

個別要素法による斜面の進行性崩壊解析と 極限平衡法による解析結果の評価

栢野伸也^{1*}・平松大周¹・西村 強¹

¹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)

*E-mail: kayano07017@cv.tottori-u.ac.jp

要素間結合を考慮した個別要素法 (DEM) を用い、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の解析を試みている。その試みでは、縮尺 $1/n$ の幾何学的な相似モデルを重力加速度が n 倍の場で解析することで、模型斜面内において実物スケールの応力レベルが表現できるとする手順を採用している。既報の解析例では、特に急勾配斜面において、DEM解析で求めた換算限界高さが極限平衡解析の与える限界高さを上回る結果を得ている。このことは、DEM解析では、斜面内で局所的な破壊が進行して、やがて斜面の破壊に至る、いわゆる進行性破壊を扱っているとの考察をうまく説明できない。この点について、一般化された極限平衡解析法による結果とDEM解析結果を比較した。

Key Words : *distinct element method, progressive failure, limit equilibrium method*

1. 緒言

本報告では、個別要素法 (以下 DEM) ¹⁾を用い、岩盤斜面内で発生する進行的な破壊とそれが大崩壊に至る過程を表現する解析技術の開発を試みている。既報告²⁾では、要素間結合強度や要素配列などの入力条件に注目した解析例を示した。その中で、極限平衡解析の結果と比較したところ、DEM解析の与える換算限界平衡高さ H_d は、斜面傾斜角 $\beta=80^\circ$ では、極限平衡解析が与える結果より高く、また、斜面傾斜角 $\beta=60^\circ$ になると低くなる傾向を示していた。この結果については既に他の論文においても報告されている³⁾。DEM解析では、応力集中に伴う局所的な破壊が徐々に進行して斜面モデルが崩壊に至る過程を表現している。これに対して、比較に用いた極限平衡解析 (以下 LEM) は、円弧すべりを仮定して、そのすべり面上では強度定数 c, ϕ は完全に動員されているとするものである。前述からすれば、DEM解析が与える H_d は、極限平衡解析の与えるそれより低くなる方が理解しやすい。その差異の原因の一つとして、すべり面形状の相異にあると考えた。そこで、本文では、非円弧のすべり面を表現できる一般化極限平衡法 (以下 GLEM)⁴⁾を採用し、GLEM解析が与える限界平衡高さおよびすべり面形状に対して、DEM解析結果の比較・検討を試みた。解析方法には、遠心加速度模型実験の相似則⁵⁾を参考に $1/n$ 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⁶⁾。

2. 積層体の力学特性の把握と斜面モデル設定

図-1に示すように高さ $h_f=100\text{cm}$ 、幅 $w_f=200\text{cm}$ 、斜面傾斜角 β の岩盤斜面モデルを設定する。3種の直径 ($D=20, 14, 10\text{cm}$) の円形要素をランダムに配列した原積層体からトリミングしたものである。このランダムに要素を配置した不規則配列モデルは、規則的配列に比べ特定の配向方向を持たないものとなっている。斜面傾斜角 $\beta=60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ の3種を設定した。斜面を構成する積層体の力学特性を把握するために、同じく原積層体から供試体モデルをトリミングして、圧縮解析および圧裂解析を行った。図-2に示すように高さ $h_b=120\text{cm}$ 、幅 $w_b=60\text{cm}$ の圧縮解析モデルと、直径 $d_b=60\text{cm}$ の圧裂解析モデルを用いている。圧縮解析モデルの寸法は、高さ 120cm 、幅 60cm 、および圧裂解析モデルのそれは、直径 60cm である。図-2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。圧縮解析・圧裂解析による結果を表-2に示す。

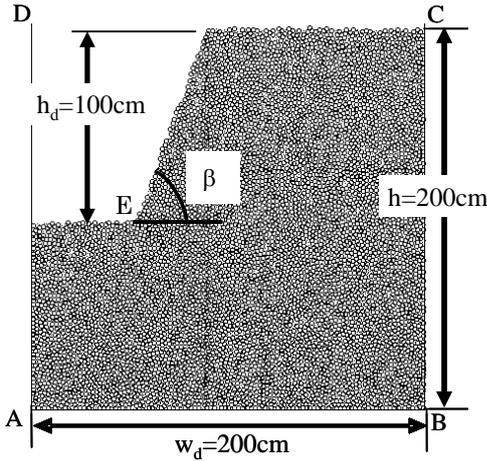


図-1 岩盤斜面解析モデル

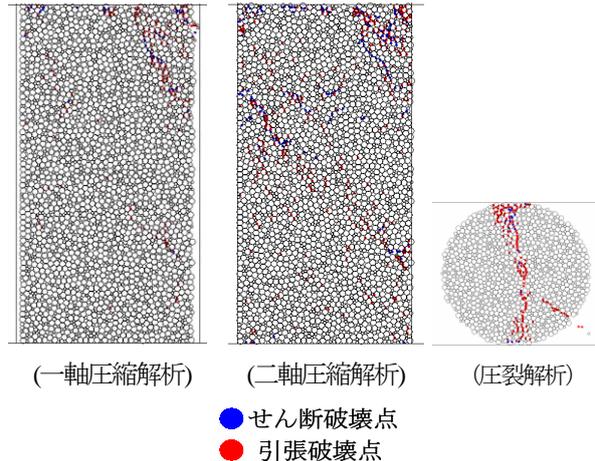


図-2 供試体解析モデル

表-1 円要素に与えた特性

円要素	密度	$\rho=2650(\text{kg/m}^3)$
	直径	$D=20, 14, 10(\text{cm})$
	接触剛性係数	$k_t=100\text{MN/m}$ (法線) $k_s=25\text{MN/m}$ (接線)
	静止摩擦係数	$\mu=0.577$ ($\tan^{-1}\mu=30^\circ$)
結合物質	剛性係数	$E_t=100\text{MN/m}^2$ (法線) $E_s=25\text{MN/m}^2$ (接線)
	せん断強度	$\tau=0.2, 0.25, 0.3, 0.35\text{MN/m}^2$
	引張強度	$\sigma=0.2, 0.25, 0.3, 0.35\text{MN/m}^2$

表-2 供試体モデルの物性値

$E(\text{MN/m}^2)$	145			
ν	0.295			
$\alpha(\text{MN/m}^2)$	0.2	0.25	0.3	0.35
$\tau(\text{MN/m}^2)$	0.22	0.27	0.33	0.35
$q_u(\text{MN/m}^2)$	0.036	0.043	0.049	0.057
$\sigma(\text{MN/m}^2)$	0.067	0.079	0.093	0.105
ϕ (°)	26.1	28.8	31.5	32.1

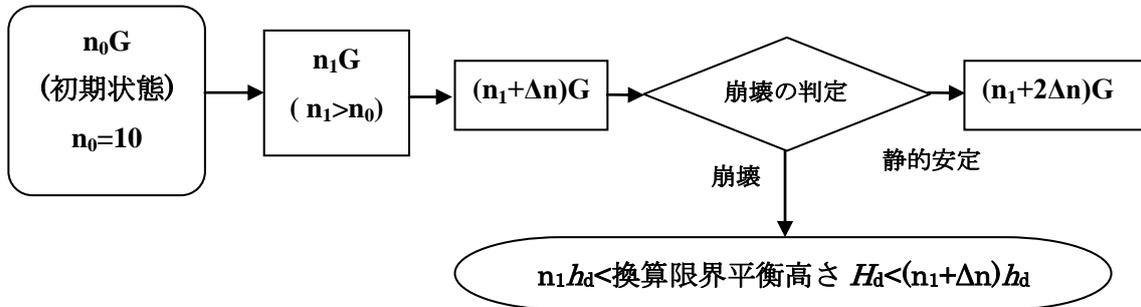


図-3 段階的な n の増加と換算限界平衡高さ

3. 斜面モデルの崩壊解析

解析定数は表-1 に示したとおりであり、図-1 は、 $n=10$ として各要素の変位増分が静止判定基準となった状態である。図-3 に示すように、 n を段階的に増大させたとき、岩盤斜面モデルの各円形要素は静的安定状態に達するか、それとも、斜面が不安定状態に至り、大変形に至るかに注目して解析するものである。上述のような大変形に至った一例として、図-4 に、破壊点の分布(上)と要素変位図(下)を示す。まず、斜面法先部の要素間に破壊が

生じて、その後、斜面上部でも観察されるようになる。また、変位図より要素の変位量も、要素間の破壊に応じて、斜面先部分から斜面上部に向い徐々に大きくなる様子がわかる。図中の step 数は、 n の値に増分を与えて後、一回の計算時間 $1\text{step}(\Delta t = 1.0 \times 10^5 \text{ sec})$ 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 Δt を乗ずると、 n の増加により荷重増分を斜面全体に与えて以降の経過時間となる。模型縮尺 $1/n$ として、加速度 ng 場を考えると時間縮尺が $1/n$ となる。今後、模型実験との対比を行うことも可能である。

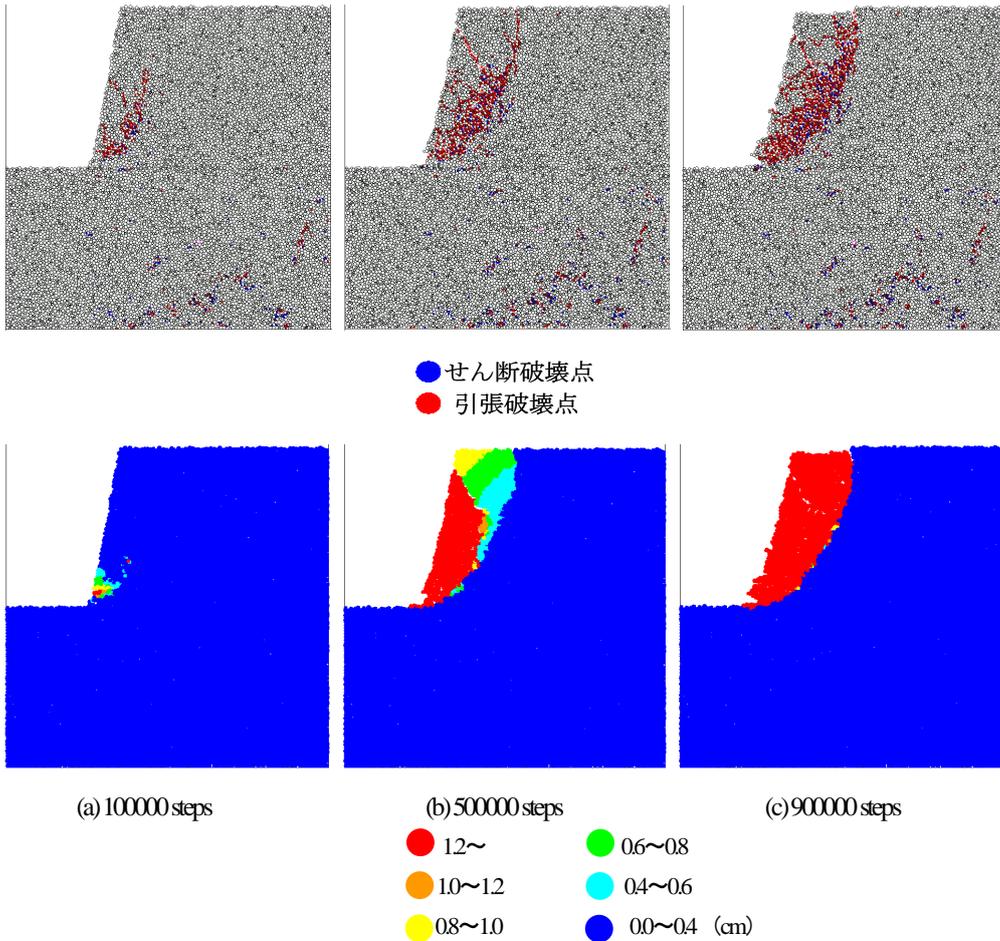


図-4 斜面内の破壊の進行(上)と変位分布(下) ($\alpha=\tau=0.20$, $\beta=80^\circ$, $n=21$)

4. 個別要素解析と極限平衡解析との比較

従来、塑性解析法としては、スライス法のような極限平衡法がよく用いられている。しかし、極限平衡法は式の数が未知数よりも少ないという不静定問題であるため、モーメントのつりあい式やブロック間面に力学的根拠のない仮定を導入して無理に静定問題に帰着させている場合が多い。そこで、このような問題を解決したとされる一般化された極限平衡法 (Generalized Limit Equilibrium Method, GLEM) を用いて DEM 解析結果の評価を行う。

極限平衡解析に際しては、 $\gamma=25\text{kN/m}^3$ と仮定し、表-2 に示した c , ϕ の値を用いている。図-5 に DEM 解析により求めた崩壊時の換算限界平衡高さ $H_d(=nh_d)$ と GLEM 解析より求められる限界平衡高さ H_g の比較を示す。 $\beta=80^\circ$ では $H_g/H_d=1$ 付近に集中していることから、DEM 解析結果と GLEM 解析結果による限界平衡高さが近い値となっていることがわかる。 $\beta=80^\circ$ から $\beta=70^\circ$, 60° となるにつれて、 H_g/H_d の値が大きくなる、すなわち、供試体解析で得られる強度が破壊面上で一様に発揮される場合よりも、DEM

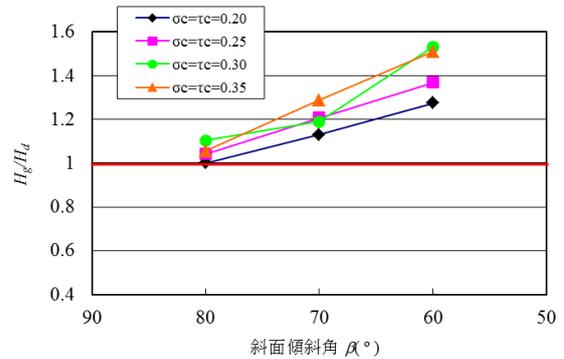


図-5 DEM解析とGLEM解析による換算限界平衡高さ

解析が与える限界平衡高さは低くなることを示しており、応力集中により破壊が逐次進行したことを示す結果と考える。また、 $\gamma=20\text{kN/m}^3$ と仮定し、表-2 に示した c , ϕ の値を用いて、DEM 解析により求めた崩壊時の換算限界平衡高さ $H_d(=nh_d)$ と GLEM 解析より求められる限界平衡高さ H_g の比較を示す。なお、以下の比較においては $\beta=80^\circ$ のみを示す。この場合においては $H_g/H_d=1.4$ 付近に集中した。次に、すべり面形状の相違の比較として図-6 を示す。

図-6 は、DEM 解析の変位分布図（上）、GLEM 解析のすべり面形状（下）を示す。この図から、特に上部地表面において、すべり面形状自体に不整合な箇所が見られる。せん断・引張という破壊モードの差異も起因していると思われる。この点においては、さらに検討を続けたい。

5. 結語

既に、著者が報告した解析における DEM 解析による換算限界高さと同極限平衡解析の与える限界高さの差異について、新たに、一般化された極限平衡解析法を採用して、DEM 解析結果の検討を実施した。その結果、限界高さは、斜面傾斜角 80° でよい一致を示し、また、 60° では DEM 解析結果が低い値を与えた。DEM 解析結果を説明する上では、斜面内部の進行的破壊を表現していると言えるが、一方、すべり面形状自体には、不整合な箇所も見られる。これについては、今後の研究課題とした。

参考文献

- 1) Potyondy, D.O., Cundall, P. A. : A bonded-particle model for rock systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, Vol. 41, pp.1329-1364, 2004.
- 2) 平松大周, 西村強, 辻野孝治: 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, 土木学会第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, vol40, p305-310, 2011
- 3) 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.
- 4) 榎明潔: 摩擦体としての土における安定と変形の解析法, 電気書院, 2007.
- 5) 高田直俊, 日下部治: 講座 遠心模型実験 3. 原理, 土と基礎, Vol.35, No.12, pp.89-93, 1987.
- 6) 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, Vol.38, pp.7-12, 2009.

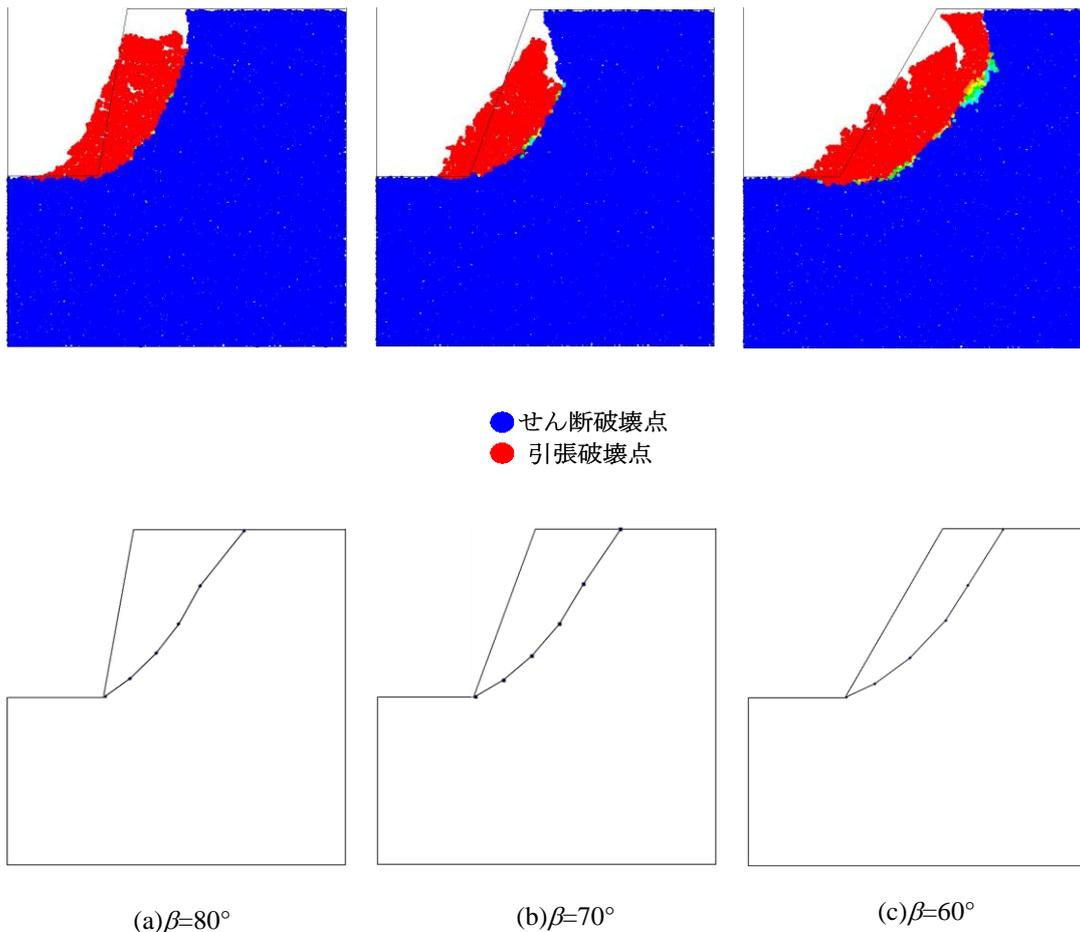


図-6 DEM 解析の変位分布図（上）と GLEM 解析のすべり線形状（下） ($\sigma_c = \tau_c = 0.20$)

DEM SIMULATION FOR PROGRESSIVE SLOPE FAILURE
- ALLOWABLE HEIGHT OBTAINED BY DEM AND LEM -

Shinya KAYANO, Hironori HIRAMATSU, Tsuyoshi NISHIMURA

This paper presents a numerical modeling of progressive failure in slope using DEM with a bonded model. Deformation and failure of a reduced-scale rock slope of h_d in height is analyzed with the condition where the gravitational acceleration is ng ($g=9.8\text{m/s}^2$ and $n\geq 1$). Three different slope angles β of 60° , 70° , 80° with constant inclination are simulated. A stability factor for the slope of $H_d=nh_d$, calculated by a generalized Limit Equilibrium Method, is greater than 1.0 for these inclinations. This must be the explanation of the successive development of failure surface in slope used in the DEM analysis.