

中国の洒勒山 (Saleshan) 地すべりの運動機構について

張 得煊・佐々 恭二

THE MECHANISM OF MOVEMENT IN THE SALESCHAN LANDSLIDE 1983 IN CHINA

By *Dexuan* ZHANG and *Kyoji* SASSA

Synopsis

A big landslide of $3.5 \times 10^7 \text{m}^3$ occurred at the Saleshan mountain, Gansu Province, China on 7 th March 1983. It moved at a high speed (13–14 m/sec at average) and killed 227 persons and destroyed 585 houses. The landslide mass slid down from a steep slope and rode on the quaternary alluvium and moved over about 800 m until the Baxie river.

Sassa, 1989 has developed a new high-speed high-stress ring shear apparatus to estimate the friction angle during the motion of large-scale landslides¹³⁾. We took the sample from the quaternary alluvium on which the Saleshan landslide moved. In use of this sample, the authors performed tests to estimate the shear strength during motion under rapid loading using the high-speed high-stress ring shear apparatus. This rapid loading tests presented a small apparent friction angle during motion in the Saleshan landslids.

Sassa, 1988 proposed a new computer simulation model for the motion of landslides¹⁰⁾. This method was applied for this Saleshan landslide using this measured apparent friction angle. The result almost reproduced the real motion of the Saleshan landslide.

1. ま え が き

1983年3月7日17時、中国甘肅省 (Gansu) の蘭州市 (Lanzhou) から南へ約 60 km の所の洒勒山 (標高 2,833 m) の南向きの斜面で、推定土量 $3,500 \text{万 m}^3$ の大規模地すべりが発生し、死者227名、被害家屋72戸を出すなどの大きな被害が生じた。この地すべりの大きな特徴は、高速でほぼ平坦な沖積地を約 800 m 運動したことである。近くの地震観測所の記録によると、地すべりは動き始めから、停止までの時間は65.5秒で、この地すべりの平均速度は 13~14 m/sec と計算された。Fig. 1 に洒勒山 (Saleshan) 地すべりの位置を示す。この地すべりは地すべりが多発するレス (Loess) の分布地域にある。

洒勒山地すべりの発生前の斜面は平均勾配は35度の急斜面であるが、斜面脚部から川までの間は約 800 m にわたって平坦な沖積地が広がっている。地すべり地の近辺は第三紀の泥岩層が広く分布しており、これを厚さ約 100 m の第四紀の風成レスが覆っている。Photo. 1 に洒勒山地すべりの全影、Photo. 2 に頭部滑落崖の写真を示す。

中国レスの分布地域では、これまでも突発・高速運動する地すべりが多発し、災害も大きかった。そして、洒勒山地すべりの大災害以後、地すべり災害を未然に防ぐための地すべりの予知・予測の必要性が特に強く認識されるようになった。そのために、中国ではこの地すべり運動について多くの研究がなされ、数多

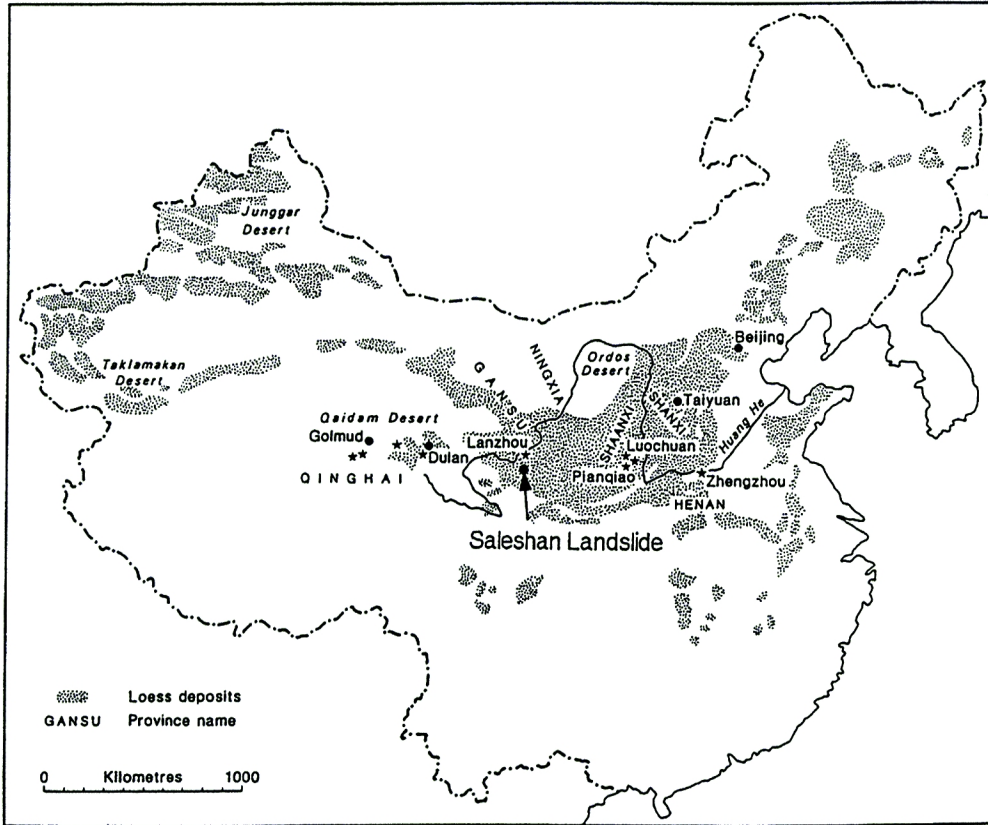


Fig. 1. Location map of the Saleshan landslide.
(by E. Derbyshire 1988)

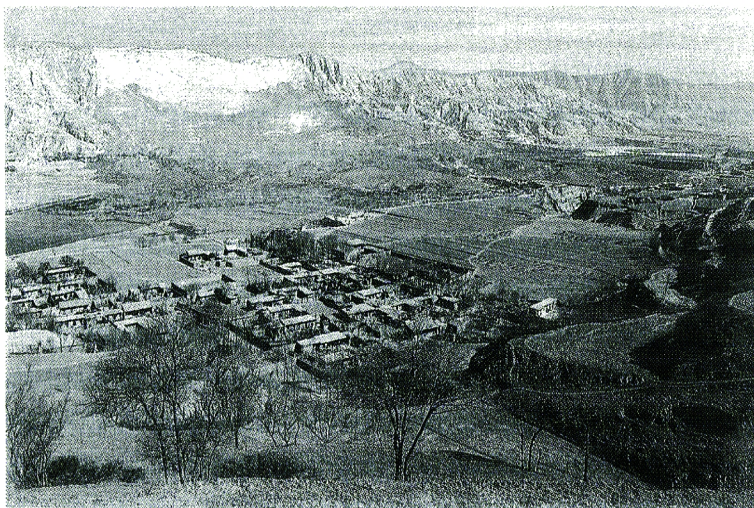


Photo. 1 Total view of the Saleshan landslide.

くの論文が発表された。洒勒山地すべりの高速運動機構に関して従来、以下のような議論が提出されている。Liuら²⁾、Xu³⁾は、Shreve²¹⁾(1968)のBlackhawk地すべりについての空気クッション説と同様にこの地すべりは高速運動時、すべり面でマサツ熱による間ゲキ水の気化により、大きな過剰間隙空気圧が発生し、空気のクッションに乗る形で高速運動が生じたと推定した。しかし、平均 40 m の地すべり土塊を支え

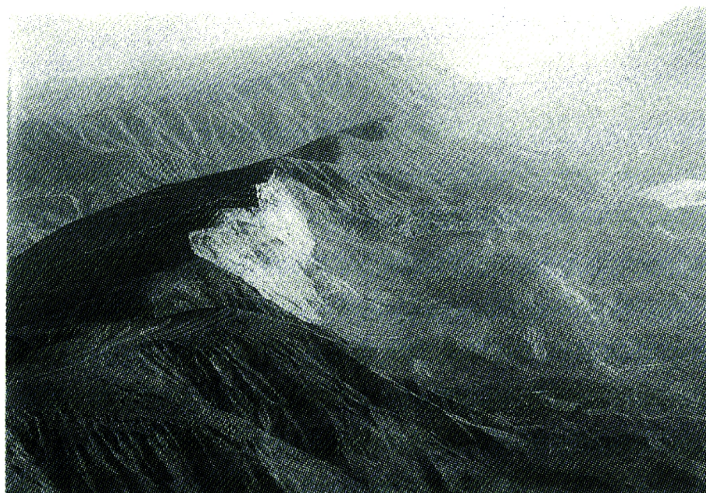


Photo. 2 Main scarp of the Saleshan landslide.

るような高い水蒸気圧が発生するとは考えにくい。

一方、佐々⁴⁾¹⁰⁾は御岳大崩壊や地附山地すべりの調査と高速リングせん断試験機による試験結果から、地すべり・斜面崩壊の土塊は飽和した斜面あるいは溪床を流下する際、地盤の土層を急速に載荷するために過剰間隙水圧が発生し、見かけのマサツ角が減少し、緩傾斜の斜面でも高速で運動し得ると説明した。著者らは洒勒山地すべりの運動も御岳大崩壊や地附山地すべりと同じメカニズムで説明し得るのではないかと考え、この地すべりからサンプルを採取し、一面せん断試験機と高速高圧リングせん断試験機を用いて、その土質試験を実施し、佐々により提案された改良そりモデルとシミュレーションモデルでこの地すべりの運動が説明できるかどうか検討した。ここでは、その結果を報告する。

2. 洒勒山地すべりについて

2.1 洒勒山地すべりの地質調査結果

洒勒山地すべりの発生後、甘肅省地質局によって23本のボーリング地質調査が行われ、地すべり発生前後の地すべり土塊の深度分布及び地質がかなり詳細に調べられている²⁴⁾。Fig. 2-1 は地すべりの平面図を示し、実線で囲まれた部分が地すべりの発生域であり、点線は地すべりの運動範囲である。Fig. 2-2 は地すべりの中央縦断面 A-A' であり、地すべり面、旧地表面が示されている。

2.2 洒勒山地すべりの運動について

佐々¹⁰⁾¹³⁾は地すべり運動中のせん断面の間ゲキ水圧の形成タイプを Fig. 3 に示す3つに分けた。A は間ゲキ水圧が発生も発散もしない地盤上（基岩やコンクリート水路など）を移動する場合で、せん断面の間ゲキ水圧は運動土塊内の間ゲキ水圧によって決まる。B は飽和度の高い地盤上を地すべりが移動する場合で、飽和地盤の非排水載荷によって高い間ゲキ水圧が地盤内に発生し、地盤をえぐりながら進む場合である。C は透水性の高い不飽和の地盤上を移動する場合で、土塊の間ゲキ水圧が地盤へ排水され、間ゲキ水圧の最大値が移動土塊の内部に現れ、移動土塊の一部を堆積させながら進む場合である。

洒勒山地すべり地の場合、年平均降水量はわずか 446 mm の内陸・半乾燥気候に属し、かつ地すべり発生直前に降雨もなかったことを考慮すると、地すべり発生域のすべり面の土（第三紀層の粘土）は Wet な状態であっても、間隙水圧は小さい値または 0 に近いと推定できる。また、山頂にクリープによる引っ張りキレットと段差が 3 年前¹⁾ から徐々に拡大していたことを考慮すると、地すべり土塊の発生域では、土層の

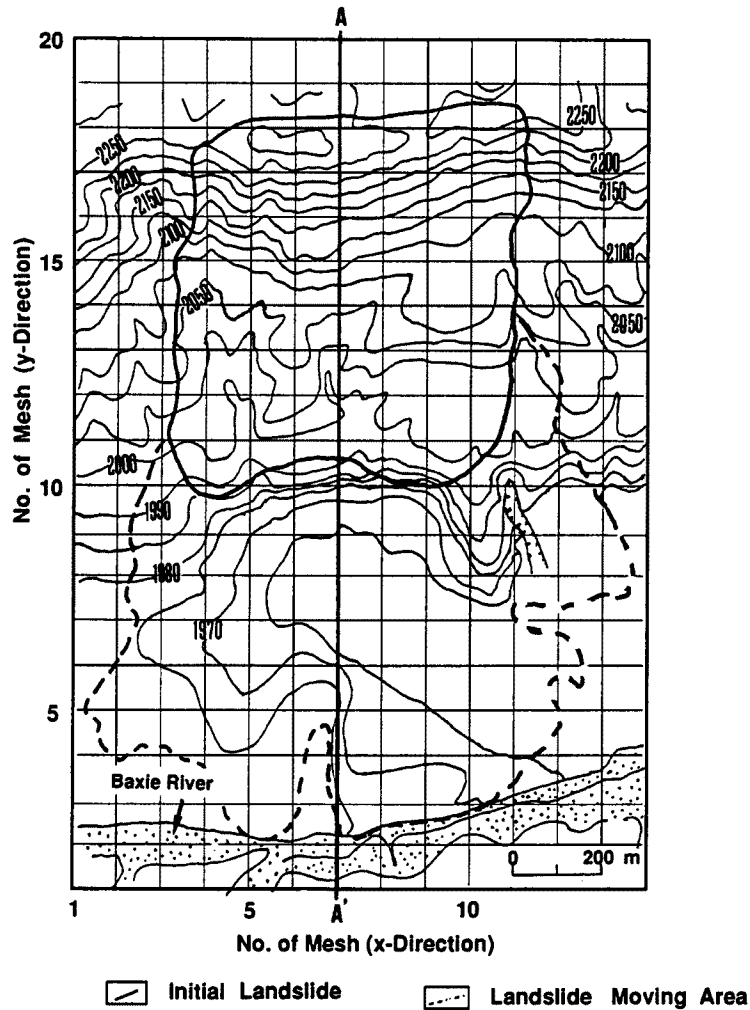


Fig. 2-1. Plan of the Saleshan landslide.
(by the Gansu Bureau for Geology and Mines)

マサツ角はほぼ残留時のマサツ角に近い値を発揮したと思われる。

一方、地すべり主要な堆積域の沖積地は文献¹⁸⁾の地すべり発生前の空中写真より、地すべり発生前は水田として利用されており、また、地すべり発生時は灌漑期と一致していたことから、沖積地の土層は飽和に近い状態となっていたと考えられる。したがって、地すべり土塊が動き出し、平坦な沖積層に到達すると、その時の間ゲキ水圧の形成は Fig. 3 の B タイプと相当したと推定できる。この場合、すべり面ではかなり高い過剰間ゲキ水圧が形成され、この土塊の運動時の見かけのマサツ角は、真のマサツ角よりかなり小さくなると想定される。

以上の考え方をもとに洒勒山地すべりの運動時の見かけのマサツ係数について、地すべりの発生域における土の残留時のマサツ角は一面せん断試験機の繰返し試験によって求め、地すべり運動域における沖積層の急速載荷時の見かけのマサツ角は高速高圧リングせん断試験機を用いた急速載荷試験¹³⁾により求めた。サンプル採取場所は、Fig. 2-2 に Sampling Point として示している場所であり、地すべりの発生域の三紀層については滑落崖から、堆積域の沖積層については河岸の露頭であった。

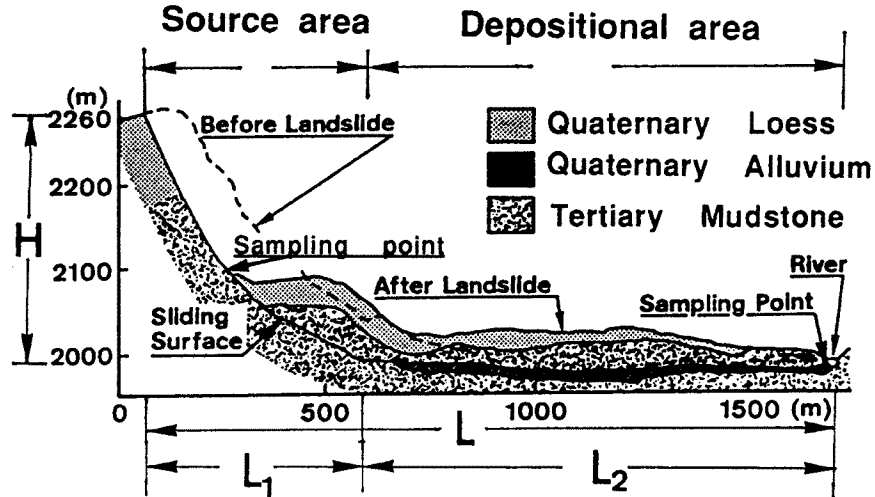


Fig. 2-2. A-A' cross section of the Saleshan landslide.
(by the Gansu Bureau for Geology and Mines)

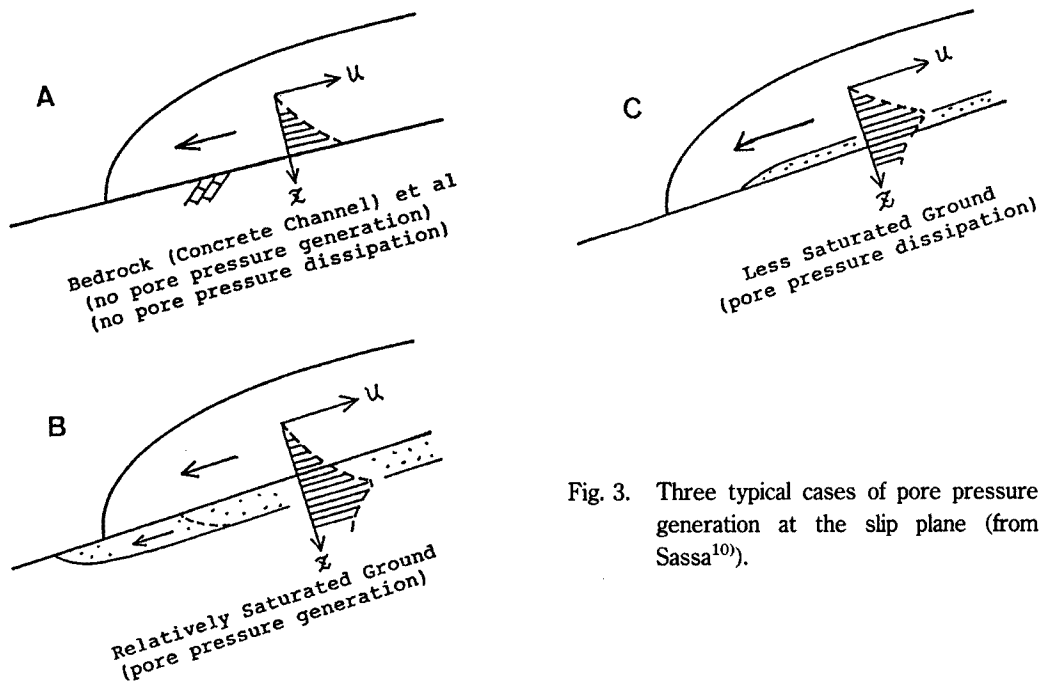


Fig. 3. Three typical cases of pore pressure generation at the slip plane (from Sassa¹⁰⁾).

2.2.1 一面せん断試験機による第三紀層の残留時のマサツ角の測定

残留時のマサツ角の測定はリングせん断試験機の方が望ましいが、サンプルが粘性土であり、試験に長時間を要することと、一面せん断試験機の繰り返し試験でも求められることから、文献⁹⁾に紹介したような一面せん断試験機で試験を行った。せん断箱は金属製の 10 cm×10 cm×10 cm の大きさで底面から 5 cm の所で、水平にせん断面ができるようになっている。

1) サンプルの作成

飽和サンプルを作成するために、採取したサンプルを小さな土塊に砕き、容器に入れて十分な水と混ぜ合わせ 3 日間放置して、その後、スラリー状になるまでねり返す。次にスラリー状になったサンプルをせん断

箱に移し、その上に載荷板を置き、さらにその上に重りを 5 kg ずつ、徐々に 30 kg まで乗せて圧密する。圧密終了後、さらにサンプルを入れて同じ方法で 3 回圧密を繰り返し、試験に適切な高さのサンプルを作成した。また、このサンプルは粘土を多く含み、透水係数は 10^{-8} のオーダーであるので、せん断中、排水しやすいようにせん断箱の上、下部に厚さ 1 cm の直径 2 mm のガラスビーズを敷き、ガラスビーズとサンプルの間にろ紙を入れた。

2) 試験方法

せん断箱の周りに水を注入後、所定の垂直応力 (50 ~ 150 kPa) で圧密する。圧密量と $\log t$ の関係をプロットして圧密の完了を確認してからせん断し始める。

試験は水浸下での排水試験とした。せん断過程ではせん断によって間隙水圧が発生しないように、せん断速度は十分緩いものにする必要がある。0.5 mm せん断し、間隙水圧が発散するまで 1 時間待つ。せん断の第一行程 (40 mm) が終わった後、せん断箱をもとの位置に押し戻し、サンプルの強度が残留値に落ち着くまでせん断を繰り返した。せん断箱を戻す行程においては、できるだけ粒子が乱されないように、垂直荷重を外して行った。一方、除荷にともなってサンプルは若干の膨張を起こしうるので、次のせん断行程においては、あらかじめ、2 ~ 3 時間程度の再圧密をしてからせん断した。

試験結果を $\sigma - \tau$ 図 (Fig. 4) で示す。ピーク時の強度定数は、

$$c'_p = 1.96 \text{ kPa}$$

$$\phi'_p = 29.5^\circ$$

残留時の強度定数は、

$$c'_r = 0$$

$$\phi'_r = 19.3^\circ$$

となった。

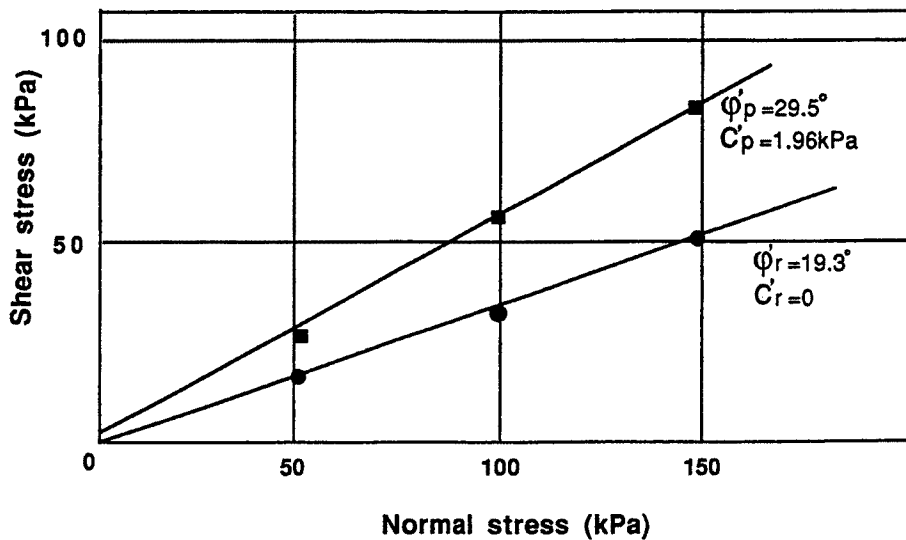


Fig. 4. Direct shear test on the tertiary deposit soil.

2.2.2. 高速高圧リングせん断試験による沖積層の急速載荷時の見かけのマサツ角の測定

1) 地すべりにおける急速載荷時の応力変化

佐々¹⁹⁾¹⁷⁾は Fig. 5 に示すように地すべり土塊が飽和した地盤に乗って進む時の地盤の応力変化を下記のように説明した。地すべり土塊が進んで来て地下水面の位置ですべる場合 (間ゲキ水圧は飽和度に大きく依

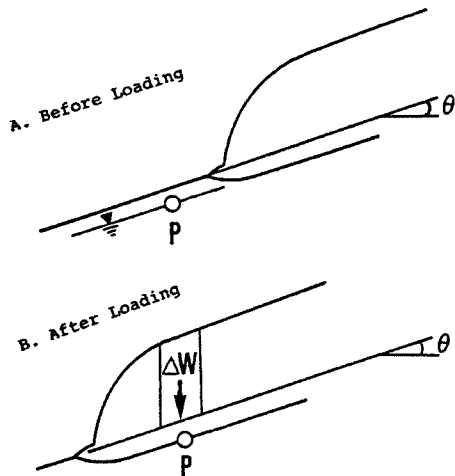


Fig. 5. Loading on a slope by a moving landslide mass (from Sassa¹³⁾).

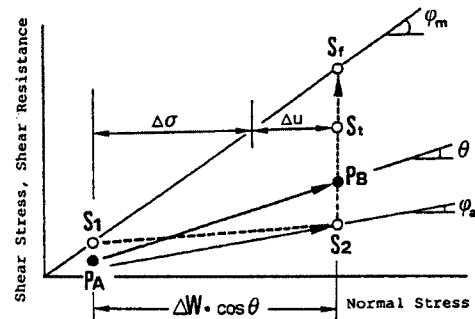


Fig. 6. Stress and shear resistance at the point P during loading.

存することと深くなるほどせん断しにくいのでこの場合が最も多い) を考える。Fig. 5 A の地下水面の位置にある P 点の応力はせん断応力—垂直応力図 (Fig. 6) において傾斜が斜面勾配と同じ θ の線上の点 P_A ($W \cdot \cos \theta$, $W \cdot \sin \theta$) にある。そして、地すべりが P の位置まで来たときに、 P 点にかかる応力 (Fig. 6 の P_A) は、運動土塊による自重の増分 ΔW によって垂直応力は $\Delta W \cdot \cos \theta$ 、せん断応力は $\Delta W \cdot \sin \theta$ だけ増加し、勾配 θ の線に沿っては Fig. 6 の P_B に移行する。一方、せん断強度を A , B の場合について計測すると、間ゲキ水圧がなければ、おのおの P_A , P_B 点の垂直応力に対応する破壊線上のせん断強度 S_1 , S_f になるはずである。

しかし、土塊の载荷による間ゲキ水圧 (Δu) が発生すれば、その分だけ有効垂直応力 ($\Delta \sigma'$) は小さくなり、せん断強度もそれに対応した値になる。その後、垂直応力が一定であれば、間ゲキ水圧が徐々に発散すると時間 t の時に S_t を経て、間ゲキ水圧ゼロになれば再び破壊線上の点 S_f に至る。Fig. 6 において A の場合には $S_1 > P_A$ なので、せん断は生じないが、 B の場合には、 $P_B > S_2$ なのでせん断応力の方がせん断強度より大きくなるので P 点でせん断が生じる。そして、この場合の見かけのマサツ角は原点と S_2 を結んだ直線の傾き ϕ_a になる。

2) 沖積層の急速载荷せん断試験結果

Fig. 6 で示したような見かけのマサツ角の低下が酒勒山地すべりにおける急速载荷時に生じるかどうか、酒勒山地すべりが運動した沖積地より採取したサンプルを用いて1989年に佐々により開発された高速高圧リングせん断試験機¹³⁾で試験してみた。高速高圧リングせん断試験機を用いて、 $\tan \phi_a$ を求める試験方法は、リングせん断試験機内のサンプルに P_A に相当する垂直応力を与えてせん断し、 S_1 を求めてから、せん断を継続しつつ、急激に急速载荷に相当する垂直応力 P_B を与え、せん断強度 S_2 と ϕ_a を求めるものである。具体的な試験手順は次の通りである。

サンプルを十分に飽和するために、まず、現場から採取したサンプルを水と混ぜ合わせ、スラリーサンプルを作り、次にサンプルボックスにセットし、予定した圧密より小さな応力で予圧密して成形した。試験方法は最初地下水面の深さ (2.0~2.5 m) の土被り圧力に相当する圧力 (37 kPa) で圧密後、0.014 cm/sec の低速度でせん断してせん断強度を求め、ついで、地すべり土塊による急速载荷急速せん断に対応するように、6.2 cm/sec の高速でせん断しつつ、150 kPa/sec の高速度で 333 kPa まで急速载荷した。急速载荷時の見かけのマサツ角を正しく求めるためには以下の条件が必要であることがわかっているので、本試験もこれを満足する条件で試験を行った¹⁷⁾。

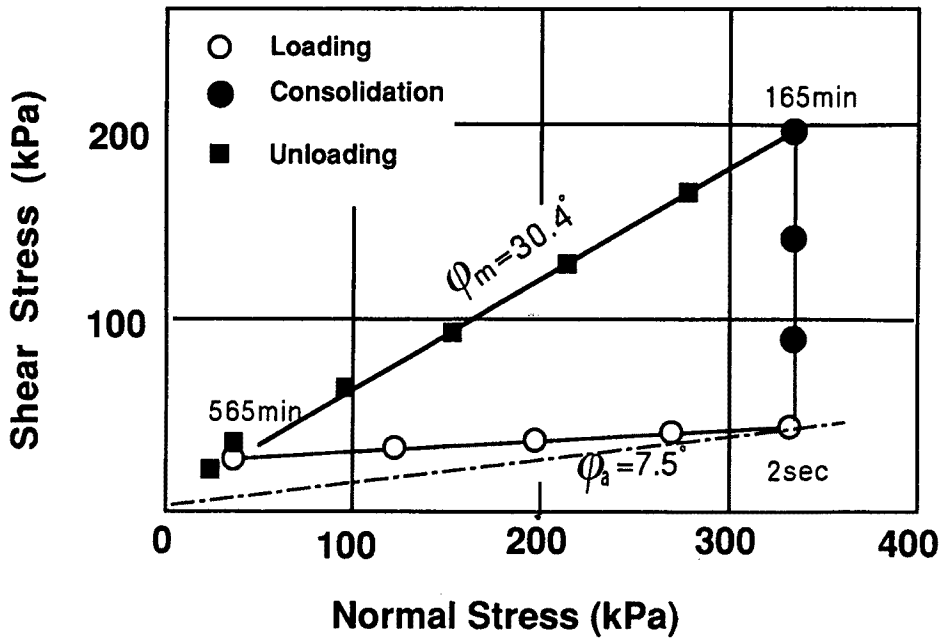


Fig. 7. Stress path of the rapid loading test (Sassa et al¹⁷⁾.
 Sample: Saturated alluvium soil, $e=0.49\sim0.64$
 Shear speed: 6.2 cm/sec in rapid loading,
 0.014 cm/sec in consolidation at 333 kPa,
 0.014 cm/sec in unloading from 333 kPa.

$$v_s \geq 0.01v_1 \dots\dots\dots (1)$$

v_s : せん断速度 cm/sec

v_1 : 荷重速度 kPa/sec

Fig. 7 は急速荷重 (○印) の後、試料内部に発生した間ゲキ水圧がせん断箱の上下端のポーラスメタルを通じて完全に発散 (●印) してから (すなわち、せん断強度が破壊線に到達してから)、次に負の間隙水圧が発生しないように垂直応力を徐々に低下 (■) させたものである。垂直応力の荷重量は酒靱山地すべりの場合 (運動土塊の厚さは平均で約 40 m, 785 kPa) より小さいが、これは試験機の容量が 0~390 kPa であるためである。間隙水圧ゼロで垂直応力を徐々に低下させたときに得られた直線がこのサンプルの破壊線であり、その傾きがこの土の運動時の真の内部マサツ角 ($\phi_m = 30.4^\circ$) を示している。見かけのマサツ角 (ϕ_a) は原点とせん断強度の各プロットを結んだ直線の傾きに相当し、急激荷重の直後にはその値は 7.5° となっていることが分る。

3. 改良そりモデルによる酒靱山地すべり運動機構の解釈

地すべりの運動モデルとしては Heim の (Kömer²⁰ 他により紹介されている) そりモデルがよく使われている。外力としては運動中の土塊重力と、土塊と斜面の間のすべりマサツだけを考え、(2)式の形で質点の移動として取り扱う。

$$m \frac{dv}{dt} = mg (\sin \theta - f_r \cdot \cos \theta) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 m は土塊の質量、 v はある時点での土塊の速度、 g は重力加速度、 θ はある時点で土塊が位置する斜面の傾き、 f_r は土塊と斜面の間の運動時の「見かけのマサツ係数」である。

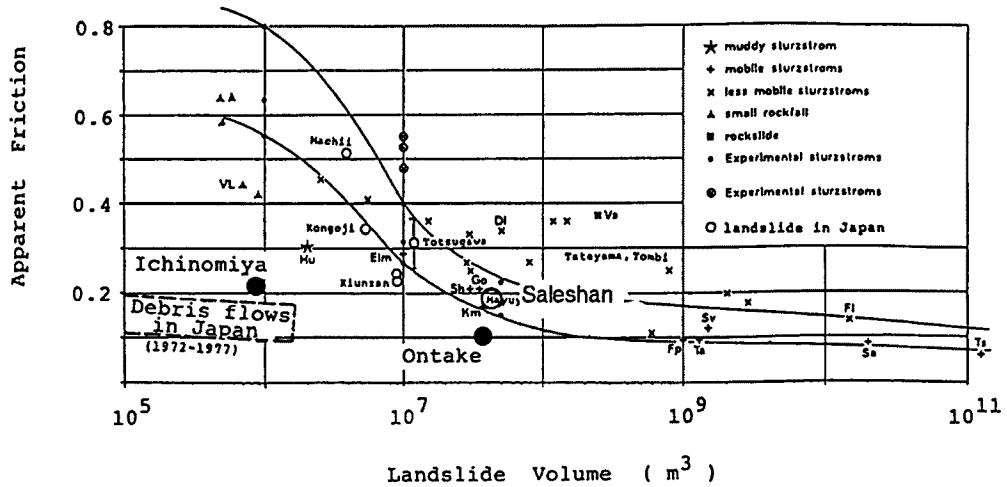


Fig. 8. Correlation between landslide volume and the apparent friction (by Sassa¹⁰⁾).

運動時の見かけのマサツ係数 $\tan \phi_a$ を推定する方法がなかったので、Scheidegger (1973)、Hsü (1975)、奥田 (1984) 等は、運動経路全体の平均の値として(3)式で地すべり運動後に逆算から求めた¹⁰⁾。

$$\tan \phi_a = f_r = H/L \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 H は移動開始から停止までに移動した土塊の高低差、 L は水平距離である。 f_r の呼称については、Scheidegger は、発生から停止までの平均のマサツ係数として平均マサツ係数、Hsü はマサツに等価な値として等価マサツ係数と呼び、これらの値は逆算でしか求められなかった。その後、佐々¹⁰⁾ はこの値を土塊の運動時のマサツ角と間ゲキ水圧から実験的に推定可能な量として「見かけのマサツ係数」と呼んだ。この論文でもこの用語を用いることにする。

Fig. 8 は逆算により求めた見かけのマサツ係数と地すべり土塊の体積であり、Hsü (1975) の図に奥田、佐々が日本の場合他を加えたものである (Sassa, 1988)。酒勒山地すべりの場合は断面図から H 、 L を求めて計算すると運動土塊のマサツ係数 $f_r = 0.18$ であり、この地すべりの $\tan \phi_a$ と崩壊土量の関係も、世界的な大崩壊とほぼ共通の傾向があることが認められる。

しかしながら、このような地すべりが起こった後の逆算による運動マサツ係数の推定方法は、地すべり運動予測としては不十分である。運動時のマサツ係数をあらかじめ土質試験その他で測定することができれば、地すべり災害の被害範囲・場所などの予知・予測にとって、大きな意味を持つと考えられる。佐々¹¹⁾ による改良そりモデルは運動時のマサツ係数を運動が予想される範囲の土層の土質試験により求めるものである。

佐々は、地すべり土塊の運動時の見かけのマサツ係数は、運動経路の屈曲や斜面土層の凹凸などによるエネルギー損失を無視すれば、土の真の運動時のマサツ角 ϕ_m と運動時の間ゲキ水圧 u で(4)式の形で表されると考えた。

$$\tan \phi_a = \frac{\sigma - u}{\sigma} \cdot \tan \phi_m \dots\dots\dots (4)$$

また、すべり面における間ゲキ水圧 u の発生機構としては Fig. 3 の3つの場合を考えた。御岳大崩壊や地附山地すべりのような長距離流動地すべりの場合は B の場合に相当すると考え、B の場合の間ゲキ水圧推定値としては、一面せん断状態の間ゲキ水圧係数 A_D 、 B_D を一面せん断試験機、三軸圧縮試験機を用いて測定する方法 (Sassa, 1988) と高速高圧リングせん断試験機を用いて間ゲキ水圧を含めた見かけのマサツ係数 $\tan \phi_a$ を直接測定する方法を提案した (佐々他, 1989)。ここでは、後者の方法で、すなわち、2.2.2で述べたリングせん断試験の急速載荷試験の結果 (Fig. 7) を用いて酒勒山地すべりの運動機構につ

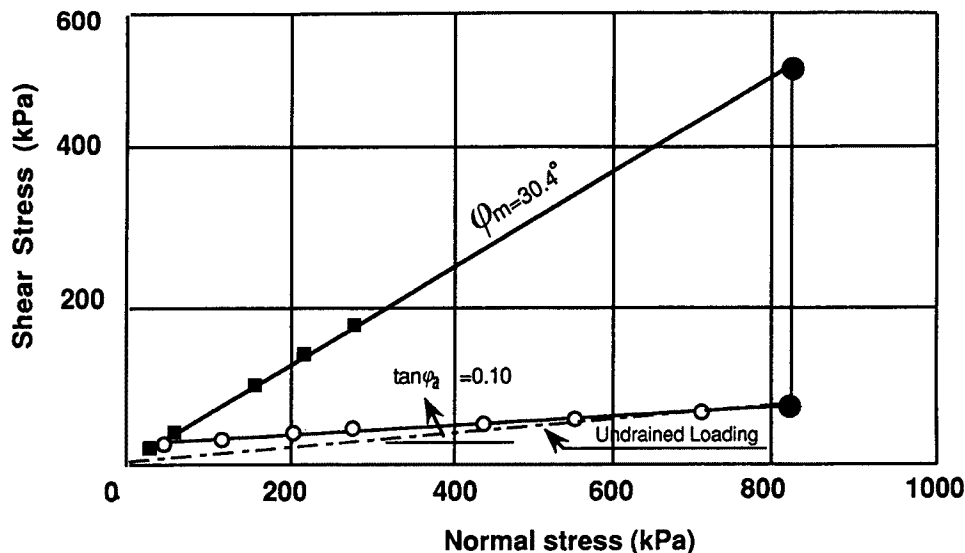


Fig. 9. Estimated apparent friction in the Saleshan landslide.

いて検討してみる。急速載荷時の見かけのマサツ係数の大きさは載荷した垂直応力により左右される。垂直応力の大きさは運動土塊の厚さによって決まる。

酒勒山地すべり発生前および発生後の堆積した土塊分布は、甘肅省地質局の調査により、かなり正確にわかっている²⁴⁾。この調査報告書に基づいて堆積土層の平均深さを求めると約 40 m になる。

ここで、地すべり移動土塊の平均深さを約 40 m、湿潤密度を約 2.0 g/cm³ と考えると、崩壊土塊が沖積層に与える垂直荷重は 785 kPa となる。Fig. 7 の垂直応力を拡大して、急速載荷時のせん断応力上昇勾配がそのまま続くと仮定すると Fig. 9 が得られる。この図からわかるように垂直荷重を 785 kPa 増加させ場合、すなわち、822 kPa の時の見かけマサツ係数は 0.10 になる。

一方、地すべり発生域では、地すべり面のほとんどは、第三紀層の泥岩であり、この土層の間ゲキ水圧は先述の如く 0 に近かったと想定され、また、地すべりはじわじわとクリープしていたことから地すべり土塊の強度は、ほぼ残留強度に近かったと思われる。

地すべり運動中の全体の平均の見かけのマサツ係数は発生域での第三紀層の残留時のマサツ係数 (tan φ_r = 0.35) と堆積域の急速載荷時の見かけのマサツ係数 (tan φ_a = 0.10) との距離を考慮した平均値になる。その値は次式で与えられる。

$$\overline{\tan \phi_a} = \frac{L_1 \cdot \tan \phi_r + L_2 \cdot \tan \phi_a}{L} = 0.19 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\overline{\tan \phi_a}$ は運動範囲全体の平均の見かけのマサツ係数、tan φ_r は地すべりの発生域の土層の残留時のマサツ係数、tan φ_a は沖積層の急速載荷時の見かけのマサツ係数である。L、L₁、L₂ はそれぞれ運動した土塊、地すべり発生域、地すべり堆積域の水平距離であり、Fig. 2-2 にその範囲に示す。

この実験から求めた値は土塊の運動の高低差 (H) と水平距離 (L) との比から求められる逆算による平均マサツ係数の値 0.18 とほぼ一致しているとわかった。

4. 酒勒山地すべりの運動のシミュレーション

佐々⁷⁾¹⁰⁾ は岩佐²²⁾、高橋²³⁾ などの洪水氾濫のシミュレーション方法を参考に地すべり運動のシミュレーションを提案した。ここでは、佐々の提案したシミュレーションモデルを用いて酒勒山地すべりのシミュ

レーションを行った。

4.1 シミュレーションの方法

地すべり・斜面崩壊の土塊が下に向かって運動をつづける時、一つの土塊としての移動と土塊がほぐされて拡散する運動が同時に進行をつづけて、その複合的な結果として崩壊土塊の到達範囲が決定されると考えられる。すなわち、1) どこまで運動するか？ 2) どれだけ広がるか？の二つの問題は地すべり運動予測の基本的な課題である。佐々の提案したシミュレーションモデルでは、1)の問題については、前節で述べた運動時の見かけのマサツ角で表現し、2)の問題については、水平土圧係数を基礎式のなかに導入することにより材料の変形特性を表現した。水平土圧係数は液体では1.0、剛体では0、土はその中間であり、運動土塊内部のマサツ角と間ゲキ水圧により決定される。

Fig. 10 は運動中の土塊の模式図である。この土塊内に水平面 (X-Y平面) 上で単位長さ $\Delta x, \Delta y$ になるような鉛直なコラムを考える。Fig. 11 はそのコラムにかかる力を示したものである。コラムにかかる力(自重と水平土圧と底面でのマサツ)のベクトル和がコラムの加速に用いられるので、次式が成り立つ。

$$a \cdot m = W_p + \frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_y}{\partial y} + R \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $W_n + N = 0$

a : 加速度ベクトル, m : 質量

W_p, W_n : W の斜面方向と斜面に垂直な成分。

運動速度の深さ方向の変化は重要でないので、深さ方向には一定の平均速度 (u_0, v_0) を考え、(6)式を x, y 成分にわけて表現したものが(7), (8)式である。また、(9)式は土塊の運動中の密度変化は無視できるとして、 x, y 方向からコラムに流入する土量だけコラムの高さが増大する時の関係式(連続式)である。

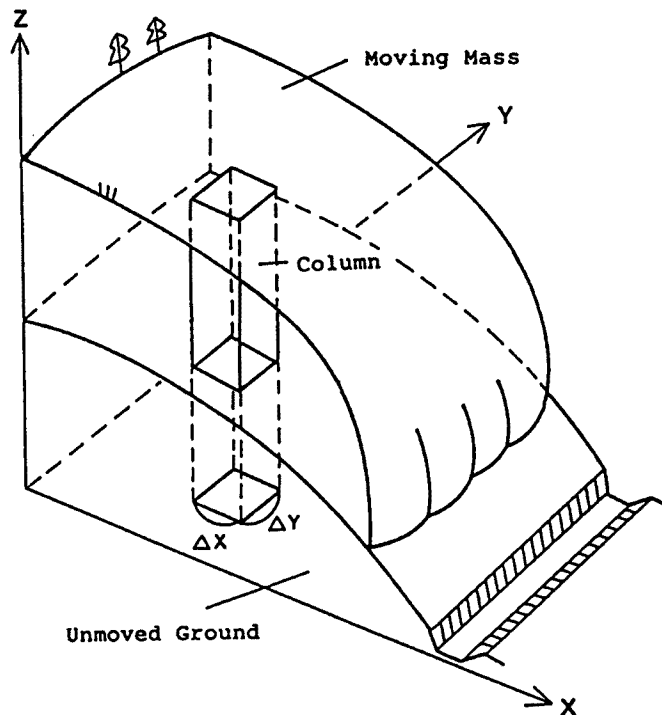


Fig. 10. Moving landslide and an element in it (from Sassa⁷⁾).

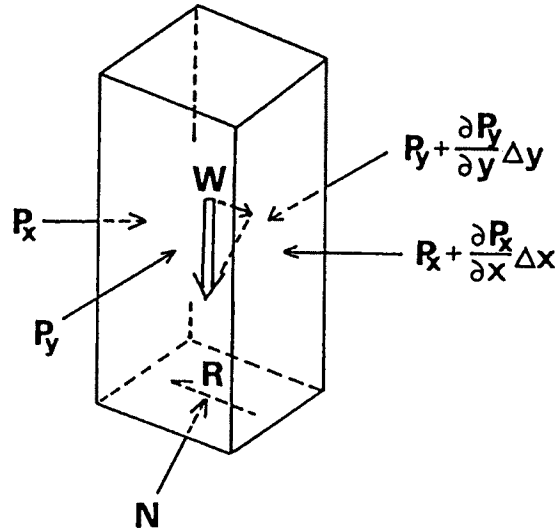


Fig. 11. Forces acting on an element (from Sassa⁷⁾).

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_0 M) + \frac{\partial}{\partial y} (v_0 M) = gh \frac{\tan \alpha}{q+1} - kgh \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{g}{(q+1)^{1/2}} \cdot \frac{u_0}{(u_0^2 + v_0^2 + w_0^2)^{1/2}} \{h_c (q+1) + h \tan \phi_a\} \dots (7)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_0 N) + \frac{\partial}{\partial y} (v_0 N) = gh \frac{\tan \beta}{q+1} - kgh \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{g}{(q+1)^{1/2}} \cdot \frac{v_0}{(u_0^2 + v_0^2 + w_0^2)^{1/2}} \{h_c (q+1) + h \tan \phi_a\} \dots (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots (9)$$

ただし、

h : コラムの高さ, u_0, v_0 : x 方向, y 方向の平均流速

M, N : x, y 方向の単位巾あたりの流量,

$M = u_0 \cdot h, N = v_0 \cdot h$

g : 重力加速度, k : 水平土圧係数

ϕ_a : 見かけのマサツ角

α, β : 要素底面が x 軸, y 軸となす角度, h_c : 粘着カヘッド ($c = \rho gh_c$), c : 粘着力, ρ : 密度,

$q = \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta, w_0 = - (u_0 \tan \alpha + v_0 \tan \beta)$

(7), (8), (9) 式を差分式に変形して計算機で解けば、地すべりの運動のシミュレーションが可能である。

4.2 初期条件の考え方

シミュレーションを行うために、Fig. 2-2 を用いて、この地すべりの発生域、運動域を含む範囲を 100 m 毎に縦20横14のメッシュに切った。各メッシュ毎の地すべりの発生前の土塊の深度分布は、甘肅省地質局によって作成された地すべり発生前の地形図と不動岩盤の地形図から求めた。Fig. 12 はその結果を7段階に分けて表示したものである。

見かけのマサツ係数については、一面せん断試験とリングせん断試験の結果に基づき、3つのブロックに分けた。地すべりの発生域では第三紀層の土の残留マサツ係数0.35を、沖積地では急速載荷時の見かけのマ

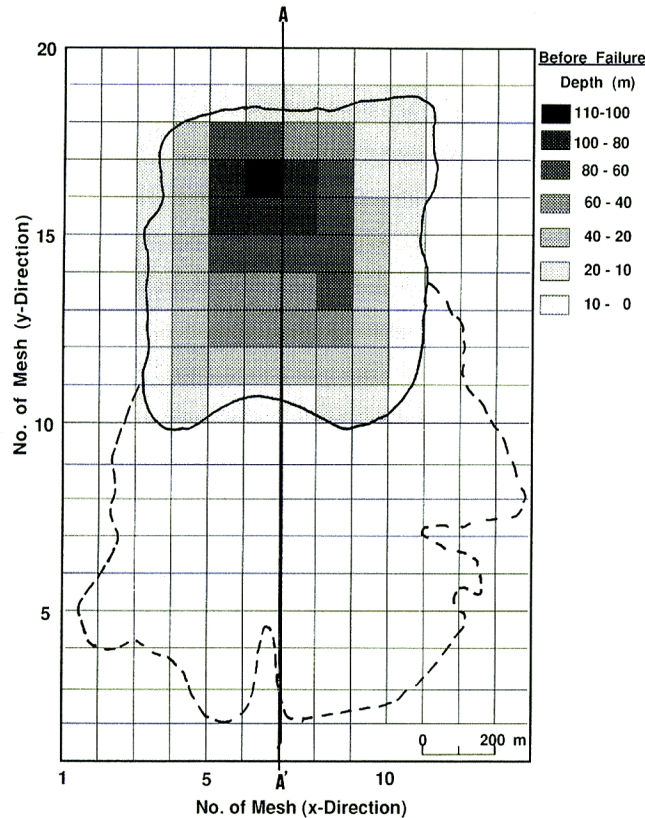


Fig. 12. Soil depth distribution before motion.

サツ係数0.10を用いた。他の区域では土層が飽和していないことから、地すべり土塊により急速荷重を受けても、過剰間ゲキ水圧は発生しないと考えられることと、事前にクリープを受けていなかったと推定されるので、第三紀層のピークの時のマサツ係数を用いた。その値は Fig. 4 より $\tan 29.5^\circ = 0.57$ である。Fig. 13 に見かけのマサツ係数の分布を示している。

水平土圧係数 k は佐々⁷⁾ によって(10)、(11)式で求めることが提案されている。

$$k = 1 - \sin \phi_{ia} \dots\dots\dots (10)$$

$$\tan \phi_{ia} = \frac{\sigma - u}{\sigma} \cdot \tan \phi_{im} = (1 - r_u) \cdot \tan \phi_{im} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 ϕ_{ia} は土塊内部の運動時の見かけのマサツ角、

ϕ_{im} は土塊内部の運動時の真のマサツ角

$$r_u : \text{間ゲキ圧比}, r_u = \frac{u}{\sigma}$$

洒勒山地すべりは乾燥地域において無降雨の時に発生したことから、地すべり土塊内部の間ゲキ水圧は0と考えられるので、

$$k = 1 - \sin \phi_{im} \dots\dots\dots (12)$$

となる。

洒勒山地すべりの運動土塊は第三紀層の泥岩とレスからなるが、運動土塊の拡散により寄与しているのは、運動土塊の下部を占める第三紀層の土と思われる。第三紀層の土を不飽和状態（飽和度29.3%）、排水条件で三軸試験を行ったところピーク時のマサツ角は 43.2° 、20%ヒズミの時に発揮されるマサツ角は 36.9° であった (Fig. 14)。また、比較的外見の似ている地附山地すべりの運動土塊の不飽和時のマサツ角をリングせん断機で大変位を与えて求めたところ 37.5° (佐々他¹³⁾) であった。そこで、試験は十分ではな

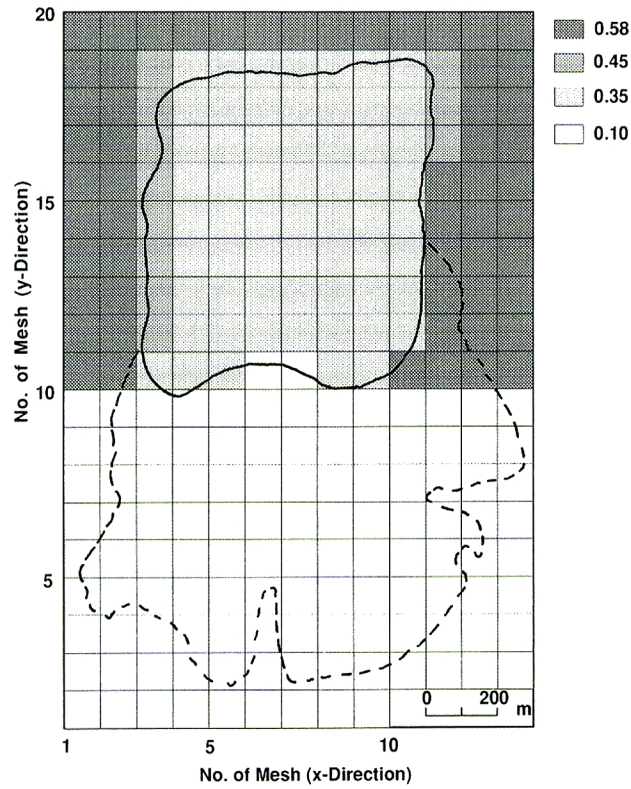


Fig. 13. Estimated values of the apparent friction.

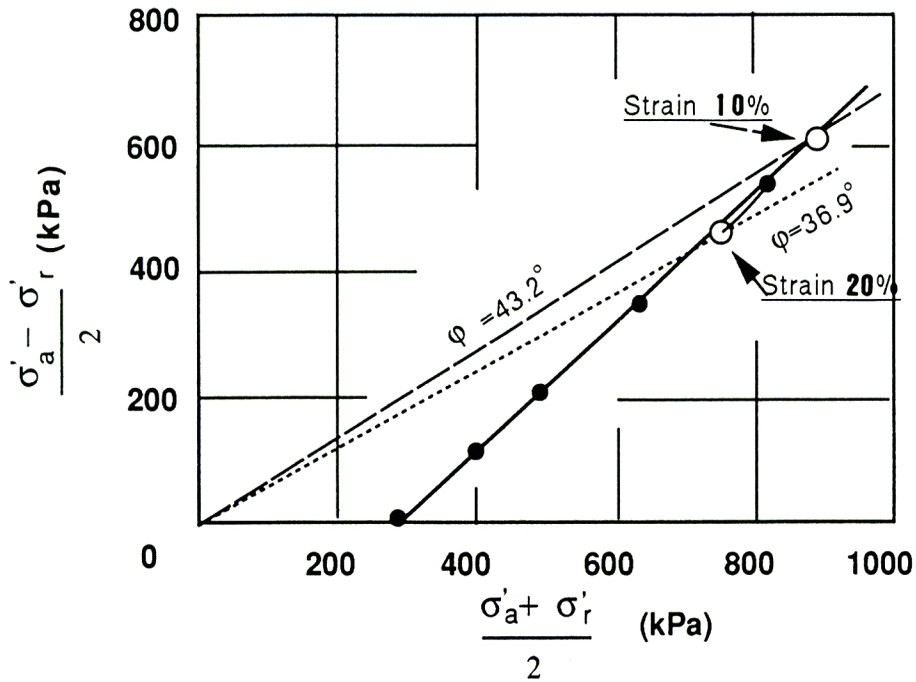


Fig. 14. Consolidated-drained triaxial test on the unsaturated tertiary deposit soil ($S_r = 29.3\%$).

いが、洒勒山地すべりの運動土塊があまり拡散せず、塊となって移動したことも考慮して、洒勒山地すべりの運動時の土塊内部見かけのマサツ角を $\phi_{ia} = \phi_{im} = 37^\circ \sim 44^\circ$ 、したがって、水平土圧係数は $k = 0.3 \sim 0.4$ であったと推定した。そこで、 $k = 0.3$ と 0.4 を用いてシミュレーションを行った。

4.3 計算結果

Fig. 15-1 ~ **Fig. 15-2** に $k = 0.3$ でシミュレーションを行った結果を示している。**Fig. 15-1** は運動中の地すべり土塊で、**Fig. 15-2** は停止後の地すべり分布である。アミを掛けた部分が地すべり土塊のある所を示し、その濃さが地すべり土塊の深さを示している。図中に実線で示した地すべり発生域及び点線で示した地すべり運動範囲と比較すると、計算した土塊の運動距離、広がり範囲はほぼ実際現象と一致していることがわかる。また、**Fig. 2-2** に示す $A - A'$ 断面の地すべり土塊の深度分布と比較しても、平均深度 40 m と実際とはほぼ一致している。

一方、水平土圧係数 $k = 0.4$ で計算した結果が **Fig. 16** である。この場合は、実際より少し流動性が高

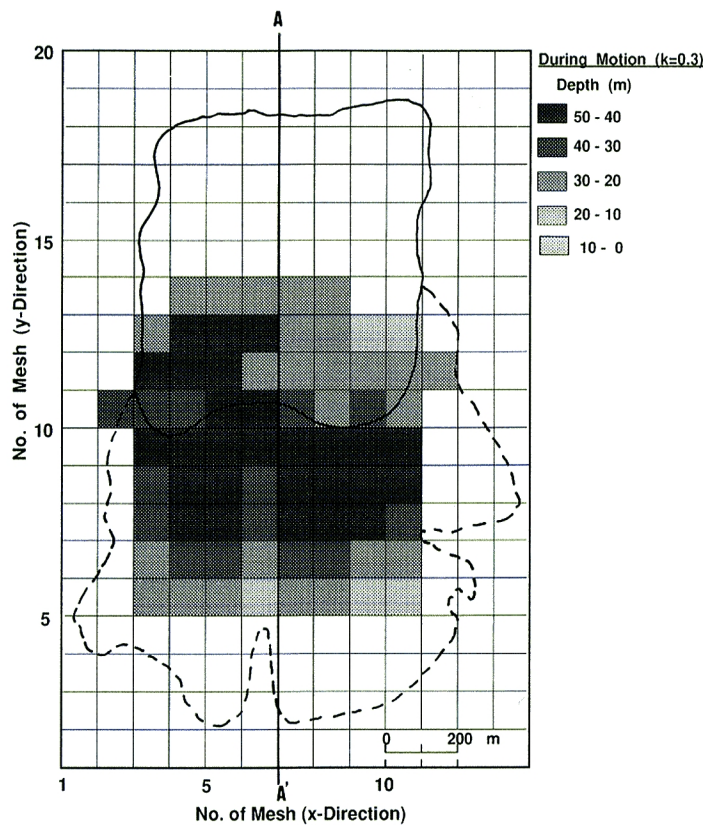


Fig. 15-1. Calculated soil depth distribution during motion ($k = 0.3$).

すぎるように見え、 $k = 0.3$ の場合ほど実際の運動との対応が良くないが、それほど大きな差はない。

5. おわりに

洒勒山地すべりの運動機構を調べるために、佐々の提案した改良そりモデルとシミュレーション・モデルをもとに、実験的、理論的な検討を行い、次の結論を得た。

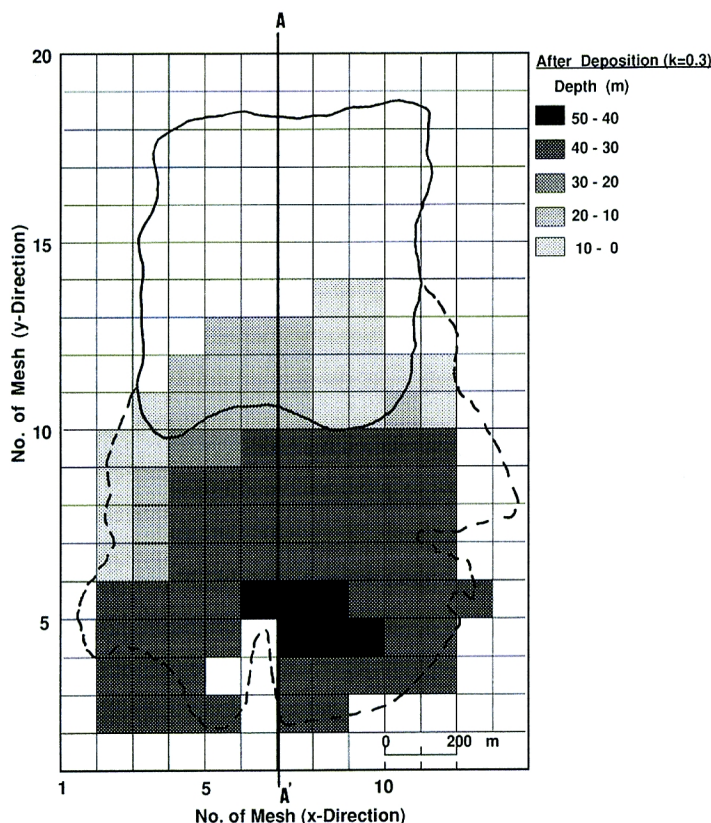


Fig. 15-2. Calculated soil depth distribution after the deposition ($k=0.3$).

1) この地すべりが平坦面を800 mも移動した原因としては、日本の御岳大崩壊、地附山地すべりと同じく、飽和した土層に急速に地すべり土塊が乗ったために非排水状態になり、過剰間ゲキ水圧が発生し、マサツ抵抗が減少したものと推定される。

2) 一面せん断試験機の繰り返し試験によって第三紀層の土の残留時のマサツ角を求め、高速高圧リングせん断試験機によって沖積層の急速載荷時の見かけのマサツ係数を測定した。発生域の残留時のマサツ係数と堆積域の急速載荷時の見かけのマサツ係数を用いて、この地すべり運動時の平均の見かけのマサツ係数を求めたところ。この値はそりモデルで運動土塊の高低差 (H) と水平距離 (L) の比から逆算した値とほぼ一致した。

3) 佐々の提案したシミュレーション・モデルを用いて酒勒山地すべりのシミュレーションを行った。この地すべりの移動距離、広がり範囲、地すべり後の崩壊土塊の深度分布など実際に生じた現象をほぼ再現できた。佐々¹⁰⁾は、御岳大崩壊の運動に対して、このシミュレーション方法を用い、実際の地すべり土塊の運動と良く似た動きを再現したが、土塊の運動時の間ゲキ水圧の推定を一面せん断状態での間ゲキ圧係数 A_b , B_b から推定していたのに対し、今回は、急速載荷時に発揮される間ゲキ水圧も含めて、地すべり土塊の運動時にせん断面で発揮される見かけのマサツ係数を直接測定してシミュレーションを行ったので、水平土圧係数の推定に逆算的な要素があるが、Hindsight (あと知恵) の余地は少なくなっており、真の意味での運動予測に、より近づいたと言える。

最後に、本研究の実施にあたり協力していただいた京都大学防災研究所地すべり部門の院生の李 宗學氏、研修員の福岡 浩氏及び中国甘肅省地質災害研究所の曾思偉教授、趙 冬至助手に感謝の意を表します。

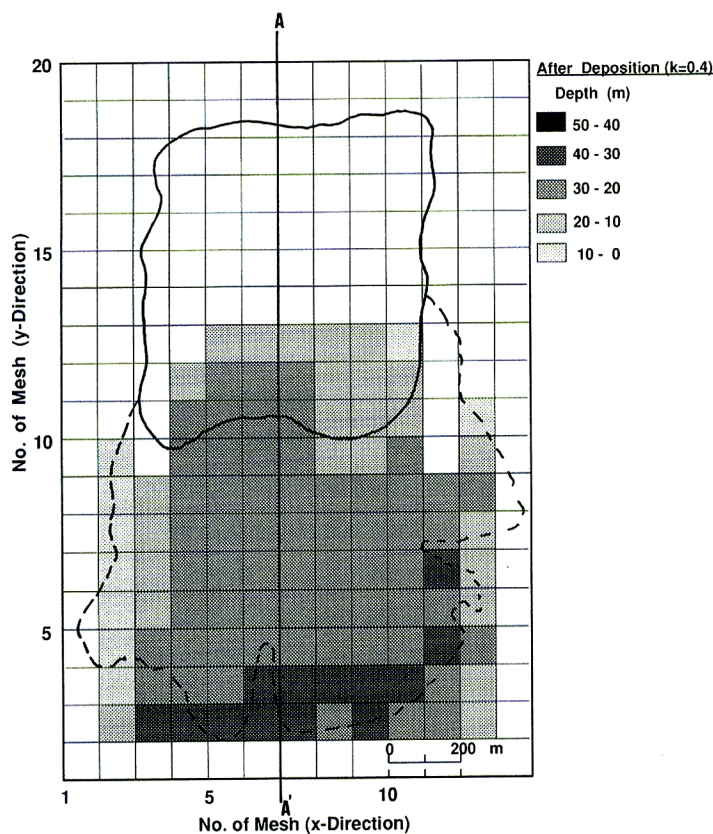


Fig. 16. Calculated soil depth distribution after the deposition ($k=0.4$).

参 考 文 献

- 1) 甘肅科学委員会：洒勒山滑坡綜合考察報告，水土保持通報，Vol. 13, No. 3, 1983, pp. 2-7 (同日本語訳，1983年中国甘肅省洒勒山地すべり，地すべり Vol. 20, No. 4, 1984, pp. 28-33)
- 2) Liu Chengyu, Wu Xingming: On the Deformational Destruction of Saleshan Landslide and Its Mechanism of High Slipping Speed and Sliding Long Distance, Proc. The China-Japan Field Workshop on Landslides, Xian-Lanzhou, 1987, pp. 19-24.
- 3) Xu Junling: Three Elements for Forming High Speed Landslide and Its "Floodgate" Effect, Proc. The Japan-China Symposium on Landslides and Debris Flows, Niigata and Tokyo, 1989, pp. 93-97.
- 4) 佐々恭二：御岳土石流など不飽和土石流の流動機構について，京都大学防災研究所年報，第29号 B-1, 1986, pp. 315-329.
- 5) 佐々恭二：速い地すべりの運動機構について，地すべり学会関西支部シンポジウム「突発地すべりの予知・予測」資料集，1986, pp. 15-41.
- 6) 福岡 浩，佐々恭二，島 通保：長野市地附山地すべりの土質特性と運動，京都大学防災研究所年報，第30号 B-1, 1987, pp. 359-371.
- 7) 佐々恭二：地すべり・斜面崩壊の運動予測，京都大学防災研究所年報，第30号 B-1, 1987, pp. 341-357.
- 8) 佐々恭二：改良そりモデルによる地すべり・斜面崩壊の運動予測，昭和62年度砂防学会概要集，1987,

- pp. 68-71.
- 9) 佐々恭二：地すべり・斜面崩壊の面的予測法，第26回地すべり学会概要集，1987，pp. 16-19.
 - 10) Sassa, K.: (Special Lecture) Geotechnical Model for the Motion of Landslides, Proc. 5th International Symposium on Landslides, Vol. 1, 1988, pp. 37-56.
 - 11) 佐々恭二：地すべり・斜面崩壊の災害危険地図の作成方法について，昭和63年度砂防学会概要集，1988，pp. 69-72.
 - 12) 佐々恭二：御岳大崩壊の運動のシミュレーション，第27回地すべり学会概要集，1988，pp. 136-139.
 - 13) 佐々恭二，福岡 浩，島 通保：高速高圧リングせん断試験機の開発と地すべりにおける急速載荷時のせん断強度変化，京都大学防災研究所年報，第32号 B-1，1989，pp. 165-182.
 - 14) 佐々恭二：地すべり運動時のマサツ角と運動予測，地すべり学会関西支部シンポジウム「地すべりの c , ϕ と発生・運動予測」資料集，1989，pp. 41-56.
 - 15) 福岡 浩・佐々恭二・島 通保：高速高圧リングせん断試験機による砂質土・粘性土のせん断特性，京都大学防災研究所年報，第33号 B-1，1990，pp. 179-190.
 - 16) 小橋澄治・佐々恭二：地すべり・斜面崩壊を防ぐために，山海堂，1990，pp. 37-44.
 - 17) K. Sassa, H. Fukuoka, J.H. Lee, D.X. Zhang: Measurement of Apparent Friction Angle during Rapid Loading by the High-Speed High-Stress Ring Shear Apparatus -Interpretation of the Relationship between Landslide Volume and the Apparent Friction during Motion-, Proc. of 6th International Symposium on Landslides, 1992, Vol. 1, pp. 545-552.
 - 18) 福岡正己：レス地帯の高速地すべり，地すべり技術，Vol. 11, No. 3, 1985，口絵写真
 - 19) 奥田節夫：歴史的記録からみた大崩壊の土石堆積状態の特性，京都大学防災研究所年報，第27号 B-1，1984，pp. 353-368.
 - 20) K'örner, H：山崩れとなだれの運動の予測のためのモデル，国際自然災害防止シンポジウム (INTERPRAEVENT 1980) 論文集 (日本語訳)，砂防学会，1982，pp. 169-206.
 - 21) Shreve, R.L.: The Blackhawk Landslide, Geological Society of America, Special Paper 108, 1968, pp. 1-49.
 - 22) 岩佐義郎，井上和也，水島雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号 B-1，1980，pp. 305-317.
 - 23) 高橋 保，中川 一，西崎丈能：堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，第29号 B-2，1986，pp. 431-450.
 - 24) 甘肅省地質鉞山局：甘肅省東郷県巴謝河流域滑坡類型分布及斜坡穩定性評価，1986，pp. 30-53.