〔講 座〕

地すべり調査における地盤傾斜計の 利用方法について

渡 正 亮*

Practical Use of the Ground Tiltmeter for the Landslide Investigation
by Masasuke WATARI

1. は し が き

地すべりの調査に地盤傾斜計を初めて使用したのは昭和28年頃のことである。当時、土木研究所の砂防研究室長であった福岡正巳氏がこの器械を考案して、石川県甚之助谷の地すべり地に数基設置して観測し、31年から筆者がこれを引きついで、これをとりまとめたところ、地すべりの運動を非常に明らかに観測できることがわかった。当時は、インバー線型の伸縮計もまだ試作段階にあったため、この器械は各地の地すべり地に設置されて、地すべりの運動とこの予測のためにさかんに使用されるようになった。昭和34年頃から伸縮計の改良が成って、活動域での運動速度の測定はこの器械が用いられるようになったが、なお、滑落の予測、地すべり拡大の予測、潜在的な地すべりの判別などのために現在もその利用度が増大しつつあり、地すべり計測手段の主要な器械として、伸縮計、地中内部歪計、地下水検層器とともに、調査には必ずといってよいほど利用されている。

ところが、本器の性能、利用方法、結果の解析方法について、十分な手引き書がないため、ともすれば誤った使用をしている現場がときどき見受けられるし、観測者自身が本器の使用目的を知らないために、観測に手落ちがあったり、必ずしも使用目的の明確でない利用がされていることが多いので、ここに、これらについての説明を試み、正しい使用目的、利用方法を知っていただきたいと思っている。

2. 地すべりと地盤傾斜運動

地すべり運動が発生すると、これに伴って地すべり地塊には傾動が始まるが、これを観測することによって地すべり運動の情報を得て、これによってその運動の解析を行ったり、滑落の予測を行なうことができる。

地盤は、元来それぞれ固有の傾斜運動を行なっている。これをわれわれは基底変動と呼んでいる。これは地殻の潮汐や降水、温度変化、微小地震等によって発生するもので、その地点の標高、地形（特に傾斜）、地盤構成、気象などによってその量が異なっている。一般に標高が高くなるにつれて、また、地表の傾斜が急になるに

つれて、傾動が大きくなり、特に火山地帯や気象変化の激しい所では、その傾動が激しい。しかし、その基底変動には回帰性があることが知られている。降雨により地盤が傾動した場合、その傾動は数日中には元に戻るし、潮汐運動は1日を周期とするし気温も幾分の傾斜歪を残留しつつ1日の周期運動を続けている。

これらの基底変動の中で、24時間毎(1日毎)の平均的な傾斜変動量を日平均基底変動量と呼び、秒/日で表わしその変動結果、地殻の潮汐や季節的温度変化によって生ずる地盤の傾斜累積速度を基底累積速度と称し、秒/日で表示する。

日平均基底変動量は、全国各地の地すべり地周辺の不動地盤で測定した結果、ほぼ次の範囲にあることがわかっている。

日平均基底変動量の範囲(3カ月間の観測結果の日平均)

平地 2~3 秒/日、丘陵地 3~5 秒/日
山岳地 5~8 秒/日

観測期間が1カ月程度だったり、観測の時間間隔が3日に1回の場合には、この平均値が20%程度大きくなる傾向がある。

次に基底累積速度についても、同様に丘陵地と山岳地ではある程度累積傾向が異なり、次のとおりになってい

図-1(1) 基底変動の年変化

図-1(2) 基底変動の日変化

* 建設省土木研究所急傾斜地崩壊研究室長

る。

丘陵地 1秒/日以下, 山岳地 1.5秒/日以下
(観測期間1ヵ月)

この基底累積の傾向は大体1年間の周期性をもって回帰し, 1年間観測を続けければ, 図-1に示すようにその速度はほとんどゼロになる。

地すべりが発生したり, または発生しそうになると, そのために地盤に傾動が起こり, そのための傾動が基底変動に加わるので, その量が大きくなる。これを見いだすことによって地すべりの予知や運動形態を推定しようとするのがこの調査の目的となるわけである。

すなわち, 日平均基底変動量を上回るような(8秒/日以上)の傾斜変動が発生をした場合には, その地域がすでに地すべり運動を起こしていることがわかるし, その量が大きくなればなるほど活発化していることが推定できる。

また, 傾斜歪の累積速度が, 基底累積速度を上回っていけばいるほど, 地盤内に傾斜歪が貯積されているこ

図-2 地すべり運動開始直前の傾斜ひずみの累積

とになり, たとえ日平均の傾斜変動が日平均基底変動量の範囲の中にあっても, 潜在的に地すべりを起こす可能性が高まりつつあることがわかる。

3. 地盤傾斜計の構造と観測方法

この地表地盤の傾動を観測する器械としてもっともよく用いられているのが地盤傾斜計である。

この器械は図-3に示すごとく, 1本の主脚と2本の支脚の3脚に支えられた長さ25cm, 幅4cmの気泡管の上に長さ17cm, 幅1.95cmの主気泡管を長さ方向に, また長さ4.5cmの副気泡管を台の幅方向に, たがい直角に設置したもので, 主脚と主気泡管は両支脚の垂直二等分線上に正しくとりつけられており, 主脚には円形分度盤が固定されていて, 主脚は回転することにより, 気泡管台を傾斜させるようになっていて, その回転角は, この円形分度盤によって読み取れるようになっている。副気泡管は計器の設置時に水平を保つように調節すればその後はよほど傾いた場合以外, 水平に調節する必要はない。主脚を分度盤の読みで1°回転すると大体1.2"の傾斜を生じ, 主気泡管で1目盛気泡が移動すると約10"の傾斜が生ずるようになっている。

地盤傾斜計を設置するときは図-4のように50×50×30cm程度のコンクリート台を設置する。この台は地盤に密着する必要があるので, 普通は5~7cm角の長さ1~1.5mの杭を5本程度あらかじめ地盤内に打込んで, その上にこの台を打設し, 表面に40×40cmガラス板をモルタルによって固定してこの上に傾斜計2台をN-S, E-Wに回転分度板をSとWになるように設置する。器

図-3 地盤傾斜計

図-4

図-5

位置 No. ○	年 ○ 月 ○ 日	天候 ○
観測者氏名 ○○○○		
W		E
前回の読み 260° 今回の読み 278° 差 +18°		
N		S
前回の読み 71° 今回の読み 64° 差 -7°		
備考		

図-6

観測装置はコンクリート台打設後、その不等沈下を考慮して約10日ないし2週間後に行なう。次に図-5に示すように直射日光による放射熱の作用と、盗難を防止するための小屋を載せる。小屋はできれば通気をよくし、白ペンキで塗るとよい。

観測は原則として1日1回行なうものとし(傾斜の累積のみを見る場合は3~5日に1回でもよい)、最初主気泡管を水平に保ち、その後、これが偏心した場合、主脚を回転して、これを水平に戻し、このときの傾斜角を分度盤で読みとり、図-6に示すような野帳に整理する。

いま、N方向とE方向の傾斜角をそれぞれ α 、 β とす

ると、このときの最大傾斜角 θ とその方向角 ϕ は次の式によって算出できる。

$$\sin \theta = \sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\cos \phi = \frac{|\sin \alpha|}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$= \frac{|\alpha|}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (\alpha, \beta)$$

(表-1によって計算する)

そして、 ϕ の存在する象限は表-2のとおりになる。

(図-7)

表-1

bate 月 日	累 経過日数 (d)	N-S (秒) 傾斜変動量(x)	E-W (秒) 傾斜変動量(y)	X ²	Y ²	X ² + Y ²
	[d]					

date 月 日	$\theta_n = \sqrt{X^2 + Y^2}$	$(\theta_n - \bar{\theta}_n)^2$	N-S (x) 傾斜累積量	E-W (y) 傾斜累積量	dx	dy	d ²
	秒 $\bar{\theta}_n$				[dx]	[dy]	[d ²]

$$\alpha = \frac{n(dx) - [d](x)}{n(d^2) - [d]^2},$$

$$\beta = \frac{n(dy) - [d](y)}{n(d^2) - [d]^2}$$

$$\cos \phi_n = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}},$$

ϕ_n = 傾斜運動方向

$\bar{\theta}_n$ = 平均傾斜変動量

表-2

α	正	正	負	負
β	正	負	正	負
傾斜方向	N ϕ E	N ϕ W	S ϕ E	S ϕ W

図-7

4. 地すべり調査の場合の使用目的

a) 地すべりの予知

地盤傾斜計を用いて、地すべりを予知するときの目的は次のとおりである。

- i) 地質、地形的にみて地すべり地であると考えられている地域の安定度をみる場合、特に現在活動中であるか否か、あるいは近い将来活発になるおそれがあるか否かを判断する場合
- ii) 道路、宅造等に伴う土工や貯水池湛水による斜面の一部の水没等、自然環境に変化を与えた場合の地すべり運動の活発化の予測
- iii) 現在活動中の地すべり地の拡大の可能性を地すべり地域外で調べる場合

地すべりの予知の手段としては地盤傾斜計は現在もっとも有効な測定方法であり、地盤傾斜計を地すべり地に利用する主目的はこれにあるといっても過言ではない。

地すべり運動が開始される以前には地盤内にある程度歪が蓄積されることは土質力学上からも証明されているし、地質的にも認められている。そこで、運動が現われる以前にこれを察知するためには、この歪の累積をなんらかの形で取り出せばよいわけである。その手段として、この方法の外に地すべり調査では地表の伸縮量を測定する伸縮計による方法とボーリング孔を利用した地中歪計（ストレインゲージパイプ）が考えられるが、これらの計測器も次のような欠点をもっているため、実用化が困難である。

i) 伸縮計

現在 0.2mm 程度の精密な地表歪を測定することが可能であるが、実用してみると、旧いクラックや、段落ちの部分を跨いで設置したものでは、ある程度、予測が可能であり、したがって、地すべり地内に広範囲に連続し

て（1基が長さ20mまで設置可能）斜面を覆うように設置すれば予測も可能であるが、経費がかかるのと、目に見えない亀裂を見つけ出して、その開き方を測定することが困難なため、よほどの専門家が位置を選定しないかぎり失敗することがある。

ii) 地中歪計

ボーリング孔内にパーパスストレインゲージを貼布したパイプを挿入して、ボーリング孔の曲がり測定する方法で $1/10^3 \sim 1/10^4$ までの歪を測定することが可能であるが、パイプとボーリング孔壁の間には通例 5~10mm の空間があり、これを砂などで間詰めをするが十分でないため、少なくともこの程度の動きでは、パイプに歪が発生しないことがあるし、現在ゲージ貼布間隔を 2m 程度にとっているため、たまたまゲージ貼布位置がすべり面に当たっていない限り、相当大きな運動でも測定できない場合があり、これについては中村浩* の研究がある。

結局、本方法は活動中の地すべりのすべり面の判定には非常に有用であるが、活動期以前の小さな歪をとるためには現在の形式を大幅に改良する必要がある。

iii) 地盤傾斜計

本器は傾斜歪を取り出す手段であるから、その設置場所の選定で比較的容易であり、あまり急な傾斜地や、道路脇のような振動の大きな場所、川岸のように流量の影響を受ける所以外ならどこに置いても測定できる。できうれば、同一斜面の中で比較的傾斜のゆるい所や台地部の奥（のり先は避ける）の所が望ましい。

地すべりの発生の可能性を予測するには、次の2点を判断して決める。

- ① 傾斜累積速度が 1.0~1.5 秒/日 以上の場合には、地すべり運動が活発化するおそれが多いので気をつける。特に梅雨や融雪期にこの傾向のある場合がもっとも危険である。
- ② 傾斜累積の方向が、地すべり地の斜面方向に一致したり、あるいはこれと逆の方向（180°）を向いている場合は、累積速度が場合によって急変して大きくなることが多いので、さらに観測を続けて、累積速度の変化に注意する。

本器の欠点は、設置に日数と手間がかかることと、観測に手間のかかる点で、遠隔地の場合は、自記式傾斜計を用いることになる。自記式傾斜計には、気泡管の偏心を光電導セルで追隨して、自動的に水平を保つ型のものと、水平振子を用いて、振子の振れを自動調整するものがあるが、ともに精度が 5~10 秒程度で、手動式に比して精度が低いと価格が高いのが欠点である。最近では水平振子式が比較的良好に用いられている。

* 地すべり No. 17, 中村浩之, 近藤政司, 白石一夫: 地中歪計による地すべりすべり面判定の一考察

次に地すべりの層厚の小さいものほど傾斜累積は顕著であって、早期に累積運動が起るが厚さが40～50mになると累積速度が小さくなる傾向をもつ。また、地すべり土塊が岩で構成されていると、速度が一般に小さく礫混り土砂→粘土となるにしたがって顕著に現われる。

6. 地すべりの運動状況

地すべり運動が発生すると、地すべり地の地盤は種々な傾動を開始する。この傾動は一般に頭部ではもっとも小さく、周辺部、末端部、テンションクラックの発生部（頂天部）では大きく現われるし、その傾動方向も、頭部では地すべりの運動方向にはば一致し、側面部では、ほぼこれに直角の方向が優越し、末端部、頂天部では傾動に方向性が少なく、時期によって、いろいろな方向に変動する。

地すべり土塊の規模によっても傾動の大きさが異なり、厚さの大きいものほど日平均傾斜変動量が小さく、薄いものほど大きくなるし、岩のすべりでは小さく、土になるほど大きくなる傾向をもっている。

したがって、その設置部位によって、傾動の様相が変わるため、その運動の大きさを推定することは非常に困難である。

図-8

頭部に設置した場合、日平均傾斜変動量 30秒/日 程度で 0.4mm/日、9～10秒/日 程度で 0.2mm/日 の運動速度をもっている。1cm/日 程度の運動になると 100秒/日以上の変動が生じているが、地すべりの形式、地質によって非常に異なる。

したがって、本器は時間的な運動の変化をある地点での観測成果で判断するには有用で、特に対策工施行後の地すべりの安定を確認するのにもっともよく用いられ、災害復旧事業の場合では、これを義務づけられているほどである。この場合の観測期間は1～3 カ月である。

7. 傾斜計測定結果の整理

傾斜の運動方向を求めるには、直交する2台の傾斜計について、それぞれ図-9のごとく傾斜運動図をつくり、それぞれの運動を直線運動と仮定して、最小自乗法によって傾斜速度を求め、これを(2)式に代入して、方位角を求めればよい。

図-9 傾斜運動図

表-3

表-4

X	Y	Z	X	Y	Z	XY	XZ	X ²
X ₁	Y ₁	Z ₁	X ₁	Y ₁	Z ₁	X ₁ Y ₁	X ₁ Z ₁	X ₁ ²
X ₂	Y ₂	Z ₂	X ₂	Y ₂	Z ₂	X ₂ Y ₂	X ₂ Z ₂	X ₂ ²
X ₃	Y ₃	Z ₃	X ₃	Y ₃	Z ₃	X ₃ Y ₃	X ₃ Z ₃	X ₃ ²
X ₄	Y ₄	Z ₄	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X ₅	Y ₅	Z ₅	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X _{n-1}	Y _{n-1}	Z _{n-1}	X _n	Y _n	Z _n	X _n Y _n	X _n Z _n	X _n ²
X _n	Y _n	Z _n	{X}	{Y}	{Z}	{XY}	{XZ}	X ²

X…日数 Y…(N-S)傾斜累積量 Z…(E-W)

すなわち、いまある地点で n 回の観測をして、表-3のような観測結果を得たとする。ただし、 X は日づけ、 Y はN-S軸、 Z はE-W軸の傾斜累積量とする。この場合、表-4のような計算表を作製し、 $\{X\}$ 、 $\{Y\}$ 、 $\{Z\}$ 、 $\{XY\}$

$[XZ]$, $[X^2]$ を求め $N-S$ 方向および $E-W$ 方向の傾斜速度 α および β は次式によって求められる。

$$\alpha = \frac{n[XY] - [X][Y]}{n[X] + [X][X]} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta = \frac{n[XZ] - [X][Z]}{n[X] + [X][X]} \quad \dots\dots\dots (4)$$

この α および β を (2) 式に代入すれば、傾斜方向が得られる。

傾斜計はできうれば、一つの地すべり地について同時に 2 カ所以上設置することが望ましい。そして 1 組は地すべり地内に、他の 1 組は地すべり地外に置き、両者とも設置場所は地形的に似通ったところに、たとえば、斜面ならばその傾斜角のいたい等しい所におく。そうすれば、両者の日平均移動量を比較することによって、基

底変化量の推定がつき、地すべりの有無をしらべるのにたいへん便利である。不動地に置く方の 1 組は、そのまま動かさずに観測を続けるとともに、他の 1 組を、地すべり地内の種々の地点に移動させて測定すれば、地すべり地域もだいたい推定されるし、また、今後の拡大を予想される地域も推定し得る。

1 点当りの観測回数は少なくとも 30 回以上で、でき得れば、毎日、同一時刻に 1 回ずつ測定することが望ましいが、場合によっては、3 日おきぐらいでもよい。ただ、観測日には、すべての器機をだいたい同一時刻に測定する必要がある。また、平均日傾斜量が少なく、潜在性地すべりの可能性の有無をしらべる場合には、約 1 カ月以上の連続観測を必要とする。

■新刊紹介■

An Introduction to Soil Mechanics and Foundations

C. R. Scott 著 (Elsevier Publishing Company. P. O. BOX 211-Amsterdam-The Netherlands. 316 ページ)

米国では土質力学の入門書があいついで出版されているが、これはヨーロッパで出版されたものである。他の同種の書と内容、体裁は類似しているが、やはり何か堅実な感じがする。土質力学は他の力学と違って複雑な自然物(土)を取扱うところから、その理論・計算において対象を単純化した仮定が必要である。この単純化する際の思考課程が、単純化したものについて理論的な計算を行なうのと同等に重要であるにもかかわらず、ともすれば後者を重視するきらいを著者は指摘し、これが現場での失敗の主な原因であるとしている。このような観点から、粘土鉱物、土中の水の挙動について他の入門書よりくわしく説明している。各章では、K. Terzaghi に始まる土質力学のこれまでの成果をふまえて、基礎的な事項を着実に説明するとともに、くわしい計算実例があり、読者が自身で計算してみるといった方法をとれば非常に効果的だと思われる。第 2 章 粘土鉱物では、最近研究の進んだ Soil-Chemistry と土の工学的性質の結びつきにふれているのがめあたらしい。第 13 章 斜面の安定では、他よりページをさき、5 つの代表的な例題を掲載して、基本

的な考え方から最近発表された種々の安定解析法を系統的に説明している。本書のなかでも、優れた部分だと思われる。この本は主として、土木工学の学部学生の教科書として書かれたものであるが、土質工学に関連する仕事に従事している技術者にも問題をもう一度基本へもどして考え直す際に大きな助けとなるであろう。g. cm の国際単位が使われているのも都合がよい。ただ土を動的に取扱った章がなく、その点地震に悩むわが国にはものたりない感じがしないでもないが、近來、急速に進歩した土質力学、基礎工学の基本を知ろうとする人にとっては、良書であるといえよう。本書は以下の 13 章からなっている。第 1 章 土の構造と分類、第 2 章 粘土鉱物、第 3 章 間げき水圧、有効応力、サクシオン、第 4 章 透水と浸透、第 5 章 圧密、第 6 章 土のせん断強度、第 7 章 地盤調査と現位置試験、第 8 章 土の破壊論、第 9 章 土圧、第 10 章 斜面の安定、第 11 章 基礎の支持力、第 12 章 基礎の沈下、第 13 章 くい基礎

(安江朝光)

(訂正お詫び)

Vol. 7, No. 3 15頁 英文標題は誤植につき下記の通り訂正いたします。

The Distribution of Landslides in Rokushinai Area, Hokkaido