

排土に伴う斜面崩壊発生の時期予測の問題について

島 通 保

ON THE PROBLEMS OF FORECASTING THE TIME OF OCCURRENCE OF SLOPE FAILURE ASSOCIATED WITH SOIL REMOVAL

By *Michiyasu SHIMA*

Synopsis

Variations of soil associated with soil removal have been investigated in the Kamenose landslide area. Its removal led to instability of the slope, as it was from the base of the slope. Both strain and inclination on the surface and internal strain showed remarkable change, and the slope failure has occurred on Jan. 1st, 1967 and May 28th, 1967. The author analysed their variations as a process of creep rupture characteristics. The relationship between the strain or the inclination and time in the tertiary creep range was used to forecast the time of occurrence of slope failure. It was shown that the analysis of the compressive strain as well as the extensive strain was effective to forecast the time.

1 序

地すべり・崩壊の予知という場合、a) 発生する場所、b) 発生の時期、c) 発生する現象の規模と形態の3つが明らかにされねばならないと、普通よく言われている。誘因が土工等の人為的なものである場合、発生し易い場所については予めほぼ予想されるから、このような例では発生の可能性、時期、規模が特に問題となる。

以下において報告する、大阪府柏原市亀の瀬地すべり地における排土工事の例は、その場所は大体予想し得るから、もし発生するとすれば、発生の時期を予測しておくことが重要である。

亀の瀬地すべり地は、最近では、昭和6年および昭和42年に地すべりを起したが、諸対策が実施された結果、一応移動も停止した。恒久対策として、地すべり地上部の載荷荷重の軽減のための排土工法を、昭和50年度から実施することが計画された。昭和50年度には、清水谷上部からとめしよ山山腹にかけて、約8万m³の排土工事が実施に移されたが、この工事の進行過程において生ずる、施工中途の斜面および完成斜面の安定性が問題となった。

肉眼でわかるようなクラック等の徴候は、斜面の巡回によって発見することも出来るが、斜面が崩壊に至るような場合には、クラック発生から崩壊までの時間が短く、対策を立てる時間的な余裕の少ないことが多い。このため、亀の瀬地すべり地では、地表面歪、傾斜、地中内部歪等の各種の移動量に関する観測を行ない、極くわずかな徴候をも計器によって発見することに努めた。

斉藤博士は土のクリープ破壊試験を多数行なわれて、クリープ破壊曲線を得られた。これを更に、実物大の斜面崩壊実験および実斜面の自然発生的な崩壊に於て確かめられている^{1),2)}。筆者も斉藤博士の方法を使って、排土に伴う山腹斜面の変動記録を、地すべり・崩壊の発生予知という観点から、種々解析したので、その結果について報告する。

2 排土計画と観測方法

1975年8月から排土工事が開始されたが、その範囲および切土斜面の形状は Fig. 1, Fig. 2. に示す通りである。排土は原形斜面の下位部から順次上方に向けて、1975年12月末頃まで実施された。1976年1月17

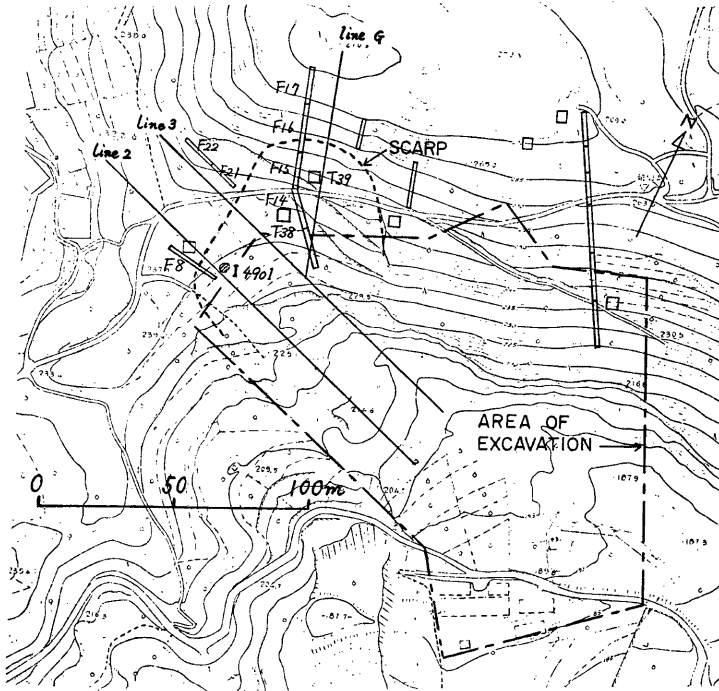


Fig. 1. Location of instruments
 F, S: extensometer, T: tiltmeter, I: internal strain meter

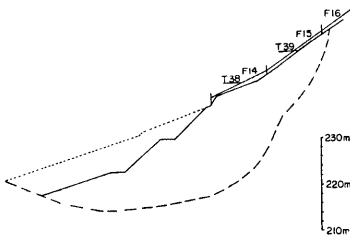


Fig. 2a. Geological section through line G.



Fig. 2b. Geological section through line 3.

日の崩壊以後は、排土は殆んど中止状態である。

図に示す範囲に、地表面に伸縮計と傾斜計、地中に地中内部歪計が設定されて、移動観測が継続された。排土および地すべりの進行に伴って、計器の位置には変更があり、また新設、廃止がなされたが、主なものは Fig. 1., Fig. 3. に示されている。

なお地中内部歪の測定は、ストレーンゲージ 1m 間隔のパイプ歪計を自動記録方式のデジタル歪測定器によって記録させたものであり、また傾斜は、地表に設置された長さ 4.5m の H 鋼の傾斜の測定によっている。

3 観測結果

1975年11月上旬までの期間は、計器配置点には変動は殆んど現れなかった。しかし11月中旬頃より、まず、G断面付近に設置された2地点の傾斜計にゆるやかな変動が現れ始めた。その傾斜方向は、T38が下方が下り、T39は上方が下った。これはT38とT39の中間が膨れ上がったことによるものと思われ、T39は上部地すべり土塊の回転に対応する動きを示している。傾斜速度は次第に加速的であるが、12月10日頃から、比較的規則的な3次クリープの形状の加速性を示し始めた。

ついで12月上旬頃より、地表の伸縮計、地中のパイプ歪計にも変動が現れ始めた。即ち、G断面に設置された

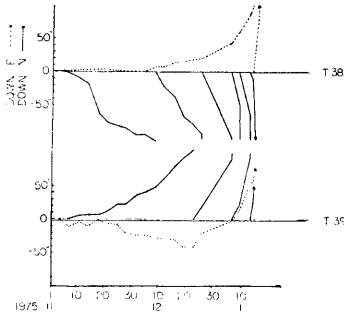


Fig. 4. Variation of surface inclination (T38 and T39).

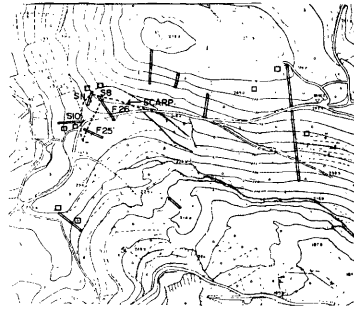


Fig. 3. Location of instruments.
F, S: extensometer, T: tiltmeter,
I: internal strain meter

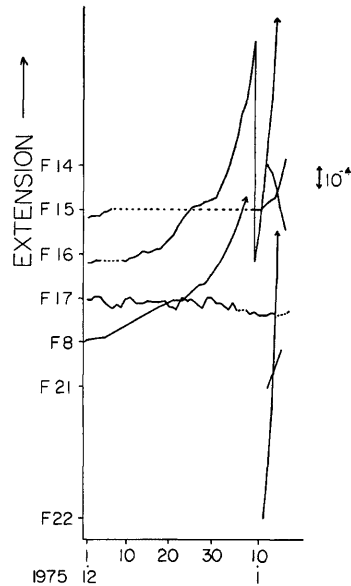


Fig. 5. Variation of surface strain

F14~F17の中、F16に12月中旬より伸びの変動が現れ始めているが、歪速度には加速的なものと減速的なものが混り、2次クリープの形状とはいいいにくく、やや複雑である。12月末より3次クリープ的に歪速度は加速的になり始めた。

なお、観測計器は排土工事の行なわれつつあった地域に配置されてあるため、その地点が工事期間中であれば、一時的に取外され、観測が中断することもしばしばであった。F14, F15が12月に欠測しているのもその一例である。

この G 断面では、1月8日以後の記録からみて、F14 地点に於て縮みが現れており、この点が地すべり斜面の上位部ではないことを示している。

また No. 2, No. 3 の断面に設置された F8 の伸縮計にも、12月上旬より伸びの変動が現れ始めた。約2週間、2次クリープの定常的な歪増加の後、12月下旬より3次クリープに移った。

No. 2 断面に設置されたパイプ歪計にも、12月中旬より、深さ 3.5m の所に変動が現れ始め、12月末より3次クリープ的な加速過程に入った。

このように3種の観測のいずれにも、クリープ破壊曲線に類似の傾向が現れ、12月末から3次クリープの過程に入り、1月17日16時50分に、遂に破壊点に達し、先ず G 断面の方向に、その直後に No. 2, No. 3 断面の方向に地すべり性崩壊が発生した。この時期には降

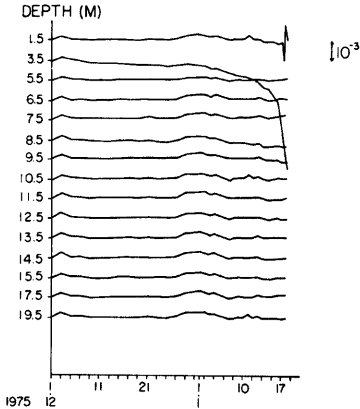


Fig. 6 Variation of internal strain (I4901).

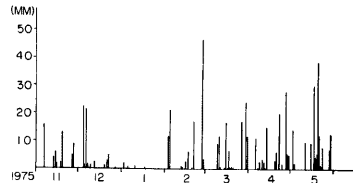


Fig. 7. Variation of precipitation.

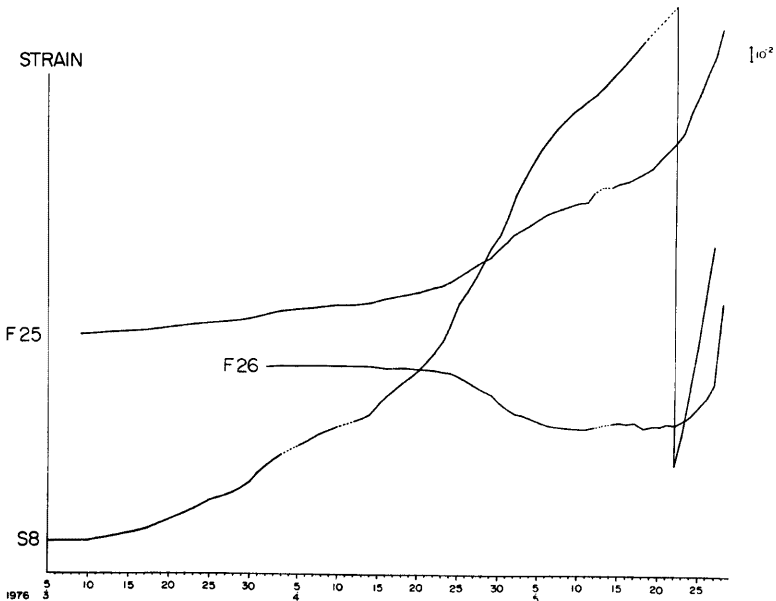


Fig. 8. Variation of surface strain

雨は殆んどなかったから、浸透水による土壌強度の低下によって崩壊が発生したのではなく、斜面の中央部から下部にわたる排土によって、上位部の土塊の支えが外され、安全率が低下して、地すべり性崩壊を起したものと考えられる。

1月17日の地すべりによって大きく変状したこの領域の斜面は、一時的に安定していたが、2月下旬より5月下旬にかけて地すべり活動を再開し、3月6日と5月28日に地すべりを起した。後者の地すべりに至る変動は、地表面歪の Fig. 8. からわかるように、かなり複雑な過程をたどっているが、その詳細は次章で述べる。

1976年2月以降降水量はかなりあった。この中2月28日の降水量 46mm のものは、この日から伸縮計 F22 に変動が現れ始めたから、これが誘因となったものとみなすことも出来る。

しかし、4月および5月における、歪速度の加速過程と降水量の多かった日との間には、直接的な関係は薄く、間接的なものようである。

4 観測結果の解析と崩壊時期の予測の問題

1976年3月以降の変動に比べ、1月17日の崩壊に至るものは典型的なクリープ破壊曲線に比較的類似した経過をたどったので、まずこちらの方について、地すべり予測の観点から解析することにした。

地すべり性崩壊に至る過程の解析およびその予測の方法に関しては、齊藤博士の研究がよく知られているが、亀の瀬の地すべりについてもこの方法を適用して解析してみた^{1),3)}。

齊藤博士によると、2次クリープの定常歪速度とクリープ破壊までの時間との間には

$$\log_{10} t_r = 2.33 - 0.916 \log_{10} \dot{\epsilon} \pm 0.59 \dots\dots\dots (1)$$

t_r : クリープ破壊までの余裕時間 (分)

$\dot{\epsilon}$: 歪速度 ($\times 10^{-4}$ /分)

によって表わされる関係にあることが報告されている。式 (1) の傾斜 0.916 を 1 と見なすと

$$t_r \cdot \dot{\epsilon} = \text{常数}$$

のような逆比例の関係が成立していることを示されている。またこの関係が3次クリープの範囲においても成立つとして、クリープ破壊曲線上の歪間隔を等しくとった3点から、次式によって破壊時刻 t_r を推定する方法を示されている。

$$t_r = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)^2 / 2}{(t_2 - t_1) - (t_3 - t_1) / 2} \dots\dots\dots (a)$$

そこでまず、亀の瀬に於ても、 t_r および $\dot{\epsilon}$ の対数の間に式 (1) に示されているような比例関係が成立つ

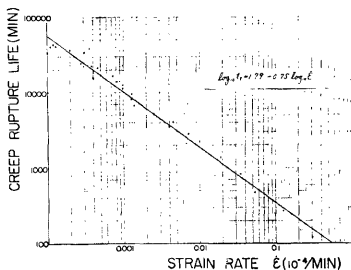


Fig. 9a. Relationship between surface strain rate and creep rupture life of failure occurred on Jan. 17th (F16).

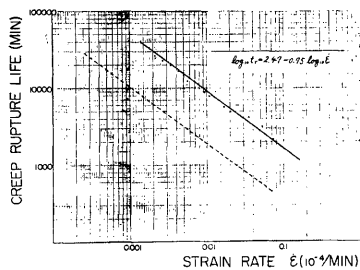


Fig. 9b. Relationship between surface strain rate and creep rupture life of failure occurred on Jan. 17th (F8).

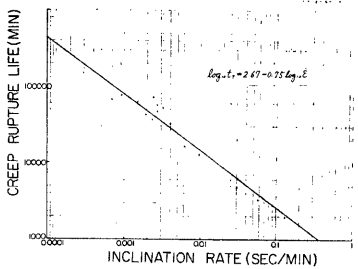


Fig. 9c. Relationship between inclination rate and creep rupture life of failure occurred on Jan. 17th (T38).

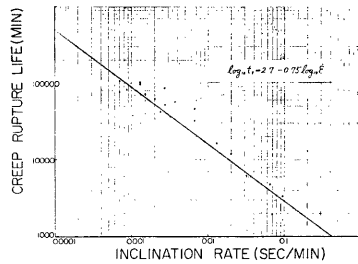


Fig. 9d. Relationship between inclination rate and creep rupture life of failure occurred on Jan. 17th (T39).

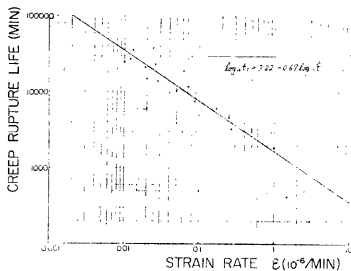


Fig. 9e. Relationship between internal strain rate and creep rupture life of failure occurred on Jan. 17th (14901).

かどうかを、表面歪、地中内部歪、傾斜量について、3次クリープの範囲で調べ、予測の可能性について検討した。

亀の瀬での結果では、式(1)の通りにはならず、式の常数がやや異なり、従って、破壊時刻 t_r の推定式も式(a)のようにならず、式(b)が導出された。地表面歪の速度について見ると、F8, F16ともかなり良く式(2), (3)で表わされる直線に乗っている。即ち

$$\log_{10} t_r = 2.47 - 0.75 \log_{10} \dot{\epsilon} \dots \dots \dots (2)$$

$$\log_{10} t_r = 1.79 - 0.75 \log_{10} \dot{\epsilon} \dots \dots \dots (3)$$

$$t_r = t_3 + \left\{ \frac{2}{(t_r - t_2) +} - \frac{1}{(t_r - t_1) +} \right\}^{-3} \dots \dots (b)$$

傾斜量についてもその変化速度をとり、破壊までの余裕時間との関係を描いてみた。F38, F39 は地表面歪に比して、かなりばらついているが大体に直線によく、その傾きは地表面歪のものとはほぼ同一で次式で表わされる。

$$\log_{10} t_r = 2.7 - 0.75 \log_{10} \dot{\epsilon} \dots \dots \dots (4)$$

$$\log_{10} t_r = 2.67 - 0.75 \log_{10} \dot{\epsilon} \dots \dots \dots (5)$$

破壊時刻 t_r の推定式は式(b)と同一である。

地中内部歪についても4901地点の深さ3.5mについて、同様に図示してみた。これもかなりばらつき、傾きはやや緩やかである。

$$\log_{10} t_r = 3.22 - 0.67 \log_{10} \dot{\epsilon} \dots \dots \dots (6)$$

$$t_r = t_3 + \left\{ \frac{2}{(t_r - t_2) +} - \frac{1}{(t_r - t_1) +} \right\}^{-2} \dots \dots (b')$$

以上、傾斜、地中内部歪は余りよい直線性を示さなかったが、これらのものについても予測にどの程度使えるか調べてみた。伸縮計のものが最も規則的であるが、その変動の現れるのが、上部のクラックに限られ易いということ、また傾斜量に比べて変動の出現するのがかなり遅れ、敏感でない等の短所があるから、伸縮計以外のものにも注目してみる意義はある。

次に3次クリープ曲線上の3点から、推定破壊時刻 t_r を求める方法の適用性を調べてみた。地表面歪の変化を表わす F8, F16 の結果からみている。どの式を使用するかが問題であるが、先ずこれまで多くの場

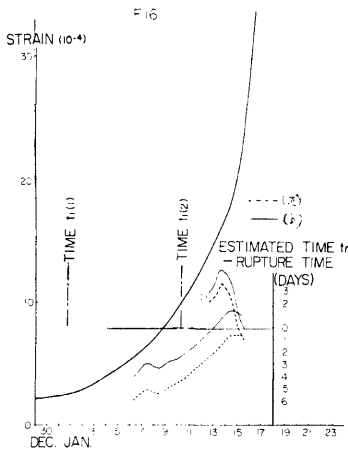


Fig. 10a. Result of analysis for rupture life (F16).

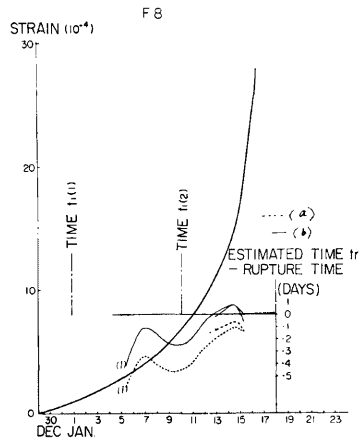


Fig. 10b. Result of analysis for rupture life (F8).

合、比較的良好な予測結果を出した、式 (a) を使ってみた。その結果が Fig. 10a., Fig. 10b. の右下の所に示され、……で表わされたものがそれである。

縦座標に推定した破壊時刻 t_r と実際の破壊時刻との差をとり、横座標は式の中の t_3 の値である。基準時刻 t_1 は2種類として推定してみた。推定破壊時刻 t_r の外れ方は、一般に推定を行った時刻 t_3 が破壊時に近い程小さいのが普通である。 t_3 が破壊時の一週間から1日前の間であれば、破壊基準時を(1)の時刻にとっても(2)にとっても、推定破壊時刻 t_r の外れ方には、余り違いはないようである。しかし、 t_1 をなるべく早くとして、 $t_3 - t_1$ の値を大きくしておいた方が、観測誤差や、観測値の3次クリープ曲線からのずれの、 t_r への影響が少ないことが多い。

推定破壊時刻 t_r の外れ方は3日前で1日程度、10日前で4日程度である。先の Fig. 9a. から得られた式 (b) を使ったのが実線で描かれたものであり、式 (a) を使ったものよりややよくなっている。しかし、この地域での破壊に至る歪速度変化のデータは、これまでに得られていなかったから、これらの式は予めわかっておらず、当初に於て使用することは出来ない。

次に地中内部歪の観測値からの推定を試みた。地中歪の場合、地表歪に比してきれいな曲線に乗らないので、滑らかな曲線で近似したものから、式 (a), (b) を使って求めてみたのが、Fig. 10c. に示してある。先の地表歪のものとはほぼ同程度の外れ方で予測し得ているようであるが、滑らかな曲線に直す所でのかなりの曖昧さが入る。

また傾斜変動であるが、変動が11月中頃からと、早くから現れ始めたのに対応して、3次クリープ的变化も早くから出始め、式 (a), (b) を使った推定も、歪の場合

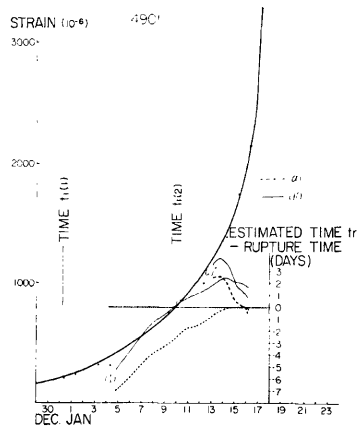


Fig. 10c. Result of analysis for rupture life (I4901).

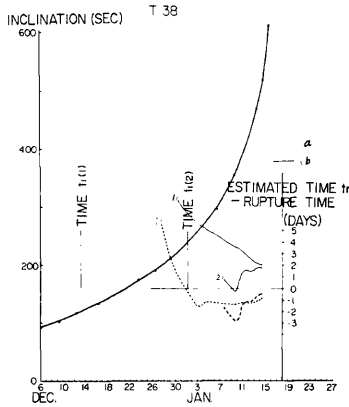


Fig. 10d. Result of analysis for rupture life (T38).

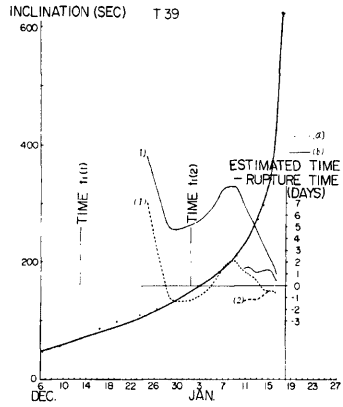


Fig. 10e. Result of analysis for rupture life (T39).

合より10日早く始められる。しかし推定破壊時刻は実際のものとかかなり違っていて、(a), (b)の平均値で、3週間前で、5日程度外れている。しかし比較的早い時期に、大凡の推定をするのに使えそうである。

以上、1976年1月17日夕刻における、地すべり性崩壊に至る移動量の変動過程は、3種の物理量ともクリープ破壊曲線に近いものであり、齊藤博士の方法によった解析の結果、破壊時の推定に有効な手段となり得るものであることが示された。特にこれまで余り注目されなかった傾斜変動についても、地すべり土塊内の地表面の傾斜量を、短いスパンの台ではなく、杭間隔 4.5m の上の H 鋼の傾斜測定によって求めることにより、傾斜変化も3次クリープ破壊曲線に近いものが得られ、これの解析も興味深い結果をもたらすことが示された。

1月18日より2月下旬までの間、変動は殆んど停止していたが、2月28日以降、再び顕著な変動を示し始め、かなり複雑な過程を経て、5月28日未明より決定的な破壊性地すべりが発生した。観測計器の配置は、Fig. 3 に示されているように、1月以前とはかなり異なっている。この間の変動を日時を追って、伸縮計の記録によってみる。

2月28日より再び F22 に顕著な変動が現れ始め、4日間にわたって加速的な歪速度を示し、3月6日には約 1m の滑落崖が生じた。この時は2次クリープの定歪速度状態ではなく、直ちに3次クリープに移った。この際の歪変動の曲線を式 (a) によって解析し、推定破壊時刻を計算、図示したものが Fig. 11. であるが、実際の破壊時とよく一致している。この滑落崖の付近に、傾斜計 T43 が設置されていたが、連続記録方式でないことと、変動の出現直後に、排土工事に伴って取除かれたため、この期間の記録は殆んどとれていない。

この3月6日から破壊的地すべりの起った、5月28日までの3ヶ月近くの地表面の歪の状態は、S8, F25, F26 その他によって扱われている。歪速度の変化は典型的なク

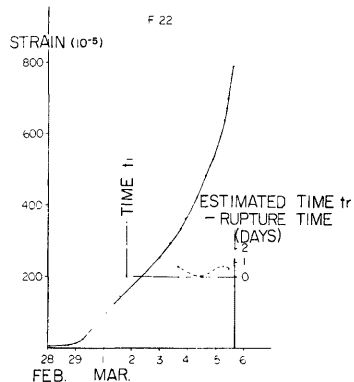


Fig. 11. Result of analysis for rupture life (F22).

リープ破壊曲線とは異なり、かなり複雑である。3月6日以後4月15日頃までの1ヶ月半は 10^{-3} /日前後の定常的な歪速度で経過した。この速度自体、地すべり速度として相当に大きな値で、1月17日の際の歪速度と破壊余裕時間の関係に照せば（Fig. 9a）、破壊までの時間は1週間程度であり、破壊点にかなり近づいていることを示すデータであるが、実際には定常的な状態が続いただけで、破壊の状態には至らなかった。

4月15日頃より、S8, S10, S11, F25 の伸縮計に、加速的な歪速度に移ったことを示す変動が現れ、これは5月始め頃まで続いたが、この時点から再び減速的になり、破壊状態には至らなかった。この際の加速過程は非常に顕著なものであり、歪速度自体も大きかったので、加速過程を式 (a) によって解析して、破壊時刻を予測したものが、Fig. 12a, Fig. 12b. に示されている。それによると4月20日過ぎの時点での推定破壊時刻は4月30日～5月1日になっている。この頃に歪速度が最大値に達したが、破壊点には至らず、この時から再びやや減速的になり、これが5月10日頃まで続いた。

5月に入ってから歪速度の変化は S8, S10, S11, F25, F26, その他によって測定されているが、この間継続的に良い記録の取れた S10, S11, F25, F26 の歪速度の変化を描いたものが Fig. 13a.～Fig. 13c. に示されている。細かく見ると、5月1日～10日の間は減速過程であり、10日から20日頃までは加速的に経過し、

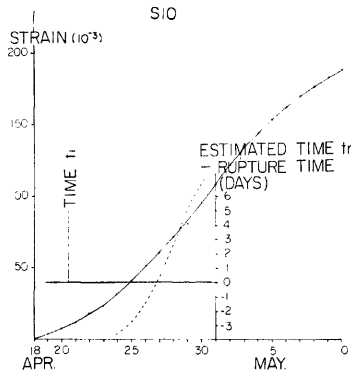


Fig. 12a. Result of analysis for rupture life (S10).

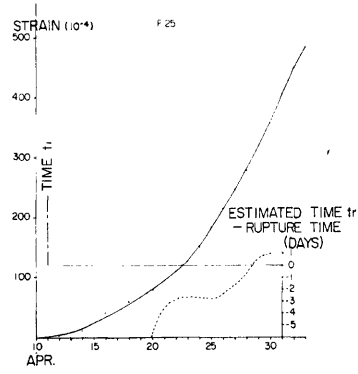


Fig. 12b. Result of analysis for rupture life (F25).

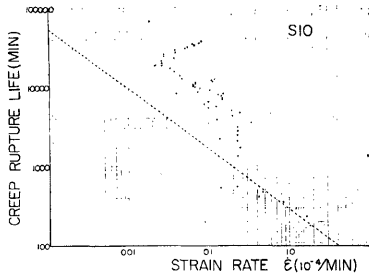


Fig. 13a. Relationship between surface strain rate and creep rupture life of failure occurred on May 28th (S10).

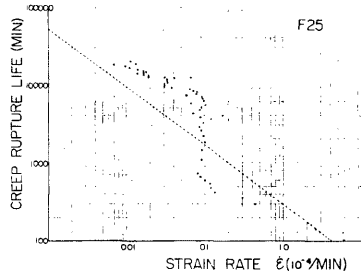


Fig. 13b. Relationship between surface strain rate and creep rupture life of failure occurred on May 28th (F25).

21日から24日までは減速と加速の繰返しである。24日頃から破壊点直前の27日朝までは殆んど一定の歪速度で経過している。即ち破壊前1000分～8000分の間は非常に高い一定歪速度で推移しており、この状態から加速過程に移ってからは1000分という短い時間で破壊的な地すべりを起し始めたが、これはそれまでの一定歪速度状態の速度値が 0.1～0.2 (10⁻⁴/分) と非常に高い値であったことによるものと思われる。

このように5月1日～5月28日の期間の歪速度の変化は複雑であって、log₁₀ t_r: log₁₀ ε̇ のグラフに対して、この2つの量の間に関係のあることを示すような、1本の直線を引くことは出来ない。図中の点線も、1975年12月30日～1976年1月17日の期間の F8 のものを、参考のため引いておいたに過ぎない。

細かく見た変動は以上の通りであるが、細かい変化を無視すると、5月10日から5月28日の破壊時まで、動きは全体として加速過程にあったと見なすこともできる。この観点から、地表面歪変動曲線を3次クリープと見なした曲線が Fig. 14a., Fig. 14b. の実線の曲線である。この曲線がクリープ破壊曲線の3次クリープ部分に相当するとして、(a) に従って解析して、推定破壊時を計算してみた。その結果は図示されているが、S10, S11, F25, の解析結果によると、破壊7日前の時点で、予測の外れは、大体、4日程度であり、先の1月17日の崩壊の時よりは劣るが、かなりよい予測結果を得た。

以上伸縮計の記録を解析するに当って、全期間伸びの方向に変化するもののみを取上げて来た。齊藤博士もこのような伸縮計の記録を解析しておられる。ところで、亀の瀬の排土地域の伸縮計の中、S8 に接して、その下部に設置された F26 の伸縮計は、他の伸縮計が加速的伸びの歪を示していた、4月後半や5月の中旬にも、縮みまたは不変状態で経過し、漸く5月22日から伸びに転じ、6日後に破壊点に達した。

このように異った歪変化を示していたものが、伸びの同一傾向を示し始めてから、破壊点に至ったという点にも注目してみることは、複雑な特徴を呈していた現象を解明していく上で重要と思われる。即ち S8, S10, S11, F25, の伸びの歪速度のもののみを追跡していれば、少なくとも、4月末、5月20日過ぎ、5月28日頃の

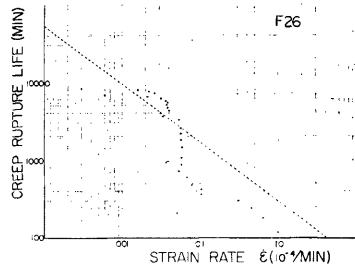


Fig. 13c. Relationship between surface strain rate and creep rupture life of failure occurred at May 28th (F26).

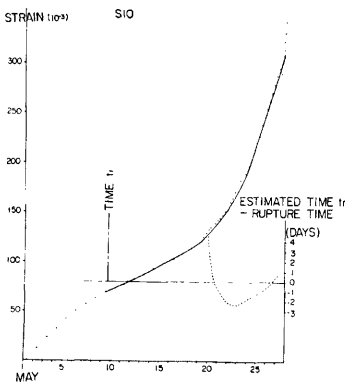


Fig. 14a. Result of analysis for rupture life (S10).

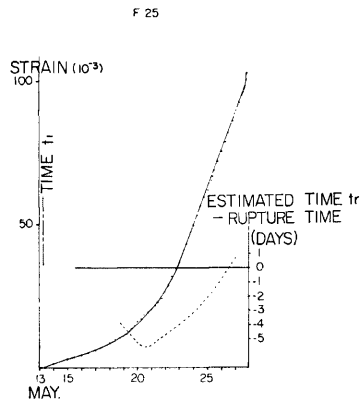


Fig. 14b. Result of analysis for rupture life (F25).

3度の破壊点到達を推定することになる。F26のものからは Fig. 14c. からわかるように、5月28日頃のみ破壊点到達を推定することになり、このように S8 に接する F26 の変化も同時に注目すれば、最後の5月28日に至るものが、他のものに比してずっと危険であると考えられることができるであろう。異なった傾向のものを合せ、総合的に判断することにより、より信頼度の高い推定を行うことが出来るのではないであろうか。

5月28日の地すべりに至る過程は複雑であったが、これに対し、1月17日の崩壊に至る過程は比較的単純で典型的なものであった。これは G 断面および No. 3 断面のすべり面に沿うような地すべりは、それまで過去数十年間記録されておらず、再活動性の地すべりではなかったことによるものと思われる。

それに対し、近い時期に一度地すべり・崩壊の起きた所の土塊の、その後の地すべり活動の特性はかなり複雑で、加速的経過のみを経て破壊点に至るといような簡単なものではない。地すべり土塊ももまれており、すべり面の形や状態も複雑になっていることが考えられる。

このような場合には、その地すべり活動の解析にあたって、細かいミクロ的な変化を追跡すると同時に、一方では、細かい変化を無視したマクロ的な変化も追跡し、解析する方法や、縮みの方向に変化している伸縮計の動向も併せている等、2つ以上の方法を使うことが有効であると考えられる。

なお、1976年3月以後、地表面に傾斜計 (T46~T49) も設置されていたが、場所が地すべり土塊の外であったため、一般に変動量は小さく、またクリーブ破壊曲線に類似した変化も示さなかったため、解析の対象としなかった。

5 む す び

以上、亀の瀬地すべり地の排土に伴う土塊の変動を追跡して、地すべりの予知・予測の観点から、その解析を試みた。この例からいえることは、予測の精度の高いのは地表面歪の変化から求める方法であるが、一方、歪変動の殆んど現れない、比較的早い時期に於て予測するには、適切な位置に設置された傾斜計に記録される、傾斜量の解析による方法も有力であることが示された。

また同一地区でも、地すべりの発生が新しいものであるか、再発性のものであるかによって、歪の変化曲線の形に違いがあつて、再発性のものの方が複雑になる傾向があり、従つて、再発性のような複雑な歪変化曲線の解析にあたっては、マクロ的な観点からこれを単純化してみる方法や、縮みの変化のデータも使う等、幾つかの方法を併用するといふが、信頼度はかなり低いものにならざるを得ない。いづれにしても、地すべりの履歴も考慮しながら、解析し、予測することが必要であろう。

最後に本研究に当り、種々御協力賜った建設省大和工事事務所原俊一専門官を始め、当局の方々に厚く御礼申し上げます。

なお観測値のデータ処理には、防災研究所資料センターの FACOM 230-25 を用いた。

参 考 文 献

- 1) 齊藤迪孝: 斜面崩壊発生時期の予知, 土と基礎, 第17巻, 第2号, 1969, pp.29-38.
- 2) Saito, M.: Forecasting the Time of Occurrence of a Slope Failure, Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Vol. II, 1965, pp.537-541.

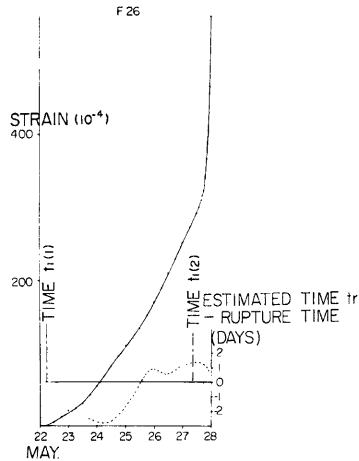


Fig. 14c. Result of analysis for rupture life (F26).

- 3) Saito M. : Forecasting Time of Slope Failure by Tertiary Creep, Proc 7th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Vol II, 1969, pp. 677-683.