

## 積層した岩塊の流下実験における到達距離に関する検討

岡田康彦（森林総研）

**要旨：**約 0.1m 角の花崗岩の岩塊積層体を対象に流下実験を実施し、到達距離および発揮された重心間の等価摩擦係数について検討を行った。また、粒状体数値計算手法の一つである個別要素法を用いて、岩塊群流下実験に関する数値シミュレーションも実施した。

個数を種々に与えた岩塊群を流下させたところ、物理実験および数値実験の双方に関して、岩塊の個数が増すと縦断方向の流下距離が小さくなる結果が得られた。岩塊群は流下する際お互いに非弾性衝突を繰り返すため、個数の多い供試体ほどエネルギーが多く散逸していることが原因と推定された。

数値実験で流下開始から堆積までの供試体全体についての運動エネルギー変化を算出したところ、岩塊個数が多いほど位置エネルギーから変換された運動エネルギーは小さいことが示された。このことは岩塊個数が多い供試体ほど、運動中に早くエネルギーが散逸することを意味し、その結果、到達距離が小さくなることがわかった。

**キーワード：**崩落岩塊、到達距離、等価摩擦係数

### I はじめに

広義の「地すべり」(1) 現象を議論する場合、発生・運動機構、到達距離予測の視点が重要である。研究手法としては土質力学的試験 (2, 3) あるいは数値実験 (4) によるものもあるが、斜面・水路模型や自然斜面を対象に、現実に発生している現象と可能な限り等価な条件下で再現実験を行い、各種、物理的パラメータの計測を行うことができればそれに超したことではないと考えられる。

本研究は、花崗岩の平板による大規模な斜面を形成し、ここに花崗岩の岩塊（約 0.1m 角）群を崩落させ、その到達距離を調査するものである。実験は、ステレオ撮影画像と立体写真測量技術を用いて岩塊の流下運動を定量化すると共に、これらの挙動を再現可能な個別要素法数値モデルの構築を目指したものである。また、個別要素法を用いて崩落岩塊群の流下挙動のシミュレーションを行い、得られた重心間の等価摩擦係数 (5) と岩塊個数の関係について、物理実験の結果と併せて検討するものである。これまでに実施した 9 回の物理実験（水で飽和と乾燥の両条件）と 4 回の数値実験（乾燥条件）の結果を報告する（表-1）。

### II 実験の概要

実験に使用した斜面を図-1 に示す。勾配 35 度の斜面(4m)ならびにその下方の水平面 (10m) には厚さが約 0.05m の花崗岩板が敷き詰められている。供試体は、斜面上方に設置した崩落装置(最大 1m<sup>3</sup>)に岩塊を積み上げることにより形成した。岩塊の挙動は、2 方向から撮

影した中速ビデオカメラ (60 フレーム/秒) の画像を対象に、3 次元座標を算出する手法を用いて解析可能である。岩塊群崩落装置は水密機能を有し、供試体を水で飽和させた条件下で崩落が可能である。

個別要素法を用いた数値実験については、乱数を発生させることにより粒径が 0.050m から 0.11m になるよう調整した球要素を 8 個剛結することにより 1 つの数値岩塊を作製した（図-2）。垂直方向ならびに接線方向の弾性バネ定数については、チューニングパラメータとして考えそれぞれ  $9.0 \times 10^{3.0}$ ,  $9.0 \times 10^{3.0}$  N/m を与えた。数値岩塊を物理実験と同様の条件下で崩落させ、その時の挙動を調べた。

### III 実験結果と考察

1. 到達距離 地すべりの到達距離を議論する場合、一般に等価摩擦係数が用いられる。等価摩擦係数は、物体の移動を質点の運動と仮定し、移動した斜距離に対する最大鉛直高さをその最大到達水平距離で除した値で表現したものであり、実際には地形条件や含水条件等によりその値は異なってくるものの、移動開始から停止するまでに見かけ上平均的に発揮された摩擦係数として代用されている。一方、ある大きさを持つ実際の土砂の移動現象において、力学的に現象をより正確に表現するには、崩壊発生前および堆積時の重心間の関係が用いられる (6)。これを鑑み、重心間の縦断方向到達距離を示すと（図-3），物理実験については、岩塊群の個数との間に明瞭な関係が示され、岩塊群の個数が多くなれば重心間

Yasuhiko OKADA(For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba, Ibaraki, 305-8687)

Examining run-out distances of rock blocks in a large scale rock-mass failure experiments

の縦断方向到達距離が小さくなることがわかった。また、岩塊群の個数の3乗根とは直線の関係になることがわかった（寄与率0.98以上）。

個別要素法を用いた数値実験については、直線関係は認められなかったものの、岩塊群の個数が増加すると、重心間の縦断方向到達距離が減少する傾向は認められ、物理実験で得られた結果と調和的な結果となった。

表-1. 岩塊崩落実験の番号と条件

	Number of blocks	Volume (m <sup>3</sup> )	Dry / saturated
Ex-P1	3×3×3	0.0270	Dry
Ex-P2	5×5×5	0.125	Dry
Ex-P3	5×5×5	0.125	Dry
Ex-P4	7×7×7	0.343	Dry
Ex-P5	10×10×10	1.00	Dry
Ex-P6	3×3×3	0.0270	Saturated
Ex-P7	5×5×5	0.125	Saturated
Ex-P8	7×7×7	0.343	Saturated
Ex-P9	10×10×10	1.00	Saturated
Ex-N1	3×3×3	0.0270	Dry
Ex-N2	5×5×5	0.125	Dry
Ex-N3	7×7×7	0.343	Dry
Ex-N4	10×10×10	1.00	Dry

2. エネルギー線 図-4に、エネルギー線の概念図を示す。崩落実験を開始する前、岩塊群はある位置エネルギーを有している。流下運動する過程で、その一部は運動エネルギーに変換され、残りは、非弾性衝突、摩擦や熱などのエネルギーとして失われる（図-4では、各エネルギー値を岩塊群重量mgで除すことにより、長さの単位で表現している）。流下中の位置エネルギーは、運動する斜面の計上に規制されるため、エネルギーロスが大きく、運動エネルギーへの変換が小さい場合、岩塊群としての到達距離は短くなることがわかる。

図-5は、数値実験において計測されたエネルギー線（図-5a）、ならびに岩塊群の重心の縦断方向の流下距離と運動エネルギー（並進および回転のエネルギーの和）の関係（図-5b）を示している。岩塊群の縦断方向の流下距離の初期値は、崩落前の供試体の重心を合わせてあり、つまり、その時の高さは供試体毎に異なる。岩塊個数1,000個と最も多いEx-N4は、初期値の高さ（位置エネルギー）が最も大きいものの、エネルギー線の右下がり勾配が最も大きくなっていることがわかる（図-5a）。

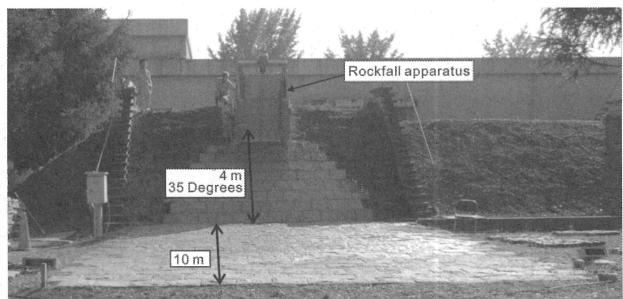


図-1. 岩塊崩落装置と実験斜面（35度斜面の上部に水密機構を有した崩落装置が設置されている）

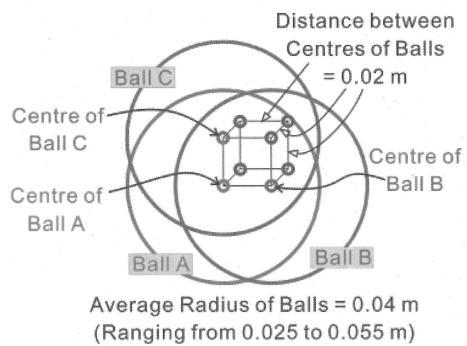


図-2. 数値岩塊の模式図(簡略化のため3個の数値球要素のみ記載)

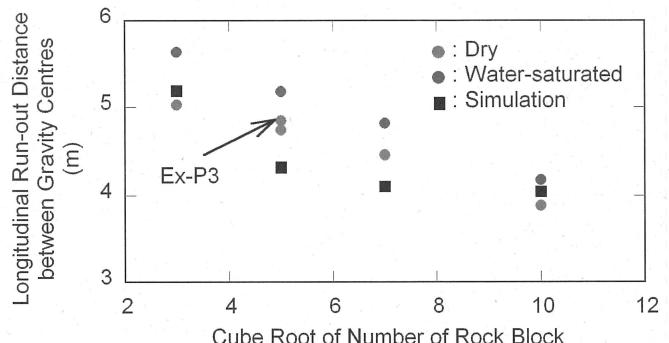


図-3. 岩塊崩落実験で計測された重心間の縦断方向到達距離と岩塊の個数（3乗根）の関係

また、図-5bから明らかのように、数値岩塊の個数が多い実験ほど、位置エネルギーから変換された運動エネルギー値は小さく、つまり、より多くのエネルギーが早く失われたことがわかった。

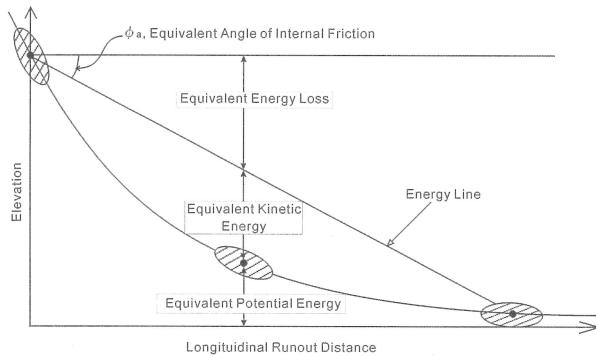


図-4. 地すべりの到達距離の議論に用いられるエネルギー線の概念図

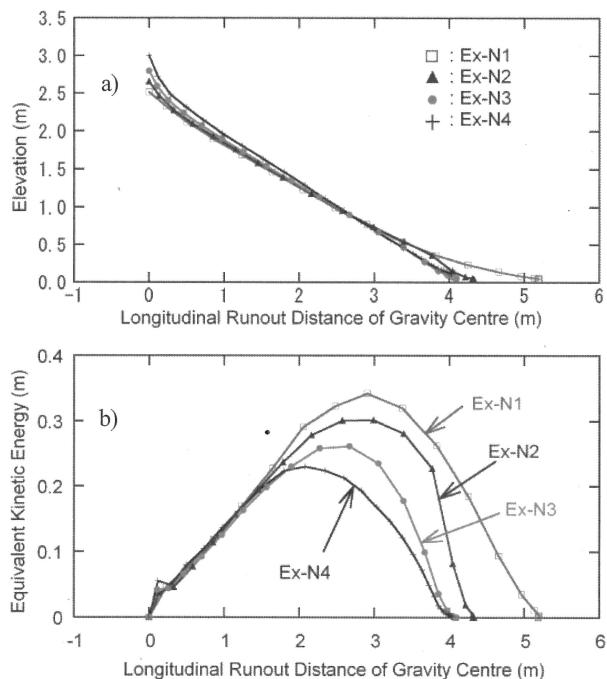


図-5. 岩塊群の崩落実験で得られたエネルギーと重心間の縦断方向流下距離の関係. a) エネルギー線, b) 運動エネルギー

岩塊群の流下運動は、個々の岩塊がそれぞれ衝突やすべりを繰り返しながら流下していた。なお、岩塊同士、ならびに岩塊と花崗岩の平板間の反発係数は、約 0.4 であり、このため、流下運動している間に非弾性衝突を繰り返すほど、運動エネルギーが失われることになる。目視確認や、撮影した画像の確認により、岩塊群の個数が多い実験では、例えば供試体の中央に位置した岩塊に関して、流下運動中もその周囲に多くの岩塊が位置し、常に周囲と多くの衝突を繰り返しながら流下していた。このため、岩塊の個数が多い実験では、流下中に多くエネルギーが早く失われたものと考えられた。

3. 等価摩擦係数 地すべりの運動学の分野では、Air-layer lubrication model ( $\phi$ ) やすべり面液状化モデル ( $\phi$ ) を根拠に、運動する土砂の体積が大きいほど、到達距離が長くなり、等価摩擦係数が小さくなると指摘されている。この両モデルは、運動体の下面付近（すべりゾーン）で非常に高い間隙圧を保った層が形成され、そのため見かけ上発揮される摩擦係数が極めて小さくなることから、運動体の長距離運動が引き起こされている。運動体の体積が大きければすべりゾーンの高圧層から地表面への距離が大きく圧力勾配がより小さくなることにより、すべりゾーンの高圧状態が継続しやすいとしている。

本研究で実施した実験により得られた等価摩擦係数と岩塊群の体積の関係を図-6 に示す。物理実験（水で飽和および乾燥の両条件）および数値実験のいずれに関しても、崩落させる岩塊群の体積が大きいほど等価摩擦係数が大きくなることが示されている。つまり、従来の地すべり学で認知してきた事実と逆の結果が得られた。

これは、本研究で実施した岩塊群の崩落実験においては、Air-layer lubrication model やすべり面液状化モデルで説明されているような高圧のすべりゾーンを有した運動が発生しているわけではないことが主因と考えられる。つまり、岩塊の積層体は隙き間が大きく、間隙圧の高まりを認めるものではなく、むしろ、岩塊個々が周囲との衝突やすべりを繰り返しながら、それが個別に運動していると考えられる。

また、いずれの体積においても、水で飽和の条件下での物理実験において一番小さな等価摩擦係数が得られた。これは、岩塊が濡れていると岩塊同士および岩塊と花崗岩平板間との動摩擦係数が低下すること、浮力が働くことなどが主因と考えられる。

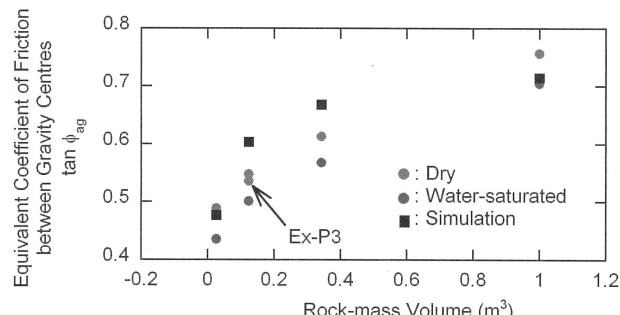


図-6. 岩塊群崩落実験で得られた重心間の等価摩擦係数と岩塊群積層体の体積の関係

#### IV 終わりに

乾燥ならびに水で飽和の両条件下における岩塊群の崩落に関する物理実験を行った。また、粒状体シミュレーション手法の一つである個別要素法を用いて、岩塊崩落に関する物理実験を摸した数値実験（乾燥条件）も実施した。供試岩塊群の体積が最大で  $1m^3$  というのは、実際の地すべり現象を想定した場合かなり小さいものであり、花崗岩の崩落、それに続く流下現象が厳密に再現されているとは必ずしも言えない。しかしながら、岩塊個々がそれぞれ運動するような現象に関して流下挙動を検討するにあたり、有益な知見が得られたので下記する。

- 1) 岩塊の個数(初期体積)と重心間の等価摩擦係数には、正の相関関係が認められ、従来の地すべり学で一般的に認識されてきた「地すべり土量と等価摩擦係数には負の関係がある」という知見と逆の結果になった。
- 2) 岩塊群の流下運動においては、間隙構造は形成されず、地すべりの長距離運動を説明するための Air-layer lubrication model やすべり面液状化モデルが想定している高圧の層は生じないと推定された。
- 3) 数値実験ならびに物理実験の目視確認により、岩塊の個数が多い実験では、流下中に非弾性衝突を頻繁に繰り返しながら流下していることがわかった。岩塊の反発係数は約 0.4 であることから、岩塊は他の岩塊や、底面の岩板と衝突を繰り返す毎に運動エネルギーを散逸することになる。このことが、岩塊個数の多い供試体において、重心間の縦断方向の到達距離が抑制される主因であるとわかった。

#### 引用文献

- (1) 佐々恭二 (2003) 砂防学と地すべり研究の学際的発展と国際化. 砂防学会誌 **55**(5):1-3.
- (2) OKADA, Y., SASSA, K., FUKUOKA, H. (2004) Excess pore pressure and grain crushing of sands by means of undrained and naturally drained ring-shear tests. Engineering Geology. **75**(4):325-343.
- (3) OKADA, Y., SASSA, K., FUKUOKA, H. (2005) Undrained shear behaviour of sands subjected to large shear displacement and estimation of excess-pore pressure generation from drained ring shear tests. Canadian Geotechnical Journal. **42**(3):787-803.
- (4) OKADA, Y., OCHIAI, H. (2008) Coupling pore-water pressure with distinct element method and steady state strengths in numerical triaxial compression tests under undrained conditions. Landslides. **4**(4):357-369.
- (5) SCHEIDECKER, A.E. (1973) On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. Rock Mechanics. **5**:231-236.
- (6) OKADA, Y., OCHIAI, H. (2008) Flow characteristics of 2-phase granular mass flows from model flume tests. Engineering Geology. **97**(1):231-236.
- (7) SHREVE, R.L. (1968) Leakage and fluidization in air-layer lubricated avalanches. Geological Society of America Bulletin. **79**:653-658.
- (8) SASSA, K. (1996) Prediction of earthquake induced landslides. Special Lecture of 7th International Symposium on Landslides, "Landslides." **1**:115-132.