弾性論に基づくバネ係数算出法を導入した

個別要素法による斜面安定解析

鳥取大学大学院	学生会員	〇上田	洋,	森山耕祐
鳥取大学大学院	正会員	西村	強,	河野勝宣
大成建設株式会社	正会員	文村賢	文村賢一	

1. はじめに

不連続面の幾何学的特性(方向など)と、その岩盤の構成材料の強度が、斜面の安定性に与える影響を研究 している.そして、トップリング崩壊に対して、亀裂先端における応力集中の影響を考慮した安定性評価式を 誘導し、衝撃荷重載荷による斜面模型実験結果を報告した¹⁾.さて、ここでは、個別要素法(DEM)による前 述の模型実験の結果に対する数値解析例を報告する.それは、より広範な地盤条件の表現や既存き裂の進展の 影響に対して理解を深めるためである.この数値解析に際しては、弾性論に基づく要素間バネの係数値算出法 を導入している.

(3)

2. 模型実験の概要¹⁾

図-1は、衝撃載荷による斜面崩壊実験の概要を示している. 石膏の柱状成型体を用いた斜面モデルを振動台に設置したの ち、次式のような半周期の正弦波を振動台に入力する.

$$a_{h}(t) = \begin{cases} A_{h} \sin(2\pi f t) & 0 \le t \le 1/(2f) \\ 0 & when & others \end{cases}$$
(1)

ここに A_h は入力波の振幅, fは振動数である. 与えた加速度波 形を図-2 に示す. 時刻 t において斜面内の単位体積当たりに 生じる慣性力はダランベールの原理により, $-\rho a_h(t)$ となる. そして, 体積 Vの領域に働く最大の慣性力は次式となる.

$$F_e = -\int_{v} \rho A_h dv \tag{2}$$

実験において、 A_h の値は次のように設定した.まず、図-3 に 示す斜面モデル内の柱状要素 i に作用する力(図-3 右図)を もとに求めた安定性評価式(3)を用いて、 $P_0>0$ とする F_e を求め る.なお、 P_0 は、斜面法尻で斜面上向きに作用する力であり、 $P_0>0$ は斜面にトップリング破壊を生じさせないために外力が 必要であることを意味する.式(3)は、既存き裂の先端におけ る応力集中を考慮した安定性評価式であるが、詳細は報告済 である²⁾

$$P_{i-1} = \frac{P_{i+1}(\eta h_i - \mu \frac{t_i}{2}) + S_i \frac{h_i}{2} + S_e \frac{h_i}{2} - \frac{2I_i}{t^*} \left\{ \frac{\sigma_i}{FS'} + \frac{N_i - N_e}{t_i} \right\}}{\eta h_{i-1} + \mu \frac{t_i}{2}}$$



図-3 斜面モデル内のi番目のブロックに作 用する力

 $FS' = \frac{\sqrt{\pi a}F(\xi)}{\sqrt{2\pi r}}\frac{\rho}{2r}\cos\frac{3\theta}{2} + \frac{\sqrt{\pi a}F(\xi)}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1 + \sin\frac{\theta}{2}\cdot\sin\frac{3\theta}{2}\right)$

なお、 F_e を水平外力として $N_e=F_e\sin\alpha$ 、 $S_e=F_e\cos\alpha$ である. 詳細は、既報に譲る.

3. 弾性論に基づく接触定数の算定法と DEM 解析³⁾

解析対象を弾性体とするとき、その内部に蓄えられるひずみ エネルギーと DEM の要素接点間のバネに蓄えられるエネルギ ーが等価と仮定する.そして、ひずみエネルギーの勾配が、そ の弾性体内の応力状態を表すとすることにより、弾性定数(ヤ ング率 E、ポアソン比v)と接触定数(法線方向バネ定数 K_n、接 線方向バネ定数 K_s)に関連付けることが可能である³⁾.一例と して図-4のようなモデルの規則配列を採用すると次のようにK_n、 K_sは決定することができる.

$$K_{s} = \frac{2VE}{(1+\nu)(d_{b}^{2}+d_{s}^{2})}$$
(4)
$$K_{n} = 2V \left[\frac{\nu E}{d_{s}^{2}(1+\nu)(1-2\nu)} + \frac{E}{2(1+\nu)(d_{b}^{2}+d_{s}^{2})} \right]$$
(5)

ここにEはヤング率,vはポアソン比,Vは d_b^2 , d_b と d_s は要素 同士の中心間距離である.

4. 一軸圧縮解析と模型実験解析

まず,一軸圧縮解析によって,式(4),(5)で求めた K_n , K_s の値 によって,石膏供試体のヤング率 E=882MN/m²,ポアソン比 $\nu=0.18$ が再現されるか否かを確認した.**表**-1 に,式(4),(5)に より算出した示したバネ定数 K_n , K_s を示す.また,解析結果を **表**-2 に示す.以上より,Eについては約 60%, ν については同 程度の値を再現することができている.この解析では,石膏供 試体の引張強度(2.64MN/m²)となるように要素間結合物質強度 τ_c , σ_c も設定して,最大圧縮荷重が出力されるまで圧縮解析を継続 した.図-6 は,最大圧縮応力時の破壊点分布図である.

本解析は、運動方程式の陽型式時間差分に基づく方法である が、静的安定状態を求め得るように、時刻 *t*+*Δt* における速度を 次式に示すとおり計算している.

$$\dot{u}^{(t+\Delta t)} = \dot{u}^{(t)} + \left\{ \Sigma F_i^{(t)} - \alpha \Big| \Sigma F_i^{(t)} \Big| SGN(\dot{u}^{(t)}) \right\} \frac{\Delta t}{m}$$
(6)



図-4 規則配列モデル

表-1 解析条件

	密度	1200 kg/m ³		
円要素	直径	D=0.5, 0.21 cm		
	配合比	D _{0.5} :D _{0.21} =288:253 (一軸) D _{0.5} :D _{0.21} =240:177 (模型)		
	接触剛性定数	K _n =1740 MN/m (法線) K _s =430 MN/m (接線)		
	静止摩擦定数	$\mu = 0.577 (\tan^{-1}\mu = 30^{\circ})$		
結合物質	剛性定数	K _n =1740 MN/m (法線) K _s =430 MN/m (接線)		
	せん断強度	$\tau_c = 4.5 (MN/m^2)$		
	引張強度	σ_c =4.5(MN/m ²)		
時間増分		$\Delta t = 1.0 \times 10^{-7} (\text{sec})$		
変位増分		$\Delta u = 1.0 \times 10^{-8} (\text{cm})$		

表-2 解析結果





図-6 一軸圧縮解析の破壊点分布図

ここに、 \dot{u} は速度、 $\Sigma F_i^{(i)}$ は時刻 t における合力、 $SGN(\cdot)$ は()内の量の符号を採用することを示している. 結果としてα倍の力を速度の逆向きに与えることとなる.

前記の一軸圧縮解析においては、α=0.8 として解析を進めた.一方、模型実験に対する解析では、極めて短時間の載荷を表現することからαの値が変形や破壊に影響を与えることが考えられる.本解析では、αを 0.8

より試行錯誤的に小さくして、実験における崩壊形状をどの程度再現できるか検討した.

解析条件は、表-1と同じであり、解析モデルを図-6に示す。図-6中の青線で連結された要素間に結合物質 が存在していることを表している。図-7は、 $A_{h'g}=9$ 、f=50Hzの条件のもと模型斜面が崩壊に至った状態を描 いている。図-8(a),(b),(c)は、同一加速度条件のもとαを変化させたとき解析結果であり、αが解析結果に影響 を与えることが分かる。α=0.2では破壊点は出現していないが、α=0.1では解析領域全体にわたり破壊点が出 現している。そこで、α=0.13について解析(図-8(b))を実施し、繰り返しの載荷によって破壊に至った時の ものを図-9に示す。その結果、斜面法尻からの破壊は確認されたが崩壊後の運動状態には差異がある。



5. 結語

弾性論に基づく弾性定数と要素定数の関係式でバネ定数を決定した.そして,一軸圧縮解析を行い元の材料 のヤング率,ポアソン比がどの程度再現されるか確認した.さらに、トップリング崩壊に関する模型実験の 再現解析を実施して崩壊形態の再現性を調べた.その結果,斜面の崩壊形態については若干の差違がみられる ことを指摘できた.

参考文献

- 1) 上田 洋, 平松大周, 栢野伸也, 西村 強, 中村公一: たわみ性トップリング崩壊に関する模型衝撃実験, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, pp.671-672, 2012.
- 2) 平松大周, 栢野伸也, 上田 洋, 西村 強, 中村公一:トップリング崩壊に対する斜面の安定計算法に関 する基礎的研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp.669-670, 2012.
- 3) 栢野伸也,上田 洋,西村 強,河野勝宣,文村賢一:3次元格子バネ係数解析法におけるモデル定数路 弾性定数の関連付けに関する研究,第65回土木学会中国支部研究発表会,2013.