

論文 高温作用と塩水作用を受けた RC 部材の曲げ破壊特性と耐久性評価

阿久津 裕亮*1・小澤 満津雄*2・山本 哲*3・迫井 裕樹*4

要旨: 本研究では、鉄筋コンクリート(以下、RC)角柱を対象として、高温作用と塩水作用を受けた場合の耐久性の影響を検討を行った。すなわち、①Control 供試体と②500°Cで加熱した供試体、③塩水浸せき試験供試体、④加熱後に塩水に浸せきした供試体について曲げ載荷試験を実施した。その結果、②500°Cで加熱したものが斜め引張破壊(せん断破壊)を示し、①と比較して破壊荷重は最も低下した。一方、④の供試体は①と同様に曲げ破壊を生じた。

キーワード: 複合劣化, 耐久性, RC 部材, 曝露試験, 超音波試験, 塩水浸せき試験, 荷重-変位曲線

1. はじめに

2011年3月に起きた東日本大震災の津波により、福島第一原子力発電所(以下、F1)は多大な被害を受けた¹⁾。この事故において、原子炉が格納された RC 建屋が高温作用と塩水作用および爆轟作用と放射線の作用を受けた。事故から8年経過した現在、一部の RC 構造建屋は、そのまま性能を保持し続ける必要がある状況である。すべての核燃料デブリを除去して除染作業が完了し、RC 建屋が解体されるまで今後30~40年は、継続的に維持管理し、続ける必要がある。これまでに、爆轟を受けた鉄筋コンクリート部材の耐久性評価について検討がなされている²⁾。火災により高温作用を受けた RC 構造物は、かぶり部分が損傷し耐久性が低下することが懸念される。加熱により表面および内部に微細ひび割れが発生し、さらにはセメント水和生成物の熱分解が生じる危険性がある³⁾。このように火害を受けたコンクリートはかぶりにおけるバリア機能が低下することが予想される。さらにバリア機能の低下に伴い、コンクリート表面から中性化の要因となる酸素や二酸化炭素、塩害の原因である塩化物イオンなどの劣化因子が侵入し、耐久性上問題となることがある。加えて、塩化物浸透環境下に曝された場合、内部鉄筋の腐食が進行し、構造部材としての耐力低下が懸念される。既往の研究では、高温作用⁴⁾および塩化物の浸透における鉄筋の腐食⁵⁾、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。一方、本研究グループでは、高温作用を受けた後の RC 部材の耐久性評価の検討を進めている⁶⁾⁹⁾。しかしながら、高温作用と塩水作用を受けた RC 部材の力学性能について検討した事例は少ないのが現状である。そこで本研究では、高温作用と塩水作用を受けた RC 部材の曝露試験を実施し耐久性評価の基礎資料を得ることを目

的とした。すなわち、高温加熱と塩水作用させた後、屋外で曝露した RC 角柱供試体の曲げ載荷試験を行った。曝露試験後に超音波試験を実施した。曲げ載荷試験後、塩水の浸透状況を硝酸銀噴霧試験により確認した。

2. 実験概要

2.1 供試体

表-1, 2にコンクリートの配合およびフレッシュ性状と力学特性を示す。コンクリートは JIS 認定工場の生コンを使用した。W/Cは56.5%とし、セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)を使用した。細骨材は S1: 砂岩砕砂(表乾密度:2.62g/cm³)、S2: 石灰岩砕砂(表乾密度:2.64g/cm³)を使用した。粗骨材は G1: 輝緑凝灰

表-1 配合

W/C	単位量 (kg/m ³)						Ad.
	W	C	S		G		
			S1	S2	G1	G2	
56.5	183	324	458	457	631	271	3.75

表-2 フレッシュ性状と力学特性

スランプ cm	空気量 %	圧縮強度 N/mm ²
18.5	5.8	30.1

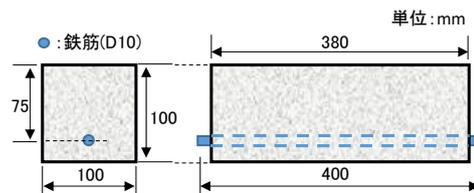


図-1 供試体概要

*1 群馬大学 理工学部 環境創生理工学科 4年生 (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 群馬大学 大学院理工学府 環境創生理工学プログラム (学生会員)

*4 八戸工業大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

岩砕石(表乾密度: 2.89 g/cm³), G2: 珪岩砕石(表乾密度: 2.65 g/cm³)を使用した。混和剤はAE減水剤を使用した。図-1に本実験に用いた供試体の概要を示す。対象供試体はRC供試体とし、供試体寸法は高さ100×幅100×長さ380mmとした。鉄筋は長さ400mmのD10(SD295A)を使用した。コンクリートの有効高さは75mmとした。供試体は脱型後、28日間水中養生を行った。

2.2 実験フロー

表-3に実験条件を示す。No.1は比較対象とし、劣化損傷作用を与えないControl供試体とした。No.2は500°Cで加熱したのち封緘して保管した。No.3は塩水浸せき試験後に、屋外で曝露試験を実施した。No.4は500°C加熱試験後、塩水に浸せきした。その後、実験棟の屋外で曝露試験を実施した。図-2に実験フローを示す。

ここでは、No.4のケースについて説明する。①供試体を作製後、28日間水中養生を行い、②電気炉を用いて加熱試験を実施した。図-3に加熱曲線を示す。加熱は4面加熱とした。鉄筋が露出している部分は断熱材で被覆し、鉄筋が直接加熱されることを防いだ。加熱条件は既往の報告¹⁰⁾を参考に、1°C/minで500°Cまで加熱し5時間保持して、自然冷却とした。その後、③塩水浸せき試験(NaCl溶液で濃度10%)を28日間実施した。露出した端部の鉄筋は直接塩水に接触するのを防ぐためビニールテープで

被覆した。その後、④屋外で17ヶ月の曝露試験を実施した。曝露試験の期間、ひび割れの状況を確認した。曝露試験後、⑤RC角柱供試体の曲げ載荷試験を実施した。詳細は下記に記す。

2.3 超音波試験

超音波試験は、透過法を用いた。測定時の伝搬時間と探触子間の距離により伝搬速度を計算した。測定では、鉄筋部を避け、探触子間距離は100mmとした。測定位置は長手方向に25, 190, 355mmとして、各位置における値の平均値を超音波伝搬速度とした。

2.4 曲げ載荷試験

角柱の曲げ載荷試験はJIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」を参考にし、三等分点載荷を実施した。等分点間隔は100mmとした。図-4に曲げ載荷試験の概要を示す。荷重計容量は30kNのものを用いた。荷重と変位の関係を検討するため、等分点位置に剛性の高いL型の金具を設置し、変位計許容値(容量: 10mm, 感度1/100mm)を配置した。L型金具は供試体の底面と平行になるように設置した。

2.5 硝酸銀噴霧試験

各供試体の塩化物浸透の程度を確認するため、曲げ載荷試験後の供試体を対象として、硝酸銀噴霧試験を実施した。各供試体を長手方向に割裂し、割裂面に硝酸銀溶

表-3 実験条件

試験体No.	加熱	塩水	曝露
No.1-1	/	/	/
No.1-2	/	/	/
No.1-3	/	/	/
No.2-1	○	/	/
No.2-2	○	/	/
No.2-3	○	/	/
No.3-1	/	○	○
No.3-2	/	○	○
No.3-3	/	○	○
No.4-1	○	○	○
No.4-2	○	○	○
No.4-3	○	○	○

○: 試験実施 /: 試験未実施

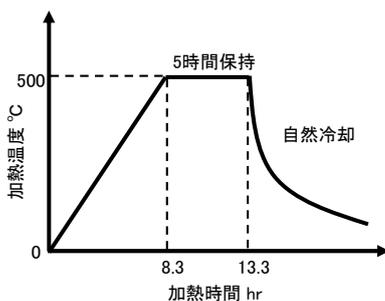


図-3 加熱曲線

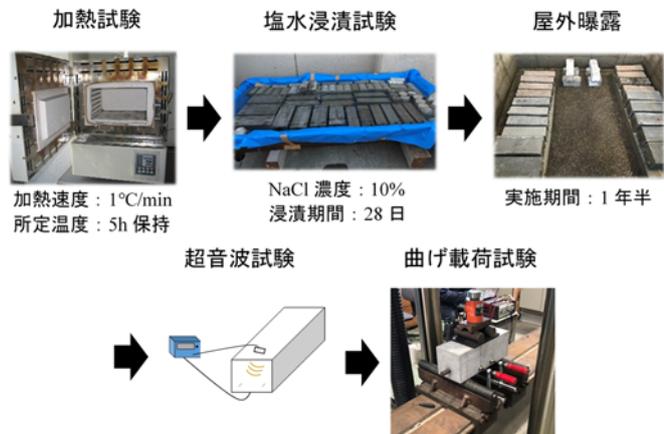


図-2 実験フロー

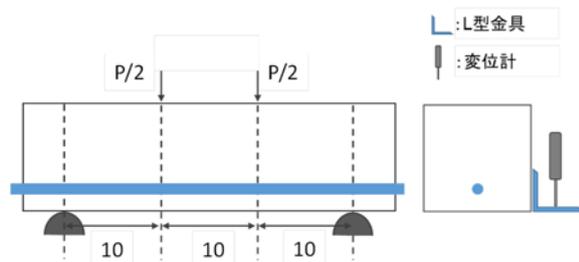


図-4 曲げ載荷試験概要

液を噴霧した。その後十分乾燥させ、白色化した部分を塩化物浸透深さとした。併せて、鉄筋の腐食状況を目視で確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 曝露試験後の供試体の性状 (No. 3, 4)

図-5にNo.3とNo.4の曝露試験後の状況を示す。No.3の供試体は、端部の露出した鉄筋が腐食していることを確認した。その影響で3体中2体において、供試体端部の10mmの範囲で幅0.1mm程度のひび割れが生じていた。No.4についても、No.3同様に露出した鉄筋の腐食が確認できた。加えて、3体とも供試体底面の長手方向に鉄筋の沿ったひび割れが確認できた。ひび割れ幅は0.1mmであった。このことについて、No.4は500°Cの加熱によって、コンクリートマトリックスが損傷し剛性の低下と物質侵入抵抗性が低下した。その後、塩水浸せき試験を実施したことで、塩水がNo.3よりも浸透しやすくなった。鉄筋位置まで塩化物イオンが浸透することで、鉄筋が腐食しその膨張圧でひび割れが発生したと考えられる。

3.2 超音波伝搬速度

図-6に各条件における超音波伝搬速度およびNo.1(Control)を基準としたときの超音波伝搬速度比を示す。超音波伝搬速度の平均値はNo.1, 3, 4でそれぞれ3690m/s, 3879m/s, 3505m/sであった。No.2は加熱の影響で2208m/sと大きく低下した。

次に、ControlのNo.1を基準として比較すると、加熱のみを受けたNo.2の超音波伝搬速度比は0.60となり最

も小さい結果となった。これは、加熱されたことでセメントマトリックスと粗骨材の内部組織が損傷し、ひび割れが生じたことが考えられる。

No.3は塩水浸せき後に屋外に曝露したが、No.1と大きな差異は見られなかった。No.4はNo.1と比較すると、0.95程度で速度低下はわずかであった。No.2とNo.4を比較した場合、No.2とNo.4はそれぞれ0.60と0.95となった。このことについては、No.4は500°C加熱後に塩水浸せきを行ったため、水分供給による再養生効果によって、コンクリートの強度が回復したことが要因であると考えられる。また、曝露試験中に屋外に設置したが、雨水の供給によってさらに再養生が進んだことが考えられる。加熱後の水分供給による再養生効果について既報においても報告がある¹¹⁾。

3.3 荷重-変位曲線

図-7(a)~(d)と表-4, 5にNo.1~No.4の曲げ載荷試験結果と破壊性状および曲げ試験後の写真を示す。No.1は3体中2体が曲げ破壊して鉄筋が降伏し、圧縮領域が圧壊することで終局状態となった。1体はせん断圧縮破壊を生じた。鉄筋降伏荷重は48kNであった。No.2は3体ともに斜め引張破壊(せん断破壊)を生じた。せん断破壊時の荷重は29kN程度であった。No.3は3体とも曲げ破壊を示した。鉄筋降伏荷重は50kN程度となり、終局曲げ荷重は60kNであった。No.4は曲げ破壊を示した。鉄筋降伏荷重は47kN程度であり、終局荷重は55kNであった。No.3とNo.4ともに最終的には圧縮領域が圧壊した。

3.4 高温作用と塩水作用が曲げ破壊に与える影響

No.1のControl供試体とNo.2加熱供試体の比較につい

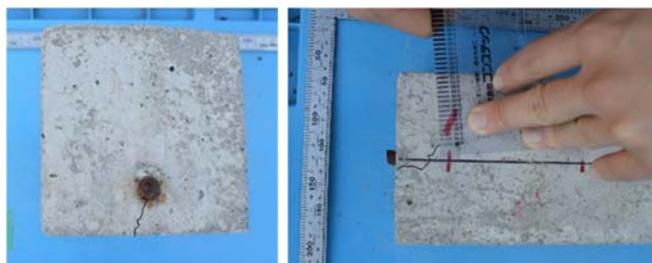


図-5(a) No. 3の曝露試験後の供試体状況

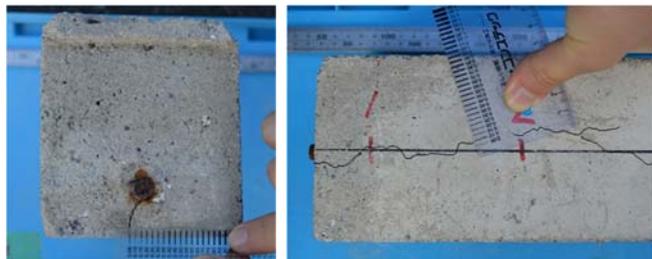


図-5(b) No. 4の曝露試験後の供試体状況

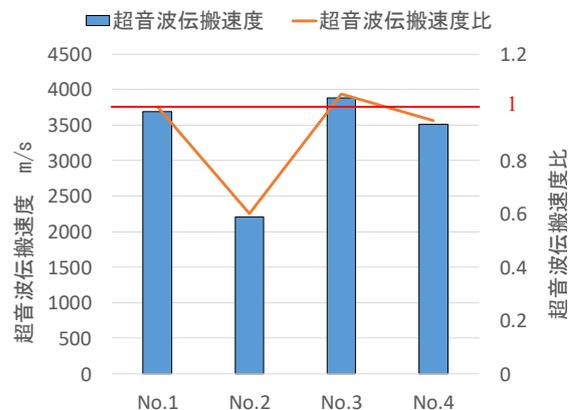


図-6 超音波伝搬速度・超音波伝搬速度比

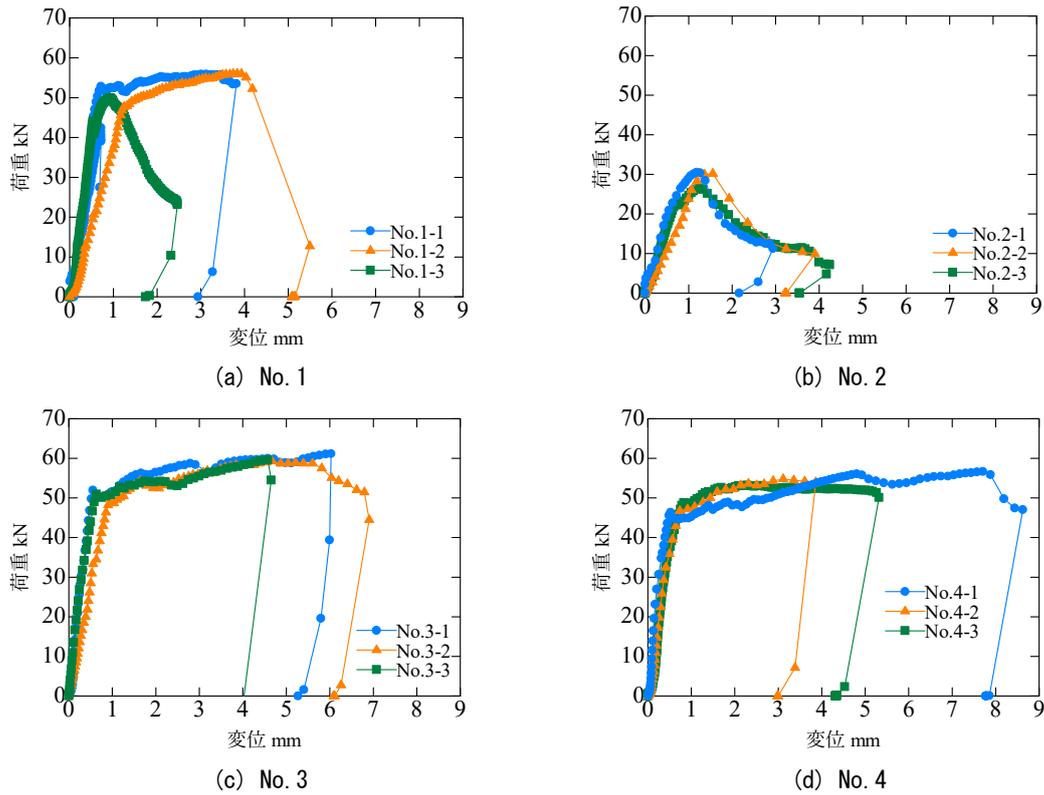


図-7 荷重-変位曲線

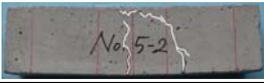
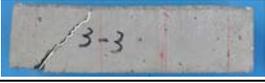
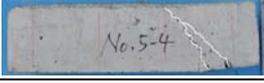
表-4 破壊挙動

No.		鉄筋降伏 kN	終局耐力 kN	破壊形態
1 (Control)	①	52.8	55.9	曲げ引張破壊後に圧壊
	②	47.7	56.1	曲げ破壊し鉄筋降伏後にせん断
	③	43.5	50.0	斜め引張破壊
	平均	48.0	54.0	
2 (加熱)	①	—	30.5	斜め引張破壊
	②	—	30.2	斜め引張破壊
	③	—	26.5	斜め引張破壊
	平均	—	29.1	
3 (塩水浸せき)	①	51.9	61.2	曲げ引張破壊後に圧壊
	②	48.2	59.3	曲げ引張破壊後に圧壊
	③	51.0	59.6	曲げ引張破壊後に圧壊
	平均	50.4	60.0	
4 (加熱+塩水浸せき)	①	46.4	56.6	曲げ引張破壊後に圧壊
	②	46.7	54.8	曲げ引張破壊後に圧壊
	③	48.8	53.2	曲げ引張破壊後に圧壊
	平均	47.3	54.9	

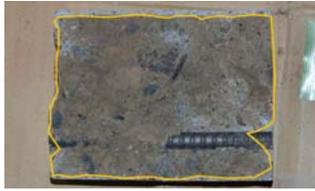
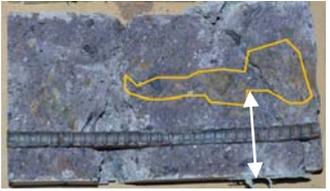
て考察する。No.1 はせん断圧縮破壊もしくは曲げ破壊が先行した。これは、せん断スパン比(a/d)の影響と考えられる。すなわち、a/dが1.3程度と小さいため、このような破壊性状を示したのだと考えられる¹²⁾。一方で、No.2

は加熱による影響でコンクリートの圧縮強度と弾性係数が低下していることが考えられる。これにより、せん断引張破壊となったと考えられる。図-6の超音波伝播速度比においても、No.1と比較してNo.2は0.60まで低下

表－5 曲げ載荷試験後の破壊状況

	No.1 Control	No.2 500℃加熱	No.3 塩水浸せき+曝露	No.4 500℃加熱+塩水浸せき曝露
①				
②				
③				

表－6 硝酸銀噴霧試験後の供試体状況

No.1	No.3	No.4
		
浸透無し 鉄筋腐食無し	浸透深さ:50mm 部分的に鉄筋腐食あり	全面浸透 全体的に鉄筋腐食あり

している。加えて、今回の加熱試験では 500℃で 5 時間保持した。既往の知見で圧縮強度残存率と温度の関係が示されているが、500℃加熱のケースでは残存強度比が 0.5 程度となっている¹³⁾。このことから、コンクリートの圧縮強度の低下が破壊性状に影響を与えていると考えられる。

次に、No.1(Control)供試体と No.3 塩水浸せき後曝露試験供試体の比較について考察する。No.3 は曲げ破壊先行型となった。この点について、No.3 は塩水浸せき試験時に塩化物がコンクリート内部に浸透すると同時に、水分も供給することになり、水和反応がさらに進行したと考えられる。これにより、圧縮強度が増加したと推察される。曝露試験においては、コンクリート中の塩化物の影響により鉄筋の腐食が予想されたが、マトリックスが密実であるため鉄筋腐食は進行しなかったと考えられる。曝露試験後のコンクリートの状況を確認したが、端部に鉄筋腐食の影響によるひび割れは観察されるものの(図—5a)、供試体全体にひび割れは生じていないことを確認している。

次に、No.1(Control)供試体と No.4 加熱+塩水浸せき後曝露試験供試体の比較について考察する。No.4 は曲げ破壊先行型の破壊形式を示した。終局曲げ破壊荷重については、No.1 が 54kN であるのに対し、No.4 は 54.9kN とほぼ同等の値が得られた。これについて、No.4 は加熱 500℃により強度は一時低下したと考えられる。その後、

塩水浸せき試験によって水分が供給されたことで再養生により圧縮強度の回復が生じたと考えられる。一方、加熱によるセメントマトリックスの損傷によって、物質侵入抵抗性が低下し、塩水浸せき試験で塩化物が浸透したため、曝露試験では、鉄筋の腐食が進行したと考えられる。曝露試験後の供試体には、供試体長手方向に鉄筋の腐食生成の膨張によるひび割れが確認できた(図—5b)。他方で、鉄筋の腐食生成物の膨張圧が作用し剛性が高くなったため、損傷が生じても曲げ破壊先行型の破壊を示し耐力の低下も見られなかったと考えられる。ある程度の範囲では、鉄筋の腐食生成物の膨張圧によって、耐力が低下しないことが報告されている¹⁴⁾。

3.5 硝酸銀噴霧試験結果

表－6 に No.1 と No.3 および No.4 に硝酸銀噴霧試験結果を示す。3 シリーズともに曲げ載荷試験後に供試体を割裂して塩化物の浸透状況を確認した。No.1(Control)供試体は、塩水浸せき試験は実施していないが、比較のために結果を示した。No.1 は割裂面全体が褐色となり、塩化物が確認されなかった。また、鉄筋も腐食していないことがわかる。次に、塩水浸せき試験のみを実施した No.3 は、中心の一部のみが褐色となったが、その周囲は白色を呈していることが確認できた。白色であることは塩化物が浸透していることを示すものである。褐色が確認された部分までの塩化物浸透深さは、外周面から中心へ向かって 50mm であった。また、鉄筋腐食が部分的

に観察できた。次に、加熱後に塩水浸せきした No.4 供試体は、割裂面の全面で白色を呈した。また、鉄筋全体で腐食が確認できた。No.3 と No.4 を比較すると、加熱の有無によって塩化物浸透の程度に顕著な差が見られた。割裂面全体で白色を呈した No.4 は、500°C加熱により水和生成物が分解され、表面付近に微細ひび割れが発生したことで物質侵入抵抗性が低下し、塩化物が浸透しやすくなったと考えられる。

以上より、高温作用と塩水作用を受けた RC 角柱供試体を 17 ヶ月の曝露試験と曲げ載荷試験を実施することで力学性能に与える影響を検討した。本研究の範囲では、高温作用によって、RC 角柱の曲げ試験結果が曲げ破壊先行型から斜め引張破壊(せん断破壊)になった。加熱によって、コンクリートの圧縮強度が低下したことが影響したと考えられる。一方で、高温作用を受けたあと塩水作用を受け曝露試験を行った場合、加熱によって一時的に強度は低下するが、塩水作用時の水分供給によって強度回復することが考えられる。また、鉄筋腐食が生じて、曲げ耐力は低下せず、影響は少なかった。

しかしながら、今回の結果は小型の RC 角柱供試体であり、曝露試験も 17 ヶ月と短いため、今後更に供試体の寸法と加熱温度および塩水浸せき期間と曝露期間を実験因子として、検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、高温作用と塩水作用を受けた RC 角柱供試体の曝露試験と曲げ載荷試験を実施し、力学性能へ与える影響を検討した。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 高温作用によって、RC 角柱の曲げ試験結果が曲げ破壊先行型から斜め引張破壊(せん断破壊)になった。加熱によって、コンクリートの圧縮強度が低下したことが影響したと考えられる。
- 2) 高温作用の後に塩水作用を与えた供試体に曝露試験を行った場合、加熱によって一時的に強度は低下するが、塩水作用時の水分供給によって強度回復することが考えられる。また、鉄筋腐食が生じて、曲げ耐力は低下せず影響は少なかった。

今後更に実験因子を検討して、データを増やす必要があると考えられる。

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, pp.524-527, 2013 年 3 月

- 2) 清敦俊, 清原千鶴, 別府万寿博, 小澤満津雄: 爆轟を受けた鉄筋コンクリート部材の耐久性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.555-560, 2018
- 3) 高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書: 日本コンクリート工学会, 2017.9
- 4) 森田武, 西田朗, 刑部章, 河内二郎: 耐火性に優れた高強度コンクリート仕様と施工, コンクリート工学, Vol.39, No.11, pp.18-23, 2001
- 5) 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討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.886-891, 2012
- 6) 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
- 7) 若林瑠美, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 川邊清伸: 火災損傷を受けた普通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基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1003-1008, 2015
- 8) 向井佑真, 小澤満津雄, 谷辺徹, 小林孝一: 火災劣化後のコンクリートの物質移動抵抗性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1147-1152, 2013
- 9) 六本木日菜子, 小澤満津雄, 鉄羅健太, 杉野雄亮: 高温加熱された鉄筋コンクリート部材の物質侵入抵抗性と内部鉄筋の腐食状況, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1011-1016, 2018
- 10) 杉野雄亮, 谷辺徹, 前田祐貴, 小澤満津雄: 加熱により細孔構造の変化したコンクリートの物質侵入抵抗性と表面含浸材の補修効果に関する検討, コンクリート構造物の造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, Vol.17, pp.155-160, 2017
- 11) 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博, 河辺伸二: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.353-358, 2003
- 12) 中村光, 内田裕市, 伊藤睦, 木全博聖: コンクリートを学ぶ一構造編一, 理工図書, 2016
- 13) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック 2017
- 14) 佐々木淳, 丸山久一, 清水敬二, 米田直也: 鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.2, pp.139-144, 1991