6. DIC 法を用いた火害を受けたコンクリートの劣化深さの推定に関する実験

Experimental Study on Estimating the Deterioration depth of Cover concrete due to Fire Damage using Digital Image Correlation Method

山崎 順二^{*1} 加藤 猛^{*2}

山内 豊英*3

要 旨

火災を受けた鉄筋コンクリート系構造物の補修工事や表面劣化を受けたコンクリートの補修工事において,構造体コンク リートの表層部のコンクリートの劣化深さを的確に把握することは,補修範囲の決定の際に重要な要因となる。

本報では、火害による表層コンクリートの劣化深さを簡便かつ迅速に推定する手法を確立することを目的として、火災に よる受熱で損傷したコンクリートの載荷試験時に画像相関法(DIC 法)を適用することを考案し、DIC 法によりリアルタイ ムに得られる供試体表面の局部ひずみ挙動の変化に基づく表層コンクリートの劣化深さの推定手法について検討した。

検討の結果,劣化を受けた表層コンクリートの局部ひずみの挙動は,健全部と比較して特異な変化が生じることが確認でき,劣化深さの推定にDIC法によるひずみ計測手法を適用することの有効性が示せた。

キーワード:火害/劣化深さ/画像相関法/局部ひずみ/火害調査/劣化診断

1. はじめに

火災を受けた鉄筋コンクリート系構造物の補修工事や 表面劣化を受けたコンクリート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深さを的確に把握する ことは,補修範囲の決定の際にも重要な要因となり,極め て有用な情報となる。

表層コンクリートの劣化深さを評価するための手法と して,既往の研究には,衝撃弾性波などによる非破壊的手 法や,構造体コンクリートから採取したコアの載荷時の ひずみ挙動により臨界応力度を用いて劣化深さを判定す る手法が提案¹⁾されている。具体的には,劣化損傷を受 けた構造体コンクリートから直径 100mm~80mm 程度 のコアを採取し,コア側面に深さ方向に 2cm 間隔でひず みゲージを対面に貼付し,コア供試体の載荷時の軸方向 および直行方向のひずみから算出される臨界応力度によ り劣化深さを評価する手法である。この臨界応力度によ る手法は,既往の研究の中でも高精度であり学術的な手 法ではあるものの,ゲージ貼付などの前処理など劣化深 さを評価するまでのタスクが比較的大きく,実務に適用 するには劣化深さの推定手法も含めて現時点では改善の 余地があると考えられる。 そこで、迅速性を要する調査業務への実装を視野に入 れ、まずは、火害による表層コンクリートの劣化深さを簡 便かつ迅速に推定する手法として、損傷したコンクリー ト供試体の載荷時に画像相関法(DIC法: Digital Image Correlation Method)によるひずみ計測を適用すること を考案した。

本実験に適用する DIC 法は,非接触の三次元変位・ひ ずみ測定システム (ARAMIS: GOM 社製) であり,カラ ースプレーなどでランダム模様を付した試験対象物を 2 台の高性能カメラで撮影し,ランダム模様の経時変化を 画像相関法で解析することによって高精度に変位とひず みを測定するものである。このシステムによれば,ひずみ ゲージの貼付が物理的に困難な箇所の測定も可能となり, 広範囲または局所的なひずみ分布を三次元的に把握する ことが可能となる。

以上,本報では,火害による表層コンクリートの劣化深 さを迅速かつ的確に把握することを目的として,DIC法 によるひずみ計測手法を適用し,載荷時にリアルタイム に得られる供試体の局部ひずみの挙動の変化に基づくコ ンクリートの劣化深さの推定手法について検討する。

^{*1} 技術研究所 建築材料研究グループ 兼 大阪本店建築部 品質管理室

^{*2} 技術研究所 建築材料研究グループ

^{*3} 技術研究所 建築構造研究グループ

2. 実験概要

2.1 実験に供したコンクリート

本実験に使用したコンクリートは、レディーミクスト コンクリート工場で製造した呼び強度 30 の普通コンク リートを使用して作製した供試体(直径 100mm 高さ 200mmの円柱供試体)である。コンクリートの製造に使 用した骨材は、細骨材は海砂、粗骨材は硬質砂岩砕石であ り、当該生コン工場が JIS 品として日常的に使用してい るものである。

実験に供したコンクリートは、十分に養生した後、耐火 炉を用いて供試体端面(直径 φ 100mm の打込み底面側) から加熱劣化を与えたものである。加熱条件は、炉内温度 を常温から約 2 時間で 770℃まで上昇させ、その状態で 約5時間保持(770℃)した後に徐冷した。

図-1に、コンクリート供試体の深さ方向の受熱温度 を熱電対により計測した結果を示す。炉内温度 770℃に 対して、コンクリート供試体の受熱時間 5 時間後におけ る最高到達温度は、表面で 656℃、表層から深さ 50mm の位置で 389℃、100mm の位置で 229℃であった。一般 に、コンクリートの圧縮強度は、300℃以上の受熱により 徐々に強度低下が生じ、500℃では常温時の強度の 60% 以下に低下、ヤング係数は受熱温度と共に徐々に低下す る²⁾ ことになる。本実験に使用したコンクリート供試体 は、図-1から、表面からの深さが 70mm 程度の位置ま で 300℃以上の熱を受けていることから、この深さ以浅 の領域には微細ひび割れの発生など、マトリックスの弛 緩が生じている可能性があると想定される。

2.2 本実験における劣化深さの推定のための試験方法

DIC 法による三次元変位・ひずみ測定システムでの載 荷時のひずみの計測状況を写真-1に示す。コンクリー トの耐圧試験機に供試体を設置して載荷するのと同時に, 高解像度カメラでの三次元ひずみ計測を開始し,供試体 が破壊するまで継続した。

ここで,通常の圧縮試験では,加圧板と供試体間に端面 摩擦が生じ,図-2a)のように供試体端面付近が加圧板 との摩擦により三軸圧縮状態となり,破壊域が供試体の 端部から中央部に移行するせん断破壊型の破壊パターン となる。一方,図-2b)に示すように,テフロンシートを 挿入して加圧板と供試体端面の摩擦を減じる対策を施し た場合には,供試体の加圧板に接する上下端部が拘束状 態とならず,破壊域が最も脆弱な部分に移行,つまり本実 験に用いる供試体では,受熱を受けて損傷が生じている 供試体端面部から一軸圧縮により破壊することになる。

以上のことに配慮し、本実験では、供試体の設置に際し、





写真-1 三次元ひずみ測定システムの状況



図-2 供試体の端面摩擦の有無による破壊形態¹⁾

供試体と加圧板との摩擦を減じることを目的として,テ フロンシートを挿入して載荷することとした。

3. DIC法による局部ひずみの計測結果

本実験では、供試体底面から図-1に示した受熱を受けた供試体(以下「After Fire 供試体」と記す)と、未加熱の供試体(以下「未加熱供試体」と記す)をそれぞれ準備し、DIC 法を適用した高解像度カメラを用いた三次元

ひずみ計測に供した。

After Fire 供試体および未加熱供試体ともに,載荷時 には,供試体上下端面と加圧板の間に図-2b)に示すよ うにテフロンシート(シートを2枚重ねてその間にグリ ースを挿入)を設置し,供試体端面に生じる摩擦を極力低 減するように配慮した。また,供試体の耐圧試験機への設 置方向は,加熱面が上側となるように設置した。

DIC 法による三次元ひずみ計測システムでは、写真-1に示すようなランダム模様を付した供試体表面全面の 局所ひずみを連続計測すると共に、画像処理によって載 荷途中の局所ひずみの挙動の変化がリアルタイムで可視 化される。そこで、本実験においては、深さ方向の劣化の 程度を推定するために、供試体端面からの深さ(高さ)5, 6,7,8,9cmの位置(それぞれ P1~P5の位置)の圧縮試 験時の供試体表面の局部ひずみ(軸方向圧縮ひずみ)の挙 動を抽出することとした。これらの位置を選定した理由 は、図-1に示す After Fire 供試体の受熱温度が 300℃ を下回る程度の深さ(深さ 80mm 以深)までは、受熱に よる劣化が生じていないと想定したことによるものであ り、本実験で設定した各測定ポイントの局部ひずみの挙 動を捉えることによって、劣化深さをセンチメートルオ ーダーで把握できると考えたためである。

写真-2a)に、未加熱供試体の載荷途中のひずみ分布 のコンターマップ画像の例を示す。色自体の差の詳細に は言及しないが、コンターマップからは、未加熱供試体の 表面には特異なひずみの変化(局所的な色の変化)が認め られず、供試体中央部から端部に向かい徐々にひずみが 変化する様相を呈している。一方、写真-2b)に示した After Fire 供試体におけるコンターマップからは、供試 体上部(受熱面が上端)において表面の局部ひずみが不連 続となる領域がみられ、深さ7cm~8cm(P3~P4)まで のひずみが、供試体下部に見られるような未加熱供試体 と類似したひずみの様相とは異なることが認められる。

ここで、供試体上面からの高さ(深さ)が 5cm~9cm (P1~P5)の位置に生じた軸方向圧縮ひずみの載荷中の 推移を図-3および図-4に示す。図-3には未加熱供 試体での計測結果を示しているが、P1~P5の各点におけ る載荷中の軸方向圧縮ひずみは、未加熱供試体の載荷中 のコンターマップに示されるようにほぼ同様に変化して いることが定量的に把握できる。これに対し、After Fire 供試体の P1~P5 の位置の局所ひずみの推移を図-4に 示す。P4と P5に示す深さ8cmより下部(深い位置)の ひずみ挙動は、図-3に示す未加熱供試体のひずみ挙動 と類似し載荷とともに徐々にひずみが増大する傾向にあ



図-4 After Fire 供試体における局部ひずみの推移

るが、図-4のP1~P3 (深さ5cm~7cm)の軸方向圧縮 ひずみの挙動には、積荷途中における軸方向圧縮ひずみ の急激な増大がみられ、供試体上端部、つまり加熱により 劣化を受けている部分に局所的な破壊が生じていること が伺える。ここでいう局所的な破壊とは、セメントマトリ ックスと粗骨材の界面の微細ひび割れを指し、加熱劣化 により局部的な破壊が生じている部位では、載荷中に骨 材界面の微細ひび割れが徐々に連結し進展することによ り、健全な部位とは異なる局部ひずみの挙動を呈すると 考えられる。このことに基づけば、図-4に示す加熱劣化 を受けたコンクリートの劣化深さが7cm 程度であること が容易に推定できる。

また、**図-5**に、**図-4**と同じ受熱環境で深さ方向に加 熱劣化を与えた After Fire 供試体における DIC 法による



図-5 同条件での After Fire 供試体における推移



写真-3 After Fire 供試体の載荷後の切断面

局部ひずみの計測結果を示す。載荷による各点 (P1~P5) のひずみ挙動は、図-4とはやや異なる傾向を示すもの の、図-4と同様に、供試体上端面から5~7cm (P1~P3) の位置における局部ひずみに特異な挙動が認められるこ とから、同条件の加熱劣化を受けた After Fire 供試体に よる、本報で示した推定手法の再現性が確認できた。

加えて,載荷後の After Fire 供試体の縦方向の切断面 を写真-3に示す。一般に,コンクリートは 300℃~ 600℃の受熱により主としてモルタル部分が変色すると 考えられている。変色の程度は使用材料によって異なる が、**写真-3**では 7~8cm 付近の深さまで変色が生じて いることが確認できる。本実験に供した After Fire 供試 体は、図-1に示したように、深さ 7cm 程度までは 300℃ 以上の加熱を受けており、**写真-3**に示される変色領域 と概ね一致している。

4. まとめ

画像相関法(DIC法)による三次元ひずみ計測の適用 によって、加熱劣化を受けた表層コンクリートの載荷中 のひずみ挙動に、健全部のコンクリートのひずみ挙動と は異なる変化が生じることが確認でき、その挙動により 表層コンクリートの劣化深さが推定できることを示した。

しかし,現段階では,ひずみ挙動の特異な変化の程度を 定性的に評価することによって劣化深さを推定している のみである。

今後,さらに表層劣化に関する実験を継続し,局部ひず みの挙動の変化に基づく,劣化深さの簡便かつシステマ ティックな推定手法の提案と併せて,火害調査診断に対 する実務的かつ実装可能な劣化深さの推定手法を確立し たい。

【謝辞】

火害による表層コンクリートの劣化を模擬したコンク リート供試体の前処理および加熱処理には、一般財団法 人 日本建築総合試験所の春畑仁一様に多大なご協力を 頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

【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一体積ひずみ曲 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)日本建築学会編「建物の火害診断および補修・ 補強方法指針・同解説」