

# 委員会報告 コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能 研究委員会

野口貴文\*1・丸屋剛\*2・神田亨\*3・一瀬賢一\*4・古市耕輔\*5・道越真太郎\*6・野島昭二\*7・森田武\*8

**要旨:** 本研究委員会では、2009～2011年度の3年間、火災時におけるコンクリートの特性と構造物の耐荷性や変形性との関係についての技術の現状を最新の実験結果や解析手法の調査を実施するとともに、耐火試験方法、および火災を受けた構造物の調査・診断・対策についても文献調査を行い、耐火コンクリート構造物（コンクリート製品含む）の設計・施工・維持管理に関する技術の現状を取り纏めた。さらに、「コンクリート構造物の火災診断および補修・補強計画に関する試案」などを提案するとともに、今後の課題を抽出した。

**キーワード:** 耐火設計, 火災曲線, 火災応答, 火災診断, 補修・補強, 試験方法

## 1. はじめに

コンクリートは不燃の材料であるため、コンクリート構造物は、木材や鋼材で造られた構造物と比較して火災に対しては強いと考えられてきた。しかし、昨今、構造物は巨大化・高層化・複雑化し、トンネル、高速道路、高層RC建築物などで生じた火災において多大な損失を被った事例もあり、火災時のコンクリート構造物の挙動を土木・建築で共通に評価できる体系が必要となってきた。そこで、本研究委員会は、表-1に示す設計・構造ワーキンググループ(WG1)、調査診断・補修補強ワーキンググループ(WG2)および材料ワーキンググループ(WG3)を設置し、2009～2011年度の3年間において、コンクリート構造物の耐火設計手法の開発や火災診断方法の確立に向けて、火災の成長現象、火災時のコンクリートの化学的・物理的变化、コンクリート構造物の各種性能への火災の影響などについて、国内外の研究事例や制度・規格・法規などの調査を行ってきた。具体的には、次の活動を実施した。

- ✓ コンクリート構造物の耐火に関する考え方の整理
- ✓ 火災リスクを考慮した耐火設計と対策工法の検討
- ✓ 地下駐車場、トンネル、橋梁などの火災に対する火災外力の合理的な決定手順の提案
- ✓ 実構造物の熱変形挙動に関する整理
- ✓ コンクリート構造物の耐火設計事例の調査
- ✓ 火災調査、診断、評価および判断方法の事例収集と技術の現状整理
- ✓ 火災調査・診断に関する試験方法の現状の整理
- ✓ 火災後の部材・構造物の健全性評価方法の検討
- ✓ 火災後の補修・補強方法に関する技術の現状整理
- ✓ 「コンクリート構造物の火災診断の考え方」の提案
- ✓ 高温下のコンクリートのRILEM試験方法の調査
- ✓ コンクリートの爆裂性判定試験方法に関する検討
- ✓ 耐火被覆に対するオランダの試験方法の調査
- ✓ ポリマーセメントモルタルの高温下の物理的性質に関する調査
- ✓ 高強度鉄筋の高温下の性質に関する調査

表-1 委員会構成

委員長 野口貴文		副委員長 丸屋 剛			
設計・構造 WG (WG1)		調査診断・補修補強 WG (WG2)		材料 WG (WG3)	
主査	神田 亨	主査	一瀬賢一	主査	古市耕輔
幹事	道越真太郎	幹事	野島昭二	幹事	森田 武
委員	大宮喜文 清宮 理	委員	大久保雅憲 古賀一八	委員	小澤満津雄 小島正朗
	鈴木淳一 武居 泰		阪口明弘 志村 敦		笹沼美和 谷辺 徹
	原田和典 平島岳夫		土橋 浩 野本 康介		常世田昌寿 濱崎 仁
	森川昌司				

\*1 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 博士(工学)(正会員)  
 \*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 博士(工学)(正会員)  
 \*3 日本シビックコンサルタント(株) 技術本部技術研究部 (正会員)  
 \*4 (株)大林組 技術研究所 博士(工学)(正会員)  
 \*5 鹿島建設(株) 技術研究所 (正会員)  
 \*6 大成建設(株) 技術センター建築技術研究所 博士(工学)  
 \*7 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 (正会員)  
 \*8 清水建設(株) 技術研究所 博士(工学)(正会員)

## 2. 設計・構造 WG (WG1)

### 2.1 はじめに

火災に対するコンクリート構造物の応答は、温度の上昇に伴い熱膨張、高温劣化、応力再配分が連成して起こり最終的には破壊に至る。本WGでは種々のコンクリート構造物の火災時の挙動を精度良く予測すべく、火災外力と火災応答に関して現状分析と課題の抽出を行なった。建築物のみならず道路構造物や鉄道構造物のような屋外空間における火災についても、火災事例を分析し火災外力を評価する手順について提案した。また最新の耐火設計事例を収集整理し、実務者が耐火設計を行う上での有益な情報を紹介した。

### 2.2 火災外力

建築物の屋内火災に対しては、建築基準法の耐火性能検証法に基づき可燃物のデータや火災曲線を決定する手法が整備され、設計実務に供されている。隣棟火災および市街地火災に関しても、技術的な課題は残るものの、屋外火災の温度や火災継続時間についても規定されている。一方、トンネルや橋梁等の道路構造物については大規模火災が増えているものの、可燃物の種類や状態、換気状態が建築物の場合と大きく異なるため、建築物の手法はそのまま適用することはできない。こうした火災を評価するための合理的な手法を整備する必要性が高まっていた。現状では、図-1 に示すような海外の火災曲線の中から適宜選択して耐火対策の検討を行っているが、その適用範囲については不明な部分が多く、検討の余地が大きい。

耐火設計における火災曲線とは、耐震設計における入力地震動に相当するものであり、これが決まらないことには設計検討を進めることは難しい。現状では道路構造物の火災曲線を厳密に求めることには相当の困難であるが、図-2 のような熱収支が分かれば、実務上問題のない精度で、ある程度合理的に火災曲線を定めることは可能になると考えられる。耐火対策が施される事例が増えているトンネルの場合で考えてみると、可燃物は、車両のみであり、換気量は制御されているため既知である。

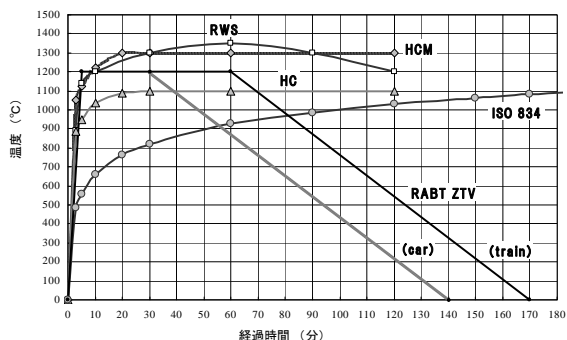


図-1 各種の火災曲線

可燃物である車両の台数や種別については、道路規格、設計交通量、危険物車両通行規制の有無などから想定することが可能である。また発熱速度については、実車両を使った燃焼実験における実測値が海外を中心に報告されるようになってきている。その結果を整理したところ、図-3 に示すように、発熱速度の履歴はRABT曲線に近いものとなり、同一車両を燃焼させた場合に風速が高いほど、また内空断面が大きいほど最高温度は低くなった。このようなことから、図-2 の前提条件は妥当なものであり、図-4 に示すようなデータが整えば、合理的にトンネルの火災曲線を求めることが可能になるも

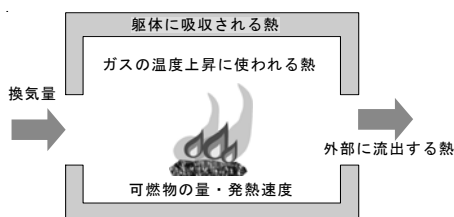


図-2 火災曲線算定的前提となる条件

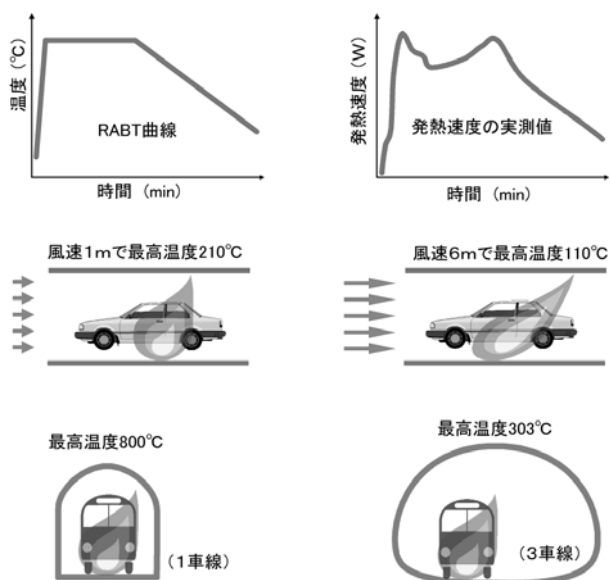


図-3 火災大燃焼試験結果の傾向

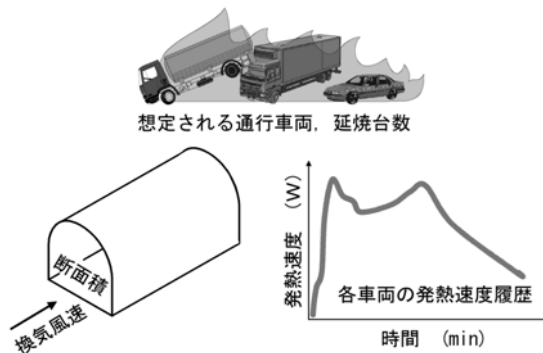


図-4 トンネルの火災曲線決定に必要なデータ

のと考えられる。なお、鉄道トンネルに対しても、JR 石勝線火災事故の分析や車両の火災性状モデルに関する考え方を紹介している。

橋梁火災の場合も基本的に同じアプローチで火災曲線を提案できると考えられる。首都高速5号池袋線の事故に見られるように、橋梁で問題となるのは床版下で火災が発生した場合である。橋梁火災では、トンネルなどに比して圧倒的に換気量は大きくなるが、天井と床は存在するので、**図-5** に示すように、開口部の比率が極めて大きい空間としてモデル化できるものと考えられる。

### 2.3 火災応答

コンクリート系構造物の火災時の部材温度、変形挙動を精度良く再現可能な手法について調査検討を行なった。既往の荷重加熱実験事例、解析事例を収集し、構造・架構形式に応じた最適な解析手法を紹介するとともに、解析に必要な物性値について評価を行なった。

**図-6** は3階建事務所建物（3×5スパン）を対象とした時刻歴応答解析の事例である。架構の対称性を考慮し、左半分を解析対象としている。このケースでは、2階全スパンの火災を想定し、コンクリート表面はISO 834標準加熱温度曲線に従って上昇するものとし5時間後まで計算を行なっている。応力～ひずみ関係および熱膨張ひずみはEurocodeモデルを用いている。過渡ひずみの大きさをパラメータとしている。

梁の熱膨張に起因する柱頭水平変位は外側になるほど大きくなり、同スパンではあるが側柱につながる梁のたわみは若干大きくなっている。過渡ひずみを考慮した方が柱の柱頭変位水平変位が小さく、梁のたわみが大きくなった。

地下構造物においては構造系が崩壊しないことは勿論のこと、火災時の変形が上部構造物に影響を与えないように変形を制御する必要がある。シールドトンネルの火災時の変形挙動を予測するために、実セグメントを用いた荷重加熱実験と周辺地盤の土圧水圧を考慮した数値解析の事例を**図-7** に示す。このケースでは、実大の試験体に対して設計断面力を付与しながらRABT加熱試験を行なっている。数値解析で実験結果を再現できることを確認した上で、覆工全断面の火災時の変形解析を実施している。耐火対策の有無により覆工の熱変形が大きく異なることが確認されている。

### 2.4 耐火設計事例.

建築物に関しては、有機繊維を添加した爆裂防止対策やCFTの場合の耐火設計の考え方について紹介を行なった。道路構造物に関しては、沈埋トンネルとシールドトンネルについて耐火被覆や有機繊維による対策事例について取りまとめを行なった。特に耐火被覆については最近採用事例の増えている内装機能付き耐火板の事



図-5 橋梁火災のモデル化

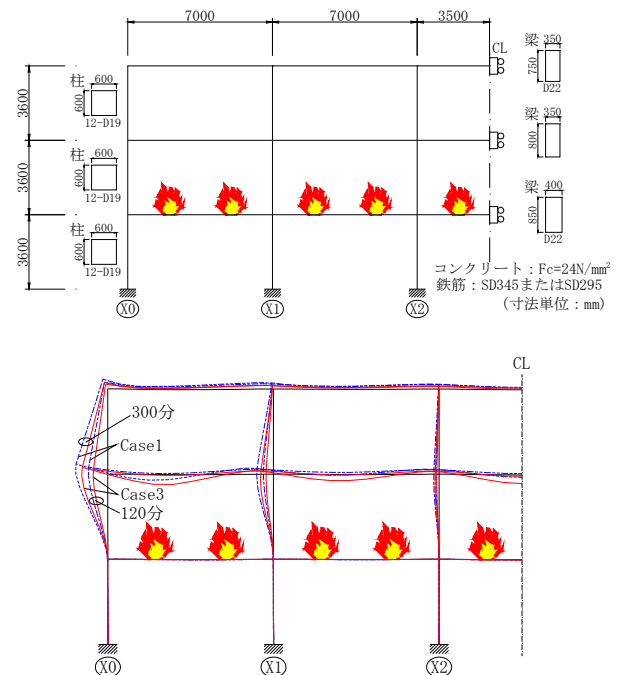


図-6 RC架構の荷重加熱実験と数値解析の事例[1]

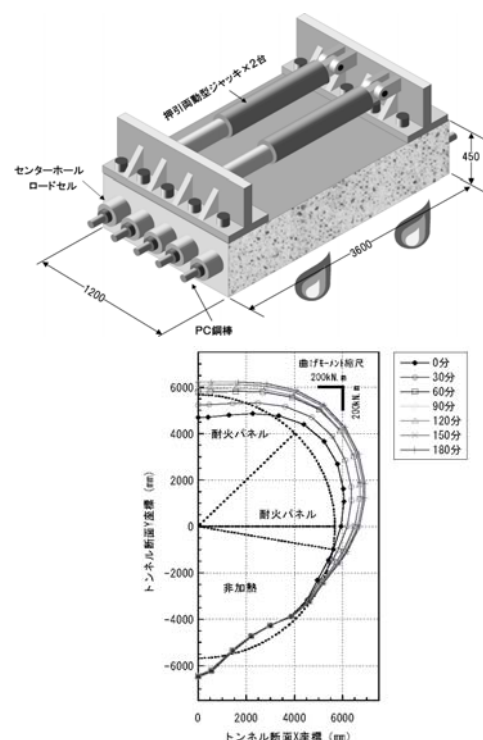


図-7 覆工の荷重加熱実験と数値解析の事例[2]

例を紹介した。

### 3. 調査診断・補修補強 WG (WG2)

本 WG では、火害を受けたコンクリート構造物に対して実施する調査・診断から補修・補強について主に文献調査を実施し、最近の知見を取りまとめた。具体的には、健全性評価基準の確立、供用の判断基準の明確化、補修・補強方法の選定、および簡易な現場調査方法の開発に対して、文献調査に基づく技術的な整理を実施したうえで、建築物および土木構造物に対して実用的な「コンクリート構造物の火害診断および補修・補強計画に関する試案」を作成した。

#### 3.1 火災後の調査・診断・評価および判断方法の整理

##### (1) 事例収集

火害調査、診断および評価の事例を学協会誌に公表されているものから収集した。建築物では公表されている事例が少ない。土木構造物では比較的多くの事例が収集できた。土木構造物は公共物が多く、社会的に注目されるような火害の場合には、その対応を公表する事例が多いのであろう。収集した各事例に対しては、採用された調査方法、診断結果、および特筆すべき事項を整理した。一次調査は目視調査で行われる事例がほとんどであり、火害等級を判定する二次調査の実施については、建築物と土木構造物の調査において違いが見られた。

##### (2) 火災後の調査・診断に関する技術の現状

火害の調査方法、診断方法および非破壊・微破壊検査方法について提案されている事例を収集した。非破壊検査方法の研究がすすめられおり、詳細な診断を可能とするため微破壊検査方法の小径コアを用いた分析方法などが提案されている。

##### (3) 調査・診断に関する注目すべき試験方法

火害の診断では、深さ方向の受熱温度の推定を可能にする試験方法が望まれている。しかし、現状では UV スペクトル法などの化学分析に頼らざるを得ない。今回の事例収集の中で、比較的容易に深さ方向の受熱温度や強度分布を推定する方法として、孔内局部載荷試験<sup>1)</sup>、コンクリート比色分析<sup>2)</sup>、および穿孔抵抗に基づく方法<sup>3)</sup>などが提案されている。

孔内局部載荷試験は、図-8 に示す直径 40mm、長さ 270mm の小型の孔内局部載荷装置を直径 42mm でコア削孔した孔内に挿入して用いる。φ6mm の載荷先端部分を孔内コンクリート側面に対して押し出すように載荷して、荷重と貫入量の関係よりコンクリート強度を推定するものである。たとえば、コンクリート表層付近の物性を深さ 1cm ごとに測定して、その変化を詳細に捉えることが可能であるが、今まで火害コンクリートに対する実績はなかった。本委員会では、標準加熱したコンクリ



図-8 孔内局部載荷試験装置

ート供試体を用いて、孔内局部載荷試験の適用性を検証した。その結果、本試験方法は、深さ方向の強度推定方法として適用できることを確認した。

コンクリート比色分析は、コア孔内の側面の色の变化から、熱による被害の深さを調査するものである。また穿孔抵抗に基づく方法は、ハンマードリルで削孔する際に必要な単位深さあたりの仕事から、深さ方向の残存強度を推定する方法である。いずれの方法も加熱面のコンクリート表面から層ごとの評価が可能となるため、今後の適用性の拡大に向けた研究開発が期待される。

##### (4) 現状の火害調査・診断方法の課題

火災後の調査、診断、評価および判断方法の整理を行わない、次のような課題を明らかにした。

- ① 火害の面的把握方法: 受熱温度を推定するうえでの変色は、使用骨材によって異なる場合がある。
- ② 火害の深さ方向の把握: ヤング係数に影響を与える受熱温度 200℃の簡易な判定方法がない。
- ③ キャリブレーション値: 様々なコンクリートのキャリブレーション値を整備する必要がある。

#### 3.2 火害を受けたコンクリート構造物の補修材料・補強方法に関する技術の整理と選定方法の提案

火災後の対策を行った事例を調査し、構造物を建築物、土木構造物（橋梁）および土木構造物（トンネル）に分類し、現状の対策方法の傾向について整理した。

補修材料、補強方法は、火害構造物の所有者、管理者および使用者の意向に基づき、火害診断者と構造設計者、施工者が十分検討したうえで選定しているようである。指針類を調査したところ、対策方法については次のように大別できる。

- ① 補修（ごく表層のコンクリート）: 表面処理工法、注入・充填工法
- ② 補修（かぶりコンクリート）: 断面修復工法
- ③ 補強: 鋼板、FRP 巻立て工法、接着工法、増厚工法、または部材の交換

#### 3.3 火災後の部材および構造物に対する健全度評価方法の検討

##### (1) 被災直後の供用性の判定

被災直後の供用性の判定は、主に個人や企業の使用が多い建築物と、公共に供することが多い土木構造物では

大きく異なる。

建築物は、「建物の火害診断および補修・補強方法指針（案）・同解説」<sup>4)</sup>に基づき判定が行われている。すなわち、火害診断は、火害調査（予備調査、一次調査、一次調査結果を基に必要に応じて設定した二次調査）、火害診断（調査結果に基づく火害等級・被災度の判定）を実施し、診断結果に応じて対策が検討される。地震により被災した建築物では、加えて「被災建築物応急危険度判定マニュアル」<sup>5)</sup>で恒久的復旧までの間における使用性についての判定方法が示されている。

土木構造物の場合は、今まで一般的な判定基準はなく、個別に診断している事例が多い。道路橋においては、「火災被災橋梁の点検マニュアル（案）」<sup>6)</sup>が用いられることがあり、緊急点検により総合判定を行い、交通規制等の措置を実施したうえで応急措置のフローが示されている。

#### (2) 補修・補強後の健全性の判定

建築物においては、補修・補強後の健全性評価まで行うことは少ない。しかし、少ない事例ではあるが、二次調査で実施した振動試験や載荷試験と比較するために実施することもある。

土木構造物では、対策後の供用開始の判断として、載荷実験により対策効果を確認した事例がある。

### 3.4 コンクリート構造物の火害診断および補修・補強計画に関する試案

火害を受けたコンクリート構造物の調査・診断から補修・補強に関する調査検討結果を踏まえて、無筋または鉄筋コンクリート造（鉄骨コンクリート造を含む）建築物と土木構造物を対象として、コンクリート構造物の火害診断および補修・補強計画に関する試案を取りまとめた。試案の構成は、1章「総則」、2章「火害調査・火害診断および補修・補強の考え方」、3章「建築物」、4章「土木構造物」、および5章「試験項目」とした。ここで、可能な限り建築物と土木構造物の記述の統一を図ったが、次の理由により3章と4章は独立させた。

建築物では、火害の予備調査、一次調査を実施したうえで、調査の継続の有無および補修・補強の要否を決定し、二次調査を実施することとしている。一方、土木構造物では、列車の運行や車両の通行の可否を判断するための緊急調査を実施し、通行規制や応急復旧の措置をとり、その後、一次調査・二次調査が行われる。よって、建築物と土木構造物では、応急措置や調査の位置づけが異なり、統一的な記述は困難と判断した。

表-1に試案の概要を示す。

#### 4. 材料 WG (WG3)

WG3では、平成21年度のFSにおいて、コンクリー

表-1 コンクリート構造物の火害診断および補修・補強計画に関する試案

#### (1) 総則

試案の目的、適用範囲および用語の定義を示した。目的は、火災を受けたコンクリート構造物の火害調査・診断、および補修・補強計画において考慮すべき事項を示し、もってコンクリート構造物の適切な維持管理に資するものであり、無筋または鉄筋コンクリート造（鉄骨鉄筋コンクリート造を含む）建築物、および橋梁、トンネルなどの土木構造物に適用する。用語は建築物と土木構造物でできるだけ統一が図れるよう定義した。

#### (2) 火害調査・火害診断および補修・補強の考え方

火害調査および火害診断では、火災を受けた橋梁の落橋および倒壊、トンネルの崩壊などの危険性の判断、列車の運行や第三者の通行の可否、応急措置の必要性の判断や建築物の再使用可否の判断、再使用する場合の補修・補強方法を検討・選定するための基礎データを得ることを目的とする。火害調査は、予備調査または緊急調査、一次調査および二次調査の3段階に分けて実施する。火害診断では、火害調査の結果に基づき、火害等級および被災度を判定する。

補修・補強は、火害構造物の構造安全性、公衆安全性、耐火性、耐久性、使用性、供用性およびその他必要な諸性能について、設定した回復目標までの復旧を目的とする。

#### (3) 建築物

火害を受けた建築物の調査、診断および補修・補強計画の立案について示している。火害調査は、予備調査、一次調査および二次調査からなり、火害調査の結果より火害診断を行うこととしている。補修・補強は、回復目標の設定、補修・補強範囲の設定、および補修・補強工法の選定を行ったうえで実施する。

#### (4) 土木構造物

火害を受けた土木構造物の火害調査、火害診断および補修・補強計画の立案について示している。ただし、PC構造物については、知見が乏しいため適用外とした。火害調査の手順としては、まず緊急調査を実施することとしており、速やかな応急措置の要否の判定を求めている。その後、一次調査、および必要に応じて実施する二次調査を行い、補修・補強計画を立案することとなる。

#### (5) 試験項目

一次調査および二次調査で用いる試験方法を示した。一次調査は、現場で容易に実施可能な試験方法が用いられることが多い。二次試験では、火害の状態をより詳しく調査するため、力学的試験、材料分析などを実施する。

ト構造物の耐火性能や火災後の補修・補強にかかわるコンクリート、鋼材、耐火被覆および補修材料等の建設材料の高温特性データ（冷却後も含む）に関する現状を把握するために、文献調査による情報収集・整理を行った。その結果、次の(1)～(4)に示すように現状と課題が整理され、今後の国内の研究・開発の発展に資するための基礎資料の提示を目的として活動を行った。調査・検討結果の概要は4.2～4.6に述べる。

#### 4.1 現状と課題

##### (1) コンクリートと鋼材の高温特性データ

コンクリートに関しては、多くのデータが蓄積されてきてはいるものの試験方法が統一されていないため、データを解釈する上での系統だった比較や整理を困難にしている状況が把握された。このような問題点を将来的に解決するためには、試験方法の統一の必要性があると考えた。そこで、コンクリートに関しては、RILEMによって提案されている一連の高温コンクリートの試験方法を中心にその内容を調査・整理し、標準的な試験方法の提案に資する資料を作成した。

鋼材に関しては、多くのデータが蓄積されてきており、また、標準的な材料試験方法がJISに規定されている。そこで鋼種等に着眼して現状のデータの有無を系統的に整理するとともに、検討例の少ない鉄筋継手と後施工アンカーに着目して情報を収集・整理した。

##### (2) コンクリートの爆裂

日本でも高強度コンクリートの適用に関連して研究・開発成果が多く報告されてきている。一方、海外においても様々な実験的・解析的な研究が行われており、近年は定期的にワークショップも開催されている。ワークショップでは多くの貴重な研究成果が報告されており、これらの成果の概要を纏めた。

##### (3) 耐火被覆

道路トンネル等の耐火対策はヨーロッパを中心に以前から検討・適用がなされてきており、近年の日本の道路トンネルにおける車両火災等の対策に関する良いお手本になっている。また、ヨーロッパの中でも水底トンネルの多いオランダでは先駆的な研究・開発がなされており、近年、耐火被覆等のトンネル耐火対策に関する標準試験方法の改定がなされた。一方、日本には道路トンネル等の耐火対策に関する標準的な耐火性能試験・評価方法がない。このことから、現状の建築・道路トンネル等における耐火被覆工法を整理するとともに、将来的な標準試験法の提案の一助とすべく、オランダの標準試験方法に関して概要を纏めた。

##### (4) 補修材料

火災被害を受けたコンクリート構造物を再使用するには、再使用の可否を判断するための診断および再使用

するための補修・補強が必要になる。火災による被害の調査診断・補修補強に関しては本小委員会のWG2において調査・検討・提案がなされている。これに対して、WG3では、補修材料としてポリマーセメントモルタルに着目した。ポリマーセメントモルタルはその施工性や接着性から、補修材料として有望な材料であるが、耐火性が要求される構造物への適用において、その高温特性については未解明な点も多い。このため、近年国内において、ポリマーセメントモルタルの耐火性に関する精力的な検討がなされてきている。そこで、この最新の検討成果に関して情報を収集し、整理することとした。

#### 4.2 コンクリートの材料特性

##### (1) 概要

コンクリートは一般に耐火材料と見なされているが、火災のような高温下および高温履歴歴においては、強度・弾性といった力学的性質が低下する。また温度変化に伴って熱膨張、収縮等の変形（ひずみ）が生じ、これらに起因する応力（熱応力）が発生する。一方、コンクリートは温度を伝えにくい性質があることから、火災を受けるコンクリート部材は、1000℃前後に達する加熱表面と内奥部との間に比較的大きな温度勾配が生じる。この温度勾配は、前述した熱応力の原因になり構造体の火災時挙動に影響を及ぼす。そのため、コンクリート系構造物の耐火設計を行うためには、次に挙げるコンクリートの性質を定量的に把握しておく必要があり、これらの概要を委員会報告書にまとめた。

##### 熱的特性

密度、比熱、熱伝導率、水分移動、潜熱及び顕熱、加熱表面の熱伝達係数

##### 機械的特性

圧縮強度、付着強度、引張強度、（曲げ強度、せん断強度）、応力ひずみ関係、弾性係数、ポアソン比、熱ひずみ、遷移クリープ、定常クリープ

##### (2) 研究分野に関する調査

高温下のコンクリートの材料特性に関して、どのような研究データが報告されているか現状を調査した。調査対象は、コンクリートの高温下の特性を主題として取り扱っている日本建築学会の構造材料の耐火性ガイドブック<sup>7)</sup>および日本コンクリート工学協会のコンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書<sup>8)</sup>に引用されている文献を主とした。調査結果は、実験条件ごとに研究件数、研究データの充実度という尺度で評価した。この結果を踏まえ、今後どのような研究データの充実が望まれるかなど、今後の課題について整理した。

##### (3) 試験方法

RILEMにおける高温下におけるコンクリートの力学試験方法に関する検討成果として、応力ひずみ関係、

圧縮強度、引張強度、弾性係数、熱ひずみ、遷移クリープ、定常クリープ、収縮、拘束応力、応力緩和に関する10種類の試験方法が提案されている。各試験法は、各力学特性に応じた試験方法が詳述されているが、想定しているコンクリートの状態、材料・調合、供試体作製に係る型枠・打込み・養生・保管などの記述は共通している点が多い。委員会報告書の本文では、RILEM 試験方法 Part 1 (総論) に記述されている内容に関して概要を述べ、各試験法 (Part 2～Part 11) に関しては委員会報告書の付録に掲載した。

#### 4.3 鋼材の材料特性

文献 7～9) の3文献を主たる情報源とし、応力-ひずみ関係、弾性係数、降伏強度、引張強度、破断伸び、クリープ特性、熱伝導率・比熱・線膨張率などのデータの有無を鋼種 (鋼材、ケーブル、ボルト等) ごとに整理して委員会報告書に掲載した。データ整理の結果、試験時のひずみ速度は高温強度試験結果に影響が大きいこと、一般鋼材では、厚板、鋼管、熱処理鋼材のデータが少ないこと、さらに、耐火鋼、ステンレス鋼、PC、継手のデータも少ないこと、などが課題として把握された。

また、鉄筋コンクリート構造物を構成するための重要要素である、鉄筋継手と後施工アンカーの耐火性について情報収集を行ったが、これらに関するデータはほとんどないのが実情であった。

#### 4.4 コンクリートの爆裂

2009年9月にドイツのライプツヒヒにおいてコンクリートの爆裂に関する第1回国際会議<sup>10)</sup>、2010年に米国のミシガンにおいて Structures in Fire 2010<sup>11)</sup>、2011年10月にオランダのデルフトにおいてコンクリートの爆裂に関する第2回国際会議<sup>12)</sup>が開催されるなど、コンクリートの爆裂や構造物の火災に対する抵抗性についての議論が海外で活発になされている。これらの国際会議におけるコンクリートの爆裂に関する発表のうち、爆裂の原因とされる蒸気圧や熱応力の計測方法、爆裂現象のモニタリング方法、爆裂に関する解析的検討、爆裂の抑制対策などに関して最新情報の概要をまとめた。

#### 4.5 耐火被覆

建築物に対する耐火被覆工法は、多くの適用実績がある。一方、国内の土木構造物に対する耐火被覆としては、主にセメント系またはアルミナ・シリカ・カルシア系の吹付け型耐火被覆材、けい酸カルシウム系およびアルミナシリカ質セラミック系のボード型耐火被覆材、その他ブランケット型耐火被覆材などが適用されている。

耐火試験方法に関しては、1986年にTNO (ビルディング・アンド・コンストラクション・リサーチの火災研究センター) が、RWS (オランダ運輸公共事業省治水本局) の定めた火災曲線下で試験される耐火被覆材を施し

たコンクリート・スラブの試験方法「BI-86-69: トンネル耐火試験手順」を発行した。1998年には、RWSとTNOが合同で、より詳細な試験方法「1998-CVB-R1161 (改訂版1) トンネルの耐火-第1部: 耐火試験手順」を作成した。その後、RWSとエフェクティス・ネーデルランド (元TNO火災研究センター) は、この1998-CVB-R1161 (改訂版1) の手順に従った耐火試験の10年以上の経験を活かし、トンネル・ライニングのための最新の耐火試験方法を作成した。この試験方法は、吹付けモルタルなどの耐火被覆システムやポリプロピレンファイバーなどの合成繊維添加などの対策によるコンクリートの爆裂抑止効果を確認するための“Spalling Test”と、耐火被覆システムの断熱性や固定方法の評価を目的とした“Thermal Insulation Test”に分けられ、“Spalling Test”は更に耐火被覆システム工法と爆裂抑止型コンクリート工法に細分されている。

#### 4.6 補修材料

RC構造物の補修用の材料としては、ポリマーセメントモルタルやエポキシ樹脂モルタルなどの欠損部の充填用の材料やコンクリート表面に施工する表面被覆材などが使われる。このうち、エポキシ樹脂モルタルや表面被覆材については、有機系の成分が主成分であり、火災時のような高温を受けると燃焼・消失してしまう。一方、ポリマーセメントモルタルは、普通モルタルに有機系のポリマーが混入された材料であり、コンクリート系材料に近い高温物性を示すものの、ポリマーの影響による相違も確認されている。そこで、ポリマーセメントモルタルの高温時 (冷却後含む) の物理的性質、力学的性質 (圧縮強度、ヤング係数、付着強度)、燃焼特性および爆裂性状などの既往の研究等を調査・整理した。

また、耐爆裂性の評価については、標準化された簡易な試験方法はなく、補修材料の選択や材料開発におけるスクリーニングの試験として、比較的簡易に実施できる耐爆裂性の試験方法が望まれている。そこで、ポリマーセメントモルタルの耐爆裂性の簡易的な試験方法について検討した。

#### 5. おわりに

コンクリート構造物の火災時の要求性能を照査 (検証) するには、火災時の挙動を精度よく算定する必要がある。こうした観点から、WG1では火災外力と火災応答に関して現状分析と課題の抽出を行なった。火災外力については、建築物に関しては課題が少ないものの、トンネルや橋梁等の道路構造物については、明確な基準や指針は存在せず、これらについて火災外力を算定する考え方を示したが、今後はその精度と妥当性について検証していく必要がある。

火災応答については、コンクリートの過渡ひずみの値が挙動解析の結果に大きく影響することが課題として挙げられる。今後は、その値を適切に設定する考え方について整理していく必要がある。

また、耐火設計を行う上での助けとなる最新の検討事例と技術の現状を紹介した。特に道路や鉄道などの構造物については、指針や示方書、標準仕様書などの整備が遅れている現状においても、実務者が耐火設計を行う上での有益な情報を提供することを一つの目標として活動してきたが、十全に目標が達成できたとは言い難い。今後は、こうした構造物についても指針や示方書、標準仕様書などが整備され、要求性能に応じた耐火設計が可能になることを望む。

一方、火害を受けたコンクリート構造物の調査・診断、および補修・補強に関する最新の技術の現状については、文献調査と委員会における審議を踏まえて取り纏めた。これは、火害の事例が学術誌等に幾つか公表されていたため可能となったものである。事例の公表が係争にかかわる可能性が高い建築物の事例では、特に検索が困難である。事例の公表は、今後の診断技術、対策技術の向上に大きく貢献すると考えられ、今後は、事例を公開できる仕組みの構築が必要である。

また、調査技術については、さらに現場で容易に診断が可能となる技術の開発が望まれる。

試案については、実際の火害事案に適用してもらい、意見をいただき、今後の指針（案）などの作成の際の参考としていただければ幸いである。

#### 参考文献

- 1) 皿井剛典・田中徹・清水陽一郎・高橋輝：孔内局部載荷試験によるコンクリート性状の把握に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.709-714，2007
- 2) fib: Fire of concrete structures-structural behavior and assessment. 7 Post-fire investigation and repair of fire-damaged concrete structures., 2008
- 3) Felicetti R.: "The Drilling-Resistance Test for the Assessment of the Thermal Damage in Concrete". Proc. Int. Workshop "Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?" -fib Task Group 4.3 ed by P. G. Gambarova, R. Felicetti, A. Meda and P. Riva publ. by Starrylink (Brescia, Italy), Milan (Italy), December 2004, pp.241-248, 2005
- 4) 社団法人日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針（案）・同解説，2010
- 5) 財団法人日本建築防災協会：被災建築物応急危険度判定マニュアル，1998
- 6) 建設省名古屋国土工事事務所：火災被災橋梁の点検マニュアル（案），1999
- 7) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，丸善，2009.3
- 8) 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研究委員会 報告書，2002.6
- 9) 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，2004.10
- 10) RILEM: Proceeding of 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Leipzig, Germany, edits. F. Dehn and E. A. B. Koeners, September, 2009
- 11) Proceeding of Sixth International Conference on Structures in Fire (SIF10), Michigan, USA, edit. V. K. R. Koudar, 2010
- 12) RILEM: Proceeding of 2nd International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Delft, Netherland, edits. E. A. B. Koeners and F. Dehn, October, 2011