

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

出水享*・板井達志**・御舟研二***・松田浩****

Fundamental Study on Strain Measurement of Construction Material by Digital Image Correlation Method

by

Akira DEMIZU*, Satoshi ITAI**, Kenji MIFUNE*** and Hiroshi MATSUDA****

In recent year, the research and development of the warp instrumentation technology that uses optical instrumentation technologies of the sampling moire method, the digital holography method, the digital image correlation method, and the infrared stress measurement, etc. is advanced as a strain measurement that takes the place of the strain gauge method. Here, the fundamental study on the strain measurement when the digital image correlation method of one of full-field optical measurement method was applied to the construction material (steel and concrete) was done.

Key words : strain measurement, digital image correlation method, construction material

1. はじめに

近年、既設構造物の維持管理に対する研究が注目され、アセット・マネジメントや新たな電子機器類が開発されるとともに、構造物のモニタリング技術に関する研究が多々行われるようになった。構造物の劣化損傷の評価法としてのモニタリング技術は、どんな変状をどの段階でどのような精度で得ることが可能で、どんな対策に繋げることができるのかが重要になる。鋼部材の場合、探傷試験として、目視試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、電磁誘導試験などがあり、部材内部の探傷試験としては、放射線透過試験、超音波探傷試験などがある¹⁾。また、コンクリート部材の場合、探傷試験としては目視試験、ひび割れ深さ調査のために超音波探傷試験などがある²⁾。しかし、これらの試験手法はいずれも、き裂やひび割れの有無、位置、大きさ、深さなどを検査するもので、き裂やひび割れが

すでに発生した後の試験法である。一方、これまで、構造部材の変形状態を把握する手段として主にひずみゲージによる計測が行われてきた。ひずみゲージ法は適切な位置、方向、状態、環境の下でひずみゲージを貼ることで信頼性の高い評価を得ることができるが、ひずみゲージを用いた計測法では、得られるひずみ値は定点あるいはゲージ長の平均的なひずみ値に留まる。しかし、破壊挙動が複雑で、進展方向が変化するひび割れの場合、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り、対象全体のひずみ分布を得るには多くのゲージが必要となる。また、ひび割れ発生やひび割れ幅の増大にともない、ひずみゲージ自体が切れてしまうことで計測不能となることも多い。また、ひずみゲージ法においては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がある。こ

平成22年12月28日受理

* 生産科学研究科博士後期課程 (Graduate Student, Graduate School of Science and Technology)

** 構造工学科 (Student Department of Structural Engineering)

*** 生産科学研究科博士前期課程 (Graduate Student, Graduate School of Science and Technology)

**** 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

これらのことから、従来のひずみゲージ法は多くの利便性を備えているが、一方で既設構造物、各種建設材料においては適応の限界があることがわかる。

こうした中、ひずみゲージ法に代わる計測法として、近年、サンプリングモアレ法、デジタルホログラフィ法、デジタル画像相関法、赤外線応力測定法などの光計測技術を基本としたひずみ測定法の研究開発が鋭意進められている³⁾。これらの光学的計測技術を用いれば、構造部材を構成する材料の破壊が、いつ、どこに、どのように、生じるかを、非接触かつ全視野で計測することができる。

本研究では、各種建設材料への光学的計測法の適応性、有効性を確認するために、非接触かつ簡易にひずみ計測が可能な光学的全視野計測法の一つであるデジタル画像相関法により、鋼及びコンクリート部材のひずみ測定に関する基礎的研究を行った。

2. デジタル画像相関法 (DICM)

2.1 概要

DICMの技術は、1980年代初頭にSouth Carolina大学の研究者によって紹介された⁴⁾。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画像処理することにより、計測範囲全体にわたって変形の大きさと方向を求めることができる手法である。DICMの特長として、測定空間の揺らぎには比較的強いことが挙げられる。

DICMの適用事例としては、機械・材料分野では集積回路の熱膨張や窒化ケイ素のき裂開口機構の解明をはじめ、多岐にわたる研究に活用されている⁵⁾。また、農学分野では、栄養生長期の小麦における植被率に関する研究に用いられている⁶⁾。医療分野においても、X線CTによる生体組織内部の非侵襲力学場計測の応用として用いられている⁷⁾。また、建設分野では、橋梁のたわみ計測⁸⁾をはじめ、初期不整を付与した薄肉円筒の座屈メカニズム⁹⁾、合成桁の変形挙動¹⁰⁾や曲げ加工した異形鉄筋の変形特性¹¹⁾の把握に用いられている。

2.2 原理

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。DICMの解析原理は、デジタル画像が一般的に256濃度階調で表現される画像から構成された濃淡のある画像であることを利用したものである。まず、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。

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(Fig. 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(Fig. 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形方向、変形量を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返す事によって、全視野の変形データが得ることができる。

ひずみ分布は、以上の方法により得た変形量を利用して算出する。これは、Fig. 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、垂直、斜め、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(Fig. 2(b)~(e))。本研究では、DICM解析プログラム Correlated Solutions VIC3D 2009^{12,13)}を用いてひずみ分布を算出した。本計測装置と計測システムの仕様をPhoto. 1とTable 1にそれぞれ示す。

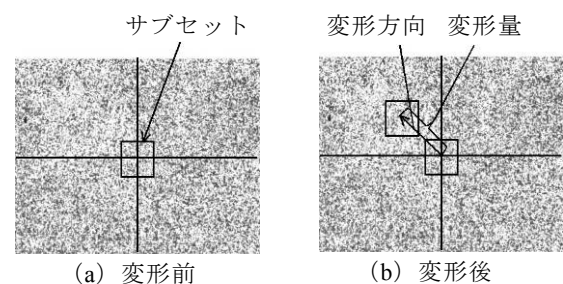
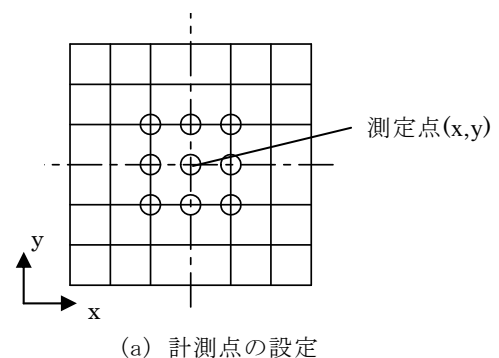


Fig. 1 変形前と変形後のデジタル画像



(a) 計測点の設定

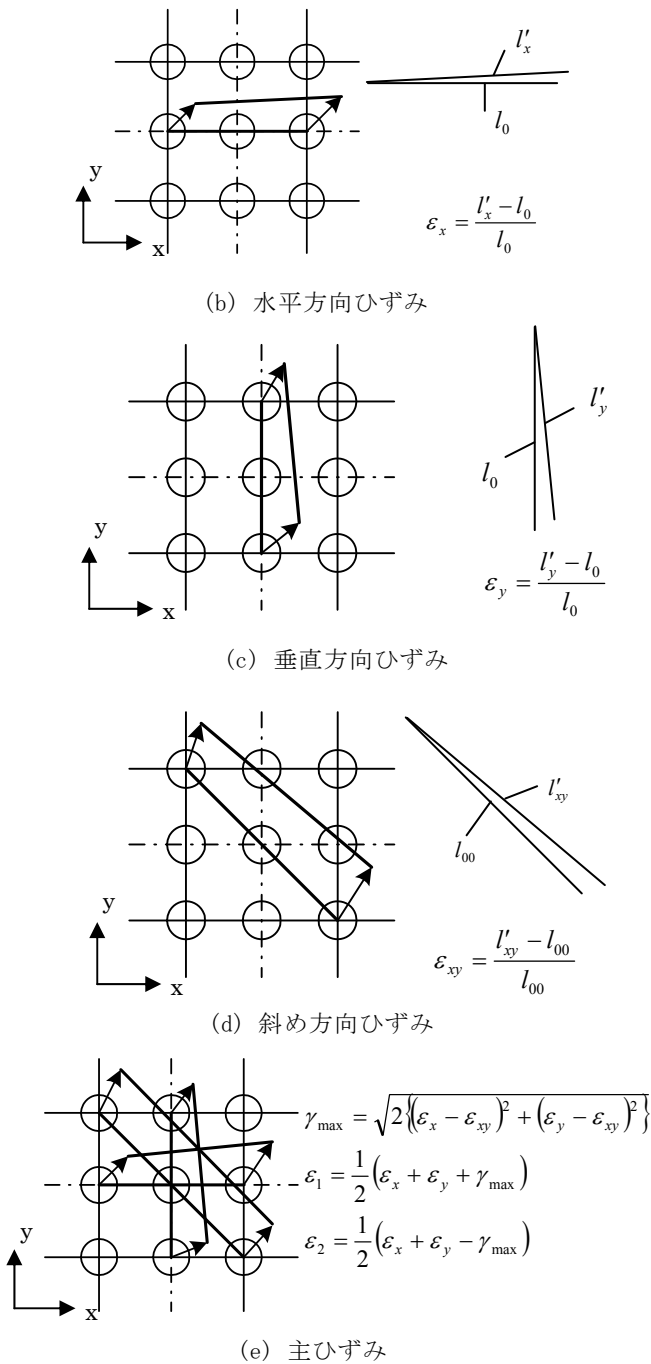


Fig. 2 ひずみ解析

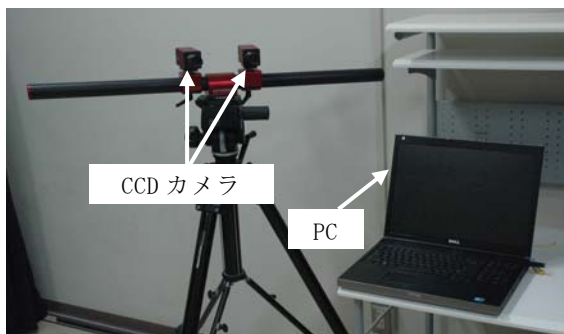


Photo. 1 本計測装置

Table 1 計測器仕様

CCD カメラ	1380×1034pixel AVT 社製 Marlin F-145B2
レンズ	Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 1.4/ 17
計測感度 (高温環境化 も同様)	ピクセル間距離の 1/10~1/100
	変位: 100mm の視野で 20 μm ひずみ: 0.01%
計測レンジ	数百%の変形まで可
出力形式	三次元形状, 変位, ひずみ

3. 鋼部材への適用

3.1 試験概要

鋼部材は、均一な材料であることからコンクリート部材と異なりひずみゲージを貼付する際にゲージ長の制約等はない。このことから、集中的なひずみを測定したい場合には、ユーザー側が自由にゲージ長の異なるひずみゲージを使用することができる。一方、DICMでは、解析パラメーターを設定することで、自由にユーザー側が取得したい任意長さ（以下解析ゲージ長と呼ぶ）のひずみを算出することができる。ここでは、解析ゲージ長を変化させた場合の測定精度を検証することを目的として以下の試験を実施した。

本試験では、長さ 400×断面 100×100×6/8 (mm) の H 鋼を用いて一軸圧縮試験を行い、ひずみゲージと DICMにより、ひずみ計測を実施した。本試験では試験体中央部表面にゲージ長 5mm, 30mm, 60mm のひずみゲージを貼付し、ゲージを貼付した面を DICMにより測定した。DICMの測定面には、白色のスプレーで下地を塗布し、後に黒色のスプレーでランダムパターンを設けた。そして、塗料が乾燥した後に一軸圧縮試験を実施した。試験体概要、試験片ランダムパターンを Fig. 3 と Photo. 2 にそれぞれ示す。また、試験片の材料特性を Table 2 に示す。

計測条件として、試験体から2つのカメラの中心位置までの距離を 340mm、カメラ間の距離を 160mm とした。また、計測時には、白熱灯を 2つ使用した。なお、本条件下で撮影した画像は、0.073mm/pixel で構成される。このことから、ゲージ長手方向において 5mmゲージは、68pixel、30mmゲージは 410pixel、60mmゲージは 820pixel で構成される。

載荷速度は 2kN/s とし、ひずみゲージ、DICMともに 1秒ピッチで計測し、約 1200μ で計測を終了した。計測位置を Fig. 4、計測状況を Photo. 3 に示す。

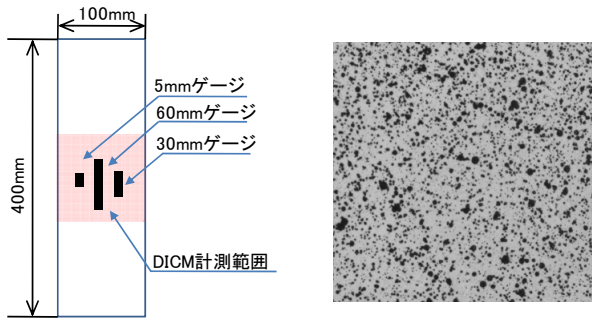


Fig. 3 試験体概要 Photo. 2 ランダムパターン

Table 2 試験片材料特性

規格	降伏点	引張強さ	伸び
JIS G3 101 SS400	329N/mm ²	445N/mm ²	31(%)

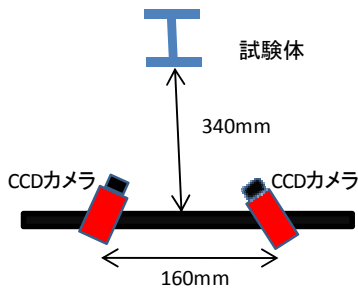


Fig. 4 計測位置

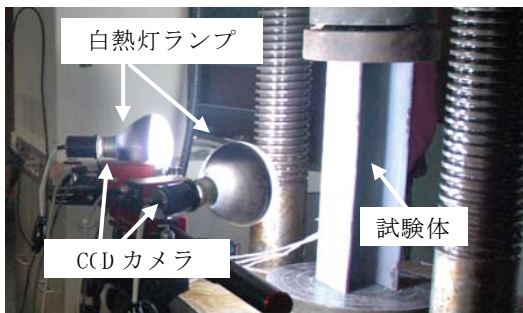


Photo. 3 計測状況

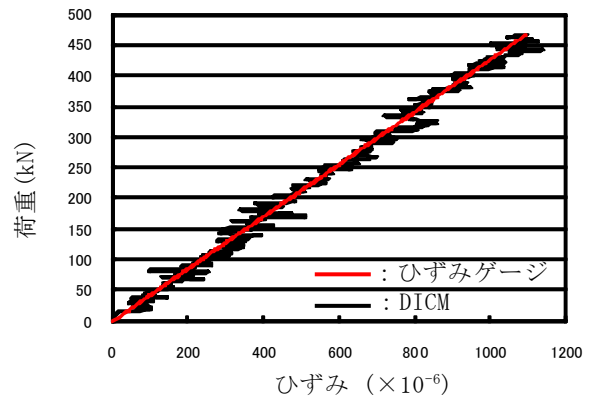
3.2 試験結果

荷重-ひずみ曲線とバラツキ-time 関係を Fig. 5 と Fig. 6 にそれぞれ示す。バラツキは、DICM とひずみゲージのひずみ値の差分を表し、time は、試験開始時からの時間 (秒) を表す。また、DICM とひずみゲージのひずみ値の相関係数、バラツキの平均、標準偏差を Table 3 に示す。

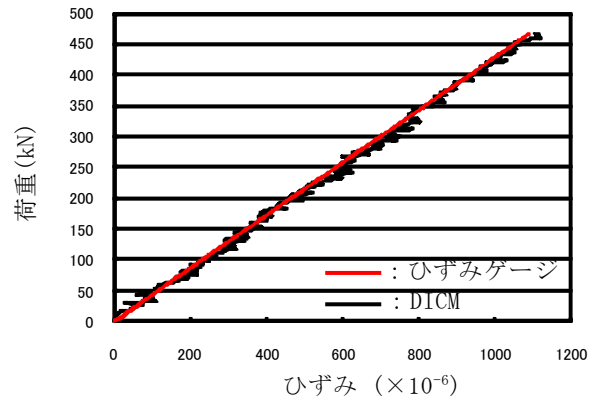
Fig. 5 よりゲージ長 5 mm の場合、DICM は、バラツキながらひずみゲージを追従していることが確認でき、ゲージ長 30 mm, 60 mm の場合は、DICM は、精度よくひずみゲージを追従していることが確認できる。

Table 3 より、DICM とひずみゲージの相関係数は、

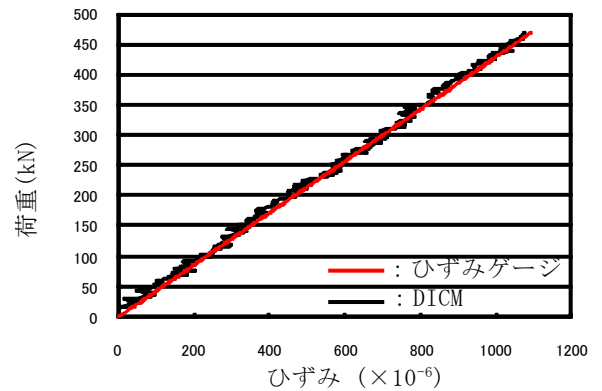
ゲージ長 5 mm は、0.9944、ゲージ長 30 mm は、0.9985、ゲージ長 60 mm は、0.9987 とゲージ長が長くなるにつれて相関係数が 1 に近づいていった。ゲージ長 5 mm の場合、DICM のバラツキの平均は 27 μ、標準偏差は 23 μ、ゲージ長 30 mm 場合、バラツキの平均は 16 μ、標準偏差は 13 μ、ゲージ長 60 mm 場合、バラツキの平均は 17 μ、標準偏差は 11 μ とゲージ長が長くなるにつれてバラツキと標準偏差が減少した。このことからゲージ長を構成するピクセル数が多くなるについて DICM のひずみ測定精度が向上することが確認できた。



(a) 5mm ゲージ



(b) 30mm ゲージ



(c) 60mm ゲージ

Fig. 5 荷重-ひずみ曲線

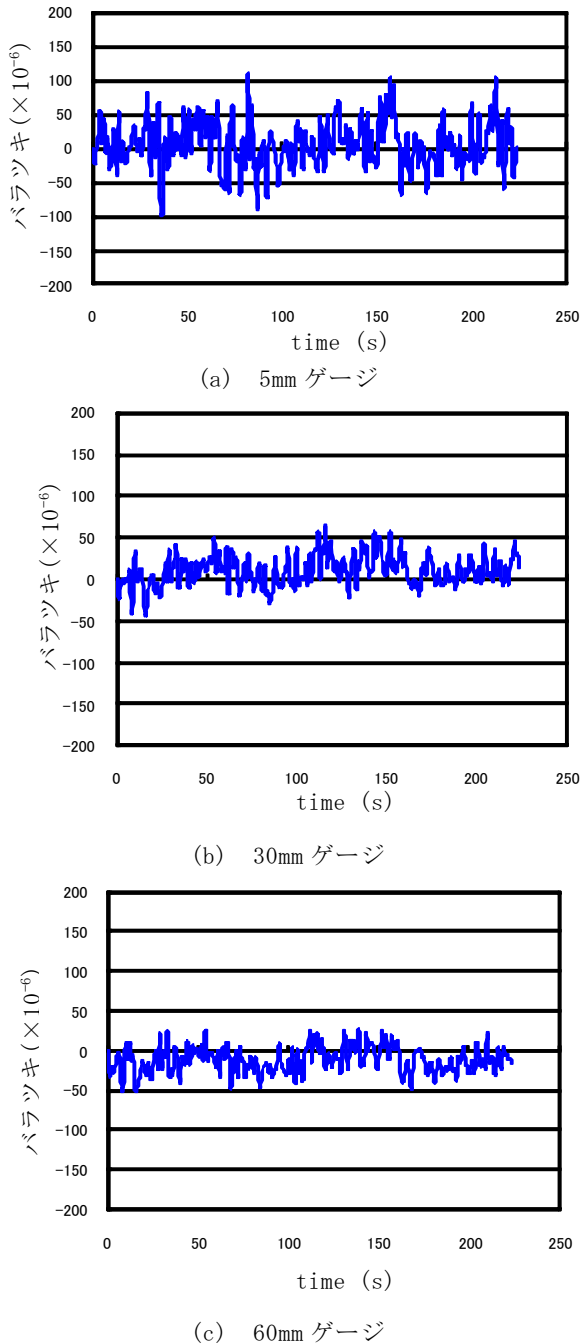


Fig. 6 バラツキ-time の関係

Table 3 ひずみ値の比較

ゲージ長 (mm)	5	30	60
解像度 (mm/pixel)	0.073		
ゲージ長 (pixel)	68	410	820
相関係数	0.9944	0.9985	0.9987
バラツキ平均 (μ)	27	16	17
標準偏差 (μ)	23	13	11

4. コンクリート部材への適用

4.1 試験概要

コンクリートは、セメント、水、細骨材、粗骨材などで構成されていることから不均一材料として取り扱われる。コンクリートのひずみ測定においては、骨材の最大寸法の3倍以上のひずみゲージを使用することがJISで定められている。

ここでは、不均一材料のコンクリート部材にDICMを適用した場合のひずみ測定精度の検証を行った。

本実験では、試験体寸法 100×100×400 (mm) の無筋コンクリート試験体を用い、一軸圧縮試験を実施した。その際にコンクリート表面に発生するひずみをひずみゲージとDICMで計測し、比較した。試験体は、普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を45%、最大粗骨材寸法を20mmとした。

本試験では、試験体中央部表面にゲージ長 60mm のひずみゲージを3枚貼付し、ゲージを貼付した面をDICMにより測定した。DICMの測定面には、白色のスプレーで下地を塗布し、後に黒色のスプレーでランダムパターンを設けた。そして、塗料が乾燥した後に一軸圧縮試験を実施した。試験体概要、試験片ランダムパターンをFig. 7とPhoto. 4にそれぞれ示す。また、配合表をTable 4に示す。

計測条件として、試験体から2つのカメラの中心位置までの距離を620mm、カメラ間の距離を310mmとした。また、計測時には、白熱灯を2つ使用した。なお、本条件下で撮影した画像は、0.0146mm/pixelで構成される。このことから、ゲージ長手方向において60mmゲージは、410pixelで構成される。

載荷速度は2kN/sとし、ひずみゲージ、DICMともに1秒ピッチで計測し、最大荷重に達した時点で計測を終了した。計測位置をFig. 8、計測状況をPhoto. 5に示す。

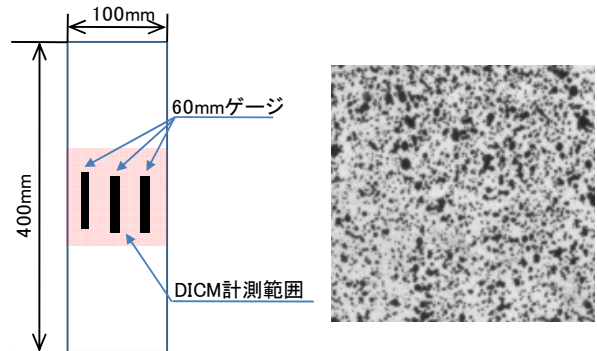


Fig. 7 試験体概要 Photo. 4 ランダムパターン

Table 4 配合表 単位: kg/m³

セメント	細骨材	粗骨材	水	AE 剤
377.3	71.2	937.7	170.7	3.0

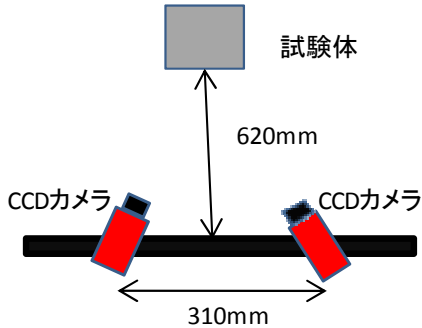


Fig. 8 計測位置

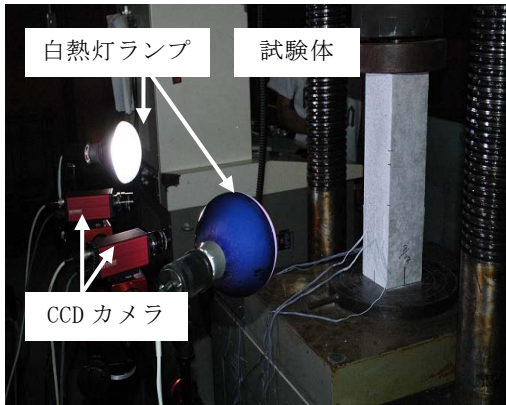
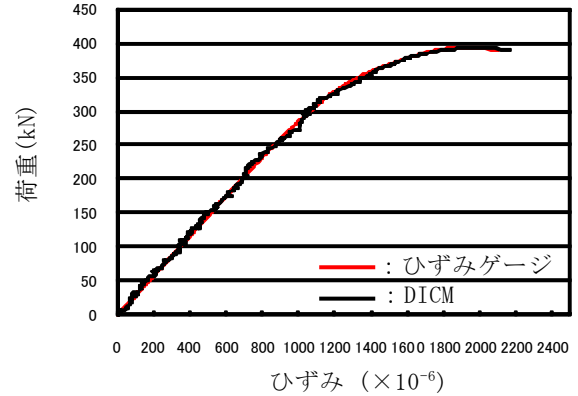


Photo. 5 計測状況

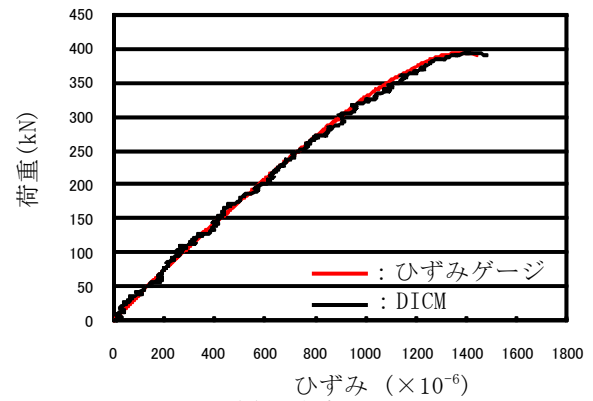
4.2 試験結果

荷重-ひずみ曲線とバラツキ-time 関係を Fig. 9 と Fig. 10 にそれぞれ示す。ここで示すバラツキは、DICM とひずみゲージのひずみ値の差分を表し、time は、試験開始時からの時間 (秒) を表す。DICM とひずみゲージのひずみ値の相関係数、バラツキの平均、標準偏差を Table 5 に示す。

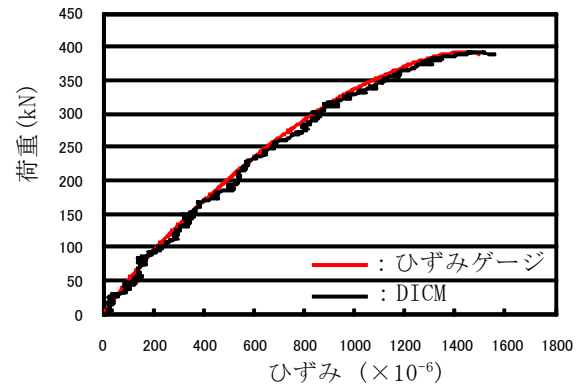
Fig. 9 より DICM は、弾性域から塑性域そして最大荷重時まで左中右のひずみゲージを精度よく追従しているのが確認できる。Fig. 10 により試験終了時付近になると DICM がひずみゲージを上回る傾向を示した。Table 5 より、DICM とひずみゲージの相関係数は、0.9991~0.9994 と高い相関を示した。DICM のバラツキの平均は、左ゲージは 16 μ, 中央ゲージは 18 μ, 右ゲージは 25 μ でその平均は 20 μ だった。DICM のバラツキの標準偏差は、左ゲージは 13 μ, 中央ゲージは 14 μ, 右ゲージは 18 μ でその平均は 15 μ だった。



(a) 左

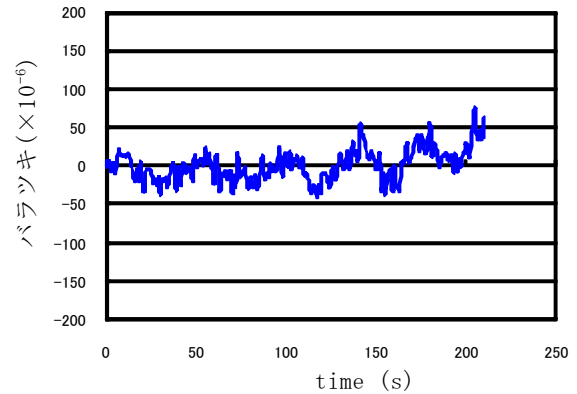


(b) 中央



(c) 右

Fig. 9 荷重-ひずみ曲線



(a) 左

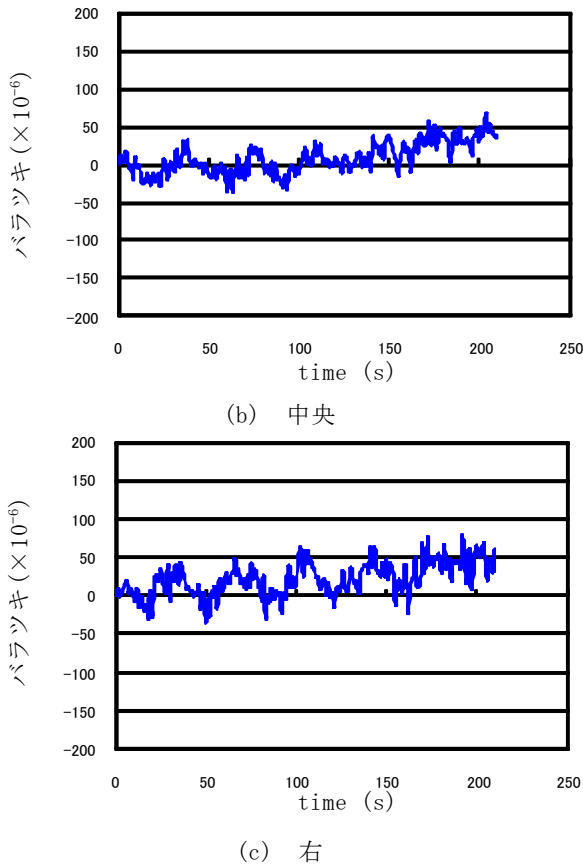


Fig. 10 バラツキ-time の関係

Table 5 結果一覧

ゲージ位置	左	中央	右
ゲージ長 (pixel)	410		
解像度 (mm/ pixel)	0.146		
相関係数	0.9994	0.9994	0.9991
バラツキ平均 (μ)	16	18	25
平均 (μ)	20		
標準偏差 (μ)	13	14	18
平均 (μ)	15		

6. 考察

鋼部材においてゲージ長を構成するピクセル数が増加すると DICM のひずみ測定精度が向上した。このことから、高解像度の CCD カメラを使用することや拡大して撮影することにより、ひずみ測定精度の向上が期待できる。コンクリート部材においては、DICM は、弾性域から塑性域そして最大荷重時までひずみゲージを精度よく追従できた。また、DICM のバラツキの平均は 20μ 、バラツキの標準偏差は 15μ と小さい値を示した。以上から DICM は、建設材料に十分適用できる手法であることが確認できた。

参考文献

- 1) (社) 日本鋼構造協会：土木鋼構造の点検・対策・診断技術 2009 年度版，2009 年 8 月
- 2) (社) コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 09 基礎編，200 年 2 月
- 3) (社) 日本非破壊検査協会：非破壊検査検査と材料評価, Vol159, No. 7. 2010
- 4) 安全の評価のための非接触計測技術について，株式会社レーザー計測，pp. 1-8
- 5) 西川出・小倉敬二・M. A. Sutton：DICMによる微小変位計測システム，応用力学研究所研究集会報告 14ME-S4 実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫，pp. 43-47，2002
- 6) 福嶋陽：デジタル画像を利用した栄養生長期の小麦における植被率の簡易推定法，日本作物学会紀事vol. 70 (別1)，pp. 236-237，2001
- 7) 桑水流理・中本与一・吉川暢宏：X線CTによる生体内非侵襲力学場評価，日本機械学会第15回バイオエンジニアリング講演会講演論文集，pp. 423-424，2003
- 8) Yoneyama, S. Kitagawa, A. Iwata, S. Tani, K. and Kikuta H. : Bridge deflection measurement using digital image correlation, Experiment Technique, Vol. 31, No. 1, pp. 34-40, 2007
- 9) C. Morita, C. Zhao, A. Demizu, K. Makino, H. Matsuda, K. Ichimiya : Proc. of the Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 3D profile measurement and buckling simulation on thin-walled cylindrical shells under compression by utilizing 3D-digital Image Correlation Method, , IABMAS2010. 7
- 10) Goda, H. , Uchino, M. , Yamaguchi, Y. , Hibino, M. and Matsuda, H. : Base study on measure of transformation of concrete structures used by digital image correlation method, Proceeding of IABMAS2010, 2010
- 11) 合田寛基, 原田哲夫, 日比野誠, 永藤政敏：曲げ戻しを受ける鉄筋の脆性破断に対する感受性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp. 1315-1320，2009
- 12) Correlated Solutions : Vic-3D 2009 Reference Manual.