

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820185

研究課題名(和文) 光学的計測法を用いたPC構造物の革新的現有作用応力測定法の開発

研究課題名(英文) Development of innovative existing action stress measurement method of PC structure by full-field optical measurement method

研究代表者

出水 享 (DEMIZU, Akira)

長崎大学・工学研究科・技術職員

研究者番号：00533308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においてイメージセンサタイプのカメラタイプ全視野ひずみ計測装置(カメラ装置)の開発を行った。そして、カメラ装置の変位・ひずみ計測精度を確認を行うとともにひずみ計測精度向上のための画像処理手法の検討を行った。そして、現有応力推定プログラムの開発を行い、曲率のあるコンクリート部材を用いた現有応力の推定精度の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, I have developed camera type full-field strain measurement device (camera device). Then, it was confirmed measurement accuracy of strain and displacement of the camera device. It was studied image processing technique for the measurement accuracy. It was developed existing action stress estimation program. It was investigated the accuracy of existing action stress estimated using no curvature concrete member.

研究分野：維持管理工学

キーワード：プレストレス コンクリート構造物 現有応力 デジタル画像 応力解放法 維持管理技術 PC構造物
光学的全視野計測

1. 研究開始当初の背景

近年、国内外の PC 構造物において塩害、中性化、アルカリ骨材反応などに伴うひび割れの発生、崩落事故などが報告されるようになってきた 1)、2)、3)。ひび割れが生じた PC 構造物は、設計時のプレストレスを満足していない場合が多く、安全性の評価のために現有作用応力(プレストレス)の把握が必要不可欠となる。

既存の PC 構造物の現有作用応力測定法は、応力が作用する部材に円孔の溝(φ100mm、深さ 200mm)を切削し、応力解放した際の解放ひずみをひずみゲージで計測し、作用応力を測定するコア応力解放法が一般的に行われている。しかし、ひずみゲージは解放ひずみを精度よく計測できないため、現有作用応力を高精度に測定できない。ひずみゲージ値は 1 点 1 方向の平均値であるため、円孔周辺に生じた局所的かつ複雑な解放ひずみの評価が困難なこと、ひずみゲージ値がコンクリート表面付近の粗骨材・気泡分布の影響を受けることが原因である。計測値の信頼度を向上させるために多点・多方向計測を行うが、設置・配線作業が問題となる。また、コア切削中に誤ってひずみゲージや配線を切断し再調査することや鉄筋を切断することもある。

研究代表者らは上記の問題を解決すべく、コンクリートを部分的にスリット切削し、応力解放ひずみをスキャナタイプ光学的全視野ひずみ計測装置(スキャナ装置)により計測し、現有作用応力を測定する手法であるスリット応力解放法を開発し、PC 構造物の維持管理に適用してきた 4)。

スキャナ装置に用いたラインセンサは、焦点距離が短く、撮影範囲に凹凸があると撮影できない場合もあり、計測前にコンクリート表面を研磨し平滑にする必要がある。その、作業に時間と手間を要する。また、曲率のある部材に対しては適用できない場合もある。スキャナ装置は計測時に装置を固定する必要があり、応力解放前後で取り外し、再設置に手間を要するなどの問題がある。

2. 研究の目的

本研究では、現有作用応力測定法の作業性の向上ならびに適用範囲を拡大させるためイメージセンサを搭載した光学的全視野ひずみ計測装置の開発、その装置を用いた現有作用応力測定法の開発ならびにアーチ橋、タンクなど曲率のある PC 構造物についても適用可能となる現有作用応力測定法の開発を目的とする。具体的な開発目的を以下に示す。

(1) カメラタイプ光学的全視野ひずみ計測装置(カメラ装置)の開発

2 台のイメージセンサタイプのデジタルカ

メラを組み合わせた 3 次元カメラ装置とその計測プログラムの構築を行う。また、カメラ装置の変位・ひずみ計測精度の検証・計測精度向上のための画像解析手法を検討する。

(2) 現有作用応力測定法の開発

カメラ装置を用いた現有作用応力推定プログラムの開発、カメラ装置を用いた現有作用応力推定精度の検討、新しい現有作用応力測定法の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) カメラタイプ光学的全視野ひずみ計測装置(カメラ装置)の開発

① 計測システムの開発

イメージセンサを搭載した光学的全視野ひずみ計測装置を構築するためイメージセンサ、レンズの選定を行う。曲率のある構造物に適用するためカメラ装置を 2 台組み合わせた 3 次元計測装置を構築する。また、2 台のカメラを用いた同期計測が可能な計測プログラムの構築を行う。ひずみ算出のための画像解析プログラムを構築する。

② 変位・ひずみ計測精度の検討

カメラ装置の変位計測精度の検討を行うため QR コードを取り付けた Z ステージ(図 1)を用いて試験を行う。QR コードの大きさは縦、横ともに 54.5 mm である。計測は Z ステージの変位量を重力方向に 0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90、1.00mm の 10 段階、奥行方向に 0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90、1.00mm の 10 段階に調整し、各段階で 3 回計測を行う。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 850mm、カメラ間の距離を 600mm とする。また、計測には、LED ライトを 2 つ使用する。計測状況を写真 2 に示す。



写真1 QRコード



写真2 計測状況

カメラ装置のひずみ計測精度の検討を行うためコンクリート試験体を用いる。試験体は φ100×200(mm)の円柱供試験体を用い、一軸圧縮試験を行う。

試験体中央部表面にゲージ長 60mm のひずみゲージを貼付し、ゲージを貼付した面をカメラ装置により計測する。計測面には、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る。そして、スプレーが乾燥した後に一軸圧縮試験を実施する。

計測では無載荷時およびひずみゲージ値がおよそ 50 μ、100 μ、150 μ、200 μ、250 μ および 300 μ の 6 段階として、各段階で荷

重を一定にして、カメラ装置で3回計測を行う。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850mm、カメラ間の距離を600mmとする。また、計測時には、LEDライトを2つ使用する。計測状況を写真3に示す。



写真3 計測状況

③計測精度の向上

カメラ装置のひずみ計測精度を向上させるため加算平均処理法を用いる。計測精度の検証を行うためコンクリート試験体を用いる。試験は寸法φ100×200(mm)の円柱供試験体を用い、一軸圧縮試験を行う。

計測は無載荷時およびひずみゲージ値がおおよそ50μ、100μ、150μ、200μ、250μおよび300μの6段階として、各段階で荷重を一定にして、カメラ装置で50回計測を行う。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850mm、カメラ間の距離を600mmとする。また、計測時には、LEDライトを2つ使用する。

連続的に撮影した静止画像は、同じ画像に見えるが、画素レベルで分析すると、輝度値にばらつきが存在している。これは、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する。

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50枚を合成させ、その合成させた画像を用いて解析を行う。つまり、無載荷時の画像を初期画像として6荷重段階の変形画像の画像に対して解析を行うことになる。

(2) 現有作用応力測定法の開発

①現有作用応力測定精度の確認1

カメラ装置を用いたスリット応力解放法の測定精度の検討を行うため、鉄筋コンクリート(以下RC)試験体を用いた試験を行う。試験体は縦240mm×横370mm×高さ460mmの角柱である。コンクリート中にD25の主鉄筋4本、D13の帯鉄筋2本を配置している。試験体の端面(上下面)の研磨仕上げの精度や圧縮試験機ヘッドのわずかな偏心によりひずみ差が生じるため、端面に石膏を塗りその上から金属板を接着することで試験体にか

かる荷重が全体でほぼ同等となるよう調整する。

試験では、RC試験体を圧縮試験機で一軸載荷を行い、既定の応力に達するまで荷重を載荷させる。本試験で目標とする載荷応力は、10.0N/mm²とする。既定の応力に達した後に荷重を一定に保持し、試験体中央部をコンクリートカッターにより応力作用方向に対して垂直方向にスリット切削し、応力を解放させる。スリット切削は、切削専用の治具を用いて行い、切削幅や深さがほぼ一定となるようにしている。ここでは、スリット応力解放法により求めた応力値と載荷荷重から求めた応力値を比較し、精度を検証する。

計測条件は、カメラ間距離を305mm、カメラと試験体までの距離は1170mmとし、135mm×160mmの範囲を計測する。カメラ装置は初期画像と変形画像を50枚計測し、解析時に複数枚計測した画像に加算平均処理を行い結合し、その結合画像を用いて画像解析を行い計測精度を向上させる。計測状況と切削状況を写真4と写真5にそれぞれ示す。



写真4 計測状況

写真5 切削状況

②現有作用応力測定精度の確認2

曲率があるコンクリート部材の現有作用応力測定精度の検討を行う。φ300mm×600mmのコンクリート円柱を用いた試験を行う。試験体の端面(上下面)の研磨仕上げの精度や圧縮試験機ヘッドのわずかな偏心によりひずみ差が生じるため、端面に石膏を塗りその上から金属板を接着することで試験体にかかる荷重が全体でほぼ同等となるよう調整する。

試験では試験体を圧縮試験機で一軸載荷を行い、既定の応力10.0N/mm²に達するまで荷重を載荷させる。既定の応力に達した後に荷重を一定に保持し、試験体中央部をコンクリートカッターにより応力作用方向に対して垂直方向にスリット切削し、応力を解放させる。スリット切削は、切削専用の治具を用いて行い、切削幅や深さがほぼ一定となるようにする。

計測条件は、カメラ間距離を340mm、カメラと試験体までの距離を580mmとする。カメラ装置は初期画像と変形画像を複数枚計測し、解析時に50枚計測した画像に加算平均処理を行い結合し、その結合画像を用いて画像解析を行い計測精度を向上させる。計測状況と切削状況を写真6と写真7にそれぞれ示す。



写真6 計測状況



写真7 切削状況

② 現有作用応力測定法の開発

ロゼット解析法を用いた現有作用応力測定法の検討を行う。検討には実橋梁からの撤去したプレテンション PC 桁（試験体）を用いる。試験体は撤去直後に載荷試験を実施し、ひび割れ発生モーメントから現有作用応力の推定を行っている。研究では、載荷試験により推定した現有作用応力と比較を行う。研究では載荷試験の影響が最も少ない箇所を選定して行う。

試験体はアルカリ骨材反応の影響により下フランジの橋軸方向に多数のひび割れが顕著に確認される。試験体には、有効プレストレス量に ASR による膨張圧が作用していることになる。ここでは、ASR の膨張圧を受けたプレテンション PC 桁の応力状態を把握するために、橋軸方向に作用している現有作用応力測定を行う。測定は 6 箇所で行う。計測状況と切削状況を写真 8 と写真 9 にそれぞれ示す。



写真8 計測状況

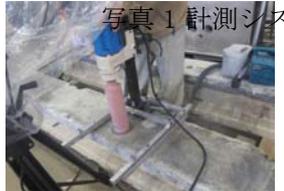


写真9 切削状況

4. 研究成果

(1) カメラタイプ光学的全視野ひずみ計測装置（カメラ装置）の開発

① 計測システムの開発

カメラ装置を写真 10 に示す。カメラ装置は、2 台のモノクロ CCD カメラ、レンズ、ノートパソコン、それらを接続するケーブルなどで構成される。そのため、軽量であり現場への持ち運びが容易である。また、焦点距離の異なるレンズを使用することで計測距離を自由に設定することができるため、構造物に密着して計測する必要がない。2 つカメラを用いてステレオ計測することで 3 次元計測が可能となり、凹凸面や曲面形状の部位の計測が可能となる。計測では同期計測が可能でありシャッタースピードを自由に設定でき、計測画像はパソコンに保存される。

一般にレンズは曲面となっているため、計測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計測する場合は、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 台のカメラでキャ

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の画像を計測することで、画像のひずみ補正やカメラの位置合わせを行うことができる。

カメラ装置はデジタル画像相関法（DICM）5）、6）を利用して変位・ひずみを計測する。DICM は、計測対象物表面の模様ランダム性を基にして計測対象物の変形前後をデジタルカメラで計測し、得られたデジタル画像の輝度値分布から計測対象物表面の変位量と方向を同時に求める方法である。

ひずみは、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基に、変形前後の二点間の長さの変化を求めることで算出できる。DICM の特長として、水平、垂直、斜め方向ひずみの値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、などがあげられる。



写真10 カメラ装置

② 変位・ひずみ計測精度の検討

変位計測結果を図 1、2 に示す。図には回帰直線も合わせて示す。図 1 より回帰直線の傾きが 1 に近くまた、切片の値は 0 に近い値を示した。そして、相関係数 (R^2) は 1 を得た。平均誤差は 0.007mm、最大誤差は 0.012mm および標準偏差は 0.004 mm を得たことから高精度な計測ができた。

図 2 より回帰直線の傾きが 1 に近くまた、切片の値は 0 に近い値を示した。そして、相関係数 (R^2) は 0.9999 を得た。平均誤差は 0.002mm、最大誤差は 0.008mm および標準偏差は 0.004mm を得たことから奥行方向にも高精度な計測ができた。

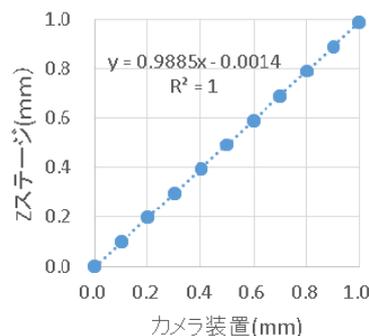


図1 計測結果(重力方向)

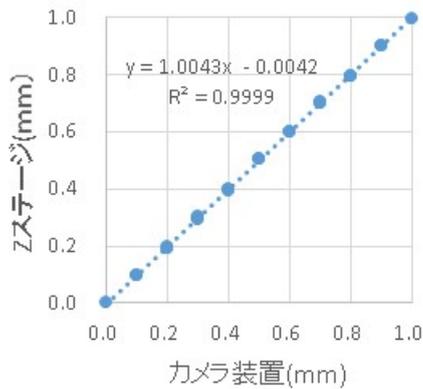


図2 計測結果 (奥行方向)

ひずみ計測結果を図3に示す。図には回帰直線も合わせて示す。図3より回帰直線の傾きが0.86、切片の値は20を示した。そして、相関係数(R^2)は0.9432を得た。平均誤差は 15μ 、最大誤差は 58μ および標準偏差は 24μ を得た。

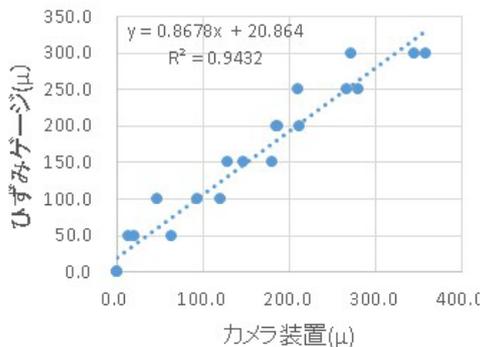


図3 計測結果

③ 計測精度向上

加算処理枚数を行って計測した結果を図4に示す。図には回帰直線も合わせて示す。図より回帰直線の傾きが1に近くまた、切片の値は0に近い値を示した。そして、相関係数(R^2)は0.9894を得た。平均誤差は 14μ 、最大誤差は 26μ および標準偏差は 11μ を得た。以上から加算平均処理を行うことにより、計測精度向上したことが確認された。

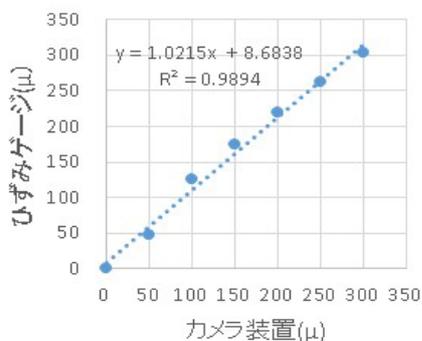


図4 計測結果

(2) 現有作用応力測定法の開発

① 現有作用応力測定精度の確認 1

計測した解放ひずみ分布 (対象点距離変化率分布) を元に部材に作用している応力を逆計算するために、FEM解析を行った。解析モデルは1/4モデルとし、主鉄筋のみモデル化を行った。解析で使用したコンクリートの静弾性係数はコアによる試験結果である $2.42 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を用いた。スリット切削幅および深さは、切削後に計測した値を用い、それぞれ 2.0mm と 30mm とした。

FEM解析により逆解析して求めた試験体の対象点距離変化率分布を図5に示す。また、スリット切削前後の画像からカメラ装置によって解析した対象点距離変化率分布も合わせて示す。解析値と計測値はほぼ一致していることが確認できる。作用応力 10N/mm^2 に対して 9.8N/mm^2 と高精度に推定できた。

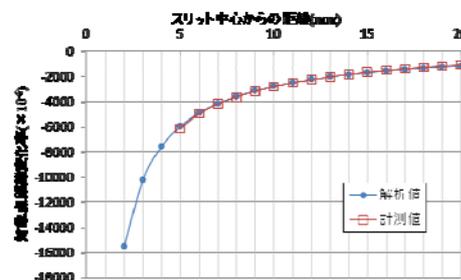


図5 推定結果

② 現有作用応力測定精度の確認 2

計測した解放ひずみ分布 (対象点距離変化率分布) を元に部材に作用している応力を逆計算するために、FEM解析を行った。解析で使用したコンクリートの静弾性係数はコアによる試験結果である $2.63 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を用いた。スリット切削幅および深さは、切削後に計測した値を用い、それぞれ 2.0mm と 29.8mm とした。

FEM解析により逆解析して求めた試験体の対象点距離変化率分布を図6に示す。また、スリット切削前後の画像からカメラ装置によって解析した対象点距離変化率分布も合わせて示す。解析値と計測値はほぼ一致していることが確認できる。作用応力 10N/mm^2 に対して推定値が 8.0N/mm^2 を得た。

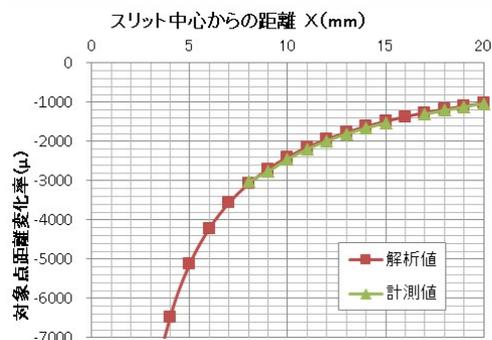


図6 推定結果

① 現有作用応力測定法の開発

計測した解放ひずみ分布 (対象点距離変化

率分布) を元に部材に作用している応力を逆計算するためにFEM解析を行った。解析で使用したコンクリートの静弾性係数はコアによる試験結果である $3.51 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を用いた。開発した手法により推定した現有作用応力推定結果(推定値)を表1に示す。現有作用応力における推定値/試験値は、NO.1:113%、NO.2:91%、NO.3:89%、NO.4:121%、NO.5:88%、NO.6:95%となり、試験値に近い値を示した。NO.1、NO.4は試験値より大きい値を示したのはASRの影響だと考える。計測値は、プレストレスによるひずみの開放とASR膨張ひずみの開放の両者を含んでいる。これらのひずみ量を分離できれば、ASRが生じたPC橋梁の維持管理に有用な情報になると考えるが、実験データ量が少ないため、今後の研究課題としたい。

表1 現有作用力推定結果 (N/mm²)

箇所	推定値	試験値
NO.1	16.5	14.6
NO.2	13.3	
NO.3	13.0	
NO.4	17.7	
NO.5	12.9	
NO.6	13.9	
平均	14.6	

<引用文献>

- 1) 松田芳範、今井勉、石橋忠良：アルカリ骨材反応により劣化損傷を受けたPC桁の補修、セメントコンクリート、No.765、pp.37-42、2010
- 2) 鳥取誠一、吉田幸司、新田耕司：PCグラウト充填不良に対する補修、プレストレス・コンクリート、Vol.45、No.2、pp.84-89、2003
- 3) 木村嘉富、田中良樹：塩害に対するPC道路橋の維持管理と設計へのフィードバック(特集 PC構造物の高耐久化・長寿命化)、プレストレス・コンクリート、Vol.52、No.2、pp.43-48、2010
- 4) 出水享、伊藤幸広、松田浩、出雲真仁：光学的全視野ひずみ計測法を用いた応力解放法によるASRが生じたポストテンションPC合成I桁橋の現有作用応力測定、プレストレスコンクリート技術協会シンポジウム論文集、プレストレスコンクリート技術協会、No.20、pp.473-478、2011
- 5) M. A. Sutton、J. -J. Orteu and H. W. Screier：Image Correlation for

Shape、Motion and Deformation Measurements、Springer、2009

- 6) F.Hild and S.Roux：Digital Image Correlation：from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties—a Review、Strain、42(2)、pp.69-80、2006
- 7) 内野正和、岡本卓慈、肥田研一、伊藤幸広、松田浩：タル画像相関法を用いたマルチロゼット解析法による円孔周辺のひずみ解析手法の検討、実験力学、Vol.9、No.2、pp.96-102、2009

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

- ① Kenichi HIDA、Yukihiro ITO、Katsuya MITA、Akira DEMIZU、Takuji OKAMOTO、Masaki YONEMOTO:The existing stress measurement of the PC bridges by slit stress relief techniques using the optical full-field measurement method、International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2015(NDT-CE2015)、pp.959-968、2015、査読無
- ② 松田浩、出水享、伊藤幸広、肥田研一：既設PC橋の残存プレストレス測定技術の現状～光学的計測法を用いた応力解放法による測定～、プレストレスコンクリート特集:PC構造物の非破壊検査技術、Vol.56、No.6、pp.25-28、2014、査読無
- ③ 出水享、松田浩、伊藤幸広：カメラ装置とコア応力解放法によるプレテンションPC桁の現有作用応力測定：プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、No.23、pp.489-494、2014、査読有

[学会発表](計0件)

[図書](計1件)

- ① 松田浩、出水享、伊藤幸広、内野正和、肥田研一：巨大構造物のヘルスマonitoring～劣化のメカニズムからの監修技術とその実際まで～(3.2.3光学的全視野計測法によるコンクリート構造物の健全性診断装置の開発担当)、(株)エヌ・ティール・エス刊、pp237-243、2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

出水 享 (DEMIZU, Akira)
長崎大学・工学研究科・技術職員
研究者番号：00533308