

シールドトンネルの耐火材に関する大規模燃焼実験と

要求性能

保全施設部 保全計画室 西林 素彦
神戸建設局 建設企画部 安田 扶律
計画部 特定計画調整室 仲 義史

要 旨

新十条通のシールドトンネル区間は、二次覆工が省略された構造であり、そのために火災時にセグメントを守るための耐火材の設置が前提となっている。本トンネルで実際に使用する合成セグメントの実物大試験体に3種類の耐火材を施して、想定される火災温度で燃焼させる実験を行い、大規模火災時のセグメント本体の変化及び耐火材の性能を確認した。本稿では、まずこの実験結果を報告する。この実験結果を基にして、セグメントを防護するために必要な耐火性能について、セグメント構造物の耐力確保という観点から検討した。また、今後の耐火材の選定の参考資料とするために、実験結果を基に、耐火性を中心とした要求性能を提案した。

キーワード：耐火材、燃焼実験、セグメント、シールド、

RABT曲線

はじめに

京都高速道路新十条通の伏見シールドトンネルにおいては、建設コスト縮減の観点から二次覆工省略した断面としている。このため建築限界を侵さずに、二次覆工に相当するトンネル本体の火災時の安全性を確保するには、図-1に示すようにセグメントの露出部分に薄肉の耐火材を設置する必要がある。本実験は、本トンネルで使用する実物大のセグメントを用い、各種の耐火材を施した上で、実際の供用状態を想定した耐火性能を総合的に検証するために実施するものである。

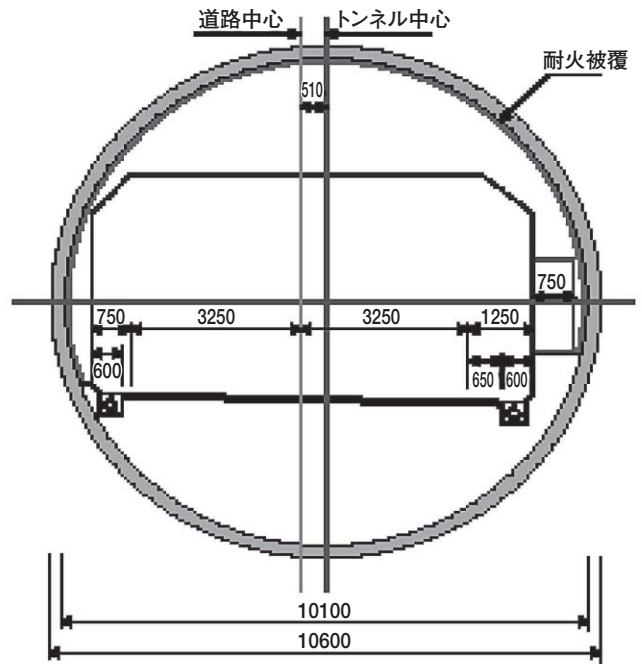
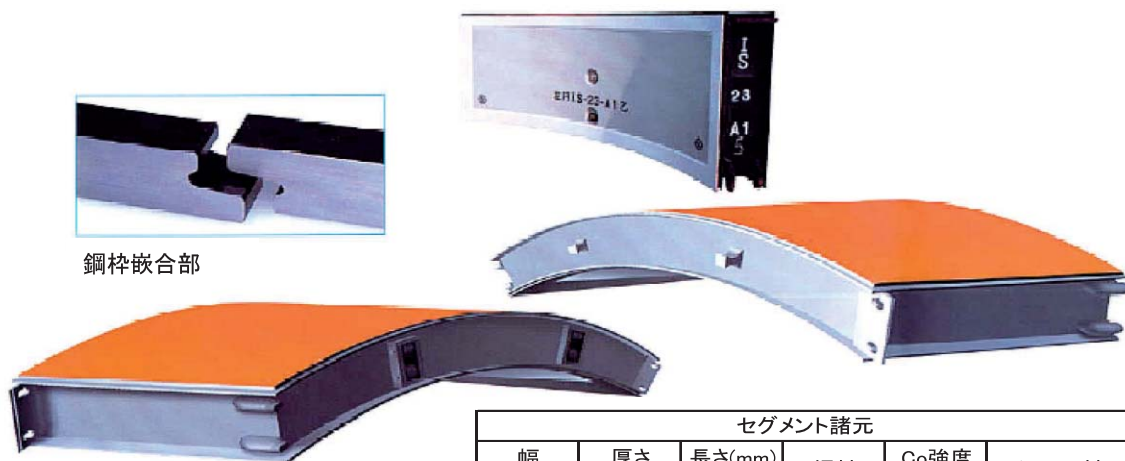


図-1 標準断面及び耐火工範囲

1. 実験概要

1-1 セグメントの特徴と耐火材の必要性

本トンネルで採用するセグメントは、写真-1に示すコンクリート中詰め鋼製セグメントである。



鋼枠嵌合部

写真—1 セグメント形状

セグメント諸元					
幅 (mm)	厚さ (mm)	長さ(mm) (中心径)	鋼材	Co強度 (N/mm ²)	シール材
1,500	250	10,400	SM490	42	水膨張性 ゴムシール材

これには、①鋼，コンクリート合成構造である，②通常のRCセグメントに比してコンクリート部分の鉄筋量が少ない．③継手がボルトレスの嵌合方式である．④桁高（セグメント厚さ）が250mmと比較的小さい．といった特徴がある．

耐火材を選定するに当たっては，国内においてシールドトンネルの耐火被覆の実績が少ないこと，セグメントの種類で耐火性能が異なること，セグメントと耐火被覆材との相性の問題等により既往の研究成果のみでの確かな判断を行うことは難しい．このような点に鑑み，本実験では実際に使用する合成セグメントを用い，セグメントと耐火材の複合体としての耐火性能を総合的に確認することとしたものである．



ボード系



ブランケット系

1-2 耐火材の選定

本実験で用いる耐火材として，海外でのシールドトンネルや国内の沈埋トンネルで採用実績のある3種類を選択した．外観を写真—2，断面図を図—2に示す．

(1) ボード系

工場製作される板状のもので，トンネル本体に金具で取付ける．今回使用したのはアルミナシリカ質セラミック系ボードである．工場製品であるため厚さ等が一定であり，耐火性能は安定している．国内においては，沈埋トンネルの天井や側壁



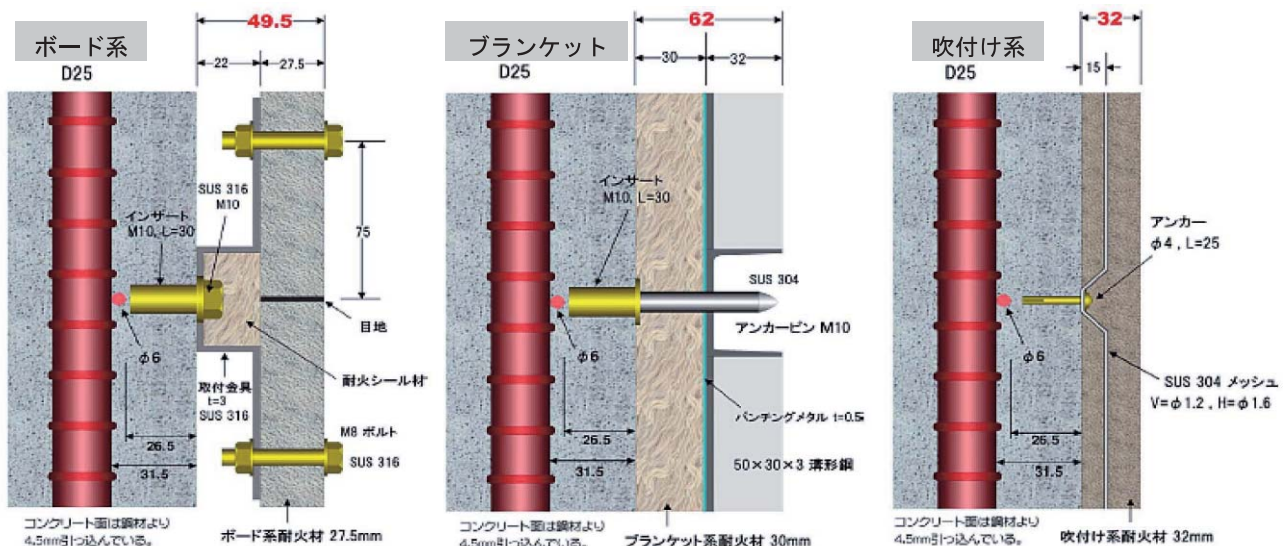
吹付け系

写真—2
耐火材
外観

部分への施工事例があり，シールドトンネルには，ドイツの第四エルベトンネルの天井に対する適用事例がある．

(2) ブランケット系

シリカ質のセラミックファイバーをトンネル面

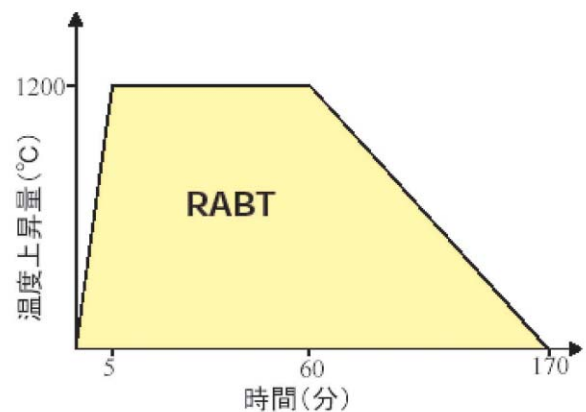


図—2 耐火材断面図

に沿って巻き付け，パンチングメタルで押さえつける構造である．重量が軽く，取扱いや隅各部・曲線部への適用が容易であることが特徴である．首都高速王子線飛鳥山トンネルに採用されている．

(3) 吹き付け系

耐火材を混ぜ込んだ軽量セメントモルタルをセグメント面に吹き付け付着させる．吹付であるため，曲線部や複雑な構造に対する対応が容易で不陸調整が不要であることが利点である．国内の実績はないが，オランダや北欧での施工実績は多い．



図—3 RABT 曲線

1-3 想定火災時間-温度曲線

耐火材性能を確認する際には，本トンネルで想定すべき火災の規模を決めておく必要がある．耐火材が機能するのは，燃料や化学製品等の爆発的な燃焼がトンネル内で発生した時であるが，このような大規模火災の状況，特に温度上昇傾向は実績からつかむことは難しく，実験や実火災の事後調査から想定するしかない．このような火災時間-温度曲線として様々なものが提案されているが，本実験では図—3に示すドイツの RABT 曲線を採用した．RABT 曲線は，タンクローリーの火災を想定し，発生直後に最高温度に達し，その温度が1時間持続後消火活動により徐々に温度が低下し，約3時間後に常温に戻ると考えている．

本トンネルの想定火災の設定にあたって，3次元 FEM 解析による熱流体解析を行った．¹⁾ 条件と

して，本トンネルにはタンクローリーの進入があると仮定し，国内の最大積載量である 26 キロトン積載時の炭化水素火災の規模を 200MW 程度とした．この解析の結果，燃焼時間 73 分，最高温度 1142°C を得た．これらは RABT 曲線に近似している．

1-4 評価の着目点

耐火材により，大規模火災時にセグメントが所定の耐力や機能を維持することを実証するだけでなく，火災後もそれらが長期的に低下しないことも確認しなければならない．火災時の最も懸念されている損傷はコンクリートの爆裂である．これは，高温に晒されるとセメント含有の水分が気化して発生した蒸気圧が外方向に解放され，表面が突然剥がれ落ちる現象である．セグメントの断面欠損が生じ鉄筋が露出するので，土圧に耐えきれ

なくなると最悪トンネル崩壊につながる。耐火材で爆裂を防止できるかが主要な評価項目である。

また、セグメント本体や継手、シール材等の部材の到達温度とその履歴、材料としての物性の変化を調べることで、それらの健全度を調べる。さらに、耐力試験を加えることで、構造物としての劣化の程度や長期的な耐力の残存性を確認する。

1-5 試験体と燃焼方法

実験は、独立行政法人建築研究所の大型水平炉を使用し、オランダのTNOが定めている試験方法に準拠して実施した。²⁾

1) 試験体形状と種類

試験体としては、桁高、リング幅、曲率を合わせた実物大セグメントを継手で2個組み合わせたものを用いた(図-4)。試験体は前述の3種類の耐火材を施したものと比較用の無被覆のもの計4体を準備した。写真-3に、炉上への試験体の設置状況を示す。

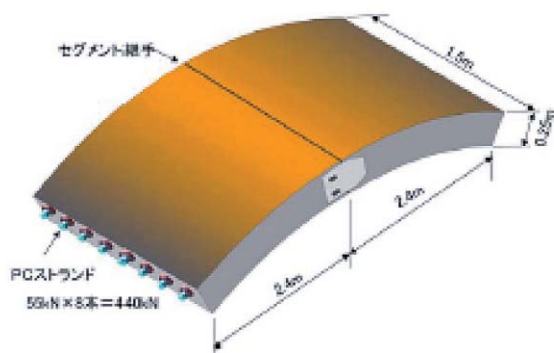


図-4 試験体形状

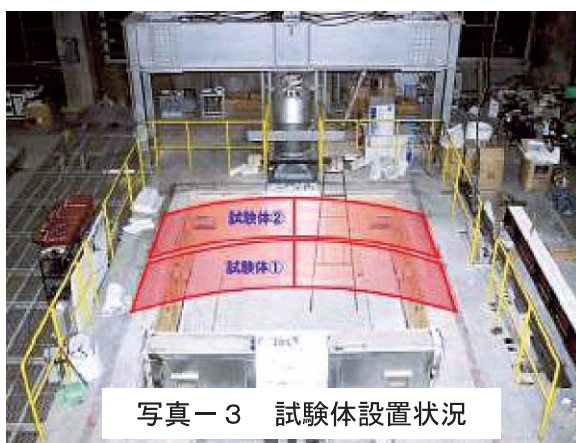


写真-3 試験体設置状況

2) 設計断面力

セグメントには完成時土圧や水圧よりも軸力が

卓越して作用する。またコンクリートは圧縮応力が作用している場合に爆裂が生じやすい。そこで実験体には設計断面力を導入し、供用状態における耐火性能を適正に評価することにした。火災時に最も高温になるクラウン部に着目し、軸力最大になる断面近傍の継手部の断面力を導入した。設計断面力は軸力が $-4400.29\text{kN}/\text{リング}$ 、曲げモーメントが $195.78\text{kN}\cdot\text{m}/\text{リング}$ である。実験体には、図-4に示すアンボンドPCストランド8本を中立軸に対して偏心配置することで、断面力を発生させた。

3) セグメント間継手

継手部は構造的な弱点になりやすく、耐力の低下だけでなくシール材の破損による漏水の発生が懸念されるため、実験体は、継手を含めている。そして火災後の残存継手耐力試験を実施し、平常時の継手曲げ試験のデータと対比した。

4) 試験体の温度測定

試験内部温度測定のために、断面方向の6点(コンクリート表面、表面から50mm毎に4点、背面)に熱電対を配置した。また、シール材、鋼材の測定も行った。

5) 残存曲げ耐力試験

加熱後の試験体について、まず継手を含む全体系での曲げ試験を行い、耐火材の有無による残存耐力の差を確認し、あわせて実セグメントの曲げ耐力試験結果との対比を行った。その後継手をばらして単体での曲げ試験を実施した。

6) 加熱後の物性評価

耐力試験終了後、セグメントからコア採取を行い、圧縮強度と弾性係数を測定した。また試験後のコアをカットし中性化試験を実施した。鋼材やシール材についても、試験片を取り出して引張強度、弾性係数、伸び等の変化を測定し、残存強度を確認した。

2. 実験結果

2-1 耐火材の劣化状況

無被覆の場合、写真-4のように炉内温度が約

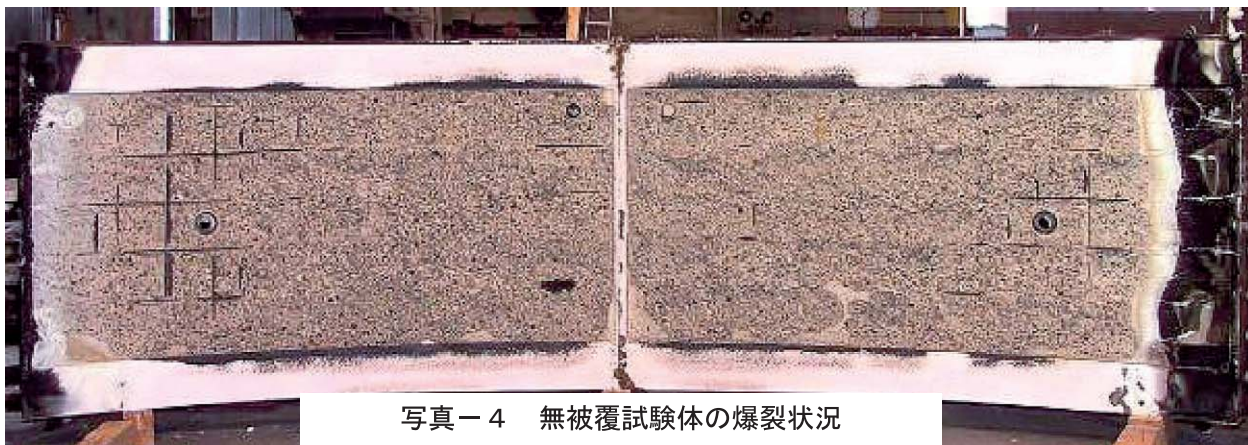


写真-4 無被覆試験体の爆裂状況



ボード系

右側が耐火材表面の状況、左側がセグメント表面の状況



ブランケット系

右側が耐火材表面の状況、左側がセグメント表面の状況



吹付け系

左側が耐火材表面の状況、右側がセグメント表面の状況

写真-5 被覆試験体の損傷状況

800℃に達した時点で加熱面全体に爆裂が生じ、平均で約1.5cmの断面が欠損した。また最大爆裂深さは約6cmにも達し、部分的には被りが無くな

り鉄筋が露出した状態になった。

耐火材を介すると、コンクリート表面温度は抑えられ、無被覆での爆裂発生温度までに至ることはなかった。写真-5に示すように、耐火材表面は損傷しているものの、セグメントの爆裂は全く生じず、断面及び鉄筋の被りは確保されている。

2-2 温度履歴

図-5に表面温度の測定結果を示す。無被覆の試験体は、爆裂後コンクリート表面温度が1200℃まで上昇した。一方、主桁下面の最高温度は、鋼材はコンクリートより熱伝導が良いため、1100℃程度とコンクリートより若干低く、継手面は800℃とさらに低くなった。

3種の耐火材とも表面温度が250℃程度までしか上昇しなかった。吹付けタイプで最も温度上昇が小さくなったが、これは吹付け後の材齢が14日と短く含水率が高かったためと推察される。100℃付近で温度が一定になる区間が見られるが、これは耐火材中の水分蒸発に伴うもので、この現象はボード系にも見られる。ブランケット系とボード系は、ほぼ等しい温度上昇となったが、ピークに達する時間はボード系のほうが長くなった。

無被覆の試験体における深さ方向の温度分布を図-6に示す。コンクリートのほうが継手部より表面温度は高くなる反面、逆に背面側に熱を伝え難いことがわかる。

図-7にシール材の断面内の温度分布を示すが、継手部の鋼材が熱を伝えやすく、無被覆の場合全てのシール材が損傷を受けている。一方、耐火材の

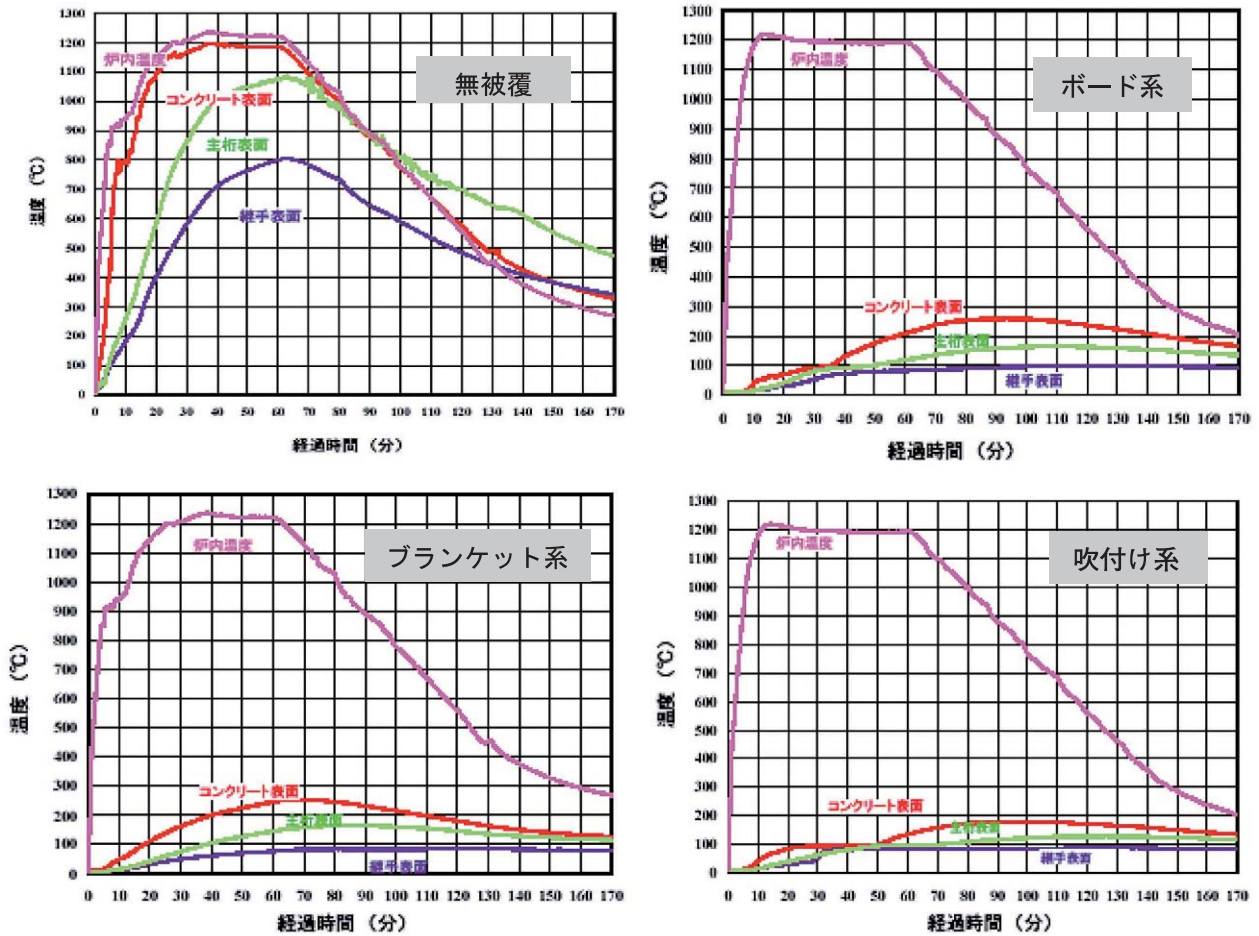


図-5 試験体の表面温度履歴

ある場合シール材の温度はほとんど上がっていない。例として、ブランケット系における4箇所
シール材の温度履歴を示す。いずれも100°Cを上回ることはない。シール材の製造時の温度が120°C
であることから、この温度範囲であれば良好な止水性が担保されると考えられる。

2-2 残存曲げ耐力

図-8に加熱後の残存継手耐力の測定結果を、
試作品検査時の非加熱のデータと共に示す。最高
到達温度の高い試験体ほど、若干ではあるが変形
が大きく回転ばね定数は小さくなる傾向が見られ

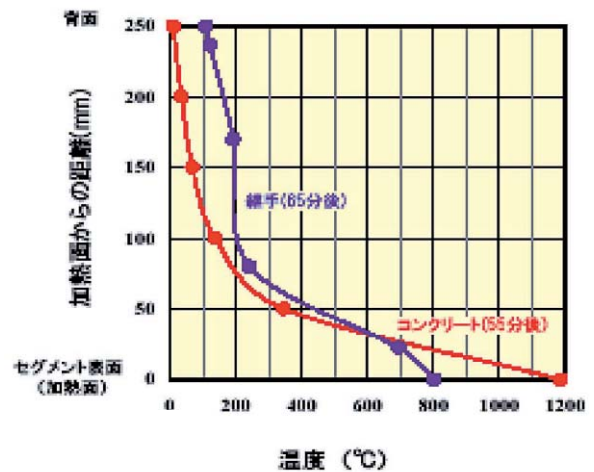


図-6 深さ方向の温度分布（無被覆）

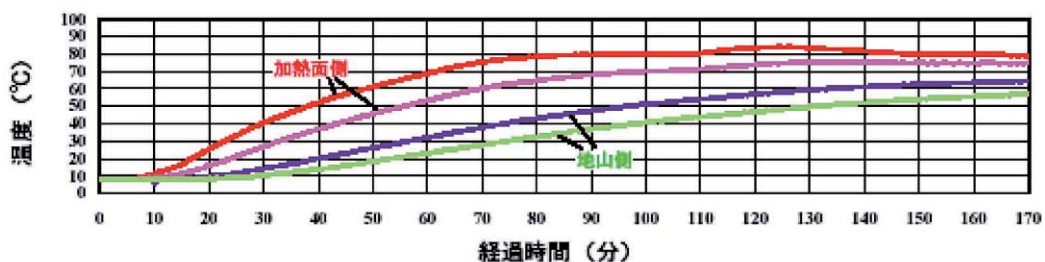


図-7 ブランケット系におけるシール材温度履歴

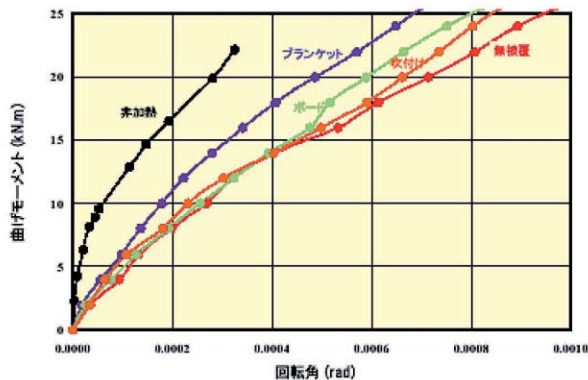


図-8 試験体の残存曲げ耐力

る。しかしシールドトンネルは軸力卓越型であり、この程度の回転ばね定数の変動が覆工の耐力に及ぼす影響は無視できると考えられる。

2-3 コア試験

表-1に示すように、無被覆の試験体のコア強度、および弾性係数は大きく低下していることが確認された。耐火材がある場合は低下が小さく、種類による差はあまり見られない。

表-1 コア試験結果

	コア番号	供試体強度 σ_{28} N/mm ²	コア強度 σ_{90-84} N/mm ²	弾性係数 N/mm ²	平均中性化深さ mm
無被覆	①	59.4	33.8	10.15	31.0
ブランケット系	②	59.4	69.7	41.01	2.8
吹付け系	③	63.9	73.3	40.99	1.5
ボード系	④	62.8	63.2	39.42	2.1

過去の研究で 500℃以上に加熱されたコンクリートでは pH が低下し、中性化が生じることが報告されている。³⁾ 図-9に示すように、500℃以上に加熱された部分で、かなり深くまで pH の低下現象が確認された。耐火材がある場合は中性化範囲が 3mm 以下で納まり、コンクリート表面温度が 300℃以下に保持されている場合には、コンクリートの物性の変化はほとんど無いと考えられる。

2-4 鋼材の物性変化

常温まで冷却後の鋼材の物性は、非加熱のものと大差ないことが既往の RC セグメントに関する実験でも確認されている。本実験では、1100℃付近まで温度の上昇した無被覆の試験体から、主桁と鉄筋のサンプルを切り出して物性を測定した。

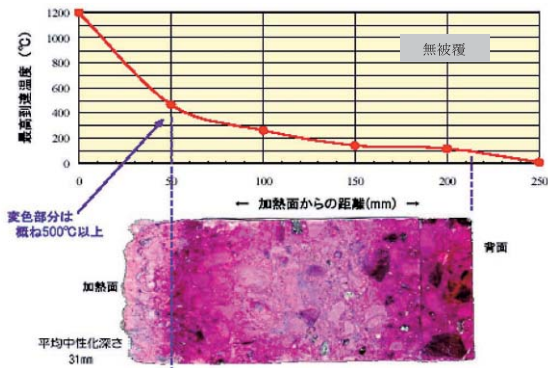


図-9 コアの最高到達温度と中性化

表-2のように、主桁、鉄筋とも JIS の規格値を満足しており、常温に下がった後の物性には変化がほぼないことがわかった。

表-2 鋼材の残存強

主桁	SM 490	試験片	JIS 1号
	降伏点または0.2%耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %
規格値	315以上	490~610	21以上
実測値	321	530	27

鉄筋	SD 345	試験片	JIS 2号
	降伏点または0.2%耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %
規格値	345~440	490以上	18以上
実測値	366	553	24

2-5 シール材の物性変化

無被覆の試験体のシール材は類焼しており、試験は困難であった。耐火材のある試験体から最も加熱面に近いシール材を採取し、10cm間隔に切断し、200%伸び時の引張応力を測定した。図-10に示すように、いずれの試験体も主桁に近い部分は相対的に劣化していることがわかる。これは測温結果より主桁部分のほうが、表面温度が高くなっていたためであると推察される。いずれにせよ耐火被覆材による差は少なく、最も加熱面よりのシール材においても劣化の程度は軽微である。

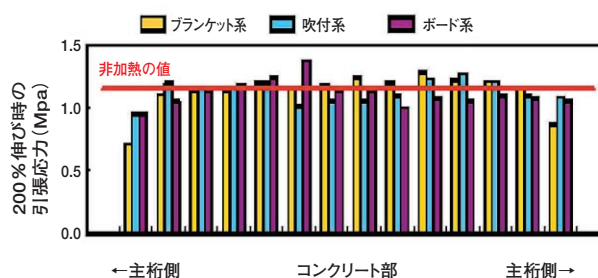


図-10 シール材の残存強度

3. 要求性能案

耐火材の選定に際しては、本セグメントの防護に必要な要求性能を事前に指定することになる。その項目としては、最も重要な耐火性だけでなく、常時の耐久性や設置時の施工性の項目も網羅することにした。以下では、実験結果に基づき設定した耐火性に関する主要項目について述べ、併せて要求性能を満足することを確認、評価する方法について述べる。

3-1 コンクリート表面の限界温度

断面確保のために爆裂を防止することが最重要視される。無被覆の場合は 800℃で爆裂が生じたが、これは今回の実験の温度勾配での発生温度と考えられ、異なる火災条件ではこれより低い温度で爆裂が生じる可能性がある。しかし現実的な爆裂発生限界温度を固定するのは困難であるので、要求性能としては実験によって爆裂が生じないことを確認することを要求することにした。

セグメントは軸力卓越型で、コンクリートは全断面有効として設計されている。よって、力学・物性の側面からもコンクリート構造の健全性を担保できる限界温度を設定する必要がある。日本コンクリート工学協会によれば、コンクリートは加熱されると、圧縮強度は 200℃を越えると低下が始まり、350℃で常温の約 3/4 になる。また弾性係数も加熱直後から低下し、200℃で常温の 80%、350℃で半分程度までに落ちる。⁴⁾ 両係数とも、低下度合いは高強度コンクリートほど大きくなり、強度は冷却後時間が経つと回復するものの、高強度ではその回復量は非常に少ない。⁴⁾ ただし、図-5のようにコンクリートの熱伝導性は非常に低く、5cm 程内側に入ったところでも、温度が 1/3 程度まで降下する。これは被覆した場合も同様であった。したがって、表面部が高温状態で強度が低下しても断面のほとんどは健全であるとみなされ、火災時でも強度を確保するために、いたずらに低い限界温度を設定する必要はない。そこで今回の要求性能としては、高温により強度が低下した 5cm 分の深さを断面欠損した条件で座屈照査を

した上で、350℃を限界温度として設定した。そして、本実験の耐火材はこれを満足している。

一般的にセメント硬化体は、450℃以上でポルトランダイトの分解に伴い、コンクリートは中性化が始まる。この物性変化の面からも 350℃の限界温度は妥当であると考ええる。

前述のように爆裂の限界温度は未定であるが、350℃は今回の実験の爆裂温度の800℃よりかなり低い値であることから、爆裂防止の要求性能をある程度包含すると考えている。

3-2 鋼材表面の限界温度

欧州の材料品質基準である EUROCODE には、鋼材強度の温度変化が示されている。⁵⁾ これによると、300℃までは常温の強度を保っているが、それ以上では引張強度は急激に低下する。また、合成構造物の鋼材の応力-ひずみ関係は、温度上昇で弾性域が減少し、200℃で 8 割、500℃で 3 割程度になり、常時よりも低い応力で塑性域に入り、座屈に対する安全性が低くなる可能性が生じる。以上の力学的変化の傾向を踏まえ、要求性能としては、設計引張強度が確保でき、弾性域の減少が半分に抑えられる 300℃を限界温度として設定した。本実験では耐火材により鋼材は 200℃以下に納まっており、この要求性能を満足している。

3-3 継手部の機能確保

今回の実験では、セグメント継手部の温度は 100℃以下であり、シール材の止水機能も維持できていた。しかし、シール材の材質変化と温度との関係を示す根拠はなく、限界温度でシール材の安全性を判断することはできない。したがって要求性能としては、セグメント地山側の止水性機能を損なわないようにするという表現にとどめた。

3-4 その他の耐火性に関する要求性能

1) 小規模火災時の耐火性

上記の要求性能は、RABT 曲線で代表される大規模火災時の耐火性を確保するために定められており、火災発生後は、耐火材取り替えを前提と

して、トンネルの機能回復を考えている。しかし、頻度がより多く発生すると想定される小規模の火災（普通自動車の燃焼で、最高温度は約400℃を想定）では、火災処理後速やかに通行を再開させるために、耐火材の取替えなしで元の耐火性能を維持する必要がある。そのために、想定火災後でもクラック等の大きな損傷を生じないことを、実験等により確認することを要求することにした。

2) 取付け部の耐火性

インサートアンカー等の取付け部材が露出している場合、これを通して熱がセグメントに伝導し、コンクリート内部に損傷を引き起こす可能性がある。したがって、取付け部に関しても、限界温度等の鋼材と同等の要求性能を規定することにした。

3) 火災時及び火災後のその他の要求性能

耐火材は、燃焼中化学変化を起こす可能性があるため、人体に有害なガス等を発生しないことを要求している。その他、火災後の耐火材の取替えの容易性等の施工性の面での項目も加えている。

3-5 耐火性以外の要求性能

耐火性以外の要求性能としては、常時の耐久性が重要である。本トンネルでは、内装板に対する規定を参考にして、耐火材の落下または剥離、衝突等による損傷、トンネル内の常時環境下での劣化等が生じないようにすることを求めている。また、耐火材の設置についても、施工性を重視し、厳しい全体工程を満足する必要がある。加えて、セグメントのローリング等による寸法誤差に対応可能であるとしている。

3-6 要求性能の総合評価と確認手法

要求性能の各項目は点数で評価し、得点に重みを乗じたものを加算して総合評価点を算出する。重み付けは、各要求性能項目の重要度ならびに性能を確認する手法の妥当性（その確認手法による評価が実際の供用状態における性能を担保できるものか否か）を勘案して相対的に設定している。従って、耐火性項目の重みを大きく、自社試験の結果より公的機関での実験データをより高く評価

している。また、総合評価点が高くてもある評価項目で著しく性能が劣ることがある場合には、性能的に不都合が生じる危険性がある。そこで各評価項目で最低限達成すべきレベルを設定し、これに満たない項目が一つでもある場合は失格とした。

要求性能の確認手法は、公平性の確保を重視して、メーカーに係らず同一条件で行える J I S 等に規定された試験方法を優先的に採用し、実大スケールの実験ではなくメーカーの保有している実験装置の規模・性能レベルを認め、解析数値も活用できるように配慮している。

4. まとめ

実物大のセグメントを用いた大規模実験結果及び他の検討成果等を踏まえ、合成セグメントに対する要求性能案を定めた。特に大規模火災時の性能として、セグメント構造物の限界温度を設定し、耐火材の定量的な評価が可能にしている。その他の性能についても、高速道路トンネルの特性を考慮してできるだけ具体的な項目を挙げている。この要求性能により耐火材選択を客観的に行うことが可能になった。また、今後増加する都市内の道路トンネルでの、防火対策を検討する上での基礎資料を提供できたと考えている。

最後に、本検討内容は京都高速道路トンネル技術委員会（委員長：足立京大名誉教授）で審議していただいている。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉村敏志，足立幸朗，岡島義行，鈴木直人：シールドトンネルの火災時の温度特性に関する解析検討，トンネル工学研究論文・報告集 第13巻，2003年11月。
- 2) TN0: Fire Protection for Tunnels, GT-98036a, 98-CVB-R1161a, March 1999.
- 3) 岸谷孝一，森実：火害を受けた鉄筋コンクリート構造の火害度と受熱温度の測定，火災，No. 85, pp. 8-20, 1972, 5月。
- 4) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性検討委員会報告書，

2002. 6.

- 5) Eurocode4: Design of composite steel and concrete structures, ENV 1994-1-2.

**FIRE SIMULATION OF SHIELD TUNNEL WITH FIRE-PROOF COVERING
USING FULL-SIZED SEGMENTS
AND THE PREPARATION OF ITS REQUIRED SPECIFICATIONS**

Motohiko Nishibayashi , Furitsu Yasuda , and Yoshihumi Naka

The shield tunnel section in Shin-Jujo Route plans to use steel-concrete composite segments covered with thin fire-proof material to prevent its exposure and deterioration in case of large-scale fire. Fire simulation is conducted to evaluate the validity of this protection method. Full-scaled segments installed with three types of fire-proof covering are exposed in the furnace to an estimated temperature hysteresis of fire generated by lorry overturn. The result proves all materials can protect the segments from excessive temperature increase and the consequent sudden rupture of concrete surface. Based on the simulation results, technical specifications of fire-proof covering are presented.