

1. はじめに

岩石の変形・破壊のメカニズムの解明は岩盤力学の根幹を成す重要な問題の一つであると同時に、岩盤崩壊等の地質学的現象、それに起因する災害防止などの考え方の基本となるという意味で工学的に重要である。岩石は本来、鉱物粒子の集合体であるからその巨視的な力学特性は粒子レベルの微視的な特性に支配されている。そこで、粒子レベルの観点から集合体の破壊挙動を把握し、要素間のパラメータと岩石の物性値との相関関係を明らかにする必要がある。本研究では、要素間に結合力を考慮した二次元モデルを用い、要素間結合強度などが岩石供試体を意識したモデルが示す圧縮強度等に、どのような影響を与えるか解析した。なお、本解析は後に行う岩盤斜面の崩壊過程の解析の前段階であり、斜面解析と同じ半径を有する円形要素を用いて、供試体モデルを作成した。また、斜面解析では、遠心加速度模型実験を参考に重力加速度を増加させる解析手順をとることにより、供試体モデルの破壊時に発生する荷重レベルが岩盤斜面モデル内にも再現されると考えた。

2. 供試体モデルと岩盤斜面モデルに発生する荷重レベル

実物の $1/n$ の幾何学的相似模型を nG (重力加速度 980cm/s^2) の遠心力場においた場合の実物と模型の関係を考える。添字 p, m はそれぞれ実物と模型を表すものとする。まず、幾何学的には、

$$\text{長さに関して} \quad L_m = L_p/n \quad (1)$$

$$\text{面積に関して} \quad A_m = A_p/n^2 \quad (2)$$

$$\text{体積に関して} \quad V_m = V_p/n^3 \quad (3)$$

となる。したがって、岩盤の単位体積重量は $\gamma_m = n\gamma_p$ 、深さ $z_m (= z_p/n)$ における自重による鉛直応力 $\sigma (= z\gamma)$ は、

$$\sigma_m = \gamma_m z_m = (n\gamma_p)(z_p/n) = \sigma_p \quad (4)$$

となる¹⁾。つまり、模型と実物の鉛直応力が等しくなる。以上を参考にして、遠心加速度場を想定して岩盤斜面モデルの解析を実施すれば、供試体モデルと岩盤斜面を意識したモデルに同程度の荷重レベルを発生させることができ、さらに、斜面モデルは実岩盤内の荷重レベルを意識したことになると考えた。

3. 圧縮解析・圧裂引張解析

高さ $h_0=120\text{cm}$ 、幅 $w_0=60\text{cm}$ の圧縮解析モデル(図 1)、幅 $D_0=60\text{cm}$ の圧裂引張解析モデル(図 2)を設定する。今回の解析で用いた解析条件は表 1 に示す。まず、擬似乱数を用いて、表 1 に示す直径を有する円形要素の中心座標を決定した後、重力を作用させて静止状態を得る。その後、圧縮解析モデル、圧裂引張解析モデルとなるよう要素群を切り出した後、供試体が自立できるように、接触点間に結合力を導入する。以降、通常用いられる圧縮試験・圧裂引張試験を模擬した手順で解析を行う。なお、本解析では要素間引張強度(σ_c)を $0.4 \times 10^7, 0.65 \times 10^7, 0.7 \times 10^7, 0.8 \times 10^7$ (dyne/cm²)と変

表 1 解析条件

要素	密度 ρ (g/cm ³)	2.65
	表面摩擦角 ϕ (°)	30
	粒径 r (cm)	2.0, 1.4, 1.0
接触バネ	法線方向剛性係数 K_n (dyne/cm)	1.0×10^9
	接線方向剛性係数 K_s (dyne/cm)	0.25×10^9
結合力	法線方向剛性係数 K_n (dyne/cm ³)	1.0×10^9
	接線方向剛性係数 K_s (dyne/cm ³)	0.25×10^9
	せん断強度 τ_c (dyne/cm ²)	0.4×10^7
	引張強度 σ_c (dyne/cm ²)	0.6×10^7
時間増分	Δt (sec)	1.0×10^{-5}
変位増分	Δu (cm)	1.0×10^{-6}

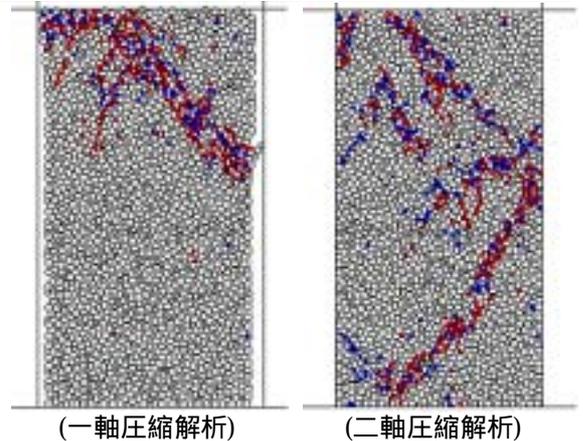


図 1 破壊点図(圧縮解析) ●せん断破壊点 ●引張破壊点

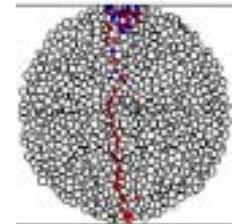


図 2 破壊点図(圧裂引張解析)

化させ、数例の解析を行った。図1には、供試験体への作用荷重が最大値となった直後の圧縮解析における破壊点の分布図を示す。この図より、破壊点ではせん断破壊ばかりでなく引張破壊も生じている。破壊点を連ね、それを破壊面と呼ぶならば、それは、軸方向に対して傾きを有するなどの解析上の観察ができる。図2には圧裂引張解析における破壊点の分布図を示す。この図より、圧裂引張解析では破壊面が供試体モデルの中心線付近に発生している。表2に圧縮解析・圧裂引張解析より求めた供試体モデルの物性値を示す。ここで、図1の上下の線分要素の変位とその線分要素への接触力をもとに、応力ひずみ曲線を求め、ヤング率やポアソン比を読み取っており、ポアソン比は平面ひずみ問題と仮定して求めた値である。図3には横軸に σ_c をとり、縦軸に岩石の圧縮強度、引張強度をとった強度分布図を示す。この図より、 σ_c が大きくなるに従い、岩石の引張強度も大きくなっていることから、岩石の引張強度は要素間引張強度に支配されることが確認できた。

4. 岩盤斜面崩壊シミュレーション

図4に示すような高さ $H_0=150\text{cm}$ 、幅 $W_0=200\text{cm}$ 、斜面傾斜角 β の岩盤斜面モデルを設定する。解析条件は表1に示したとおりである。解析ケースは表3に示す β と n の値を組み合わせた5ケースである。解析手順は圧縮解析・圧裂引張解析と同様に要素群を切り出した後、 n 倍の重力場により静止状態を作成する。その後、一様勾配斜面を作成

するため設置した剛板を上方から斜面長にして10cmを一段階として段階的に取り除き(図中AEは残分を表す)、掘削解放相当荷重を作用させる。これは実掘削を模擬したものではなく、掘削相当荷重増分に対して、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、要素間の結合物質に3.で模擬した破壊が生じて斜面が不安定状態に至り、(要素個々の変位が集積して斜面が大

変形に至るかに注目して解析するものである。このような大変形に至ったときの掘削深さを H とする。上述のような大変形に至った一例として、図5に、 $\beta=70^\circ, n=100$ としたときの破壊点の分布と要素変位図を示す。まず、斜面E点(図4)付近の要素間に破壊が生じて、その後、斜面上部でも生じるようになる。また、変位図より要素の変位量もE点付近から斜面上部に向い徐々に大きくなる様子が見られる。図中のstep数は、解放荷重を作用させて後、表1中の Δt で繰り返した計算回数を示している。

《参考文献》1) 高田直俊・日下部治：遠心模型実験，土と基礎，Vol.35，No.12，1987。

表2 供試体モデルの物性値

	要素間引張強度(dyne/cm ²)				
	0.4×10^7	0.6×10^7	0.65×10^7	0.7×10^7	0.8×10^7
粘着力(MPa)	0.124	0.226	0.205	0.181	0.197
内部摩擦角(°)	34.0	20.5	24.1	28.3	25.9
圧縮強度(MPa)	0.465	0.651	0.633	0.606	0.629
引張強度(MPa)	0.065	0.072	0.073	0.082	0.093
脆性度	7.15	9.02	8.67	7.44	6.76
ヤング率(GPa)	0.145				
ポアソン比	0.295				

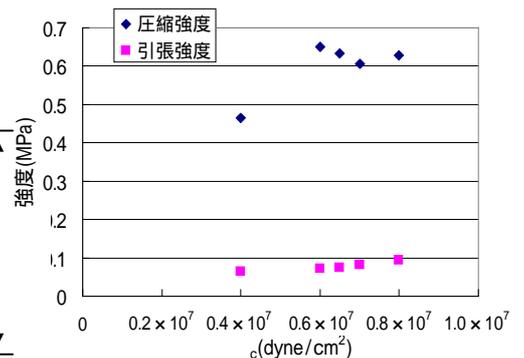


図3 強度分布図

表3 解析ケース

β	60°	70°	80°
n	100	75, 100, 125	100

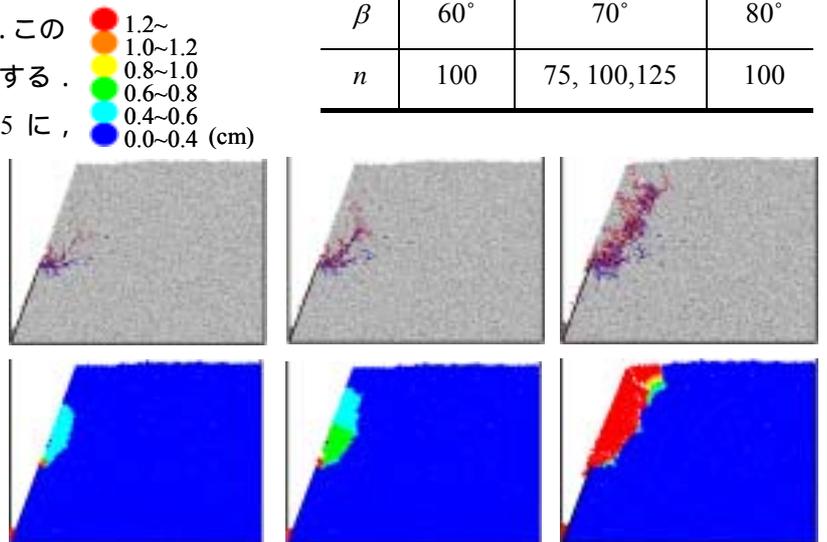


図5 破壊点図(上図)と変位図(下図) ($\beta=70^\circ, n=100$)