

地表面傾斜計を用いた岩盤斜面の安定度評価法の提案

菅原紀明

A proposal on assessing rock slope stability using tiltmeter

Noriaki Sugawara

Abstract

Tiltmeter has been used as an effective instrument for assessing potential failure of rock slope which shows uncertainty of failure mechanism within rock slope. Although tiltmeter instrumentation is very advantageous because of simplicity of setting work and maintenance cost, there are very few tiltmeter data obtained from field especially where actually failure of rock slope happened.

In order to make outline of criteria for assessing potential failure of rock slope using tiltmeter, many data related to inclination rate of soil and rock were collected involving various kinds of data from laboratory vane shear test, field data of borehole inclinometer, tiltmeter of embankment and geodetic survey combined with borehole inclinometer in mining excavation.

Supposing that shear strain of the shear zone in landslide and inclination of rock cliff obtained from tiltmeter are the same deformation characteristics, it is found that those characteristic against time to failure are plotted on the log-log graph being in harmonious relationship in the following equation :

$$tr \cdot \dot{\theta} \approx 0.02 \sim 0.3$$

where,

tr : time to failure (day), $\dot{\theta}$: rate of tilt (rad/day)

Based on the above relationship, author boldly presents the assessment criteria of slope stability.

Key words : tiltmeter, rock slope, monitoring Assessment of slope

要 旨

地表面傾斜計（ティルトメータ）は崩壊機構の不明な斜面の安定度を評価するのに有効な計器として使用されている。ティルトメータはその計器の設置の簡便さやその維持費用など非常に有利な特徴をもつにもかかわらず、岩盤斜面が実際に崩壊する現場においてそれが使用され、そこで得られた計測データは非常に少ない。

ティルトメータを使用して崩壊の危険がある斜面の安定度を評価するための概略の目安を決定するために、ティルトメータ、地中傾斜計、ベーンセン断試験、および地表一般測量結果と地中傾斜計などの傾斜変動と関連する多様なデータを収集した。

それらのデータを同じ変形特性として取り扱い、傾斜変動速度と崩壊時間の関係を両対数グラフ上にプロットすると、次式に近似する関係が求められた。

$$tr \cdot \dot{\theta} \approx 0.02 \sim 0.3$$

ここで、

tr : 崩壊までの余裕時間 (d), $\dot{\theta}$: 傾斜角速度 (rad/d)

上式の関係に基づいて、著者は傾斜角速度による斜面の安定度評価基準を提案した。

1 まえがき

地表面傾斜計（別名：ティルトメータ）は、地盤や構造物の点の傾斜（回転）変化を伴う、擁壁の傾き、コンクリートダムの傾き、地すべりをモニターする場合に使用されている。また非常に正確なティルトメータを用いて、鉱山地帯の地盤沈下、潮汐や地震、火山による地殻変動のモニターに利用されている。地すべりを含む斜面のモニターでは主に運動様式の不明な斜面の安定性を確認する場合に主に多用されている。

岩盤斜面の実際の崩壊形態は非常に複雑であって、精密な調査を実施できるところであっても、崩壊以前にその崩壊機構を正確に予測することは非常に困難であることが多い。一方、岩盤斜面の崩壊に至る場合の変動速度は非常に速く、また、その場合の変動量は小さいと言われている。

このように、比較的微小で、複雑な運動をする岩盤斜面のモニタリングを合理的に実行するための観測方法は高精度のティルトメータを用いた方法が最も適していると考えられる。

ティルトメータの長所は

- ①表層で検出するものであるにもかかわらず、深層部から表層部までの変状を総合した運動として捉えている。
- ②二軸のセンサーを持つティルトメータを採用すれば斜面変動の運動方向も容易に捉えられる。
- ③伸縮計の測定値とティルトメータの測定値とを直接的に比較した大部分の対比資料によれば、両者の変動量はほとんど相似している。

④測定器の設置箇所がワンポイントで目的を達成できる。

⑤設置後の維持管理が簡便である。

このような多くの長所をもつティルトメータであるが、ティルトメータの測定データから斜面の崩壊時間を予測する研究がほとんど皆無であり、それは補助的に利用されているに過ぎない現状にある。

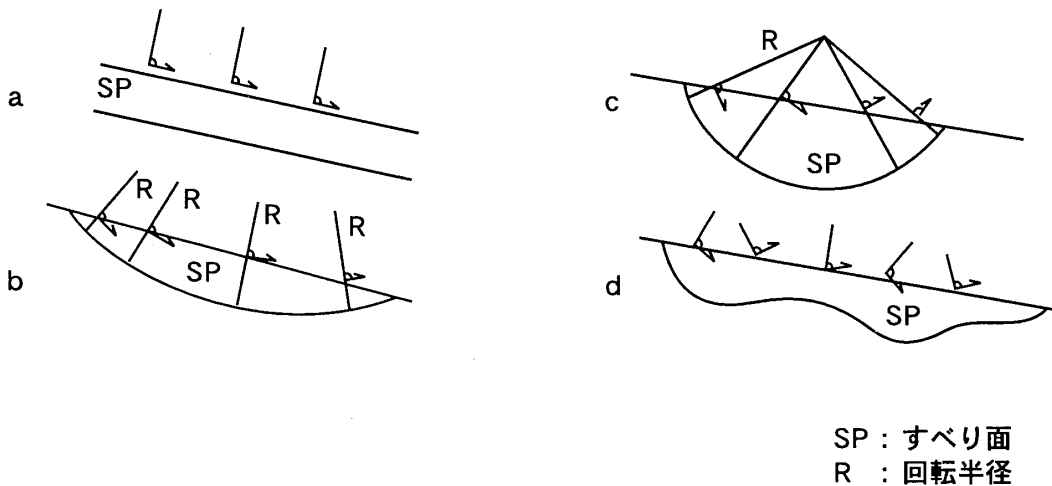
ティルトメータの観測結果を紹介した文献資料に乏しく、また、その観測中の岩盤斜面において、崩壊した実例が報告された文献も見あたらない。そこで、地盤の傾斜・回転変動に関する既往の文献をレビューし、ティルトメータ観測データに基づいて岩盤斜面の安定度をどのように評価すべきかに関して考察を加え、その評価基準を提案した。

2 斜面の変動と崩壊様式

(1) 斜面表層のベクトル変位

移動土塊の地表面変位ベクトルとすべり面の形状との関係はManzic (1988)¹⁾が示した図-1に要約される。すなわち、地すべり移動土塊が剛体であると仮定すれば、活動した土および岩盤の表面はその下にあるすべり面の傾斜に平行になると言うことである。このような関係はCarter & Bentley (1985)²⁾およびTer-Stepanian (1966)³⁾も提唱している。

一方、Burland et al (1977)⁴⁾は、英国のOxford粘土を70°の勾配で高さ29m掘削したときの地表面の変動測定結果を図-2に示すベクトル図に表している。この掘削に伴うすべり面は掘削の進行に伴って法尻より水平に奥に向かって進行していると推定されている。このよ



SP : すべり面
R : 回転半径

図-1 地すべりブロックの地表面の変位ベクトルとすべり面 (Manzic, 1988)
Fig.1 Relationship between surface movement and slide plane (Manzic, 1988)

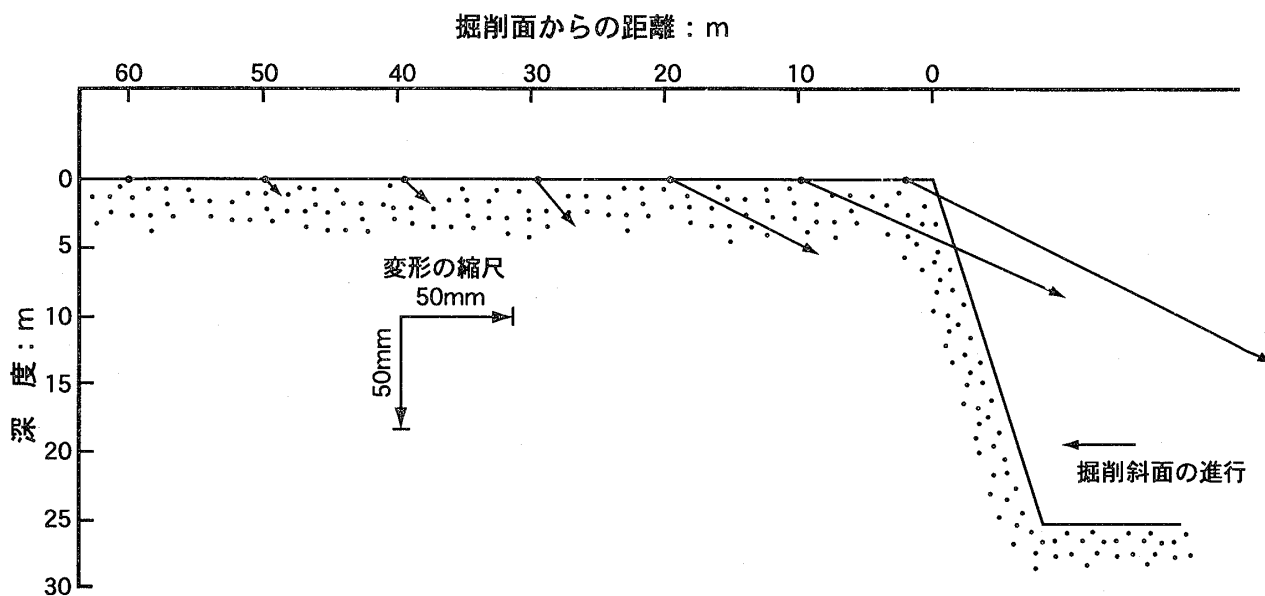


図-2 Oxford粘土の掘削による地盤の移動 (Burland et al, 1977)

Fig. 2 Ground movement due to excavation in the Oxford clay (Burland et al, 1977)

うに掘削面に近づくほどその移動が大きく、ベクトル方向が緩やかになる傾向は、地表部に設置したティルトメータで傾斜変動として捉えられると解釈される。

一般に地すべり地帯の移動土塊はその内部に無数の亀裂を含み、そして不動の基盤と比較して風化が進んでいることが観察される。このことは緩やかで平坦なすべりの場合であっても、移動土塊は内部のすべり破壊を伴いながら移動する事を暗示している。

(2) 斜面深層部のベクトル変形

掘削斜面内部のせん断変形を現場設置型地中傾斜計の実測を基にB.D'elia et al (1989)⁹⁾が報告している。図-3はSanta Barbara 鉱山の採掘中に観測された斜面中央部の変位分布である。3mの傾斜計のロッドを連結し

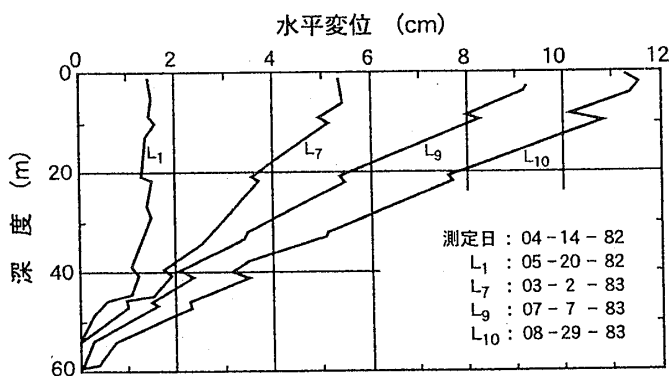


図-3 地中傾斜計で求めた変位断面 (B. D'elia et al, 1989)

Fig. 3 Displacement profile from inclinometer (B. D'elia et al, 1989)

て長さ60mとした現場設置型地中傾斜計を用いて自動観測したものである。斜面の変位は法尻に向かって倒れるように進行し、同時にその進行方向とは逆回転方向に鉤状のずれが4箇所発生し、そのずれの大きさも全体の変位が大きくなるにつれて増加している。このような変位分布の変化は図-4に示すスリップラインの存在を想定する事によって解釈されている。

このように斜面の変動は移動ブロックの内部変動を伴いながら進行すると解釈され、その結果は地表の傾斜・回転変動として検知されると考えられる。

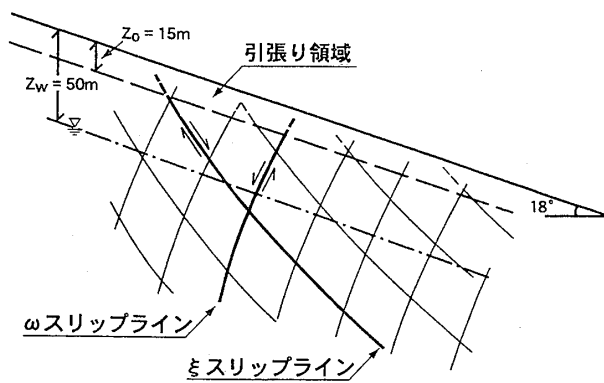


図-4 スリップラインを想定した斜面変動の解釈 (B. D'elia et al, 1989)

Fig. 4 Interpretation of slope displacement supposing slip line (B. D'elia et al, 1989)

(3) 斜面の崩壊変動様式

Kovari (1988)⁹⁾は、自身で開発した地中変位を3次元計測できる測定器(トリベック)を使用して、地すべり変動を実測し、その結果を基に斜面の崩壊様式を分類している。斜面の崩壊様式は図-5に示すように①すべり面に沿って直線的に移動するすべり、②回転を伴うすべり、③両者の複合したすべりおよび④トッピング状の崩壊など様々である。

①の層すべりを除く全ては回転変動を伴うものである。しかし、上述したように、層すべりであっても移動ブロックの内部変動による傾斜・回転変動を伴うと考えられる。

1963年10月9日に貯水池に滑落し、大災害をもたらしたVajont valleyの岩盤斜面の地すべりについては、災害が発生する前の1957以来から本格的な調査が始まり、大災害に至るまでの斜面の変動の詳細が明らかにされている。Müller (1964)¹⁰⁾の報告によれば、その斜面全体の崩壊前の変動様式は図-6のように想定され、特に注目されるのは斜面の下端部急崖部分の回転・傾斜(またはトッピング)変動が顕著であったと指摘されていることである。

以上述べたことは、斜面の崩壊に至る過程はほとんど全ての斜面に関して傾斜・回転変動を伴うものであり、

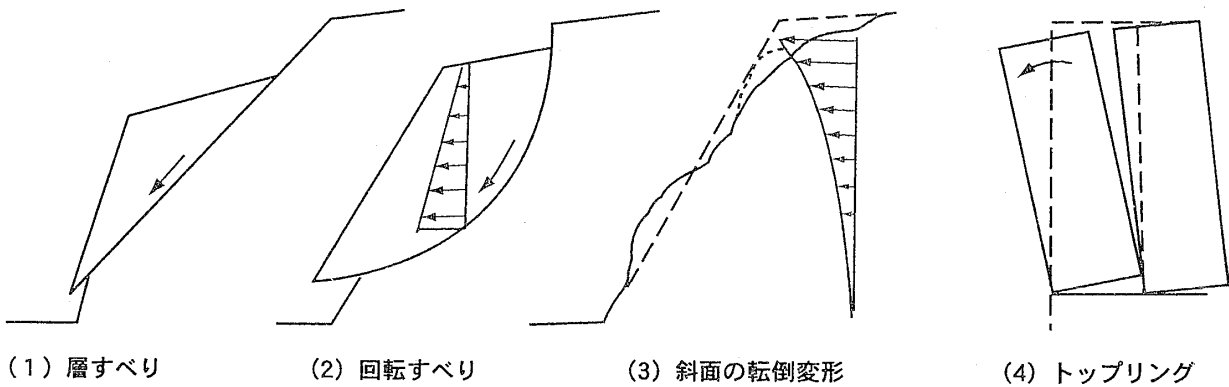


図-5 斜面の崩壊様式 (Kovari, 1988)
Fig.5 Failure pattern of slope (Kovari, 1988)

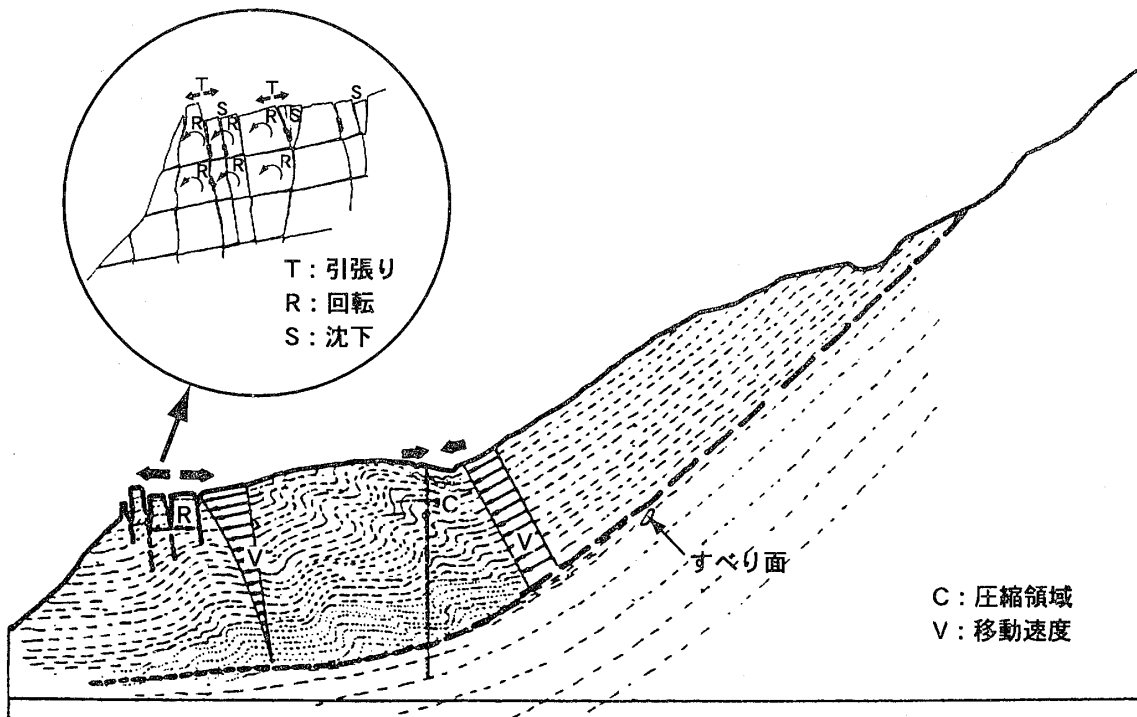


図-6 Vajont Valleyの崩壊直前の変動 (Müller, 1964)
Fig.6 Displacement pattern immediately before failure in Vajont Valley (Müller, 1964)

地表の傾斜計に敏感に反映するものであるといえる。

3 回転・傾斜角速度と斜面の崩壊時間に関する事例

ティルトメータを用いて実際に斜面の崩壊まで計測をし、傾斜角または傾斜角速度と崩壊までの余裕時間の関係を明らかにした事例は極めて少ない。そこで、回転角速度または傾斜角速度に関する各種の室内実験および各地の現場測定データをレビューしてみよう。

3.1 ティルトメータの実測例

(1) 地すべり調査における利用

渡他(1964,1971)⁸⁾⁹⁾は、1953年以来ティルトメータ(これを地盤傾斜計と呼んでいる)を地すべり調査に利用する研究を約十数年に亘り継続し、その成果を要約している。なお、その研究に使用したティルトメータはコンクリート台を基礎とし、その上に重ねたガラス板の上に測定器をセットし、測定器は気泡管を水平に調整する目盛りの読みとりから傾斜角度約1秒の分解能をもち、随時手動で測定する方式の水管式傾斜計である。

地盤は元来それぞれの固有の傾斜運動を行っている。それは、潮汐、降水、気温変化、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)、地盤構造、気象などによってその大きさが異なり、これを基底変動と定義している。この基底変動を3ヶ月間の観測結果をもとに日平均で表し、これを日平均基底変動量と呼んでいる。その値は：

平地………2～3秒/日、丘陵地………3～5秒/日
山岳地………5～8秒/日

また、基底変動に起因する地盤の傾斜累積速度を基底累積速度と呼び、その値は：

丘陵地………1秒/日以下、山岳地………1.5秒/日以下

この基底変動の累積傾向は大体1年間の周期性をもって回帰し、1年間の観測を続ければ、その速度はほとんどゼロになる。

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傾斜運動が始まる。図-7に示すように、地すべりの運動速度と地盤傾斜変動量の間には明らかな相関性がある。また、傾斜運動の最も激しい方向と地すべり運動の方向とほぼ一致する。地すべりが発生すると日平均基底変動量を上回るような(8秒/日以上)傾斜変動が生ずる。

また、渡(1971)は傾斜角の累積方向と地すべり運動の関係を次のように要約している。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。その傾動は一般に頭部では最も小さく、周辺部、末端部引

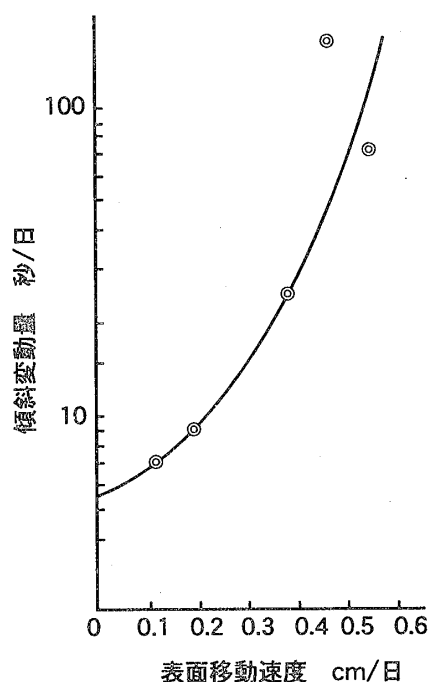


図-7 傾斜変動量と表面移動速度との関係(渡他, 1964)

Fig. 7 Relationship between increment of tilt and displacement velocity of ground surface (Watari et al, 1964)

張り亀裂発生部(頂天部)で大きく現れ、その傾動方向も、頭部では地すべりの運動方向にほぼ一致し、側面部ではほぼこれに直角方向が優越し、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。

(2) 盛土斜面の崩壊モニタリング

森野および草野(1985)¹⁰⁾¹¹⁾は、法面崩壊の早期検知を目的として、山砂を材料とし、4種類の法勾配を持つ実験盛土(幅:1.40m, 奥行き:2.64m, 高さ:1.20m)を作成した。盛土中の上中下段に6個の傾斜計を設置し、20mm/hの人工降雨を与えて法面を崩壊させ、崩壊に至るまでの傾斜計の経時変化を記録した。使用した傾斜計は、測定領域が±10°、精度が1%FSの1方向吊下式振り子型である。

一連の実験の結果より明らかになった内容を要約すると、傾斜角度と崩壊までの余裕時間との関係は法面勾配による違いが少なく、図-8に示すように両者の相関性が非常に良い結果が得られた。崩壊前5分では、ほぼ120'～150'、崩壊前2分では400'の傾斜角度を記録した。

角速度と崩壊までの余裕時間との関係は緩い勾配の法面ほど角速度が小さくなる傾向が認められたが、図-9に示すように、角速度と崩壊までの余裕時間の関係はほぼ両対数グラフで相関性の良い直線式で表される。

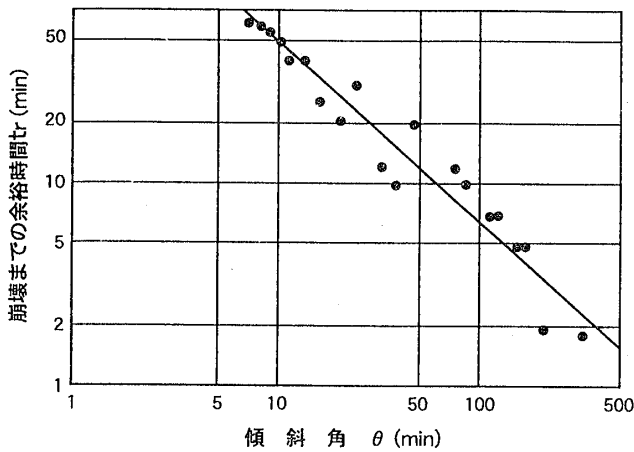


図-8 傾斜角と崩壊までの余裕時間の関係 (森野他, 1985)
 Fig. 8 Relationship between degree of tilt and time to failure (Morino et al, 1985)

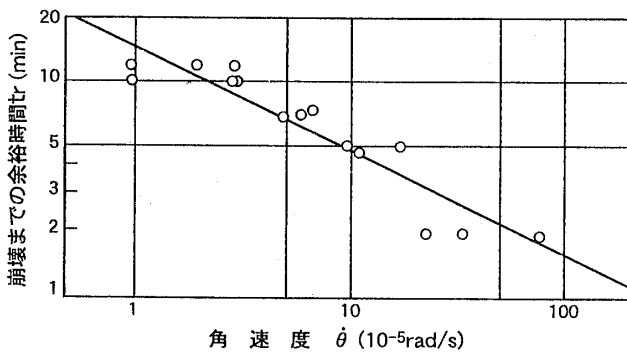


図-9 角速度と崩壊までの余裕時間の関係 (森野他, 1985)
 Fig. 9 Relationship between rate of tilt and time to failure (Morino et al, 1985)

森野および草野は室内モデル実験結果を総括して土中の傾斜角速度 $\dot{\theta}$ と崩壊までの余裕時間 tr との関係を次のように要約している。それらを rad/d の単位に変換すると次のとおりである。

法尻において,

$$tr = 3.5 \times 10^{-3} \text{ (d)}, \quad \dot{\theta} = 6.0 \sim 8.6 \text{ (rad/d)}$$

$$tr = 1.4 \times 10^{-3} \text{ (d)}, \quad \dot{\theta} = 26 \sim 52 \text{ (rad/d)}$$

法中央において

$$tr = 3.5 \times 10^{-3} \text{ (d)}, \quad \dot{\theta} = 1.7 \sim 8.6 \text{ (rad/d)}$$

$$tr = 1.4 \times 10^{-3} \text{ (d)}, \quad \dot{\theta} = 4.3 \sim 86.4 \text{ (rad/d)}$$

この盛土斜面崩壊実験は連続した降雨に伴う崩壊を模擬したもので、斜面内部の間隙水圧が上昇し続け、崩壊部分が連続して拡大する時の崩壊であり、一定の厚さのすべり面をもった条件でのクリープ破壊とは異なる性質の崩壊である。

(3) 自然斜面の表層クリープのモニタリング

佐々木他 (1994)¹²⁾ および藤井他 (1996)¹³⁾ は谷頭斜面の表層崩壊の予測に資するために降雨に起因する傾斜変動のモニタリングを行った。モニタリング地は茨城県筑波山北方の真壁町に位置する自然斜面である。この地は数mの厚さの関東ローム層が花崗岩のマサを覆った斜面である。その斜面の表層クリープ発生の確認と、特にクリープ速度を規定する要因を検討するために、斜面表層 (0~80cm) の平均傾斜変動を計測した。

測定計器は図-10に示す傾斜計とテンシオメータである。傾斜計は温度センサーを内蔵した測定領域 $\pm 0.5^\circ$ 、分解能 10^{-6} の特性を持つ高精度のティルトメータを用いた。

斜面の傾斜変動は、降雨量と降雨パターン (長雨, 集中雨) によって少しずつ異なる。図-11には長雨時と短期集中強雨時の累積雨量と傾斜変動の経時記録の典型例を示した。降雨の発生後、斜面の表層はいったん山側に傾斜し、次に谷側に傾斜する。降雨が更に継続すると、表層は谷側に傾斜を増し、降雨が止むとしばらくして傾斜はやや山側に回復して安定化する。このときの山側への回復の度合いは長雨よりも短期集中降雨時に大きい。そして、最終的には降雨発生以前よりも谷側に傾き、降雨発生前よりも傾斜角度が増加する。図-12には累積雨量と傾斜変動量の関係を示した。降雨初期に山側へ傾斜変動する原因は斜面表面付近の乾燥している地盤が降雨によるわずかな含水比の増加によって、強いサクションが生まれ一時的に収縮したためと考えられている。

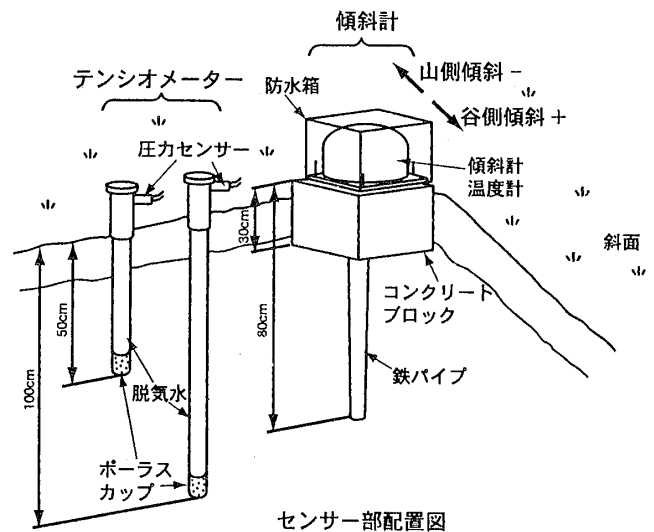


図-10 傾斜計とテンシオメータの設計図 (佐々木他, 1994)
 Fig. 10 Installation of tiltmeter and tentiometer (Sasaki et al, 1994)

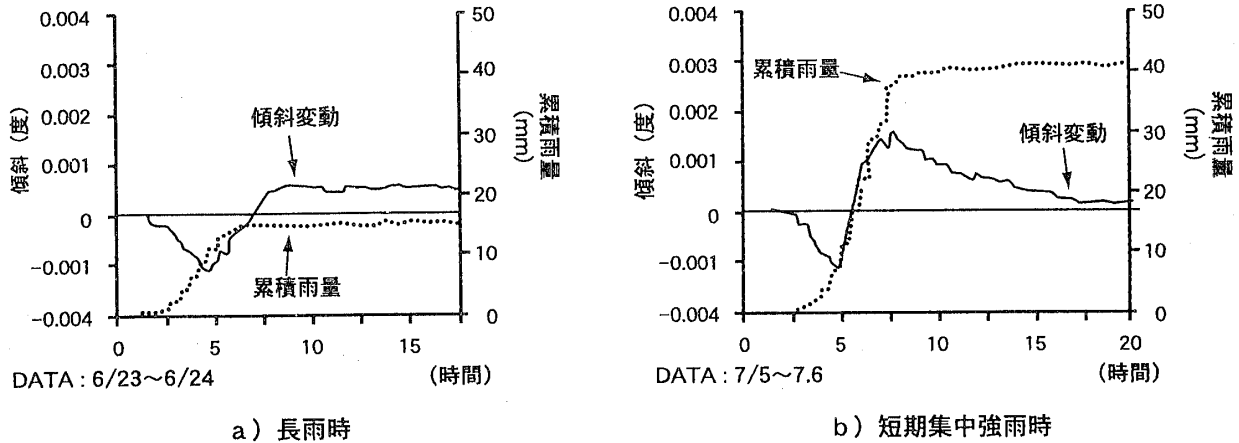


図-11 累積雨量とティルトメータの記録 (佐々木他, 1994)
 Fig. 11 Records of tiltmeter and accumulated rain fall (Sasaki et al, 1994)

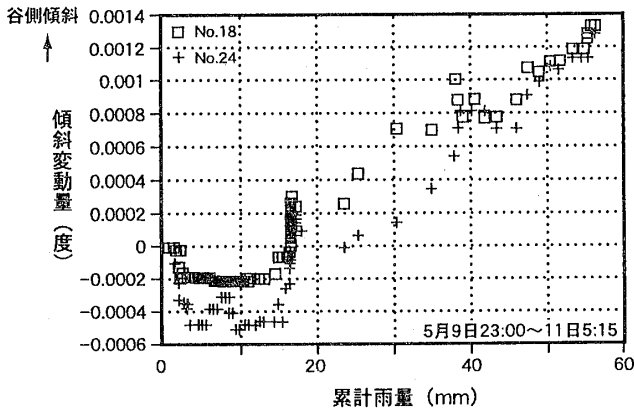


図-12 累積雨量と傾斜変動の関係 (藤井他, 1996)
 Fig. 12 Relationship between increment of tilt and accumulation of rain fall (Fujii et al, 1996)

(4) チョークからなる高い急崖のモニタリング

英国の南端にあるWight島の南海岸を通る道路は高さ70mの急崖とわずか15~30m離れているだけである(図-13)。Barton et al (1988,2000)¹⁴⁾¹⁵⁾は、この道路の災害を最小にするために、ティルトメータを基本とする警戒システムを1981年に設置した。5箇所に設置したティルトメータは、深度2mのボーリング孔に1.24mの長さの管をコンクリートで固め、その管の頂部に傾斜センサーを固定する構造とした。それぞれのセンサーは約±0.5°の測定領域、±1秒の分解能を持つバブルセンサー(electrolytic level transducer)である。

図-14は1981年~1997年の約17年間の測定結果を示した。1981~1986年はほぼ一定の速度で傾斜が増加している。1987~1988年の傾斜変動速度の急激な増加はその年の冬の天候が特に激しい嵐であったことによると説明されている。1989年のスパイク状の上下変動は恐らく岩盤

内部の応力開放による急激な地盤の変動によるものと思われる。1995年以降、傾斜角の記録は激しく上下している。この現象は明らかに1994年までの傾斜変動と違ったパターンを示している。この傾斜角度の上下変動は岩盤斜面の内部構造変化を表し、崩壊に向かって一步近づいたものと推測される。約17年間の長期間モニターされたティルトメータの記録で明らかなのは、傾斜変動はその気象条件および急崖の内部構造変化を敏感に反映していることである。

1987年にティルトメータの近傍に設置した深度30.5mの地中傾斜計(inclinometer)用ケーシングの測定結果より得られた約10年間の表層部の移動量(谷方向)を図-15に示した。図-14のティルトメータの傾斜が著しく増減した1995~1997年と同年の図-15の移動量と比較すれば、ティルトメータの傾斜角の増減は移動量の増減とは調和せず、むしろ、傾斜角がプラスであれマイナスであれ、傾斜角の変化量が移動量に関係することが判断される。

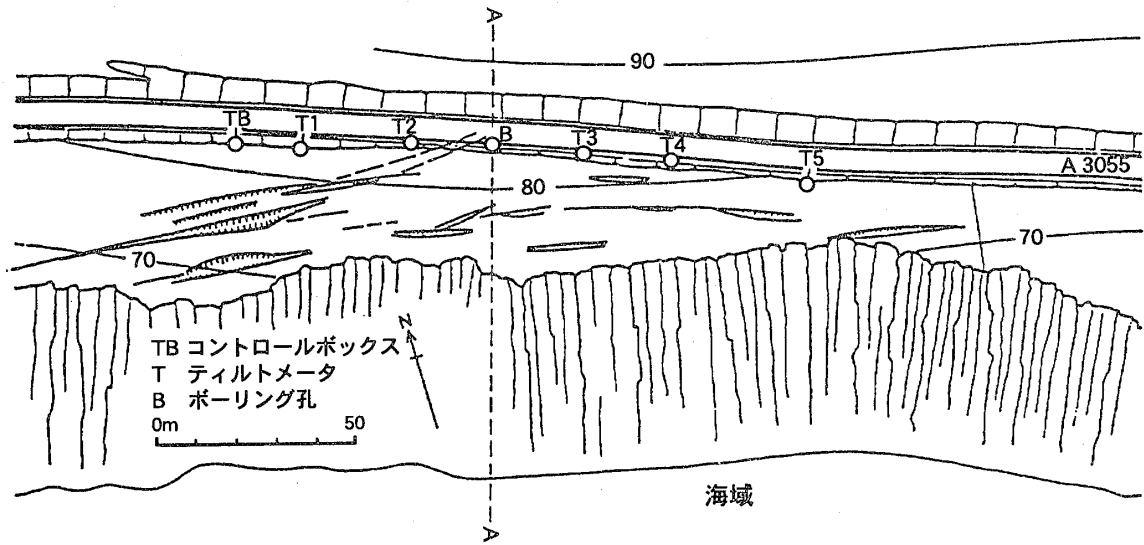
図-14に示すティルトメータの1981~1983年の平均傾斜角速度は

$$\dot{\theta} = 0.116 \text{ (秒/日)} \approx 5.5 \times 10^{-7} \text{ (rad/d)}$$

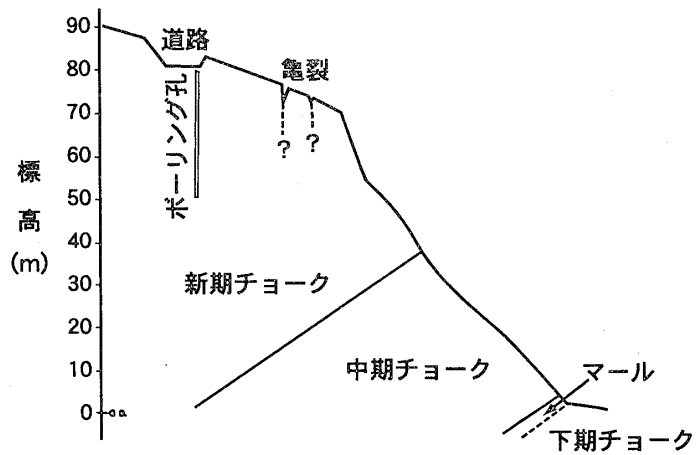
約17年以上経過した2000年の現在もこの急崖の崩壊は報告されていない。しかし、図-14にも示したように1995年以後の傾斜角の急速な増減変化は崩壊が間近に迫っていると推測され、Barton et al (2000)¹⁵⁾は、道路の崩壊を防止するために杭構造壁の対策工を施すべきことを推奨している。

3.2 ベーンの回転角速度と崩壊余裕時間

石本・飯田(1936)¹⁶⁾は図-16に示す同心円筒装置を用い、含水率26.6%, 30.7%および33.7%の3つの粘土



a) ティルトメータの設置を示す平面図



b) A A線に沿った地質断面

図-13 ティルトメータの設置を示す道路平面図と斜面の断面 (Barton et al, 1988)

Fig. 13 a) Plane of road and installation of tiltmeter, b) Profile section of the cliff (Barton et al, 1988)

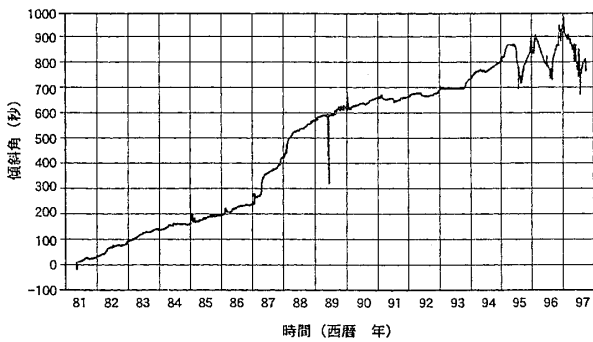


図-14 ティルトメータ (No. 3) の傾斜角と経過時間 (Barton et al, 2000)

Fig. 14 True tilt angle with time (Barton et al, 2000)

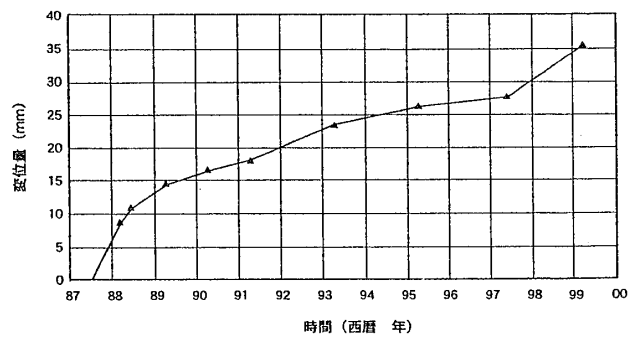


図-15 地中傾斜計で実測した地表面下1mの変位量と時間 (Barton et al, 2000)

Fig. 15 Displacement with time at 1m depth obtained by measurement of borehole inclinometer (Barton et al, 2000)

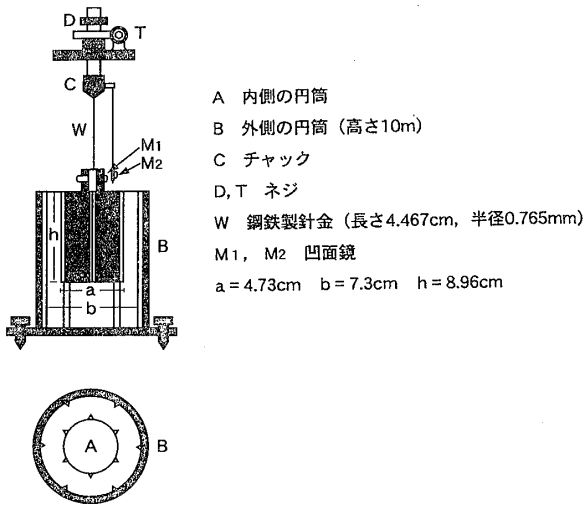


図-16 石本・飯田のクリープ実験装置 (石本他, 1936)
 Fig. 16 Laboratory experiment device (Ishimoto et al, 1936)

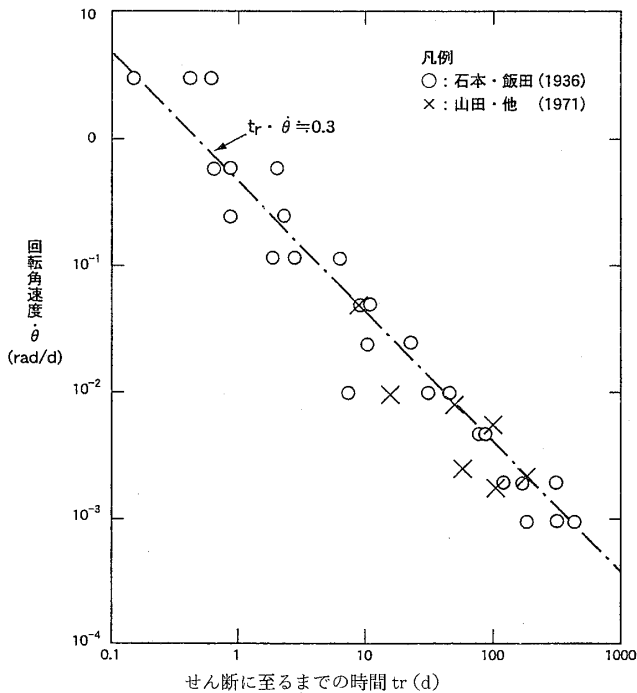


図-17 せん断に至る時間と回転速度との関係 (石本他, 1936)
 Fig. 17 Relationship between time to shear failure and rotational rate of vane (Ishimoto et al, 1936)

試料についてのクリープ実験を行った。3種類の含水率を替えた粘土のクリープ実験結果は、図-17に示すとおりで、これより、次のように結論している。「せん断破壊に至る時間は力の働く速度に関係する。すなわち、せん断速度が大であると、せん断破壊に達する時間が短く、小であると時間が長い」。

山田他 (1971)¹⁷⁾ はベーンせん断試験器を用いて同様のクリープ室内試験結果からほとんど同じ関係を得てい

る。

両者の室内実験は粘土の違いや若干の試験方法の違いがあるにもかかわらず、概略次のような関係に近似できる。

$$tr \cdot \dot{\theta} \approx 0.3$$

ここで、tr : 破壊までの余裕時間 (d)

$\dot{\theta}$: 回転角速度 (rad/d)

3.3 地中傾斜計のせん断ひずみ速度

(1) せん断ひずみの定義

地中傾斜計は鉛直軸を基準として傾斜角を測定するものであり、その角度の変化量 $\Delta \alpha$ に相当する水平成分の変位 H は次式で求められる。

$$H = D \cdot \sin \Delta \alpha \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、H : 水平変位 D : 測定間隔

すべり面が水平である場合、そのすべり領域のせん断ひずみ γ は

$$\gamma = H/D \quad \dots \dots \dots (2)$$

で表される (図-18)。

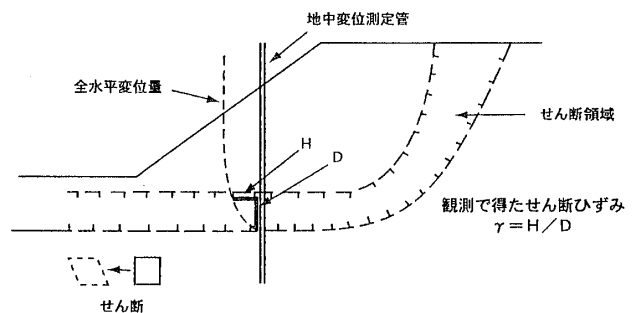


図-18 水平すべり面の場合の地中傾斜計によるせん断ひずみの求め方

Fig. 18 Definition of shear strain using borehole inclinometer in horizontal shear plane

すべり面が水平面と β の角度を有する場合のせん断ひずみは図-19より

$$\gamma = \frac{AE}{AD} = \frac{AC/\cos\beta}{AB\cos\beta} = \frac{H}{D\cos^2\beta} \quad \dots (3)$$

で求められる。

(2) カルフォルニア海岸の地すべり変動

Gould (1960)¹⁸⁾ は米国カルフォルニア海岸に多発する地すべり地の中から12地点を選んで、(3)式で求めたせん断ひずみ速度の実測値を報告している。その地すべり地の代表的な斜面の形状と地中傾斜計の測定による土塊の変位分布を図-20に示す。これらの箇所は過去に滑落

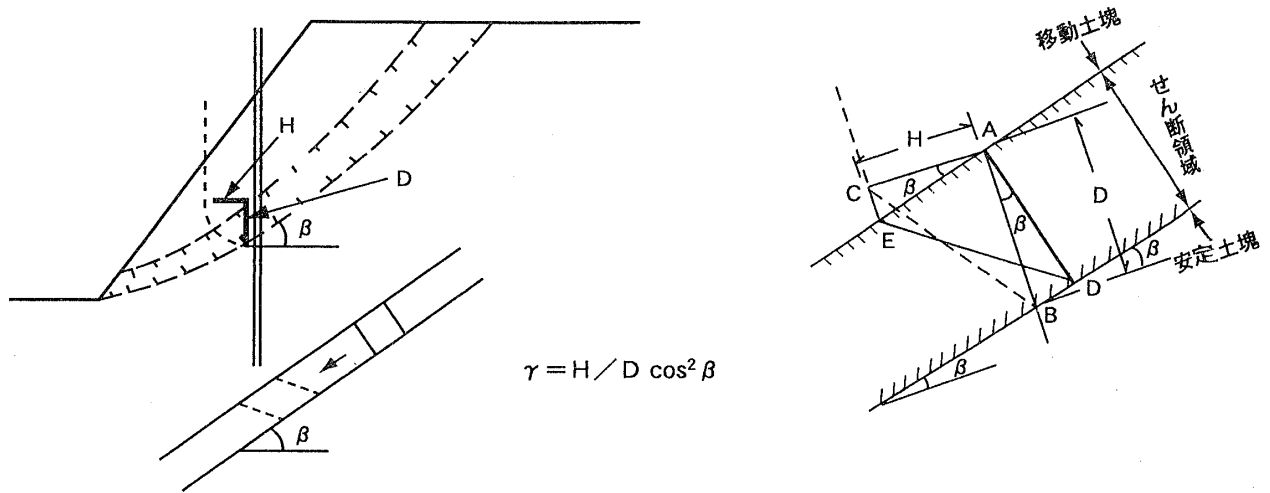


図-19 傾斜すべり面の場合の地中傾斜計によるせん断ひずみの求め方
 Fig. 19 Definition of shear strain using borehole inclinometer in inclined shear plane

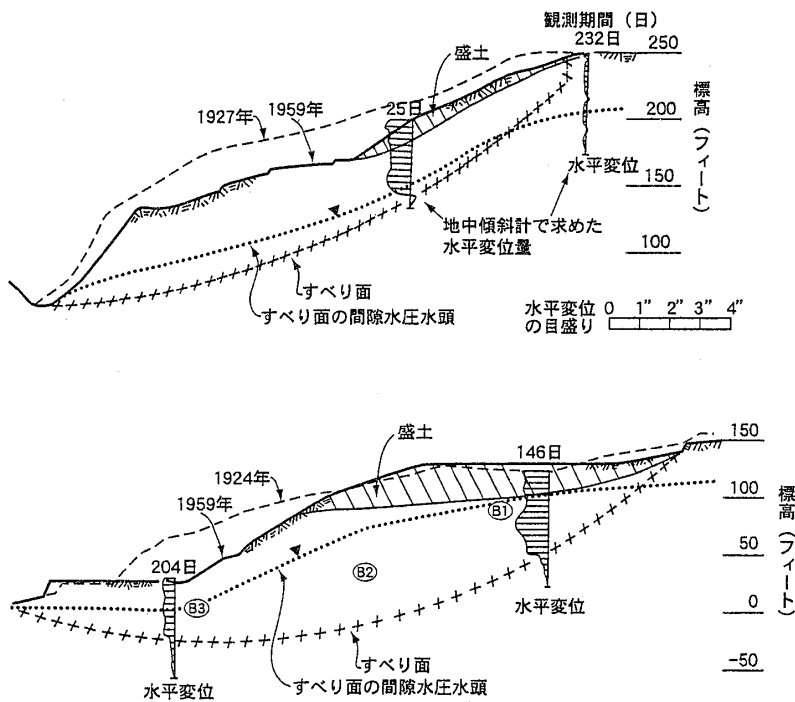


図-20 カリフォルニア海岸の地すべり変動の地中傾斜記録例 (Gould, 1960)
 Fig. 20 Examples of records from borehole inclinometer in California shore slides. (Gould, 1960)

した斜面であり、その後も連続したクリープ変動が続いている。大部分の地点において地すべりのせん断が厚さD=2~6フィートの狭い領域で発生している。各々の地中傾斜計によるせん断ひずみ速度はそれぞれの地すべり地の平均で $2 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$ (rad/d)の領域にあり、それらを平均すると、 4×10^{-4} (rad/d)であった。このせん断ひずみ速度は不安定領域のせん断ひずみ速度として明記すべき値である。

(3) 新潟県の第三紀層地すべりの変動¹⁹⁾

著者は新潟県で発生した2つの地すべりの地中傾斜計に基づくせん断ひずみ速度と崩壊または崩壊直前までの余裕時間の関係を求めた。

1986年3月30日に新潟県田沢地区で発生した泥・砂岩互層からなる斜面の地中傾斜計測定結果は滑落日の10日前後を挟む平均値で 2×10^{-3} (rad/d)であった。

一方、北陸自動車道太平寺トンネル東坑口山側の掘削

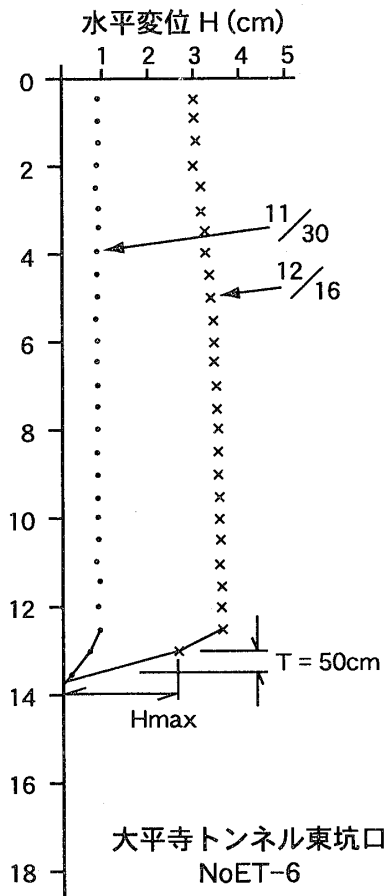


図-21 滑落直前の地中傾斜計の測定記録
Fig. 21 Displacement profile immediately before slide

斜面は1985年11月26日～同年12月20日に急速に変動し、斜面の頂部に大きな亀裂が発生した。滑落直前に押さえ盛土の急速施工を行って地すべり発生を抑えた。その時に観測した地中傾斜計の観測結果は図-21に示す通りである。11月30日および12月16日の二回の測定結果よりその期間の平均せん断ひずみ速度を算定すれば、 3.2×10^{-3} (rad/d) であり、崩壊直前の余裕日数は大略10日前後と推定される。

3.4 一般測量と地中傾斜計の組み合わせ

イタリアのSanta Barbara鉱山の高さ205mにも及ぶ大切土斜面は、最終段階で崩壊した。切土高さ50~170m間に至るまで斜面中間点の測量杭の変動を一般測量法で計測し、それを水平変位速度として図-22に示している(D'elia et al, (1988)²⁰)。切土高H=50~100m間では1~4 mm/dの滑らかな水平移動速度を示し、高さH=125mに達したときに28mm/dと急速に増加している。その後、斜面の切り直しに伴って測点を移動したが、切り直しに伴う除荷の影響が現れて水平移動速度が減少した。切土高さH=150mにおいては、平均10mm/dの水平速度であった。その後の切土高さの増加に伴って測点部分の速度が波打つ変化に変わり、降雨などの気象条件に敏感な変動が見られた。この斜面は1987年11月高さ205mに達したときに回転すべりを伴って崩壊した。図-23は現場設置型の地中傾斜計の記録より想定された切土

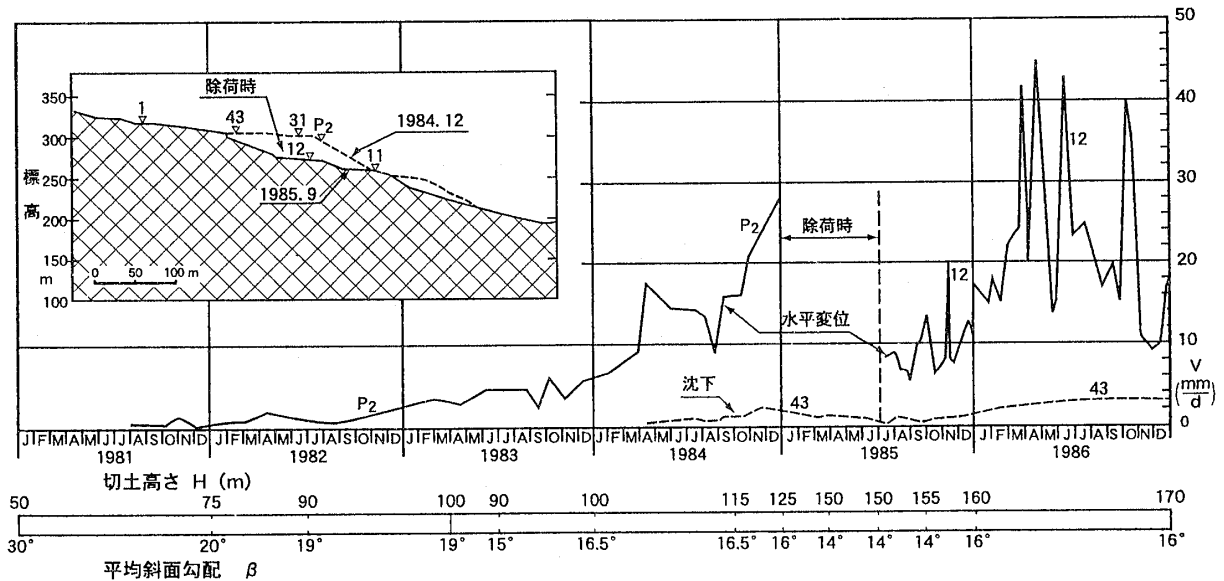


図-22 切土斜面の測定点の水平変位速度と時間 (D'elia et al, 1988)
(切土高さ (H) と平均斜面勾配 (β) を下段に示す)
Fig. 22 Horizontal displacement of the measurement point and time during excavation (D'elia et al, 1988)

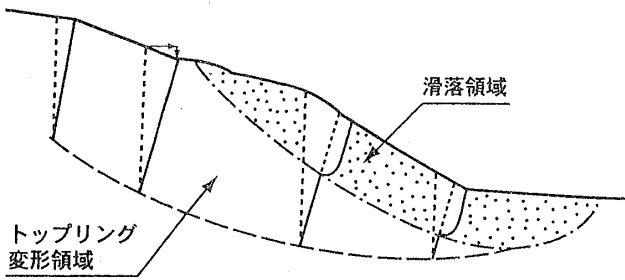


図-23 切土斜面の変形モデル (B. D'elia et al, 1988)
 Fig. 23 Model of deformation and slide for cutting slope
 (B. D'elia et al, 1988)

斜面の変形を図解したものである。この変形は、基本的には深部のせん断帯が掘削深度が深くなるにつれて下方に移動し、変形が進むとせん断帯の上方にある土塊が剛体のように回転している。このような変形の過程は節理に沿った連続岩塊に発生するトッピングと類似のものである。

前述の切土斜面の変動は前節に示した図-3が現場設置型地中傾斜計で得られた実際の測定結果である。およそ60mの深度のせん断帯を支点とした回転変動として

解釈される。その場合、回転半径を60mと仮定して、それぞれの斜面高さの水平移動速度を回転半径で割り算すれば、それぞれの傾斜変動速度が求められる。図-22より崩壊までの余裕日数 t_r 、傾斜変動速度 $\dot{\theta}$ を求めると：

| 斜面の高さ m | 測定日 年・月 | t_r d | 水平速度 mm/d | $\dot{\theta}$ rad/d |
|------------|------------|------------|--------------|-------------------------|
| 90 | 1983.7 | 1580 | 5 | 8.3×10^{-5} |
| 165 | 1986.8 | 455 | 40 | 6.6×10^{-4} |

と概算される。

3.5 傾斜角速度と崩壊時間に関するまとめ

(1) 傾斜角速度と崩壊までの余裕時間の関係

3.1~3.4で紹介した回転・傾斜角速度およびせん断ひずみ速度を同一の状態変数とみなして、これらを傾斜角速度と呼び、傾斜角速度と崩壊までの余裕時間の関係を図-24に総括図としてまとめた。同図は傾斜角速度および崩壊までの余裕時間をそれぞれ、rad/d, dの単位で対数グラフにプロットした。グラフの右側には、上述した研究報文の中で崩壊と直接関係付けることが出来ない

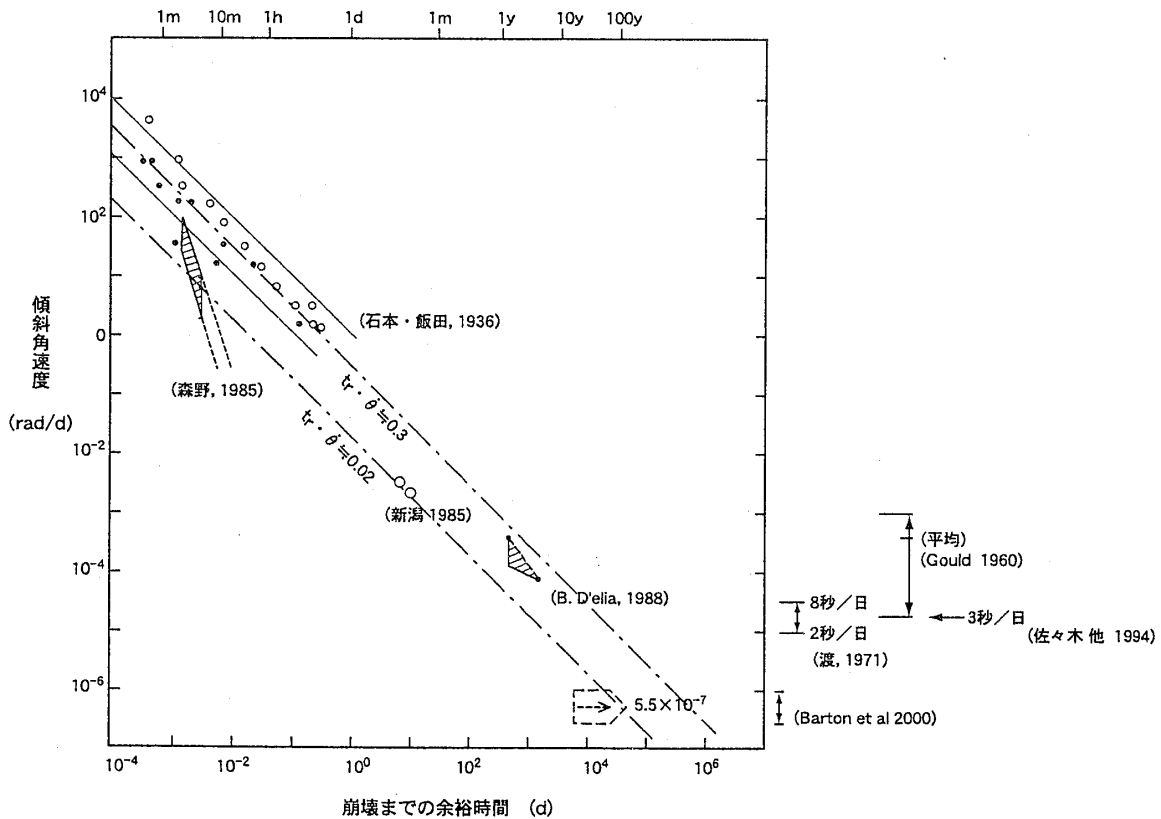


図-24 斜面の傾斜角速度と崩壊までの余裕時間の関係総括図
 Fig. 24 Summary of relationship between rate of tilt angle and time to failure in slope

が、斜面の安定領域を示唆する傾斜角速度領域を示すものと判断して、縦の目盛りを一致させ、併記した。この図のグラフ中の右最下段にプロットした破線の矢印は崩壊までの余裕日数が17年以上（6200日以上）であることを表したものである。石本・飯田(1936)よりBarton et al (2000) までの各々のプロットは「傾斜角速度の増加に伴って崩壊までの余裕時間が短くなる」と言う一般的な常識に一致しており、その大凡の関係は

$$tr \cdot \dot{\theta} \approx 0.02 \sim 0.3 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 tr : 斜面崩壊までの余裕時間 (d)
 $\dot{\theta}$: 傾斜角速度 (rad/d)

で表すことが出来る。

グラフの右端部に示した傾斜角度の数字で記した、渡(1971)、佐々木他(1994)およびBarton et al (2000)の領域がほぼ安定斜面と評価できる領域である。一方、Gould (1960) の下端の領域は地すべりの傷を持った斜面のクリープ変動の値であることから、不安領域の始まりと評価できる。

(2) 崩壊速度に影響する要素

上記の(4)式の右辺の定数の幅は斜面の地質構成、斜面の構造、水理的な要素などによって変化すると考えられる。Rizzo (1990)²¹⁾は、崩壊前の変形速度が速いか遅いかを決定する要素を、岩質、すべり面の特徴および水理地質的特徴の3つに分けて次のように説明をしている。

- ・岩質の特性：硬くてもろい材質の岩層は速く、固結度の低い粘土質な地層ほど遅い。
- ・すべり面の特徴：単純な直線的で明確なすべり面を持つ場合、すべり深度が浅い場合、傾斜が急な場合に速い。複雑で緩やかな傾斜を持った深いすべり面の場合は遅い。
- ・水理地質的特徴：透水係数の非常に小さい基底面を持つ多孔質な地盤で、それ故に降水によって地盤の間隙水圧が著しく変化する場合は速い。降雨量に影響されにくい地下水滞水層の場合は遅い。

図-24のプロットは、軟らかな粘土から硬い岩盤までの広い地盤の特性が含まれており、また、一定の幅でせん断する地すべり、降水の増加によって崩壊の厚さが時間とともに変化すると想像される砂斜面の崩壊実験結果も含まれている。このように、多様な要素を包括した図から(4)式の右辺の定数の範囲を決定している。したがってその定数にある幅を持つ事は当然であり、斜面の上記3要素の組み合わせの多様性を反映していると考えられる。

実際に(4)式を適用して崩壊時間の予測を行う場合は

上記の3つの要素を勘案して0.02~0.3の領域の定数を選択する必要があるであろう。実証データがきわめて少ないので、著者の試案として提案すると：

- 急崖をなす岩盤斜面 0.02
- 緩い勾配を持った
 集水地形の崩積土砂斜面 0.02
- 亀裂の多い硬い岩盤斜面 0.1
- 一枚の明確なすべり面をもつ軟岩斜面
 0.3

等、硬い岩盤で急斜面、および、透水性の良い未固結土斜面は、0.02を適用し、一般の軟岩地すべり斜面は0.3を適用するが、すべり面勾配が急なほど0.1に近づく。これらの定数をより信頼できるものとするためには、今後の多くの関連データの蓄積を必要とするものである。

4 傾斜角速度の斜面の安定度評価基準

(1) 崩壊までの余裕時間と社会的活動

目視によって危険と感じられる斜面があった場合、その斜面のモニタリングの成果が社会生活にどのような影響をもたらすかを、斜面の崩壊時間との関連で考察し、表-1にまとめた。

表-1 崩壊までの余裕時間と社会的活動
 Table-1 Social activities against slope failure in terms of the time to failure on slope

| 崩壊までの余裕時間 tr | 対応策および行動 |
|-------------------|---|
| 2~3年以上 | 観測値が日常変動の範囲にとどまっていることを監視し、安全を確認する。 |
| 2~3年以内 | 崩壊時の影響を検討し、斜面の安定対策工事を実行するか否か検討する。 |
| 1年 | 安定対策工事を早急に行うか、または、崩壊時の被害を最小にするための計画を立案する。 |
| 1ヶ月 | 崩壊によって被災するライフライン(通信・電力・ガス・上下水道)および交通網の対応策を具体的に検討し、諸機関に連絡する。 |
| 10日 | 避難準備、ライフラインの撤去と切り直し工事完了する。 |
| 1~3日 | 緊急避難 |

モニタリングで予測する崩壊時間の精度は、長い時間ほど正確ではなく、数年以上になると目安程度にすぎない。したがって、ある程度の崩壊時間に迫らないと、確実な予測が出来ないことから、予測精度の確実さに応じて、または、崩壊時間が身近に迫って始めて具体的な行動を取ることが一般的である。特に、避難行動はよほど

の確証がなければ実行できないことであり、一方では安全確保を最重点としなければならない。

(2) 傾斜角速度による斜面の安定度評価基準

安全側を採用して(4)式の右辺の定数を0.02とすれば、崩壊までの余裕時間と平均傾斜速度との関係は図-25に示したとおりである。同図には、関係直線の左側に○で囲んで(秒/日)、(分/日)の親しみのある単位で傾斜角速度を表し、崩壊までの余裕時間との対応を示した。この図より、対象斜面の安定度を傾斜角速度から直感的に判断する基準を表-2に提案する。

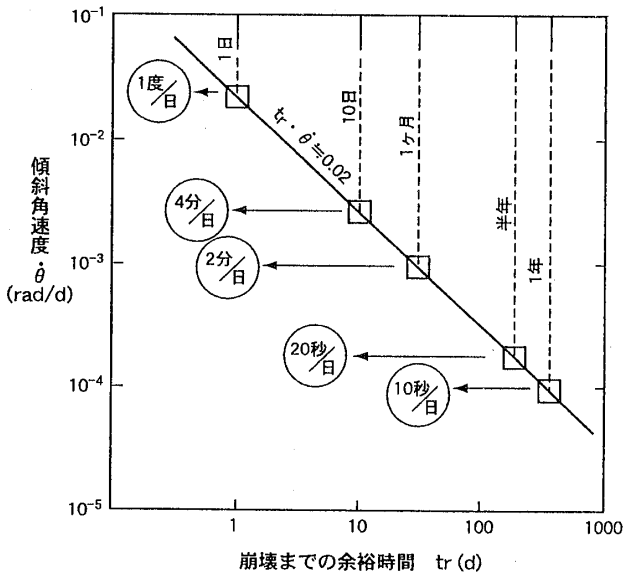


図-25 $tr \cdot \dot{\theta} = 0.02$ と仮定した場合の $tr \sim \dot{\theta}$ の関係
 Fig. 25 Relationship of time to failure with rate of tilt in the case of $tr \cdot \dot{\theta} = 0.02$

表-2 傾斜角速度と斜面の安定度判定基準
 Table-2 Assessment criteria of slope stability based on rate of tilt angle.

| 傾斜角速度 (rad/d) | 斜面の安定度評価 |
|-----------------|---------------|
| | 緊急避難 |
| 10^{-2} ----- | 嚴重警戒, 崩壊覚悟 |
| 10^{-3} ----- | 崩壊の危険があり, 要警戒 |
| 10^{-4} ----- | 崩壊の可能性をもつ斜面変動 |
| 10^{-5} ----- | 日常斜面変動 |

5 結論

通常、斜面のモニタリング計器として伸縮計、亀裂変位計などの直線移動測定計器が多用され、その測定結果より、斜面の安定度を評価することが常道となっている。

しかし、それらの計器の設置や長期の維持を考えるとティルトメータは優れた特徴を持っており、将来、より多用されるべきであると考えられる。

斜面の変動は基底のすべり面に沿って移動すると言う単純なものでは無く、ほとんど全ての斜面変動はすべり移動に伴う斜面内部の構造変化を伴うものであり、それを反映した傾斜・回転変動を斜面表層部にもたらす。その傾斜・回転変動量または角速度は伸縮計その他で計測された移動量または移動速度とは相似の関係にあることが多く経験されている。

本文では、数少ない報文から傾斜・回転変動と崩壊時間の関係を拾い上げ、回転角、せん断ひずみ、傾斜角を同一の数値として扱い、傾斜角速度と崩壊時間の関係を求めた。その結果、傾斜角速度と崩壊までの余裕時間 tr とは

$$tr \cdot \dot{\theta} = 0.02 \sim 0.3$$

の関係にある事を提案した。

なお、この関係を基にして、傾斜変動の斜面安定度評価基準を表-2に提案した。

6 謝辞

ティルトメータの計測に興味を持ったのは、昭和59年9月に当社の技師長であった上沢弘氏に石本・飯田(1936)およびGould (1960)の文献を紹介され、当時の私にとってはその内容の新しさに大変感激したことが最初であった。その後、折に触れ実測された斜面の傾斜変動に関係する文献を蓄え、本文をまとめることが出来た。ここに、新鮮で興味深い技術の紹介をいただいた上沢弘氏に感謝するものである。

参 考 文 献

- 1) Mandzic, E. (1988) : Stability of unstable final slope in deep open iron mine, Procs. of 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, Vol.1, pp455~458.
- 2) Carter, M. & Bentley, S.P. (1985) : The geometry of slip surfaces beneath landslides: prediction from surface measurements, Can. Geotech. J. Vol.22, pp 234~238.
- 3) Ter-Stepanian, G. (1966) : Types of deep creep of slopes of rock masses, Procs. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol.2, pp157~160.
- 4) Burland, J.B., Longworth, T.I. and Moore, J. F.A. (1977) : A study of ground movements and progressive failure caused by deep excavation in Oxford clay, Geotechnique, Vol.27, No.4, pp 557~591.
- 5) D'elia, B., Esu F. and Federico, G. (1989) : Instrumental analysis of deformation in a high cut, Procs of 12th ISMFE, Rio de Janeiro, vol.3 pp1555~1560.
- 6) Kovari, K. (1988) : General Report; methods of monitoring landslides, Procs of 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, Vol.3. pp 1421~1433.
- 7) Müller, L. (1964) : The rock slide in the Vajont Valley, Rock mechanics and Engineering Geology pp148~211.
- 8) 山口真一, 渡 正亮, 湊元光春, 高田理夫, 中村三郎, 高田雄次 (1964) : 地球物理学的調査法について, 地すべり, Vol.1, No.1 pp35~44.
- 9) 渡 正亮 (1971) : 地すべり調査における地盤傾斜計の利用方法について, 地すべり, Vol.7, No.4, pp27~32.
- 10) 森野亮宏, 草野国重 (1985) : 切取りのり面の早期検知手法に関する模型実験, 土と基礎, Vol.33, No.12 pp9~14.
- 11) 森野亮宏 (1985) : 斜面の災害危険度と崩壊発生の予測に関する研究, 鉄道技術研究所報告No.1292.
- 12) 佐々木靖人, 藤井厚企, 浅井健一, 中村康夫 (1944) : ロームに埋設された谷頭斜面のマスムーブメントの過程, 応用地質, Vol.35, No.5 pp27~39.
- 13) 藤井厚企, 佐々木靖人, 中村康夫 (1996) : 斜面表層の安定度評価のためのモニタリング基礎実験, 第20回日本道路会議論文集, pp119~121.
- 14) Barton, M.E. and McInnes, R.G. (1988) : Experience with a tiltmeter-based early warning system on the Isle of Wight, Procs. of 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, Vol.1, pp379~382.
- 15) Barton, M.E. and MacCosker, A.M. (2000) : Inclinator and tiltmeter of a high chalk cliff, Procs of 8th Int. Symp. on Landslides, Cardiff, vol.1, pp 127~132.
- 16) 石本巳四郎, 飯田汲事 (1936) : 土の粘弾性とせん断抵抗, 地震研究所彙報Vol.14, pp534~544.
- 17) 山田剛二, 渡正亮, 小橋澄治 : 地すべり・斜面崩壊の予知と対策, 山海堂, pp292.
- 18) Gould, J.P. (1960) : A study of shear failure in certain tertiary marine sediments, Procs of ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado, pp615~641.
- 19) 高速道路技術センター (1986) : 北陸自動車道 (上越~朝日間総合検討 (昭和60年度) 地すべり計測システムの検討報告書 pp58~65.
- 20) D'elia B., Destifano, D., Esu, F. and Federico, G. (1988) : Deformation and stability of high cuts in a structurally complex formation, Procs. of the 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, vol.1, pp599~603.
- 21) Rizzo, V. and Rende, I.R.P.I. (1990) : Pre-failure deformations and landslide surveillance, Procs. of 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, vol.3, pp1459~1461.

