

8. デジタル画像相関法による火災後の表層コンクリートの受熱温度推定

Estimation of heat received temperature of cover concrete after fire using digital image correlation method.

荒木 朗 *¹

山崎 順二*¹

要 旨

鉄筋コンクリート造構造物（以下、RC 造と呼ぶ）は、一般的に優れた耐火性能を保有しており、火災による被害は他の構造と比較すると大きくなりにくい傾向がある。しかしながら、コンクリートが火災による熱を受けることで、受熱温度に応じて強度および耐久性能が低下することになる。受熱温度が 300℃程度から圧縮強度の低下が大きくなり始め、500℃に達すると圧縮強度は 1/2 程度まで低下することが既往の研究などでも報告されている。一方で、コンクリートの表面から熱を受けた部材の、深さ方向に対する受熱温度の推定および、劣化の進行度合いの確認については、速やかに判断するためのその手法が確立されているとは言い難い現状である。

本報では、高解像度 3D カメラにより加熱したコンクリート試験体から採取したコア供試体の表面各部の載荷時の局部ひずみ挙動をデジタル画像相関法によりリアルタイムに可視化することで、火害による損傷深さおよび受熱温度の推定を簡便かつ迅速に推定する手法について検討した。

キーワード： デジタル画像相関法、火害、受熱温度、体積ひずみ、劣化深さ

1. はじめに

火災は建物の一部で発生することが多いため、被災後は補修や補強を実施して再使用するのが一般的である。一方、火災は頻繁に発生しないため、多くの技術者が火害診断に慣れていないのが実情である。

また、コンクリート構造物は、火災により熱を受けると受熱温度に応じて強度や耐久性が低下する。受熱温度が 300℃程度から圧縮強度の低下が大きくなり始め、500℃に達すると圧縮強度は 1/2 程度まで低下することが既往の研究などでも報告されている。

しかしながら、コンクリート系構造物の補修工事や建物火災後の補修工事において、構造体コンクリートの表層部の劣化の程度やその深さを把握するための簡便で有効な検査手法は確立されていない。

そこで、加熱後のコンクリート試験体から採取したコア供試体の、載荷時の局部ひずみ挙動をリアルタイムに可視化できる三次元計測が可能な高解像度カメラによるデジタル画像相関法を適用し、火害による受熱温度の推定および損傷深さを簡便かつ迅速に推定する手法について検討した。

また、この実験は一社日本建築総合試験所との共同研究という形をとっており、同じ試験体から採取したコア供試体を異なる試験法で確認することにより、劣化深さの推定精度をより高める目的としている。

2. 実験概要

2.1 コンクリート試験体の概要

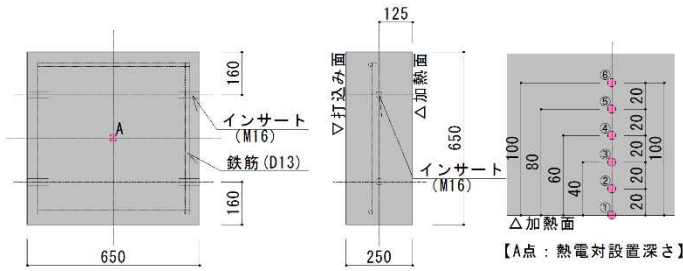
コンクリート試験体の概要を図-1 に示す。試験体形状は加熱面を 650mm 角とした厚さ 250mm の直方体とし、コンクリート試験体の加熱時に試験体の深さ方向の温度分布をモニタリングするため、図-1 の①加熱面に加え、②～⑥に示す深さ 20mm～100mm までの位置に 20mm 間隔で K 熱電対を設置した。試験体に打ち込んだコンクリートは、呼び強度 24 で実験室から運搬時間 15 分前後の生コン工場で標準化された JIS マーク表示品を使用した。

試験体はコンクリートの打込み後、打込み面にビニルフィルムを張り封かん処理を行ったのち、7 日間の室内気中養生後に型枠を取外し、加熱試験に供するまで屋内で静置した。

コンクリートの使用材料を表-1 に、調合概要と打込み時のフレッシュコンクリートの性状を表-2 に示す。

型枠の組立て状況および K 熱電対の設置状況を写真-1 および 2 に、コンクリートの打込み状況および湿潤養生状況を写真-3 および 4 に示す。

*¹ 技術研究所 建築材料研究グループ



図－1 試験体形状およびK熱電対設置位置（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（上澄み水）
セメント(C)	普通ポルトランドセメント （密度：3.16kg/cm ³ ）
細骨材(S)	兵庫県赤穂市産砕砂 （表乾密度：2.58g/cm ³ 、粗粒率：2.72）
粗骨材(G)	箕面市長尾山産砕石 （表乾密度：2.69g/cm ³ 、実積率：58.0%）
混和剤(A)	AE減水剤遅延形Ⅰ種

表－2 調合概要とフレッシュコンクリートの性状

W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				スランプ	空気量
		W	C	S	G		
57.0	44.6	175	307	839	963	12.5cm	5.4%



写真－3 コンクリート打込み状況



写真－4 湿潤養生状況



写真－1 型枠状況



写真－2 配筋およびK熱電対設置状況

2.2 コンクリートの加熱試験体

本実験では、天井スラブ裏面の火災による劣化を想定し、試験体の打込み下面（650mm 角）が炉内に接するようにガス加熱炉に設置した。試験体への加熱方法は、炉内温度を ISO834 に規定する標準加熱曲線に沿って上昇させ、試験体の加熱面の温度が650℃となるまで継続した。加熱に供した試験体は3体であり、1体は650℃に達した直後に、もう1体は650℃に達してから60分間保持した後に、もう1体は650℃に達してから120分間保持した後に、それぞれガス加熱炉から取り外し、室温になるまで静置した。

ここで、加熱表面温度を650℃に設定したのは、受熱温度が500℃に達すると圧縮強度が健全時の1/2程度まで低下するとされていることや、580℃程度の受熱でコンクリート中の遊離アルカリ分であるCa(OH)₂が熱分解し中性化傾向が高まることが既往の研究で報告されているためである。

放冷後、画像相関法に供するコア供試体を加熱後の2種の試験体と非加熱の試験体からそれぞれ採取した。

加熱試験体の加熱炉へのセット状況および加熱試験の状況を写真－５および６に示す。

2.3 デジタル画像相関法による受熱温度および劣化深さの推定手法

本実験に適用する非接触の三次元変位・ひずみ測定システムは、カラースプレー等でランダム模様を付した試験対象物（ここではコア供試体）を、２台の高解像度カメラを用いて撮影されたランダム模様

様の経時変化をデジタル画像相関法で解析することによって、高精度に変位やひずみを測定するものである。このシステムでは、圧縮荷重の載荷と併せて供試体表面の局所ひずみを三次元で計測できる。さらに、載荷時に加圧板と供試体端面の摩擦を減じる対策を施すことでコア供試体端部が拘束状態とならず、破壊域が受熱により損傷を受けたコア供試体上部（本実験では損傷部を上にして載荷）に移行し、一軸圧縮により破壊することが想定される¹⁾。そのため、本実験においては、供試体と加圧板との摩擦を極力減じるために、全てのコア供試体の上下の加圧板と供試体上下端面の間にテフロンシートを２枚重ねて挿入（２枚のテフロンシートの間に真空グリースを充填）して載荷することとした。劣化深さ（本報ではコア供試体上面からの距離に相当）および受熱温度の推定には、画像相関法により得られた供試体の上面（加熱面）からの深さ1cm 毎のポイントにおける縦ひずみと横ひずみの値を抽出し、式(1)により算定される体積ひずみの載荷中の挙動の各高さの差異によって推定することとした。なお、体積ひずみを算出するためのコア供試体の各高さにおける縦ひずみおよび横ひずみの抽出位置は、左右約3cmの間隔を空けた同じ深さの３点とし、算出された３点の体積ひずみの平均値を検証に用いることとした。

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

ここに、 ε_V ：体積ひずみ， ε_c ：縦ひずみ
 ε_T ：横ひずみ

圧縮試験時の画像相関法によるリアルタイムな体積ひずみの計測状況およびコア供試体表面に付したランダム模様

模様の状況を写真－７に示す。

3. 試験結果

3.1 コンクリート試験体内部の最高到達温度とコア供試体圧縮強度

コンクリート供試体の受熱による加熱面からの深さ方向の最高到達温度の分布を図－２に、載荷した際のコア供試体の圧縮強度を図－３に示す。

圧縮強度については、非加熱のコンクリート試験体から採取したコア供試体では19N/mm²であったのに対し、表面温度が650℃到達後の保持時間が0分、60分、120分のコンクリート供試体から採取したコア供試体ではそれぞれ15N/mm²,13N/mm²,10N/mm²にまで低下していた。



写真－５ 加熱試験体（加熱炉）セット状況



写真－６ 加熱試験状況



写真－７ DIC 計測状況およびコア供試体ランダム模様

加熱面から深さ方向 20mm ごとの深さ 100mm までの各位置での最高到達温度は、加熱面表面温度が 650℃に到達後 60 分間保持することで、保持しなかった場合と比べて深さ 2cm (②) の位置で約 120℃、深さ 8cm (⑤) の位置で約 70℃上昇していることが認められた。さらに、650℃で 120 分間保持した場合は、保持しなかった場合と比べて深さ 2cm (②) の位置で約 160℃、深さ 8cm (⑤) の位置で約 130℃上昇していることが認められた。

また、内部の到達温度が 150℃以上と確認された範囲は、保持しなかった試験体、650℃を 60 分間保持した試験体、同じく 120 分間保持した試験体でそれぞれ、50mm、90mm、110mm 程度であった。

3.2 デジタル画像相関法による劣化深さおよび受熱温度の推定

図-4 に、受熱のない非加熱のコンクリート試験体から採取したコア供試体による画像相関法によって得られたコア供試体表面の縦横方向それぞれの局所ひずみから(1)式を用いて算出した体積ひずみと、圧縮強度との経時変化の関係を、図-5 に非加熱供試体の載荷時の終局直前の縦ひずみの度合いを表すコンター図を示す。また、非加熱供試体と同様に、図-6 および 7 に 650℃到達後加熱を停止したコンクリート試験体から採取したコア供試体での関係および終局直前での縦ひずみのコンター図を、図-8 および 9 に試験体表面温度 650℃を 60 分間保持したコア供試体での関係および縦ひずみのコンター図を、図 10 および 11 に 650℃を 120 分間保持した試験体での関係および終局直前での縦ひずみのコンター図を示す。なお各図中の凡例は加熱面からの深さを表している。

非加熱コア供試体の体積ひずみの挙動は、深さ 1～10cm まで大きく負側に卓越した挙動を示すことなく終局に向かっていった。図-5 に示す終局前の縦ひずみコンター図においても、加圧板との接触面付近が赤くなっているものの、そこから深さ 10cm 程度までは負側に卓越した挙動は見られなかった。一方、受熱したコア供試体においては、650℃到達後停止の供試体では加熱面からの深さ 4～5cm までが、また、650℃を 60 分保持したコア供試体では深さ 10～11cm までが、650℃を 120 分保持したコア供試体においては深さ 14～15cm までの体積ひずみが、最大圧縮荷重に達する以前に負側に大きく推移している。これはその位置での横ひずみが載荷途中に卓越した挙動を呈したためであり、体積ひずみが負側に推移する挙動が、受熱による損傷を受けた位置を表現していると考えられる。

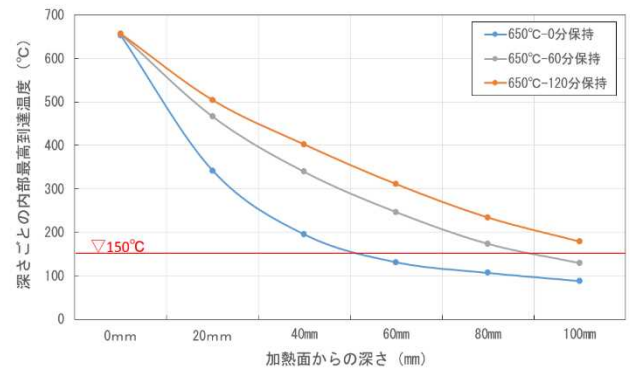


図-2 供試体深さ方向の加熱による受熱温度

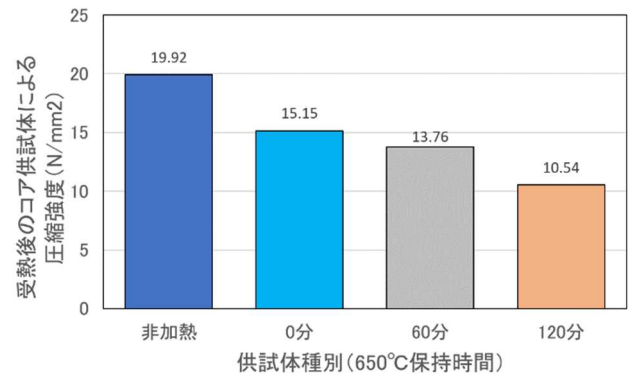


図-3 加熱後供試体の圧縮強度

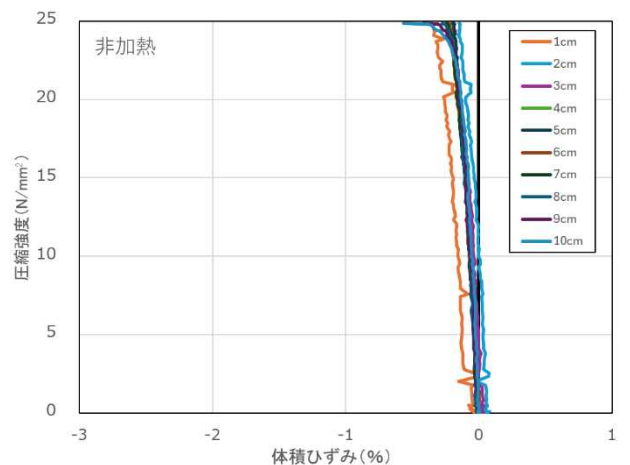


図-4 非加熱供試体の体積ひずみと圧縮強度

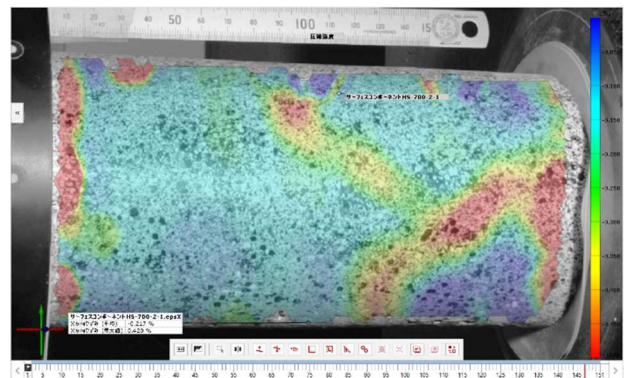
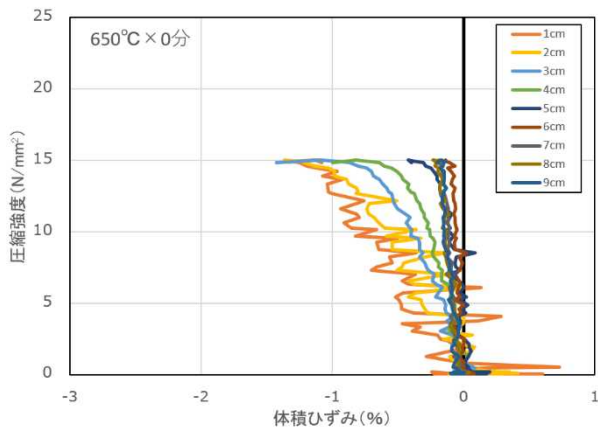
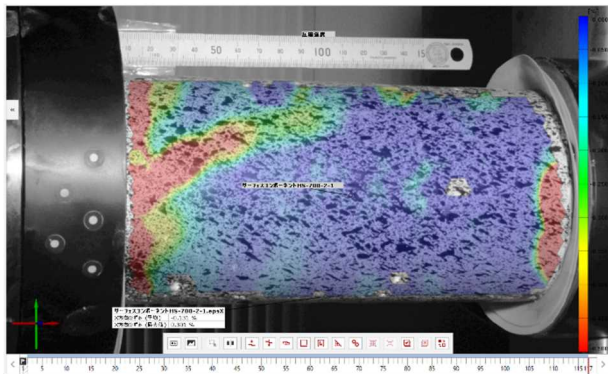


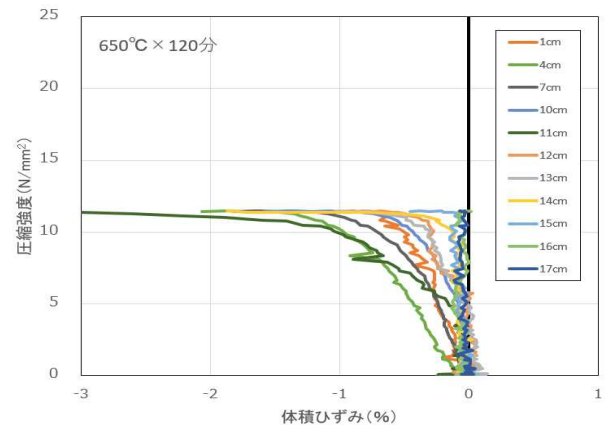
図-5 非加熱供試体の終局前縦ひずみ



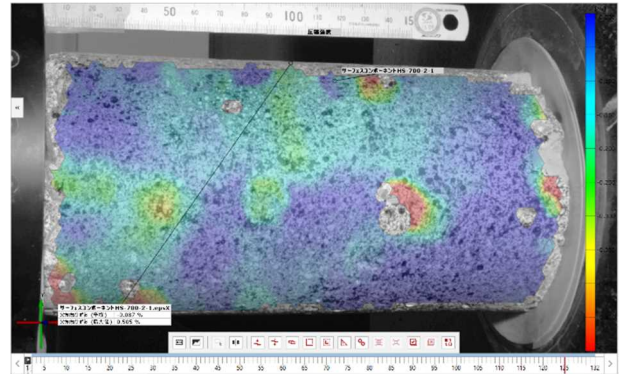
図－6 650°C×0 分供試体の体積ひずみと圧縮強度



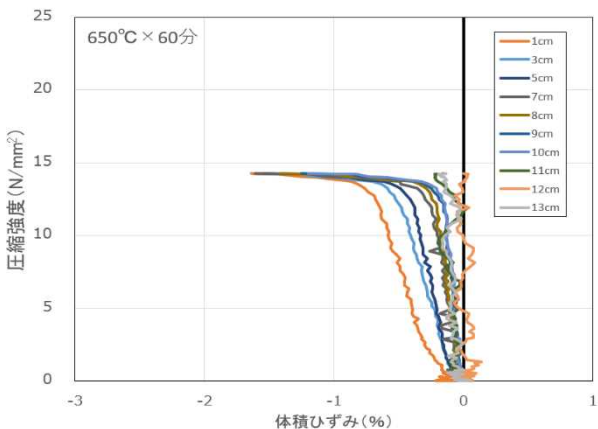
図－7 650°C×0 分供試体の終局前縦ひずみ



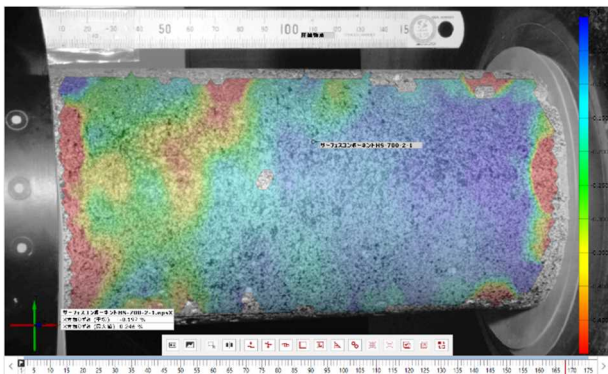
図－10 650°C×120 分供試体の体積ひずみと圧縮強度



図－11 650°C×120 分供試体の終局前縦ひずみ



図－8 650°C×60 分供試体の体積ひずみと圧縮強度



図－9 650°C×60 分供試体の終局前縦ひずみ

この位置（650°C加熱で4～5cm、650°C-60 分保持で10～11cm、650°C-120 分保持では14～15cm）を図－2の内部最高到達温度と照合すると、加熱面から最高到達温度がおよそ150°C以上となる位置までは、受熱の影響による何らかの損傷を受けているものと判断できる。

3.3. 荷重段階における体積ひずみの推移について

前項では、深さごとに体積ひずみの卓越した挙動有無を確認することにより、受熱の影響による劣化範囲の推定を行ったが、本項では水準ごとの荷重中の体積ひずみの推移を比較することで劣化範囲の推定を試みる。

それぞれの試験体で、終局時最大荷重の30%、50%、80%の段階において、2.3 項で加熱面からの深さごとに3 点ずつ抽出したポイントでの縦ひずみおよび横ひずみを確認し、(1)式により体積ひずみを算出してその平均値を求めた。水準ごとに各荷重段階および加熱面（加圧板）からの距離ごとの体積ひずみを並べて比較した。

非加熱供試体における体積ひずみの推移は、荷重段階に応じて負側に大きくなっていくものの、その挙動はコア供試体の加圧板からの距離によることなく、ただ荷重に応じて大きくなる比例的な推移となっていた。

一方で、各加熱後供試体の体積ひずみの推移は、加熱面（上加圧板）からの距離が大きくなるにつれて、最大荷重の 80%荷重段階の曲線と 30%荷重段階の曲線の差が徐々に小さくなり、0 に近い大きさに収束していく傾向が確認できた。その深さは、加熱面温度が 650℃到達直後に加熱を止めた試験体（保持時間 0 分）では、約 6cm であった。同様に 650℃到達後 60 分間保持した試験体では約 12cm、650℃到達後 120 分間保持した試験体では約 16cm であった。

この段階ごとの体積ひずみの曲線が収束に近い状態が見られた深さを、前項で仮定した劣化深さと確認すると、推定した劣化深さとほぼ同じ深さとなっていた。

圧縮強度と体積ひずみの関係性からのみならず、載荷途中の各荷重段階における体積ひずみを比較することで劣化深さの推定が可能となる可能性が確認できた。

図-12～15 に、各水準の加熱面（上加圧板）からの深さおよび、荷重段階ごとの体積ひずみの推移を示す。

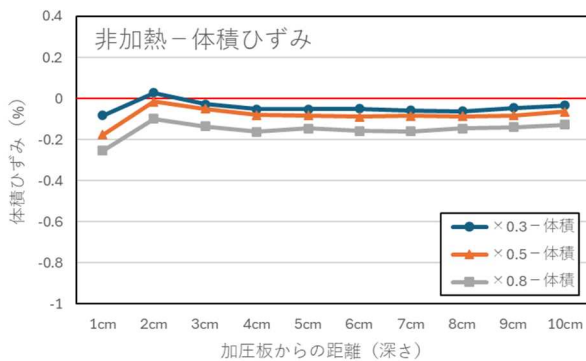


図-12 載荷段階ごとの体積ひずみの推移（非加熱）

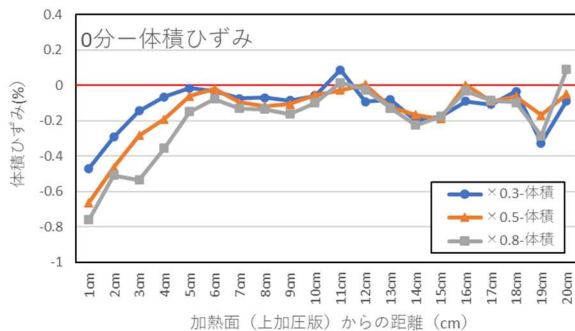


図-13 載荷段階ごとの体積ひずみの推移（0 分）

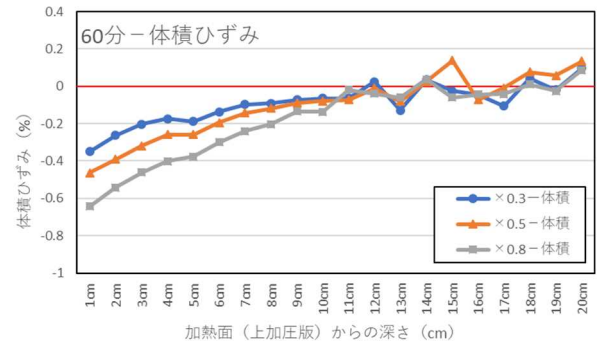


図-14 載荷段階ごとの体積ひずみの推移（60 分）

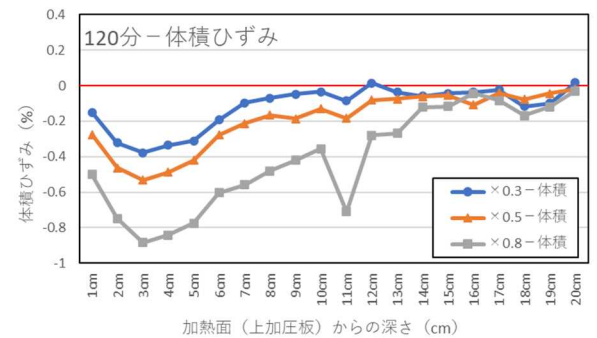


図-14 載荷段階ごとの体積ひずみの推移（120 分）

4. まとめ

デジタル画像相関法を用いて圧縮強度試験の載荷状況を撮影・解析することにより、以下に示す知見が得られた。

- (1). 火害による受熱の影響を受けたコンクリート表層からコア試験体を採取し、デジタル画像相関法を用いて圧縮強度試験状況を解析することで、脆弱化したコンクリート表層の組織の劣化範囲特定を簡便に行うことが可能であることが確認できた。
- (2). 既往の文献などに示されている温度よりも低い約 150℃の受熱の影響により、表層組織が脆弱化する可能性が示された。
- (3). 受熱の影響を受ける時間（高温を保持される時間）が長くなるほど、内部の最高到達温度は高くなり、影響範囲は奥に広がることが確認できた。
- (4). 受熱の影響は、骨材の配置などにより深さ方向に均一に広がるのではなく、深さ方向にひび割れが先行してしまい、体積ひずみの挙動が温度履歴から想定されるよりも深い範囲まで卓越してしまうこともあったことが確認できた。

今後は、ほかの試験法との比較検証を行うとともに、供試体ごとのばらつきに対する検証、さらに低い受熱温度による影響の分析などを行い、より精度の高い推定手法を確立し、迅速な火害調査および補修の実務に役立てたいと考える。

【参考文献】

- 1) 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害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
- 2) (一社)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, p.42, 2024.2
- 3) 日本コンクリート工学会: コンクリート便覧, 技報堂出版, P.78, 1976.2