

27 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 ○佐々恭二、福岡 浩、C. Vibert

はじめに

1984年の御岳大崩壊や1985年の地附山地すべりでは、地すべり土塊がその土の持つ内部マサツ角よりはるかにゆるい勾配の所まで移動して人々を驚かせ、その原因について粉体流説など種々の議論を呼んだ。佐々は急速載荷による非排水せん断現象が、これらの低い運動時の見かけのマサツ角の原因になっていると考え、理論的、実験的に裏付けた¹⁾。しかし、どの程度の載荷速度であれば非排水状態になるか、御岳大崩壊の伝上川の溪床堆積物のように透水係数の高いものでも非排水状態になるかどうかについて疑問も出された。そこで新しく製作した高圧用の高速リングせん断試験機を用いて急速載荷時のせん断強度（せん断抵抗）変化を直接測定してみた。

1. 高圧用高速リングせん断試験機

1983年に佐々が開発したリングせん断型土石流試験機（低圧用高速リングせん断試験機 $\sigma = 0-0.4 \text{ kgf/cm}^2$ ）をもとに地すべりを対象とした高圧用高速リングせん断試験機を製作した²⁾。

内径21cm、外径33cm、高さ6cmのドーナツ状の容器に試料を入れ、上部より垂直荷重を与えた状態で下半分のみを回転させて試料をせん断するものである。図1は試験機の全景写真、図2はせん断箱の断面の模式図である。飽和した試料に載荷板より急激に垂直力を与えると、直ちに試料は圧縮されるが、間ゲキ水の移動には時間遅れがあるので間ゲキ水圧が発生する。発生した間ゲキ水圧は、次第に上下のポラスメタル、およびゴムエッジとメタルエッジの接触面より排水される。（せん断速度が遅い時はゴムエッジとメタルエッジの密着が良く、ここからの排水は少ないようである。）

2. 地すべり運動中の間ゲキ水圧について

地すべりの運動中のせん断面の間ゲキ水圧の形成のタイプは図3に示す3つに分けられる。Aは間ゲキ水圧が発生も発散もしない地盤上を移動する場合で、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発生する間ゲキ水圧がせん断面の間ゲキ水圧を形成している場合である。Cは透水性の高い不飽和の地盤上を移動する場合で、土塊内の間ゲキ水圧が地盤へ排水される場合である。長距離移動する地すべりの場合の多くはBに該当する。Bの場合についてすべり面の位置は地下水面の位置が高い場合には、地盤との境界面付近に形成される。また、発生する間ゲキ水圧は、三軸圧縮試験に対するSkemptonの式と同じ形の（1）式で定量化できる³⁾。地すべり運動時には粘着力はほぼゼロなのでこれを無視すると運動時のせん断強度（応力）は、運動時の真のマサツ角（ ϕ_m ）と見かけのマサツ角（ ϕ_a ）、全垂直応力（ σ ）、有効垂直応力（ $\sigma - u$ ）を用いて（2）式で表わされる。（2）式を変形すると（3）式が得られる。

$$\Delta u = B_D (\Delta \sigma + A_D \cdot \Delta \tau) \cdots (1)$$

$$\tau_m = \sigma \cdot \tan \phi_a = (\sigma - u) \cdot \tan \phi_m \cdots (2)$$

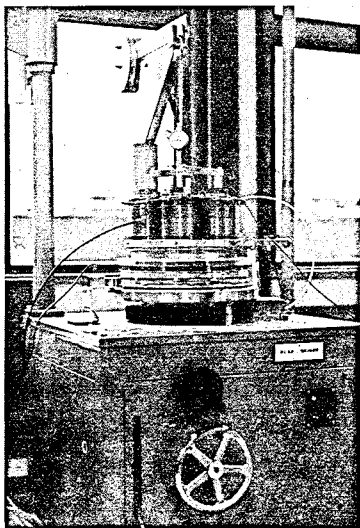


図1 高圧用高速リングせん断試験機

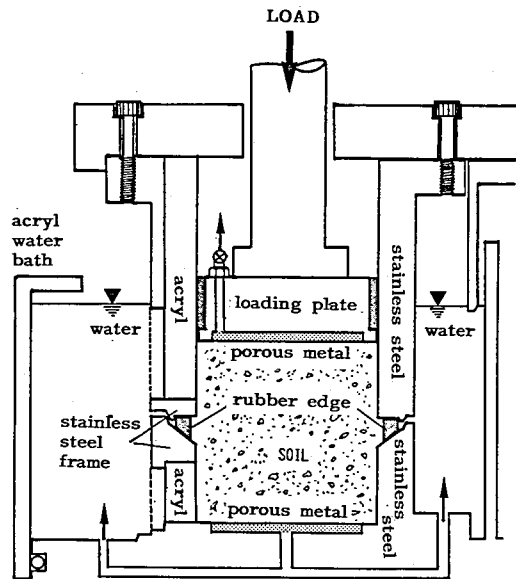


図2 せん断箱の断面模式図

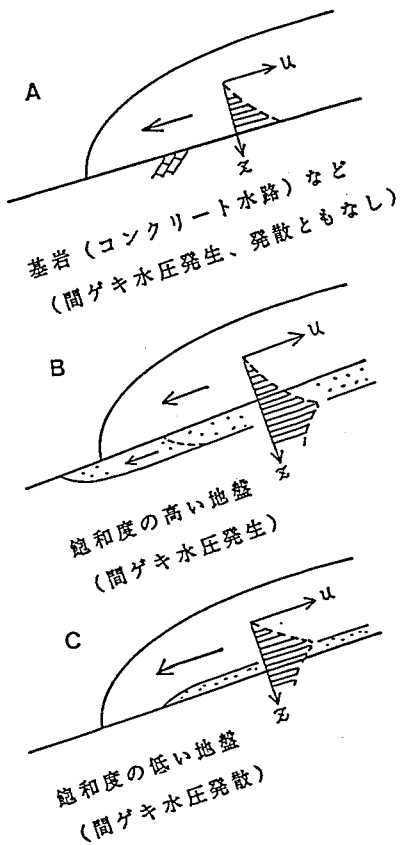


図3 間ゲキ水圧の形成のタイプ

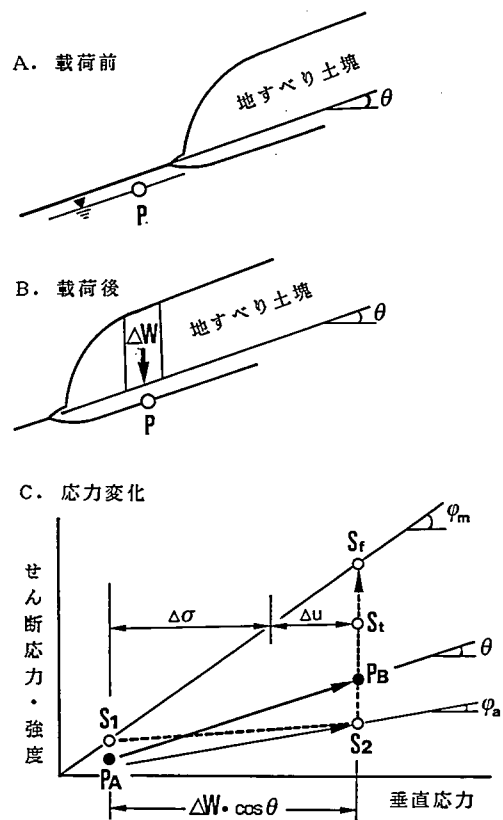


図4 急速载荷時の応力と強度変化

$$\tan \phi_a = \frac{\sigma - u}{\sigma} \tan \phi_m \cdots (3)$$

間ゲキ水圧係数 B_D は飽和度と試料の圧縮性によって変化し、間ゲキ水圧係数 A_D は試料せん断時の体積変化（ダイラタンシー）特性によって変化する。間ゲキ水圧が発生すると運動時のせん断強度、見かけのマサツ角は低下する。

3. 急速載荷時のせん断強度変化

図4は地すべりが運動して来た時の地盤内の応力変化の例を示している。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存すること、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。地下水面の位置にあるP点の応力は（C）で傾斜が斜面勾配と同じ θ の線上の点 P_a にある。そして、地すべりがPの位置まで来た時は同じ線上を P_B 点まで移動する。この時、P点のせん断強度はどのように変化するだろうか？ 地盤のマサツ角を ϕ_m とすると、（A）の状態の時のせん断強度は間ゲキ水圧がゼロなので P_a の真上の破壊線上の値 S_1 になる。（この図では単純化したが、本当は S_1 は運動時の破壊線より大きなピーク時の破壊線の上にある。）（B）の状態では垂直応力が $\Delta \sigma$ だけ増大するが、間ゲキ水圧も発生するために有効垂直応力は余り増えず、したがってせん断強度の増分も少なく、 S_2 点に移行する。その後、間ゲキ水圧が徐々に発散すると時間 t の時に S_t 点を経て、間ゲキ水圧がゼロになれば再び破壊線上の点 S_f に至る。

図中の S_t 点の場合について示したように、 S_t 点の時に残留している間ゲキ水圧は S_t 点と破壊線の間の水平距離に相当する。載荷速度が十分遅く間ゲキ水圧が発生しない時は、せん断強度は S_1 から破壊線に沿って S_f に移動する。また、一般には地すべり土塊の厚さが変化するので、時間と共に $\Delta \sigma$ が変化するので S_2 から S_f への経路は必ずしも直線ではない。図から分かるように（A）ではせん断強度がせん断応力より大きく（ $S_1 > P_a$ ）すべりは生じないが、（B）ではせん断応力がせん断強度より上回っており（ $P_B > S_2$ ）すべりが生じ、 P_B と S_2 の差は土塊の加速度に消費される。また、原点と S_2 点を結ぶ線が急速載荷時の見かけのマサツ角（ ϕ_a ）になる。

図5－図7は地附山地すべりの深礎工から採取した土と御岳大崩壊の伝上川の溪床堆積物より採取した土について、急速載荷時のせん断強度変化を測定したものである。方法は0.01cm/secで試料を継続的にせん断し、せん断強度を測定しながら急激に垂直応力を増大させて、その時のせん断強度変化を実測したものである。地附山の飽和した試料（図5）では載荷荷重のほとんどが間ゲキ水圧になり（ $B_D \approx 1.0$ ）、その発散には14-25時間を要している。不飽和の場合（図6）には、間ゲキ水圧の発生はより小さく発散も早い。（不飽和の場合は試料内部に含まれる粘土の物性が変化し、マサツ角も大きくなっている。）御岳の溪床堆積物の場合は間ゲキ水圧の発散は秒単位で終了する。この試験の場合、せん断面から自由水面までの排水経路は図2に示す如く短いものであるが、それでも急速載荷時の間ゲキ水圧の発生とせん断強度の低下が実測された。この結果から御岳大崩壊の平均移動速度約20m/secであれば、十分非排水載荷によるせん断強度低下が見られたことが推定できる。

この研究に御助言、御協力いただいた京都大学島通保教授に感謝致します。また、研究の一部に昭和62年度特定研究「大規模な崩壊・氾濫災害に関する研究」（代表：奥田節夫）の研究費を受けたこと、研究メンバーの一人芦田和男教授に有意義なディスカッションをいただいたことを記し謝意を表します。

参考文献 1) 佐々恭二(1988):地すべり・土石流の運動-被害区域の予測-の研究、昭和62年科学研究費報告書 No.61480062およびSpecial Lecture:Geotechnical Model for the Motion of Landslides, Proc. 5th ISL Lausanne, Vol.1, pp.37-55(内容同じ) 2) 佐々恭二他(1989):高速高圧リングせん断試験機の試作と地すべりにおける急速載荷時のせん断強度変化、防災研年報32号(出版予定) 3) 佐々恭二(1987):改良そりモデルによる地すべり・斜面崩壊の運動予測、砂防学会研究発表会概要集、pp.68-71

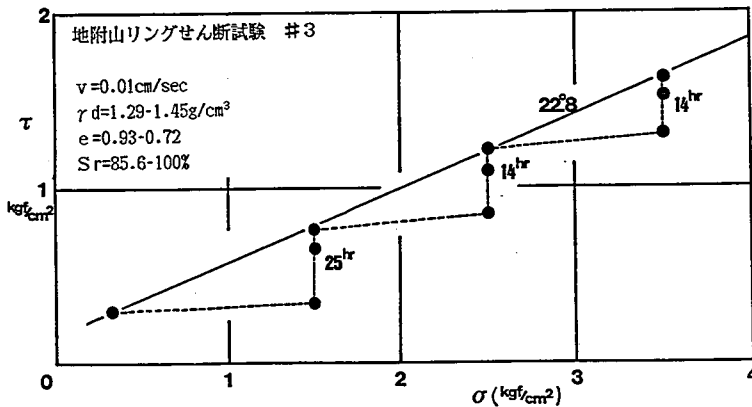


図5 地附山地すべりの土の試験結果
飽和度=85.6-100%
乾燥密度=1.29-1.45g/cm³

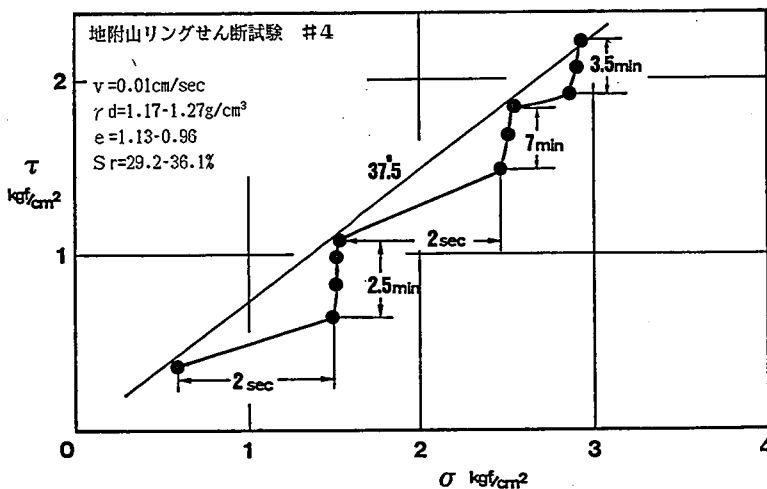


図6 地附山地すべりの土の試験結果
試料内の平均飽和度=29.2-36.1% (せん断ゾーンでは圧縮が著しいのでより高い飽和度を持つ)
乾燥密度=1.17-1.27g/cm³

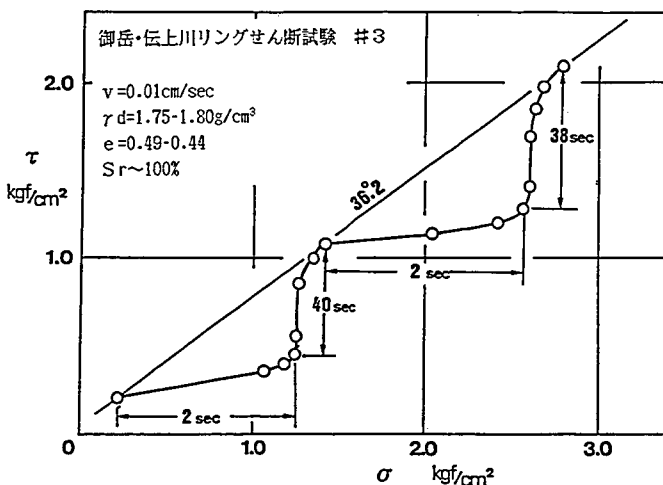


図7 御岳・伝上川の土の試験結果
飽和度~100%
乾燥密度=1.75g/cm³

(乾燥密度が高いのはせん断時の粒子破碎により粒径に幅が出来たため)