

耐火型NMセグメントの開発

Development of Fire-Resistant NM-Segment for Road Tunnels

川村 彰 誉^{*(1)} 中津 賢 一^{*(1)} 佐野 陽 一^{*(2)} 山田 淳 二^{*(3)}
 Akiyoshi KAWAMURA Kenichi NAKATSU Youichi SANNO Junji YAMADA

抄 録

今後の道路シールドトンネル分野において必須技術となるトンネル耐火工に関して、新日本製鐵では耐火型NMセグメントを新技術として開発した。開発に際して、要素加熱試験、実大加熱試験、加熱後のコンクリート・シール材の物性試験などの結果から、耐火型NMセグメントは十分な耐火安全性を有していることを確認できた。

Abstract

In recent years, tunnel safety technology, especially fire protection technology for road boring tunnels is needed. We had developed Fire-Resistant NM-Segment that has an ability of protecting concrete and steel structures itself against tunnel fire. This paper reports the results of a fire test done for some reduction and real size models of Fire-Resistant NM-Segment. These results demonstrate that Fire-Resistant NM-Segment has a practical use.

1. 緒 言

道路用シールドトンネルにおいてはトンネル覆工体(以下、セグメント)を車両火災から守るための耐火工の設置が必須となっている。トンネル耐火工に要求される性能は、セグメントコンクリート部の爆裂を防止すること、鋼材、コンクリート内鉄筋、継手部シール材の温度上昇を抑止することにある。近年のトンネル耐火工は、写真1、2、3に示すように、セグメント組立て後にトンネル内面へ耐火工(吹付け材、ボード材、ブランケット材など)を設置する後施工タイプが主流である。

新日本製鐵では、鋼とコンクリートの合成セグメントであるNMセグメントにおいて、セグメント組立てと同時に耐火工が完成する耐火工一体型NMセグメント(以下、耐火型NMセグメント)の開発を完了した。耐火型NMセグメントは、後施工タイプの耐火工に比べ、建設コストの縮減や工期短縮を図ることが出来る。本稿では、



写真2 ボード系耐火工の例
Board type fire refractory



写真1 吹付け系耐火工の例
Spray mortal type fire refractory



写真3 ブランケット系耐火工の例
Fiber blanket type fire refractory with stainless steel

^{*(1)} 建材事業部 建材開発技術部 マネジャー
東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-7744

^{*(2)} 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

^{*(3)} (株)日鉄テクノリサーチ テクニカルサービス事業部 技術主幹

当該セグメントの実用性を確認するために実施した要素加熱試験、実大加熱試験および加熱後のコンクリート・シール材の物性試験結果について報告する。

2. 耐火型NMセグメントの仕様

図1に耐火型NMセグメントの構造を示す。耐火型NMセグメントは、中詰めコンクリートへポリプロピレン繊維（以下、PP）を混入することで耐火性を確保すると同時に鋼材部もPPコンクリートで被覆する“コンクリートタイプ”と、中詰めコンクリートはPPコンクリートとし、鋼材部は不定形耐火材で被覆する“不定形耐火材タイプ”の2種類の構造を考案した。

3. 溶射炉を用いた要素加熱試験

考案した2種類の構造に対して、セグメントの各要素(中詰めコンクリート部、ピース間継手部、リング間継手部)の耐火性能およびPPコンクリートの性能、不定形耐火材の性能を確認するために縮小モデルによる加熱試験をおこなった。

3.1 要素加熱試験のモデル

耐火型NMセグメントの基本性能を確認するための試験モデルは図2に示す3種類とした。

- (1) “中詰めコンクリート”部をモデル化し、PP繊維混入量の差によるコンクリート爆裂の有無および深度方向の温度分布を測定するためのコンクリートモデル
- (2) “ピース間継手”部をモデル化し、鋼材およびシール材温度を検証するためのピース間継手モデル
- (3) “リング間継手”部をモデル化し、鋼材温度の検証および鋼材からの耐火材の剥離を検証するためのリング間継手モデル

3.2 要素加熱試験

3.2.1 試験概要

図3に示すように新日本製鐵無機材料研究開発部保有の溶射バーナーにより、ドイツ交通省にて設定されているRABT(1200℃, 60

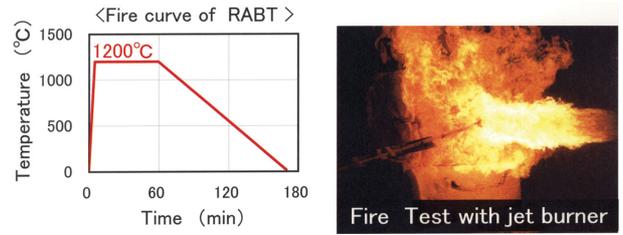


図3 要素加熱試験概要
Fire test for reduction models

分)加熱曲線にしたがった要素加熱試験をおこない、コンクリートの爆裂発生状況およびコンクリート、鋼材、シール材温度を確認した。

3.2.2 試験ケース

試験ケースを表1に示す。試験体1～3はPP繊維混入量の差を比較、試験体4～5はPPコンクリートによる鋼材被覆厚60mmでのリング間継手およびピース間継手の温度状況、試験体6～9は2種類の不定形耐火材による鋼材被覆厚20mmでの温度状況および不定形耐火材の比較をおこなった。なお、不定形耐火材はトンネル耐火工として実績のある2品種を適用した。

3.2.3 試験結果

(1) コンクリートの爆裂を防止するPP繊維混入量の選定

PP繊維を混入しなかった試験体1を除き、他の試験体では爆裂、剥離が起こらなかったことからPPの混入量は0.1vol%(0.91kg/m³)で十分な爆裂防止効果を発揮することがわかった。加熱前後の試験体状況を写真4に示す。

(2) コンクリート、鋼材、シール材の温度履歴

試験体2～3におけるコンクリート深さ60mm位置での温度履歴を図4に示す。

表1 要素加熱試験 試験ケース
Test parameter

Specimen No.	Model	Addition ratio of PP fiber (vol%)	Refractories for steel surface	
			Refractory	Thickness (mm)
1	Concrete	0	-	-
2	Concrete	0.1(0.91kg/m ³)	-	-
3	Concrete	0.2(1.82kg/m ³)	-	-
4	Ring joint	0.2(1.82kg/m ³)	PPconcrete	60
5	Piece joint	0.2(1.82kg/m ³)	PPconcrete	60
6	Ring joint	0.2(1.82kg/m ³)	Castable A	20
7	Piece joint	0.2(1.82kg/m ³)	Castable A	20
8	Ring joint	0.2(1.82kg/m ³)	Castable B	20
9	Piece joint	0.2(1.82kg/m ³)	Castable B	20

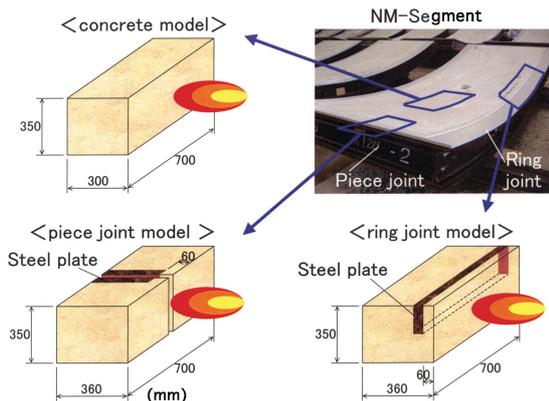


図2 耐火型NMセグメントの要素試験モデル
Specimens of reduction model

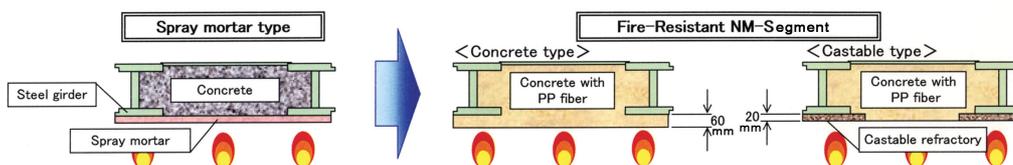


図1 耐火型NMセグメントの構造
Structures of Fire-Resistant NM-Segment

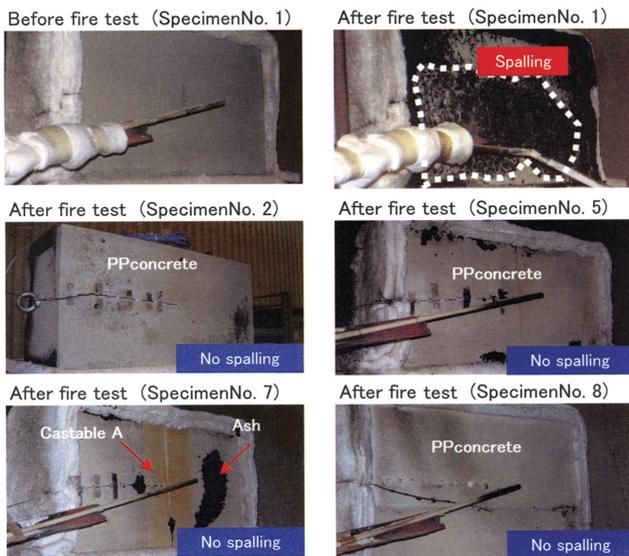


写真4 加熱試験前後の供試体状況
Test results of before and after fire test

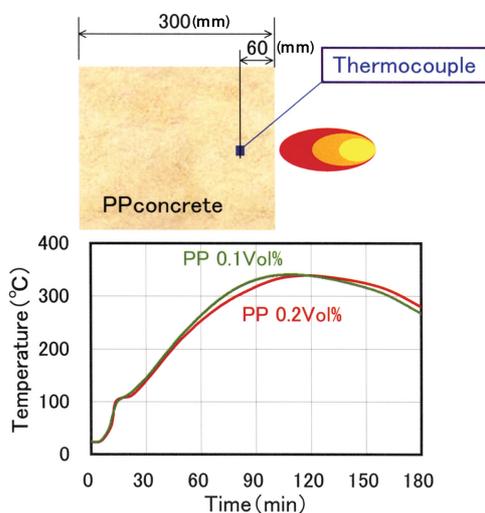


図4 コンクリートの温度履歴
Temperature of concrete at 60mm depth

コンクリート深さ60mm位置での最高到達温度は約340 (PP繊維0.1vol% : 339 , PP繊維0.2vol% : 341)となった。コンクリートの物性(圧縮強度, ヤング係数など)に影響を及ぼさない限界温度は350程度と言われており, 実験の結果60mm以深のコンクリートに対する火災時熱影響は少ないと推定される。また, PP繊維混入量による温度の差は見られなかった。

リング間継手モデル(試験体4, 6, 8)における鋼材表面の温度履歴を図5に示す。最高温度到達時間に若干の差があるものの(PPコンクリート: 166分後, 不定形耐火材A, B: 107~108分後), 鋼材表面の最高到達温度は約220となった(PP繊維: 220, 不定形耐火材A, B: 217~220)。鋼材の物性(圧縮強度, ヤング係数など)に影響を及ぼさない限界温度を300程度と考えれば, PPコンクリート60mm被覆タイプおよび不定形耐火材20mm被覆タイプの両タイプとも, 鋼材に対する断熱性能は十分なものであった。

また, ピース間継手モデル(試験体5, 7, 9)における地山側シール材の最高到達温度は図6に示すとおり約96となった(PP繊維: 96, 不定形耐火材A, B: 91~93)。シール材の物性(ゴム性

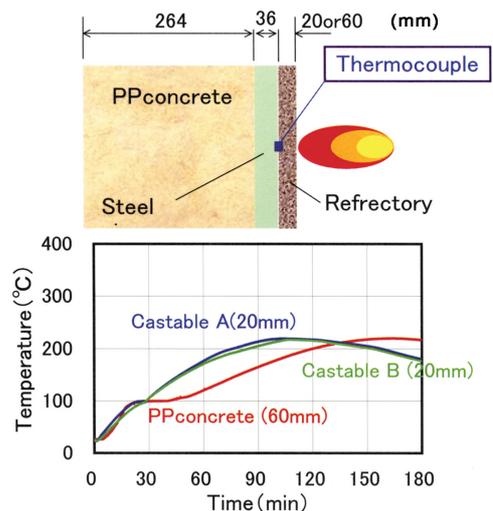


図5 鋼材の温度履歴
Temperature of steel surface

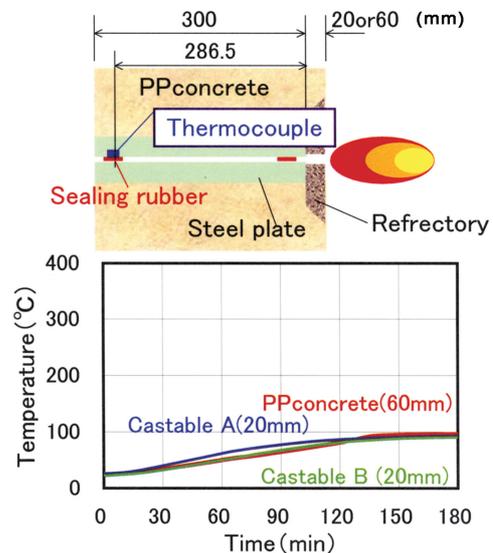


図6 シール材の温度履歴
Temperature of sealing rubber

能など)に影響を及ぼさない限界温度は120程度であることは別途実施した実験で確認しており, PPコンクリート60mm被覆タイプおよび不定形耐火材20mm被覆タイプの両タイプとも, 継手部シール材に対する断熱性能も十分なものであった。

3.3 要素加熱試験から得られた知見

要素加熱試験より以下の知見が得られた。

- (1) コンクリートの爆裂はPP繊維を0.1vol%以上混入することで防止できる。
- (2) PPコンクリート60mmまたは不定形耐火材20mmの耐火被覆をおこなえば, 火災時においてコンクリート, 鋼材, シール材は所期の限界温度を十分満足する。

4. 大型加熱炉を用いた実大加熱試験

前述の要素加熱試験によって, PPコンクリート60mm被覆タイプおよび不定形耐火材20mm被覆タイプの両タイプとも, 十分な耐火性能を有することを確認した。

次に, 実物大のセグメントを用いた実大加熱試験を行なった。

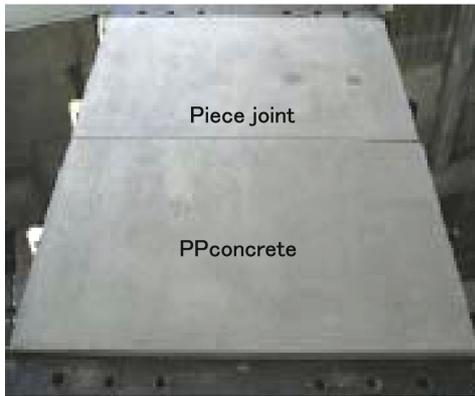


写真5 PPコンクリートタイプ実大供試体
Specimen of PPconcrete refractory

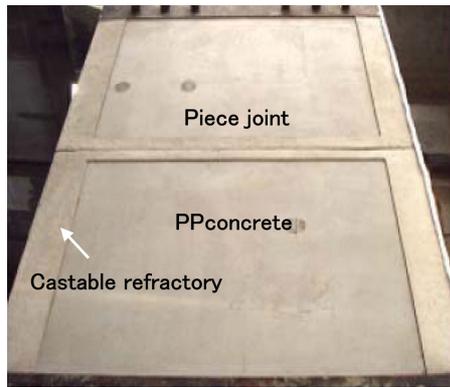


写真6 不定形耐火物タイプ実大供試体
Specimen of castable refractory

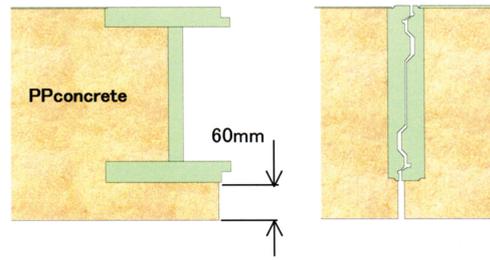


図7 PPコンクリートタイプ供試体断面図
Section of PP concrete refractory

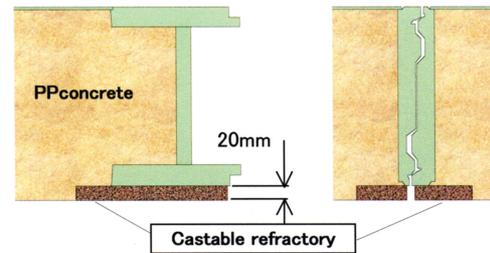


図8 不定形耐火材タイプ供試体断面図
Section of castable refractory

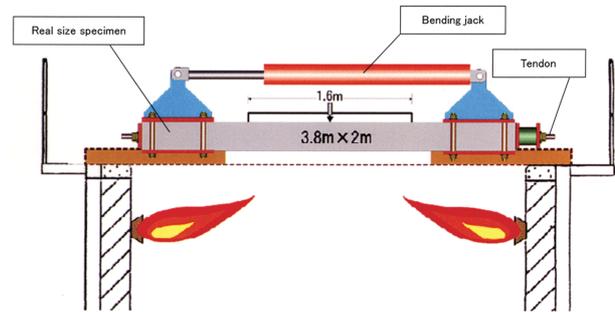


図9 荷重加熱試験装置
Fire test with loading jack

4.1 試験概要

写真5, 6に実大供試体を示す。実大加熱試験用の供試体も図7, 図8に示すように、要素加熱試験と同様のPPコンクリート60mm被覆タイプおよび不定形耐火材20mm被覆タイプの両タイプとし、独立行政法人建築研究所においてRABT(1200, 60分)曲線によって加熱試験をおこなった。コンクリートはPP繊維を0.2vol%(1.82kg/m³)混入した耐火コンクリートとし、不定形耐火材にはトンネル耐火工として既実績のある材料を適用した。

セグメント幅は近年の広幅化の流れを考慮し2000mmとした。桁高は300mm(+耐火被覆)、長さは1900mmの供試体を中央で連結することでピース間継手を再現し、シール材も設置した。供試体形状は、軸力導入および曲げ荷荷がしやすいこと、ならびに曲率の影響が小さい大口径のトンネルを対象としていることを考慮して平板型とした。

試験は図9に示すような装置で軸力と曲げを同時に作用させ、コンクリートの爆裂に対してより厳しい条件となる内面圧縮状態で加

熱した。具体的には、負曲げモーメント=350kN・m、軸圧縮力=7000kNを荷した状態で加熱し、鋼材およびコンクリートの断面内温度分布、シール材温度およびコンクリートの爆裂発生状況を確認した。なお、加熱中、ジャッキ荷重は変動しないよう一定に保持した。

耐火型NMセグメントの耐火性能を評価するために用いた目標値を表2に示す。

4.2 試験結果

図10に各供試体の温度履歴を、表3に主要測定点での最高温度を示す。鋼材(主桁内面およびピース間継手鋼材内面)において最高温度の差異が見られるものの、いずれも目標値を満足する300以下であった。地山側シール材の温度も目標値の120以下、コンクリートの最高温度は図11に示すようにいずれのケースも加熱面から深さ

表2 各部位の目標温度と要求性能
Target temperatures and phenomena

	Ring joint	Piece joint	Sealing rubber	Concrete surface
Point				
Target temp. & Phenomenon	≤300°C	≤300°C	≤120°C	—
	No exfoliation of refractory			No spalling

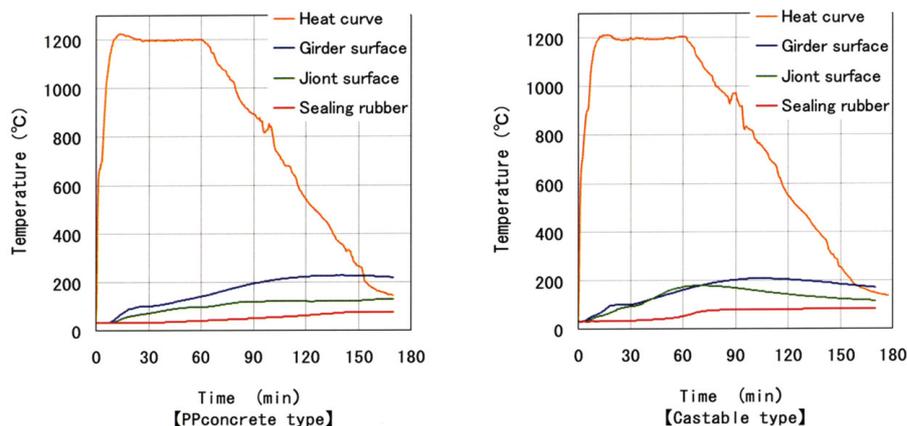


図10 経過時間と温度の関係
Time-temperature curve of PP concrete type and castable type

表3 最高温度測定結果と目標値
Results of maximum temperature

Notice point	PP concrete type	Castable type	Target temp.
Sealing rubber	76	82	120
Girder surface	226	206	300
Piece joint surface	130	178	300

4.3 加熱後の材料劣化試験結果

実大加熱試験後の供試体を用いてコンクリート強度、中性化、PP焼失範囲、シール材劣化度の測定をおこなった。

図12はシュミットハンマー法によって測定したコンクリート深さ方向の反発度を非加熱面の反発度を1.0とした場合の比で示している。加熱面からの深さに比例して反発度比はほぼ直線的に増加し、加熱面から40mm以深で非加熱面と同等の反発度となることから、40mm以深では常温と同等の強度が残存していると考えられる。

写真8は、加熱後供試体から採取したコアを用いてコンクリートの中性化範囲を示したもので、概ね50mm程度の深さまで中性化が進んでいる。この中性化範囲は同様にコア抜き試験体を用いておこ

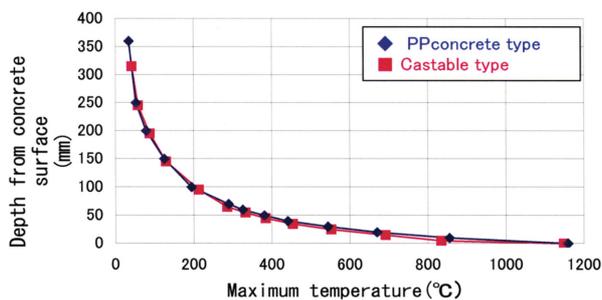


図11 コンクリート最高温度分布
Maximum temperature-depth curve

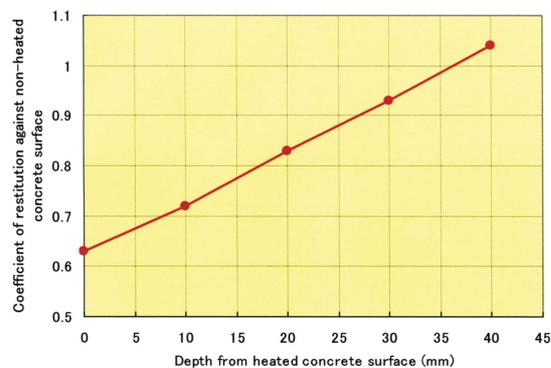


図12 非加熱面の反発度に対する加熱後コンクリートの反発度比
Coefficient of restitution against non-heated concrete surface

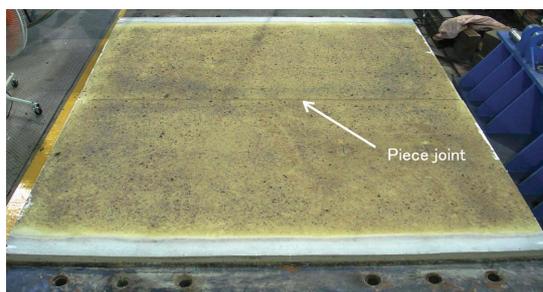


写真7 加熱後供試体(PPコンクリートタイプ)
Specimen after fire test (PP concrete type)

60mm以深で350 以下であった。

写真7に、PPコンクリートタイプの加熱終了後の加熱面側の状況を示す。耐火型NMセグメントの耐力に影響を及ぼすコンクリートの爆裂や表面剥落による断面欠損は一切発生しなかった。また、不定形耐火材タイプも同様にセグメントの耐力に影響を及ぼす爆裂等は確認されなかった。

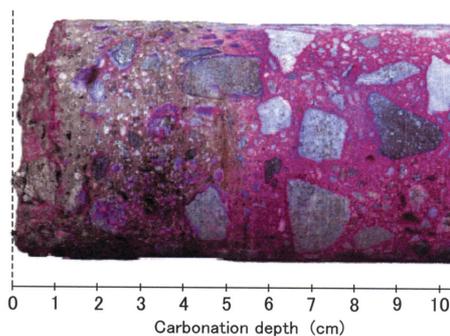


写真8 中性化深さ
Carbonation after fire test

なった水浸試験のPP消失範囲とほぼ一致していた。

シール材についても加熱後供試体から採取したシール材の劣化試験の結果、健全性が損なわれていないことを確認した。

5. 結 言

耐火型NMセグメントの耐火性能を確認するために要素加熱試験、実大加熱試験および加熱後の材料劣化試験を実施した。この結果、耐火型NMセグメントは、RABT加熱曲線(1200℃, 60分)相当のトンネル火災を受けても、セグメントの耐力に影響を及ぼす爆裂は発生しないことを確認した。また火災時におけるコンクリート、鋼材およびシール材温度も目標値に対して十分な耐火安全性を確保していることから、耐火型NMセグメントの実用性が確認できた。

都市再生、地下空間の利用を目的に、道路シールドトンネルは都

市部を中心に計画が進められている。本開発技術はこれらの事業において、トンネルの耐火安全性はもちろん、コスト縮減、工程短縮、構造信頼性といった社会的要請に応えるものと確信している。

今後とも、事業主、施工者、トンネル利用者および周辺住人に貢献できる新技術を提供すべく尽力していきたい。

謝 辞

本開発にあたりジオスター株式会社には多大なる協力をいただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川村彰普 ほか: V-597, V-598: 第62回年次学術講演会 広島 2007-9 土木学会