

1. はじめに

本研究では、要素間に結合力を考慮した個別要素法（以下 DEM と略す）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を解析した。まず、設定した領域内に円形要素を配置して 2 次元積層体（以後、原積層体とする）を作成し、これより切り出した岩石供試体モデルの示す（粘着力、内部摩擦角、ヤング率などの）力学的特性を求めた。続いて、原積層体より 2 次元斜面モデルを切り出した後、遠心加速度模型実験を参考に重力加速度を $G(=9.8\text{m/s}^2)$ から nG ($n \geq 1$) に増加させて斜面モデルの安定性を解析した。この手順により、供試体解析で得られた力学的特性を引き継ぐとともに、実物スケールの斜面内の荷重状態を再現できると考えた¹⁾。本文は、入力条件として要素間結合強度、斜面傾斜角、要素接触角に注目し、これらが斜面の安定性に与える影響を検討するとともに、設定する加速度の大小に対する斜面の安定性および斜面が大変形に至る過程を解析結果として報告している。

2. 積層体としての力学的特性の把握と斜面モデルの設定

図-1 は原積層体から切り出した斜面モデルである。高さ $h_d=100\text{cm}$ 、幅 $w_d=200\text{cm}$ 、斜面傾斜角は $\beta=60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ の 3 種を設定した。等粒径 ($D=2.0\text{cm}$) の円形要素で構成された規則配列モデルと、3 種 ($D=2.0, 1.4, 1.0\text{cm}$) の異なった円形要素で構成され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 $\alpha=35^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ の 3 種を設定した。一方、不規則配列モデルは、規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。不規則配列モデルの積層体としての力学特性を把握するために、岩石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。解析条件を表-1 に、解析から得られた物性値を表-2 に示す。なお、モデルは原積層体から圧縮解析モデル ($120 \times 60 \text{ cm}^2$) および圧裂解析モデル (直径 60 cm) を切り出して作成した。

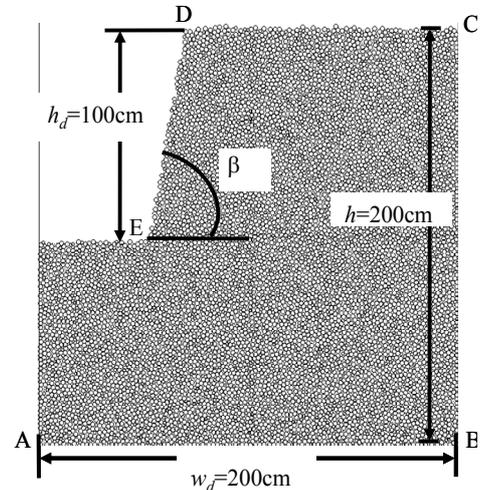


図-1 岩盤斜面解析モデル

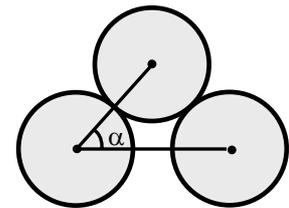


図-2 要素接触角

3. 岩盤斜面モデルの崩壊解析

図-3 に示すように n を最小で 5 ずつ段階的に増大させる解析手順をとる。作用する加速度 (n_1G) が斜面モデルに大きな破壊を与えないならば、1step ($\Delta t = 1.0 \times 10^{-5} \text{ sec}$) での全要素の変位増分は減少し、静的安定状態に達する。 n を増加させる手順を繰り返す、要素間に破壊が生じて斜面が大

表-1 円要素に与えた特性

円要素	密度	$\rho=2650(\text{kg/m}^3)$
	直径	$D=2.0, 1.4, 1.0 \text{ (cm)}$
	接触剛性係数	$k_n=100\text{MN/m}$ (法線) $k_s=25\text{MN/m}$ (接線)
	静止摩擦係数	$\mu=0.577 \text{ (}\tan^{-1} \mu = 30^\circ\text{)}$
結合物質	剛性係数	$E_n=100 \text{ MN/m}^2$ (法線) $E_s=25 \text{ MN/m}^2$ (接線)
	せん断強度	$\tau_c=1.0, 2.0 \text{ MN/m}^2$
	引張強度	$\sigma_c=1.0, 2.0 \text{ MN/m}^2$

表-2 供試体モデルの物性値

E (MN/m^2)	145			
ν	0.295			
σ_t (MN/m^2)	1.0	1.0	2.0	2.0
τ_c (MN/m^2)	1.0	2.0	1.0	2.0
q_u (MN/m^2)	1.46	1.63	1.82	3.11
σ_t (MN/m^2)	0.402	0.426	0.722	0.869
c (MN/m^2)	0.480	0.374	0.485	0.734
ϕ ($^\circ$)	28.9	43.4	33.6	37.7

変形に至るまで解析を行う。大変形に至った解析例として、図-4(a)に $\alpha=35^\circ$, $\beta=80^\circ$, $(\sigma_c, \tau_c)=(1,1)$ の規則配列モデルの破壊点の分布を示す。図中のstep数は、 n の値に増分を与えた後、 Δt で繰り返した計算回数を示している。まず斜面E点(図-1)が応力集中部となり、せん断破壊が生じ、要素接触角方向に沿ってせん断破壊が進行する。その後、せん断亀裂先端に引張破壊が発生し、斜面DE方向に進展している。図-4(b)に示す $\alpha=45^\circ$, $(\sigma_c, \tau_c)=(1,2)$ のケースでは、上部地表面CDから引張破壊が発生し、下方に進展している。これら2ケースの破壊過程は、金子ら²⁾の岩盤斜面の典型的崩壊モード4種の中の2種を再現している。また、以上の結果は σ_c, τ_c および α は斜面崩壊モードに関与する因子であることを示している。

4. 限界平衡解析による結果との比較

図-5に $\beta=80^\circ, 70^\circ, 60^\circ$, $(\sigma_c, \tau_c)=(1,1)$ の不規則配列モデルの破壊点の分布を示す。斜面E点(図-1)付近に破壊が生じて、その後、斜面上部でも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 $H_d(=nh_d)$ と、円弧すべりを仮定した限界平衡解析から求められる限界高さ H_c を比較した例を図-6に示す。限界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。この図より、 $\beta=70^\circ$ 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 H_d が、限界平衡解析の与える限界高さ H_c 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 H_d の方が高いことがわかる。このように、限界平衡解析の与える限界高さが $\beta=70^\circ$ 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、限界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られる。

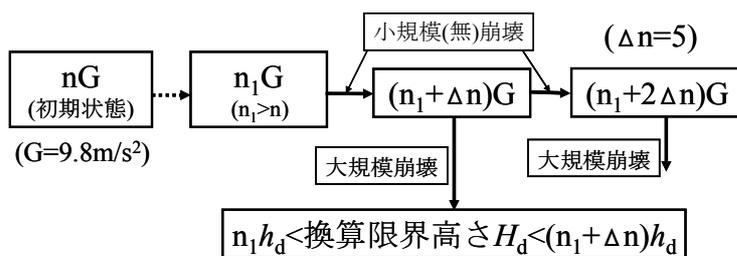
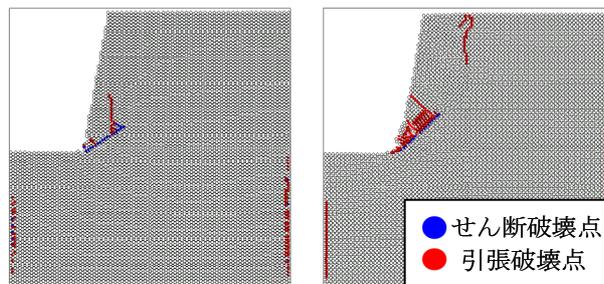


図-3 解析手順の概要



(a) $\alpha=35^\circ, \beta=80^\circ$, $(\sigma_c, \tau_c)=(1,1)$, $n=60$, 130000 steps
(b) $\alpha=45^\circ, \beta=80^\circ$, $(\sigma_c, \tau_c)=(1,2)$, $n=175$, 110000 steps

図-4 破壊点図(規則配列)

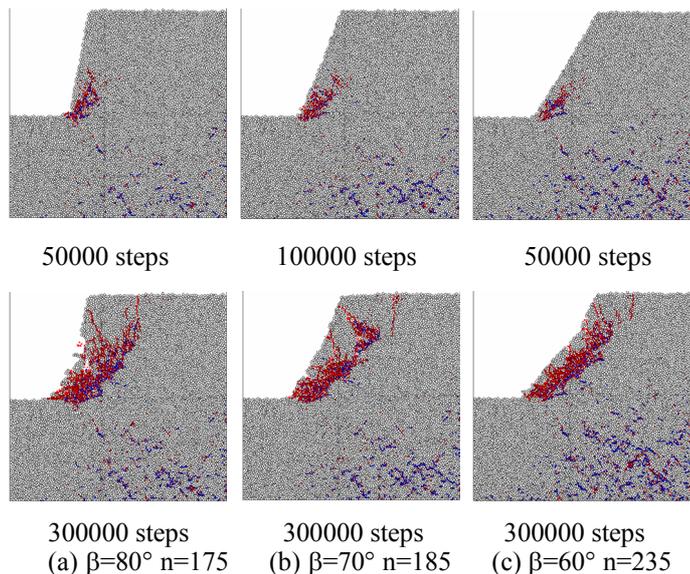


図-5 破壊点図(不規則配列)

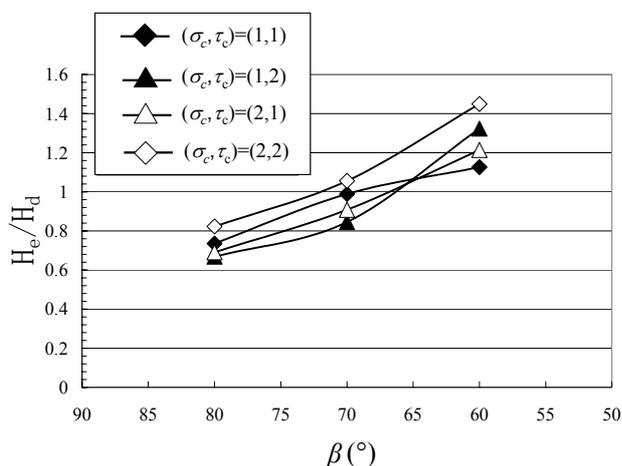


図-6 DEM解析と限界平衡解析の限界高さの関係

《参考文献》1) 辻野考治, 西村強, 福田毅: 円形要素を用いた個別要素モデルの強度特性と評価, 「実務利用を目指すマイクロジオメカニクス」に関するシンポジウム発表論文集, pp.47-52, 2008. 2) 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.