

論文 デジタル画像相関法を用いたコンクリートの光学的全視野変形計測

齊藤 隆典^{*1}・趙 衍剛^{*2}

要旨：本研究ではコンクリート試験体を対象とした一軸圧縮実験を行い、デジタル画像相関法を用いた光学的全視野変形計測を実施した。本論文ではまず、本計測法の概要について示し、特に画像解析法であるデジタル画像相関法の概要とサブピクセル変位の算定法を中心に記述している。更に、計測結果の比較・考察から本計測法の精度について検証し、本計測法が対象物の表面処理を施すことなく十分な精度を有していること、コンクリートに生じる全視野的なひずみ分布を可視化し得ることを示している。また、解析条件をパラメータとした画像解析を実施し、画像解析条件が光学的な変形計測結果に及ぼす影響について検討を行っている。

キーワード：非接触型計測, 全視野計測, 画像解析, デジタル画像相関法

1. はじめに

従来より、コンクリートを対象とした変形計測を行う場合、変位計やひずみゲージといった計測デバイスを用いることが一般的である。この方法は計測実績も豊富であるため、その精度の信頼性が高い反面、対象物に直接接触した状態での計測が前提となるため、設置条件等の物理的な制約が計測の障害となる場合があり、また、コンクリートの計測に関してはひび割れ発生後では計測自体が困難となる可能性がある。一方、このような従来型の計測法に対して、デジタルカメラ等の光学機器を用いることで部材表面の変形状態を画像情報として捉え、取得画像を画像解析することによって変形挙動を全視野的に把握する試みが近年行われつつある^{1), 2), 3), 4)}。この種の方法では、対象物と非接触状態で変形の計測が可能であるために、前述のような物理的制約による問題は生じず、より簡便に対象全体の変形挙動を把握し得ると考えられる。更に、ひずみゲージ等では通常計測することが困難な、対象全体のひずみ分布をより詳細に捉え得る可能性を有しており、非常に大きな利点を有している。しかしながら、この種の計測法では、計測の精度面や計測上、対象物に表面処理を施す必要がある等の実用面からも未だ議論の余地が残されているように思われ、限定的な適用範囲に留まっているのが現状のように思われる。

本研究ではこのような背景から、デジタル画像相関法による光学的全視野変形計測法を用い、特別な表面処理を施すことなく、より高精度で実用的にコンクリートの変形挙動を計測することを目的として、画像解析アルゴリズムにデジタル画像相関法と二次曲面近似手法を採用した計測法を構成し、コンクリート試験体の一軸圧縮実験による計測結果からその精度について検証を行っている。更に、計測精度に影響を及ぼすと想定される画像解析条件をパラメータとするパラメトリック解析を実施

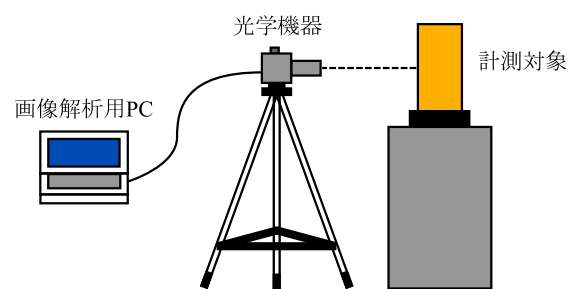


図-1 光学的全視野変形計測法の構成

することで、その影響について検討を加えている。

2. デジタル画像相関法による光学的全視野変形計測法

2.1 変形計測法の構成

図-1に本研究で用いる光学的全視野変形計測法の構成を示す。本計測法は画像取得用の光学機器と画像解析用PCから構成している。図に示すように、計測対象物の変形状態を光学機器により画像情報として記録する。解析用PCを用いて、この得られた画像に後述する一連の画像解析を適用することにより、計測対象と非接触状態で変形を全視野的に計測することが可能である。

2.2 デジタル画像相関法の概要

ここでは、本研究で計測点の変位算出に用いた、画像解析手法の一種である、デジタル画像相関法について記述する。図-2は解析画像の一例を示したものであり、図中に示す変位前後の画像を用いその原理を説明する。まず、図中(a)にあるように、変位前の初期画像における任意の点を計測点と仮定し、この点を中心とした $N \times N$ ピクセルの領域(サブセット)を設定する。この初期画像において設定したサブセットは後に相関値を計算する際の参照画像となる。次に、計測対象に変形や剛体変位が生じ、画像中に設定したサブセットが変位した状態を考える(図中(b))。図中に示す u, v はそれぞれ計測

*1 神奈川大学工学部建築学科 助教 博士(工学) (正会員)

*2 神奈川大学工学部建築学科 教授 博士(工学)

点の水平・鉛直方向の変位であり、参照画像と変位後画像とを比較することでこれら変位を算定する。デジタル画像相関法では、画像を構成するピクセルが持つ輝度値を基に設定したサブセットの相関性によるパターンマッチングを行い、最も相関性の高いサブセットを推定することになる。本計測法では、参照画像として設定したサブセットと変位後画像におけるサブセットの輝度相関値 R を計算するにあたり、下式で表される正規化相互相関法を用いる。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N D_1(i, j) \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_1(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N D_2(i, j) \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_2(i, j)}} \quad (1)$$

ここで、

$$D_1(i, j) = \{L_d(u_o + u + i, v_o + v + j) - \overline{L_d}\}$$

$$I_1(i, j) = \{L_i(u_o + i, v_o + j) - \overline{L_i}\}$$

$$D_2(i, j) = \{L_d(u_o + u + i, v_o + v + j) - \overline{L_d}\}^2$$

$$I_2(i, j) = \{L_i(u_o + i, v_o + j) - \overline{L_i}\}^2$$

但し、 L_d : 変位後画像におけるサブセット内任意点の輝度値、 L_i : 参照画像における任意点の輝度値、 $\overline{L_d}$: 変位後画像におけるサブセット内の輝度平均値、 $\overline{L_i}$: 参照画像における輝度平均値

(1) 式から計測画像中の各点を中心とするサブセット領域の相関値を算定し、最も高い相関性を有するサブセット中心を変位した計測点として求め、計測点の初期座標との比較から変位量を求めることができる。更に、計測画像中に複数の計測点を設定して同様に変位量を求めることで、隣接する計測点間の変形量・ひずみを求めることができる。この画像解析プロセスを取得したすべての画像情報に適用することで、計測対象の変形の推移を計測することができる。

2.3 回帰二次曲面を用いたサブピクセル変位の計測

デジタル画像相関法を用いた計測を行う場合、画像のピクセル輝度値の相関性を利用して変位量を求めるため、表示できる変位の最小量は画像の最小単位であるピクセルサイズに依存することになる。しかしながら、載荷時のコンクリートに生じる変形は極めて小さく、取得画像の解像度の大きさにもよるがピクセルサイズと比べて微小な値を取る場合が多い。即ち、光学的な方法で高精度に変形計測を行うためには、1ピクセル以下のサブピクセルレベルでの変位測定が求められる。本研究では、このサブピクセル変位の測定を行うために、前節の方法で同定した計測点の輝度相関値から、計測点近傍を極値とする回帰二次曲面⁵⁾を求め、その極値を最も真値に近い座標値として算出する。ここで、計測点のサブピクセル

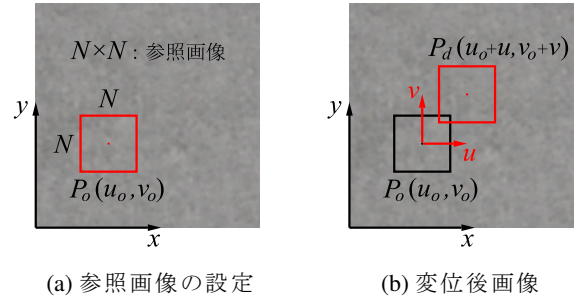


図-2 デジタル画像相関法の概要

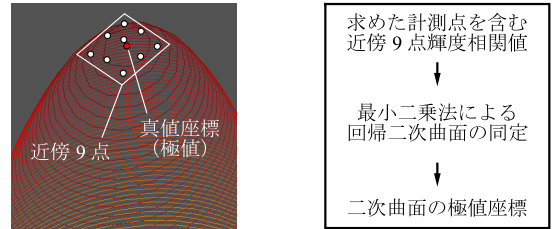


図-3 回帰二次曲面によるサブピクセル変位の計測

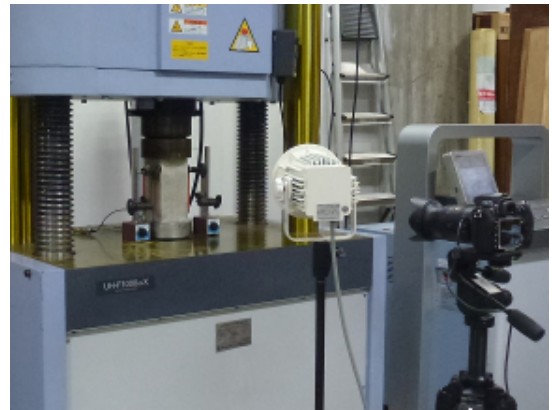


写真-1 計測時セットアップの一例

変位を求めるために、次式で表す二次曲面を考える。

$$f(x, y) = c_1x^2 + c_2y^2 + c_3xy + c_4x + c_5y + c_6 \quad (2)$$

この二次曲面形状を表す係数 $c_1 \sim c_6$ は、同定した計測点を含む近傍9点の輝度相関値を用い、最小二乗法を用いて回帰することにより決定する。図-3は、実際に求めた回帰二次曲面と用いた近傍9点および算出した極値の一例を示したものである。この図に示すように、回帰二次曲面の極値を求めることによって、計測点のより真値に近いサブピクセル変位を算定することができ、より高精度な計測が可能となる。

3. コンクリート試験体一軸圧縮試験の計測結果の比較

軸方向長さの異なる2種のコンクリート角柱試験体の一軸圧縮試験を実施し、本計測法を用いた計測を行った。圧縮試験はアムスラー型試験機を用いて変位制御により載荷を行った。計測では光学機器として、デジタル

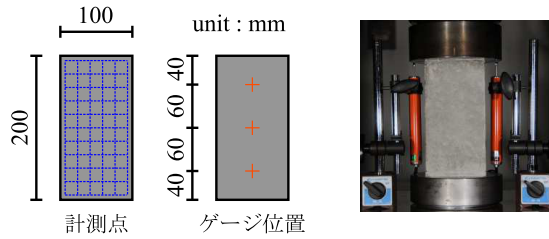


図-4 試験体CSの概要

表-1 試験体CSの材料性状および計測条件

圧縮強度	打設方向	ゲージ検長	载荷速度
33.8 N/mm ²	縦打ち	30 mm	0.005 mm/sec
計測距離	計測周期	焦点距離	絞り値
1210 mm	5秒間隔	50.0 mm	F8
計測点(水平)	間隔(水平)	計測点(鉛直)	間隔(鉛直)
6点	80 pixel	11点	80 pixel
解析画像範囲		サブセット範囲	
400×800 pixel		101×101 pixel	

スチルカメラ（カメラ：Nikon D300S，レンズ：AF-S DX NIKKOR 18-200mm f/3.5-5.6G ED VR II）を用いた。尚、本計測ではレンズ収差等の補正については実施していない。また、計測対象面の照度を一定に保つために白色LEDライト2組を用いた（写真-1）。デジタル画像相関法を用いた計測では通常、計測対象に表面処理としてランダムパターンを付与するが、本研究では実用的な観点からは望ましくないパターンを付与することなく、本計測法が十分な精度を有するかを確認するため、いずれの試験体でも特別な表面処理は行っていない。以下より、各試験体の概要および計測結果の比較・考察を示す。

3.1 コンクリート試験体CSの計測結果の比較

コンクリート角柱試験体CSの概要を図-4、材料性状および計測条件を表-1に示す。この試験体は寸法100×100×200mmの角型断面を持つコンクリート試験体である。本計測に際し計測点は、水平方向6点、鉛直方向11点を解析画像に設定しており、ひずみの全計測区間は水平方向55区間、鉛直方向60区間である。また、計測結果の比較のために、試験体裏面に2軸ひずみゲージを複数貼付することで水平ひずみ、鉛直ひずみを計測し、試験体両脇に設置した変位計で鉛直変位を計測した。

図-5は、試験体CSの軸方向応力-ひずみ関係についての計測結果の比較を示したものである。図中には、本計測結果とひずみゲージによる計測結果について示してあり、水平ひずみと鉛直ひずみとを併せて表示してある。尚、それぞれのひずみの値は複数ある計測区間の平均値で表示している。計測結果の比較より、水平ひずみ、鉛直ひずみのいずれでも、本計測結果とひずみゲー

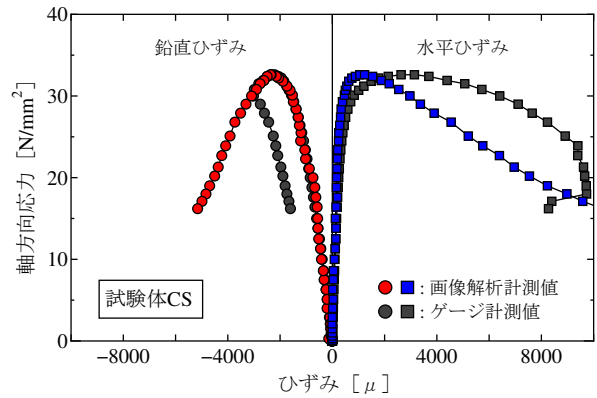


図-5 試験体CSのひずみ計測結果の比較

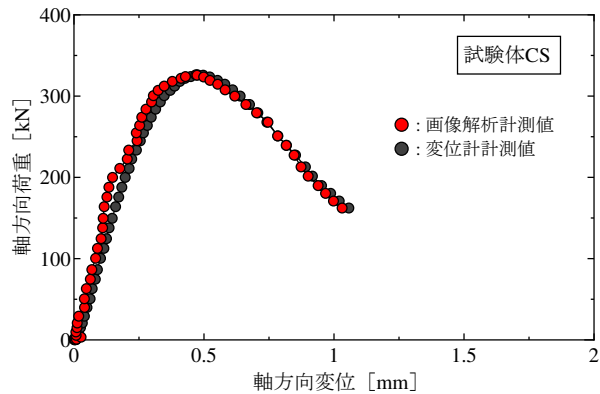
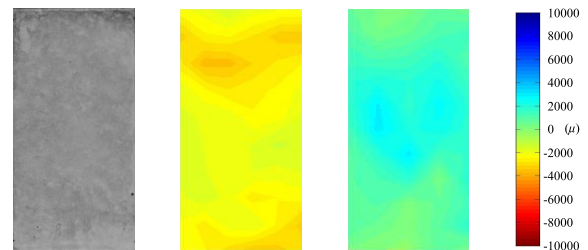
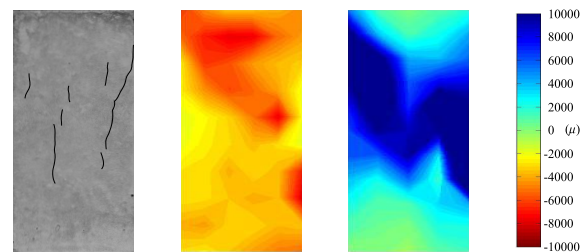


図-6 試験体CSの変位計測結果の比較



(a) 最大応力 32.6 N/mm² 時点



(b) 応力低下域 23.6 N/mm² 時点

図-7 画像解析による試験体CSのひずみコンタ

ジの計測結果は最大応力に至るまで良好に対応していることが読み取れる。また、最大応力以降について見てみると、水平ひずみは両者で異なる結果が得られた。これは、それぞれの計測位置とした試験体の表面、裏面でのひび割れ状況が異なったことに起因するものと考えられる。鉛直ひずみについては、本計測結果とひずみゲージ

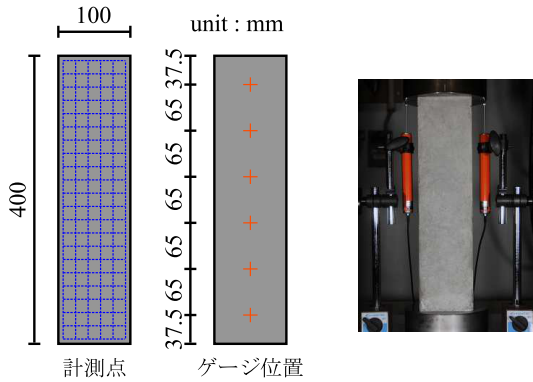


図-8 試験体 CL の概要

表-2 試験体 CL の材料性状および計測条件

圧縮強度	打設方向	ゲージ検長	荷重速度
33.8 N/mm ²	縦打ち	30 mm	0.005 mm/sec
計測距離	計測周期	焦点距離	絞り値
1360 mm	5秒間隔	50.0 mm	F8
計測点(水平)	間隔(水平)	計測点(鉛直)	間隔(鉛直)
6点	80 pixel	21点	80 pixel
解析画像範囲		サブセット範囲	
400×1600 pixel		101×101 pixel	

の計測結果は最大応力以降においても、ひずみゲージが一部計測不能となった、およそ-3000 μ 程度まで同等の結果が得られている。更に、本計測法では、これ以降の領域でも計測が可能であった。

図-6に試験体CSの軸方向荷重-軸方向変位の計測結果の比較を示す。図中には、本計測結果と併せて変位計による測定結果を表示してある。この結果から、本計測法で得られた軸方向変位は変位計による計測結果と比べて、最大応力に至るまでの経路で若干のばらつきが見られる部分はあるものの、ランダムパターンの付与なしでも計測終了に至るまで概ね良好に対応していると言える。また、この結果はひび割れ発生が顕著となり、ひずみゲージでの計測が通常困難なポストピーク領域においても、本計測法が計測可能であることを示唆している。

図-7は本計測結果により表示した試験体CSのひずみコンタを表したもので、図中には最大応力時および応力低下域の代表点における結果を示してある。また、試験体表面の状態を表す画像中には、その時点で生じているひび割れを黒線で強調表示してある。これらの図より、最大応力から応力低下域にかけて、ひずみが増大していく様子が読み取れる。また、試験体表面にひび割れが生じた応力低下域での結果を見ると、引張となる水平ひずみの増大域とひび割れ発生箇所には概ね対応が見受けられ、本計測法が従来型の計測では難しい全視野的なひずみ分布を表示し、より詳細にコンクリートの圧縮挙

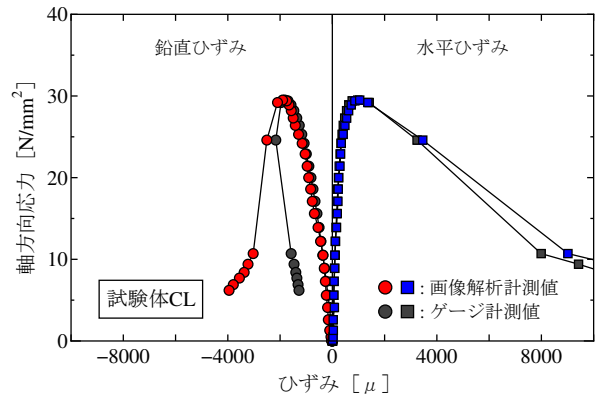


図-9 試験体 CL のひずみ計測結果の比較

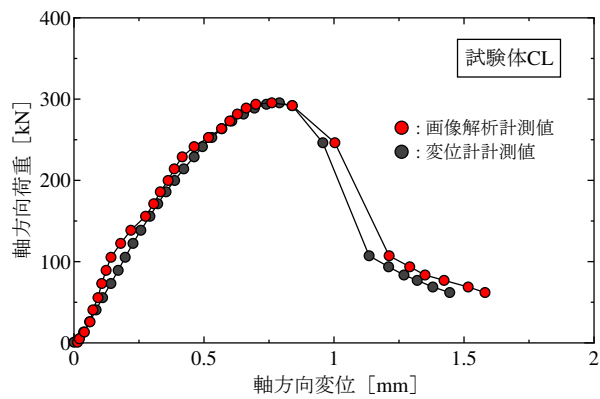
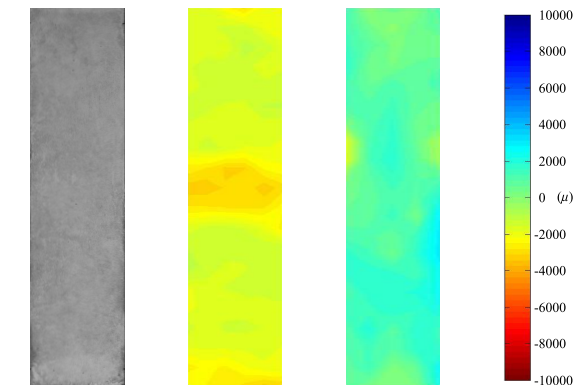
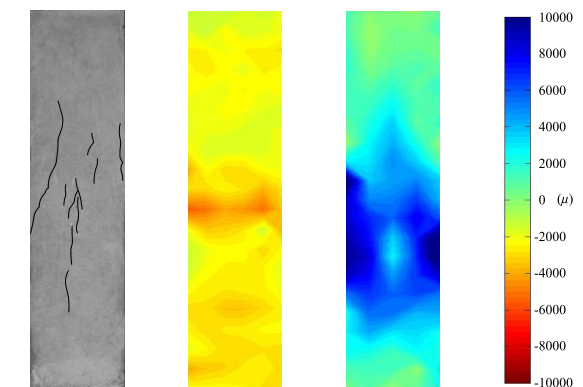


図-10 試験体 CL の変位計測結果の比較



試験体表面 鉛直ひずみ 水平ひずみ

(a) 最大応力 29.5 N/mm² 時点



試験体表面 鉛直ひずみ 水平ひずみ

(b) 応力低下域 24.6 N/mm² 時点

図-11 画像解析による試験体 CL のひずみコンタ

動を表現し得る可能性を有していることがわかる。

3.2 コンクリート試験体 CL の計測結果の比較

図-8 にコンクリート角柱試験体 CL の概要および計測条件を示す。試験体は $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の寸法を持つ角型断面のコンクリート試験体であり、前節の試験体 CS の 2 倍の高さを持つ試験体である。画像解析において設定した計測点は水平方向 6 点、鉛直方向 21 点で、ひずみの全計測区間は水平方向 105 区間、鉛直方向 120 区間である。計測の比較用に用いたひずみゲージおよび変位計については、先の試験体 CS とゲージ点数を除いて同様である。

図-9 に試験体 CL の軸方向応力-ひずみ関係についての計測結果の比較を示す。それぞれのひずみの値は複数ある計測箇所の平均値で表示してある。この比較より、水平ひずみ、鉛直ひずみともに本計測結果とひずみゲージによる結果は、最大応力以降の鉛直ひずみを除いて良好に対応する結果となった。試験体 CL では最大応力に達した直後に急激な応力低下が生じ、その際に圧縮となる鉛直方向のひずみゲージの一部が計測不能となった。

図-10 に試験体 CL の軸方向荷重-軸方向変位の計測結果の比較を示す。本計測結果は変位計による計測結果と荷重初期段階から計測終了に至るまでほぼ同等な値が得られる結果となった。この結果と図-9 での比較とを併せて考えると、本計測法が比較的細長比の大きい試験体を対象とした場合も、通常は計測が困難な最大応力以降の変形挙動を捉えることが可能であると言える。

図-11 に、本計測結果から表示した試験体 CL のひずみコンタを示す。図中には最大応力時、応力低下域における結果を水平ひずみ、鉛直ひずみに分けてそれぞれ表示してある。また、図中には試験体表面に発生したひび割れを黒線表示してある。これらの図を比較すると、最大応力時点で試験体中央部分に鉛直ひずみの局所化が表れ始め、圧縮軟化の生じた応力低下域ではひずみの局所化が急激に進行していく様子を読み取れる。特に試験体高さ 400 mm の試験体 CL では、この影響が顕著に表れており、既往の研究で指摘されている点⁴⁾とも一致する。また、試験体表面に生じたひび割れ発生箇所と引張となる水平ひずみの集中箇所についても概ね対応が見られた。

4. 画像解析条件が計測結果に及ぼす影響

画像解析条件の設定が計測結果に及ぼす影響について検討を試みる。ここでは、前章において示した試験体 CS の軸方向応力-鉛直方向ひずみ関係の計測結果を基準値とし、計測精度に関係すると予想される画像解析条件をパラメータとした解析を行い、計測結果の比較を行う。尚、基準値を用いた場合、計測における解析時間は取得画像 1 枚あたり 5.66 sec (画像解析環境 CPU : Intel Core

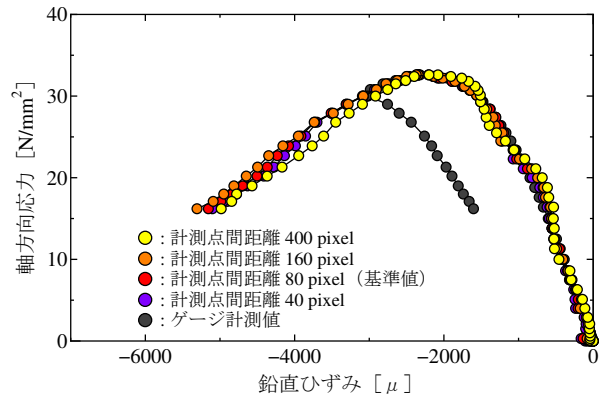


図-12 計測点間距離をパラメータとした解析結果

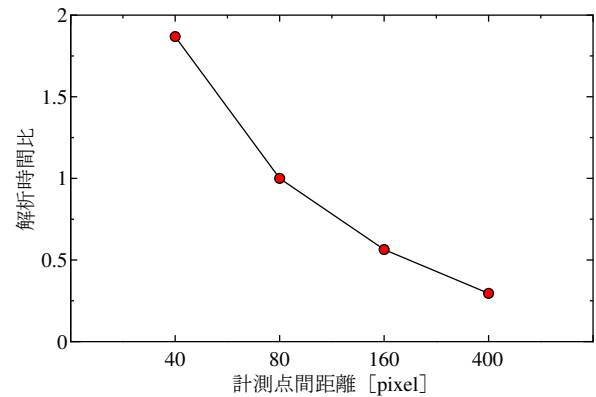


図-13 解析時間比 (計測点間距離) の比較

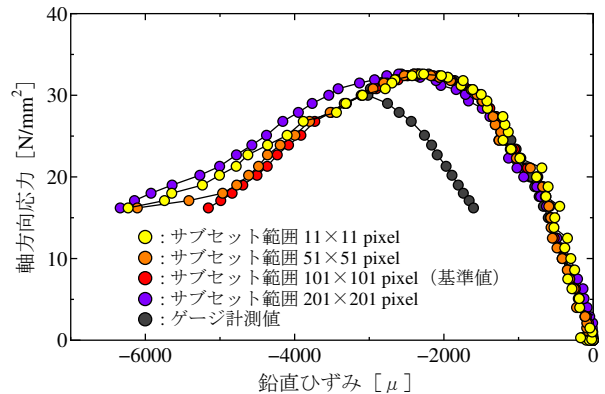


図-14 サブセット範囲をパラメータとした解析結果

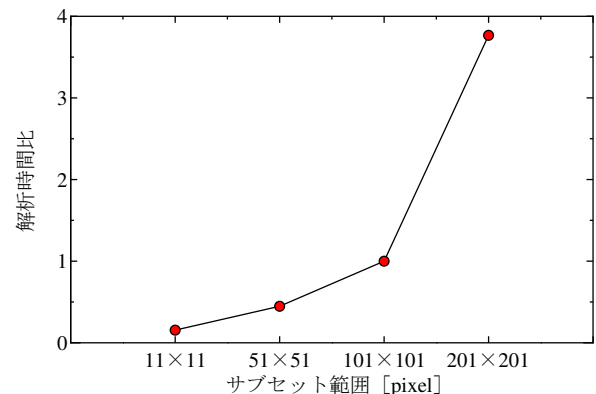


図-15 解析時間比 (サブセット範囲) の比較

i5 3.47GHz, RAM : 2.0GB), 計測精度は, 計測可能範囲内におけるひずみゲージの計測結果と本計測結果を比較した場合のひずみ差の最大値で, 約 50μ (目標計測精度 : $50\mu = 1/250\text{pixel}$) である。以下より, 各パラメータ設定が計測結果に及ぼす影響について検討する。

4.1 計測点間距離の設定の影響

図-12に, 画像解析時に設定する計測点数により決定される計測点間距離をパラメータとした解析結果の比較を示す。鉛直ひずみの計測結果について比較を行うため, ここでは鉛直方向の計測点間距離をパラメータとして変化させている。基準値として設定した鉛直方向の計測点間距離は80pixelに相当する。尚, その他の解析条件については基準値と同様である。この図から, 計測点数を減少させて計測点間距離を大きく設定するほど, 計測精度が低下することが読み取れる。特に, 計測点間距離を基準値の5倍である400pixelとした場合には応力上昇域で波打つような曲線となり, ひずみゲージによる計測結果との間に最大でひずみ 180μ 程度の差が見られた。また, 計測点数を減少させた場合には解析範囲に設定する計測区間が粗くなるため, 表示可能なひずみ分布の精度も低下する結果となる。一方, 計測点間距離を40pixelとして計測区間をより詳細化した場合については, 基準値との計測精度の大きな差は見られなかったが, 図-13に示すように, 計測点数の増加に伴い, 解析時間については基準値と比べておよそ2倍増加する結果となった。

4.2 サブセット範囲の設定の影響

図-14は, 画像解析時に設定するサブセット範囲をパラメータとした解析結果の比較を表したものである。図中には, サブセット範囲を $11 \times 11\text{pixel}$, $51 \times 51\text{pixel}$, $101 \times 101\text{pixel}$ (基準値), $201 \times 201\text{pixel}$ と設定した場合の計測結果を示してある。その他の解析条件については基準値と同様である。この図より, パターンマッチングに用いるサブセット範囲を基準値よりも減少させた場合, 計測精度が低下する結果となった。特に, サブセット一辺の長さを基準値の0.1倍とした $11 \times 11\text{pixel}$ の計測結果でその傾向が顕著に表れている。これは, 本計測では計測対象へのランダムパターンの付与を施していないため, より正確に計測点の探索, 変位の算定を行うためには, 基準値程度のサブセット範囲が必要であることを示唆している。また, サブセット範囲を拡張した $201 \times 201\text{pixel}$ においては, 基準値と比べて逆に精度が低下する結果となっている。サブセット範囲をパラメータとした場合の解析時間は, 図-15に示すように, サブセット範囲 $201 \times 201\text{pixel}$ の解析において, 基準値の約4倍の解析時間が必要となった。これはサブセット内のピクセル数の増加のため, 計算回数が大幅に増加したことに起因している。ここまでに示したよう

に, 設定するサブセット範囲の大きさが解析時間に与える影響は非常に大きく, 先の精度面での比較も併せて考えると, 本計測で基準値として設定したサブセット範囲が妥当であることがわかる。

5. まとめ

本研究では, デジタル画像相関法を採用した光学的全視野変形計測法を用い, コンクリートの一軸圧縮実験における計測を実施した。本論ではまず, 計測法の構成とデジタル画像相関法およびサブピクセル変位の算出方法を中心とした画像解析法の概要について記述した。更に, コンクリート試験体を用いた試験から得られた計測結果の比較について示し, 本計測法が従来型のひずみゲージや変位計による計測結果と比べても概ね良好な精度を有しており, 全視野的なひずみ分布を表示可能であることを示した。また, 計測結果の比較より, 計測上, 通常必要とされるコンクリート試験体表面のランダムパターン処理を施すことなく, 十分な精度を有していることを確認した。更に, 画像解析条件をパラメータとした解析を実施し, その結果の比較から, 計測への影響が大きいと予想される, 計測点間距離およびサブセット範囲の設定が計測結果に及ぼす影響について示した。

謝辞

本研究の遂行にあたり, 清瀧彩加氏(神奈川大学学部生)にご助力をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 出水亨, 松田浩, 中島朋史, 浜岡広: 非接触全視野計測によるコンクリートの材料試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.473-478, 2006
- 2) 内野正和, 佐川康貴, 尾上幸造: デジタル画像相関法を用いたコンクリート供試体のひずみ計測, 日本機械学会2006年度年次大会講演論文集(1), pp.833-834, 2006
- 3) 畝田道雄, 柴原正和, 丸石正克, 石川憲一, 岩田節雄, 北村幸嗣: サブピクセル画像処理を用いた構造物の非接触変形・応力計測法に関する研究, 精密工学会誌, Vol.72, No.3, pp.360-365, 2006
- 4) 阪本陽一, 三木朋広, 二羽淳一郎: 画像解析によるコンクリートの局所的圧縮破壊領域の同定, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.43-48, 2007
- 5) 畝田道雄, 奥畑峻, 石川憲一: デジタル画像相関法を用いた全視野変形・ひずみ測定精度評価研究, 日本機会学会論文集(C編), 76巻, 763号, pp.119-126, 2009