

一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測へのデジタル画像相関法の適用性に関する検討

佐川, 康貴
九州大学大学院工学研究院

尾上, 幸造
福岡大学工学部

内野, 正和
福岡県工業技術センター機械電子研究所

松下, 博通
九州大学大学院工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/8099>

出版情報 : 実験力学. 7 (2), pp.20-26, 2007-06. 日本実験力学会
バージョン :
権利関係 :

一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測への デジタル画像相関法の適用性に関する検討

佐川 康貴*, 尾上 幸造**, 内野 正和***, 松下 博通****

Application of Digital Image Correlation Method to Strain Measurement of Mortar Specimen under Uniaxial Compression

Yasutaka SAGAWA, Kouzou ONOUE, Masakazu UCHINO and Hiromichi MATSUSHITA

The applicability of the digital image correlation method (DICM) to the fields of civil engineering and architecture was investigated through analyzing the strain distribution of mortar specimen under uniaxial compression. As a result, it was proved that the strain of mortar specimen under uniaxial compression was well measured by digital image correlation method with the same precision as strain gauges. Digital image correlation method makes it possible to obtain the strain distribution on the surface of an object easily, and can be a powerful tool for the tracking of the local deformation of structures.

Key words: Digital Image Correlation Method, Strain Distribution, Mortar Specimen, Uniaxial Compression, Size of Subset, Gauge Length, Strain Gauge, Maintenance of Infrastructures

1. はじめに

材料のひずみを測定する方法の代表的な方式として、ひずみゲージを用いる方法がある。ひずみゲージは比較的小型で軽量であり、測定対象の変形挙動にほとんど影響を与えないため、これまで多くの実績を有している。しかしながら、微小な電気抵抗を捉えているため、水分に弱いこと、長期に渡る計測には不向きであること、ゲージ貼付位置の値しか測定できないこと等の欠点を有する¹⁾。

コンクリートはセメント・細骨材・粗骨材から構成される複合材料であり、コンクリート表面に貼付するひずみゲージの検長は、一般に粗骨材最大寸法の2~3倍以上とされており、測定される値は検長の区間内における平均的な値であり、局所的なひずみあるいは応力の状態を知ることは困難である。

近年、建設投資額の減少に伴い、構造物をいかに延命させるかが求められており、構造物の点検・維持管理の重要性が高まっている。点検項目の一つに構造物の変形挙動の追跡が挙げられるが、これはひずみゲージによる方法ではひずみゲージが無数に必要となり、ほとんど不可能に近い。

このような問題を解決するための手段の一つとして、光学的手法により全視野的にひずみ分布を測定できるデジタル画像相関法に着目した。デジタル画像相関法は、近年のデジタル技術や電子計測技術の向上に伴い、既に様々な分

野に適用されているが、社会基盤構造物を対象とした検討例はほとんど見当たらないのが現状である。

本研究では、デジタル画像相関法を社会基盤施設の維持管理に応用するための第一歩として、同手法により一軸圧縮力を受けるモルタル供試体表面のひずみ分布計測を行い、従来のひずみゲージ法との比較を行うことで、その適用性について検討したので報告する。

2. デジタル画像相関法

2.1 概要

デジタル画像相関法は、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして測定対象物の変形前後をデジタルカメラ等で撮影し、得られたデジタル画像の輝度値分布から試料表面の変形量と方向を同時に求める方法である。変形前の画像中の任意の位置を中心とする小さい画像領域(サブセット: $N \times N$ 画素)を基準とし、変形後の画像よりこの基準サブセットと最も良い相関を得る位置を変形後の画像より求め、変形量と方向を決める。

2.2 粗探査

相関を求める方法としては画素単位の計測精度で変位量を求める粗探査と画素以下の精度で変位量を求める精密探査に分けられる。粗探査には次式に示す残差最小法を利用して相関関数 C を求めた。

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

ここで、 $I_u(X, Y)$ 、 $I_d(X+u, Y+v)$ はそれぞれ変形前、変形後の画像強度を示す。また、 X, Y はサブセットの中心座標、 u, v はそれぞれ x 方向、 y 方向への移動量、 M はサブセット一辺の画素数 N との間に $N = 2M + 1$ なる関係がある。

原稿受付 2007年2月8日

* 正会員 九州大学大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 非会員 福岡大学工学部 (〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

*** 正会員 福岡県工業技術センター機械電子研究所 (〒807-0831 北九州市八幡西区則松 3-6-1)

**** 非会員 九州大学大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

2. 3 精密探索

式(1)が最小になる座標位置がそのサブセットの中心が移動した点の最近接画素と考えられる。しかしながら実際の移動量は1画素の大きさよりも小さいため画素以下の精度で移動量を求める必要がある。

画素以下の移動量を求める方法として、最近接画素周辺の画素点での相関値を利用する方法^{2,3)}や離散的な画素の強度値の間を直接、数値補間し、これらの値を利用して相関がもっとも良い位置を求める方法^{4,5)}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を1次曲線や2次曲線、ガウス分布等の直線、曲線を利用して補間し、その交点やピークより1画素以下の移動量を求める方法である。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し、初期の画像の画素間の輝度分布を構築し、それらを元に相関値の最も良い座標位置を求める方法である。今回の精密探索には、後者の方法を選択し、離散的な画素の強度値の間を線形補完する方法を用いた。本研究において精密探索に使用した相互相関の式を式(2)に示す。

$C(X+u, Y+v)$

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

式(2)は式(1)に比べて計算に時間がかかるが、誤差の少ない、より良い相関が得られるという利点を持つ。

2. 4 ひずみ変換法

本研究において用いたひずみ変換法を、Fig. 1に示す。これは、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元に、変形後の2点間の長さの変化を求め、計測点のひずみを得る方法で、非常にシンプルな解析法である。この方法では(a)水平、(b)垂直、(c)斜め方向の3軸ロゼットひずみゲージ解析を行い、最大主ひずみ、最小主ひずみの値と方向を求めることが可能である。また、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長を自由に選択することができる。

3. 実験概要

3. 1 使用材料および配合

実験には、モルタル供試体を使用した。セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ，比表面積 $3250\text{cm}^2/\text{g}$ ）を、細骨材には海砂（表乾密度 2.55g/cm^3 ，吸水率 1.52% ）を使用した。化学混和剤は使用しなかった。

モルタルの配合を Table 1 に示す。モルタルの砂セメント比は JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に示されるフローが $210 \pm 10\text{mm}$ となるよう決定した。水セメント比は 35% および 50% の2種類とした。これは、強度レベルがひ

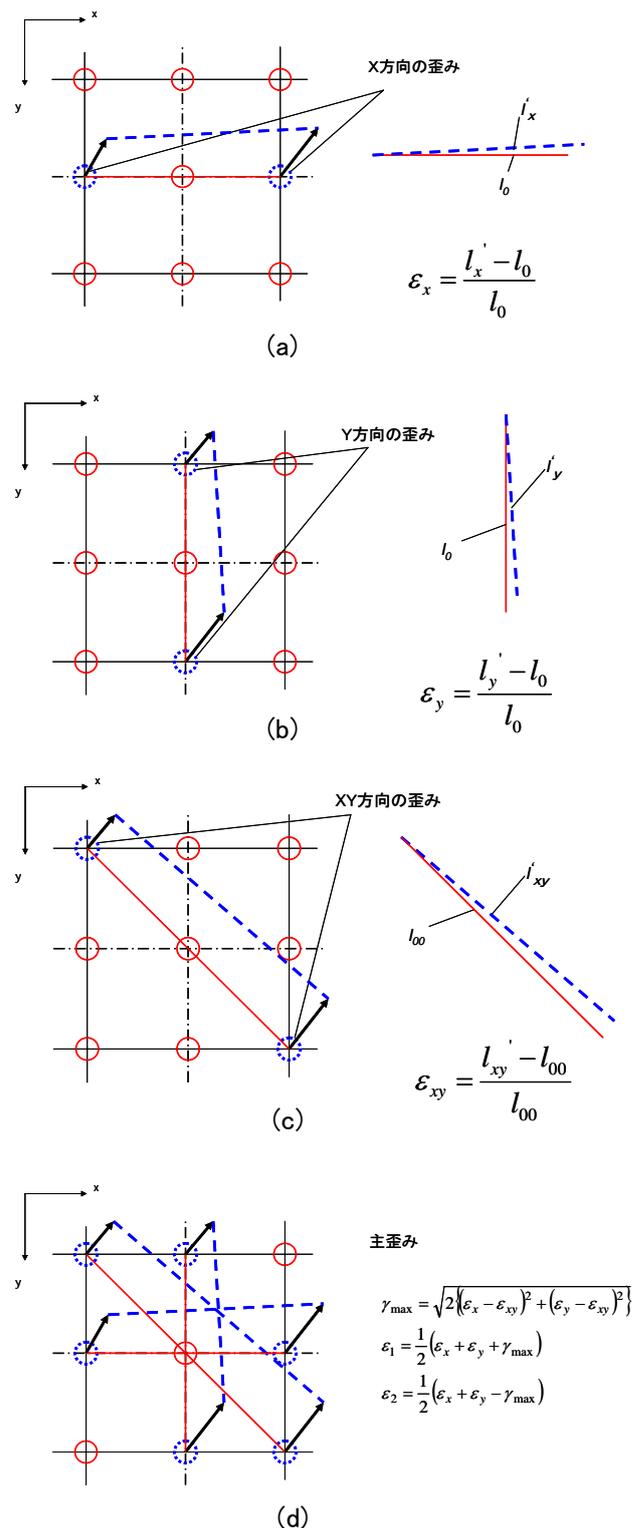


Fig. 1 Conversion from displacement to strain

Table 1 Mortar mixtures

Water to Cement Ratio (%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
35	357	1020	816
50	284	568	1365

ずみ分布に及ぼす影響をみるためであり、一般に水セメント比が小さいほど高強度のモルタルとなる。

3. 2 供試体

供試体の一覧を Table 2 に示す。本実験では、測定対象面を平面とするため、供試体は全て角柱とした。供試体寸法は $100 \times 100 \times 100 \text{mm}$ 、 $100 \times 100 \times 200 \text{mm}$ および $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の 3 種類である。一軸圧縮力を受けるコンクリートのひずみ分布は、供試体全体で一様ではなく局所化し、その傾向は高さ直径比 (H/D) が大きいほど顕著になると言われている。そこで、本研究では供試体寸法がひずみの局所化に及ぼす影響を調べるため、上記の 3 種類のサイズの供試体を用意した。 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱を打設後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで 20°C 水中にて養生を行った。その後、所定の寸法となるよう、そのままあるいは切断した後後に載荷面を研磨した。さらに、 20°C 、60% R.H. の恒温恒湿室内にて養生を施し、材齢 28 日以降に載荷試験を実施した。

3. 3 測定方法

測定は、実験室内において太陽光線による照度の変化の少ない時間帯に行った。

測定には、CMOS カメラ (2000×2000 画素)、一眼レフカメラ用レンズ、三脚、パソコン (CPU: Pentium 4, 3.0GHz; RAM: 2GB) から構成される測定システム一式を用いた。また、照明には市販のハロゲンランプを用いた。測定状況を Fig. 2 に示す。耐圧試験機に供試体をセットし、その手前に CMOS カメラを設置した。

レンズのズームは最も望遠側とし、供試体全体が画面内に入るよう、供試体と CMOS カメラとの距離を調節した。供試体とカメラとの距離は $100 \times 100 \times 100 \text{mm}$ 供試体の場合約 1m、 $100 \times 100 \times 200 \text{mm}$ 供試体の場合約 1.4m、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 供試体の場合約 1.8m であった。

撮影画像の一例を、Fig. 3 に示す。デジタル画像相関法におけるパターン認識を容易にするため、供試体の測定対象面につや消しタイプの黒色スプレーを噴霧することで斑点状の着色を施した (拡大写真)。

従来のひずみゲージ法による計測値との比較を行うため、測定面と隣接する 2 面には鉛直方向および水平方向にひずみゲージ (検長 30mm) を貼付した。

単調増加載荷を行い、約 10 kN 毎にひずみゲージの値をデータロガーに取り込むと同時に供試体表面の画像を撮影し、ファイルをパソコンに保存した。

4. 実験結果および考察

4. 1 最適なサブセットの大きさに関する検討

相互相関係数を算出するためのサブセットは、大きすぎると計算に時間がかかるとともに空間分解能を低下させるが、小さすぎるとパターンマッチングの精度が低下する⁹⁾。そこで、 $100 \times 100 \times 100 \text{mm}$ 供試体を用い、最適なサブセットの大きさについて検討した。

本研究で用いた解析ソフトでは、粗探索用および精探索

Table 2 Specimens

No.	Water to cement ratio (%)	Dimension of specimen (mm)	Dimension of measuring area (mm)
1	35	$100 \times 100 \times 100$	100×100
2		$100 \times 100 \times 200$	200×100
3		$100 \times 100 \times 400$	400×100
4	50	$100 \times 100 \times 100$	100×100
5		$100 \times 100 \times 200$	200×100
6		$100 \times 100 \times 400$	400×100



Fig. 2 Setting of measurement

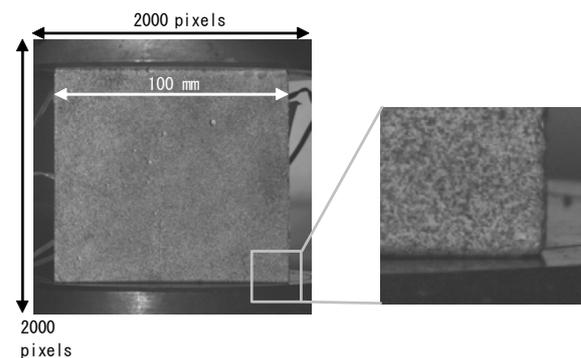


Fig. 3 Example of taken image

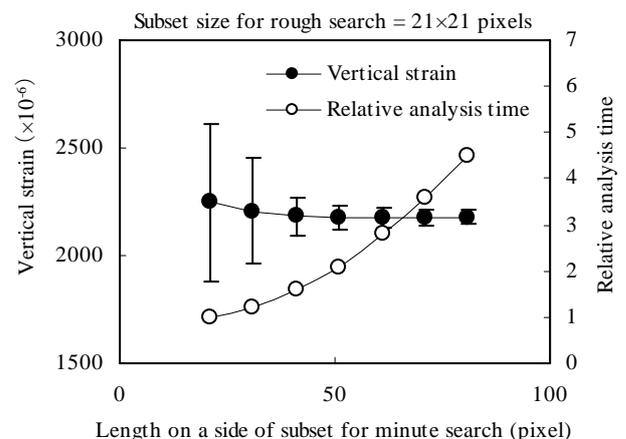


Fig. 4 Effect of subset size for minute search on vertical strain and analysis time

用に異なるサブセットを設定する。まず、粗探索用サブセットを 21×21 画素とし、精探索用サブセットの大きさを変化させた場合について検討した。具体的には、最大荷重の

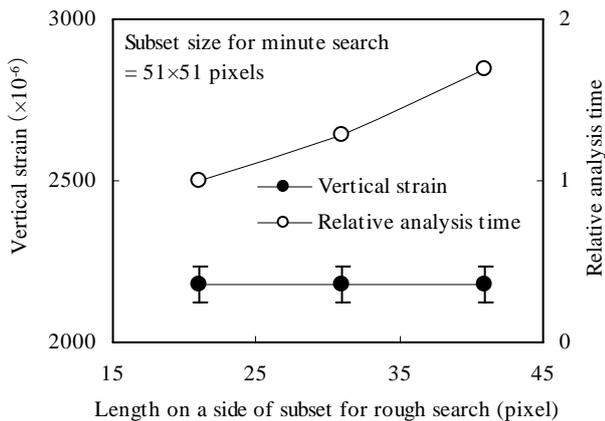


Fig. 5 Effect of subset size for rough search on vertical strain and analysis time

50% 荷重時の供試体中央近傍における微小領域内（約 $5 \times 5 \text{ mm}$ に相当）では鉛直ひずみがほぼ等しいという仮定のもと、225 節点の鉛直ひずみの平均値、標準偏差および解析に要した時間を調べた。なお、変位をひずみに変換するための標点距離は 400 画素で固定した。

解析結果を Fig. 4 に示す。鉛直ひずみのばらつきが小さく、かつ計算時間が最短である 51 画素を最適な精探索用サブセットの大きさとして選択した。なお、粗探索用サブセットの大きさを変えても同様の結果を得た。

次に、精探索用サブセットを 51×51 画素とし、粗探索用サブセットを変化させた場合について同様の検討を行った。Fig. 5 より、粗探索用サブセットの大きさを変化させた場合、鉛直ひずみの平均値およびばらつきは一定であるが、計算時間に影響することが分かる。これより、計算時間が最短であった 21×21 画素を最適な粗探索用サブセットの大きさとして選択した。

上記の検討結果は、供試体寸法および強度レベル（水セメント比）が異なる場合についても同様であった。よって、本研究では粗探索用サブセットを 21×21 画素、粗探索用サブセットを 51×51 画素として解析を行った。

4. 2 標点距離がひずみ値に及ぼす影響

ひずみの解析値は標点距離（ゲージ長）によっても大きく異なるため、標点距離が鉛直ひずみの平均値および標準偏差に及ぼす影響について調べた。結果を Fig. 6～Fig. 8 に示す。いずれも最大荷重の 50% 荷重時の供試体中央近傍における微小領域内（約 $5 \times 5 \text{ mm}$ に相当）では鉛直ひずみがほぼ等しいという仮定のもと、225 節点の鉛直ひずみについて調べたものである。サブセットの大きさは 4. 1 で求めた最適設定とした。

まず、 $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ 供試体 (Fig. 6) および $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ 供試体 (Fig. 7) について見ると、鉛直ひずみの平均値および標準偏差ともに標点距離の影響を強く受けるが、標点距離が 400 画素以上で収束し、ひずみゲージの値とほぼ一致していることが分かる。後にひずみ分布を求めるにあたり、より広範囲領域を解析するためには、標点距

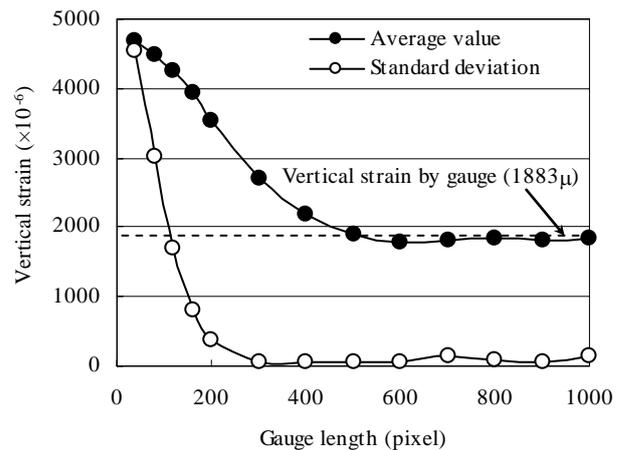


Fig. 6 Effect of gauge length on average value and standard deviation of vertical strain ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ specimen, Water to cement ratio = 35%)

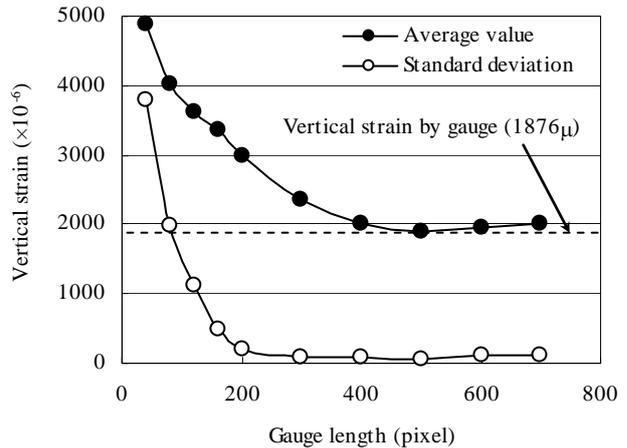


Fig. 7 Effect of gauge length on average value and standard deviation of vertical strain ($100 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ specimen, Water to cement ratio = 35%)

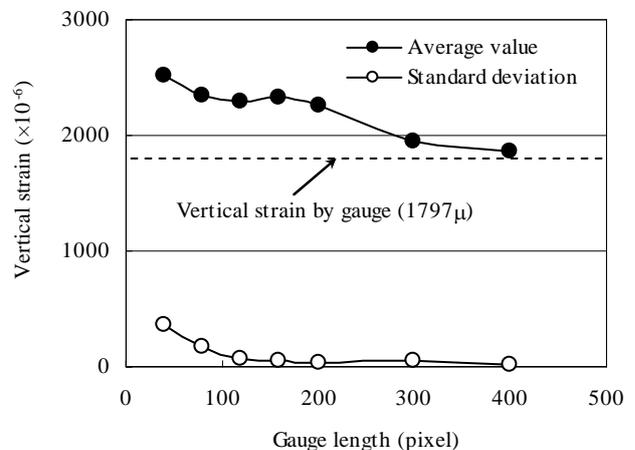


Fig. 8 Effect of gauge length on average value and standard deviation of vertical strain ($100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ specimen, Water to cement ratio = 35%)

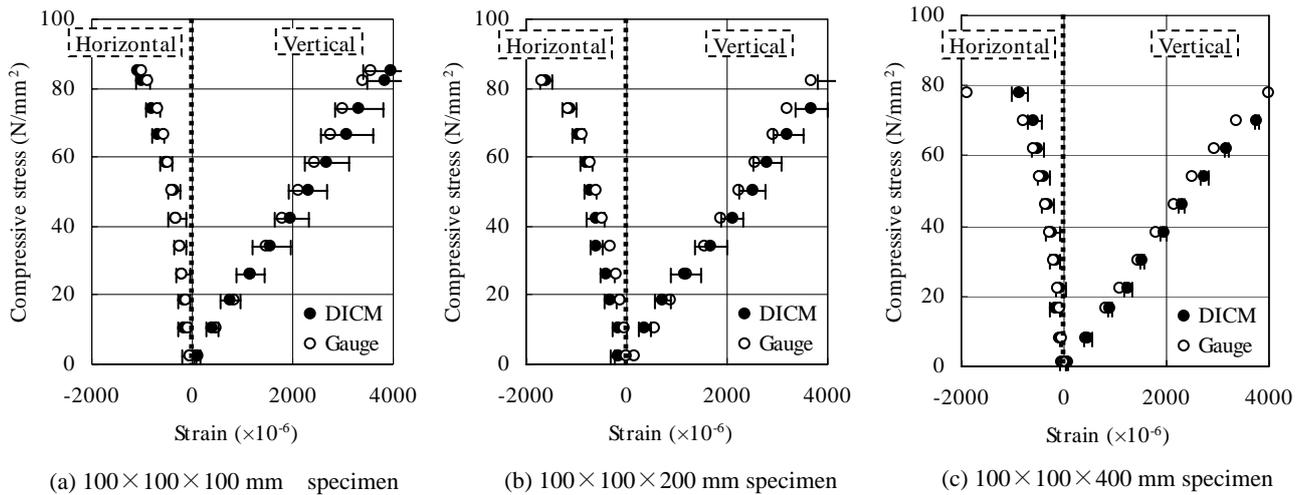


Fig. 9 Comparison of compressive stress - strain relationship by digital image correlation method (DICM) and strain gauge (Water to cement ratio = 35%)

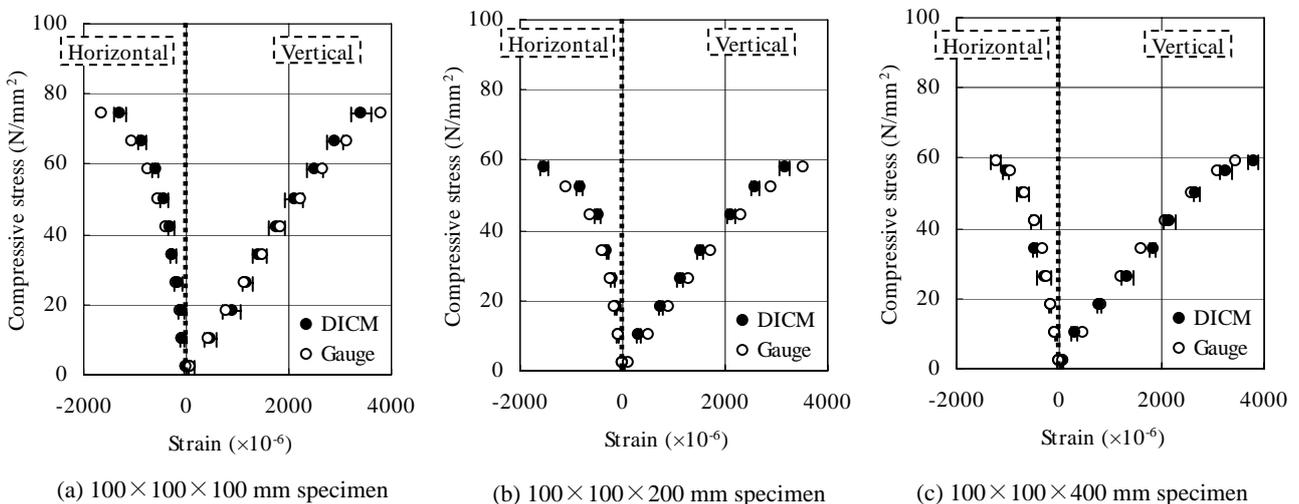


Fig. 10 Comparison of compressive stress - strain relationship by digital image correlation method (DICM) and strain gauge (Water to cement ratio = 50%)

離はばらつきの小さい範囲で出来るだけ小さく設定する必要がある。よって100×100×100mm 供試体および100×100×200mm 供試体の解析においては、標点距離を400画素として解析した。

Fig. 8に100×100×400mm 供試体の場合の解析結果を示す。なお、100×100×400mm 供試体の場合、標点距離が400画素以上では解析対象点が供試体からはみ出し、エラーとなるため、解析を行っていない。標点距離が400画素までの範囲では鉛直ひずみの平均値が一定値に収束する傾向は認められない。これは、供試体とカメラとの距離が大きくなることにより解像度が低下したためと考えられる。しかし、鉛直ひずみの標準偏差は標点距離が200画素以上で収束する傾向にあり、さらに400画素以上であればひずみゲージの値とほぼ同等の値を示すことから、解析における設定値として400画素を用いることとした。上記の結果はモルタルの水セメント比が50%の場合にも同様であった。

4. 3 圧縮力を受けるモルタルの応力-ひずみ関係

Fig. 9およびFig. 10に、一軸圧縮力を受けるモルタル供試体中央部における載荷軸直角方向ひずみ（水平ひずみ）および載荷軸方向ひずみ（鉛直ひずみ）の、デジタル画像相関法による解析結果（● DICM）およびひずみゲージによる測定結果（○ Gauge）を示す。デジタル画像相関法によるひずみ解析領域は、ひずみゲージの貼付位置に対応するよう設定し、30×30mmに相当する領域内の25点について各ひずみの平均値および標準偏差を求めた。図より、デジタル画像相関法による解析結果は、多少のばらつきは認められるものの、ひずみゲージによる測定結果と概ね一致しており、デジタル画像相関法によるひずみ測定は十分に使用に耐える精度を有しているといえる。同一寸法の供試体で強度レベル（水セメント比）が異なる場合、水セメント比35%のケースの方がデジタル画像相関法によるひずみ解析結果のばらつきが多少大きい傾向にあるが、この原因

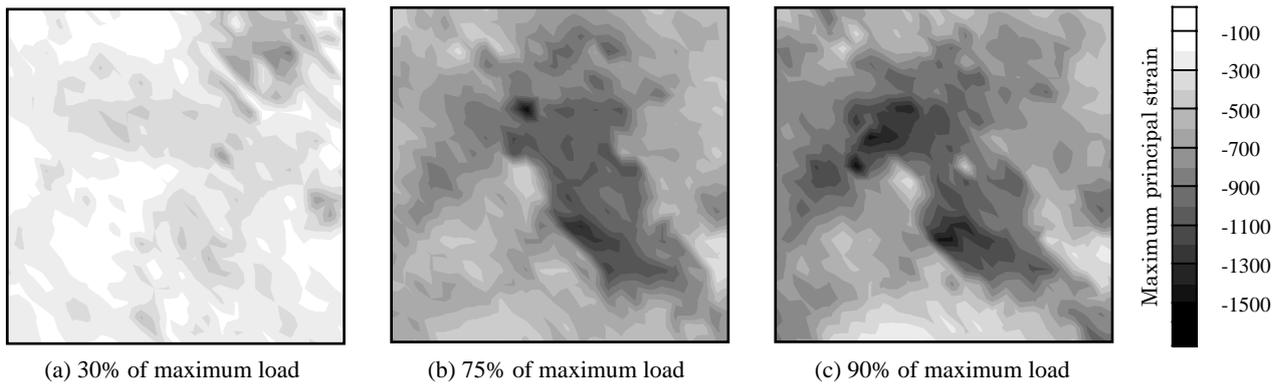


Fig. 11 Maximum principal strain distribution of $100 \times 100 \times 100$ mm specimen (Water to cement ratio = 35 %)

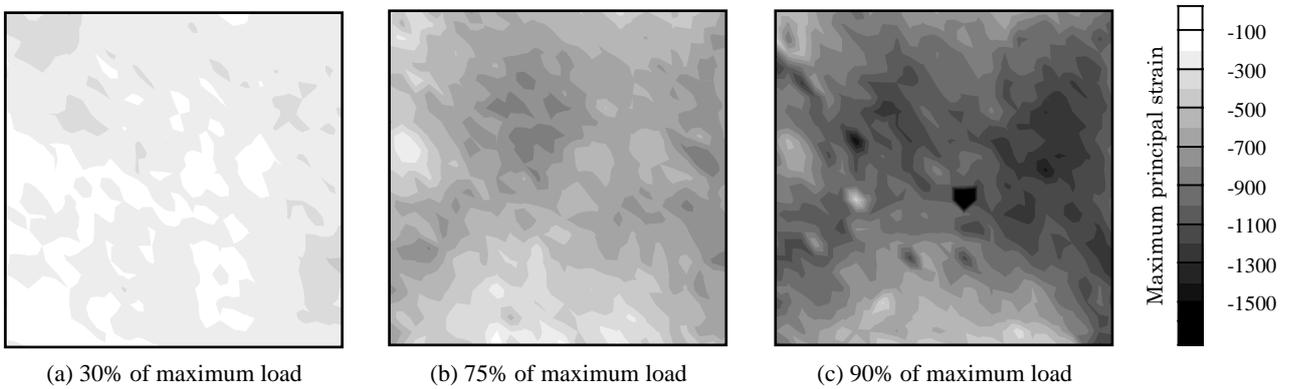


Fig. 12 Maximum principal strain distribution of $100 \times 100 \times 100$ mm specimen (Water to cement ratio = 50 %)

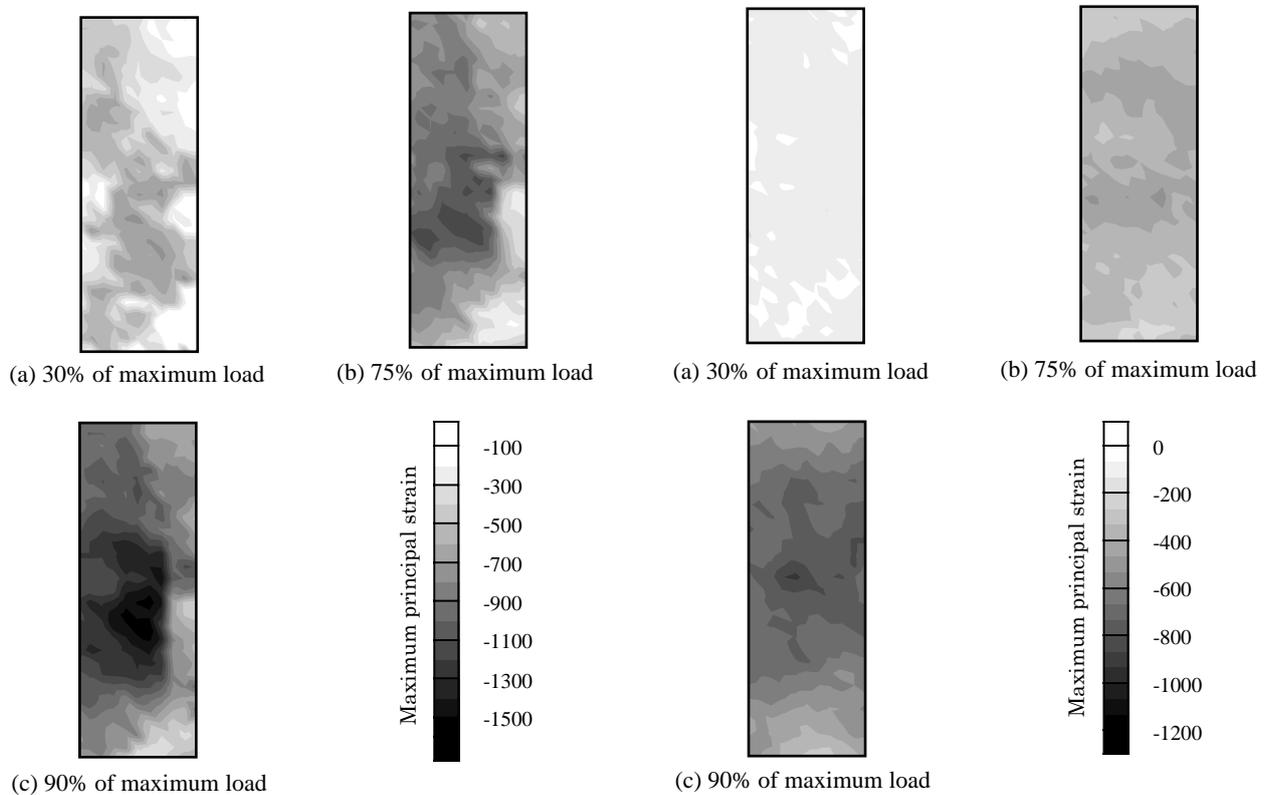


Fig. 13 Maximum principal strain distribution of $100 \times 100 \times 200$ mm specimen (Water to cement ratio = 35 %)

Fig. 14 Maximum principal strain distribution of $100 \times 100 \times 200$ mm specimen (Water to cement ratio = 50 %)

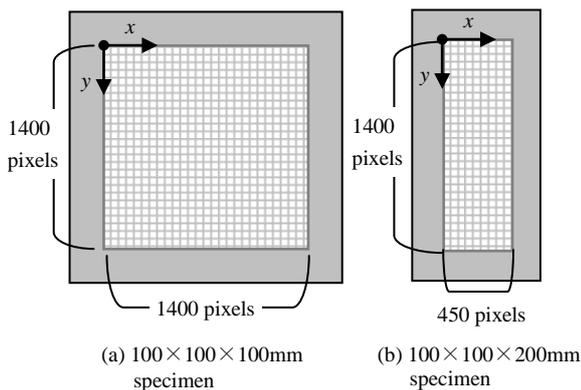


Fig. 15 Analyzed area in mortar specimen, gray mesh indicates the area for full-field strain measurement

がモルタルの材料特性であるのか、実験または解析による誤差であるのかは本研究の範囲内では断言できず、今後の課題である。

4. 4 圧縮力を受けるモルタル供試体表面のひずみ分布

コンクリートの破壊過程は微細ひび割れの発生伝播過程であるが、微細ひび割れはコンクリートに作用する引張応力がコンクリートの引張強度よりも大きくなった時点で発生すると考えられる。そこで、一軸圧縮力を受けるモルタル供試体表面における最大主ひずみ分布の解析結果を Fig. 11～Fig. 14 に等高線図で示す。解析は、各供試体の端部を除いた矩形領域 (Fig. 15) において 50 画素おきに等間隔の節点を設定して行なった。なお、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 供試体については、標点距離を 200 画素とした場合、解析対象点が供試体部分からはみ出し、解析を行うことが出来なかったため、 $100 \times 100 \times 100 \text{mm}$ 供試体および $100 \times 100 \times 200 \text{mm}$ 供試体についての結果のみ示す。なお、最大主ひずみ分布解析結果は、最大荷重の 30%、75% および 90% の荷重が載荷された時点におけるものである。

モルタル供試体表面における最大主ひずみ分布は、最大荷重の 30% 載荷時においてすでに一様ではなく部位ごとに異なっており、荷重レベルが高くなるほど、また供試体の高さ直径比 (H/D) が大きいほど、その傾向が顕著になる様子が読み取れる。また、供試体上下端部に近い部位では最大主ひずみは小さいが、これはコンクリート供試体上下端面と載荷試験機の圧盤との間に生じる摩擦力により、供試体の変形が拘束されることを示しているものと思われる。

$100 \times 100 \times 100 \text{mm}$ 供試体の最大主ひずみ分布 (Fig. 11,

Fig. 12) に着目すると、最大主ひずみの大きい領域が供試体を斜めに横断するように表れており、荷重レベルが増大するに従ってその傾向が顕著になることが読み取れる。一般的なコンクリート供試体の圧縮試験では、斜め方向にひび割れが進展し、供試体が鼓状となって破壊する状況が観察されるが、本解析結果はこの現象をとらえているものと考えられる。

5. 結論

デジタル画像相関法を社会基盤構造物の点検・維持管理に応用するための第一歩として、同手法により一軸圧縮下におけるモルタル供試体表面のひずみ解析を行い、従来のひずみゲージ法との比較を行うことで、土木・建築分野への適用性について検討を行った。その結果、解析パラメータであるサブセットおよび標点距離を適切に設定することで、デジタル画像相関法により従来のひずみゲージと同等の精度で一軸圧縮力を受けるモルタル表面のひずみを解析できることが明らかとなった。また、ひずみゲージでは困難であった供試体表面のひずみ分布を比較的容易に取得できることから、構造物の局所的な変形挙動の追跡等に有力なツールとなり得ることが期待される。

ただし、今回の検討は室内試験における限られた条件で行ったものであり、実構造物への適用については、測定対象範囲の設定、測定環境条件、測定精度などについて明らかにすべき点が多く残されていると考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (B) (研究代表者 長崎大学 松田浩、課題番号: 17360217) の一環として行ったものであり、関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Fujita, K., Sueyoshi, Y. and Matsushita, H. : The Present State and Prospects of Measuring Instruments (in Japanese), *Concrete Journal*, **44-5**(2006), 13-17.
- 2) He, Z. H., Sutton, M. A., Ranson, W. F. and W. H. Peters : Two-dimensional fluid-velocity measurements by use of digital-speckle correlation techniques, *Exp. Mech.*, **24** (1984), 117-121.
- 3) Sutton, M. A., McNeill, S. R., Helm, J. D. and Chao, Y. J. : *Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision*, Springer-Verlag, (2000), 323-372.
- 4) Noh, S. and Yamaguchi, I. : Automatic Analysis of Strain Distribution by Two-dimensional Speckle Pattern Correlation, *Non-Destructive Inspection*, **47-8** (1992), 473-478.
- 5) Kato, A. and Wate, H. : Deformation Measurement using Digital Image Correlation, *Proc. APCFS & ATEM'01*, (2001), 840-845.
- 6) Murata, K., Masuda, M. and Ukyo, S. : Analysis of Strain Distribution of Wood Using Digital Image Correlation Method, *Transactions of the Visualization Society of Japan*, **25-9**(2005), 57-63