

コンクリートを対象とした DICMのひずみ計測に関する基礎的研究

永松 牧子¹・福原 巧也²・高橋 恭涼³・松田 浩⁴

¹学生会員 長崎大学大学院 工学研究科総合工学専攻 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

E-mail:bb52118412@ms.nagasaki-u.ac.jp

²非会員 長崎大学 工学部工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

E-mail:bb35416035@ms.nagasaki-u.ac.jp

³非会員 長崎大学 工学部工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

E-mail:bb35416023@ms.nagasaki-u.ac.jp

⁴正会員 長崎大学大学院 工学研究科教授 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

E-mail:matsuda@nagasaki-u.ac.jp

ひずみゲージ法に代わる計測法として、ゲージの複雑な配線作業などを必要としないデジタル画像相関法 (DICM) に着目し、コンクリートを計測対象として研究を行った。

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、ノイズの影響により低ひずみ領域の測定において、大きな誤差が生じる。しかし、コンクリートの引張破壊は約100 μ で生じるため、コンクリートを対象とした場合のひずみ計測における精度向上が要される。計測環境やサブセット、ステップ、キャリブレーションの解析条件を変化させて、単軸ひずみおよび主ひずみの計測精度について検討を行った。

Key Words : Digital Image Correlation Method, strain measurement, concrete, principal strain

1. はじめに

構造物の部材や部位の変位やひずみの計測法として主に変位計やひずみゲージを用いた計測が行われてきた。ひずみゲージ法は適切な条件の下で信頼性の高い測定値を得ることができる。しかし、対象物全体のひずみ分布を得るには多くのゲージと複雑な配線作業が必要になる。そのため、ひずみゲージ法に代わる計測法として、デジタル画像相関法 (以下、DICM) 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進められている¹⁾。

本研究ではコンクリート部材を対象としたひずみの計測に関する研究を行う。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、撮影時の振動などにより発生・混在するノイズの影響により低ひずみ領域の測定において、大きな誤差が生じる。しかし、コンクリートの引張破壊は約100 μ で生じるため、コンクリートを対象とした場合のひずみ計測における精度向上が要される。本研究ではひずみのばらつきが大きいコンクリートにおいて、計測条件および解析条件を変化させて、ひずみ計測精度の向上を目的に研究を行った。

2. DICMの原理

DICMは非接触かつ全視野計測が可能な光学的計測法の1つである。測定対象物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カメラ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。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)。変形前のサブセットの輝度地分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索し、サブセットの中心の点の移動より変位方向、変位量を算出する²⁾。

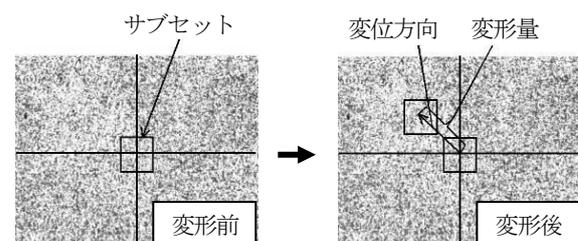


図-1 変形前後のデジタル画像

ひずみ分布は、得られた変位量と座標を利用して算出する。図-2の白い点が座標を、矢印が変位を表わしている。これらの点を使用して三角形のメッシュを形成する。剛体移動を取り除いた変形前後の三角形の形の変化よりひずみを計算する。この操作を全ての点で行うことにより、周囲のひずみデータから主ひずみなども算出する。

3. 試験概要

本試験の計測対象となるコンクリートは100×100×400mmのRC角柱供試体とする(図-3)。主鉄筋はD10(SD295)を1本使用し、かぶりは25mmである。2点集中荷重で曲げ試験を行う。

試験体と計測条件の概要を表-1に示す。試験体の種類はA-Fの6種類がある。試験体B, C, E, FのDICM計測表面には、黒色のスプレーでランダムパターンを塗布し、輝度地分のランダム性を施している。比較用として試験体A, Dにはランダムパターンを塗布せずに、そのままのコンクリート表面を計測した。カメラと試験体との計測距離について、試験体A, B, D, Eは試験体長さがデジタル画像の9割を占める距離として900mmとした。試験体C, Fについては、焦点が合う最大の距離である1,600mmとした。計測は照明がついた室内で行い、試験体D, E, FはさらにLEDライトを用いて、試験体表面の明るさを一定に保っている。

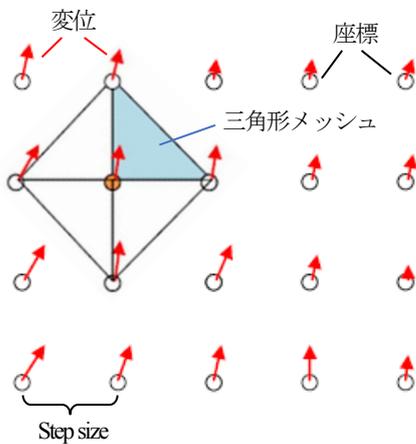


図-2 ひずみの解析³⁾

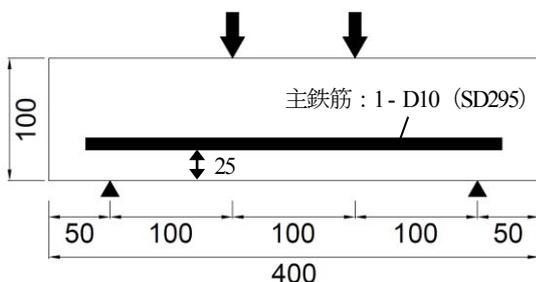


図-3 試験体の設計図(単位mm)

4. 計測・解析方法

(1) ひずみ計測方法

RC供試体には、DICMで算出したひずみと比較するために、ひずみゲージ(PL-60-11)をDICMで計測する面の裏側の面に添付した。図-4に示すように、ゲージ長60mmのひずみゲージを、スパン中央と片側のせん断スパンの中心に添付した。スパン中央には単軸ゲージを用い、はり軸(x軸)方向のひずみを計測し、せん断スパン中央にはロゼットゲージを用いて主ひずみを計測した。

DICMのひずみ計測方法を図-5に示す。荷重前の試験体を基準として、曲げ応力が0.5MPa増加するごとに撮影し、計測を行った。本試験では2台のCCDカメラ(解像度:500万画素、画素サイズ3.45×3.45μ)を用いて3次元計測を行い、ひずみを算出した。計測前には2台のCCDカメラで校正プレートを用いて、位置や角度を変えながら20枚撮影することで、画像のひずみ補正やカメラの位置合わせを行う。キャリブレーションプレートの種類として、計測距離が900mmの試験体A, B, D, Eでは格子点距離8.98, 17.68mmの2種の校正プレートを用い、計測距離1600mmの試験体C, Fでは、8.98, 17.68, 35.08mmの3種の校正プレートを用いてキャリブレーションを行った。

表-1 試験体と計測条件の概要

| 試験体 | ランダムパターン | 距離 | 光源 |
|-----|----------|---------|---------------|
| A | 無 | 900mm | 室内照明のみ |
| B | 有 | | |
| C | 有 | 1,600mm | 室内照明 + LEDライト |
| D | 無 | 900mm | |
| E | 有 | 1,600mm | |
| F | 有 | | |

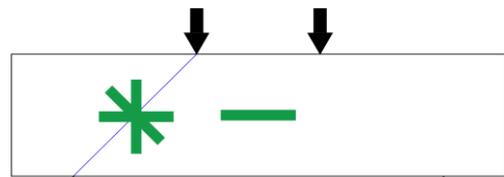


図-4 ひずみゲージ貼付け位置

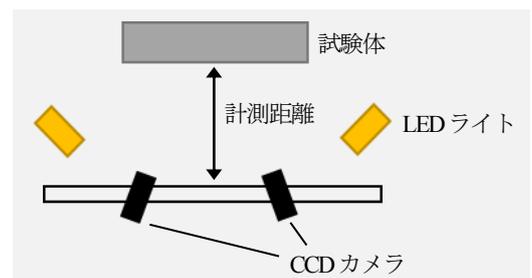


図-5 DICMのひずみ計測位置

(2) DICMのひずみ解析方法

ひずみ分布を得るための解析をするにあたり、サブセットとステップを選択する。サブセットについては、29, 151およびDICMのソフトが算出する最適サブセットの3種類のパターンで解析を行った。相関を行うピッチであるステップ（図-2）に関しては、ステップ4, 8の2種類のパターンで解析を行い、解析法によるひずみの精度について検証する。また、キャリブレーションについても、4章1節で述べた種類でそれぞれ解析を行った。

DICMでひずみを算出する位置を図-6に示す。ひずみゲージの位置に対応する箇所を解析する。スパン中央部の単軸ゲージに対応する場所について、点, 10, 30, 60, 90, 120mmの長さを取り、幅10mmの四角形範囲内におけるx軸方向のひずみの算出を行う。せん断スパン中心の主ひずみについては、点および30×30, 60×60mmの正方形範囲内における主ひずみを算出する。

5. 試験結果

(1) 相関係数

一例として試験体Bのサブセットおよびステップの違いにおける、ひずみの相関係数の比較を図-7に示す。全ての試験体に共通して、解析範囲が点の場合はばらつきが大きく、ゲージ長60mm以上を境にばらつきが小さくなった。点~30mmのとき、サブセットおよびステップが大きいほど解析の精度が向上し、60mm以上では解析方法による相関係数の違いは小さくなった。

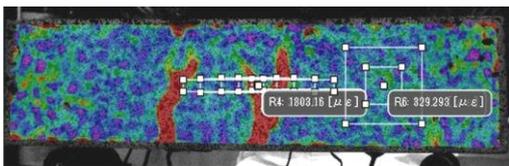


図-6 DICMのひずみ解析位置

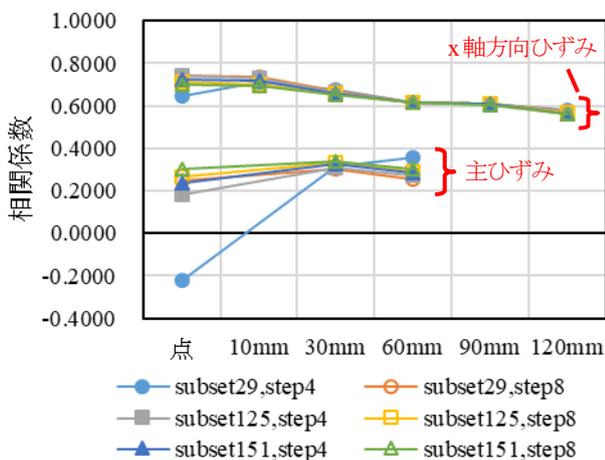


図-7 相関係数 (試験体B, cal spacing : 17.68mm)

一例として試験体Cの校正プレートの格子点距離の違いにおけるひずみの相関係数の比較を図-8に示す。試験体Cの場合、格子点距離35.08mmのとき相関係数が高い値となった。キャリブレーションする際の校正プレートがデジタル画像を占める割合が高いほど、相関係数が高い傾向があったが、試験体Fについては17.68mmのときに相関係数が高くなり、計測条件による適当な校正プレートを選択する必要がある。

全試験体の相関係数を図-9に示す。校正プレートの格子点距離が17.68mmの場合を代表して図-7を示すが、試験体Aは8.98mmの場合しか解析できず、試験体Dは解析不能であった。以上より、ランダムパターンを塗布することが解析をするうえで必要であることがわかる。全ての試験体において、主ひずみよりx軸方向のひずみの方が高い相関を得られた。試験体Bを除いて、解析範囲の長さ60mm以上の場合、x方向ひずみの相関係数が0.95以上となった。試験体Bでは相関係数が小さいが、ひずみの解析範囲とひび割れ発生位置の関係などが原因として、相関係数が小さくなることがあると考えられる。

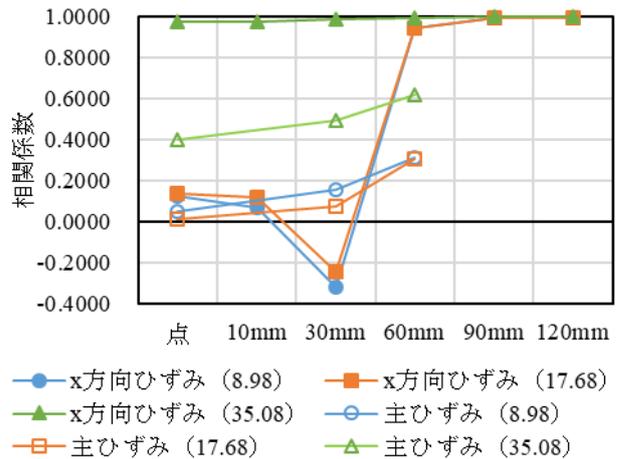


図-8 格子点距離(mm)の違いによる相関係数の比較 (試験体C)

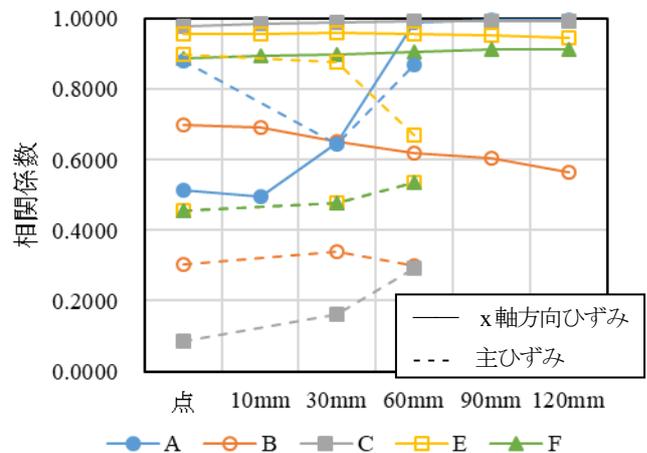


図-9 全試験体の相関係数 (サブセット151, ステップ8, cal spacing : 17.68mm (試験体Aのみ8.98mm))

(2) ひずみの誤差

試験体Bのサブセットおよびステップの違いにおける、ひずみ誤差の比較を図-10に、試験体Cの校正プレートの格子点距離の違いにおけるひずみ誤差の比較を図-11に、全試験体のひずみ誤差を図-12に示す。図-10, 11について、ゲージ長が60mm以上になると、解析方法によるばらつきが小さくなった。図-12について、試験体Aでは誤差が大きく、ランダムパターンが解析において必要であることがわかる。ひずみの誤差は計測距離が遠いほど、小さくなる傾向があり、試験体C, Fの主ひずみは誤差が100 μ 以下に抑えられ、精度が良好であった。

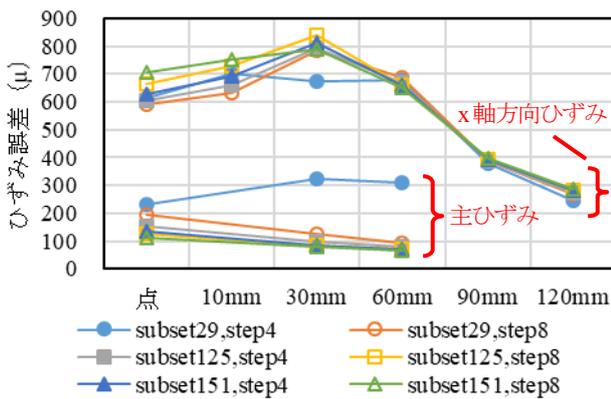


図-10 ひずみの誤差 (試験体B, cal spacing : 17.68mm)

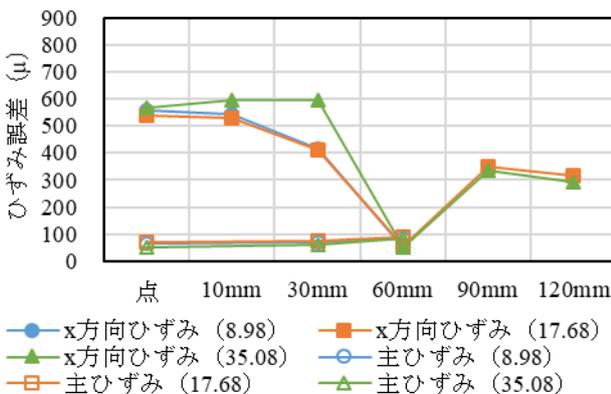


図-11 格子点距離の違いによるひずみ誤差の比較 (試験体C)

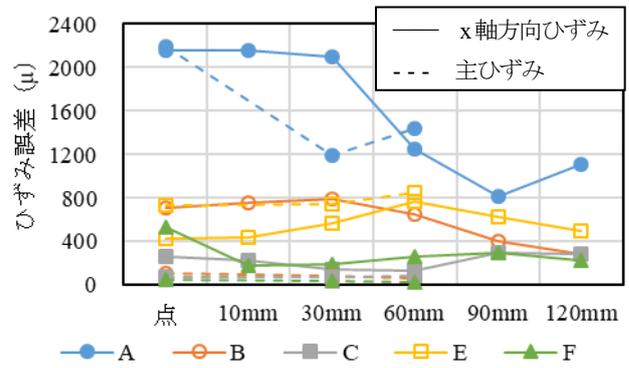


図-12 全試験体のひずみ誤差 (サブセット151, ステップ8, cal spacing : 17.68mm (試験体Aのみ8.98mm))

7. まとめ

DICMで解析するにおいて、ランダムパターンが必須となる。解析精度について、サブセットおよびステップが大きいほど、精度が向上する傾向にある。また、解析範囲長さ60mm以上で、解析法によるばらつきが小さくなる。試験体C, Fの条件では、主ひずみの誤差が100 μ 以下となった。

謝辞：本論文は、長崎大学の松田浩教授の終始暖かなご指導のもとにまとめることができました。また、論文作成にあたり、ともに研究を行ってくれた同研究室の福原巧也さん、高橋恭涼さんには心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松田浩：光学的全視野計測法を用いた構造物の変位、ひずみ、応力、・振動計測, pp.53-61, 検査技術, 2017.
- 2) 出水亨：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, pp.1_683-I.690, 土木学会論文集 A2, Vol.68, No.2 (応用力学論文集 Vol.15), 2012.
- 3) 株式会社レーザー計測：Vic-3D のひずみの計算について, 2011.

(2019.10.21 受付)

BASIC STUDY ON STRAIN MEASUREMENT OF DICM FOR CONCRETE

Makiko NAGAMATSU, Takuya FUKUHARA,
Kiyosuke TKAKHASHI and Hiroshi MATSUDA

The authors focused on Digital Image Correlation Method (DICM). DICM doesn't need to wire many strain gauges. In this study, we measured strain of concrete. In DICM analysis method of strain that variation of distance between two points, influence of noise causes large error in measurement of small strain. Nevertheless, tensile fracture of concrete causes when strain is about 100 μ . So strain measurement accuracy for concrete has to improve. We studied measurement accuracy of uniaxial and principal strain by changing measurement and analysis condition. The differences of measurement condition (brightness and distance) and analysis condition (calibration, subset and step) changed strain measurement accuracy.