

トンネルの耐火構造の現状技術と課題

CURRENT ISSUES AND SOLUTIONS FOR TUNNEL FIRE PROTECTION

大塚 孝義, 神田 亨, 荒木 繁雄, 滝本 孝哉*

Takayoshi OTSUKA, Toru KANDA, Shigeo ARAKI, Takaya TAKIMOTO

In our country, fire protection measures for road tunnel are not positively examined because dangerous article loading vehicle can be shut out from underwater tunnel and tunnel of 5km or more in length by the road traffic law and many tunnels have secondary lining for example Trans-Tokyo Bay tunnel. In these years, tunnel fire protection has come to the front due to the Mont Blanc and Tauern disaster. No dangerous articles cannot be found in the site of those fires. General goods like margarine, flour and paints only burnt and temperature inside of tunnel reached to 1000°C or more. On the other hand, fire protection measures are executed for many tunnels in Europe. This paper describes the current issues and solutions for tunnel fire protection.

1. はじめに

我が国の道路トンネルの耐火対策は、道路法（第46条）により水底トンネルおよび長さ5km以上のトンネルについては危険物積載車両の通行を禁止できることや東京湾横断道路トンネル等では二次覆工が施されたことなどから、積極的に検討された事例は少なかった。しかしながら、小麦粉とマーガリンを積載したトラック火災（モンブラントンネル 1999/3）や塗料を積んだトラックの衝突火災（タウエルントンネル 1995/5）など危険物を含まないトンネル火災で内部温度が1000°C以上にまで上昇したこと、さらに都市防災やトンネルの役割、建設投資の活用といった面からみれば危険物積載車両を積極的に通行させるほうが望ましいこと、また都市トンネルで大規模火災が発生した場合には覆工の崩壊により多大な被害・損害を生じる危険性があるといった見地から、近年耐火対策の重要性が認識され関係各機関で検討が進められるようになった。一方、欧州では以前より実トンネルを用いた火災実験や覆工の耐火実験などを含めた研究が進められており^{1),2)}、多数のトンネルで耐火工が実施され、技術が確立されつつある。ここでは、道路トンネルの耐火工の現状について述べるとともに、今後の課題について考察する。

2. 耐火工の現状

ここでいう耐火工(Passive Fire Protection)には、スプリンクラー等の能動的な防災施設は含まれない。主に覆工表面の耐火被覆や覆工材料の改善による受動的な耐火対策について述べる。

2.1. 耐火被覆

覆工を断熱性のある被覆材で覆うことにより、覆工表面の温度を許容範囲内に抑える技術である。被覆材は材質や施工法等から、ボード系、セラミックファイバー系、吹付け系の3種に大別される。これら以外にも塗料系やパンチングメタル系なども存在するが採用事例は少ないようである。

Key words: トンネル, 耐火, 耐火材

* 正会員 日本シビックコンサルタント株式会社 技術本部

(a)ボード系

珪酸カルシウムやセラミック等からなる板状の材料を覆工表面に貼り付けるもので最も施工実績のある工法である。覆工表面に密着させる直貼りと、空気層を設ける浮かし貼りがある。ボードの厚さは 20～30mm 程度でフラットなものが主体であるが、トンネル内径に合わせて曲面形状に加工されたものも存在する。

施工法には、覆工コンクリート打設時に型枠の一部としてセットして一体化させる方法や、現場にてインサートや後打ちアンカーによって固定する方法がある。ボード系は目地の発生が避けられないが、2層の板を千鳥に貼りつけ貫通目地をなくす方法も採用されている。

固定する金物部分や目地部も一般部と同レベルの耐火性能が要求されるため、背面に断熱材をセットする等の工夫がなされている。

ボード系の場合、比較的重量があり、ボルト等により限られたポイントで固定されるため、振動や風圧で割れたり落下することのない固定方法を工夫する必要がある。また固定する金物等についても排気ガスなどで劣化しない素材を用いる必要がある。

(b)セラミックファイバー系

軽量で耐熱性に優れたシリカ系のセラミックファイバーを覆工表面に被覆する方法である。ファイバーは柔軟で大きな変形に追従できるため、トンネルのジョイント部等に適している。

極めて軽いため施工性がよく、覆工表面の目違いなどにも容易に追従できる。ファイバー系も本質的には目地が存在するが、柔軟なためラップさせることで目地に起因する問題を回避できる。

ファイバー単体では表面の繊維がはがれやすいことや剛性が足りずたるみが生じやすいことから、パンチングメタルや防災シートで押さつける工法が採用されている。

セラミックファイバーは、一部に人体への有害性

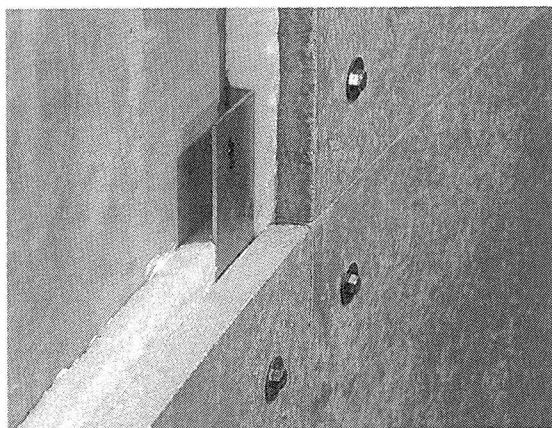


写真-1 SUS金物を用いた浮かし貼りの事例

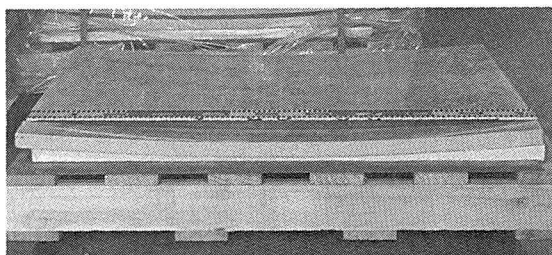


写真-2 曲面板の例



写真-3 第4エルベトンネルの施工状況

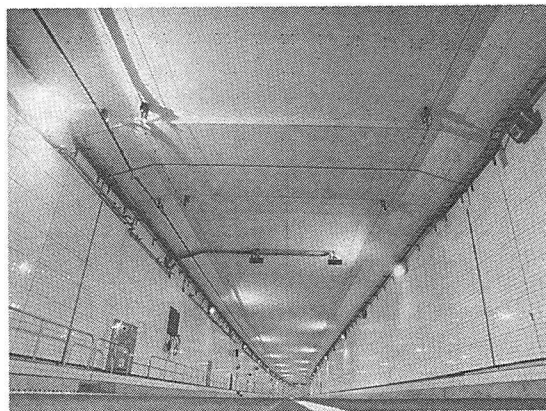


写真-4 臨海道路トンネルの施工状況

が指摘されるものもあり、体内で溶解するソルブルファイバーも開発されている。固定する金物類に要求される性能はボード系の場合と同様であるが、圧倒的に軽いためボルト等は小径のものが使えるというメリットがある。

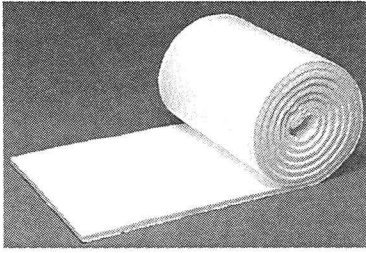


写真-5 セラミックファイバー

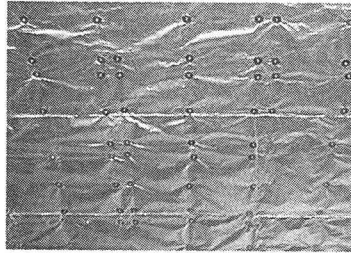


写真-6 シートでカバーした事例

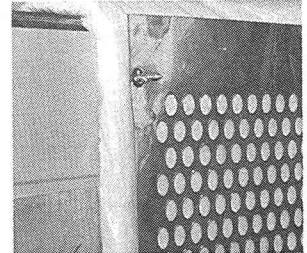


写真-7 金物で押さえる事例

(c)吹付け系

耐熱性に優れたモルタル系の材料を覆工表面に吹付ける方法である。補強用にワイヤーメッシュを併用するものもある。覆工表面の凹凸に自由に追従でき、他のタイプに比べ施工スピードが圧倒的に速い。

原理的に目地が存在せず、固定用の金物が表面に露出することもない。また覆工表面温度の要求性能に応じて、吹付け厚を自由に設定できるという他の工法にない優れた特長がある。比較的柔軟性があり、火災を受けた後も大きなひび割れが生じにくい。表面の硬度や平滑性についてはボード系に劣る。材料にもよるが三つのタイプの中では比較的安価である。

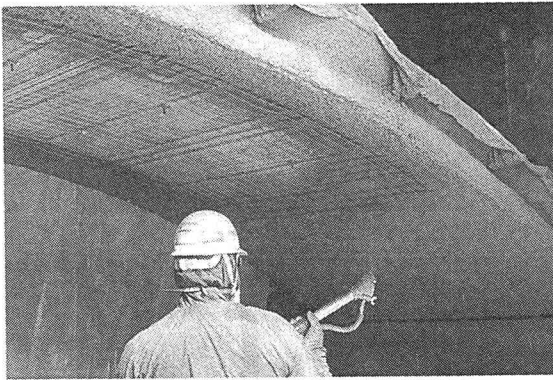


写真-8 補強メッシュを用いるタイプ

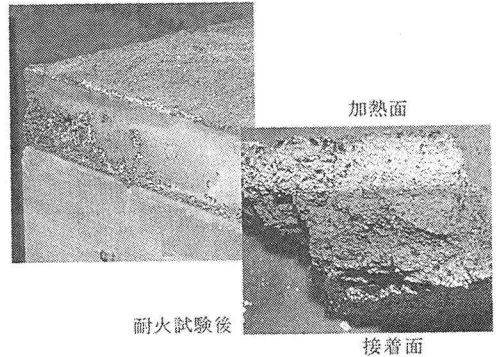


写真-9 補強メッシュのないタイプ

2.2. 耐火被覆の効果

耐火被覆の効果を確認した実験の一例を以下に示す。我が国にはトンネル火災を想定した時間温度曲線が存在しないため、図-1 に示すドイツの基準である RABT 曲線と呼ばれる時間温度曲線を採用した。

試験体は、セグメントを想定した設計基準強度 48N/mm²、W/C=31.9%の高強度コンクリートである。コンクリートは圧縮状態にあるほうが爆裂を生じやすい。このため供用状態を想定して PC 鋼棒により 13N/mm² 相当の圧縮応力を導入している。試験体の形状、寸法を

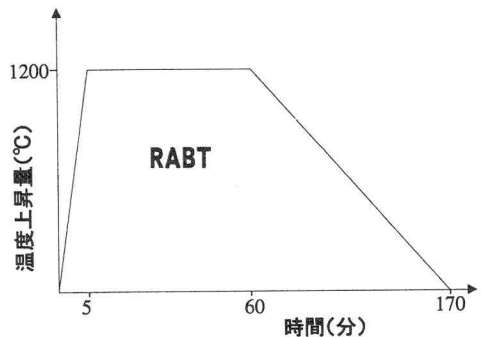


図-1 時間温度曲線

図-2 に、配合を表-1 に示す。

図-3 は無被覆の試験体の温度履歴を示している。コンクリート表面温度は RABT 曲線とほぼ等しい履歴をたどっている。試験開始4分後からコンクリートは激しい爆裂を生じた。主筋温度は 800℃まで上昇している。このような高温下では鉄筋の強度はほとんど期待できないため、覆工は崩壊する危険性が高い。写真-10 に試験後のコンクリート表面を示す。激しい爆裂により配力筋の一部が露出している。

図-4 は 20mm 厚の吹付け系耐火被覆を施した試験体の温度履歴である。コンクリート表面温度は 350℃以下に、主筋温度は 100℃以下に抑えられている。写真-11 は被覆材を除去した試験後のコンクリート表面の状況である。全く損傷が見られず、耐火被覆が十分な機能を発揮していることが分かる。

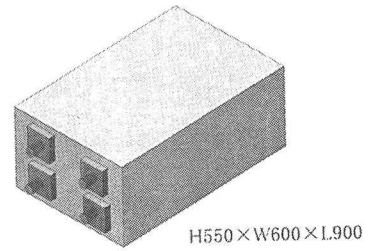


図-2 試験体

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	設計基準強度 (N/mm ²)
20	1.8	31.9	40.0	48
単位量 (kg/m ³)				
W	C	S	G	高炉スラグ 高性能減水剤
134	210	744	1149	210 4.2

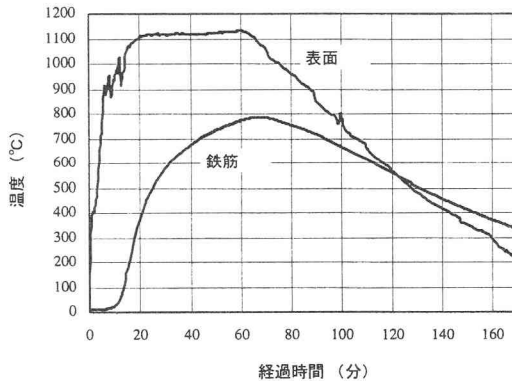


図-3 無被覆の試験体の温度履歴

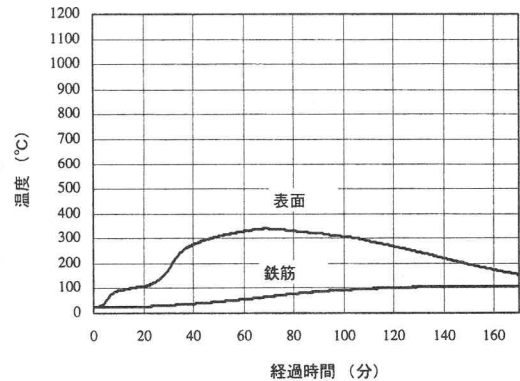


図-4 吹付け系(20mm)の温度履歴

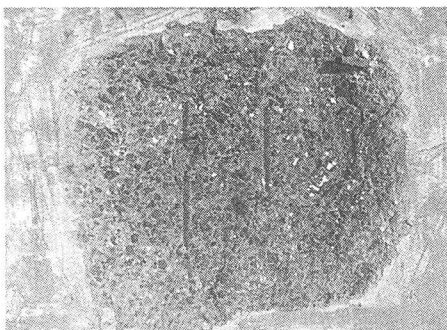


写真-10 試験後の表面(無被覆)

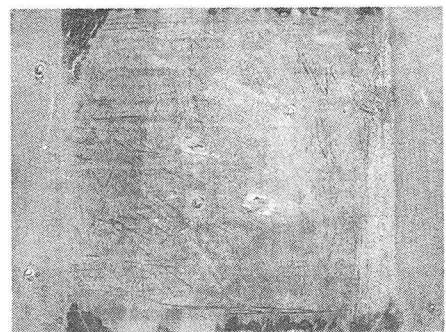


写真-11 試験後の表面(吹付け系 20mm)

2.3.樹脂繊維

コンクリートに樹脂繊維を混入し爆裂に対する抵抗性を持たせることで、かぶりコンクリート自体を鉄筋に対する耐火被覆として機能させる工法である。爆裂を防ぐメカニズムは、図-5 に示すように樹脂繊維が火災時の熱で融解することでコンクリート内部の水蒸気圧を解放することによるものである。樹脂繊維は数百

度の低温で融解し消失するとともに、人体に有害なガスなどを出さないことが重要である。このような性能を満足する繊維材料として写真・12 に示すようなポリプロピレンファイバーが用いられている。

写真・13~14 は PP ファイバーの有無による RABT 曲線下における爆裂性状の差を見たものである。この試験体にも供用時を想定した圧縮応力が導入されている。プレーンコンクリートでは激しい爆裂を生じているが、ファイバーを添加した試験体は極軽微な損傷を抑えられている。ファイバーの添加量は、コンクリート 1 m^3 当たり 1 kg 程度で十分な効果を発揮するようである。

図・6 は、ポリプロピレンファイバーを添加した試験体の温度履歴を示したものである。鉄筋の温度を 350°C 程度に抑えるには、 $50\sim 60\text{ mm}$ 程度のかぶりが必要となることがわかる。

この工法では覆工の崩壊を防止できても、かぶり部分のコンクリートは損傷を受けるため補修が必要となる。また原理的にコンクリート以外の部分には適用できない。このため鋼製セグメントに適用できないことはもとより、RCセグメントに適用する場合においても継手金物やシール材の防護は別途考える必要がある。しかしながら他の工法に比して圧倒的に安価なため、この手法は近年注目を浴びている。あらかじめコンクリートに混入しておくだけでよく、耐火工設置のための工期を考える必要が無いのも大きなメリットである。

一般に耐火被覆は覆工表面を覆ってしまうため、トンネル供用中の覆工表面の変状を目視によって点検し難くなる側面がある。このことはトンネルを維持管理する立場から見ると、ある種の障害ともいえる。この工法は、覆工表面に何ら影響を与えることがなく、かつ耐火工の剥落や落下といった心配もないため、維持管理上の制約がほとんどない。このような特長を有することから、かぶり厚が大きく表面に金物等がない開削トンネルの耐火工として特に有望であると考えられている。

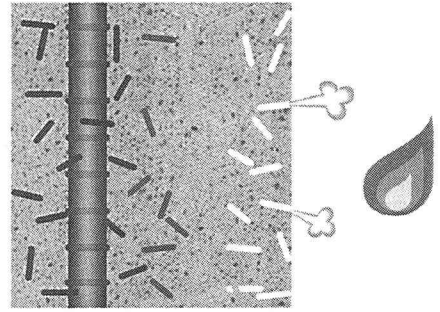


図-5 爆裂を防ぐメカニズム

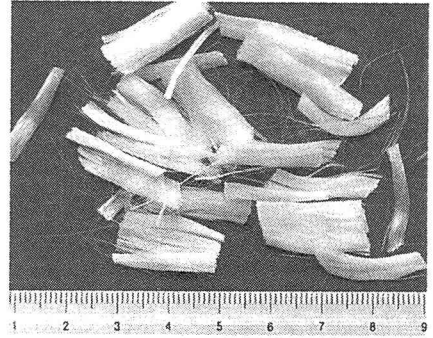


写真-12 ポリプロピレンファイバー

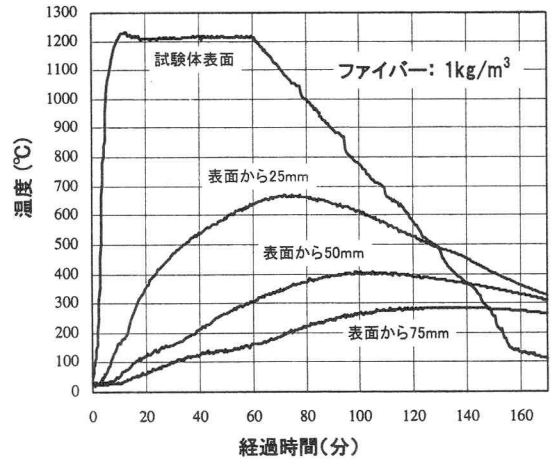


図-6 RABT 曲線下の PP ファイバーの効果



写真-13 爆裂したプレーンコンクリート

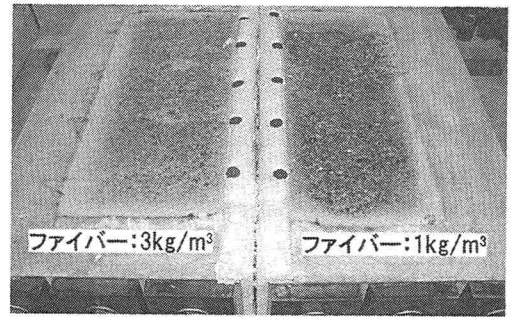


写真-14 ファイバーによる爆裂防止効果

3. 耐火工の要求性能

写真-15は、BOX形状のトンネルの火災事例である。コンクリートが爆裂し鋼材が垂れ下がっている。このような被災を受けたトンネルにおいても、復旧に当たり耐火工は施工されなかった。トンネルの火災に対する要求性能は、用途、重要度、通行車両の種類、周辺環境等を考慮し、耐火工の費用対効果を分析した上で各トンネル毎に設定すべきものであるといえる。

道路トンネルに耐火対策を実施する目的としては、以下の四つが挙げられる。

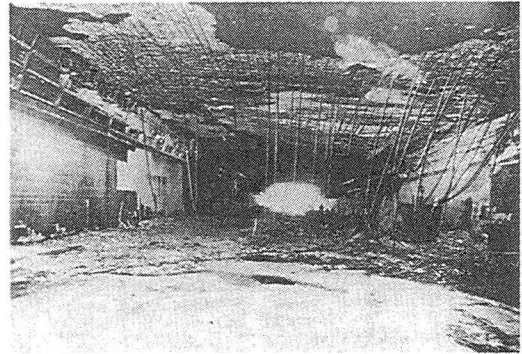


写真-15 ハンブルグ Moorfleetトンネル火災(1968)

1)トンネル利用者の安全確保

火災発生時における初期段階の避難の支障となるトンネルの部分的な崩壊を防止する。

2)消火、救命活動のための環境の確保

トンネルの部分的な崩壊を防止し、スムーズな消火・救命活動を可能にする。

3)高価なインフラの保全

トンネル修復に要する多大な費用と時間、その間の交通遮断に伴う経済的損失等をできる限り小さく抑える。

4)トンネルの変形・崩壊に伴う二次災害の防止

火災時はもとより鎮火後も含めてトンネルの崩壊や過度の変形を抑え、地表面の沈下、陥没、周辺構造物の変状等を防止する。

こうした目的を満足するために、耐火工には表-2に示すような耐火性能が要求される。

表-2 耐火工の要求性能

分類	要求性能
火災時の要求性能	コンクリートが覆工の耐力に影響を及ぼすような爆裂を生じないこと。
	覆工を構成する鋼材が耐力に影響を及ぼすような強度低下を生じないこと。
	覆工構造に機能上支障となる変形、損傷等が生じないこと。
	耐火被覆材および取付部材が落下や剥落を生じないこと。
	目地部や取付部材は、一般部と同等以上の耐火性能を有すること。
鎮火後の要求性能	人体に有害な煙、ガス等が発生しないこと。
	覆工構造に長期的な耐力が残存していること。
通常時の要求性能	損傷した耐火被覆材の取り替えが容易であること。
	車両衝突や飛び石等により第三者被害を及ぼすような損傷がないこと。
	トンネル内の風圧や振動によって、耐火工が損傷、剥離、落下しないこと。
	トンネル内の温度、湿度、排ガス等による劣化で機能を損なわないこと。
	洗浄、点検等の維持管理が容易であること。

4. 耐火工の設計とその課題

4.1 火災規模と時間温度曲線の設定

諸外国の基準を参考に、火災の規模を想定し時間温度曲線を選定する。表-3はトンネル内を通行する車両と対応する時間温度曲線の関係を、図-7は時間温度曲線の温度履歴を示したものである。これらの情報を元に、対

象とするトンネルの危険物車両の通行規制の有無や通行車両の種類、消防車両の到着時間などを総合的に勘案して火災曲線を選定することになる。我が国では、RABT曲線の1200℃の区間を60分に設定した曲線が採用されることが多いようである。

4.2 許容温度の設定

覆工構造物の耐力が低下する主な要因は、熱による構成材料の強度低下、覆工に発生する熱応力、コンクリートの爆裂等である。

図-8, 9はEUROCODEに規定されている強度の温度依存性を示したものである。鋼材に関しては300℃を超えると強度低下が著しくなる。このため鋼材の許容温度の設定は比較的容易であり、「主筋温度が300℃を上回らないこと。」といった要求性能が設定される事例が多い。

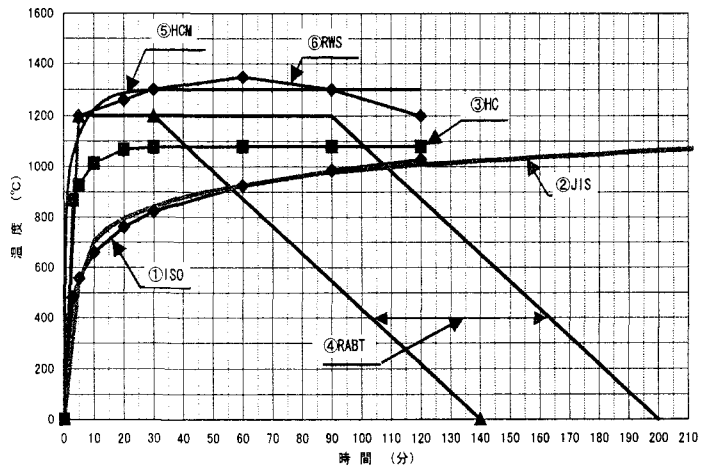
コンクリートに関してはこれほど単純ではない。コンクリートの場合は、熱による強度低下を生じる温度よりもむしろ爆裂を生じる限界温度の方がより重要である。爆裂を生じ、鉄筋が炎にさらされた場合には、鋼材に対して設定した許容温度が意味をなさなくなるためである。

問題をさらに複雑にしているのは、半野や田嶋⁴⁾らの研究で明らかにされたように、コンクリートの爆裂は温度だけではなく温度上昇速度に大きく依存することである。爆裂は熱応力やコンクリート内部の水蒸気圧がからみあった複雑な現象であり、水セメント比や骨材の種類、含水率、拘束の有無等が影響を与える。⁵⁾

このため一意的に爆裂の発生温度を設定することが困難であり、多くの場合実験による確認が必要となる。圧縮応力の作用する高強度コンクリートでは200～250℃程度でも爆裂が発

表-3 交通種別と時間温度曲線

交通種別(火災時の発熱量)	火災曝露時間(分)	時間温度曲線
歩行者	-	無視
自転車	2	無視
荷馬車	90～120	HC
自走者(5～10MW)	30～60	ISO または HC
コンテナシャトル	120以上	HC
トラック(100MW)	120以上	HC
タンクローリー(300MW)	120	RWSなど
バス	240	ISO または HC
地下鉄, 路面電車, HSL(40MW)	90～120	HC
列車(300MW)	120	RWSなど
	240	ISO または HC



- ① ISOの標準時間温度曲線: Standard temperature-time curve. PIARCでは小型車専用道路などに適用。
- ② JIS A 1304-1994: 建築構造部分の耐火試験方法 4. 加熱等級 (において標準曲線を設定。
- ③ 炭化水素燃焼曲線(HC): Hydrocarbon curve. 油火災を想定した曲線。
- ④ ドイツの道路トンネルの装備及び稼働に対する基準(RABT), 1994: RABT curve
- ⑤ 修正炭化水素燃焼曲線(HCM): 大型トラックによる火災で、特に可燃性物質、液体、液化物質が積載されている場合に適用。
- ⑥ オランダ運輸公共事業省治水本局の曲線(RWS): RWS (Rijkswaterstaat) curve

図-7 時間温度曲線の種別

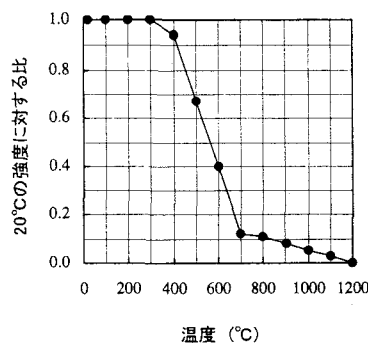


図-8 鋼材強度の温度依存性³⁾

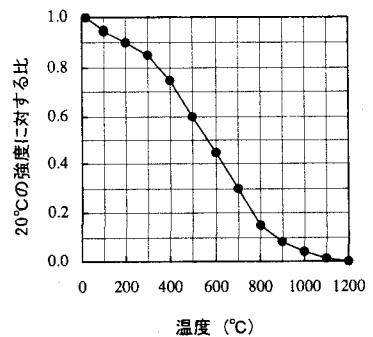


図-9 コンクリート強度の温度依存性

生するという報告もある。これら以外に、シールドトンネルの場合には継手部やシール材の許容温度も設定する必要がある。シール材の許容温度は、材料の特性から比較容易に設定可能と思われるが、継手部に関しては一般部より耐力低下が生じやすいといった報告⁴⁾もあり留意する必要がある。

4.2 許容温度以外の要求性能について

表-2 に示した要求性能の中には許容温度だけでは規定できないものが含まれている。火災時に耐火工が落下しないこと、有害なガスや煙を発生しないこと、火災時の覆工の変形や耐力といった項目については定性的、抽象的な記述にならざるを得ず、その評価も現状では実験によって確認することとなる。オランダのTNOでは、写真-16 に示すように実セグメントに断面力を導入した確認実験を推奨している。我が国におけるトンネル耐火工の設置事例が極めて少なく性能発注とならざるを得ないことを考えれば、先に述べた許容温度や継手強度に関する評価も含めて実大実験による確認は現状では避けては通れないものと考えられる。

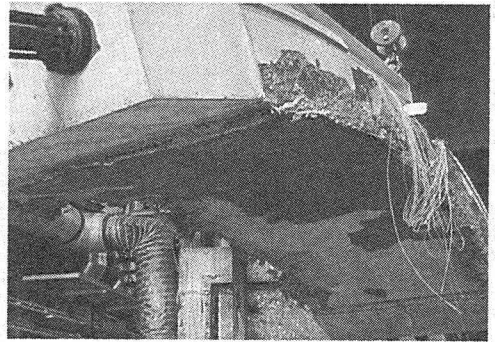


写真-16 実セグメントを用いたTNOの耐火実験

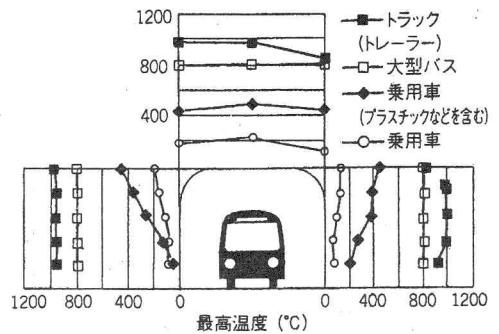


図-9 火災時の最高温度の分布⁶⁾

4.3 耐火工の設置範囲

図-9 に示すようにトンネル断面内の温度分布は一様ではない。このため耐火工のグレードを場所によって変化させるという発想が出てくるのはある意味当然である。これを合理的に決定していくには、精度のよい熱流体解析により火源に応じた断面内の温度分布を求めたり、覆工全体に作用する土水圧や熱による物性値の変化を反映できる非常常の熱応力解析などを実施する必要がある。今後の研究が待たれるところである。

5. おわりに

我が国においては、トンネルの耐火工に関する基準類はほとんど存在しないといえる。にもかかわらず既に二つの沈埋トンネルでRABT曲線対応の耐火工が施工され、多くのシールドトンネルにおいて耐火工の設置が計画されている。いわば実務のほうが先行した状態にあり、耐火工の設置に当たっては海外の基準を参考に性能を規定し、実験により確認するという手順を踏むことになる。この報文がそのような際の一助になれば望外の喜びである。

6. 参考文献

- 1) Fire Protection in Traffic Tunnels, International Conference with exhibition, 12/13 Sep., 1995.
- 2) C Both, P van de Haar, G Tan, G Wolsink; Evaluation of Passive Fire Protection Measures for Concrete Tunnel Linings, TNO Center for Fire Research.
- 3) Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structure – Part 1-2/ General rules – Structural fire design. pp. 19-21, DD ENV 1994-1-2: 1994.
- 4) 半野久光, 田嶋仁志, 川田成彦, 谷上敦亨: RC セグメントの耐火性能に関する実験的検証, JCI, 6.2002.
- 5) 堀誠行, 大関宗孝, 大塚孝義, 神田亨: RC セグメントの高温時の特性, JCI, 6.2002.
- 6) Dr.-Ing. Casale, Haack, Ingason, Malhotra, Richter: Project 145.1 Fires in Transport Tunnels Report on Full-Scale Tests; pp. 10/11-10/13, 11.1195.