# 個別要素法による岩盤斜面崩壊解析における 入力値の影響に関する数値実験

# 平松 大周1\*・西村 強1・辻野 孝治2

#### <sup>1</sup>鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻(〒680-8552鳥取市湖山町南4丁目101) <sup>2</sup>元鳥取大学大学院 工学研究科建設工学専攻(現水資源機構) \*E-mail:hiramatsu06047@cv.tottori-u.ac.jp

本研究の目的は、個別要素法(DEM)を用いて、岩盤斜面内で発生する進行的な破壊とそれが大変形に 至る過程を解析する技術を開発することである.本文は、DEM解析を用いた岩盤斜面解析における、入力 条件の影響について報告したものである.入力条件として要素配列、要素間結合強度、斜面傾斜角に注目 し、これらが斜面の安定性に与える影響を数値実験により示すとともに、斜面が大変形に至る過程を解析 した.解析には要素結合を考慮したモデルを用い、重力増加手順を利用して実斜面規模の応力状態の再現 を試みた.本報告では、斜面内部に弱層を想定したモデルを用いた解析例についても報告する.

KeyWords: rockslope, distinct elementanalysis, progressive failure

### 1. 緒言

岩盤は複雑な地質構造より形成され、特に断層、節理、 層理等、大小様々な不連続面が存在するため、従来の極 限平衡解析では安定性を評価することが難しい. そのた め、不連続面を直接モデル化する方法として、ジョイン ト要素を用いた有限要素法(JFEM)、剛体バネモデル

(RBSM), 個別要素法(DEM), 不連続変形法(DDA) などの解析手法が開発されている. また, 不連続面の数 が膨大にある岩盤については、不連続面を含む岩盤を等 価な連続体に置き換える手法として、クラックテンソル 法やマイクロメカニクスに基づく連続体理論 (MBC) が 開発されている.実斜面に適用するにあたっては、各手 法の特徴を把握し,解析しようとする挙動に対して適切 な解析手法を選定する必要がある<sup>1)</sup>. このうち, DEM は, 岩盤を構成する岩塊の個々の動きを、大変形に至るまで 追跡することが可能であり、大規模崩壊に至る過程を解 析する手法として適していると考えられる.近年では, 要素間に結合力を考慮できるモデルも提案され、岩石供 試体内の破壊過程のシミュレーションなどに利用される ようになっている. このような供試体解析では、直径数 mmの円形要素を用いて解析が進められるが、その要素を 用いて実斜面を作成することは不可能である.供試体寸 法モデルが示す力学的性質を保持し、そして実斜面内の

応力レベルで安定性を評価するためには、何らかの手法

#### を考案する必要がある.

本文では、要素間結合モデルを導入した個別要素法<sup>2</sup> による岩盤斜面の安定解析における入力条件の影響につ いて報告する.入力条件として要素配列,要素間結合強 度,斜面傾斜角に注目した.斜面のすべりに対する安全 率は強度定数 c, ¢で評価できるが,DEM 解析では c, ¢の値 を直接の入力変数とすることはできず、要素間結合強度 や要素配列を試行錯誤的に変化させて解析をせざるを得 ない.また、要素配列は亀裂の進展方向に影響を与える 因子にも成り得る.要素配列を表す指標としては要素接



触角を採り上げた.本文は、これらの入力条件が、岩盤 斜面の安定性に与える影響を解析的に示すとともに、斜 面が大変形に至る過程を解析したものである.併せて、 斜面内部に弱層を含んだモデルの解析例についても報告 する.

解析方法には、遠心加速度模型実験の相似則<sup>3</sup>を参考 に ln の斜面モデルを n 倍の重力加速度場で解析する手順 を導入している.この方法により、供試体モデルから得 た力学特性を斜面モデルに反映させ、さらには斜面モデ ルに実物レベルの荷重を与えることができる.この詳細 については、既に報告している<sup>4</sup>.

## 2. 斜面モデル設定と積層体としての力学特性の把握

図-1 に示すように高さ h=100cm, 幅 w=200cm, 斜面傾 斜角βの岩盤斜面モデルを設定する.等粒径 (D=20cm)の 円形要素を規則的に配列した規則配列モデルと,3種 (D=20,14,10cm)の異なった円形要素をランダムに配列 させた不規則配列モデルを作成した.規則配列モデルで は、要素接触角α(図-2 接触法線方向と水平方向がなす 角)に注目して要素配列が斜面崩壊モードに与える影響 を解析する.要素接触角はα=35°,45°,55°の3種を設定し, 斜面傾斜角は 80°とした.一方,不規則配列モデルは、規

円要素	密度	$\rho = 2650 (\text{kg/m}^3)$		
	直径	<i>D</i> =2.0, 1.4, 1.0(cm)		
	接触剛性係数	<i>k</i> ,≓100MN/m (法線)		
		<i>k,=25</i> MN/m (接線)		
	静止摩擦係数	μ=0.577 (tan <sup>-1</sup> μ=30°)		
結合物質	剛性係数	$E_n$ =100MN/m <sup>2</sup> (法線)		
		<i>E_=</i> 25MN/m <sup>2</sup> (接線)		
	せん断強度	$\tau_c$ =1.02.0MN/m <sup>2</sup>		
	引張強度	$\sigma_c$ =1.02.0MN/m <sup>2</sup>		

表-1 円要素に与えた特性



図-2 要素接触角



入力値	配合比 D29 D14 D10	451738			
	引張強度 o (MN/m <sup>2</sup> )	1.0	1.0	20	2.0
	せん断強度 $\tau_{a}$ (MN/m <sup>2</sup> )	1.0	2.0	1.0	2.0
解析結果	一軸王縮強度 $q_{(MN/m^2)}$	1.46	1.63	1.82	3.11
	圧裂引張強度 $\sigma_{MNm}^2$ )	0.402	0.426	0.722	0.869
	粘着力 <b>(MN</b> m <sup>2</sup> )	0.480	0.374	0.485	0.734
	内部摩擦角 ()	28.9	43.4	33.6	37.7
	ヤング率 E(MN/m <sup>2</sup> )	145			
	ポアソン比レ	0295			



図-4 斜面崩壊解析の手順

則配列に比べ特定の配向方向を持たない配列となっている.不規則配列モデルにおいては斜面傾斜角β-60°,70°,80°の3種を設定した.

不規則配列モデルについて,積層体としての力学特性 を把握するために,供試体モデルを用いて圧縮解析およ び圧裂解析を行った.図-3 に示すように高さ h<sub>F</sub>=120cm, 幅 w<sub>0</sub>=60cmの圧縮解析モデルと,直径 d<sub>2</sub>=60cmの圧裂解析 モデルを用いる.なお,モデルは原積層体から圧縮解析 モデル(120×60cm<sup>3</sup>)および圧裂解析モデル(直径 60cm)を切 り出して作成した.また,図-3 には載荷ピーク時の破壊 点の分布も示している.表-1 に接触剛性係数や結合物質 に与えた解析条件を示す.表-2 に圧縮解析・圧裂解析よ り求めた供試体モデルの物性値を示す.表-2 中の要素直 径の配合比は,全体を 100 として示しており,下添字は D<sub>20</sub>の場合は,直径が 20cmであることを示している.

## 3. 岩盤斜面の崩壊解析

加速度を段階的に増大させる解析手順をとる. 図-4 に 示すように、加速度 $(n_iG)$ において、静止状態が得られたと する.この時点では、適用された加速度 $(n_iG)$ の作用では要



90000step 130000steps (a)  $\alpha = 35^{\circ}, \beta = 80^{\circ}, \sigma_{\circ}, \tau_{\circ} = (1,1), n = 60$ 



80000step 100000steps (b) α=45°,β=80°(σ,τ)=(12),n=175 ● せん断破壊点 ● 引張破壊点 図−5 規則配列モデルにおける破壊の進行



素間の破壊はほとんど起こらず、一回の計算時間 1step(Δr =1.0×10<sup>5</sup>scc)における全要素の変位増分は減少し、モデルは 静的安定状態に達している.これは、n<sub>i</sub>G により導入され たエネルギーが要素間の接触点と結合物質の両方にひず みエネルギーとしてモデル内に吸収されたことを意味す る.続いてnをn<sub>i</sub>+Δnに増加させる.ここで、増分Δnは最 小で5とする.このとき要素間に破壊が生じ、要素個々の 変位が集積して斜面が大変形に至った場合、換算限界高 さは  $n_i h_i$  より大きく,  $(n_i + \Delta n) h_i$  より小さいことになる. 斜 面が大変形に至るまで nを増加させる手順を繰り返し, 解 析を行うものとする.

上述のような大変形に至った解析例として、図-5(a)に β-80°、(α、c)=(1,1)、α-35°の規則配列モデルの破壊点の分布 を示す. 図中の赤色部分は引張破壊を、青色部分はせん 断破壊を示している.まず斜面 E点(図-1)に応力集中が発 生し要素間にせん断破壊が生じて、要素接点角方向に沿



図-7 DEM 解析と極限平衡解析による限界高さの関係



**2000日** 図-8 弱層を含むモデル



図-9 弱層を含むモデルの解析結果 (弱層部結合強度 0.75MPa(上)および 0.25MPa(下))

ってせん断破壊が伸長していく. その後, せん断亀裂先 端に引張破壊が生じて、斜面 DE(図-1)方向に進展している. 図-5(b)に示す(a, t)=(12), a=45°のケースでは、上部地表面 CD(図-1)に引張破壊が生じて、そして下方に向かって進展 している.これら2ケースの破壊過程は、金子らっによっ て示され岩盤斜面の4種の典型的崩壊モードをよく表現し ている. また, 以上の結果は要素間結合強度 στ および要 素接触角αは斜面崩壊モードを支配する因子となることを 示している. 図中の step 数は, n の値に増分を与えた後, △で繰り返した計算回数を示している. この繰り返し回数 に∆tを乗ずると、荷重増分(5G)を斜面全体に与えてからの 経過時間となる. これは、解析における経過時間である が、文献によれば時間に関しては、 tm=tph が成り立つ %こ とから、実時間への読みかえも可能である. ここで添字 p, mはそれぞれ実物と模型を表す.例えば、図-5(a)の 130000stepのとき, Δt=1.0×10<sup>5</sup>sec であるので 78sec と計算さ れる.

図-6に、β=70°、(q、τ)=(1,1)の不規則配列モデルにおける 破壊点の分布図と変位図を示す.まず斜面 E 点 (図-1) 付 近の要素間に破壊が生じて、法面や斜面上部へ向かって 破壊が進行している. その後, 上部地表面でも引張破壊 が観察されるようになる. DEM 解析により求めた崩壊時 の換算限界高さ H(=nh)と、円弧すべりを仮定した極限平 衡解析<sup>り</sup>より求められる限界高さ H<sub>e</sub>を比較した例を図-7 に示す.極限平衡解析に際しては、 ¥25kN/m<sup>3</sup>と仮定し、 表-2に示した c, φの値を用いている. この図より, β-70 程 度を境界にして、これ以下の角度では DEM 解析結果の与 える換算限界高さ Haが,極限平衡解析の与える限界高さ Heより低く,これ以上の角度では,DEM 解析結果の与え る換算限界高さ Haが高いことがわかる. このように極限 平衡解析の与える限界高さがβ=70°以上で DEM 解析結果に 比較して過小な評価を与えていることには、極限平衡解 析では亀裂の伸長・発生などの逐次破壊が考慮されてい ないことなどが関係していると考えている.

以上の解析結果からも観察できるように、本解析法に よれば、法面や上部地表面で発生する引張破壊など様々 の破壊モードを表現できるものと判断される.

#### 4. 弱層を有する斜面の解析

弱層が斜面内部に存在する場合のモデル化及び解析を 実施した.図-8のように弱層の間隔10cm,水平に対する 弱層の傾斜角を65°とする受け盤を想定したモデルを設定 した.青色部分が弱層を示している.弱層の設定方法は, 弱層に相当する部分の要素間結合強度の値を,周辺部よ りも小さくすることにより設定した.弱層の強度が斜面 の限界高さと崩壊形態に影響を与えると考え,弱層部の

要素間結合強度の値を変えて解析条件として与えた. た だし、結合強度は引張強度とせん断強度が同じ値になる よう設定した. 図-9 は, 弱層部の結合強度 0.75MPa と 0.25MPa のケースの破壊点分布図である。崩壊形態と弱層 強度の関係に注目すると,弱層強度が大きい場合,すな わち弱層とそれ以外の部分との強度の差が小さい場合は すべり破壊となる傾向がある(図-9上).一方,弱層の 強度が小さい場合では、トップリング崩壊に類似した崩 壊形態を示しており,受け盤の特徴が顕著に表れている (図-9下).トップリングが発生する条件は、斜面上の ブロック挙動から分かるように、斜面の傾斜角、ブロッ クの内部摩擦角およびブロックの高さと幅との関係によ って決まるとされている 8. 本解析においては、弱層強度 σ,τ=0.25MPa のケースがトップリング崩壊を示しているこ とから、モデルの設定条件を適切に設定することにより 種々の崩壊形態を表現できる可能性があると思われる.

#### 5. 結言

集合体としての強度を知るための供試体解析モデルと 斜面解析モデルに同寸法の要素を採用するとともに、斜 面内応力状態の再現に対しては、遠心加速度場の原理を 参照して重力加速度を増大させる解析手順を報告した. 要素配列および要素間結合強度は、斜面の安定性ならび に崩壊過程に影響を与え、斜面の崩壊過程を支配する因 子の一つであることが示された.極限平衡解析との比較 を示したが、斜面傾斜角の変化に対する限界高さの変化 は、70°より急斜面側で DEM 解析結果の方が大きく、緩斜 面側では極限平衡解析が大きくなった. これには、逐次 破壊や破壊面の形状、地盤材料の破壊条件などの差異が 関係していると考えているが、明確な根拠を得るには至 っていない. 今後は、斜面の模型実験を実施し、実験結 果と DEM 解析および極限平衡解析との比較を検討するこ とが必要である.また,弱層を入れた斜面解析として, 受け盤を想定したモデルの解析例を示した. 受け盤特有 のトップリング崩壊に類似した崩壊が確認された.本解 析では、斜面内に弱層を任意に設定できることから、入 力条件を検討することで,様々な斜面を想定した崩壊解 析が可能であると思われる.

#### 参考文献

- I) 倉岡千郎,木下慎逸,桜井達朗,ダマラフセイン,大角恒雄: 不連続性岩盤斜面における数値解析の適用と課題,こうえいフォーラム7号,1998.
- 2) Potyondy, D.O., Cundall, P.A.: A bonded-particle model for rockck systems. Internationallournab/RockMechanicsandMiningsciences Vol41pp.1329-1364,

- 3) 高田直俊, 日下部治:講座遠心模型実験3. 原理, 土と基礎, Vol35, No.12, pp.89-93,1987.
- 4)西村強,福田毅,辻野孝治:岩盤斜面安定解析のための2次元 個別要素モデル,土木学会第38回岩盤力学に関するシンポジウ ム講演論文集,Vol38, pp7-12,2009.
- 5) 金子勝比古, 古賀誠, 野口義文: 均質岩盤斜面の崩壊過程に関

する数値解析的検討,資源·素材学会誌, Vol.109, pp.797-802,1993.

- 6) 日下部治,谷口栄一:講座 遠心模型実験9. 適用事例一動的問題,土と基礎, Vol.36, No.8, pp83-84.
- 7)Hoek,E.&Bray,J. (小野寺透,吉中龍之進訳):岩盤斜面工学, pp.169-175,朝倉書店, 1979.
- 8) 日本材料学会:岩の力学-基礎から応用まで、pp646647, 1993.

## NUMERICALSIMULATIONONEFFECTSOFINPUTPARAMETERSINDEMON FAILUREMODEOFROCKSLOPE

## HironoriHIRAMATSU, TsuyoshiNISHIMURA and KojiTSUJINO

This paper presents a numerical modeling of progressive failure inrock slope using the distinct element analysis. The rock slope is represented by a packing of bonded circular elements. The stability and progressive failure process are simulated based on the gravity increased procedure while keeping the properties of the slope constant. Numerical results are shown focusing on the dependency of the allowableslopeheightandpossible failure modes on the progressive failement and the strength of the bonded material. This paper also shows the effect of pre-existence discontinuous surface in slope on the modes.