

画像計測法による鉄筋コンクリート部材の 変形量の測定精度

宮内 克之*・秋本 圭一**・服部 進***

Precision and Accuracy of Deformation Measurement of RC Members

by Vision Metrology

Katsuyuki MIYAUCHI*, Keiichi AKIMOTO **, Susumu HATTORI ***

ABSTRACT

Monotonic loading test for RC beams and cyclic loading test for RC columns were performed, and their deformation characteristics were measured by vision metrology method. Based on the test results, precision and accuracy of this measurement method were discussed.

It was cleared that the displacements could be measured by this method with high precision and high accuracy, preparing enough number of CCD visions and adopting a correct cut level for gross error at bundle adjustment.

キーワード：画像計測, デジタルカメラ, 計測精度, RCはり, RC柱

Keywords : Vision Metrology, Digital Camera, Precision, RC Beam, RC Column

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 部材の荷重試験に際して、変形特性の測定には主として変位計とひずみゲージが使用されている。例えば平均曲率を算定するための変位の計測には、部材に設置した埋め込みボルトに変位計を設置して測定¹⁾するのが一般的である。柱部材における主鉄筋の基礎からの抜き出し量を直接測定する方法としては、変位計を用いた測定¹⁾や鉄筋に連動したワイヤーの伸び量を測定する方法²⁾が採用されている。ひび割れ幅の測定は目視または ϵ ゲージを使用する機会が多いようである。

最近では、デジタルカメラを用いて測定点の変位を測定し、ひずみを算出している例³⁾⁻⁵⁾も見られるが、いずれの方法も精度的に十分満足のいくものではない。

また、レーザースペックル法を用いて 1μ 程度の精度で変形を測定した例⁶⁾も見られるが、測定が狭い範囲に限定されるという難点がある。

一方で耐震設計、特に性能規定型の設計や耐震補強法を精度良く確立するためには、部材の塑性域での変形性状を詳細に検討、把握しておくことが必要である。ところが、RC部材の荷重試験を実施する際には、荷重および荷重点変位が計測されるのが一般的であり、平均曲率、ひび割れ性状、柱部鉄筋の基礎からの抜き出し量などは、通常では測定が難しいことに加えて、経費と労力がかかり、計測される機会は多くないのが現状である。しかし、これらの変形特性はRC部材の塑性域での挙動を解明するためには、その詳細を知る必要がある。写真測量を応用した画像計測法(以後単に

*建設環境工学科

**四国職業能力開発大学校

***情報処理工学科

画像計測法)を用いると、同時に多数の測定点を観測でき、この問題の解決策の一つとして有望と考えられる。画像計測法に必要な機材は、高精度のデジタルカメラと処理用のコンピュータのみである。最近では市販されている高精度のデジタルカメラも安価となり、RC部材の変形特性把握に関して画像計測法を採用する環境は整いつつあるものと考えられる。

そこで本研究は、今後画像計測法によってRC部材の変形特性を計測する機会が増えるであろうことを踏まえ、画像計測法を用いることによるRC部材の変形量の測定精度について、撮影条件が悪く測定精度の低下が懸念される場合と、撮影条件が良好で測定精度が確保しやすい場合に関して検討したものである。

2. 画像計測法

2.1 画像計測法の原理

図-1に示すように計測対象物の測定点に専用の反射ターゲットを貼り付け、対象物をいろいろな方向からデジタルカメラでストロボを用いて撮影する。その際、それぞれの測定点が複数の画像に写るように撮影する。このときある測定点について考えると、測定点 P とそのCCD面上での像 p およびカメラレンズの中心 O の3点は一直線上にある。この関係は、測定点(ターゲット)の対象空間座標 $P(X, Y, Z)$ と画像座標 $p(x, y)$ を用いて式(1)の共線条件式で表される⁷⁾。

$$\begin{aligned}
 &x + \Delta x \\
 &+ c \frac{M_{11}(X - X_0) + M_{12}(Y - Y_0) + M_{13}(Z - Z_0)}{M_{31}(X - X_0) + M_{32}(Y - Y_0) + M_{33}(Z - Z_0)} = 0 \\
 &y + \Delta y \\
 &+ c \frac{M_{21}(X - X_0) + M_{22}(Y - Y_0) + M_{23}(Z - Z_0)}{M_{31}(X - X_0) + M_{32}(Y - Y_0) + M_{33}(Z - Z_0)} = 0 \\
 &\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

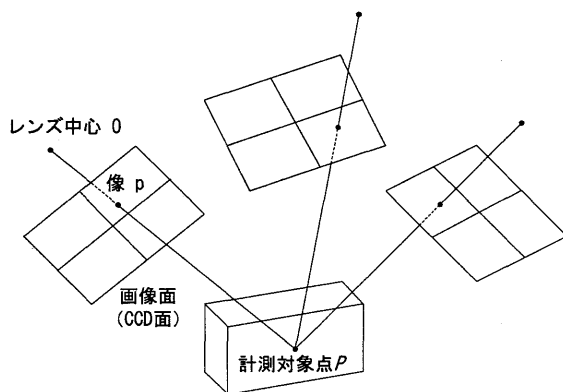


図-1 画像計測法の原理

ここで、 (X_0, Y_0, Z_0) は撮影点(カメラレンズの中心)の座標、 M_{ij} は対象空間座標系(後述する図-3に示す基準板に基づいた座標系)からのカメラ(CCD面の座標系)のずれをあらわす対象空間座標系での回転行列、 Δx および Δy は主点(レンズの中心からCCD面に下ろした垂線の足)の座標を含めたレンズひずみの項、 c は画面距離(一般的にはカメラの焦点距離に一致する)である。レンズひずみモデルとしては、式(2)で表されるモデルを用いた⁸⁾。

$$\begin{aligned}
 \Delta x = &-x_p + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x - x_p) \\
 &+ P_1(r^2 + 2(x - x_p)) + 2P_2(x - x_p)(y - y_p) \quad (2-a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta y = &-y_p + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y - y_p) \\
 &+ 2P_1(x - x_p)(y - y_p) + P_2(r^2 + 2(y - y_p)) \quad (2-b)
 \end{aligned}$$

$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \quad (2-c)$$

ここで、 (x_p, y_p) は主点の画像座標である。また、レンズひずみモデルにおいては、レンズひずみの中心と主点位置が一致するものと仮定している。 K_1, K_2, K_3 は放射方向のひずみを表す係数、 P_1, P_2 は接線方向のひずみを表す係数である。

全写真の全ての像に関して式(1)で表される共線条件式を作り、近似値の周りに線形化し、残差(図-2参照)の平方和が最小となるように、繰返し最小二乗法を適用して測定点の対象空間座標 $P(X, Y, Z)$ の最確値を求める。本研究においては、レンズひずみモデルを表す係数、主点の座標値および画面距離の内部標定要素8個($c, x_p, y_p, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2$)も同時に求める自己校正付バンドル調整法を採用している。

2.2 測定精度に影響を及ぼす要因

画像計測法における測定精度に影響を及ぼす主要な要因は、①写真に写し込まれているターゲット像の良否

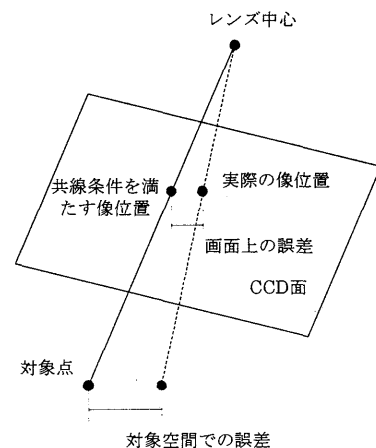


図-2 共線条件からの像のずれ

および②1つのターゲット（測定点）像の数，すなわち各ターゲットが何枚の写真に写っているかである。

このうち写真に写し込まれているターゲット像の良否については，ストロボ光の斜め入射に対してのターゲットの反射特性および CCD 面上におけるターゲット像の大きさが関係する．本研究で使用したターゲットの斜め入射に対する反射特性は極めて良好であり，約 70° の入射角に対しても十分な反射特性を有している⁹⁾．また，CCD 面上でのターゲット像の大きさは，使用するターゲットの大きさ，CCD 画素の大きさ，使用するカメラレンズの焦点距離および撮影距離の影響を受ける．筆者らが使用している画像処理システムの場合，CCD 面上での像の大きさは，画素数にして 10～15 程度が最適であることが確認されている¹⁰⁾．このような像が得られるよう，使用カメラの特性（1 画素の大きさ 0.0078×0.0078 mm），撮影スペース（2～4 m）等を考慮して，後述するように， $\phi 5$ mm のターゲットおよび焦点距離 18 mm のレンズを採用している．

一方ターゲット像の数に関しては，誤差は撮影する写真の枚数（各ターゲットが写っている写真の枚数）の平方根にほぼ比例する¹¹⁾．したがって，一般に写真の枚数は多ければ多いほど精度は向上するものと考えられる．本研究の測定対象物の場合，表裏それぞれ 5ヶ所から 2 枚ずつ計 10 枚（表裏合わせて 20 枚）撮影すれば十分と考えられる¹⁰⁾．しかし後述写真-1を見てもわかるとおり，本研究で使用した RC はりの実験装置の場合，撮影対象物と撮影位置の間に支柱等の障害物が存在しており，5ヶ所からの撮影のみでは精度の低下が予想されるため，9ヶ所（表裏合わせて 18ヶ所）からの撮影とした．RC 柱の実験の場合，撮影対象物と撮影位置との間に障害物が存在しないので，5ヶ所から 10 枚の撮影とした．また，座標値を求める際の交会（前方交会）精度を向上させるためには，なるべく上下，水平方向に角度を有した（ 90° に近い角度が望ましい）写真を撮影する必要がある．

3. RC はりの変形量の測定精度

3.1 実験概要

3.1.1 実験計画

計測の対象としたのは，表-1に示す 3 体の RC はりである．曲げ破壊，せん断破壊といった破壊形式によらず画像計測法による測定が可能であることを確認するため，実験要因としては引張鉄筋比およびせん断補強筋の有無とした．また，スケール調整を行うための基準尺を使用せず，基準板の測点間の距離を基準として簡易的にスケール調整した場合の精度を検証するため基準尺の有無についても実験要因とした．試験体

表-1 RC はりの実験計画

試験体	引張鉄筋	せん断補強	基準尺
B1	2-D16	D6-100mm	無
B2	2-D13	D6-100mm	有
S1	2-D16	—	有

表-2 基準尺の長さ (mm)

番号	長さ	番号	長さ	番号	長さ
①	958.934	③	539.796	⑤	338.619
②	957.980	④	540.661	⑥	346.355

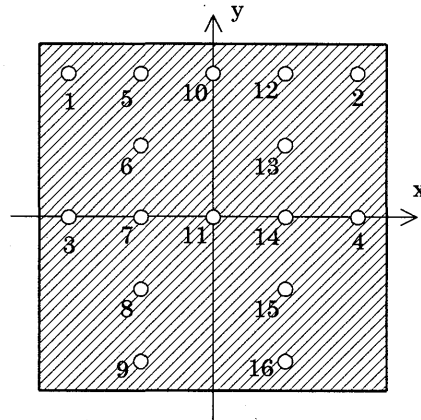


図-3 基準板の測点の配置

表-3 基準板の測点間の距離 (mm)

測点間	基準板 A	基準板 B
1-2	198.900	220.50
3-4	198.725	—

表-4 鉄筋の機械的特性 (RC はり用)

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D16	395	573	182
D13	416	586	171
D6	(295)	566	189

表-5 コンクリートの強度試験結果 (RC はり用)

養生	圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)
標準	31.2	25.1
現場	29.9	22.6

B1 以外に関しては、基準尺を 6 本（長さ約 1000 mm の尺 2 本，約 500 mm の尺 2 本，約 300 mm の尺 2 本）設置した。実験に使用した基準尺の長さを表-2 に示す。また、外部標定を行うための基準板の測点配置を図-3 に、簡易的なスケール調整を行った際に使用した基準板の測点間の距離を表-3 に示す。

試験体の形状寸法の一例（B1）を図-4 に示す。引張鉄筋には D16，D13（SD345），せん断補強筋には D6（SD295A）を使用した。また、コンクリートには呼び強度 24 のレディーミクストコンクリートを使用した。鉄筋の機械的特性を表-4 に、コンクリートの強度試験の結果を表-5 に示す。

荷荷は万能材料試験機に曲げ試験用の荷荷台をセットして二点对称集中荷荷とした。荷荷方法は、引張鉄筋が降伏するまでは荷重制御とし、引張鉄筋が降伏した後はスパン中央のたわみを基準とした変位制御とした。荷荷中はスパン中央および両支点的変位（B1 においては荷荷点も計測）を変位計により測定した。

3.1.2 測定点の設置

RC はりの変形量を計測するための測定点には、直径 5 mm の専用の反射ターゲットを貼り付けた。測定点の設置位置を図-5 に示す。表側には、はり高中央、上下縁から 55 mm の位置にφ6 mm の全ネジボルトをはりに貫通して設置し、これに専用の反射ターゲッ

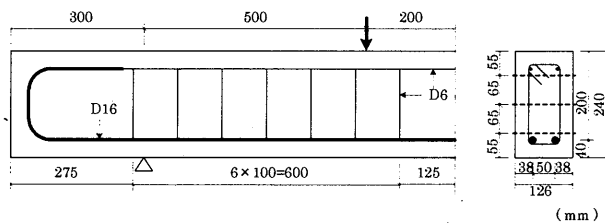


図-4 RC はり試験体の形状寸法

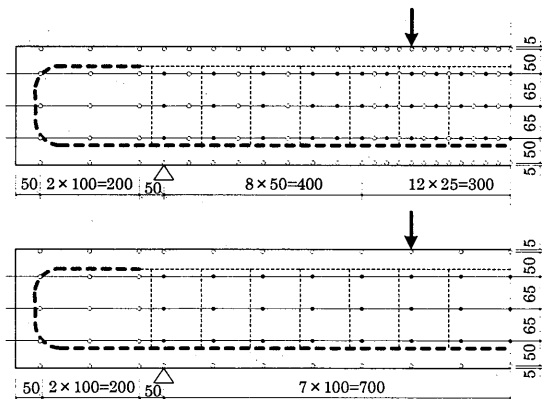


図-5 測定点の設置位置（上段：表，下段：裏）
白丸：試験体表面に設置
黒丸：貫通ボルトに設置

トを貼り付けた。はりの上下縁から 5 mm，はり高中央および上下縁から 55 mm の位置にはコンクリート表面にも反射ターゲットを貼り付けた。はりの裏側に関しては、はり高中央，上下縁から 5，55 mm の位置に、軸方向に 100 mm 間隔で貼り付けた。さらに、荷荷前後の相対変形量を求める際の不動点とするため、荷荷台にも表裏合わせて 72 点の測定点を設置した。また、試験体の表裏で撮影された写真を接続するために、はり試験体の両端断面およびその傍らに設置した鋼材にも測定点を設けた（写真-1 参照）。

3.1.3 撮影方法

外部標定を行うための基準板 A（写真-1 中の黒板）を試験体の傍らに設置し、左斜め約 60°の上下，左斜め約 40°の上下，正面，右斜め約 40°の上下，右斜め約 60°の上下の 9 カ所から 2 枚ずつ，計 18 枚の写真を撮影した。なお本研究においては、カメラパラメータも同時に求める自己校正付バンドル調整法を採用している。したがって、カメラパラメータ算定の精度向上のため、同一位置の撮影においては、それぞれカメラを 90°回転させた。はりの裏側についても同様に撮影を行い、計 36 枚の写真を 1 セットとした。撮影

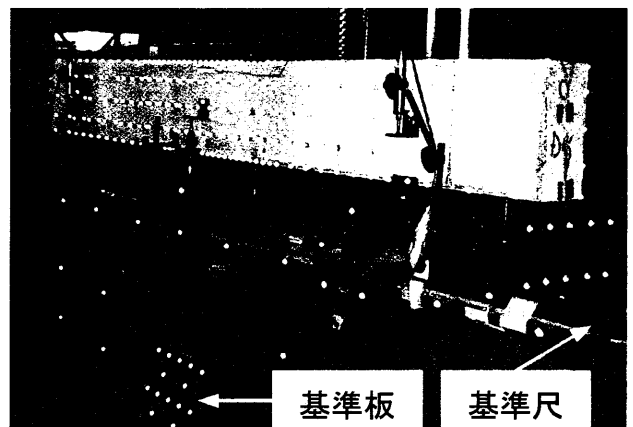


写真-1 試験の様子（RC はり）

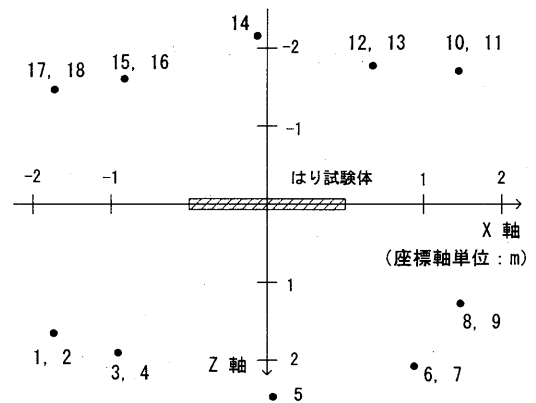


図-6 撮影位置（RC はり試験：平面）

距離は約 2~4m である。撮影位置を図-6 に示す。

写真の撮影は、載荷前の状態（以下、基準状態）および所定のたわみについて行った（計測ステップについては図-7 参照）。使用したカメラは、約 600 万画素のデジタルカメラで、撮影スペースの関係で焦点距離が 18mm のレンズを採用した。撮影は絞りをできるだけ絞り、ストロボを用いて行い、画像を撮影段階で可能な限り 2 値化し精度の向上を図った。撮影に要した時間は、1 セット 36 枚で 3~5 分程度であった。

3.2 変形量の計算方法

3.2.1 座標計算の方法

各計測ステップにおける 1 セット 36 枚の写真から、以下の手順により各測定点（ターゲットの中心）の三次元座標値を算出した。

(1) 外部標定要素の取得

基準板（写真-1 中の黒板）に設置された 16 点のターゲット（座標値はあらかじめ測定されてわかっている。）の像から、以下の手法により各々の写真の外部標定を行った。

- 1) DLT(Direct Linear Transformation)によって、16 点のターゲットの空間座標から外部標定要素の初期値を得る。
- 2) DLT の結果を初期値として単写真標定を行い、外部標定要素を決定する。

(2) ターゲット像の重心座標の計算

- 1) 前方交会法により全写真についてターゲット像の重心座標の初期値を計算する。
- 2) カメラパラメータも同時に求める自己校正付バンドル調整により、全ターゲットの三次元座標値を計算する。この段階での三次元座標値は基準板の座標系に基づいたものである。

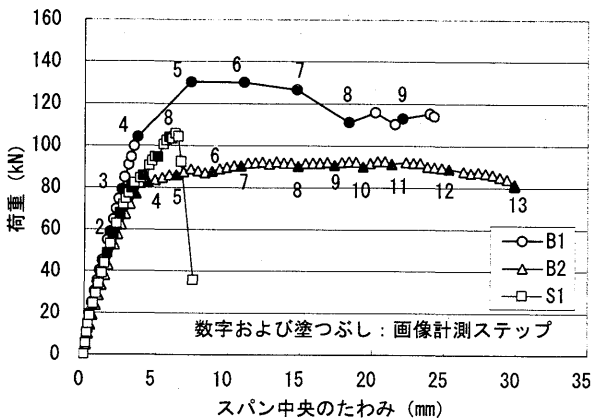


図-7 荷重～たわみ関係

(3) 座標系の変換

基準板の座標系に基づいた各ターゲットの三次元座標値を、試験体の XYZ 座標系に変換する。

3.2.2 変形量の計算

荷重が作用しても、載荷台はほとんど変形が生じないと考えられることから、この部分の測定点（像の状態が良い 17~20 点）の座標を不動点として、基準状態（載荷前の状態）に対しての各変形時における測定点の変形量（相対座標値）を最小二乗法によって算出した。

3.3 実験結果および考察

図-7 に実験より得られた各試験体の荷重～たわみ関係を示す。また図中には、画像計測法によって測定を行った計測ステップも合わせて示す。

3.3.1 測定精度の確認

(1) 座標値の算定精度

バンドル調整を行う際には、各測定点の座標値を算定する像の数（各測定点の座標値を算定するために使用する写真の枚数、以後単に写真の枚数：n）、および写真に写し込まれている各測定点の像の良否が座標値の算定精度に大きく影響を及ぼす。

像の良否は、具体的には CCD 面上の像の共線条件式による理論値からのずれ、残差によって表すことができる（図-2 参照）。したがってバンドル調整を行う際、ある一定値以上の残差を有する像を破棄することによって、大誤差を除去することができる。この像を破棄する残差のカットレベルを、ここでは閾値と称す。

図-8 に、 $n > 2$ の場合（少なくとも 3 枚以上の写真に像が存在する測定点のみバンドル調整に採用し、座標値が求まることを意味する）に関して、残差の閾値を、0.005, 0.004, 0.003, 0.0025, 0.002, 0.0015, 0.0012,

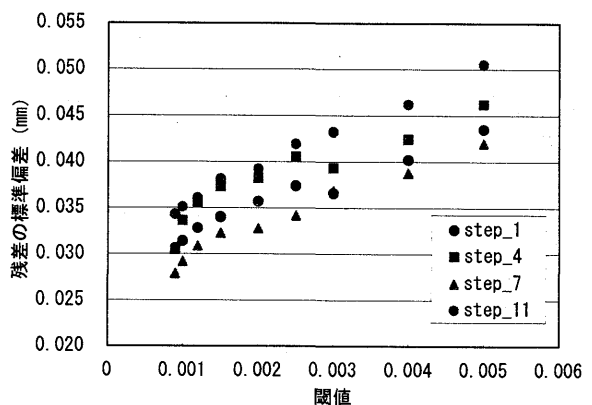


図-8 残差の閾値が座標値の算定精度に及ぼす影響の一例 (B2:n>2)

0.001, 0.0009 mm と順次下げていった場合の、残差の標準偏差の rms (root mean square): σ_r の一例を示す。また図-9 は、残差の分布と大誤差の要因となっている像の状態の一例を示したものである。残差の大きい像は、ターゲットの一部が計測器具や載荷治具の陰になっている場合、あるいはストロボ光の斜め入射等何らかの原因による光量不足の場合がほとんどである。図-8 からわかるように、当然のことながら、閾値を小さくすれば座標値の算定精度は向上する。n>2 の場

合、閾値が 0.0015 mm であれば不良な像による大誤差もほとんど除去され、実用的な精度が得られていることがわかる。

一方、写真の枚数を増やせば座標値の算定精度の向上が期待される。図-10 は、n>2, n>4, n>8 の場合に関して閾値が 0.002, 0.0015, 0.001 mm のときの残差の標準偏差の rms: σ_r の一例を示したものである。ここで写真の枚数として n>2, n>4, n>8 の場合を設定したのは、本実験における撮影形態を考慮した以下

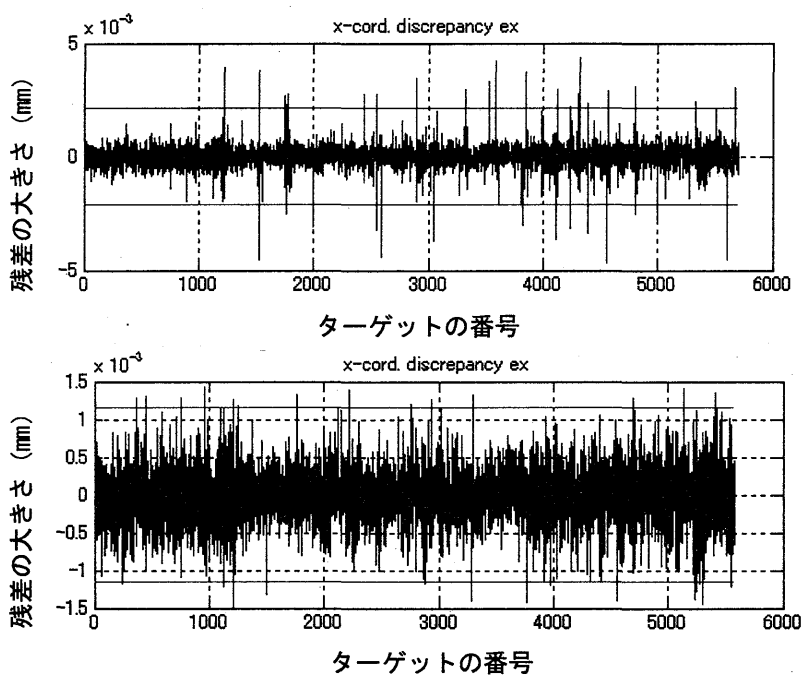


図-9 残差の分布の一例 (S1: step_1: n>2) とターゲット像の一例
 上段: 残差の分布; CL=0.005mm, 像の状態; 不良
 下段: 残差の分布; CCL=0.0015mm, 像の状態; 良好

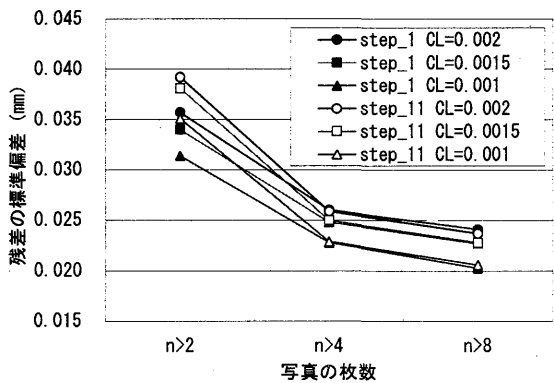


図-10 写真の枚数が測定精度に及ぼす影響の一例 (B2)

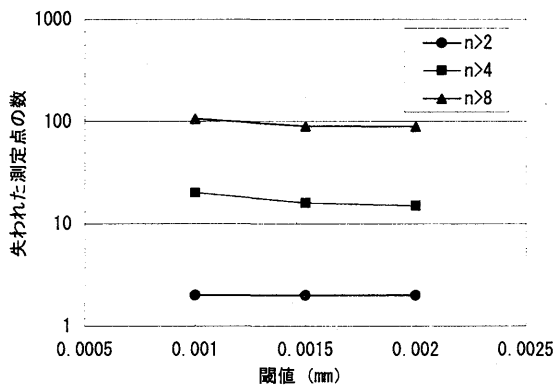


図-11 座標値が得られなかった測定点の数の一例 (S1: step_1)

の理由による。

- ① $n > 2$ の場合：少なくとも異なる 2 地点の画像を使用する（例えば図-6 中の地点 1 と地点 2）
- ② $n > 4$ の場合：少なくとも異なる撮影角度の画像を使用する（例えば図-6 中の地点 1, 2 と地点 3）
- ③ $n > 8$ の場合：片方に偏った撮影角度の画像のみを使用しない（例えば図-6 中の地点 1, 2, 3, 4 と地点 5）

また図-11 は、 $n > 2$, $n > 4$, $n > 8$ の場合に関して座標値が得られなかった測定点の数の一例を示したものである。

図-10 からわかるように、写真の枚数を増やせば座標値の算定精度は向上するものの、一方で図-11 に示すように、座標値が得られない測定点が増加する。写真の枚数を増やした際にバンドル調整から除外され座標値が得られない測定点の多くは、計測器具や載荷治具の陰になっている場合がほとんどであり、その多くは試験体中央部付近に位置し、平均曲率を算定するのに不可欠な測定点である。実用的な精度で平均曲率等の変形特性を算定するという本研究の主旨を考えると、座標値の算定精度が $\sigma_r = 0.0035$ mm 程度から 0.0025 mm 程度に向上するからといって、測定点の情報（座標値および変形量）が失われることは本意ではない。したがって以後の考察においては、RC はりに関しては $n > 2$ 、閾値 0.0015 mm ($\sigma = 3.2 \sim 3.5$ mm) でバンドル調整を行った際の結果を用いることとした。

図-12 は $n > 2$ 、閾値 0.0015 mm でバンドル調整を行った際の各試験体の計測ステップ毎の座標値の算定精度を示したものである。残差の標準偏差の $rms: \sigma_r$ は約 $0.030 \sim 0.038$ mm 程度であり、本実験の場合、座標値の算定精度は概ね $\sigma_r = 0.035$ mm 程度であると考えられる。

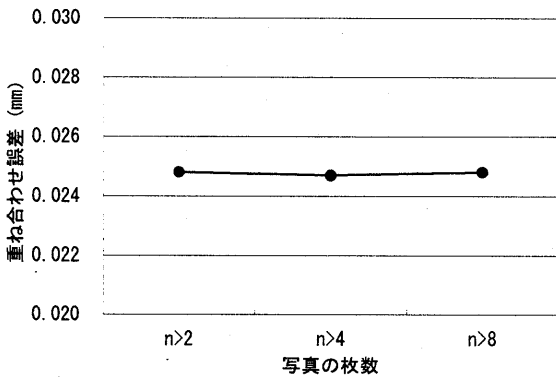


図-14 写真の枚数が重ね合わせ誤差に及ぼす影響 (B2)

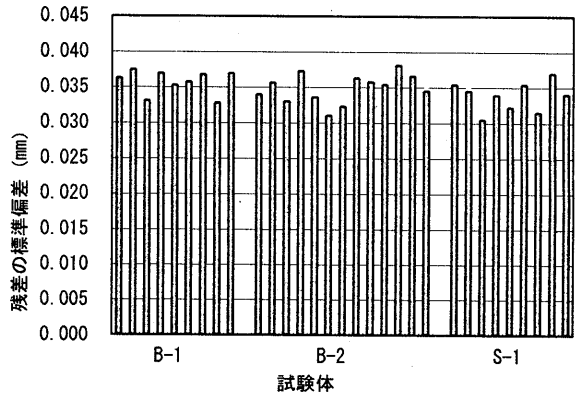


図-12 座標値の算定精度 (標準偏差)

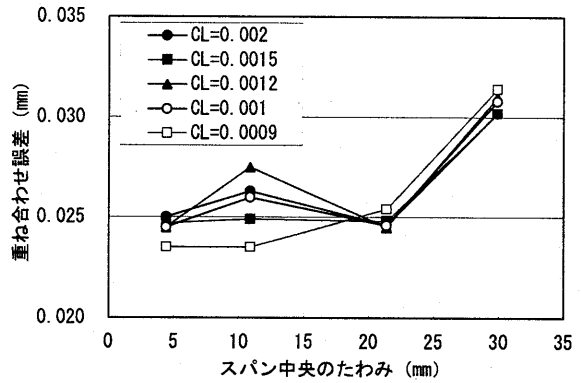


図-13 重ね合わせ誤差と閾地との関係の一例 (B2: $n > 2$)

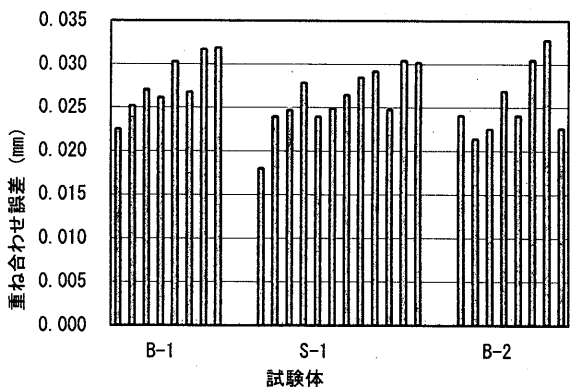


図-15 重ね合わせ誤差

(2) 変形量の算定精度

図-13 は試験体 B2 に関して、 $n > 2$ の場合の不動点の重ね合わせ誤差と閾値との関係の一例を示したものである。また図-14 は、試験体 B2 に関して閾値 0.0015 mm のときの写真の枚数が重ね合わせ誤差に及ぼす影響を表したものである。これらの図から、基準状態に対する不動点の重ね合わせ誤差は、閾値および写真の枚数の影響をほとんど受けないことがわかる。

図-15 は $n > 2$ 、閾値 0.0015 mm でバンドル調整を行った際の各試験体の計測ステップ毎の不動点の重ね合わせ誤差を示したものである。重ね合わせ誤差の標準偏差の rms は $\sigma_s = 0.018 \sim 0.033$ mm 程度であった。したがって、RC はりの載荷試験における各測定点の変形量の算定精度は概ね $\sigma_s = 0.03$ mm 程度以下と考えられ、実用上十分な精度で変形量が計測できているものと思われる。

3.3.2 基準尺を用いない場合の測定精度

基準尺を使用せずに基準板の測点間の距離(図-3, 表-3 参照)を基準としてバンドル調整を行った場合の座標値の算定精度を、S1 に関して基準尺の寸法との比較により行った。得られた座標値から算定される基準尺の長さとの比は、平均で 0.9993~0.9996 の範囲であった。基準尺を使用せずに基準板の座標値を用いてバンドル調整を行った場合でも、かなりの高精度で座標値が算定できていることがわかる。この種の実験であれば基準尺を使用せず、基準板の測点間の距離を長さの基準としてバンドル調整を行っても、実用上問題が無いものと考えられる。したがって以下においては、S1, B2 に関しては基準尺を用いた場合の、B1 に関しては基準尺を用いない場合の値を使用した。

3.3.3 たわみ測定の精度

画像計測法により、はりのたわみがどの程度正確に計測できているかどうかの確認を、スパン中央におけるたわみに関して、変位計による測定値との比較により行った。図-16 および図-17 は、それぞれ画像計測法と変位計の測定値との差(画像計測法による測定値-変位計の測定値)に及ぼす閾値および写真の枚数の影響を示したものである。これらの図から、閾値および写真の枚数の影響は小さいものと考えられる。

図-18 は画像計測法による測定値と変位計の測定値との差を、各試験体に関して示したものである。たわみが大きくなると若干両者の差が大きくなる傾向はあるが、両計測法による測定値の差は高々 0.7 % 程度に過ぎない。変位計による測定値にも誤差が含まれることを考え合わせると、画像計測法による測定によ

て、たわみは精度良く測定されているものと考えられる。

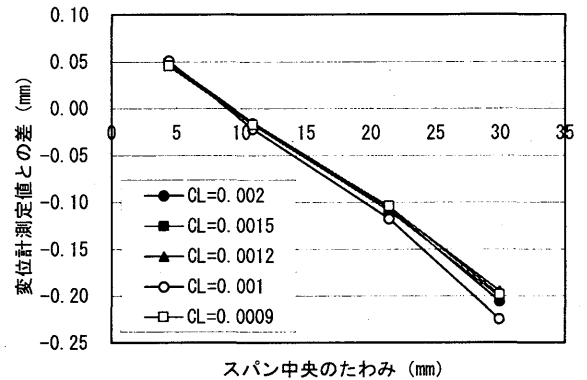


図-16 たわみの測定精度に及ぼす閾値の影響 (B2)

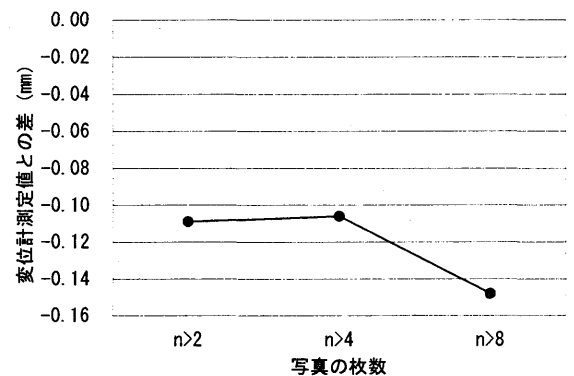


図-17 たわみの測定精度に及ぼす写真の枚数の影響 (B2 : step_11)

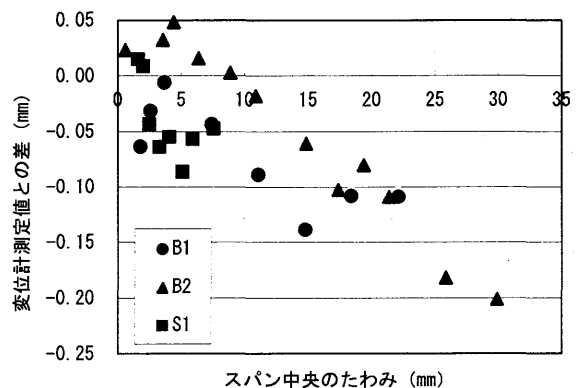


図-18 画像計測法と変位計による測定値との差

4. 正負交番繰返し荷重を受ける RC 柱の変形量の測定精度

4.1 実験概要

4.1.1 実験計画

計測の対象とした RC 柱試験体の形状寸法を図-19に示す。RC 柱試験体は 3 体で、軸方向鉄筋として D16 を 4 本、せん断補強筋として D6 の帯鉄筋を 150mm 間隔で配置した。実験要因は表-6に示すように同一変位における繰返し回数である。コンクリートには呼び強度 27 のレディーミクストコンクリートを使用した。鉄筋の機械的特性を表-7に、コンクリートの強度試験の結果を表-8に示す。

測定点として $\phi 5$ mm の専用の反射ターゲットを貼り付けた。ターゲットは、柱前面に 5 列(中心, ± 30 mm, ± 55 mm) \times 20 段 (25mm 間隔), 柱左右載荷面中央にそれぞれ 1 列 18 段 (25mm 間隔), 基礎部分に 15 ~ 21 点設置した。測定点の設置状況を図-20に示す。

荷重は主鉄筋が降伏した時点の荷重点の変位 δ_y を基準に, $\pm \delta_y$, $\pm 2\delta_y$, $\pm 3\delta_y$, ... と順次変位を増加させながら, 同一変位において所定の回数の正負交番繰返し荷重を行った。実験の様子を写真-2に示す。

表-6 RC 柱の実験計画

試験体	主鉄筋	せん断補強	繰返し回数
N1	4D16	D6 - 150 mm	1
N3	4D16	D6 - 150 mm	3
N5	4D16	D6 - 150 mm	5

表-7 鉄筋の機械的特性 (RC 柱用)

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D16	379	572	197
D13	366	563	190
D6	426	534	183

表-8 コンクリートの強度試験結果 (RC 柱用)

養生	圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)
標準	33.0	22.1
現場	30.9	20.6

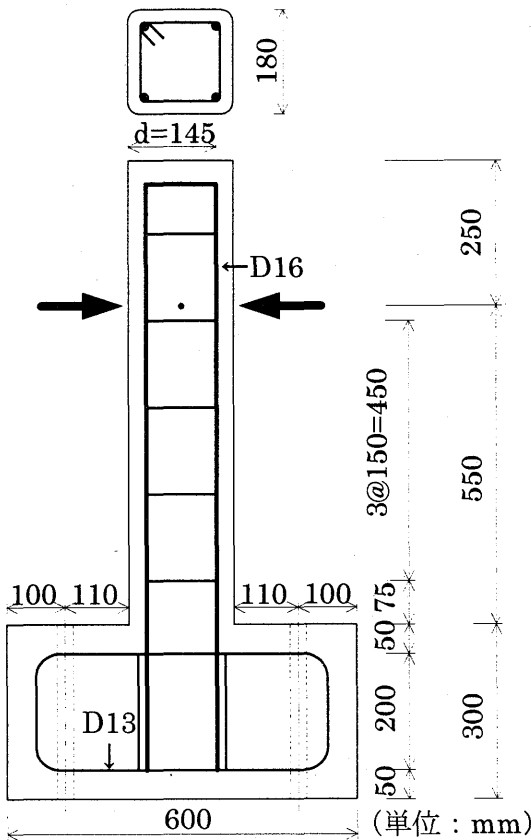


図-19 RC 柱試験体の形状寸法

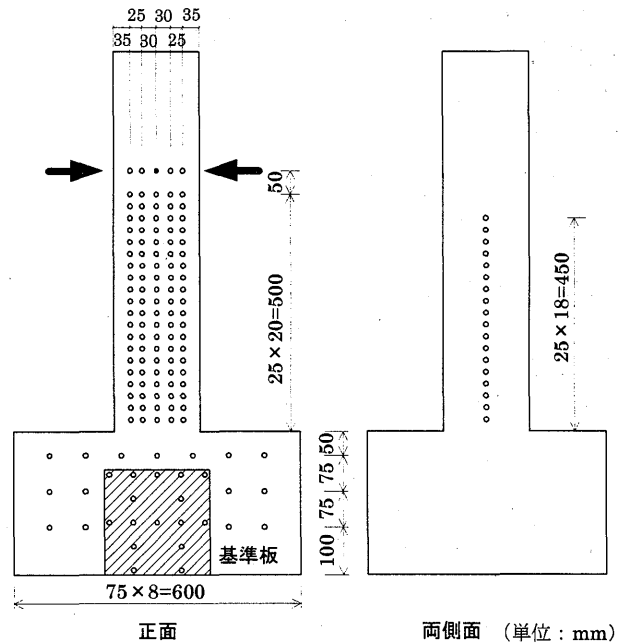


図-20 測定点の設置状況 (RC 柱)

4.1.2 撮影方法

標定を行うための基準板 B (写真-2 中の黒板) を試験体の傍らに設置し, 左上下, 正面, 右上方向の前面 5 ヶ所からそれぞれカメラを 90° 回転させて 2 枚ずつ, 計 10 枚の写真撮影し 1 セットとした. 撮影距離は 2~3m である. 本実験の場合, 前述の RC はりの実験とは異なり, 写真-2 からわかるとおり, 撮影対象物である RC 柱と撮影位置との間に障害物が存在しない. したがって, 5 ヶ所 10 枚の写真で十分な計測精度が期待できる. 写真の撮影は, 載荷前の状態 (以下, 基準状態), 正負変位のピーク時および変位ゼロ時について行った (図-21 参照). 使用したカメラは, 約 600 万画素のデジタルカメラで, 焦点距離は 18mm である. なお, この実験に関してはスケール調整を行うための基準尺を設置していない.

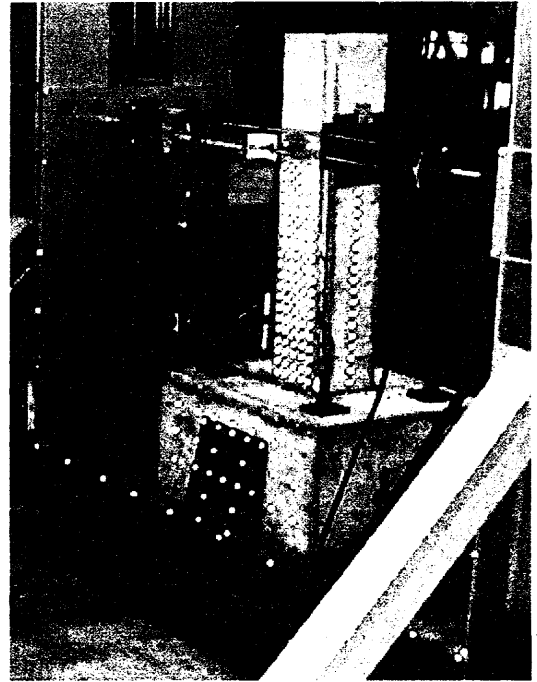


写真-2 試験の様子 (RC 柱)

4.2 変形量の算定と計測精度

4.2.1 座標値の算定精度

各計測ステップにおける 1 セット 10 枚の写真から, 各測定点の三次元座標値を算出した. バンドル調整を行う場合, 撮影対象物である RC 柱と撮影位置との間に障害物が存在しないことを考慮し, なるべく高精度が得られるよう, また, 柱側面に設置した測定点は最大でも 4 枚の写真にしか写らないことを考慮して, 写真の枚数は $n > 3$ (少なくとも 4 枚以上の写真に像が存在する測定点のみバンドル調整に採用し, 座標値が求まる), 残差の閾値を 0.0007 mm (残差の標準偏差 $\sigma = 2.8 \sim 3.5$ 程度) とした. その他座標計算の詳細は RC はりの場合と同一である (3.2.1 参照). ただし, スケール調整は実験の簡素化を考慮して基準尺を使用せず, 基準板 B の測定点間の距離 (220.5 mm) で行っている. 基準板の測定点間の距離を用いてスケール調整を行っても, 実用上精度的に支障がないことは, はり試験体により確認されている (3.3.2 参照).

図-22 に各試験体の計測ステップごとの残差の標準偏差の rms: σ_r を示す. これより本実験の場合, 座標値の算定精度は概ね $\sigma_r = 0.03 \text{ mm}$ 程度であると考えられる.

4.2.2 変形量の算定精度

基準状態 (載荷前の状態) に対しての各変形時における測定点の変形量 (相対座標値) は, 荷重が作用しても, RC 柱試験体の基礎部分はほとんど変形が生じないと考えられることから, この基礎部分の測定点 (像の状態が良い 7~20 点) の座標を不動点として, 最小二乗法によって算出した.

図-23 に各試験体の計測ステップごとの不動点の

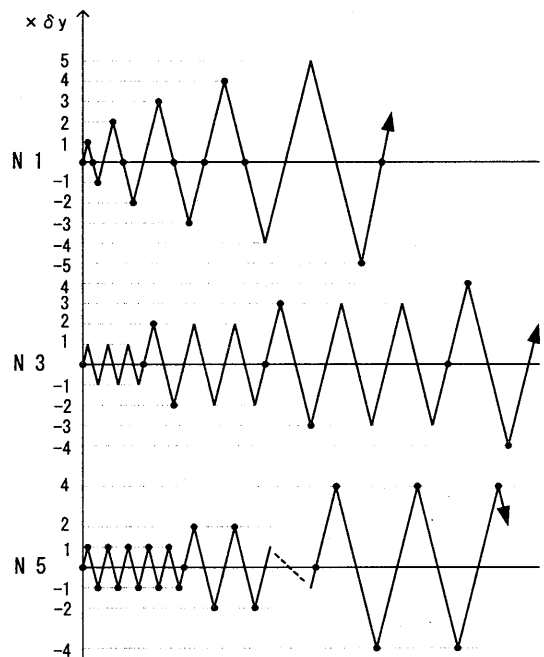


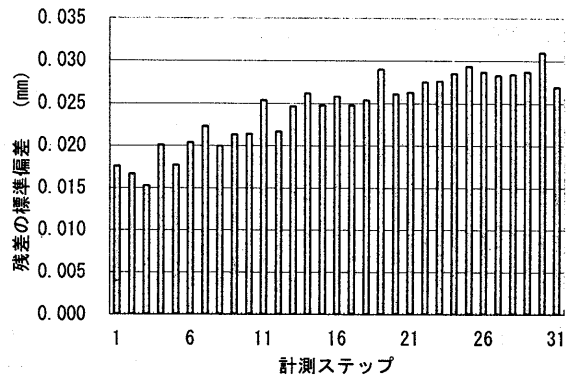
図-21 画像計測法による計測ステップ (黒丸)

重ね合わせ誤差の標準偏差の rms: σ_s を示す。これより重ね合わせ誤差の標準偏差は $\sigma_s=0.008\sim0.020$ mm 程度であり、十分な精度で柱部の変形量が計測できているものと考えられる。

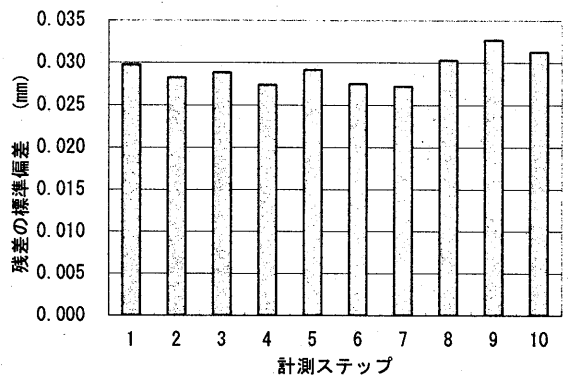
5. まとめ

画像計測法を用いることによる RC 部材の変形量の測定精度について、撮影条件が悪く測定精度の低下が懸念される場合と (RC はり)、撮影条件が良好で測定精度が確保しやすい場合 (RC 柱) に関して検討した結果、以下のことが明らかとなった。

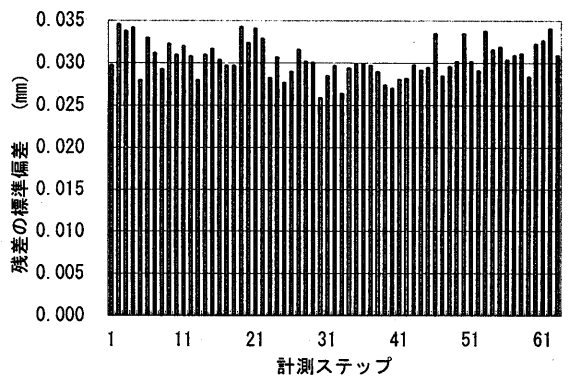
- (1) 試験体と撮影位置との間に障害物があり、測定精度の低下が懸念される RC はりの載荷試験の場合、片面 9ヶ所 18 枚の写真を準備し、3 個以上の像を用い、大誤差の除去レベルとして残差の閾値を 0.0015 mm ($\sigma=3.2\sim3.5$ mm) と設定したバンドル調整を行った際の座標値の算定精度は概ね $\sigma_r=0.035$ mm 程度であり、この場合の変形量の算定精度は概ね $\sigma_s=0.03$ mm 程度以下であった。
- (2) 試験体と撮影位置との間に障害物がなく、撮影条件が良好な RC 柱の載荷試験の場合、前面 5ヶ所 10 枚の写真を準備し、4 個以上の像を用い、残差の閾値を 0.0007 mm ($\sigma=2.8\sim3.5$ mm) と設定したバンドル調整を行った際の座標値の算定精度は概ね $\sigma_r=0.030$ mm 程度であり、この場合の変形量の算定精度は概ね $\sigma_s=0.02$ mm 程度以下であった。
- (3) RC はりの試験においては載荷台、RC 柱の試験においては RC 柱の基礎部分に設置した測定点を、載荷後も不動な点として重ね合わせることによって、各測定点の変形量 (相対変位) を十分な精度で算定することができる。
- (4) 以上のように撮影条件の良・不良にかかわらず、適切な写真の枚数の確保と残差の閾値を設定することにより、画像計測法によって概ね $0.02\sim0.03$ mm 程度の精度で各測定点の変形量を計測することができた。これは実用的な精度で平均曲率等の変形特性を算定するという本来の目的に対して十分な精度であった。
- (5) 特殊な基準尺を用いてスケール調整を行わず、基準板の測点間の距離 (長さ 200 mm 程度、標準偏差 $0.05\sim0.10$ mm 程度) を用いて簡易的にスケール調整を行っても、実用上問題ない精度が得られる。
- (6) RC はりの試験結果に関して画像計測法による測定結果と変位計による測定結果を比較したが、両者による測定値にはほとんど差が無く、画像計測法の有効性が確認できた。



(a) N1



(b) N3



(c) N5

図-22 座標値の算定精度 (標準偏差)

載荷点の変位やスパン中央のたわみなど、特定の測定点の変形量のみを高精度で求めるのであれば、本実験結果の場合、 $n > 8$ 、閾値 0.001 mm 程度に設定してバンドル調整を行えば、 $\sigma_r = 0.01$ mm、 $\sigma_s = 0.01$ mm 程度の精度で算定可能であることを付記する。

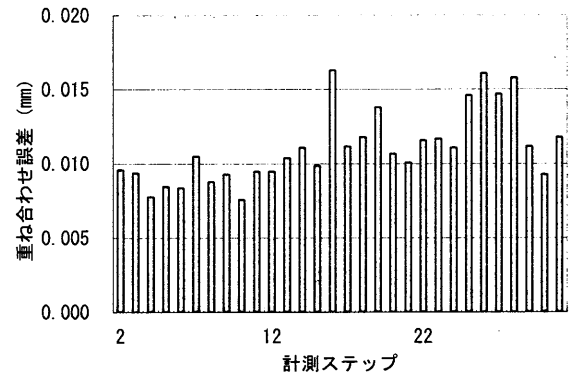
本研究を遂行するにあたり実験に協力いただいた、四国職業能力開発大学校 2002 年度卒研究生の井本勇也、梅形崇之、波戸秀志君、福山大学 2003 年度卒研究生の荒川裕介、安原雅和君に感謝する。

参考文献

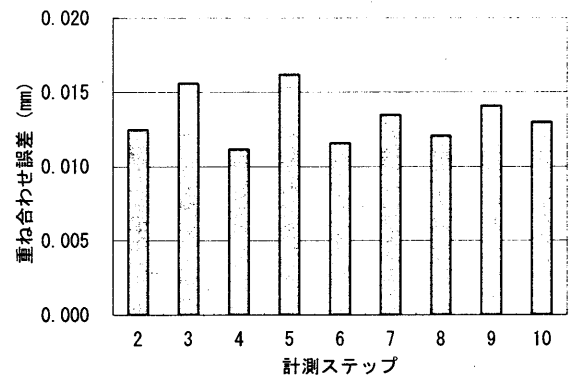
- 1) 例えば、星隈順一、運上茂樹、川島一彦、長屋和宏：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法、構造工学論文集、Vol.44A、pp.877-888、1998.3
- 2) 石橋忠良、小林 薫、海原卓也：大変形領域の交番荷重を受ける RC 橋脚のフーチングからの鉄筋拔出し量算定法に関する研究、土木学会論文集、No.648/V-47、pp.43-54、2000.5
- 3) 熊谷幸樹、近久博志 他：画像解析によるひずみと応力測定について、土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集 VI-125、pp.250-251、2001
- 4) 酒井理哉、宮川義範、松尾豊史 他：画像計測を利用した鉄筋コンクリート構造のひずみ測定の試み、土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集、CS3-002、pp.164-165、2001
- 5) 酒井理哉、松尾豊史、山崎健一 他：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断実験（その 2：画像計測の適用）、土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集、V-269、pp.537-538、2003
- 6) Tamon UEDA, Yasuhiko SATO, Tsunemasa ITO, et al : Shear Deformation of Reinforced Concrete Beam, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.711/V-56, pp.205-215, 2002.8
- 7) 秋本圭一、服部 進、大西有三 他、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/IV-56、pp.289-301、2001.9
- 8) 服部 進、秋本圭一、岡本 厚 他：ターゲット場の多重撮影による基準点のない CCD カメラキャリブレーション、電子情報通信学会論文誌 D-II、Vol.J82-D-II、No.9、pp.1391-1400、1999
- 9) 秋本圭一：情報化施工のためのデジタル画像計測法に関する研究、京都大学博士論文、p.101、2002.3
- 10) 秋本圭一、服部 進、井本治孝：デジタル画像計測法を用いた精密工業計測、電子情報通信学会論文

誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1299-1309, 2001

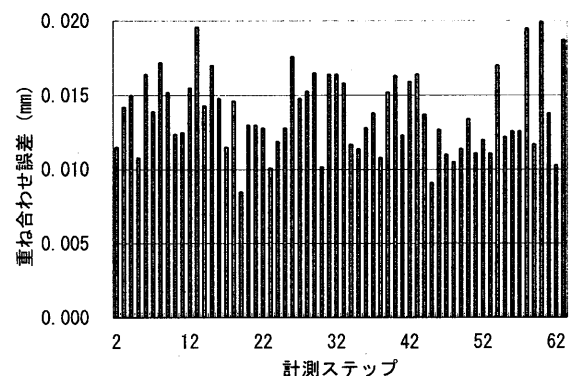
11) Fraser C. S.: Network Design Consideration for Non-Topographic Photogrammetry, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol50, No.8, pp.1115-1126, 1984



(a) N1



(b) N3



(c) N5

図-23 重ね合わせ誤差