

(34) 斜面上の2つのブロックの安定性に関する数値解析による検討

前田建設工業(株)

齊間 正

正会員 ○久慈雅榮

井上淳一

橋詰 茂

A Study of 2 Blocks Stability on Slope by Numerical Analysis

Tadashi SAIMA

MAEDA Co. Ltd.,

Masayoshi KUJI

Junichi INOUE

Shigeru HASHIZUME

Abstract

Usually many cracks exist on natural rock mass, and these cracks control stability of rock slopes. Therefore, to estimate rock slopes stability, we must be modeling rock slopes based on 3-dimensional crack disposition, and examine the stability by take attention to behavior of blocks separated by cracks. Finite Element Method with joint-element (call JFEM) and Distinct Element Method (call DEM) can calculate the behavior of each blocks. However, in case of apply these method to model of rock slope, it is frequently hard to estimate the analyzed effect, because of complexity of reciprocal relation of blocks by many separated blocks number and irregular blocks shape.

So we prepare the models that are one or two blocks on slope, and examine the estimate stability method in case of apply these method to rock slopes, by apply JFEM and DEM to these models and compare the theoretical solution. Here, JFEM is adopted by Goodman's joint element and DEM is adopted by "UDEC".

The result are followings.

- (1) JFEM's stability condition of one block on slope corresponds Ashby's stability diagram, and DEM's corresponds Sagaseta's.
- (2) Friction angle of JFEM's effect of two blocks is biased to stable side, and in case of toppling, it is difficult to conclude stable angle.
- (3) DEM is just fit to theoretical solution and good method for static problem.

1. はじめに

自然の岩盤は通常多くの亀裂が発達しており、この亀裂が岩盤斜面の安定性に大きく影響する。従って、岩盤斜面の安定評価を行うには亀裂の空間的配置に考慮して斜面をモデル化し、そして亀裂により分離されたブロックの挙動に注目して評価する事が必要となる。ブロック個々の挙動を解析できる数値解析方法としてはFEMジョイント要素法(以下JFEMと呼ぶ)や個別要素法(以下DEMと呼ぶ)などがある。しかし、これらの解析方法をモデル化した岩盤斜面に適用した場合、分離されたブロックの数が多い事やその形状が不規則であるためにブロック間の相互作用が非常に複雑となり、得られた結果の評価が困難である事が多かった。

そこで、斜面上に1個のブロックを置いたモデルと2個のブロックを置いたモデルを作成し、このモデルについてJ F E MとDEMを適用、理論式と比較する事によってこれら解析手法を岩盤斜面に適用した場合の安定性評価方法について検討した。なお、J F E MとしてはGoodmanのジョイント要素を組み込んだF E M解析法を、DEMとしては「UDEC」を用いた。

2. 計算モデルと計算方法

計算モデルは斜面上にブロック1個を置いたモデルおよびブロック2個を置いたモデルの2種である。

ブロック1個のモデルは図-1に示すように、傾斜角 30° の斜面上に断面積 100m^2 の長方形ブロックを1個置いたものである。このモデルに対し、ジョイントの摩擦角をパラメーターにJ F E

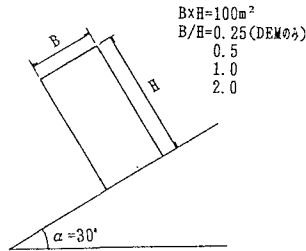


図-1 モデル図
ブロック1個の場合

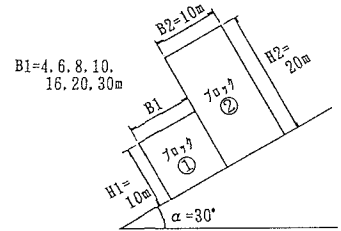


図-2 モデル図
ブロック2個の場合

MおよびDEMで解析を行い、安定・不安定の判定およびブロックの挙動を追跡した。

ブロック2個のモデルは図-2に示すように幅 $B_1\text{m}$ 、高さ 10m のブロック（ブロック①）と幅 10m 、高さ 20m のブロック（ブロック②）の2個の長方形ブロックを傾斜角 30° の斜面上に並べて置いたものである。このモデルに対し、ブロック1の幅 B_1 をパラメーターにJ F E MとDEMで解析を行い、ブロックが安定する所要摩擦角を求めた。計算ケースは表-1に、使用した物性値は表-2に示すとおりである。

計算方法はJ F E MとDEMとも2ステップからなる。第1ステップではモデルに初期応力を発生させるため、計算ブロックの下方に安定ブロックを置き、自重計算を行った。第2ステップではこの安定ブロックを取り除き、当該ブロックに等価節点力を作用させて計算を行った。計算はJ F E Mの場合、変位で制御し、基本的には速度ベクトルで制御した。

表-1 計算ケース一覧表
(ブロック2個の場合)

ケースNo.	ブロックの縦横比 B/H		ブロックに対する安定性	
	ブロック1	ブロック2	ブロック1	ブロック2
1	4/10	10/20	不安定	不安定
2	6/10	10/20	安定	不安定
3	8/10	10/20	安定	不安定
4	10/10	10/20	安定	不安定
5	16/10	10/20	安定	不安定
6	20/10	10/20	安定	不安定
7	30/10	10/20	安定	不安定

表-2 使用物性値一覧表

解析方法	単体重量	弾性係数	ポアソン比	ジョイント係数	
	γt	E	ν	ks	kn
	[tf/m^3]	[tf/m^2]	[-]	[tf/m^4]	[tf/m^3]
J F E M	2.50	1.0×10^5	0.25	2.0×10^4	6.0×10^4
D E M	2.50	1.0×10^5	0.25	1.0×10^4	1.0×10^4

3. 計算結果と考察

(1) 1個のブロックの検討

斜面上に置かれた1個のブロックの安定性はジョイントの粘着力を $C=0$ とした場合、すでに多くの研究者により検討が行われおり、Ashby、Bray&Goodman¹⁾、Sagaseta²⁾、石田ら³⁾の安定図表が知られている。今回の計算はこれら理論計算と比較する事により、J F E MとDEMの基礎的な適用性を明らかにする事を意図したものである。

図-3はJ F E MおよびDEMによる解析結果をプロットしたものである。J F E Mの結果はAshbyの安定図に、DEMの結果はSagasetaの安定図に対応する事が判る。この理由は西村ら⁴⁾も述べている通り、Ashbyが安定条件をブロックの幾何学的条件から求めており、剛性方程式を連立で解くJ F E Mに対応すると考えられるのに対し、Sagasetaは安定条件を並進・回転に関する運動方程式を解く事で求めており、運動方程式

を差分で解くDEMに対応していると
考えられるからである。この結果より、
ブロックの安定評価やモデルの破壊形
式の判定はJ F E Mの場合、ジョイン
トの降伏状態、ジョイント発生力およ
び変位図による変位モードの判定で可
能な事が、DEMの場合は速度ベクト
ルを基本に、変位の時刻歴グラフや計
算終了時の変位図で確認できる事が判
明した。また、滑動やトッピングの
表現も疑似的ではあるが、J F E Mで
も可能な事が判明した。

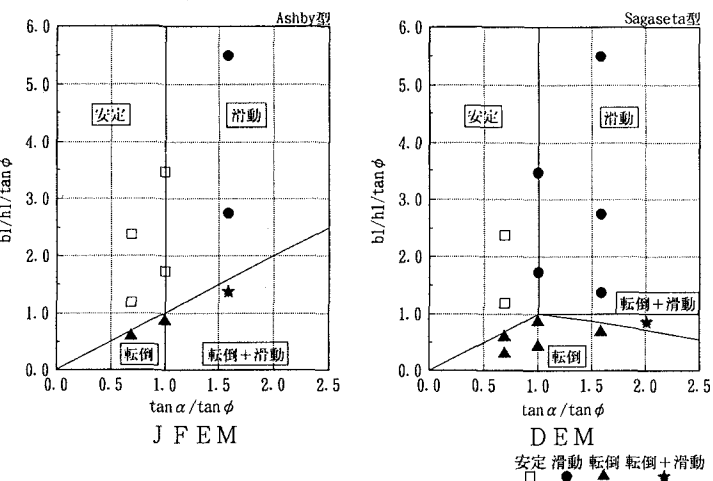


図-3 ブロック1個の解析結果

(2) 2個のブロックの計算結果

a) 理論値

斜面上に置いた2個のブロックの安
定性はブロック1個の場合と異なり、
ブロック間の相互作用を考慮して検討
する必要がある。今回の検討は、この
ような複雑な相互作用が生じるモデル
についてJ F E MおよびDEMを適用
し、安定性評価を行う事で、これら解
析手法を岩盤斜面に適用した場合の安
定性評価方法を明らかにしようと意図
したものである。

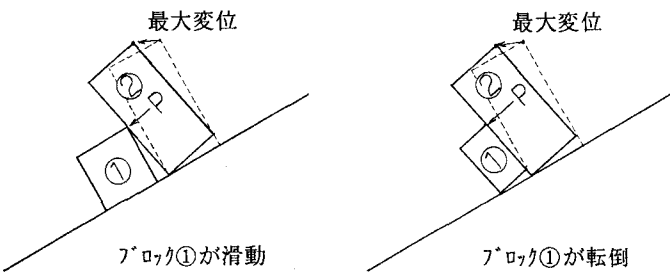


図-4 ブロックの破壊形態

図-4はブロック②が転倒しようとする瞬間を表したものである。この時点のブロック②よりブロック①
への作用力をPとし、ジョイントの粘着力をC=0とすれば、モデルが安定するための所要摩擦角はブロック
①の安定条件により決定され、下記ようになる (Goodman⁵⁾)。

$$\begin{aligned} \text{ブロック①の滑動条件} \quad 0 \leq P \leq & \frac{W_1(\cos \alpha \cdot \tan \phi - \sin \alpha)}{1 - \tan^2 \phi} \\ \text{ブロック①の転倒条件} \quad 0 \leq P \leq & \frac{W_1(t_1 \cdot \cos \alpha - h_1 \cdot \sin \alpha)}{2(h_1 - t_1 \tan \phi)} \end{aligned}$$

計算モデルに対して理論計算を行った結果を図-5に示す。所要摩擦角はB₁/H₁=0.77を境界とし、境界値
以上の場合は滑動条件で、境界値以下の場合は転倒条件で決定される。

b) J F E M

図-5はモデルが安定するための所要摩擦角をJ F E Mにより2.5°刻みで求めて、前述した所要摩擦角と
B₁/H₁の関係図にプロットしたものである。理論値に比べ、転倒条件と滑動条件の境界がB₁/H₁=1.0程度にず
れている事、滑動条件で決まる場合の所要摩擦角が5°程度ずれている事が判る。この結果はブロックの発生
変位量からも確認される。図-6はブロックに発生する最大変位量 (ブロック②の左上点: 図-4 参照) と
ブロック①の縦横比の関係性をプロットしたものである。モデルの安定がブロック①の滑動条件で決まる場合
の変位量が1 cm以下であるのに対し、B₁/H₁ ≤ 1.0の場合の変位量は3 cm程度となっており、この部分はブロ
ックがトッピング的な挙動をしている事がうかがわれる。これはJ F E Mがジョイント間の微小な変位お

よび回転を対象に理論展開されており、このような大変位を伴う回転を考えていない事と相俟って、J F E Mが理論式と異なりブロックを弾性体と仮定しており、ジョイント発生応力の分布、ひいてはブロック間の作用力Pが理論式と異なって来る事が原因と考えられる。なお、ブロック①が転倒する条件、 $B_1/H_1=0.4$ の場合は計算が振動しているようであり、不安定であった。

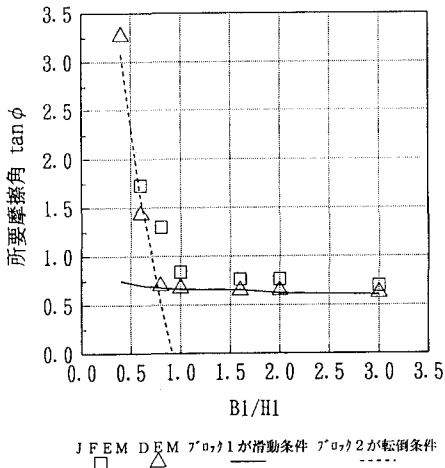


図-5 計算結果と理論値との比較

図-7は $B_1/H_1=0.6$ の場合についてジョイントの摩擦角と最大変位量の関係をプロットしたものである。図示したケースでは計算は全て収束しているが、発生変位量は $40^\circ \leq \phi \leq 50^\circ$ 、 $52.5^\circ \leq \phi \leq 57.5^\circ$ 、 $\phi \geq 60^\circ$ の3種類に区分できる。理論式から求められる所要摩擦角が $\phi = 57.9^\circ$ である事を考え併せると、 $\phi = 60^\circ$ は理論値に対応したものであり、 $40^\circ \leq \phi \leq 50^\circ$ はブロックがトップリング状態の安定条件を、そして $52.5^\circ \leq \phi \leq 57.5^\circ$ はその中間状態を表しているものと考えられる。このようにブロックが2個以上の場合はブロック相互のせり合い等のため、状況の異なったいくつかの安定状態が生じる。計算の収束性だけで安定性評価を行うのは危険であり、発生変位量等も見ながら総合的に判定する必要がある。

c) DEM

上記J F E Mと同様に、DEMによりモデルが安定するための所要摩擦角を 1° 単位まで求めた。その結果は前述の図-5に△印で示すとおりである。DEMは滑動条件、転倒条件およびその境界をも含めて理論値と非常に良く一致しており、ほぼ完全にシミュレートしている事が判る。また、今回の計算ではJ F E Mで見られたようなトップリング状態でのいくつかの安定状態、すなわち、モデルの幾何学的条件に対して複数個の所要摩擦角が求められるような事は起こらなかった。

図-6の△印はブロック①の縦横比とブロック②の最大変位量の関係をプロットしたものである。 $B_1/H_1 \geq 0.6$ の範囲では変位量が5 cm程度と余り変化しないのに対し、 $B_1/H_1 = 0.4$ では変位量は23 cmと突出している。すなわち、 $B_1/H_1 \geq 0.6$ の範囲は滑動条件に、 $B_1/H_1 = 0.4$ は転倒条件に対応するものである。なお、転倒条件と滑動条件の境界は $B_1/H_1 = 0.5$ 程度であり、理論値から求められる境界 $B_1/H_1 = 0.77$ とややずれている。

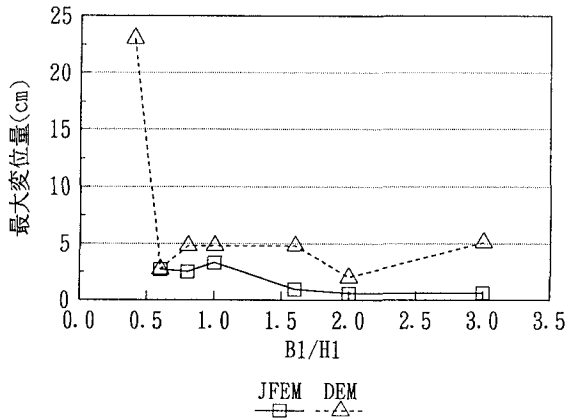


図-6 ブロック①の縦横比と最大変位量の関係

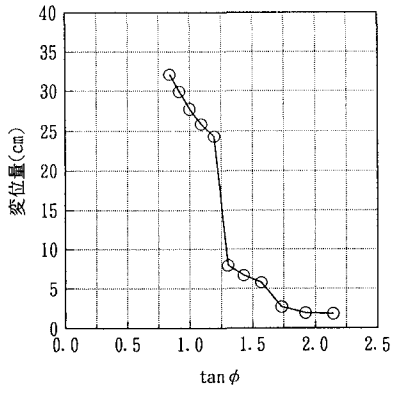


図-7 $B_1:H_1=0.6$ の場合の内部摩擦角と変位量の関係

以上、ブロック2個の場合はブロック1個の場合と異なり、幾何学的条件から求められる理論値と非常に良く一致した。これは計算モデルが斜面上に並べられた2個のブロックから成っており、そして、前方ブロックは基本的に安定であり、後方ブロックからの作用力によってモデル全体の安定性が決定されるためである。すなわち、モデルの安定性を支配するブロック間の作用力にはブロック1個の場合とは異なって動力学的な効果の入る余地が少なく、静力学的な力が支配的であると考えられるからである。

4. 結論

斜面上に置いたブロック1個のモデルの検討より、J F E MはAshbyの安定図に、D E MはSagasettaの安定図に対応している事が判明した。そして、D E Mはもちろんであるが、J F E Mも疑似的にブロックの滑動やトップリングを表現できる事が判明した。

斜面上に置いたブロック2個のモデルでの検討では、J F E Mはブロックが安定するための所要摩擦角をやや安全側に評価する事が判明した。ただし、安定性が転倒条件で決定される場合には前述したように所要摩擦角が一義的に決定出来ないと言うような限界があり、現実斜面のモデル化、計算結果の評価に当たっては注意を要する。一方、D E Mは静力学的な意味でモデルを非常に良くシミュレートしている事が判明した。このようにブロック間の作用力が支配的な問題、すなわち、モデル的に静力学的な力が支配的な問題に対してD E Mは非常に有効な方法と考えられる。

参考文献

- 1) Bray, J. W, Goodman, R. E: The Theory of Base Friction Model, Int. J. Rock Mech, Min. Sci. Vol. 18, No. 6, pp. 453-468, 1981
- 2) Segaseta, C: On the Model of Instability of a Rigid Block on an Inclined Plane, Rock Mech. & Rock Eng., Vol. 19, pp. 261-266, 1986
- 3) 石田、日比野、北原、伊藤：個別剛体要素法の斜面の転倒・滑落破壊への適用性，電力中央研究所報告，No. 384007, 1984
- 4) 西村、木山、藤村：離散剛要素法による岩盤斜面の解析，第23回土質工学研究発表会，No. 408, 1988
- 5) R. E. Goodman(大西、谷本共訳)：わかりやすい岩盤力学，鹿島出版会，1984