

九州四万十帯切取り斜面の岩盤崩壊過程

諏訪 浩・平野 昌繁・奥西 一夫

ROCK FAILURE OF A CUT SLOPE IN THE KYUSYU SHIMANTO GEOLOGIC BELT, JAPAN

By Hiroshi SUWA, Masashige HIRANO and Kazuo OKUNISHI

Synopsis

A mountainous rock cliff collapsed on to the National highway of Route 327 in Miyazaki Prefecture, Japan, on 31 May 1990. Fortunately no human life was lost owing to the previous holding up of traffic. While the creep of the slope continued to be monitored, whole process of the failure was visually recorded. The dip of stratum is opposite to the slope, whose rock is schalstein of Paleogene Miocene. Covering the slope with mortar was going on after cutting the slope as improvement work of the highway.

The relationship between the rupture time and the strain rate which was obtained both from extensometers and from the visual records showed that the creep process of the rock slope to the failure can be explained with Saito's theory (1968) on the tertiary creep, in which as time goes on, strain rate increases along the curve of the Saito's formula (1966) on secondary creep. Though the motion of the final stage for 20 seconds just before the climax of the failure has taken a similar process in general as the law in the Saito's tertiary creep theory, this final creep seemed to have slightly changed its mechanism. The creep accelerated almost continuously, but rock fall occurred intermittently, alternating active and inactive periods of rock fall. Its frequency had increased since early time, but the main portion of volumetric accumulation of fallen debris had focused on the climax time of the failure. After the climax, secondary failures of rather smaller scale continued to occur intermittently for several hours.

ま え が き

宮崎県東臼杵郡西郷村の山須原と小八重の間で耳川右岸を通過する国道327号線の山側の岩盤斜面が1990年5月31日に崩壊した(Photo. 1)。この崩壊は事前に予知されていて、道路は通行止めになっていたため、幸い人命にかかわるような災害には至らなかった。国道の改良工事にあたっていた宮崎県日向土木事務所は崩壊の約1ヶ月まえから斜面の動きをモニターしつづけ、問題の斜面に隣接して発電所を有していた九州電力(株)宮崎電力所と日向土木事務所は崩壊そのものと崩壊にいたる様子をビデオカメラで撮影した。ふつう、崩壊は瞬時に起こるので、その様子はたまたま現場に居合わせた人や被災者に目撃されることはあっても、科学的な解析に耐え得るような映像記録が残されることは皆無に近かった。筆者らは、1989年7月に越前海岸の国道305号線で発生した岩盤崩壊による災害の調査をおこなったが、崩落の過程はあとに残された痕跡や物体の配列・姿勢などの検討と、たまたま近くに居合わせた二人の目撃

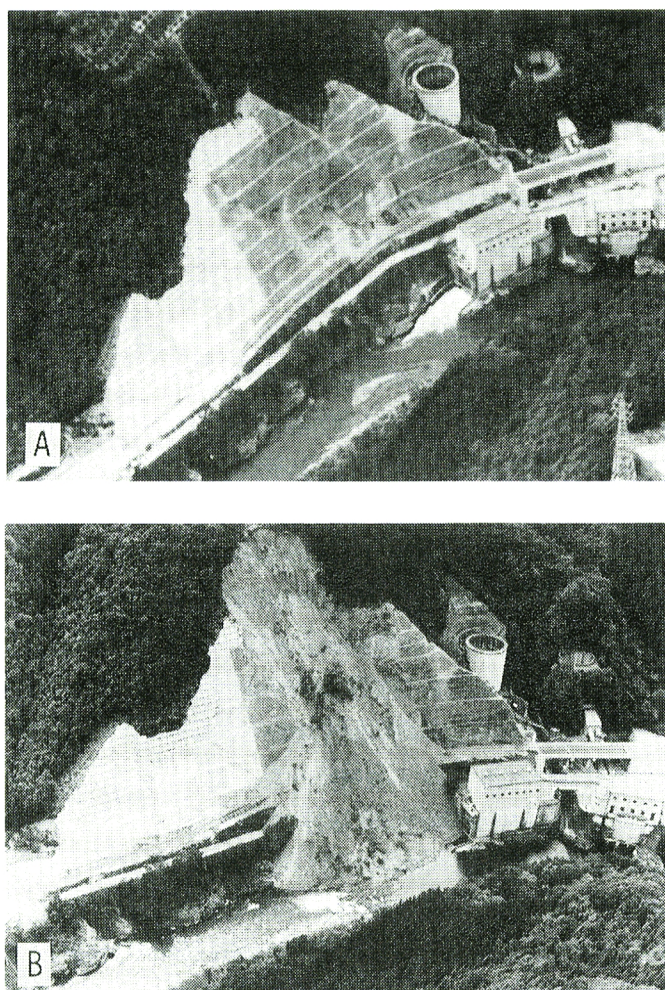


Photo 1. The slope before and after the failure at Yamasubaru in Miyazaki prefecture. A : on May 8, B : on June 6. By courtesy of Kyusyu Electric Co. Ltd. and Raito Kogyo Co. Ltd.

者の証言によって推定するはかなかった¹⁾。今回は宮崎県日向土木事務所と九州電力(株)宮崎電力所ならびにライト工業(株)の厚意で、この崩壊に関する貴重な資料の提供を受けることができた。そこで、これらのデータの検討を進めるとともに、現地調査を行って斜面の地形や地質を把握し、前兆現象としての落石や崩落の進行過程の特性の解明をめざした。また崩壊ブロックの最終段階のクリープの特性を調べ、さらに伸縮計のデータを用いて斉藤の方法³⁾と福岡の方法⁵⁾による崩壊時刻の予測について検討を行った。

1. 道路工事と崩壊に至る経過

崩壊地は日向市から国道327号線を椎葉村に向けて約30km西へ入ったところに位置し、地質構造は四万十帯古第三紀神門層の輝緑凝灰岩からなる受盤斜面である(Photo. 2 参照)。道路は以前は県道であったが、1969年に国道に昇格している。現場では国道の改良工事にともない、1988年から1990年の間に、Fig. 2に示すように斜面の切り取りが行われ、1989年に斜面の一部に格子枠コンクリート・ノリ面工が施工された。そして1990年にラス張モルタル吹き付け工の施工中であった。岩体には、もともと大小

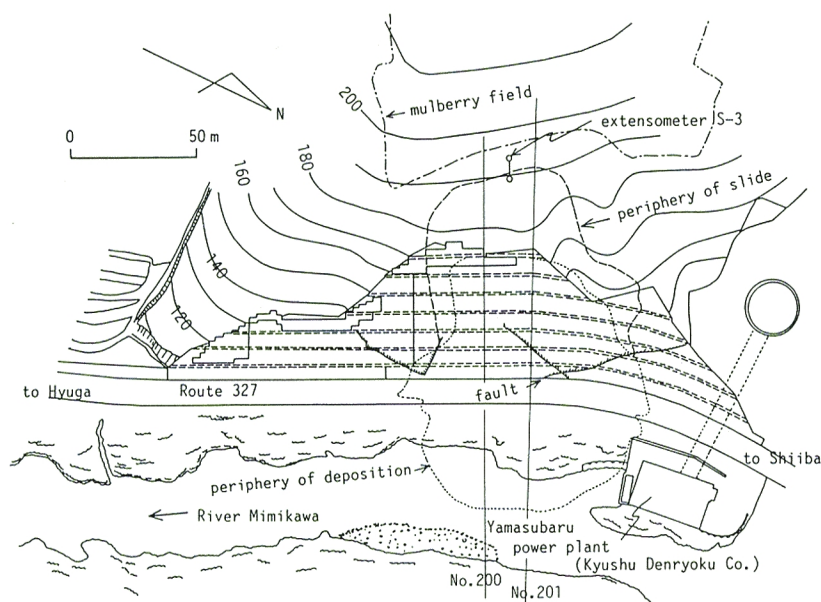


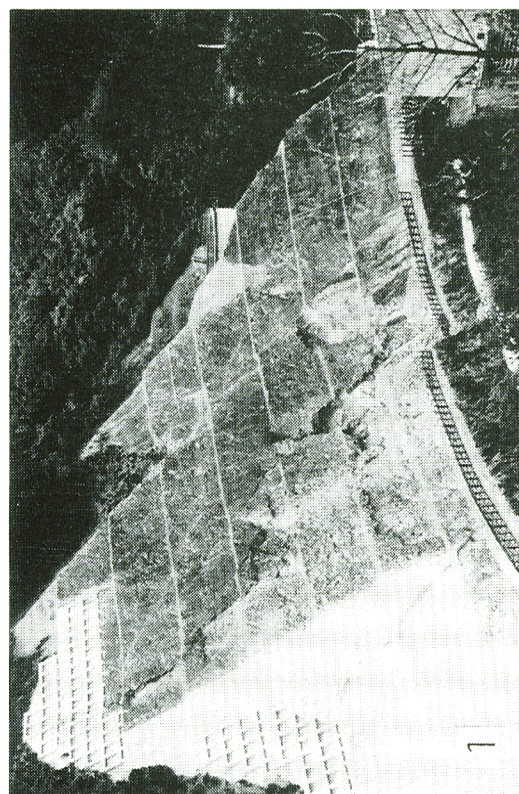
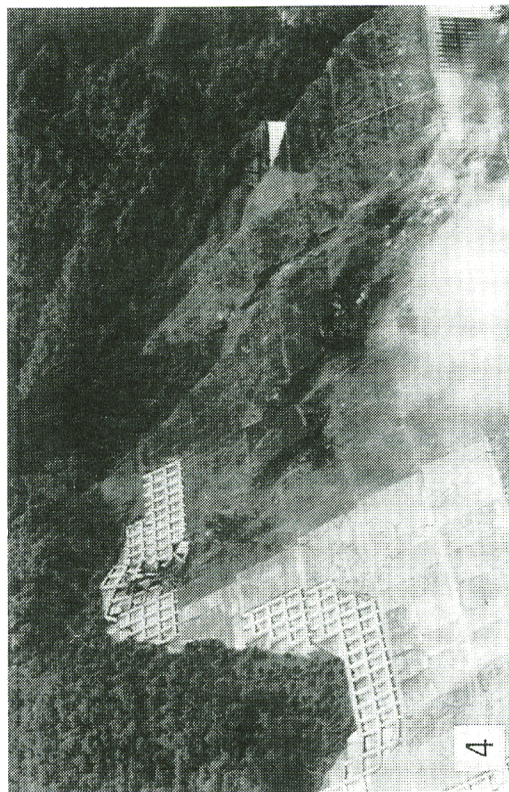
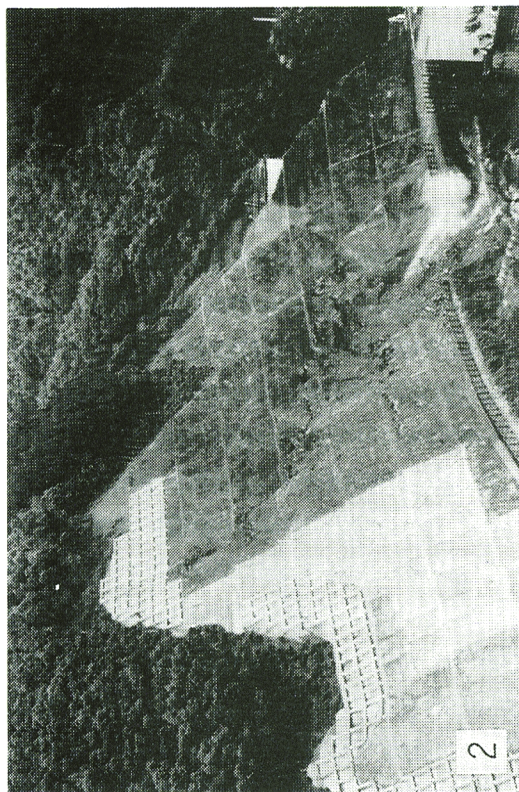
Fig. 1. A plan of the site of the rock slide.

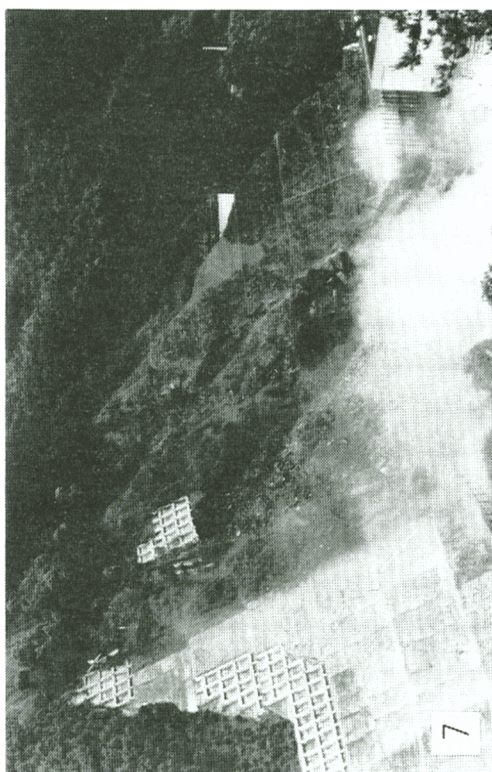
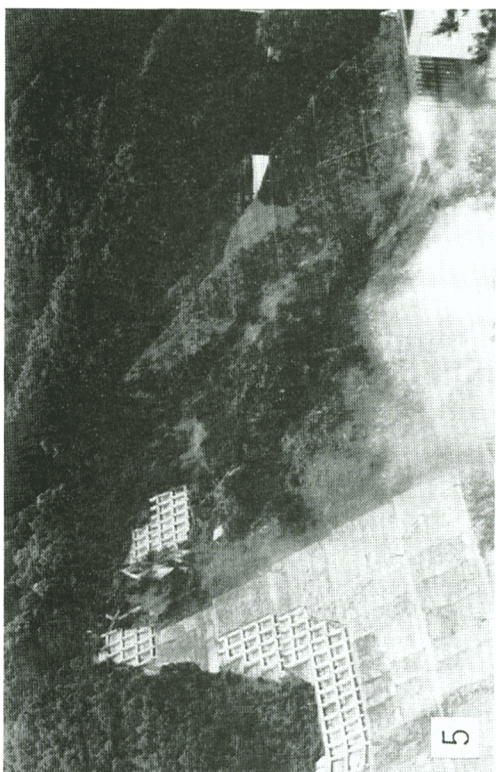
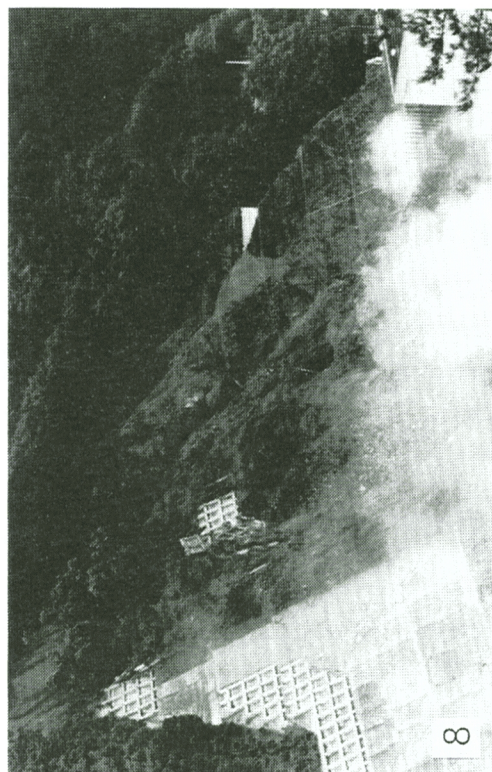
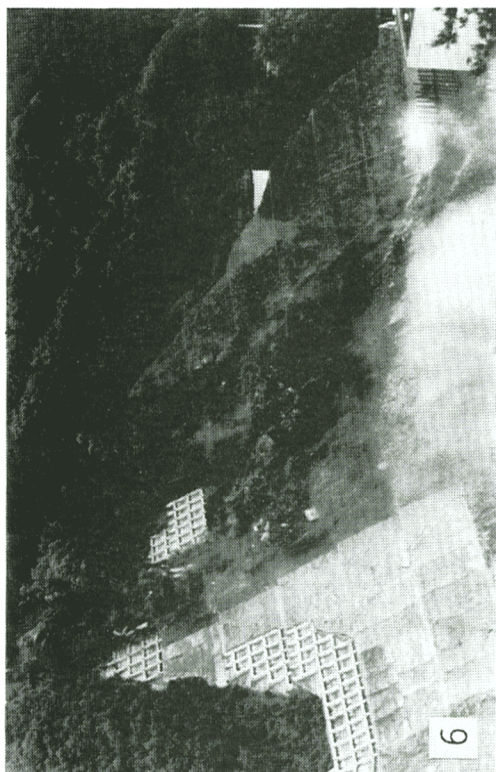
様々な節理が発達していたが、4月12日に日雨量162 mmという4月としては記録的な降雨のあったあと、4月20日頃にモルタル吹付工の上を含め、切り取り斜面上に顕著な亀裂が認められるようになった（Fig. 1 参照）。そこで、日向土木事務所は、4月28日から伸縮計、傾斜計、歪計、光波距離計を駆使して斜面の動きをモニターしつづけた。崩壊が近づくにつれ、個別的な落石や集合的な崩落が前兆現象として頻発するようになったが、崩壊の前夜からはこの様子を記録にとどめるべくビデオカメラによる撮影が始められた。夜間は録音だけに限られたが、当日の早朝以降は崩落の経過が映像記録としても残された。ここでは崩壊の様子をPhoto. 3に示す。

録画記録によると、崩壊時刻が近づくにつれ、落石や岩屑の崩落頻度がおおむね増大していったが、単調には増大せず、活発期と静穏期が交互に現れた。そして、崩壊は15時14分53秒に、Fig. 2に示すように河床から高さ110 mの斜面の上部（比高約70 mの部分）で発生した。切り取り斜面の傾斜角は 58° （勾配6.4分）であったが、この崩壊は斜面の脚部に比高70 mで傾斜角 35° の崖錐を形成した。崩壊の規模がもう少し大きければ耳川を堰止めるところであった。崩壊後約2ヶ月を経た斜面をPhoto. 4に、斜面脚部に形成された崖錐をPhoto. 5に示す。



Photo 2. Northern part of the cut slope. A remarkable fault crosses the slope at the middle point of a pipe for an extensometer.





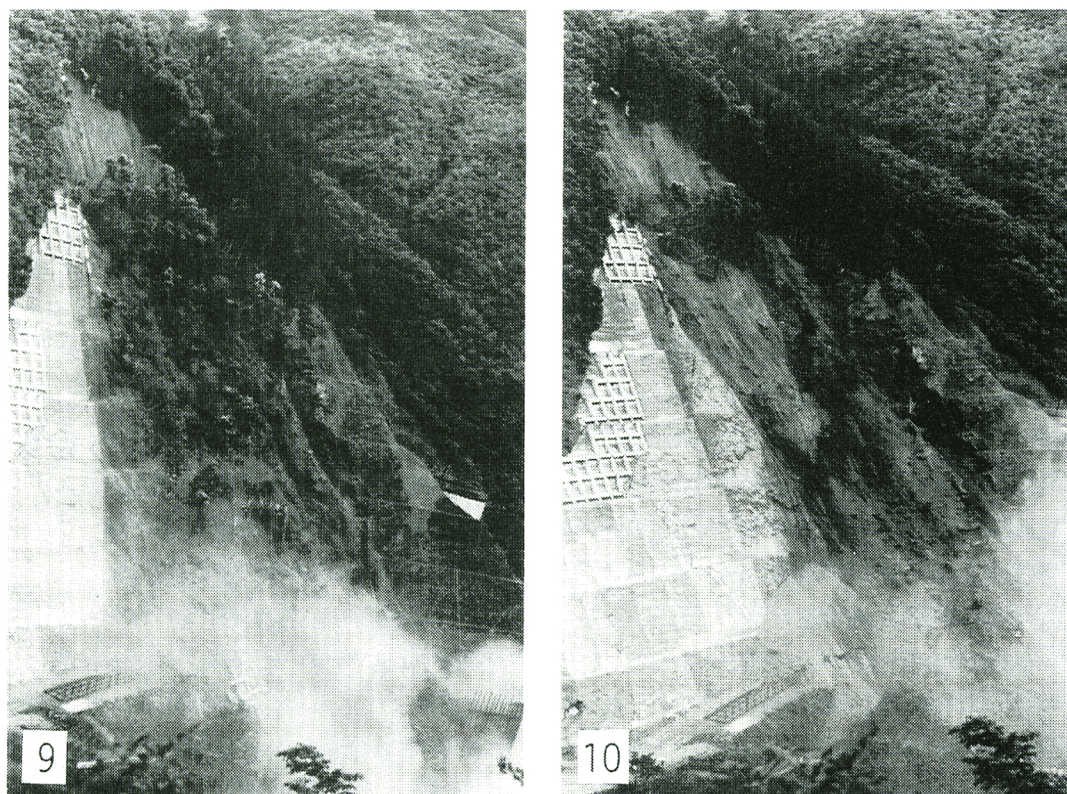


Photo 3. Leading process of the rock slope to the failure. By courtesy of Raito Kogyo Co. Ltd. 1: in the afternoon May 30, 2: in the morning May 31, 3~10: a series of photos taken in about 30 seconds from 15 hrs 14 min 53 sec on May 31, 1990.

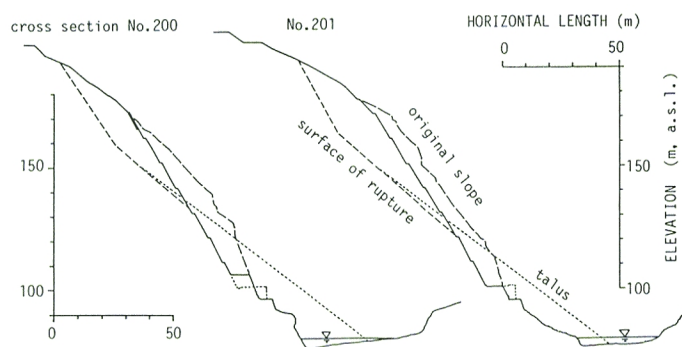


Fig. 2. Cross sections of the cut slope along the lines No. 200 and 201 in Fig. 1.

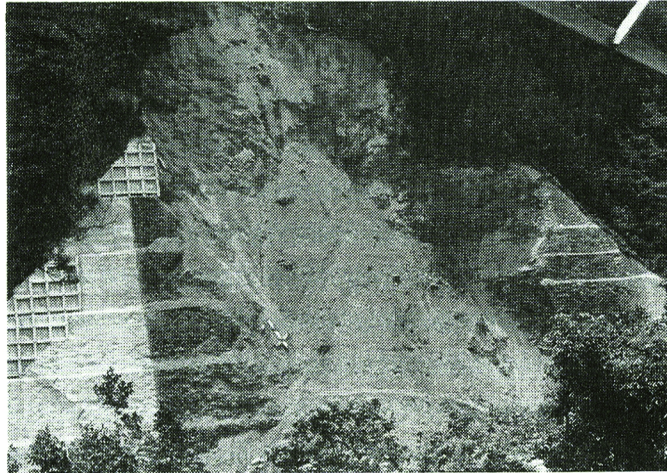


Photo 4. A full view of the slope of the rock slide (taken on 24 July 1990)

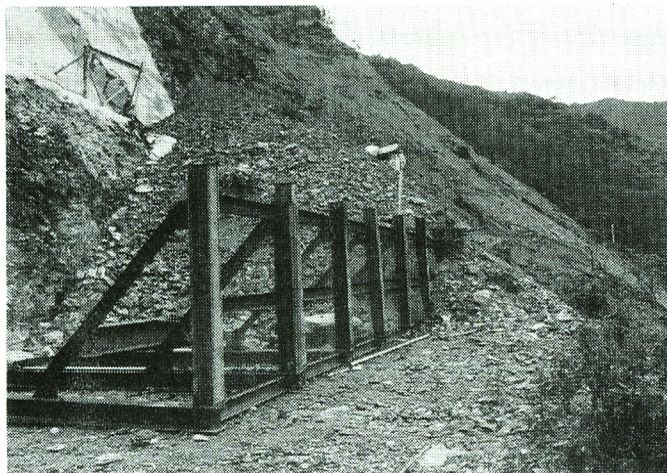


Photo 5. The talus cone on the foot of the slope of the rock slide (taken on 24 July 1990). The height of the steel construction for rock-fall protection is 2.26 meters.

2. 3次クリープの経過と崩壊直前のクリープ

伸縮計 S-3（設置位置を Fig. 1 に記す）の記録を Fig. 3 に示す。このデータから求めた崩壊 15 分前までの歪速度と崩壊に至るまでの時間 t_R の関係を Fig. 4（ t_R が 10 分よりも大きい領域のプロット）に示す。この図は、崩壊に至る岩盤のクリープが、斉藤の 3 次クリープ説³⁾、すなわち、崩壊時刻が近づくにつれ、2 次クリープ・斉藤・上沢式²⁾の表す曲線に沿って歪速度が増大してゆくとの説にほぼ合致する経過をたどったことを示す。なお、歪量には、伸縮計で計測した表面変位量をすべり面までの深さで割った値を用いるべきであるが、すべり面の深さが明確でないので、代わりに表面変位量を伸縮計の基線長で割った値を用いた。

いっぽう、岩盤が崩落する寸前の 20 秒間の岩盤の運動をビデオ記録から判読して得た歪速度の変化を、同じ図の右下方部分に示す。この図から、崩壊直前の岩体の運動もおおむね同じ関係、すなわち歪速度が

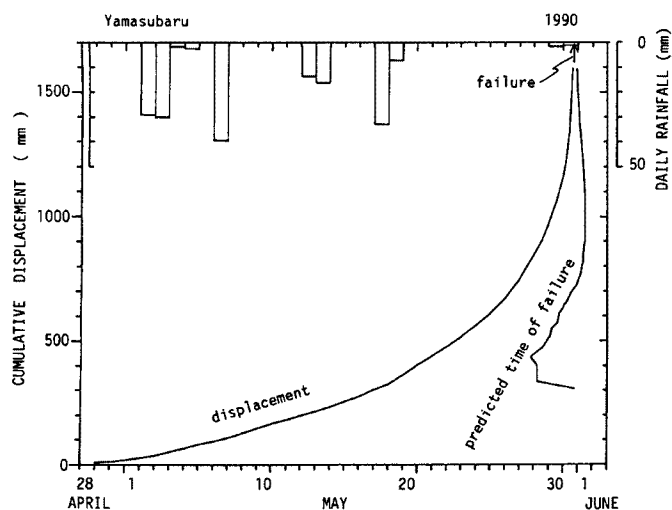


Fig. 3. Creep displacement recorded by extensometer S-3 (see Fig. 1) versus time, and the predicted time of the failure by the graphical method of Saito's tertiary creep theory versus the displacement.

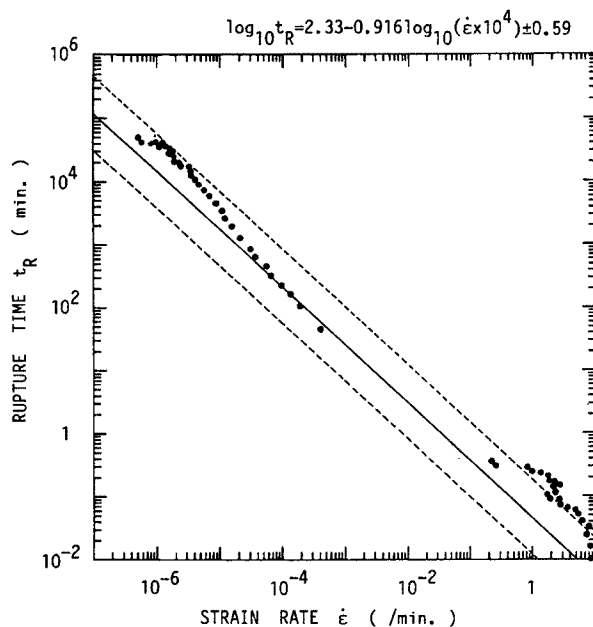


Fig. 4. Relationship between the observed strain rate and rupture time. Secondary creep curve of Saito and Uezawa (1966) is drawn with a solid line and its 95% confidence width with broken lines. A group of plots in the left-upward area is from the extensometer S-3 and the right-downward one is from the analysis of the visual records.

破壊時間 t_R の減少とともに、 t_R にほぼ反比例して増大してゆくという関係は成立しているものの、斉藤式から予測される歪速度よりもかなり大きな歪速度が出現しており、運動の様相に変化が生じていることをうかがわせる。

伸縮計 S-3 の変位データを用いて、斉藤の方法³⁾で崩壊時刻を予測すると、Fig. 3 に示すようになる。

破壊時間（崩壊までに残された時間）を t_R 、歪速度を $\dot{\epsilon}$ として、3次クリープ領域において

$$\log t_R = A - \log \dot{\epsilon} \dots\dots\dots (1)$$

が成り立つとして、歪速度から崩壊時刻を予測するのがこの方法である。この図によると、4日前以降に予測時刻が実際の崩壊時刻よりかなり遅れて予測が危険な側にずれることが分かる。いっぽう福園は斜面崩壊の実験に基づき、クリープによる表面の移動速度 V と破壊時間 t_R との間に

$$1/v = a(a-1)^{1/(a-1)} t_R^{1/(a-1)} \dots\dots\dots (2)$$

なる関係が成り立つことを利用して、崩壊時刻を予測する方法をあみだしている⁵⁾。福園⁵⁾にならい、同じ伸縮計のデータを用いてクリープ速度の逆数の時間変化をプロットすると Fig. 5 と Fig. 6 のようになる。崩壊時刻に近づくとき崩壊推定時刻の精度がますます向上することが期待される。伸縮計 S-3 のデー

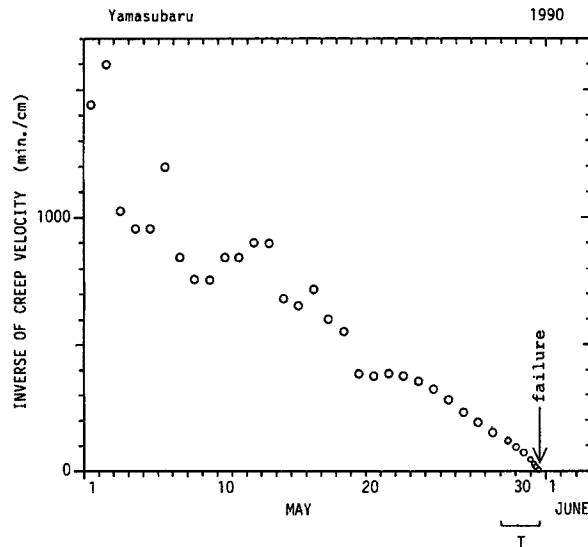


Fig. 5. Change in the reciprocal of the surface velocity of creep from the records of the extensometer for one month. The time span T corresponds to the time range of Fig. 6.

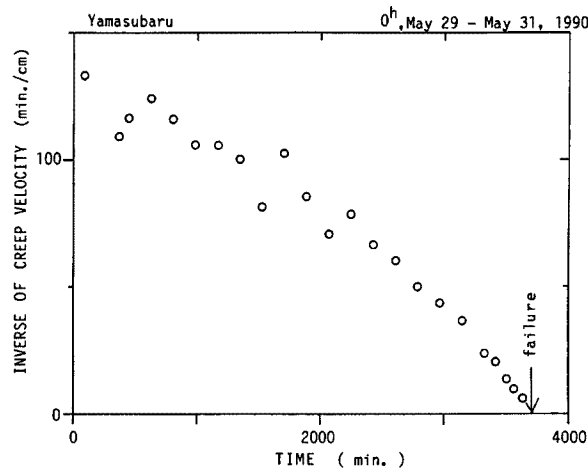


Fig. 6. Change in the reciprocal of the creep velocity from the records of the extensometer for about 63 hours.

Table 1. Comparison of the predicted time of the failure

Time before the failure	with the method by Saito (1968)	with the method by Fukuzono (1985)
75 minutes	9 hours & 15 minutes after	110 minutes after
3 hours	17 hours after	3 hours & 25 minutes after
12 hours	29 hours after	16 hours & 40 minutes after
24 hours	43 hours after	26 hours & 10 minutes after
7 days	7 days & 35 hours after	7 days & 38 hours after

タを用いて、どちらも図式解法で、斉藤の方法と福園の方法による崩壊時刻の予測例を対比して **Table 1** に示す。崩壊時刻が近づくにつれ福園の方法のほうがよい成績を収めることが分かるが、斉藤の方法でも、より洗練された片対数法⁴⁾を用いれば、成績が向上するものと思われる。いっぽう、ビデオから得た崩壊直前のデータを福園の方式でプロットすると、**Fig. 7** のようになる。**Fig. 6** と **Fig. 7** とでは、プロットまたはプロット群の中ほどを連ねる曲線の2階の微分係数の符号が異なるが、このことはやはりクリープの質の違いを示唆する。すなわち、崩壊直前の20秒間には、応力一定の条件からはかなり外れてしまい、崩壊ブロックが自由落下の様相を強めてゆくはずである。**Fig. 5** や **Fig. 6** では (2) 式の α が $\alpha > 2$ であるのに対し、**Fig. 7** では $1 < \alpha < 2$ に対応している。

3. 前兆現象としての岩屑の崩落過程

岩盤が最終的に崩落するまでの約10時間にわたるビデオ映像記録には、前兆現象としての岩屑の間欠的な崩落の様子がつぶさにとらえられていた。403回に及ぶこれらの落石や崩落の体積別ランクを判読し、崩落岩屑量の経時変化を求めた。すなわち、個々の崩落の幅をビデオ画像から読み取り、これを3乗して岩屑の嵩体積の相対値とした。これを小さいほうから大きいほうへ桁を異にする第1ランクから第5ランクの5段階に分けて計数し、崩落岩屑の体積の累積値(相対値)を求めた。幅が求まらない崩落については、体積の相対値を画像から直接推定することにしたため、このようなランク分けという便宜的な方法を用いた。そして間欠的に撮影されたスチール写真のうち、12時と15時14分の2枚を用いて求めた両時刻の堆積岩屑量で較正して体積の絶対値 V (m³) とした。すなわち、

$$V = a(N_1 10^n + N_2 10^{n+1} + N_3 10^{n+2} + N_4 10^{n+3} + N_5 10^{n+4}) \dots\dots\dots (3)$$

である。ここに、添字の1～5は崩落の体積別ランク、 $N_1 \sim N_5$ は各ランクの崩落の発生回数(ビデオ映像記録から計数)、 a と n は定数で、12時と15時14分における V の値を(3)式に代入して決定した。結局 $n = -2$, $a = 3$ となった。なお崩壊岩屑の総体積(bulk volume)は最終的に56000 m³に達した。第2ランク以上の崩落の毎10分間の発生頻度を**Fig. 8**に示し、堆積岩屑量の増加の様子を**Fig. 9**と

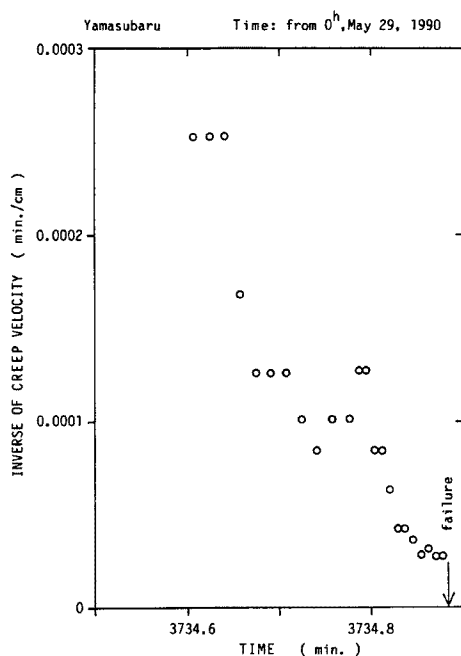


Fig. 7. Change in the reciprocal of the surface velocity from the visual record of video cameras for about 20 seconds.

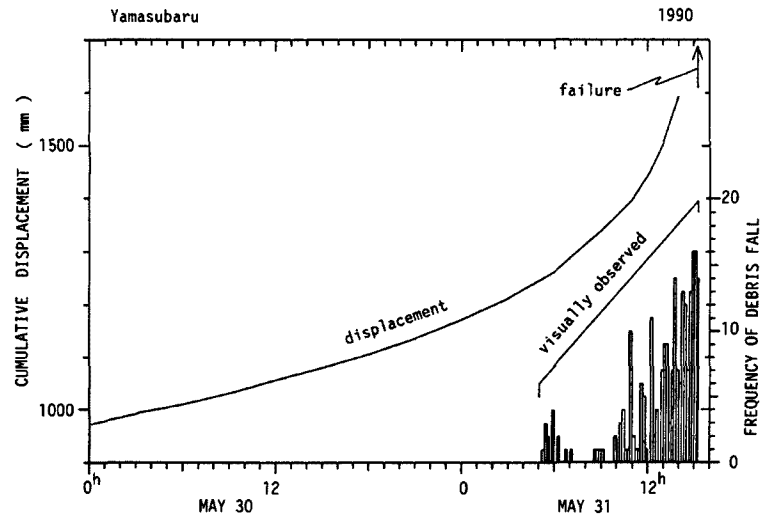


Fig. 8. Frequency of rock fall of the magnitude above the rank 2 (volume larger than 0.3m^3) in every 10 minutes.

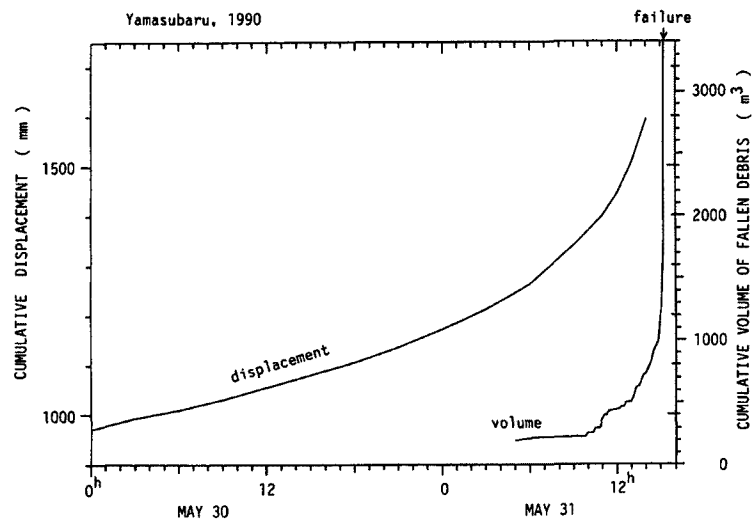


Fig. 9. Change in the cumulative volume of fallen debris deciphered from the visual records.

Fig. 10 に示す。

崩落経過の特徴を記すと次の通りである。前兆現象としては、

- ① 最終的に崩落した岩盤を取り巻く亀裂部分からの落石や崩落が頻発した。
- ② クリープの変位は比較的連続的に増大したが、崩落の発生は間欠的で、活発な時期と休止期・小康状態期が交互に現れた。
- ③ 岩屑の崩落頻度は早くから増大したが、崩落量（体積）は崩壊のクライマックス期（15時14分53秒～15分23秒）に集中した。すなわち、もう少し分かりやすく示すと、崩落量と崩落体積増大速度は Table 2 のように推移した。

崩壊のクライマックスのあと、

- ④ 崖錐斜面上での岩屑の流動が10分以上にわたってつづき、さらに、滑落崖の冠頂部や側方崖からの

Table 2. Change in the volume and the rate of volumetric increase of rock fall before the climax of the failure

Period	Time	Bulk Volume(m ³)	Rate(m ³ /min)
from 28 April to 5 on 31 May	about 33 days	200	0.0042
from 5 to 10 on 31 May	5 hours	56	0.186
from 10 to 15 on 31 May	5 hours	991	3.3
from 15 hours 00 min to 14 min	14 minutes	1872	133
from 14 min 00 sec to 19 sec	19 seconds	1200	3789

副次的な崩壊はクライマックスのあとも数時間にわたって間欠的につづいた。ビデオ撮影はクライマックス後 30 分で終了しているが、副次的な小崩壊はこの 30 分間に 17 回以上に達した。

ま と め

斜面に亀裂が発見されたとき、岩体は既に 3 次クリープの領域に入っていた。伸縮計の測定記録から求めたクリープは斉藤の 3 次クリープ説³⁾、すなわち、崩壊時刻が近づくにつれて、2 次クリープ斉藤・上沢式²⁾の表す曲線に沿って歪速度が増大してゆくとの説にはほぼ合致する経過をたどったことを明らかにした。岩盤が崩壊する寸前の歪速度を映像記録から判読したが、その変化過程は同じ 3 次クリープの特性を有するものの、運動の様式にやや変化の生じていることがうかがえた。最終的な崩壊に至る過程で、岩盤斜面から間欠的に発生する落石や崩落が、活発期と不活発期を繰り返しながらも、その頻度を増大させていった。この様子をビデオ記録から判読して崩落体積の増大速度の推移を調べたところ、最終的な崩壊時の増大速度を除き、崩壊に至る約 33 日の間に、平均的な増大速度のオーダーは少なくとも 10^6 倍に増大した。

拡幅や直線化など、道路の改良のために斜面の切取りが必要になることが多い。斜面下部の切取りは基本的には斜面の安定度を低下させることになる。本報告の事例は残念ながらこの該当例である。しかし、いっぽうでまさに崩壊するときの斜面の動きに関する学術的に大変貴重な記録を残すことになった。

謝 辞

本研究に対し、大阪教育大学の石井孝行教授に貴重なご教示をいただいた。映像記録を始め、崩壊に関する資料の多くは宮崎県日向土木事務所ならびに、九州電力(株)宮崎電力所、ライト工業(株)のご厚意で提供していただいた。現地調査に際しては日向土木事務所の方々のお世話になった。本研究の一部は文部省科学研究費補助金重点領域研究(1)「豪雨による広域道路災害の危険度予測」(代表者 奥西一

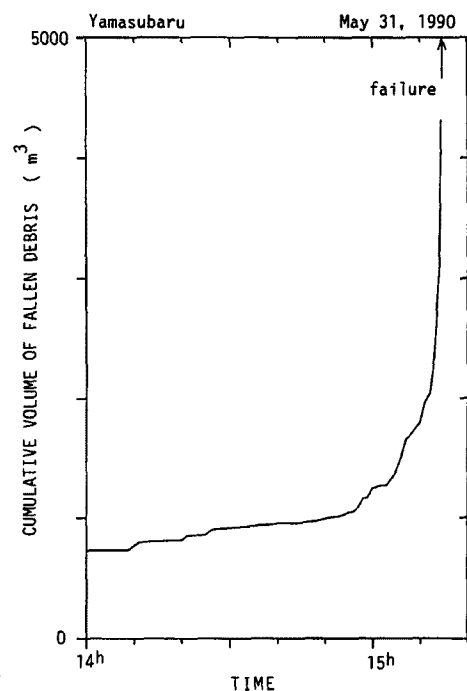


Fig. 10. Progressive accumulation of fallen debris in shorter time resolution.

夫)の交付を受けて行った。以上の関係各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 平野昌繁・諏訪 浩・藤田 崇・奥西一夫・石井孝行：1989年越前海岸落石災害における岩盤崩壊過程の考察，京都大学防災研究所年報，33 B-1，1990，pp.219-236.
- 2) 斉藤迪孝・上沢 弘：斜面崩壊時期の予知，地すべり，2(2)，1966，pp.7-12.
- 3) 斉藤迪孝：第3次クリープによる斜面崩壊時期の予知，地すべり，4(3)，1968，pp.1-8.
- 4) 斉藤迪孝：土質工学におけるレオロジー 7.2 斜面崩壊予測，土と基礎，29(5)，1981，pp.77-82.
- 5) 福園輝旗：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法，地すべり，22(2)，1985，pp.8-13.
- 6) Bozzolo, D. and Pamino, R.: Simulation of Rock Falls down a Valley Side, Acta Mechanica, 63, 1986, pp.113-130.
- 7) Kobayashi, Y., Harp, E.L. and Kagawa, T.: Simulation of Rock Falls Triggered by Earthquakes, Rock Mechanics and Rock Engineering, 23, 1990, pp.1-23.