

# 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

川西 貴士 平田 隆 祥

屋代 勉

(本社土木本部)

## Comprehensive Fire Protection Technology for Road Tunnel in Urban Area

Takashi Kawanishi Takayoshi Hirata

Tsutomu Yashiro

### Abstract

Lining concrete with fire-resistant material produced by mixing short polypropylene fibers into concrete is needed to provide protection against the occurrence of fire on roads in urban areas. Therefore, comprehensive fire protection technology for use from new construction to maintenance was developed (no. 1: fire-proofing performance of SFRC segment, no. 2: cast-in-place fireproof concrete, no. 3: fireproof cross-section repair method). This paper reports, various experimental verification results for the explosive spalling resistance provided by the selection of short polypropylene fibers, the thermal barrier performance provided by the securement of the concrete cover, and the performance of the segment production and construction of fireproof concrete.

### 概 要

都市部の道路トンネルでは、トンネル内で発生する車両火災に対して、ポリプロピレン短繊維の混入により、覆工コンクリート自体に耐火性を付与する技術が求められている。そこで、トンネル覆工の新設から維持管理に向けて、総合的な耐火工構築技術（①耐火型高機能SFRCセグメント、②場所打ち耐火コンクリート、③耐火型断面修復技術）を開発した。本稿では、これらの技術について、適切なポリプロピレン短繊維の選定やかぶりの確保により爆裂抵抗性および遮熱性を確保できること、セグメントの製造や現場での耐火コンクリートの施工が可能であることなどを、各種実験により確認した結果を報告する。

## 1. はじめに

道路トンネル内で車両火災が発生した場合、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℃以上の高温にさらされる可能性がある。トンネルの覆工コンクリートがこのような高温化にさらされた場合、コンクリートは爆裂を引き起こしたり、強度が低下するため、トンネルの崩壊に繋がりがかねない。

我が国では、東名高速道路の日本坂トンネル(1979年)において、大型トラック4台と乗用車2台の追突事故が原因で火災が発生した。この火災事故では、コンクリートの表面は600℃～1000℃まで上昇し、覆工のコンクリートが剥落したと報告されている<sup>1)</sup>。

これまでトンネル火災の対策として、耐火板や耐火吹付けなど、一次覆工の上に耐火被覆を施してきた。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、覆工コンクリート自体に耐火性が求められている。

このような背景から、これまでにポリプロピレン短繊維（以下、PP繊維と呼称）の混入により耐火性を付与したコンクリートの基礎的な研究を進めてきた。これまでの知見をもとに、道路トンネルへの実用化を目的として、

耐火型高機能SFRCセグメントおよび現場打ち耐火コンクリートを開発した。また、コンクリートの火害や経年劣化等の補修を考慮して、耐火型断面修復技術についても開発した。本稿では、開発技術の概要、耐火実験結果および現場適用に向けた検討結果について報告する。

## 2. 道路トンネルに求められる耐火性

### 2.1 概要

トンネル構造物の耐火設計に関して、土木学会から指針（以下、土木学会指針と呼称）<sup>2)</sup>、首都高速道路株式会社から設計要領（以下、首都高設計要領と呼称）<sup>3)</sup>が発刊されている。これらの指針類では、トンネルの耐火性に関する要求性能として、トンネルが崩壊に至らず、機能を維持すること、避難経路や消火活動の環境を確保することなどが記載されている。そのためには、爆裂抵抗性および遮熱性の2つの性能を満たす必要がある。

一般に、コンクリートが高強度になるほど、爆裂は発生しやすくなる。都市部の道路トンネルには、高強度のコンクリートが使用されることが多く、首都高設計要領では十分な耐火設計を行う旨、記載されている。以下、道路トンネルに求められる耐火性について述べる。

## 2.2 爆裂抵抗性

爆裂のメカニズムの一因として、急激な加熱によりコンクリート中の自由水が蒸気となる際に発生する蒸気圧によって、コンクリートの剥離を引き起こす水蒸気圧説が挙げられる。PP繊維を混入することで、繊維が熔融・気化した後に形成される連続空隙により、蒸気圧が解放されるため、爆裂の抑制対策として、PP繊維の混入が効果的であると言われている<sup>2)</sup>。

筆者らは、これまで寸法形状の異なる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<sup>4)</sup>。実験では、PP繊維を容積比で0.2%混入している。PP繊維のアスペクト比（繊維の長さ／繊維の直径）と爆裂深さの関係をFig. 1に示す。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分かる。そこで、実験には、Photo 1に示すアスペクト比570（繊維径0.02mm×長さ10mm）のPP繊維（以下、PP①と呼称）およびアスペクト比410（繊維径0.05mm×長さ20mm）のPP繊維（以下、PP②と呼称）の2種類を選定した。また、水結合材比と爆裂の抑制に必要なPP繊維の混入率にはFig. 2の関係があり、水結合材比の低下に伴い、爆裂の抑制に必要なPP繊維の混入率が増加傾向を示すことが分かっている<sup>5)</sup>。PP繊維を混入しない場合、水結合材比が45%および40%においては、爆裂が生じた。水結合材比による強度の設定レベルに応じたPP繊維の混入率の設定が望ましい。

## 2.3 遮熱性

受熱温度と強度低下の関係については、以前から建築分野を中心に研究がなされている。土木分野においては、首都高設計要領に、Fig. 3に示すようなコンクリートおよび鋼材の温度依存性が記載されている。また、併せて、許容温度について、コンクリートが350℃、鋼材が300℃と明記されている<sup>3)</sup>。そこで、遮熱性については、耐火実験時にコンクリート内部の最高温度の分布を測定し、鉄筋が受ける最大受熱温度が、許容温度である300℃を超えないことを確認するとともに、コンクリートの受熱温度に対する強度低下を考慮して、火災時にも構造を保つ耐力を維持しているかどうかを確認することとした。

## 2.4 耐火性の検証

首都高設計要領では、耐火実験により耐火性の照査を行うことが求められている<sup>3)</sup>。そこで、爆裂抵抗性および遮熱性を確認するために耐火実験を実施した。

耐火実験に用いる加熱曲線には、用途や目的に応じて、Fig. 4に示すような各種規格による加熱曲線が使用されている。建築分野では標準加熱曲線（ISO）が用いられるが、トンネル火災を想定した基準としてRABT曲線やRWS曲線がある。

我が国では、火災時にトンネル坑内が数分で高温化にさらされること、公道を走行するタンクローリーの最大危険物積載容量および消火活動の時間等を考慮し、5分で

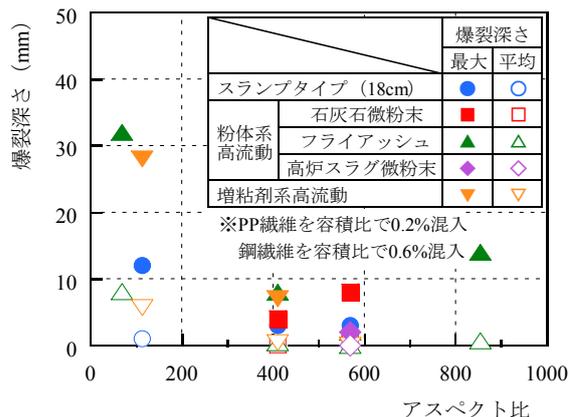


Fig. 1 PP繊維のアスペクト比と爆裂深さの関係  
Spalling Depth to Aspect Ratio of PP Short Fiber

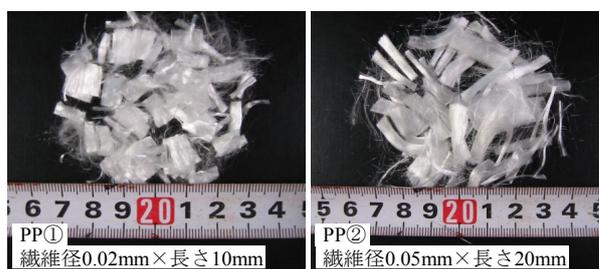


Photo 1 使用したPP繊維  
Polypropylene Short Fiber

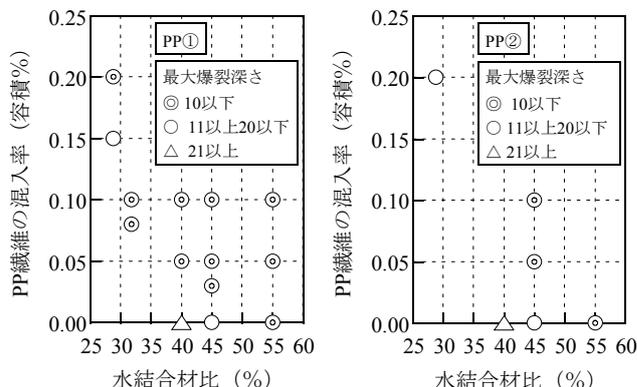


Fig. 2 水結合材比とPP繊維の混入率の関係  
Mix Flow of PP Short Fiber to Water Binder Ratio

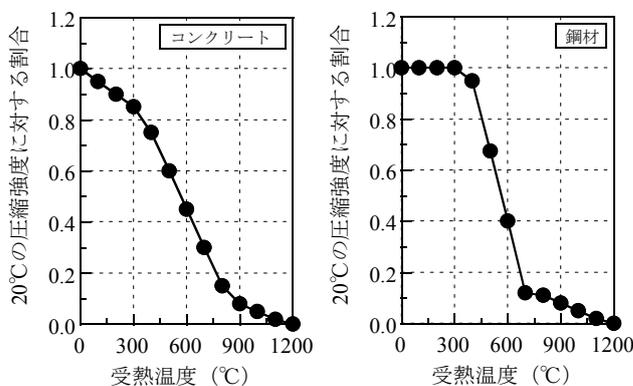


Fig. 3 コンクリートおよび鋼材の温度依存特性<sup>3)</sup>  
Thermal Property of Concrete and Steel

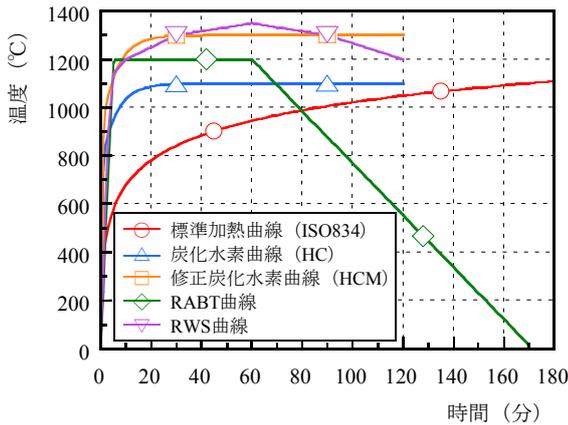


Fig. 4 耐火実験に用いられる加熱曲線  
Heating Curves of Fire Resistance Test

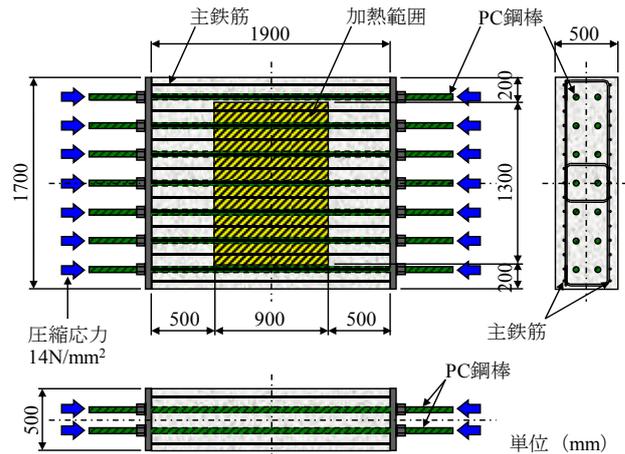


Fig. 5 試験体の概要  
Outline of Test Specimen

Table 1 開発技術の種類および検討項目  
Kind of Technology Development and Study Contents

技術の対象	技術の名称	実験での検討項目
本線セグメント	耐火型高機能SFRCセグメント	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐火実験による爆裂抵抗性および遮熱性の確認</li> <li>製造実験によるフレッシュコンクリートおよびセグメントの品質の確認</li> </ul>
分合流拡幅部	現場打ち耐火コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐火実験による爆裂抵抗性および遮熱性の確認</li> <li>施工実験による運搬に伴う品質の経時変化および施工性の確認</li> </ul>
補修箇所	ウォータージェットによる劣化部除去工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工実験による劣化部の除去性能の確認</li> </ul>
	耐火型吹付け工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>フレッシュモルタルの品質確認実験によるPP繊維の形状の選定</li> <li>耐火実験による爆裂抵抗性および遮熱性の確認</li> </ul>
	耐火型こて仕上げ工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工実験によるフレッシュモルタルの品質および施工性の確認</li> <li>耐火実験による爆裂抵抗性および遮熱性の確認</li> </ul>

1200℃まで昇温し、60分まで保持するドイツ規格のRABT曲線が用いられることが多い<sup>2), 3)</sup>。そこで、耐火実験には、RABT曲線を使用することとした。

### 2.5 開発技術の対象

新設の道路トンネルの覆工コンクリートには、本線のRCセグメントと、本線とランプ線の接続箇所である分合流拡幅部の現場打ちコンクリートの2種類がある。また、火害を受けた場合や経年劣化等により補修を行う場合、広範囲の断面修復には吹付け工法、局所的な狭い範囲の断面修復にはこて仕上げ工法の2種類が考えられる。さらに、断面修復を行うためには、劣化部の除去工法が必要となる。そこで、Table 1に示す5種類の技術について、その性能を各種実験により確認した。次章以降に、その技術の概要および実験結果について報告する。

## 3. 耐火型高機能SFRCセグメント

### 3.1 概要

筆者らは、これまでに剥落防止、鉄筋量低減、施工性向上および製作コスト縮減など様々な利点から、鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント（以下、高機能SFRC

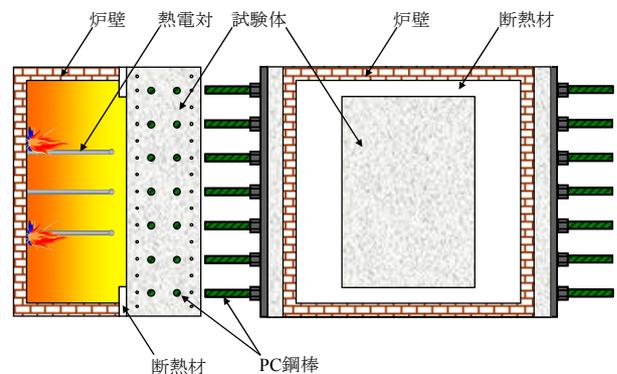


Fig. 6 耐火実験の概要  
Outline of Fire Resistance Test

セグメントと呼称) を適用してきた<sup>6)</sup>。この高機能SFRCセグメントを耐火性が求められる都市部の道路トンネルに適用するために、PP繊維を混入した耐火型高機能SFRCセグメントを開発した<sup>4)</sup>。耐火性を確認するための耐火実験および現場への適用に向けた製造実験を行った。

コンクリートは、粉体系の高流動コンクリートとし、結合材として、普通ポルトランドセメントに、高炉スラグ微粉末を50%置換して用いた。鋼繊維の混入率は容積比で0.6%とした。コンクリートの圧縮強度は、設計基準強度48N/mm<sup>2</sup>のセグメントを対象に設定した。2章での知見をもとに、PP繊維はPP①(繊維径0.02mm×長さ10mm)とPP②(繊維径0.05mm×長さ20mm)の2種類とし、混入率は容積比で0.2%とした。

### 3.2 耐火性の検証

実際のセグメントを模擬した実物大の試験体を用いた耐火実験により、爆裂抵抗性および遮熱性を確認した。試験体の寸法は、Fig. 5に示すとおり、幅1700mm×長さ1900mm×厚さ500mmとし、セグメントの設計で考慮する圧縮応力を想定して、PC鋼棒により14N/mm<sup>2</sup>の圧縮応力を作用した状態で実験を行った<sup>4)</sup>。

耐火実験の概要をFig. 6に示す。耐火実験には、壁用耐火炉を使用し、側面に設置されているガスバーナーによ

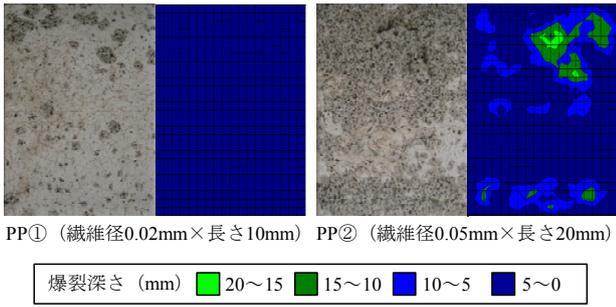


Fig. 7 試験体の状況  
Situation of Test Specimen

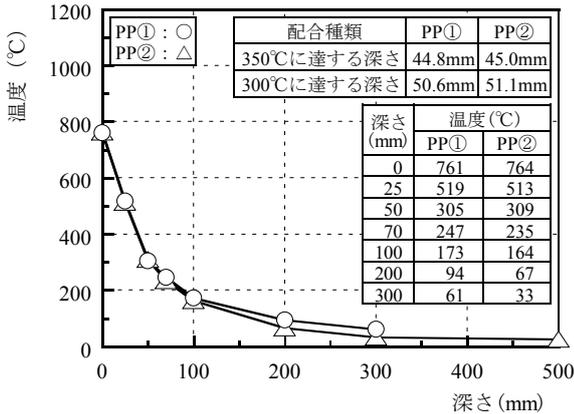


Fig. 8 加熱面からの深さと最高温度の関係  
Maximum Temperature to Depth from Heated Surface

り加熱した。測定項目として、耐火実験時には、加熱面から0, 25, 50, 70, 100, 200, 300および500mmの位置に熱電対を設置し、コンクリート内部の温度履歴を測定した。耐火実験後には、試験体を取り出し、表面を50mm間隔に分割し、ノギスを用いて爆裂深さの測定を行った。

爆裂深さの分布をFig. 7に示す。PP①の方が、PP②に比べて、爆裂の程度が小さかった。爆裂深さの平均値は、PP①で0.3mm、PP②で3.3mmであり、両者とも軽微な損傷に抑えられた。加熱面からの深さと最高温度の関係をFig. 8に示す。両試験体とも同程度の分布であった。鉄筋の芯かぶりを50mm~60mm確保することで、鉄筋の受熱温度を許容温度以下に制御できることが分かった。

セグメント自体に耐火性を付与する場合、セグメント間の継手部の評価が重要となる<sup>3)</sup>。実際に現場への適用に向けて、Fig. 9およびFig. 10に示すとおり、継手部を模擬した耐火実験により、爆裂抵抗性や遮熱性を確認するとともに、継手やシール材の受熱温度や過大な変形がないことなどについて、別途確認されている<sup>7)</sup>。

### 3.3 製造方法の検証

耐火実験の結果から、PP①を容積比で0.2%混入したコンクリートについて、製造実験を実施した。耐火型高性能SFRCセグメントでは、Photo 2に示すようなPP繊維の自動計量器を設置し、正確に計量した。コンクリートの打込みに関しては、テーブルパイプレータを使用するこ

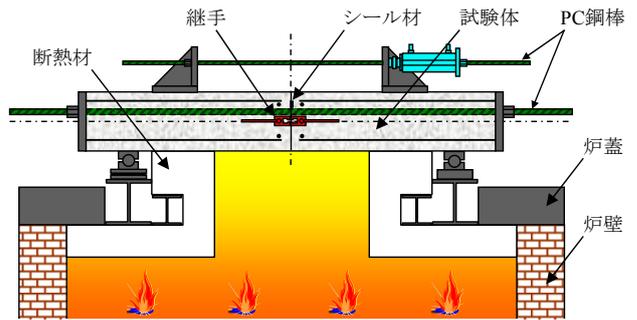


Fig. 9 継手部を模擬した耐火実験の概要<sup>7)</sup>  
Outline of Fire Resistance Test Simulated Simulated Joint

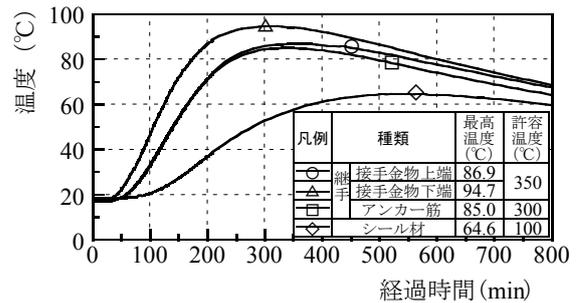


Fig. 10 継手部・シール材の温度履歴<sup>7)</sup>  
Temperature History of Joint and Seal Material



Photo 2 セグメントの製造状況  
Situation of Production of Segment



Photo 3 セグメントの外観  
Appearance of Segment

となく、コンクリートを流し込むことにより製造が可能であることを確認した。セグメントの製造状況をPhoto 2に示す。また、セグメントの外観をPhoto 3に示す。

## 4. 現場打ち耐火コンクリート

### 4.1 概要

道路トンネルにおいて、本線とランプ線が接続する箇所においては、トンネルを構築後にセグメントを切り開き、拡幅部（以下、分合流拡幅部）を掘削後、現場打ちのコンクリートにより覆工を構築する方法が用いられる。その場合、現場打ちのコンクリートにおいても、セグメントと同様の耐火性が求められる。そこで、PP繊維の混入により耐火性を付与した現場打ちの耐火コンクリートを開発した<sup>8)</sup>。

覆工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、高流動タイプと呼称）とし、側部はスランプ管理のコンクリート（以下、スランプタイプと呼称）とした。セメントには、温度ひび割れ抑制の観点から低発熱・低収縮型の高炉セメントB種を使用し、設計基準強度40N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを対象とした。PP繊維の混入率は容積比で0.1%とし、PP①（繊維径0.02mm×長さ10mm）とPP②（繊維径0.05mm×長さ20mm）の2種類について耐火実験を行った。

### 4.2 耐火性の検証

現場打ちの耐火コンクリートについても、耐火実験により、爆裂抵抗性および遮熱性を確認した。実験に用いた試験体は、3章の試験体と同様に、Fig. 5およびFig. 6に示すとおり、幅1700mm×長さ1900mm×厚さ500mmとし、14N/mm<sup>2</sup>の圧縮応力を作用させながら耐火実験を実施した。

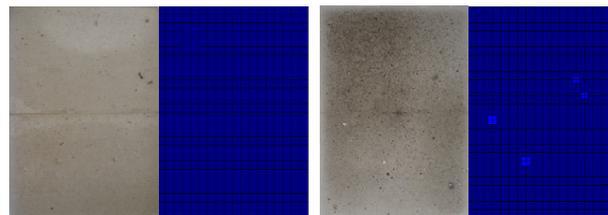
測定項目についてもセグメントと同様に、耐火実験時にコンクリート内部の温度履歴を測定し、耐火実験後に爆裂深さを測定した。熱電対の設置位置は、加熱面から0, 25, 50, 75, 100, 200, 300および500 mmとした。

爆裂深さの分布をFig. 11に示す。爆裂深さは、PP②の試験体で最大で3~4mmと軽微であった。PP①およびPP②のPP繊維を容積比で0.1%混入することで爆裂を抑制できることが確認できた。また、加熱面からの深さと最高温度の関係をFig. 12に示す。セグメントと同様に、鉄筋の芯かぶりを50mm~60mm確保することで、鉄筋の受熱温度を許容温度以下に制御できた。

### 4.3 施工性の検証

トンネルの地下に分合流拡幅部を構築する場合、コンクリートの運搬に手間と時間を要する。プラントから現場まで運搬し、地上部にて荷卸した後、地下へ運搬する必要がある。また、立坑を通して打込み場所までトンネル坑内を運搬した後、PP繊維を混入する必要がある。そのため、現場打ちの耐火コンクリートには、運搬に伴って、ワーカビリティの低下が懸念された。耐火コンクリートの打込みまでの運搬の流れをFig. 13に示す。

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、実際の施工を想定した施工実験を行った<sup>8)</sup>。施工



PP①（繊維径0.02mm×長さ10mm） PP②（繊維径0.05mm×長さ20mm）

爆裂深さ (mm)	6~4	4~2	2~0
-----------	-----	-----	-----

Fig. 11 試験体の状況  
Situation of Test Specimen

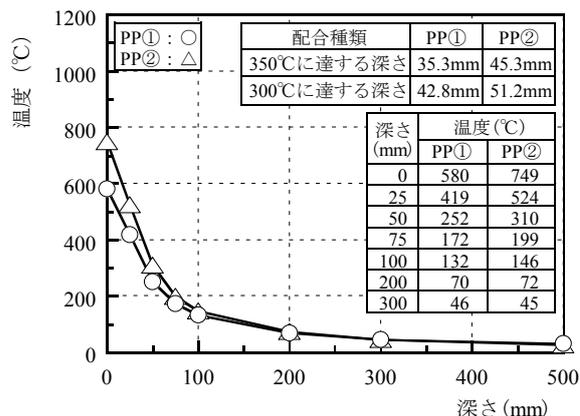


Fig. 12 加熱面からの深さと最高温度の関係  
Maximum Temperature to Depth from Heated Surface

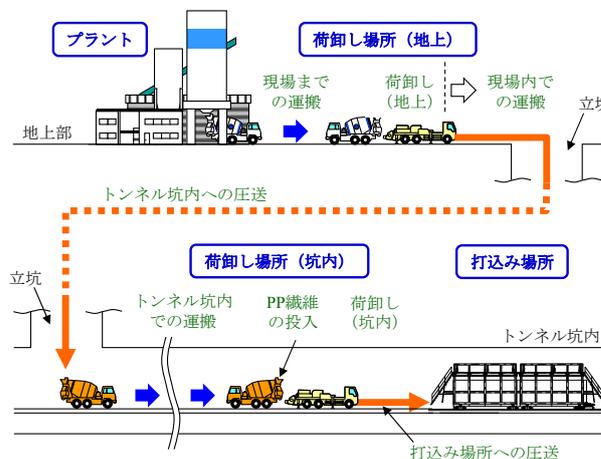


Fig. 13 コンクリートの運搬の流れ  
Flow of Concrete Transportation

実験の概要をFig. 14に示す。実験では、次頁a)~f)に示す各施工段階を想定し、コンクリートの品質を確認した。Fig. 14に示すトンネル坑内への圧送および打込み場所への圧送における配管距離は、どちらも水平換算距離で90mと想定し、同じ配管を使用した。トンネル坑内でのPP繊維を混入した時点で、高流動タイプの目標スランプフローは62.5cm（ランク2）とし、スランプタイプの目標

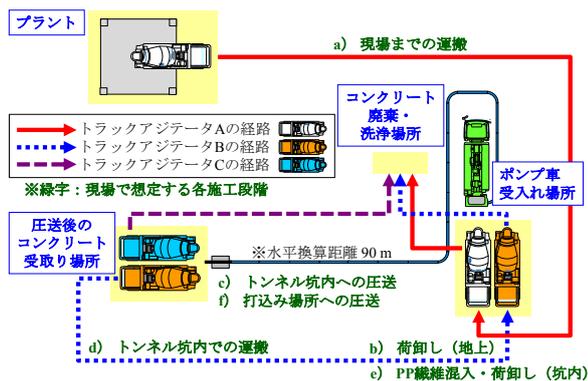


Fig. 14 施工実験の概要  
Outline of Construction Test

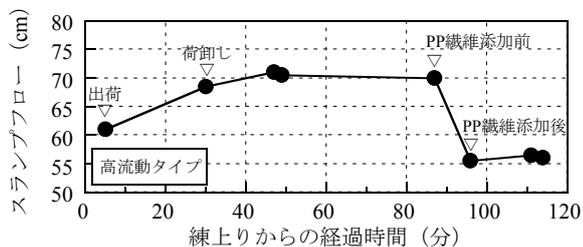


Fig. 15 スランプフローの経時変化  
Temporal Change of Slump-Flow

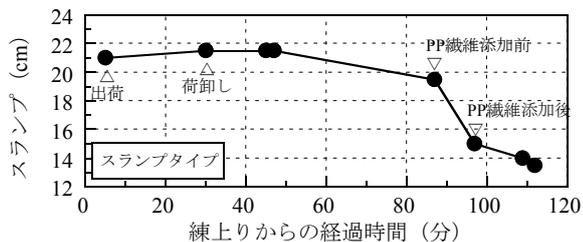


Fig. 16 スランプの経時変化  
Temporal Change of Slump

スランプは15cmとした。PP繊維は、PP①よりワーカビリティに与える影響の小さいPP②を使用した。

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

施工実験から得られたスランプフローの経時変化をFig. 15に、スランプの経時変化をFig. 16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4.5 cm、高流動タイプはスランプフローが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。所要のワーカビリティを確保でき、配管の閉塞やPP繊維のファイバールも認められなかった。

実際の現場での品質管理にあたっては、運搬に伴う流動性の低下量を考慮して、プラントから出荷するベースコンクリートの配合を検討する必要がある。そこで、地

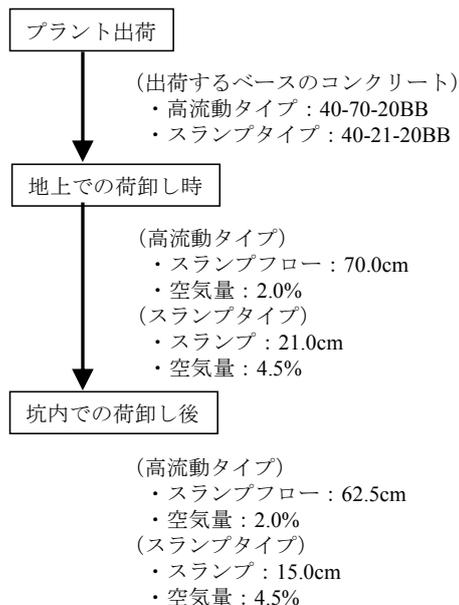


Fig. 17 各施工段階における目標品質の例  
Target Quality in Each Construction Step



Photo 4 施工の状況  
Situation of Construction

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時点でコンクリートの品質の目標値を変えることとした。各施工段階における流動性の目標品質の概要をFig.17に示す。また、施工状況の例をPhoto 4に示す。

## 5. 耐火型断面修復技術

### 5.1 概要

トンネルの覆工が、火災により高温履歴を受けた場合、表層部のコンクリートは強度が低下するため、劣化部を除去し、断面修復を行う必要がある。耐火被覆を設置することなく、トンネルの覆工のコンクリート自体に耐火性を付与する場合には、次の火災に備えて、耐火性を有する材料により断面修復を行う必要がある。また、火災に限らず、経年劣化等により、剥離および剥落が生じた場合にも、同様の断面修復が必要となる。そのため、劣化部を除去する方法および耐火性を付与した断面修復技術を確立する必要がある。

劣化部を除去する方法として、ウォータージェット(以下、WJと呼称)による劣化部除去工法を検討した。この方法によれば、健全部を傷めることなく、劣化部のみを除去することが可能となる。

一方で、構造体コンクリートの断面修復では、耐久性や一体性を確保する目的で、一般にポリマーセメントモルタル(以下、PCMと呼称)が用いられる。そこで、このPCMにPP繊維を混入することで耐火性を付与した断面修復技術を検討した。断面修復技術として、吹付け工法とこて仕上げ工法の2種類について検討した。

本章では、WJによる劣化部除去工法、耐火型吹付け工法および耐火型こて仕上げ工法について、各種性能の確認実験および耐火実験結果を報告する。



Photo 5 WJによる研り状況  
Situation of Removal by Water Jet

## 5.2 WJによる劣化部除去工法

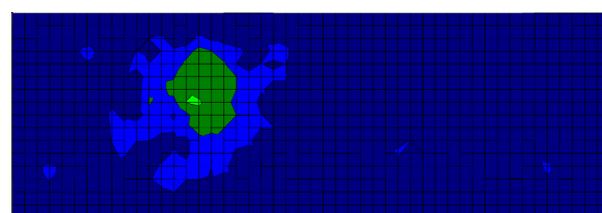
WJによる研り性能を確認するために、実際に耐火実験によりRABT曲線による加熱履歴を与えた試験体を用いて、劣化部の除去実験を行った。実験には、幅800mm×厚さ500mm×長さ4700mmの試験体を使用し、加熱区間は、試験体の中央部(長さ2400mmの範囲)とした。コンクリートには、セグメントと同様に、設計基準強度48N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを使用した。WJによる除去には、超高圧水発生装置、研り装置、発電機、油圧ユニット、水タンクおよびバキューム車を用いて行った。WJによる研り状況をPhoto 5に示す。

耐火実験後の爆裂深さおよびWJによる研り深さの測定結果をFig. 18に示す。耐火実験後の爆裂深さの最大値は31mm、平均値は4.2mmであり、WJにより劣化部を除去した後の深さは、最大値が79mm、平均値が44.5mmであった。WJによる研り作業で除去した深さは、平均で40mm程度であった。耐火実験により爆裂した部分については、加熱による劣化の度合いが大きく、研り深さも増大した。耐火実験時に測定した温度履歴の測定により、コンクリートの許容温度350℃に達する深さは、48.7mmであり、劣化部を除去した深さと概ね一致した。実験の結果、水圧を80N/mm<sup>2</sup>~100N/mm<sup>2</sup>程度に調節し、試験体表面から研り装置の先端までの離隔距離を100mm~200mmとすることで、加熱により劣化した部分のみを除去できることが確認できた。

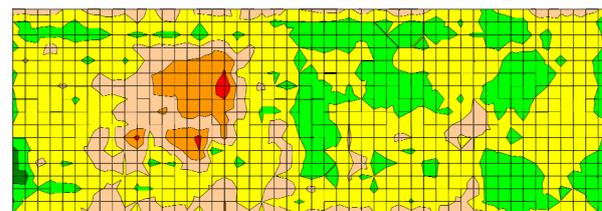
## 5.3 耐火型吹付け工法

**5.3.1 概要** これまでに、コンクリート構造物の断面修復工法として、液体急結剤を使用したPCM系の吹付け工法を開発している<sup>9)</sup>。この工法に使用するPCMにPP繊維を混入することで耐火性を付与した吹付け工法(耐火型吹付け工法)を開発した<sup>10)</sup>。

PCMはプレミックス材料とし、ポリマーには酢酸ビニル・アクリル等の共重合樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を使用した。ポリマーの添加率は結合材に対して5%とした。セグメントの補修や補強を想定して、設計基準強度は48N/mm<sup>2</sup>とし、水結合材比は38%とした。



耐火実験後の爆裂深さの分布



ウォータージェットによる研り深さの分布

爆裂深さおよび研り深さ (mm)			
70~80	60~70	50~60	40~50
30~40	20~30	10~20	0~10

Fig. 18 爆裂深さおよびウォータージェットによる研り深さの分布  
Distribution of Explosive Spalling and Removal Depth by Water Jet

PP繊維を混入したPCMを練り混ぜた後、このモルタルと急結剤を専用のポンプにて圧送し、吹付けノズルの先端にて混合した。コンプレッサーにより空気を送り、モルタルを噴出させることにより吹付けを行った。吹付けシステムの概要をFig. 19に示す。また、吹付けの状況をPhoto 6に示す。

**5.3.2 フレッシュモルタルの品質の確認** 4章でも報告したとおり、PP繊維の混入により、ベースのモルタルの流動性は大きく低下することが懸念される。吹付けを行う際に、圧送時の閉塞を防止するには、これまでの研究から、モルタルの15打の目標フロー値は、下限で180mmを確保する必要があることが分かっている。そこで、PCMにPP繊維を混入したモルタルの流動性を確認した。実験に用いるPP繊維は、2章の知見から、PP①(繊維径0.05mm×長さ20mm)およびPP②(繊維径0.02mm×

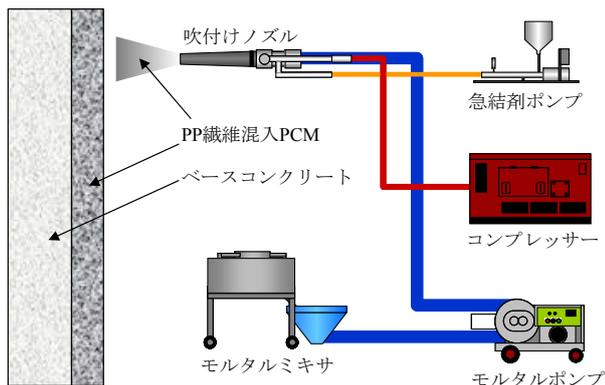


Fig. 19 吹付けシステムの概要  
Outline of Spray System

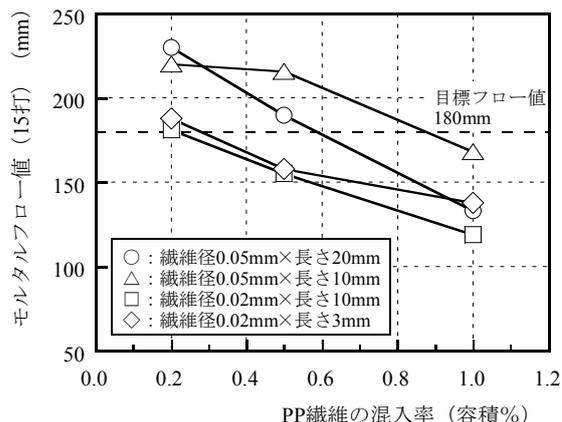


Fig. 20 PP繊維の混入率とモルタルのフロー値の関係  
Mortar Flow to Mix Rate of PP Short Fiber



Photo 6 吹付けの状況  
Situation of Spray Mortar

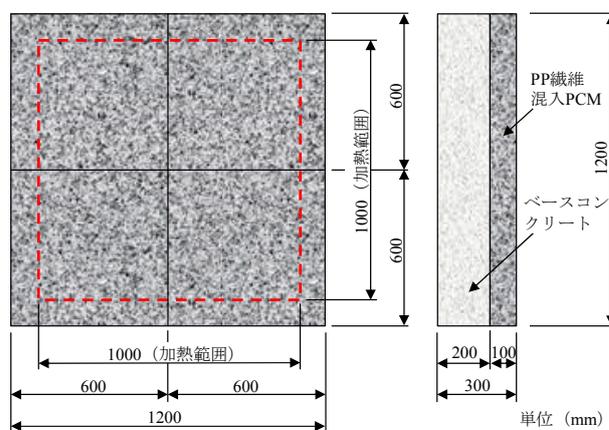


Fig. 21 試験体の概要  
Outline of Specimen

長さ10mm)をベースとし、流動性の低下が懸念されたので、長さを半分にした繊維径0.05mm×長さ10mmおよび繊維径0.02mm×長さ3mmの繊維についても検討した。PP繊維の混入率は、それぞれ容積比で0.2%、0.5%および1.0%の3水準とした。PCMは、プレミックス材料に加水後3分間練混ぜを行い、その後PP繊維を混入し、さらに1分間練混ぜて作製した。

各配合について、JIS R 5201に準拠して、モルタルのフロー値(15打)を測定した。PP繊維の混入率とフロー値の関係をFig. 20に示す。繊維径0.05mm×長さ10mmのPP繊維については0.5%以下、繊維径0.02mm×長さ3mmのPP繊維については0.2%以下とすることで、目標とするフロー値を確保できることが分かった。

**5.3.3 耐火性の検証** PP繊維を混入したPCMについて、耐火実験により爆裂抵抗性を確認した。PP繊維の混入率の増加と圧送性を考慮して、PP繊維の混入によるフロー値の低下量が最も小さい繊維径0.05mm×長さ10mmを使用することとした。PCMは普通のモルタルと比べて爆裂しやすいとの報告があるため<sup>11)</sup>、PP繊維の混入率を変えた4ケース(容積比で0、0.1、0.3および0.5%)について実験を行った。試験体の概要図をFig. 21に示す。

ベースコンクリートの寸法は、縦1200mm×横1200mm×厚さ200mmとし、吹付け厚さは100mmとした。ケースごとに4分割して吹き付けた。ベースコンクリートと吹付けモルタルとの一体性を強化するために、吹付け前にベースコンクリートの表面に吸水調整材を塗布し、剥落防止のためにステンレス製のアンカーおよびワイヤーを設置した。

耐火実験は、試験体を耐火炉の上部に設置し、吹付け面を加熱した。加熱条件は、これまでと同様にトンネル火災を想定したRABT曲線を使用した。耐火実験後、耐火炉から試験体を取り出し、爆裂深さを測定した。爆裂深さは、50mm間隔ごとにノギスを用いて測定した。

爆裂深さの分布をFig. 22に示す。PP繊維を混入していない試験体は、全体に激しい爆裂が生じ、断面修復部のほとんどが剥落した。PP繊維の混入率の増加に伴い、爆裂深さは低下しており、PP繊維を容積比で0.5%混入することで爆裂を防止することができた。

遮熱性については、これまでベースコンクリートの厚さを450mmとし、吹付け厚さを50mmとした試験体を用いて確認した<sup>10)</sup>。加熱面からの深さと最高温度の関係をFig. 23に示す。300℃に達する深さは45.4mmであり、

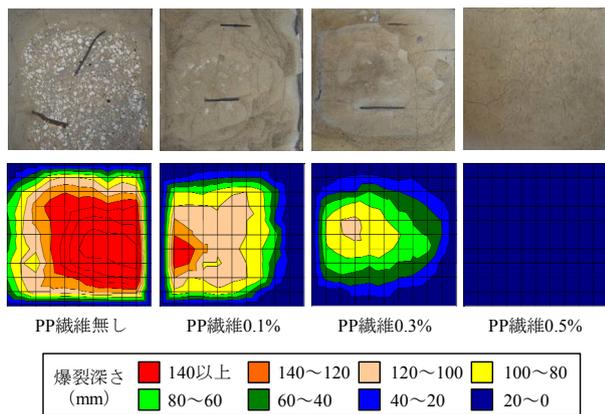


Fig. 22 試験体の状況  
Situation of Specimen

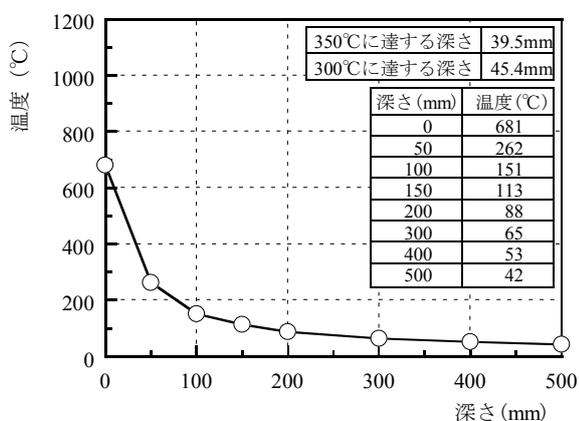


Fig. 23 加熱面からの深さと最高温度の関係  
Maximum Temperature to Depth from Heated Surface

吹付け厚さ50mmでベースコンクリートの温度を300℃以下に抑制できる。

#### 5.4 耐火型こて仕上げ工法

**5.4.1 概要** 比較的広範囲の断面修復を行う場合には、前節に示した吹付け工法が有効であるが、吹付け機械設備に手間と費用を要するため、局所的な断面修復においては、こて仕上げによる施工方法が望まれる。そこで、市販のこて仕上げ用のPCMにPP繊維を混入した耐火型こて仕上げ工法を開発した<sup>12)</sup>。

PCMはプレミックス材料とし、ポリマーにはアクリル系粉末樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を使用した。ポリマーの添加率は結合材に対して1.3%とした。設計基準強度は、吹付け工法と同様に48N/mm<sup>2</sup>とし、水結合材比は30%とした。PP繊維の種類は、PP①(繊維径0.02mm×長さ10mm)とし、前節の結果から混入率は0.5%とした。

**5.4.2 施工性および耐火性の検証** 吹付け工法では、モルタルのフロー値は15打で180mmを目標としたが、こて仕上げでは、仕上げ後にダレや剥落が生じないように、目標とする上限値を150mmとした。練混ぜは、パン型ミキサを用いて行い、プレミックス材料と練混ぜ水を混入して2分間練り混ぜた後にPP繊維を混入し、さらに



Photo 7 モルタルの打込み状況  
Situation of Placing Mortar

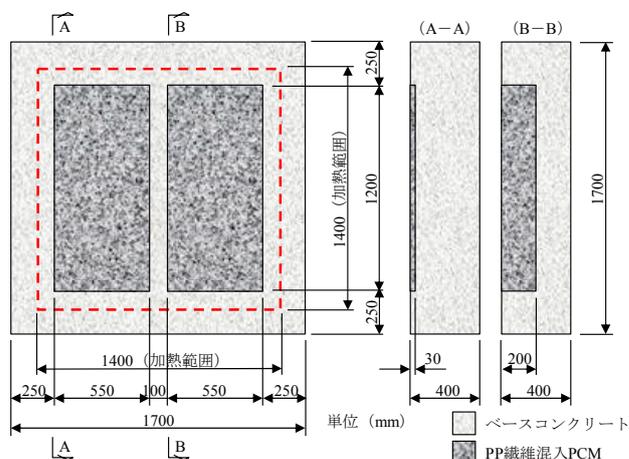


Fig. 24 試験体の概要  
Outline of Specimen

1分練混ぜを行った。

モルタルのフロー値は、15打で132mmであった。少し小さい値であったが、PP繊維を混入しても、こて仕上げに必要な流動性は確保できており、施工が可能であることを確認した。モルタルの打込み状況をPhoto 7に示す。

試験体の概要をFig. 24に示す。実際の断面修復を想定して、窪みを設けた平板状の試験体をあらかじめ作製し、その窪みに断面修復材を打ち込んだ。ベースコンクリートの寸法は、縦1700mm×横1700mm×厚さ400mmとした。窪みの寸法は、幅550mm×長さ1200mmとし、深さは30mmと200mmの2種類とした。加熱範囲は、補修を行った範囲を含む1400mm×1400mmの範囲とした。熱電対を加熱面より0、30、60、100、200および400mmの位置に設置し、試験体内部の温度履歴を測定した。窪みの部分に断面修復材を打ち込み、金ごてを用いて仕上げた。ベースコンクリートとモルタルとの一体性を強化するために、打継面には、あらかじめ吸水調整材を塗布した。窪みの深さ30mmのケースについては、剥落防止のために、ステンレス製のアンカーおよびメッシュ筋を設置した。



補修厚さ30mm 補修厚さ200mm

Photo 8 試験体の状況  
Situation of Specimen

耐火実験の結果、爆裂は認められなかった。実験後の試験体の状況をPhoto 8に示す。繊維径0.02mm×長さ10mmのPP繊維を容積比で0.5%混入することで、爆裂を防止できることが分かった。また、加熱時に特に大きな変形や剥離・剥落は認められなかった。加熱面からの深さと最高温度の関係をFig. 25に示す。最高温度の分布は、深さ30mmと200mmでほぼ一致しており、モルタルとコンクリートで同等な分布であった。

## 6. まとめ

都市部の道路トンネルで発生する車両火災に向けて、トンネル覆工の新設から維持管理まで含めた総合的な耐火工構築技術(①耐火型高機能SFRCセグメント、②場所打ち耐火コンクリート、③耐火型断面修復技術)を開発した。本稿では、これらの技術について、適切なPP繊維の選定やかぶりの確保により爆裂抵抗性および遮熱性を確保できること、セグメントの製造や現場での耐火コンクリートの施工が可能であることなどを、各種実験により確認した結果を報告した。これまでに、いくつかの現場で実際に適用してきた。今後も、さらに需要が続くとと思われる都市部の道路トンネルにおいて、火災時に対する安全性の高い覆工コンクリートの構築に貢献したい。

## 謝辞

5.3節の耐火型吹付け工法の開発につきましては、東急建設株式会社との共同で研究を行いました。研究の実施に際してご協力いただきました関係各位に感謝致します。

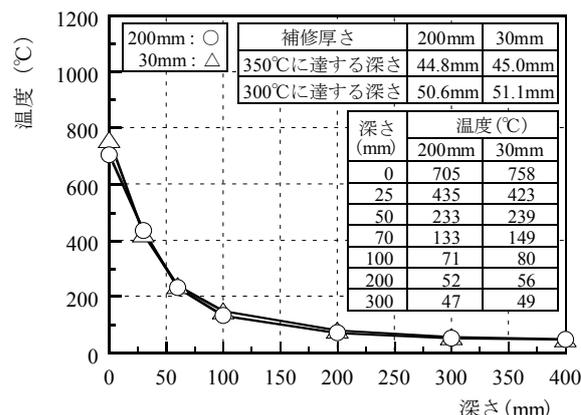


Fig. 25 加熱面からの深さと最高温度の関係  
Maximum Temperature to Depth from Heated Surface

## 参考文献

- 1) 河村忠孝：日本坂トンネル内の車両火災事故とその復旧，セメントコンクリート，No.439，pp.108-111，1983.9
- 2) 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.143，2014.12
- 3) 首都高速株式会社：トンネル構造物設計要領（シーールド工法編），第3編 耐火設計，pp.1-27，2008.7
- 4) 川西貴士，他：耐火型高機能SFRCセグメントの開発，大林組研究所報，No.74，2010.12
- 5) 川西貴士，他：トンネル覆工用コンクリートの爆裂およびはく落抵抗性に関する研究，大林組研究所報，No.75，2011.12
- 6) 土橋浩，他：鋼繊維補強高流動コンクリート(SFRC)セグメントの現場適用，コンクリート工学，Vol.44，No.11，pp.45-50，2006.11
- 7) 津野和宏，他：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.281-291，2010.11
- 8) 春日清志，他：シー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，pp.1-6，2014.12
- 9) 伊藤正憲，他：液体急結剤を使用した高品質ポリマーセメント系断面修復吹付け工法の開発，土木学会論文集F，Vol.62，No.3，pp.459-472，2006.10
- 10) 川西貴士，他：ポリプロピレン短繊維を用いた耐火性吹付け工法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，2007.7
- 11) 岡村一臣，他：ポリマーセメントモルタルの防耐火性に関する実験研究，フジタ工業技術研究所報，第20号，pp.107-124，1984.6
- 12) 屋代勉，他：ポリプロピレン短繊維を用いた断面修復材の耐火性，土木学会第69回年次学術講演会，V-028，pp.55-56，2014.9