

地すべり面における破壊伝播速度について

島 通保・末峯 章・小西利史

NOTES ON RUPTURE VELOCITY AT SLIDE SURFACE

By Michiyasu SHIMA, Akira SUEMINE and Toshijumi KONISHI

Synopsis

It is indispensable for study of the mechanism of landslide to estimate the rupture velocity at slide surface. The array observations of extensometers and observations of internal strain meters at Kuki landslide have been made since 1972. It is found out that the rupture at slide surface is propagated upward along a slope at several tens of meters an hour, from analyzing the onset times of these records.

1. ま え が き

地すべり現象を解明する目的で、各地の地すべり地において、地すべり変動観測が行なわれている。しかし、これまでの地すべり変動観測の多くの例は、伸縮計を利用した地すべりの変動状態についての研究や、地中内部歪計による地すべり面の解明が主な内容となっている。

地すべり現象を発生機構から見た場合次のように考えられる。地中のある深さで、何らかの原因によって、滑動力がその地点での剪断抵抗を上まわり、そこで破壊がある伝播速度を持って、ある方向に伝播する。この破壊が伝播した瞬間から、土塊がある面（層）を境として、不動な土塊に対して相対的に変位する。ここで発生した破壊面が地すべり面（厚さを持つこともある）である。このようにして地すべり面（層）付近の変位が、地表面に伝播し、地表面でクラックが発生したり、家が傾く等の地すべり現象が観測される。故に、地すべりの発生機構を解明するためには、破壊のおこる地点、破壊の伝播速度、破壊面の面積、地すべり土塊の変位を明らかにする必要がある。

今まで各地の地すべり地では伸縮計を利用して、地すべり移動速度についての研究がなされてきた¹⁾。即ち、クラックを挟んで伸縮計の一端を不動地と考えられる位置に設置し、他端を移動土塊内に設置している。そして、そのクラックの成長の速度を観測して地すべり移動速度を計算している。クラックは、地すべり面（層）が地表面に現れたものである。地すべり土塊と不動地との相対的な動きを伸縮計で観測しているのだから、この移動速度は、変位速度である。しかし、破壊の伝播速度がどの位であるかということについて、伸縮計を利用した報告は、あまりなされていないように思われる。ただし、地中内部歪計を利用して、伝播速度についての報告はなされている²⁾。筆者らは、地すべり斜面の縦断方向にほぼ一直線に多数設置されていた伸縮計の観測記録を使って、このような破壊の伝播速度を明らかにしようとした。

昭和51年9月中旬に日本を襲った台風17号による集中豪雨の雨水の浸透により、地すべり面（層）の剪断強度が低下し、徳島県三好郡東祖谷山村九鬼地すべり地で地すべりが発生した。その時、地すべり面（層）の破壊の伝播速度のうち斜面の縦断方向の成分を観測した。なお、伝播速度は、各伸縮計の伸縮開始時の立ち上りの時間差を利用して計算した。

この報告ではまず、九鬼地すべり地の地質・地形的な特徴を述べ、次に地すべり面（層）の破壊の伝播速度の観測結果について報告する。

2. 九鬼地すべり地の概要

九鬼地すべり地は、吉野川の支流、祖谷川の上流域で剣山より約 15km 西方に位置している (Fig. 1)。

地質は、三波川南縁帯の泥質片岩を主とする結晶片岩類からなる基盤岩と、これを被覆する岩屑性堆積物から構成されている。

地形は次のようになっている。地すべり地末端には、泥質片岩からなる基盤岩が露出しており、その部分は河床から比高約 10m の急崖を形成し、祖谷川と接している。この急崖を含め河床より約 30m の高さまでが急斜面となっており、地すべり地主要部は、この急斜面より上部に約 25° の傾斜をもった緩斜面として広がっている (Fig. 2)。

地すべり地南縁は、泥質片岩を主とする三波川結晶片岩類からなる急崖、およびそれに続く急斜面で境されている。地すべり頂部である西縁は、標高 950m 付近から上部へやや急になっているが、はっきりとした滑落崖は認められない。地すべりの北縁は、小さな沢によっておおそ境されているが、小さな沢より北部にも地すべり地の一部が存在している。地すべり地内にはもう一つ小さな沢があり、前述の小さな沢とこれによって、地すべり地を北部・中央部・南部の 3 つの部分に区分けすることができる。この地すべり地は、地すべり地脚部が祖谷川の下刻作用によって切られ段化している潜在地すべり地であった。昭和38年ごろより、地すべり活動が顕在化し、送電線の切断や、人家の土台の変位が認められるようになった。その後この地すべり地では、小規模な地すべりによる地表変動がみられ昭和47年以来、現在に至るまで種々の観測が実施されている³⁾。

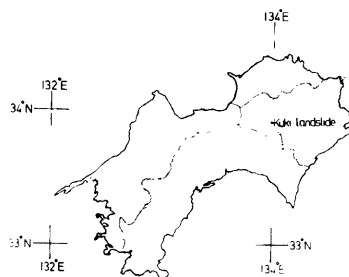


Fig. 1. Index map.

3. 観測方法と結果

(1) 観 測 方 法

昭和51年9月8日～13日にかけて台風17号は、九鬼地すべり地に 508mm に達する降雨をもたらした。九鬼地すべり地においては、集中豪雨による雨水が地下に浸透し、剪断抵抗力が低下し地すべりが起こることが、今までの観測から明らかになっている⁴⁾。今回は地すべり面 (層) の破壊の伝播速度の観測を対象としているが、これに使用した計器は伸縮計、地中内部歪計で、これらは、地すべり中央部に Fig. 3 に示す通りに配置されている。伸縮計の定数は Table 1 に示されている。なお伸縮計の No. 25 は、No. 2 と No. 3 の間に地表面の歪の状況を理解するために昭和52年1月下旬に設置され、観測を始めたために昭和51年中の記録はない。観測に使用した伸縮計は、坂田電気 K. K. 製のスーパーインバー線伸縮計である。これは、長さ 1.2m～1.5m の木の杭にスーパーインバー線の一端を、25×40cm 四方で深さ約 80cm のコンクリートの基礎の上に拡大記録部を固定し、スーパーインバー線他端をこれに連結して、両基礎間の伸縮変化を拡大記録せしめるものである。なお、一部の伸縮計は木の杭を両端の基礎としている。この拡大記録部は、実変化を 5 倍に拡大し、送り速度は約 4mm/h である。又地中の変動状況を解明するために、外径 48mm の塩化ビニールパイプにセンサーとして、ストレインゲージを 1m 間隔に (1部 50cm 間隔に) 貼った地中内部歪計を製作し、これを地中に設置して、共和電業 K. K. 製のデジタル歪測定装置で記録させた。地中内部歪は、9月8日17時15分から9月10日11時15分までは1時間毎に出力され、9月10日12時50分から9月13日6時20分までは、30分毎に出力されている。9月13日7時前から9月14日12時までは停電の為欠測となっている。9月14日12時から9月16日12時までは又、30分毎に地中内部歪は出力されている。

(2) 観 測 結 果

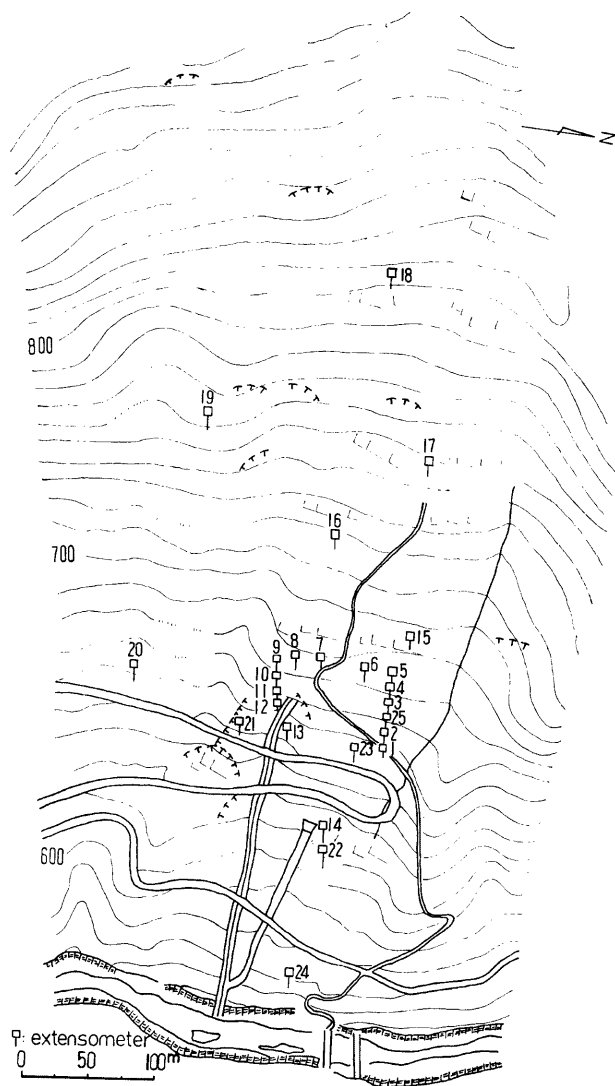


Fig. 2. Topographical map of the Kuki landslide area.

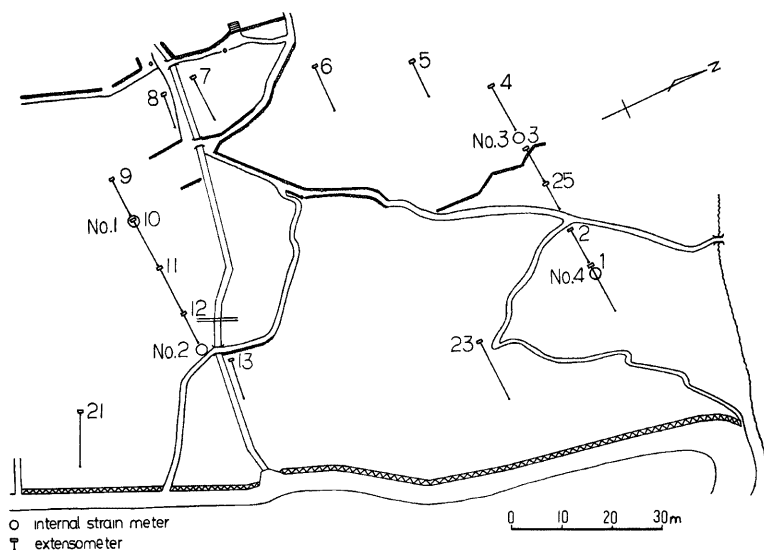


Fig. 3. Stations of observing instruments.

Table 1. List of observing instruments.

Extensometer	Length	Sensitivity	Extensometer	Length	Sensitivity
1	10.26m	$1.94 \cdot 10^{-5}/\text{mm}$	14	19.00m	$1.05 \cdot 10^{-5}/\text{mm}$
2	7.4	2.72	15	11.71	1.71
3	5.97	3.35	16	17.59	1.14
4	8.12	2.46	17	12.40	1.61
5	7.48	2.67	18	9.77	2.05
6	10.68	1.87	19	17.50	1.14
7	7.99	2.50	20	15.30	1.31
8	10.12	1.98	21	11.71	1.71
9	8.82	2.27	22	16.30	1.31
10	7.75	2.58	23	10.45	1.91
11	7.68	2.60	24	14.00	1.43
12	9.82	2.04	25	8.23	1.43
13	13.38	1.49			

伸縮計の観測結果は Fig. 4 に示されているが、これから明らかなように、台風17号の集中豪雨による地表面の歪は、No. 3～No. 7 の伸縮計が設置してある場所が大きい。Fig. 5 には、昭和51年9月11日～13日の伸縮計の原記録のコピーが示されている。これは、Fig. 4 に示した結果よりも時間の精度が高くなっている。この結果、どの伸縮計もほとんど同じ時間に伸び歪を記録していることが、明らかである。このうち斜面の下部の No. 3 の歪が一番大きく、No. 4, No. 5 はその約半分の歪を観測している。このことは、伸縮計の両端における変位の差が No. 3 に比べて小さいことに対応している。その変動の絶対値について

は、伸縮計が完全に連結して設置されていないので、伸縮計の観測結果だけでは不明である。このことは、伸縮計の間の土塊が盛り上る等によって歪が解放される可能性があるからである。しかし、地表面の踏査からは、各伸縮計間に土塊の盛り上がりやクラックなどは見られなかった。又、どの伸縮計も伸び歪を記録しているが、伸縮計の両端の基礎のうち、斜面の下方の基礎部分が、斜面の上部の基礎部分より大きい下方への

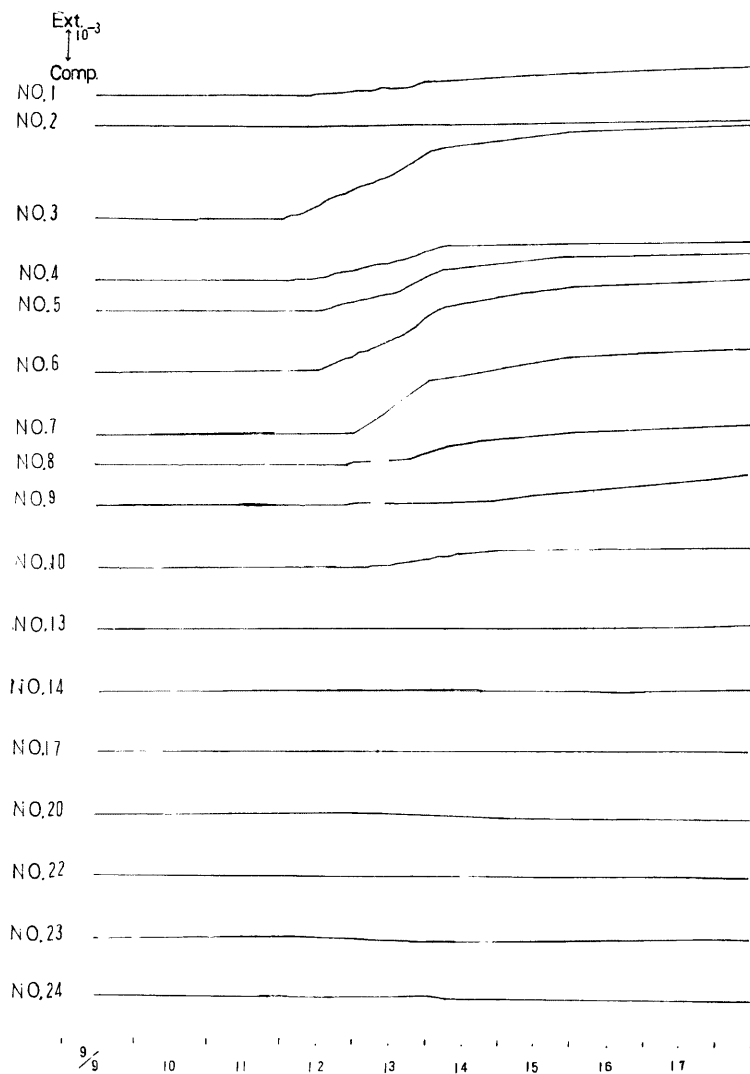


Fig. 4. Variations of extensometers from 9. Sept. to 17. Sept. 1976.

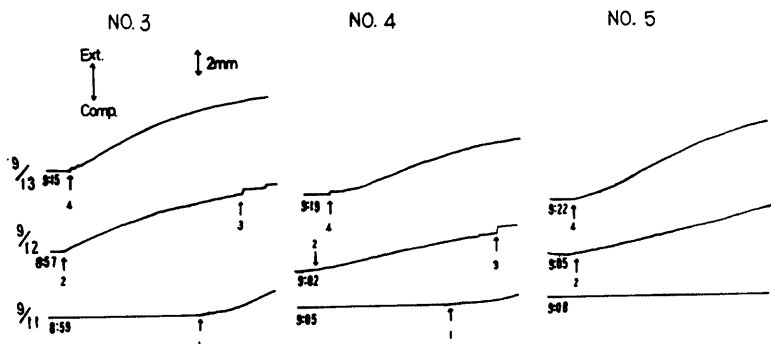


Fig 5. Variations of extensometers from 11. Sept. to 13. Sept. 1976.

変位をしていると考えれば、物理的にその現象は解釈できる。つまり変位の絶対値は No. 3, No. 4, No. 5 と斜面上部に行くにつれて小さくなったと考えられる。

Fig. 6 に伸縮計 No. 3, No. 4 に近接して設置してある、地中内部歪計 No. 3 の各深度における歪の経日変化図を示してある。昭和51年9月中旬に、歪の変化を示している主な深さは、4m, 5m, 7.5m, 8m で、他の深さではあまり変化を示していない。従って昭和51年9月の地すべりにおける地すべり面（層）の深さは、4~5m 付近と 7.5~8m 付近であると推定される。7.5~8m の歪の変化の方が 4~5m の歪の変化より、約 1.5 倍絶対値が大きいの、多分主な地すべり面（層）は、7.5~8m 付近であろう（**Fig. 6** 参照）。なお、昭和47年から今までの観測結果からも、この斜面における地すべり面（層）はこの深さにあり、地表面とはほぼ平行であるという結果が、得られている。台風時の地中内部歪の短時間の変化を調べる為に、昭和51年9月10日12時50分から9月13日6時20分までの、30分毎に出力させたデジタル歪計の記録を使用した。地中内部歪は、30分毎の出力となっているので、30分以内の短時間の地中の変動については不明である。また記録は、直線的なドリフトとノイズの為、十数マイクロストレインのばらつきを含んでいる。それで、9月10日12時50分から9月11日8時20分までの観測が、地すべり変動に関係している歪変動ではないと思われるので、その期間の40個のデータから最小2乗法を使用して、傾きと切片を決定して、直線的なドリフトを除去した。地表面の歪と地中内部歪の関係の調べる為には、立ち上り時刻をなるべく精確にもとめる必要がある。ここでは便宜上1時間以上（データ個数として2個）継続して、ばらつきの標準偏差以上の変動があった時刻とその30分前の時刻との間を、立ち上りの時刻とした。この手続を、各深度の地中内部歪の観測結果について実施した結果、立ち上り時刻は各深度ともほとんど同じ時刻、たとえば9月12日1時50分から2時20分の間とか、9月12日10時20分から10時50分の間となった。これは、近接して設置してある伸縮計 No. 4 の各 phase の立ち上りの時刻と同時刻か、あるいは若干早くなっている。各深度の地中内部歪の変化がほとんど同じ時刻に現われているが、これは、地すべり土塊がほとんど変形せずすべったことに対応する。けれども、地すべり面（層）で破壊が起り、そこで変位（歪）が発生し、それが地表面に伝播するには、ある時間がかかる筈である。しかし、地中内部歪の出力を30分毎にしたため、この歪がどの位の速度で地表面に達したかは観測することができていない。今後この速度を検出する為には、もっと短い時間間隔で地中内部歪の出力をしなければならいだろう。地すべり面（層）付近以外ではあまり歪を観測していないので、今報告では、便宜的にこれらの地すべり面（層）を境として、地すべり土塊が、第1次近似として、斜面に平行な面には剪断的にほとんど変形しないで滑っているものとした。

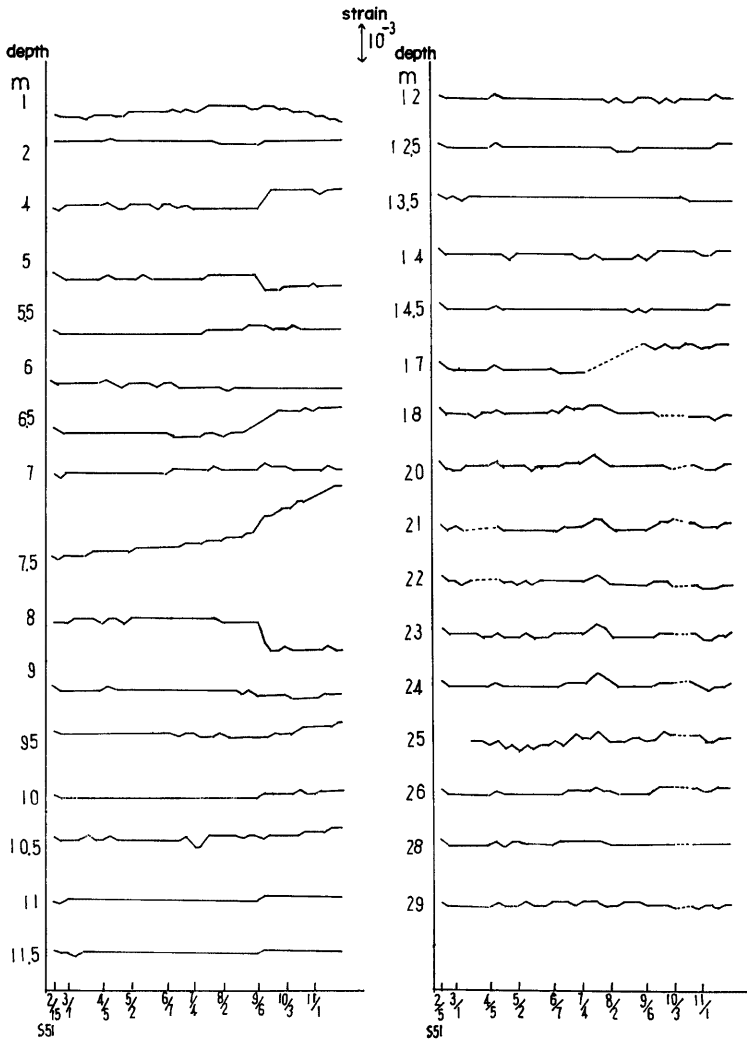


Fig. 6. Strain variations at each depth of internal strain gauges No. 3.

4. 考 察

No. 3, No. 4, No. 5 の伸縮計の記録を見ると (Fig. 5 参照), どれもほとんど同じ時刻に, 大きさは違うが同じような地表面の伸び歪を観測している。この phase の同じ地表面の歪は, 一連のある地すべり変動を表わしているものと思われる。そこで, この記録を使用して, 地すべり面 (層) の破壊が, 斜面の上部

Table 2. List of rupture velocity.

Extensometer	Onset time	Mean rupture velocity	Onset time	Mean rupture velocity	Onset time	Mean rupture velocity	Onset time	Mean rupture velocity
No. 3	9/12 0: 55	20. 3m/h	9/12 10: 33	19. 6m/h	9/13 5: 32	13. 2m/h	9/13 12: 03	91. 4m/h
No. 4	9/12 1: 49		9/12 11: 26		9/13 6: 55		9/13 12: 15	
No. 5			9/12 12: 14				9/13 12: 21	
				24. 4m/h				195. 2m/h

から始まっているのか、あるいは斜面の下部から始まっているのか、また、その破壊の伝播速度の速さはどのくらいであるのかを検出するために、今報告では以下のような手続きによった。10倍のルーペを使用して記録紙上で 0.5mm の変動を示した時刻をもって、便宜上各伸縮計の立ち上りの時刻とした (Table 2 参照)。ただし、伸縮計の感度が違うために、No. 3 の伸縮計では、No. 4, No. 5 の伸縮計が記録した歪の約1.5倍の歪を記録した時刻が、立ち上りの時刻となっている。これは No. 4, No. 5 に比較して約10分ぐらい遅い時刻をもって立ち上りの時刻としたことになる (Table 1 参照)。そして、記録紙の送り速は 4mm/h であるから、時間精度は少なくとも15分はあるものと思われる。従って、各伸縮計間において15分以上の立ち上りの時間差は、有意な時間差と見なすことができる。

こうして決定された各伸縮計の各 phase (Fig. 5 の 1, 2, 3, 4 に相当する) の立ち上り時刻は、この3つの伸縮計の中で斜面の一番下に設置してある No. 3 が一番早く、その次に No. 4, 最後に斜面の一番上部に設置してある No. 5 という順序になっている。このことは、台風17号の集中豪雨によって引き起こされた地すべりでは、伸縮計 No. 3, No. 4, No. 5 の設置された数 10m の斜面において、その斜面の下部から地すべり面 (層) に破壊が発生し、その破壊が斜面上部に向かって伝播したと、考えられる。

以上のような地中内部歪計と伸縮計の観測結果は、Fig. 7 に示したような二次元のモデルによって説明できる。ただし

- ϵ_i : 伸縮計によって観測された歪
- l : 伸縮計間の距離
- L_i : 伸縮計のスパン
- D : 変位
- v : 破壊の伝播速度

図中の $\dot{D}$ (D を時間 t で微分したもので、変位速度を表わす) の形については、現状では理論ならびに観測による裏づけがないので、伸縮計の観測結果を説明する D の形を模式的に描いた。地すべり土塊では、地表面に平行な面内で剪断的な変形をしていないのだから、

$$D=D(x, z, t)=D(x, t) \dots \dots \dots (1)$$

伸縮計の歪は、次のように表わされる。

$$\epsilon_i(t)=\frac{1}{L_i}\int(\dot{D}|_{x=xi}-\dot{D}|_{x=xi+1})dt. \quad (i=1,2) \dots \dots \dots (2)$$

今回の場合は常に伸び歪であるから

$$\epsilon_i(t) \geq 0. \dots \dots \dots (3)$$

(2), (3)から $\dot{D}$ の減衰の仕方が解明される筈であるが、これについては、もっと観測資料を集めて、別の機

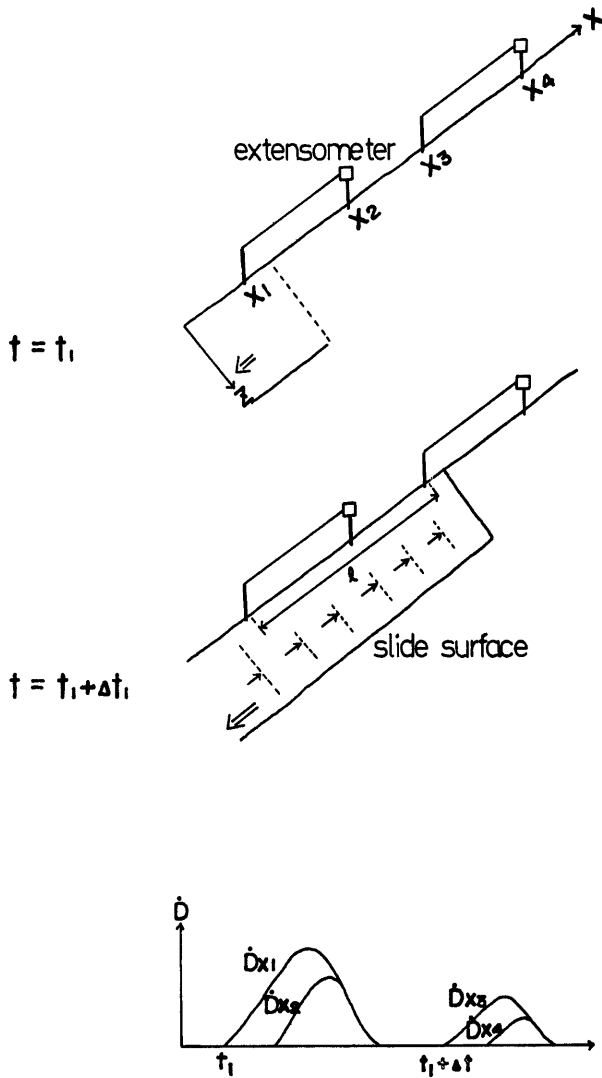


Fig. 7. A model of mechanism of landslide.

会に解析してみるつもりである。

各伸縮計で観測された伸び歪の立ち上りの時間差を Δt とする。(1)と今までの観測結果から 地すべり面 (層) は地表面とだいたい平行であるので、地すべり面 (層) の破壊の平均的な伝播速度は

$$v = \frac{l}{\Delta t} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

(4)式を使って算出させた地すべり面 (層) の破壊の平均的な伝播速度のうち、斜面の縦断方向の成分は、斜面上部に向って数十m/h であり、Table 2 に示した。そのうち、最後の phase は、立ち上りの時間差が時間精度内であって、有意な立ち上りの時間差でないで、それまでの地すべりの結果、抵抗力が弱まり破壊が早い速度で伝播したのかも知れない。破壊の伝播を考える上で興味深い事実である。

5. ま と め

簡単にまとめると次のようになる。九鬼地すべり地で、昭和51年9月の台風17号の集中豪雨の雨水が、地下に浸透し、地すべり面 (層) の剪断強度を低下させ、地すべりを引き起こした。この地すべりは、第一次近似として、深さ約 8m のところにある地すべり面 (層) を境として、それ以深は不動であり、それ以浅の土塊が、地表面に平行な面では剪断的に変形しないで滑った地すべりであると考えられる。そして、地すべり面の破壊は、斜面のある所で発生し、斜面上部に向って、数十m/h の速度で伝播している。しかし、どこで破壊が発生し、その破壊が、あるいは二方向、即ち斜面の上部と下部に向って進行したかどうかは不明である。又、その破壊が斜面に沿って伝播していったか、斜面に斜行して伝播したかどうかという問題は明らかにしえなかった。今後さらに観測精度の向上をはかって解明していくつもりである。

おわりに、京都大学防災研究所小林芳正助教授ならびに千葉大学古谷尊彦助教授の有益な助言と批判に対して深謝する。また、資料整理と図表を作成するのに高橋君子氏に大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) たとえば、山田剛二, 渡 正亮, 小橋澄治, 地すべり・斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, 1971.
- 2) Yuji Takada: A Geophysical Study of Landslides (Mechanism of Landslides), Bull. D. P. R. I., Vol. 18, part 2, 1968, pp. 59-77.
- 3) 九鬼地すべり地調査報告書, 昭和47年度防災協会.
- 4) 九鬼地すべり地調査報告書, 昭和48年度防災協会, 昭和49年度防災協会, 昭和50年度防災協会.