

## 17 精密写真測量を利用した供試体変形計測の可視化

### Visualization of a deformed structure by the Photogrammetry

塩崎正人<sup>1</sup>・篠崎裕生<sup>2</sup>・西山哲<sup>3</sup>・大西有三<sup>4</sup>

Masando Shiozaki, Hiroo Shinozaki, Satoshi Nishiyama and Yuzo Ohnishi

**抄録：**精密写真測量は、デジタルカメラで対象物に貼った反射ターゲットを撮影し、その画像から3次元座標を求める計測方法である。従来の計測機器では1方向の変形を計測するため、3次元変形を捉える場合3つの計測器が必要となる。一方、精密写真測量では画像を解析することで、容易に3次元変形を捉えることが可能である。今回コンクリート供試体を用いた正負交番載荷試験の内部補強鉄筋の座屈によるコンクリートの破壊挙動把握に精密写真測量を適用した。この計測で変形の過程を3次元で可視化することができたためここに報告する。

**Abstract:** Photogrammetry is the technique to measure the form of 3-dimensional objects by analyze the pictures of reflective targets on the objects. Conventional measures need three devices to measure the 3-D deformations, however Photogrammetry can measure the deformations by one device. We tried to apply this technique for measuring 3-D deformation of a concrete structure under the cyclic load. The expected failure mode is due to buckling of enclosed reinforcements. 3-D deformations are necessary to clarify the behavior of specimen. As the results, it was possible that this technique has an accuracy and can visualize the process of deformation.

**キーワード：**精密写真測量, デジタルカメラ, 正負交番載荷試験, 3次元測量, 可視化  
**Keywords :** photogrammetry, digital camera, cyclic load, 3-D survey, visualization

### 1. はじめに

精密写真測量（以下、本方法とする）とは、反射ターゲット（以下、ターゲットとする）を貼った対象物を複数箇所からデジタルカメラでストロボ撮影し、その画像を解析してターゲットの3次元座標を算出する方法である。従来より航空写真測量等で利用されていたが、近年のデジタルカメラの性能向上に伴い、より身近な計測手法となってきた<sup>1)</sup>。

一般に、構造物を構築する場合、事前にスケールモデルを用いた試験を実施することが多い。こういった構造実験で製作される供試体の変形計測では、従来からある接触式計測器の変位計や $\pi$ ゲージ等の直接的に変位を測る方法のほか、ひずみゲージによって間接的に変位を求める方法がある<sup>2)</sup>。しかし接触式計測器を多数設置することは、煩雑な配線処理を必要とする(図-1)。加えて、設置位置によっては計測機器同士の干渉が起きることによって設置することが困難な場合もある。このため、供試体の3次元的な変形挙動を捉えることは困難な作業であるといえる。

一方で、精密写真測量は対象となる供試体にターゲットを貼付し撮影する計測方法である。供試体にはシール式のターゲットを必要箇所に貼るだけであり、上

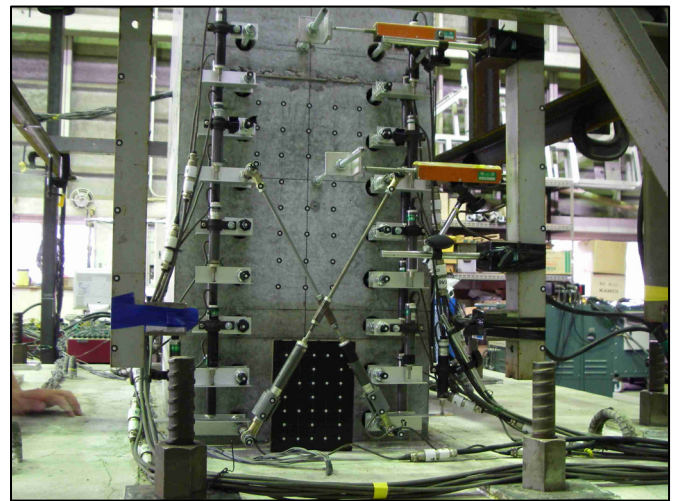


図-1 接触式計測器の設置例

述の煩雑さを避けることができる上、小さなシートであるためターゲット同士で干渉が起きることなく、計測箇所の自由度が高いという特徴がある。

今回、コンクリート橋脚供試体の正負交番載荷試験において、本方法を用いた変形計測を実施し、変形挙動を可視的に捉え、本方法の適用により構造実験における可視的な変形挙動の把握に可能性を見いだした。この結果について以降に述べる。

1 : 正会員 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術研究所 土木研究開発部  
(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1, Tel :04-7140-5202, E-mail : MasandoShiozaki@smcon.co.jp)  
2 : 正会員 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術研究所 土木研究開発部  
3 : 正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 ジオフロント環境工学講座 准教授  
4 : フェロー会員 工博 京都大学大学院工学研究科 ジオフロント環境工学講座 教授

## 2. 変形計測方法<sup>3)</sup>

### (1) 計測法の概要

本方法によって変位を測るには次のように行う。まず、変形前の静止状態において複数箇所から必要枚数の写真を撮り、計測点の3次元座標を算出する。次に対象物が変形した後の静止状態において、同様にして計測点の座標を求める。そして両座標値の差を取るとこの差が変形量である。

ところが、精密写真測量では、対象物の相対的形狀は正確に測れるが、絶対座標は測れないということである。すなわち、まったく変形がない場合であっても、2回の測定で算出される同一点の座標は異なる。言い換えれば、測定ごとに異なる座標系で対象点座標が表現される。その理由は、基準点（予め座標が分かっている点）を通常は設定できないからである。このため、座標系を固定しないフリーネットワーク法で解を求める必要があり、上述のような事情は避けることができない。

そこで変形前後の2回の測定で得られた座標値の比較は、次の手順による。

- ①変形後の形状を、変形前の形状に重ね合わせるように座標変換する（図-2）。座標変換は、回転・平行移動・伸縮の3つの変換の合成である。
- ②上記操作を行った後、対応する点の座標の差をとる。

そこで重要なのは、手順①の重ね合わせの方法である。以下これについて説明する。

### (2) 一様な重みによる簡易法

前述のように、変形後の座標を変形前の座標に重ね合わせるような座標変換を見出す必要がある。重ね合わせの基準は最小二乗誤差である。この方法には2つある。まず本節では、計測の重みが一様な場合、特異値分解を用いて簡易に解く方法を示す。次節では、計測精度が点によって異なる場合、繰り返し法によって正確に解く方法を説明する。

変形前後の $n$ 個の計測点の座標をそれぞれ $\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) とする。両者の関係は、次のように表される。

$$\mathbf{x}_i = s\mathbf{M}(\mathbf{y}_i - \mathbf{t}) + \mathbf{v}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

ここで $s$ はスケール比（伸縮の割合）、 $\mathbf{M}$ は座標回転行列、 $\mathbf{t}$ は平行移動ベクトル、 $\mathbf{v}$ は誤差である。

簡易法は、伸縮、回転、平行移動の3つの操作が、互いに相互関係なく独立に行えるという仮定のうえでこれら各操作量を求める。本来はこれらの操作は互いに関連するはずである。

最初にスケール比を計算する。スケール比は、それぞれの計測点の重心からの距離の二乗和が等しくなる

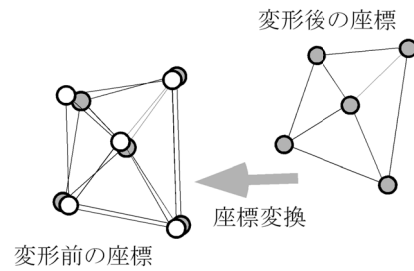


図-2 座標計測値の重ね合わせ

ように定める。まずそれぞれの計測点の重心座標を $\mathbf{x}_g, \mathbf{y}_g$ とし、座標系の原点を重心に移動させると、座標値は $\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_g, \mathbf{y}_i - \mathbf{y}_g$ となる。これを改めて $\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i$ と置きなす。するとスケール比 $s$ は

$$s^2 = \sum \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i / \sum \mathbf{y}_i^T \mathbf{y}_i \quad (2)$$

として求めることができる。ここで総和記号は計測点全点の和を取ることを意味する（以下同じ）。このスケール比を変形後の座標に乗じてスケールをあわせ、改めて $\mathbf{y}_i$ と置く。以上でスケール調整が終わったが、重心を原点に取り直したことによって平行移動が完了する。

最後に回転行列 $\mathbf{M}$ を求める。重ね合わせの誤差は

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{M}\mathbf{y}_i \quad (3)$$

で表されるから、誤差の二乗和を $E$ とすると

$$\begin{aligned} E &= \sum \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i = \sum (\mathbf{x}_i - \mathbf{M}\mathbf{y}_i)^T (\mathbf{x}_i - \mathbf{M}\mathbf{y}_i) \\ &= \sum \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i - 2\sum \mathbf{x}_i^T \mathbf{M}\mathbf{y}_i + \sum \mathbf{y}_i^T \mathbf{y}_i \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで $\mathbf{M}$ は直交行列であるから $\mathbf{M}^T \mathbf{M} = \mathbf{I}$  ( $\mathbf{I}$ は単位行列)となる性質を用いた。式(4)の値を最小にするような $\mathbf{M}$ を求めるのが目標である。

式(4)の第1項と第3項は一定だから、 $E$ を最小にするには第2項を最大にすればよい。

$$\begin{aligned} E_1 &= \sum \mathbf{x}_i^T \mathbf{M}\mathbf{y}_i = \sum \text{trace}\{\mathbf{x}_i (\mathbf{M}\mathbf{y}_i)^T\} \\ &= \text{trace}\{(\sum \mathbf{x}_i \mathbf{y}_i^T) \mathbf{M}^T\} = \text{trace}\{N \mathbf{M}^T\} \end{aligned} \quad (5)$$

ただしここで $N = \sum \mathbf{x}_i \mathbf{y}_i^T$ とおいた。

この $3 \times 3$ 行列 $N$ を $N = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ と特異値分解する。ここで $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ は直交行列、 $\mathbf{S}$ は特異値を対角項に持つ対角行列である。すると $E_1$ は

$$E_1 = \text{trace}\{\mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \mathbf{M}^T\} = \text{trace}\{\mathbf{V}^T \mathbf{M}^T \mathbf{U}\mathbf{S}\} \quad (6)$$

と変形できる。ここで行列のトレースは、積が実行できるならばその順序に無関係であることを用いた。これが最大になるのは $\mathbf{V}^T \mathbf{M}^T \mathbf{U} = \mathbf{I}$ となるときである。なぜなら $\mathbf{V}^T \mathbf{M}^T \mathbf{U}$ の要素を $(a_{ij})$ とし、 $\mathbf{S}$ の対角項（特異値）を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ （いずれも非負）とすると $\text{trace}\{\mathbf{V}^T \mathbf{M}^T \mathbf{U}\mathbf{S}\} = \lambda_1 a_{11} + \lambda_2 a_{22} + \lambda_3 a_{33}$ となる。ところが $\mathbf{V}^T \mathbf{M}^T \mathbf{U}$ は直交行列であるから $a_{11}, a_{22}, a_{33}$ の最大値は1であり、そしてそのと

きに $E_1$ は最大になるからである.  $a_{11}, a_{22}, a_{33}$ が1のとき, 他の要素はすべて0となる. よって $V^T M^T U = I$ となる.

以上のことから求める回転行列は

$$M = UV^T \quad (7)$$

として求められる.

### (3) 繰り返し法による精密計算法

簡易法では伸縮・回転・平行移動が独立して誤差最小化に寄与するが, 計測精度を考慮していないという問題がある. これは次のような意味である.

式(4)で重ね合わせの誤差を評価したが, この式は全ての点を同一の重みで取り扱っている. ところが実際には, 座標値は計測値なので, 計測精度が同じではない. 計測精度の高い点は, 低い点よりも大きな重みで評価せねばならないと考えられる. すなわち座標値の分散共分散行列を $\Sigma_x (3n \times 3n)$ とすると重み行列 $W$ は

$$W = (\Sigma_x)^{-1} \quad (8)$$

で表されるので, これを用いて式(4)は

$$E = v^T W v \quad (9)$$

のように書き換えられねばならない. ただし

$$x = [X_1 Y_1 Z_1 \dots X_n Y_n Z_n]^T$$

(変形前の全座標を並べたベクトル)

$$y = [X_1 Y_1 Z_1 \dots X_n Y_n Z_n]^T$$

(変形後の座標を変形前の座標に重ね合わせるように変換した後, それらを並べたベクトル)

としたとき

$$v = x - y \quad (10)$$

である.  $\Sigma_x$ として2回の計測(変形前と後)のいずれかの結果を用いるかで精度が異なる場合がある. しかし, 現実的には2回の計測はほとんど同様に実行される(ほぼ同じ位置から同じ枚数写真が撮影される)ため, 精度差は生じない. 大きく異なる場合には, 計測そのものを見直さなければならない.

式(1)より  $v_i = x_i - sM(y_i - t)$  であるから

$$f_i = sM(y_i - t)$$

とにおいて $v_i$ を初期値の周りでテーラー展開し, 線形化する.

$$v_i + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial s} & \frac{\partial f_i}{\partial \theta} & \frac{\partial f_i}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_i}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_i}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s \\ \Delta \theta \\ \Delta \varphi \\ \Delta \kappa \\ \Delta t \end{bmatrix} = x_i - f_i^0 \quad (11)$$

ここで $f_i^0$ は $f_i$ に初期値(スケール比 $s$ , 回転角 $\theta, \varphi, \kappa$ および平行移動 $t$ のそれぞれの初期値)を代入した値

である.

式(10), (11)を組み合わせると, 次の線形連立方程式が得られる.

$$v + A \xi = e \quad (12)$$

ここで $A$ は式(11)の係数行列を計測点の数だけ並べて構成される行列であり,  $e$ は式(11)の右辺から作られる残差ベクトルである. 式(12)の $v$ を式(9)に代入して得られる最小二乗問題の解は, 次で与えられる.

$$\xi = (A^T W A)^{-1} A^T W e \quad (13)$$

これで得られた解 $\xi$ は, 初期値からの変化量であるから, これを加えて初期値を更新する. そしてそれを新しい初期値として再び線形化を行う. この手順を, 解が収束するまで繰り返す. 最初の初期値としては前節で説明した簡易法の結果を用いる.

## 3. 正負交番載荷試験

### (1) 試験概要

正負交番載荷試験は, 引張側鉄筋が降伏に達する変位を $\delta_y$ とした際の $\delta_y$ を, 加力により2倍, 3倍…と順次漸増させる試験である. 各 $\delta_y$ の変位振幅は正負3回ずつ行う. この載荷は1サイクル目の水平力が最大水平加重の80%以下になるまで継続させる<sup>5)</sup>.

供試体寸法および変位計設置図を図-3に示す. 右図にあるとおり, 供試体の各面を東西南北で表すこととし, 東西(加力軸)方向で交番載荷した.

接触式計測器(変位計)は南北(加力軸直角)方向に当たる側面に5箇所ずつ計10箇所設置し, 供試体の外側にH型鋼でフレームを組み立てて不動点とし, このH型鋼からアームを伸ばして所定の位置の変位を計測した(図-4). 変位計は東西(加力軸)方向の変位を計測している. なお, 今回の計測では変位計に巻込型変位計DP-500C(株式会社東京測器研究所製)を用いており, 計測精度は1/10mmである. 本試験での, 水平力-水平変位関係の履歴曲線を図-5に示す(10 $\delta_y$ で載荷終了).

### (2) 計測方法

#### a) ターゲット設置

反射ターゲットは, 微細な球形ガラス(ガラスビーズ)をシート中央の円形部に一層ちりばめたものである. また, 円形部を周囲を黒色無反射塗料で印刷している(図-6). ガラスビーズをストロボ撮影した場合, ガラスビーズは反射し, 周囲はストロボ光を吸収するため図-7のように円形部が浮き上がった画像を得ることができる. ターゲットの大きさは, 画像上においてその直径が4~5画素以上の像を得ることが必要である<sup>4)</sup>. 撮影距離に応じてカメラの分解能は低下

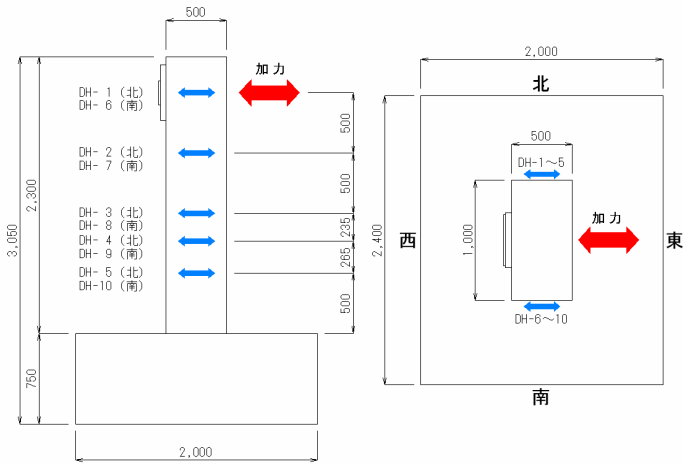


図-3 供試体寸法および変位計設置図

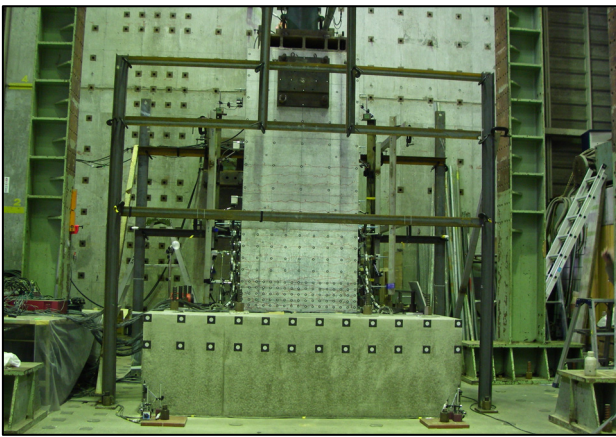


図-4 供試体および計測機器設置状況

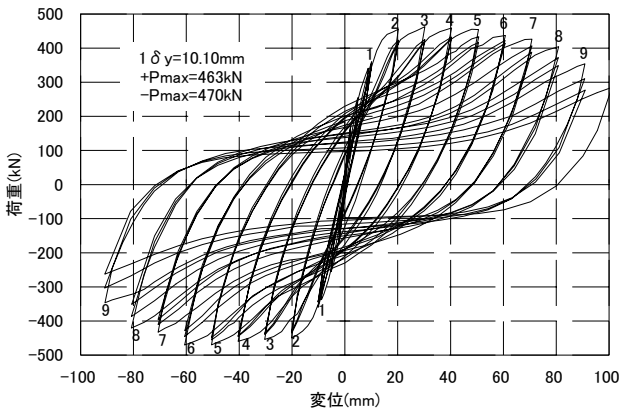


図-5 水平力-水平変位関係の履歴曲線

するため、必要画素数を得るためにターゲット径を検討する必要がある。

今回の試験では、ターゲットを2種類使用しており全て供試体西面に設置した。本方法では3次元座標を得ることが可能であるから、このターゲットの面外方向変位と変位計とを比較することとした。

まず橋脚部分には反射面の直径10mm、ターゲット全体で直径20mmの円形ターゲットを使用した。理由として、供試体のひび割れスケッチを実施するため、小さなターゲットを用いる必要があった。一方、フーチング部分には反射面の直径30mmターゲット全体で50×50mmの矩形ターゲットを使用した。これは、フーチン

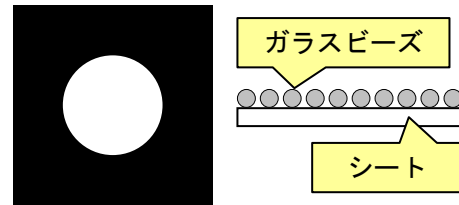


図-6 反射ターゲットの模式図

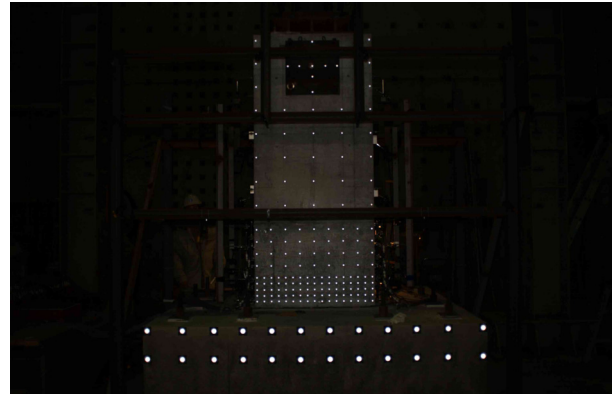


図-7 ストロボ撮影したターゲット

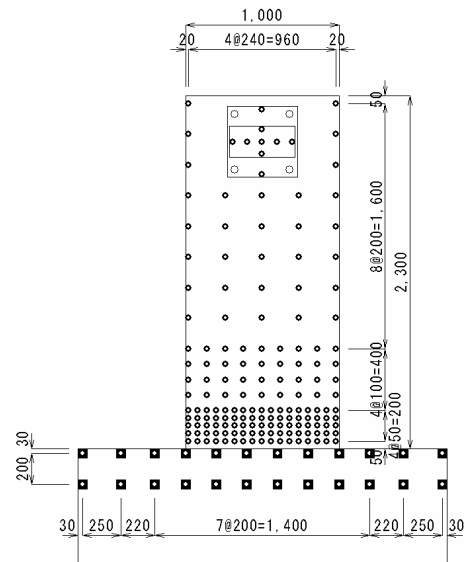


図-8 ターゲット設置位置

グ部には設置に関する制約がないため、大きなターゲットを使用することで、検出精度の向上を図ったものである。ターゲットは計184枚使用し、橋脚基部にはターゲットを密に設置した(図-7)。

#### b) 撮影方法

カメラにはNikon製D1X(有効画素数:590万画素, CCDサイズ:23.7×15.6mm)を使用した。レンズには焦点距離20mmの広角レンズを使用している。広角レンズを使用することで、1枚の画像に多くのターゲットを写せるという利点がある。反面、レンズ歪みが大きくなるため、レンズ歪み補正計算を行う。

ターゲットを撮影する場合、カメラの絞りを最大に絞って、シャッタースピードを上げた状態でストロボ撮影を行う。この方法で撮影すると画像全体は暗く写るが、ターゲットは反射剤が塗布してあるため鮮明に

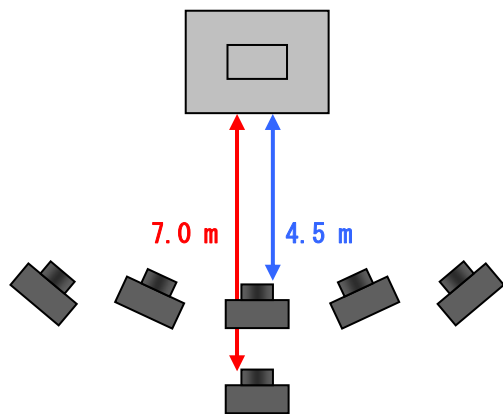


図-9 撮影位置

写る(図-8)。よって、白黒の濃淡がはっきりすることからターゲットの認識精度が向上する。

撮影は各ケースのピーク荷重時に、荷重をホールドした状態で行い、6箇所から撮影した(図-9)。この時カメラを90度ずつ回転させて計4枚撮影する。カメラを回転させながら撮影することで、解析時に正確なレンズ歪の補正を行うことが可能となる。

### (3) 計測結果

本方法での解析結果と供試体南面に設置した変位計(DH-1~5)の計測結果を比較したグラフが図-10である。グラフは正負交番荷重試験の $+5\delta_y \sim +8\delta_y$ 間の計測結果を抜粋して比較したものである。今回の試験では、変位計とターゲットの設置高さが異なっているため、単純に比較はできないが、本方法による計測結果が変形の進行を精度良く捉えていることがわかる。変位計と比較した誤差は0.15~0.45mmであった。誤差が増大するのは、橋脚基部のコンクリートが剥離する $7\delta_y$ 以降である。これは、荷重によりコンクリートが剥離した際、橋脚基部のターゲットが剥がれてしまったためと考えられる(図-11)。ターゲットが剥がれてしまったことにより、フーチングにあるターゲット間の距離が大きくなることでネットワークが弱くなり、橋脚基部に近い範囲で誤差が大きくなっているものと思われる。

## 4. 供試体変形の可視化

本方法では、解析によりターゲットの3次元座標を算出できることが特徴である。

解析したターゲットの3次元座標を利用して、鉄筋の座屈による橋脚基部のコンクリート膨張を可視化した。供試体のモデル化には3次元CGモデラーソフトウェアであるNf Designを使用している。本ソフトはXYZの座標データを元にメッシュ化やポリゴンデータ生成を行うことができるソフトウェアである。

今回の試験において、内部鉄筋の座屈が発生した $+7\delta_y \sim +7\delta_y$  2サイクルまでの変形モデルを図-

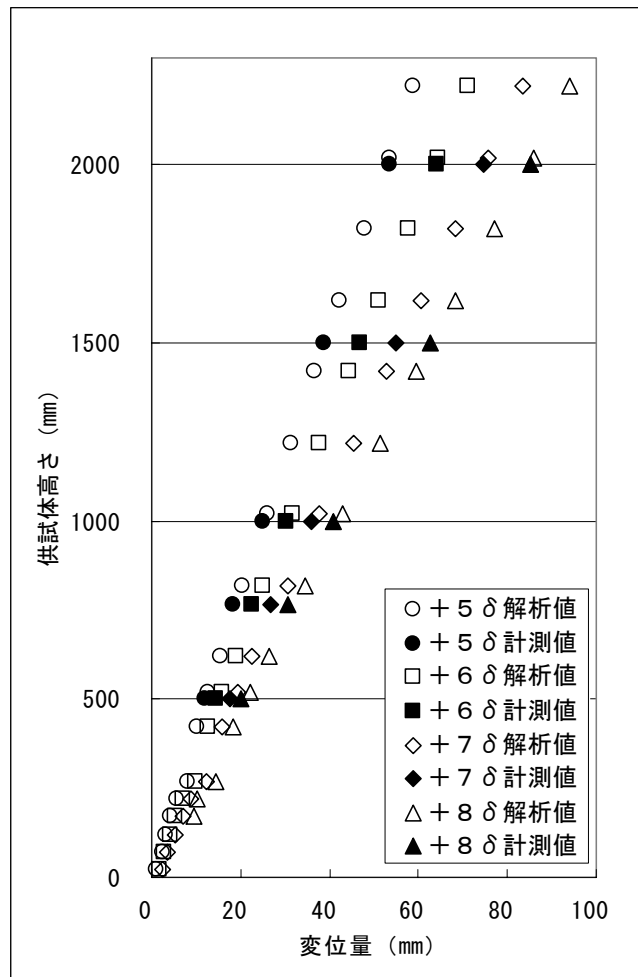


図-10 解析結果と計測結果の比較(抜粋)

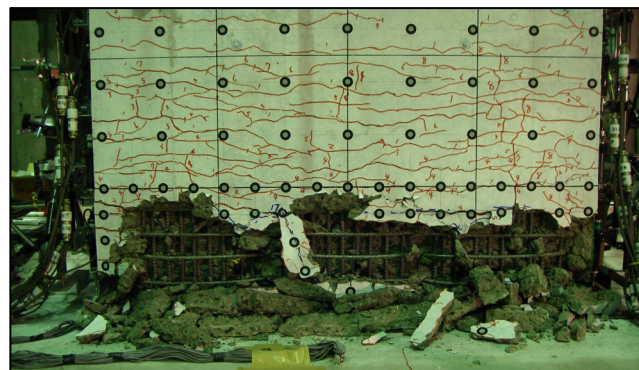


図-11 剥がれたターゲット(+ $8\delta_y$ )

12に示す。変形モデルをみると、供試体西面の基部では隅角部からコンクリートの膨張が発生していることから、鉄筋の座屈が $+7\delta_y$  2サイクルの時点で、端部から発生したことがわかる。続く $+7\delta_y$  3サイクルの時点で、中央部の鉄筋も座屈したことが読み取れる。

今回は50mm間隔でターゲットを設置しているため、変形が粗く表現されているが、コンクリートの膨張過程を精度良く捉えることができた。

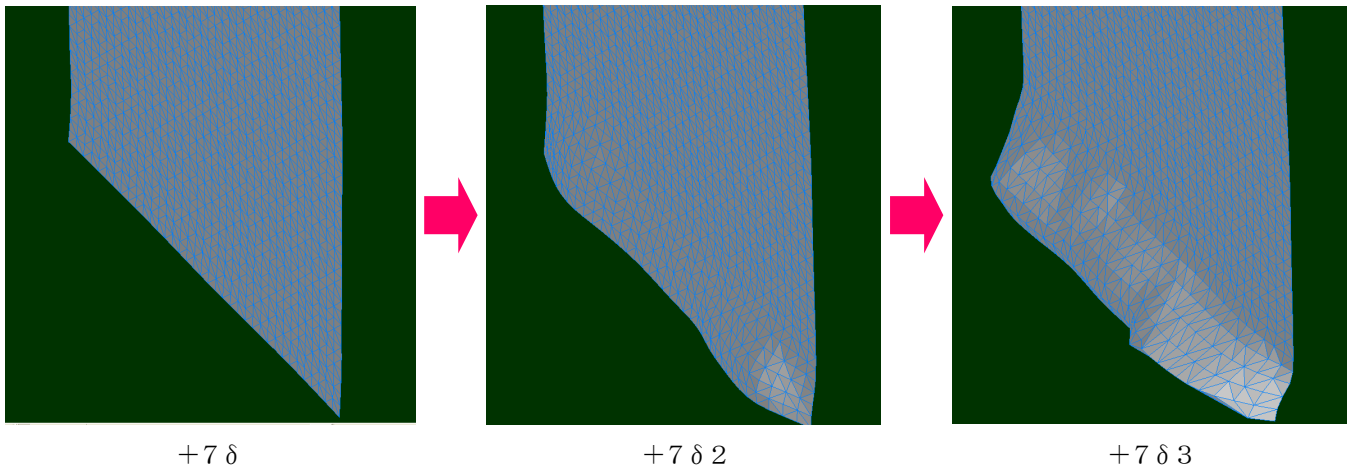


図-12 変形挙動のモデル化

## 5. まとめ

今回の正負交番載荷試験において、鉄筋座屈に伴うコンクリート膨張・破壊過程を精度良く3次元可視化することを確認した。3次元座標データを元にモデル化することで、変形挙動を可視的に評価することが可能となる。3次元的な挙動を示す構造実験において、本方法は有効な測量手法であるといえる。また、計測機材がデジタルカメラとターゲットのみであり、安価で簡便という利点もある。

一方で、撮影時には荷重をホールドする必要がある。これは、同一条件で複数箇所から撮影を行う必要があるからである。このため、連続的な計測を行うには撮影箇所の数だけカメラ台数が必要である。今回の計測に当てはめると24台のデジタルカメラが必要となる。これは現実的な測量方法とはいえない。

加えて、撮影後に解析を要することから、結果算出までにタイムラグを生じる。解析時間は、写真枚数・設置ターゲット数および使用するパソコンのスペックによっても異なるが、1時間～1時間半は必要である。構造実験においてリアルタイム性は計測機器に求められる重要な要素の一つであるため、解析時間の短縮は、今後の展開における重要な課題といえる。このため、解析に要する時間を短縮する方法も開発が進んでおり、この中でターゲットを自動認識する方法が実用化に一番近いと思われる<sup>6)</sup>。

計測精度は、ターゲット間距離によって変化することが判った。3. (3)にも挙げたとおり、ターゲット剥離によるターゲット点間距離の増大は精度の低下へと繋がっている。本方法では「ターゲット数=データ数」となるため多点のデータ取得が可能である。モード解析等の3次元モデルへのデータ提供には効果を発揮できるが、従来の計測機器の代替には精度が足りないものと感じている。しかし、デジタルカメラの進化に併せて分解能も向上することから、今後も精度向

上が期待できる。

従来の計測機器に代替するためには、計測の連続化・解析時間の短縮が急務であり、実用的な3次元測量方法として確立させるため、今後も研究開発を進めていきたい。

**謝辞：**本論文作成にあたり多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

特に、故秋本圭一先生には個人的に精密写真測量の可能性について手取り足取りと教えて頂きました。また個々の試験計測においても、弊社技術研究所までご足労いただき、細部にわたりご指導いただきました。諸般の事情により投稿が遅れてしまい、本編をご覧になっていただけないのが非常に残念でなりません。

## 参考文献

- 1) 大西有三, 張春, 林訓裕: 岩盤変位計測における精密写真測量手法の適用, 第44回地盤工学シンポジウム, pp.139-144, 1999年.
- 2) 塩崎正人, 秋本圭一: 精密写真測量を用いたアラミドロッドの微小変形計測, 平成16年度土木学会年次学術講演会, 2004年9月.
- 3) 秋本圭一, 服部進, 大西有三, 三浦悟: 画像計測法のトンネル内空形状計測への応用, 土木学会論文集 No.687/III-56, pp.289-301, 2001年.
- 4) 塩崎正人, 戸村豪治, 木山保, 大西有三, 西山哲, 矢野隆夫: 精密写真測量技術を用いた施工法面の変位モニタリングシステムに関する研究, 第48回地盤工学シンポジウム, pp.287-292, 2003年.
- 5) 独立行政法人土木研究所: 橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)【橋脚の正負交番載荷試験方法及び振動台実験方法】, 土木研究所資料第4023号, pp.20, 2006年8月.
- 6) 服部進, 秋本圭一, 井本治孝: コード付きターゲットを使った工業画像計測の自動化, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.9, pp.2011-2019, 2001年.

(2007.5.18受付)