

論文 接触・近接爆発による衝撃荷重と高温作用を受けた RC 部材の耐久性に関する基礎的研究

塚越 俊*1・小澤 満津雄*2・別府 万寿博*3・清原 千鶴*4

要旨：本研究では接触・近接爆発による衝撃荷重と高温作用を受けた鉄筋コンクリート部材の耐久性を塩水浸漬試験による物質侵入抵抗性と超音波試験およびテストハンマー試験によって評価した。物質侵入抵抗性は塩化物をトレーサーとする塩化物侵入抵抗性で評価した。その結果、爆源での浸透深さが大きいことがわかった。テストハンマー試験を用いることにより、爆源付近の圧縮強度低下状況を推定することができた。超音波伝播速度を用いることにより、加熱前後での材料の劣化状況を把握することができた。

キーワード：コンクリート, 高温作用, 耐久性, 接触・近接爆発, 塩化物量

1. はじめに

一般的に、爆発やテロなどにより損傷を受けた RC 構造物はその安全性が懸念されるため撤去されることが多い。しかしながら、2011年に発生した福島第一原子力発電所（以下、F1）における事故のように、爆発や高温作用を受けた後も継続的に使用しなければならない RC 構造物もある。また、F1において高温物質による熱損傷を受けたペDESTALは約 30 年間圧力容器を支え続ける必要がある¹⁾。

既往の研究では、爆発荷重²⁾と高温作用³⁾および塩分浸透環境における鉄筋の腐食⁴⁾それぞれの事象におけるコンクリートの耐久性を検討したものが多数報告されている。しかしながら、上記の複合作用を受けたコンクリートの耐久性を議論した報告⁵⁾は少ないのが現状である。本研究グループでは、爆轟作用と高温および塩分浸透環境下における RC 部材の耐久性の検討を試みている⁶⁾がデータの蓄積が十分とは言いがたいのが現状である。そこで、本研究では接触・近接爆発による衝撃荷重と高温作用を受けた RC 部材の耐久性評価手法を提案するための基礎的資料を得ることを目的とした。すなわち、上記の劣化事象を受けた RC 部材の耐久性を物質侵入抵抗性と超音波試験およびテストハンマー試験によって評価できるかを検討した。物質侵入抵抗性は塩化物をトレーサーとして評価した。岩本ら⁷⁾は、火害後のコンクリートの物質侵入抵抗性を評価している。すなわち、加熱温度 200℃でコンクリートの残存強度の低下が小さい状態でも、物質侵入抵抗性が大きく低下することを報告している。

なお、F1 では RC 構造物は水素爆発による爆轟作用を受けたが、本研究では試験の簡便性のため接触・近接爆

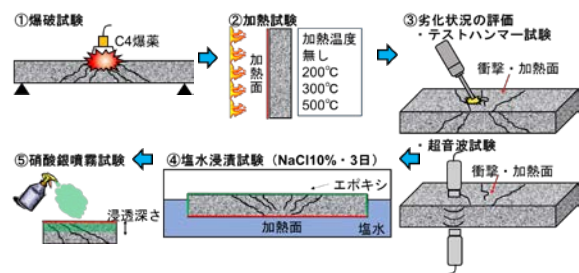


図-1 研究フロー

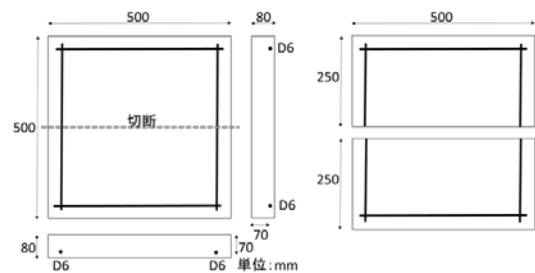


図-2 RC 床版供試体概要

発による爆轟作用を受けた RC 部材を対象とした。爆轟作用の種類は違うが、この影響については今後の検討課題としたい。

2. 実験概要

図-1 に研究フローを示す。対象は鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）とした。①RC 床版の中央上部に C4 爆薬を設置し、接触・近接爆発による衝撃荷重を与えた。②衝撃荷重を受けた RC 床版を対象として加熱試験を実施した。加熱には電気炉を用いた。加熱温度は 200℃、300℃、500℃とした。設定温度毎に加熱試験を実施し、

*1 群馬大学大学院 理工学府 環境創生理工学専攻 (学生会員)

*2 群馬大学大学院 理工学府 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 防衛大学校 建設環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託補手 博士(工学) (正会員)

表-1 示方配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	ad
%	%					
47.5	46	192	405	762	899	4.05

表-2 供試体シリーズ

No.	板厚 (mm)	薬量 (g)	スタンドオフ (mm)
1	80	50	20
2	80	50	30

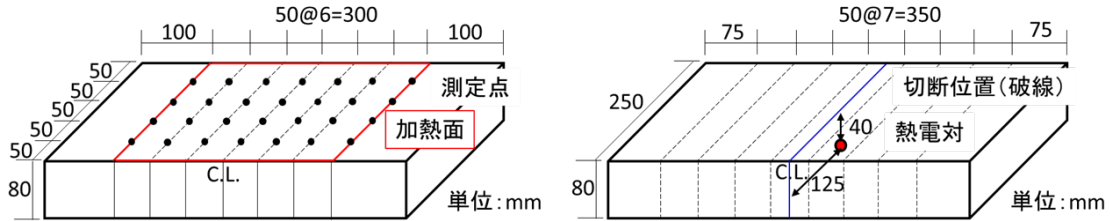


図-3 測定概要

③テストハンマー試験⁸⁾と超音波試験⁸⁾を繰り返した。
 ④塩水浸漬試験は、500℃加熱後に行った。塩分浸透深さより耐久性の評価を行った。実験の詳細を下記に示す。

2.1 コンクリート供試体

図-2 に実験に用いた RC 床版供試体の概要を示す。供試体の寸法は縦 500mm×横 500mm×厚さ 80mm とした。供試体の損傷を防ぐために D6 鉄筋を RC 床版の周囲に配置した。表-1 にコンクリートの配合を示す。W/C は 47.5%とし、圧縮強度 (材齢 28 日) は 46MPa である。

2.2 爆発試験

供試体シリーズを表-2 に示す。本研究では、取り扱いが比較的安全で成型が容易な C4 爆薬を使用した。C4 爆薬は直径/高さ=1/1 の円柱形に成型し、充填密度を 1.4g/cm³ とした。爆薬量は 50g とし、供試体から爆薬までの距離 (スタンドオフ) を 20mm と 30mm とした。供試体は爆発試験後に半分 (縦 250mm×横 500mm) に切断した。供試体を切断後、切断面のひび割れ図を作成した。なお、爆発による衝撃荷重を受けたコンクリート部材は、動的荷重を受ける。爆発条件に応じて、曲げやせん断変形による全体破壊やクレータ (表面破壊と供試体断面内のせん断ひび割れ)、スポール (表面破壊と裏面剥離)、貫通などの局部破壊が生じる⁹⁾。この破壊性状は、静的載荷試験では見られない現象である。

2.3 加熱試験

加熱試験には電気炉 (内寸: 幅 300mm, 高さ 160mm, 奥行き 260mm) を用いた。図-3 に熱電対の設置状況を示す。供試体中心部の深さ 40mm 位置までドリル削孔して K 熱電対を埋め込み、その後、断熱ブランケットで穴を塞いだ。加熱試験方法は RILEM 試験¹⁰⁾に準拠し、電気炉内の温度上昇速度は 1℃/min とした。電気炉内の温度が設定温度に達した後、設定温度を 5 時間保持し、その後自然冷却を行った。加熱は衝撃面を加熱面とした。また、衝撃面を電気炉の開口部 (縦 250mm×横 300mm)

に押し当てる形で加熱した (図-3)。

2.4 テストハンマー試験

本研究では、衝撃・加熱面に対してテストハンマーを用いて反発度による強度推定を行った。使用したテストハンマーは N 型シュミットハンマーである。図-3 に計測点を示す。図の通り、打撃場所は 50mm 間隔で 28 点とした。打撃方向は-90°とした。強度の推定には日本材料学会の提案する換算式を用いた¹¹⁾。試験結果は、爆発による衝撃荷重によるひび割れの影響も含まれており、強度推定式をどうするのかは議論が必要であるが、今後の検討課題としたい。

2.5 超音波試験

本研究では、衝撃・加熱面に対して超音波法⁸⁾による伝播速度を測定した。本試験では、透過法により伝播速度を算出した。計測された伝播時間を供試体厚さで除して算出した。なお、爆薬中心 (以下、爆源) は損傷が激しいが、残った厚みを測定し、供試体の厚さとした。計測箇所はテストハンマー試験と同様に 50mm 間隔で 28 点とした (図-3)。

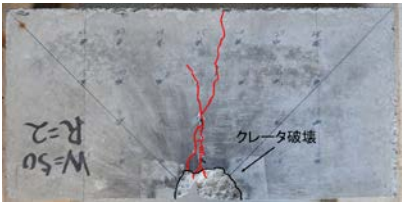

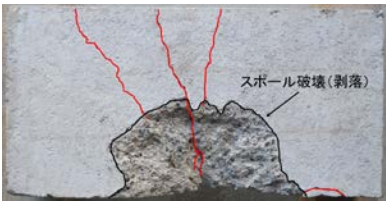
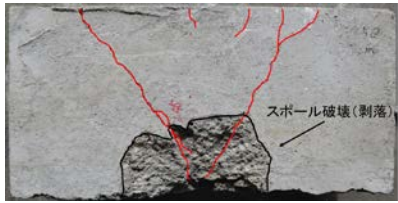
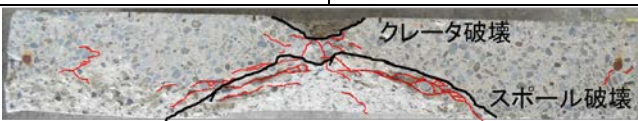
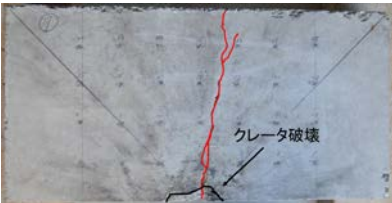
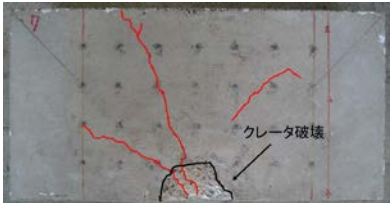


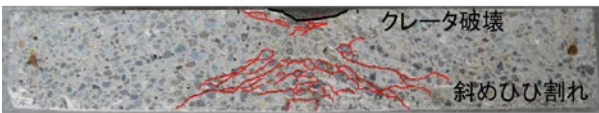
2.6 塩水浸漬試験

加熱試験とテストハンマー試験および超音波試験を実施した後、供試体の塩水浸漬試験を実施した。供試体の衝撃・加熱面以外にエポキシ樹脂を塗布し、防水処理を施し、衝撃・加熱面から塩水が浸透する一面浸透とした。塩水は NaCl 溶液 (濃度 10%) とし、供試体は塩水が入った容器に 3 日間浸漬させた。塩水の濃度と浸漬期間は予備試験により決定した。

2.7 硝酸銀噴霧試験

塩水浸漬試験を終了した供試体を用いて、硝酸銀噴霧試験を実施した。この試験は既往の研究¹²⁾より、硝酸銀溶液を噴霧することで、塩化銀が生成され、白色に発色することを利用したものである。供試体の切断位置を図-3 に示す。コンクリートカッターを用いて、供試体は

表-3 供試体の損傷状況

			加熱なし	加熱あり (500°C加熱)
No.1	スタンド オフ	衝撃面		
		裏面		
	20 (mm)	切断面		
No.2	スタンド オフ	衝撃面		
		裏面		
	30 (mm)	切断面		

加熱領域（長手方向中央の 300mm の範囲，端部から 75mm）を 50 mm 間隔に切断した。供試体切断面に硝酸銀溶液（0.1mol/L）を噴霧し，白色を呈した部分を塩化物浸透深さとした。

3. 実験結果および考察

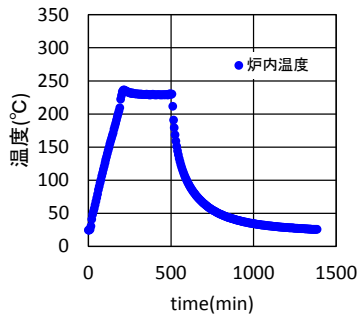
3.1 コンクリート内部の損傷評価

表-3 に爆破試験後の RC 床板の損傷状況を示す。表には，加熱無しのケースと 500°C加熱のケースを示す。表より，No.1 は，衝撃面にてクレータ破壊が生じている。切断面を見ると裏面方向にスポール破壊が生じコンクリートが剥落していることが分かる。No.2 は，衝撃面の一部にクレータ破壊が生じていることが分かる。切断面を見ると斜めひび割れが発生しているが，裏面の押し抜けは生じていないことがわかる。裏面からは大きな損傷は

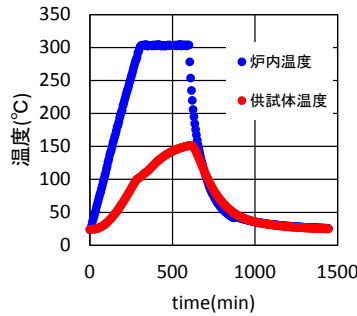
確認できないが，内部は大きな損傷を受けていることが分かる。供試体 No.1 と No.2 はスタンドオフの違いにより，破壊モードが異なることが分かる。すなわち，No.1 はスタンドオフが 20 mm であり，爆薬と供試体の距離が近いいため，衝撃圧が大きくスポール破壊を生じたと考えられる。No.2 はスタンドオフが 30mm であり，No.1 よりも供試体と爆薬との距離が遠いため，スポール破壊にまで至っていないことがわかる。

3.2 加熱時の供試体内部の温度履歴

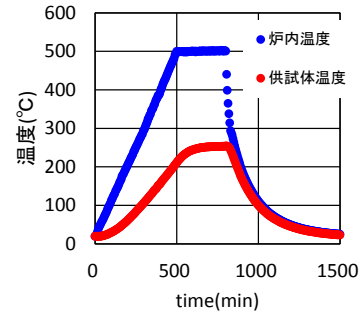
図-4，5 に No.1 と No.2 供試体の 200°C と 300°C および 500°C 加熱時における炉内温度と供試体中心部の温度履歴を示す。なお，供試体 No.1 について，200°C 加熱時の供試体中心部の温度は試験の不備により計測できていない。図より，No.2 について，200°C 加熱時の供試体中心部の最高温度は 101°C であった。300°C 加熱では，供試



(a)加熱温度 200°C

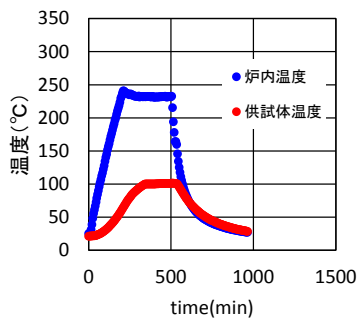


(b)加熱温度 300°C

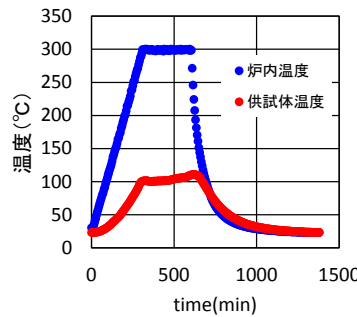


(c)加熱温度 500°C

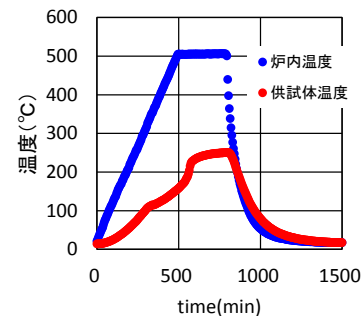
図-4 No.1 : 温度の経時変化



(a)加熱温度 200°C



(b)加熱温度 300°C



(c)加熱温度 500°C

図-5 No.2 : 温度の経時変化

体中心部の最高温度は No.1 と No.2 それぞれで 152°C と 101°C であった。500°C 加熱では、No.1 と No.2 の供試体中心部の最高温度はそれぞれ 254°C と 251°C であった。300°C 加熱時に供試体中心部の温度が No.1 と No.2 で差が生じた。これは、No.1 が爆発衝撃によりスポール破壊が生じ、損傷が大きかったため、コンクリートの厚さ方向の断面が薄くなり、熱抵抗が小さいことから最高温度が高くなったと考えられる。一方、No.2 は供試体内部にせん断ひび割れが生じていることにより、ひび割れが熱抵抗となって温度上昇が抑制されたと考えられる。加えて、300°C 加熱では加熱時にひび割れに沿って含有水の湧出しが確認できた。森田ら⁹⁾は剛飛翔体のコンクリート版への高速衝突試験後に耐火試験を実施している。高速衝突で生じた斜めひび割れが熱抵抗となって、裏面の温度上昇を抑制することを実験と解析から明らかにしている。

3.3 テストハンマー試験と超音波試験結果

図-6 に供試体 No.1, No.2 におけるテストハンマー試験より推定した圧縮強度と超音波伝播速度および供試体中央切断面のひび割れ状況を示す。ここで、爆源からの距離とは爆源から計測点までの直線距離である。

No.1 供試体について、爆源から 15cm の範囲は強度低下していることがわかる。特に、7cm までの範囲は、12~32MPa 程度まで低下していることがわかる。爆源か

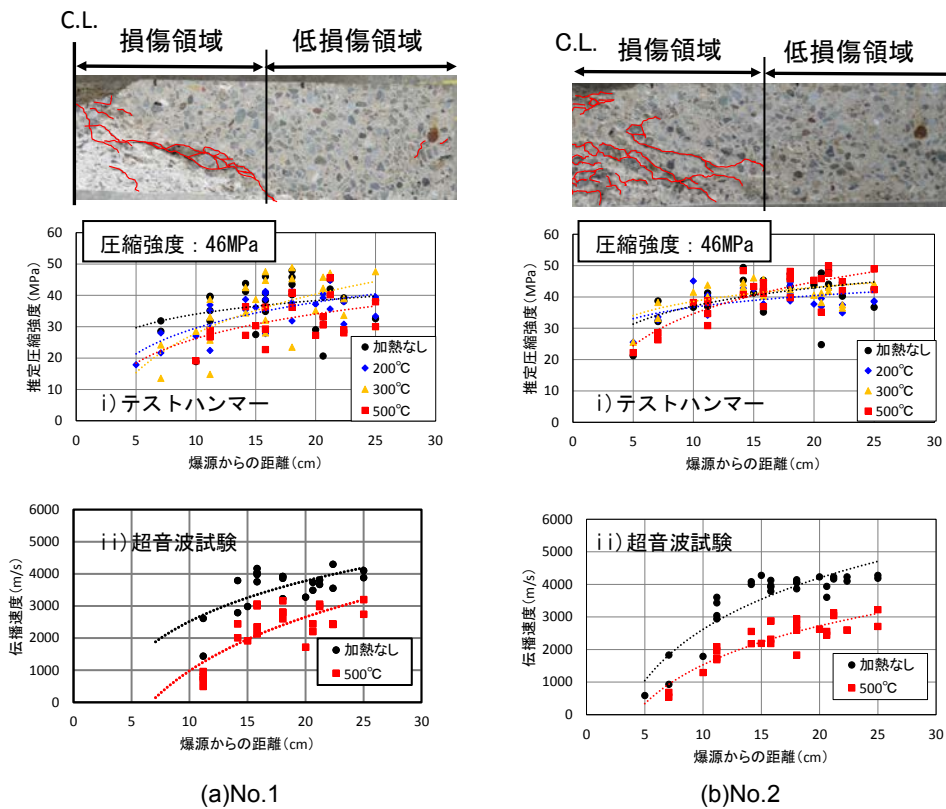
らの距離が 15cm よりも遠くなると強度低下は小さいことがわかる。また、加熱温度が 200°C から 500°C まで高くなると広範囲にわたって強度低下が大きくなることわかる。No.2 供試体について、爆源から 5cm の位置の強度低下は大きいことがわかるが、それより遠くなると強度低下は小さい。また、加熱による強度低下も小さいことがわかる。

次に超音波伝播速度について、No.1 と No.2 とともに 500°C 加熱した結果は加熱無しと比較して、伝播速度の低下がみられる。No.1 供試体は、加熱なしの場合、爆源から 11cm では伝播速度の低下がみられる。11cm よりも遠くなると、伝播速度の低下は小さいことがわかる。一方、500°C 加熱では、加熱無しに比べて、爆源から 11cm での速度低下が著しい。No.2 供試体は、ひび割れ図より、爆源から 15cm 範囲の斜めひび割れによる損傷が大きい、ひび割れの影響で伝播時間が長くなり、速度低下を起こしたものと考えられる。

3.4 硝酸銀噴霧試験

表-4 に No.1, No.2 供試体における硝酸銀噴霧試験による加熱無しと 500°C 加熱における塩化物浸透状況を示す。この図は、図-3 に示す破線で供試体を切断した断面の爆源付近の状況である。

No.1 供試体はスポール破壊により爆源付近の断面欠



(a)No.1

(b)No.2

図-6 ひび割れ状況と爆源からの推定圧縮強度と伝播速度

損とひび割れ損傷により、全面で塩化物が浸透していることがわかる。爆源付近、供試体下部での塩化物浸透深さは全面に達しており、爆源から離れるほど塩化物浸透深さが小さくなっているのがわかる。これは、爆源付近から離れるほど、ひび割れ損傷が小さくなるためであると考えられる。

No.2 供試体は、爆源付近において塩化物が全面に浸透していることがわかる。爆源から 15cm 以上離れると塩化物浸透深さは小さくなっている。また、供試体の衝撃面よりも裏面からの塩化物浸透深さが大きいことがわかる。No.2 供試体は爆源付近で斜めひび割れが生じており、そのひび割れから塩化物が浸透していることがわかる。また、爆源から離れた領域でも、塩化物が浸透していることから、衝撃荷重によるマイクロクラックが生じている可能性があると考えられる。

500°C加熱では、No.1, No.2 ともに全面で白色化したことがわかる。このことから塩化物が全体に浸透していることがわかった。既往の研究によれば 0.1mol/L の硝酸銀溶液を噴霧した後の白色化境界位置の全塩化物量は以下の式に水セメント比を代入することで算出できるとしている¹²⁾。

$$C_{bw} = -15.15(W/C) + 11.35 \quad (1)$$

ここで、 C_{bw} ：白色化境界領域の全塩化物量(kg/m³)である。本研究での水セメント比は 47.5%であるため、白色化境界位置の全塩化物イオン濃度は 4.15kg/m³となる。加熱なしと 500°C加熱では、白色部で少なくとも 4kg/m³程度の塩化物が浸透していると推定される。

4. まとめ

本研究で得られた知見を下記に示す。

- 1) 爆発試験より、クレータ破壊が生じた供試体は、裏面の押し抜けは生じていないが内部は斜めひび割れが発生していることがわかった。
- 2) テストハンマー試験より、爆源付近の強度低下は大きいことがわかった。一方、爆源から離れると強度低下は小さくなった。
- 3) 超音波伝播速度は、加熱なしの場合、爆源付近で伝播速度の低下がみられた。爆源から離れると、伝播速度の低下は小さかった。一方、500°C加熱では、加熱無しに比べて、爆源付近の伝播速度の低下が著しかった。
- 4) 塩分浸透深さは、爆源付近での塩分浸透深さが大きかった。また、爆源から離れた領域でも、塩化物が浸透していた。このことは、衝撃荷重によるマイクロクラックが生じている可能性があると考えられる。

表-4 塩化物浸透状況

		爆源	爆源	爆源	爆源
		から	から	から	から
		5cm	10cm	15cm	
供試体上部					
N o. 1	加熱なし				
	500℃加熱				
N o. 2	加熱なし				
	500℃加熱				
供試体下部					

今後、更に実験を進めて材料データを蓄積し、最終的にはRC構造部材の評価を実施したいと考えている。

謝辞

本研究は、平成26年度科学技術研究補助金基盤研究

(C) No. 26420561(代表：今本啓一)の補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：東日本大震災に関する特別委員会報告書，2013年3月
- 2) 大久保一徳，大山浩代，別府万寿博，大野友則，片山雅英：C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート板の損傷評価，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1273-1283，2007.3
- 3) 例えば，森田武，西田朗，刑部 章，河内二郎：耐火性に優れた超高強度コンクリートの仕様と施工，コンクリート工学，Vol. 39， No. 11 pp. 18-23,2001
- 4) たとえば，田中伸幸，内田慎哉，鎌田敏郎，関 翔太：塩害環境下にあるRC部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法とその有効性の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.886-891，2012
- 5) 森田武，別府万寿博，鈴木誠：剛飛翔体の高速衝突を受けたコンクリート板の火災時における温度性状に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1312-1317，2014
- 6) 小澤満津雄，岩本早耶香，塚越俊，今本啓一：水素爆轟と高温および塩水浸漬作用を受けたRC部材の物質侵入抵抗性，セメント技術大会講演梗概集，pp.374-375，2014.5
- 7) 岩本早耶香，迫井裕樹，小澤満津雄，川邊清伸：火害を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36,No.1,pp.820-825,2014
- 8) 2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，土木学会，pp.212-213，2013.3
- 9) 大久保一徳，別府万寿博，大野友則，片山雅英：C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート板の損傷評価，構造工学論文集 A，Vol. 53A， pp. 1273-1283，2007
- 10) 日本コンクリート工学会：コンクリートの耐火性能に関する研究委員会報告書，2012.5
- 11) 日本材料試験協会：シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度推定方法指針(案)，材料試験，第7巻第59号，pp.40-44，1958
- 12) 青木優介，鳴野慶次，三好佑果，鈴木正志：硝酸銀溶液噴霧による硬化コンクリート中への塩化物イオン浸透予測：コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.759-764，200