

供試体変形計測への精密写真測量の適用

Application of Photogrammetry to Measurement of Deformation for Specimens

塩崎 正人 MASANDO SHIOZAKI

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

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。また、変形過程を3次元で可視化することができたためここに報告する。

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

Photogrammetry is the technique to measure the form of 3-D objects by analyze the pictures taken by digital cameras of reflective targets on the objects. Conventional 1-D measurements need three devices to measure the 3-D deformations, however Photogrammetry analyzing pictures can measure the deformations by one device. We tried to apply this technique for measuring 3-D deformation of a concrete specimen which the failure mode is buckling of reinforcement under the cyclic loading. 3-D deformations are necessary to clarify the behavior of specimen. As the results, it found that this technique has an accuracy and can visualize the process of deformation.

Key Words: 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¹⁾。

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ある。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 π 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²⁾。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こることで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、上述の煩

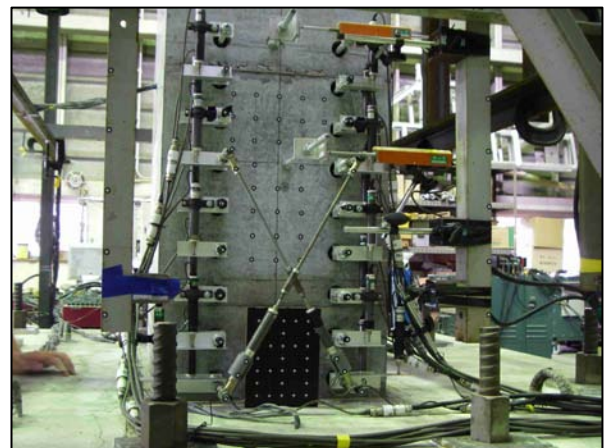


図-1 接触式計測器の設置例

雑さを避けることができるうえ、小さなシートであるためターゲット同士で干渉が起こることなく、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、本方法を用いた変位計測を実施し、変形挙動を可視的に捉えた。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。この結果について述べる。

2. 変位計測方法³⁾

(1) 計測法の概要

本方法による変位計測は次のように行う。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。この差が変位量である。

ところが、精密写真測量には、対象物の相対的形状は正確に測れるが、絶対座標は測れないというという課題がある。すなわち、全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（あらかじめ座標が明らかでない点）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ことで、上述のような課題を解決することができる。

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 x_i, y_i

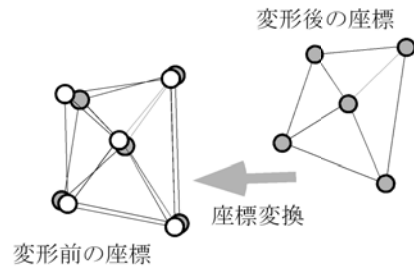


図-2 座標計測値の重ね合わせ

($i=1, \dots, n$) とする。両者の関係は、次のように表される。

$$x_i = sM(y_i - t) + v_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

ここで s はスケール比 (伸縮の割合), M は座標回転行列, t は平行移動ベクトル, 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ように定める。まずそれぞれの計測点の重心座標を x_g, y_g とし、座標系の原点を重心に移動させると、座標値は $x_i - x_g, y_i - y_g$ となる。これを改めて x_i, y_i と置き直すとスケール比 s は

$$s^2 = \frac{\sum x_i^T x_i}{\sum y_i^T y_i} \quad (2)$$

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合わせ、改めて y_i とおく。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も終わっている。

最後に回転行列 M を求める。重ね合わせの誤差は

$$v_i = x_i - My_i \quad (3)$$

で表されるから、誤差の二乗和を E とすると

$$E = \sum v_i^T v_i = \sum (x_i - My_i)^T (x_i - My_i) \\ = \sum x_i^T x_i - 2 \sum x_i^T My_i + \sum y_i^T y_i \quad (4)$$

となる。ここで M は直交行列であるから $M^T M = I$ (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 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。

$$E_1 = \sum x_i^T My_i = \sum \text{trace} \{ x_i (My_i)^T \} \\ = \text{trace} \{ (\sum x_i y_i^T) M^T \} = \text{trace} \{ NM \} \quad (5)$$

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

この 3×3 行列 N を $N = USV^T$ と特異値分解する。ここで U, V は直交行列, 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

$$E_1 = \text{trace}\{USV^T M^T\} = \text{trace}\{V^T M^T US\} \quad (6)$$

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原理を用いた。これが最大になるのは $V^T M^T U = I$ となるときである。なぜなら $V^T M^T U$ の要素を (a_{ij}) とし, 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 $\text{trace}\{V^T M^T US\} = \lambda_1 a_{11} + \lambda_2 a_{22} + \lambda_3 a_{33}$ となる。ところが $V^T M^T U$ 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, この式ではすべての点が同一の重みで取り扱われている。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

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

のように書き換えられなければならない。ただし

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

(変形前の全座標を並べたベクトル)

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

(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

$$\mathbf{v} = \mathbf{x} - \mathbf{y} \quad (10)$$

である。 Σ_x として 2 回の計測 (変形前と後) のどちら

の結果を用いる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 $\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i - sM(\mathbf{y}_i - \mathbf{t})$ であるから

$$\mathbf{f}_i = sM(\mathbf{y}_i - \mathbf{t})$$

とおいて \mathbf{v}_i を初期値の周りでテーラー展開し, 線形化する。

$$\mathbf{v}_i + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial s} & \frac{\partial f_i}{\partial \theta} & \frac{\partial f_i}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_i}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{t}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s \\ \Delta \theta \\ \Delta \varphi \\ \Delta \kappa \\ \Delta \mathbf{t} \end{bmatrix} = \mathbf{x}_i - \mathbf{f}_i^0 \quad (11)$$

ここで \mathbf{f}_i^0 は \mathbf{f}_i に初期値 (スケール比 s , 回転角 θ, φ, κ および平行移動 \mathbf{t} のそれぞれの初期値) を代入した値である。

式 (10), 式 (11) を組み合わせると, 次の線形連立方程式が得られる。

$$\mathbf{v} + A \boldsymbol{\xi} = \mathbf{e} \quad (12)$$

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, \mathbf{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 \mathbf{v} を式 (9) に代入して得られる最小二乗問題の解は式 (13) で与えられる。

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

これで得られた解 $\boldsymbol{\xi}$ 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, 加力装置により実験供試体に, 直接, 力または変形を正負交番に加えて載荷する実験と定義される。載荷方法は, 引張側鉄筋が降伏に達する変位を δ_y とし, この δ_y を 2 倍, 3 倍... と漸増させながら変位振幅を各 3 回ずつ行うものである。載荷は 1 サイクル目の水平力が最大水平加重の 80% 以下になるまで漸増させる⁴⁾。

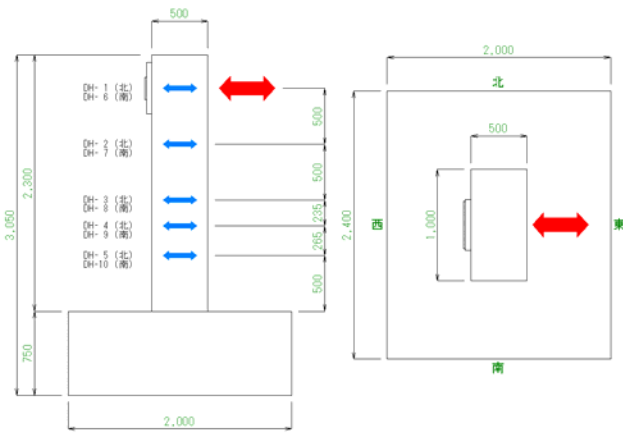


図-3 供試体寸法および変位計設置図

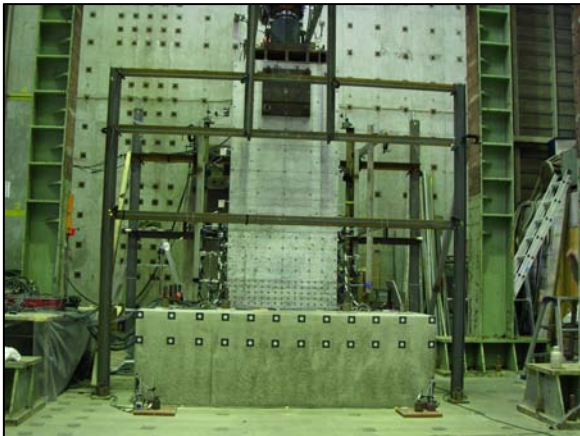


図-4 供試体および計測機器設置状

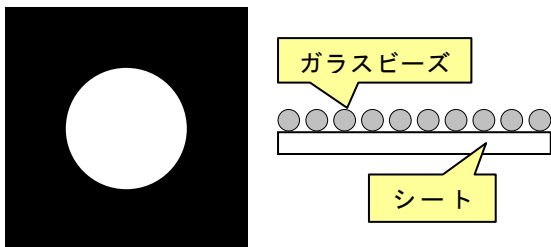


図-5 反射ターゲットの模式図

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、東西方向で交番載荷した。

接触式計測器（変位計）は南北方向に計10箇所設置し、供試体の外側にH鋼でフレームを組み立てて不動点としている。このH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）。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。

（2）計測方法

a) ターゲット設置

反射ターゲットは、微細な球形ガラスをシートに一層

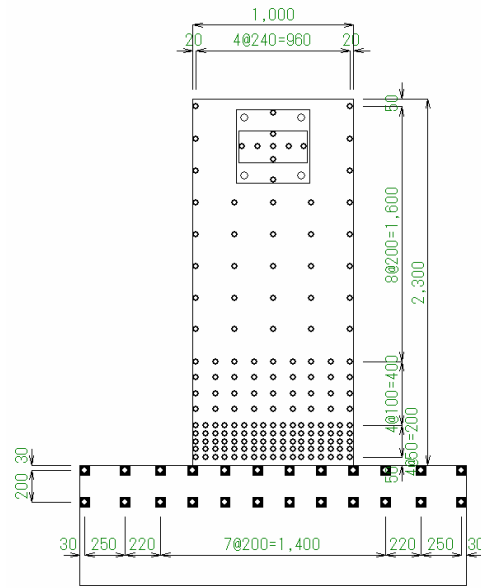


図-6 ターゲット設置位置

ちりばめたものである。シートには黒色無反射塗料を印刷している（図-5）。解析では円の重心位置を求めるため、反射率は計測精度と密接な関係があるといえる。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⁵⁾。このため撮影距離に応じてターゲット径を変更することとなる。

今回の試験では、ターゲットを2種類使用しており、すべて供試体西面に設置した。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。フーチング部には設置に関して制約がなく、大きなターゲットを使用し、検出精度を向上させることを意図している。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-6）。

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写る（図-7）。よって、白黒の濃淡がはっきりすることから

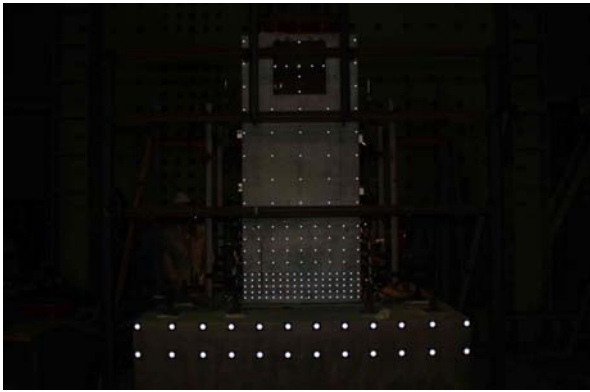


図-7 ストロボ撮影したターゲット

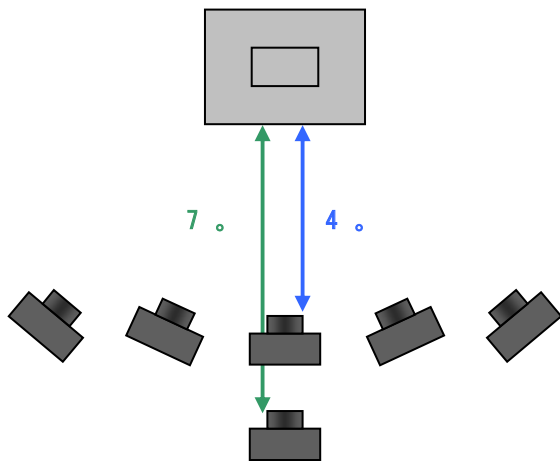


図-8 撮影位置

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、荷重を保持した状態で行い、6箇所から撮影した(図-8)。この時カメラを90度ずつ回転させて計4枚撮影する。1つの撮影箇所から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-9である。グラフは正負交番荷重試験の+5 δ_y ～+8 δ_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。

(4) 考察

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 δ_y 以降である。これは、荷重によりコンクリー

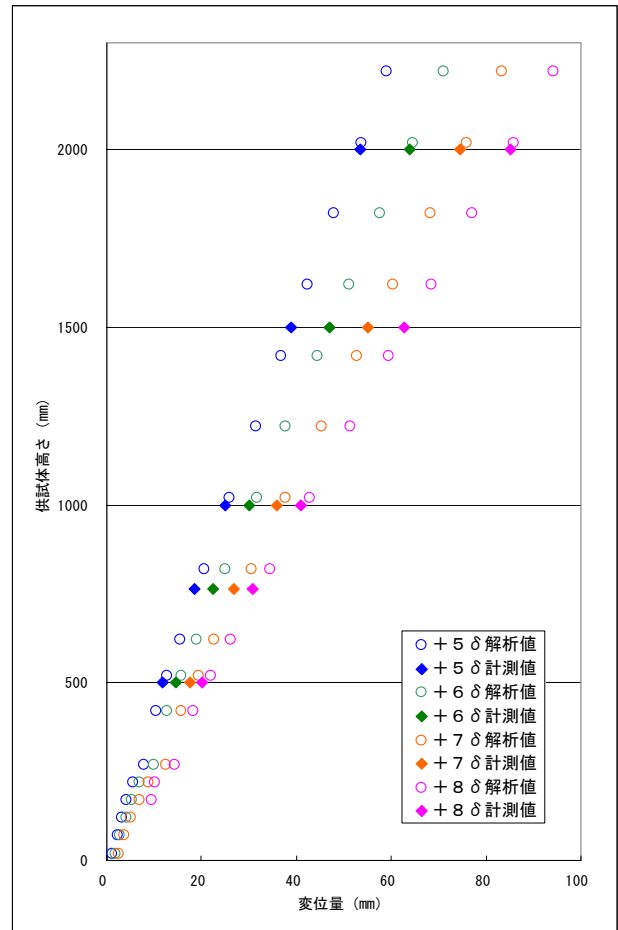


図-9 解析結果と計測結果の比較



図-10 剥がれたターゲット (+8 δ_y)

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-10)。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。

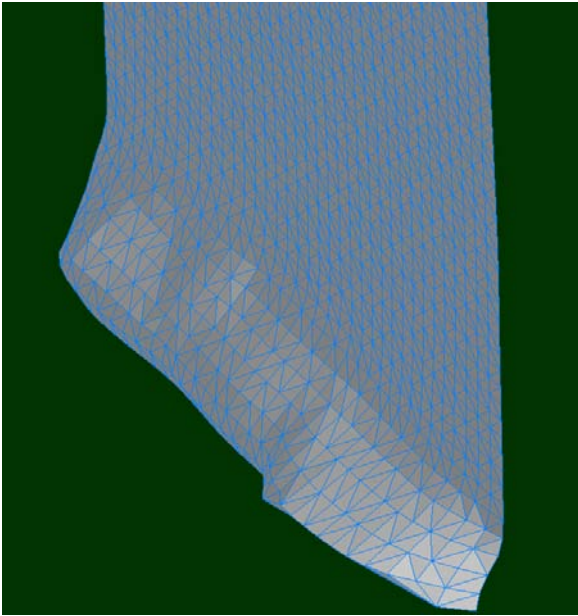


図-11 変形挙動のモデル化 ($7\delta_y/3$)

4. まとめ

今回の正負交番載荷試験のような3次元的な挙動を示す構造実験において、以下の知見を得た。

- ① 平面的なターゲットを使用することで、設置の制約を受けずに変位計測が可能である。
- ② デジタルカメラとターゲットのみで計測可能であり安価である。
- ③ 撮影時に載荷を保持する必要があるため、連続した撮影が難しい。
- ④ 座標算出には解析が必要なためリアルタイムに変形を捉えることができない。

平面的なターゲットを利用することで、同時に多点の3次元座標を取得することができるため、供試体全体の挙動を把握することが容易である。ターゲットの3次元座標値をモデル化すると、鉄筋座屈によるコンクリートの膨張を可視化することができるため、挙動の把握はより一層容易となる(図-11)。

一方で、撮影時には載荷を保持する必要がある。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。

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性能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1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⁶⁾。

従来の計測機器に代替するためには、計測の連続化と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：本論文作成に当たり多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。株式会社タクモ：清水哲也氏と東京理科大学：河野竜之氏、広瀬康之氏には、実験の準備やデータ解析作業に多大なご協力をいただきました。深く謝意を表します。

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) 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.7-29, 2006年8月
- 5) 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, 2003年
- 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