

道路シールドトンネルにおける耐火工の 設計・施工および維持管理計画

A design build of fire-resistant structure in the road tunnel and a maintenance plan

佐々木寿一¹・富田幸憲¹・西岡 巖²・小原伸高³・岡谷利之⁴

Juichi Sasaki, Yukinori Tomita, Iwao Nishioka, Nobutaka Ohara and Toshiyuki Okaya

¹秋田県 秋田中央道路建設事務所 (〒010-0864 秋田県秋田市手形住吉町1-9)

²正会員 工修 大成建設株式会社 東京支店土木部 (〒163-6009 東京都新宿区西新宿6-8-1)

³正会員 工修 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

⁴大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

Akita Chuuo road is a city planning road linking the east and west of JR Akita Station, and the most are shield tunnel without secondary lining. Fire-resistant structure to prevent the damage of the segment for the vehicle fire in the tunnel is necessary. This report is described the design of the fire-resistant structure in the tunnel and an execution method and maintenance.

Key Words : fireproof plate, rabt-curve, maintenance

1. まえがき

秋田中央道路はJR秋田駅の東西間を結ぶ都市計画道路であり、その大部分がシールド工法により施工されるトンネル構造（シールド区間約1.5km）である。シールドトンネルの覆工は、内径11.2mで二次覆工省略型であり、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ぐための耐火構造が必要となる。道路シールドトンネル一般部のセグメントに対する耐火工は、本工事が国内で最初の実績となったが、その設計と施工及

び維持管理計画について報告する。

2. 工事概要

秋田中央道路は、秋田県が計画している秋田市中心部から秋田自動車道秋田中央ICを結ぶ、全長約8kmの地域高規格道路である。

このうち、秋田駅東西間を結ぶ中心市街地の約2.5kmは主にトンネル構造の自動車専用道で計画されている。JR秋田駅東西間を結ぶトンネル構造からなる自動車専用道路であり、当面は下り線ルートを整備し、2車線の対面通行として暫定的に供用する計画である。

主要部分の施工方法は当該区間が軟弱な地盤であること、交通量の多い中心市街地であることから周辺環境へ与える影響が少ない泥水式シールド工法を採用しており、中間のランプ分岐部と東西の出入り口付近は開削工法による函渠および掘割構造としている。現在、主要工事は完了し、2007年9月に道路が供用開始される予定である。

シールド外径はΦ12.4m、延長1,524mと国内有数の規模となっている。また、一次覆工は外径12.2m、厚さ0.5m、幅1.5mのRCセグメントが主体となる。

本工事は入札前に技術提案を受ける設計・施工一括発注方式にて発注・契約され、請負者が自らの技術提案に基づき実施設計を行うこととしてい

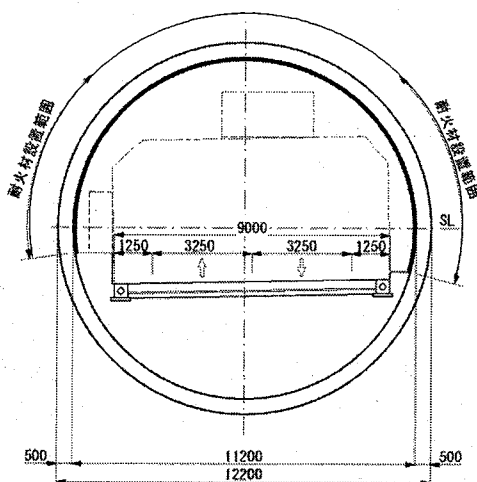


図-1 シールド標準断面図

る。特に既往の事例がないシールドトンネルの耐火構造については、発注者が特記仕様書により要求性能を規定し、請負者が耐火構造の検討の他、要求性能を満足することを確認するための試験計画の立案および実大試験を実施設計において行うこととしている。

シールド標準断面及び耐火材設置範囲を図-1に示す。

3. 耐火工の要求性能

秋田中央道路シールドトンネル部では、コスト縮減と工期短縮等を目的として、二次覆工を省略している。したがって、一次覆工であるRCセグメント等が、むき出しの状態となり、供用時の事故による火災で、高強度であるRCセグメントが熱せられると、爆裂現象の恐れがあり、トンネル崩壊の危険が生じる。また、鋼製セグメントやダクタイルセグメントでは、高温により、部材強度が低下する恐れがある。そこで、セグメントの内面に、耐火材を設置し、トンネル本体を火災から守る事が必要となる。

当トンネルに要求される性能について列記する。

(1) 火災時および火災後（除冷後）の要求性能

- ・ 火災想定曲線は、RABT 曲線とする。
- ・ セグメントのかぶりコンクリートが爆裂しない。
- ・ セグメントの主筋温度が 250℃を越えない。
- ・ スチールおよびダクタイルセグメントの本体部の最高温度は 350℃以下とする。
- ・ トンネル使用上で復旧できない漏水ならびに不都合な変形、損傷が覆工構造体（セグメント本体、継手部、シールド材など）に残留しない。
- ・ 耐火工が落下しない。
- ・ 耐火金具は、耐火材以上の耐火性能を有する。

(2) 常時の要求性能

- ・ 洗浄作業、排気ガスなどに対して劣化しない。
- ・ 割れや剥離による落下を生じない。
- ・ トンネル内を高速走行する車両によって生じる負圧力などに対して剥離・落下などを生じない。
- ・ ドライバーの走行性への影響、ドライバーに不安感を与える形状、色、反射率などに

ついて内装材と同等以上の仕様を満足する。

要求性能の照査は、原則として設計荷重作用下における実物大火災実験による性能確認と常時における性能確認を行うこと、火災時および火災後に対するトンネル構造の崩壊に対する安全率は $SF \geq 1.1$ とすることと規定している。

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（図-2参照）。

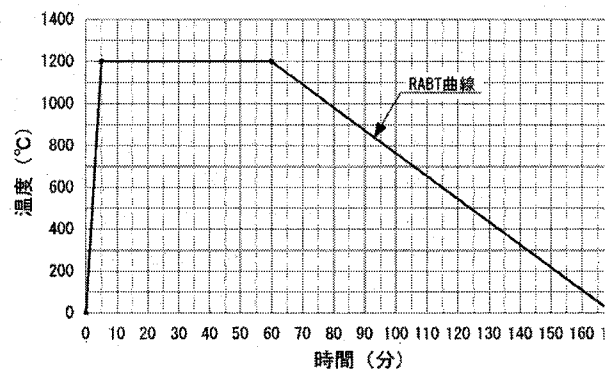


図-2 火災想定温度曲線（RABT 曲線）

4. 耐火板の設計・施工について

(1) 耐火構造の選定

トンネル延長が、東トンネルおよび西トンネルを合わせ 1530m あり、耐火工面積は、約 30,000m² となる。また、耐火工は、全体工程確保のためにシールド掘進との同時施工が必要となり、製作・施工上の工夫が求められた。

耐火材として候補に挙がるものとして、セグメントに耐火性の吹付けを施す方法、耐火板をセグメント表面に取付ける方法、耐火性のブランケットを取付ける方法等が考えられる。

耐火吹付方式は、実績も有り、特に大きな施工上の課題も無いが、当工区は、軟弱地盤内にトンネルが位置するため、地震時のセグメント継手面の目開きに対する追従性や剥離の懸念が考えられた。

ブランケットタイプの耐火材は、トンネル内の洗浄などによる水を含んだ場合の垂れなどを懸念した。これに対し、耐火板を後付け設置する方式は、性能を満足する他に、仕上りの美観、内装設備との相性、施工性なども良好であると考え、本工事の耐火構造として選定した。

耐火板の材質は要求性能を満足できるプレス式珪酸カルシウム系耐火板とセラミック系耐火板を

用いることとした。

(2) 常時および火災時の要求性能に対する検証

(a) 耐火性能確認試験に使用する供試体

耐火構造の性能確認試験に使用する供試体は実際の工事で使用するRCセグメントと同じ形状寸法（桁高500mm、幅1500mm）とし、本体部試験体と継手部の供試体を製作した。また、耐火板としてプレス式珪酸カルシウム系耐火板とセラミック系耐火板の2種類について性能確認を行うため、合計4体の供試体により加熱試験を実施した。

本体部供試体の目的は、セグメント本体の火災時および火災後の健全性を確認するためのものである。コンクリートは高温に加熱された際に爆裂を生じることがあるが、コンクリートに働く圧縮力が高いほど爆裂が生じ易いことが知られている。また、火災時には地山側よりトンネル内側の温度が高くなる。以上のことから、加熱試験を行う供試体はトンネルの内側に最も大きな圧縮応力が発生する断面で使用するセグメントとし、供試体内部に設置したPC鋼線を緊張することにより供試体に所定の圧縮応力を発生させる。導入する軸圧縮力は設計計算における最大値に余裕を見込んで 10N/mm^2 に相当する値を設定した。（図-3）

継手部試験体は、セグメント継手部の火災時および火災後の健全性を確認する目的で、継手部を頂点とした半割A型セグメント2ピースを接合させた試験体とした。

(b) 加熱試験結果

加熱試験では4ケースを実施した。「本体部供試体+セラミック系耐火板」の加熱試験結果概要を

図-4～図-5に示す。

いずれの試験も、RABT曲線に従った適切な加熱を行うことができ、加熱後に耐火板を撤去してセグメント表面を観察したところ爆裂や有害なひび割れは確認されなかった。

また、コンクリート表面温度は最大で 274°C 、主筋の温度は最大 104°C であった。

継手部供試体の加熱試験において、継手部地山側のシール材の温度は 35°C 、内空側の緩衝材の温度は最大 84°C であり（図-6）、本体・継手部ともに耐火構造が要求性能を満足できることが確認された。

鋼製セグメントおよびダクトイルセグメント本体部の温度については、中詰コンクリート厚が鋼殻の桁高より100mm大きいことから、RCセグメントの加熱試験におけるコンクリート表面から100mm深さ位置での最高温度により評価した。この位置での温度は最大 91°C であり、要求性能を満足できると判断した。

火災後に対するトンネル構造の安定性評価は、加熱試験後の供試体を用いたセグメントの単体曲げ試験・継手曲げ試験により行い、安全率（ $F_s = \text{破壊曲げモーメント} / \text{抵抗曲げモーメント}$ ）が2.5以上と、加熱前から低下していないことを確認した。

また、火災時のトンネル構造の安定性評価は、コンクリート、鉄筋、継手部材の各材料の高温時強度からセグメントの本体・継手部の強度を推定することにより評価した。特にコンクリートは、セグメントと同一配合・同一養生の供試体に対して高温に加熱した各温度において圧縮試験を実施して高温時強度特性を把握した。火災時の鉄筋（ま

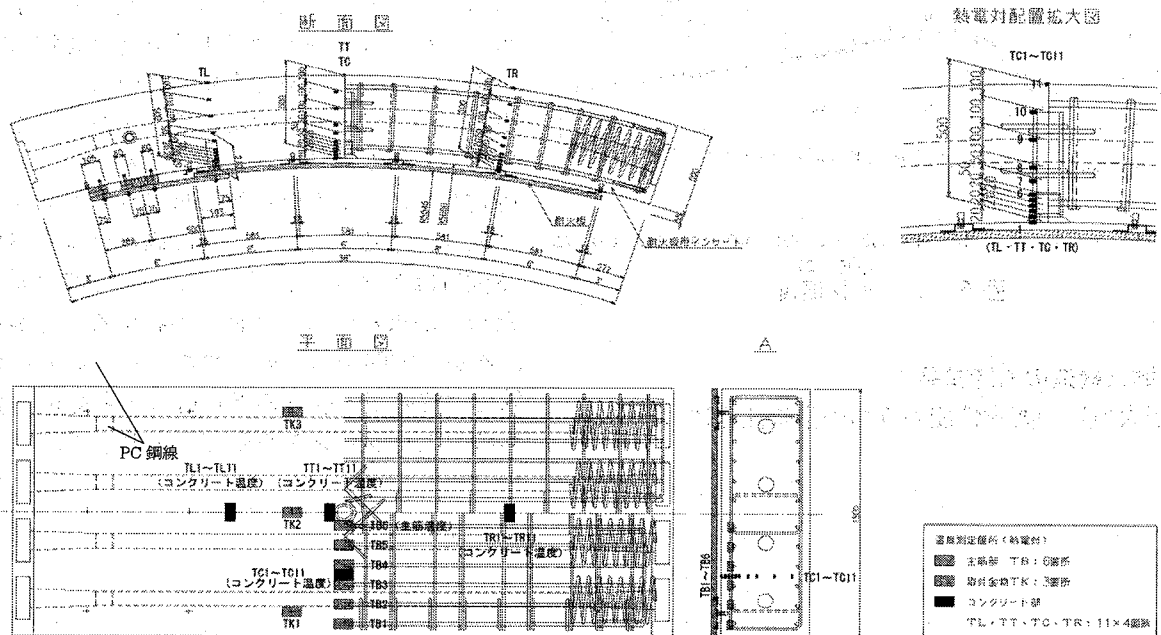


図-3 本体部供試体温度測定位置図

たは鋼材)の引張強度/許容引張応力度が2.1以上、火災時のコンクリート圧縮強度/許容圧縮応力度が1.8以上となり、火災時のトンネル構造の安定性についても要求性能を満足することを確認した。

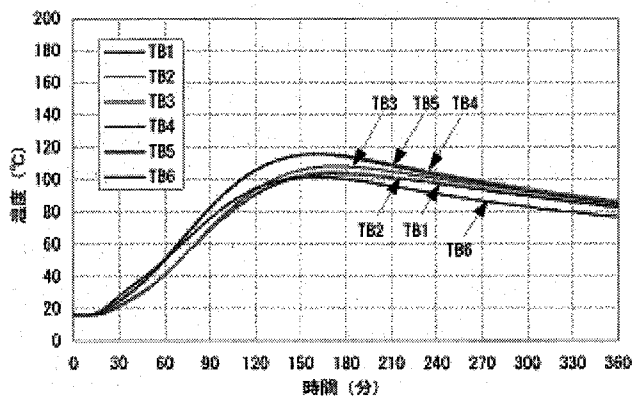


図-4 主筋温度

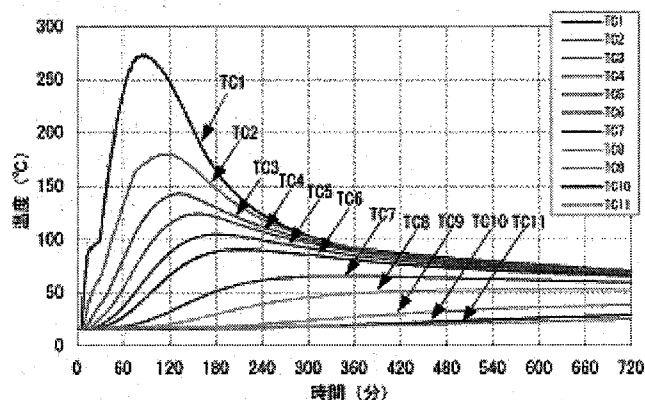


図-5 コンクリート温度

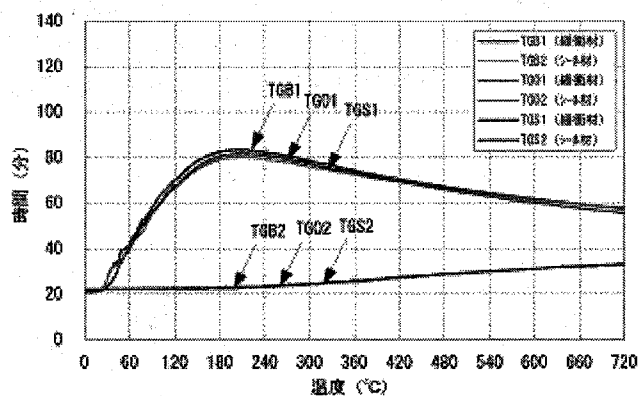


図-6 シール材温度

(c) 耐火構造の常時試験

耐火構造の要求性能のうちの常時性能について

も耐火板と耐火板取付金物の強度および耐久性に関する試験を実施し、性能を確認した。

耐火板については、トンネル内装工に要求される性能を参考に、自動車通行時の風荷重や洗浄作業時の洗浄荷重に対して十分な強度や耐久性を有することを確認した。また、耐火板取付金物は耐久性を考慮してステンレス製 (SUS316) とし、酸・塩に対する耐久性試験により耐久性を確認した。また、耐火板の取り付け方法については、実際と同一形状の金物により固定した耐火板に対し、静的曲げ試験および風荷重を想定して200万回連続載荷する疲労試験を実施し、いずれも異常がみられないことから所要の強度および耐久性を有することを確認した。

(3) テーパーセグメント対応と施工方法

シールドセグメントへの取付けは、その特徴を考慮した施工方法が必要となる。曲線部で使用するテーパーセグメントは、その組み方 (Kセグメントの位置など) は事前には確定できない。これに対応するため、セグメント組立完了後に、その出来形に応じた幅で耐火板を高精度に工場加工して現場に持ち込み、現場で切断加工するような作業を行わず、効率よく耐火板設置ができるような施工システムを開発した (詳細は (5) に記述)。

(4) トンネル内装工や坑内設備への対応

道路トンネルには視線誘導などを目的とする内装工が必要となるが、本工事では白色系の内装機能付き耐火板を初めて適用した (写真-1)。これはトンネル内装板と耐火板を貼り合わせて一体化したもので、内装工と耐火工の両方の機能をあわせもち、耐火板の設置と同時に内装工も完了するため、それぞれ単独で施工する場合と比較してコストダウンと工程短縮を実現している。

トンネルには照明等の坑内設備があり、これらはあらかじめセグメントに埋め込んだインサートに固定したボルトを耐火板に貫通させておき、これに取り付けることになる。設備用ボルトが貫通する位置はセグメントのインサート位置に対応するため、耐火板には精度良く削孔することが可能であるが、隙間からの火災巻き込みの防止とボルト締付け時の耐火板への過負荷の発生を防止するための耐火パッキンを開発して適用している。

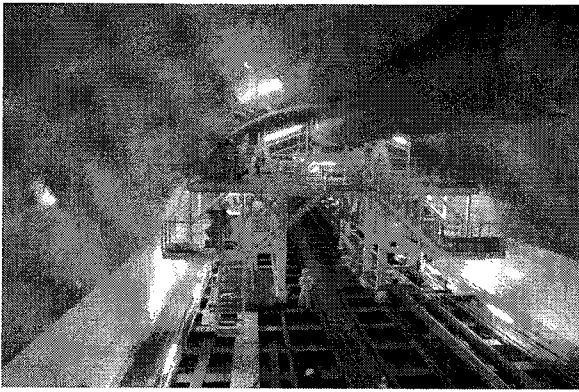


写真-1 耐火板施工台車

(5) 耐火板の施工手順

図-7 に耐火板設置工の施工手順を示す，耐火板はセグメントリング単位で取付順にパレット積みされたパッケージとして搬入され，シールド掘進のセグメント運搬の合間に発進立坑からエレベーター付き耐火板施工台車まで運搬する．施工台車では耐火板の背面にスリット金物を取付け，トンネルの左右それぞれで下から上へ順に耐火板（耐火内装板）を設置していく（図-8，図-9 参照）．設置済みの耐火板に差込金物を取付け，トンネル周方向目地とトンネル軸方向目地にはそれぞれ敷目板と火炎巻き込み防止材を設置した後で，耐火板を建て込んでいくことを繰り返す（③～⑦）．テーパーセグメント部では、セグメント組立出来形にあわせて耐火板を工場加工させて取付け

図-7 耐火板設置手順

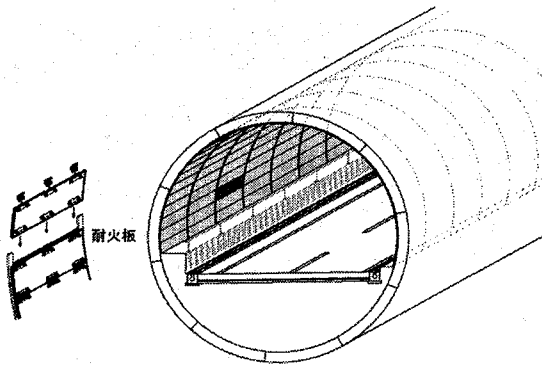


図-8 耐火板模式図

順に積上げたパッケージとして搬入させるため，順次はめ込み式で組立てていくだけであり，現場での切断・加工等の作業は発生せず効率よく施工を進めることが可能である．

耐火板設置工の施工実績は10名程度の作業班の構成を基本として片番当たり3～5リングである．シールド掘進と耐火板設置を同時に行なうため，耐火板の坑内運搬がセグメント搬送のサイクルにより決まり，耐火板施工台車では耐火板の到着待ちとなるような状況が生じる結果となった，本施工システムでは施工箇所仮置きできる数量やセグメント運搬サイクル，他工種の工程調整が耐火板設置工の工程・進捗に与える影響が大きいといえる．

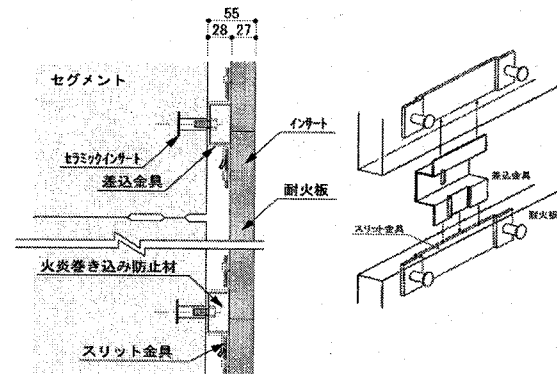


図-9 耐火板取付図

5 可撓セグメントの耐火工について

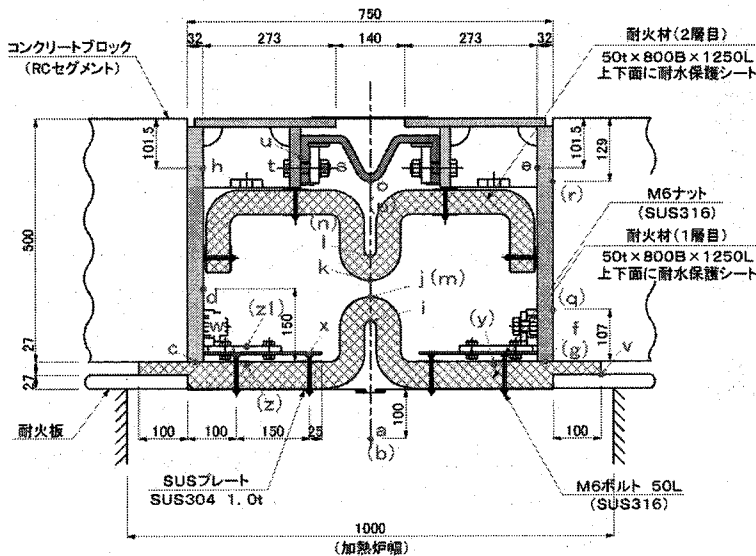
(1) 可撓セグメント部の耐火工の要求性能

可撓セグメントの耐火工の主要要求性能は，火災想定曲線をRABT曲線（60分加熱+110分除冷）とし，①セグメント本体部（スチール）の最高温度は350℃以下とすること，②トンネル使用上で復旧できない漏水ならびに不都合な変形・損傷が覆工構造体（セグメント本体、継手部、シール材など）に残留しないこと，③耐火工が落下しないこと，である．また，耐火工の性能は実物大試験により確認することと規定されている．

(2) 可撓セグメント部の耐火工の概要

可とうセグメントの耐火工は，セグメント本体部，止水ゴムおよびシール材位置の火災時温度を許容値以下に抑えると同時に可とう性を有する構造とする必要がある．

止水ゴムとシール材の許容温度は，それぞれの材質から120℃および100℃と設定した．耐火工の概要および加熱試験における温度測定位置を図-10



熱電対の設置目的	数量	熱電対設置位置の記号
炉内の温度測定用	2	a, b
可撓セグメント本体部の温度測定用	6	c, d, e, f, g, h
耐火材の温度測定用	6	i, j, k, l, m, n
止水ゴムの温度測定用	3	o, p, u
シール材の温度測定用	2	q, r
止水ゴムの熱履歴温度測定用	2	s, t
一般部との取り合い部の温度測定用	1	v
耐火材取付ボルトの温度測定用	2	w, x
表面側耐火材の界面温度測定用	3	y, z, z1
合 計	27	

●印:熱電対設置位置 断面1:熱電対17箇所
断面2:熱電対10箇所…()内

図-10 可とうセグメント耐火工概要図および温度計測項目

に示す。耐火材はセラミックファイバブランケットとし、必要な断熱性を確保するため2層構造とした。耐火材の設置方法は、1層目（地山側）は可とうセグメントの内面カバープレートに溶接したナットにボルトにより固定し、2層目は可とうセグメントの主桁と副桁（止水ゴム取付鋼板）にナットを溶接してボルトにより固定する。

ナットやボルトの材質は耐久性よりSUS316とした。また、洗浄等により耐火工に水が浸入することが想定されるが、セラミックファイバブランケットは水を吸収するため、吸水状態にて火災が発生した場合、水蒸気爆発により耐火性能を発揮できない可能性もある。

従って耐火材に耐水を目的とした保護シートを1層目、2層目に被覆して性能維持を図った。これはガラスクロスにシリコンコーティング処理をした不燃性で有毒ガスの発生がない保護シートで耐水性を有する材料である。また、耐火材のブランケットは火災時の燃焼ガスのガス圧を透過させて断熱性能を阻害させる可能性があるため、これを避けるためにトンネル内面側にステンレス板を設置した（図-10、写真-2参照）。

実験結果の概要を図-11～図-13に示す。

可撓セグメント本体部への温度移行は、①熱電対の $c \rightarrow d \rightarrow h$ が $148^{\circ}\text{C} \rightarrow 108^{\circ}\text{C} \rightarrow 54^{\circ}\text{C}$ 、②熱電対の $f \rightarrow e$ が $208^{\circ}\text{C} \rightarrow 55^{\circ}\text{C}$ 、③熱電対の g が 193°C （いずれも最高温度）と3つの経路での温度測定結果により、いずれも 350°C を超えないことを確認できた。

止水ゴムへの温度移行は、①熱電対 o が 50°C 、②熱電対 p が 48°C と2つの経路での温度測定結果により、いずれも 120°C を超えないことを確認できた。

シール材への温度移行は、①熱電対 r が 54°C （地山側：シール材位置）、②熱電対 q が 92°C （内空側：緩衝材位置）と 100°C を超えないことを確認できた。

また、加熱後の試験の健全性を目視により確認した。耐火材の落下等は認められず、セグメント本体部、継手部、シール材などの覆工構造体に変形、損傷なども認められなかったため（写真-3）、火災後においても覆工構造体の性能劣化がないことが確認できた。

(3) 可撓セグメント部耐火工加熱試験

耐火工の性能は実物大のセグメント部分供試体（セグメント幅 $750\text{mm} \times$ セグメント厚さ $500\text{mm} \times$ 周方向長さ 800mm ）をRABT曲線に従った加熱が可能なガス炉による加熱試験により確認した。実



写真-2 耐火工設置状況

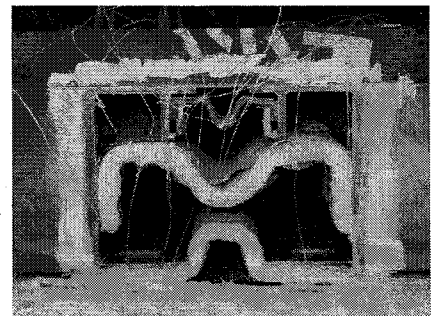


写真-3 加熱後試験体

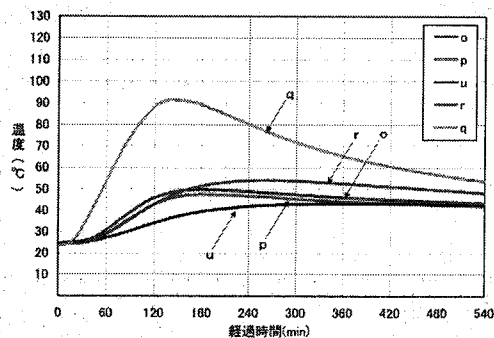


図-11 止水ゴム・シール材の温度

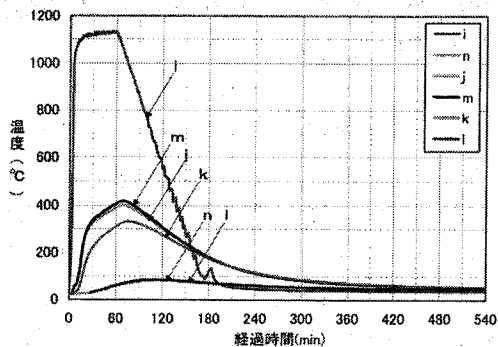


図-12 耐火材の温度

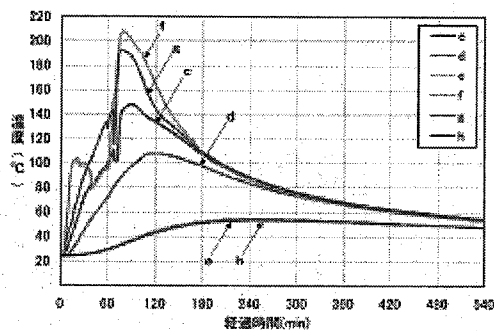


図-13 可とうセグメント本体の温度

6 完成後の維持管理計画

耐火板は供用後も、その性能を半恒久的に保つために、定期点検と緊急点検を行いながら、耐火板の保守を行っていく必要がある。そこで、維持管理についての手法を作成し、点検の目安とする必要がある。

維持管理は、常時点検や定期点検、地震時、事故時、火災時等の緊急点検に分類し、応急処置方法および完全復旧方法についての計画を作成した。

耐火板はストックを用意しておくが、ストックが不足した場合は、応急処置方法としてブランケットタイプの耐火材を暫定使用する事とした。

耐火板の取替え方法については、通常の出付では行えない、1枚だけの交換や取付方法を、

耐火板の損傷程度ごとに作成した。

特に検証の必要があるものとして、小規模火災後の耐火板を交換する場合の基準を決める必要がある。

耐火板の要求性能は上述した通りであるため、どの程度の火災を受けた場合に、耐火板が要求性能を満たせなくなるのかを、実験等により確認し、交換基準を決定とする事とした。

実験に当たり、小規模な火災を想定する事が必要となる。そこで、温度変化の速度を RABT 曲線と等しく、ピーク温度継続時間を 20 分とした火災曲線を想定し、200 度～500 度の範囲で 100 度ごとにピーク温度を変えて、耐火板の加熱後試験体を作成した（表-1、図-14 参照）。

表-1 試験体種類

耐火板種類	履歴加熱条件 ピーク温度
プレス式珪酸カルシウム系耐火板	200℃20分
	300℃20分
	400℃20分
	500℃20分

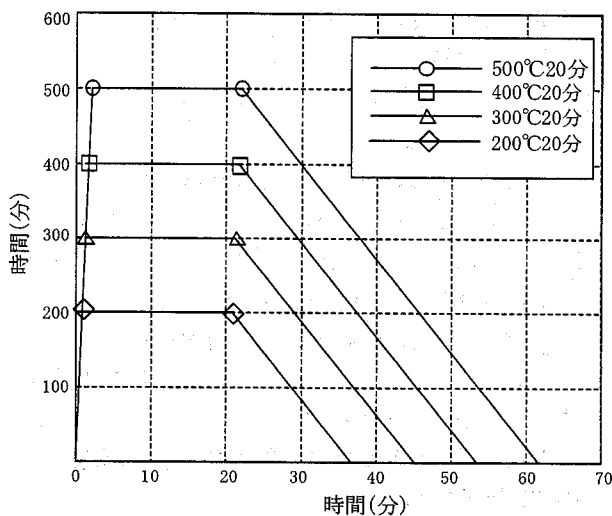


図-14 履歴加熱条件

これらを、曲げ強度、かさ比重、吸水率、表面硬さについて測定を行った。

試験結果を表-2 に示す。

曲げ強度、かさ比重、吸水率共に、未加熱耐火板と同等の値を示すのは、200 度であり、ピーク温度が高くなると共に、曲げ強度は低下、かさ比重は小さく、吸水率は上がる傾向となった。これらの原因として、耐火板中の有機成分が燃焼する事で、空隙が出来、強度低下や比重の減

少に繋がるためと考えられる。

また、各ピーク温度ごとの、加熱後供試体の状態を写真-4に示す。これらを比較すると、加熱側の表面はピーク温度が300度の供試体で、特

表-2 加熱後試験体性能試験（トンネライト耐火板）

試験体加熱条件	曲げ強度 N/mm ²	かさ比重	吸水率 %
500℃×20分	5.9	0.92	60.2
400℃×20分	7.0	0.92	58.6
300℃×20分	8.6	0.92	58.0
200℃×20分	10.5	0.96	52.6
ブランク	8.8	0.96	52.3

に変色が多い。これは、300度前後で、耐火板中の有機成分が燃焼しており、その後、さすが燃え尽きて、元の色に近くなるものと考えられる。

これらより、小規模火災後の耐火板は、ピーク温度200度×20分程度の加熱後耐火板の状態以下であれば、継続使用が可能であると考ええる。但し、実際の火災では、ピーク温度や、加熱継続時間を測定する事は困難であるため、表面や、コア抜きによる状態で判断し、有機成分の燃焼が微小である範囲を特定して、継続使用が可能かどうか判断する。

次に、小規模火災後の耐火板の耐火性能について検証が必要である。

そこで、耐火板の加熱後供試体を作成し、RCセグメントと同配合のコンクリート供試体に取り付け、RUBT曲線で加熱し、コンクリート供試体が要求性能を満たすかを実験した。

結果、小規模火災を受けた耐火板を設置したコンクリートブロックでは、RABT曲線加熱を受けても、爆裂しなかった。

RABT曲線加熱に対する試験体の主筋温度は100度前後であった。

又、耐火板は加熱中および加熱後に落下することはなかった。

したがって、小規模火災に相当する加熱を一度受けても、RABT曲線のような大規模な火災に対して、十分な耐火性能を有している事が分かった。

今後の検討課題としては、小規模火災後の耐火板の耐久性の検証を、繰返し振動試験後の曲げ試験等で行う点や、小規模火災後の交換の判定手段を、コア抜きを行わずに、耐火板を非破

壊で簡易に行える方法を見出す点が挙げられる。

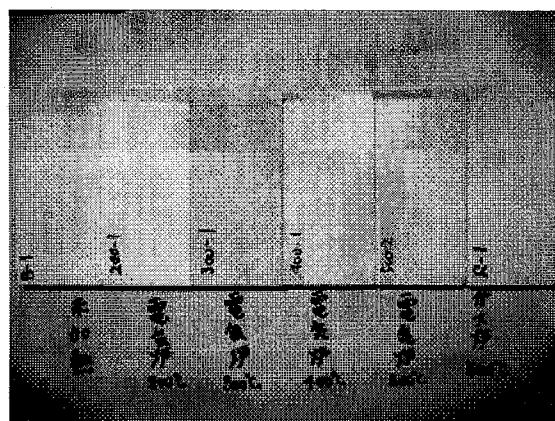


写真-4 耐火板加熱後表面状況

7. まとめ

実験により、円形トンネル内の耐火構造を、耐火板を用いることで、その要求性能を満たすことを実証した。また、耐火板の取付構造を開発し、耐火板台車を用いることなど、製作から施工に至る一連の施工システムを考案し実行した。また、耐火板の維持管理について、管理方法や、交換基準の一例を作成した。写真-5に耐火板取付け後の全景写真を示す。

秋田中央道路は、平成19年9月15日に開通したが、供用後も維持管理を行いながら、より良い耐火構造のあり方を見出していく所存である。

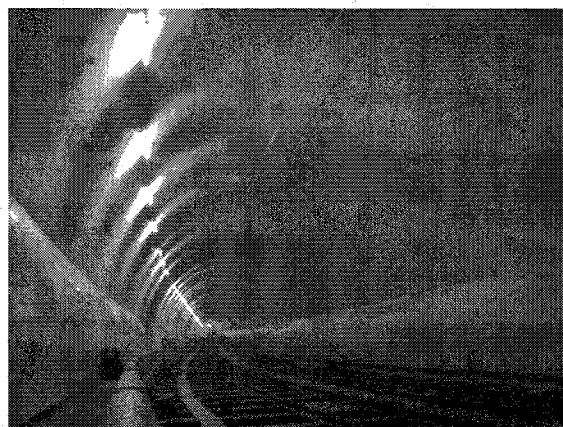


写真-5 耐火板取付完了

参考文献

- 1) 本田ほか: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2005年7月
- 2) 由利ほか:道路シールドトンネルにおける耐火工の設計と性能確認試験、土木学会第61回年次学術講演会
- 3) 西岡ほか:道路シールドトンネルにおける耐火工の施工計画および施工実績、土木学会第61回年次学術講演会
- 4) 小原ほか:道路シールドトンネルにおける可とうセグメントの耐火工