

# デジタルカメラを用いた 3次元形状計測に関する精度確認試験

近藤 琢也 \*1・矢吹 信喜 \*2・三井 雄二 \*3・阿田 芳久 \*4

## 1. はじめに

近年のデジタルカメラの性能の向上とソフトウェア解析技術の向上により、デジタル画像から3次元形状を算出する手法が建設分野以外の分野において積極的に活用されている。本稿は、建設業における省力化および高品質化を目的とするIT化の推進の一環として、これらの技術を活用することを試みたものである。また、これらのITの活用技術は現在各方面で積極的に研究が進められている3次元プロダクトモデル(3DPM)<sup>1) 2)</sup>との連携を保つことにより、製品の品質の向上や業務の効率化につながる可能性がある。今回は、デジタルカメラを用いてプレストレストコンクリートの工場製品に関する3次元形状計測を行い、その精度を確認することによりコンクリート構造物の施工管理や維持管理に対する適用性に関する確認と今後の課題について検討を行った。

## 2. 3次元形状計測の活用について

### 2.1 建設分野での活用事例

デジタルカメラを用いた3次元形状計測とは、市販のデジタルカメラで撮影した複数の画像をパソコンに取り込み、市販の解析ソフトを用いることにより任意の位置の3次元座標を算出する手法である。写真を利用した計測技術としては、航空写真測量において以前から研究が進められており、デジタルカメラを用いた3次元形状計測自体は確立された技術であり、建設分野での活用事例として前述の航空写真測量での利用をはじめトンネルにおける内空変位の計測<sup>3)</sup>やのり面変位の計測<sup>4)</sup>などで報告がある。撮影対象の大きさの違いはあるもののいずれの報告においてもデジタル画像から算出した3次元座標の計測誤差は1~2mmである。これらの技術を利用することによりプレストレストコンクリートに関する構造物においても、品質の向上や施工管理省力化が図れる可能性があると考えられる。

### 2.2 プレストレストコンクリート橋への適用について

プレストレストコンクリート橋における具体的な活用の可能性としては、以下の項目が挙げられる。

- ・ 出来型形状管理
- ・ 型枠形状、配筋状況の確認
- ・ 既設橋梁形状調査
- ・ ひび割れ、コンクリート劣化状況の調査

(ひび割れ幅の算出や劣化による凹凸形状)

・ 上げ越し管理

これらの計測はすべてデジタルカメラを用いて非接触で行われるため、場合によっては特別な機器の用意や大がかりな足場の設置などを省略することによる安全性の向上やコストの低減が図れることも考えられる。本報告では、デジタルカメラを用いた3次元形状計測の実務への適用性を検討する目的で、一例としてプレストレストコンクリート橋(工場セグメント)を対象とした形状計測試験を行い、精度の確認と精度の向上に関する課題を抽出することとした。

## 3. 3次元形状解析の理論と解析の流れ

### 3.1 解析理論

デジタル画像から3次元座標を算出するソフトウェアは、何種類かのソフトが開発され市販されている。これらのソフトで利用されている解析理論の概要について解説<sup>5)</sup>する。

図-1に示すように、写真画像から3次元座標を算出するための基本的な原理として、2次元画像と立体座標にみられる関係がある。これは、視線条件とよばれるものでピンホールカメラの原理と同様であり、画像ファイルから3次元座標を算出する各種ソフトウェアで用いられる基本原理である。レンズを用いた実際のカメラでは厳密には魚眼レンズに見られるような画像のゆがみ(収差)が含まれて

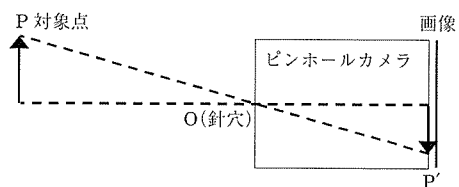


図-1 視線条件

いるため、このピンホールカメラの原理を用いて収差補正を行うことにより、写真上の点と実対象物の点との直線関係を成り立たせる必要がある。

次に、2次元座標しかもたない写真画像を立体座標に変換する必要がある。3次元座標の算出原理は三角測量の原理と同様である。図-2に示した左カメラと右カメラの位置関係が既知であれば対象点Cは角CABおよび角CBAが

\*1 Takuya KONDO : オリエンタル建設(株) 第二技術部 主任研究員

\*2 Nobuyoshi YABUKI : 室蘭工業大学 工学部 建設システム工学科 助教授

\*3 Yuji MITSUI : オリエンタル建設(株) 関東工場 管理課担当

\*4 Yoshihisa ATA : オリエンタル建設(株) 東京支店 技術部 係長

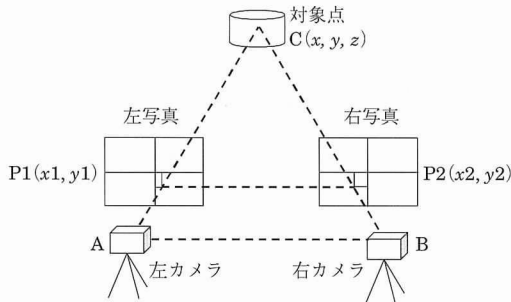


図-2 共面条件

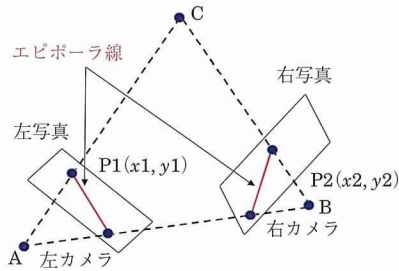


図-3 エピポラ幾何

わかることにより容易に求まることとなる。このとき、左カメラと右カメラの視線（中心線）が交わる条件としては、2つの高度角は独立でない。つまり、2つの直線 A - C および B - C が食い違わなく交わるためにはそれらが同一平面上に存在する必要がある。この原理も写真測量の基本原則で共面条件とよぶものである。

しかしながら、デジタルカメラを用いた3次元座標解析では一般にカメラ位置が不明である。そこで、これらの基本原理を応用したエピポラ幾何を用いてカメラ位置を算出している。エピポラ幾何とは図-3に示す左カメラと右カメラの位置関係を表す行列であり、カメラの相対的な回転や並進の情報をもつ。たとえば2つのカメラ位置の関係は、一方のカメラを固定し他方のカメラの位置および角度を調整することで対象物の立体形状を再現できる位置を導き出すことができる。このとき、左写真上のある点に対する右写真上の対応点は共面条件を満たすため、右写真上のある線上に存在する。この線をエピポラ線とよび、この条件を用いることにより対応点の検索範囲を一つの直線上に限定することが可能となる。実際の解析では算出された相似座標を実寸座標に変換するため、既知となるある2点間の距離を与えることにより実座標の解析が可能となる。

### 3.2 解析の流れ

3次元座標算出までの解析の流れを図-4に示す。最初にデジタルカメラにより対象物を撮影し、これらの画像を解析ソフトに入力する。1点の3次元座標を解析するためには最低2枚の画像が必要となる。直方体形状を完全に再現するためには死角のないよう撮影する必要があるため外周を最低4枚撮影する必要がある。ただし、基本的には画像の枚数が多いほど3次元座標の精度は向上するため、4枚以上の画像を撮影し入力することが望ましい。次に、画像入力の際3次元座標をより高精度に算出するために、カメ

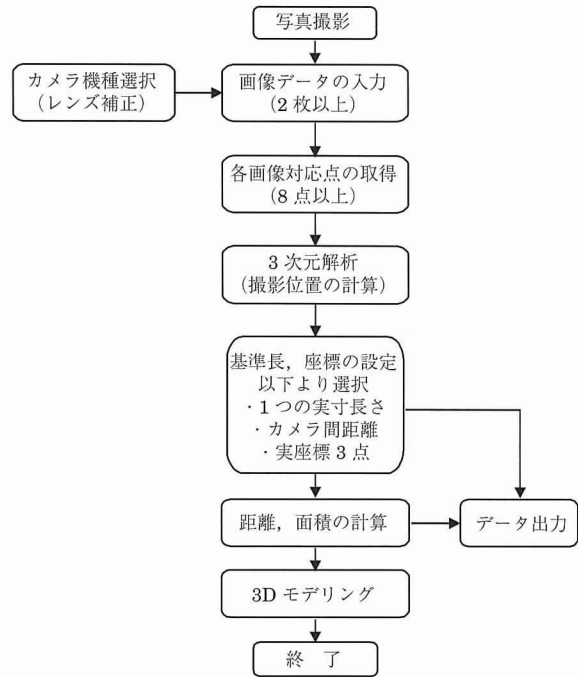


図-4 3次元座標解析手順

ラのレンズがもつひずみの補正を行う必要がある。ひずみの補正については予め正確な形状が既知である図形を実際のカメラで撮影することにより、撮影画像と実寸法の誤差を計算し、ひずみ補正用のデータを作成することとなる。その補正用データを用いて実画像のレンズひずみの補正を行う。その後、各画像上に共通となる点をマウスで指示する。入力する点は、エピポラ幾何のマトリクスを生成するため最低8つの点を指示する必要がある。また、隣り合う画像間で共通する点になるべく多くなるように指定することが精度向上の上で重要である。以上の作業からカメラ位置の解析が可能となる。その後さらに基準となる実寸法を1辺、もしくは3点の既知座標、カメラ間距離などを指定することにより対象物の3次元座標を取得することが可能となる。

## 4. 計測試験

### 4.1 概要

計測試験は写真-1に示す工場製品ポストテンション方式ホロー桁（1セグメント）と、写真-2に示すコンボ桁（1セグメント）について行った。おのおのの桁に関してデ

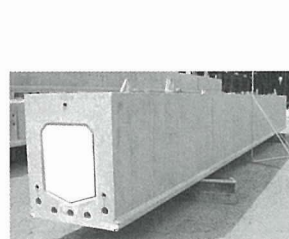


写真-1 ホロー桁



写真-2 コンボ桁

デジタルカメラを用いた3次元形状解析を行い、その結果とスチールテープによる部材寸法の実測値との比較を行い精度を確認することとした。デジタルカメラによる計測は、撮影パラメータを種々変化させて撮影状況による精度の変化を考察することとした。

#### 4.2 使用機器

##### (1) デジタルカメラ

撮影に使用したカメラは、NIKON COOLPIX 8700である。解像度は800万画素で、使用したレンズは35mmレンズである。撮影画像の有効画素数は解析精度に影響を与えることが明確であるため、高解像度のカメラを使用することとした。

##### (2) ターゲット

コンクリート構造物は型枠の目地の状況などにより、面と面の境界(角)が丸くなっている場合が多い。そのため、測定点をミリ単位で正確に特定することが困難である。そこで、測定点を明確にし解析の精度について検証する目的で写真-3、写真-4に示すターゲットを設置することとした。最初に撮影を行ったホロー桁(写真-3)では赤色のビニールテープを使用したが、後から行ったコンボ桁の撮影ではターゲットの視認性を考慮して白黒のビニールテープを使用することとした。

##### (3) 解析基準(基準尺)

解析を行う際に画像ファイル内に基準寸法が必要となる。解析時の基準として用意したのは、写真-5に示すように

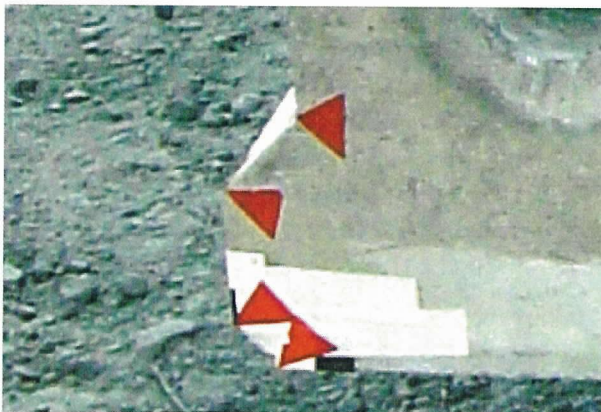


写真-3 ターゲット(赤色)

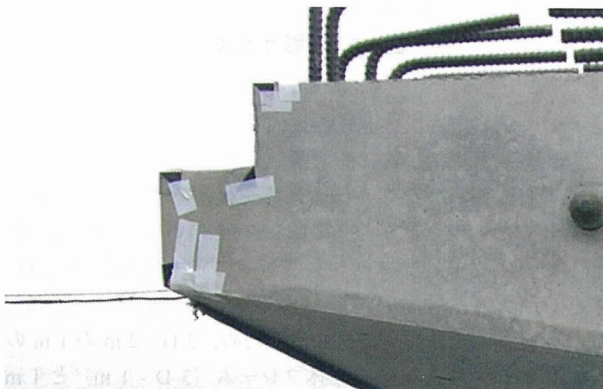


写真-4 ターゲット(白黒)



写真-5 立体フレームとアルミロッド

長さ2mの3本のアルミ棒を直角に組んだアルミフレームを作成した。各アルミ棒には原点から1mの位置に印をした。解析時には基準として2mと1mの立体フレームおよび長さ1mのアルミロッドを使用した。立体フレームは撮影前に長さ、角度などをキャリブレーションし正確な形状を確認した。また、長手方向(セグメント長)の計測用にアルミスタッフをつなぎ合わせたスケールもあわせて用意した。

#### 4.3 計測試験の流れ

計測試験の流れを図-5に示す。

##### (1) 撮影準備

土木構造物は比較的大きなものが多いため、計測対象を一画面内に納めるためにはある程度の撮影距離が必要となる。そこで、今回は対象となるセグメントを撮影用に確保した広いスペースに移動した。また、後に解析値の精度確認を行うため、対象物には測定位置にターゲットを設置した。

さらに、撮影画像内にはデジタル画像から解析した3D座標のスケールを決定するために、基準となるスケール

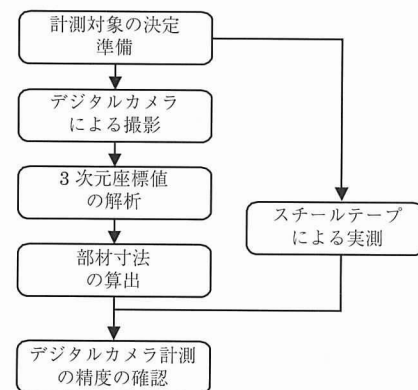


図-5 試験の流れ

○ 研究報告 ○

(基準尺) を設置する必要がある。これは、解析精度に大きく影響するため正確な数値を把握しているものを使用する必要がある。今回は、解析精度の確保を目的として用意した立体フレームと、実運用時に可搬性に優れるアルミロッドを設置し比較を行った。

(2) 撮影

解析に使用する画像ファイルは1平面あたりの寸法計測で最低2枚必要となる。そのため撮影は1断面に対して複数の方向から行った。

(3) 実測

画像解析による部材寸法との比較を行うために、対象物の寸法を実測した。実測値の計測はスチールテープに所要の緊張力を与え、同一箇所にて3回の計測を行い平均値を採用することとした。

(4) 解析

撮影した画像はパソコン上に取り込み、市販の解析ソフト「メガポインター (株式会社ニコン・トリンプル)」を用いて3次元座標を計算した。なお、カメラのレンズには収差があるため、これを補正するためのキャリブレーションデータをあらかじめ作成しておく必要がある。今回はキャリブレーションデータはカメラメーカーより入手し解析を行った。

(5) 精度の確認

画像解析により算出した部材寸法とスチールテープにより測定した部材寸法を比較することにより、デジタルカメラを用いた出来型計測における精度を確認した。また、各撮影パラメータの比較によりデジタルカメラを用いた3次元形状計測に関する留意点や改善点などを考察した。

4.4 撮影パラメータ (断面寸法の比較)

デジタルカメラを用いた3次元形状計測の実運用を想定して撮影環境にさまざまなパラメータを設け、撮影および解析の比較を行った。これにより、実運用における作業可能な範囲や、留意点などについて考察を行う。表-1に比較ケース一覧を示し、以下に設定したパラメータについて

確保できないケースが考えられる。そこで、撮影角度をパラメータとして撮影を行うこととした (C-case 1~3)。ここで撮影角度とは、図-6に示すように写真中心と被写体を結んだ視線と被写体平面の法線とのなす角 $\theta$ である。撮影角度の比較は、表-1の解析ケース C-case 1~3であり

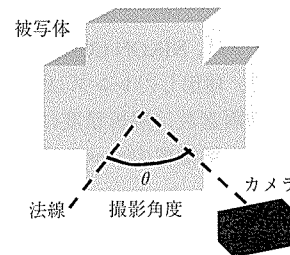


図-6 撮影角度

それぞれ2枚の画像を用いて解析を行った。

(2) 解析画像枚数の影響

解析に使用する撮影画像の枚数が解析精度にどの程度影響を及ぼすかを検討することとした (C-case 3~5)。撮影枚数が少なくてもある程度の精度が確保できるようであれば、極力少ない枚数で解析を行うことが実作業での負担を低減することとなる。

解析枚数の比較は、表-1の解析ケース C-case 3~5となり、2枚のケース ( $\pm 30^\circ$ )、3枚のケース (0,  $\pm 30^\circ$ )、5枚のケース (0,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ) について比較を行った。

(3) 撮影サイズの影響

1画像に納められる対象部材の実寸法の大きさ (以下、撮影サイズとよぶ) が解析精度に及ぼす影響を検討することとした (C-case 4, 6, H-case 1, 2)。図-7に示すように対象面全体を1画像に撮影した場合 (撮影サイズ大) と対象面を上下2分割して半分づつを撮影したケース (撮影サイズ小) で検討を行った。また、コンボ桁 (桁高 2.1 m)

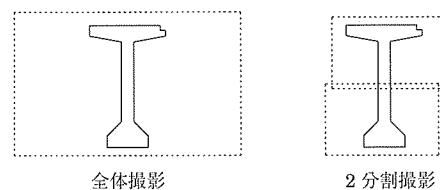


図-7 撮影サイズ

とホロー桁 (桁高 1.15 m) の比較も行った。

(4) 基準尺の違いによる影響

基準尺が解析結果に及ぼす影響を検討した。立体フレームもしくはアルミロッド (写真-5) を用いて解析を行い比較した (C-case 4, 7~9)。長さ 2 m の立体フレーム (3D-2 m) がもっとも高い精度が確保できると予想されたが、実務で使用するには可搬性に劣るため、3D-2 m の 1 m の位置に印を付けた 1 m の立体フレーム (3D-1 m) と 1 m のアルミロッド (ロッド 1 m) を用いた場合についても検

表-1 断面寸法に関する解析ケース

撮影対象	基準	解析画像枚数と撮影角度	その他
C-case 1	3D-2 m	2 ( $\pm 60^\circ$ )	
C-case 2		2 ( $\pm 45^\circ$ )	
C-case 3		2 ( $\pm 30^\circ$ )	
C-case 4		3 (0, $\pm 30^\circ$ )	
C-case 5		5 (0, $\pm 30^\circ$ , $\pm 45^\circ$ )	
C-case 6	3D-1 m	3 (0, $\pm 30^\circ$ )	上下2分割
C-case 7			
C-case 8			ロッド 1 m
C-case 9			3D-2 m
H-case 1	ホロー桁	3D-2 m	3 (0, $\pm 30^\circ$ )
H-case 2		ロッド 1 m	

述べる。

(1) 撮影角度の影響

デジタルカメラを用いた形状計測を実際に製品管理に使用する場合、撮影場所の状況により十分な撮影スペースが

討を行った。なお、C-case 9 については C-case 4 と同じであるが立体フレームのキャリブレーションを再度取り直して解析を行ったものである。

4.5 撮影パラメータ（セグメント長の比較）

セグメント長の計測では対象構造の寸法が大きくなるため解析精度が低下することが考えられた<sup>6)</sup>。そこで、大きな寸法に対して精度向上を図る手法について検討を行った。撮影方法を断面寸法の解析と異なる方法とし、撮影パラメータを変更した。セグメント長の計測では、表-2の解析ケース一覧に示すように全体を撮影した画像と、全体を3分割して撮影した画像を用意することとした。長手方向に3分割したのは、撮影画像の1ピクセルが示す実際の大きさを小さくすることにより精度を向上するためである。さらに、図-8に示すようにセグメントの上にスタッフを設置し、セグメント両端部のみを撮影し3分割の内中央の画像を使用する代わりにスタッフを用いて中間部を補完する手法を検討した。写真-6には端部のみ撮影したケースの撮影状況を示す。

表-2 セグメント長計測に関する解析ケース

ケース名	基準	撮影方法
C-case 1 L	3 D-2 m	全体
C-case 2 L		3分割
C-case 3 L		端部のみ

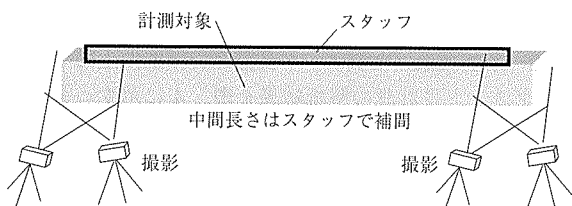


図-8 長手撮影（端部のみ撮影：C-case3L）



写真-6 端部撮影状況

5. 計測結果

5.1 解析結果（断面寸法）比較による作業性の確認

撮影パラメータを考慮した断面寸法に関する計測結果から、デジタルカメラによる形状計測に関する作業条件について考察する。

まず、断面寸法に関する計測結果のうちもっとも良い精度が確認されたケース（C-case 9 および H-case 1）についてその解析結果を表-3に示す。なお、計測箇所は図-9に示した位置とした。ホロー桁（H-case 1）では、誤差の最大値が2 mm、コンボ桁（C-case 9）では誤差の最大値が4 mmであった。コンボ桁で精度が低下しているのは、計測対象の大きさがコンボ桁でほぼ2倍となっていることから、撮影サイズがコンボ桁では2倍となったためと考えられる。つまり、同じ解像度で撮影する撮影サイズが小さいほど単位長さを表現するピクセル数が多くなり精度が向上することとなる。なお、H-case 1では誤差は0～1 mmに、C-case 9では誤差は1～2 mmに集中していることがわかる。図-10には各解析ケースの誤差の絶対値に関する平均値を示す。

表-3 解析結果（断面寸法：C-case 9, H-case 1）

計測箇所	南側断面			北側断面			
	実測値	解析値	誤差	実測値	解析値	誤差	
C-case 9 (コンボ桁)	B1	1 300	1 296	- 4	1 300	1 297	- 3
	B2	1 121	1 118	- 3	1 123	1 120	- 3
	B3	1 124	1 120	- 4	1 122	1 120	- 2
	B4	1 299	1 296	- 3	1 298	1 297	- 1
	B5	703	702	- 1	223	222	- 1
	B6	-	-	-	221	220	- 1
	B7	-	-	-	700	699	- 1
	B8	657	656	- 1	664	662	- 2
	B9	701	701	0	698	697	- 1
	HL1	2 126	2 127	1	2 098	2 098	0
	HL2	81	78	- 3	79	80	1
	HL3	102	101	- 1	99	99	0
	HL4	1 853	1 851	- 2	1 366	1 364	- 2
	HL5	-	-	-	184	183	- 1
	HR1	2 122	2 122	0	2 099	2 098	- 1
	HR2	75	77	2	80	80	0
	HR3	105	103	- 2	102	100	- 2
HR4	1 857	1 854	- 3	1 368	1 366	- 2	
HR5	-	-	-	183	181	- 2	
H-case 1 (ホロー桁)	H1W(N)	1 152	1 151	- 1	1 153	1 153	0
	H2W(N)	1 051	1 051	0	1 051	1 051	0
	H1E(N)	1 152	1 151	- 1	1 153	1 153	0
	H2E(N)	1 051	1 052	1	1 051	1 052	1
	B1(N)	941	943	2	946	948	2
	B2(N)	1 002	1 002	0	1 001	1 001	0

単位：mm

(1) 撮影角度および解析画像枚数の影響

図-10からわかるように撮影角度および解析画像枚数をパラメータとしたケース（C-case 1～C-case 5）では顕著な差は見られなかった。このことから、運用時においては1断面あたり2枚の撮影枚数で十分であり撮影の角度はと

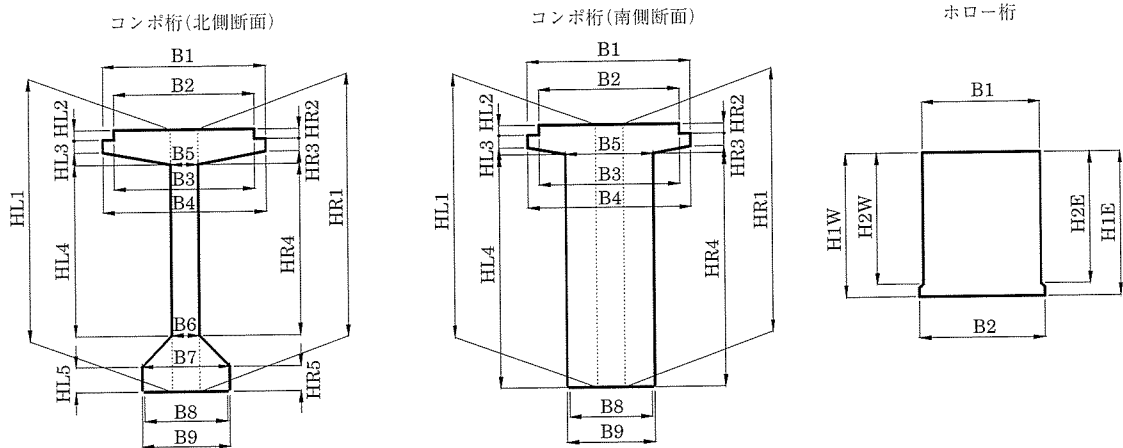


図-9 計測位置図

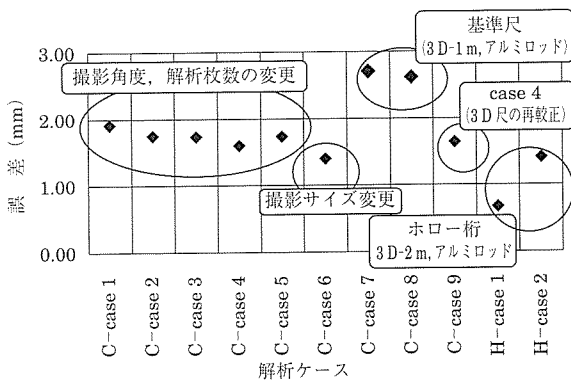


図-10 結果の比較

くに影響しないことがわかった。なお、撮影角度±75度でも検討を試みたが、この角度ではターゲットの認識が困難となり解析までたどり着けなかったことから、解析可能な範囲は約±60度程度までと考えられる。

(2) 撮影サイズの影響

次に撮影サイズの影響について考察する。図-10に示すように同じ形状であるコンボ桁のC-case 4(全体撮影)とC-case 6(二分割撮影)での比較ではC-case 6の方が若干よい精度が得られた。また、桁高が2.1mのコンボ桁(C-case 4)と桁高が約1.1mのホロー桁(H-case 1)で比較を行うとH-case 1の方が誤差が半分程度となっていることがわかる。これらのことから、撮影サイズは解析精度に大きく影響することがわかる。

ただし、画像を2分割して解析した結果は単純に誤差が半分にはならなかった。分割方法は上下2分割であったため、上側の画像には基準尺を配置することが困難であり、解析には立体フレームの上部一部しか利用できなかった。おそらくこの影響で撮影サイズを小さくしたにもかかわらず解析結果が良好でなかったのではないかと考えられる。

(3) 基準尺の違いによる影響

コンボ桁において基準尺を変更したケース(C-case 4, C-case 7, C-case 8)で比較してみる。立体フレーム2mに対して、立体フレーム1mおよびアルミロッド1mの結果は両者ともに同程度に誤差が大きくなっている。このこと

から、基準尺が大きければ精度が向上することがわかる。また、立体フレーム1mとアルミロッド1mではそれほど誤差に違いがないことから基準尺の形状の違いが誤差に与える影響は小さいと考えられる。

次にホロー桁の計測結果に着目すると、立体フレーム2m(H-case 1)とアルミロッド1m(H-case 2)ではやはりアルミロッド1mの方が誤差が大きくなっていることがわかる。

なおC-case 9では、確認のため立体フレーム2mを再度キャリブレーションを行い解析を行った。結果は若干改善された傾向にあるが大きな差は見られなかった。

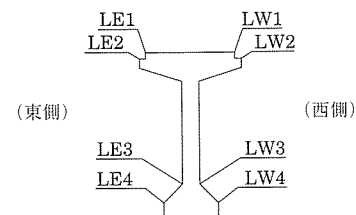
以上から基準尺の大きさが誤差に与える影響は大きく解析対象に対してある程度の寸法が必要であるといえる。

5.2 解析結果(セグメント長計測の精度向上について)

セグメント長計測の解析結果を表-4に示す。全体撮影の結果では、東側と西側でばらつきが大きく異なっている。この結果については原因が明らかではないが、一つの原因として東側の画像撮影は夕刻に行っており、逆光の影響を受け桁端部の認識が困難になってしまいセグメント長さを

表-4 解析結果(セグメント長)

	実測値	誤差		
		C-case 1 L 全体撮影	C-case 2 L 3分割撮影	C-case 3 L 端部のみ
LW 1	10 153	2	-	-
LW 2	10 153	- 1	- 6	- 2
LW 3	9 116	- 5	- 15	-
LW 4	10 162	1	- 14	-
LE 1	10 154	- 10	-	-
LE 2	10 153	- 6	- 11	- 3
LE 3	9 109	- 20	- 12	-
LE 4	10 161	- 24	- 16	-



短く評価したことが考えられる。結果的に最大 24 mm と予想以上に大きな誤差が出ている。3 分割撮影の結果では、最大誤差は十数 mm ではあるが誤差のばらつきは小さくなる傾向が見られた。解析ケース C-case 3 L では図 - 8 (C-case 3 L) に示したようにセグメント端部のみを撮影し、中間部はスタッフの長さを利用して全長を算出することとした。この手法では、端部のみを拡大して撮影するため解像度の影響による誤差が低減できる。また、中間部を画像解析により算出する分の解析誤差も解消できる。計測試験のサンプルとしては少ないが、C-case 2 L の結果と比較しても明らかに誤差が改善されている傾向が見られた。

### 5.3 解析精度に関する考察

#### (1) 誤差のばらつきについて

コンボ桁のケースにおける C-case 1 ~ 5,9 では、同一の基準尺を使用しており撮影サイズも同じである。図 - 11 にこれら同条件のケースについて全結果 (197 箇所の計測) を集計し誤差の発生頻度をグラフ化した。このグラフからわかるように、誤差 0 を中心に誤差の絶対値が大きくなるほど、その発生頻度は小さくなっている。このことから、誤差の発生頻度が正規分布すると仮定すると、誤差の平均値は 1.73 mm、標準偏差は 2.43 mm となる。なお、誤差が ± 2 mm 以内に収まっているケースは 197 箇所の計測うち 147 箇所であり、割合で示すと 74.6 % となる。

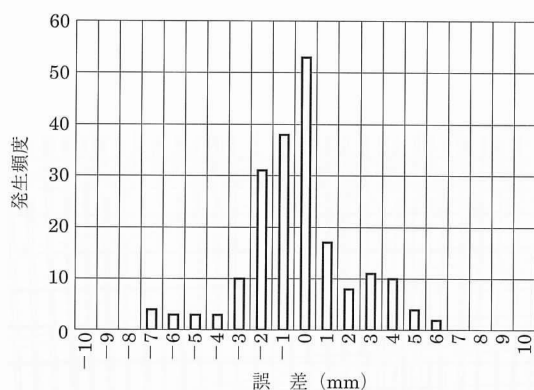


図 - 11 誤差頻度

これらの結果から桁高 2.1 m のコンボ桁断面では解析誤差の平均は 2 mm 以内となりかなりよい精度で計測できたと考える。しかしながら、標準偏差については 2 mm を越えるため実用化するためには計測手法にさらなる改善が求められる。

#### (2) 誤差の要因について

同じ基準尺を使用し撮影サイズが同一であるケース (case 1 ~ 5, 9) について、おのおのの計測長と誤差の関係を図 - 12 にプロットした。図 - 12 より計測長さにかかわらず誤差は同じ程度のばらつきである。

一般的に解析時の誤差の発生要因としては以下が考えられる。

- ① カメラのレンズひずみの補正誤差
- ② 基準尺の製作誤差
- ③ 解析時の計測点指示誤差

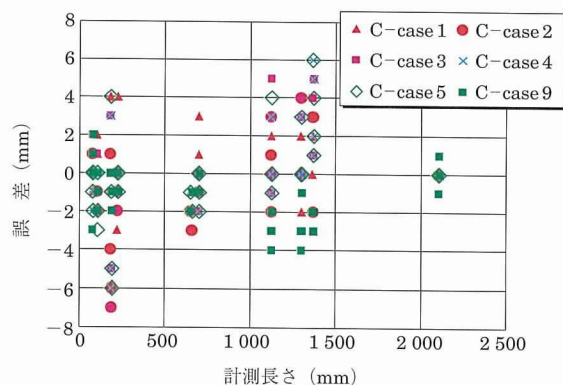


図 - 12 計測長さとの関係

このうち、①のひずみ補正データは今回はカメラメーカーより入手したものを使用しており、一般的に 0.5 ピクセル程度と考えられる。今回のケースでは約 0.5 mm と考えられ、レンズひずみの誤差は画像外周近辺で大きく現れるものであり、今回の誤差要因として影響は小さいと考えられる。②については、2 m の基準尺の長さが不正確である場合計測する寸法長さに比例して誤差が大きくなるはずである。図 - 12 より、計測誤差が計測長さに無関係であることが推測されるため、基準尺の製作誤差の影響は小さいと考えられる。したがって、今回現れた誤差の多くは③の解析時の計測点指示誤差である可能性が高いといえる。

誤差の平均については、前述の図 - 11 より 1.73 mm であった。計測点指示誤差は、画像ファイルの解像度と大きな関係があり、計測点の指示時に間違ったピクセルを指示するために発生するものである。そのため 1 ピクセルの表す寸法がそのまま誤差として現れることとなる。今回の解析では、撮影サイズから逆算すると 1 ピクセルがほぼ、1.4 mm 程度と考えられる。そのため今回の試験で確認された誤差平均は 1 ピクセルが表す形状寸法に非常に近く、解析時の計測点のマウス指示誤差が誤差要因として大きく影響していると考えられる。

### 5.4 システムの改善について

#### (1) 計測点指示誤差の解消について

今回の結果から、誤差の多くは計測対象点を画面上で指示する手法に問題があることで発生していることが明確となった。今後、解析精度を向上するためには、精度よく対象点を指示できる手法を導入すれば大きな改善が図れることと考えられる。現在、確立された画像処理技術として黒地に白い円を描画した画像の円の重心を算出する手法がある。この手法を用いれば、白い円の内側をマウス指示することで自動的に円の中心を計算する事が可能となるため、複数画像上で同一点を正確に指示することが容易となる。実際にこの技術を実装した 3 次元形状解析ソフトは、種々市販されており適用が可能であり、今後、ターゲットを改善することにより大きな精度向上を図ることが可能と考える。

#### (2) ターゲット設置作業の解消

精度の向上のみを考慮すると、円形ターゲットを活用することで大きな効果が得られることは明らかである。しか

しながら、形状計測を行う際にその都度ターゲットを設置するのでは、従来のスチールテープによる計測に比べ作業効率が向上したとは言いがたいのが実情である。そこで、今後ターゲットの設置なしによりよい精度を算出できるよう改善を進めていくことが必要である。

ターゲットの設置を行わない場合で、問題となるのは、複数画像での同一点の認識である。そこで、ひとつの案として型枠に改良を加えておき、脱枠時に製品になんらかの目印がつくようなシステムが考えられる。もしくは、画像処理上の解決策として、桁形状などの輪郭線を自動的に認識させることも有効であると考えられる。

### (3) 計測長さの問題解決

断面形状の計測についてはある程度の誤差で計測可能であることがわかった。しかしながらセグメント長などの大きな寸法に対しては誤差が大きく現れてしまう。これを解決する手法として今回提案した計測箇所の中間部分をスタッフなどの計測器で補間する方法が有効であると考えられる。比較的計測環境の整備が可能である工場などにおいては計測手法をシステム化することにより大きな寸法でも高精度で計測することが可能になると考える。

## 6. 3次元プロダクトモデルとの連携

### 6.1 3 DPM の形状管理への適用

今回行ったデジタルカメラを用いた3次元形状計測技術が積極的に実務へ利用されることとなれば、製品の品質管理に3次元データが活用されることとなる。そこで、3 DPM データとの連携を図ることにより、より効率的な品質管理を行うことが可能となると考えられる。

3 DPM は、製品のライフサイクルにおいて共通して利用される情報を3次元的に保持するデータ仕様である。そのため、図 - 13 に示すように対象構造物の形状はもちろん鉄筋やPC鋼材などに関するデータも全て保持しており各業務プロセスにおいて様々な用途が考えられる。今回対象とした形状管理においては、3 DPM データとデジタルカメラによる3次元形状計測で実測した値をコンピュータ上で比較することにより容易に形状管理が可能となり、プレキャストセグメント橋等においては架設後の形状をシミュレーションすることも可能となる。

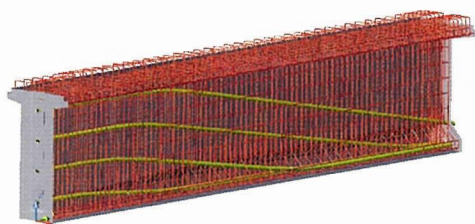


図 - 13 コンポ桁 3 DPM データ

### 6.2 3 DPM の鋼材配置管理への適用

デジタルカメラで撮影した画像から得られる情報と、3 DPM が保持しているPC鋼材や鉄筋に関する形状データを立体的に重ね合わせることで、製作過程における製品

管理を行うことも可能である。ただし、現状においては鋼材1本ごとの3次元形状の計測までを行うにはソフトウェアの改善がない限り膨大な作業量となる可能性が高い。そこで、現場において撮影した配筋状況やPC鋼材配置状況などの写真を用意し、3 DPM データをこれにあわせたアングルから表示する。その後、これらの2画像をコンピュータ上で重ね合わせることで容易に鋼材配置状況の確認が可能となる。図 - 14 に実際のPC鋼材の配置状況写真を、図 - 15 に3 DPM の同アングルからの画像を示す。これらをコンピュータ上で重ね合わせた画像が図 - 16 である。実際のシース（図 - 14）と3 DPM のシース（図 - 15）の形状が重複して表示されていることがわかる。



図 - 14 PC 鋼材実写データ

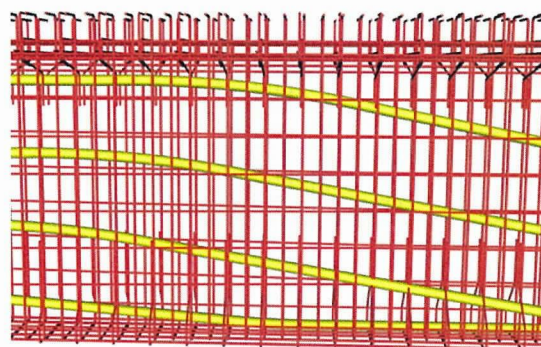


図 - 15 PC 鋼材 3 DPM データ



図 - 16 実写と 3 DPM データの重ね合わせ



## 7. おわりに

本試験によりデジタルカメラを用いた形状計測の誤差が確認できた。計測誤差にはある程度のばらつきがあるものの誤差要因が明確となったことから、今後のシステム改善の目標が明確となった。計測時の留意点として基準尺が大きければ誤差は小さくなり、撮影サイズが大きければ誤差が大きくなることが明らかとなった。デジタルカメラを用いた形状計測システムは、今後これらの結果をふまえさらなる改善を行うことにより十分実用可能なシステムとなると考える。なお、オリエンタル建設ではデジタルカメラを用いた形状計測の実用化事例として、高精度な施工管理が要求されるモノレール桁において試験的に適用した実績がある。今後機会があれば、この件に関しても報告させていただきたい。

デジタルカメラを用いた3次元形状管理は建設業へのITの活用に関する要素技術として有用であるが、今後のさらなる発展を考える上では3DPMに見られるようなライフサイクルを考慮した包括的なシステムとの連携が重要であると考えられる。デジタルカメラを用いた3次元形状計測を含め今後これらの技術の実用化を図り、製品の品質の向上と業務効率化などによる経済性の向上を図るよう研究を継続したいと考える。

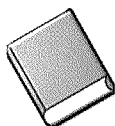
## 謝 辞

本計測試験を行うにあたり、大浦工測株式会社の方々に多大なご協力を頂いた。試験に関する撮影および解析、機材の準備などを担当していただき、今回の有意義なデータを取得できた。ここに、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 矢吹信喜・志谷倫章：プロダクトモデルを用いた包括的設計支援システムの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.273 ~ pp.280, 2003
- 2) 矢吹信喜・志谷倫章・今村晃久・近藤琢也：PC 橋梁用プロダクトモデルのコンバータプログラムと簡便な現場寸法チェックシステム, 土木情報利用技術論文集, Vol.13, pp.235 ~ pp.242, 2004
- 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 ~ pp.301, 2001.9
- 4) 長尾和之・松山裕幸・天野浄行：デジタルカメラを用いたのり面変位計測システムの開発, EXTEC No.70, Vol.18, No.2, 2004.9, 財団法人高速道路技術センター
- 5) 秋山実：写真測量 株式会社山海堂, pp.5 ~ 15, pp.233 ~ 239, 2001.4
- 6) 近藤琢也・佐々木良一・阿田芳久：デジタル画像を用いた3次元形状計測のPC 構造物への適用性に関する研究, 第13回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.605 ~ pp.608, 2004.10

【2005年3月1日受付】



刊行物案内

# プレストレストコンクリート構造物の 新たな動向

## 第32回 PC 技術講習会

(平成16年2月)

頒布価格 会員特価：5 000 円 (税込み・送料別途 500 円)

非会員価格：6 000 円 (税込み・送料別途 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会