

地すべり観測における光波距離計の応用

顧問 組 大野陸雄, 馬渡裕二
 ○猪狩哲夫

1. まえがき

地すべりに伴う地表面変位量, 構造物の変位量などの測定において, 従来の方法は対象領域内での測定であることなどから, 不動点や安全性を確保することがむずかしい場合がある。一方, 光波測距儀による測定では, 対象域外の不動点から距離および角度を測定することによって, 変位の絶対量とその方向を知ることができる。これは極座標法によって測定の座標を求め, その経時変化として変位をとらえるものである。極座標法とは, 1点から距離を光波測距儀で, 高度角, 水平角をセオドライトでそれぞれ測定する方法である(図-1参照)。しかし, この方法では変位量の測定精度に疑問があり, 測定精度を定量的に把握し, それを向上させることが重要な課題である。

著者らは光波測距儀の変位量測定への適用に関して, これまで光波測距儀による4ヵ月間の測定データを統計的に解析して, 測距値のばらつきを定量的に把握し, 影響要因について検討を行ってきた。

本稿は, 変位の大きさとその方向を極座標法によって測定する場合の測定精度を検討し, その結果に基づくシミュレーションによって, 変位量の検出限界と効率的な測定方法についてまとめたものである。

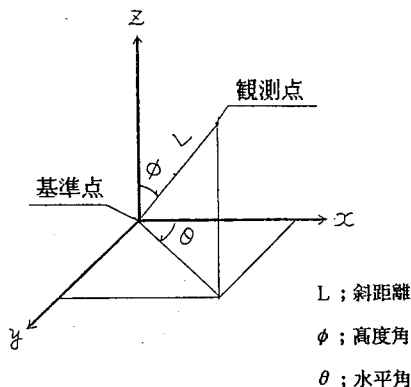


図-1 極座標法

2. 実験の概要

2.1 実験目的

極座標法による変位量測定の精度は, 測距および測角の精度に左右されるため, 測距および測角の精度すなわちばらつきの程度を定量的に把握することを目的とする。また, 後述する座標値のばらつきを求めるシミュレーションの基本データとする。

2.2 使用機器

実験は, 光波測距儀による測距実験とセオドライトによる測角実験とからなっている。

測距実験では, 日本光学工業製の光波測距儀 (ND-160) と1素子型の反射プリズムを使用した。測角実験では, 測定器によるばらつきの違いを調べるために, 1秒読みセオドライト (NT-5) および6秒読み (NT-4D, いずれも日本光学工業製) を使用した。

使用機器の一覧を表-1に示す。

表-1 使用機器一覧

目的	機器	仕様
測距	光波測距儀	測距範囲 0~1,000m
		測距精度 $\pm (5\text{mm} + 5\text{ppm} \cdot D)$
		視準望遠鏡 正像, 8倍, 視野3.5°
		使用温度範囲 -20℃~+50℃
		測距時間 5秒
		製作所, 型名 日本光学工業, ND-160
測角	プリズム反射鏡	型式 コーナーキューブ
		プリズム定数 40mm
		素子数 1素子
	気圧計	製作所 日本光学工業
		型式 アネロイド式気圧計
		測定範囲 530~770mmHg
測角	セオドライト	最小目盛 1mmHg
		望遠鏡光学 内焦式アナラフチック
		倍率 30倍
		マイクロ目盛 数字読み 6秒 1秒
		型名 NT-4D NT-5
		製作所 日本光学工業

2. 3 測点の配置

測点は、セオドライトおよび光波測距儀を設置し測距、測角の読取りを行う基準点、基準点とともに測角の基線を構成する基準控点、および反射プリズムを設置する観測点の以上3点からなる。基準点は、地上の安定した場所を選定し、木杭を打ち込んだのちコンクリートで根固めた。また、三脚も同様の方法で固定した。基準控点および観測点は4階建て事務棟屋上に設置した。両点ともコンクリート床にくぎを打ち込み、さらにモルタルで固定した。

測点群の配置を図-2に示す。基準点と観測点との関係は、斜距離約9.2m、標高差約1.5mである。観測点の高度角は80度22分、基準控点との水平角は4度52分である。

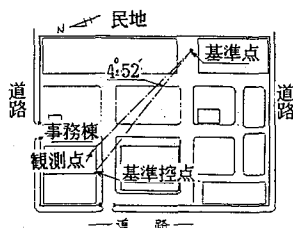


図-2 測点群の配置平面図

2. 4 測距実験

一般に測量におけるばらつきの要因としては図-3のようなものがある。光波測距儀を用いた測距に関する影響要因については、表-2に示す要因を取り上げた。機器の設置条件については、常時設置した場合と、測定のつど設置する場合の違いを検討することとした。

また、測定の精度を向上させる方策として、繰返し測定が考えられ、繰返し回数によるばらつきの低減効果を調べる実験も行った。これは1度の測定において1～50回繰返し、その平均値をとるものである。

なお、気温および気圧の補正は基準点でのそれぞれの測定値を入力することによって行った。

2. 5 測角実験

測角実験では前掲の図-3の要因の中から、測定時刻、機器の設置条件、測定者および測定器の4要因取り上げた。水準はすべて2水準で多元配置実験を行った（表-3参照）。

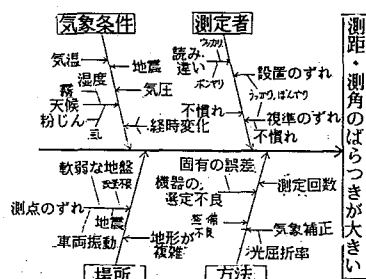


図-3 特性要因図

水平角は基準控点と測点との挟角を時計回りに測定し、高度角は天頂を0度として測定した。

水平角、高度角とも測角方法は対回法を採用した。

表-2 測距実験の因子と水準

因子	水準
測定時刻	午前9時～午後3時まで、2時間おきに、5水準
測定者	A、B技師、2水準
機器設置条件	常時設置、測定のつど設置、2水準

表-3 測角実験の因子と水準

因子 \ 水準	1	2
測定時刻	午前10時	午後2時
機器設置条件	常時設置	測定のつど
測定者	A技師	B技師
測定機種	6秒読み	1秒読み

対回法は、望遠鏡の正位で1回測角し、反位でもう1回測角する方法（この場合1対回法という）である。この方法によれば角度目盛の誤差および器械と目盛板の偏心などの器械固有の誤差を消去できる利点がある。

3. 結果および考察

3. 1 測距実験

(1) 測距に及ぼす要因の影響

実験で取り上げた要因によるばらつきが誤差に比較して大きいかどうかの検定を行うために、分散分析を行った。測定値は5回繰返ししたときの平均値である。

分散分析表を表-4に示す。2個以上の因子の組合せ効果を表す交互作用としては、（機器の設置条件）×（測定者）、すなわち機器の設置条件が変わることによって測定者による影響の度合いが異なることを考慮した。また、（測定時刻）×（測定者）をも考慮したが、誤差のばらつきに

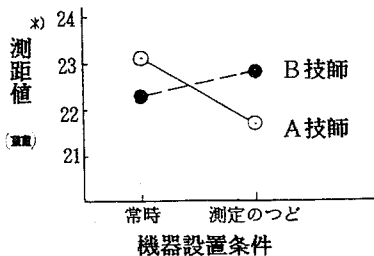
比べると小さいため、誤差項にプーリングした。

要因と誤差との分散の比と、F分布の限界値を比較した結果、測定時刻および測定者ともに影響を及ぼさないことが確認された。機器の設置条件と測定者の交互作用についても同様である。しかし、この交互作用は図-4に示すように、機器の設置条件によっては、測定者の影響が見られることを示唆している。すなわち、常時設置のほうが測定のつど設置するよりばらつきは小さくなる傾向にある。

表-4 分散分析表（測距実験）

要 因	平方和S	自由度 ϕ	分散V	分散比F ₀
A（測定時刻）	11.87	4	2.97	1.20
B（測付け条件）	1.15	1	1.15	0.46
C（測定者）	0.074	1	0.074	0.03
B×C	5.0	1	5.0	2.02
誤 差	29.72	12	2.48	
計	47.81	19		

交互作用A×Cを誤差項にプーリング
 $F(4.12:0.05) = 3.26$
 $F(1.12:0.05) = 4.75$



*) 実測値から91.9mを引いた値をmmで表示したもの

図-4 交互作用の実態

(2) 繰返し回数の効果

一般に、平均値 μ 、標準偏差 σ なる正規母集団 $N(\mu, \sigma^2)$ からとった n 個のサンプルの平均値 $\bar{x}$ の分布は、平均値 μ 、標準偏差 $\sigma/\sqrt{n}$ の正規分布 $N(\mu, \sigma^2/n)$ にしたがう。すなわち1度の測定において n 回繰返しを行うことによってばらつき（標準偏差）は $1/\sqrt{n}$ になることを示している。

光波測距儀による測距の測定に要する時間は1回あたり約5秒と短いため、繰返し測定は有利であると考えられる。

繰返し回数と標準偏差の関係を示すと、図-5のようである。繰返し回数25回までは標準偏差

の低下は著しいが、それ以上の回数では標準偏差は一定値（0.9mm）を示している。なお、機器の設置条件は常時設置で測距を行ったものである。

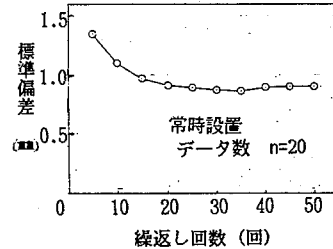


図-5 繰返し回数の効果

3. 2 測角実験

(1) 測角に及ぼす要因の影響

実験に取り上げた要因が測角に及ぼす影響を調べるために分散分析を行った。分散分析を表-5、6および7に示す。ただし、機器の高さ（ここでは三脚上面から望遠鏡の中心までの高さ）が、機種によって異なるため、高度角については機種ごとに分散分析を行った。

6秒読みのセオドライトを用いた場合、要因と誤差の分散比が、いずれの要因でも検定限界値より小さいため、高度角に影響を及ぼさないことがわかる（表-5参照、）。一方、1秒読みの用いた高度角の測定では、機器の設置条件が影響を及ぼす結果が得られた（表-6参照）。これは分散分析のプーリング後の誤差項の大きさ（厳密に言うところ総平方和に対する誤差平方和の百分率）を比較すれば、6秒読みのセオドライトで48%、1秒読みでは10%となり、機器固有のばらつきが小さいため、1秒読みのセオドライトを用いた場合に、設置条件の影響が検出されたものと考えられる。すなわち、分解能が小さい機器では機器設置条件を設定しなければならない。今回の実験データ4個の標準偏差は、常時設置で0.6秒、測定のつど設置で0.9秒であり、常時設置のほうが標準偏差が小さいため、機器設置条件は常時設置が望ましい。

つぎに、水平角の測定値に影響を及ぼす要因は、測定者と測定機種であることがわかった（表-7参照）。とくに前者は分散比が危険率1%の限界値より大きく、影響が大である結果となった。これは視準と角度の読取りが、高度角の測定では1

表-5 分散分析表 (高度角, 6秒読み)

要 因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F ₀
B: 観付け条件	9.68	1	9.68	1.86
A: 時刻	2.88	1	2.88	0.55
C: 測定者	0.18	1	0.18	0.03
B × C	5.45	1	5.45	1.05
A × C	0.61	3	5.20	
誤 差	15.6			
計	33.80	7		

F (1.3 ; 0.05) = 10.1.

表-6 分散分析表 (高度角, 1秒読み)

要 因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F ₀
B: 観付け条件	8.48	1	8.48	25.7*
C: 測定者	1.53	1	1.53	4.64
A: 時刻	0.28	1	0.28	0.85
B × C	0.79	1	0.79	2.39
A × C	0.19	3	0.33	
誤 差	0.98			
計	12.06	7		

F (1.3 ; 0.05) = 10.1. * = 有意.

表-7 分散分析表 (水平角)

要 因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F ₀
C: 観付け条件	95.1	1	95.1	22.1**
D: 測定者	30.3	1	30.3	7.05
A: 時刻	10.9	1	10.9	2.53
B: B × C	4.2	1	4.2	0.98
A × C	10.2	1	10.2	2.37
B × D	8.4	1	8.4	1.95
A × B	2.6	9		
A × D	1.3			
B × C	0.4			
C × D	0.4			
誤 差	34.3			
計	198.1	15		

F (1.3 ; 0.05) = 5.12. * = 有意.
F (1.3 ; 0.01) = 10.5. ** = 高度に有意.

回であるのに対し, 水平角の測定では2回行うこととなるため, 測定者の影響が現れたものと考えられる。測定者ごとの測定値は4度52分47.6秒および4度52分52.4秒と異なるが, 標準偏差は2.5秒および2.9秒であり, 各測定者のばらつきはほぼ等しいと言えることができる。

(2) 測定機器の比較

前項の検討によって測定機種は水平角の測定値に影響を及ぼすことが確認された。ここでは優劣を定量的に把握してみる。このような測定器の優劣を評価する方法としては, 古く通信工学の分野でSN比が用いられている。SN比とは信号 (Signal) 対雑音 (Noise) 比の略称で, 信号は感度, 雑音は誤差と読みかえることができる。よい測定器, よい測定方法というのは, SN比の大きいものということになる。

SN比は以下のように算定する。

$$\eta = \frac{m}{\sigma} = \frac{1}{n} (Sm - Ve) / Ve \quad (1)$$

ここに, η ; SN比

m ; 母平均

σ ; 母標準偏差

Sm ; 平均値の変動

$$Sm = \frac{(\sum Xi)}{n} \quad (2)$$

Ve ; 誤差分散 (σ の推定値)

$$Ve = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Xi - X)^2 \quad (3)$$

n ; データの個数

Xi ; 得られた特性値

X ; サンプルの平均値

一般にはSN比 η の常用対数値の10倍をデシベル値として用いることが多い。SN比はこのようにして求めた値が最大となるような測定器や測定方法を選定するのに用いられる指標である。

ここで2種類のセオドライトの優劣を比較するために, SN比を求めると表-8のようになる。1秒読みのセオドライトのほうが0.8デシベル大きい。すなわちSN比が1.25倍となっている。このことは, 6秒読みのセオドライトを用いて1秒読みと同じ測定精度を得ようとするれば, 1.25倍繰返して測定しなければならないことになる。さらにどちらのセオドライトを用いるかは, 要求精度や経済性などから選定すべきである。

表-8 機種別のSN比

機 種	6秒読み	1秒読み
平均値 $\bar{x}$ (秒)	51.39	48.64
分散 Ve	13.71	10.39
変動 Sm	21125.4	18939.4
感度 $1/n (Sm - Ve)$	2639.0	2366.1
SN比 η	192.5	227.7
η (デシベル)	22.8	23.6

* 実測値から4度52分を引いて秒単位で表示 ($n=8$)。

(3) 繰返し測定の効果

では, 6秒読みセオドライトを用いる場合, 繰返し測定を行ってばらつきを小さくすることが必要となる。そこで測距実験と同様に繰返し数回の効果を確認した。測定の場合は, 水平角測定への影響の検討結果から同一測定者によることとした。

なお、機器の設置は常時設置で行った。

繰返し測定は前述の対回法で行った。対回数と標準偏差の関係は図-6に示すとおりである。水平角のばらつきが高度角に比較して大きいのは、今回の測点群配置では水平角が約5度と小さいためと考えられる。水平角のばらつきは2対回までは低下が顕著であるが、それ以上では一定値(3秒)を示す。一方、高度角の場合、ばらつきは対回数の増加とともに直線的に低下しており、4対回でのばらつきは1対回のときの1/3以下に低下していることがわかる。

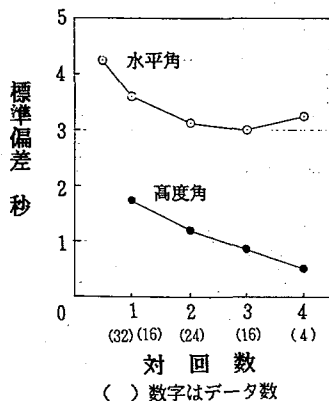


図-6 対回数の効果

4. シミュレーション

4.1 目的

前章では、測距および測角に及ぼす影響要因の検討を行い、繰返し測定の効果を把握するとともに測定値のばらつき(標準偏差)を定量的に把握した。

ここでは以上の結果をもとに、極座標法で得られる座標のばらつきを定量的に評価し、光波測距儀を用いた変位量観測方法による変位量の測定限界を把握するためにシミュレーションを行った。

4.2 方法

(1) モデル

モデルは今回の実験に対応したものとした。すなわち基準点と観測点との斜距離100m、高度角80度、基準点との水平角は5度とした。

(2) 方法

設定距離および角度を中心に、前章の実験で得られた標準偏差をもつ正規乱数500個を独立に

発生させ、極座標の公式(図-1参照)によって座標値を計算し、そのばらつきを調べた。

シミュレーションは、測距繰返し回数および測角対回数をそれぞれ3水準とり、合計9通り行った。水準ごとの標準偏差は表-9のように設定した。

表-9 因子と水準

因子	水準	水準1	水準2	水準3
		回数	回数	回数
測距	標準偏差(mm)	1.35	0.97	0.86
	対回数	1	2	4
測角	水平角σ(秒)	3.6	3.1	3.0
	高度角σ(秒)	1.7	1.2	0.5

4.3 結果および考察

(1) 座標のばらつき

シミュレーションの結果を、各平面(X-Y, Y-Z, Z-X平面)上に打点した。その一例を図-7に示す。これはX-Y平面、つまり地表面へ投影したものである。原点が設定した距離と角度の点で、これを中心にX, Y軸方向とも±4mmの範囲に分布していることがわかる。

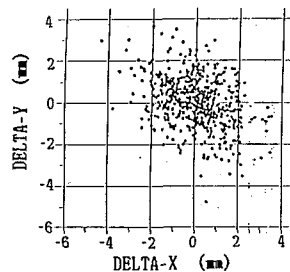


図-7 シミュレーション結果の一例
(測距15回、測角2対回)

(2) 変位量の検出限界

つぎに三次元的なばらつきの度合を調べるために、原点を中心とする半径rmmの球を考え、その中に全体の点数の何パーセントが含まれるかをカウントした。

図-8に誤差球の半径と累加相対頻度の関係を示す。ここで前点の95%を含む誤差球の半径r95を、変位量の検出限界と定義する。すなわち、半径r95mmの球の外には5%の点しか存在しない。したがってr95mm以上の変位量が測定されたときには、測定値のばらつきではなく、何らかの原因で測点の変位したと判断するほうが妥当で、その判断が誤りである確立は5%であると言い換える

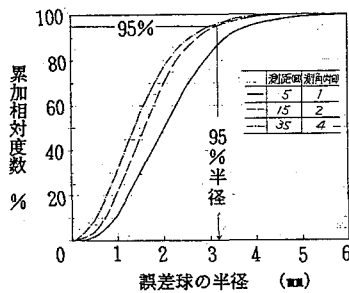


図-8 変位量の検出限界

ことができる。

各ケースごとに検出限界 r_{95} を求め、測距回数、測角対回数平面上で等値線を示すと図-9 のようになる。検出限界は $3.9 \sim 3.1 \text{ mm}$ で、等値線が密なほど繰返し回数の効果が大であることを示している。また、横軸に平行な等値線は測距回数を増大させる効果がないことを、縦軸に平行な等値線は測角対回数の効果がないことを、それぞれ示している。これから検出限界を小さくする効率的な測定方法としては、測距 15 回、測角 2 対回繰返しが適当であると提案することができる。

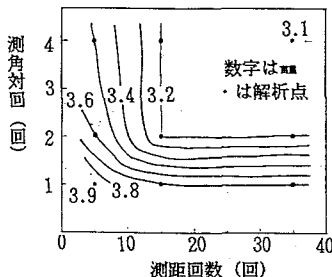


図-9 95%信頼半径等値線図

5. まとめ

光波測距儀を変位量測定へ適用するにあたり、極座標法での検出限界を調べるために、距離約 90 m、標高差約 15 m の位置に基準と測点を配置し、測距および測角を行った結果をまとめると次のようである。

- ① 機器を常時設置するのと測定のつど設置するのとは、測距に影響を及ぼさないが、測定者との組み合わせ効果が考えられるため、常時設置するほうが望ましい。
- ② 測距においては繰返し測定による標準偏差の低下がみられ、とくに繰返し回数 25 回までが顕著で

ある。25 回以上では標準偏差は一定値 (0.9 mm) を示す。

③ 高度角の測定では、6 秒読みセオドライトを用いた場合、測定値に影響を及ぼす要因はないが、1 秒読みのもものでは、機器の設置条件が影響することがわかった。これは機器固有のばらつきが 1 秒読みのほうが小さいためと考えられ、分解能が小さい機器ほど取扱いに注意する必要があることを示している。

④ 水平角の測定値に影響を及ぼすのは、測定者と測定機種であった。とくに、前者は影響が大きい (分散分析結果で 1% 有意である) 結果を得た。

⑤ 水平角の測定において、測定機種の優劣を評価するために SN 比を導入した。その結果、1 秒読みセオドライトのほうが 6 秒読みのもより 1.25 倍 SN 比が大きい結果となった。

⑥ 6 秒読みセオドライトを用いた場合、ばらつきを小さくするために繰返し測定を行った。その結果水平角では 2 対回までは標準偏差は低下し、それ以上は変化がない。また、高度角では対回数の増加に伴い直線的に低下することがわかった。

以上の測距、測角実験に基づいて、極座標法による座標値のばらつきを定量的に把握するためにシミュレーションを行った。実験によって得られた標準偏差をもつ正規乱数を発生させる方法を採用した。その結果は次のとおりである。

⑦ 全体点数の 95% が含まれる球の半径 r_{95} を変位量検出限界とすると、今回のモデルでは r_{95} は $3.1 \sim 3.9 \text{ mm}$ となった。

⑧ 検出限界 r_{95} の等値線を描き、この図より r_{95} を最小にする測定方法として、測距 15 回繰返し、測角は 2 対回法を提案することができる。

6. あとがき

今回の実験は、限定された条件のもとであり、必ずしも野外での実観測へ適用されるものではないが、効率的な方法への手がかりを与えることができたと思う。

今後は現場でのデータを積み重ねること、より長期間における検討を行うとともに、観測の省力化についても研究を進めたい。