

カメラタイプ全視野計測装置を用いた現有作用応力計測に関する基礎的研究

長崎大学大学院工学研究科	学生会員	○熊本 和展
長崎大学大学院工学研究科	正会員 博(工)	出水 享
佐賀大学大学院工学系研究科	正会員 博(工)	伊藤 幸広
長崎大学大学院工学研究科	正会員 工博	松田 浩

Abstract : The technique that measures the existing action stress of the PC bridge in high accuracy is requested now. Authors are researching the existing action stress measurement (slit stress release technique) by the full-field optical strain measurement method and the stress relief technique. In this study, the measurement accuracy of the slit stress relief technique was verified with CCD camera type full-field optical strain measurement device. Consequently, the existing action stress was measured in high accuracy.

Key words : PC bridge , DICM , Stress release technique , Presumption of pre-stress

1. 序 論

高度経済成長期に建設されたPC構造物は、約40年以上供用されており劣化が顕在化しているものも多く見られるようになった。PC構造物の劣化診断においては、各部材の残存プレストレス（現有作用応力）を把握することは耐荷性能評価をする上で非常に重要であり、後に補修・補強設計を行う場合には、これを正確に把握することが必要不可欠となる。

現在、PC構造物で多く利用されている現有作用応力計測法は、コンクリートを切削し、その際に生じる解放ひずみをひずみゲージで計測し、応力を推定する応力解放法である。しかし、コンクリートのひずみ計測の困難さから、現有作用応力を精度よく計測できていない¹⁾。その理由として、ひずみゲージから得られるひずみ値は、1点の1方向のデータであり、貼付するひずみゲージの検長は、最大粗骨材寸法の3倍以上と推奨されており、計測値は検長の区間内における平均値であり、局所的なひずみを知るには精度面で不十分である。

そのような中、筆者らは従来のひずみゲージを用いた現有作用応力計測法に比べ精度を向上させるため、ラインセンサタイプ全視野計測装置²⁾（以下スキャナ装置）を用いた光学的全視野計測法によるPC橋梁の現有作用応力計測法（スリット応力解放法）の開発を行っている^{3) 4)}。スキャナ装置は筆者らが開発したものであり、コンクリート表面の変形前後の画像を計測・解析することで計測範囲内の任意の位置・方向のひずみ（解放ひずみ）を高精度に計測できる装置である。しかし、スキャナ装置の利用に際して、いくつかの問題点がある。スキャナに用いたラインセンサの焦点距離が約3mmと浅く、コンクリートに密着させて計測させる必要があるため、凹凸の大きな面や曲面形状の部位への適用は不向きである。そのため、計測前に表面を研磨・平滑にする必要がある。また、形状によっては計測できないこともある。さらに、コンクリートを切削するためにスキャナ装置を一度取り外す必要がある。1回の計測に要する時間は5分程度と長いため、計測中の車両通行によりコンクリートが変形して計測値が乱れることや装置がやや大きく重量が重いため、現場での操作性に劣るなどの問題もある。

そこで、本研究では、スキャナ装置を用いたスリット応力解放法の問題点を解決するためカメラタイプ全視野計測装置（以下カメラ装置）を用いた応力解放法による現有作用応力計測法の基礎的研究を行った。

2. スリット応力解放法³⁾⁴⁾

2.1 概要

スリット応力解放法は、応力作用方向（プレストレス作用方向）に対して直角に深さ約20mm～30mmのスリットをコンクリートカッターで切削し、解放ひずみを発生させる。そして、スリット切削前後のコンクリート表面をカメラ装置で計測し、その画像を用いてデジタル画像相関法（以下DICM）⁵⁾⁶⁾⁷⁾により解析し、スリット周辺の解放ひずみを算出する。計測精度を向上させるために、計測範囲全域において、一直線上の解放ひずみをスリット切削方向に約100測線で平均化し、その平均した解放ひずみ分布を計測値として決定する。

次に FEM 解析により現有作用応力を逆計算する。解析では、試験体とスリット切削幅、長さを再現した解析モデルを構築し、その解析モデルに応力を作用させスリット応力解放のシミュレーションを行う。解析では作用応力を変化させ、計測値に最も近似する解放ひずみ分布を求める。つまり、計測値と近似した作用応力が現有作用応力となる。スリット応力解放法の手順を以下に示す。

- (1) 鉄筋探査を行い、鉄筋を切断しないスリット切削位置、深さ、長さを決めて、カメラ装置の計測範囲を特定する。
- (2) 計測位置をアセトンなどで清掃した後、計測面に白黒のスプレーでランダムパターンを設ける。
- (3) カメラ装置により応力解放前のコンクリート表面の画像を計測する（初期画像）。
- (4) 応力作用方向に対して直角方向にコンクリートカッターを用いて深さ約 20mm～30mm のスリットを切削する。
- (5) 再度、カメラ装置により応力解放後のコンクリート表面の画像を計測する（変形画像）。
- (6) 初期画像と変形画像を用いて DICM により解析し、解放ひずみ分布を得る。
- (7) ノギスやメジャーでスリット切削深さ、長さを計測する。
- (8) FEM解析により現有作用応力を逆計算する。

2.2 カメラ装置

カメラ装置の写真、仕様を写真-1、表-1にそれぞれ示す。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のみで構成される。そのため、簡易なシステムかつ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れば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、凹凸の大きな面や曲面形状の部位の計測が可能となる。コンクリート表面の明るさにもよるが、カメラのシャッター速度を最速で0.02msと設定できるため、計測対象物の変形の影響をほとんど受けない。装置の操作は通常のデジタルカメラとほぼ同様なため、計測に際して特別な技量などは必要としない。

一般に、デジタルカメラの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 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）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。

2.3 デジタル画像相関法 (DICM)⁵⁾⁶⁾⁷⁾

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、計測対象物表面の模様の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などで計測し、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。

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)）。計測対象物に変形を与えると、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、全視野の変形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、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）、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、などが挙げられる。



写真-1 カメラ装置

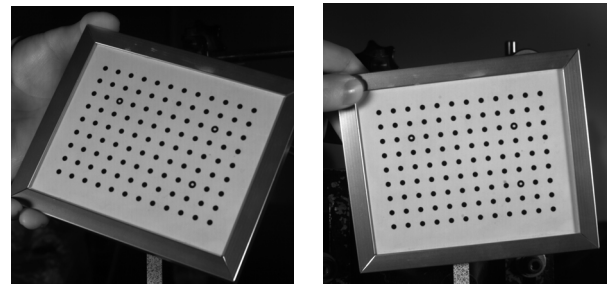


写真-2 キャリブレーション画像

表-1 カメラ装置仕様

CCD カメラ	型番：Point Grey Research 社 GRASS-50S5M/C 解像度：2448×2048pixel 画素サイズ：3.45 × 3.45μm デジタル画像：モノクロ 8 ビット シャッター形式：電子シャッター シャッター速度：0.02ms ~ 10s 最大フレームレート：15fps レンズマウント：Cマウント型 インターフェイス：IEEE-1394b 重量：100g
レンズ	Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 2.8/ 50mm 重量：80g
PC	CPU：Intel(R) Core(TM)i7 CPU Q 820 @1.73GHz (8CPU)s HD：300GB メモリ容量：3.5GB RAM 重量：3.7kg

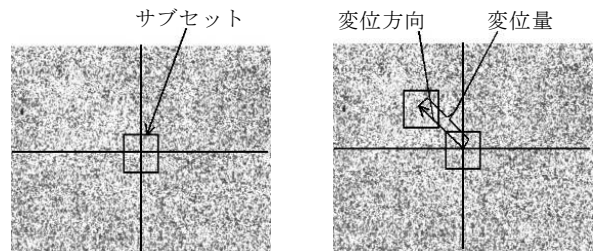


図-1 変形前と変形後のデジタル画像

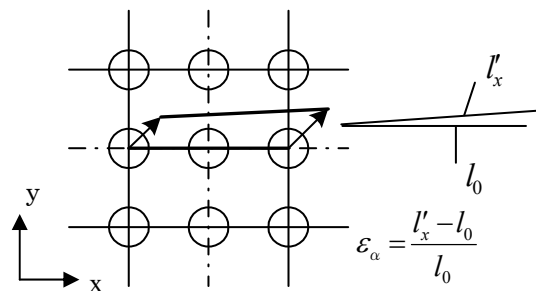


図-2 水平方向ひずみ解析

3. 計測精度の検証

カメラ装置を用いたスリット応力解放法の計測精度の検証を行うため、鉄筋コンクリート（以下 RC）試験体を用いた試験を行った。試験体概要を図-3 に示す。試験体は縦 240mm×横 370mm×高さ 460mm の角柱である。配合は最大粗骨寸法を 20mm、水セメント比 54%、細骨材率 46%とした。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した。

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た。本試験で目標とする載荷応力は、約 1.0, 2.0, 4.0, 10.0N/mm² の 4 種類とした。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 (写真-3) し、応力を解放させた。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た。スリット切削長さは試験体の横幅 370mm に対して中央部の約 320mm とした。そして、2.1 節で述べる手順により作用応力を推定した。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、精度を検証した。

カメラ装置は写真-4 に示すように三脚に固定して行った。スリット切削後の試験体と計測位置の関係を写真-5 に示す。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 の範囲を計測した。この計測条件下の画像解像度は 0.072mm/pixel となる。カメラのシャッタースピードは、20ms とした。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た⁸⁾。

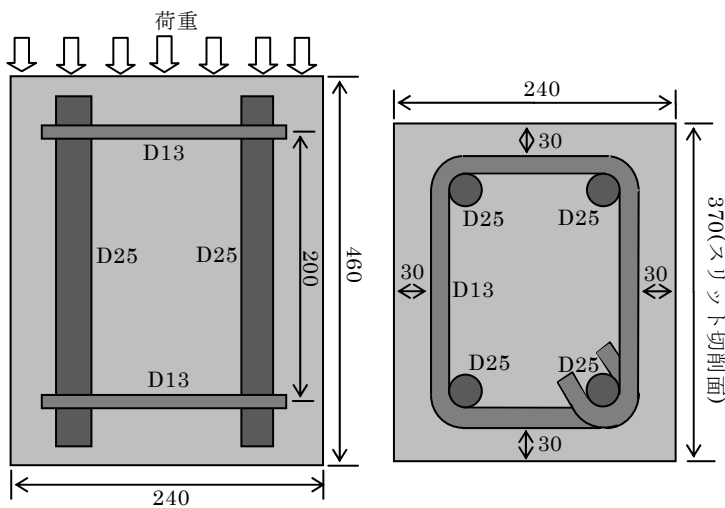


図-3 試験体概要(mm)



写真-3 スリット切削状況

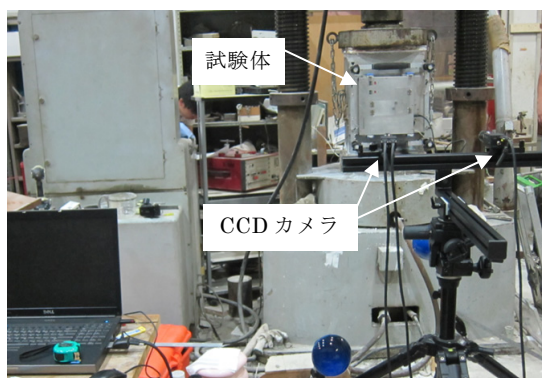


写真-4 計測状況

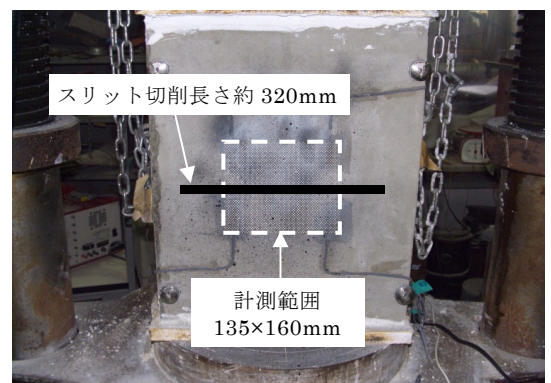


写真-5 計測範囲

4. 現有作用応力計測結果

10N/mm² 載荷時のカメラ装置で計測したスリット切削後のコンクリート表面画像を写真-6 に示す。写真の白黒の斑点は、計測前にスプレーで塗布したランダムパターンを表している。10N/mm² 載荷時のスリット切削前後の画像を DICM で解析した解放ひずみ分布 (以下対象点距離変化率分布) を図-4 に示す。対象点距離変化率とは、写真-6 に示すようにスリットを中心とした 2 点間の距離変化率を意味する。図からスリットの近傍に近づくにつれてひずみが解放されているのが確認できる。

計測した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、汎用解析ソフト MARC を用いて 3次元線形 FEM 解析を行った。解析モデルを図-5、解析条件を表-2 にそれぞれ示す。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、切削後にノギスで計測した値を用い、それぞれ 2.0mm と 30mm とした。

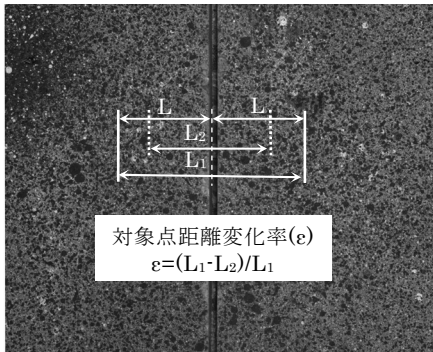


写真-6 スリット切削後

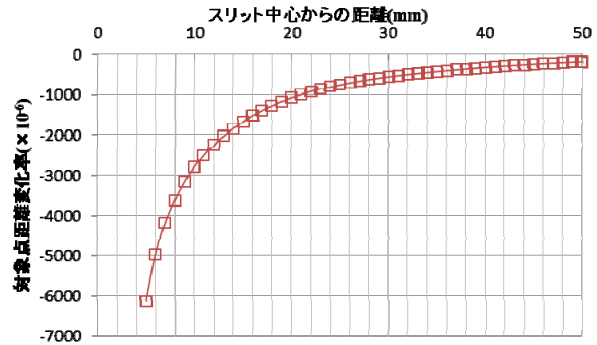


図-4 対象点距離変化率分布

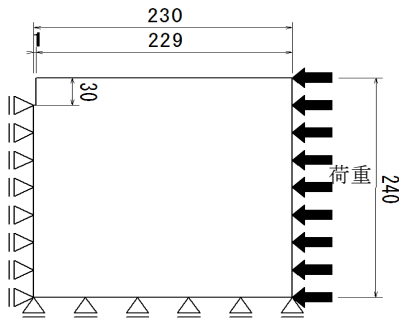
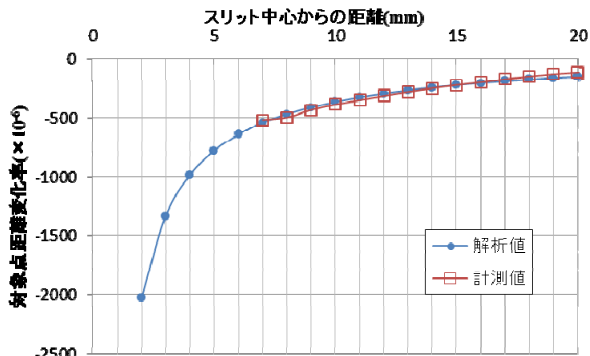


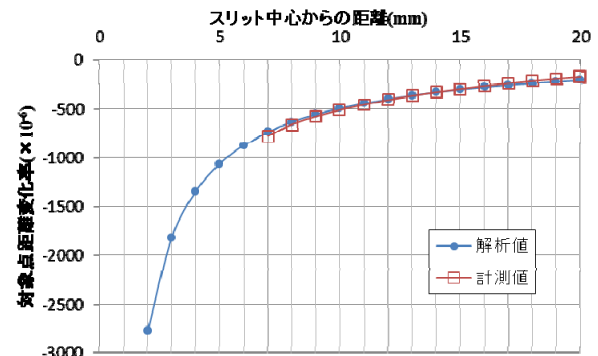
図-5 解析モデル (1/4 モデル)

表-2 解析条件

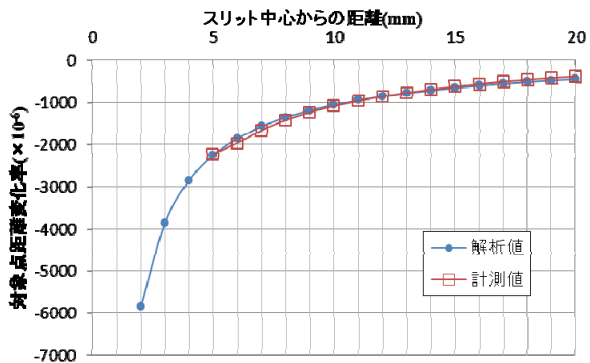
解析タイプ	3次元線形 FEM 解析		
モデル	1/4 モデル		
要素タイプ	8 節点ソリッド要素		
材料定数	コンクリート	静弾性係数 (N/mm ²)	2.42×10^4
		ポアソン比 ν	0.18
	鉄筋	静弾性係数 (N/mm ²)	2.0×10^5
		ポアソン比	0.3



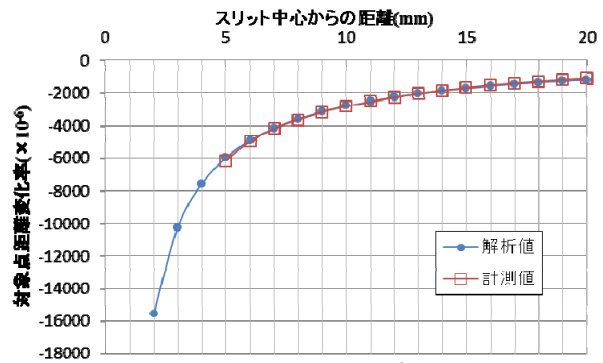
(a) 1.0N/mm²



(b) 2.0N/mm²



(c) 4.0N/mm²



(d) 10.0N/mm²

図-6 対象点距離変化率分布 (0mm~20mm)

表-3 推定結果一覧

目標作用応力(N/mm ²)	1.0	2.0	4.0	10.0
載荷時作用応力(N/mm ²)	1.0	2.0	4.0	9.6
計測値(N/mm ²)	1.3	1.7	3.7	9.8
誤差(N/mm ²)	0.3	0.3	0.3	0.2
誤差(%)	30.0	15.0	7.5	2.1

FEM解析により逆解析して求めた4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DICM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。すべての結果において、解析値と計測値はほぼ一致していることが確認できる。

推定結果一覧を表-3に示す。表より全試験体において高精度に作用応力を推定できることが確認できた。また、計測誤差は全試験体においてほぼ同じ値を示した。計測誤差があるのは、試験体断面の中央部に均一に応力が作用されていなかったことや乾燥収縮などの影響だと考えられる。

5. 結 論

本研究では、カメラ装置による光学的全視野計測法の一つ DICM を用いた応力解放法による現有作用応力計測法に関する基礎的研究を行った。DICM と応力解放法を用いて対象点距離変化率を算出することで、高精度に解放ひずみを計測することができた。また、低応力域においても高精度に計測できることが確認できた。今後は、曲率がある試験体に対する現有作用応力計測を行うとともに、実構造物へ適用していく予定である。

【参考文献】

- 1) 肥田研一,神野人志,永吉竜二,高橋洋一,出水享:有ヒンジPC箱けた橋の応力解放法によるプレストレス推定と中央ヒンジ部の異常たわみ原因の推定,土木構造・材料論文集 第21号,pp.119-128,2005
- 2) 本山慎一郎,伊藤幸広,深町卓也,谷本健太,松田浩,出水享:ラインセンサスキャナタイプ全視野ひずみ計測装置を用いた表面ひずみ計測に関する基礎的研究,日本試験力学学会講演論文集,No.10GS5-5,278-279,2010
- 3) 出水享,肥田研一,伊藤幸広,松田浩:応力解放法によるPC構造物の現有作用応力の推定方法の開発,プレストレストコンクリート技術協会第19回シンポジウム論文集,pp241-246,2010
- 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計測,第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム,pp473-478,2011
- 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) 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
- 8) 出水享,板井達志,藤野義裕,山下務,松田浩:撮影・解析条件がデジタル画像相関法のひずみ計測精度に及ぼす影響,長崎大学工学部研究報告,41(77), pp.45-52, 2011