論文 部分高温作用と塩水作用を受けた RC 部材の鉄筋腐食状況と曲げ耐 力評価

富士田 玲*1・阿久津 裕亮*2・杉野 雄亮*3・小澤 満津雄*4

要旨:本研究では,部分高温作用と塩水作用を受けた RC 構造物を想定し,複合作用を受けた RC 部材の耐久 性評価を目的とし実験を行った。高温作用と塩水作用を受けた RC はりの曲げ載荷試験を行い,耐荷性を評価 した。併せて塩化物浸透状況と鉄筋腐食状況の確認を行い,損傷領域の違いと鉄筋腐食程度が耐力および耐 久性に与える影響を検討した。その結果,加熱と塩水浸漬を行った RC はりでは内部鉄筋の腐食が確認された。 一方で,曲げ耐力の大きな低下はみられなかった。加えて,加熱と塩水浸漬を行った RC はりの SEM-EDS 分析 を実施し,塩水浸漬を行った供試体のひび割れ部にエトリンガイトが生成されていることを確認した。 キーワード:高温加熱,塩水作用, RC はり,曲げ耐力,鉄筋腐食

1. はじめに

コンクリート構造物が火災などの高温に曝される場合, コンクリート表面付近からセメント水和生成物の熱分解 および微細ひび割れが生じる¹⁾。その結果,コンクリー トのバリア機能が低下することで物質侵入抵抗性が低下 し²⁾,表面から中性化の原因となる酸素や二酸化炭素が 侵入しやすくなる。加えて,塩害の原因となる塩化物イ オンなどの劣化因子が侵入し内部鉄筋の腐食が発生する ことで,鉄筋コンクリート部材の耐力低下に繋がる危険 性がある。一方,RC部材の複合的な劣化損傷の事例とし て,2011年に発生した福島第一原子力発電所事故がある。 この事故では,原子炉が格納されたRC建屋が高温作用, 塩水作用,爆轟作用および放射能作用を受けた。しかし 現状では除染作業が完了するまでの数十年間,RC建屋 の構造性能を維持しなければならない状況にある。

既往の研究では、高温作用および塩水作用、それぞれの作用を受けたコンクリートの耐力および耐久性を検討したものが多く報告されている^{3),4)}。本研究グループでは、高温作用を受けた RC 部材の耐久性評価の検討を行っているが⁵⁾、複合劣化による耐久性、すなわち高温作用と塩水作用の複合作用を受けた RC 部材の耐久性を検

討した報告は少ないのが現状である⁹。そこで本研究は, 高温作用と塩水作用を受けた RC 構造物を想定し,複合 作用を受けた RC 部材の耐力および耐久性の評価を目的 とした。すなわち,部分高温作用と塩水作用を受けた RC はりの曲げ載荷試験を行い,耐荷性を評価した。併せて 塩化物浸透状況と鉄筋腐食状況を確認し,損傷領域の違 いと鉄筋腐食程度が耐力および耐久性に与える影響を検 討した。加えて,加熱と塩水が作用した RC はりの SEM-EDS 分析を実施した。

2. 実験概要

図-1 に本研究の実験フローを示す。作製したコンク リートはり供試体を対象に、①加熱試験を行い、②対象 供試体の塩水浸漬試験および気中曝露後、③超音波伝搬 速度試験、④曲げ載荷試験を行った。その後供試体の切 断を行い、⑤硝酸銀噴霧試験、⑥鉄筋腐食量測定および ⑦SEM-EDS 分析を実施した。

2.1 供試体概要

図-2 に,はり供試体の概要を示す。供試体は,高さ 150mm×幅100mm×長さ1500mmとし,有効高さ125mm 位置に主筋として D13 の鉄筋を2本配置した。表-1に



*2 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)

*3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 修士(工学) (正会員)

*4 群馬大学大学院 理工学府教授 博士(工学) (正会員)



図-2 はり供試体概要

表-2	コンクリー	トの配合表
-----	-------	-------

W/C	s/a	単位重量(kg/m ³)						
		W	С	S		G		阳千山文山
				S 1	S2	G1	G2	化化们们
49.5%	51.0%	183	370	439	439	634	271	4.07

衣 J ノレノノユビ(MJよび)J手行住					
スランプ	空気量	弾性係数	圧縮強度		
(cm)	(%)	(GPa)	(MPa)		
19.5	5.6	30.3	43.1		

表-3 フレッシュ性状および力学特性

実験条件を示す。加熱無し(No.1)と引張領域加熱(No.2) および圧縮領域加熱(No.3)の3種類の供試体を用意し た。No.1は、加熱無し(N:基準)と塩水浸漬有り(S) とした。No.2とNo.3は、加熱のみ(F)と加熱と塩水浸 漬有り(S)とした。全体で計6本の供試体を作製した。 コンクリートの内部の温度を測定するために、熱電対を はり中央部に設置した。設置位置は、No.2において加熱 面から0,25,50,75,150mmとし、No.3において加熱 面から0,25,50,75,125(主筋位置),150mmとした。 2.2 配合およびフレッシュ性状

表-2 に,使用した生コンクリートの配合表を示す。 W/C は 49.5%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。混和剤は AE 減水剤を 使用した。表-3 に,コンクリートのフレッシュ性状お よび材齢 5 ヶ月時の力学特性を示す。弾性係数と圧縮強 度はそれぞれ 30.3GPa と 43.1MPa であった。

2.3 加熱試験

加熱試験時の供試体の材齢は6ヶ月である。加熱試験 は電気炉を使用した。図-3 に加熱試験の概要を示す。 電気炉の開口部は300mm×250mm である。加熱領域は 等モーメント区間の引張領域(底面)と圧縮領域(上面) とした。加熱範囲は幅100mm×長さ300mmとし,所定 部位の一面加熱となるよう電気炉に設置した。加熱範囲 以外の開口部は断熱用ブランケット(厚み30mm)を設 置し,加熱時の熱が漏れないよう留意した。図-4 に本 研究で用いた加熱パターンを示す。16℃/min で最高温度 800℃まで昇温後,5時間保持し,その後自然冷却とした。

2.4 塩水浸漬試験および屋外曝露試験

塩水浸漬試験は、RCはりを水槽に配置して実施した。 塩水は NaCl: 10%溶液とした。加熱試験実施後、材齢7 ヶ月において、塩水浸漬と気中曝露を1ヶ月毎に繰り返 し、計10ヶ月実施した。塩水浸漬対象外の供試体は、ラ 表一1 実験条件

供試体	加熱 塩水	
No.1-N	もの表わ (年)	×
No.1-S	加熱無し	0
No.2-F	引進結構	×
No.2-S	归汞顶域	0
No.3-F	口嫔酒坛	×
No.3-S	广和限域	0









図-6 曲げ載荷試験概要

ップを巻き屋内にて保管した。

2.5 超音波伝搬速度試験

全ての供試体において,超音波伝搬速度の測定を行った⁷⁾。測定箇所において探触子を対向させ伝搬時間を計測し,伝搬速度の算出を行った。図-5 に測定箇所を示す。加熱領域の中心から軸方向に0,75,150,225,300,375,450,625mm,高さ方向に25mm間隔とし,計40箇所測定した。



図-7 内部温度の経時変化 (No. 2-F)

2.6 静的曲げ載荷試験

図-6 に曲げ載荷試験の概要を示す。支点間距離を 1250mm とし、等モーメント区間とせん断スパンをそれ ぞれ 450mm, 400mm とした。計測項目は、荷重と等モー メント区間の変位とした。荷重の計測には荷重計(容量 100kN)を用い、変位は等モーメント区間両端に変位計 (分解能:1/1000mm)を設置し変位の平均値を算出した。

2.7 硝酸銀噴霧試験

基準供試体(No.1-N)と塩水浸漬供試体(S)を対象と し、曲げ載荷試験後,RCはり供試体の中央部から厚さ 50mmの供試体を切り出し,硝酸銀噴霧試験を実施した。 使用した硝酸銀溶液は0.1mol/Lとし,塩化銀の生成によ り紫色に呈する領域を確認した。

2.8 鉄筋腐食量測定

硝酸銀噴霧試験で切り出しを行った供試体を対象とし て鉄筋を取り出した。その後,取り出した鉄筋を10%ク エン酸二アンモニウム水溶液に2日間浸漬し,鉄筋に付 着した錆の除去を行った。除錆後の鉄筋の重量から鉄筋 腐食減少率を算出した。

2.9 SEM-EDS 分析

RC はりの加熱と塩水浸漬によるひび割れとセメント 水和生成物の変化を確認するために、SEM-EDS 分析^{8),9)} を実施した。対象供試体は、No.2-F(引張領域加熱)と No.2-S(引張領域加熱+塩水浸漬)とした。SEM 観察の 領域は RC はり中央部の下縁から 50mm の位置とし,所 定の場所から1cm角程度のモルタル試料片を切断採取し た。これを直径 25mm のプラスチック製リングに入れ, エポキシ樹脂で包埋した。樹脂の硬化後、リングの底面 を切断し、切断面を耐水研磨紙により乾式研磨し観察面 とした。観察面に導電性を付与するために炭素を蒸着し, 走査型電子顕微鏡 (SEM) による反射電子像観察に供し た。SEM 観察には、日立ハイテクノロジーズ社製 SU5000 を用い、加速電圧は 15kV とした。また、装置付属のオ ックスフォード・インスツルメンツ社製 N-MaxN50 エネ ルギー分散型 X 線スペクトロメーター (EDS) を用い, そこに見られた物質に含まれる元素の定性分析を行った。

図-8 超音波伝搬速度試験結果

3. 結果および考察

3.1 加熱試験結果

図-7に、No.2-F供試体の加熱試験時における内部温 度の経時変化を示す。なお、その他のRCはり供試体に おいても同様な温度履歴を示した。炉内温度の上昇とと もに供試体内部の温度も上昇している。加熱面に近い計 測位置から順に温度勾配が生じている。25mm(鉄筋位置) においては、500℃程度となった。

3.2 超音波伝搬速度試験結果

図-8 に、加熱試験と塩水浸漬試験を実施した RC は りの断面内の超音波伝搬速度(以下,US)試験結果を示 す。代表値として No.1 と No.2 の結果を示す。No.1-N の US は、測定範囲全体で 4650m/s 程度となった。No.1-S の US は、やや低下し 4500m/s 程度となった。No.2-F の US は、加熱面近傍で 2400~3500m/s まで低下した。これは、 受熱によるコンクリートの損傷の影響であると考えられ る。No.2-S の US は、4500m/s 程度となった。No.2-F と 比較すると、加熱領域で US が上昇した。これは、加熱 後の塩水浸漬により水分がコンクリートマトリックスに 供給され、再水和が生じたためと考えられる。既報¹⁰に おいても、受熱したコンクリートを水中で再養生すると 超音波速度が回復するという報告がある。No.3 において も No.2 と同様の傾向を示した。

3.3 硝酸銀噴霧試験結果および鉄筋腐食状況

表-4 に、硝酸銀噴霧試験による塩化物浸透深さ(以下, Cl-d)と鉄筋腐食状況および鉄筋腐食減少率(以下, C-ratio)を示す。紫色に呈している部分は塩化銀が生成している領域を示している。No.1-SのCl-dは、供試体表面から約20mm浸透していることがわかる。しかし鉄筋腐食は確認できなかった。No.2-SのCl-dは全面にわたり紫色に呈しており、塩化物が全体に浸透していることを示した。表-4において、鉄筋腐食が確認できる。No.2-Sの鉄筋腐食減少率は1.3%程度となった。No.2-Sは引張領域(主筋近傍)を加熱しており、加熱によるひび割れの発生と水和生成物の熱分解を生じ、マトリックスが損傷した状態となった。その後塩水浸漬と気中曝露により塩化物が容易に鉄筋まで到達し、気中曝露による酸素供

	No.1-N	No.1-S	No.2-S	No.3-S	
塩化物 浸透 状況					
	浸透なし	20mm	全面浸透	全面浸透	
鉄筋 腐食 性状					
C-ratio	-	0.29%	1.30%	1.47%	
i = 0 (i) N = 2 (i) I = 0 (i) I = 1 (i					
$\left(\frac{1}{2}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) = $					

表-4 塩化物浸透深さおよび鉄筋腐食状況

図-10 EDS 分析結果

給によって鉄筋が腐食したと考えられる。六本木ら¹¹⁾の 研究においても同様の報告がある。No.3-S は圧縮領域加 熱であるが No.2-S 同様に紫色に呈しており,塩分が全面 に浸透していることがわかった。表-4 より鉄筋腐食が 確認され,鉄筋腐食減少率は1.47%程度となった。No.2-S と No.3-S は No.1-S と比較し, Cl-d が大きく鉄筋腐食 も大きいことがわかった。これはコンクリートが加熱に より,損傷し物質侵入抵抗性が低下したためと考えられ る。

3.4 SEM-EDS 分析結果

図-9, 10 に, SEM-EDS 分析の結果を示す。C はセメ

ント粒子(水和,未水和), CH は水酸化カルシウム, AFt はエトリンガイトおよび S は骨材を示す。また,これら の周囲を充填している部分は C-S-H を示す。No.2-F では 全体的にひび割れが見られ,粗骨材周囲の隙間も大きい ことがわかる。組織自体も加熱による損傷により脆くな っている。ひび割れの隙間には水和生成物は確認できな かった。次に,No.2-S では加熱によるひび割れが確認で きるが,セメントペースト中のひび割れ内にはエトリン ガイト(AFt)が観察された。また,粗骨材周囲の隙間内 部には,AFt を生成している箇所がみられた。以上より, 加熱により骨材とセメントマトリックスにひび割れを確



認することができ,加熱により組織が脆くなっているこ とがわかった。一方,加熱後に塩水浸漬した供試体はひ び割れを確認できたが塩水の水分浸透によりセメントが 再水和し,組織が緻密化した可能性がある。

3.5 曲げ載荷試験結果

図-11, 12 に, RC はりの載荷試験における荷重-変位 関係と試験後のひび割れ性状を示す。荷重変位関係には, 併せてせん断耐力(44.3kN)と終局曲げ耐力(49.4kN) の計算値を示す¹²⁾。今回の RC はりはせん断破壊先行型 となる。No.1-N は斜め引張破壊(破壊荷重 50.4kN)を生 じた。No.2-F はせん断ひび割れ(49.3kN)を生じ一時的 に耐力が低下したがその後増大し,斜め引張破壊(破壊 荷重 51.8kN) を生じた。No.3-F は No.1-N と比較し初期 剛性が小さい傾向を示した。破壊性状は,鉄筋降伏後, せん断ひび割れが生じたが最終的に圧壊(48.5kN)した。 No.1-S は曲げひび割れ発生後, 斜め引張破壊(破壊荷重 51.8kN)を生じた。No.2-S は①斜めひび割れ (50.8kN) を生じ,一時的に耐力が低下したがその後耐力が増大し, ①のひび割れと逆側のせん断領域において,斜め引張破 壊(54.3kN)を生じた。No.3-S は鉄筋降伏(51.3kN)後, 変形が進行し、斜め引張破壊(53.1kN)を生じた。

3.6 高温作用と塩水作用が曲げ耐力に与える影響

まず,加熱の影響について考察する。No.1-N(基準) とNo.2-F(引張領域加熱)では,同程度の破壊荷重とな った。一方で,初期剛性はNo.2-Fが若干低下した。これ は,等モーメント区間の引張領域を加熱することにより, すでに曲げひび割れが発生した状況となったと考えられ

る。No.3-F(圧縮領域加熱)では, No.1-N と比較すると 初期剛性が大きく低下した。また、破壊性状は曲げ破壊 となり最終的には圧縮領域が圧壊した。これは、圧縮領 域を加熱したことによりコンクリートの圧縮強度と弾性 係数が低下したことによるものと考えられる。既往の研 究 ¹³⁾において,800℃で加熱した場合の残存強度比が約 0.3 であると報告されている。超音波伝搬速度試験結果よ り、圧縮領域の加熱面近傍において大きな損傷を受けて いることが分かる。圧縮領域を加熱した場合に初期剛性 が大きく低下する点については、迫井ら4の研究におい ても同様の結果となっている。次に、加熱後に塩水浸漬 を行った場合について考察する。No.1-N(基準)とNo.2-S(引張領域加熱+塩水浸漬)を比較すると, No.2-S は初 期剛性と終局状態の耐力に大きな差はなかったが、破壊 形態は鉄筋降伏後にせん断破壊となり,違いがみられた。 No.1-N と No.3-S (圧縮領域加熱+塩水浸漬)を比較する と, せん断破壊先行から曲げ破壊先行となり, 最終的に せん断破壊を生じたため、破壊形態に違いがみられた。 次に、塩水浸漬による影響について考察を行う。塩水浸 漬時に水分が供給され,加熱された領域の再水和が生じ た可能性がある。図-9において No.2-S の場合, ひび割 れ部に AFt が生成し再水和した可能性が示唆された。既 報14)においても、加熱後に水中養生を行うことで再水和 が生じ、強度が回復するという報告がされている。塩水 浸漬時に塩化物がコンクリート中に浸透し鉄筋の一部で 腐食が生じたが、鉄筋腐食率は最大1.5%程度であったた め、RC はりの耐力低下を引き起こすレベルではなかっ

たと考えられる。しかし長期的にみると,さらに腐食が 進むことで腐食の影響が再水和効果よりも耐力に大きな 影響を与える危険性がある。破壊形態について,加熱の みの供試体と加熱後に塩水浸漬を行った供試体で違いが みられた。既往の研究では,小型の供試体において同様 な報告がある⁹。

以上より,本研究では,加熱と塩水浸漬により RC 部材 の耐力と耐久性の評価を行った。本研究の範囲では,加 熱部位の違いにより破壊形態に違いがみられた。また, 塩水浸漬により破壊形態の違いを確認できた。一方,鉄 筋腐食を生じたが RC はりの耐力への影響は小さかった。 各種の影響が RC はりの破壊性状に与える影響は,今後, RC 部材の曲げ破壊性状の解析的な検討をする必要があ ると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 加熱試験後の RC はりの超音波伝搬速度試験結果より、加熱面近傍において超音波速度が低下し、塩水 浸漬を行うことにより超音波速度が回復した。これ は、セメントの再水和が影響したためと考えられる。
- 加熱試験後の RC はりにおいて塩水浸漬を行った結果,受熱により物質侵入抵抗性が低下したため,全面に塩水が浸透し,鉄筋腐食がみられた。
- 3) 最大モーメント部分に高温作用を受け、さらに塩水 作用を受けた RC はりの曲げ載荷試験を行った結果, 耐力の低下はみられなかった。加熱により一時的に コンクリートの強度は低下するが、塩水浸漬時に水 分供給が行われ強度が回復したためと考えられる。 鉄筋腐食が生じたが、腐食減少率が1.5%程度であり、 耐力への影響は少なかった。また、加熱と塩水浸漬 により RC 部材の曲げ破壊性状に違いがみられた。 圧縮領域加熱では初期剛性が大きく低下し破壊性 状は曲げ破壊となり、圧縮領域加熱+塩水浸漬では せん断破壊先行から曲げ破壊先行となった。
- 4) SEM-EDS 分析より,加熱によるひび割れを確認する ことができた。一方,加熱後に塩水浸漬を行った供 試体のひび割れ部に,AFtの生成が確認できた。塩 水の水分浸透により未水和セメントが再水和し,組 織が緻密化した可能性が考えられる。

5. 参考文献

 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

- 向井佑真、小澤満津雄、谷辺徹: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
- 松田耕作,横田優,米澤和宏:塩害劣化を受ける鉄 筋コンクリート梁の耐荷性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.834-843, 2012.3
- 迫井裕樹、小澤満津雄、山本哲:高温加熱を受けた RC はりの損傷評価および耐荷力に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1025-1030, 2019
- 5) 若林瑠美,小澤満津雄,迫井裕樹: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, Vol37, No.1, pp.1003-1008, 2015
- 阿久津裕亮,小澤満津雄,山本哲: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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1007-1012, 2019
- 公益社団法人 日本材料学会:建設材料実験,公益 社団 日本材料学会, pp.232-236, 2015.3
- 熊谷守晃, 星俊彦, 佐伯昇: 50数年経過したコンク リートの物理, 化学的特性と耐久性, 土木学会論文 集, No.686/VI-52, pp.41-54, 2001.9
- 9) 安藤陽子、広野真一、片山哲哉:コンクリート劣化 組織におけるエトリンガイトの生成場と形態の顕 微鏡観察、セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.255-262, 2018
- 10) 李柱国,流田靖博,杉原大祐:高温加熱を受けたコンクリートの再養生による性能変化と回復に関する研究-質量,長さ,動弾性係数および超音波伝搬速度について、セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.363-370, 2015
- 六本木日菜子,小澤満津雄,鉄羅健太: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
- 12) 中村光,内田裕市,伊藤睦,木全博聖:コンクリートを学ぶ-構造編-,理工図書株式会社,pp.54-55,101,2010
- 日本建築学会:構造材料の耐火性ガイドブック, pp.13-32, 2017
- 14) 李柱国,李慶濤:高温加熱を受けたコンクリートの
 性能回復に関する研究,日本建築学会構造系論文集, 第76巻,第666号, pp.1375-1382, 2011