

論文 加熱冷却後のコンクリートから採取したコアの圧縮強度試験で測定したひずみに基づく火災による劣化深さの推定

新井 真^{*1}・春畑 仁一^{*2}・内田 慎哉^{*3}・山崎 順二^{*4}

要旨：本研究では、火災を受けたコンクリートの劣化深さを、加熱面から採取したコアの圧縮強度試験時のひずみ挙動から推定する方法について検討を行った。筆者らがこれまでに検討してきたひずみゲージで計測した縦ひずみおよび横ひずみから体積ひずみと臨界応力度を求める方法に加え、画像相関法によるひずみ計測を同一のコアで実施した。ひずみゲージにより求めた深さ方向の臨界応力度分布は、加熱面に近づくほど低下する傾向を示し、一方、画像相関法による縦ひずみ分布は、加熱面付近で増大した。これらの結果から、画像相関法による縦ひずみ分布から、火災による劣化深さを推定できる可能性が示唆された。

キーワード：コンクリート, 火害, 体積ひずみ, 臨界応力度, 画像相関法, 縦ひずみ分布

1. はじめに

コンクリートの劣化現象の一つに火災による劣化（以下、火害と記す）がある¹⁾。火害を受けたコンクリート構造物の劣化深さを的確に評価することは、合理的な補修・補強方法を決定する上で重要となる。しかしながら、火害を受けたコンクリートの劣化深さの推定に関する研究は少なく、筆者らは、火害を受けたコンクリートから採取したコンクリートコア（以下、コアと記す）の圧縮強度試験において求めた体積ひずみから、深さ方向の臨界応力度分布を算出する方法により、劣化深さを推定する研究を行っている²⁾。臨界応力度の算出に必要となる体積ひずみは、ひずみゲージまたはデジタル画像相関法（以下、DIC法と記す）により計測した縦ひずみおよび横ひずみを用いて算出している。ひずみゲージによる方法（以下、ひずみゲージ法と記す）では、DIC法と比較して測定精度が優れているものの、測定範囲が限定されることや局所的なひび割れの影響を受ける可能性がある。一方、DIC法では、測定精度に課題があり、体積ひずみの挙動から明瞭な変形特異点が認められず、臨界応力度の算出に至っていない³⁾。

そこで、本研究では、火害を受けたコンクリートの研究事例の蓄積、ならびにDIC法を用いた火害による劣化深さ推定方法の提案を目的として、以下の実験を行った。すなわち、火災を模擬したコンクリート試験体から採取したコアを対象に、圧縮強度試験を行い、試験中にひずみゲージ法による深さ方向の臨界応力度分布およびDIC法による縦ひずみ分布を求めた。その後、得られた深さ方向の臨界応力度分布とDIC法による縦ひずみ分布を相互に比較し、考察を加えた。

2. 加熱試験概要

2.1 試験体

試験体は、図-1に示すとおり、長さ650mm、幅650mm、厚さ250mmの直方体を4体作製した。なお、加熱後の試験体の移動を考慮して、加熱面からかぶり（厚さ）110mmの位置に用心鉄筋（異形棒鋼（呼び名：D13））を4本配置した。コンクリートは生コン工場で製造した呼び強度：24を使用した。コンクリートの使用材料を表-1、調合を表-2、フレッシュコンクリートの性状を表-

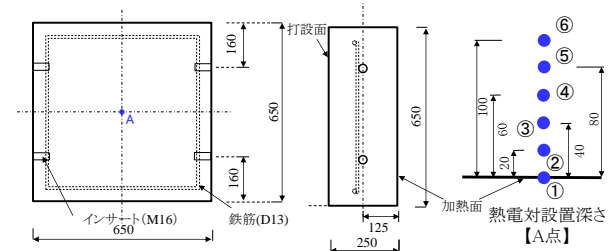


図-1 試験体の形状、熱電対の設置位置(単位：mm)

表-1 コンクリートの使用材料

材 料	品 種(物 性)
水(W)	地下水および回収水(上澄水)
セメント(C)	普通ポルトランドセメント (密度：3.16 g/cm ³)
細骨材(S1)	福岡県北九州市産石灰砕砂 (表乾密度：2.69 g/cm ³ , 粗粒率：2.40)
細骨材(S2)	兵庫県赤穂市産砕砂 (表乾密度：2.58 g/cm ³ , 粗粒率：2.72)
粗骨材(G)	箕面市長尾山産砕石 (表乾密度：2.69 g/cm ³ , 実積率：58.0%)
混和剤(A)	AE減水剤標準型I種

*1 (一財) 日本建築総合試験所 試験研究センター構造部耐震耐久性調査室 (正会員)

*2 (一社) 構造耐力評価機構 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 富山県立大学 工学部 環境・社会基盤工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*4 (株) 浅沼組 技術研究所所長 博士(工学) (正会員)

3にそれぞれ示す。試験体は室内気中養生した後、材齢7日で脱型し、加熱試験に供するまで屋内にて静置した。なお、試験体4体のうち加熱試験に供した3体については、図-1に示すAの位置に、加熱面から0、20、40、60、80、100mmの位置（深さ方向）にK熱電対をそれぞれ設置した。

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	S/a (%)	単用量(kg/m ³)					
		W	C	S1	S2	G	A
57.0	47.6	175	307	264	586	963	3.07

W/C：水セメント比，S/a：細骨材率

表-3 フレッシュコンクリートの性状

項目	スラブ ^a (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 ^{注)} (N/mm ²)
実測値	11.5	5.4	30.9

注) 28日間標準水中養生した試験体の圧縮強度を示す。

2.2 加熱方法

試験体の加熱はガス加熱炉を使用した。試験体は、図-2に示す通り、天井スラブの加熱を想定し、試験体の長さ650mm、幅650mmの型枠面（有効加熱範囲：長さ650mm×幅650mm）が炉内を向くように設置した。

加熱試験に供した計3体の試験体は、火災による劣化程度にバリエーションを設けるため、試験体ごとの加熱温度の保持時間（以下、加熱保持時間と記す）を0分、60分および120分とした。具体的には、ガスバーナー（都市ガスを熱源）によりISO834に規定する標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、図-1に示す加熱面から0mmにある熱電対で測定した温度が650℃となるまで加熱し、所定時間まで加熱温度を保持するように各試験体を加熱した。加熱終了後、直ちに試験体を炉外に取り出し、室温になるまで放冷した。なお、試験体の温度測定は、加熱開始からすべての測定位置で最高温度を確認し、100℃程度になるまで継続して行った。また、加熱試験は、コンクリートの材齢が188～202日に実施した。

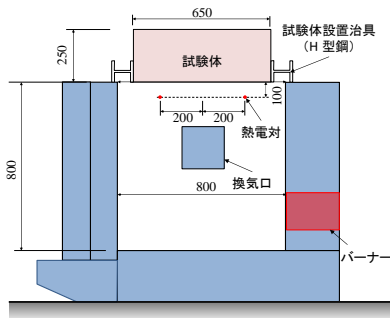


図-2 試験体の設置状況 (単位：mm)

2.3 加熱結果

加熱保持時間0分および120分の試験体の炉内温度お

よびコンクリートの温度履歴を図-3に、各試験体の最高温度を表-4に示す。

図-3より、加熱試験は設定どおりに実施できており、また加熱保持時間中の加熱面0mmの温度差は、最大で8℃であった。表-4より、その他の試験体においても設定温度で加熱ができており、加熱保持時間が長くなるほどコンクリート内部の最高温度が高くなった。

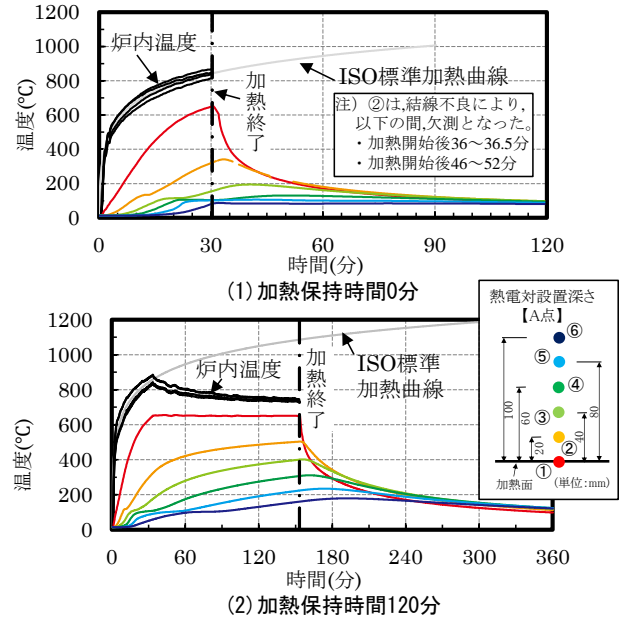


図-3 炉内温度およびコンクリートの温度履歴

表-4 加熱を受けた試験体の各測定位置における最高温度

加熱温度 (°C)	保持時間 (分)	各測定位置の最高温度 (°C)					
		0 mm ①	20 mm ②	40 mm ③	60 mm ④	80 mm ⑤	100 mm ⑥
650	0	651.6	341.5	194.5	130.7	106.2	87.5
	60	655.5	466.3	339.0	246.6	173.6	129.3
	120	655.7	503.6	401.7	310.9	234.2	179.1

3. 圧縮強度試験、ひずみ測定方法および臨界応力度の算出方法

3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験に供するコアは、JIS A 1107:2022 に基づ

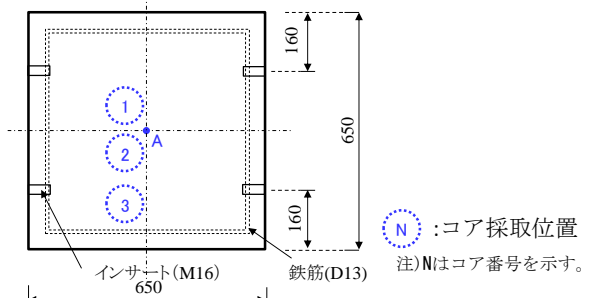


図-4 コアの採取位置 (単位：mm)

き、乾式のコアドリルを用いて、加熱冷却後の試験体および未加熱試験体からそれぞれ3本ずつ採取した。コアの採取位置を図-4に示す。

また、圧縮強度試験では、端面摩擦を低減するために圧縮試験機加圧板とコア上下端面との間に減摩材（テフロンシート2枚の間にグリース塗布）を挿入（図-5参照）した。

3.2 ひずみ測定方法

採取したコアの圧縮強度試験時に、ひずみゲージによる計測と併せて、2台のカメラにより画像を撮影してDIC法によるひずみを求めた。ひずみゲージの貼付位置およびDIC法による解析範囲を図-5に示す。

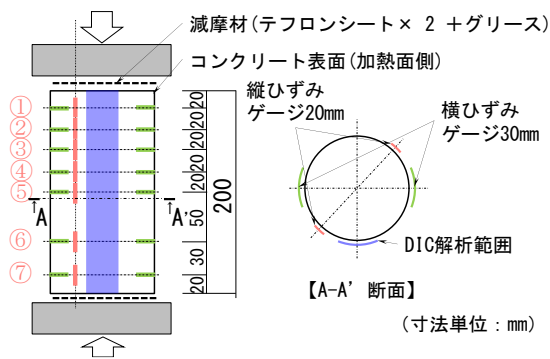


図-5 ひずみゲージの貼付位置およびDIC法による解析範囲

(1) ひずみゲージ法

図-5より、コンクリート表面から20, 40, 60, 80, 100, 150, 180 mmの深さ（図-5中の①～⑦）において、縦ひずみ（図-5中の赤色）および横ひずみ（図-5中の緑色）を測定した。計測には、縦ひずみは検長20 mm、横ひずみは検長30 mmのひずみゲージをそれぞれ用いた。

(2) DIC法

DIC法は、カメラで撮影された画像から測定対象の変位を求め、ひずみを算出する手法である。上記(1)のひずみゲージを貼付後、コア側面の解析範囲に白色塗料を塗布した上に、黒色塗料でランダムなドット模様を吹き付けた後、圧縮強度試験に供した。

計測では、図-5に示す青色の範囲を含んだコンクリート面を対象に、1ピクセルの大きさを0.08～0.09 mmとし、4096×3000ピクセルの画像を撮影した。

画像解析では、図-5に示す青色の範囲に限定して、Correlated Solutions社製のVIC-3Dソフトを使用し、サブピクセル以下の精度を確保するため8次のスプライン関数を用いて、離散濃淡値を補間して計算した⁴⁾。テンプレートマッチングは、リファレンス画像を基準にして正規化残差二乗和法(NSSD)で行い、マッチング解析を実

施した。なお、サブセットは29×29ピクセル、ステップは7ピクセル、オーバーラップは22ピクセルで計算した。また、各点の縦ひずみは2点間の長さ変化から計算した。

3.3 臨界応力度の算出方法

一般的に、臨界応力度は体積ひずみの変形特異点時の圧縮応力と定義され、クリープ限界応力や端面摩擦を低減した圧縮強度試験で得られる最大荷重に相当することが知られている。ここでいう変形特異点とは、載荷荷重の増加に伴い、コア内部に発生したひび割れが互いに連結することで大きなひび割れを形成し始め、コアの体積が収縮から膨張に転じた時点を示す⁵⁾。本研究では、臨界応力度は、体積ひずみの変形特異点から求めることにした。なお、体積ひずみ ε_V は、ひずみゲージ法で得られた縦ひずみ ε_C および横ひずみ ε_T から式(1)により算出した⁶⁾。

$$\varepsilon_V = \varepsilon_C - 2\varepsilon_T \quad (1)$$

4. ひずみゲージによる臨界応力度

コアの圧縮強度およびコンクリート表面からの深さごとの臨界応力度を表-5に示す。なお、コア記号は、『加熱温度-加熱保持時間(加熱した試験体から採取したコアのみ)-コア番号』の順とし、該当する加熱温度や数値を並べて示した。また、一例として、未加熱-1および650-60-1の圧縮応力と体積ひずみの関係を図-6および図-7に示す。図中の○印は、変形特異点を示す。

表-5より、加熱を受けたコアの圧縮強度は、未加熱のコアと比較して、加熱保持時間に概ね比例して低下した。未加熱のコアを1とした時の加熱を受けたコアの圧縮強度の比は、加熱保持時間0分で0.64、同時間60分で0.53、同時間120分で0.49となった。

未加熱のコアの各測定点の臨界応力度は、すべての測定点において、変形特異点が認められており、最大が33.3 N/mm²、最小が20.7 N/mm²であった。また、同一コア内の各測定点の臨界応力度の差が最も大きいコアは未加熱-2であり、その差は9.2 N/mm²であった。

加熱を受けたコアは、一部の測定点において、変形特異点が認められず、臨界応力度が算出できなかった。その理由としては、まず、試験中に体積ひずみが収縮側で推移し続けたため、圧縮強度以上の臨界応力度となり体積ひずみが膨張側に転じなかったことが要因と考えられる（表-5中の※2）。また、載荷初期より体積ひずみが膨張側に推移した測定点では、加熱の影響により生じたひび割れ²⁾が、圧縮強度試験前から互いに連続化していたことも要因と考えられる（表-5中の※3）。そのため、載荷初期より膨張側に推移した測定点は、加熱の影響を顕著に受けた範囲であると考えられる。

表-5 加熱条件ごとの圧縮強度と各測定点の臨界応力度

コア 記号	圧縮 強度※1 (N/mm ²)	各測定点の臨界応力度 σ_{cr} (N/mm ²)							
		20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	150 mm	180 mm	
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
未加熱-1	33.7	33.3	25.1	26.5	25.1	25.8	31.0	28.0	24.4
未加熱-2	32.6		20.7	26.6	29.8	28.3	30.1	27.0	23.5
未加熱-3	33.6		26.6	30.1	29.1	27.2	24.4	33.3	29.8
650-0-1	20.6	21.2	10.5	15.6	20.2	※2	※3	※3	※3
650-0-2	22.7		12.5	11.4	17.8	12.5	22.7	※2	21.9
650-0-3	20.4		9.2	8.7	8.3	15.1	19.3	※2	18.9
650-60-1	19.6	17.5	7.8	9.5	12.6	17.7	15.7	※2	※2
650-60-2	16.0		4.6	4.6	8.9	15.0	14.3	15.9	※2
650-60-3	17.0		※3	9.8	5.9	12.6	16.2	※2	※2
650-120-1	17.8	16.3	6.7	6.2	6.4	10.5	9.9	17.6	※2
650-120-2	16.1		5.1	4.2	2.8	15.8	16.1	※2	16.0
650-120-3	14.9		6.0	3.2	3.0	3.5	12.1	※2	※2

注) ※1：端面摩擦を減じた圧縮強度試験で得られた値を示す。
 ※2：臨界応力度に達しなかった。
 ※3：体積ひずみが載荷初期より膨張しており変形特異点が認められなかった。

加熱を受けたコアにおいて臨界応力度が得られた測定点では、すべてにおいて、未加熱のコアのそれぞれの測定点と比較して、臨界応力度が低下した。同一コア内の各測定点による傾向については、おおむね加熱面に近づくほど低下する傾向であった。加熱保持時間0分および60分においては加熱面から60mmの範囲で、同時間120分においては加熱面から100mmの範囲で10 N/mm²を下回る測定点が認められた。また、測定点60mmにおいて、未加熱を1とした時の加熱を受けたコアの臨界応力度の平均値の比は、加熱保持時間0分で0.55、同時間60分で0.33、同時間120分で0.15となり、大きく低下している。加熱の影響によって臨界応力度が低下する傾向は、既報²⁾の傾向と一致している。これは、コンクリートが加熱を受けると、骨材は膨張し、セメントペーストは収縮することで、組織が緩み内部にひび割れが生じる²⁾ことや、臨界応力度は、コアの圧縮過程において、内部に発生したひび割れが連続化し、体積が収縮から膨張に転じた時点の圧縮応力である³⁾ことが要因と考えられる。これらから、加熱を受けたコアの内部でひび割れが生じている測定点においては、未加熱のコアや加熱の影響が緩慢な内部と比較して、ひび割れの連続化が低圧縮応力で生じたものと考えられる。

650-0-1については、一方向から加熱した試験体からコアを採取しているため、加熱面近傍の高温層の熱変形を低温層が拘束することにより内部に引張応力が生じた可能性がある⁴⁾。この引張応力によるコア軸方向のひび割

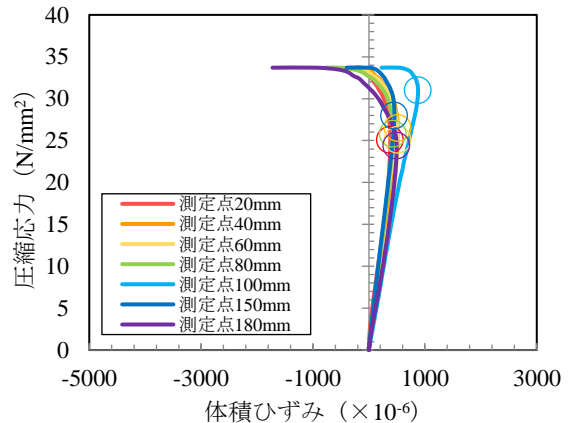


図-6 コア記号：未加熱-1の圧縮応力と体積ひずみの関係

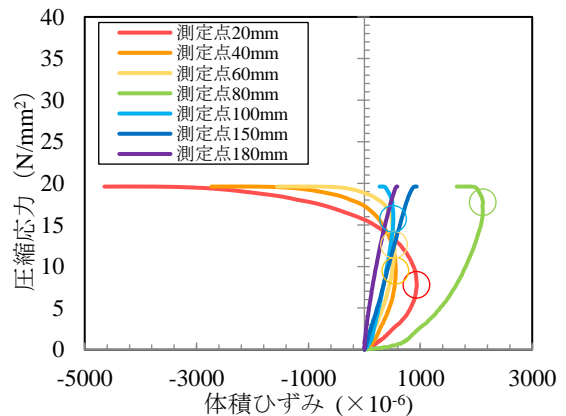


図-7 コア：650-60-1の圧縮応力と体積ひずみの関係

れが内在していた可能性があり、加熱の影響が緩慢となる 100 mm 以深の測定点においても、体積ひずみが载荷初期から膨張側に推移したと考えられる。また、同一加熱条件での各測定点の臨界応力度のばらつきは、横ひずみの測定範囲に発生したひび割れが主な要因と考えられる。

加えて、測定点が 150 mm や 180 mm についても、臨界応力度の低下が認められている点については、加熱面近傍のコア端部が先行して膨張域に達することで、より以深の範囲にコア軸方向のひび割れの発生を誘発し、臨界応力度を低下させている可能性がある。また、一部の未加熱のコアにおいて認められた両端部の臨界応力度が低い点については、コア端部の端面摩擦を減摩材によって低減させていることから、コアの端部と内部で拘束条件が異なったことが要因の一つとして考えられる。

図-6 より、未加熱-1 の各測定点の体積ひずみの挙動は、おおよそ同傾向に推移しており、すべての測定点において、収縮側から膨張側に転じている。また、変形特異点時の体積ひずみは 382~878 μ であり、大きな違いは

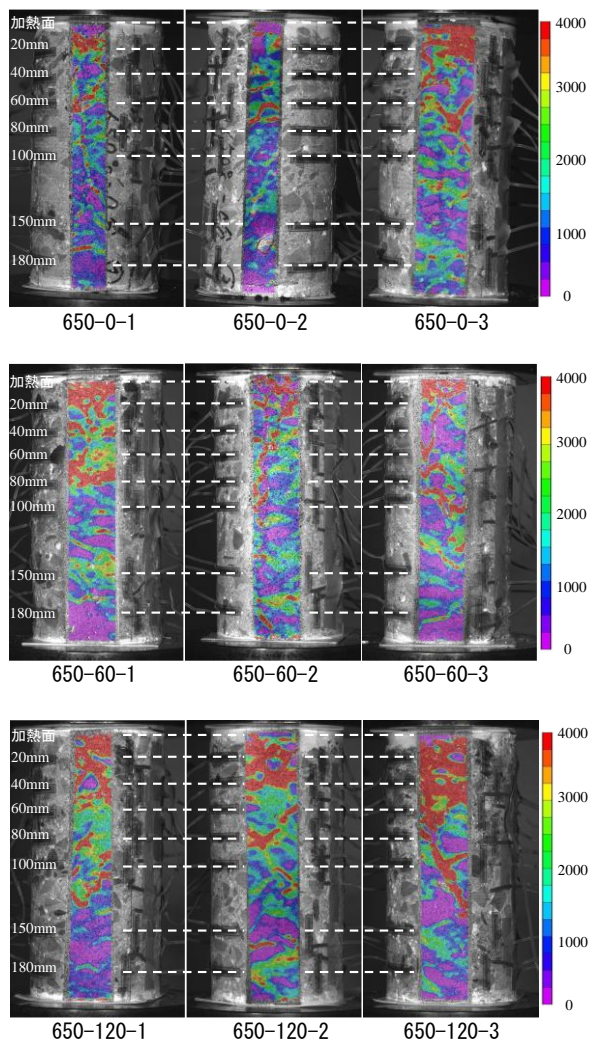


図-8 加熱したコアの縦ひずみ分布 (単位: μ)

認められない。一方、図-7 に示した 650-0-1 は、各測定点で異なる傾向を示しており、変形特異点時の体積ひずみにおいては 517~2120 μ であり、測定点によって大きく異なっていた。なお、測定点 150 mm および 180 mm の体積ひずみにおいては、臨界応力度に達していないため、収縮側に推移し続け、圧縮強度に達している。

5. DIC 法による縦ひずみ分布

加熱を受けたコアの縦ひずみ分布を図-8 に、未加熱のコアの縦ひずみ分布を図-9 にそれぞれ示す。なお、図-8 および図-9 には、圧縮強度試験における最大荷重時 (以下、最大荷重時と記す) の縦ひずみ分布を示しているが、未加熱のコアについては、比較のため、加熱保持時間 0 分の圧縮強度の平均値 21.2 N/mm² とおおよそ同程度の圧縮応力 20 N/mm² 時の縦ひずみ分布も示した。

図-8 より、加熱を受けたコアの縦ひずみ分布は、加熱面近傍の縦ひずみが大きくなっており、おおよそではあるものの、加熱保持時間に比例して、その範囲がより内部 (深さ方向) に広がっている。また、コア軸方向にひび割れのような形状で、縦ひずみが大きくなっている。これは、加熱面近傍の高温層の熱変形を低温層が拘束することにより発生した引張応力により生じたひび割れが可視化されたものと考えられる。

一方、図-9 に示した圧縮強度時の未加熱の縦ひずみ分布では、方向性は認められず、偏りなく縦ひずみが生

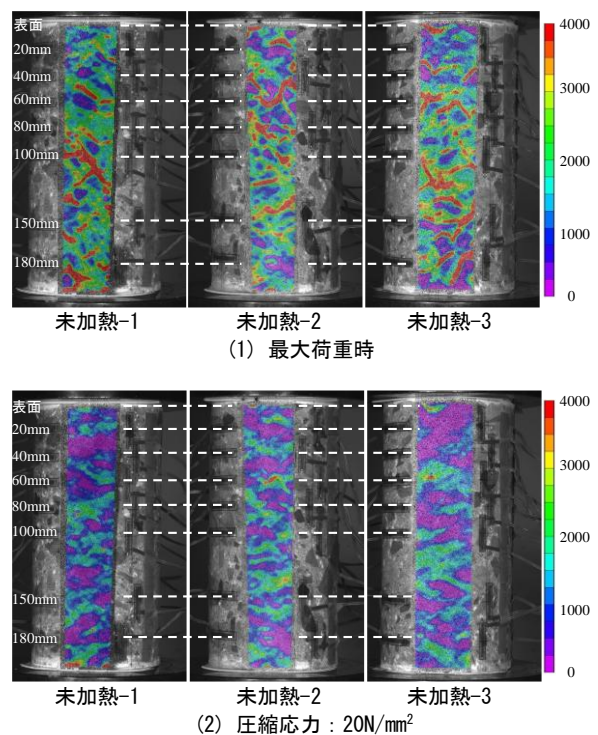


図-9 未加熱のコアの縦ひずみ分布 (単位: μ)

じており、加熱を受けたコアのような傾向は認められなかった。また、圧縮応力 20 N/mm² 時の縦ひずみ分布においては、4000 μ 以上を示す赤色はごくわずかな範囲に限られており、それ以外の範囲は 2000~3000 μ 、または 0~500 μ であった。同程度の圧縮強度である 650-0-3 の縦ひずみ分布では、コンクリート表面から 80 mm 程度の範囲において、4000 μ 以上の範囲が多く認められている。加熱を受けたコンクリートの静弾性係数は、圧縮強度よりも顕著な低下傾向を示すことから、4000 μ 以上の範囲が多くなったと考えられる。未加熱の縦ひずみ分布には、このような傾向が認められないため、両者を比較することにより火災の影響により縦ひずみが増大した範囲を可視化できた。これにより、DIC 法を用いて縦ひずみ分布を計測することによりおおよその劣化深さを推定できる可能性が示唆された。

6. ひずみゲージ法による臨界応力度と DIC 法による縦ひずみ分布の比較

ひずみゲージ法により求めた臨界応力度は、既報²⁾と同様の傾向を示し、加熱の影響を受けた範囲で臨界応力度が低下した。DIC 法による縦ひずみ分布においては、同圧縮応力時の縦ひずみが加熱の影響を受けた範囲では大きくなる傾向であった。これらの結果から、両手法とともに、未加熱と加熱したコアを比較することで加熱による影響を受けた範囲を推定できると考えられる。

7. まとめ

本稿では、火災を模擬したコンクリート供試体から採取したコアを対象に、コア上下端面と試験機加圧板との摩擦を低減した圧縮強度試験を行い、火災による劣化深さ推定の可能性について検討した。その結果、次の知見を得た。

- (1) ひずみゲージ法により、複数点の臨界応力度を求めた結果、加熱面に近づくほど臨界応力度は低下する傾向を示したが、一部の加熱を受けたコアにおいては、受熱温度が低い 100 mm 以深においても、臨界応力度の低下や荷重初期から膨張側に推移する測定点が認められた。これらの傾向は、コア軸方向に生じたひび割れが要因である可能性が考えられる。
- (2) DIC 法により得られた圧縮強度試験時のコア側面の縦ひずみ分布は、加熱面に近いコア上端付近において、縦ひずみが内部より大きくなり、その範囲は、加熱保持時間が長くなるほど、内部へ広がった。また、加熱面近傍の高温層の熱変形を低温層が拘束することにより発生した引張応力が要因と考えられるコア軸方向のひび割れ位置において、縦ひずみが増大することが明らかとなった。

(3) DIC 法で求めた縦ひずみ分布において、同程度の圧縮応力時の加熱したコアと未加熱のコアの結果を比較することにより、加熱の影響により縦ひずみが増大している範囲を可視化できた。

(4) 上記(1)~(3)より、ひずみゲージ法および DIC 法を用いて、加熱を受けたコアと未加熱のコアの結果を比較することにより加熱による影響範囲を判別できる可能性が示唆された。

現状では、受熱温度が 100 °C未満と想定される深さにおいて、ひずみゲージ法では臨界応力度の低下が認められており、DIC 法により求めた縦ひずみ分布ではコア軸方向のひび割れが可視化されている。これらについては、加熱中や圧縮強度試験中に発生するコア軸方向のひび割れが要因と考えられる。このひび割れについては、劣化深さの推定に大きく影響を及ぼすため、今後も引き続きデータ蓄積を行い、現象のメカニズムを解明する予定である。また、今後は、未加熱との比較を伴わない、加熱を受けたコアの結果のみを用いた劣化深さを推定する方法について検討する予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費（基盤研究（C）23K04133、研究代表者：日本建築総合試験所 春畑仁一、研究分担者：富山県立大学 内田慎哉）の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (一社)日本建築学会：建物の火災診断および補修・補強方法 指針・同解説、2024
- 2) 例えば、春畑仁一、新井 真、池田憲一：火災を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ曲線による変形特異点を用いた火災損傷深さの推定に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、第 84 巻、第 765 号、pp.1497-1502、2019.11
- 3) 山崎順二、春畑仁一、加藤 猛、荒木 朗：画像相関法を適用した表層コンクリートの火災劣化深さの推定、コンクリート工学年次論文集、Vol.44、No.1、pp.730-735、2022.6
- 4) Sutton, M. A., Orteu, J. J., Schreier, H. : Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications, Springer, Mar. 2009.
- 5) 谷川恭雄 監修：硬化コンクリートの性質、セメントジャーナル、2004.10
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧、p78、1976.2