

道路シールドトンネルにおける耐火工について ～首都高速中央環状新宿線～

FIREPROOF CONSTRUCTION OF THE ROAD SHIELD TUNNEL

～THE METROPOLITAN EXPRESSWAY CENTRAL CIRCULAR SHINJYUKU ROUTE～

小西 由人¹・濱野 裕己²・近藤 由也³・屋代 勉⁴
Yoshihito KONISHI・Yuki HAMANO・Yoshinari KONDO・Tsutomu YASHIRO

The fireproof structure for preventing the damage of the segments by vehicle fire has been conducted the Metropolitan Expressway Central Circular Shinjyuku Route. Results such as construction technique and the required performance on fireproof structure and fireproof panel and fireproof spraying adopted as a fireproof construction are described.

Key Words : road shield tunnel, fireproof structure, fireproof panel, fireproof spraying, RABT curve

1. はじめに

首都高速中央環状新宿線（以下、新宿線）は、東京都目黒区から板橋区に至る延長11kmの路線であり、トンネル部の約7割の区間にシールド工法が採用されている。一般に、シールドトンネルは、一次覆工の内側に現場打ちコンクリートによる二次覆工が施されることが多く、国内初の道路シールドトンネルである東京湾アクアラインにおいても、二次覆工が行われている。一方、新宿線ではシールドトンネルの全区間が二次覆工省略構造であり、トンネル内での自動車火災に対して、セグメントの損傷を防止するための耐火構造を施す必要がある。耐火構造は、1200℃にもなる高温条件下において、トンネルの崩壊を防止し、トンネル利用者の安全避難確保ならびに消火活動環境を確保できる性能を必要とした。加えて、日常の供用下においても、ドライバーの走行性に支障を与えてはならず、走行車両の積荷などが衝突しても耐火材の飛散がないことなど要求性能は多岐にわたる。国内では同様の事例はまだ秋田中央道路¹⁾のみであり、耐火構造の仕様や性能確認方法などの統一的な考え方は確立されていない。

本稿では、このような状況下で施工された新宿線における耐火構造（耐火板、耐火吹付け）について、その要求性能と施工方法、ならびにSJ51工区～SJ53工区（外回り）トンネル工事の施工実績について述べる。

2. 工事概要

SJ51工区～SJ53工区（外回り）トンネル工事は、新宿線のうち、豊島区千早1丁目の立教通り立坑から新宿区上落合2丁目の大江戸線中井駅までの延長2,020m区間において、泥土圧シールド工法によりトンネ

キーワード：道路シールドトンネル, 耐火構造, 耐火板, 耐火吹付け, RABT曲線

1. 正会員 首都高速道路株式会社 西東京管理局 保全設計第一グループ
2. 非会員 首都高速道路株式会社 東京建設局 池袋工事グループ
3. 正会員 大林・大豊・東急SJ51～SJ53（外回り）トンネル特定建設工事共同企業体
4. 正会員 ㈱大林組 土木技術本部 技術第五部

表-1 工事概要

工事名称	SJ51工区～SJ53工区（外回り）トンネル工事・内装工事
発注者	首都高速道路株式会社
施工者	大林・大豊・東急SJ51～SJ53（外回り） トンネル特定建設工事共同企業体
シールド機外径	φ12,020mm
トンネル延長	2,018.8m
掘削工法	泥土圧（気泡）シールド工法
一次覆工	RCセグメント：811リング 外径φ11,800mm、桁高450mm、幅1,500mm ダクタイルセグメント：302リング 外径φ11,800mm、桁高400mm、幅1,200mm 鋼製セグメント：287リング 外径φ11,800mm、桁高400mm、幅1,500mm
耐火工	RCセグメント部：約10,500m ² ダクタイルセグメント部：約7,000m ² 鋼製セグメント部6,500m ²

ルを構築するものである。工事概要を表-1に示す。

耐火工は、RCセグメント部は上部90°の範囲に耐火吹付を、ダクタイルセグメント部および鋼製セグメント部は道路内空部に露出する全範囲に耐火板を施すこととしている。また、耐火工の内側に、トンネル内設備のために金物を取付ける。耐火工の施工範囲を図-1に、施設配置計画図を図-2に示す。

3. 耐火構造の要求性能

耐火構造の要求性能と規定内容を表-2に示す。耐火性能の検証に用いる火災曲線は図-3に示すRABT曲線（最高温度1200℃、燃焼時間60分）とした。RABT曲線とは、ドイツの指針が規定している、木製家具などを満載した大型トラックが火災を起こしたときのトンネル内の温度を想定したもので、国内でも沈埋トンネルの耐火設計に適用されている。

4. 耐火構造の概要

(1) 耐火吹付の構造

耐火吹付けは、所定の耐火性能を保持するとともに、トンネル供用後、万が一にも耐火材が剥落することのない構造でなければならない。そのため、目地の無い連続的な構造とし、耐火性を満足できる被覆厚さ30mm（設計値）を確保するとともに、耐火材自重増による剥落の懸念や、景観上の平滑性の観点から、吹付け精度を考慮して仕上がり厚さの上限を40mm（+10mmの許容誤差）と定めた。また、RCセグメントにステンレスメッシュ（SUS304）をアンカー（SUS304）で固定し、耐火材とメッシュを一体化させ剥落を防止する構造とし

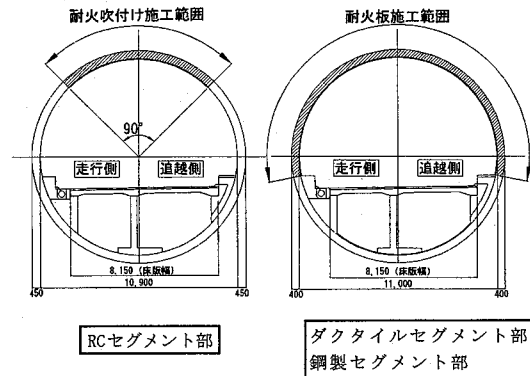


図-1 耐火材設置範囲

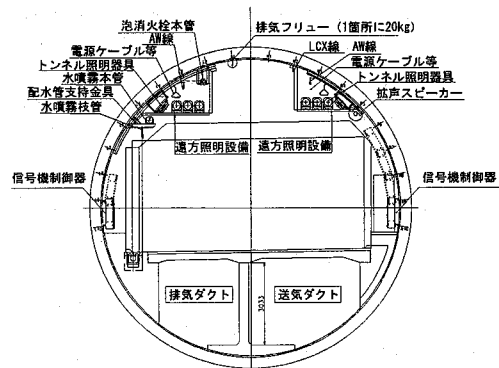


図-2 施設配置計画図

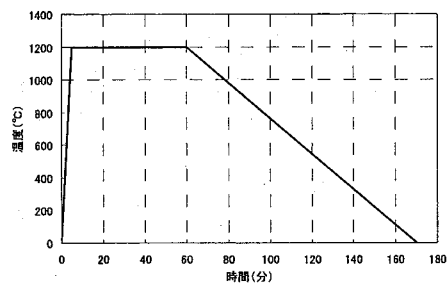


図-3 RABT曲線

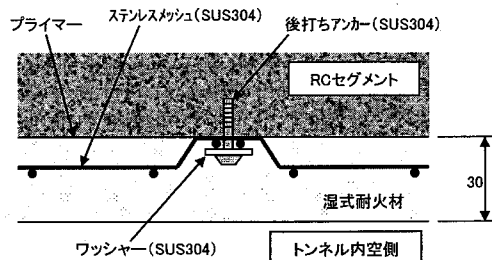


図-4 耐火吹付け構造概要図

表-2 耐火工の要求性能及び規定内容

要求性能		規定内容	吹付け	耐火板
耐火性能関係	耐火性能に優れていること	① 部材が著しい強度低下を起こさないこと ・ 断熱性能があること ・ 止水性能を維持していること コンクリート表面温度 : 350℃以下 鋼材表面温度 : 350℃以下 鉄筋表面温度 : 300℃以下 地山側シール材温度 : 100℃以下	○	○
		② 火災時に爆裂などにより部材の温度上昇をさせないこと	○	○
常時の耐久性・その他関係	人体への影響が無いこと	① 有害物質を含まない材料であること	○	○
		② 火災時に有害なガスを発生させないこと	○	○
	トンネル内の必要内空断面を確保すること	① 耐火工は原則として50mm以内で設置できること	○	○
	施工性に優れること	① 耐火工の設置が容易な構造であること	○	○
	常時の耐久性を保持すること	① 動的風圧に対して耐久性があること	—	○
		② 排気ガスや酸性、アルカリに対して耐久性があること ・ 排気ガスに対する耐久性	○	○
		・ 漏水や結露、水噴霧などの水、酸性に対する耐久性	○	○
		・ アルカリ性に対する耐久性	○	○
		・ 飛び石などに対する耐久性	○	○
		③ 吹付けの場合、耐火材が剥落しないよう所定の付着強度を有すること	○	—
	維持管理が容易であること	① 排気ガスなどにより汚れにくいこと	○	○
		② 耐火工の補修などが容易であること	○	○
	トンネル内景観を損なわないこと。	・ 耐火材はコンクリート色（マンセル値5Y7.0/0.5）と同等色であること	○	○
	トンネル火災発生時の消火活動を阻害しないこと。	・ 耐火板の場合、放水により耐火材が急冷されることで、割れ等に起因する脱落が発生しないこと。	—	○
	耐火材に自動車の積荷などが衝突した時に二次災害の危険性がないこと	・ 耐火板の場合、自動車の積荷などの衝突により耐火材の飛散や割れに起因する落下が生じないこと	—	○
	トンネル内照明等の反射や耐火板への映り込みが、ドライバーの視認性に影響を与えないこと	・ 耐火板の場合、耐火材表面の光沢度が10以下であること	—	○

た。耐火吹付け構造概要図を図-4に示す。

施設物は、RCセグメントの既設インサートよりボルトを取り出し設置するが、その際、耐火材を損傷しないように配慮する必要がある。そのため、ボルト締め付け時の軸力が耐火材に伝達しないようにスリーブ金物（SUS304）を取り付け、耐火材と施設物の接触防止を図っている。施設用金物取付部詳細図を図-5に示す。

(2) 耐火板の構造

a) 耐火板の構造

耐火板は、トンネル線形に追従させるため、セグメント1リングごとの割付けを基本としている。耐火材の寸法は、人力による取付が可能な大きさ（40kg/枚以下）にする必要があり、また、耐火性

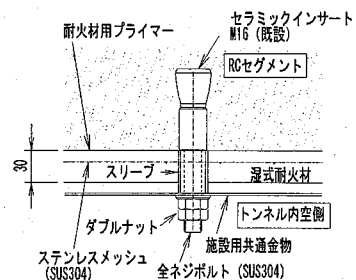


図-5 施設用金物取付部詳細図

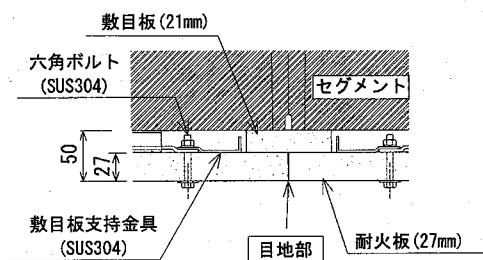


図-6 敷目板詳細図

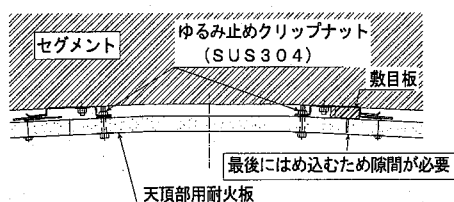


図-7 天頂部詳細図

および経済性の観点から、できる限り目地を減らすような割付けを考慮し、横寸法はセグメント幅と同一 (DC:1200mm, ST:1500mm) とし、縦寸法は900～1000mm程度とした。耐火板の厚さは、耐火性能および常時耐久性能を満足するものであり、既往の試験結果および製作・施工実績を踏まえ、 $t=27\text{ mm}$ (管理値 $0 \sim +2\text{ mm}$) とした。また、同厚さの耐火板を用いた既往の目地部の耐火試験 (RABT) の結果から、目開きの幅が5mmまでは、セグメントに悪影響を及ぼさないことが確認されていることから、新宿線では安全側を考慮して、目開き幅を3mmと規定した。しかし、設計上、目開き幅が3mmを超える箇所が一部生じるため、その箇所には耐火板の背面に耐火板と同材質のバックアップ材 (以下、敷目板) を設置し、耐火性を補完することとした。敷目板は、耐火性能を満足する最小の厚さが $t=20\text{ mm}$ であることから、製作誤差を考慮して $t=21\text{ mm}$ (管理値 $\pm 1\text{ mm}$) とした。敷目板の詳細を図-6に示す。

カーブ区間などテーパセグメントに対しては、その形状に合わせて耐火板の横寸法を少しずつ変えて階段状に擦り付けるため、設計上、3mmを超える縦目地の開きが生じる。また、線形以外でもセグメントの軸方向設置誤差や蛇行修正、耐火板取付け誤差などにより目開きが生じる可能性が高いため、縦目地には敷目板を設置することとした。一方、横目地は下端部を除いて、シールド線形等によりその形状を変化させる必要がなく、耐火板の取付け方法に配慮すれば、目開きを3mm以下に抑えることが可能である。そこで、円周方向に耐火板を積上げて設置する方式とし、横目地は目開きが生じにくい構造とした。しかし、天頂部や下端調整部など最後に取付ける耐火板は限定された空間にはめ込むように取付けるため、ある程度の隙間が必要となる。そこで天頂部と下端調整部の横目地には縦目地と同様に敷目板を設置することとした。天頂部の詳細図を図-7に示す。

耐火板の基本構造は、差込金具をセグメントに固定し、耐火板に取付けたスリット金物を差込金具に差し込んで取付け、下方から順次、耐火板を積上げて設置していく構造である。耐火板の施工手順を図-8に示す。ただし、天頂部の耐火板はスリット金物を差込む形式での施工ができないため、ゆるみ止めクリップナット (SUS304) を用いて、外からボルト締めを行い固定する (図-7参照)。また、耐火板の設置後は、セグメントを完全に覆い隠してしまうことになるため、セグメントの状態 (例えば、漏水の有無など) を確認することが困難である。そのため、保全性の観点から、下端部の耐火板についても、取り外しが容易に行える構造とするため、ボルトによる後付け方式とした。

セグメントへの各種金具の固定は図-9に示す打込式スタッドボルト (以下、スタッド) により行っている。スタッドは恒久的な耐久性 (SUS316 相当) と高い耐食性を有するもので、耐火板、金物の自重及び動風圧に対して十分な引張強度を有することを確認している。スタッドの打設は母材にあけた下孔に図-9に示す専用の鋏打機 (火薬式) を用いて打ち込むもので、取付ける金物や位置に応じて2種類のスタッド (M8, M10) を使い分ける。スタッド打設後の金物の固定は、ゆるみ止めナットを用いることで供用後もボルトが緩むことのない構造としている。

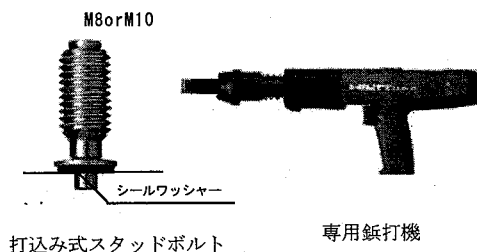


図-9 打込式スタッドボルト

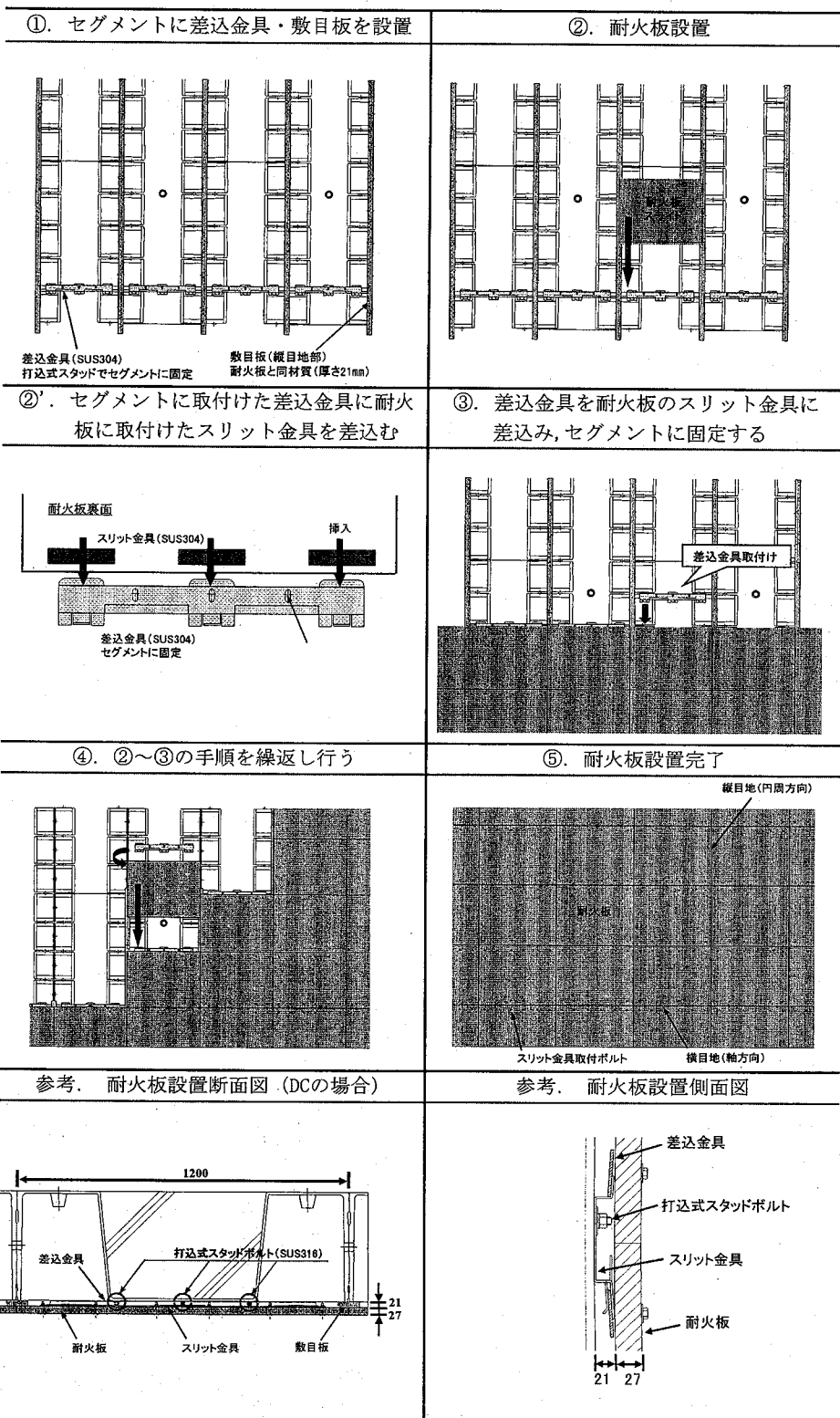


図-8 耐火板施工ステップ図

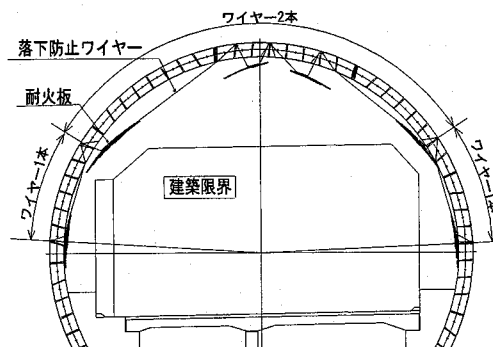
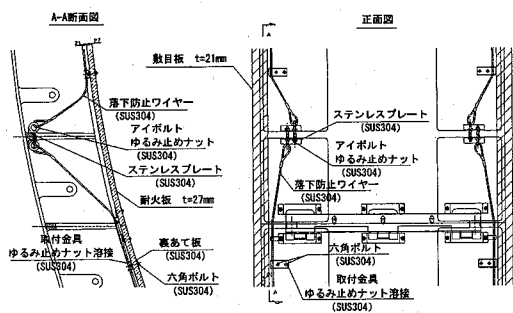


図-10 フェールセーフ構造概要図

図-11 フェールセーフ脱落想定図

施設物は耐火板の設置前に施設用取付金物（雌ネジ）をセグメントに取り付け、そこからボルトを取り出し設置するが、その際、耐火材を損傷しないようにするため、耐火吹付けと同様にスリーブを設置する。

b) フェールセーフ

耐火板には、車両の積荷などが直接衝突して耐火板がセグメント表面から脱落する場合や、経年劣化等により部材が脱落する場合など、万が一のことを想定し、耐火板が建築限界の内側に落下しないよう対策をとることが重要である。そこで、落下防止の装置として耐火板に落下防止ワイヤーを取り付けることとした。フェールセーフの構造概要図を図-10に、フェールセーフ脱落想定図を図-11に示す。

フェールセーフに使用する材料（ワイヤーロープ、取付金具等）の材質については、供用中の取替えが困難であることから、恒久的な耐久性が必要と考え、ステンレス製とした。フェールセーフの設置位置については、天井部など耐火板が万が一落下した場合に建築限界を侵す可能性がある部位については、耐火板1枚に対してワイヤー2本を使用することを基本とした。一方、側部など耐火板が万が一落下したとしても建築限界を侵すことなく車道側部の防護コンクリート上に落ちる部位については、ワイヤー1本を使用することとした。

5. 耐火工の施工

SJ51 工区～SJ53 工区（外回り）トンネル工事では、耐火工の他に、床版工事、上下線連絡坑工事などが並行して行われており、坑内資材運搬のための軌道の確保が工事遂行のための生命線となる。そのため、耐火用の施工足場は軌道に支障しないよう門形の自走式台車（写真-1）とし、工程確保のため、2 台の台車を使用している。

(1) 耐火吹付けの施工

耐火吹付けの作業手順を以下に示す.

① 準備工

- ・耐火吹付け範囲（天頂より円周方向45°）の墨出しを行う。

② 金物取付工

- ・ 墨出しに合わせて、円周方向側の端部金物 (SUS304 : L-30) をアンカー (SUS304 : $\phi 4$) で固定する。
- ・ RCセグメントの既設インサート (M16) にスリーブ金物 (SUS304) を取付ける。

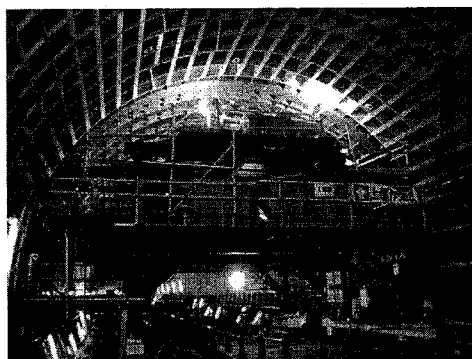


写真-1 門形レール走行台車

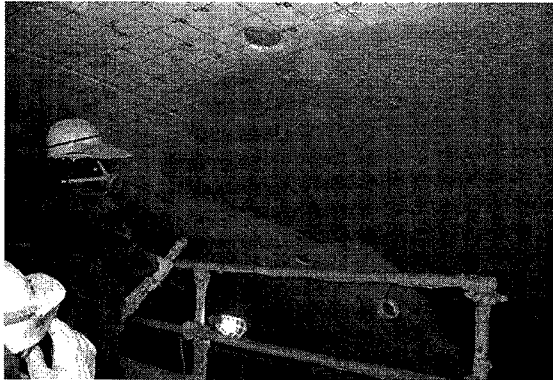


写真-2 吹付け状況



写真-3 表面仕上げ（ローラー使用）

- ・ステンレスメッシュの割付け計画に従って位置合わせを行い、マーキングを行う。
- ・アンカーの下穴を穿孔し、ステンレスメッシュをアンカーにて直接固定する。
- ・アンカーの打設間隔およびメッシュのたわみが生じていないことを確認する。

③ 下地処理工

- ・RCセグメント表面を高圧水により洗浄し、埃やアンカー穿孔屑等の異物を除去する。
- ・洗浄後、セグメント表面の乾燥状態を確認し、所定量のプライマーを塗布する。

④ 耐火吹付工

- ・所定の配合で耐火材を練混ぜ、フレッシュ性状（スランプ/フロー値）を確認する。
 - ・耐火材の吹付けを行う。（写真-2）
 - ・厚さ測定治具を用いて吹付け厚さの管理（30mm～40mm）を行う。
 - ・吹付完了後、ローラー等を用いて耐火材表面の仕上げを行う。（写真-3）
- 耐火吹付けの完了全景を写真-4に示す。

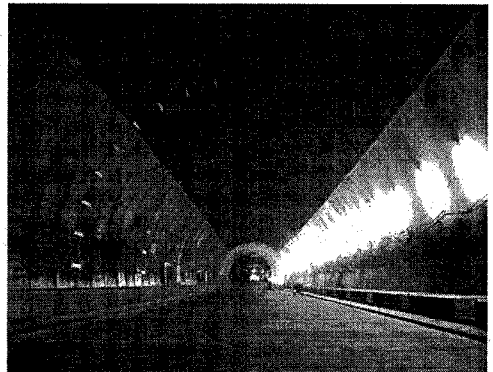


写真-4 耐火吹付け完了全景

(2) 耐火板の施工

耐火板の施工手順を以下に示す。

① 施設用金物設置工

- ・スタッドボルト打設位置の墨出しを行い、専用ドリル（φ4）を用いて垂直に下穴を穿孔する。
- ・専用鉋打ち機を用いてスタッドボルト（SUS316:M10）を下穴に直角に打設する。（図-9参照）
- ・施設用取付金物をスタッドボルトに差込み、緩み止めナットにて固定する。

② 落下防止ワイヤー設置工

- ・落下防止ワイヤー片側端部のアイボルトを緩み止めナットでセグメントに固定する。（図-10参照）

③ 耐火板設置工（図-8参照）

- ・施設用取付金物のボルト孔の位置に合わせて耐火板にボルト取出し用の孔（φ35）を開ける。
- ・耐火板裏面にスリット金具（SUS304）を水平に取り付ける。
- ・①と同じ要領でスタッドボルト（SUS316:M8）をセグメントに打設する。
- ・差込金具（SUS304）をスタッドボルトに差込み、緩み止めナットにて固定する。
- ・敷目板の裏面に無機系の接着剤を塗布して、セグメントのリング間継手部に仮固定する。
- ・耐火板の下部スリット金具をセグメントに取付けた差込金具に差し込む。

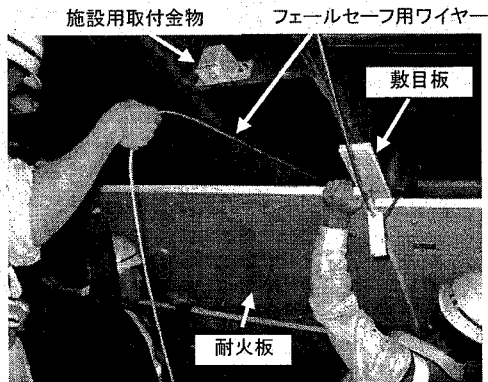


写真-5 耐火板設置状況

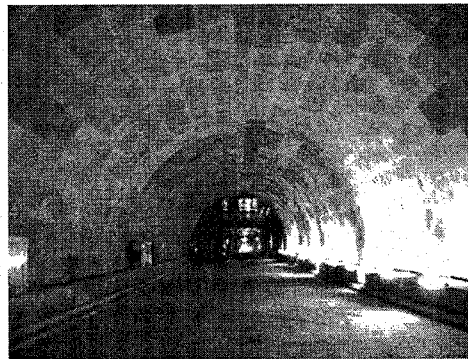


写真-6 耐火板設置完了全景

- ・落下防止ワイヤー取付金具を耐火板に固定する。
- ・耐火板の上部スリット金具に差込金具を差込み、スタッドボルトと緩み止めナットにて固定する。
- ・同様にして耐火板を円周方向に積み上げる。
- ・天頂部および下端調整部の耐火板は必要に応じて所定寸法に加工する。
- ・天頂部および下端調整部の耐火板は差込金具 (SUS304) に緩み止めクリップナット (SUS304:M8) を設置し、六角ボルト (SUS304:M8) で固定する。

耐火板の設置状況を写真-5 に、耐火板の設置完了全景を写真-6 に示す。

6. おわりに

トンネル内を自動車火災から保護するための耐火対策への取り組みは、ヨーロッパ諸国では早くから行なわれており、ドイツやオランダにおいては耐火規準が制定されている。近年、国内においても、沈埋トンネルでは耐火工が採用されるケースが増えてきているが、これまで道路シールドトンネルでは耐火工の実例はほとんどなく、耐火構造の使用や施工方法の確立が望まれてきた。首都高速道路株式会社では、新宿線において、各種セグメントに対する耐火工の要求性能を定め、耐火板および耐火吹付けの仕様とその検証方法、取付け構造を確立するに至った。

現在、新宿線では、8 工区あるシールドトンネルのうち4 工区について耐火工工事に着手しており、国内では初めてとなる耐火吹付けに至っては4 工区とも約8 割の施工が完了している。また、DC セグメントへの耐火板取付けの施工も開始しており、その取付け構造の確実性も実証することができた。

耐火構造としては、新たに耐火性を有するセグメントの開発が進められてきており、耐火セグメントに対する要求性能と検証方法なども確立していく必要があるが、それについてはまた後日改めて報告したい。

参考文献

- 1) 本田武志, 進藤敏博, 西岡巖, 小原伸高: 道路シールドトンネルにおける耐火構造と性能確認, トンネルと地下誌, pp49-57, 2005. 7