

成層岩盤の斜面崩壊に関する一模型実験

村山 朔郎・石井 義明

A MODEL EXPERIMENT ON THE SLOPE FAILURE OF STRATIFIED ROCK

By *Sakuro* MURAYAMA and *Yoshiharu* ISHII

Synopsis

A model experiment on the slope failure of stratified rock was carried out by blocks made of vinyl chloride.

As an experimental result, it can be concluded that the slope failure occurs even if the slope angle of stratified layer α is less than the frictional angle between the layer ϕ , and that the critical slope angle of the stratified layer below which slope stands decreases with the increase of slope height. Further in this paper the reason why above results are caused is discussed.

1. ま え が き

岩石の節理, 層理, 片理あるいはひび割れなどのいわゆる岩目には不規則なものもあるが, それらが一定方向に発達して成層状態をなす場合も少なくない。後者の成層岩には主方向にある主成層面のほかに, これとほぼ直交する副層面が潜在していて一つの弱線を形成しているものが多い。

ここではこのような成層岩盤の斜面安定の研究の一つとして, Fig. 5 のように主成層面が単斜層をなし, この層を横断する副層面を有する斜面の崩壊について, 塩化ビニールで作った長さ 5 cm, 幅 2 cm, 高さ 2 cm の方塊状ブロックの積層体を傾斜させて実験を行なった。本文はその実験ならびに成層岩盤斜面の崩壊機構について考察したものである。

2. ブロック間の摩擦係数について

単斜層をなす岩盤斜面の破壊は従来は層間に生ずるすべりによって生ずると考えられているようである。この実験ではブロック接触面を層と仮定しているため, ブロックのすべりに対する抵抗を調べねばならない。そのため模型実験に先立ってブロック接触面のすべり抵抗を測定した。

一般に摩擦係数は物体間の接触面積には無関係に, 物体間の性質によって定まる定数とされている。しかし D. Tabor¹⁾ によれば 2つの金属の接触面においては 真の接触面積は見掛け上の接触面積に比べ非常に小さく, 垂直力, 水平力と一定の関係があり, したがって摩擦係数とも深い関連があることを示している。また岩石についての Rös および Eichinger²⁾ の試験によれば, せん断抵抗角はすべり面上の垂直応力の増加につれて減少するとのべている。

このように摩擦力の特性は複雑であり, 実験用方塊の摩擦係数に対する垂直力の影響も未知であるので, Fig. 1 (a) のようにブロック A に荷重台を取り付け, 垂直力 N を種々変えてすべり抵抗を調べた。図ではブロック A を大きさの同じブロック B 上で糸と滑車により水平力 T を与えて滑らせるようになっている。

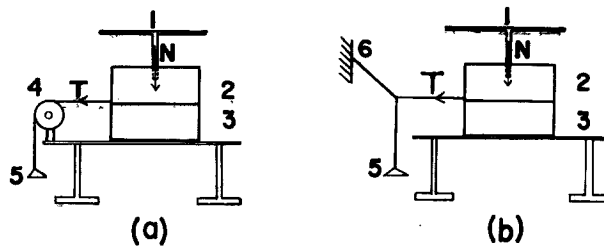


Fig. 1 Apparatus for measuring friction between blocks.

- 1 Load stand, 2 Block A, 3 Block B,
- 4 Pulley, 5 Load, 6 Fixed end.

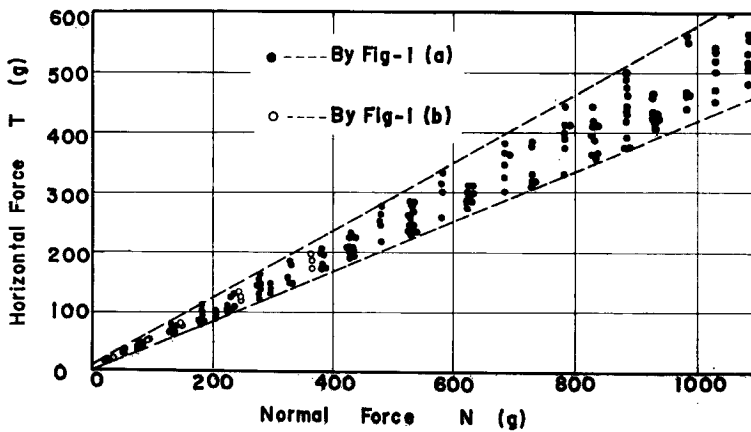


Fig. 2 Relationship between horizontal and normal force.

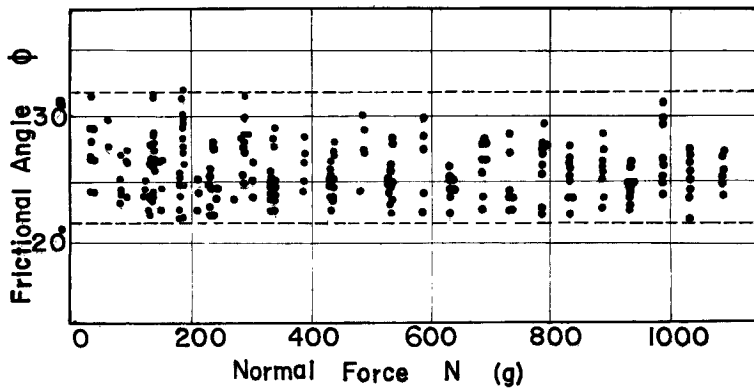


Fig. 3 Relationship between frictional angle and normal force.

水平荷重としては糸につった容器に水銀を 20 g/min の割合で等速载荷した。

ブロックが滑動を始めるときの水平力 T と垂直力 N の関係を求めると Fig. 2 のようになる。但し T は加えた実荷重から滑車車軸に働く摩擦力をこの滑車について別に測った軸圧—摩擦力の関係を用いて差し引いたものである。

なお垂直力 N の小さいときは滑車の摩擦の影響が多いので、 $T-N$ 関係を Fig. 1 (b) のように滑車のかわりに糸を壁とブロックの間に張って求めた。(Fig. 2 参照)

ブロック表面仕上げの不均一のため、 $T-N$ 関係は Fig. 2 の程度のバラツキがあるが、ほとんどすべての点は図のように原点を通る 2 直線の範囲にある。

Fig. 2 からブロックの摩擦角 $\phi [= \tan^{-1}(T/N)]$ と垂直力 N との関係を求めれば Fig. 3 となり、 ϕ は垂直力にほとんど関係なく上限 32° 、下限 22° の範囲にある。

3. 単斜層構造の斜面模型実験装置

単斜層をなす成層岩盤斜面の模型として、前記の角柱状の塩化ビニールブロック (2cm×2cm×5cm) を積み重ねていった。すなわち Fig. 4 のように水平におかれた鋼製の台上にブロックを断面 (2cm×2cm) が斜面横断面となるようにして、主成層面を水平に、上下のブロックは幅の半分づつずらし積層する。すなわち Fig. 5 のように主成層面に直角な副成層面はたがいちがいとなり、図中の距離 C と主成層面間距離 D の比 C/D は 1/2 とする。

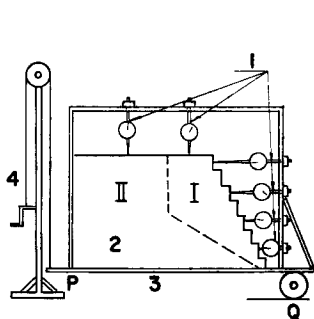


Fig. 4 Test apparatus for investigating stability of stratified rock.

- 1 Dial gauge, 2 Block mound,
- 3 Channel beam, 4 Handle and rope.

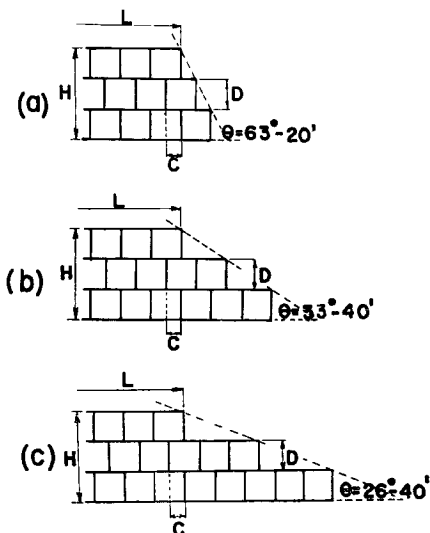


Fig. 5 Kinds of inclination of slope angle of stratified rock.

ブロックの前面を Fig. 5 のように階段状の斜面をなすように積層した後、ブロック構造体の頂面の移動をみるためダイヤルゲージを Fig. 4 のように頂面に 2 箇所、斜面前面に等間隔に 4 箇所取り付け。

図中 I はあらかじめ実験的に求めたブロック斜面が崩壊すると予想される領域で、II は I が崩壊後も安定して残存すると予想される部分である。

セットが済みしだい、ロープを捲き鋼製台の一端 P を静かに引きあげる。そのためブロック斜面は鋼製台の他端につけた車輪 Q を中心に回転し成層面に傾斜を与える。

これらを写真で示せば Photo. 1 のようになる。すなわち鋼製台上にセットされたブロック斜面 ($\theta=63^\circ$)

20', $H=20$ cm) を静かに引きあげ、主成層面に 12° の傾斜を与えた状態を示している。

この装置では法尻を通る成層面より下のブロックは両側面が固定されているので破壊には影響しない。

次に斜面の頂面長さ α と破壊との関係を実験し、頂面の長さを無限長さ α と近似できるように必要な長さ α を求めた。

すなわち Fig. 5 における $H=30$ cm, $\theta=63^\circ 20'$ について頂面長さ L のみを種々変えた結果、Fig. 6 のように $L=30$ cm までは L によって破壊時主成層面のなす角 α_f は変化する。しかし $L=30$ cm \sim 40 cm 以上なれば L の大小にかかわらず α_f はほとんど一定であることを示している。また $H=60$ cm, $\theta=63^\circ 20'$ についても図中に示すように同様の結果が得られた。

これらよりここで取扱う実験のブロック積斜面の頂面の長さは 30 cm (ブロック15個) 以上で行なった。

4. 実験結果

斜面高さ H , 斜面が水平となす角 θ を与え、3 にのべた装置と方法により、セットが済んだブロック積斜面に主成層面が水平となす角 α を増す。 α が増加するに伴いブロック積の頂面に設置したダイヤルゲージの測定値は Fig. 7 (横軸は α を示す) の例のような増加の様相を示す。

図の例は斜面高さ $H=32$ cm, 斜面傾斜角 $\theta=63^\circ 20'$, $L=40$ cm の斜面について測定した結果である。

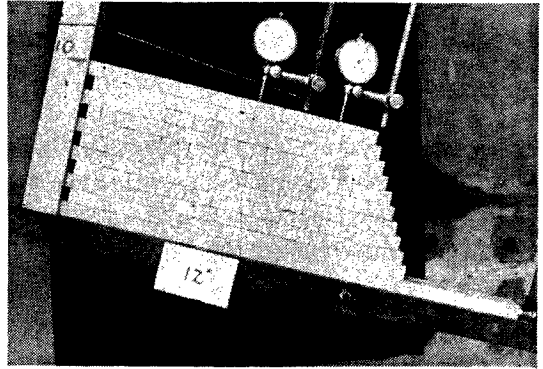


Photo. 1 Block mound of staggered joint while testing (slope angle: 12°).

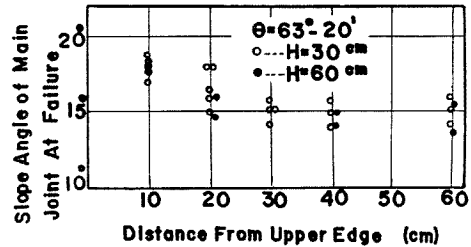


Fig. 6 Relationship between slope angle of main joint at failure and distance from upper edge of slope.

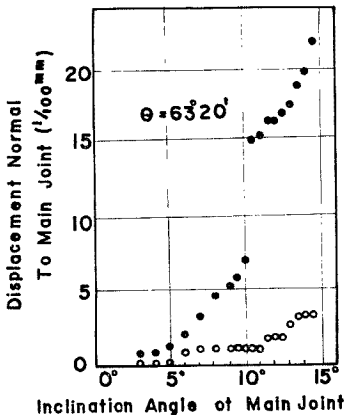


Fig. 7 Relationship between slope angle of main joint and surface displacement normal to main joint.

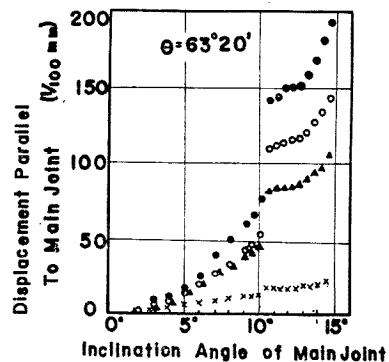


Fig. 8 Relationship between slope angle of main joint and displacement parallel to main joint.

すなわちⅠの領域の測定値（●印）は、 α の増大に伴い浮上りを示すが、その様相は $\alpha=10.5^\circ$ で急激に浮上り量が増し、その後やや安定を保った後 14.5° で破壊している。

一方Ⅱの領域の測定値（○印）は $\alpha=6^\circ$ までほとんど動かず、その後微少な浮上りを示すが、その量はⅠにくらべ非常に少なく、わずかな増加のまま破壊に到っている。

斜面前面に取付けたダイヤルゲージにより測定した主成層面方向の変位と α の関係は Fig. 8 の例 ($H=32\text{ cm}$, $\theta=63^\circ 20'$, $L=40\text{ cm}$ の斜面図中●印は上部測定値, ○, ▲印は中, ×印は下部測定値) に示すように、水平変位は斜面上部ほど大きく、斜面は α が増すにつれ水平方向にそり出すように弯曲する。

上に示した例以外 H , θ を変えた斜面についても測定したが、いずれも Fig. 7, 8 と同じ傾向にあった。

Fig. 5 (a) のように $\theta=63^\circ 20'$ を一定とし、 H を種々変えて積層斜面を破壊させ、破壊時の主成層面のなす角 α_f と斜面高さ H の関係をみるため α_f を H に対しプロットすれば Fig. 9 のように α_f は最大 20° から、最小 12° の間にある。しかも H の増加に伴い、 α_f が減少することを示し、斜面高さが高くなるほど α_f は減少を示して、斜面は破壊しやすいことをあらわしている。

その他 $\theta=33^\circ 40'$ について H を種々変え得られた結果を図中に×印で示した。これについても α_f は最大 20° 最小 13° で H の増加に伴い α_f は減少を示している。

斜面傾斜角 θ が α_f におよぼす影響をみるために、斜面高さ H を一定として、 θ が $63^\circ 20'$, $33^\circ 40'$, $26^\circ 40'$ についての α_f を求めると Fig. 10 となる。

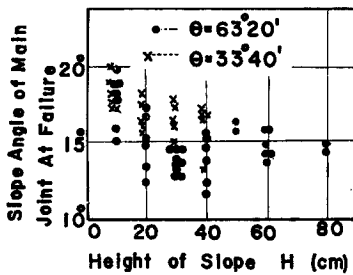


Fig. 9 Relationship between slope angle of main joint at failure and height of slope.

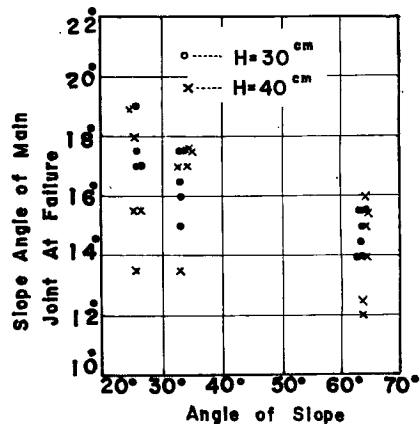


Fig. 10 Relationship between angle of slope surface and slope angle of main joint at failure.

図は $H=30\text{ cm}$, $H=40\text{ cm}$ の結果であるが、斜面傾斜角 θ が小さくなるに伴い α_f は大きくなり、斜面が安定になることが知られる。

従来 $c=0$, $\alpha < \phi$ (ここに c は成層面の粘着力, ϕ はその摩擦角) であれば斜面傾斜角の限界は 90° といわれているが³⁾, ここで得られた結果は、 $c=0$, $\alpha < \phi$ であるにかかわらず、 $(\theta + \alpha_f)$ として斜面の限界角になおせば最大 78° , 最小 44° の範囲となり、しかも H が増すほど斜面の限界角は小さくなっている。

Photo. 2 は $H=40\text{ cm}$, $\theta=63^\circ 20'$ の斜面のき裂発生状態を示している。写真にみられるように法肩より 12 cm 離れた 6 番目と 7 番目のブロックの間にき裂が生じている。3 にのべた領域Ⅰはこのき裂の生じた場所より法肩までの範囲である。

写真は α が 9.5° のとき写真にみられるようなき裂が生じただけで破壊に到らず 15° で破壊に到ったが、他の例には Photo. 3 のような場合や、 α が $12\sim 20^\circ$ の範囲で写真と同様なき裂が入り、次の瞬間にはⅠの領域は完全に破壊したものもあった。

均質で連続体とみられる岩盤では斜面背後に引張りによりき裂が生じ、法肩よりき裂が生ずる場所までの距離 l 、斜面頂面よりのき裂の深さ d は斜面高さ H と一定の関係があるといわれている⁴⁾。

この実験は連続体でないため厳密には引張りき裂とはいえないが、得られた写真結果より $l-H$ の関係を示せば Fig. 11 となる。

図は $\theta=63^\circ 20'$ で H を種々変えることにより、得られた写真結果から測定した l, H の関係である。明らかにき裂が生じていることが測定できる場合と目地切れが多く生じ、いずれが最初に生じたき裂か判定しがたい場合とがあり、明らかなものについてのみプロットした。

図は H の増大とともに l が大となり、き裂は法肩より遠ざかることを示している。

またき裂の深さ d と H の関係を Fig. 12 に示した。これによれば H の増大とともに d は大きくなる。

上述の実験結果は斜面を互いちがいに積層した場合である。これらは不連続体とはいえ、各ブロックは独立に挙動せず、主成層面に直角な層がもつ支距 C のため、ブロックは互に干渉あっている。

そこで支距 C によるかみあわせの影響を除くため、ブロックを格子状に積層して破壊させる実験を行なった。

Photo. 4 は斜面部のみを5段、5列の階段状に積層した状態と、これが破壊した状態を、二重露出により得られたものである。写真は前2列が滑り、後3列が転倒している。

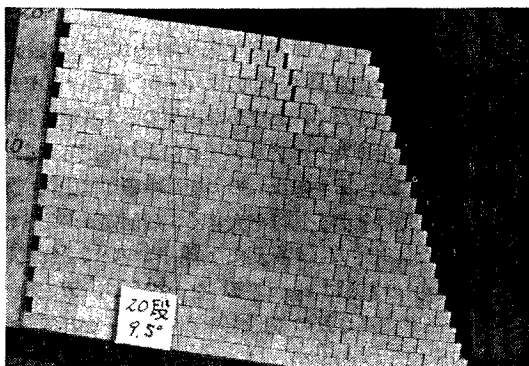


Photo. 2 Block mound of staggered joint while testing. ($\alpha=9.5^\circ$)



Photo. 3 Block mound of staggered joint while testing. ($\alpha=10.5^\circ$)

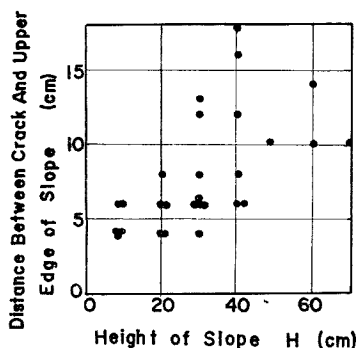


Fig. 11 Relationship between height of slope and distance of crack from upper edge of slope.

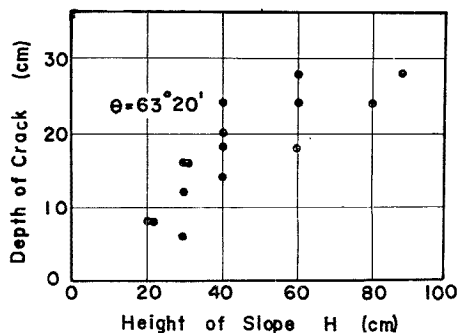


Fig. 12 Relationship between height of slope and depth of crack.

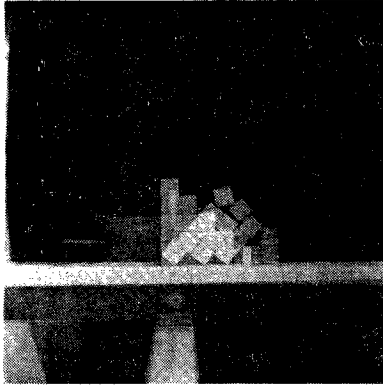


Photo. 4 Double exposed photograph before and after failure of block mound of checked joint.

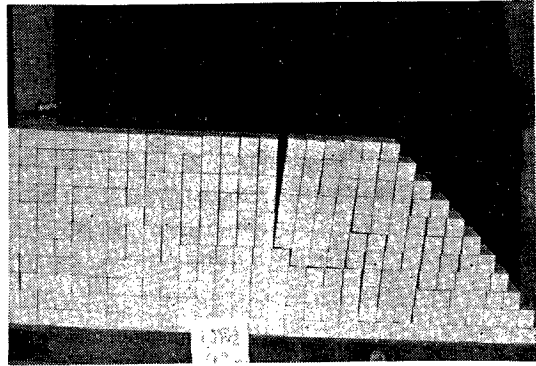


Photo. 5 Block mound of checked joint while testing.

Photo. 5 は10段に積層し、頂面を有する斜面を破壊させた結果である。これは法肩付近のブロックはそれぞれ一本の柱となり転倒し、法尻付近はこれら柱に押されて前方へすべっている。これら写真によれば格子状に積層した斜面の破壊は転倒する領域と、これに押されてすべりにより抵抗する領域が存在することがわかる。

5. 考察とむすび

単斜層構造をなす岩石斜面の崩落機構は、従来は岩石の積層面に沿う滑動によるものと解されており、これらの文献中⁵⁾たとえば Terzaghi は成層面の摩擦角 ϕ 、有効粘着力 c を有する成層岩直立斜面の法尻よりの安定限界高さの条件として次式を与えている。

$$H \leq \frac{c}{w \cos \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi)}$$

ここに α は成層面の水平面となす角、 w は岩石の単位体積重量である。

この式より明らかなように、成層岩盤斜面の安定は、成層面に沿う滑動応力 $Hw \cos \alpha \cdot \sin \alpha$ とその抵抗力 $Hw \cos^2 \alpha \cdot \tan \phi + c$ の大小により決められるとしており、またこの条件は主成層面に直交する横方向の成層面があるときにも成立するのとべている。

本実験においては、ブロック間の粘着力 c は存在せず($c=0$)、またブロック間の摩擦角は2のべたように $\phi=22^\circ \sim 32^\circ$ の範囲にあったため、従来の考察によれば、破壊時の成層面の水平面となす角 α (この α を α_f と記した)は ϕ に等しくならねばならないはずである。しかし前記実験結果(Fig.9, 10 参照)が示すように、 α_f は斜面高さによっても変化するが、ほぼ $\alpha_f=12^\circ \sim 20^\circ$ となつて α_f は ϕ よりもかなり小さい角度で崩落に到っている。故にその崩落機構は単なる成層面の滑動以外の他の破壊機構をもって説明せねばならない。

Fig. 13 において成層面の水平となす角 α を増大すると、ブロック積層体は水平力 H の増加により、目地間のすべりがなくても、あたかも弾性体のように全体は水平方向

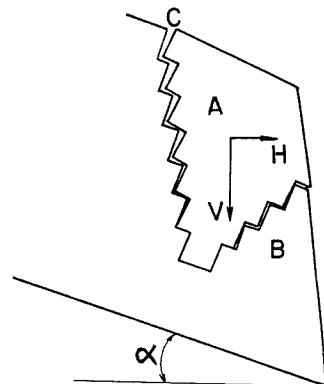


Fig. 13 Illustration of failure mechanism.

に彎曲し、その結果、C点近傍ブロックには成層面に沿う引張り力の発生と水平目地間の垂直圧の低下とが生じ、C点付近にみられるような目地間のすべりや目地切れが生ずる。このすべりのためAの区域のブロック群は一層水平方向に傾き、Bの部分のブロック群を水平に圧す。

一方Bの部分のブロックは層の傾斜角 α がブロックの摩擦角以下であっても、Aの部分よりの水平力を余分に受けるために、ついに滑動を生じ、一層Aの部分の安定を低下させ、その転倒を誘発させる。

このようにして成層面の傾斜角 α がブロック間の摩擦角以下であっても、C点付近のき裂の発生、Bの部分のブロックの滑動が発生するため、斜面は崩壊されることとなるとみられる。すなわち成層岩斜面はたとえ成層面が存在していても、その中の目地が滑動するまでは、まず弾性的な連続体として挙動し、弾性体斜面を水平に傾けたとき生ずるような斜面の変形や、斜面後方の頂面付近の引張り応力の発生など弾性体に準じた応力、変形挙動をする。ついでこの内部応力により目地の滑動、目地切れが発生し、以後はブロック積層のパターンによる特殊な変形に移り、破壊の発生に到るものと考えられる。

もし目地の滑動、目地切れなどの発生する瞬間の成層面の水平傾斜角を破壊の規準とすれば、この角は成層岩斜面を見かけ上、単なる弾性連続体からなる斜面として取扱い、その内部応力による目地の滑動、目地切れの発生条件より与えられることになるであろう。しかしこのような見かけの弾性体として扱うとき、成層岩の層のパターンや、ブロックの各種諸元の不同などに応じて、その弾性係数、ポアソン比、破壊強度などをどのようにとるかはさらに困難な問題があるようで、今後の研究にまちたいと思う。

なお本研究に与えられた昭和41年度文部省科学研究費（地すべり予知）の補助ならびに実験を手伝った塩川陸男、伊藤誠両君の労に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Tabor D: Junction growth in metallic friction : the role of combined stress and surface contamination. Proc. Roy. Soc. (1959) pp.378—392.
- 2) 日本材料学会編：岩石力学とその応用 (1966) pp.185.
- 3) Terzaghi, K: Geotechnique, 12. (1962), pp.251.
- 4) 土木学会編：土木技術者のための岩盤力学 (1966), pp.247.
- 5) たとえば上掲 (4) および Müller, L: Int. J. Rock Mech Mining Sci., Vol.1. (1964), pp.475—480.