

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

春日 清志¹・遠藤 啓一郎²・藤井 剛³・屋代 勉⁴・川西 貴士⁵

¹正会員 首都高速道路株式会社 神奈川建設局設計課 (〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4)
E-mail: k.kasuga66@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路株式会社 神奈川建設局 横浜工事事務所
(〒223-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜3-20-8 (ベネックスS-3 12階))
E-mail: k.endou164@shutoko.jp

³正会員 大林・奥村・西武 横浜環状北線シールドトンネル特定建設工事共同企業体
(〒223-0059 神奈川県横浜市港北区北新横浜2-7-13)
E-mail: fujii.tsuyoshi@obayashi.co.jp

⁴正会員 株式会社大林組 生産技術本部シールド技術部
(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟)
E-mail: yashiro.tsutomu@obayashi.co.jp

⁵正会員 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
E-mail: kawanishi.takashi@obayashi.co.jp

横浜環状北線シールドトンネルの馬場出入口部の覆工は、耐火性を有する現場打ちコンクリートにより構築される。しかし、馬場出入口部はトンネル延長のほぼ中間地点に位置しており、コンクリートの運搬に手間と時間を要するため、施工性の確保が課題であった。また、適用するコンクリートが、所要の耐火性を有することを確認する必要がある。そこで、実際の施工条件を模擬した施工実験を行い、ワーカビリティの経時変化や圧送性を確認した。また、実規模レベルの耐火実験を行い、爆裂抵抗性や遮熱性を確認した。その結果、所要のワーカビリティを確保でき、施工が可能であること、ポリプロピレン短繊維を容積比で0.08%混入することで爆裂抵抗性を付与でき、現状のかぶりで十分な遮熱性を確保できることなどを確認した。

Key Words : fire resistance, cast-in-place, polypropylene fiber, workability, shield tunnel

1. はじめに

横浜市の交通ネットワークの骨格を形成するために、第三京浜道路の港北ICから首都高速道路横浜羽田空港線の生麦JCTをつなぐ横浜環状北線シールドトンネル工事の施工が進められている。このトンネル内に構築される馬場出入口は、地中にて本線とランプ線とを接続するために、シールドトンネル構築後にセグメントを切り開き、その拡幅部（以下、分合流拡幅部と呼称）を掘削後、現場打ちにより覆工コンクリートを構築する¹⁾。

一方、トンネル内で車両火災が発生した場合、積載されていた可燃性の物質が閉鎖された空間で燃焼するため、急速に1000℃を超えるような高温に晒される可能性がある。このような高温履歴を受けた場合、コンクリート

が爆裂したり、強度低下を引き起こすため、損傷からトンネルを守るための耐火性が求められている。そのため、本線のセグメントには、ポリプロピレン短繊維（以下、PP繊維と呼称）を混入した耐火セグメントを使用している²⁾。

分合流拡幅部の覆工コンクリートにも、本線のセグメントと同様の耐火性を付与させるため、PP繊維を混入した現場打ちによる覆工コンクリート（以下、耐火コンクリートと呼称）を適用することとした。分合流拡幅部における耐火コンクリートの適用範囲を図-1に示す。耐火コンクリートは、供用時に車両が走行する部分である床版より上部に適用した。覆工コンクリートの上部は閉塞部の打込みとなるため、高流動コンクリート（以下、高流動と呼称）とし、側部は普通のスランプ管理のコン

クリート（以下、スランブタイプと呼称）とした。

分合流拡幅部は、トンネル延長におけるほぼ中間地点（坑口から約3 km）に位置している。そのため、コンクリートは、プラントから立坑まで運搬し、地上部にて荷卸した後、打込み場所まで、トンネル坑内を運搬する必要があり、現場内での運搬に手間と時間を要する。そのため、適用する耐火コンクリートには、ワーカビリティの低下が懸念された。そこで、現場までの運搬および現場内での運搬に伴うワーカビリティの経時変化を把握するために、実際の施工条件を模擬した施工実験を行った。

また、分合流拡幅部に用いる耐火コンクリートの爆裂抵抗性や遮熱性を耐火実験により確認する必要があった。そこで、実際の覆工コンクリートの設計で考慮されている圧縮応力を作用させた実規模レベルの耐火実験を行い、爆裂抵抗性や遮熱性の評価を行った。

本稿では、施工実験や耐火実験にて確認した品質の結果を報告する。また、実験で品質を確認した耐火コンクリートを実際の現場に適用した結果について報告する。

2. 施工実験

(1) 実験概要

実施工における耐火コンクリートの製造から打込みまでの流れを図-2に示す。PP繊維を混入する前のベースのコンクリートをプラントから現場まで運搬し、地上にてコンクリートの荷卸しを行った後、立坑上から立坑下の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、トンネル坑内の荷卸し場所にてPP繊維をトラックアジテータのドラム内に混入した後に、打込み場所まで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った。

施工実験の概要を図-3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い、ワーカビリティの低下が懸念されたので、下記のとおり、各施工段階で影響を確認できるよう工夫した。

- ① 現場までの運搬
- ② 荷卸し（地上）
- ③ トンネル坑内への圧送
- ④ トンネル坑内での運搬
- ⑤ PP繊維の混入・荷卸し（坑内）
- ⑥ 打込み場所への圧送

配管距離は、実際の配管の水平換算距離を考慮して設定した。トンネル坑内への圧送と打込み場所への圧送を想定した2回の水平換算距離は同程度であったため、同じ配管を使用し、90mと設定した。

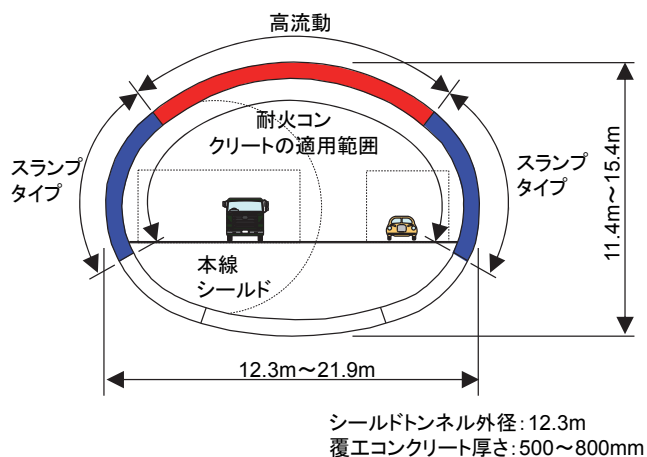


図-1 耐火コンクリートの適用範囲

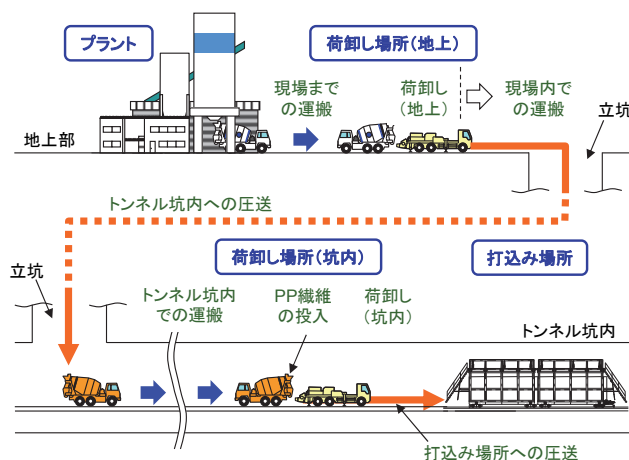


図-2 耐火コンクリートの製造から打込みまでの流れ

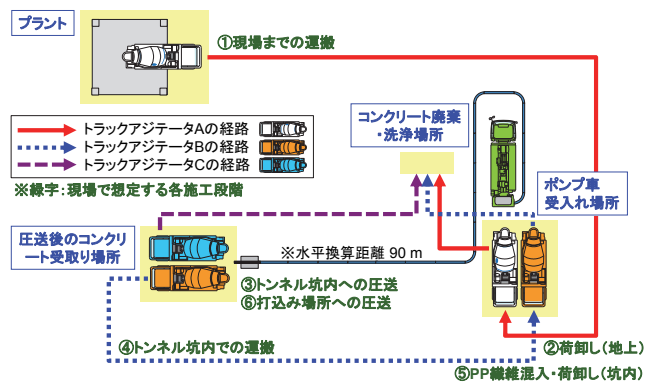


図-3 施工実験の概要

コンクリートのワーカビリティの経時変化を確認するため、各施工段階でフレッシュコンクリートの品質試験を行った。試験項目として、スランブ試験またはスランブフロー試験（JIS A 1101, JIS A 1150）および空気量試験（JIS A 1128, JSCE-F 513）を実施した。また、高流動については、PP繊維を添加した後にU型容器を用いた充填試験（JSCE-F 511）を行った。さらに、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、

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	地下水
セメント	C	高炉セメントB種(低発熱・収縮抑制型), 密度2.98g/cm ³
細骨材	S	砂, 密度2.61g/cm ³ , 粗粒率2.70
粗骨材	G	砕石, 密度2.62g/cm ³ , 実積率60.0%
減水剤	WR	AE減水剤
	SP	高性能AE減水剤
短繊維	PP	ポリプロピレン短繊維, 密度0.91g/cm ³

表-2 配合

コンクリートの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				WR (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	PP (kg/m ³)
			W	C	S	G			
スランブタイプ	39.7	44.0	172	434	733	935	5.21	—	0.91
高流動	35.0	54.5	175	500	906	760	—	6.50	0.91

表-3 品質試験結果

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)	スランブおよびスランブフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	充填高さ (mm)	PP繊維混入率 (%)	圧縮強度 (56日) (N/mm ²)
スランブタイプ	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繊維混入後	97	15.0	5.0	24	—	0.104	47.8
	打込み場所への圧送後	112	13.5	4.7	26	—	0.104	50.5
高流動	プラント出荷時	5	61.0	2.0	23	—	—	—
	現場荷卸し時	30	68.5	1.7	23	—	—	—
	坑内への圧送後	49	70.5	1.4	24	—	—	—
	施工場所への運搬後	87	70.0	1.8	24	—	—	—
	PP繊維添加後	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

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コンクリートを採取し、それぞれPP繊維の混入率試験(JSCE-F 554)を実施した。併せて圧縮強度試験(JIS A 1108)も実施した。

耐火コンクリートの坑内における荷卸し時のスランブタイプの目標スランブは15 cmとし、高流動の目標スランブフローは62.5 cmとした。目標空気量は、高流動は2.0 %, スランブタイプは、4.5 %とした。設計基準強度は40 N/mm²とした。爆裂抵抗性を確保するために、PP繊維を容積比で0.10 %混入した。セメントには、温度ひび割れ抑制の観点から、低発熱・収縮抑制型の高炉セメントB種を使用した。コンクリートに用いた使用材料および配合を表-1および表-2に示す。

(2) 実験結果

コンクリートの品質試験の結果を表-3に示す。各施工段階におけるスランブおよびスランブフローの経時変化を図-4に、空気量の経時変化を図-5に示す。また、施工

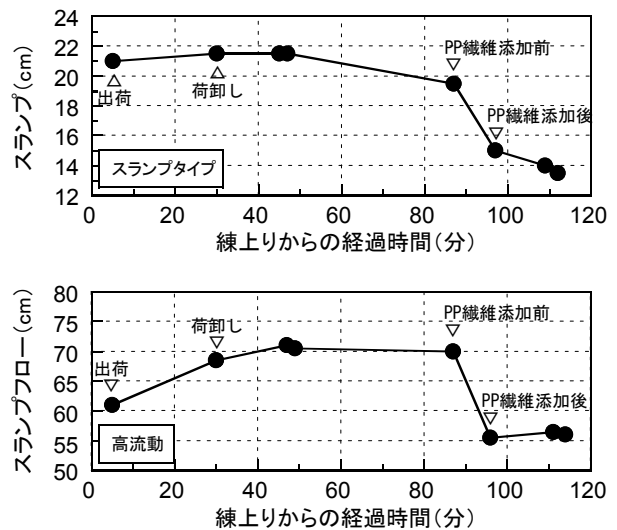


図-4 スランブおよびスランブフローの経時変化

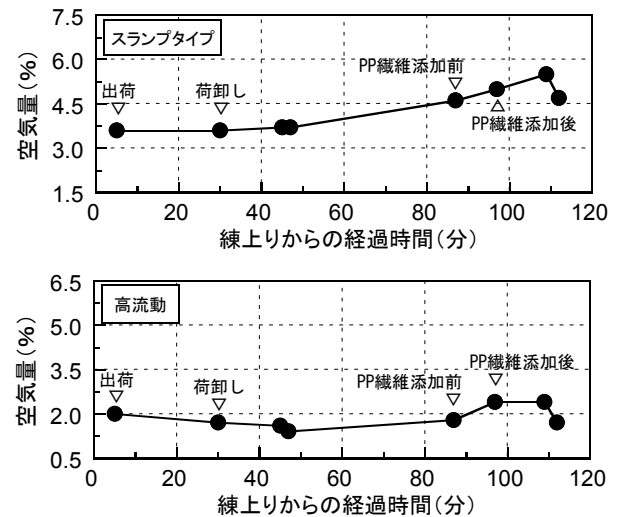


図-5 空気量の経時変化



写真-1 施工実験の状況

実験の状況を写真-1に示す。PP繊維の混入により、スランブタイプはスランブが4.5 cm、高流動はスランブフローが14.5 cm低下したが、2回目の圧送後も目標とした流

動性を十分確保できた。空気量は、PP繊維の混入により増加する傾向にあるが、概ね目標値程度に制御することができた。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。

運搬に手間と時間を要する分合流拡幅部の耐火コンクリートにおいても、所要のワーカビリティを確保でき、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。

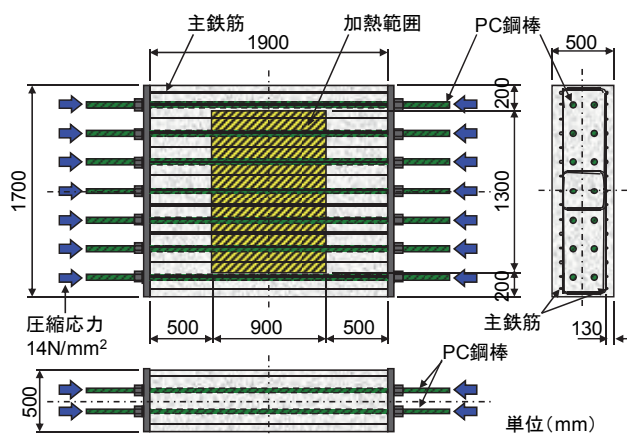


図-6 試験体の概要

3. 耐火実験

(1) 実験概要

耐火実験に用いた試験体の寸法は、幅1 700 mm×長さ1 900 mm×厚さ500 mmとした。実際の施工を模擬し、主鉄筋にはD25を使用し、芯かぶり130 mmとした。断面内には14本のPC鋼棒を配置し、設計で考慮している14 N/mm²の圧縮応力を作用させながら耐火実験を実施した。試験体の概要を図-6に示す。

加熱曲線には、トンネル火災を想定し、5分で1 200℃まで昇温し、加熱開始後60分まで最高温度を保持するRABT曲線(図-7)を採用した。測定項目として、耐火実験時は、試験体内部のコンクリートや鉄筋の温度や炉内の温度の測定および試験体表面の目視観察を行った。炉内の温度管理は、試験体表面から100 mm離れた位置に設置した熱電対にて行った。試験体内部には、加熱面から0, 25, 50, 75, 100, 200, 300および500 mmの位置に熱電対を設置し、それぞれ、温度履歴を測定した。併せて、芯かぶり130 mmの位置に設置されている鉄筋にも熱電対を設置した。試験体の表面の状況は、炉壁の窓に設置した耐熱用のCCDカメラにより観察した。耐火実験の概要を図-8に示す。

耐火実験後は、耐火炉から試験体を取り出し、外観の観察と爆裂深さの測定を行った。爆裂深さの測定は、加熱範囲を50 mm間隔でノギスを用いて行った。測定値の最大値を最大爆裂深さ、各測点の測定値を平均した値を平均爆裂深さとし、爆裂が認められた測点数を全測点数で除した値を爆裂面積率として評価した。

耐火実験用の試験体には、2章の施工実験で使用したスランプタイプと高流動の2種類の配合のうち、水セメント比が小さい方が爆裂に対して厳しい条件となることから、高流動の配合を用いて実験を行った。使用材料および配合は、表-1および表-2に示すとおりとした。実験は、PP繊維の混入率が0.10%のケースとコンクリート内

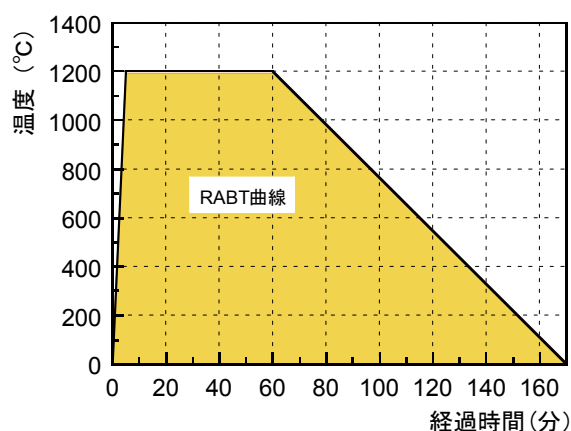


図-7 RABT曲線

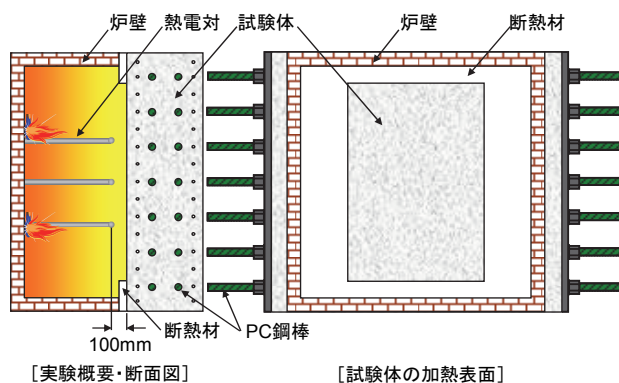


図-8 耐火実験の概要

のPP繊維の混入率が20 %変動した場合を想定して0.08 %に低減したケースの2種類について行った。0.08 %のケースは、表-2に示すベースとなるコンクリートの配合は0.10%と同じとし、PP繊維の混入率のみを低減した。

(2) 実験結果

爆裂深さの測定結果を表-4に示す。また、爆裂深さの分布図を図-9に示す。PP繊維の混入率0.10 %および0.08 %の両者とも、表層部において局所的な剥離が確認

表-4 爆裂深さの測定結果

項目		PP繊維混入率(容積比)	
		0.10%	0.08%
最大爆裂深さ	(mm)	4	3
平均爆裂深さ	(mm)	0.04	0.02
爆裂面積率	(%)	1.4	1.0

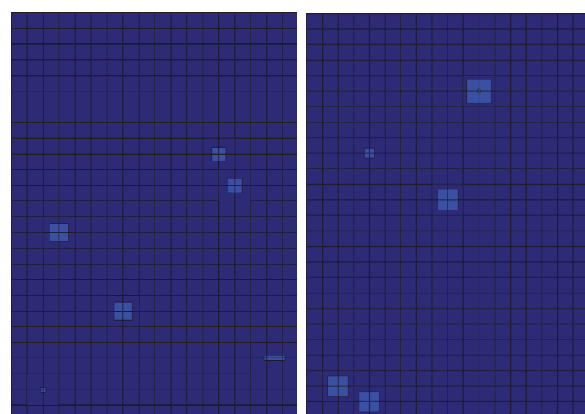


図-9 爆裂深さの分布図

されたが、大きな爆裂は生じておらず、爆裂深さも最大で3~4 mmと軽微なものであった。PP繊維を容積比で0.08 %混入することで爆裂抵抗性を付与できることが確認された。

加熱面からの深さごとの温度履歴の例（PP繊維0.08 %）を図-10に示す。また、加熱面からの深さと最高温度の関係を図-11に示す。0.10 %と0.08 %の両ケースとも最高温度の分布は同等であり、PP繊維の混入率の違いによる影響は認められず、試験の再現性が確認できた。鉄筋の温度は120 °C程度であり、許容値である300 °C³⁾を十分下回った。計画されている鉄筋の芯かぶり130 mmで十分な遮熱性を確保できることが確認された。加熱によりコンクリートの強度が低下する範囲については、強度低下を考慮した断面計算を行い、安全性を確認した。PP繊維の混入率は、20 %変動しても耐火性が確保されることから、実施工では0.10%とすることとした。

4. 現場での実施工

2章の施工実験の結果から、現場までの運搬後の地上での荷卸し時に比べて、現場内での運搬後のトンネル坑内での荷卸し時は、経時変化、圧送およびPP繊維の混入によって、スランプおよびスランプフローが低下することが確認された。そのため、実際の現場で品質管理を行うにあたっては、その流動性の低下量を考慮する必要

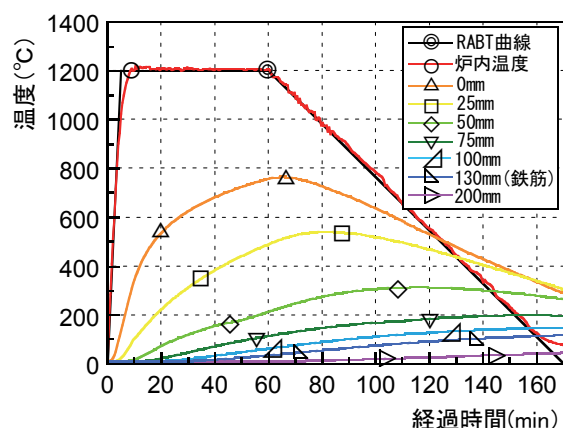


図-10 温度履歴 (PP繊維 0.08 %)

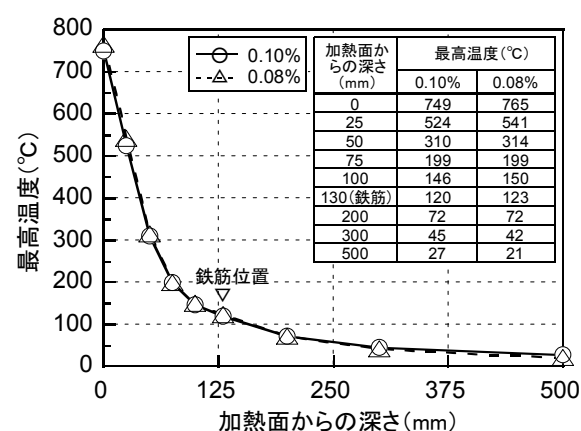


図-11 加熱面からの深さと最高温度の関係

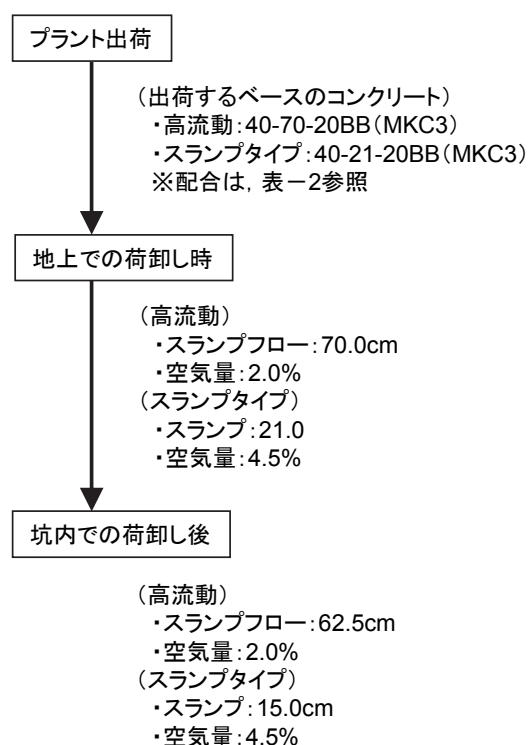


図-12 各施工段階における目標品質の概要



写真-2 施工状況

があった。そこで、現場でのコンクリートの品質は、地上での荷卸し時とトンネル坑内でPP繊維を混入した後の荷卸し時で品質の目標値を変えることとした。耐火コンクリートの各施工段階における目標品質の概要を図-12に示す。空気量については、大きな変動は認められなかったため、荷卸し場所ごとの目標値は同じとした。

コンクリートの品質は、場内運搬に要する時間によって大きく左右される。そのため、生コンプラント、地上での現場受入れ場所およびPP繊維を添加する圧送場所で、トラックアジテータの運搬状況やコンクリートの数量など、施工状況に応じて密に連絡を取り合い、トラブル等が発生した場合に柔軟に出荷間隔の調整が行えるよう、品質管理体制に重点をおいて管理している。

施工状況を写真-2に示す。現場では、スランプタイプの耐火コンクリートを先行して施工を開始した。コンクリートの品質は、事前に設定した管理値内で管理できており、平成26年9月の段階で、特に大きなトラブルもなく、順調に施工を進めている。

5. まとめ

分合流拡幅部では、PP繊維を混入した現場打ちによる耐火コンクリートを採用した。実施工への適用にあたり、施工条件を模擬した施工実験や実規模レベルの耐火実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 手間と時間を要する運搬に伴い、流動性が低下するが、プラント出荷時にその低下量を見込むことで、打込み場所においても、所要のワーカビリティを確保できる。
- 2) 圧送時に閉塞することなく、圧送後もPP繊維の分散性を確保でき、十分施工が可能である。
- 3) PP繊維を容積比で0.08%混入することで爆裂抵抗性を付与でき、計画されている鉄筋の芯かぶり130mmで十分な遮熱性を確保できる。

現段階で、スランプタイプについては圧送時の閉塞や未充填部も発生しておらず、問題なく施工を進めている。今後、高流動についても施工を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 津野和宏，落合栄司，川田成彦，藤井剛，高浜達矢：民間下に道路トンネル分合流部を構築するための技術的対策，トンネル工学報告集，Vol.22，pp.447-454，2012
- 2) 津野和宏，足立義彦，松原健太，近藤由也：首都高速横浜環状北線への耐火型SFRCセグメントの適用，トンネル工学報告集，Vol.20，pp.281-291，2010
- 3) 首都高速道路株式会社：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

(2014.9.15 受付)

STUDY ON CAST-IN-PLACE FIRE PROOF CONCRETE WITH POLYPROPYLENE FIBER IN SHIELD TUNNEL

Kiyoshi KASUGA, Keiichiro ENDO, Takeshi HUIJI, Tsutomu YASHIRO
and Takashi KAWANISHI

The Baba gateway section of the Metropolitan Expressway Yokohama Circular Northern Route project was constructed by a shield tunnel machine, and required cast-in-place fire proof concrete for the tunnel lining. Since the Baba gateway section was located in the middle of the long underground tunnel, it was critical to maintain workability and fire resistance of the cast-in-place fire proof concrete, despite its long transportation and casting time in the tunnel. A full-scale experiment to simulate conditions in the actual tunnel construction was performed, and time course variation of workability and pumpability of the cast-in-place fire proof concrete were measured. Fire resistance tests in a full scale level were conducted, and resistance for explosive spalling and heat barrier performance for reinforced bars of the fire proof concrete were evaluated. The full-scale experiment confirmed that the fire proof concrete could maintain the workability required for the tunnel construction. The fire resistance test results indicated that the required fire resistance could be given by 0.08 vol% of polypropylene fibers, and the required heat barrier performance could be provided without increasing a concrete coverage in a current tunnel lining design.