

DEMによる岩盤斜面崩壊の一考察

西村 強・池添 保雄・藤村 尚
木山 英郎

土木工学科

(1990年9月1日受理)

An Analysis of a Rock Slope Failure by DEM

by

Tsuyoshi NISHIMURA, Yasuo IKEZOE, Hisashi FUJIMURA,
and Hideo KIYAMA

Department of Civil Engineering

(Received September 1, 1990)

A rock slope failure happened along the Echizen coast road on July 15, 1989 and 15 lives were lost. Some specialists in rock mechanics have studied and reported on the cause and failure mechanism.

Main objectives of this investigation are not to determine the cause directly, but to reveal 'where key stratum (or parts) are necessary, what types of failure mode are possible, and which scenarios of the slope failure result probably?'. From this point of view, DEM analyses were performed on the modelled fractured rock slope with decrease of stiffness of an assumed 'key' element.

As a result, some probable scenarios of the slope failure were obtained, which may give useful information to judge the true cause and failure behavior by comparison with field observations.

Key words : DEM, Rock slope, Toppling failure

1. はじめに

1989年7月福井県越前海岸沿いの国道で起こった崖崩れは、落石防護用のロックシェッドを押し倒し、十数名の死傷者を出したことで、連日、新聞・テレビで大きく報じられた。事故直後に現場を視察した専門家の談話として「土の斜面ならともかく、岩盤斜面の崩壊は難しくよくわからない」旨の報道がなされた。岩盤工学に携わる著者らにとって、この言葉は、学問の遅れの指摘に恥辱と責任を感じながらも、岩盤工学の現状認識にどこか違和感を感じさせられたのも確かである。

土質斜面がすべり破壊するのに対し、岩盤斜面がすべり破壊とトップリング（転倒破壊）の2形態をとることは今日ではよく知られている。この内、岩盤特有のトップリングは、積木のように多数のブロックを積み重ねたときに生ずる柱状ブロック群の横倒れ現象（詳細は後出）であって、岩盤の節理（割れ目）のパターンと斜面形状といった幾何学的条件を主に、岩石と節理面の力学特性およびそれに影響する水の存否（荷重としての水圧作用も場合によって考えられる）など、極めて現場的要素に支配される。すべりに比べて類型化の複雑なこともあって、残念ながら一般的な解析法として公認されたものはな

い（トップリングに対する重要性の認識不足によるもので、解析法がなかったわけではない）。土と岩にかかわらず、一般斜面の設計は土質力学的なすべり破壊を中心になされているのが現状である。さらに、土質力学に比べて岩盤力学を専門とする技術者の絶対数が少なく、現場における岩盤特性への配慮が欠如している点も否めない。

以上が斜面崩壊に関連した岩盤工学の現状であって、岩盤斜面が学問的に「難しい」のではなくて、現行の設計体系下では、岩盤工学への「配慮を行うことを難しくしている」のではないかというのがさきと感じた違和感である。これまで亀裂性岩盤の斜面崩壊の類型化についてDEMによって検討してきた著者らにとって、この度の斜面崩壊の可能なパターンの究明は興味ある課題であった。事故直後から、共同研究の形で名古屋大学の川本 脩万教授の御教示を得て、著者らはDEMによる理論解析を進めることになった。研究頭初から報道された崩壊状況や地質・地形図などより「風化作用により下部層が強度を失い、上部層を支えきれなくなり、一気に崩壊に至った、いわゆるトップリング型の崩壊が生じた」と直感した著者らはその点に焦点を合わせて研究を行い、一応の成果を挙げることができた。これまでの共同研究会を通じて断片的に報告してきた知見をまとめて、以下に報告する。

本研究では、地質断面図および現場観察より得られた不連続面パターンを基に要素分割を行うとともに、剛性減減要素¹⁾を用いることにより、斜面崩壊のDEM (Dis-

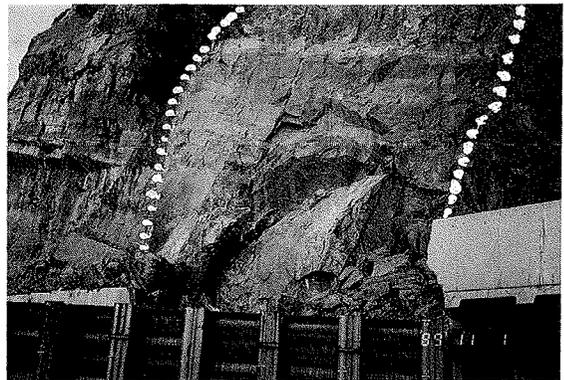
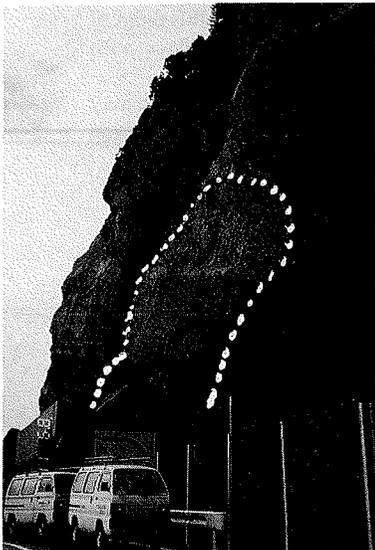


写真-1 崩壊現場

tinct Element Method ; 個別要素法) 解析を試みた。この目的は、崩壊の直接的な原因を明らかにするものではなく、剛性を通減させる部位とその率について数例の組み合わせを示して、崩壊の鍵となった層あるいは部位と崩壊様式の関係、さらにはロックシェッドへの影響を検討・考察するところにある。

2. 崩壊状況と地質

写真-1に崩壊現場を示している。この写真は崩壊発生(7月15日)より3月半後に撮影したものである。崩壊規模は、延長30m、高さ30m、崩壊岩石量約1400m³に及ぶものである。

現場は、1500万年前の新第三期中新世に堆積した比較的新しい地層である。図-1に崩壊地点の地質断面図を示しているが、下層より礫質凝灰岩、砂質凝灰岩(粒径の大きいものと小さいものと2種に分類される)、凝灰岩の順である。採取された岩石の引張強度は下より115(kgf/cm²)、27(kgf/cm²)、30(kgf/cm²)、60(kgf/cm²)となっている。また、崩壊部分より下には、それより強度の大きい泥質凝灰岩がある。層界面は、全般に走向がN30°~60°W、傾斜は北東側に20°前後傾斜しており、斜面としては受け盤となっている。

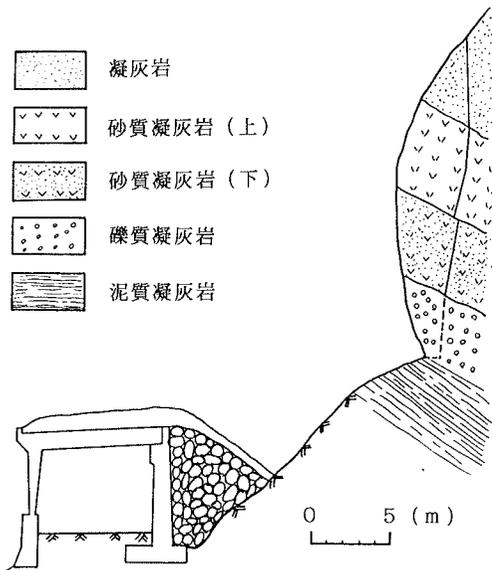


図-1 崩壊斜面地質断面図

3. 解析モデルの設定

図-2に要素分割図を示している。一般に、矩形ブロックの積層状態を2次元で単純化するとき、千鳥状、方眼状の2種に大別され²⁾、トップリングに対しては千鳥状の方が安定である。ここでは、現地観察により千鳥状に近い計15個の要素に分割している。要素寸法は図中に示しているとおりであり、現地1/100縮尺である。原寸は、最も大きな要素で8.6(m²)、小さな要素で2.3(m²)、全要素平均で4.0(m²)程度の断面積を有することになる。表-1には、解析定数を示している。これらは、これまでの同種の模型解析で採用している代表値であって、地層ごとに異なるヤング率、ポアソン比を考慮にいれず、一様と仮定した。解析定数の絶対値そのものは1. で述べたような観点で安定性の喪失から崩壊にいたる過程を考察する上では問題ないと考えている。

解析は、まず、全要素表-1に示すような通常剛性のもとで、安定な状態に達し得るかどうか、また、最下部要素(四辺形ABCD、礫質凝灰岩層に相当)の剛性を部分的にあるいは要素全体について通減させたとき、どのように崩壊して行くか追跡するものである。このように解析を進めることは、系全体からみれば、変形を下部要素に局所的に集中させることになり、礫質凝灰岩層を鍵層

t=0.00000(sec.)

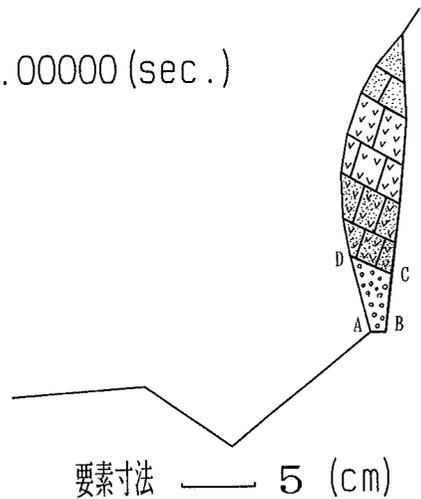


図-2 要素分割図

表-1 解析定数

time step	$\Delta t=1.0 \times 10^{-5}$ (sec.)	
$kn / \rho g$	3.85×10^4	(cm^2)
$\eta n / \rho g$	1.20×10	($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
$ks / \rho g$	3.85×10^4	(cm^2)
$\eta s / \rho g$	1.20×10	($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
μ	0.577	

とみることになる。

剛性通減の部位についてはこの要素全体、下辺ABのみ、および上辺CDのみについて3ケース、また通減率は1/10、1/1000の2ケース、これらを組み合わせて解析は計6ケースについて行っている。

4. 解析結果と考察

図-3～5には、解析結果を示している。図中 t とは、図-2より解析を開始してから経過時間であり、頂点における線分は、接触力をベクトル表示したものである。その接点をはさんで作用力と反作用力を表し、両者の大きさは等しく方向が逆で一本の線分となる。縮尺はこの

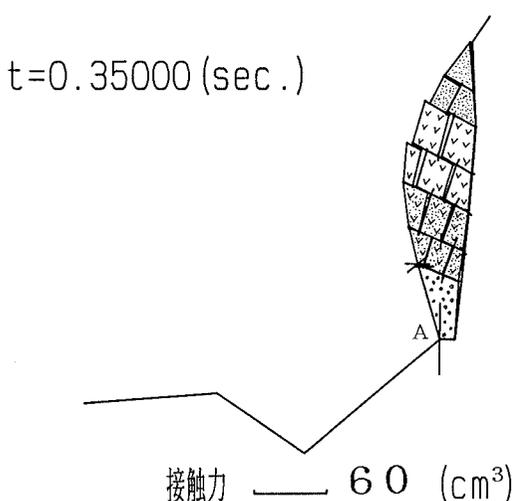


図-3 DEM解析図（剛性通減なし）

線分の長さに対する接触力の大きさを示している。但し、単位体積重量で除して相対化したため、体積の次元を有する。

図-3は、剛性通減のない場合の解析である。崩壊は生じないが、各要素は動揺を続け、完全な静止状態³⁾には至らない。このことは、図のような節理による岩盤のブロック化が生じた時点で、すでに斜面は幾何学的にかなり不安定な状態にあったことを示していると思われる。また、このとき、A点に力が集中しているのが注目される。

図-4は、剛性通減率を1/100にしたときの経時変化を示したものである。それぞれ(a)図は下辺のみ、(b)図は上辺のみ、(c)図は要素全体に剛性を通減した場合である。上辺のみ、あるいは要素全体の剛性を通減させたとき、2、3の要素の崩落は生じるが、系全体が崩壊するような状態には至らない。一方、下辺のみ通減させたとき、A点を回転中心とするトップリング型の崩壊を呈し、上から3、4層目の要素（砂質凝灰岩層にあたる）がロックシェッド上に直接落下している。同図(a-4)より、図-3と比較してもかなり大きな力が作用していることがわかる。なお、同図において、図-3と同じ縮尺では接触力ベクトルが作図範囲に取まらないほど大きくなった場合には、(*)印を記して作図を打ち切っている。

つぎに、図-5は1/1000に通減させたときの結果を示している。このときは、上辺のみ、要素全体の場合でも崩壊が生じるようになり、下辺のみの場合も崩壊の進行が速くなっている。崩壊様式をみると下辺の場合、トップリング型であるのに対し、要素全体のときはすべりを含む型で崩壊しており、上辺の場合はその中間的な様式を示していると思受けられる。また、さきに述べたように、トップリング破壊のとき、ロックシェッド上に直接落下する要素がみられたのに対し、すべり型の場合裏込め土の部分に衝突しており、ロックシェッドには、裏込め土を介して衝撃力が伝達されることになる。したがって、トップリング型の崩壊が生じたとすれば、すべり型にくらべ、かなり大きな衝撃力がロックシェッドに作用したことが推測される。

このようにみえてくると、変形を集中させる部位により崩壊様式が異なってくることを、下辺に変形を集中させると崩壊が生じ易くなることが示される。また、図-2～5では要素に図-1と同じく地質記号を描いているが、たとえば、トップリング型崩壊の場合、中間層の砂質凝灰岩層がロックシェッド上に直接落下、水平移動距離も

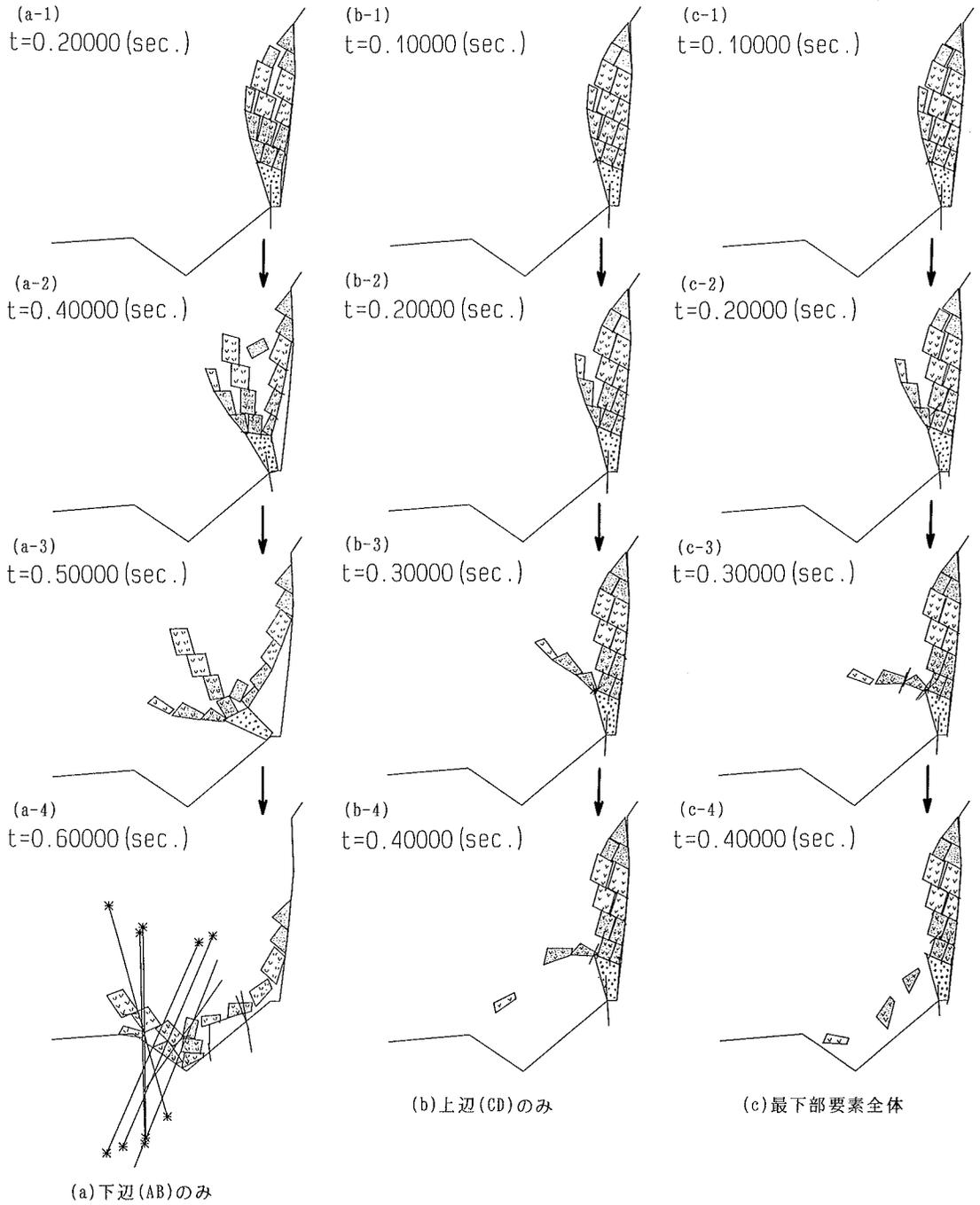


図-4 DEM解析図(剛性逓減率 1/100)

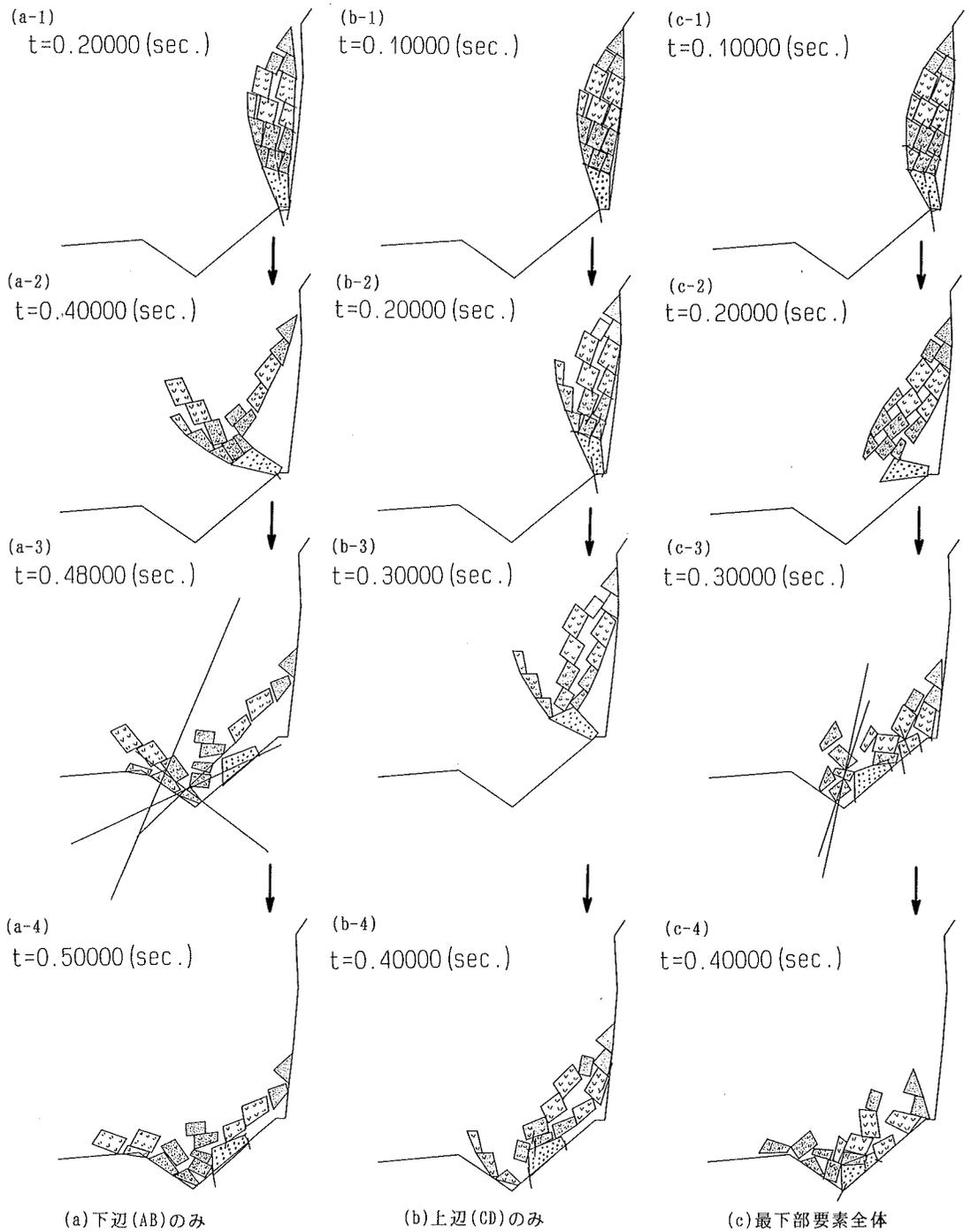


図-5 DEM解析図(剛性逓減率 1/1000)

大きくなっているのに対し、最上部の凝灰岩層は足元をすくわれる形でほぼ鉛直方向に落下する結果となっている。これらの解析結果と現地における崩壊直後の岩石の散乱状況との比較を行うことによって、崩壊様式と原因の推定はかなり選択肢を限定できるものと期待される。

5. あとがき

越前海岸で生じた岩盤斜面崩壊に対して、要素の剛性を逡減させて、DEM解析を実施した。その結果、次のようなことが示された。

- 1) 岩盤のブロック化が生じた時点で斜面はかなり不安定な状態にあり、法尻付近に上部層からの荷重が集中していたことが考えられる。
- 2) 最下部要素の剛性を逡減させていくことにより、崩壊が生じた。しかし、同一の逡減率であっても、その部位の違いによって崩壊が生じない例もあった。下部層、特に、基盤と接する部分の剛性（あるいは、この部分の基盤の剛性、以下同じ）を弱めることにより崩壊が生じ易くなる。
- 3) また、剛性を逡減させる部位の違いによって、たとえば、基盤と接する部分の剛性を弱めたときにはトップリング型など崩壊様式が異なることが示された。

崩壊様式が異なれば、当然、ロックシェッドに与える衝撃力が異なることも推測される。

以上のことをまとめると、下部層、特に、基盤と接する部分が鍵となる部分であり、上部層からの荷重を支えきれなくなり、一気にトップリング破壊に至ったものと推測される。今後、この解析結果と崩壊直後の岩石の散乱状況との比較を行うことが、崩壊様式、さらには崩壊原因推定には有効であろう。なお、本解析を実施するにあたって名古屋大学工学部川本脩万教授始め同研究室の方々には地質資料提供等御指導頂いた。記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 木山英郎他：DEM解析によるFenner-Pacher型支保特性曲線の実現と考察，土木学会論文集，第394号／Ⅲ-9，pp.37-44，1988.6.
- 2) 清水泰弘他：不連続性岩盤斜面の地震時における安定性と崩壊形状，土木学会論文集，第400号／Ⅲ-10，pp.189-198，1988.12.
- 3) 木山英郎他：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，第333号，pp.137-146.1983.5.

