

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:「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」では、現状では必ずしも明確ではない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の概要を最新の実験結果や解析手法の調査を通じて把握し、次年度以降に検討すべき項目・内容を整理した。また、耐火試験方法、耐火対策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、維持管理全体に関する最新技術の現状を取り纏めるための資料整理を行った。

キーワード: 耐火設計, 火災曲線, 火災応答, 火害診断, 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。しかしながら、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 造建築物などで生じた火災において構造物とし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、本研究委員会では、平成 21 年度はフィジビリティスタディとして、コンクリート構造物の耐火設計手法の開発や火害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・物理的変化、火災のコンクリート構造物の各種性能への影響などについて国内外の研究事例や制度・規格・法規などを調査し、次年度以降に実施すべき研究活動の方向性・内容と期待される成果について議論を行い整理した。委員会には、表-1 に示すように、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) を設けて、国内外の文献調査を実施することにより技術の現状を把握し、解決すべき課題を明確にするとともに、専門家を招聘して土木分野および建築分野の耐火設計・耐火研究の現状および火災事例に関する講演を実施し、議論を深めた。

具体的には、次年度以降の研究の継続を視野に入れて、平成 21 年度は下記の活動を実施した。

- ✓ 耐火設計法や耐火性能照査（検証）法の現状の整理
- ✓ コンクリートの高温物性試験方法の現状の整理
- ✓ コンクリート部材の耐火性試験方法の現状の整理
- ✓ 汎用的な耐火設計法、耐火性能照査（検証）法および耐火性試験方法を確立するための課題抽出と今後の研究方向の提示
- ✓ 耐火材料や耐火コンクリートに関する技術の現状の整理
- ✓ 火災を受けたコンクリート構造物の調査法および性能の評価・判定法に関わる技術の現状整理

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	古賀一八 阪口明弘	委員	小澤満津雄 小島正朗
	鈴木淳一 二羽淳一郎		志村 敦 玉越隆史		笹沼美和 谷辺 徹
	原田和典 平島岳夫		土橋 浩		常世田昌寿 濱崎 仁

*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

昨年度は、火災外力と火災応答に関する現状分析と課題の抽出を行い、種々の構造物の火災時の挙動を精度良く予測する手法の必要性を指摘した。

2.2 火災外力

標準的な建築物に対しては、可燃物の燃焼データや火災曲線を算定する手法が整備され、設計実務に供されている。

トンネルや橋梁等の交通施設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、建築物の耐火設計に用いられる燃焼データや火災曲線算定手法は交通施設に適用出来ず、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る。このため現状では、**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。また建築物についても、地下駐車場や大空間構造等の特殊な空間で発生する火災については、不明な点が多く、技術的な検討課題が残されている。

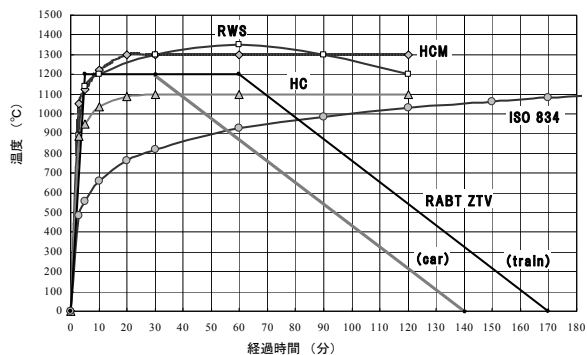


図-1 各種の火災曲線

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。現状では特殊な空間や交通施設の火災曲線を厳密に求めることには相当の困難も予想される。しかしながら**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思われる。



図-2 火災曲線算定の前提となる条件

最近、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。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ある程度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。したがって火災曲線を求める手順を標準化しておけば、燃焼実験データやトンネル諸元と利用計画をもとに設計担当者がそのトンネルにふさわしい火災曲線を決定することができるようになり、その実務的な意味は大きいと考えられる。

図-3 は、EUREKA-Project で実測された車両の発熱速度 (Heat Release Rate) の履歴である。炭化水素系火災の特徴が現れており、形状としては RABT 曲線に近いものとなっている。

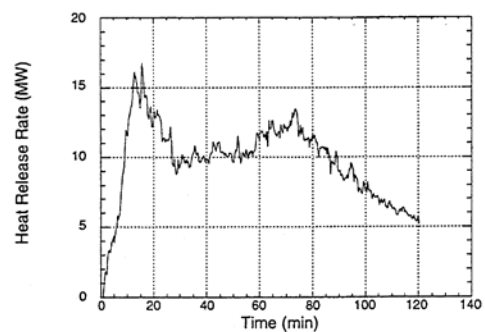


図-3 車両火災の発熱速度の実測例

Ingason¹⁾は、こうした実車両を用いた多くの燃焼実験の結果を整理し、その結果をもとに、**図-4** に示すように発熱速度の履歴を種々の曲線で近似する研究を行っており、指数近似が最も推奨できるとしている。Ingason の研究を参考にすれば、想定する車両の種別と台数に応じて発熱速度の履歴曲線を求めることができそうである。発熱速度の履歴曲線の形状は、ほぼ火災曲線と相似と考えてよい。**図-2** に示した前提条件をもとに、発熱速度の履歴を温度履歴に変換する手順を本 WG で提案することができれば、火災曲線を簡便に求めることができると考えている。

橋梁火災の場合も基本的には同じアプローチで火災曲線を提案できると考えている。橋梁で問題となるのは、ダブルデッキ構造等の床版下で火災が発生した場合である。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、開口部の比率が極めて大きい空間としてモデル化できそうである。橋梁の場合には、こうしたモデル化の妥当性を検討するとともに、可燃物としての車両に加え、周辺構造物の火災をも考慮

する必要がありと考えられる。

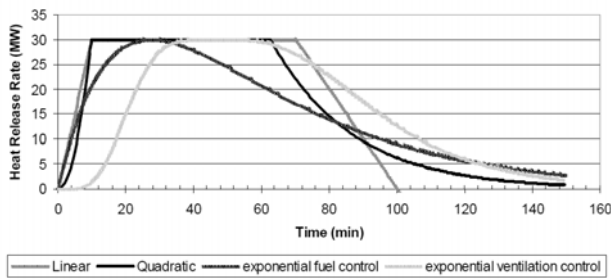


図-4 トンネル用設計火災¹⁾

2.3 火災応答

火災応答に関しては、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を提案したいと考えている。既往の荷加熱実験事例、解析事例を収集し、構造・架橋形式に応じた最適な解析手法や解析に必要な物性値について分析を行っており、さらに詳細な検討を継続する予定である。以下に、荷加熱実験と解析の事例を示す。

図-5 は、鋼板を巻いた RC 柱に梁の熱膨張を考慮して部材角を与えた軸変位の実験結果と、FEM による解析結果を比較した研究²⁾である。鋼板の熱的性質には Eurocode 4 を採用し、コンクリートの熱的性質には斎藤らの提案値 (Eurocode 4 の熱伝導率を 0.8 倍、比熱を 1.2 倍) を採用している。熱応力解析では、コンクリートの三軸応力下の応力-ひずみ関係に修正 Ahmad 式、破壊基準に Ottosen モデル、コンクリートの一軸圧縮強度、ヤング率は建築学会のデータ、過渡ひずみ係数は 4.16 を用いている。軸変位の実験結果と解析結果を比較すると、図-5 に示すように、加熱約 180 分を超えると解析値は収縮を過大に評価している。

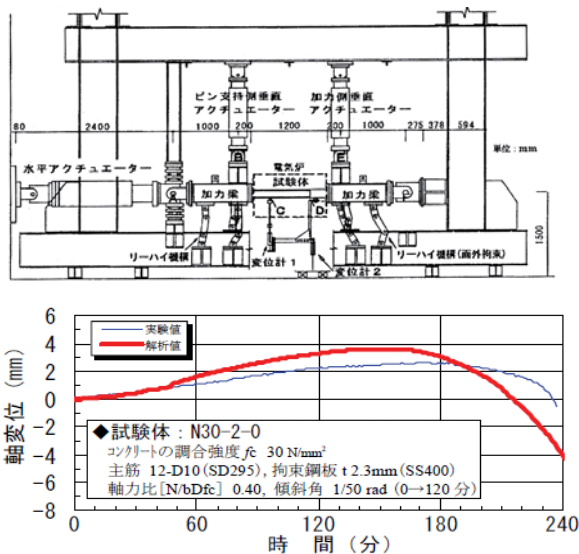


図-5 部材角を与えた柱の実験と解析の事例²⁾

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³⁾を図-6 に示す。

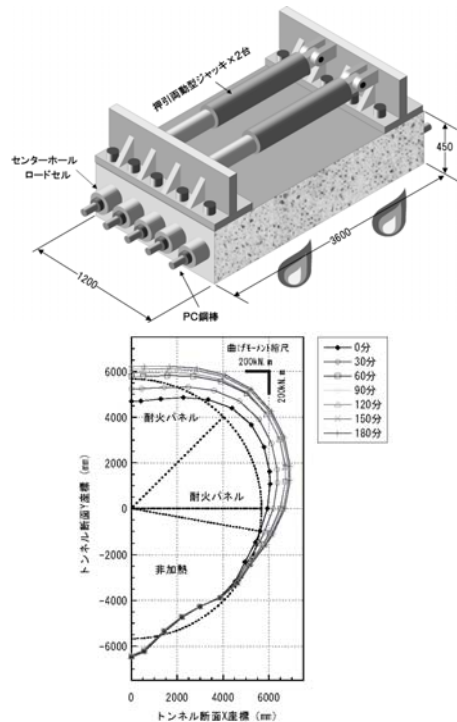


図-6 覆工の荷加熱実験と数値解析の事例³⁾

2.4 今後の課題と予想される成果

火災外力と火災応答に関して、現状分析と課題の抽出を引き続き行うとともに、内外の最新の耐火設計事例を収集する。これにより建築物のみならず地下構造物や屋外空間における火災をも評価可能な耐火設計の新たなシナリオを提示したいと考えている。具体的には以下の目標に沿って作業を進める。

- ・コンクリート系構造物の耐火性能の検証に関する現状の技術レベルを分析し、精度の高い火災応答解析を実施するために必要とされる物性値や解析技術に関する課題を明らかにする。
- ・トンネル等の地下構造物や橋梁等の屋外構造物の火災に関しては、合理的な火災曲線の設定方法を提示し、耐火対策の事例と技術の現状を示すことで、設計指針や示方書の整備が遅れている現状においても、実務者がこの種の構造物の耐火設計を行う際に有益な情報を提供する。また最近採用事例の増えている有機繊維による爆裂防止技術や内装機能付耐火板等について最新の設計事例を提示する。

3. 調査診断・補修補強 WG (WG2)

本 WG では、国内外の土木・建築構造物における火災事例や火災に関連する文献を収集し、学協会の刊行物^{4)・6)}も参考とし、調査診断・補修補強に関する情報に関して議論を進めた。また次年度からの 2 年間における WG2 の成果目標について議論した。

3.1 調査結果の概要

3.1.1 土木構造物の火災事例

土木構造物の火災事例としては高架下で発生するものの他、道路構造物では路上の通行車両による車両火災等によるものが挙げられる。路上の火災事故では高欄・舗装等の損傷を引き起こす程度であり、直ちに構造物全体の耐力に影響を及ぼすものは少なく、このような被災に対しては、車線規制を行い、適宜補修を行っている。

一方、高架下での火災の場合は橋梁の桁・床版・橋脚が損傷を受けるケースがあり、このような場合は損傷の程度により仮受け等の応急措置が必要か否かを早急に判断する必要がある。また、損傷が大きい場合は交通規制等の措置が必要となり、それが長期間に及ぶ場合、特に都市部の道路構造物等の場合では、周辺の街路にも著しい渋滞が発生し社会的に多大な影響を及ぼしかねない。今年度は、2 事例をまとめた。その 1 例について次に述べる。

(事例 1) 首都高速 5 号池袋線のタンクローリー火災事故を受けた橋梁の復旧⁷⁾

- ・火災発生：平成 20 年 8 月 3 日 (日) 午前 5 時 50 分頃
- ・交通開放：首都高速 5 号池袋線 (下り) 10 月 2 日 12 時開放、(上り) 10 月 14 日 12 時全面開放

(1) 火災の状況

首都高速 5 号池袋線を都心から埼玉方向に向けて走行中のタンクローリー(ガソリン 16kℓ, 軽油 4 kℓ 積載)が、熊野町 JCT 付近で横転・炎上した。火災から 5 時間以上経過した午前 11 時 30 分頃に鎮火した (写真-1)。損傷範囲は、1 橋脚 (池-601) を中心とした上下層 2 径間及び上層の隣接橋梁の一部に及んだ。火勢が最も激しい箇所は、約 1200℃ (約 90 分間) にまで達したものと推定された。

(2) 調査方法

RC 床版、RC 橋脚に対して損傷状況を把握するため接近目視調査により、すす付着、変色、ひび割れ、鉄筋露出、剥離等を調査した。また、圧縮強度試験リバウンドハンマーによる反発硬度試験、中性化深さ試験、鉄筋の引張強度試験を実施した。

(3) 復旧方法

損傷が激しい上層池-599~603 の 2 径間(単純 RC 床版 2 連)については全面架替えとし、その他の範囲については、損傷が局所的であったため部分補修とした。

(4) 火災発生から復旧工事完了までの交通開放状況

65t ラフタークレーンと架設用トラスにより、桁及び床版を撤去した後、上部工を復旧。橋脚部は火害の劣化範囲が限定的であったため再利用可能と判断。ポリマーモルタル吹付け工法により断面修復を行い、アラミド繊維シートを貼付け、耐震性能の確保と剥落防止対策を行った。



写真-1 被災状況全景 (鎮火直後) 7)

3.1.2 建築構造物の火災事例

建築構造物における鉄筋コンクリート造の火害劣化に関する報告は、最近の事例として詳細にわたり公表されているものを見つけることができなかった。このため、今年度は局所的な火害事例を中心としてまとめた。写真-2 は鉄筋コンクリート造建物の梁隅角部に生じた浮きであり、建築構造物の火害においてよく見られる例である。受熱温度は特に高くない場合でも、二面から熱を受けるため主筋位置まで浮きが生じ、火災後の冷却により容易に剥落が生じる。



写真-2 梁隅角部に生じた浮き

また、1973 年 7 月に米軍軍事情報センターの最上階で発生した火災を調べた。この火災では、長辺 222m、短辺 68m のほぼ中央部で火災が発生し、屋根全体の約 30% が崩壊した。この原因は、屋根スラブが別の影響により

60cm 以上もの伸びだしが生じ、41cm 角の柱がせん断破壊を起こしたもので、熱膨張変形による大変貴重な事例である。大空間を有する構造物に火災が発生した場合には、受熱温度が低い場合でも構造的に大きな被害が生じる可能性を示唆する事例である。

3.2 土木・建築構造物における課題

土木・建築構造物の火災事例を通して、次のような課題が明らかとなった。

(1) 健全性の評価基準の確立

火災事例においても、コンクリート、鉄筋等材料単体の加熱時の影響に基づいて健全性の評価が行われているものの、構造系全体としての健全性を判断する基準がないなどの課題がある。

また表面受熱温度がどの程度の深さまで構造的に影響を及ぼすのか不明である。例えば表面との温度差による部材内部応力、部材全体の温度上昇に伴う外部拘束による外部応力、部材内外の強度・ヤング係数が変化している部材の評価方法の提案も望まれる。

建築の火災調査では、基本的にはコンクリートの表層部の状態から被害等級 3（鉄筋位置へ到達しない被害の状態）までを評価している。しかし、被害等級 3 以下であっても架構に被害が及ぶ場合がある。温度は高くなくても、火災継続時間が長い場合には部材全体が伸び、柱・梁などのせん断破壊に繋がる事例もあるので構造物全体の健全性の評価が必要である。

特に土木構造物では PC 構造部の健全度を評価する指標が少ないので、緊張力下で熱影響を受ける PC 鋼材の性状に関するデータが望まれる。高温履歴を受けた PC 鋼材のプレストレスト減少量や PC 構造物としての火災の影響の検討事例を収集する必要がある。

(2) 供用の判断基準の明確化

被災した部材を補強あるいは無補強でそのまま使用するか否かの判断は、長期的な耐久性も含めた検討が必要であり、その判断に迷うケースがある。社会的影響（経済損失）等を総合的に考慮し早期の復旧、供用が求められる場合、大きな課題といえる。

また火災時のセメントの収縮・骨材の膨張などにより微細ひび割れが多く発生するが、耐久性に対してどの程度の影響があるのか不明である。

(3) 補修・補強方法の選定

基本的に被災の程度が大きい場合は再構築となるものの、部分的な断面欠損等の場合は断面修復や鋼板接着等の補強方法がこれまでの事例でも行われている。建築構造物では、文献 5)などを参考として補修・補強方法を定める場合が多いが、土木構造物では、補強方法についても明確な基準がないので、個別の判断に委ねられている。

(4) 簡易な現場調査方法の開発

補修・補強を検討する際、火災の深さや方向の正確な把握が必要である。各部位における深さ方向の受熱状況は、化学分析によって判断することが可能である。しかし、速やかな復旧が望まれる場合などでは、分析箇所数や時間的な面において問題点がある。約 1cm 単位で深さ方向の圧縮強度・ヤング係数などを把握できる技術が望まれる。

現場で簡易に計測できるリバウンドハンマーによる反発度を深さ方向に段階的に計測する方法が考えられるものの、熱劣化による物理的性質との関係も明確とは言えない。

(5) 爆裂の影響の解明

コンクリート表層部の爆裂や浮きの深さおよび範囲が、構造的にどのような影響があるのか。またどのような条件の時に爆裂や浮きが生じるのかについての解明が望まれる。

3.3 調査診断・補修補強 WG のまとめ

今年度は、土木・建築コンクリート構造物における火災事例を調べた。土木構造物では、火災事例の報告は少ないものの、火災状況から調査内容、補修・補強方法に至るまで示されていた。一方、建築構造物では、多く報告されているものの構造物の火災劣化まで詳細に示されているものはほとんど無かった。これは、係争に関わる場合が多く、公表しにくいことによるものと考えられる。

調査診断に関しては、火災診断で一般的に採用されているリバウンドハンマーによる反発度試験や中性化試験の他に現場で実施できる簡易な測定方法について議論した。補修・補強に関しては、土木における補修補強の事例が極めて少ないこと、建築においては補修方法が示されているものの、適用後の効果確認が困難なため、特に行われていないことなどがわかった。また火災に対する特有の補修・補強方法はなく、耐久性劣化が生じた場合の方法が適用されていた。

3.4 次年度以降の活動

次年度以降は、土木・建築構造物の課題をふまえ、次の 4 項目を中心として調査研究を進める。

- (1) 火災調査、診断、評価及び判断方法の事例収集と技術の現状整理
- (2) 火災後の調査、診断に関する試験方法を確立するための今後の研究課題の揭示
- (3) 火災後の部材および構造物に対する健全性評価方法の検討
- (4) 火災後の補修材料・補強方法に関する技術の整理と選定方法の提案

4. 材料 WG (WG3)

本 WG では、コンクリートの高温特性などに関する現状の知見の把握と今後取り組むべき課題の整理を目的として、コンクリート系構造物の耐火実験、コンクリートの高温特性、ならびに耐火被覆・補修材料（ポリマーセメントモルタル）・鋼材に関する文献調査を行った。また、次年度からの 2 年間における WG3 の成果目標について議論した。

4.1 調査結果の概要

4.1.1 コンクリート系構造物の耐火実験

文献検索システムを用いて 2000 年以降の文献調査を行い、分野・構造物・規模・部材・加熱曲線の項目について内容を整理・検討した。検索結果の件数は、土木に対して建築が約 3 倍であった。土木分野の構造物はほとんどがトンネルであり、橋梁に関するものが若干あった。規模別では実物大が突出していたが、これは建築部材の実験の多くが実物大で行われていることによるものと考えられる。部材別にみると、柱（建築）が多く、続いてセグメント（土木）、スラブ（建築・土木）であった。キーワード別にみると、合成構造（建築が殆ど）、有機繊維、超高強度に関するものが多かった。

建築では標準的な試験方法に沿って耐火実験が行われているケースが多く、土木では対象構造物ごとに工夫した実験がなされているケースが多い。今後は、既往の耐火実験における実験条件（加熱曲線、試験時の含水率など）を整理し、標準的な試験方法の提案についてその必要性も含められた検討が必要である。

4.1.2 コンクリートの高温特性

文献 6), 8), 9) およびこれらで引用・参考にされている文献、ならびに爆裂に関する文献 10) などから、コンクリートの高温特性に関するデータの充実度や傾向・課題などを整理した。

(1) 強度・弾性

昨今におけるコンクリートの高温特性に関する文献は、高強度コンクリートに関するものが多く、普通強度コンクリートの高温特性については少ない。加熱温度と圧縮強度および静弾性係数に関する文献は比較的多く見られるが、高温特性に対する大筋の傾向が把握されている程度であり、使用材料、調合および試験条件等によって傾向が異なる場合もあるため、データのばらつきが大きい。引張強度と曲げ強度に関するものは少ない。圧縮強度と静弾性係数に関しては、加熱冷却後（冷間試験）のデータに比べて、高温時（熱間試験）のデータが少なく、また、高温時から加熱冷却後まで通して測定したデータも少ない。

(2) 化学的性質・物理的性質・鉄筋との付着

化学的性質については、セメント硬化体と骨材に関する

研究がなされており、2000 年以前の研究成果が多い。比熱・熱伝導率・温度伝導率などの物理的性質については、建築物の工学的耐火設計手法（日本：総合防火設計法、欧州：ユーロコード）で温度依存性を考慮した設計用定数も提案されている。しかし、近年適用が拡大している高強度コンクリートに関するデータは少ない。鉄筋との付着については、2000 年以前にデンマークやドイツで行われた研究が主な情報元になっており、国内における実験データは少ない。

今後は、高強度コンクリートに関する物理的性質データの蓄積が望まれる。また、鉄筋との付着に関するデータは、高温時および冷却後におけるデータが耐火設計や火害を受けた構造物の補修・補強を検討する上でも極めて重要であることから、系統的な実験によるデータの蓄積が必要である。

(3) ひずみ関係

変形及び熱応力予測のためのひずみ挙動の基礎データとして、応力-ひずみ曲線、ひずみ-温度曲線（含熱膨張）、定常温度クリープが挙げられる。応力-ひずみ曲線については、熱間・冷間ともに圧縮試験結果が多く公表されているが、ほとんどが外部応力無しで加熱・冷却を行った結果である。ひずみ-温度曲線については、近年高強度コンクリートを中心にデータが充実しつつあるが、遷移高温下での変形測定など実験難易度が高く、結果のばらつきも大きい。また冷却過程のひずみ-温度曲線データはかなり少ない。定常温度クリープについては、さらにデータが限られているが、事故火災のような短時間の加熱条件では無視しても差し支えないとの見方がある。工学的モデル（一軸圧縮）としては、Anderberg, Schneider, Khoury など 1970~80 年代の研究成果がしばしば参照される。変位拘束加熱時における応力測定結果も幾つか公表されており、注目すべきデータといえる。

(4) 爆裂

高強度コンクリートを対象に水セメント比、含水率、骨材種類の影響、混和材料の影響、加熱条件を水準としてテストピースレベルでの実験報告が多くなされている。爆裂は、水セメント比が小さいほど、含水率が高いほど、骨材種別では石灰岩が、急加熱した場合ほど生じやすいなどの知見が得られている。高強度コンクリートを対象にした研究では、有機繊維を混入した場合の爆裂の低減効果に関する報告も見られる。爆裂の試験に用いられている試験体は $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ または $15 \times 30 \text{cm}$ のシリンダーが用いられる場合が多く、数は少ないが小型から実大の柱試験体で行われている報告もある。評価方法としては、爆裂の程度を定性的に評価するものや、重量減少率、爆裂深さ（最大、平均）で定量的に評価するものがある。最近では、爆裂の程度だけではなく、コンクリー

ト中の水蒸気圧の計測し、爆裂現象について検討している報告もみられる。爆裂現象の解析的研究については、熱応力・コンクリート内部の水分状態・熱クリープおよび強度特性などに着目した検討が行われている。解析手法としては、FEM モデルや剛体-バネモデル RBSN (Rigid-body Spring Network) などが適用され、熱-水-応力連成モデルによる解析が試みられている。

高強度コンクリートに関しては比較的多くの実験があるが、普通強度レベルでの RABT 曲線による急速加熱される場合の基礎的な実験報告は少ない。現在、爆裂の評価方法は、各研究者の方法で行われているが、爆裂のしやすさは、試験体形状、加熱方法、試験時の含水率などで大きく変わってくるため、材料としての爆裂のしやすさの評価としては、統一した試験方法の確立とデータを蓄積することが望まれる。実構造物の部材の条件は千差万別であり、これをすべて試験することは不可能であるから、材料レベルでの統一した試験方法で爆裂のしやすさの評価から、実構造物の様々な条件における爆裂の有無を推定できるようにすることも今後の課題である。

4.1.3 その他の材料の高温特性

(1) 耐火被覆

RC 構造および鋼コンクリート合成構造には、主にセメント系およびアルミナ・シリカ・カルシア系の軽量モルタル型の吹付け耐火被覆材とケイ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が適用され、その他にブランケット型耐火被覆材なども適用されている。これまで適用への検討が行われていた塗装型の発泡性耐火塗料についても、RABT 加熱曲線対応、薄膜性、非溶剤系といった特徴を活かし、近年コンクリート充填鋼管柱への適用が進められ、新たな耐火被覆材として紹介されている。最近の耐火被覆材に関連する研究は、鋼コンクリート合成構造の耐火試験および熱応力解析による耐火性評価、耐火塗料に関する性能評価およびはく落防止性などの耐久性評価や被災後の健全性評価などが行われている。海外の情報としては、RWS 加熱曲線を定めているオランダは、1998 年に定めたトンネルライニング用の耐火試験方法 (TNO-report 1998-CVB-R1161(rev.1)“Fire Protection for Tunnels”) を 2008 年に改定 (Efectis Nederland report 2008-Efectis-R0695 “Fire testing procedure for concrete tunnel linings”) している。

耐火被覆材料の高温特性や耐久性に関しては、設計面からの要求性能の議論が十分になされていないこと、高温特性や耐久性に関するデータが十分に整っていないことなどが今後取り組むべき課題として挙げられる。

(2) 補修材料 (ポリマーセメントモルタル)

独立行政法人建築研究所における研究成果をもとに、既往の研究の傾向や今後の課題を整理した。

セメントモルタルに少量のポリマーを添加したポリマーセメントモルタル (以降、PCM) は、RC 構造物の補修・補強用の材料として必要不可欠であるが、有機系の材料であるポリマーをポリマーセメント比で 5~15% 程度含むため、その耐火性については一般的なコンクリートやモルタルとは異なる傾向を示す。PCM の耐火性について系統立てて確認した研究は少なかったが、平成 17 年の建築基準法の改正以降、PCM の力学的な性状だけでなく耐火性についても研究が進められてきている。高温時の圧縮強度およびヤング係数、発熱性や不燃性についてはいくつかの実験例が報告されているが、熱間試験によるデータや圧縮強度以外の曲げや付着などの力学特性および物理的性質については報告が少ない。PCM の高温時の物性の評価のためには、ポリマー単体の燃焼特性等も重要であるが、研究例は少ない。

研究例が少ない分野、特に物理的性質についてはデータがきわめて少ない状況にあり、今後のデータの蓄積が望まれる。発熱性、不燃性などの評価方法は ISO による規定があるものの、試験に関する詳細な規定がなく、またそれらが試験結果に対して影響を及ぼすことが報告されており、試験方法の標準化が望まれるところである。

(3) 鋼材料

一般鋼・耐火鋼・ステンレス鋼ならびに高力ボルト継手・溶接継手、鋳鋼・鉄筋コンクリート用棒鋼・PC 鋼棒・高張力ケーブルに関する高温時および加熱冷却後の機械的性質と熱定数に関する実験データが公表されている。ただし、一般鋼以外の材料についてはデータが少ないのが現状であり、データの蓄積が必要である。

4.2 材料 WG のまとめ

耐火実験・コンクリート・耐火被覆・PCM・鋼材に関して文献調査を行い、データの充実度・傾向および課題を整理した。耐火実験に関しては、建築部材では標準的な耐火試験方法が定められており、土木構造物では耐火設計がなされる場合に必要に応じて耐火実験が行われている。また、材料に関しては、個々の研究によって実験方法が様々であることから、データの解釈を困難にしている場合がある。構造物の工学的な耐火設計を進展させる上で、材料・部材・構造に関するデータベースの充実や、設計用特性値のモデル化が望まれる。そのためには、材料特性や部材特性等の系統的整理を可能にする標準的な試験方法の提案が必要だと考えられる。

4.3 次年度以降の活動

WG3 では、次の項目を中心として検討を進める。

- (1) 標準的な試験方法の提案に向けた基礎資料の作成
- (2) 解析用あるいは設計用の標準的な材料物性値の提案に向けた基礎資料の作成

5. まとめ

- (1) 耐火設計における火災外力の設定には、ISO 規格などで定められている数種類の火災曲線が適用されるが、可燃物の種別や構造物の種類、さらには周辺構造物の火災などを考慮して、適切な火災曲線を定めることが必要である。
- (2) 高精度の火災応答解析を実施するためには、解析に必要な物性値や解析技術に関する課題を明らかにすることが、現段階では重要である。
- (3) 土木構造物、建築構造物での火災事例から、構造系全体としての健全性評価基準の必要性、対策要否の判定基準の明確化、補修・補強など対策の選定方法、及び簡易な現場調査方法の開発が課題として挙げられた。
- (4) 耐火試験方法では、建築部材では標準的な方法が定められている一方、土木構造物では耐火設計がなされる場合に必要に応じて耐火実験が行われている。
- (5) 火災時高温状態での材料物性は、実験方法が様々であることでデータベース化が困難であるため、今後、材料特性や部材特性等の系統的整理を可能にする標準的な試験方法の提案と、設計用特性値の設定方法の確立が必要である。

参考文献

- 1) Haukur Ingason: Design Fires in Tunnels, Second International Symposium on Safe & Reliable Tunnels Innovative European Achievements, Lausanne, 2006
- 2) 丹羽博則, 長沼一洋: 複合載荷加熱を受ける鋼板拘束 RC 柱の三次元 FEM 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.81-82, 2007
- 3) 田嶋仁志, 岸田政彦, 神田亨, 森田武: 火災高温時におけるシールドトンネル RC 覆工断面の変形挙動解析, 土木学会論文集, Vol.62, No.3, pp.606-618, 2006
- 4) 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
- 5) 日本建築学会: 建物の火害診断及び補修・補強方法, 2004.3
- 6) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック 2009, 2009.3
- 7) 桑野忠生他: タンクローリー火災事故により損傷を受けた橋梁の復旧—首都高速 5 号池袋線 復旧の設計と施工—, 橋梁と基礎, pp.13-18, 2009.4
- 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, 2009