

# 岩盤変位の遠隔モニタリング装置の開発

池川洋二郎<sup>1</sup>・伊藤洋<sup>2</sup>・大西有三<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph.D (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>2</sup>正会員 工博 同上

<sup>3</sup>正会員 Ph.D 工博 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

岩盤地下空洞や斜面において崩落の危険がある箇所は、挙動監視を必要とする場合がある。このため計測点に計測機器や標点などの設置を不必要にする安全な遠隔からの変位計測手法の開発が望まれている。

ここでは地下空洞を対象とする遠隔計測の新手法を紹介する。計測原理は岩盤面に投影したレーザースポットを別の角度から撮影することによって形成される空間中の三角形を用いて、スポット点の3次元座標を求めるものである。この原理を応用して複数点を逐次的に計測する変位のモニタリング装置の開発を行った。さらに、トンネルで行った精度検証の結果から実用性を示した。以上より計測が困難である岩盤の崩壊挙動の解明が進むことが期待される。

**Key Words :** discontinuous rock mass, underground cavern, three-dimensional automatic measurements, behavior of displacement, image processing

## 1. はじめに

重要施設を収容する大規模な岩盤地下空洞などの掘削工事では、岩盤の割れ目などの不連続面に支配され予測困難な岩盤ブロックの局所崩壊が生ずることがあり、安全管理上、岩盤の全体的な変位挙動を把握するとともに、さらに局所的な変位挙動の把握が必要となる。このように計測を要する危険箇所への変位計測器や計測用標点を設置することは、工期への影響を生じる危険作業となる場合があるため、計測箇所へ近づくことなく遠隔から安全かつ高精度に計測を可能とする計測手法や装置の開発が望まれている。

ここでは地下空洞を主な対象とする新しい遠隔計測手法の紹介を行う。手法の原理は、岩盤面に投影したレーザースポットを別の角度からCCDカメラで撮影することによって形成される空間中の三角形を用いた三角測量を行い、スポット点の3次元座標が求めるものである。この原理を適用することにより、複数点の変位のモニタリングを行うシステムの開発を行った。この計測法をポット光投影三角測量(S P T: Spot Projection Triangular Surveying)法と呼ぶ。

以降、2. ではS P T法の概要、3. では座標計算

法、4. ではモニタリングのために開発した装置の制御ソフトの概要、5. では計測精度の検証結果、6. で本論のまとめを記述する。

## 2. 開発した装置の概要

物体の立体形状や3次元位置を非接触で遠隔から計測する装置は、幅広い分野において様々な性能のものが求められている。図-1には各産業・分野で求められる計測距離と計測精度の関係を示す。ここで図中の右上がりの平行線は計測精度を計測距離で除した精度距離比を示す。土木分野で要求される精度距離比は $1 \times 10^{-4} \sim -5$ 程である。これは10~100mの計測距離において、約1mmの精度に相当し、他分野に比べ長い距離において高い精度が要求されている。

土木分野で要求される精度距離比が得られる計測手法として、プリズム式反射鏡を用いる光波測量や幾何学的関係から座標値を求める三角測量などがある。しかし、計測点が危険箇所にある場合、光波測量は反射鏡を必要とするため、遠隔からの計測が不可能になる。また、三角測量の前方交会法では、計測点の目視視準が必要であるた

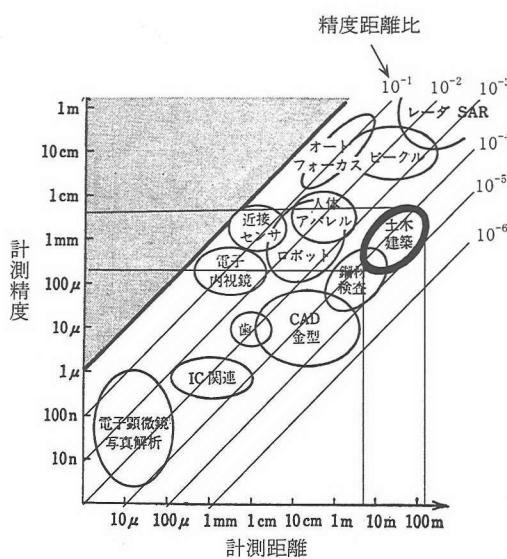


図-1 計測距離と精度の両対数関係  
(参考文献 2) より、抜粋加筆)  
(精度距離比 = 計測制度 / 計測距離)

め、モニタリングが困難になる。ここで前方交会法は三角形の1辺2角を計測し、残りの頂点の座標が決める方法である。一方、モニタリングが可能な非接触計測の手法として、電磁波や弾性波の反射時間や位相差から、距離を求める方法では必要とする距離精度比が得られていない。また、レーザー変位計、ダイヤルゲージ、渦電流式の変位計は近距離あるいは接触式の計測法である。

以下では土木分野で用いられる光波測量と同程度の精度が得られ、前方交会法の原理をモニタリング計測に適用させたSPT法の概要について記述する。図-2に示すように計測原理の概要是、岩盤面に投影したレーザースポットを別の角度からCCDカメラで撮影することにより形成される空間中の三角形を用いて前方交会法を行うものである。モニタリングでは事前に設定した複数点の3次元座標を逐次的に計測する。この計測原理の概念は存在していたが、50m程の計測距離を対象とするモニタリング装置の開発は成されていなかった。ここで、交会角は図-2に示すように前方交会法で求めた頂点で挟まれる角度である。

SPT装置の構成は、CCDカメラとレーザーを搭載するリモコンセオドライト2台、カメラ撮影した

スポット点の認識を行う画像処理装置、通信制御用のPC、PC上で稼動して装置全体を制御するソフト等から成る。望遠鏡の水平と鉛直方向は、セオドライト内部のステッピングモータを使って制御できる。測角精度は1級の1秒読みで、角度は電子式エンコーダにより検出する。また、CCDカメラの撮影画像は画角が約1度で30倍である。

搭載するレーザーは波長400~700nmの可視光で、まばたきにより眼が保護される程度である出力1mW以下である。レーザーの等級はクラス2で、計測時に管理者を必要としない。ここで等級は波長と放出時間によって人体へ与える影響の程度で分類される。

ここでセオドライト(経緯儀, theodolite)とは、小型正立望遠鏡を水平および垂直面内で回転するよう取り付け、被観測体の方方位角および高度角を精密測量するもので、主にヨーロッパで用いられた。一方、トランシット(Transit)は、バーニア読みで携帯性の良いものを指す。測角精度から1級は1秒読み、2級は6~12秒読み、3級は20~30秒読み、4級はそれ以下となっている。

事前に設定した複数点の変位をインターバル計測によるモニタリングを行うため、SPT装置の制御ソフトを開発した。ソフトの機能は、セオドライトや画像処理装置と制御用PC間の双方向通信を行う制御部と、スポット座標の解析と保存を行う解析部から成る。

計測手順の概要をまとめる。まず、岩盤面上の計測箇所あるいは範囲の決定し、基準座標系の設定する。次に装置の配置の決定と測量をした後、計測点の方向を手動で計測し、複数の計測点の記録を作成する。最後に計測点のモニタリング計測を行う。

モニタリング中に変位が生じた場合、初期に記録したセオドライトの方向には正確な三角形が形成されない。そこでレーザーの投影方向は固定し、カメラの方向を微調整することにより、正確な空間中の三角形を決め直す必要がある。ここで画像処理装置はカメラが撮影したスポット点の認識を行い、画像中のスポット点のずれ量を求めるために用いる。さらにカメラ方向の補正に必要な角度を計算し、カメラの方向の微調整を行う。この一連のプロセスの繰返しにより、スポット点が精度良く自動視準され後に、座標の計算を行う。

表-1には土木分野でよく使われる計測手法として、衛星を利用するGPS、反射鏡を用いる光波測量、ここで開発したSPT法の特徴をまとめる。SPT法の特徴としては、スポット光を計測点と

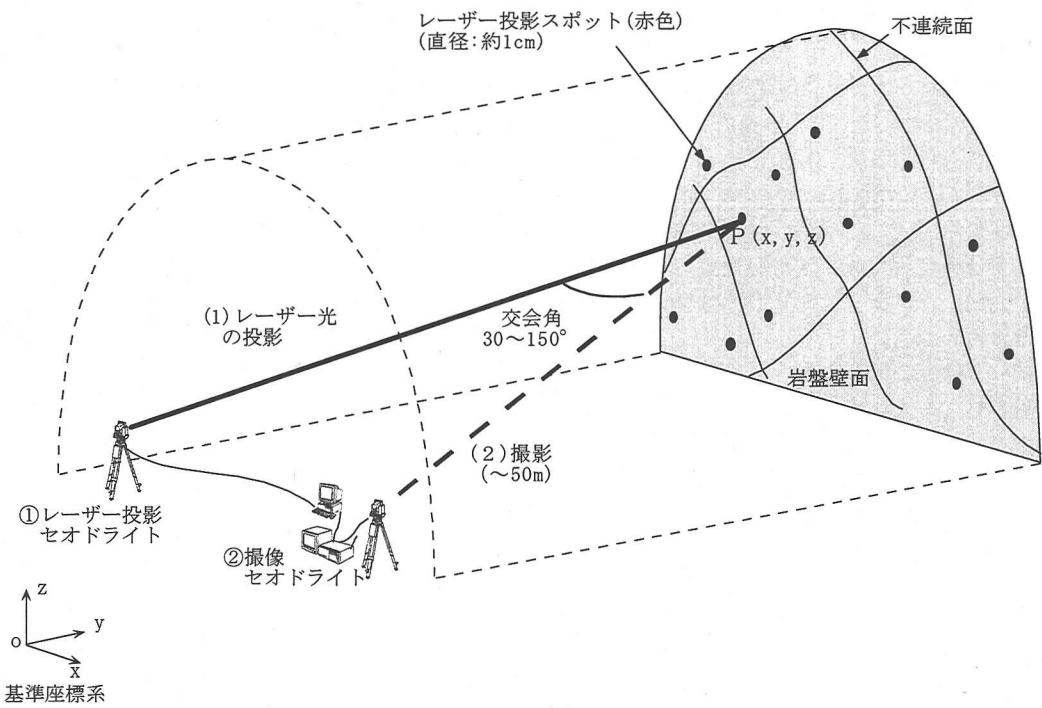


図-2 SPT法による地下空洞での計測概念図

表-1 計測手法の特徴

	G P S <sup>4)</sup>	光波測量	S P T法
計測原理	複数の人工衛星からの時間データの受信による観測点の座標計算	近赤外線光の反射時間による距離計測	レーザースポット投影点、光源点、撮影点より成る三角形を用いた三角測量
計測点の設置	必要 :アンテナと受信機	必要 :反射鏡、反射シール	不必要 :レーザースポットを投影
計測速度	約1時間/点	約20秒/点 自動計測時	約60秒/点 自動計測時
精度	水平:10 垂直:20 (mm)	(0.8+D ppm) mm D : 計測距離	光波測距と同等
適用条件	地上:可能 地下:不可	地上:可能 地下:可能	地上:夜間可能 地下:可能

することで、計測点にアンテナや反射鏡などを設置することを不要としたこと、約1mmの精度が得られることである。また、計測速度は約60秒/点である。

### 3. S P T法での座標計算法

ここでは角度の定義、三角測量法の前方交会法などを示すことにより、S P T法における3次元座標の計算法を示す。

まず、3次元空間での方向や角度の記述に関する定義を行う。図-3に示すように、あるベクトルの傾斜角 $\alpha$ (dip angle)はz軸とのなす角( $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ )で表し、傾斜方向角 $\beta$ (dip direction angle)はy軸からx軸方向(時計回り)に計測した角( $0^\circ \leq \beta < 360^\circ$ )で表す。従って、単位ベクトル $\hat{a}$ の成分(x, y, z)は、 $\alpha, \beta$ より次のように求められる。

$$\hat{a} = (\sin \alpha \sin \beta, \sin \alpha \cos \beta, \cos \alpha) \quad (1)$$

次に、図-4に示す平面上の幾何学的な関係を示す。傾斜方向角 $\beta$ を変数とする前方交会法で使われる式(2)<sup>3)</sup>を用いて、未知点pのx, y座標が求められる。

$$x = \frac{y_L - y_C - x_L \tan \beta_L - x_C \tan \beta_C}{\tan \beta_C - \tan \beta_L} \quad (2a)$$

$$= x_C - \frac{(y_L - y_C) - (x_L - x_C) \tan \beta_L}{\tan \beta_C - \tan \beta_L}$$

$$y = y_C + (x - x_C) \tan \beta \quad (2b)$$

ここで $P_L(x_L, y_L, z_L)$ ,  $P_C(x_C, y_C, z_C)$ は各々レーザー投影と撮像セオドライトの基準座標系における中心の座標で、設置時に測量結果より得られる。

実計測では視準や測角などにおける計測誤差をゼロにできないため、図-5に示す幾何学的関係によりz座標が一意に決まらない。このためx, y座標の一意性を優先させ、未知点pのz座標は式(3)のように計測点から各セオドライトまでの水平距離 $d_C, d_L$ を重みとする平均により求めることとする。

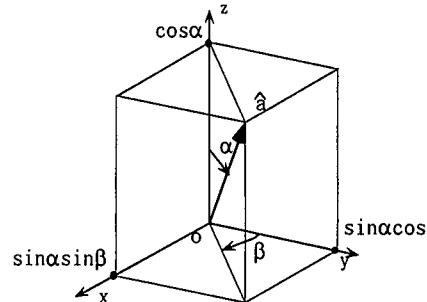


図-3 単位ベクトルと傾斜・傾斜方向角( $\alpha, \beta$ )

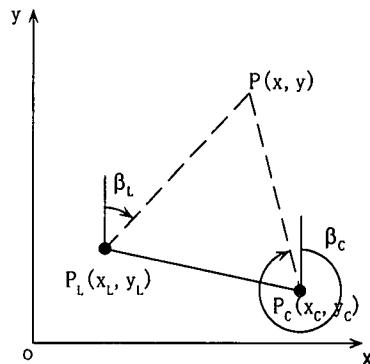


図-4 前方交会法

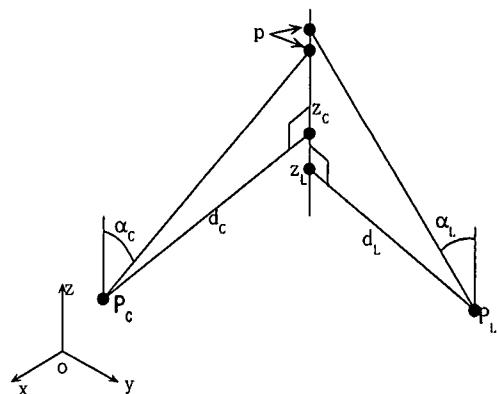


図-5 z座標の求め方

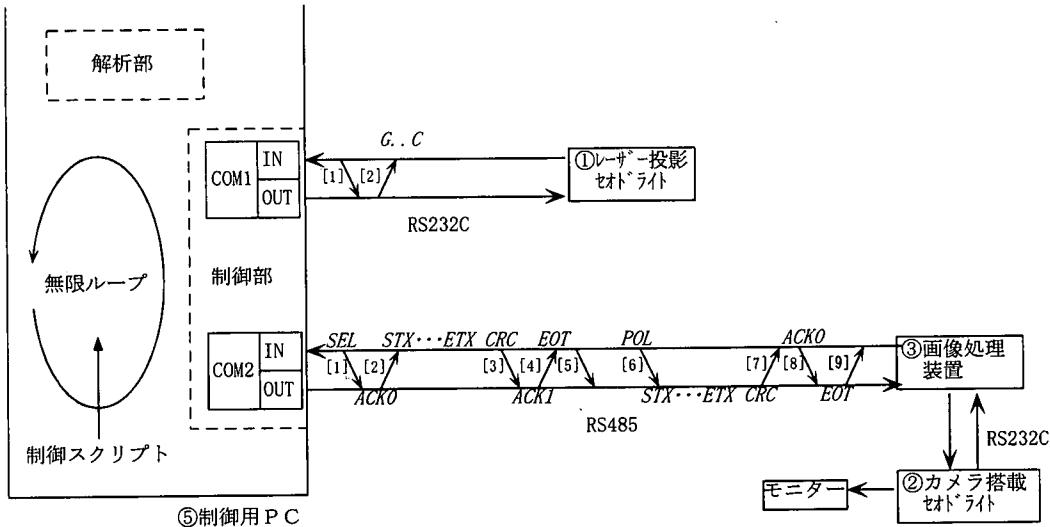


図-6 制御ソフトの流れ図  
(斜字体と [ ] は通信手順と順番を示す)

$$z = \frac{d_C(z_L + d_L \cot \alpha_L) + d_L(z_C + d_C \cot \alpha_C)}{d_L + d_C} \quad (3)$$

ここで

$$d_C = \left\{ (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$d_L = \left\{ (x - x_L)^2 + (y - y_L)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

である。

以上より、基準座標系における2台のセオドライト位置を事前に測量しておけば、モニタリング時に計測される  $\alpha_c, \beta_c, \alpha_L, \beta_L$  よりスポット座標が逐次求められる。

#### 4. 制御ソフト

ここでは複数の計測点の変位をモニタリングするために開発したSPT装置を制御するソフトの概要について記述する。

1つの計測点の座標値を求めるプロセスをまとめる。まず、2台のセオドライトの方向を制御し、レーザーとカメラを事前に記録した計測点の方向に向ける。次にカメラで撮影した画像中のスポット点の認識を画像処理により行い、ずれ量から補正角度を計算し、カメラ方向の微調整を行う。画像中のスポット点のずれ量が十分小さくなつたことを確認後に式(2)と(3)により3次元座

標の計算を行い、結果をPC内に保存する。複数点の計測は、このプロセスを繰り返すインターバル計測によりモニタリングを行う。

制御ソフトは制御用PC内で動作する。ソフトの機能は、図-6のようにリモコンセオドライトと画像処理装置との間で双方向通信を行う制御部と、計測点の3次元座標の解析と計算結果の保存を行う解析部からなる。制御部と解析部の動作は、制御スクリプトから図のように無限ループ内に逐次読み込み、各計測プロセスを連続的に実行させる。

ここで制御スクリプトとは制御用PCからセオドライトに送信する一連のコマンドを記述したもので、各行が1つの動作を実行させるコマンドに相当する。例として図-7に3点の計測点をモニタリングするために作成した自動制御スクリプトを示す。この例の具体的な動作内容は、LやSで始まる行は、それぞれレーザーとカメラを搭載するセオドライトへのコマンドである。含まれる7桁の数字は、計測点方向を度分秒の単位で記述している。“S!MEA…”の行は画像処理による自動観測を実施させ、座標計算と結果を保存させるコマンドで、計測点の名前と一致するファイルにそれぞれ追加保存を行う。Wで始まる行は計測点の名前、Aの行は計測インターバルを秒単位で設定する。#は、コメント行である。

制御スクリプトはモニタリング開始前に2台のセオドライトから各計測点の方向を手動で観測す

る時に、テキストファイルとして編集・作成する。手動による規準は、制御ソフトの一部の機能であるコントロールパネル上でのマウスによるボタン操作やキーボード入力で行う。

この制御ソフトが動作する基本ソフト(OS)は、Windows95以降のバージョンである。開発言語はC言語で、コンパイラはVisual C++ ver. 4.0Jを用いた。また、OSのマルチタスク機能により、モニタリング中に計測結果を見ることや経時グラフなどの作成が可能である。

## 5. 計測精度の検討

セオドライブ位置の測量誤差やセオドライブの制御誤差などにより、計測結果は誤差を含む。そこでトンネル内での実計測により、システムとしての計測精度の評価を行ったので、概要と結果を示す。

### (1) SPT手法の精度試験の概要

精度試験を行った場所は、電中研式岩盤等級でC<sub>II</sub>～B級で、一軸強度が100MP以上ある片麻岩中に掘削された直径約4mのトンネルである。計測位置の周辺は堅硬な岩盤が分布し、支保はロックボルトのみで岩盤面が露頭している。計測対称面は天井方向に数m掘込まれた箇所で、地下水の浸透により岩盤面は湿り、数箇所の岩盤の割れ目で水滴が落ちていた。また、空気はほぼ飽和状態であった。

図-8にセオドライブと計測箇所の配置を示す。2つのセオドライブの間は約3m、撮像セオドライブからの計測距離は約9mである。計測点はグリッド状に9点を設けた。前方交会法で必要な交会角は30°～150°であるが、この精度試験では最小の交会角の30°である。撮像セオドライブの中心に基づき座標系の原点を設け、y軸がレーザー投影セオドライブの中心を通るようにした。レーザー投影セオドライブの中心は撮像セオドライブの光波測量の機能を用いて距離計測を行い、座標を決定した。

計測精度の評価は、動かない岩盤面上の計測点の座標を複数回求め、計測結果のバラツキから再現性を評価することにより行う。

### (2) 結果

計測結果を図-9のヒストグラムに示す。横軸は

```
#画像処理装置の初期化  
S!TARGET2  
# インターバル時間(sec)の設定  
A 300  
#計測点名  
W1  
#レーザー投影セオドライブの方向制御  
L*DHA2543245VA0603302  
#撮像セオドライブの方向制御  
S!DHV 2905258 0635733  
#自動規準、座標計算、結果の保存  
S!MEASDHV001 0055000 2905258 0635733 2 25 25  
W2  
L*DHA2643245VA0603302  
S!DHV 2985143 0663018  
S!MEASDHV001 0055000 2985143 0663018 2 25 25  
W3  
L*DHA2662658VA0723607  
S!DHV 3001558 0775905  
S!MEASDHV001 0055000 2995905 0774856 2 25 25
```

図-7 制御スクリプトの例  
(3点をモニタリングする場合)

平均との差で0.1mm毎に分割している。符号は図-8中の基準座標系に基づいている。縦軸は計測回数を示す。奥行方向に相当するx軸方向のバラツキは、標準偏差で0.28mm、左右方向(y軸方向)は0.03mm、上下方向(z軸方向)は、0.12mmとなった。また、平均標準偏差値を平均距離で除した精度距離比は $1.6 \times 10^{-6}$ 程度となった。

### (3) 考察

この計測結果で得られた精度距離比は、土木分野で一般に要求される精度距離比(図-1参照)に対して1オーダー小さく、精度が良い。また、光波測距での計測誤差は、メーカー提示値として $0.8 + D$  ppm ( $D$ は計測距離、単位はmm)であり、これと比較しても十分な精度を持つと考える。

左右方向と上下方向の計測結果のバラツキに差が出た理由としては、前方交会法が平面測量を定式化したものであるためと考える。しかし、計算式の修正は必要無いと考える。また、上下方向の精度に関しては、セオドライブの設置や測量の誤差に由来すると考え、熟練を要すると考える。

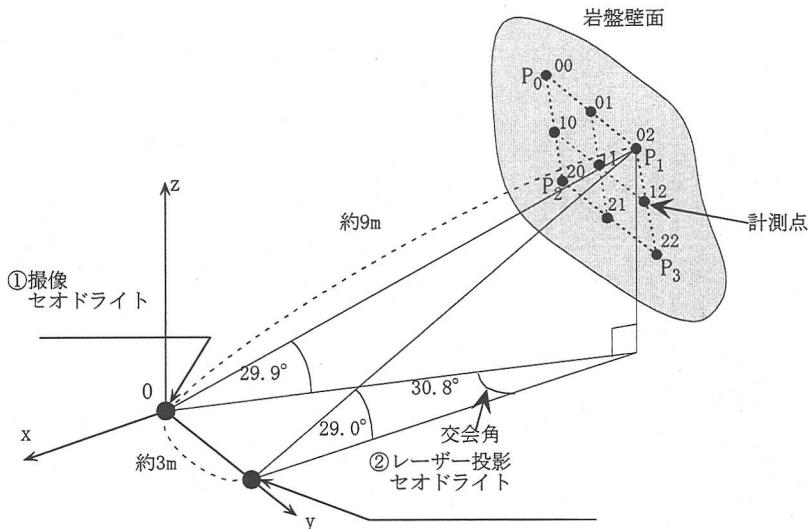


図-8 トンネルでの精度試験時の計測点と装置の配置

地下での精度評価の結果が良い理由は、地下空洞では温度と湿度が一定なので、レーザー光の屈折が無いこと、スポット光が周りの照明の変化の影響を受けない強度を持ち、画像処理による自動視準の再現性が良いことと考える。

さらに、計測原理からすると交会角が直角に近くなる配置をとることで、より高精度の計測結果が期待できる。また、大規模な空洞では直径に応じて、交会角が直角に近い配置をとれると考える。

計測距離が50mの場合に、自動視準の機能が働くことは、精度試験と同時に確認をした。しかし、交会角が $2^\circ$ となる配置しか取れなかつたため計測精度に関して言及できない。さらに、50m程の距離での精度評価が必要と考える。

## 6. まとめ

地下空洞を主な対象とする遠隔計測手法として、岩盤面に投影したレーザースポットを別の角度からのカメラ撮影によって形成される空間中の三角形を用いて、複数のスポット点の3次元座標が逐次的に求められるSPT法の開発を行った。また、変位のモニタリング計測を行うため、SPT装置の制御プログラムの開発を行い、室内実験で数ヶ月間のモニタリングができることを確認し

た。さらに、トンネルでの精度検証を行い、10m程の計測距離で1mm以下の計測精度が得られることを確認した。

以上より、危険な箇所や計測位置が高くて作業が困難箇所に計測機器や標点を設置することなく、安全な遠隔計測が可能となった。また、大規模な地下空洞の建設工事に影響を与えることなく、安全に遠隔から変位のモニタリングができる事を示した。

SPT法による計測条件をまとめる。最大の計測距離が50mであること、明るさの条件は太陽光の影響の無い地下あるいは夜間であること。装置の配置条件は交会角が30度以上となることである。また、スポット点の3次元座標は精度良く求まるが、変位はレーザーの投影方向の成分のみである。

## 7. 最後に

施工中の地下空洞での確実な計測が行えるようにするために、重機や発破等の振動、粉塵などへの対策を検討する。また、50m以上の計測距離が得られる装置の改良により、適用が可能な現場条件の拡大を図る。

## 参考文献

- 1) 池川洋二郎, 伊藤洋, 大西有三: 画像処理と三角測量を応用した原位置3次元座標の計測装置と制御コードの開発, 第10回岩の力学国内シンポジウム, 1998. 1.
- 2) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, p. 189, 1990.
- 3) 森忠次: 測量学1, 丸善(株), p. 350, 1982.
- 4) 桜井春輔, 清水則一, 血海章雄, 古谷茂也: GPSによる切り取り斜面の変位計測, 土木学会論文集, No. 475/III-24, pp. 137-142, 1993. 9.

(1998. 6. 19受付)

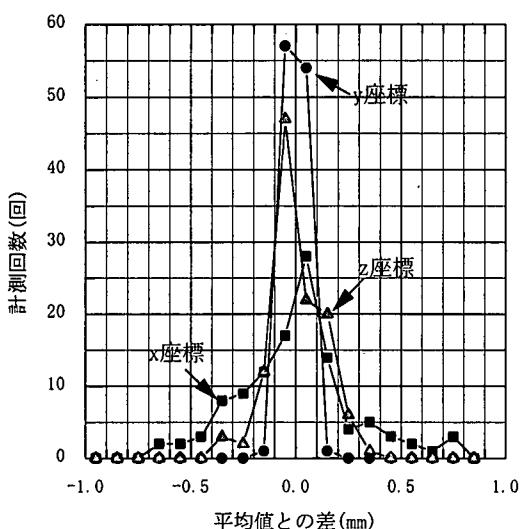


図-9 地下空洞での計測結果(計測距離 9m)

—■— x座標(奥行き方向) [0.28]  
—●— y座標(左右方向) [0.03]  
—△— z座標(上下方向) [0.12]  
[標準偏差]

## A NEW REMOTE MONITORING SYSTEM FOR LOCAL DISPLACEMENTS ON ROCK SURFACES

Yojiro IKEGAWA, Hiroshi ITO and Yuzo OHNISHI

Unstable zones of underground caverns and rock slopes would be required to be monitored. Thus, a safe measuring method at distance has been necessary by eliminating to place devices or targets at the measuring points.

Here, a new monitoring method is introduced for underground chambers. The principle is that coordinates of a laser spot projected from one angle is calculated by using a triangle in a space formed by taking the image from the other angle. Then, many measuring points can be monitored by repeating the principle step by step. A test result concerning on the accuracy shows the capability in underground chambers. It is hoped that the study on the behaviors of rock mass failures would be propelled by using this method.