

デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究

Fundamental Study on Improvement in Strain Measurement Accuracy of Digital Image Correlation Method

出水享*・松田浩**・戸次翔***・森崎雅俊***内野正和****・伊藤幸広*****・森田千尋*****
Akira DEMIZU, Hiroshi MATSUDA, Sho HETSUGI, Masatoshi MORISAKI, Masakazu UCHINO, Yukihiro
ITO and Chihiro MORITA

*修 (工) 長崎大学大学院生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

**工博 長崎大学教授 大学院工学研究科 (同上)

***学 (工) 長崎大学大学院生産科学研究科 (同上)

****博 (工) 福岡県工業技術センター (〒807-0831 北九州市八幡西区則松 3-6-1)

*****博 (工) 佐賀大学准教授 大学院工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

*****博 (工) 長崎大学准教授 大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

Recently, the optical full field measurement is researched. There is digital image correlation method (DICM) in that. DICM calculates the digital image of which it takes a picture with CCD camera and displacement and the strain distribution can be calculated easily by analyzing the value. In this study examined the strain highly accurate measurement in several 100 μ or less minute strain area. The analysis that changed the analysis condition and the improvement of the strain measurement accuracy by the multi-rosette analysis method that used DICM were tried.

Key Words: digital image correlation method (DICM), full-field measurement, multi-rosette analysis, strain distribution

1. 序 論

構造物に生じるひずみを計測し、管理を行うことは、品質やその安全性を確保する上で有効な手段である。また供用中の構造物では、荷重や材料劣化に起因するひずみのモニタリングによつて的確な維持管理が可能となる。現在、このようなひずみ計測による各種管理の有用性は一般的に認識されているものの、実現場において実施されるケースは少ない。その理由として以下のことが挙げられる。

ひずみゲージから得られるひずみ値は、1点1方向の平均ひずみであり、多点計測のためには、多くのひずみゲージを設置する必要がある。そのため、測定器までの複雑な配線作業を伴うため作業面やコスト面で問題が生じる。測定対象物が脆性材料の場合、破壊挙動が複雑でひび割れの進展方向が変化するため、ひずみゲージによる計測法では、ひび割れ発生を正確に予測し、ひび割れ進展を追跡することは極めて困難である。また、ひび割れ発生やひび割れ幅の増大にとまない、ひずみゲージが切れて計測が不能となる場合もある。さらに、ひずみゲージ自体のセンサとしての耐久性が、長期間にわたるモニタリングにおいて課題が残るとともに、対象物に直接ゲージを貼付する必要があるため、環境条件によっては計測が制限される場合もある。

現在、従来のひずみゲージに代わる計測法として、光学的全視野計測法の研究開発が行われている¹⁾。代表的な光学的全視野計測法として、スペックルパターン干渉法、デジタルホログラフィ法、デジタル画像相関法^{2)~4)}(以下DICMと呼ぶ)がある。その中でもDICMは、CCDカメラなどで撮影したデジタル画像を数値解析することにより、計測範囲全体の変位・ひずみ分布やその方向を非接触・高精度に求めることができる手法である。測定に際しては、対象物の画像を撮影するのみという簡易な手法であること、計測システムは、ノートPCとカメラのみと軽量・簡易であるため持ち運びや計測のセッティングが容易なことともその特徴の一つと言える。

筆者らは2000年ごろからDICMを土木構造物に適用するために、コンクリート部材や鋼部材の破壊・劣化過程における変位やひずみ計測に関する研究を行ってきた^{5)~8)}。その中で、DICMを利用した2点間の距離変化によるひずみ解析法では、2点間距離を短くした場合、このひずみ領域において、ばらつきが生じることを確認している。

計測誤差の要因として様々あるが、イメージセンサにより映像を光から電気信号に変換する際や撮影時のカメラの振動などにより発生・混在するノイズが主要原因だと考える。これらのノイズが低ひずみ領域の測定において、大きな誤差となる。

そこで、本研究は数 100μ 以下の微小ひずみ領域において精度良くひずみ計測を行うため、解析条件を変化させた解析やDICMを用いたマルチロゼット解析法⁹⁾によるひずみ計測精度の向上を試みた。なお、本研究は基礎的な研究のため、ひずみのばらつきが小さい鋼部材を用いて計測を行った。

2. デジタル画像相関法

2.1 原理

DICMは、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の測定対象物表面をCCDカメラなどで撮影したデジタル画像を数値解析することにより、計測範囲全体にわたって変位の大きさと方向を容易に求めることができる手法である。

DICMを行う際に重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。解析原理は、デジタル画像が一般的に256階調で表現される画像であることを利用したものである。まず、変形前の画像において、任意の点(1画素)を中心とした $N \times N$ 画素の任意領域(サブセット)を指定する(図-1(a))。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する(図-1(b))。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。このサブセット中心の点の移動より変位方向、変位量を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返す事によって、全視野の変位データを得ることができる。ひずみ分布は、以上の方法により得た変位量を利用して算出する。これは、図-2(a)に示すように、あらかじめ求めたい点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の二点間の長さの変化を求め、計測点のひずみとする解析手法である。この解析手法の特長として、水平(図-2(b))、垂直、斜め、最大・最小主ひずみの値と方向を求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となること、などが挙げられる。

変形前後の画像間における相関を求める方法として、1画素単位の計測精度で変位量を求める粗探索と、1画素以下の精度で変位量を求める精密探索が存在する。粗探索の一例として、残差最小法を利用した算出方法を式(1)に示す。

$$C(X+u, Y+v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) - I_u(X+i, Y+j) \quad (1)$$

ここで、同式中の $I_u(X, Y)$ 、 $I_d(X+u, Y+v)$ は、それぞれ変形前、変形後の輝度値を示す。 X, Y は、サブセットの中心座標を表す。 u, v は、それぞれ x 方向、 y 方向への移動量を示す。 $N=2M+1$ である。式(1)の値が最小となる位置は、設定したサブセットの移動後における中心位置(最近接画素)と考えられる。

しかしながら、前述の通り、実際の移動量は最近接画像と一致することは稀であり、ほとんどの場合は、1画素単

位以下の微小な変位をとまなうものである。そこで、粗探索後に、1画素以下の精度で移動量を求める精密探索を行う。これらの探索例として、最近接画素周辺の画素点での相関値を利用する方法^{10,11)}や、離散的な画素の強度値の間に対して直接的に数値補間を導入し、相関が最も良い位置を求める方法^{12,13)}がある。前者は、相関の最も高い画素位置とその周辺部の画素位置での相関値について、1次曲線や2次曲線、ガウス分布の直線、曲線などを利用して補間し、その交点やピークをもとに1画素以下の移動量を求めるものである。一方、後者は、計測した画像の離散的な強度分布を直接、線形や2次曲線、Bi-cubic等の補間関数を用いて補間、相関関数を演算し、相関の最も良い位置を求めるものである。本研究では、精密探索として後者の解析方法を採用した。同解析方法に使用した相互相関の式を、式(2)に示す。

$$C(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(X+i, Y+j)}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{I_d(X+u+i, Y+v+j)\}^2 \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{I_u(X+i, Y+j)\}^2}} \quad (2)$$

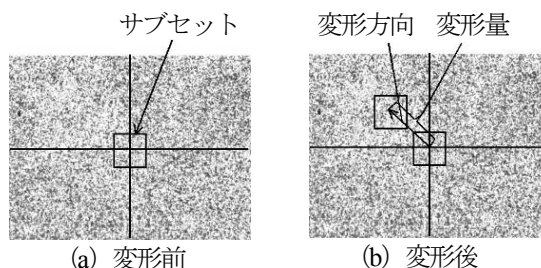


図-1 変形前と変形後のデジタル画像

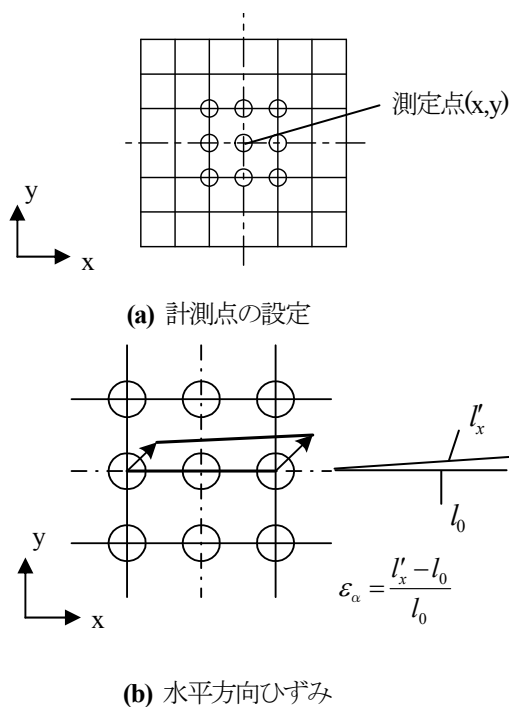


図-2 ひずみ解析

2.2 計測システム

計測システムの写真，仕様を写真-1，表-1 にそれぞれ示す。本システムは，モノクロ CCD カメラ，レンズ，ノートパソコン，接続ケーブルで構成される。簡易なシステムかつ軽量で持ち運びが容易である。カメラ自体にメモリ等が内蔵されていないため，撮影画像はノートパソコンに保存される。画像の撮影は，通常のデジタルカメラとほぼ同様のため，測定に際して特別な技量は必要としない。

本研究では，2 台の CCD カメラを用いたステレオ撮影による 3 次元計測を行い，ひずみを算出した。ステレオ撮影は，通常のカメラ 1 台の撮影と比較して，カメラと試験体を正確に正対させて撮影する必要がないことや，試験中に試験体が面外方向に変形しても高精度に計測できることなどのメリットがある。

一般に，レンズは曲面となっているため，撮影された画像はひずみを持っている。また，2 台のカメラでステレオ撮影する場合は，カメラ画像の位置合わせを行う必要がある。ここでは，計測前において 2 台の CCD カメラで写真-2 に示すキャリブレーションプレートを用いて，位置や角度を変えながら複数枚（20 枚から 30 枚程度）撮影することで，画像のひずみ補正やカメラの位置合わせを行う。

2.3 マルチロゼット解析

マルチロゼット解析は，円孔縁近傍に生じる応力集中の簡便な評価手法として筆者ら開発したものである⁹⁾。DICM は，任意にゲージ長を設定することができるが，ゲージ長が短い場合やひずみ量が小さい場合，解析値がばらつく傾向を示す。そのため円孔の応力集中部のような微小領域の計測では解析誤差が大きくなり有効な方法ではない。しかしながら，円孔の中心点から点対称となる 2 点間の距離変化率を利用する手法では，2 点間距離を大きくすることができ，誤差が小さくなる。さらに，誤差をできるだけ小さくするために 2 点間の距離変化率を利用してロゼット解析を複数回行うことで，その誤差を平均化することができる。以下にマルチロゼット解析の手順を示す。

- 1) 図-3 に示すように円孔の中心点を中心とし，同心円状に解析点を配置する。例えば，図-3 の場合は 64 点（64 分割）配置している。
- 2) 点対称になる 2 点の解析点の移動量を DCIM で求め，2 点間の距離変化率を計算する。
- 3) 2) で求めた距離変化率の内，0°，45°，90°の角度に位置する計算結果（図-2 に示す 1 と 33，9 と 41，17 と 49 の組み合わせ）を用いてロゼット解析を行い，この組み合わせの時の最大，最小の距離変化率と方向を求める。（シングルロゼット解析）
- 4) その後，組み合わせを変えてロゼット解析を行う。図-3 の場合は組み合わせの総数は 32 通りあり，その平均値を求め，この同心円における距離変化率の最大，最小値および方向とする。（マルチロゼット解析）

なお，同心円の径を変えることで円孔近傍から外側に向かっての分布評価が可能となる。



写真-1 計測システム

表-1 仕様

CCD カメラ	型番：Point Grey Research 社 GRASS-50S5M/C 撮像素子：Sony ICX625 CCD 解像度：2448×2048pixel（500 万画素） 画素サイズ：3.45 ×3.45μm デジタル画像：モノクロ 8 ビット
レンズ	Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 2.8/ 50mmg
PC	CPU：Intel(R) Core(TM)i7 CPU Q 820 @1.73GHz (8CPUs) HD：300GB メモリ容量：3.5GB RAM

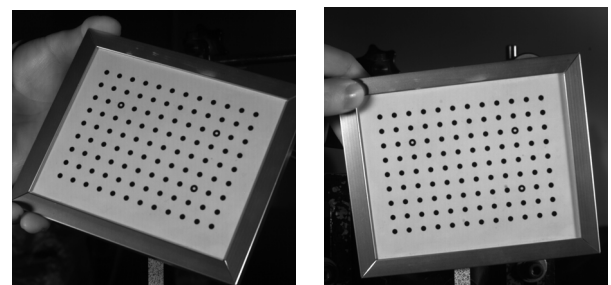


写真-2 キャリブレーション画像

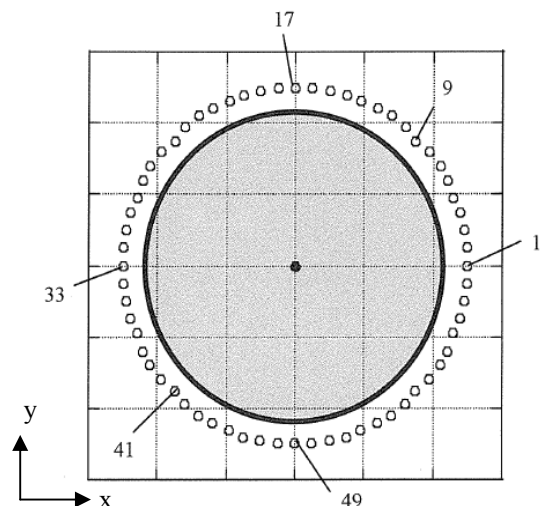


図-3 解析点

3. 解析条件がひずみ計測精度に与える影響

3.1 試験概要

解析条件が計測精度に与える影響について検証実験を行った。実験では、長さ400×断面100×100×6/8 (mm)のH鋼 (SS400) を用いて一軸圧縮試験を行い、ひずみゲージとDICMを比較にすることにより、精度の検証を行った。

図-4に示すように試験体表面にゲージ長5mmのひずみゲージを等間隔に9枚貼付し、ひずみゲージ貼付面の約13mm×11mmの範囲をDICMにより計測した。DICMの計測面には、白色のスプレーで下地を塗布し、次に下地の上から黒色のスプレーでランダムパターン (写真-3) を塗布した。計測時には、LEDライトを2つ使用し、試験体表面の明るさを一定に保った。

カメラの位置関係として、カメラ間の距離は、169mm。カメラと試験体の距離は、316mmである。この条件下の画像解像度は、約0.051mm/pixelとなるため、5mmゲージは長手方向において約91pixelで構成される。計測では、無載荷時およびひずみゲージ値がおよそ25, 50, 75, 100, 250, 500 μ 時に荷重を一定にして、各段階においてひずみゲージとDICMでそれぞれ50回計測を行った。

解析条件として、計測後の画像解析において、サブセットの大きさと加算平均処理法について検討した。

・サブセットの大きさの影響

サブセットは、変形前後の画像を比較し、変形前の物体表面の点が変形後に移動した場所を探し出すために利用する複数の画素からなる計算領域である。そのため、サブセットを大きくすると変形後の点の移動を特定しやすくなるため、ひずみの計測精度が向上すると考えられる。ここでは、サブセットを30, 50, 100pixelと変化させた場合のひずみ計測精度の影響について検討した。

ここでは、無載荷時の一枚目の画像を初期画像として、無載荷時の残りの画像49枚と各荷重段階の変形画像50枚に対して画像解析を行った。つまり、349枚の画像に対して画像解析を行った。

・加算平均処理法の影響

連続的に撮影した静止画像は、すべて同じに見えるが、画素レベルで分析すると、輝度値にばらつきが確認される。これは、CMOSやCCDなどのイメージセンサにおいて映像を光から電気信号に変換する際に発生・混在するノイズが主原因と考える。このノイズは、ひずみを算出する際に誤差として顕在化する。ここでは、複数の画像に加算平均処理を行い、ノイズを低減させた画像を用いてひずみを算出した。

加算平均枚数は、無載荷状態を含めた各荷重段階の撮影画像の1枚目から3枚、30枚、50枚をそれぞれ合成させ、その合成させた画像を用いて解析を行った。つまり、無載荷時の画像を初期画像として6荷重段階 (25, 50, 75, 100, 250, 500 μ) の変形画像の画像に対して解析を行うことになる。画像解析のサブセットは、30 pixelとした。解析条件一覧を表-2に示す。

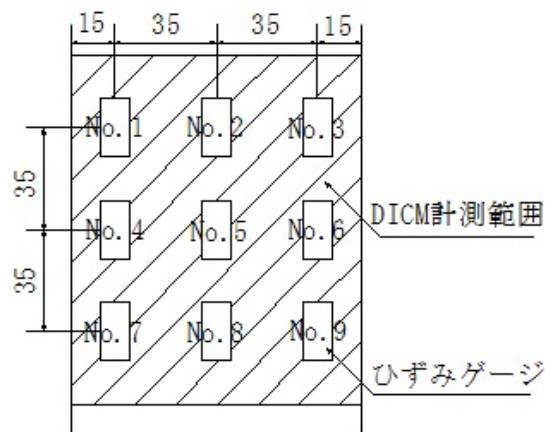


図-4 ゲージ貼付位置

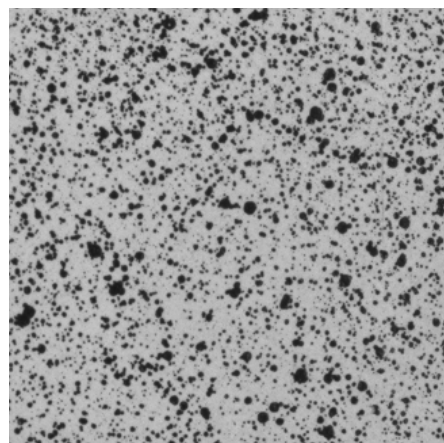


写真-3 ランダムパターン

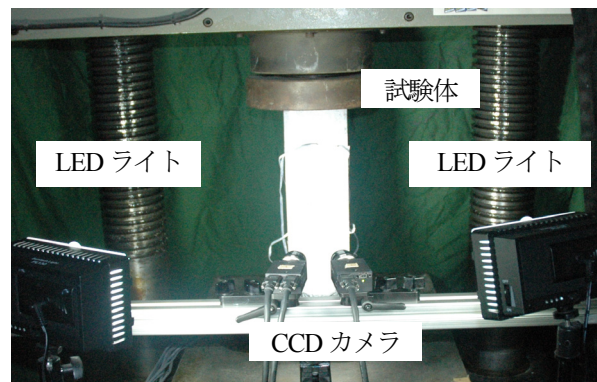


写真-4 計測状況

表-2 解析条件一覧

パターン	1	2	3	4	5	6	7
サブセット (pixel)	30	50	100	30			
加算平均処理枚数	-			1	3	10	50
画像解析枚数	349			6			

3.2 試験結果

計測結果の評価項目としては、相関係数、誤差平均、標準偏差、最大誤差とした。

・サブセットの大きさの影響

表-3にサブセットを変化させた場合の結果を示す。表には、No.1~9のひずみの平均値を記載している。表からサブセットが大きくなると相関係数が1に近づくことや標準偏差は低下することが確認された。しかし、誤差平均や最大誤差に関しては、大きな変化が確認されなかった。

例としてパターン1のゲージNo.5の計測結果の推移を図-5に示す。また、図には近似直線も合わせて示す。図より、各荷重毎にDICMに200 μ 程度のばらつきがあることが確認される。このばらつきは、パターン1~3のすべてのひずみゲージ位置の各荷重段階で確認された。このばらつきが画像ノイズと考える。

サブセットを大きくすると計測精度が向上するが、ひずみ算出の際の計算領域が増えるため計算コストが増加する。また、通常、解析領域の端近辺においてサブセット数の半分の画素領域は解析できないため、サブセット数を大きくすると、解析結果の出力範囲が狭くなる。そのため、極力サブセット数を小さくして解析する必要がある。

・加算平均処理法の影響

表-4に加算処理枚数を変化させた場合の結果を示す。表には、No.1~9のひずみの平均値を記載している。表から加算平均処理法を適用することや加算平均枚数を増加させると相関係数が1に近づくことや誤差平均、標準偏差、最大誤差が低下することが確認された。特に、3枚の画像を合成することにより相関係数が格段と向上し、誤差平均、標準偏差、最大誤差が約半分に低下することが確認された。

例としてパターン7におけるゲージNo.1の計測結果の推移を図-6示す。また、図には近似直線も合わせて示す。図より各荷重毎にDICMのばらつきがなく、近似直線の傾きも1に近く高精度に計測できていることが確認される。これは、パターン7のすべてのひずみゲージ位置においても確認された。

加算平均処理法を適用することや加算枚数を増加させると計測精度が向上するが、加算平均処理法は、静止した測定対象物にのみ適用できる手法であり、動的挙動の測定物や外乱の影響が大きい条件下においては、適用が困難である。

4. マルチロゼット解析検証実験

4.1 試験概要

マルチロゼット解析の計測精度を確認するため、有孔板の引張試験を行った。試験体概要を図-7に示す。試験体の寸法は150mm×400mm、板厚2.3mmのSS400材である。試験体の上下端には、引張試験機に取り付けるため、円孔をそれぞれ5つ設けている。試験体は、中央付近に均一な引張ひずみを生じさせるため平行部の幅を上下端の半分の75mmとし、試験体中央部に直径15mmの円孔を設け

表-3 サブセットの影響

パターン	1	2	3
サブセット	30	50	100
相関係数	0.960	0.980	0.991
誤差平均 (μ)	97	72	86
標準偏差 (μ)	49	34	23
最大誤差 (μ)	177	199	198

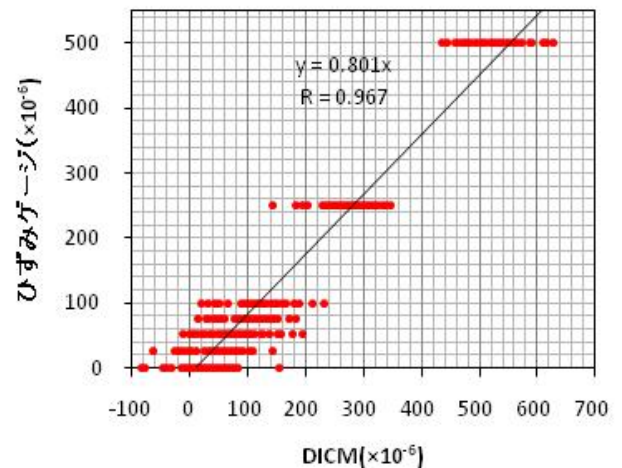


図-5 パターン1 (No.5) 計測結果

表-4 加算平均処理の影響

パターン	4	5	6	7
加算平均処理枚数	1	3	10	50
相関係数	0.969	0.988	0.993	0.997
誤差平均 (μ)	74	36	25	16
標準偏差 (μ)	47	26	19	12
最大誤差 (μ)	86	42	29	19

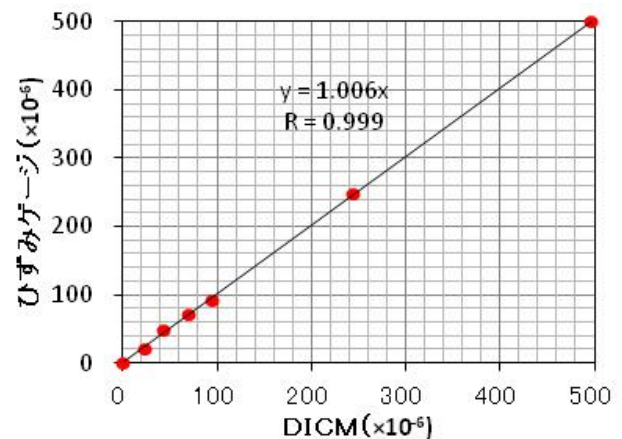


図-6 パターン7 (No.1) 計測結果

た。この試験体を引張試験機に固定して、一軸引張試験を行った。荷重は荷重制御とし、荷重が 2.00kN となるように載荷し、その荷重に達すると荷重を一定に保ち、計測を行った。DICM 計測のため、試験体の表面に、白色のスプレーで下地を塗布し、下地の上から黒色のスプレーでランダムパターンを塗布して階調値に変化を与えた(写真-5)。2 台の CCD カメラの中心から試験体までの距離を約 575mm とし、シャッター速度は 25ms とした。この条件下では、撮影解析度は約 0.032mm/pixel であるため、例えば 5mm ゲージは、約 156pixel で構成されることになる。また、試験体表面の明るさを一定に保つため、LED ライトを 2 つ使用した。計測状況を写真-6 に示す。

計測は、無載荷時および各荷重において CCD カメラで 1 枚ずつ撮影を行った。ひずみの算出は、無載荷時の画像を初期画像とし、載荷後の変形画像を DICM によるシングルロゼット解析、マルチロゼット解析を行い、最大主ひずみ、最小主ひずみ、主ひずみ方向の角度を算出した。なお、画像解析のサブセットは 30pixel とした。解析では、円孔中心より 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 30mm の位置に解析点を 64 点ずつ設け、ひずみの算出を行った。

シングルロゼット解析、マルチロゼット解析の計測値の比較・検討するために、FEM 解析を行った。解析には、汎用有限要素解析ソフト MSC.Mentat/ Marc2010 を使用した。解析に先立ち、試験体の静弾性係数とポアソン比を把握するために、JIS Z 2201 13 号試験片による引張試験を行った。試験体形状は、長さ 190mm、幅 20mm、板厚 2.3mm、平行部の長さ 50mm×幅 12.5mm である。中央にひずみゲージを貼付し、一軸引張試験を行い、静弾性係数とポアソン比を求めた。ここで得られた静弾性係数 200GPa、ポアソン比 0.3 を FEM 解析に用いた。

解析モデルの全体図および円孔付近拡大図をそれぞれ図-8(a), (b)に示す。解析モデルは、図-6 に示す試験体の平行部である 180mm×75mm のみをモデル化を行った。なお、要素数は 3420 である。解析モデルに使用した要素は、四節点平面応力要素を用い、要素メッシュは、円孔中心とする放射状に分割した。なお、計測点と同位置に要素節点を配置させている。荷重は荷重制御とし、試験と同じ荷重値である 2.00kN とした。ひずみの算出は、載荷前後の節点の変位を同心円状に算出した。つまり、FEM によるマルチロゼット解析を行うことにより、最大主ひずみ、最小主ひずみ、主ひずみ方向の角度を求めた。なお、解析モデルの妥当性は、事前に試験体にひずみゲージを貼付し、載荷試験を行った結果と比較を行うことにより、検証を行っている。メッシュ分割についても同様に、事前解析により、結果に影響がない分割数を選定している。

4.2 試験結果

FEM と DICM (シングルロゼット, マルチロゼット) の円近傍からの最大主ひずみ, 最小主ひずみの推移, その比較を図-9, 10 と表-6 にそれぞれ示す。また, 結果一覧を表-7 に示す。図-9, 10 と表-6 より, シングルロゼットは, マルチロゼットや FEM と比較して乱れる結果となった。

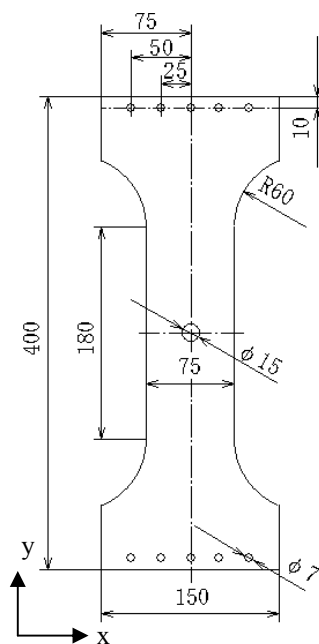


図-7 試験体



写真-5 ランダムパターン

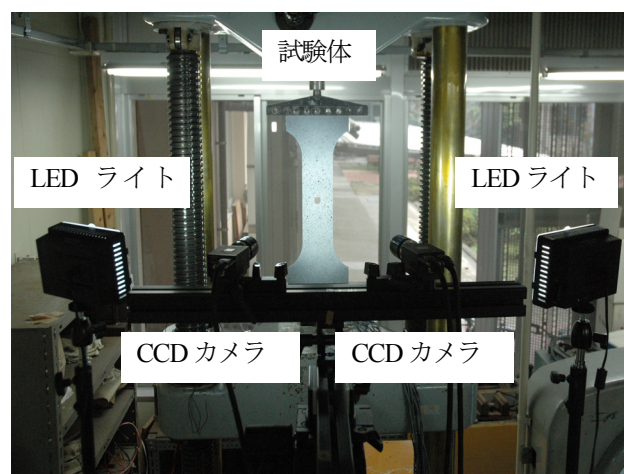


写真-6 計測状況

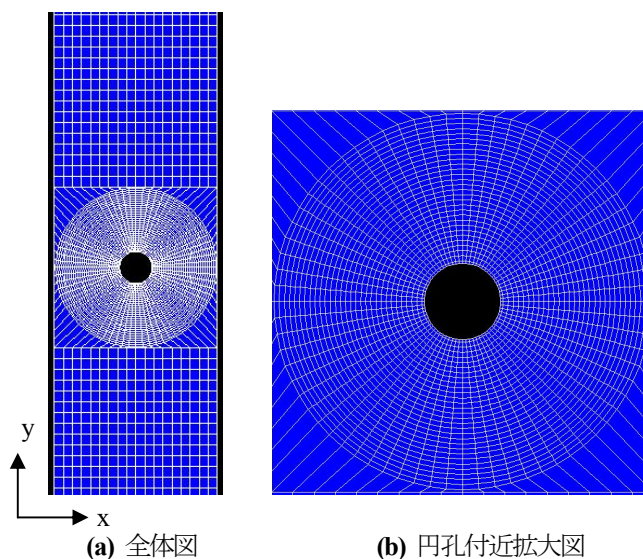


図-8 FEM 解析モデル

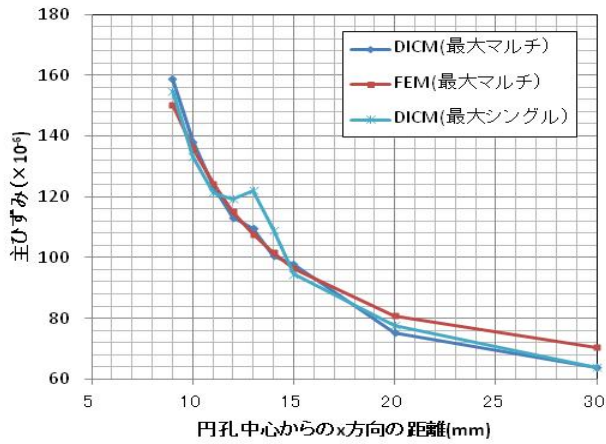


図-9 最大主ひずみの比較

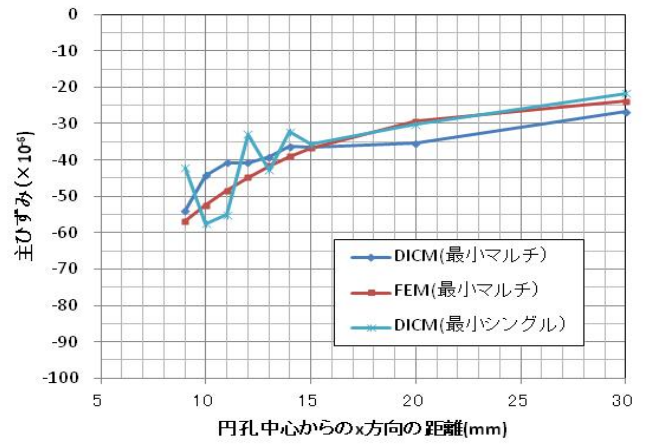


図-10 最小主ひずみの比較

表-6 最大・最小主ひずみの比較

距離 (mm)	最大主ひずみ(μ)					最小主ひずみ(μ)				
	DICM		FEM	誤差 (%)		DICM		FEM	誤差 (%)	
	シングル	マルチ		シングル	マルチ	シングル	マルチ		シングル	マルチ
9	155	159	150	2.9	5.6	-42	-54	-57	25.7	5.0
10	133	138	136	2.1	1.6	-58	-44	-53	9.6	15.8
11	121	123	124	2.4	0.9	-55	-41	-48	13.6	15.9
12	119	113	115	3.5	1.7	-33	-41	-45	26.6	9.0
13	122	110	108	13.4	1.7	-43	-39	-42	2.9	5.7
14	109	101	102	7.3	1.1	-32	-36	-39	17.7	7.3
15	95	98	97	2.0	1.3	-36	-36	-37	2.7	0.8
20	78	75	81	3.9	7.0	-30	-35	-29	2.7	20.3
30	64	64	71	9.6	9.4	-22	-27	-24	8.9	12.6
平均	—	—	—	5.2	3.4	—	—	—	12.3	10.3

表-7 最大・最小主ひずみの結果一覧

項目	最大主ひずみ		最小主ひずみ	
	シングル	マルチ	シングル	マルチ
相関係数	0.974	0.997	0.793	0.933
誤差平均 (μ)	5.3	3.4	5.6	4.2
誤差平均 (%)	5.2	3.4	12.3	10.3
標準偏差 (μ)	26.0	26.7	10.9	8.9
最大誤差 (μ)	14.4	8.5	14.6	8.3
最大誤差 (%)	13.4	9.4	2.7	0.8

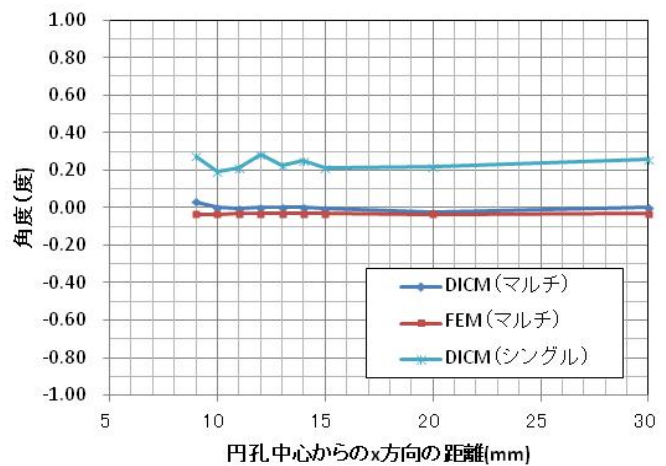


図-11 最大主ひずみ方向角度の比較

表-8 最大主ひずみ方向角度の比較

距離 (mm)	最大主ひずみ方向角度(度)				
	DICM		FEM	誤差(度)	
	シングル	マルチ		シングル	マルチ
9	0.27	0.03	-0.03	0.31	0.07
10	0.19	0.00	-0.03	0.23	0.04
11	0.21	-0.01	-0.03	0.24	0.03
12	0.28	0.00	-0.03	0.32	0.03
13	0.23	0.00	-0.03	0.26	0.03
14	0.25	0.00	-0.03	0.28	0.03
15	0.21	-0.01	-0.03	0.25	0.03
20	0.22	-0.02	-0.03	0.25	0.01
30	0.26	0.00	-0.03	0.29	0.03
平均	—	—	—	0.27	0.03

表-7 より、マルチロゼット解析を行うことで相関係数が1に近づくことや、誤差平均、最大誤差が低下することが確認された。しかし、標準偏差に関しては、あまり変化が確認されなかった。誤差平均、最大誤差は、最大主ひずみ、最小主ひずみにおいてほぼ同じ値を示した。

FEM と DICM (シングルロゼット, マルチロゼット) の円近傍からの最大主ひずみ方向の角度, その比較を図-11 と表-8 にそれぞれ示す。図-11, 表-8 より、シングルロゼットは FEM と比較して全体的に約 0.27 度の誤差が確認された。マルチロゼット解析は、FEM と比較して約 0.03 度と誤差がほとんど確認されなかった。

以上から、DICM によるマルチロゼット解析は、高精度な計測が可能であることが確認できた。

5. 結論

今回得た所見を以下に示す。

- サブセットを大きくして解析することでひずみ計測精度が向上した。
- 加算平均処理法を用いることや加算平均処理枚数を増加させることで、ひずみ計測精度が向上した。
- DICM によるマルチロゼット解析を用いることにより円孔近傍やその周辺のひずみを高精度に計測することができた。

今後は、2軸状態における計測やコンクリート部材における計測精度の検証を行うとともに、残留応力を測定するために、応力解放時による解放ひずみの計測精度の検証実験を行っていく予定である。

謝辞

本研究は第 20 回社団法人日本鉄鋼協会鉄鋼研究振興助成の補助により実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人日本非破壊検査協会: 非破壊検査~検査と材料評価, Vol.59 No.7 Jul., 2010
- 2) M.A.Sutton, J.-J.Orteu and H.W.Screier: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, 2009.
- 3) B.Pan, K.Qian, H.Xie and A.Asundi: Two-dimensional Digital Image Correlation for In-plane Displacement and Strain Measurement: a Review, Measurement Science and Technology, 20(6), Art.No.062001, 2009.
- 4) Morita, Y et al: Visualizing Displacement and Deformation Behavior of the Periodontium Under Dental Occlusion Using a Digital Image Correlation Method, Journal of biomechanical science and engineering, Vol.2, No.3, pp.115-14, 2007.
- 5) 出水享, 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.
- 6) C.Morita, C.Zhao, A.Demizu, K.Makino, H.Matsuda, K.Ichimiya: 3D profile measurement and buckling simulation on thin-walled cylindrical shells under compression by utilizing 3D-digital Image Correlation Method, IABMAS 5 2550-2556, 2010.
- 7) 出水享, 松田浩, 伊藤幸広, 森田千尋: 光学的手法による鋼部材の加熱・冷却過程におけるひずみ分布計測, 構造工学論文集 Vol.57A, pp.86-93, 2011.
- 8) 出水享, 板井達志, 御舟研二, 松田浩: デジタル画像相関法による建設材料のひずみ測定に関する基礎的研究, 長崎大学工学部研究報告, 41(76), pp.66-72, 2011
- 9) 内野正和, 岡本卓慈, 肥田研一, 伊藤幸広, 松田浩: デジタル画像相関法を用いたマルチロゼット解析法の検討, 日本実験力学学会講演論文集 (8), 134-137, 2008.
- 10) Z. H. He, M. A. Sutton, W. F. Ranson and W. H. Peters: Two-dimensional fluid-velocity measurements by use of digital- speckle correlation techniques, Exp.Mech., 24, pp.117-121, 1984.
- 11) M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D.Helm and Y.J.Chao: Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision, Springer-Verlag, pp.323-372, 2000
- 12) 盧石鎬, 山口一郎: 2次元スペックル相関法によるひずみ分布の自動解析, 非破壊検査, Vol.47, No.8, pp.473-478, 1992.
- 13) A. Kato and H. Wate: Deformation Measurement using Digital Image Correlation, Proc.APCFS & ATEM'01, pp.840-845, 2001

(2012年3月8日 受付)