

委員会報告「コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告」

小野 紘一                      太田 義和

＜委員会構成＞

小野紘一(委員長)	京都大学大学院工学研究科	谷辺 徹	太平洋セメント(株)中央研究所
太田義和(幹事)	(株)千代田コンサルタント 技術開発室	豊福俊泰	九州産業大学 工学部土木工学科
一瀬賢一	(株)大林組 技術研究所	西垣太郎	(株)大成建設 技術研究所
大塚孝義	日本シビックコンサルタント(株)	堀口浩司	(株)中研コンサルタント 東京支店
大野俊夫	鹿島建設(株)技術研究所	森田 武	清水建設(株) 技術研究所
梶田秀幸	前田建設工業(株)技術研究所	柳森 豊	飛島建設(株) 土木事業本部
川添純雄	(株)鴻池組 土木本部技術部	吉村敏志	阪神高速道路公団 工務部設計課

**概要** 平成12年度にコンクリート工学協会の研究活動の一環として発足した「コンクリート構造物の火災安全性研究委員会」の活動が平成13年度末をもって終結した。火災によって、コンクリート部材に生ずる強度劣化は、コンクリート部材への加熱状態、コンクリートの配合設計、応力状態等によって様々に変化する。本研究委員会では、火災事例及び関連文献の収集・整理を始めとして、コンクリート部材への熱影響について建築構造物、土木構造物（主として道路トンネル）の火災事象としての特徴、問題点を整理した。これらの成果に基づいて、耐火設計の目的と手順及び対策方法について取りまとめた。本報文は二年間にわたる成果の概要の紹介である。

**キーワード**：火災、コンクリート部材、建築構造物、土木構造物、耐火対策

## 1. はじめに

我国において、従来から耐火性能向上のための種々の技術開発が実施され、法令に準拠した高性能かつ大規模な建築物が建設されてきている。一方、土木構造物の中でも特に道路トンネル・鉄道トンネル（交通トンネル）における火災事故は、1940年代後期から顕在化し、近年は特に輸送量の増大とトンネルの長大化に伴って世界各地で大規模火災が発生している。

日本コンクリート工学協会では、平成12年度及び13年度に「コンクリート構造物の火災安全性研究委員会」を組織し、コンクリート構造体の火災時における技術的課題に着目し、コンクリート構造物の火災安全性向上の為の基礎的情報を広く国内外から収集・整理し、有用な技術情報として取りまとめることとした。技術情報の収集項目として、建築分野においてはコンクリート部材の耐火実験報告例を中心に、土木構造物は主として道路トンネルの火災に着目し、道路トンネルの防災計画上における火災規模の設定、およびトンネル火災の特性等についての情報を収集した。これ等の各種情報から建築・土木分野における技術的な分析を行い、現時点における技術水準に基づく耐火対策の手法について取りまとめると同時に将来に向けての課題も整理した。本稿はこれ等二年間の成果報告である。

## 2. 建築・土木構造物における火災事例

### 2.1 建築構造物

#### (1) 火災の傾向<sup>1)</sup>

阪神淡路大震災による損傷損害の影響の大きい平成7年を除けば、損害額は10年前に同程度であり、建物焼損床面積は若干小さくなっている。しかし出火件数および火災による被害者は、増加傾向にあり、平成11年で2,100人に達している。

#### (2) 主な大火

ここでいう大火とは、消防白書によるところの、建物の焼損面積が33,000m<sup>2</sup>（1万坪）以上の火災を言う。

主な大火としては、焼損面積の最も大きい昭和22年の飯田市の大火（消防法規の制定の契機ともなった）、消防力や防災設備の十分でなかった昭和30年くらいまででは消防体制・施設強化の教訓となった昭和24年の能代市および昭和25年の熱海市の大火、損害額の最も大きい昭和51年の酒田市の大火などがある。

また、焼損面積が100,000m<sup>2</sup>を超えるような大火については、昭和31年の魚津市の大火を最後に殆ど起こらなくなった（酒田市の大火及び神戸市の阪神淡路大震災は例外）。これは、木造の減少や、コンクリート構造系建物を含む耐火造の増加、消防力の充実などがその要因と考えられる。

### 2.2 土木構造物の火災傾向

コンクリート構造物のうち、道路や鉄道のトンネルや高架橋などの土木構造物においても国内や海外において火災による被害が報告されている。

被災を受けた構造物は高架橋とトンネルに大別される。高架橋の被災原因は、沿線火災・高架橋下の有効利用で貸し出された結果の火災・浮浪者の焚火の不始末など、直接的な火災によるものが殆どのものであり、その件数も比較的少なく統計的処理も難しいのが現状である。これに対し、トンネルの被災原因は、鉄道トンネルでは放火を除くと電気系統の故障に起因する列車火災が全体の約2/3、電源系などのトンネル施設火災が約1/3であり、道路トンネルでは車種によって異なり、トラック類では排気管接触などが最も多く、乗用車では衝突事故・電気配線関係によるものが多い。

平成3～12年の我国のトンネルにおける火災事故の件数は、道路トンネルの事故件数が鉄道トンネルに比べて多くなっている。これは鉄道トンネルでは車両の不燃化や設備の改良などが講じられてきたのに対し、道路トンネルでは交通量や輸送量が増加していることによると分析されている。いずれにしても毎年10～30件程度の割合でトンネルにおいて火災事故が発生している。

## 3. 高温下におけるコンクリートの特性

コンクリートが被熱した場合、その強度の劣化の状態はコンクリート配合設計、含水比、応力状態によって異なるが、概ね図-1に示す通りであろうと考えられている。

図-1においては、仮に火災直前の常温状態での強度を100%とすると、概ね200～250℃程度の温度上昇によって初期（圧縮）強度が最大で各20%程度低下している。加熱されたコンクリートの応力状態と強度の低下傾向との関係は明らかではないが、図-1に示す温度と強度との関係は、海外の文献にも見られる<sup>3)</sup>。特に加熱初期段階の300～400℃まででは加熱状態によっても残存強度は変化する。これ等、コンクリートの熱影響による劣化状態を設計段階で予測することは現在非常に困難であるが、概括的に普通コンクリートへの熱

影響は 300℃程度以下まで、高強度コンクリートの場合には 200℃以下までであれば深刻な状態とはならないとする考え方が固まりつつある。

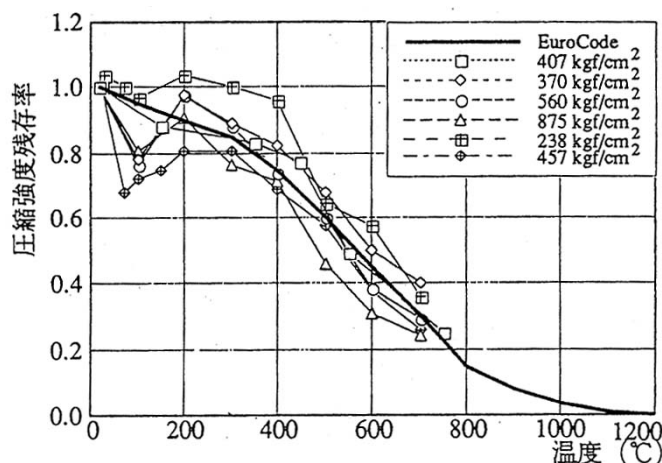


図-1 火災を受けたコンクリートの圧縮強度残存率<sup>2)</sup>

#### 4. コンクリート構造物の耐火性評価方法について

##### 4.1 建設構造物の耐火性評価方法について

###### (1) 基本方針

建築構造物における耐火性評価とは、本来その建築構造物が保有すべき基本性能、即ち、機能要求、性能要求の構成要素としての構造・防火・アクセス・避難関連設備機器等の機能維持を目的として耐火性に関する評価は重要な位置付けとなっている。

火災時における構造体の耐火性能は構造体としての基本的機能維持に直接的に関連している。したがって、構造体としての性能が崩壊等によって喪失された場合には、付帯設備的機能維持は何の効果も発揮することが出来ない。

この様な観点から火災時における建築構造物の耐火性評価は、機能性評価の根幹の一部を形成するものである。

(2) 建築構造耐火性評価の基本的考え方

図-2 に建築構造耐火性評価の手順を示す。

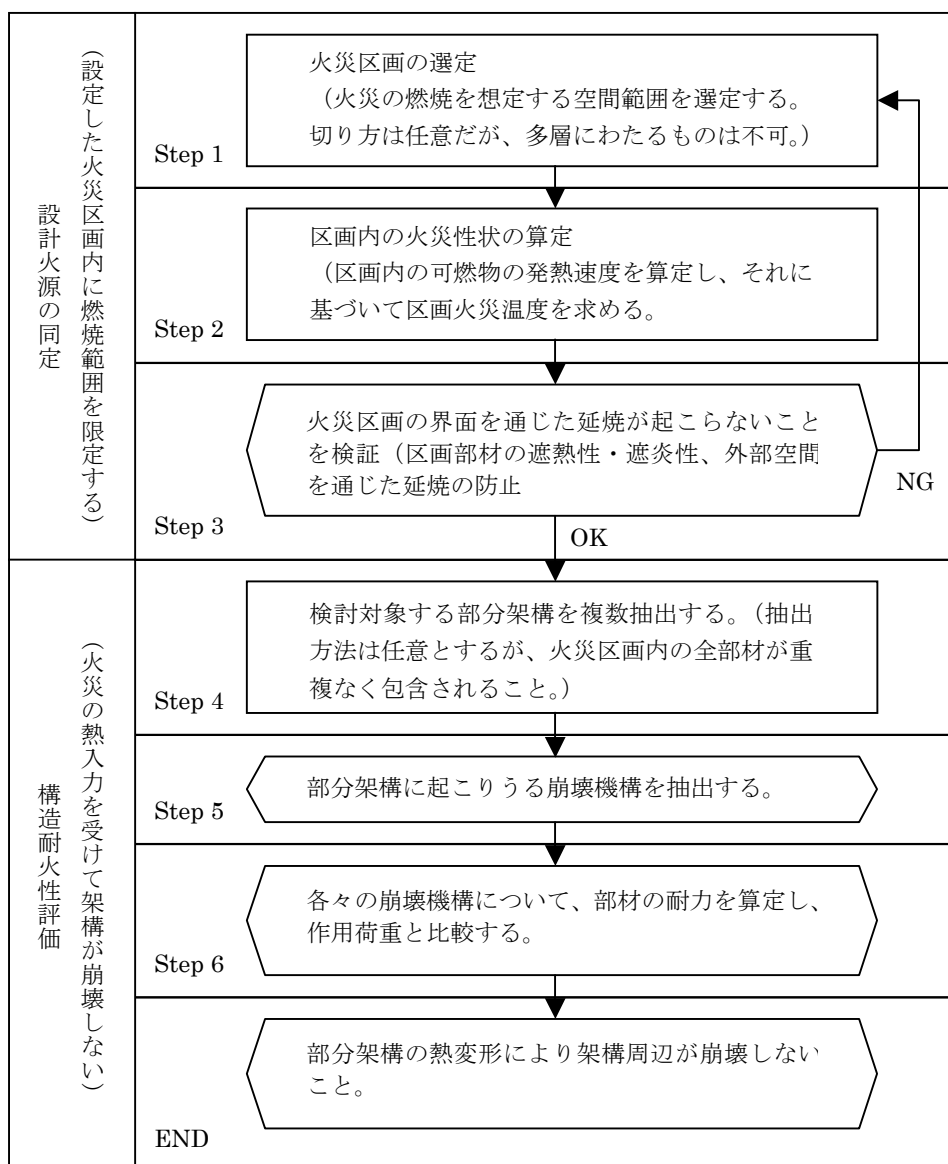


図-2 建築構造耐火性評価の手順 (建設省総プロ耐火性能評価資料から作成)

**Step 1. 火災区画の設定**

火災区画の設定方法は任意とされているが、特にアトリウム等の特殊な堅穴については層間の燃焼が起こらないこととされている。加えて多層のわたるもの火災区画の設定は不可とされている。

**Step 2. 区画内の火災性状の設定**

国土交通省では、標準入力条件と火災温度算定の簡易式を設定し、告示している。

**Step 3. 火災区画の界面を通じた延焼**

設定区画外への延焼を防止するため、ISO834 等の試験規格に基づいた部材、防火戸を採用する。外部経由の延焼については、スパンドレル、庇、袖壁等の設置により防止する。

**Step 4.**

検証対象とする部材を抽出し、耐火性能を照査する。

#### Step 5.

部分架構に起こり得る崩壊機構を抽出する。

#### Step 6.

火災性状を等価火災時間に換算した上で、実況に応じた荷重条件での载荷加熱試験結果（ISO834 方式）との比較を行う。等価火災時間と崩壊時間の関係は、試験結果の内挿によることもできる。

#### Step 7.

梁の伸び出しに相当する強制変位を加えて、周辺架構が崩壊しないことを確認する（作業中）。

### (3) 耐火対策

建築構造体における耐火対策は、前述の耐火性能評価手順に準拠し、所定の設計火源条件の下での各部材の耐力を算定し（Step 6.）熱変形によって周辺架構の崩壊が防止可能な様、耐火対策を算定する。

RC造は、一般に所定の部材寸法及びかぶり厚さを確保すれば耐火構造として認められている。しかし、設計基準強度  $80\text{N/mm}^2$  を超える高強度コンクリートを使用した場合、組織が緻密になるため、含水状態によっては火災時に爆裂が生じ耐火性能の低下が懸念される。またコンクリート部材は、含水率が高い程爆裂が生じやすいことが指摘されている。<sup>4)</sup>

#### 1) 表層部の温度上昇・温度勾配の低減

表層部の温度上昇を低減させる方法としては、耐火塗料塗布、モルタル塗布等がある。元々耐火塗料は、欧州で鉄骨用耐火被覆材として実用化されたもので、既に 30 年以上実績がある材料である。<sup>5)</sup>

#### 2) 水分移動を容易にさせ蒸気圧を低減

加熱時の水分移動を容易にさせ蒸気圧を低減させる方法としては、①合成繊維の混入、②遠心成型プレキャストコンクリート製型枠の使用、③部材の強制乾燥、④ベント管（蒸気放出管）の配置等がある。

#### 3) コンクリートの飛散防止

爆裂によるコンクリートの飛散防止としては、鋼板による被覆と表層部へのメッシュ筋の配置が考えられる。これらの方法は、コンクリート自体の爆裂を低減させるものではない。

#### (4) 今後の課題<sup>6)</sup>

特にコンクリート系構造物は温度勾配を持つ為、部材内部に様々な熱応力が働き過渡現象として脆性破壊の恐れがあるので、コンクリートは耐火被覆であり、且つ構造材と考えて、常温の延長上で安易に断面設計をするわけにはいかない。これらに対する理論的考察と更に崩壊荷重（終局耐力）を理論的に導出する必要がある。

コンクリート高強度化に伴って、爆裂の問題が生ずる。研究課題としては、

①爆裂のメカニズムの解明（ミクロ）

②爆裂と火災耐力の関係（マクロ）

③爆裂防止の工法

が挙げられる。

結局、構造の火災安全性に狭く、限定して当面注力することとすると、

①材料の高温時強度定式化の提案と試験データのより一層の蓄積

②耐火実験は崩壊まで行い、終局耐力を把握する

③大胆な仮説のもとで簡単なもの（材料）から複雑なもの（部材・架構）を説明する理論的展開と論理展開を試みる

④簡便な保有耐火性能の計算式の提案と検証が重要である。

#### 4.2 土木構造物における耐火設計の基本的手順

##### (1) はじめに

先ず最初に耐火設計における基本的概念として、下記に示す種々の基本的条件に基づいて耐火設計の必要性について検討を加える必要がある。

- ・ 地下空間における火災事故事例の収集と分析
- ・ 耐火設計の対象となる構造体に発生すると予想される火災規模と発生確率等、及び設計上の火災規模の設定
- ・ 耐火水準と耐火対策の設定

##### (2) トンネル構造条件

トンネル構造条件は基本的に土木構造物と排煙設備に代表される安全設備で構成される。

仮にある種の規模の火災が発生した場合、トンネル内の温度環境及び構造物への温度影響は、同一火災規模（出力）であっても、断面形状、断面積、冷却空気量及び換気風速等の換気条件によっても温度場は大きく変化する。したがって、最終的にトンネル構造物の耐火対策の必要性及び対策水準を適正なものとするためには、耐熱水準、即ち、強度劣化の許容値と、耐火材料の仕様と施工範囲との関連性を明らかにすることが重要である。

##### (3) トンネルの火災規模と初期条件の設定

トンネルの火災規模は、燃焼対象物の規模（総熱量）と時間経過（熱出力）によって示されるのが一般的である。この火災規模を設計熱出力（Design Fire, Heat Release Rate, H.R.R.）と称する。設計熱出力は当然の事ながら、車種毎に異なり、積載状況によっても異なる。表-1 にその代表的事例を示す。

表-1 トンネル設計等に用いる車輛の熱出力の最高値（PIARC）<sup>7)</sup>

車種	熱出力の最高値 (MW)
小型乗用車 1 台	2.5
普通乗用車 1 台	5
乗用車 2～3 台	8
貸客車 1 台	15
バス 1 台	20
一般可燃物積載車	20～ 30
油送トラック 1 台	100～300

表-1 に示す最高熱出力は発火時から時間経過によって変化する。一般には図-3 に示す通り台形(山形)の分布となるが、この分布については、現在のところ定説はなく、火災実験、事故事例等から設定している場合が多い。

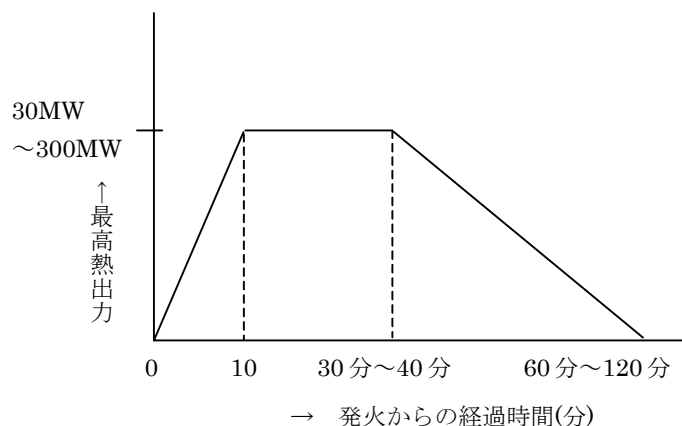


図-3 経過時間と熱出力の関係

#### (4) トンネル内空間温度分布及びトンネル内コンクリート表面温度の推定

##### 1) 概要

前述の設定熱出力に基づき、トンネル構造条件及び換気条件及び換気条件からトンネル内空間温度（空気温度分布）及びコンクリート構造体の表面付近の温度分布を推定することは耐火対策設定の上で非常に重要である。トンネル内空間温度を的確に把握する方法は、数値解析方法（CFD 法）、模型実験、過去の火災事例等からの被害推定等が考えられるが、何れの方法も現在のところ万全ではない。

しかしながら、トンネル構造体の耐火対策を検討する場合には以下に示す諸項目について可能な限り検討を加えることが不可欠である。

- ① トンネル内最高空気温度と温度分布の推定
- ② コンクリート表面（内部）と温度分布の推定
- ③ コンクリートの品質と熱特性に基づく強度劣化許容値及び爆裂発生温度についての検討
- ④ 耐火対策の必要性及び耐火対策の仕様の決定

一例として、自動車火災の場合のトンネル内空気の最高温度はPIARC<sup>7)</sup>により以下の値が示されている。

- ・普通自動車 400℃\*
- ・バス・小型トラック 700℃\*
- ・燃焼しやすい積荷(ガソリン、または危険物を除く)を乗せた大型トラック(HGV) 1000℃
- ・タンクローリー車(一般のケース) 1200℃
- ・タンクローリー車(非常のケース：トンネル排水構造及びタンクローリー車からの油の流出量が無制限。沈埋トンネルの場合) 1400℃

\* 炎が壁に触れた場合、温度はさらに高くなる。

PIARC によって示されたトンネル内の最高空気温度は、本格的な実物トンネル実験によって、自動車の内部またはコンクリート壁面に近い位置で測定された値である。

これ等の温度によって直接コンクリート部材が加熱されることになるが、マッシブなコンクリート部材が有する熱容量による加熱空気側への冷却現象及びコンクリート内部への

熱伝導現象によって、一般的にコンクリートの表面温度はこの温度に到達しない。

## (6) トンネル構造体の耐火技術

### 1) はじめに

トンネル内での火災規模・トンネル構造条件・換気条件等からコンクリート構造体の表面温度を推定し、その結果としての構造体への被害想定から耐火対策の必要性の有無および耐火対策が必要となった場合の対策の度合（耐火性能水準）について検討を加える必要がある。

次の4種類の耐火対策方法は火災からコンクリートを保護する基礎的な形式である。

- ① コンクリート面に耐火材料を設置する方法
- ② コンクリート自身の耐火性能の向上
- ③ コンクリート面への熱伝達の遅延方法
- ④ 二次覆工

以下、これらの順を追って記述する。

### 2) 耐火材料の耐火性能について

現在、耐火対策に必要な各種火災を想定した耐火材の性能試験のための時間・温度曲線を図-4に示す。

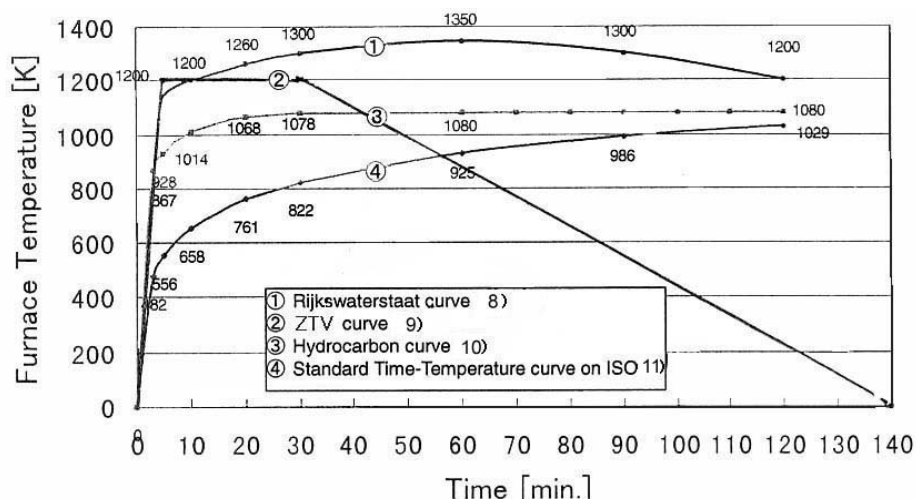


図-4 時間・温度曲線

図-4に示す4種類の時間・温度曲線の内、①及び②は道路トンネルの火災を対象としている。この2種類の時間・温度曲線は、発火後数分間で1000℃以上に達しており、③の炭化水素火災と類似しているが、やや高い温度分布となっている。

これ等の時間・温度分布曲線に示されている値は、耐火材の耐火性能試験のための炉内温度とされる。①に示されるRWS曲線は、この曲線に対応した耐火性能試験が示されており、②に示されるZTV曲線については、DIN4102 Teil2.にその実験方法が記載されている。

8)

両者は、夫々コンクリート内面（火炎側）の温度（炉内温度）は最高値の1350℃（RWS）および1200℃（ZTV-Tunnel）と異なるが外面側（非加熱側）は約300℃までの温度上昇を限度としている。

現在、欧州各地の道路トンネルおよび鉄道トンネルで施工実績を有する耐火材は、これ等に規定された試験方法によって耐火認定を取得している材料が用いられている。



## (7) 耐火対策

### 1) 耐火被覆材料

火災時にコンクリート構造体を保護する方法として、耐火被覆材料の設置が最も一般的である。基本的な施工方法はパネル方式と吹付方式である。

この施工方法の特色は新旧のトンネル共に適用することが可能な点である。

### 2) 珓瑯鋼板による耐火材の開発<sup>12)</sup>

近年、ドイツにおいて、一般的トンネル内装材として実績のある珓瑯鋼板をトンネル壁面表面から10cm～20cmの間隔で2枚を重ね貼りし、2枚のパネルを含む全体の厚さは10cm程度とし、内部の空気は換気作用が促進されるような構造としている。

### 3) 穴明鋼板（パンチングメタル）による耐火対策<sup>13)</sup>

近年ドイツにおいて、穴明鋼板を用いた耐火対策が紹介された。コンクリート躯体と一定間隔をもって設置されたパンチングメタルによって、コンクリートへの熱伝達を遅延することによって、強度の低下を抑制する技術が開発された。

## (8) トンネル構造体における耐火施工の範囲

トンネル構造体における耐火施工の範囲については、一定の基準は見られず各国、各トンネル毎に異なる施工様式が見られる。道路トンネルの耐火対策の一例を表-2に示す。

表-2 道路トンネルの耐火対策例

トンネル名	国名	型式・断面	設定熱出力(MW)	耐火対策	備考
テッドウイリアムス	米国	沈埋・矩型	約50	無・天井ダクトの崩落を前提とした設計	供用
第4エルベ	ドイツ	シールド・円形	約50	天井排気ダクト部パネル形式	施工中
リーフェンスホンク	ベルギー	沈埋・矩型	不明	路面を除く全面	耐爆構造
ウエストスカルデ	オランダ	シールド・円形	300	同上、吹付	未施工
オレスンドリンク	デンマーク スウェーデン	沈埋・矩型	300	天井部全面、側壁上部 1m吹付	供用
東京港第2航路	日本	沈埋・矩型	約100	天井部全面、側壁上部 1mパネル形式	供用

## 4.3 土木構造物の火災安全性に関する研究課題

土木構造物の火災安全性に関して、研究課題としては、次の事項が挙げられる。

①大規模な公共的地下構造物である道路トンネルおよび鉄道トンネルにおいても、コンクリート構造体に対する火災の影響について、適切な検討を加えて、耐火対策の採否あるいは対策のグレード（対策方法）の方針を設定する。

②検討を加えるにあたって、次の事項を更に明らかにする必要がある。

- ・ 土木構造物用コンクリートの耐熱特性
- ・ 強度劣化と設計安全率との関係
- ・ 火災規模の設定
- ・ 火災空間およびコンクリート表面温度の推定方法（空間全体の温度場の予測）
- ・ 温度場とコンクリートの耐熱特性に対応した適切な耐火対策の提案（無対策で可との提言も含む）

## 5. まとめ

従来、建築土木構造物の主要な構造材であるコンクリート及び鋼材は、それ自体が不燃材であり、耐火性能を有する構造体であると考えられてきた。しかしながら、火災規模の拡大及び燃焼対象物の多様化によって、構造体の大規模な損傷に繋がる火災規模の想定に伴って、耐火対策が重要視されつつあるのが現状である。

特に、土木構造物の中でも交通トンネルにおいては、毎年の如く死傷者を伴う大規模火災が世界各地で発生し、その社会的損失も無視し得ない程膨大なものとなっている。

特に近年、これらの交通トンネルを始めとする地下構造物に対する耐火対策の研究が国際的に加速され、例年頻繁に国際会議が開催されている。当学会における委員会もこれ等の状況に鑑み発足したもので、委員会における研究成果が会員各位及び関係者の一助となれば幸いである。

最後に本委員会でご尽力を賜った委員各位全員の名簿を記し、甚深なる謝意を表す。

### <参考文献>

- 1) 消防白書、平成 13 年版
- 2) 西垣他、高圧時におけるコンクリートの力学特性のモデル化、日本建築学会学術講演梗概集（北海道）1995 年 8 月
- 3) 例えば、Dr.-Ing. Ekkehard Richter, Developments in Structural Fire Protection, 1<sup>st</sup> International Conference on Traffic and Safety in Road Tunnels, 29 May 2001.
- 4) 井上明人・飛坂基夫・柘田佳寛：高強度コンクリートの耐火性の評価に関する研究（第 2 報）、日本建築学会学術講演梗概集（東北）、A, pp.739-740, 1991.1
- 5) 遊佐秀逸他：耐火塗料の開発と可能性、建築仕上技術、Vol.26, No.311, pp35-62,2001.6
- 6) 西垣、火災とコンクリート第 5 章、日本建築学会シンポジウム資料、2001.6.15
- 7) Fire and Smoke Control in road tunnels (Last Draft – August 1998) PIARC Committee on Road Tunnels.
- 8) M. Tan, “Fire Protection in Tunnel Open to Hazardous Goods Transport”, ECOLE NATIONALE, DESPONTS ET CHAUSSEES, 10 December, 1997.
- 9) DIN4102 Teil2, Ausgabe 09/1977 (Brandbeanspruchung nach ZTV-Tunnel bei einseitiger Brandbeanspruchung der Decken-unferseite).
- 10) Testing Method in the Standard of ISO 834, BS 476 : part 20 ~ 24 : DIN 4102, part I to II.
- 11) Report concerning on an investigation into the behavior of a concrete slab protected by a coating of PROMATECT-H Plates of 25mm in thickness upon heating according to a curve prescribed by the “Rijkswaterstaat” in the Netherlands, TNO Report B-85-191(E), May 1985.
- 12) Dr. Ing. Jurgen Rauch, Enameled Steel Lining System Lowers Temperature in the Even of Tunnel Fires. Tunnel, March 2001.
- 13) Prof. Dr. Ing. Alfred Haack, Fire Protection System made of Perforated steel Plate Lining Coated with Insulating Material. Tunnel, July 1999.