場での配管を想定して設定した。トンネル坑内への圧送および打込み場所への圧送については、両者とも水平換算距離90mの配管とし、実験の都合上、両者2回の圧送は同じ配管を使用した。

各施工段階でのコンクリートの品質を確認するために、スランプやスランプフローおよび空気量を測定した。また、高流動タイプについては、PP繊維を混入した後にU型容器を用いた充填試験を行い、ランク2相当の間隙通過性を有することを確認した。さらに、耐火コンクリートの圧送前後でのPP繊維の分散性を確認するために、トラックアジテータのドラム内および2回目の圧送後のホースの筒先から耐火コンクリートを採取し、それぞれPP繊維の混入率試験を併せて実施した。

コンクリートの品質試験結果をTable 15に示す。各施工段階におけるスランプおよびスランプフローの経時変化をFig. 13およびFig. 14に示す。PP繊維の混入により、スランプタイプはスランプが4.5cm、高流動タイプはスランプフローが14.5cm低下したが、2回目の圧送後も目標とした品質を確保できた。繊維混入率のばらつきは4%程度であり、繊維の分散性は良好であると判断できる。圧縮強度についても、材齢56日の段階で設計基準強度を十分満足する結果であった。配管の閉塞やPP繊維のファイバーボールも認められなかった。各種試験においても、良好な結果が得られたことから、実際の現場においても、施工は十分可能であると判断した。

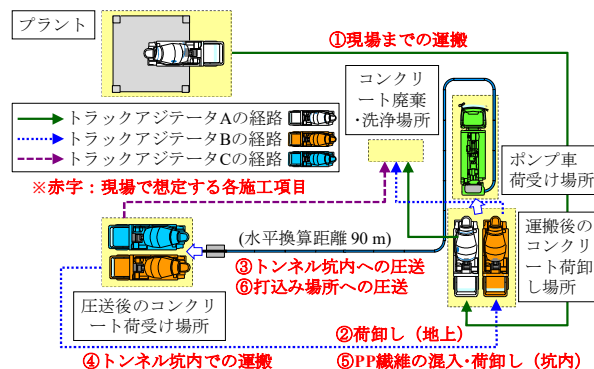


Fig. 12 施工実験の概要
Outline of Construction Test

Table 15 品質試験結果
Result of Quality Test

コンクリートの種類	想定する施工段階	練上りからの経過時間 (分)	スランプおよびスランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	充填高さ (mm)	PP繊維の混入率 (%)	圧縮強度 (56日) (N/mm ²)
スランプタイプ	プラント出荷時	5	21.0	3.6	22	-	-	-
	荷卸し(地上)時	30	21.5	3.6	22	-	-	-
	トンネル坑内への圧送後	47	21.5	3.7	24	-	-	-
	トンネル坑内での運搬後	87	19.5	4.6	24	-	-	-
	PP繊維混入・荷卸し(坑内)後	97	15.0	5.0	24	-	0.104	47.8
高流動タイプ	プラント出荷時	5	61.0	2.0	23	-	-	-
	荷卸し(地上)時	30	68.5	1.7	23	-	-	-
	トンネル坑内への圧送後	49	70.5	1.4	24	-	-	-
	トンネル坑内での運搬後	87	70.0	1.8	24	-	-	-
	PP繊維混入・荷卸し(坑内)後	96	55.5	2.4	24	348	0.096	67.8
	打込み場所への圧送後	114	56.0	1.7	25	327	0.099	70.0

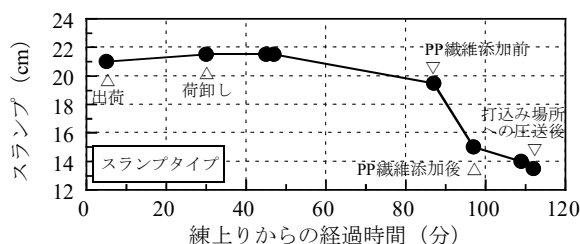


Fig. 13 スランプの経時変化
Temporal Change of Slump

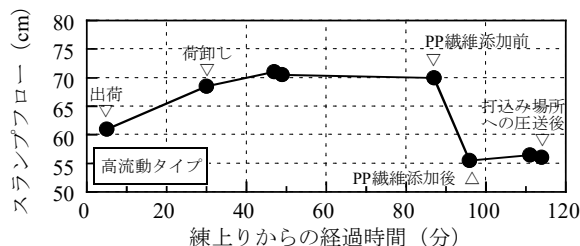


Fig. 14 スランプフローの経時変化
Temporal Change of Slump-flow

4.3.2 耐火性の検証 セグメントと同様に実際の覆工コンクリートを想定した試験体を用いて耐火性の検証を行った。試験体の寸法は、幅1,700mm×長さ1,900mm×厚さ500mmとした。主鉄筋にはD25を使用し、芯かぶりは130mmとした。断面内には14本のPC鋼棒を配置し、設計で考慮する14N/mm²の圧縮応力を作用させた。試験体は、Fig. 8に示すものと同様である。水結合材比が小さい方が爆裂に対して厳しいため、耐火実験は高流動タイプについて行った。試験体を作製後屋内にて保管し、材齢68日で耐火実験を実施した。

セグメントと同様に、Fig. 9に示すとおり、RABT曲線による耐火実験を実施した。耐爆裂性を確認するために、爆裂深さの測定を行い、遮熱性を確認するために、加熱面から0, 25, 50, 75, 100, 200および300mmの位置でコンクリートの温度履歴を測定した。

爆裂深さは最大で4mm、平均で0.04mmであり、爆裂面積率は1.4%であった。表層部において数か所の剥離が確認されたが、大きな爆裂は生じなかった。加熱面からの深さと最高温度の関係をFig. 15に示す。鉄筋の許容温度を300℃と仮定すると、300℃に達する深さはセグメントと同等であり、最低限鉄筋の芯かぶりを52mm以上確保すればよいことが判った。

5. まとめ

都市部の地下に構築されるシールドトンネルでは、車両火災に備えた安全性が求められている。可燃物を満載した車両による火災事故が発生すると、トンネル坑内の温度は急速に1000℃以上まで上昇する可能性が高い。覆工コンクリートがこのような高温履歴に晒された場合、爆裂や強度低下を引き起こすため、甚大な被害を招くことになりかねない。そのため、覆工コンクリートには耐爆裂性や遮熱性といった耐火性の付与が求められる。

そこで、爆裂の抑制効果の高いPP繊維を混入したコンクリートの耐火工の構築技術に関する検討を行った。トンネル火災を想定したRABT曲線による耐火実験により、爆裂の抑制に最適なPP繊維の種類や混入率について検討を行い、そのPP繊維を混入する際の配合修正方法について検討を行った。そして、得られた知見をもとにセグメントと現場打ちコンクリートへの適用検討を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) PP繊維のアスペクト比の増加に伴い、爆裂深さは低減される。繊維度17dtex×長さ20mmおよび繊維度2.2dtex×長さ10mmのPP繊維が爆裂の抑制に効果的である。
- 2) 強度水準が高くなると爆裂深さが増加するが、所要のPP繊維を混入することで爆裂を抑制できる。爆裂を抑制に向けて、結合材水比に応じたPP繊維の混入率の目安を提案した。
- 3) PP繊維の混入率やアスペクト比の増加に伴い、流動性や材料分離抵抗性が低下する。所要の流動性を確

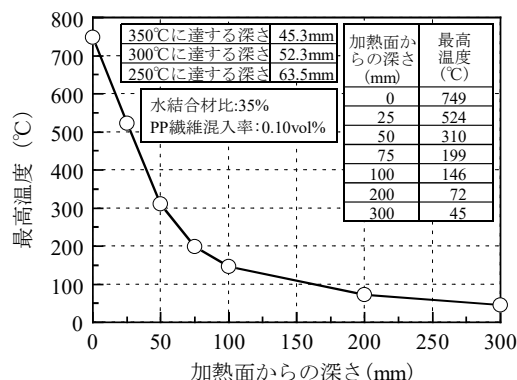


Fig. 15 加熱面からの深さと最高温度の関係
Maximum Temperature Distribution

保しつつ材料分離抵抗性を確保するには、単位水量の増加と単位粗骨材絶対容積の低減が必要である。

- 4) PP繊維の混入に伴う単位水量の増加量や単位粗骨材絶対容積の低減量を確認し、ベースコンクリートの配合の修正方法を提案した。
- 5) 設計基準強度60N/mm²のセグメントに対して、鋼繊維を0.60vol.%混入した鋼繊維補強高流動コンクリートに繊維度2.2dtex×長さ10mmのPP繊維を0.20vol.%混入することで、耐爆裂性を有する耐火工の構築が可能であることを検証した。
- 6) 設計基準強度40N/mm²の現場打ちコンクリートに対して、繊維度17dtex×長さ20mmのPP繊維を0.10vol.%混入することで、施工性を確保しながら、耐爆裂性を有する耐火工の構築が可能であることを検証した。
- 7) RABT曲線による加熱履歴を受ける場合、鉄筋の許容温度を300℃とすると許容温度に達する深さは52mmであった。遮熱性の確保には、鉄筋の芯かぶりを最低限52mm以上必要となることが判った。

参考文献

- 1) 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，No.143，2014.6
- 2) 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ，No.63，2004.10
- 3) 菅原進一：耐火技術とコンクリート—建築—，コンクリート工学 特集*耐火技術とコンクリート，Vol.45，No.9，pp.4-7，2007.9
- 4) 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2003，2003.2
- 5) 首都高速株式会社：トンネル構造物設計要領（シールド工法編），第3編 耐火設計，pp.1-27，2008.7
- 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