

高温加熱がセメントペースト・モルタル・コンクリートの基礎物性に及ぼす影響

EFFECT OF ELEVATED TEMPERATURE ON PHYSICAL PROPERTIES OF HARDENED CEMENT PASTE, MORTAR AND CONCRETE

加藤 優志 (ライフサイクル工学分野)
Yushi KATO

Abstract:

In this study, effect of elevated temperature on physical properties of hardened cement paste, mortar and concrete was investigated. The employed specimens were gradually heated in order to avoid thermal stress due to the difference of temperature inside and outside of specimens as much as possible. From the results of experiments, it was confirmed that the compressive strength decreased by 90% at 900°C and the static elastic modulus showed larger decrement than compressive strength. In addition, the correlation between the residual compressive strength ratio and the total length of the surface cracks which observed by the fluorescent epoxy impregnation method was evaluated. As a result, it was revealed that the residual compressive strength ratio has good correlation with the total length of the surface cracks observed. Furthermore, it was confirmed that there is a difference in the coefficient of determination between the total length of the surface cracks and the residual compressive strength ratio on hardened cement paste and mortar, concrete. This view suggested that there are differences in fracture energy between the crack of the cement paste, the crack at the interface between the cement paste and the aggregate, the crack of aggregate. It is expected that the result contributes improving the estimation accuracy of compressive strength decrease of concrete exposed at elevated temperature in finite element analysis.

Keywords : Hardened cement paste, Mortar, Concrete, Elevated temperature, Mechanical properties, Total length of cracks

セメントペースト, モルタル, コンクリート, 高温加熱, 力学的性質, 総ひび割れ長さ

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熔融によって壊滅的な被害を受けた。炉心温度は 1000°C 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°C、サブプレッションチェンバの液相温度で約 180°C に達したことが推定されている。現在、同発電所において廃炉作業が進められているが、原子炉建屋解体完了までの期間において、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の構造安全性を検証することが急務となっている。日本建築学会で規定される現行の一般 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、診断・補強計画を進めるとしている。しかし、原子炉建屋は、大断面部材のため部材内部の評価が不可能であること、高線量下の部位では直接点検が不可能であることから、そのまま適用して構造安全性を評価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・変形特性に関する実験により、

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 1)}や、一般火災によって受ける高温加熱^{例えば 2)}を想定して、これまでも広く行われてきた。既往の研究では、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いる。しかし、一般火災を想定した実験の数多くは、加熱された試験体内外に温度応力が生じる加熱・冷却速度で行われており、得られた実験値は加熱温度に対するコンクリートの純粋な材料物性としては曖昧であり、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適用するには過小評価になりうる。

本検討では、試験体内外の温度差により発生する温度応力と、これに伴うひび割れの発生を極力抑えた条件で加熱・放冷を行った試験体を用いて、表面に生じたひび割れの画像解析とともに、圧縮強度、静弾性係数などの物性値を実験的に取得することを目的とする。加えて、強度低下の主要因と考えられるひび割れに着目し、試験体表面に発生する総ひび割れ長さ³⁾と残存圧縮強度率の相関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

使用材料は結合材として普通ポルトランドセメント (C)、フライアッシュ II 種 (FA)、細骨材として山砂 (S1)、陸砂 (S2)、砕砂 (S3)、粗骨材として碎石 (G)、AE 減水剤とし

てポリカルボン酸エーテル系化合物 (AE) を使用した。セメントペーストは水結合材比 0.55 一定とし、Cのみを用いたシリーズ (N55) と、Cの重量に対してFAを15%内割置換したシリーズ (NF1555) の2種類を作製した。モルタルとコンクリートは結合材としてCのみを用いたシリーズ (MN55, CN55) とCに対してFAを15%内割置換したシリーズ (MNF1555, CNF1555) のそれぞれ2種類を検討した。モルタル、コンクリートの調合を表1に示す。試験体はそれぞれの調合で練り混ぜを行った後に、セメントペーストとモルタルは5φ×10cmプラスチック製型枠、コンクリートは10φ×20cmプラスチック製型枠に打込みを行った。作製した試験体は材齢1日で脱型後、セメントペーストは70日間、モルタルは28日間、コンクリートは56日間の水中養生を行った。その後、次節に示す前処理乾燥を行った。

2.2 高温加熱条件

高温加熱を行うセメントペースト、モルタルは急速な乾燥を防ぐために20±1°C、60%RHに調湿したデシケータで加熱前に28日間乾燥を行った。コンクリートは20±1°C、50±10%RH環境下で28日間乾燥させた。乾燥後、前処理乾燥として、試験体を定温乾燥機に入れ、105°Cで24時間乾燥を行い、自由水を蒸発させた後に、電気炉でそれぞれの最高温度での高温加熱を行った。それぞれの試験体における電気炉の加熱プログラムを表2に示す。なお、前処理乾燥の昇温・降温速度は表2の高温加熱プログラムと同一である。予備検討として、前述の円柱試験体を用いて、表面および中心部にK型熱電対を設置して、それぞれの昇温、降温速度で加熱試験を実施した。それぞれの昇温、降温速度における試験体の内外の温度差を表2に併せて示す。試験体内外の温度差は約20°C以下に留められることを確認した。それぞれの試験体は加熱・冷却後、速やかに各試験を行った。なお本研究では、比較用として非加熱の試験体(20°C)と前処理乾燥のみの試験体(105°C)についても各試験を行った。

2.3 蛍光樹脂含浸法によるひび割れ観察

高温加熱により試験体表面に発生するひび割れを定量評価するため、蛍光樹脂含浸法によるひび割れ観察を行った。ひ

び割れの観察面は、セメントペーストは打設底面を用いた。モルタル、コンクリートは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、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、観察面とした。それぞれの試験体は高温加熱後、観察面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へ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により撮影した。なお各シリーズについて試験体数は2体もしくは3体とした。

2.4 圧縮強度および静弾性係数の測定

高温加熱後の試験体に対して、圧縮試験を行った。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载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。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ観察結果および総ひび割れ長さの定量

セメントペースト(N55)、モルタル(MN55)、コンクリート(CN55)の20°C(非加熱)、300°C、900°Cのひび割れ画像(UV光源下)を図1に示す。なお、モルタルとコンクリートについては、白枠内の拡大画像をともに示した。セメントペーストでは、300°Cでは微細なひび割れ本数が増加し、900°Cでは肉眼でも容易に認識できる太さのひび割れの発生や、微細ひび割れのひび割れ幅が拡大していく様子が確認された。モルタル、コンクリートでは20°C(非加熱)の試験体では、ほとんどひび割れが確認できないが、300°Cで骨材周囲からひび割れが発生している様子が確認でき、骨材同士をつなぐようにしてひび割れが進展していることが確認され、900°Cでは微細なひび割れがより複雑化する様子が確認された。本研究では、ひび割れを定量化するために、取得したひ

表1 モルタル、コンクリートの調合表

シリーズ	W/B	単位量 (kg/m ³)						
		B		S1	S2	S3	G	AE
		C	FA					
MN55	0.55	538	—	1345	—	—	—	—
MNF1555		452	80	1329	—	—	—	—
CN55		306	—	—	395	395	1053	1.38
CNF1555		260	46	—	388	388	1075	0.46

表2 電気炉の高温加熱プログラム

	昇温速度 (°C/min.)	降温速度 (°C/min.)	最高温度 (°C)		最高温度 保持時間(h)	昇温時の試験体内外 の最大温度差(°C)	降温時の試験体内外 の最大温度差(°C)
セメントペースト	1.0	0.5	300, 600,	900, 1150	3	24.5	9.0
モルタル	0.5	0.5	300, 600,	900, 1150	24	10.6	10.5
コンクリート	0.3	0.3	300, 600, 750,	900	24	22.7	19.3

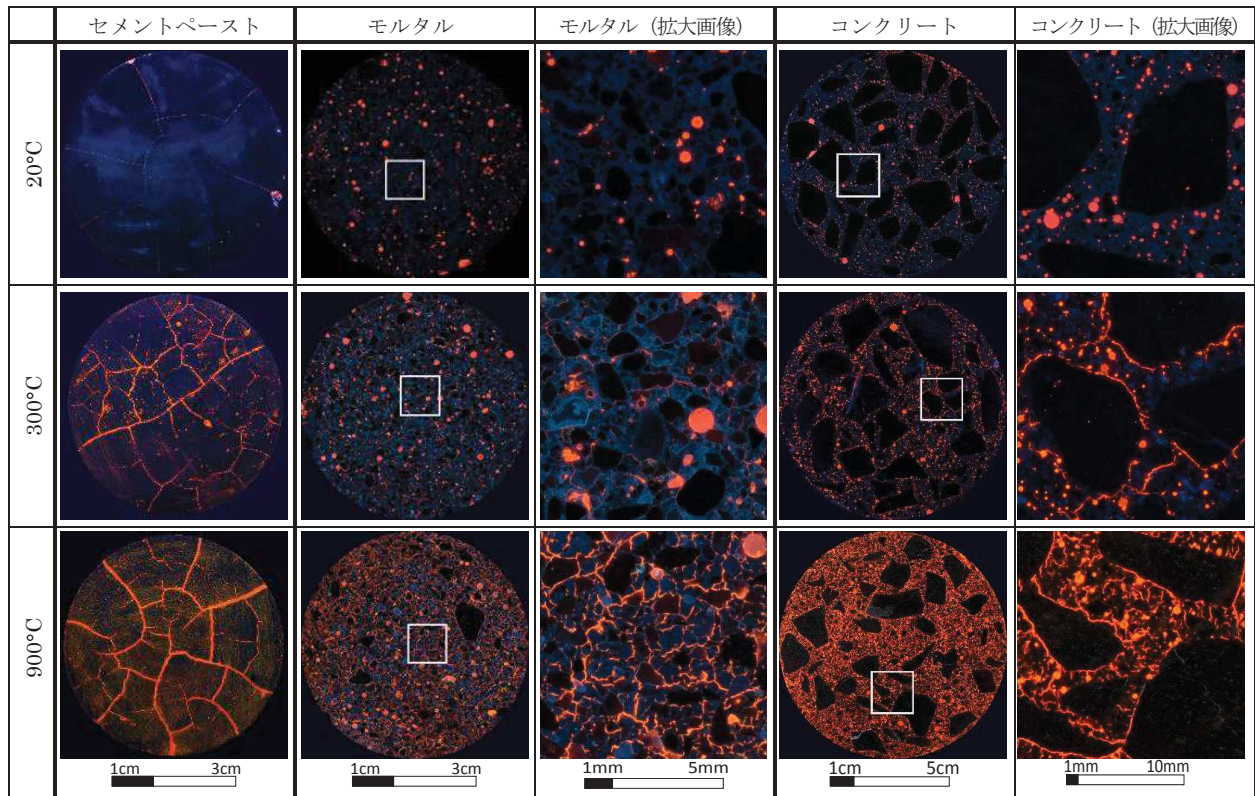


図1 セメントペースト (N55), モルタル (MN55), コンクリート (CN55) のひび割れ画像 (UV光源下)

ひび割れ画像に対して、画像解析ソフトウェア^③を用いて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、輝度の妥当な閾値としてセメントペーストでは130、モルタルでは120、コンクリートでは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^③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(ひび割れ)と認識された画素数の比を算出した。算出した非加熱(20°C)の試験体の画素数の比と、各温度で加熱した試験体の画素数の比との差を、各温度における総ひび割れ長さとして定義した。加熱温度と得られた総ひび割れ長さの関係を図2に示す。加熱温度の増大に従って総ひび割れ長さは大きくなることを確認できる。それぞれの総ひび割れ長さは、750°C、900°Cで顕著に増加することが確認された。Alonso *et al.*^④は750°CでセメントペーストのC-S-Hが脱水し、ゼライトが生成され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モルタル、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考えられた。また、600°Cまでのセメントペーストの総ひび割れ長さはモルタル、コンクリートとほぼ同程度である一方で、900°C加熱後の総ひび割れ長さはモルタル、コンクリートよりも小さくなることを確認された。これは900°C加熱後のモルタル、コンクリートではセメントペーストと骨材間に発生する微細ひび割れが複雑化しひび割れ長さが大きくなるのに対して、900°C加熱後のセメントペーストでは、より低温域で生じた微細ひび割れが、加熱温度の増大に従ってそのひび割れ幅が拡大していくため、ひび割れ長さは600°Cに比べ、ほとんど変化しなかったと推察された。

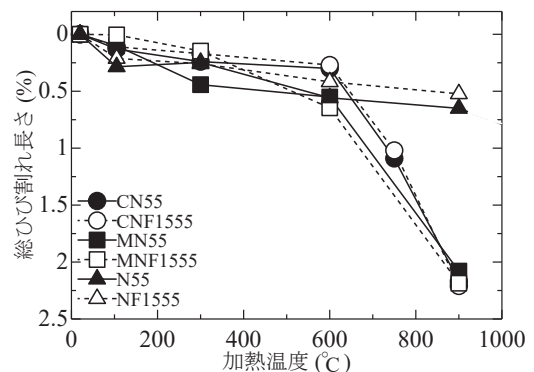


図2 加熱温度と総ひび割れ長さの関係

3.2 圧縮強度および静弾性係数

セメントペースト、モルタル、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数の測定結果をそれぞれ図3、図4、図5に示す。それぞれの圧縮強度、静弾性係数は加熱温度に従って低下し、圧縮強度は900°Cでその約9割が失われることが確認された。既往の報告^⑤では、コンクリートの圧縮強度は900°C付近でほとんどが失われることが確認されており、このことからC-S-Hの分解によるひび割れ発生が、強度低下に与える影響が著しいことが考えられた。

静弾性係数は、圧縮強度に比べ加熱温度に対する低下が大きく、それぞれ600°Cで約8、9割が低下した。原田^⑥は500°Cまでの高温加熱を受けたコンクリートにおいて静弾性係数の低下は圧縮強度よりも大きいことを確認しており、これは本検討と同様の傾向であった。また、モルタルの1150°Cでは、900°Cよりも圧縮強度、静弾性係数が大きくなることを確認でき、これは焼結反応により、微細ひび割れが閉塞したことによる影響が考えられた。

3.3 圧縮強度と総ひび割れ長さの関係

高温加熱によるセメントペースト、モルタル、コンクリートの強度低下の予測手法に関して考察を行った。Short *et al.*⁸⁾は700°Cまでの温度範囲において、骨材種類、結合材種類に因らず、コンクリートのひび割れ長さと同様に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°Cまでの温度範囲についてセメントペースト、モルタル、コンクリートの残存圧縮強度率を総ひび割れ長さから式(1)に示す関数で回帰を試みた。この残存圧縮強度率は、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。

$$R_c = 100 \times a^{-L} \quad (1)$$

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6に、それぞれの総ひび割れ長さと同様に、式(1)による最小二乗法の回帰結果を示す。本検討の範囲においてはモルタル、コンクリートの総ひび割れ長さと同様に高い相関が確認でき、高温加熱により発生する総ひび割れ長さを推定することで、圧縮強度の低下を予測できることが推察された。一方で、セメントペーストを含めた場合もある程度の相関が確認できるが、モルタルとコンクリートの回帰の方が相関は高い。これは、セメントペースト、セメントペーストと骨材の界面、骨材それぞれの、高温加熱により発生するひび割れの破壊エネルギーが異なるためと考えられた。以上のことから、強度低下メカニズムに基づいて簡易なモデル化を行うためには、高温加熱によるセメントペーストと骨材の収縮と熱膨張の差から発生する総ひび割れ長さを推定すればよく、より高精度のモデル化には、それに加えてセメントペースト、セメントペーストと骨材との界面、骨材に発生するひび割れのそれぞれの破壊エネルギーを考慮したコンクリートのひび割れ強度低下モデルを構築する必要があると考えられた。

4. 結論

- (1) 高温加熱によるセメントペースト、モルタル、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数は900°Cで約9割が低下する。また、加熱温度に対する静弾性係数の低下は圧縮強度よりも大きいことを確認した。
- (2) 高温加熱を受けたセメントペースト、モルタル、コンクリートの総ひび割れ長さと同様に高い相関があることが確認された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 川西貴士, 屋代勉, 田中喜広, 小林一博: ポリプロピレン短繊維による鋼繊維補強コンクリートの耐火性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.333-338, 2008
- 3) National Institutes of Health, ImageJ, URL: <https://imagej.nih.gov/ij/>
- 4) 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
- 5) Ma, Q. *et al.*: Mechanical properties of concrete at high temperature-A review, Construction and Building Materials, Vol.93, pp.371-383, 2015
- 6) 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1報・材令28日コンクリートの強度日本建築学会論文集, Vol.47, pp.11-18, 1953
- 7) 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, 日本建築学会論文集, Vol.48, pp.1-9, 1954
- 8) Short, N. and Purkiss, J.: Petrographic Analysis of Fire-Damaged Concrete, Proceedings of the Workshop Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?, pp.221-230, 2005

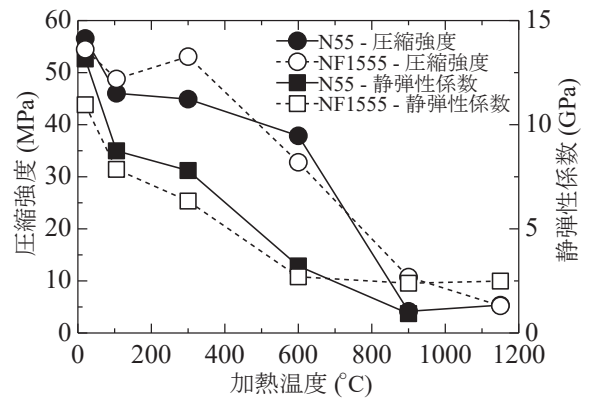


図3 セメントペーストの圧縮強度, 静弾性係数の変化

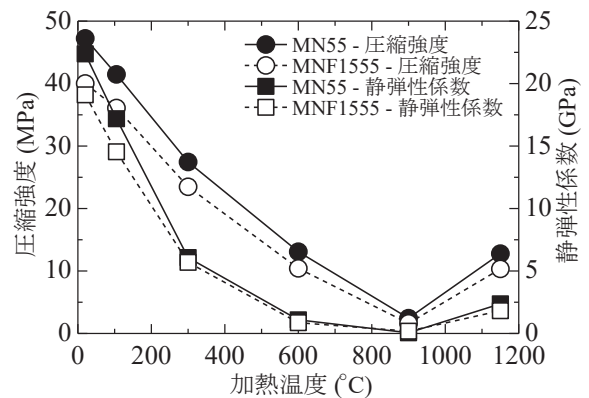


図4 モルタルの圧縮強度, 静弾性係数の変化

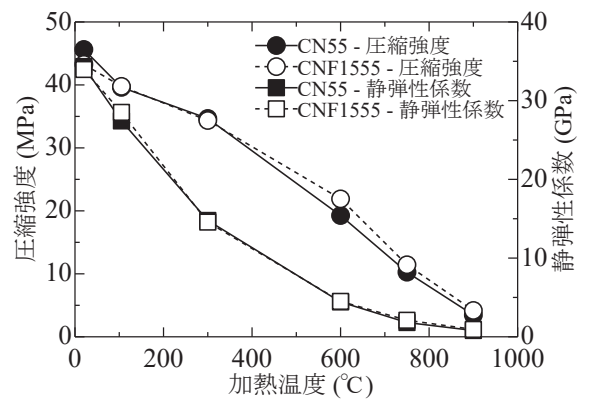


図5 コンクリートの圧縮強度, 静弾性係数の変化

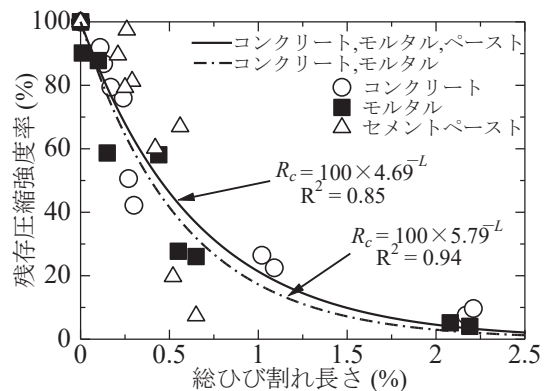


図6 総ひび割れ長さと同様に残存圧縮強度率の関係