

斜面上の剛体ブロックの挙動に関する基礎的研究

国立大分高専 学生員 ○松廣 朗
国立大分高専 正 員 相川 明

1.はじめに

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、その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、その安定性の評価法はいまだ確立されていないのが現状である。

本研究は、斜面上に置かれた単一ブロックの安定性という最も基本的な問題にたちかえり、理論解析に数値解析を併用して、不連続面のすべりの状態や、ブロックの幾何的構造の差異が、すべりと回転を伴う崩壊様式に与える影響について、簡単な検討をするものである。

2.斜面上の単一剛体ブロックの挙動

岩盤斜面の挙動を把握するために、Fig.1 に示すように、傾いた平面上の任意の形状をした1つの剛体ブロックを考える。ブロックのすべり落ちる運動に抵抗する力は摩擦力のみであり、斜面の傾斜、重力、ブロックの形状、摩擦角を考慮すれば破壊の状況を確定できるはずである。

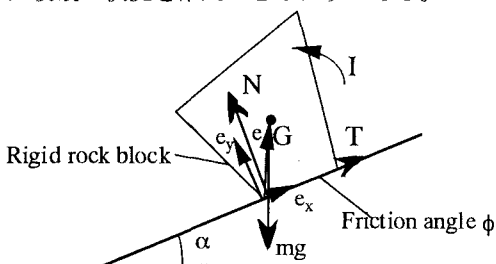


Fig.1 Definition of the problem

Sagaseta(1986)は長方形ブロックについて、動力的なつり合い条件より、(1) 安定・(2) すべり・(3) 転倒・(4) すべりながら転倒のいずれかの破壊モードが生じるとし、それぞれの破壊モードの発生条件について検討した。

本研究では、ブロックの重心とブロックのかどの位置関係に着目し、任意形状の剛体ブロックに関する破壊モードの発生条件を誘導する。つぎに、代表的な形状のブロックに適用するとともに、実際の挙動を再現するために、Shi(1984)のDDA(Discontinuous Deformation Analysis)解析による数値実験を行い、それらの結果を比較する。

3.任意形状のブロックの破壊発生条件の定式化

斜面上の剛体ブロックに関する運動方程式は次の通りである。

$$mg \sin \alpha - T = m\ddot{x}, \quad mg \cos \alpha - N = m\ddot{y}, \quad T e_y - N e_x = I \ddot{\theta}$$

ここに、 m , g , N , T , I はそれぞれ質量、重力加速

度、鉛直効力、摩擦力、重心回りの慣性モーメントであり、 e_x, e_y はブロックの頂点の重心からの偏心量の斜面方向および法線方向成分であり、 $\tan \eta = e_x / e_y$ とする。また、前述の(1)から(4)のモードを規定する付帯条件は以下の通りである。

$$(1) \text{ Stability: } \ddot{x} = 0, \ddot{y} = 0, \ddot{\theta} = 0, T/N \leq \tan \phi$$

$$\text{and } \alpha \leq \eta.$$

$$(2) \text{ Sliding only: } \ddot{x} \geq 0, \ddot{y} = 0, \ddot{\theta} = 0, T/N \geq \tan \phi$$

$$\text{and } \eta \geq \alpha.$$

$$(3) \text{ Toppling only: } \ddot{x} = e_y \ddot{\theta}, \ddot{y} = -e_x \ddot{\theta}, \ddot{\theta} \geq 0,$$

$$T/N \leq \tan \phi \text{ and } \alpha \geq \eta.$$

$$(4) \text{ Sliding and Toppling: } \ddot{x} \geq e_y \ddot{\theta}, \ddot{y} = -e_x \ddot{\theta},$$

$$\ddot{\theta} \geq 0, T/N = \tan \phi \text{ and } \alpha \leq \eta.$$

まず、上式をもとに、それぞれの破壊モードの発生条件を誘導する。例えばToppling onlyの場合、 $t = T/mg, n = N/mg, k = I/m$ とおくと次のようになる。

$$\alpha \geq \eta, \text{ and } \frac{\{(k + e_x^2) \sin \alpha + e_x e_y \cos \alpha\} \sin \phi}{\{e_x e_y \sin \alpha + (k + e_y^2) \cos \alpha\}} \geq \frac{\sin \phi}{\cos \phi}$$

4.解析結果

本数値実験は、動力的な釣り合い条件からのみでブロックの破壊状況を予測することの妥当性をみることに主眼があるので、まずは簡略化のため、矩形ブロックの挙動を調べる。傾斜角 $\alpha = 20^\circ$ の斜面上に置かれた幅 $b = 1.0$, 高さ $h = 5.0$ の長方形ブロックの挙動を $t = 0 \sim 1$ についてを調べた。

(2)sliding only

摩擦角 $\phi = 0^\circ$ の時は理論上はすべりのみが発生する。運動方程式より導出した移動量の理論値は $S = 1.676$ ($t = 1$) である。理論値とDDAによる解析値とを比較すると、Fig.2 のようによく符合している。なお、DDAでも回転は発生しなかった。

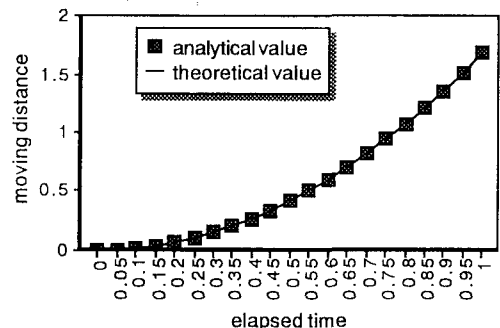


Fig.2 DDA test result (sliding only)

(3)toppling only

摩擦角を大きくすると、例えば $\phi=45^\circ$ のときは転倒のみが発生する条件下にある。この場合の転倒角度 θ の理論値は、 $t=1$ で $\theta=15.333^\circ$ である。

理論値とDDAによる解析値とを比較するとFig.3のようになる。両者はよく一致しているものの、 t が大きくなるにつれて、DDAではわずかながらすべりが発生し、 $t=1$ では若干の誤差を生じた。

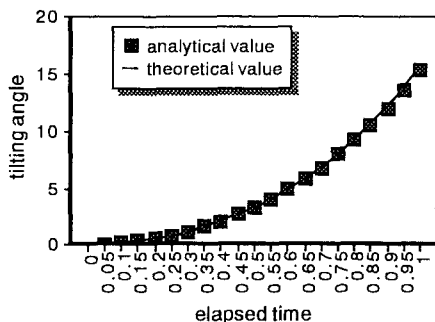


Fig.3 DDA test result (toppling only)

(4)sliding and toppling

$\phi=12^\circ$ の時は理論上はすべりながら転倒する破壊が発生する。すべりながら転倒するという破壊モードの理論値を運動方程式から陽な形で導き出すことは非常に困難なため、Mathematicaを用いて微分方程式を数値解析的に解き、剛体ブロックの移動量 S と転倒角度 θ を求めた。

理論値とDDAによる解析値とを比較するとFig.4, Fig.5のようになる。この結果をみると、移動量・転倒角度ともに時間の経過に伴い、理論値と解析値の間に乖離が発生した。DDAでは転倒破壊の進行に伴い、ブロックの頂点での滑りが止まる傾向が見られた。これは、理論値は完全な剛体であるのに対して、DDAは弾性係数を非常に大きくしてはいるものの、あくまで弾性体として扱っているため、ブロックの変形が生じることで、あるいは、破壊の進行に伴って、当初予定していた破壊モードの発生条件を満たさなくなったことにより、理論値と解析値に隔たりが生じたものと考えられる。

5.おわりに

転倒破壊は垂直に近い節理の卓越した斜面でしばしば発生しており、転倒に注目した岩盤斜面の崩壊機構の解明が重要な課題となっている。本研究では単一の剛体の破壊現象という基本的な問題について、すべりと回転を伴う崩壊様式の発生する初期条件について理論的に検討し、さらに数値実験をおこない、両者の挙動の差異を比較した。

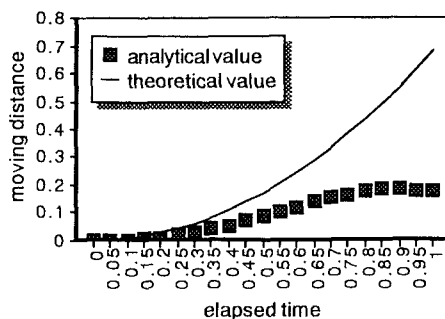


Fig.4 DDA test result (sliding and toppling)

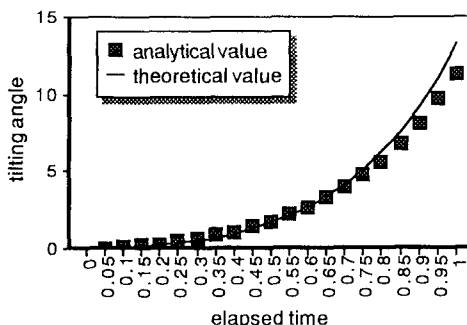


Fig.5 DDA test result (sliding and toppling)

岩盤ブロックの初期条件のみで破壊モードの発生を判断することは簡便であることから、例えば石灰岩長大斜面の崩壊部位の予測等に広く使用されており、工学上有意義な手法である。

今回の簡略な数値実験から判断すると、滑りのみの破壊モードでは数値解析的な挙動と一致を見たものの、転倒を伴う破壊モードの発生が期待される場合には、破壊の進行に伴い、必ずしも当初予期していた挙動のみが発生するわけではないことが確認できた。

今後は、ブロックの形状の工学的な評価プロセスとあわせて、挙動評価の簡略化に役立てたいと考える。

【参考文献】

- 001 Shi, G. and Goodman, R.E. (1984) : Discontinuous deformation analysis, Proceedings of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Evanston, Illinois.
- 002 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.
- 003 Stephen Wolfram : Mathematica, (A System for Doing Mathematics by Computer).