

1984年の長野県御岳の大崩壊、1985年の長野市地附山の地すべりはその運動距離が大きかったために多大の被害を及ぼした。このような早く、大きく動く地すべりや斜面崩壊の場合、運動の予測による土地利用規制、警戒・避難による被害軽減策が重要である。そのためには信頼し得る災害危険地図の作成が必要であるが、その基礎となるのは土塊の運動を支配する法則とその定数の決定法の確立である。

1. そりモデルについて

地すべり・斜面崩壊の運動を支配する法則の中心は、マサツ則であり、マサツ則を用いた土塊の運動モデルでもっともよく用いられているものはハイム（1932）のそりモデルである。このモデルは、その後シャイデガー（1973）、シュウ（1975）ほか多くの研究者によって用いられている。そりモデルにおける土塊の運動中のマサツ係数の原因は明確ではないので、シャイデガーは平均マサツ係数、シュウは等価マサツ係数と呼んでいる。原因が明らかでなかったため、佐々（1985、1986）まで、その決定は生じた運動からの逆算以外にはなかった。

いま、土塊の運動中のマサツ係数を $\tan \phi_a$ と表わすと、図1において位置エネルギー（ $mg h$ ）をもつ土塊が、水平距離（ x ）だけ進んだ時に消費するエネルギー（ E_f ）は（1）式で表わされる。（図1ではエネルギーを mg で割って長さの単位で表わしている。）

$$E_f = \int_0^x mg \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi_a \cdot \frac{dx}{\cos \theta} = mg \cdot x \cdot \tan \phi_a \quad (1)$$

図1より、土塊の出発点の重心より、角度 ϕ_a で引いた線（エネルギー線と呼ぶ）がその地点において運動土塊が持っている総エネルギーを表わすこと、したがって、エネルギー線と運動中の土塊の重心との差が、その点での運動エネルギー（ $v^2/2g$ ）になることが分かる。運動エネルギー0の点が土塊の停止点である。

2. 土塊の運動時のマサツ角、及び間ゲキ水圧

土塊の運動時のマサツ角を調べるために高速リングせん断試験機を開発し（佐々、1984）、マサツ角が運動速度によって変化するか否かを調べた。図2は、直径1mmのガラスビーズを用いた試験結果である。マサツ角は速度を1万倍変化させても一定である。図3は直径0.2mmのガラスビーズでの試験結果である。マサツ角は、ガラスビーズの丸み度（Roundness）が異なるため少し大きい速度の影響は見られない。2mmのガラスビーズでも同様にマサツ角は一定だったので、相似則が成り立つとすると、直径0.2mmのビーズでの1m/secは2mmのビーズでの10m/secに相当し、御岳大崩壊のような高速の運動でもマサツ角の速度依存性はないものと推定できる。（間ゲキ流体の粘性抵抗については水の約1500倍の粘性係数を持つグリセリンで飽和して実験を行なったが、実験範囲の0.1kgf/cm²以上の拘束圧の下では粘性項の影響は見られなかった。佐々1986）

マサツ角が運動中も変化しない場合、御岳や地附山のような緩勾配の斜面の運動が生じるには、高い間ゲキ水圧が発生していなければならない。佐々（1985、1986）は濡れた泥道で足を滑らせる現象や雨の高速道路での車のスリップ（ハイドロプレーニング現象）と同じく、飽和度の高い地盤、ま

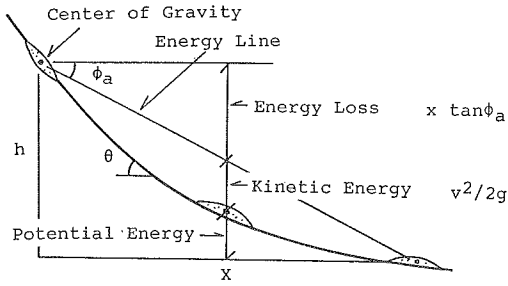


図1 そりモデルによる土塊の運動

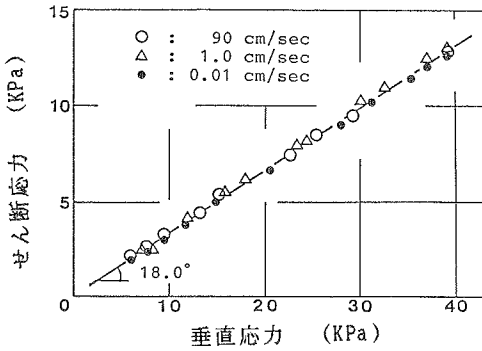


図2 高速リングせん断試験の結果
1 mm のガラスビーズ ($e = 0.63-0.64$)

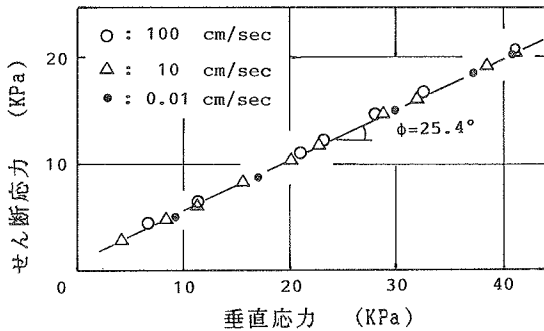


図3 高速リングせん断試験の結果
0.2 mm のガラスビーズ ($e = 0.70-0.72$)

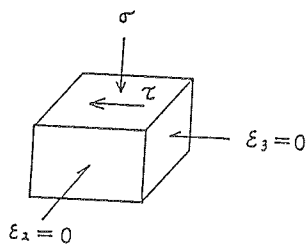


図4 直接せん断状態にある土の要素

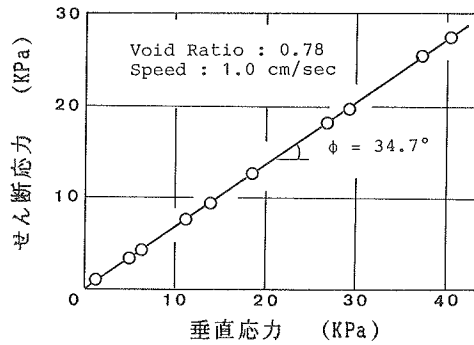


図5 高速リングせん断試験の結果
伝上川の溪床堆積物 (0-9.8 mm)

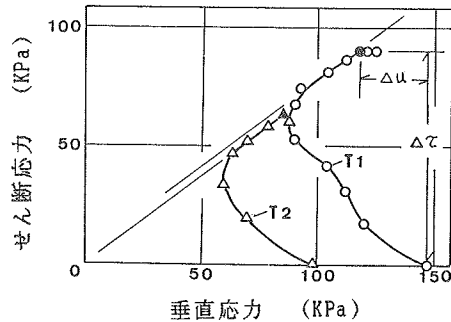


図6 定体積一面せん断試験の結果
伝上川の溪床堆積物 (0-9.8 mm)
T1 : $e = 0.76$, $A_D = 0.33$
T2 : $e = 0.82$, $A_D = 0.20$

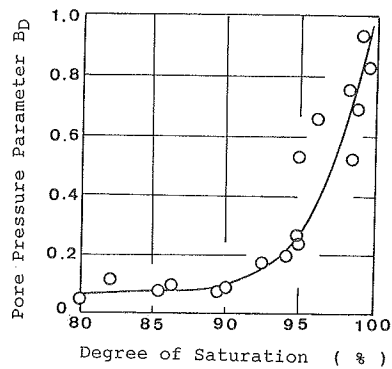


図7 三軸試験による B_D (B) 値の測定
伝上川の溪床堆積物 (0-4.76 mm)

たは溪床堆積物：の非排水載荷による間ゲキ水圧発生がその原因と考えた。地盤に土塊が乗った場合を、直接せん断状態と考え（図4）、その時に発生する間ゲキ水圧を（2）式で表わした。（2）式はスケンプトンの非排水三軸圧縮試験に対する間ゲキ水圧の表現する式（3）と同じ形であり、その係数間には、 $B_D = B$ 、 $A_D = 2A$ の関係がある（1986）。

$$\Delta u = B_D(\Delta\sigma + A_D \cdot \Delta\tau) \quad (2) \quad \Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)) \quad (3)$$

A_D, B_D, A, B ：間ゲキ水圧係数 $\Delta u, \Delta\sigma, \Delta\tau, \Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$ ：間ゲキ水圧、垂直応力、せん断応力、最大主応力、最小主応力の増分

3. 改良そりモデルとその適用

間ゲキ水圧の影響を含めた見かけのマサツ角（全応力表示でのマサツ角） $\tan\phi_a$ は、次ぎのように求められる。せん断面でのせん断応力増分は、（4）式で表わされ、地盤の密度と上に乗った土塊の密度を同じとして近似すると、（5）式の関係がある。

$$\Delta\tau = \tau_f - \tau_0 = (\sigma_0 + \Delta\sigma - \Delta u)\tan\phi - \tau_0 \quad (4) \quad \frac{\sigma_0}{\Delta\sigma} = n, \quad \frac{\tau_0}{\Delta\sigma} = n \cdot \tan\theta \quad (5)$$

τ_0, σ_0 ：初期のせん断応力、垂直応力 τ_f ：せん断強度 h, d, θ ：運動土塊の厚さ、地盤のせん断深さ（えぐれた深さ） θ ：斜面勾配 $n = d/h$

運動時のマサツ角を ϕ_m と表わすと、 $\sigma \cdot \tan\phi_a = (\sigma - u) \cdot \tan\phi_m$ なので、この関係と（2）、（4）、（5）式から、（6）式が得られ、地盤のせん断深さが無視できる場合（ $n = 0$ ）には、（7）式になる。

$$\tan\phi_a = \frac{1 - \frac{1}{n+1}B_D + \frac{n}{n+1}A_D \cdot B_D \cdot \tan\theta}{1 + B_D \cdot A_D \tan\theta} \cdot \tan\phi \quad (6) \quad \tan\phi_a = \frac{(1 - B_D)\tan\phi}{1 + B_D \cdot A_D \tan\theta} \quad (7)$$

（6）、（7）式より求めた $\tan\phi_a$ を図1のそりモデルに適用すれば、これまでのように逆算ではなく、運動が生じる場所（地盤）とその状態に対応するマサツ係数が決定できる。運動時のマサツ角、間ゲキ水圧より決定したマサツ係数を用いるそりモデルを改良そりモデルと呼ぶことにする。

図5は御岳大崩壊が流下した伝上川の溪床堆積物の高速リングせん断試験機の結果であり、運動時のマサツ角は34.7度である。図6は同じサンプルの定体積（体積変化0なので、 $B_D = 1.0$ に相当する）一面せん断試験の結果である。間ゲキ水圧係数 A_D （ $\Delta u / \Delta\tau$ ）は、歪によって変化するが、破壊時（最大せん断応力時）の時の値をとると、0.20-0.33になる。図7は同じサンプルのB値（ B_D と同じ）と飽和度の関係である。水を満水状態にすると、水を通す時間に比例して飽和度が上昇し、飽和度で95-100%、B値で0.5-0.9になる。御岳の流動の解析にあたっては、斜面および常時は表面流が見えない伝上川源頭部では、0.6、伝上川の溪床では0.8、濁川との合流点以下では十分に飽和していると考えて0.9とした。これらの値を（7）式に代入して求めたエネルギー線が図8のA-B-C-Dである。このエネルギー線より、土塊の停止点は濁川と王滝川の合流点近辺となり、その運動速度はエネルギー線と土塊の重心の距離（ $v^2/2g = 40m$ ）より、約22m/secと算定され、停止位置、推定流動速度20-26m/secとも現実の運動と同じになる。

地附山の運動を調べるために地附山の深礎工の深さ6mよりサンプル（褐色のレキ混じり粘土）を採取し、高速リングせん断、定体積一面せん断試験、三軸試験による B_D 値の測定を行なった。その結果、現在まで試験回数は多くないが、運動時のマサツ角は34.7度、 A_D 値はかなり高く1.3-2.2

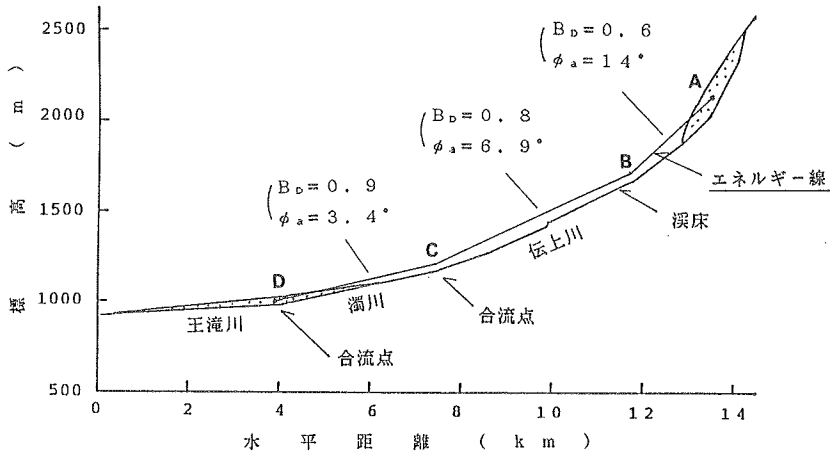


図8 御岳大崩壊の運動と算定されたエネルギー線

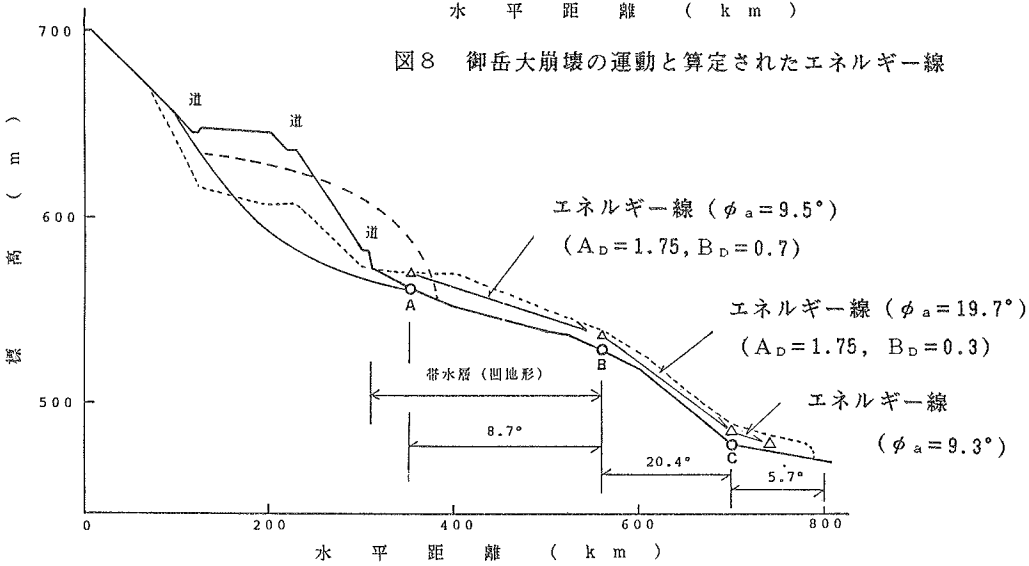


図9 地附山地すべりの運動と算定されたエネルギー線

(1.75を計算に用いた), B_D 値は湛水状態に近かったと思われる図9のA-B区間(および崖下のC点以下)に対応すると思われる飽和度98%前後で0.7、単に雨が浸透したのみと思われる急傾斜部(B-C区間)で飽和度90%前後で0.3と推定した。 B_D 値、マサツ係数とも、まだ実験不十分であるが、これらの推定値を用い、また、厚さ10-15mの土塊が地下数mの所をえぐって進んだと言われることから $n = 0.2$ として、式(6)用いてエネルギー線を計算したものが図9に記したものである。この図はなぜ地附山の地すべりが約8.7度の緩勾配の所をこえて湯谷凹地のあるC点以下まで達したか説明し得るものである。

4. 引用文献 1) 佐々恭二他(1984): リングせん断型土石流発生、流動、停止現象再現試験機の試作研究、昭和58年度科学研究費補助金研究成果報告書 2) 佐々恭二(1985): Rapid Landslides and Debris Flows. 第11回国際土質基礎工学会議セッション3A [地すべりと土石流の運動]のテーマレクチャー 3) 佐々恭二(1986): 御岳土石流など不飽和土石流の流動機構について、京大防災研究所年報29号B-1