

地すべり崩積土の亀裂の研究

—スケールモデル実験による考察—

藤田 至 則*・山 岸 武 徳**・山 本 直 樹**

A Study of the Cracks of Landslide Debris Consideration by the scale-modeling experiment

by

Yukinori FUJITA Takanori YAMAGISHI and Naoki YAMAMOTO

(Abstract)

The landslide experiment by FUJITA *et al.* (1984) arrived at a conclusion that the sliding blocks are broken to pieces due to the paired normal faults, and the cause of such a phenomenon was attributed to the rise of the slip plane. In the present experiment, however, it has become clear that a similar phenomenon can take place when the sliding speed differs from block to block, even if there is no rise of the slip plane.

It was known that two kinds of normal fault type cracks and thrust type low-angled cracks occur within the sliding mass (FUJITA *et al.*, 1984), although the correlation of the occurrence of two types remained unclear. The present experiment has also revealed that the occurrence of the normal type cracks determines the position of the occurrence of the thrust type ones.

Key words: crack, landslide, scale model

キーワード: 亀裂, 地すべり, スケールモデル

I ま え が き

虫亀地すべりの調査により, 地すべり崩積土上の正断層型亀裂は, 崩積土表面が上流側へ転倒した平行正断層型亀裂 (parallel normal fault type cracks) と, 下流側へ転倒した交差正断層型亀裂 (cross normal fault type cracks) とに分類され, それらが互いに対をなして発達していること (藤田ほか, 1981), そして, この対になった亀裂群が1ブロックを構成し, ブロック単位で崩積土内をすべり, その下底に2次すべり面が形成されているということが推測された。また, この対の平行正断層型亀裂は地すべり冠頭部や, 下流部の崩積土のやや盛り上がった部分に発達しているともわかった (藤田ほか, 1981)。

その後調査した1980年4月13日, 新潟県岩船郡関川村字中東に発生した中東地すべり, 1980年12月31日~1981年1月1日にかけて長岡市濁沢に発生した濁沢地すべり, 1981年1月25日に新井市上馬場^{かまば}遅屋敷に発生した上馬場地すべりなどにおいても, 虫亀地すべりと同様に2つの対をなした上馬場地すべりなどにおいても, 虫亀地すべりと同様に2つの対をなした正断層型亀裂が発見され, 上記のようなこ

* 新潟大学積雪地域災害研究センター

** 新潟大学工学部学生

とが確認された（藤田，1982）。なお，これらの地すべり調査によれば，それぞれのブロックごとに平行正断層型亀裂と交差正断層型亀裂の出現率がまちまちで，やや交差正断層型亀裂の方が多く現れるということも明らかになった。

その後，これらの調査結果を確かめるため，ベントナイト粘土を用いたスケールモデル実験が行われ，この対の平行正断層型亀裂の形成過程が説明されている（藤田ほか，1984）。そこで，筆者らは藤田ほかの実験がより詳しく解析できるように，記録装置にビデオカメラを用いて追試を行い，亀裂発生過程を再検討した。そして，境界条件を設定し直して，平行正断層型亀裂と交差正断層型亀裂のおおのの形成過程を明らかにするとともに，交差正断層型亀裂が平行断層型亀裂よりやや多く現れる理由についても検討した。さらに，地すべり崩積土が，何らかの障害物によって流れが止められる時に崩積土の先端部に発生する正断層型亀裂の様子を見るための実験も行うことにした。

II 実験の方法

1 モデル試料

供試体の材料としてベントナイト粉末（商品名クニゲルV1）を用いる。これを含水量 $84 \pm 0.5\%$ となるように純水と混合し，大型ミキサーにより4時間練り合わせる。このベントナイト粘土を型枠によって所定の大きさ（長さ40cm×幅15cm×高さ5cm）に整形する。

ベントナイト粘土の物性については実際に測定しなかったが，小玉ほか（1974）により含水量 $84 \pm 0.5\%$ のベントナイト粘土の物性が表-1のように調べられているので，これを用いて物理相似などを行った。

2 物理的相似律

ある現象をスケールモデル実験で再現する場合には，モデルと対称となる自然現象の間に対応するすべての物理量の間，一定の相似条件を満たすことが必要である。

この実験で相似性を満たすべき物理量として，運動方程式から応力・長さ・密度・加速度が，状態方程式から強度が導かれ，これらの物理量間に次元解析に基づいて，表-2の様な相似律が成り立つ。したがって，実験条件によってあらかじめ独立に選択される相似乗数から他の乗数を求めることができる。なお，この実験に際しての相似条件は，虫亀地すべりを対象とした。

表-2 物理的相似律と相似乗数

Table 2. Physical similar and similar invariable.

独立因子	
長	さ： $Cl = 2 \times 10^{-3}$
密	度： $Cd = 0.5$
重力加速度	： $Cg = 1$
計算される因子	
強	度： $Cs = Cl \times Cd \times Cg = 1.0 \times 10^{-3}$

表-1 ベントナイト粘土の物性

Table 1. Physical quality of bentonite clay.

粒	度： $90\%以上 - 250 \text{ mesh}$
密	度： $1.05 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$
含	水比： $550 \pm 5\%$
水	分： $84 \pm 0.5\%$
液	性限界： 480%
塑	性限界： 23.3%
塑	性指数： 457%
粘	性： 10^4 poise
降	伏強度： $2.5 \times 10^3 \text{ dyn/cm}^2$

3 相似乗数

具体的に各相似乗数を定め、実験条件を定めていく(表-2)。

長さ；虫亀地すべりの崩積土の厚さは、新潟県庁土木部のボーリング資料によると、最大でも20 m前後である。しかし、地すべり目撃者の話によると、地すべりの高まりが当初はのちの安定期のそれよりも高くそれが次第に低くなった(藤田ほか, 1984)とのことなので、初期のすべり面までの深さを約25 mと想定する。したがって実験では供試体の高さを5 cmとするので、長さの相似乗数は $C_l = 2 \times 10^{-3}$ となる。

密度；天然の地すべり崩積土の密度を約2.1 g/cm³と想定する。実験で用いるベントナイト粘土の密度は約1.05 g/cm³なので、密度の相似乗数は $C_d = 0.5$ となる。

重力加速度；実験は野外と同じ重力場において行われるので、重力加速度の相似乗数は $C_g = 1.0$ となる。

強度；長さ・密度および重力加速度の相似乗数から、強度の相似乗数は $C_s = C_l \times C_d \times C_g = 1.0 \times 10^{-3}$ となる。表-1より、実験に用いたベントナイト粘土の降伏強度は約 2.5×10^3 dyn/cm²(=約 2.5×10^3 kg/cm²)なので、強度の相似乗数を考えると天然の2.5 kg/cm²に相当する。

実際の地すべり地の土地の強度については、土の採集場所、亀裂状態、あるいは含水比によってかなりの差がある。例えば玉田・工藤(1974)によると、長崎県平山地域の地すべり現場では粘着力0.184 kg/cm²、すべり面上の鉛直力7.35 kg/cm²、内部摩擦角 $10^\circ 54'$ とされている。このことからせん断強度は1.6 kg/cm²となる。

4 実験装置と方法

実験装置は本誌第5号に紹介したものと同一である(鈴木・藤田, 1983)。

すなわち、傾斜可変板上に所定の大きさに整形したベントナイト粘土の供試体をのせ、スピードコントローラーで、ある一定の速度でモーターを動かすことにより、それと連結された突き上げ棒が上昇し、一定の速度で可変板を傾斜させるというものである。

藤田ほか(1984)により、可変板の速度は実験供試体の亀裂やすべりの発生に何ら影響しないということが示されているので、ここでは亀裂発生過程の観察に適した速度として $5^\circ/\text{min}$ の速度で行う。

可変板の上面には、マイラー紙を貼ってすべり面とする。なお、供試体をのせるときに、マイラー紙上をセッケン水でぬらしてさらにすべりをよくする。

可変板を傾斜させていく時、ある角度に達すると供試体は亀裂を生じ、もうそれ以上傾けなくても自動的にすべりはじめる。このため、供試体が約10 mm/minの速度ですべるようになった時、あるいは亀裂が生じ始めた時にスイッチを切り可変板の角度を測定する。

供試体の変形および亀裂発生の様子は、カメラによる写真撮影・ビデオカメラによる録画・スケッチ等を行ってくわしく記録する。また、供試体の側面に器具で真円を刻んでおき、亀裂や歪みの解析に用いる。

5 実験内容

実験1；冠頭部に生じる対の正断層亀裂に関する実験

図-1の1のように、可変板上面にマイラー紙を下流側から供試体の約 $\frac{1}{3}$ の位置まで貼り、板とマイラー紙の摩擦係数の違いによっておこる亀裂を観測する。すなわち、実際の地すべりでの冠

頭部における対をなす正断層型亀裂の形成過程を検討するための実験である。

実験2：すべり面の高まりによって生じる対の正断層型亀裂に関する実験

発泡スチロールを背の低いかまぼこ型に加工した凸部（長さ8cm×幅15cm×高さ1.7cm）を、可変板上の位置を以下のようにかえて固定し、凸部と可変板上面にマイラー紙を貼っておく。そして、その上で供試体をすべらせ、この時発生する亀裂を観測する。すなわち、実際の地すべりにおいて、すべり面上の高まりによって現れる対の正断層型亀裂の形成過程を検討するための実験である。

その1：図-1の2のように、可変板上に凸部を供試体内部の上流側から10cmの位置に固定する。

その2：図-1の3のように、可変板上に凸部を供試体内部の上流側から20cmの位置に固定する。

その3：図-1の4のように、可変板上に凸部を供試体内部の上流側から30cmの位置に固定する。

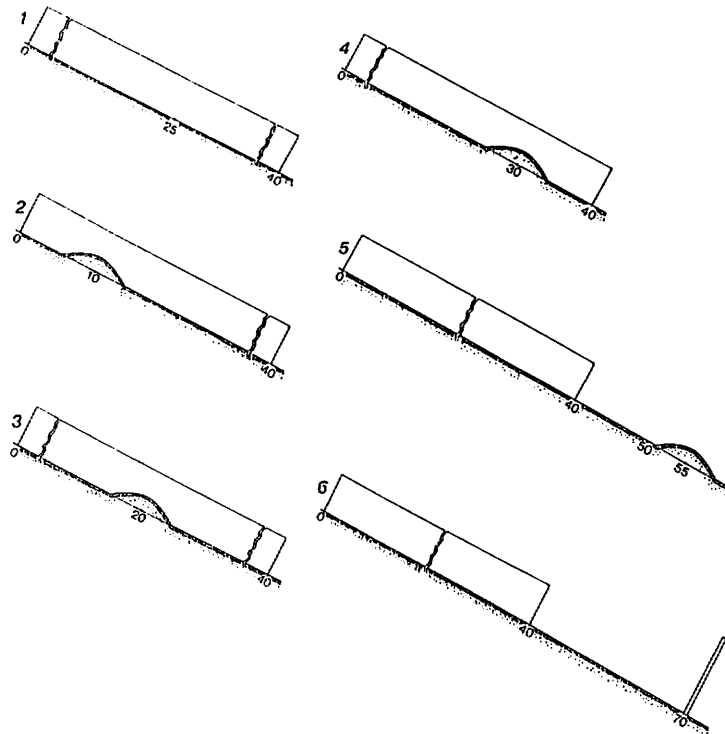


図-1 実験の種類（小数字：距離，cm単位）

- 1：平らなすべり面の場合
- 2：上流側に高まりがある場合
- 3：中央部に高まりがある場合
- 4：下流側に高まりがある場合
- 5：離れた下流部に高まりがある場合
- 6：衝害物に衝突する場合

Fig. 1 Variety of the experiments of landslide.

- 1：Experiment on the flat plane.
- 2：Experiment on a projection at up-stream.
- 3：Experiment on a projection at the center.
- 4：Experiment on a projection at the downstream.
- 5：Experiment on a projection at the far downstream.
- 6：Experiment on the collision.

実験3；すべり面上の高まりを越流することによって生じる正断層型亀裂に関する実験

実験2において、交差正断層型亀裂は冠頭部で平行正断層型亀裂と対をなして発生するもの他に、凸部を越流する過程において発生しているものが確認される。そこで、この交差正断層型亀裂の発生過程を検討するため、図-1の5のように、可変板上に凸部を供試体の下流側15cmの位置に固定し、その上から供試体全体をすべらせて凸部を越流させる。そして、この時に発生する亀裂を観測する。すなわち、実際の地すべりにおいて、上からすべってきた崩積土がすべり面上の高まりを越流する時に現れる正断層型亀裂の形成過程を検討するための実験である。なお、供試体全体をすべりやすくするため、可変板上面全部にマイラー紙を貼る。

実験4；地すべり崩積土の先端部に生じる亀裂に関する実験

図-1の6のように、可変板の最下部に薄いアクリル板（高さ10cm×奥行40cm）を固定し、実験3と同様に可変板上面全部にマイラー紙を貼る。そして、上から供試体全体をすべらせてアクリル板に接触し停止するときに供試体の先端部に発生する亀裂を観測する。すなわち、実際の地すべりにおいて、崩積土が停止する時先端部に現れる亀裂の形成過程を検討するための実験である。

Ⅲ 実 験 結 果

1 実験1；冠頭部に生じる対の正断層型亀裂に関する実験（図-2）

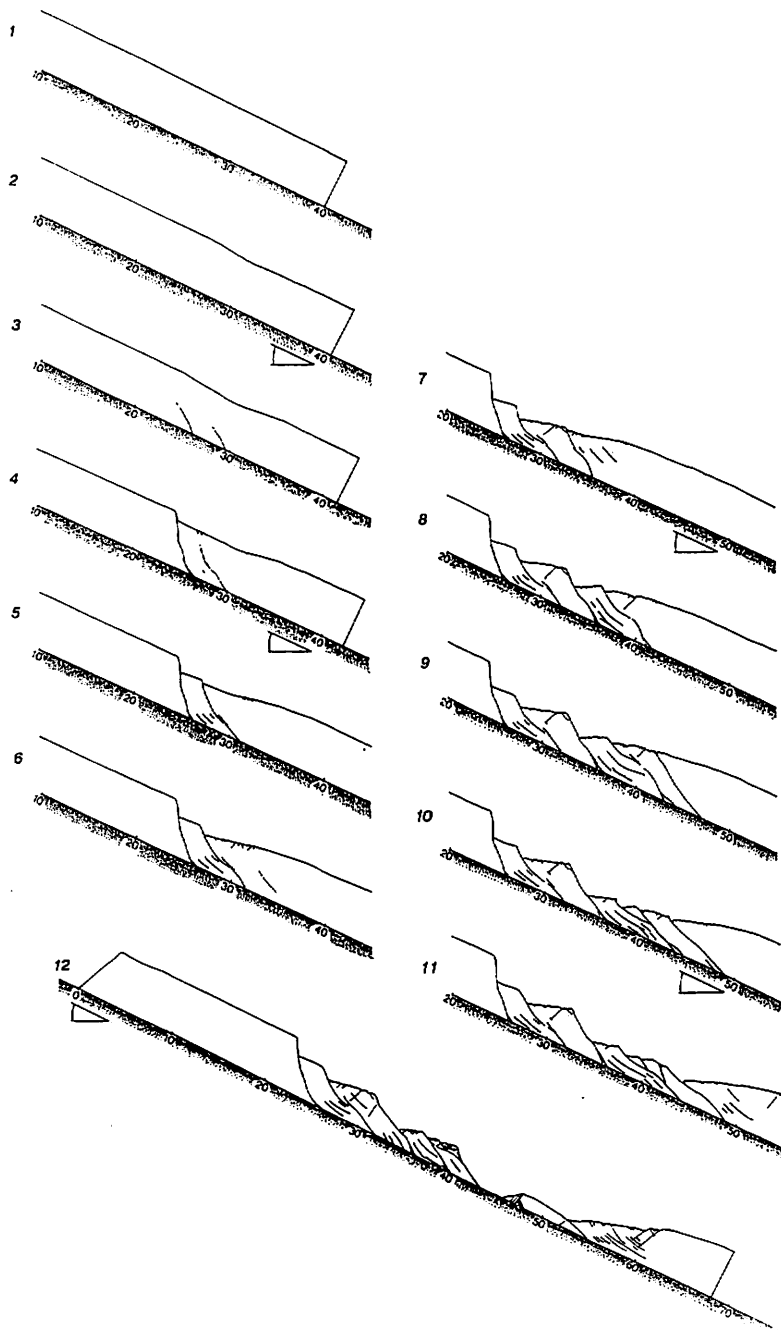
ゆっくり傾いていく可変板の傾斜が 20° 付近になると、マイラー紙上を供試体がすべりはじめ、そのため供試体が伸びはじめる。そして、マイラー紙と可変板の境界付近（供試体上流側から約25cm）で、供試体の表面がゆるく凹んでくる（2）。これは、マイラー紙上と可変板の摩擦係数が違うため、マイラー紙上にある供試体の部分が、可変板上にある部分に比べて非常にすべりやすい状態になっているためである。

このとき、供試体には強い引張力が働き、やがて、この力に耐えることができなくなり、境界付近で供試体の下面から上面へ、下方に傾斜する亀裂が数本、順々に、あるいは平行して同時に発生する（3）。そのうちの1本が供試体上面まで達し、その面に沿ってすべりはじめる。と同時に、下流側の供試体上面に亀裂群が発生する（4）。そして、前にできた亀裂と結びつき、これをすべり面としてすべりだす。すべりが進むと供試体の下流側にすべり面と平行な数本の亀裂が生じる。また、供試体上面には、上方へ傾斜する亀裂群が生じる（5）。さらに、すべりが進むと、下流側にまた新しくすべり面と平行な亀裂が供試体の中央に生じ、これが供試体の上面、下面に達すると、今度はその面に沿ってすべりはじめる。そして、前の面のすべりは徐々に止まっていく（6、7）。下流側の供試体には、上方に傾斜した亀裂群とすべり面に平行な亀裂群が生じ、上記のことが繰り返されていく（8～11）。最終的には、下方へ傾斜する亀裂群と上方へ傾斜する亀裂群のペア（対の正断層型亀裂群）がいくつかできる（12）。

この実験を何回か行った結果、供試体が発生した亀裂に沿って、自動的にすべり続けたときの可変板の傾斜角度は、 23° ～ 27° の範囲であることが明らかになった。

この実験の結果から、冠頭部やすべり面上の高まりのところだけに、対の正断層型亀裂が発生するのではなく、すべり面上に高まりがないところでも発生することがわかった。こうした結果は、今回の実験ではじめて明らかにされたものである。

ところが、図-3のように、含水量・境界条件・可変板の上昇速度などの実験条件が同じであるにもかかわらず、亀裂が繰り返して発生せずに、対の正断層型亀裂群が1組しかできずにすべりおちてしまう場合もあった。



図一2 実験1の結果(1)
 大きい数字：実験結果の経過を示す、
 小さい数字：縮尺，cm単位(図2～図11のすべてに共通する)。

Fig.2 Product of the experiment 1 (Part 1).

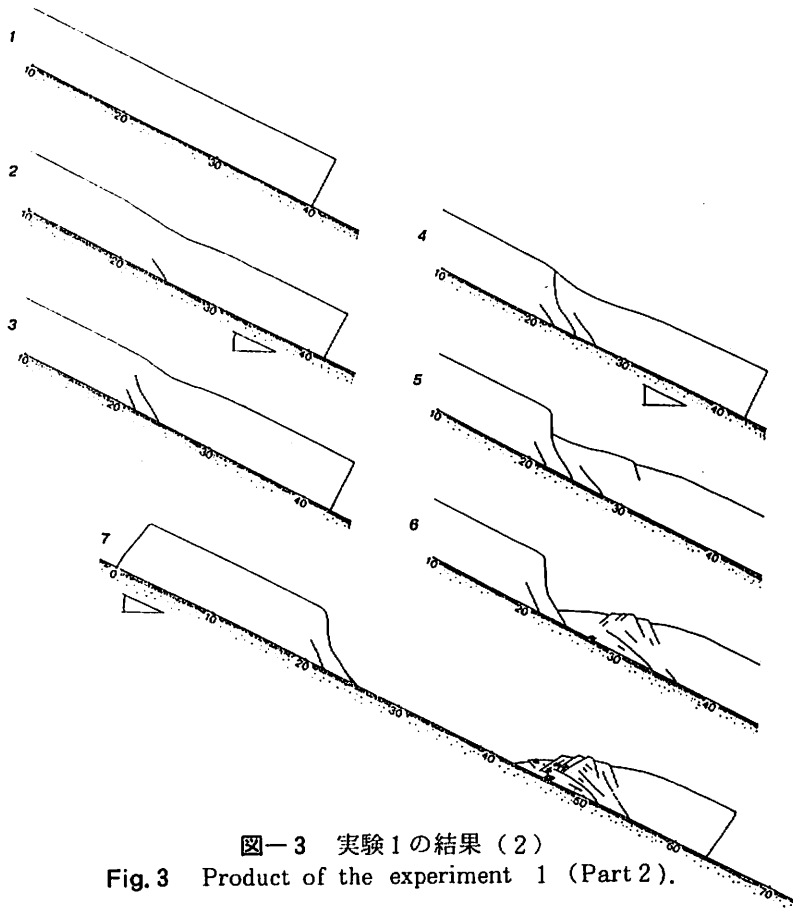


図-3 実験1の結果(2)
Fig. 3 Product of the experiment 1 (Part 2).

2 実験2；すべり面の高まりによって生じる対の正断層型亀裂に関する実験

(1) その1 (図-4)

可変板の傾斜角度が 20° 付近になると、供試体が伸びはじめ、凸部上流と下流付近で供試体表面がゆるく凹んでくる(2)。さらに、凸部下流側の粘土量は凸部上流側のそれよりも多いため、凸部下流側には非常に強い引張力が働く。プラス凸部の影響で、頂上付近でこの引張力にたえられなくなり、供試体の下面から上面へ下方に傾斜した亀裂が発生する(3, 4)。そして、亀裂が供試体上面まで達すると、その面に沿ってすべりはじめ、そのとき、下方と上方に傾斜した亀裂群がそれぞれ供試体の下面から生じはじめる(5)。さらにすべりが進むと、供試体上表面に上方に傾斜した亀裂群が生じる(6)。また、下流側の下方に傾斜した亀裂群は上面に向かって伸びていき、その周辺に平行な亀裂が数本発生する(7, 8)。その亀裂の1本が上面に達すると、今度はそこがすべり面となり、滑落しはじめる。そして、それより上流側の部分のすべりは徐々に止まっていく(9)。以下、実験1と同様なことが繰り返され(10~12)、最終的には、数組かの正断層型亀裂群ができる(13)。

この実験を何回か行った結果、供試体が発生した亀裂に沿って、自動的にすべり続けた時の可変板の傾斜角度は、 $24^\circ \sim 26^\circ$ の範囲であることが明らかになった。

この実験の結果からも、実験1と同様、冠頭部やすべり面の高まりのところだけに、対の正断層型亀裂が発生するのではなく、すべり面上に高まりがないところでも発生することがわかった。

また、図-5のように、実験条件が同じであるにもかかわらず、1対の正断層型亀裂群しかできなかった場合もあった。

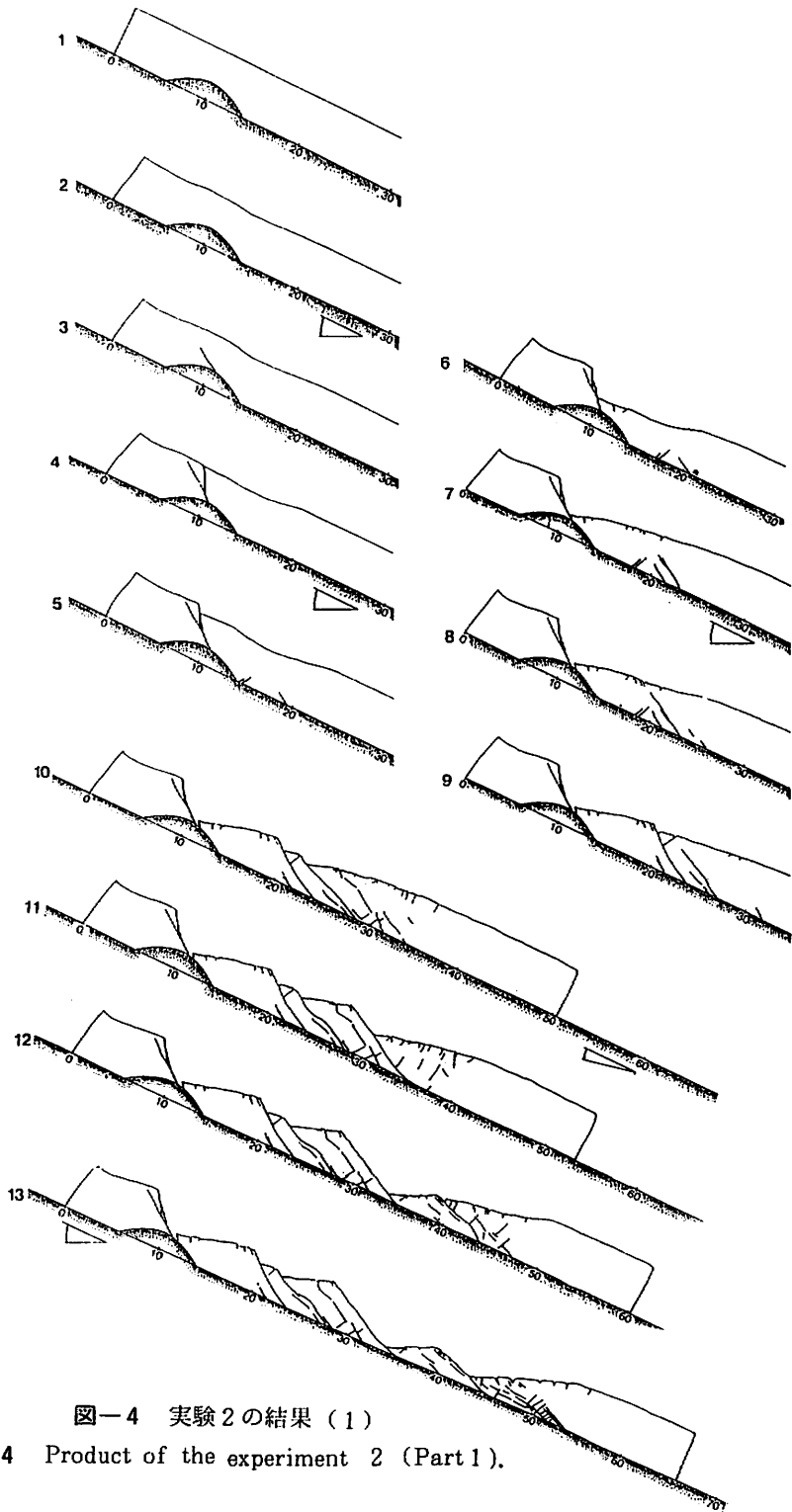
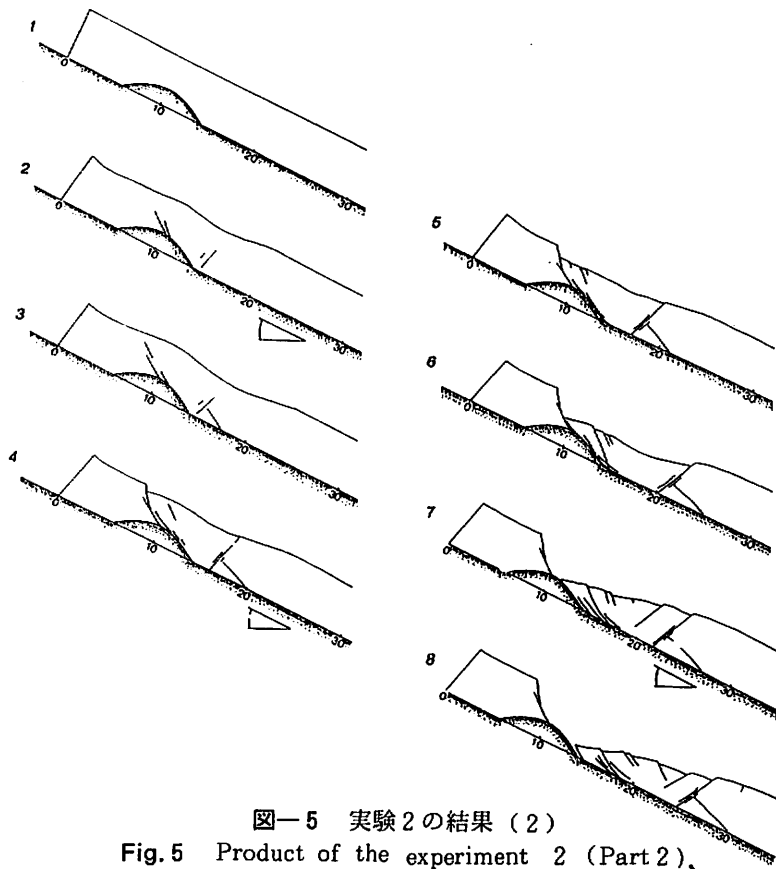


図-4 実験2の結果(1)

Fig. 4 Product of the experiment 2 (Part 1).

(2) その2 (図-6)

可変板が 20° に近づくと、凸部の下方における供試体のすべりが大きくなり、供試体が伸びはじめる。そして、凸部の下流側で供試体の表面がゆるく凹み、凸部の頂上付近では、越流によって供試体の表面が



図—5 実験2の結果(2)
Fig. 5 Product of the experiment 2 (Part 2).

盛り上がり、ゆるやかな波型を示す。やがて、凸部頂上に亀裂が発生し、次第に発達してくる(2)。またそれと同時に、凸部の下流には、ほぼ斜面に平行な低角の亀裂群(衝上断層型亀裂: thrust fault type crack)が発生しはじめる(3, 4)。その後、凸部の上流側にも同様な亀裂群が生じ、供試体が越流することによって、その数が増してくる。凸部頂上付近の供試体上面には、正断層型亀裂群が発生する(5, 6)。さらに、凸部のつけ根付近の下面から交差する亀裂が順に数本発生し、下流側の衝上断層型亀裂群を切るように成長していく(7)。供試体が越流するにしたがい、凸部の頂上に発生した亀裂は上面の平行正断層型亀裂と結びつく(8)。また、凸部上にあった衝上断層型亀裂群の1本は、上面の平行正断層亀裂と結びつき、下面に達する(9, 10)。さらに、越流が進むと、上面の平行正断層型亀裂群の後方に交差正断層型亀裂群が発生し、上流側の凸部のつけ根付近に、衝上断層型亀裂群を切る縦の亀裂が生じる(11)。下流側の衝上断層型亀裂群の1本が上面に達すると、その面に沿ってすべりはじめ、上流側のすべりは徐々に止まる(12~14)。

この実験を何回か行った結果、供試体が自動的にすべり続けたときの可変板の傾斜角度は、 $22^{\circ} \sim 28^{\circ}$ の範囲であった。ここでは、供試体全体が凸部を越流してすべる際、供試体上面にまず平行正断層型亀裂群が発生し、後に交差正断層型亀裂群が発生している。ところが図-7のように、平行正断層型亀裂群が発生する前に、越流によって交差正断層型亀裂群が発生してしまう場合もあり、この場合、まず上流側の凸部つけ根付近の内部に交差正断層型亀裂群が生じ、後からそれを切るように衝上断層型亀裂群が発生している。

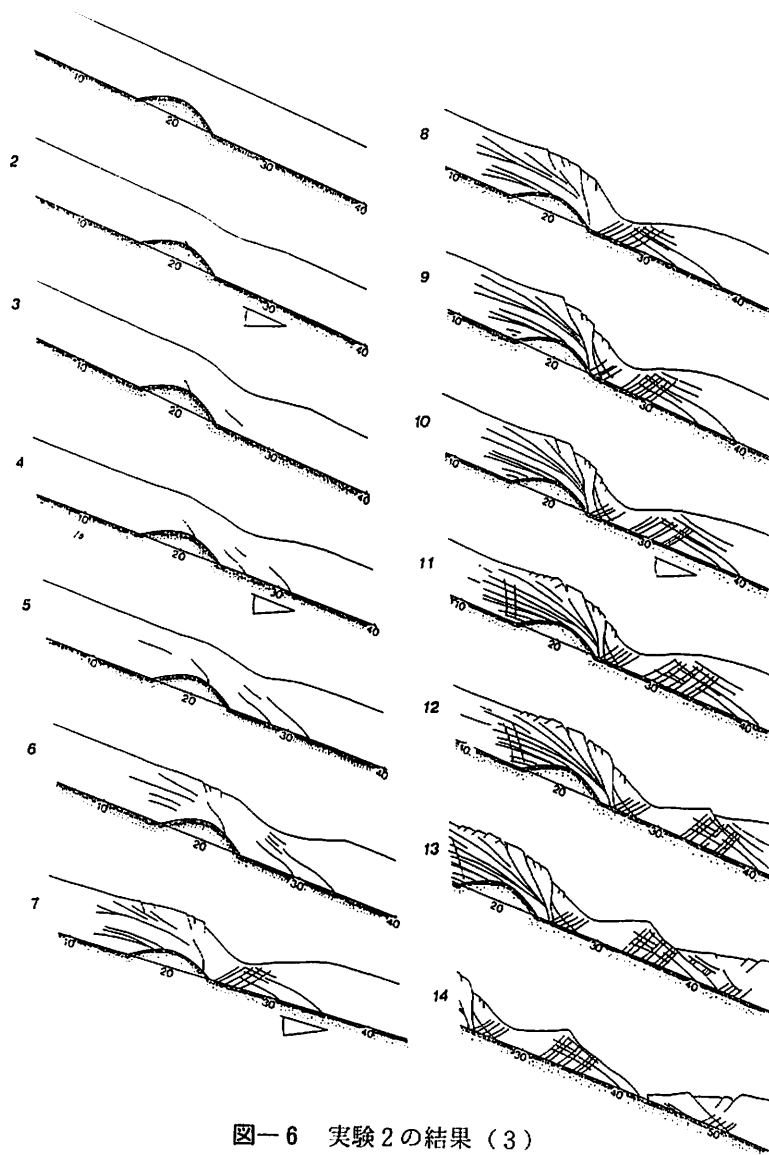


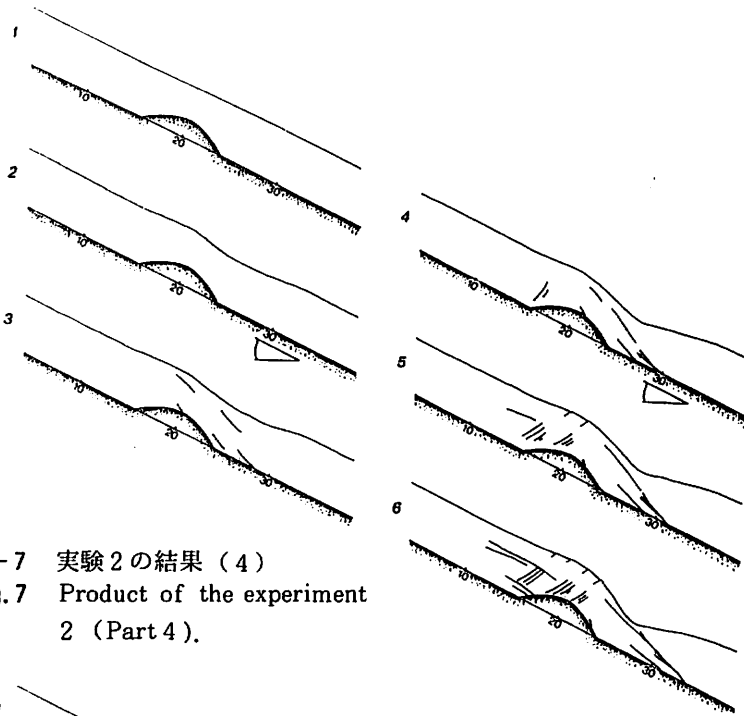
図-6 実験2の結果(3)

Fig.6 Product of the experiment 2 (Part 3).

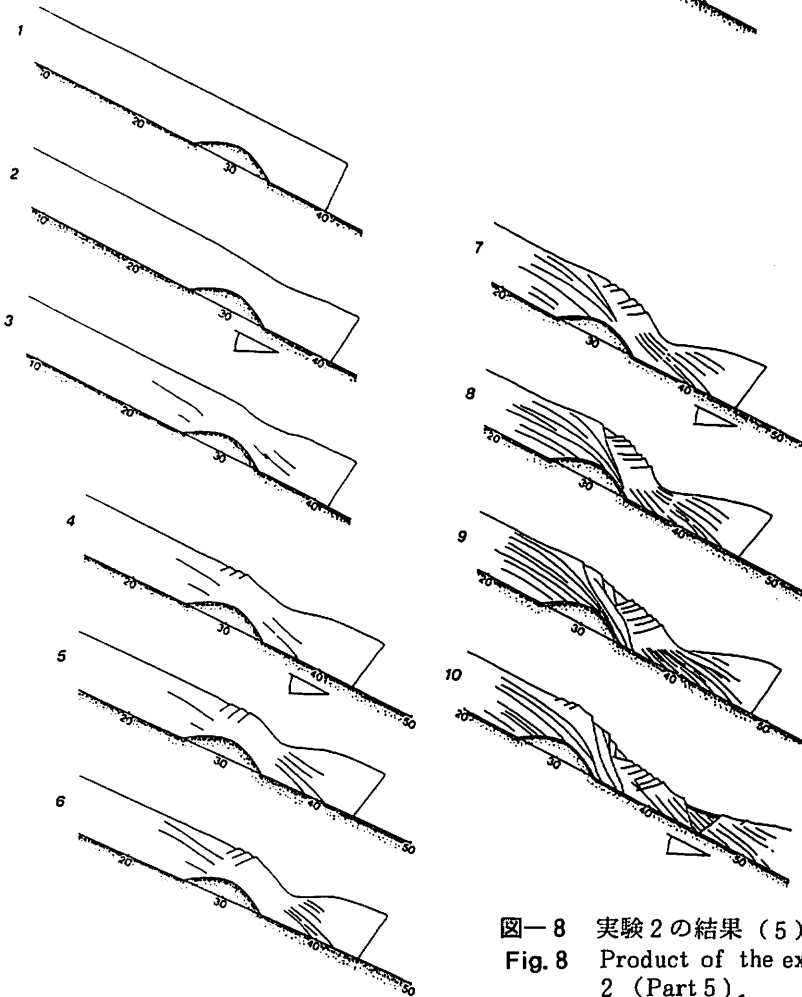
(3) その3 (図-8)

可変板が 20° に近づくと、供試体が伸びはじめ、凸部の下流側で供試体の表面がゆるく凹み、凸部の頂上付近では越流によって供試体の表面が盛り上がり、ゆるやかな波型を示す(2)。そして、凸部の上流と下流に、実験2のその2と同様、ほぼ斜面と平行に低角の亀裂群が発生する(3)。供試体は凸部を徐々に越流していき、凸部頂上付近の供試体上面には交差正断層型亀裂群ができる(4)。その間、衝上断層型亀裂群は伸びていき、数を増していく。凸部の下流側の供試体表面の凹みも徐々に大きくなっていく(5~7)。さらにすべりが進むと、凸部の頂上付近に平行正断層型亀裂が発生し、衝上断層型亀裂の1本と結びつき、下面に達する(8, 9)。最終的には、平行正断層型亀裂群の上流に新しく交差正断層型亀裂群ができ、凹んだ部分では強い引張力によって陥没が生じ、その上面には細かな平行正断層型亀裂と交差正断層型亀裂が発生する(10)。

この実験を何回か行った結果、供試体が自動的にすべり続けた時の可変板の傾斜角度は、 $20^\circ \sim 24^\circ$ の



図一七 実験2の結果(4)
 Fig. 7 Product of the experiment
 2 (Part 4).



図一八 実験2の結果(5)
 Fig. 8 Product of the experiment
 2 (Part 5).

範囲であった。

実験2の結果、交差正断層型亀裂の発生の仕方には2通りあることがわかった。1つは、その1のように、平行正断層型亀裂が生じ、それをすべり面として供試体が滑落するとき、その下流側に対としてそれが発生する仕方である。もう1つは、その2・その3のように、供試体が凸部を越流するとき、単独に交差型のものが発生し、その前後に平行正断層型亀裂が発生する仕方である。

3 実験3；すべり面上の高まりを越流することによって生じる正断層型亀裂に関する実験（図-9）

可変板角度が 20° 付近になると、供試体は少しずつ伸びはじめ、全体が下流側へすべりだす（1）。そして、供試体の先端部が凸部に接触するが、後方がすべってくるために押されて凸部にのりあげ、どんどん越流していく。すると、凸部のつけ根に、供試体下面から亀裂が生じ、広がっていく（2）。さらにのりあげていくと、後方の亀裂から衝上断層型亀裂が発生しはじめ、伸びていく（3）。

それから、凸部の頂点より下流側へ供試体の先端がすべりだすと、表面に交差正断層型亀裂群が発生し、数を増していく。一方、衝上断層型亀裂はすべるに従って後方へ枝分かれしていく（4、5）。供試体の先端部が凸部をのりこえたあたりで、交差正断層型亀裂群の後方に平行正断層型亀裂が発生する（6）。さらにすべりが進むと、再び後方に交差正断層型亀裂群が発生し、供試体内部の衝上断層型亀裂群も増えていき、それを切るように凸部つけ根付近から縦の亀裂が発生する（7、8、9）。

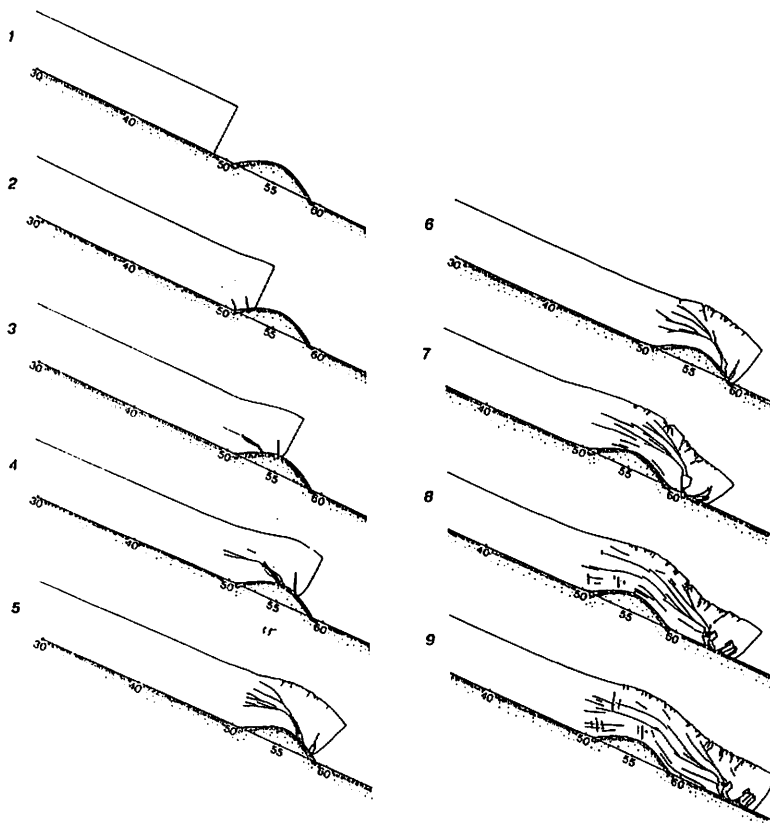


図-9 実験3の結果

Fig.9 Product of the experiment 3.

4 実験4；地すべり崩積土の先端部に生じる亀裂に関する実験（図-10，図-11）

図-10で，可変板角度が 20° 付近になると，供試体全体がすべってくる（1）。そして供試体がアクリル板に接触すると，後方から受ける圧縮力により供試体は徐々に縮み，上面は盛り上がり，側方はアクリル板に沿って広がっていく（2）。供試体がアクリル板と接触している両端の部分から，おのおの亀裂が供試体中心に向かって約 45° の角度で生じる。また，手前の亀裂に交差する亀裂が発生する（4）。

はじめの亀裂が交わり三角形を作ると，その部分は徐々に隆起している。さらに側方は徐々に外へはみだしていく（4）。手前の交差する亀裂がアクリル板に達し，また，三角形の頂点から上流側に向かって亀裂が生じはじめ，数が増えていく（5）。手前側にはじめの亀裂と平行な亀裂が生じる。次に，それに交差する亀裂が生じ，三角形は徐々に押しつぶされていく。そして，供試体とアクリル板が接触している両端の部分に，はじめの亀裂に交差する亀裂が生じ，その部分は外にはみだしていく（6）。頂点付近にできた亀裂が伸びていき，また数を増やしてくると，上流側に外側に向った斜めの亀裂が生じ，上流側は外へはみだしていく。アクリル板に接触した側方は，徐々に外側にはみだしていく。と同時に亀裂が生じ，数を増す（7）。下流側の部分はどんどん盛り上がっていく。アクリル板に接触した側方の部分も外側に広がっていき，今度は，最初の亀裂と平行な亀裂が多数発生する（8）。

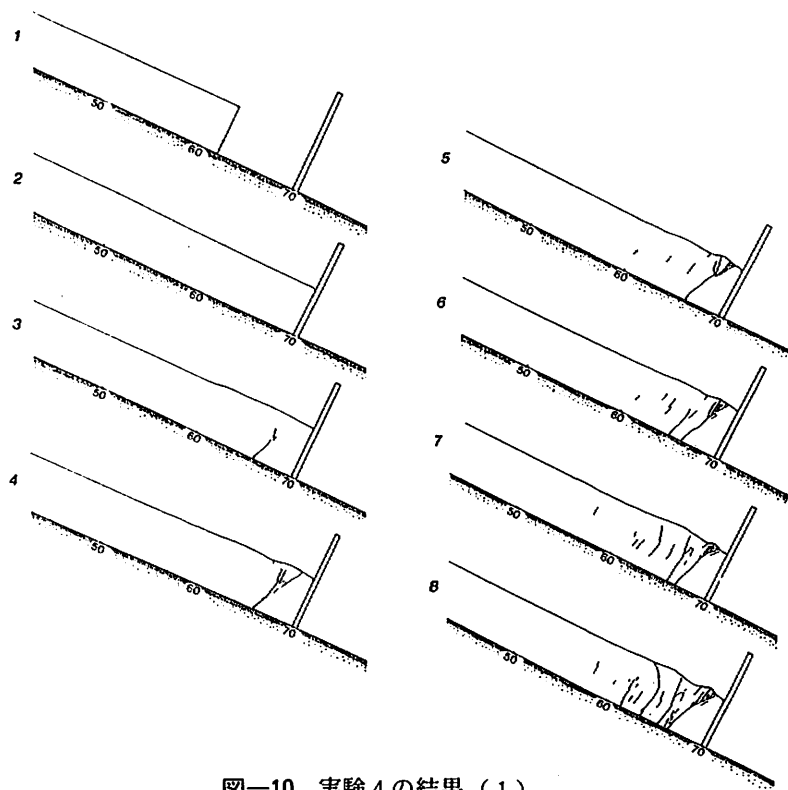


図-10 実験4の結果（1）

Fig.10 Product of the experiment 4 (Part 1).

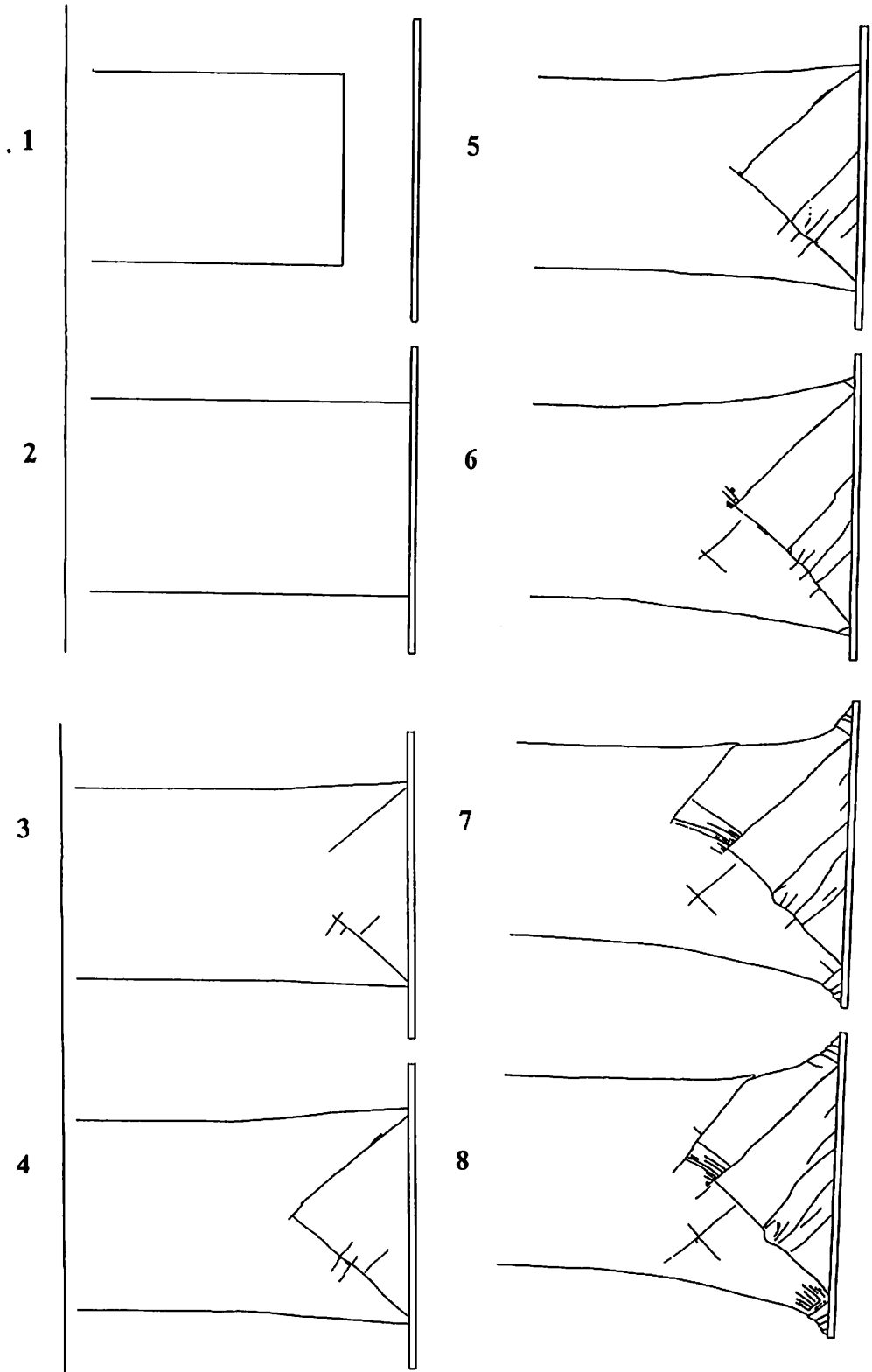


図-11 実験4の結果(2)

Fig.11 Product of the experiment 4 (Part 2).



図-12 すべりおちたベントナイト粘土に生じた亀裂群
 Fig.12 The crack on the bentonite clay caused sliding.

IV 考 察

1 可変板角度

実験の結果、供試体が発生した亀裂または斜面に沿って、自動的にすべり続けたときの可変板の傾斜角度は、表-3 のようになる。

実験条件を同じにしてそれぞれの実験を行ったのだが、傾斜角度は一定の値にはならなかった。

藤田ほか(1984)によると、自動的にすべり続ける状況を呈するときの傾斜角度を地すべりの臨界値とし、実験2のその2の場合、22.5が最も多く、 20° ・ 22° ・ 24.5° ・ 26° ・ 27° ・ 28° で、はじめてすべりはじめるという例もあったとされている。こうしたことは、可変板の傾斜速度とは無関係であり、供試体の物性が、温度変化で脱水したためでないこともわかっている。

この原因として、供試体のすべりを促すためのマイラー紙上のセッケン水が不十分であったか、あるいは、ベントナイト粘土を型枠につめるとき、底に空気ははいりこんでしまい、それによりすべりやすさに差が生じたのではないかと考えられる。実験では、ベントナイト粘土を箱型の枠に少しずつつめていき、

表-3 可変板の傾斜角度
 Table3. Dlip of the changeable plate.

実 験 名	可変板角度
実 験 1	$23^{\circ} \sim 27^{\circ}$
実験2(その1)	$24^{\circ} \sim 26^{\circ}$
"(その2)	$22^{\circ} \sim 28^{\circ}$
"(その3)	$20^{\circ} \sim 24^{\circ}$
実 験 3	$21^{\circ} \sim 23^{\circ}$
実 験 4	$21^{\circ} \sim 23^{\circ}$

つめおわったあとまず上表面をならし、次に杵をとり去って側表面をならして整形したのであるが、どんなに丁寧に空気を追い出そうとしても、杵をとったとき側面に隙間がみられた。したがって、供試体の底面にもそのような隙間の存在が予想でき、その隙間にマイラー紙上をぬらした水がはいりこみ、一種の吸盤の役目をして、すべりにくくしていたのではないかと思われる。

しかしながら、この実験は供試体に亀裂が生じる過程を観測するための実験であり、最適な条件であればよいので、供試体がすべりだす傾斜角度はあまり問題にしないでもよいと考える。

2 実験1・実験2（その1）

藤田ほか(1981)は、虫亀地すべりの調査から、対をなす平行正断層型亀裂と交差正断層型亀裂は、地すべり冠頭部と地すべり下流部の崩積土の高まりに分布するという規則性を報告した。しかし、今回の実験結果では、すべり面に高まりがないときでも対の正断層型亀裂がいくつも生じた（図-2、図-4）ので、実際の地すべりの場合も、冠頭部や地すべり面上の高まり以外の部分に、対の正断層型亀裂が生じている可能性がある。

この実験で、すべり面を供試体が滑落し、すべっていくとき、供試体の滑落した部分に何らかの抵抗力が働き、供試体の下流側の部分からすべる速度が遅くなるのではないだろうか。そして、そのために、引張力が働いて再び下方に傾斜する亀裂が生じたのではないかと予想される。さて、この何らかの抵抗力であるが、これは供試体の滑落した部分とマイラー紙上の間に働く摩擦力ではないかと考えられる。はじめ、供試体のすべりをよくするためにマイラー紙上をセッケン水でぬらすと、この水は供試体がすべることによって除水され、供試体の滑落した部分とマイラー紙の間に水がなくなって摩擦力が大きくなる。その結果、すべっている供試体の上流側のすべり速度が遅くなる。しかし、それに比べて下流側はマイラー紙上の水といっしょにすべっているため、すべり速度はそれほど変わらないので、引張力が働き亀裂がはいり、そこをすべり面として再び滑落するのであろう。このようなことが繰り返しながら、数組かの対をなす正断層型亀裂が発生する。このように考えたのは、崩れた供試体をかたづけるとき、マイラー紙に付いたまま残ってしまう部位があり、その位置はほぼ上記の亀裂の位置と一致していたからである。つまり、その部位は他の部位よりすべりにくかったと判断されるのである。

ところが、前にも述べたように、何回か実験を行った結果、1組の正断層型亀裂しか発生せずすべりおちてしまう場合があった（図-3、図-5）。この場合、はじめのすべり面の下流側に発生する亀裂は、平行正断層型亀裂よりも交差正断層型亀裂のほうがよく発達していた。また、繰り返しが生じている場合でも、平行正断層型亀裂よりも交差正断層型亀裂が発達すると繰り返しが終わり、下流部はそのまますべりおちてしまった。したがって、すべり面を滑落した供試体に、平行正断層型亀裂と交差正断層型亀裂のどちらが優位に発生するかで、その後のすべり方が決まってくるようである。

3 平行正断層型亀裂

実験の結果、平行正断層型亀裂は冠頭部・斜面（2次すべり面も含む）をすべるとき・高まりを越流するときに発生することがわかった。そこで、おのおのについて考えてみる。

冠頭部にできるものは、実験1では、斜面の摩擦係数の違い（可変板とマイラー紙）によってすべる速度に差が生じ、そのため供試体内に引張力が働き、特に最大の引張力が働く境界付近の供試体下面から亀裂が発生する。そして、斜面の摩擦の違いが供試体内部にも影響し、斜面の上方に傾いた亀裂が供試体上面に向かって伸びていく。そして、その下流側にも引張力によって同じような亀裂が発生する。また、実験2では、高まりをのぼるときと下るときすべる速度の差と方向によって引張力が働き、最大の引張力が

働く凸部頂上付近にも発生する。ここで、冠頭部に生じるものは、ほとんど底面にはじめに生じ、それが表面に向かって伸びていく。

斜面をすべる途中で発生する亀裂は、供試体の上面からも、内部からも、下面からも発生する。下面から生じるものは、前に述べたように、マイラー紙上の水分がすべる方向に向かって不均一を示しているため、それが摩擦係数の差となって供試体内に引張力が働き亀裂が生じる。そして、摩擦係数の差が供試体内部にも影響し、斜面の上方に傾いた亀裂が供試体上面に向かって伸びていくのであろう。内部から発生するものは、おもに2次すべり面上をすべっているときに発生するのであるが、2次すべり面上をすべるときの摩擦力の反力が下流側ではせん断力として働き、内部に亀裂がはいるのであろう。上面に発生するのは、2次すべり面上をすべっていくと、下面より上面のほうが伸びるので上面は下面より強い引張力を受け、そこに2次すべり面上をすべるときの摩擦力の反力によってせん断力が発生し、亀裂がはいるのであろう。

高まりを越流するときに発生するものは、たいてい表面からできる。これは、高まりの頂上までの速度と頂上から下流側までの速度の差と下流側供試体の重さによる引張力プラスすべる方向の違いによるせん断力によって発生すると考えられ、この場合、亀裂は越流してきた衝上断層型亀裂と結びつき、下面まで達する。

4 交差正断層型亀裂

実験の結果、交差正断層型亀裂はすべり面を供試体が滑落するときに、平行正断層型亀裂の下流側に発生するものと、高まりを越流するときに単独で発生するものとがあることがわかった。

最初に供試体が伸びていくときに、引張力によって供試体上面は自由面で広い範囲まで伸びるが、下面は拘束されているので狭い範囲しか伸びず、場所によって強さに差ができる。そして、供試体内部には下方に傾斜した弱い面ができ、さらに引張力をうけた場合亀裂が生じるのであろう。この場合、亀裂は上面から生じる場合・下面から生じる場合がある。上面から生じるのは、2次すべり面をすべっていくとき、下面より上面のほうが伸びるためであらう。また下面から生じるのは、下流側とすべり面のすべりの速度差によって働く引張力のためであらう。

越流時には、凸部頂上付近と、凸部の下流側つけ根付近に発生する。凸部頂上付近に発生する亀裂は、すべて表面から生じている。これは、供試体が凸部を越流するとき、凸部からの反力と流れる力によって上向きに下流側に傾いた力が働き、また、頂上付近までは圧縮されているが、頂上より下流では引張力にかわるので、頂上付近で交差正断層型亀裂が生じるのであろう。その後、上面に交差正断層型亀裂が増え、下流側が重くなると、下方からの引張力が上方からの流れる力より強くなり、平行正断層型亀裂が発生しそれが下面まで伸びて、いったん供試体下流側を切り離れたあと、再び上記の理由によって交差正断層型亀裂群ができるのであろう。

次に、凸部の下流側つけ根付近に生じる亀裂であるが、これはすべて下面から生じている。越流してきた供試体は、凸部の下流側つけ根付近で流れる方向が急に変わることにより、流れの方向が変わる点(凸部のつけ根付近)でせん断力が働き交差正断層型亀裂が生じるのであろう。

凸部の上流側つけ根付近の内部にできるものもあるが、これも流れる方向が変わることによってせん断力が働き、亀裂が生じるのであろう。

5 高まりを越流することによって発生する交差正断層型亀裂

地すべり崩積土上面に見られる交差正断層型亀裂は、すべて平行正断層型亀裂の下流側に対となって発

生したものであると考えられている。しかし、実験の結果、交差正断層型亀裂は供試体がすべり面上の高まりを越流することによって、単独で発生することがわかった。

また、平行正断層型亀裂と交差正断層型亀裂の発生する割合は、平行正断層型亀裂と交差正断層型亀裂が対になって発生する場合（実験1、実験2のその1）には、平行正断層型亀裂の方がやや多い。それと比べて、越流によって交差正断層型亀裂が単独で発生する場合には、平行正断層型亀裂の発生割合が非常に少ないことがわかった。以上のことを、実際の地すべり、ここでは虫亀地すべりにあてはめて考えてみる。

虫亀地すべりでは、平行正断層型亀裂の出現率が交差正断層型亀裂に比べてはるかに少ない（藤田ほか、1981）。虫亀地すべりでの正断層型亀裂は高まりを越流したことによってできたと考えられる。事実、交差正断層型亀裂の上流側にはほとんど必ず基盤面の高まりがある。そして、藤田ほか（1981）によると、崩積土は上流側で70～100 m、下流で200数10mすべったとあるので、交差正断層型亀裂はすべて基盤面の高まりを越流してきたと考えられる。

上記のことから、崩積土の表面と、崩積土のすべった距離によってすべり面形状を予測することも可能になってくると思う。すなわち、交差正断層型亀裂が多く発生して平行正断層型亀裂が少ないときは、それは越流によってできたと考えられ、すべった距離と表面の形状から、斜面途中の基盤面のもりあがりの位置までわりだすことが可能になると考える。また、基盤面のもりあがりの位置と表面の形状によって、どのくらいすべってきたかということも予測できると思う。

6 衝上断層型亀裂

実験2のその2・その3において、すべり面上の高まりの上方側と下方側の供試体内に、すべり面にほぼ平行した低角の亀裂がみられる。実験1・実験2のその1では、この種の亀裂はみられなかった。したがって、この衝上断層型亀裂群は、すべり面上の高まりを越流することによって、供試体内部に発生する亀裂と考えられる。

凸部の上流側にできる亀裂については、次のように考えられる。すなわち、供試体はある角度に達すると自重に耐えきれずすべりだす。しかし、凸部があるためにすべりが妨げられ、また、すべる方向を変化させられる。そのため、この付近の供試体には圧縮力が働き、すべる速度が供試体上面ほど大きくなり、下面ほど小さくなる。この速度差により供試体内部にせん断力が発生し、亀裂が生じたのであろう。

凸部の下流側にできる亀裂は、以下のように考えられる。凸部を越流してきた供試体が再び可変板に接する地点において、供試体下面はすべる方向が変わるが、上面にいくほど方向の変化が小さい。また、下面ほど摩擦力が大きいため、内部に速度差が生じ、せん断力が働いて亀裂が発生するのであろう。

7 実験 4

地すべり崩積土が、何らかの障害物によって流れが止められるときに、崩積土の先端部に、上流側に傾斜する逆断層型の亀裂が生じ、上流側の崩積土が下流側の岩盤などへのし上げるという現象が多く報告されている。この場合、この断層の部分の地表にはうず高い高まりが生じるのがふつうである。

この実験は、斜面をすべってきた供試体を、アクリル板で止めることにより、このような亀裂の発生状況を観測しようとするものであったが、予想していた亀裂の発生はみられなかった。それは、実験では側面を拘束しなかったために、アクリル板に供試体が接触した後、供試体の自重でアクリル板に沿って押しつぶされ広がってしまったことが原因と考えられる。さらに、アクリル板を鉛直に立てたことや、アクリル板を高くし過ぎたため、供試体が行き場を失って押しつぶれるしかなく、そのため、上面に三角形の

亀裂が生じ、その部分が隆起してしまったものとみられる。

したがって、境界条件をもう一度検討し直す必要があり、今後追求すべき課題である。

V あ と が き

これらの実験結果から、地すべりの調査・予測・防止をするうえで、2つの重要な点が指摘できる。

1. 今まで、野外の地すべり調査において、地すべり下流部の崩積土上面の対の正断層型亀裂は、すべり面の高まりによって生じると考えられていた(藤田ほか, 1981; 長谷川ほか, 1981; 藤田, 1982; 藤田ほか, 1984)。しかし、実験1と実験2のその1の結果から、すべり面上に高まりがないところでも崩積土自身の内部でのすべる速度の差により、対の正断層型亀裂がいくつも生じることが明らかになった。これからの野外における地すべり調査にあたって、この実験結果は重要なポイントとなると思われる。
2. 図-6の12にみられる凸部付近の供試体は、平行正断層型亀裂群・交差正断層型亀裂群・衝上断層型亀裂群によって表面に割れ目が現われ、内部はそれらの亀裂によって複雑に切られてブロック化している。また、こうした現象は、供試体が大きな正断層型亀裂が生じているような部分に分布している。

従来の地すべりの研究結果からすると、現在おこっている地すべりの大部分は、過去の地すべりにより滑落した崩積土の再すべりであると考えられ、これには、以前にすべったときできた崩積土の割れ目が、大きな影響を与えることがわかっている。図-6の12にみられるような割れ目がこのような部分に存在すれば、それは雨水や融雪水などの地表の水が浸み込み易い構造をなしているから、こうした部分は、このような点からも将来の地すべりの滑落部になりうる可能性がある。

3. 図-2~図-4のように、すべり面に高まりのない場合には、図-6のようなすべり面上の高まりを越流するときに生じる低角の衝上(逆断層)型の亀裂は生じない。しかし、図-2~図-4の最終結果をみると、多くの低角度の亀裂が沢山分布していて、図-6の低角の亀裂と一見似た形を呈している。しかし、図-2~図-4の場合は、すべて交差正断層型が変形してきたもので衝上型のそれとは全く異なっている。このことは、地すべり崩土の発掘調査の場合には、これらちがったタイプの亀裂を区別して観察しなければならないことを教えてくれている。

文 献

- 藤田至則・鈴木幸治・国安 稔・長谷川良三・仁多見 朗・西山 亨(1984): 地すべり崩積土内の亀裂の発生に関する実験とその意義, 自然災害科学, No.3, pp.29~40.
- 藤田至則(1982): 地すべり崩積土ブロックに関する研究, 新潟大災害研年報, No.4, pp.35~50.
- 藤田至則・茅原一也・青木 滋・鈴木幸治(1981): 新潟県古志郡山古志村における虫亀地すべりの形態とその形成過程, 新潟大災害研年報, No.3, pp.35~21.
- 小玉喜三郎・鈴木尉元・小川銀三・丸田美幸(1974): 箱型褶曲の内部構造について——スケール・モデル実験による研究——, 地質調査所報告, 250-2, pp.121~144.
- 長谷川良三(1981): 地すべり発生期における断裂の成因——スケール・モデル実験による考察——, 新潟大土木工学科卒論.
- 仁多見 朗・西山 亨(1982): 地すべり過程に発生する崩積土内の断裂の成因——地すべり塑性モデル実験による考察——, 新潟大土木工学科卒論.
- 玉田文吾・工藤久樹(1974): 長崎県平山地すべり地区における排水効果(2), 地すべり, vol.11, No.3, pp.32~39.
- QUIDO ZARUBA and VOJTECH MENCL (1985): Landslides and their control, Elsevier scientific publishing company, Holland, pp.105~110.