

立坑の内空変位計測における写真測量技術の適用性

三井建設(株) 正会員 ○木山 保, 山田 惇人, 重盛 剛彦
 京都大学 正会員 大西 有三, 西山 哲

1. はじめに

大深度地下岩盤における構造物の建設において、立坑によるアプローチが目標の深度に最短距離で到達できるため、適切な立坑掘削が構造物全体の合理的な構築に及ぼす影響は大きい。立坑の掘削工法には、ショートステップ工法、立坑NATM工法、レイズボーラー工法などがある。このうち、立坑NATM工法では掘削時の内空変位計測が基準化されている。また、すでに完成した立坑についても、立坑の長期供用における安定性の管理・監視の観点から、今後、内空変位計測などの必要性がでてくると考えられる。

立坑の内空変位計測は、一般的な水平坑における計測法をそのまま適用するのが困難である。立坑では、地表、スカフォード(吊り作業足場)、坑底以外に作業スペースはなく、スカフォードと坑底の間には各種掘削機械が、スカフォードと地表の間には数種のワイヤーロープが張られているため、計測作業の支障となる。このため、コンバージェンスメジャーなどによる計測は不可能である。また光波測距儀を利用する場合、一般にこれらの機器は上向きしか計測できないこと、限られた作業スペースからの計測で仰角が大きくなり誤差が増大すること、スカフォードは揺動するため計測精度が低下することなど、実用上は適用が困難であろう。

一方、近年進歩の著しいデジタルカメラを用いた精密写真測量技術は、非接触測定、測定が簡単、装置が軽量・低コスト、高精度化が可能、測定の自由度・柔軟性が高いなど、優位な点が多い。そこで本報告では、立坑の内空変位計測における精密写真測量技術の適用性について検討し、さらに今後の課題を抽出した。

2. 精密写真測量技術について

写真測量は、航空写真の画像から地形データを読み取る空中三角測量技術を基に、複数の2次元画像から被写体の3次元像を再構築する手法として発展してきた。これらは工業計測の分野で、大型構造物に標点(反射ターゲット)を貼付してストロボ撮影し、形状を測定する技術に展開した。また近年市販のデジタルカメラの低価格化と高精度化が進み、これによる精密写真測量が可能となっている。

計測システムおよび方法を示す。立坑内面に多数の標点を貼付しておき、1枚の画角に複数の標点が写るようにストロボ撮影する。撮影位置・角度を変えて複数枚撮影し、すべての標点を数回は撮影する。また被写体の中に長さが既知の基準尺を設置しておく。図1は立坑上の標点をデジタルカメラで撮影する場合の模式図である。標点の3次元座標(X, Y, Z)とカメラの位置(X0, Y0, Z0)、および画像上の標点の座標(x, y)は同一の直線上に存在する。この中心投影原理から、各座標を関係付ける共線条件式が幾何学的に導かれる。一般にはレンズ歪が存在するため、図1に示す関係が成立しないため、図2に示すレンズ歪を考慮した共線条件式を導かねばならない。カメラ固有のレンズ歪などの系統誤差を取り除く手法はSelf-Calibration法と呼ばれ、市販のデジタルカメラを用いても高精度な計測が可能となる。

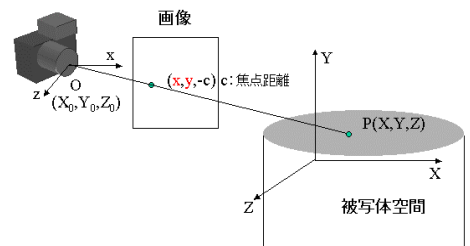


図 1. 共線条件式 の概念

写真画像上の座標(x,y)と被写体の3次元座標(X,Y,Z)の関係式
 (X_0, Y_0, Z_0) はカメラの位置、 a_{ij} はカメラの角度を表す

$$x = \Delta x - c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = \Delta y - c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

デジタルカメラの内部構造に起因するパラメータ(レンズ歪み)を
 $\Delta X, \Delta Y$ として方程式に組み入れる。

図 2. Self-Calibration 法の共線条件式

次に、共線条件式を線形化し、最小二乗法によって3次元座標(X, Y, Z)を算出する。

$$v \mid AX \ 4 \ d$$

ここで、 v : 残差ベクトル, A : 係数行列, X : 未知数ベクトルそして d : 観測値ベクトルである。ここでは、撮影時のカメラの座標および角度も未知数として扱う。さらに v の2乗和を最小にするため正規方程式:

$$\mathbb{Q}^T \ A \ \hat{x} \ \mid \ A^T \ d$$

が導かれる。ここで、左辺の係数行列にはランク落ちが生じており逆行列が存在しない。これは、被写体空間上に座標軸が固定されていないために生じる。ここではフリーネットの手法を用いてランク落ちに相当する分の拘束条件式を正規方程式と組み合わせ、基準点無しで標点の3次元座標を求めることを可能とした。

3. 試験結果および考察

立坑における写真測量の適用化試験は、群馬県大間々地区の立坑で実施した。直径7.5mの円形断面で、深さ24mである。地質は固結した礫混じりの凝灰岩からなり、稀に1m程度の巨礫が出現するが、切羽は自立し、すでに変形は収束している

施工法はロックボルトと吹付コンクリートによる立坑 NATM 工法で、支保構造として4.0mのロックボルトを1断面20本、1.0m間隔で配置し、14~20cm厚の吹き付けコンクリートを施している。

図3に撮影画像の1例を示す。標点は、1箇所て上下50cm間隔に3点、螺旋状の階段に沿って1m間隔に11箇所に設置し、合計33点で、最深の標点から順に番号を付けた。この他、基準尺を数箇所に設置した。撮影は昼間であったが、反射ターゲットの標点は、ストロボ撮影により白い点として写っている。解析では、これらの白い点の標点番号を入力すると、標点の重心とその画像上の座標は自動的に決定される。

今回の試験では、すべて地上部の立坑周囲から、フリーハンドで撮影した。使用したデジタルカメラは、18mmレンズ搭載で、274万画素の仕様である。簡単な撮影規準を決めて1setを19枚の写真とし、撮影者を変えて2set撮影したが、2set目はストロボの不調により16枚が有効であった。以降、19枚の試験ををset1、16枚をset2と呼ぶ。図4にset1の測定結果を示す。水平面がzx面、y軸を鉛直方向にとっているので注意されたい。zx面では●で示した標点が半円状に分布し、撮影位置が■で示されている。

表1に、それぞれの測定における内的精度を示す。両setとも鉛直方向のy軸の精度がX,Z軸に比較してやや劣り、軸毎ではset2がset1より精度が良いなどの傾向があるが、総じていえば、0.5mm以下の精度は内空変位計測において十分な精度と言える。

最深(No.1)、ほぼ中間部(No.16)、最浅の標点(No.33)を選び、2測定(set)における2点間の距離(内空)の差、測定の再現性について検討した結果を表2に示す。最も離れた2点間(No.1とNo.33)の距離は11.7mであるが、2setの差はわずか0.35mmであった。一方、坑口寄りの2点間(No.16とNo.33)の距離は7.3mであるが、2setの差は1.84mmであった。set数が2つしかないため、十分な議論はできないが、今後の課題として、撮影枚数、撮影位置と方向によりきまるネットワークの強さを考慮して、適正な撮影規準を決めてやれば、測定の再現性はさらに向上すると考えられる。

4. まとめ

デジタルカメラによる写真測量を立坑において実施し、十分な内的精度があること、いくつかの課題を検討することにより立坑の内空変位計測に適用可能であることがわかった。

(参考文献)

大西有三, 他(1999): 第44回地盤工学シンポジウム, pp.139-144.

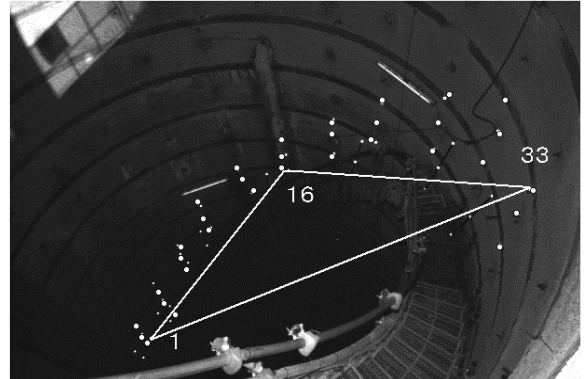


図3. 撮影画像の1例

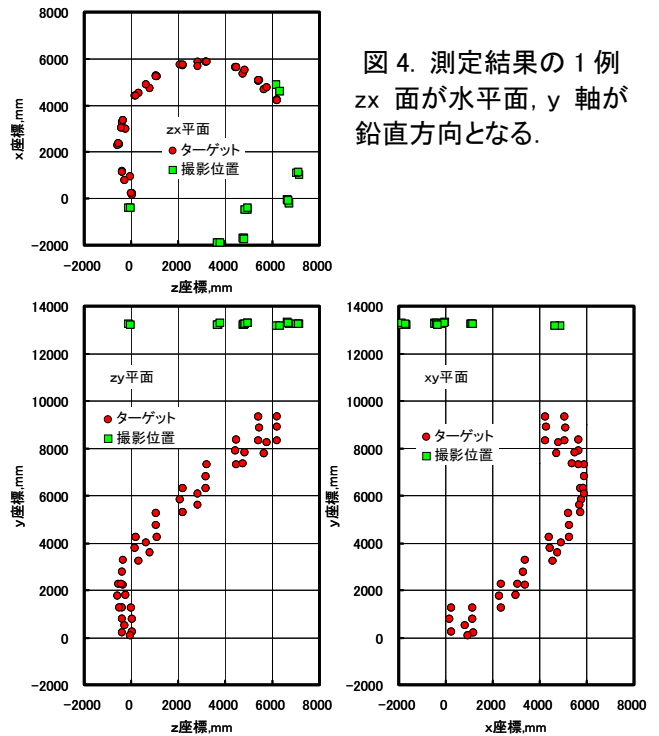


図4. 測定結果の1例
zx面が水平面、y軸が鉛直方向となる。

表1. 測定の内的精度

set	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xyz}
set1 (mm)	0.25	0.44	0.35	0.36
set2 (mm)	0.14	0.29	0.19	0.21

表2. 任意の2点間の測距と測定の再現性

(mm)	No.1			No.33			2点間距離	2setの差
	x	y	z	x	y	z		
set1	232.59	246.59	31.81	4217.43	9347.17	6189.17	11688.14	-0.35
set2	267.45	199.57	16.82	4159.91	9359.50	6145.84	11688.48	
(mm)	No.1			No.16			2点間距離	2setの差
	x	y	z	x	y	z		
set1	232.59	246.59	31.81	5246.75	4253.06	1105.53	6507.42	0.83
set2	267.45	199.57	16.82	5259.03	4226.62	1113.45	6506.59	
(mm)	No.16			No.33			2点間距離	2setの差
	x	y	z	x	y	z		
set1	5246.75	4253.06	1105.53	4217.43	9347.17	6189.17	7269.99	-1.84
set2	5259.03	4226.62	1113.45	4159.91	9359.50	6145.84	7271.83	