

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

長崎大学大学院工学研究科	正会員	博(工)	○出水	享
長崎大学大学院工学研究科	正会員	工博	松田	浩
佐賀大学大学院工学系研究科	正会員	博(工)	伊藤	幸広
(株) K&T こんさるたん	正会員		肥田	研一

Abstract : PC structure, damaged by chloride. PC Tendons is corroded by chloride, the cross-section is reduced. As a consequence, decrease of prestressing, load carrying performance is insufficient, or collapse accident occurs. The technique that measures the existing action stress of the PC structure, in high accuracy is requested now. Authors develop the existing action stress technique of the PC structure, to improve accuracy compared with a past technique by the stress release technique that uses full-field optical measurement method. In the thesis, it introduces the technique. And, it explains application to Pre-tension PC girder where alkali aggregate reaction.

Key words : PC structure , Digital image correlation method , Stress release technique , Alkali aggregate reaction(ASR) , Existing action stress

1. 序 論

最近、国内外のPC構造物において塩害、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⁾。ひび割れが生じたPC構造物では、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コアカッターで円孔の溝を切削し、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³⁾。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。その理由として、ひずみゲージから得られる値は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・配線作業やコストが問題となる。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。

そこで筆者らは、従来のコア応力解放法に比べ精度を向上させるために、カメラタイプ光学的全視野計測装置を用いた応力解放法によるPC構造物の現有作用応力測定法の開発を行った。ここでは、測定法とアルカリ骨材反応が生じたプレテンションPC桁への適用について説明する。

2. 現有作用応力測定

2.1 光学的計測法

開発した現有作用応力測定法は、従来のひずみゲージを用いた解放ひずみの計測と比較して精度を向上させるために、光学的計測法の高精度、非接触、全視野計測が可能というメリットに注目し、デジタル画像相関法⁴⁾(以下DICMと呼ぶ)を用いたマルチロゼット解析法を適用した点に特徴がある。

DICMは、デジタル画像の輝度値が一般的に256濃度階調で表現されることを利用したものである。まず、変形前の画像において、任意の点 (1pixel) を中心とした $N \times N$ pixelの任意領域 (サブセット) を指定する (図-1(a))。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でサブセットの位置は移動する (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、計測全域の変位データを得ることができる。

ひずみ (以下距離変化率と呼ぶ) は、上述の方法により求めた変形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2点間の距離変化を求め、計測点の距離変化率とする。

DICMの特長として、水平・垂直・斜め、最大・最小主距離変化率の算出が可能なこと、任意に解析点の距離を変えること、すなわち自由な解析長さの選択が可能となること、などが挙げられる。

しかし、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、一定の誤差が生じることを確認している。計測誤差の要因として様々あるが、イメージセンサにより映像を光から電気信号に変換する際に発生・混在するノイズの影響が大きい⁵⁾。これらのノイズが微小領域や低ひずみ領域の測定において誤差となるため、2点間の距離変化率を利用する手法では、2点間距離を大きくとることで、誤差の影響を小さくすることができる。そこで、筆者らは同心円状に解析点を配置し、円孔の中心点から点对称となる2点間の距離変化率を複数求めるマルチロゼット解析法の開発を行っている⁵⁾。以下に解析手順を示す。

- (1) 図-2に示すように円孔の中心点を中心とし、同心円状に解析点を配置する。図-2の場合は64点 (64分割) 配置している。
- (2) 点对称になる2点の解析点の移動量をDICMで求め、2点間の距離変化率を計算する。
- (3) (2)で求めた距離変化率の内、 0° 、 45° 、 90° の角度に位置する計算結果 (図-2に示す1と33、9と41、17と49の組み合わせ) を用いてロゼット解析を行い、この組み合わせの時の最大・最小主距離変化率と方向を求める。
- (4) その後、(3)の組み合わせを変えてロゼット解析を行う。その組み合わせの総数は32通りあり、その平均値を求め、この同心円における最大・最小主距離変化率および方向とする。なお、同心円の径を変えることで円孔近傍から内外側に向かったの分布評価が可能となる。

2.2 測定順序

開発した手法は、コンクリート部材に直径約75mm、深さ約20mm~30mm、幅約2mmの円孔をコアカッターで切削し、解放ひずみを発生させる。そして、カメラタイプ光学的全視野計測装置 (以下カメラ装置と呼ぶ) (写真-1)により計測した画像をDICMを用いたマルチロゼット解析法により円孔内部の最大主距離変化率分布 (解放ひずみ分布) を算出する。さらに、対象部材をFEM解析による逆解析

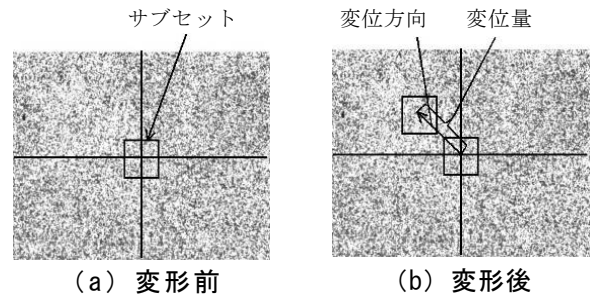


図-1 デジタル画像

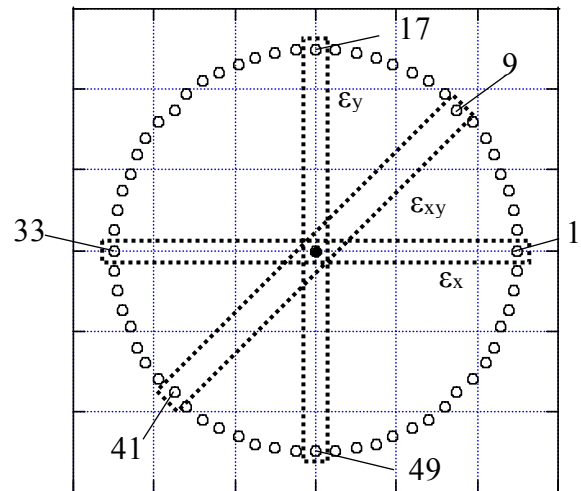


図-2 解析点

を行い、計測した最大主距離変化率分布を元にコンクリート部材に作用している応力を逆計算する。作業手順は、以下のとおりである。

- (1) 鉄筋探査により計測位置と切削深さを決定する。
- (2) 計測位置を洗浄液（アセトン等）にて清掃する。
- (3) 測定表面に白と黒のスプレーを用いて DICM の解析に必要なランダムパターンを塗布する。
- (4) カメラ装置により、応力解放前のコンクリート表面の計測を行う（初期画像）。
- (5) 乾式のコンクリートカッターでコア切削する。
- (6) コンクリート表面の削孔粉を刷毛又はブロアーで除去し、カメラ装置を用いて応力解放後のコンクリート表面の計測を行う（変形画像）。
- (7) 初期画像と変形画像により DICM を用いたマルチロゼット解析により、最大主距離変化率分布を（解放ひずみ分布）算出する。
- (8) FEM解析により逆解析を行い現有作用応力を推定する。

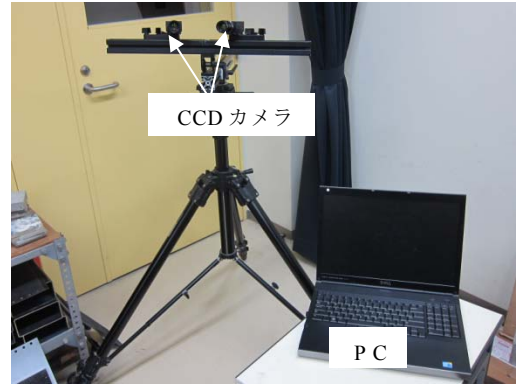


写真-1 カメラ装置

3. ASRが生じたプレテンションPC桁の現有作用応力測定

3.1 概要

開発した測定法の適用性の検討を実橋梁からの撤去したプレテンションPC桁（以下試験体と呼ぶ）を用いて行った。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った。試験体は、載荷試験直後に約2.4mに4分割（写真-2）している。そして、作業性を考慮して下フランジを上に戻り、その上面で測定を行った。反転前の試験体の断面図を図-3に示す。

試験体はアルカリ骨材反応の影響により下フランジに橋軸方向に多数のひび割れが顕著に確認される（写真-3）。なお、写真のひび割れは識別しやすいようにマジックでトレースしている。計測した全箇所において写真と同様のひび割れが確認された。試験体には、有効プレストレス量に加えてASRによる膨張圧が圧縮力として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った。測定箇所図と箇所名を図-4に示す。測定は載荷試験によるひび割れおよび切断の影響がない箇所を選定して行った。測定は試験体Aで4箇所、試験体Bで2箇所、合計6箇所で行った。



写真-2 プレテンション PC 桁

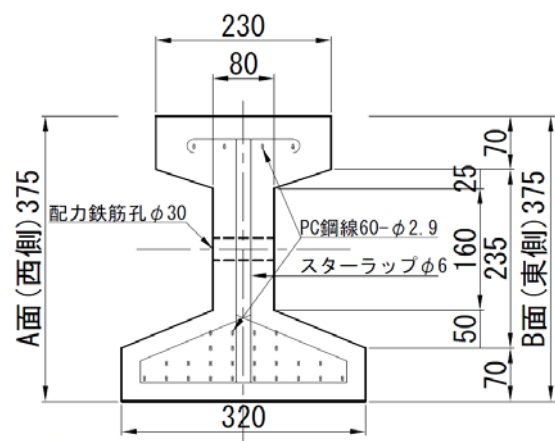


図-3 断面図

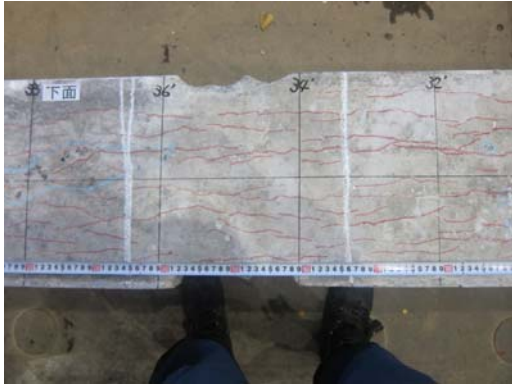


写真-3 ひび割れの状況

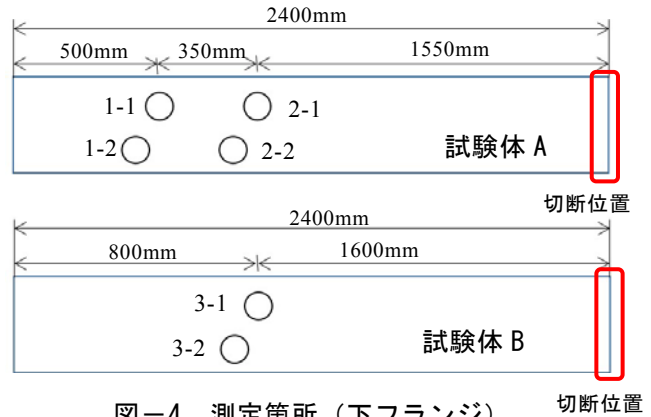


図-4 測定箇所 (下フランジ) 切断位置

3.2 現有作用応力測定

コンクリートカッターによる切削状況とカメラ装置による計測状況を写真-4と写真-5にそれぞれ示す。コアカッターは、専用の治具を用いて桁に固定して削孔を行った。カメラは三脚に固定して下向きに計測を行った。計測にはPoint Grey Research社GRASS-50S5モノクロCCDカメラ (約500万画素) を用いた。計測は2箇所分(例えば1-1,1-2)が撮影されるように画角を調整した。カメラと計測面までの距離は約760mmであり、この時の画像解像度は約0.14mm/pixelとなる。カメラ装置で計測したコア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、DICM解析のため、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。表-1にコア削孔深さ一覧表を示す。削孔深さは約25mm~30mmとなった。

計測した最大主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。図-5に解析モデルを示す。現有作用応力を算出する際に使用した静弾性係数は、材料試験値 (35,120 N/mm²) とした。FEM解析により逆解析して求めた最大主距離変化率分布を図-6に示す。また、コア切削前後の画像からマルチゾット解析によって算出した距離変化率分布も合わせて示す。現有作用応力推定結果において、コアの中心から12mm~28mm間で解析値と計測値はほぼ一致している。計測値は、ほぼ一定の値を示していることからひび割れの影響による乱れはないものとする。

载荷試験により推定した現有作用応力推定結果(試験値)、開発した手法により推定した現有作用応力推定結果(解析値)を表-2, 3にそれぞれ示す。現有作用応力における解析値/試験値は、1-1 : 113%, 1-2 : 91%, 2-1 : 89%, 2-2 : 121%, 3-1 : 88%, 3-2 : 95%となった。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。これらを分離できれば、ASRが生じたPC構造物の維持管理に有用な情報になると考えるが、実験データが少ないため、今後の研究課題としたい。



写真-4 削孔状況



写真-5 計測状況

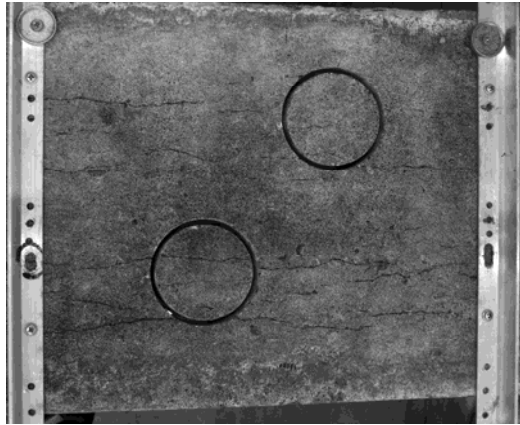


写真-6 変形画像 (削孔後)

表-1 コア削孔深さ

箇所	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
深さ (mm)	25	26	28	25	30	30

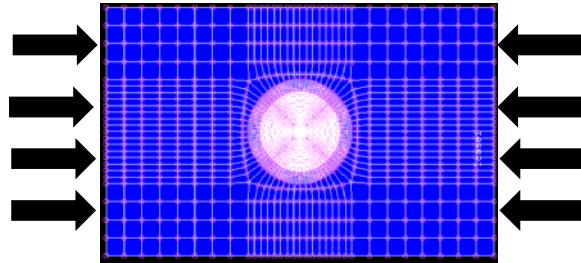
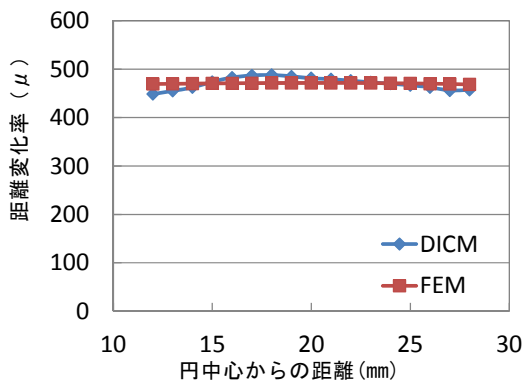
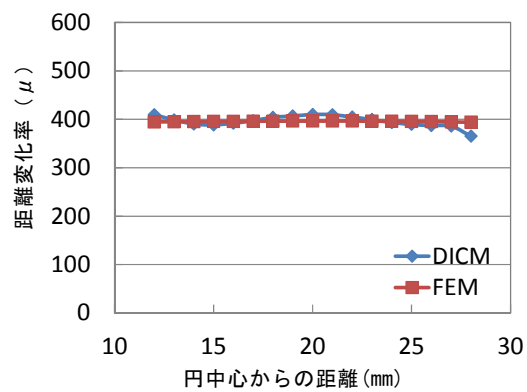


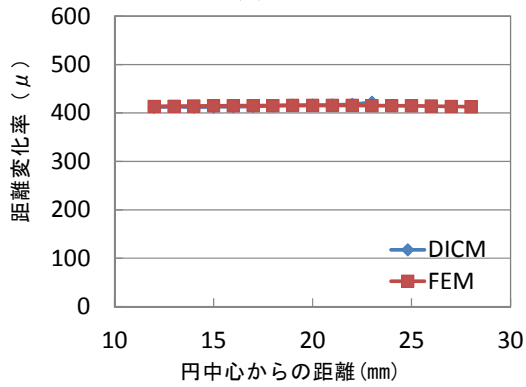
図-5 解析モデル



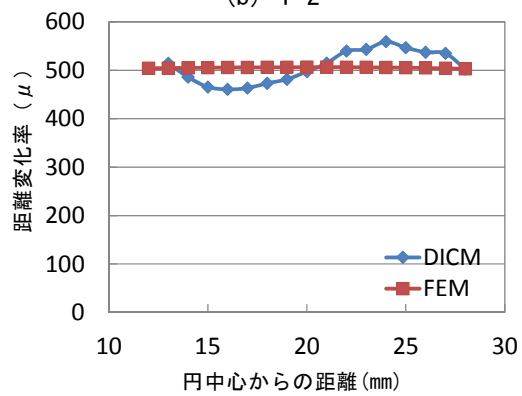
(a) 1-1



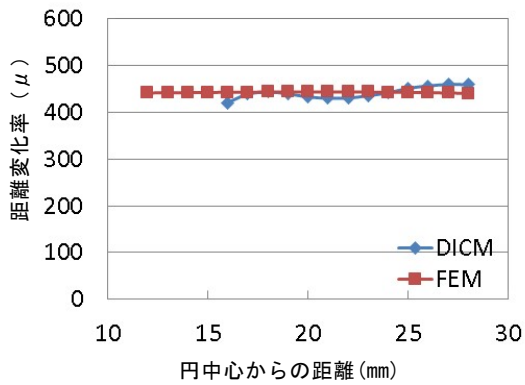
(b) 1-2



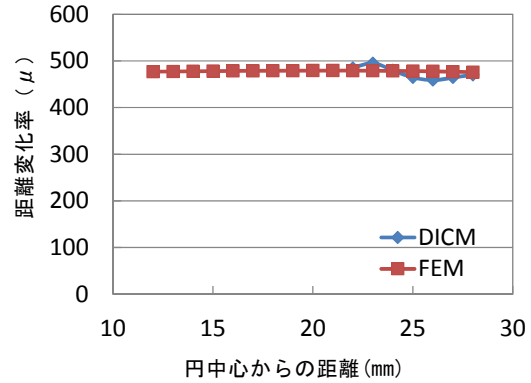
(c) 2-1



(d) 2-2



(e) 3-1



(f) 3-2

図-6 最大主距離変化率分布

表-2 応力推定 (載荷試験)

	単位	材料試験
コンクリート圧縮強度	N/mm ²	74
コンクリート弾性係数 E _c	N/mm ²	35,120
PC 鋼材弾性係数 E _p	N/mm ²	204,605
弾性係数比(E _p /E _c)		5.83
ひび割れ発生モーメント	kNm	96.3
ひび割れ発生ひずみ	μ	415
現有作用応力	N/mm ²	14.6

表-3 応力推定 (開発手法)

箇所	現有作用応力 N/mm ²
1-1	16.5
1-2	13.3
2-1	13.0
2-2	17.7
3-1	12.9
3-2	13.9
平均	14.6

4. 結論

本研究では、カメラ装置を用いた応力解放法による現有作用応力測定法の開発を行うとともにASRが生じたプレテンションPC桁への適用を行った。そして、以下の所見を得た。

- ・ DICMを用いたマルチロゼット解析法により最大主距離変化率分布（解放ひずみ分布）を算出することができた。
- ・ 最大主距離変化率分布（解放ひずみ分布）からFEMにより逆解析することで現有作用応力を推定することができた。
- ・ 開発した手法により推定した現有作用応力は、載荷試験により推定した値と比較して88%～122%となった。

謝 辞

本試験は、(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)メンテナンス技術交流会活動の一環で実施しました。また、当時、CAESARの上席研究員の木村嘉富様、交流研究員の青柳聖様、長崎大学大学院生の熊本和展君に協力して頂きました。ここに記して、謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 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), プレストレスト・コンクリート, Vol.52, No.2, pp.43-48, 2010.
- 2) Jwoodward, R., and F.W., Willlams : Collapse of Ynys-y-Gwas bridge, West Glamorgan STRUCTURAL ENGINEERING GROUP Proc. Instb Civ .Engrs, Part 1, pp.635-669, 1998.
- 3) 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
- 4) M.A.Sutton,J.-J.Orteu and H.W.Screier : Image Correlation for Shape,Motion and Deformation Measurements,Springer,2009
- 5) 出水享, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅俊, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋: 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, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol. 68, No.2, pp.683-690, 2012