

(28) 任意形状ブロックからなる岩盤斜面の崩壊機構に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE FAILURE MECHANISM OF SLOPE IN DISCONTINUOUS ROCKMASS CONSISTING OF RANDOM-SHAPED RIGID BLOCKS

相川 明*
Akira AIKAWA

Abstract : The huge failure motions of discontinuous rock slopes, like a mountain collapse, will be largely governed by the mechanical properties of discontinuities and the size and the shape of rock blocks consisting of rockmass itself. In this paper, the experimental studies using the tiltable frame model apparatus on the model slopes which are constructed by assemblage of the various-sized rigid rock blocks with arbitrarily-shaped geometry. Test results reveals that the failure modes and post-failure motion are influenced greatly by the slope height against relative *grainsize* of blocks ratio (H/D) and shapes of rock slopes. Stability of rock slopes is also greatly governed by the individual block shape or the asperity of discontinuities if H/D is small, but smaller obvious effect on failure and post-failure motion if H/D is large. The H/D's threshold may be existed between from 10 to 20 of H/D ratio.

Keywords: slope stability, discontinuous rockmass, experimental study, random shape rigid blocks, tiltable-frame model test apparatus, travel length of rockfalls, density of discontinuities, stable angle.

1. はじめに

山体崩壊などの大規模な岩盤斜面の崩壊現象では、斜面に存在する不連続面や斜面を構成する岩塊の大きさなどがその挙動に大きく影響する。たとえば、崩壊時に被害の及ぶ堆積規模や到達距離の予測に関しては、斜面の規模、岩塊の大きさ・形状、斜面構造ばかりでなく、堆積範囲での地面の傾斜等も関与すると考えられるが、まだ未解明な点が多い。本研究は、岩盤斜面を任意形状を有するの剛体ブロックの集合体と仮定し、剛体ブロックの大きさ、斜面の基層および堆積範囲での地面の傾斜が、崩壊機構やその到達距離に及ぼす影響について、実験的に検討するものである。

2. 不連続性岩盤斜面の崩壊と到達距離について

Fig.1は大きさVの岩塊が高さHの斜面上から滑り落ちる現象を図示したものである。岩塊が回転すること

* 正会員 国立大分工業高等専門学校助教授 土木工学科

なく滑るならば、位置エネルギーがすべて摩擦力で消費されるため、岩塊の到達距離 L は斜面形状や V に無関係に一定値となる。実際の崩壊ではFig.2のように、摩擦以外の要因が関与するため到達距離は長くなる。町田¹⁾、森脇²⁾、落合ら³⁾は崩壊実績をもとに崩壊土量 V と等価摩擦係数 H/L の関係を調べた。これによると V が極めて大きい場合には H/L が指数的に小さくなり、したがって、 L が非常に大きくなる可能性がある。このことは、静力学的釣合いや、滑りのみを考えるモデルでは説明できない。

このように、堆積規模や岩塊の到達距離の予測に関しては、一般的な円弧滑りモデルを適用するには限界があり、斜面の幾何学および動力学的な特性を考慮して検討しなければならない。すなわち、不連続岩盤斜面の挙動には、不連続面の分布や特性、あるいは岩塊の形状が関与しており、安定性を評価するには、岩盤を不連続面で区切られた剛体ブロックの集合体とみなして検討するべきであるが、斜面の規模、岩塊の大きさ、斜面構造等を考慮して、崩壊規模や到達距離を調べた研究事例は少なく⁴⁾、その安定性の評価法は確立されていないのが現状である。

岩盤斜面の破壊様式には、絶壁などで発生する崩落[rock falls]と、斜面の形状と岩盤の特性に支配されるすべり[sliding]、および、岩塊の回転を含む動力学的な破壊様式である転倒[toppling]があり、回転運動も考慮した崩壊機構の解明が重要な課題となっている。Sagaseta⁵⁾は岩盤斜面の挙動を把握するために、斜面上に置かれた単体ブロックの安定性という最も基本的な問題について、動力学的なつり合い条件より、安定、すべり、転倒、転倒とすべりの各破壊モードの発生条件について検討した。しかしながら、ブロック形状は長方形のみであり、任意の形を対象としたものではなかった。Goodman&Bray⁶⁾は階段斜面上の矩形ブロックについて、転倒破壊に着目して検討している。Aydanら⁷⁾は、Sagasetaの理論を柱状の複数のブロックにも適用できるように拡張し、解析的および実験的に確かめている。また、Young & Goodman⁷⁾は、DDA解析によりSagasetaと一致した結果を得ている。

Choquetら⁸⁾は、岩盤斜面の法面角度と不連続面の角度を変数として、転倒破壊の発生条件を解析的に調べた。この研究より得られた図を参考にすると、斜面の高さ(H)とブロックの大きさ(D)比(H/D)、すなわち亀裂密度が小さくなると、個々の不連続面の特性が卓越する挙動を示すが、逆に、 H/D が大きくなれば集合体としての挙動が卓越する傾向がある。条件にもよるが、この挙動の閾値は H/D が10~20のところにある。すなわち、 H/D が小さい範囲ではブロックの凹凸によるインターロッキングが発生するが、他方、 H/D が大きくなると、ブロックが動きやすくなることから、粒としての挙動が卓越するものと考えられる。Jiangら¹⁰⁾の底面摩擦模型とUDECによる解析でも、 H/D が斜面崩壊に大きく関与している。

山体崩壊などの大型の斜面崩壊では一般に H/D が大きいものと想定され、したがって、粒としての挙動が卓越するものと考えられる。すなわち、 H/D が大きくなると、斜面を構成する剛体ブロックが回転運動をしやすくなることから、到達距離に影響するのではないかと考えるものである。Choquetらの解析は矩形に限定したものであったが、より一般的な任意形状のブロックでも起こりうる可能性があり、ひいては岩塊の到達距離にも影響するのではないかと考え、傾斜台¹¹⁾を用いて実験的な解明を試みた。

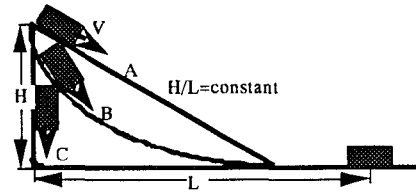


Fig.1 Illustration of a block and its travel length.

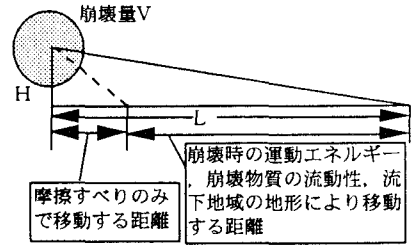


Fig.2 Illustration of a block and its travel length.

3. 模型実験の概要

実験装置 Fig.3に実験装置を示す。高さ750mm, 幅1500mm, 奥行き90mmの函体であり, 前面は観察用に透明なアクリル板とした。止め板は取外し可能であり, 底板の角度は可変できる。

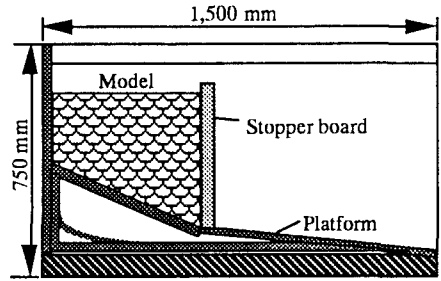


Fig.3 Layout of model test apparatus

実験材料 大分県津久見産の石灰石(比重2.70g/cm³)を標準網ふるいにより, 呼び径2.5, 5,10,15mmの4種類に分類した(Fig.4)。落下実験による安息角はそれぞれ37.5°,41.2°,37.7°であった。崩壊にはブロックの形状が影響するため, スペクトル解析やフラクタル次元でブロックの形状および凹凸を評価すべきであるが, 今回は形状の概略を把握するため, 各500個のサンプルの縦, 横, 高さをノギスにより測定した。平均粒径からのばらつきをとと細長比をFig.5, Fig.6に示す。平均粒径Dは 2.3, 8.1, 13.3, 19.3mm, 平均重量は0.018, 0.724, 3.221, 10.33 (g)である。

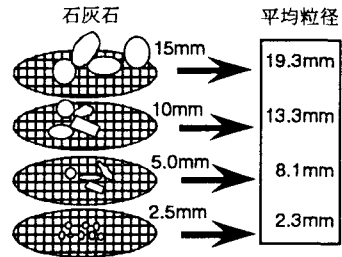


Fig.4 Model materials.

石灰石を標準ふるい分け試験により粒径の概略をコントロールした。

実験方法 止め板を固定し, 材料を詰め, 斜面模型を作成し, 止め板を瞬間的に取り除き斜面を崩壊させる。

[実験.1] 斜面高Hと斜面構造が到達距離に与える影響を調べるために, Hを300mm,200mm,100mmと変化させ, 4種類の粒径の崩壊状態を調べた。模型法面 $\theta=90^\circ$, 斜面の基層の角度 α を $0.0^\circ, 5.0^\circ, 10.0^\circ$, 堆積範囲の傾斜 $\beta=0^\circ, 5^\circ$ とした。

[実験.2] H/Dが崩壊機構に与える影響を調べるために, $\theta=60^\circ, \alpha=\beta=0.0^\circ$ について, H/Dを約30から5以下まで変化させ, 崩壊後の斜面の安定角等を測定した。

[実験.3] 堆積範囲での凹凸の影響を見るために, 堆積範囲の傾斜 $\beta=5^\circ$, また堆積範囲の傾斜面に目の粗さJIS規格40番のサンドペーパーを張り付けて同様の実験を行った。

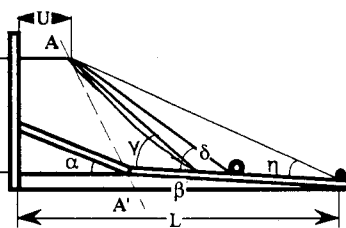


Fig.7 Details of slope parameters

計測方法 崩壊後の斜面形状に関する変数をFig.7に示す。最

も遠くまで到達した石までの距離をLとし, その角度を η , 法肩より法尻を見込む角度を δ とし, 破壊面の最大傾斜を γ とする。このとき, $(\beta+\eta)$ を到達角度, $(\beta+\delta)$ を崩壊角度, $(\beta+\gamma)$ を最大傾斜角と定義する。なお, 実験結果は, 装置前面のデジタルスチルカメラで撮影・記録し, 実験後パソコンの画像解析により数値化する。同時に一眼レフカメラでも撮影し, スケッチを行い, メジャーによる測定も行った。

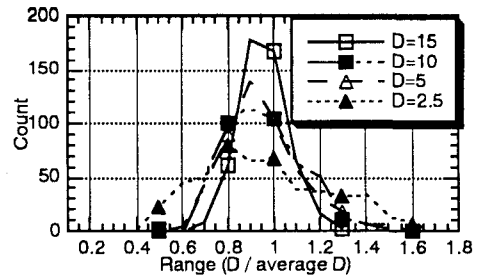


Fig.5 Relative grain size distributions.

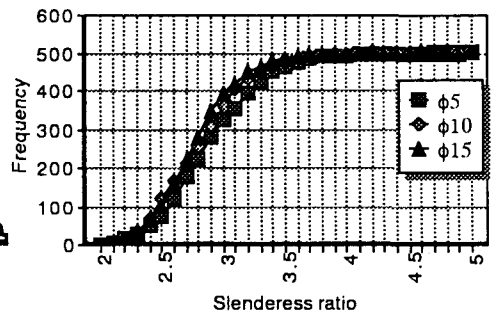


Fig.6 Slenderness ratio and their frequency

4. 実験結果と考察

Fig.8は、実験1において、斜面高 $H=300\text{mm}$ に関する結果であり、到達角度 $(\beta+\eta)$ と崩壊角度 $(\beta+\delta)$ を示したものである。図中の数値は H/D である。基層および堆積面が水平面となす角 α, β の組み合わせは4パターンとする。図より、いずれの角度の組み合わせでも、 H/D が大きくなるに従って到達角度も崩壊角度も小さくなる傾向がある。したがって、崩壊後の斜面形状はなめらかとなり、ブロックもより速くへ到達するようになる。

$\beta=0^\circ$ の場合について $\alpha=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ の結果を比べると、 H/D が同じ値ならば、崩壊角度には大差は見られない。これは本実験では基層面にほとんどすべりが発生しなかったためである。到達角度についても同様の傾向がある。

また、法先以降の傾斜を $\beta=0^\circ$ から $\beta=5^\circ$ に下り勾配にすると、 $\beta=5^\circ$ の場合の到達角度は小さくなっており、速くまでブロックが転がったことを示している。ここでは図を省略するが、崩壊角度についても同様の傾向がより顕著に得られた。これより堆積範囲での傾斜 β が到達距離にも影響することが分かった。

個々のブロックの移動量については、詳細には検討していないが、いずれの粒径においても、崩壊前の法尻と崩壊後の法尻を結んだ直線(Fig.7に示すA-A')より内側にあるブロックには殆ど移動や回転は発生しなかった。

Fig.9は実験2の崩壊斜面の最大傾斜角 $(\beta+\gamma)$ と H/D の関係を示したものである。崩壊前の法面の角度 $\theta=60^\circ$ なので、崩壊に至らなかった場合の最大傾斜角は 60° となる。図より、 H/D の値がおよそ10より小さい値では斜面が安定することがわかる。これは斜面を構成するブロックが互いに引っかかり、ブロック間のインターロッキングによるエネルギー損失が大きことがわかる。すなわち、 H/D の値が小さくなるとブロックの形状の影響が顕著であるといえる。これらの傾向は、矩形ブロック等の解析や実験結果において、亀裂密度が少ない場合は不連続面の方向性や性質が卓越し、亀裂密度が多くなってくると不連続面の影響が

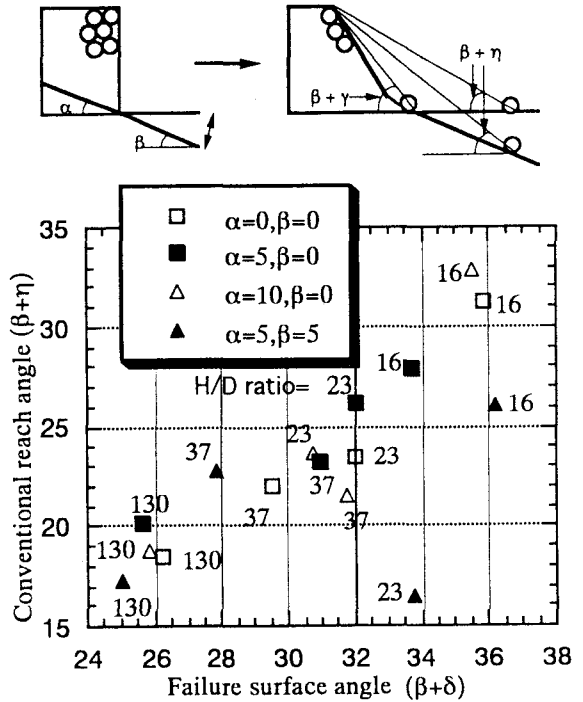


Fig.8 Conventional reach angle $(\beta+\eta)$ and failure surface angle $(\beta+\delta)$ with respect to H/D ratio.

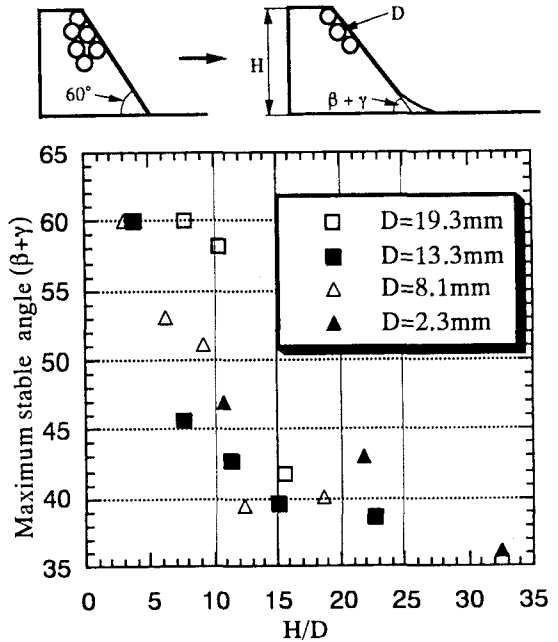


Fig.9 Maximum stable angle $(\beta+\gamma)$ and H/D ratio with respect to various grain size.

小さくなっていくこと符合している。このようにブロックの形状が任意形状の場合においても、不連続面の特性（すなわち、ここでは岩塊の凹凸の形状等の特性）が卓越する閾値があることが確認できた。

Fig.10 は、法先以降の斜面の凹凸をサンドペーパーの有無により表現した場合の、粒径と到達角度の関係のプロットしたものである。いずれの場合でも、凹凸が大きい場合の方が到達角度が大きくなっており、したがって、到達距離が短くなっていることが確認できる。底面が木材に対し、サンドペーパーの場合におよそ15%程度の到達距離の減少が見られた。

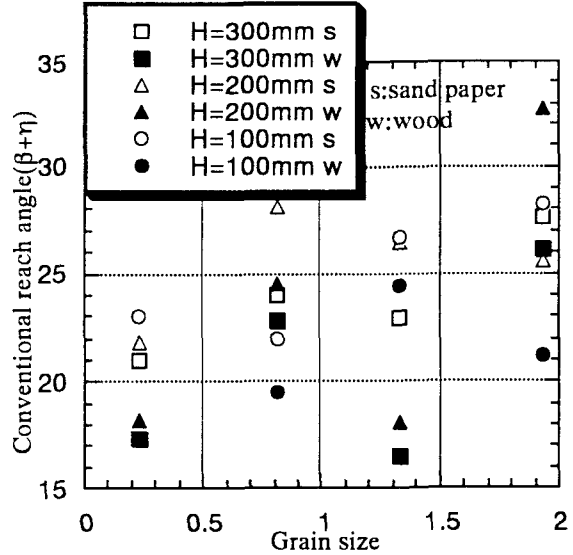
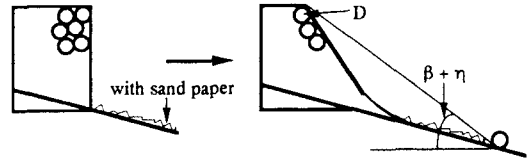


Fig.10 Conventional reach angle ($\beta+\eta$) and grain size with respect to with and without sand paper.

5. あとがき

本研究はまだ実験回数が少なく、必ずしも十分とはいえないものの、斜面を構成するブロックの相対的な大きさ、および堆積範囲の傾斜が到達距離に影響することが実験的に明らかとなった。また、任意形状のブロックでも、H/Dの値により挙動に差異があることが確認できた。今後は、デジタルスチルビデオカメラの画像データを処理し、個々の剛体ブロックの挙動を数值的に把握するとともに、さらに実験水準や実験条件を制御することが必要である。また、粒径ばかりでなく、ブロックの形状や凹凸の程度についても、フラクタル次元やスペクトル解析で数值的に評価して、崩壊のメカニズムを明らかにする必要がある。

【参考文献】

1. 町田 洋(1983), 巨大崩壊, 岩屑流と河床変動, 地形, Vol.3, No.1.
2. 森脇 寛(1987): 地すべり, Vol.24, No.2, pp.10-16.
3. Ochiai,H., Hayashi,S., Uemura,J. and Iryo,T. (1992): Slope stability of Mt. Mayuyama under the volcanic activity of Unzen Volcano, Unzen Volcano the 1990-1992 Eruption, pp.110-115, The Nishinippon & Kyushu Univ. Press.
4. Aydan,O. and Shimizu,Y.(1993): Post-failure motions of rock slopes, Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Eng., pp.409-415, ISRM, Balkema.
5. C. Sagaseta (1986) : On the Modes of Instability of a Rigid Block on an Inclined Plane, Rock Mechanics and Rock Engineering 19, pp. 261-266, Springer-Verlag.
6. Goodman,R.E. And Bray,J.W. (1976): Toppling of Rock Slope, ASCE. Speciality Conf. On Rock Engineering for Foundation and Slopes, Vol.2, pp.201-234.
7. Aydan,O., Shimizu,Y. and Ichikawa,Y. (1989): The effect failure modes and stability of slopes in rock mass with two discontinuity sets, Rock Mech. and Rock Eng., 22, pp.163-188.
8. Yeung,M.R. And Goodman,R.E. (1992): Multi Block Stability Analysis Using the DDA Method, Fractured and Jointed Rock Masses, pp.672-679.
9. Choquet,P. and Tanon,D.D.B.(1985): Nomograms for the assessment of toppling failure in rock slopes, 26th US Symp. on Rock Mech., pp.19-30.
10. Jiang,Y. et.al. (1995): Studies on toppling failure mechanism of slope in discontinuous rockmass, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, pp.605-610.
11. Barton,N. (1971): A model study of the behavior of steep excavated rock slopes, Ph.D. Thesis, Univ. London.