

既存 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 —

松田 浩*1・出水 享*2・伊藤 幸広*3・肥田 研一*4

プレストレストコンクリート橋において、プレストレスの管理は維持管理のためには欠かせない項目である。プレストレスの減少は耐荷力に大きく影響し、安全性の低下に繋がる。PC 橋を補修・補強設計を通じて適切に維持管理するためには、プレストレス量を正確に把握することが必要不可欠となる。本稿では、光学的計測法であるデジタル画像相関法を用いた応力解放法によるプレストレス量の測定法について紹介する。

キーワード：PC 橋、プレストレス、応力解放法、光学的全視野計測装置、デジタル画像相関法

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC）構造物は高強度で密実なコンクリートを使用するので、耐久性が高い構造である。しかし、PC 構造物においても種々の変状が生じている。たとえば、ポストテンション PC 橋において、グラウト充填不良¹⁾や塩害²⁾等が原因で PC 鋼材が腐食・破断し、それに起因する異常ひび割れや落橋事故³⁾も報告されている。さらに、想定外のクリープ・乾燥収縮によりプレストレスが減少し、異常たわみ⁴⁾が発生することもある。

道路橋の約 4 割に使用されている PC 橋⁵⁾において、プレストレス量の管理は、維持管理のためには欠かせない項目である。PC 橋においてプレストレス（現有作用応力）の減少は、直接耐荷力に大きく影響し、安全性の低下に繋がる。したがって、PC 橋を補修・補強設計を通じて適切に維持管理していくためには、プレストレス量を正確に把握することが必要不可欠となる。

一方、これまでに建設された PC 橋の中には、設計図書が保存されておらず、設計時の応力状態が不明な橋梁も数多く存在する。さらに、設計図書が保存されていたとしても、設計で考慮された応力状態にない PC 橋も多く存在する。

既設 PC 橋の点検において、プレストレス量の管理は重

要であるにもかかわらず、施工初期時において PC 鋼材緊張力管理が実施されているのみであり、定期的かつ定量的なプレストレス量の管理は行われていないのが現状である。

既存 PC 橋のプレストレスト量の把握に関しては、応力解放法の原理を用いた手法が提案されている。本稿では、ひずみ計測精度の向上を目的として開発したスキャナ装置を用いて、応力解放法による現有作用応力計測技術、プレテンション PC 桁を用いた精度検証実験ならびに実橋梁への適用事例について紹介する。

2. 応力解放法

既設コンクリート構造物の応力計測には、主に応力解放法を応用した計測法が多く用いられている。応力解放法は、元来、鉱山業界で岩盤などに作用する応力を計測する方法として開発されたものである。応力解放法の原理は、応力を受けている岩盤にスリットやオーバーコアなどで応力を解放し、解放されたひずみや変形を計測することで応力解放前の初期応力を算出する方法である。代表的な計測方法をあげると、孔径変化法⁶⁾、孔壁ひずみ法⁷⁾、円錐孔底法⁸⁾などがある。この応用例として、コンクリート構造物においては、スロットストレス法⁹⁾、鉄筋切断法¹⁰⁾、コア応力解放¹¹⁾が適用されている。その中でもコア応力解放法^{12, 13)}は、もっとも多く研究・利用されている測定



*1 Hiroshi MATSUDA

長崎大学大学院
工学研究科教授



*2 Akira DEMIZU

長崎大学大学院
工学研究科 技術職員



*3 Yukihiko ITO

佐賀大学大学院
工学系研究科 教授



*4 Kenichi HIDA

(株) K&T こんさるたん
代表取締役社長

法である。

3. スリット応力解放法

開発した測定法（以下、スリット応力解放法）は、①ひずみ測定精度向上のためにスキャナタイプ全視野ひずみ計測装置（以下、スキャナ装置）を用いたこと、②合理的な切削方法、③応力解放ひずみの新しい評価法、④現有作用応力を測定するための解析手法、に特徴がある。

3.1 スキャナ装置¹⁴⁾

スキャナ装置の外観を写真 - 1 に示す。スキャナ装置の画像を讀取する方法は、パソコンに接続したスキャナ装置を計測対象物の表面に密着させ、ラインセンサを平行に走査し、二次元画像を取得するという簡易な方法である。スキャナ装置によると取差のない二次元画像を取得できる。また、ラインセンサの横に光源を配置することにより、屋外においても外乱光の影響を受けることなく計測できる。さらに、計測対象物に取付けた固定具にスキャナ装置を固定するためブレのない画像を得ることができる。スキャナ装置の4隅には焦点調整ネジや焦点距離（計測距離）を確認するためのマイクロメーターを設置し、焦点距離をつねに一定に保つことができ、再現性の高い画像が得られる。

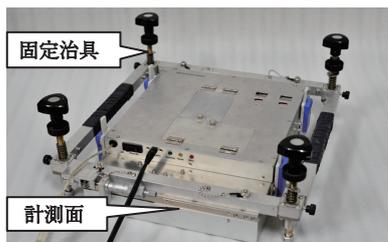


写真 - 1 スキャナ装置

スキャナ装置の讀取り解像度は1200 dpi であるため、画像内の1 pixel の一辺サイズは約21.1 μm となる。また、讀取範囲(210 × 210 mm)を1200 dpi で計測すると、約1億 pixel で構成される高解像度の画像を取得できる。応力解放ひずみの計測は、応力解放前後のコンクリート表面画像を用いてスキャナで計測し、デジタル画像相関法(Digital Image Correlation Method: 以後 DICM)を用いて算出する。

3.2 デジタル画像相関法 (DICM)¹⁵⁾

DICM の解析原理は、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(1 pixel)を中心としたN × 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の方向と大きさを算出する。この処理をすべての小領域で繰り返すことによって、計測全域の変位データを得ることができる。

ひずみは求めた変位データを利用して算出する。求めた

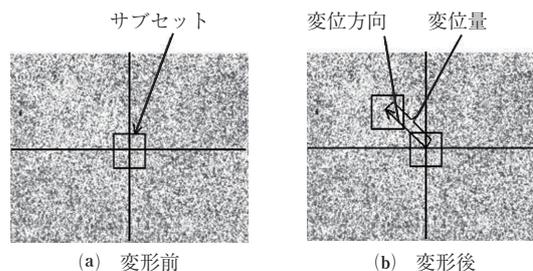


図 - 1 変形前と変形後のデジタル画像

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。水平ひずみ、垂直ひずみ、斜めひずみ、最大主ひずみ、最小主ひずみを求めることが可能で、また、任意にゲージ長を指定して解析することができる。

3.3 現有作用応力の算定法

スリット応力解放法では、まず、応力の作用方向に対して直角に深さ約20 ~ 30 mm のスリットをコンクリートカッターで切削する。スリット切削により、解放ひずみを均一に発生させることができ、ひずみの評価がしやすくなる。次に、スキャナ装置を用いてスリットを中心とした2点間の距離の変化率(以下、2点間距離変化率、図 - 2)を計測し、これを解放ひずみと称する。本法により、スリット近傍を含め計測面全域のひずみを計測することができる。

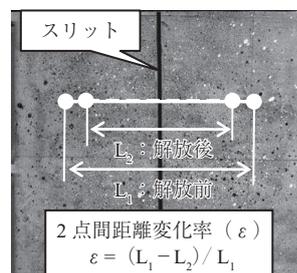


図 - 2 2点間距離変化率

つづいて、測定対象物のFEMモデルを作成し、作用応力を変化させて解析し、計測値に最も一致する2点間距離変化率を現有作用応力として推定する。

スリット応力解放法の計測手順を以下に示す。

- ① 鉄筋探査により計測位置と切削深さを決定する。
- ② ひずみ計測位置を洗浄液(アセトン等)にて洗浄する。
- ③ 測定面にスプレーを用いてDICMの解析時に必要なランダムパターンを設ける。
- ④ スキャナ装置により、切削前(応力解放前)のコンクリート表面の計測を行う(初期画像、写真 - 2(a))。
- ⑤ 桁軸直角方向にコンクリートカッターで幅2 mm、深さ約20 ~ 30 mm のスリットを切削する(写真 - 2(b))。
- ⑥ スキャナ装置により切削後(応力解放後)のコンクリート表面の計測を行う(変形画像、写真 - 2(a))。
- ⑦ 初期画像と変形画像によりDICMで解析し、解放ひずみを算定する。



(a) スキャナ装置設置 (b) スリット切削

写真 - 2 計測状況

⑧ 測定対象物のFEMモデルを作成し、FEM解析により逆解析を行い、現有作用応力を推定する。

4. プレテンションPC桁を用いた計測精度の検証

4.1 実験概要

スリット応力解放法の精度を確認するために、プレストレス導入量が既知のプレテンションPC桁（JIS桁）を用いて現有作用応力推定の実証実験を行った。実験では、作業性を考慮してプレテンションPC桁の下縁側を上向きに反転し、5点支持で設置し、その上面側で試験を行った。図-3にプレテンションPC桁の概要図を示す。なお、実験では、載荷試験後のプレテンションPC桁を使用したため、スリット応力解放法は、ひび割れの影響を受けない箇所を選定して行った。

4.2 プレストレス量の推定

スキャナ装置での測定結果およびFEMにより逆解析し算出した2点間距離変化率分布を図-4に示す。図よりスリット近傍でひずみが解放されているのが確認できる。FEMによる逆解析は、測定対象物のFEMモデルを作成し、作用応力を変化させて解析し、測定値にもっとも一致する2点間距離変化率を作用応力とした。なお、解析では、コンクリートの静弾性係数は設計値 ($3.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$) を、スリット切削幅と深さはノギスによる計測値を用いた。

スキャナ装置による計測値とFEMにおいて 8.12 N/mm^2 作用させた逆解析値はほぼ一致する。PC桁のプレストレスの設計値は 9.03 N/mm^2 であり、推定値と若干の差異があるが精度よく推定できている。

5. 実PC橋への適用

5.1 調査概要

写真-3に示す調査橋梁の構造諸元を表-1に示す。

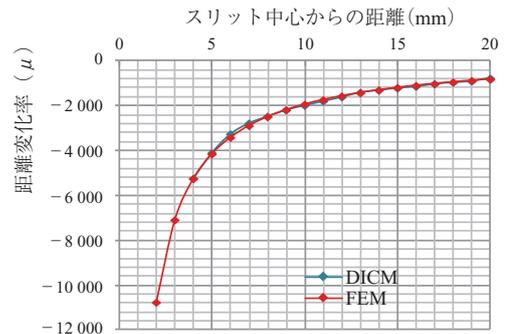


図 - 4 プレストレス量の計測及び解析結果



写真 - 3 対象橋梁

表 - 1 橋梁諸元

適用示方書	昭和39年RC道路橋示方書 昭和43年PC道路橋示方書
設計荷重	TL-20
橋長	22.200 m
有効幅員	10.750 m
斜角	$81^\circ 20' 12'' \sim 80^\circ 39' 37''$
設計基準強度	主桁 $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ 床版、横桁 $\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$
鋼材	PC鋼材 12- $\Phi 7$ 鉄筋 D295 $\sigma_{sa} = 140 \text{ N/mm}^2$

調査橋梁は昭和47年に建設され、構造形式はポストテンションPC単純合成I桁橋（5主桁）である。本橋は平成12年の点検で主桁に変状が確認されたため、現在、定期的に追跡調査が実施されている。変状は主桁の下フランジおよびウェブに橋軸方向ひび割れが確認されている。雨水の影響を受ける外桁にひび割れが顕著に確認され、ひび割れ幅や長さが大きいことからひび割れの発生原因はアルカリシリカ反応（以下、ASR）と推察される。

本調査では、ASRにより膨張圧を受けている主桁の応

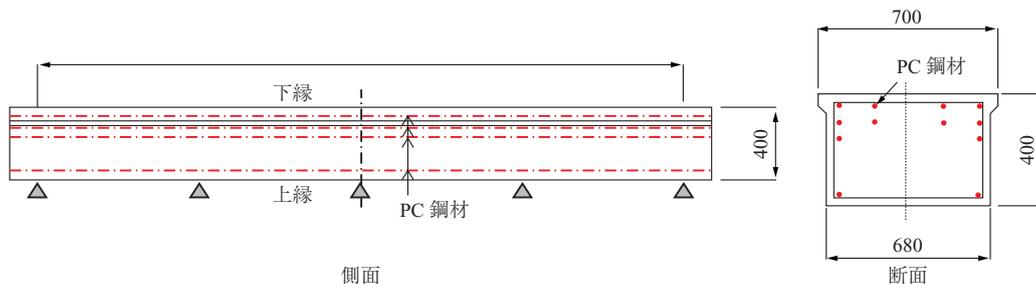


図 - 3 プレテンションPC桁 (mm)

力状態を把握するために、G4、G5主桁の橋軸方向の現有作用応力計測を行った。計測箇所は、スパン中央からA2方向に約2.3m地点の下フランジである。

5.2 調査結果

スリット切削前後の画像からDICMによって解析した2点間距離変化率分布を図-5に示す。計測した2点間距離変化率分布を基に部材に作用している応力を求めるために、2次元線形FEM解析を行った。現有作用応力を算出する際には、設計値の静弾性係数(3.2 × 10⁴ N/mm²)を用いた。逆解析して求めたG4主桁とG5主桁の橋軸方向の2点間距離変化率分布も図-5に併せて示す。

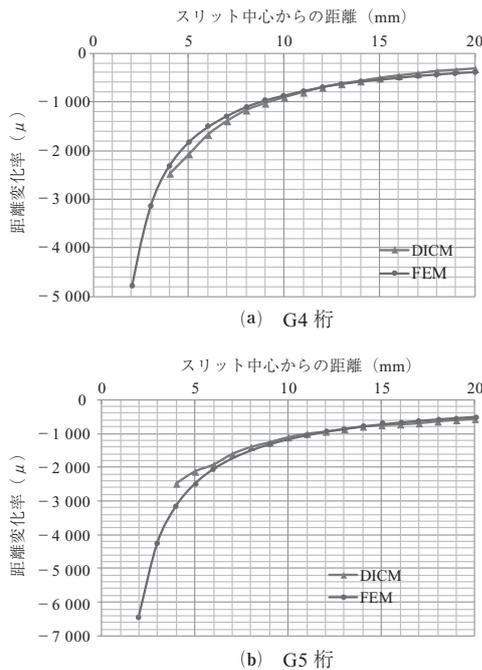


図-5 プレストレス量の計測及び解析結果

スリットから4~8mm間で計測値が乱れ、8~100mm間では、解析値と計測値は一致している。スリット近傍の計測値の乱れはASRの膨張力の影響を受けていると考えられる。計測値はプレストレスによるひずみの解放とASRの膨張応力の解放ひずみの両者を含んでいる。これらのひずみ量を分離できれば、残存膨張量などの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られるが、データ量が少ないため、これに関しては今後の研究課題である。

表-2にG4、G5主桁の橋軸方向の現有作用応力計測結果と結果から算出した有効プレストレス量を示す。また、有効プレストレス量の設計値も合わせて示す。表より有効プレストレス量における計測値/設計値は、G4主桁：95.4%、G5主桁：104.4%となり、有効プレストレス量の大きな減少は確認されなかった。また、活荷重時の応力状態から耐荷力を十分保有していることが確認された。

6. おわりに

非破壊・微破壊検査を用いたプレストレス測定技術とし

表-2 有効プレストレス量 (N/mm²)

	G4桁	G5桁
① 現有作用応力 (計測値)	3.49	4.71
② 死荷重合計	-9.45	-9.45
③ 有効プレストレス計測値 (①-②)	12.94	14.16
④ 有効プレストレス設計値	13.56	13.56
⑤ 計測値/設計値 ③/④	95.4 %	104.4 %
⑥ 活荷重 (設計値)	-4.47	-4.47
⑦ 活荷重時 (計測値) ①+⑥	-0.98	0.24

+圧縮応力、-引張応力

て、デジタル画像相関法を用いたひずみ計測とスリット切断による応力解放法による測定技術を紹介した。PC橋の残存プレストレス量の経時変化データは、PC橋の維持管理において必要不可欠事項である。そのためにも本計測法の簡便化、省時間、省力化、低コスト化を進めていきたい。

参考文献

- 鳥取誠一ほか：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
- 木村嘉富ほか：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，プレストレス・コンクリート，Vol.52，No.2，pp.43-48，2010
- Jwoodward, R., et-al.: Collapse of Ynys-y-Gwas bridge, West Glamorgan Structural Engineering Groupe Proc. Instb Civ. Engrs, Part 1, pp.635-669, 1998
- 吉田健太郎ほか：大仁高架2号橋のクリープ・乾燥収縮計測に基づいた免震支承の後ひずみ調整計画，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.465-470，2002
- 道路統計年報2013，国土交通省，2013
- 岡林信行ほか：地下空洞掘削における地山初期応力について直交異方性岩盤における初期応力計測法および解析方法，土質工学会論文報告集，Vol.18，No.1，1978
- Int. Soc. for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods: Suggested method for in-situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO), Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol.36, pp.307-322, 1999
- 小林昭一ほか：改良円錐孔底法による地山応力計測，材料，Vol.52，No.5，pp.500-504，2003
- 浅井 洋ほか：フラットジャッキを併用した応力解放法によるコンクリート部材の現有作用応力計測，コンクリート工学，Vol.42，No.4，pp.26-32，2004
- 横山和昭ほか：鉄筋切断法による実PC橋の残存プレストレス計測に関する検討，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.13，pp.501-504，2004
- 種 健，鈴木拓雄，深沢且典，清水秀樹：コンクリート構造物の現有応力の連続的計測法，土木学会論文集，No.735，VI-59，pp.197-202，2003
- 加藤暢彦：コンクリート構造物の現存応力の計測法に関する研究，構造工学論文集，42A，pp.333-340，1996
- 二井谷教治ほか：コンクリート部材の有効応力の計測手法に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.20，No.2，pp.27-37，2009
- 伊藤幸広ほか：技術開発最前線 全視野ひずみ計測装置による施工・維持管理，土木技術，Vol.66，No.4，pp.48-53，2011
- 松田 浩ほか：光学的全視野計測技術による建設構造物の劣化・変状メカニズムの解明と診断法の開発，平成18年度科学研究費補助金基盤研究(B)，2008，http://hdl.handle.net/10069/14903

【2014年9月2日受付】