

論文 デジタル画像相関法を用いた撤去PCT桁橋の載荷試験時における変位, ひずみ, ひび割れ計測

出水亨^{*1}・松田浩^{*2}・伊藤幸広^{*3}・木村嘉富^{*4}

要旨: 本研究では, デジタル画像相関法の実橋梁レベルの大型試験体への適用性を検討するために, 撤去PCT桁の載荷試験時における変位およびコンクリート表面ひずみの計測を行った。計測精度を確認するために変位計およびひずみゲージによる計測結果と比較した。また, ひび割れの発生・進展挙動を確認するために, 目視によるひび割れ観察とデジタル画像相関法により得られたひずみ分布と比較した。計測結果は, 変位計・ひずみゲージとほぼ同等の計測精度が得られた。ひずみ分布からひび割れの発生前にひずみ集中が生じ, ひずみ集中箇所とひび割れ発生箇所が一致し, 荷重増加とともにひずみの進展過程を観察することができた。

キーワード: 実橋載荷試験, 光学的全視野計測, デジタル画像相関法, ひび割れ, 変位, ひずみ

1. はじめに

コンクリート構造物の長寿命化や維持管理の観点から耐荷性能や健全性を評価するために, 様々な要因で発生する変位やひずみを計測することは必要不可欠である。そのため, 従来では変位計やひずみゲージといった接触式計測法が用いられてきた。これらの接触式計測法は適切な位置, 方向, 状態下で設置・貼付することで信頼性の高い評価を得ることができる。しかし, 変位計やひずみゲージから得られる値は, 1点1方向のみの計測値であるため, 多点を計測するためには多くの変位計やひずみゲージの設置が必要となる。また, 測定器までの複雑な配線作業を伴うため作業面やコスト面で問題が生じる場合がある。さらに, ひび割れの発生から破壊に至るまでの挙動が複雑で, ひび割れの進展方向が刻々と変化するコンクリートの場合, 従来のひずみゲージによる計測法では, ひび割れ発生を正確に予測し, 進展を追跡することは極めて困難である。また, ひび割れ発生やひび割れ幅の増大にともない, ひずみゲージによる計測自体が不能となる場合も多々ある。

最近では, 従来の接触式計測法に代わる計測法として, サンプリングモアレ法やデジタル画像相関法(以下DICM)などの光学的全視野ひずみ計測法の研究が盛んに行われている^{1) 2)}。その中でもDICMは, 変形前後の計測対象物をCMOSカメラやCCDカメラなどのデジタルカメラで撮影したデジタル画像を用い, 解析することで広範囲の変位分布やひずみ分布を簡易に計測できる計測手法である。デジタルカメラの高解像度化, パソコンのCPUの高速化やハードディスクの大容量化にともない, 高解像度かつ膨大な画像データを短時間に処理する

ことが可能になったこともDICMの魅力の一つと言える。この手法を用いることで, 測定対象物の破壊が, いつ, どこに, どのように生じるかを非接触かつ全視野で計測することができる。

筆者らは2000年頃から光学的手法を用いてコンクリートおよび鋼などの建設材料に適用するため実験室レベルにおいて小型試験片を用いた各種研究を行ってきた。その結果, 実験室レベルにおいてひずみゲージや変位計などの既存計測法と同等の計測精度が得られること, コンクリートのひび割れの発生・進展挙動の可視化が可能で, 溶接中の高温環境化においてもひずみ計測が可能となったことが確認された^{3)~6)}。

本研究では, DICMを実構造レベルの大型試験体への適用可能性を検討するために, 撤去PCT桁の3点曲げ載荷試験時における変位およびコンクリート表面ひずみの計測を行った。また, ひび割れの発生・進展挙動を確認するために, 近接目視によるひび割れ観察とDICMによる計測データを用いて算出したひずみ分布を比較した。

2. 計測システム

2.1 DICMについて

DICMは, 測定対象物表面の模様のランダム性を基にして, 変形前後の測定対象物表面をCCDカメラやCMOSカメラなどで撮影したデジタル画像を画像処理することにより, 計測範囲全体にわたって変形の大きさと方向を求めることができる解析手法である。また, 2台のカメラによりステレオ撮影することで3次元計測が可能となる。さらに, レーザ光を照射するスペックルパターン計測法と異なり高温時の測定空間の揺らぎ等に比較的強い

*1 長崎大学大学院生産科学研究科 博士後期課程 (正会員)

*2 長崎大学大学院工学研究科教授 工博 (正会員)

*3 佐賀大学大学院工学系研究科准教授 博(工) (正会員)

*4 (独) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター上席研究員 修(工) (非会員)

こともその特長の一つと言える。

DICM で解析する際に重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。その解析原理は、デジタル画像が一般的に 256 階調で表現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、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))。計測対象物に変位を与えると、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。ひずみ解析は、以上の手法により得られた変位計測結果を利用してひずみ分布を求める。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、垂直、斜めと 3 軸のひずみゲージと同じ解析を行い、最大主ひずみ、最小主ひずみの値と方向を求めることが可能であること、任意に解析点間距離を変更可能なこと、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。

本計測システムの写真、システム概要図、仕様を写真-1、図-2、表-1 にそれぞれ示す。本計測システムは、2 台の 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ため、簡易なシステムかつ軽量であることから持ち運びが容易である。

2.2 キャリブレーションについて

一般に、デジタルカメラのレンズは曲面となっていることから撮影された画像はひずみを有する。高精度に計測するためには、画像のひずみを補正する必要がある。2 台のカメラでステレオ撮影する場合は、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)撮影することで、画像のひずみ補正やカメラの位置合わせを行う。

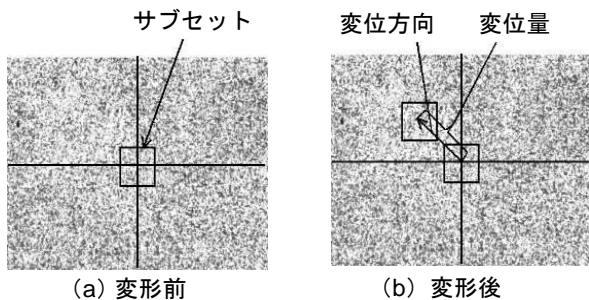


図-1 変形前と変形後のデジタル画像

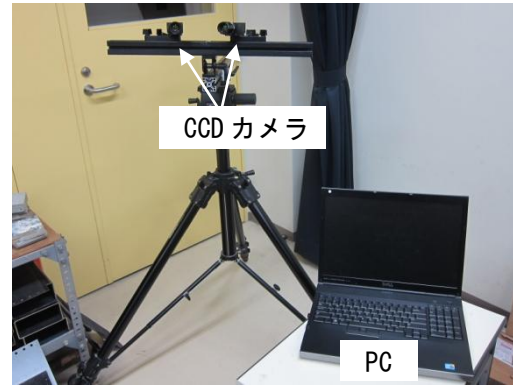


写真-1 計測システム

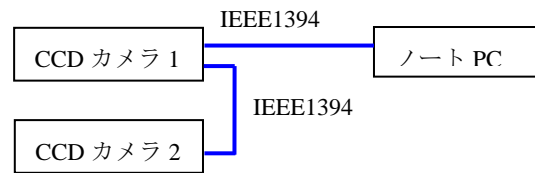


図-2 システム概要

表-1 計測器仕様

CCD カメラ	型番：Point Grey Research 社 GRASS-50S5M/C 撮像素子：Sony ICX625 CCD 解像度：2448×2048pixel (500 万画素) 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 重量：100g
レンズ	Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 2.8/ 50mm 重量：80g
ノート PC	CPU：Intel(R) Core(TM)i7 CPU Q 820 @1.73GHz (8CPUs) HD：300GB メモリ容量：3.5GB RAM 重量：3.7kg
計測 レンジ	数百%の変形まで計測可
出力形式	三次元形状、変位、ひずみ

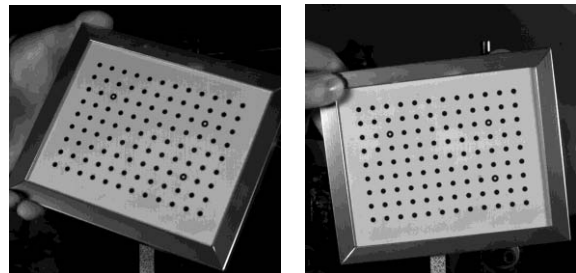


写真-2 キャリブレーション状況

3. 試験概要

3.1 供試体概要

本研究で使用した橋梁の概要を表-2 に示す。橋梁の形式は、2 径間単純ポストテンション T 桁橋 (2 主桁) である。北陸地方で自転車道として供用 (写真-3) されていたが、塩害による劣化が激しく、供用後 38 年経過後、平成 22 年に撤去された。本橋は撤去前に 2 回の調査が行われており、1 回目の調査では、塩害による鉄筋腐食によりコンクリートが剥落し、断面損傷が全体的に見られた。2 回目の調査(平成 21 年)では、2 径間中、短スパンの海側の主桁 (以下、調査桁) で、PC 鋼材の素線破断 (8 本のうち 2 本) が確認された。そして、LCC の検討にて架替えが優位と判断されたため撤去に至った。

本研究は、調査桁のせん断耐力を評価するために土木研究所構造物実験施設の 30MN 大型構造部材万能試験機を用いて載荷試験を行った際に計測した結果についてまとめたものである。調査桁の側面図及び支点・載荷位置等を図-3 に、断面図を図-4 にそれぞれ示す。なお、載荷試験結果の詳細については、別の機会に報告する。

3.2 計測概要

DICM の計測位置を図-5 に示す。同図には、載荷試験前の変状図も合わせて示す。DICM の計測位置は変状がない (Line49~53 の区間内) の下フランジからウェブ中央までの側面部(横 670mm×縦 480mm)とした。

表-2 橋梁概要

橋長	44.0m(支間長 19.2m+23.24m)
全幅員	2.9m (有効幅員 2.5m)
橋梁形式	2 径間単純ポストテンション T 桁橋 (2 主桁)
竣工年	昭和 47 年(1972 年)38 年経過
示方書	昭和 43 年 PC 道路橋示方書

DICM の精度検証として、写真-4 に示す調査桁下面に設置した変位計(変位計 I, 変位計 II), 下フランジとウェブに貼付したひずみゲージ(ゲージ I, ゲージ II)から得られた計測値と比較を行った。ひずみゲージのゲージ長は 60mm である。

画像解析のため載荷前に計測面に白と黒のスプレーを用いてランダムパターンを散布し、撮影画像の階調値に変化をもたせた。また、計測時には白色発光ダイオード(白色 LED)ライトを 2 つ使用し、試験体表面の明るさを一定に保つようにした。計測風景を写真-5 に示す。本条件下では、カメラ間の距離は約 400mm, カメラと計測面までの距離は約 4200mm, カメラのシャッタースピードは 70ms である。この条件下で計測した画像解像度は約 0.28mm/pixel となる。すなわち、60mm ゲージは 214pixel で構成されることになる。

計測は、無載荷時、それ以降 10kN 毎に 560kN まで行った。200kN 以降は、20kN 間隔で近接目視によるひび割れ観察を行った。DICM の計測精度を向上させるために、各荷重段階において 50 枚撮影した画像に加算平均処理を行い、その画像を用いて画像解析を行った⁷⁾。



写真-3 撤去前の橋梁

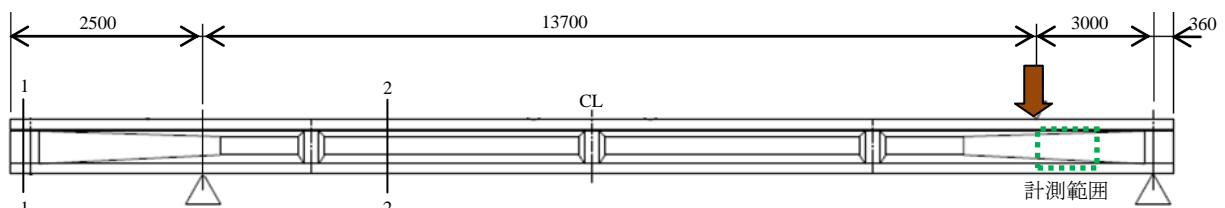


図-3 調査桁側面図 (mm)

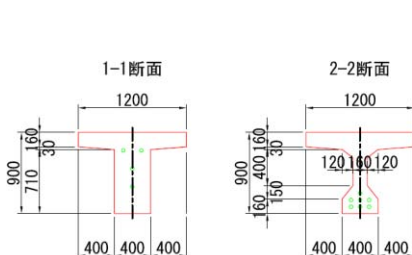


図-4 調査桁断面図 (mm)

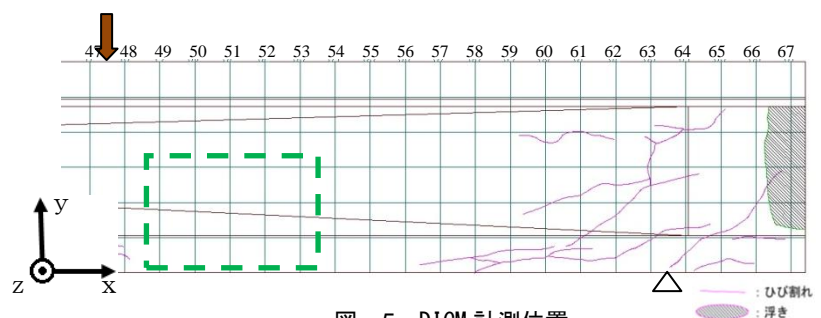


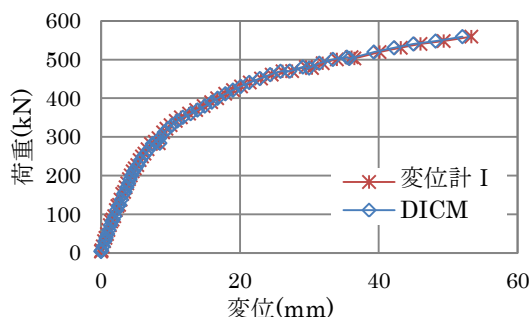
図-5 DICM 計測位置

4.1 変位とひずみの精度検証

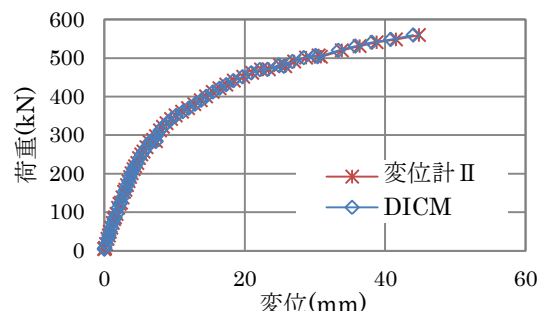
図-6(a), (b)より変位計と DICM の計測値は同等の変位挙動を示している。変位計 I, II との相関係数が 0.999 と高く、標準偏差も平均して約 0.24mm とばらつきも小さいことから、高精度で計測できている。

ひずみ計測より、ゲージ I の相関係数は 0.999 と高く、標準偏差は 166μ であった。図-6(c) の 380kN 付近からひずみが急激に増加した理由は、ひずみゲージ I にひび割れが生じたためである。ひび割れの発生にともないひずみゲージと DICM の計測値に差が生じているのは、それぞれのひずみの計測原理の違いによるものだと考える。しかし、概ねひずみの増加挙動は捉えている。ゲージ II の相関係数は 0.995 と高い相関を示し、標準偏差は 34μ である。図-6(d) からゲージ I と同様にひずみの増加挙動を捉えている。本計測での撮影解像度は約 0.28mm/pixel である。撮影画像の解像度を上げることで計測精度の向上が期待できる⁸⁾。

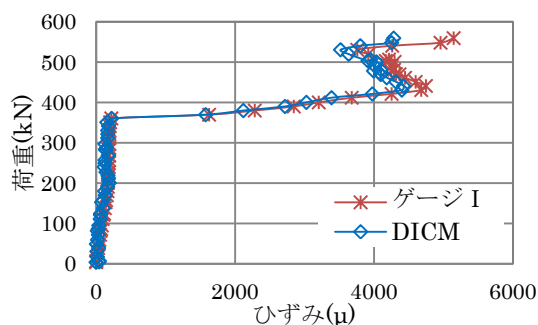
	相関係数	誤差平均	標準偏差
変位計Ⅰ	0.999	0.25 mm	0.28 mm
変位計Ⅱ	0.999	0.12mm	0.19 mm
ゲージⅠ	0.999	129 μ	166 μ
ゲージⅡ	0.995	45 μ	34 μ



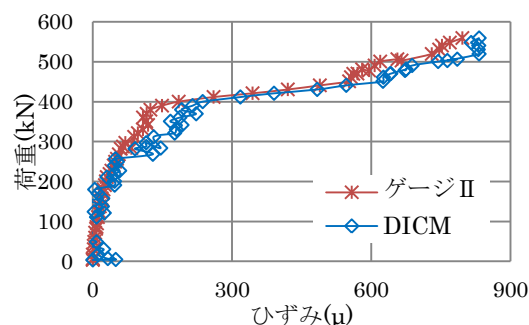
(a) 変位計 I



(b) 變位計 II



(c) ゲージ I



(d) ゲージⅡ

図-6 計測結果

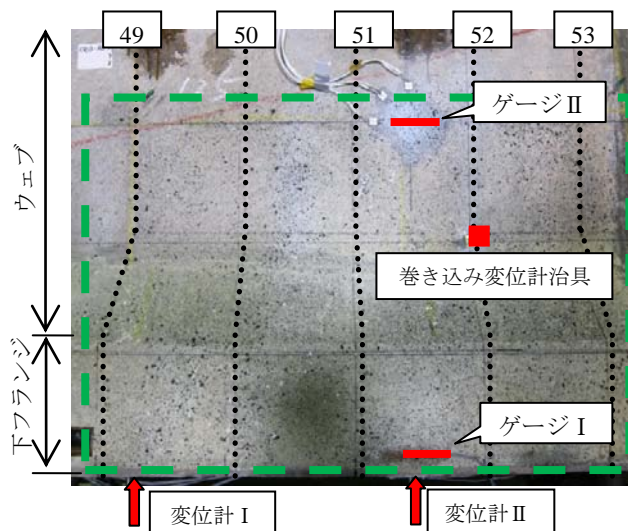


写真-4 計測範囲（拡大図）

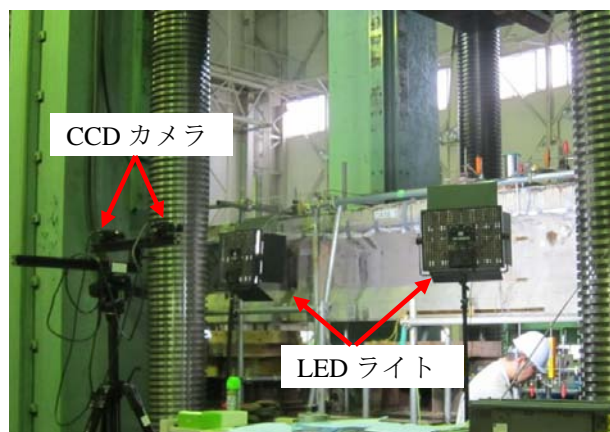


写真-5 計測風景

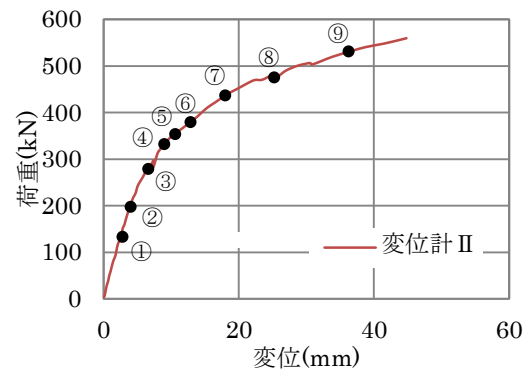
4.2 各荷重段階におけるひずみ分布計測

変位計Ⅱより得られた荷重－変位曲線を図－7 に示す。同図に示す荷重段階①～⑨における DICM による最大主ひずみ分布を図－8 に示す。なお、ひずみ分布には目視観察により得られたひび割れを黒線で、ひずみゲージと巻込み変位計の治具を白色で記載している。なお、巻込み変位計の結果については、別の機会に報告する。

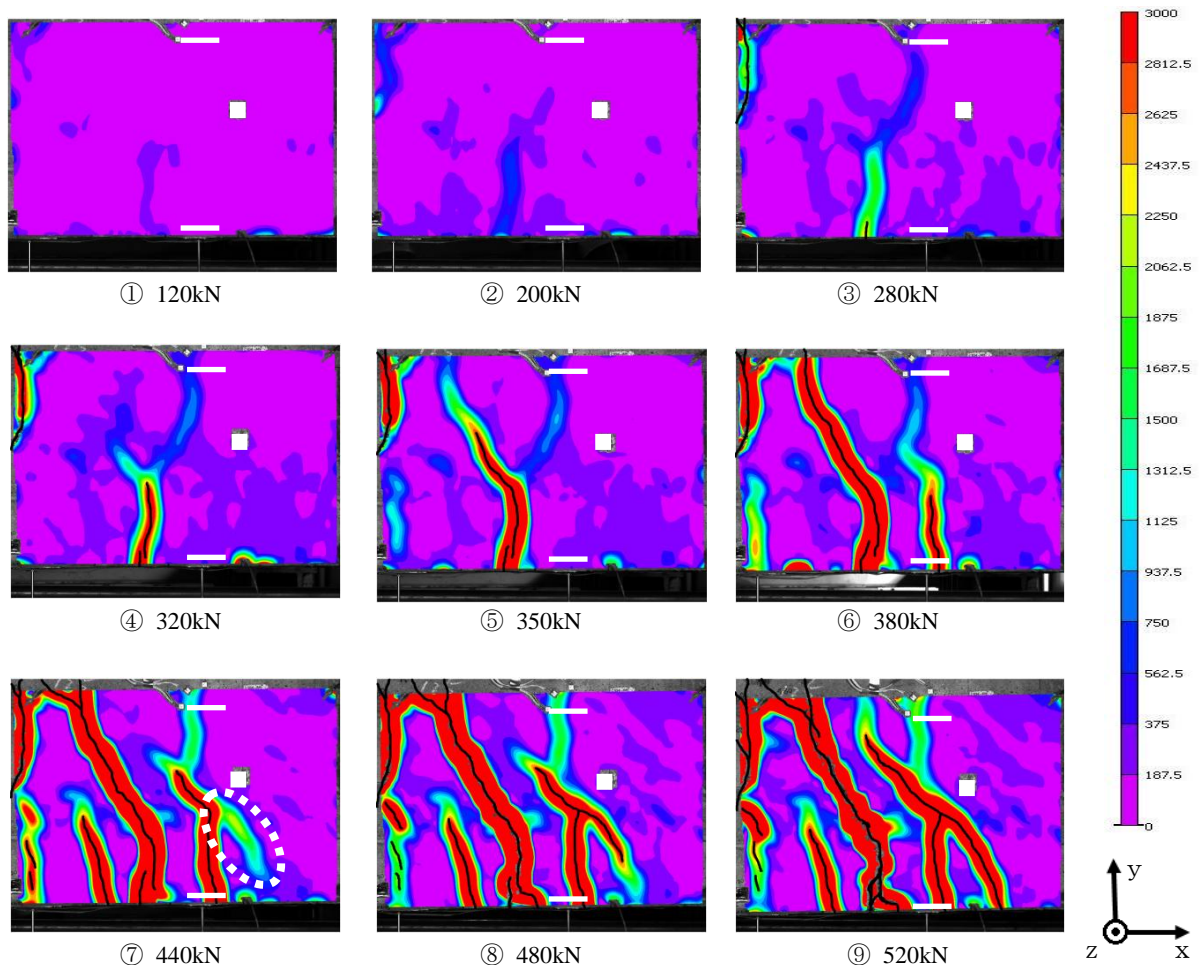
図－8 より 120kN 時 (①) に計測範囲の中央の下フランジ位置にひずみの集中が確認され、280kN 時 (③) にひずみの集中箇所にはひび割れが目視で確認された。ひずみの集中は、ゲージⅡの方向に進展しているが、320kN 時 (④) では載荷点方向に新しいひずみの集中が確認された。荷重の増加にともない載荷点方向にそのひずみが進展し、ひずみの集中箇所にはひび割れが確認された。また、荷重 380kN 時 (⑥) ではひずみゲージ位置でひずみの集中に沿ったひび割れ発生が確認された。図－6(c) においても、荷重 380kN 付近にひずみが増大しており、計測結果からもひび割れ発生が確認できる。載荷荷重 440kN 時 (⑦) には点線枠内に示すように斜めひび割れを予兆させるひずみの集中が確認でき、480kN 時 (⑧) にはひずみの集中に沿ったひび割れ発生が確認された。

図－8 からひび割れはひずみの集中箇所に発生しており、本手法を用いることでひび割れの発生・進展を追跡することができることがわかる。

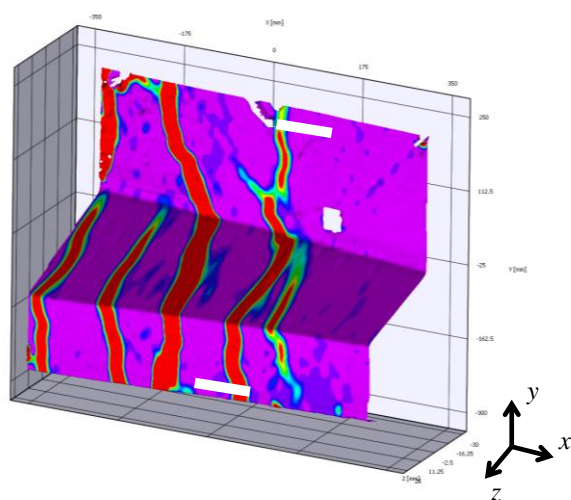
荷重 440kN 時 (⑦) を 3 次元的に表示したものを図－9 に示す。このように 2 台のカメラを用いてステレオ撮影することで計測範囲の 3 次元形状も同時に計測することができるため、ひずみの集中をより視覚的にとらえることができ、ひび割れの発生・進展の追跡観察に有効であることがわかる。



図－7 荷重－変位曲線



図－8 ひずみ分布図



図－9 3次元ひずみ分布図(440 kN時)

5. まとめ

今回、DICMにより撤去PCT桁の3点曲げ載荷試験時における変位およびコンクリート表面ひずみの計測を行った結果、以下の所見を得た。

- ・実構造物レベルにおいても、変位計やひずみゲージによる従来法と同様に、DICM計測は高精度に変位およびひずみ計測が可能ことが確認された。
- ・実構造物レベルにおいても、ひずみ集中を可視化することができ、全視野ひずみ計測の有効性を確認できた。
- ・2台のカメラを用いたステレオ計測により三次元的にもひずみ分布の可視化が可能ことが確認された。
- ・DICM計測はひび割れの発生前にひずみの集中が確認され、また、DICMで計測したひずみの集中箇所と目視によるひび割れ発生箇所が一致したことから、DICMはひび割れの発生・進展挙動を正確に追跡することができる。このことはひび割れの発生・進展の解析に有効なデータとなるものと考えられる。

謝辞

本研究の載荷実験は、独立行政法人土木研究所で実施され、その際、DICMにより計測する機会を与えていただきました。本論文を作成するにあたり、長崎大学大学院生産科学研究科修士2年の板井達志君に協力していた

いただきました。本研究の一部は平成21-23年度科学研究費補助金基盤研究B(課題番号:21360127,研究代表者:松田浩)の補助により実施しました。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 2011 社団法人日本非破壊検査協会：非破壊検査～検査と材料評価, Vol.59 No.7 Jul., 2010
- 2) 李志遠, 坂真澄, 南原健一, 小林大輔：先端画像処理技術による全視野変位分布計測と大型構造物への応用, 応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関する研究集会・九州大学応用力学研究所主催, pp.13-14, Jan., 2010
- 3) C. Morita, C. Zhao, A. Demizu, K. Makino, H. Matsuda, K. Ichimiya : 3D profile measurement and buckling simulation on thin-walled cylindrical shells under compression by utilizing 3D-digital Image Correlation Method , IABMAS 5, pp.2550-2556, 2010
- 4) 出水享, 松田浩, 伊藤幸広, 森田千尋, 藤野義裕：光学的手法による鋼部材の加熱・冷却過程におけるひずみ分布計測, 構造工学論文集 Vol. 57A, pp. 86-93, 2011
- 5) 出水享, 松田浩, 中島朋史, 浜岡広：非接触全視野計測によるコンクリートの材料試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.473-478, 2006
- 6) T. Nyomboi, H. Matsuda, A. Demizu, K. Makino: Experimental and analytical study on shear capacity in steel fiber and stirrup RC beam, Journal of Structural Engineering 56A, pp.13-22, 2011 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
- 7) 出水享, 板井達志, 御舟研二, 松田浩：デジタル画像相関法による建設材料のひずみ測定に関する基礎的研究, 長崎大学工学部研究報告, 41(76), pp. 66-72, 2011