

光学的全視野ひずみ計測法を用いた応力解放法による プレテンションPC桁の現有作用応力測定

出水享*, 松田浩**, 伊藤幸広***,

内野正和****, 肥田研一*****, 岡本卓慈*****

A Measurement of Existing Action Stress of Pre-tension Concrete Beam by Full-field Optical Measurement Method and Stress Release Technique

Akira DEMIZU, Hiroshi MATSUDA, Yukihiro ITO,

Masakazu UCHINO, Kenichi HIDA and Takuji OKAMOTO

A decrease of pre-stress is greatly influenced the load carrying capacity immediately and leads to the decrease in safety in the pre-stressed concrete (PC) structure. It is necessary to know existing action stress accurately to maintain the PC structure. In this study, new existing action stress measurement technique was developed by the digital image correlation method and stress relief technique and the proving test of a developed method was done by using pre-tension concrete beam. Results, existing action stress was able to be measured in high accuracy.

Key words: Pre-stressed concrete, Existing action stress, Digital image correlation method, Stress release technique

1. 緒論

コンクリート構造物は、耐久性が高く永久構造物と信じられてきた。しかし、近年、一部のコンクリート構造物において、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などの劣化により、ひび割れ、鉄筋腐食などの変状が顕著に生じたコンクリート構造物がある。

ポストテンション方式のプレストレスコンクリート橋(以下PC橋と呼ぶ)では、グラウトの充填不良箇所に水素脆性破壊や、塩害などが原因で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の事例¹⁾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、設計値以上の異常たわみが発生することもある²⁾。

道路橋の約4割に使用されているPC橋³⁾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橋梁においてプレストレスの減少は、直接耐荷力に大きく影響し、安全性の低下に繋がるため、PC橋梁

を適切に維持するためには、現有作用応力を正確に把握する必要がある。現状ではプレストレス量の定期的な管理は行われておらず、施工初期時のPC鋼材の緊張力管理が実施されているのみである。

現在、PC橋梁の現有作用応力を測定する方法として、フランスで開発されたスロットストレス法⁴⁾や3軸のひずみゲージを貼付しコアの応力解放による推定法⁵⁾などが用いられている。また、最近の研究では、弾性波に着目して非破壊検査技術を用いた現有作用応力計測が行われているが、精度よく実施できるものとはなっていない⁶⁾。このように、PC橋梁の現有作用応力の計測技術は、実用化されておらず、正確に推定できる技術が求められている。

本研究では、従来の現有作用応力推定法の精度向上を目的として、光学的全視野ひずみ計測法の一つであるデジタル画像相関法と現有作用応力測定法の一つである応力解放法を用いて、既設PC橋梁の現有作用応力測定法の開発を行った。そして、開発した測定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桁を用いて現有作用応力推定の実証実験を行った。

2. 既存の現有作用応力測定法

2.1 応力解放法

応力解放法とは、鉱山業界で岩盤等に作用する応力を測定する方法として開発されたものであり、現在では、この方法は、金属やプラスチック製造工程で、残留応力・ひずみ測定に用いられている。応力解放法の原理は単純である。測定対象物にスリット切削やオーバーコアリングなど行い部分的に応力を解放し、解放されたひずみや変位を測定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

原稿受付 2011年5月18日

* 学生会員 長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

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

*** 佐賀大学大学院工学系研究科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄1)

**** 正会員 (財)福岡県産業・科学技術振興財団 (〒278-8510 福岡県福岡市中央区天神1-1-1)

***** (株)K&T こんさるたん (〒277-0005 千葉県柏市柏3-8-17)

***** (株)計測リサーチコンサルタント (〒278-8510 広島県東広島市東区1-665-1)

表的な測定方法を挙げると、孔径変化法、孔壁ひずみ法、円錐孔底法などがあり、コンクリート構造物においては、スロットストレス法、コア応力解放法等が適用されている。

2. 2 スロットストレス法⁴⁾

スロットストレス法とは、フランスで開発されたもので、コンクリート表面にフラットジャッキ挿入用の細長い溝（スロット）をコンクリート専用のチェンソーで削孔し（Fig.1(a),(c)）、応力が解放されたときのコンクリートの表面変位を測定する。そして、削孔穴にフラットジャッキを挿入し、加圧するし（Fig.1(b),(d)）ことにより解放前の状態に押し戻す力（圧力）と表面変位の関係から解放時に生じた変位に相当する作用応力を算出する方法である。

スロットストレス法の特徴として、構造物に作用している応力をダイレクトに測定できるが、低応力状態の測定精度が低いことや、測定にあたり装置がとても大がかりであり、測定作業が煩雑で熟練を要するなどの欠点を保有している。

2. 3 コア応力解放法⁵⁾

円孔の開いた部材に σ の応力を作用させると、開口部周辺に 3σ の応力集中が発生する事が知られている。その事から、一様な応力が作用している部材にコア削孔などにより、部分的に応力を解放すると削孔部周辺に応力の再分配が生じ、応力状態が変化する（Fig.2）。

コア応力解放法は、削孔によって再分配されるコア周辺部のひずみ変化量をひずみゲージで計測する。削孔により再分配されたコア周辺部のひずみ計測値を FEM 解析などにより逆解析し、部材に作用している応力状態を推定する方法である。しかし、コア周辺の微小な範囲の応力変動を把握するためゲージ長の短いひずみゲージを用いる必要性があり、計測値は骨材の影響を大きく受け精度よく測定することができないなどの欠点がある。さらに、ひずみゲージから得たひずみ値は、ゲージ長の平均した値であり、1枚のひずみゲージに対して、1点1方向のみの情報を得ることしかできず、多くの情報を得るためには、多数のひずみゲージを貼付する必要があり、専用の測定装置が必要になり配線作業等が煩雑になる。

3. 開発した現有作用応力測定法

3. 1 スリット応力解放法

開発した現有作用応力測定法（以下スリット応力解放法と呼ぶ）は、従来の手法に比べ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、光学的全視野ひずみ計測法の一つであるデジタル画像相関法と現有作用応力測定法の一つである応力解放法を用いて PC 橋梁の現有作用応力を測定するところに特徴がある。

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

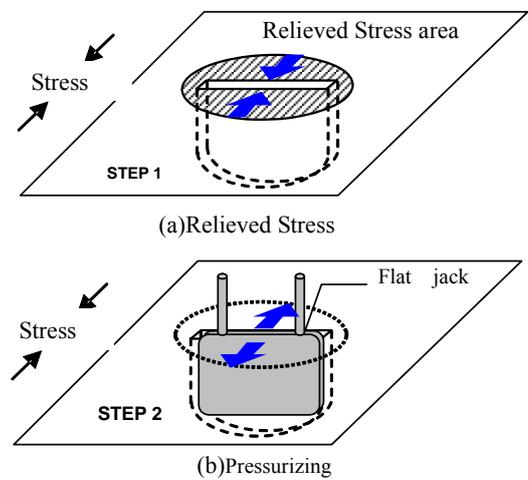


Fig.1 Slot stress

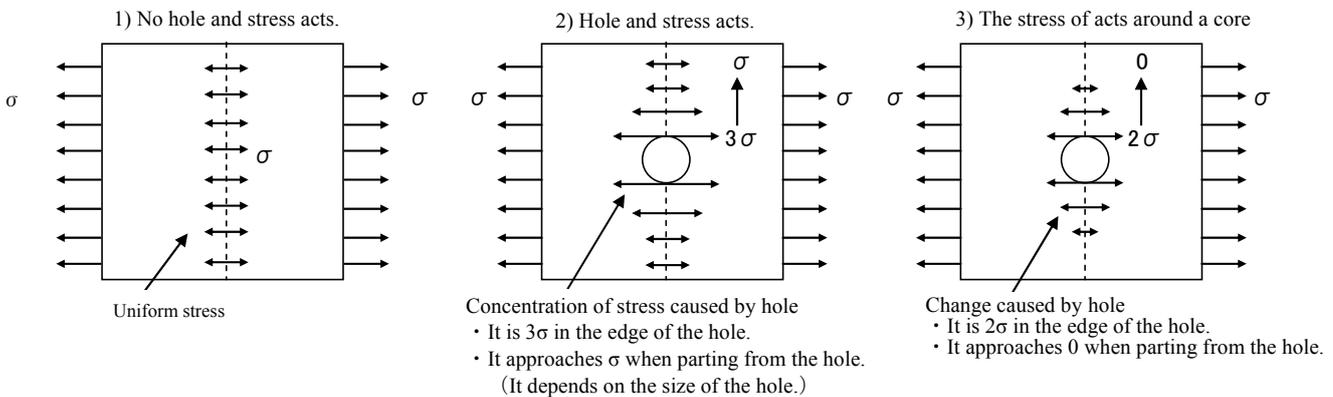


Fig.2 Change of the stress of the horizontal direction

コンクリートカッター (Fig.3) 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ラインセンサタイプ全視野ひずみ測定装置⁸⁾ (以下スキヤナ装置) で撮影し、その画像を用いてデジタル画像相関法⁹⁾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、測定範囲全域において、一直線上の解放ひずみをスリット切削方向に約100測線平均化し、解放ひずみ分布を取得する。

次に、応力解放を再現したFEM解析を行う。解析では、モデルの作用応力を変化させて、計測値に最も近似する解放ひずみ分布を逆解析で求める。つまり、計測値に最も近似した作用応力が現有作用応力となる。手順を以下に示す。

- a) 鉄筋探査を行い、鉄筋を切断しないスリット切削位置・深さおよびスキヤナ測定位置を特定する。
- b) 測定位置をアセトン等で清掃した後、測定面にスプレーを用いてランダムパターンを設ける。
- c) 測定面にスキヤナ装置の固定金具を取り付ける。
- d) 固定金具にスキヤナ装置を設置し、応力解放前のコンクリート表面の計測を行う (初期画像)。
- e) スキヤナ装置を取り外して、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 (Fig.3) で深さ約 20mm~30mm のスリットを切削する。
- f) 再度、固定金具にスキヤナ装置を設置し、応力解放後のコンクリート表面の計測を行う (変形画像)。
- g) 初期画像と変形画像によりデジタル画像相関法で解析し、解放ひずみ分布を得る。
- h) FEM解析により逆解析を行い現有作用応力を推定する。

3. 2 スキヤナ装置⁷⁾

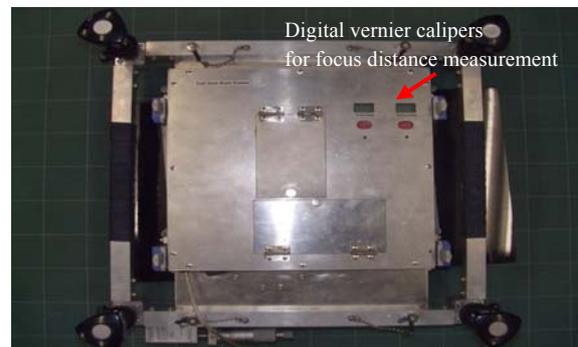
スリット応力解放法に使用したスキヤナ装置の仕様を Table 1 に、外観を Fig.4, 5 にそれぞれ示す。本装置は、ラインセンサを平行に走査し、2次元画像を取得するものであり、撮影走査や画像の保存等は、ノートパソコンにより行われる。本装置の特徴としては、ラインセンサの横に光源を配置することによって、構造物に装置を密着させてスキャンすることができ、屋外においても外乱光の影響をうけることなく撮影できる。また、焦点距離を常に一定とする機構を採用し画像再現性が高い。すなわち本装置では CCD カメラで屋外計測する際の諸問題がなく、撮影に関する特別な技能・知識を要さず、簡易な走査で高精細な画像が取得できる。この装置を用いるよりスリット近傍の微小領域の多点のひずみを高精度に計測を行うことができる。なお、スキヤナ装置の主走査方向のひずみ計測精度は、ゲージ長 30mm のひずみゲージと比較した場合、500 μ のひずみに対して 2% である。スキヤナ装置の撮影範囲は最大 210mm \times 210mm であり、解像度 1200dpi (約 0.021mm/pixel) で 9921pixel \times 9921pixel の画像が取得できる。また、マイクロメーターを本体の外側に、焦点調節ネジとデジタルノギスを配置することで、より正確かつ安易に焦点を合わせることができる。



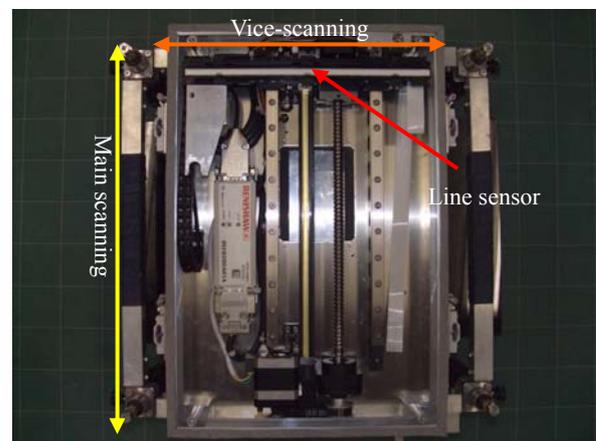
Fig.3 Cutting situation

Table 1 Specifications

| Sensor type | CIS |
|--|--|
| Maximum manuscript size | 210 \times 210mm |
| Optics resolution (main scanning \times vice-scanning) | 1200dpi \times 1200dpi (About 0.021mm/pixel) |
| Source of light | LED |
| Power supply | DC15V |
| Consumption electricity | 15W |
| Size (width \times depth \times height) | 374 mm \times 384 mm \times 182 mm |
| Weight | About 8000g |



(a) front view



(b) back view

Fig.4 Photographs of the developed device

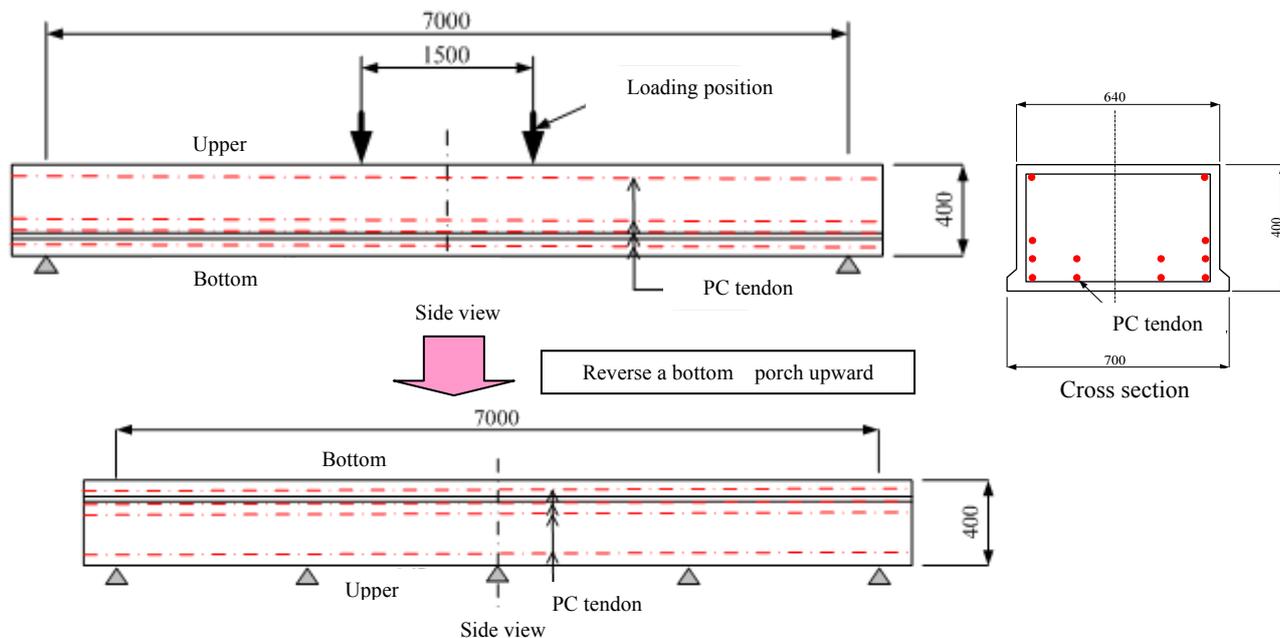


Fig.5 Pre-tension concrete beam

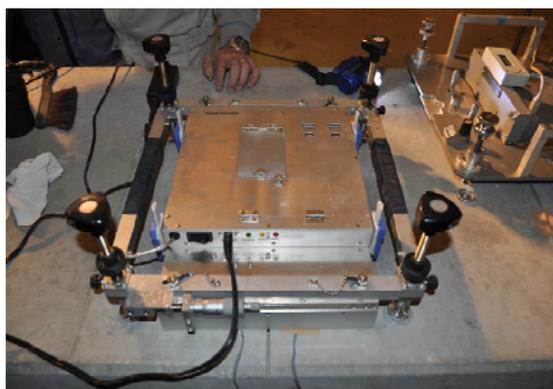


Fig.6 Setting of measurement

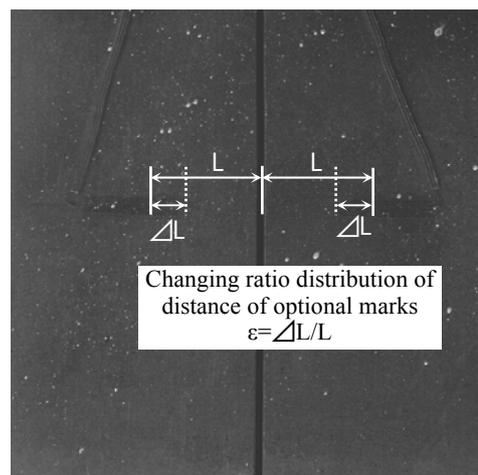


Fig.7 The image of concrete surface after cutting

4. プレテンションPC桁による現有作用応力測定

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。Fig.5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 計測結果

スキャナ装置による計測状況をFig.6、スキャナ装置で計測したスリット切削後のコンクリート表面の画像をFig.7に示す。なお、Fig.8に見える白の斑点は、スプレーで塗布したランダムパターンを表している。スリット切削前後の計測画像をデジタル画像相関法で解析した解放ひずみ分布(以下2点間距離変化率分布)をFig.8に示す。2点間距

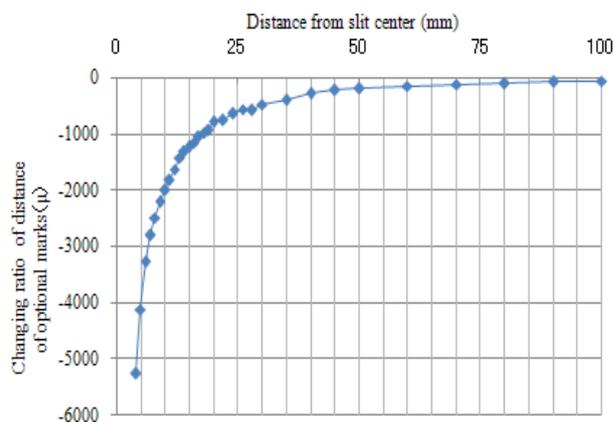


Fig.8 Changing ratio distribution of distance of optional marks

離変化率とは、Fig.8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。Fig.9より、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。

4. 3 FEM解析

スリット周辺部の解放ひずみ分布を把握するために汎用解析ソフト DIANA を用いて 2 次元線形 FE 解析を行った。解析条件を Table 2 に、解析モデル概要図を Fig.9、メッシュ分割図を Fig.10 にそれぞれ示す。解析モデルの寸法が計測対象物と異なる理由は、簡易モデルとすることで計算コスト抑えるためである。なお、簡易モデルにおいて解析精度に影響がないことを事前に確認している。平面応力要素の使用についても同様である。なお、コンクリートは、等方弾性材料⁹⁾とした。

解析で使用したコンクリートの静弾性係数は、プレテンション PC 桁の設計圧縮強度 50N/mm^2 からコンクリート標準示方書(Table 3)¹⁰⁾を参考に 3.3kN/mm^2 とした。また、ポアソン比は、 0.2 とした。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 3.0mm と 30mm とした。荷重条件の作用応力は、2 点間距離変化率分布の計測値に基づき逆解析を行い 8.12N/mm^2 とした。

FEM 解析から得られる 2 点間距離変化率分布を Fig.11 に示す。Fig.11 より、計測値と同様にスリット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。

Table 2 Analysis condition

| | |
|-----------------------|--|
| Analysis type | 2D linear FE analysis |
| Element type | 8 node quad plane stress element |
| Material condition | • Young's modulus $E = 33000\text{ N/mm}^2$ • Poisson's ratio $\nu = 0.2$ |
| Load condition | $q = 8.12\text{N/mm}^2$ (X direction) |
| Restriction condition | $x = 151, y = 0$ (center) : x, y direction fixation $y = 0$ (lower side) : y direction fixation |

Table 3 Elastic modulus of concrete

| | | | | | | |
|--|----|----|----|----|----|----|
| Compressive Strength (N/mm^2) | 24 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| elastic modulus (kN/mm^2) | 25 | 28 | 31 | 33 | 35 | 37 |

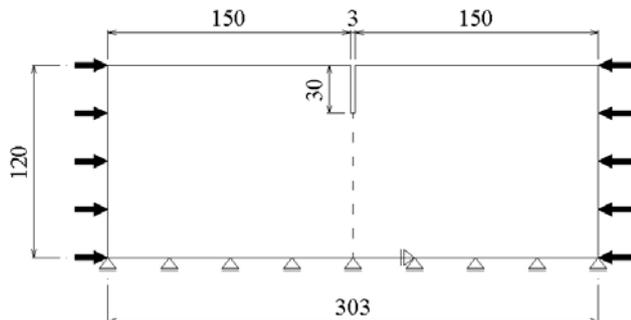


Fig.9 Analytical model

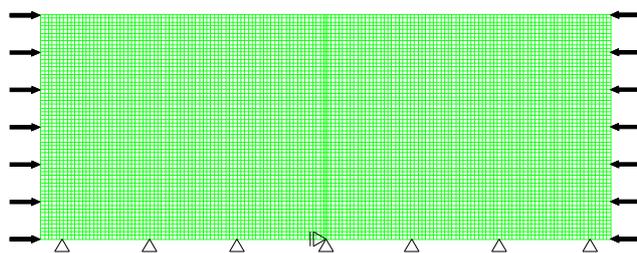


Fig.10 Mesh division

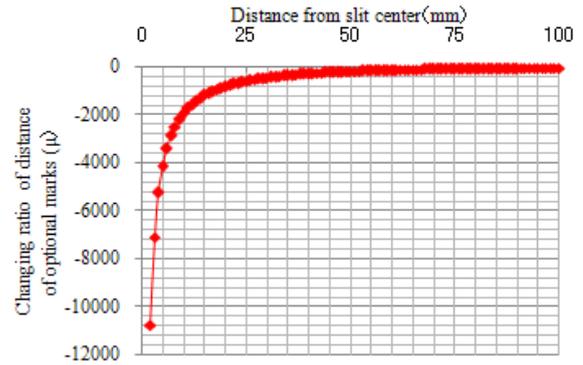
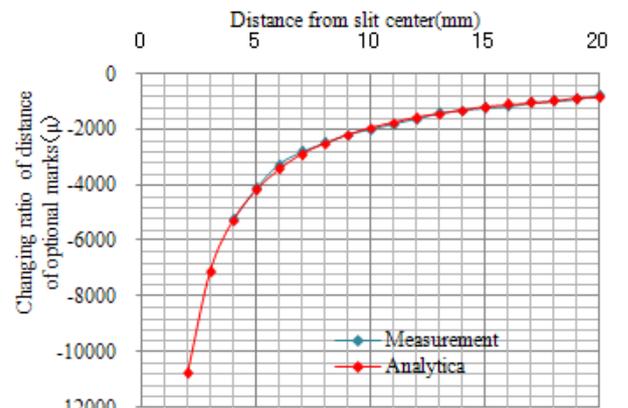


Fig.11 Changing ratio distribution of distance of optional marks (FE analysis)

4. 4 現有作用応力の推定

スリット 30mm 切削時のスキャナ装置による計測と FE 解析により算出した 2 点間距離変化率分布を Fig.12 に示す。Fig.12 示すように逆解析から求めた 8.12N/mm^2 作用させた解析値と計測値は一致しており、標準偏差が 2.85%となっている。したがって、Table 4 に示すようにプレテンション PC 桁の下縁での作用応力は、 $8.12 \pm 0.23\text{N/mm}^2$ と推定され、標準偏差 2.85%と精度のよい結果となっている。

プレテンション PC 桁のプレストレスの設計値は、 9.03N/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。この差異は、プレテンション PC 桁を上下に反転させた際に支持条件が多少不安定になっていたことが原因だと考えられる。



(Close up from slit center to 20mm)

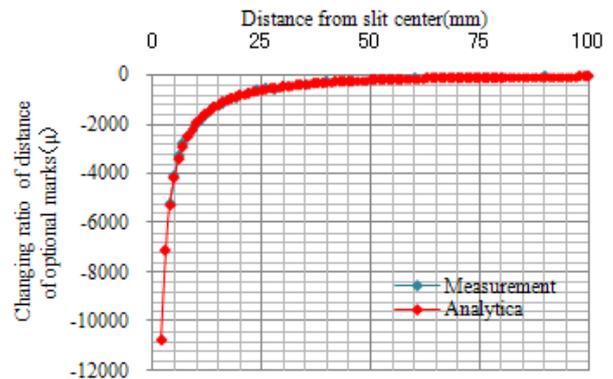


Fig.12 Changing ratio distribution of distance of optional marks

Table 4 The measurement and the FE analytical result

| Distance from slit center (mm) | Analytical (8.12N/mm^2) $\delta 1 (\mu)$ | Measurement $\delta 2 (\mu)$ | $\delta 2/\delta 1$ (%) |
|--|--|---------------------------------|----------------------------|
| 2 | -10771.5 | - | - |
| 3 | -7099.0 | - | - |
| 4 | -5262.4 | -5247.0 | 99.7% |
| 5 | -4159.9 | -4110.0 | 98.8% |
| 6 | -3424.2 | -3269.0 | 95.5% |
| 7 | -2898.1 | -2784.0 | 96.1% |
| 8 | -2502.9 | -2480.0 | 99.1% |
| 9 | -2195.1 | -2199.0 | 100.2% |
| 10 | -1948.4 | -1995.0 | 102.4% |
| 11 | -1746.3 | -1808.0 | 103.5% |
| 12 | -1577.5 | -1621.0 | 102.8% |
| 13 | -1434.5 | -1415.0 | 98.6% |
| 14 | -1311.8 | -1314.0 | 100.2% |
| 15 | -1205.3 | -1221.0 | 101.3% |
| 16 | -1112.2 | -1150.0 | 103.4% |
| 17 | -1029.9 | -1042.0 | 101.2% |
| 18 | -956.9 | -966.0 | 101.0% |
| 19 | -891.6 | -916.0 | 102.7% |
| 20 | -833.0 | -780.0 | 93.6% |
| From 0 to 20mm | Average ($\delta 2/\delta 1$) | | 100.0% |
| | Standard deviatio S ($\delta 2/\delta 1$) | | 2.85% |
| Existing stress $\sigma(\text{N/mm}^2)$ | | | 8.12 |
| Error $\Delta=\sigma \cdot S(\text{N/mm}^2)$ | | | 0.23 |

Elastic modulus : 3.3kN/mm^2

5. まとめ

スリット応力解放法の測定精度を確認するために、プレテンション PC 桁を用いて現有作用応力推定の実証実験を

行った結果、現有作用応力を精度良く測定することができた。今回は、光学的全視野ひずみ計測を PC 橋梁の現有作用応力測定に適用したが、今後は、土木構造物の新設の品質管理や維持管理等に適用していきたい。

参考文献

- 1) R.J.Woodward,F.W.Willams:Collapse of Ynys-y-Gwas bridge,West Glamorgan Structural Engineering Group Proc. Instb Civ .Engrs,Part 1, 84 (1998) , Aug. , 635-669
- 2) Wakabayashi,T., Hashimoto,T.,Kou,R. : Application of arch member for retrofitting PC girder with central hinge Yaihora Bridge (in Japanese),Bridge and Foundation Engineering,Vol.43.7 (2009), 21-26s
- 3) PWRI : Survey on the replacement of bridges(Parts III) (in Japanese),Technical NOTE of PWRI No.3512(1997)
- 4) Hida,K.,Kamino,H.,Nagayoshi,R. , Takahashi,Y.,Demizu,A. : Presumption of Prestress and Cause of Large Displacement in Center Hinge PC Box Girder by Released Stress Method(in Japanese), Journal of structures and materials in civil engineering,Vol.21(2005), 119-128
- 5) Asahi.H.,Hujita,M.,Thomas,L.D.,Miyamoto,N. : Existing Action Stress Measurement of Concrete Material by Stress Relief Technique that uses flat jack(in Japanese), Concrete Journal, Vol.42, No.4(2004), 26-32
- 6) Tamakoshi,T. : Expectation for Non-Destructive Inspection to Establish Preventive Maintenance of Road Bridges(in Japanese), journal of N.D.I 57(2008), 550-555
- 7) Ito,Y.,Matsuda,H.,Uchino,M.,Demizu, A.:Construction Management and Mintenance by Full-field Optical Mesurement Machine(in Japanese), Civil Engineering, VOL.66 No.4(2011), 48-53
- 8) Uchino,M. : Examination of strain analysis method by digital image correlation method(in Japanese), Proceedings of JSEM Combination Workshop, No.6-1(2006), 36-39
- 9) Japan Concrete Institute : Base of nonlinear finite element method for structural engineer, application, and example (in Japanese), (2008), 32
- 10) Japan Society of Civil Engineers : Standard specification for Concrete Structures-2007 Design(in Japanese), 44