

非排水・繰り返し載荷リングせん断試験機を用いた 島原市・眉山地すべりの研究

京都大学防災研究所
京都大学理学部

○福岡浩・李宗學・佐々恭二
中村恵子

1. はじめに

雲仙において1792年の噴火終了時に起きた地震により発生した眉山地すべり(図1,2)は土量1億立米以上、運動距離2 km以上、見かけの摩擦角(ϕ_a)は約10度と小さく¹⁾、地すべり土塊は島原で多数の被害を出しただけでなく、有明海に到達して津波を発生させ日本の火山災害史上最大の犠牲者を生じた¹⁾。一方、現在の普賢岳の噴火活動に伴い再び前回のような地震が発生して眉山の七面山が崩壊する可能性が指摘されている^{2) 3)}。

京都大学防災研究所では地震時地すべりの発生機構と大規模地すべりの長距離運動機構の研究の目的で非排水・繰り返し載荷リングせん断試験機を開発した^{4) 5)}。この試験機は試料に非排水条件で垂直応力、せん断応力を独立して載荷し地震時の斜面内の応力状態を再現でき、また実際に地すべり土塊が溪床上を運動している状況での溪床の土層内の応力状態の変化を再現することが可能である。今回、眉山地すべり源頭部の側方斜面および溪床から採取してきた試料について、それぞれ非排水繰り返し載荷試験および非排水垂直応力載荷試験を行い、地震時における眉山地すべり発生メカニズムと、崩壊後、沖積層上を長距離運動した運動機構について考察し、あわせて七面山地すべりの発生および運動距離についても検討した。

2. 非排水繰り返し載荷試験

図3に地震時の斜面の応力状態の模式図を示す。斜面土層の自重は図3(a)では W 、図3(b)の応力図では応力状態は (σ_0, τ_0) で表される。地震応力の方向は任意の方向が考えられるが、今回の実験では図3(a)のように地震応力 $(d\tau)$ が斜面に平行に加わるとして行った。この場合、せん断応力のみが増減するので全応力の応力経路(図3(b))は上下に変化する。

試料は図2中の試料採取位置(■印)の斜面から採取した砂質土の攪乱試料($\phi < 4.76\text{mm}$)を

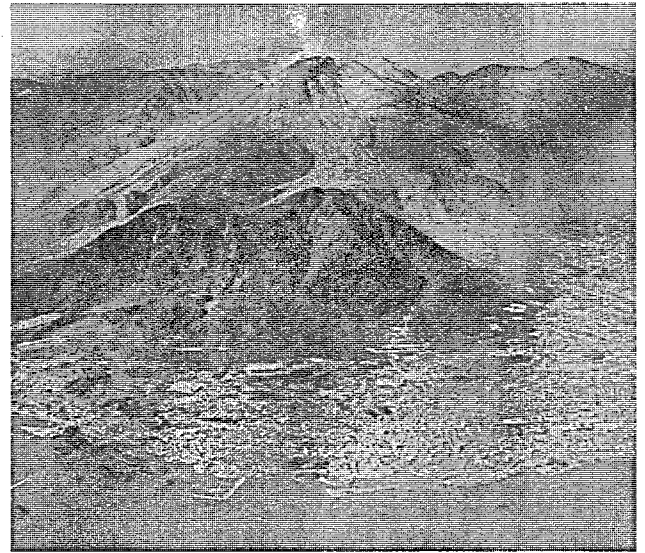


図1 雲仙普賢岳と眉山地すべり、七面山(撮影:朝日新聞社)

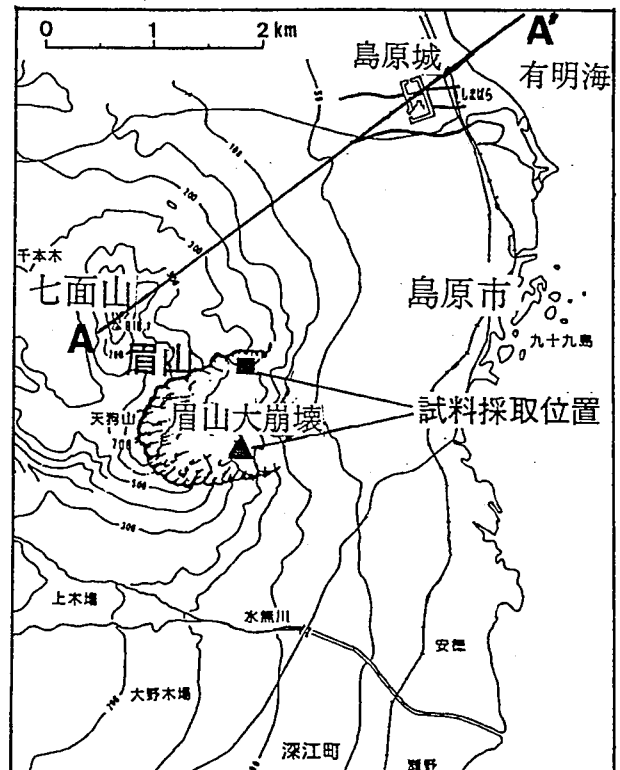


図2 眉山地すべりと七面山周辺の平面図。

用いた。試験は飽和・非排水条件で行い、試験結果は図4(a),(b)に示す。図4(a)は垂直応力、せん断抵抗、間隙水圧、せん断速度の経時変化、図4(b)は試験結果の応力経路図で、全応力と有効応力の両方の応力経路を示す。試験条件は、初期垂直応力 $\sigma_0 = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、初期せん断応力 $\tau_0 = 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ 、背圧 1 kgf/cm^2 で、地震応力としてせん断応力を、

$$\tau = \tau_0 + \Delta \tau \times \sin \omega t$$

の形で10秒周期で与えた。振幅 $\Delta \tau$ は一定ではなく、繰り返し载荷時の摩擦角を求めるため、サイクルごとに一定の幅で増大した。

図4(a)でせん断抵抗は6サイクル目で大きく減少し、せん断が加速的に始まった。試験機の構造上、せん断速度は30cm/secが最高なので、30cm/secに達したあとは一定速度でせん断している。図4(b)では応力状態はStartと記したところから始まり上下に振動し、有効応力の応力経路が31.7°の破壊線に接触すると破壊線に沿って強度が低下していき、最終的にはendと記した点まで強度は減少した。これは過剰間隙水圧が5サイクル目から発生し始め6サイクル目以降で急激に増大したためである。過剰間隙水圧発生の原因は、せん断応力の増大で土粒子骨格が崩れ、さらに粒子破碎が始まる為である^{4) 5) 6)}。全応力一定でせん断応力が減少すると、見かけの摩擦角は減少する。この試験でのせん断距離1mでの見かけの摩擦角 ϕ_a は原点と図4(a)の点Aを結んだ直線の傾きになる。したがって移動距離1m以上での見かけの摩擦角は $\phi_a < 9.8^\circ$ となる。

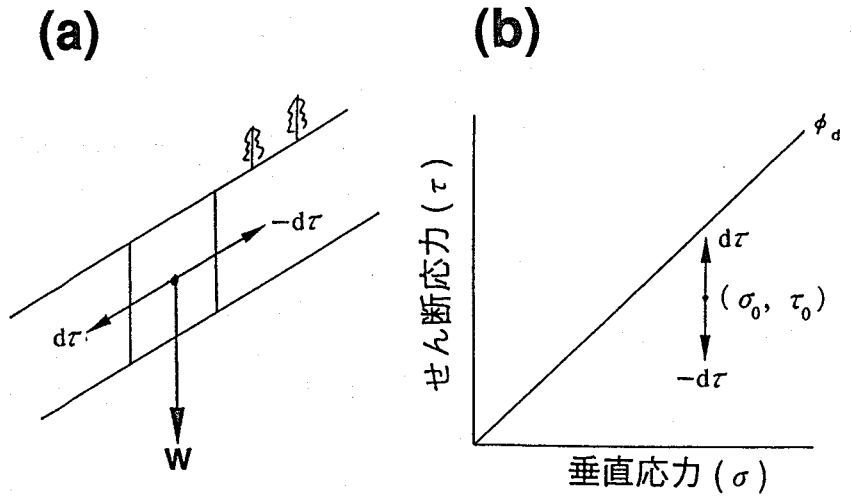


図3 地震時の斜面の応力状態(a)と繰り返し载荷試験の模式図(b)

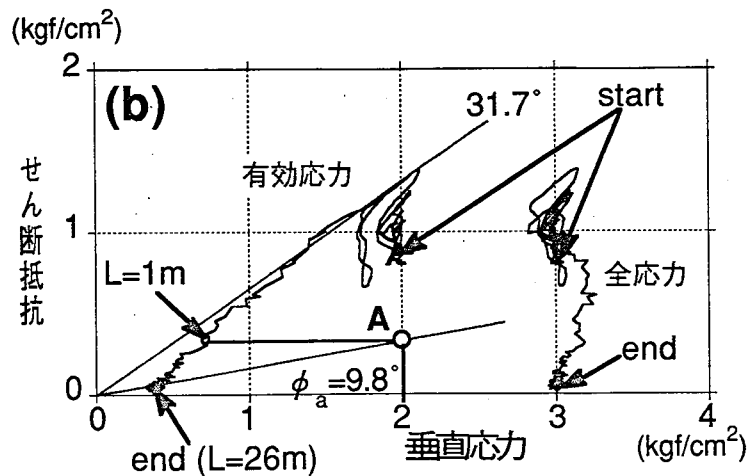
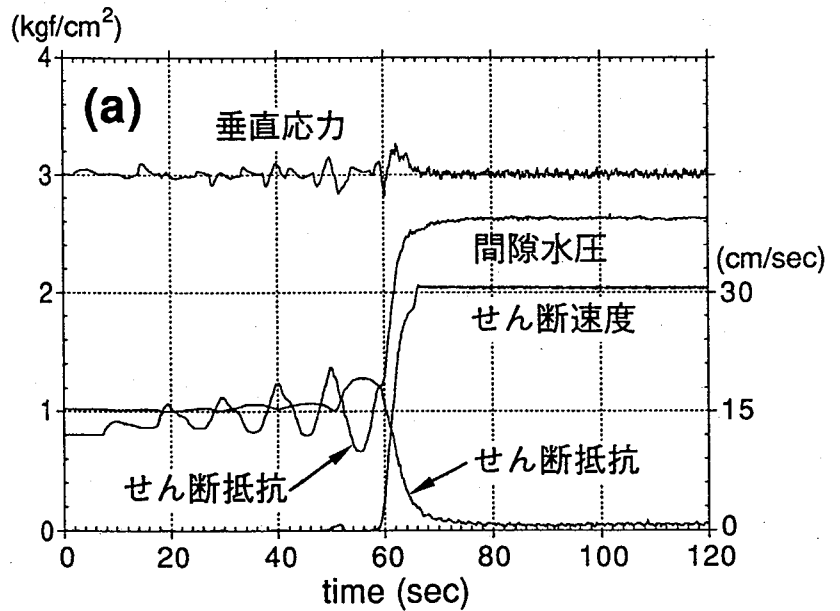


図4 非排水繰り返し载荷リングせん断試験の結果。(a)経時変化 (b)応力経路図

3. 非排水垂直応力载荷試験

厚い地すべり土塊がほぼ水平な地盤を高速で運動する場合、地すべり土塊により地盤は急激に载荷される。地下水面が浅いところにある場合、飽和・非排水条件で载荷するため、過剰間隙水圧が発生し見かけの摩擦角が減少することにより、土塊は長距離運動する⁷⁾。リングせん断試験機により、現場の土に対しせん断しながら飽和・非排水条件で垂直応力を载荷することにより、見かけの摩擦角を測定した。

試料は図2の▲印の溪床から採取してきた砂質土 ($\phi < 2\text{mm}$) について飽和・非排水载荷試験を行い、見かけの摩擦角を調べた。試験は 0.3kgf/cm^2 で圧密後、一定垂直応力、一定せん断速度でせん断を開始し、残留状態にした後、非排水条件のまま垂直応力を 3kgf/cm^2 まで増大させた。図5(a)(b)に試験結果の経時変化と応力経路とを示す。図5(a)では垂直応力の载荷とともにほぼ同じ大きさの過剰間隙水圧が発生し、せん断抵抗は载荷し始めにわずかに増大するがその後はほとんど変化しない。図5(b)の応力経路図では有効応力の増大は少なく、全応力はほぼ水平右方向に変化した。さらに垂直応力を 3kgf/cm^2 で一定に保ち、せん断を続けると、せん断抵抗は徐々に減少した。これもせん断に伴う粒子破碎による過剰間隙水圧の発生のためである。せん断抵抗の減少が止まったのは図中にendと記したせん断距離42cmで、せん断距離42cmという距離は高速地すべりの場合、ほぼ無視できる距離であるので、見かけの摩擦角はせん断距離42cmの時の 3.2° とした。

4. 眉山・七面山地すべりの発生と運動機構

繰り返し载荷リングせん断試験と非排水载荷リングせん断試験の結果から、眉山地すべりと七面山での地震時地すべりの発生と運動機構について考察する。図6は図2のA-A'の断面で、七面山から島原市内、有明海の地形を示す。七面山の下の方想定すべり面は丸井²⁾ Ochiai³⁾が想定したと同様のすべり面である。図4(b)で得られた地震による地すべりが発生した場合に発揮される見かけの摩擦角 $\phi_a = 9.8^\circ$ により、七面山山頂からエネルギー線を引いた⁷⁾。エネルギー線は七面山斜面とは交わらず、地すべりは急激に運動し始め高速で島原市内へ移動すると考えられる。一方、図5(b)で得られた非排水垂直応力载荷試験での見かけの摩擦角 $\phi_a = 3.2^\circ$ を七面山上の $\phi_a = 9.8^\circ$ のエネルギー線につないだところ、エネルギー線は有明海にまで達した。これらは眉山地すべりが長距離運動し有明海にまで到達した運動機構と考えられ、さらに今後地震により七面山で急激な地すべり運動が発生した場合、同様に島原市内を高速で長距離運動する可能性を示している。

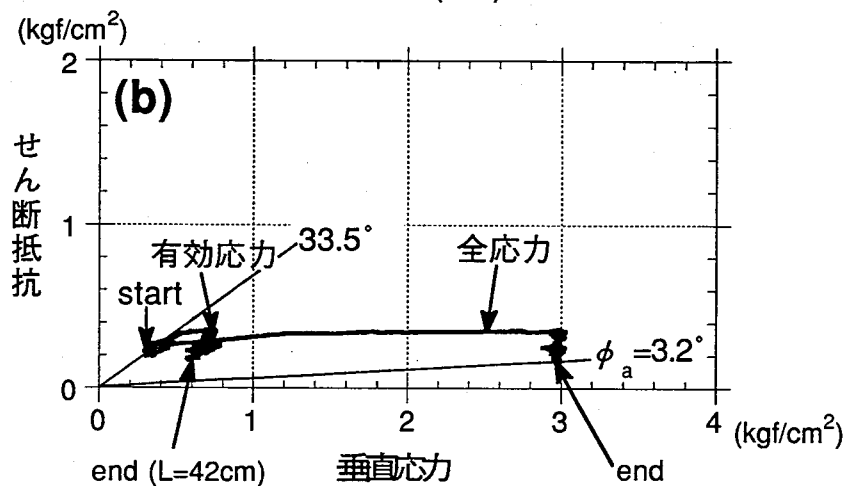
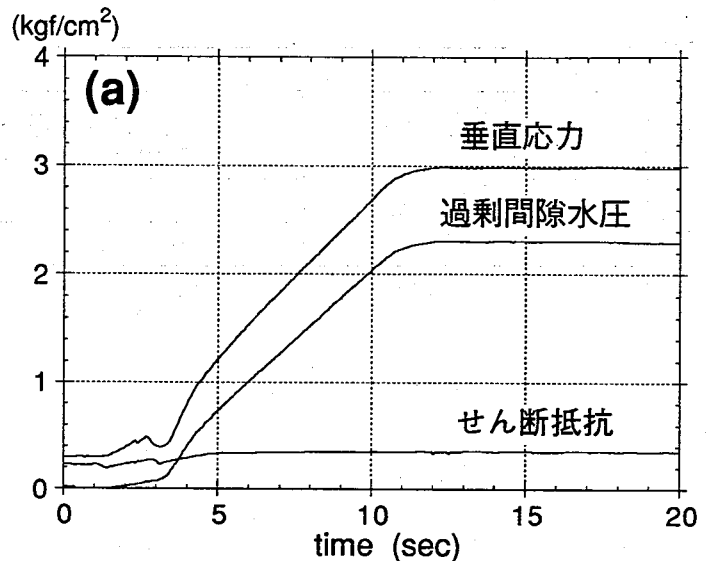


図5 非排水垂直応力試験の結果。
(a) 経時変化 (b) 応力経路図

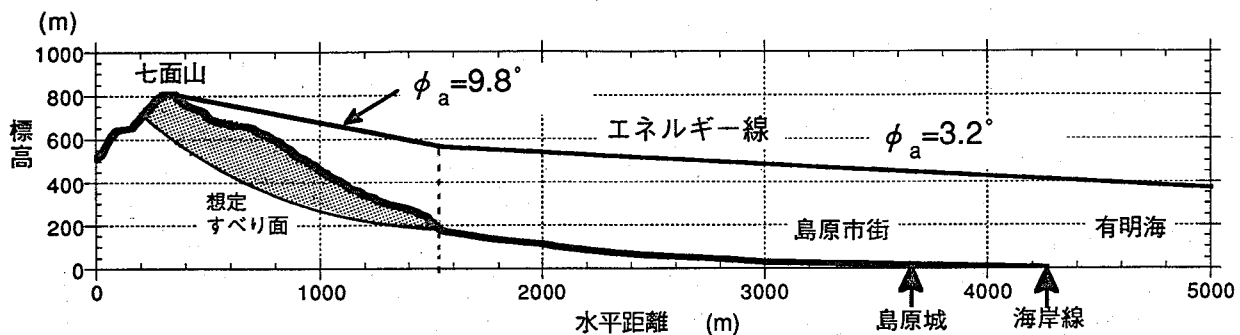


図6 七面山～有明海の断面（図2のA～A'）および七面山で地すべりが発生した場合のエネルギー線

眉山地すべりや七面山の地すべりの場合、すべり面の深さが150～400mと想定されており^{2) 3)}、この場合すべり面にかかる垂直応力は23～62kgf/cm²に相当する。また平野部を運動中も土層厚は100m以上である可能性は高く、この場合でも土圧は18kgf/cm²に達する。今回用いたリングせん断試験機は垂直応力が最高で4kgf/cm²であり、この試験結果を七面山地すべりの発生・運動予測にそのままあてはめられるとは限らないが、粒子破碎は高圧ほど起きやすく、七面山内部にすべり面が形成され地下水で飽和していれば、図4(b)で得られた ϕ_a はさらに小さい値をとる可能性がある。また今回非排水垂直応力載荷試験に用いた試料は眉山の溪床堆積物であるが、島原市内の沖積層も眉山や七面山から流出した土砂が堆積したものであり、粒子破碎の起こり易さは同等であると思われる。島原市内を高速で地すべりが移動する場合、載荷幅が今回の試験条件よりはるかに大きくなり、見かけの摩擦角はさらに小さくなる⁹⁾ので運動距離はさらに長くなると思われる。

研究上の今後の課題として、1) 七面山内部の潜在すべり面の調査、2) 超高圧のリングせん断試験機の製作と、眉山および七面山の地すべりに対応する応力範囲での地すべり発生条件、運動機構に関する試験、および3) リングせん断試験等によって得た諸土質パラメータを用いた地すべり土塊の運動の数値シミュレーション⁹⁾による地すべり災害範囲の予測、津波の発生と伝播のシミュレーションを行うことが必要である。

参考文献

- 1) 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巻，B-1，pp.353-368，1984。
- 2) 丸井英明：雲仙火山「眉山」周辺地域における土砂災害危険度調査，地すべり学会関西支部シンポジウム論文集「地すべり・斜面崩壊の予知予測」，pp.129-143，1991。
- 3) H. Ochiai, S. Hayashi, J. Umemura and T. Iryo : Slope Stability of Mt. Mayuyama under the Volcanic Activity of Unzen Volcano, in "Unzen Volcano the Eruption 1990-1992", Nishinippon & Kyushu University Press, pp.110-115, 1992.
- 4) 佐々恭二・Z. Shoaie : 非排水繰返し載荷リングせん断試験による地すべり発生予測の研究，平成6年度砂防学会研究発表会概要集。
- 5) Z. Shoaie and K. Sassa : Basic Study on the Shear Behavior of Landslides during Earthquakes - Excess Pore Pressure Generation in the Undrained Cyclic Loading Ring Shear Tests -, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.44, Part 1, 1994 (in print)
- 6) H. Fukuoka : Variation of the Friction Angle of Granular Materials in the High-Speed High-Stress Ring Shear Apparatus - Influence of Re-orientation, Alignment and Crushing of Grains during Shear -, Bull., Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ. Vol. 41, No.4, pp.243-279, 1991.
- 7) 佐々恭二・李 宗學：高速高圧リングせん断試験機による地すべり運動時の見かけの摩擦角の測定，地すべり，第30巻，第1号，pp.1-10。
- 8) K. Sassa : Landslide Volume - Apparent Friction Relationship in the Case of Rapid Loading on Alluvial Deposits, Landslide News No.6, pp. 16-19, 1992.
- 9) K. Sassa : Prediction of Landslide Motion - Measurement of the Apparent Friction Angle under Undrained Loading Condition and the Computer Simulation -, Proceedings of the Workshop of "Pierre Beghin" International Workshop on Rapid Gravitational Mass Movements, 1993 (in print)