論文 高温加熱を受けたコンクリートの力学的性質とひび割れの関係

加藤 優志*1·五十嵐 豪*2·西脇 智哉*3

要旨:本検討では,900°C までの高温加熱を受けたコンクリートの力学的性質とひび割れの関係を明らかに することを目的として,試験体内外の温度差により発生する温度応力によるひび割れが生じないように加熱・ 放冷したコンクリートを用いて,圧縮強度,割裂引張強度,質量変化,表面画像を取得した。その結果,高温 加熱を受けたコンクリートの圧縮強度の低下は,蛍光樹脂を含浸させて観察されたコンクリート表面に発生 する総ひび割れ長さと相関があることが実験的に確認された。

キーワード:コンクリート,高温加熱,力学的性質,質量変化,ひび割れ,蛍光樹脂含浸法

1. はじめに

福島第一原子力発電所は東日本大震災に伴う炉心溶 融によって壊滅的な被害を受けた。炉心温度は炉心溶融 により 1000℃ を超えたことが推定されており、事故解 析コードによる格納容器内の温度はドライウェルの雰囲 気温度で約800℃に達したことが推定されている¹⁾。現 在, 同発電所において急速に廃炉作業が進められている が、原子炉建屋解体完了までには約 40 年かかることが 想定されており、この期間において想定される各種外乱 に対して、上述の高温加熱を受けたコンクリートが十分 な構造安全性を有しているかを検証することが急務とな っている。現行の建築学会で規定される一般 RC 造建築 物の火害診断方法では、目視や非・微破壊試験による直 接点検を基に,補修・補強計画を進めることが規定され ている²⁾。しかしながら,原子炉建屋にみられる大断面 部材においては部材内部の評価が不可能であること、高 線量下であるため直接点検が不可能であることから、福 島第一原子力発電所の原子炉建屋の構造安全性の評価に そのまま適用することは困難である。福島第一原子力発 電所の原子炉建屋の健全性評価に求められる時間的制約 や検証精度を考慮すると、高温加熱によって生じるマク ロなひび割れによる強度低下について、大断面部材内部 の温度分布とともに、セメントペーストと岩石の強度・ 変形特性を考慮し、両者の加熱による変形量の差異から 生じるひび割れを予測できる数値解析コードの開発が有 効であると考えられる。このとき,精緻な数値解析には, 材料特性の入力値を,高温加熱の影響を受けたコンクリ ートの強度・変形特性を実験から実際に測定することが 不可欠である。これまでの高温加熱を受けたコンクリー トの力学的性質に関する研究は、原子炉建屋の長期的な 高温履歴^{例えば 3)}や,一般火災によって受ける高温加熱^{例え} ^{ば4)}を想定してこれまでにも広く行われており,基本的に は加熱温度が高くなるにつれて、力学的性質は低下する

ことが報告されてきた。しかし,一般火災を想定した実 験は数多く行われているものの,加熱された試験体内外 に温度応力が生じる加熱曲線で行われており,得られた 実験値は加熱温度に対するコンクリートの材料物性とし ては曖昧である。例えば,有限要素解析などの数値解析 コードに落とし込んだときのコンクリート要素の物性値 として入力する際には,加熱・放冷時の試験体内外の温 度差により生じるひび割れに伴う力学的性質の低下を内 包するため,要素の力学的性質を過小評価するといえる。

本検討では、既往の検討 ⁵で報告されている高温加熱 による強度低下において、支配的な要因であると考えら れるひび割れ長さに着目する。試験体内外の温度差によ り発生するひび割れが生じないように加熱・放冷を行っ たコンクリートを用いて、セメントペーストマトリクス と、骨材(岩石)の体積変化の差異により生じたひび割 れを画像解析により定量化するとともに、力学的性質を 実験的に取得した。得られた結果を数値解析コードでの コンクリートの物性値として利用することを目的として、 総ひび割れ長さと強度低下の関係について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

使用材料を表-1 に示す。調合は、水結合材比を 0.55 一定として、結合材(以下 B)を普通ポルトランドセメ ントのみを使用したシリーズ(以下 CN55)とセメントに 対してフライアッシュを 15%内割り置換したシリーズ (以下 CNF1555)とした2種類を検討した。フレッシュ 性状は、目標スランプ:15±2.5cm、目標空気量:4.5± 1.5%に収まるように減水剤の量を調整した。今回用いた コンクリートの調合を表-2 に示す。練り混ぜは二軸強 制練りミキサを用いて、各シリーズについて1バッチあ たり 40L として2回に分けて練り混ぜを行った。まず、 結合材と細骨材を加え、1 分間空練りを行った後に、水

*1 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員) (現 大成建設株式会社) *2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員) *3 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員) と減水剤を加え3分間練り混ぜを行った。その後,粗骨 材を入れ,1分30秒間練り混ぜた。コンクリートのフレ ッシュ性状と56日間水中養生後の圧縮強度を表-2に 併せて示す。練り混ぜたコンクリートは直径10cm×高さ 20cmのプラスチック製型枠に打ち込みを行った。作製し た試験体は,材齢1日で脱型し,56日間の水中養生を行 った後に,次節に示す前処理乾燥を行った。

2.2 高温加熱条件

高温加熱を行う試験体は急速な乾燥を防ぐために、20 ±1°C, 50±10%RH 環境下で加熱前に 28 日間乾燥を行 った。その後、前処理乾燥として試験体を定温乾燥機に 入れ,昇温速度 0.3°C/min.で 105°C まで昇温後, 105°C 一 定温度環境下で 24 時間乾燥を行い、試験体内の自由水 を蒸発させ、降温速度 0.3℃/min.で室温まで徐冷した。 300℃以上の加熱を行う試験体は、前述の 105℃ での乾 燥後に、電気炉でそれぞれの最高温度での高温加熱を行 った。試験体の加熱時の炉内の最高温度は300℃,600℃, 750℃, 900℃ である。電気炉の加熱プログラムを図-1 に示す。加熱時には試験体内外の温度差による温度応力 の発生を抑えるために昇温,降温速度を 0.3°C/min.に決 定した。なお、予備検討として前述の直径 10cm×高さ 20cm の円柱試験体を用いて,表面及び中心部に K 型熱 電対を設置して、いくつかの加熱温度プログラム(最高 温度 300°C) で加熱試験を実施した。上述した昇温速度, 降温速度では、表面と中心の温度差が約 20℃ 以下に留

められることを確認した。炉内温度が最高温度に達した後はその温度を24時間保持し、室温まで降温し、各試験を行った。なお本研究では、比較用として非加熱の試験体(20℃)と前処理乾燥のみの試験体(105℃)について

表一1 使田材料

材料	略号	物性								
セメント	С	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3320cm ² /g)								
フライアッシュ	FA	フライアッシュ II 種 (密度 2.15g/cm ³ ,比表面積 3550cm ² /g)								
細骨材	S1	福島県相馬郡新地町産砕砂 (表乾密度 2.66g/cm ³)								
	S2	宮城県亘理郡山元町産陸砂 (表乾密度 2.62g/cm ³)								
粗骨材	G	福島県相馬郡新地町産砕石 (表乾密度 2.69g/cm ³)								
AE減水剤	AE	ポリカルボン酸エーテル系化合物								

も各試験を行った。なお,900℃加熱においては,試験 体の崩壊が懸念されたが,本検討においては,いずれの 試験体も各試験終了時点まで加熱による崩壊は確認され なかった。

2.3 測定項目および実験方法

(1) 圧縮強度および静弾性係数

円柱試験体を用いて,JIS A 1108 に規定される圧縮強 度試験を行った。載荷速度は毎秒 0.2N/mm²で制御した。 併せて,コンプレッソメーターを用いて圧縮載荷中の試 験体のひずみを測定し,静弾性係数を算出した。これら の試験結果は3体の平均値として算出した。

(2) 割裂引張試験

円柱試験体を用いて JIS A 1113 に規定される割裂引張 強度試験を行った。載荷速度は試験体の引張応力度の増 加が毎秒 0.02N/mm²になるよう制御した。これらの試験 結果は 3 体の平均値として算出した。

(3) 質量測定

円柱試験体を用いて、質量変化を測定した。測定は所 定の高温加熱後に試験体を 20±1°C の恒温室に移動し, 試験体温度が室温程度になった後速やかに行った。質量 測定は 0.1g まで測定可能なはかりを用いた。試験結果は 3 体の平均値として算出した。

(4) ひび割れ観察(蛍光樹脂含浸法)

高温加熱によりコンクリート試験体に発生するひび 割れを定量するために, Auroy et al.⁶の手法を参考に試験 体表面のひび割れ観察を行った。ひび割れ観察の試験体 は直径 10cm×高さ 20cm の円柱試験体をコンクリート切 断機で湿式切断し,厚さ約 2cm としたものを用いた。切





シリーズ	W/B	単位量 (kg/m³)						バッチ	スランプ	空気量	練上がり温度	56日 圧縮油度
		С	FA	S1	S2	G	AE		(cm)	(%)	(°C)	(MPa)
CN55	0.55	306 —	395	395	1053	1.38	1	16.5	3.2	24.5	47.0	
							2	16.0	3.5	24.2	44.3	
CNF1555		260 46 200	200	1075	0.46	1	14.0	4.2	25.5	43.2		
		200	260 46 38	388	58 388	1075	0.40	2	15.0	3.8	25.5	43.3

断後,試験体の切断面を SiC 研磨粉 (#220, #400, #800) を用いて 800 メッシュまで湿式研磨した。研磨後、試験 体表面に残った研磨材を超音波洗浄機で洗浄し、前節に 示す方法で高温加熱を行った。高温加熱後、試験体表面 に市販のひび割れ探傷用の蛍光塗料(赤色)を添加した エポキシ樹脂を塗布し、ロータリーポンプを用いて、表 面から微細ひび割れヘエポキシ樹脂を真空含浸させた。 樹脂の硬化後(約24時間後),UV光源下で表面を観察 しつつ,試験体表面の余剰な樹脂を研磨紙(#100, #220) による乾式研磨で除去した。研磨後,暗室内において UV 光源(波長:254nm)下で,試験体表面をデジタルカメラ (Nikon D5500, 有効画素数 2416 万画素)を用いて撮影 した。撮影条件は絞り値:f/16, ISO 感度: ISO-100, シ ャッタースピード:5秒とした。本検討では1ピクセル あたり約 25um を評価可能であった。なお各シリーズに ついて試験体数は3体とした。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度,静弾性係数および割裂引張強度

高温加熱による圧縮強度の変化を図-2 に示す。圧縮 強度はシリーズに因らず、加熱温度の上昇とともにほと んど同程度低下する傾向を示した。両シリーズの圧縮強 度は105°Cで約1割,300°Cで約2割が低下した。一方、 原田⁷⁰の検討では200°C,300°C加熱で加熱前と比較して 圧縮強度が増加することを報告しているが、これは前処 理乾燥の過程が異なるためと考えられた。さらに温度を 上げると、600°C加熱では約5割、750°C加熱で約7割、 900°C加熱で9割以上が失われることを確認した。Ma*et* al.⁸⁾は高温加熱を受けたコンクリートの圧縮強度は900°C付近で約8~9割とほとんど失われることを報告しており、本検討と同様の傾向を示している。

加熱温度と静弾性係数の関係を図-3 に示す。静弾性 係数は,圧縮強度と比較して,加熱温度に対して低下が 大きく,両シリーズとも300°Cで約6割が低下し,600°C で約9割が低下した。750°C,900°Cでは静弾性係数はほ とんど失われた。原田^{7),9}は500°Cまでの圧縮強度と静 弾性係数を実験的に取得し,加熱温度に対する静弾性係 数の低下率が圧縮強度の低下率よりも大きいことを報告 しており,本検討でも同様の傾向が確認された。

加熱温度と割裂引張強度の関係を図-4 に示す。割裂 引張強度は105°Cで約3割が低下し、300°Cでは105°C と同程度の低下となった。また、両シリーズともに600°C では6割が低下し、750°Cでは約7割、900°Cでは9割 以上が失われた。これまでの高温加熱を受けたコンクリ ートの圧縮強度、割裂引張強度に関する報告^{7,9,10}では、 圧縮強度の低下率は割裂引張強度の低下率よりも小さい ことが報告されており、本検討も同様の結果となった。



3.2 質量変化

コンクリートの加熱温度と質量変化の関係を既報¹¹⁾の セメントペースト(N55, NF1555)による実験結果とと もに図-5に示す。ここで質量変化は 20±1°C 環境下で 28日間乾燥後の試験体を基準として表記している。セメ ントペースト、コンクリートともに 105°Cでの質量減少 は特に大きいが、コンクリートでは 750°C, 900°C での 質量減少の増加も大きくなっている。これは明らかにセ メントペーストが減量する温度とは異なっており¹²⁾、セ メントペーストとコンクリートの質量減少の傾向の差異 は使用骨材からの減量が考えられた。ここで、使用骨材 である S1 と、S2 の熱重量分析(以下 TG)を行った。 なお、今回用いている S1 は粗骨材である G の微粒分で ある。試料は微粉砕し、150µm以下に分級したものを用 いた。測定は30℃から1050℃までの範囲について昇温 速度10℃/min.,サンプリング0.5sec.,窒素フロー環境下 で行った。それぞれの骨材のTG曲線を図-6に示す。 S2は加熱温度を上げるに従って、質量減少が大きくなり 900℃では約2%の質量減少であった。一方で、S1は約 600℃までの質量減少はS2とほぼ同程度であったが、 650℃付近から質量減少が大きくなることが確認でき、 800℃では約14%の質量減少が確認された。このことか ら、750℃,900℃でのコンクリートの顕著な質量減少は、 粗骨材のGと細骨材のS1に含まれる方解石の熱分解と 考えられるが、図-2において750℃,900℃で急激な強 度低下が見られないことから、方解石の熱分解はコンク リートの強度低下に大きく寄与しないことが考えられた。 3.3 ひび割れ画像と総ひび割れ長さの定量化

UV 光源下のひび割れ観察画像と、画像中の白枠内の 拡大画像を図-7にまとめる。非加熱(20℃)の試験体 にはひび割れはほとんど確認できないが、105℃加熱の 試験体では粗骨材周辺から微細ひび割れが発生しており, 300℃, 600℃ では粗骨材同士をつなぐようにひび割れが 進展していることが確認できる。また,750℃ ではモル タル部に発生しているひび割れが複雑化しており, 900℃ではそれがより顕著に確認できた。本検討では、 高温加熱により発生したひび割れを数値化して定量的に 考察を進めるために、取得したひび割れ画像に対して画 像解析ソフトウェア¹³⁾で二値化処理を行った。二値化処 理は各画像中に占める輝度のヒストグラムの比較を行い, 妥当な閾値を256段階中の輝度値110と決定した。得ら れた二値画像に対して同ソフトウェアで幅1ピクセルの 線画像に変換する細線化処理を行い、細線化処理後の画 像における試験体表面の総画素数に対する,線と処理さ れた画素数の比を算出した。これらの処理では、試験体 表面の気泡も線画像として処理される。本検討において は、非加熱(20°C)断面にはひび割れは確認されず、気 泡のみが存在していたため、断面内の気泡量は全ての加 熱条件で等しいと仮定し、非加熱(20℃)で得られた数 値をバックグラウンドとして,全ての加熱条件からこの 数値を差し引いた値を総ひび割れ長さと定義した。加熱 温度と得られた総ひび割れ長さの関係を図-8 に示す。 両シリーズともに加熱温度に従って総ひび割れ長さは増 加しており、特に750℃からその増加が顕著になること が確認された。Alonso et al.¹²⁾は 750°C でセメントペース トの C-S-H が脱水し、ビーライトが生成することを報告 しており, C-S-H の脱水によるセメントペーストの収縮 がコンクリートのひび割れ発生に大きく影響しているこ とが推察された。また、両シリーズの総ひび割れ長さは 300°C で CN55 が CNF1555 よりもわずかに大きいが,そ



れ以外の温度ではほとんど差が見られなかった。

4. 総ひび割れ長さと圧縮強度の関係に関する考察

本章では、前章までに示した実験値から高温加熱による コンクリートの圧縮強度低下の予測手法について考察を 行う。Short et al.5はひび割れ長さと圧縮強度の関係につ いて報告しており、700℃までの温度範囲において、コ ンクリートのひび割れ長さと圧縮強度には高い線形相関 があることを報告している。このことから,本検討では, 900℃ までの加熱温度の範囲において本検討で得られた コンクリートと, 既報¹¹⁾のセメントペーストによる実験 から得られた残存圧縮強度率を、総ひび割れ長さから同 一関数で評価することを試みた。なお、セメントペース トについても本検討と同様の方法でひび割れ画像から総 ひび割れ長さを算出した。圧縮強度の予測値は高温加熱 を受ける前の圧縮強度を 100%とし、式(1)に示すような 関数で回帰を試みた。ここで残存圧縮強度率とは非加熱 (20°C)の試験体の値に対する所定の温度で加熱した試 験体の比として表記している。

$$R_c = 100 \times a^{-L} \tag{1}$$

ここで, *R_c*: 残存圧縮強度率(%), *L*:総ひび割れ長さ (%), *a*: 定数である。図-9にセメントペーストとコン クリートの総ひび割れ長さと残存圧縮強度率の関係とと もに式(1)による最小二乗法の回帰結果を示す。本検討の



図-7 コンクリートのひび割れ画像(左:UV光源下の画像,右:白枠内の拡大画像)

範囲においてはコンクリートの総ひび割れ長さと残存圧 縮強度率には高い相関が確認された。一方で、セメント ペーストを含めて同じ回帰曲線で評価すると、コンクリ ートのみの方が相関は高く、セメントペーストとコンク リートに発生するひび割れの総ひび割れ長さが強度に与 える影響は異なる、つまり、ペーストー骨材界面とペー ストマトリクスの破壊エネルギーが異なると考えられた。 以上から、図-9 のコンクリートのみの回帰結果は、コ ンクリート要素モデルを用いた部材内の温度分布による ひび割れに伴う強度低下予測に有効であると考えられた。 一方で、コンクリート要素をペースト要素と骨材要素に 分離し、よりミクロスケールからモデル化をする場合に は、セメントペースト内部、ペーストー骨材界面、骨材 内部の破壊エネルギーを実験的に取得し、モデルに導入 することで、より精緻な予測に有効であると考えられた。

5. 結論

本検討により得られた知見を以下に示す。

- (1) 高温加熱を受けたコンクリートの圧縮強度は 600℃ で約5割,900℃で約9割とそのほとんどが失われ た。また,圧縮強度の低下率は静弾性係数と割裂引 張強度の低下率よりも小さいことを確認した。
- (2) 高温加熱を受けたコンクリートの圧縮強度の低下 は試験体表面に発生する総ひび割れ長さと相関が あることが実験的に示された。このことから、加熱 により生じるコンクリート要素内(ペーストー骨材 間)のひび割れに伴う強度低下と、コンクリート部 材内の温度分布によるひび割れに伴う強度低下を 同じ関数でモデル化できる可能性が示された。

謝辞

本研究は「文部科学省英知を結集した原子力科学技術・ 人材育成推進事業」により実施された「東北大学原子炉廃 止措置事業」の成果である。ここに謝意を表します。

参考文献

- 東京電力株式会社:福島第一原子力発電所1~3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第2回進捗報告,2014
- 2) 日本建築学会:建物の火害診断および補修・補強方法 指針・同解説,2015
- 3) 嵩英雄,大野定俊:高温下のコンクリートの物性,コンクリート工学, Vol.22, No.3, pp.13-20, 1984
- 4) 河辺伸二, 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博:高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究, コン クリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.377-382, 2003
- 5) Short, N. and Purkiss, J.: Petrographic Analysis of Fire-Damaged



図-9 総ひび割れ長さと残存圧縮強度率の関係

Concrete, Proceedings of the Workshop Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?, pp.221-230, 2005

- Auroy, M. *et al.*: Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement-based materials, Cement and Concrete Research, Vol.74, pp.44-58, 2015
- 7) 原田有:高熱を受けたコンクリートの強度と彈性の 変化:第1報・材令28日コンクリートの強度,日本 建築學會論文集, Vol.47, pp.11-18, 1953
- Ma, Q. *et al.* : Mechanical properties of concrete at high temperature-A review, Construction and Building Materials, Vol.93, pp.371-383, 2015
- 9) 原田有:高熱を受けたコンクリートの強度と弾性の変化:第2報・材令28日コンクリートの引張強度と弾性 係数,日本建築學會論文集,Vol.48, pp.1-9,1954
- Zhang, B. *et al.*: Relationship between brittleness and moisture loss of concrete exposed to high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol.32, No.3, pp.363-371, 2002
- 11)加藤優志,五十嵐豪,西脇智哉:1150℃までの高温履 歴を受けたセメント硬化体の力学的性質,コンクリー ト工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.687-692, 2016
- Alonso, C. and Fernandez, L: Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments, Journal of Materials Science, Vol.39, No.9, pp.3015-3024, 2004
- National Institutes of Health, ImageJ, URL: https://imagej.nih.gov/ij/