

個別要素法による斜面の衝撃振動解析

鳥取大学大学院 学 ○平松大周

鳥取大学大学院 学 栢野伸也

鳥取大学大学院 正 西村 強

1. はじめに

岩盤斜面の場合、断層や節理など様々の形態の不連続面が存在することが常であり、これらの特性が斜面の安定性の重要因子となることがある。特に、トップリングは岩盤斜面に特徴的な崩壊形態で、節理の卓越した斜面あるいは高角度の差し目の不連続面を有する斜面等で発生する傾向にあるとされ、不連続面間隔に注目した発生条件の類型化の研究が報告されている¹⁾。岩盤の経年的な劣化などが要因となる場合が多いと思われるが、地震時には岩石の引張強度が、その発生に関与しているとの報告もある²⁾。不連続面の影響に加えて、岩石の力学的特性も考慮せざるを得ない複雑な崩壊現象であるので、実験的および数値解析的アプローチによって、その発生機構を明らかにする、および対策を講じることが有効と考えられる。近年では、遠心模型実験と数値解析を組み合わせた研究も報告されている³⁾。さらに、加振制御技術と高性能センサーを導入して、遠心加速度場における振動試験により地震時崩壊機構の解明を試みる研究も実施されている⁴⁾。本研究では、常時および地震時の岩盤斜面安定解析のための数値解析手順の開発を目指している。

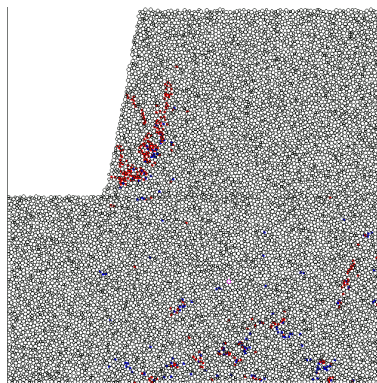
2. 重力増加手順と斜面の進行性崩壊の解析方法

(1) すべり破壊と極限平衡解析との比較

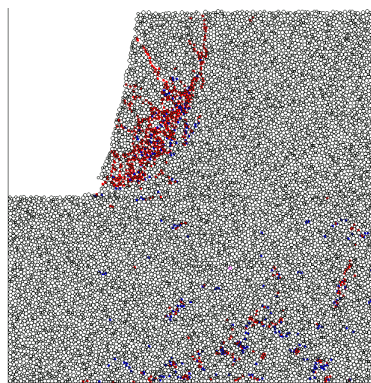
本研究では、個別要素法 (Distinct Element Method, DEM)を用いる。この手法に、要素間に結合力を考慮した要素接触モデルと重力を増加させる手順を導入している⁵⁾。つまり、重力加速度を $g(=9.8\text{m/s}^2)$ から ng ($n \geq 1$) に増加させるこ

表-1 円要素に与えた特性

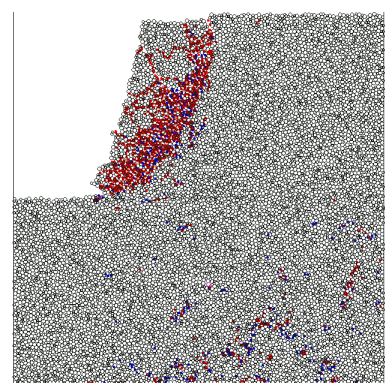
円要素	密度	$\rho=2650(\text{kg/m}^3)$
	直径	$D=2.0, 1.4, 1.0 (\text{cm})$
	接触剛性係数	$k_n=100\text{MN/m}$ (法線) $k_s=25\text{MN/m}$ (接線)
	静止摩擦係数	$\mu=0.577$ ($\tan^{-1} \mu = 30^\circ$)
結合物質	剛性係数	$E_n=100 \text{ MN/m}^2$ (法線) $E_s=25 \text{ MN/m}^2$ (接線)
	せん断強度	$\tau_c=1.0 \text{ MN/m}^2$
	引張強度	$\sigma_c=1.0\text{MN/m}^2$



(a) 100000 steps



(b) 500000 steps



(c) 900000 steps

●せん断破壊点
●引張破壊点

図-1 斜面内の破壊の進行⁶⁾

とにより、斜面モデル内に実岩盤レベルの応力状態が再現できること、さらに、供試体解析で得られた積層体としての力学的特性を保持できることが特長である。また、段階的に n を増加させるとき、各段階で、静的安定状態に至るか否か判定すれば、斜面の換算限界平衡高さ H_d 、および、それを超える高さでの崩壊形態を表現できる。図-1 は、その一例を示したものである。このような結果を極限平衡解析結果と比較したところ、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（極限平衡解析）よりも DEM 解結果は、低い H_d を与えること示しており、応力集

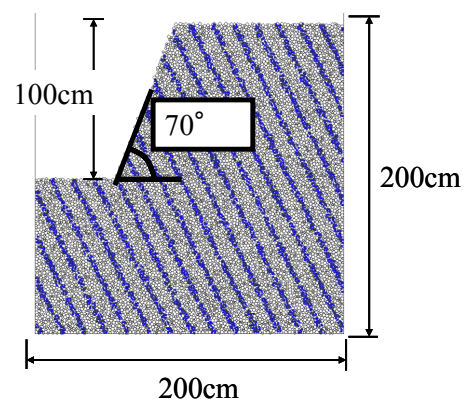


図-2 弱面を有する斜面モデル

中による破壊の逐次進行を裏付けていると報告されている⁶⁾。極限平衡法は、通常、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力に仮定を導入して静定問題に帰着させている場合が多い。そこで、この問題を解決したとされる一般化された極限平衡法(GLEM)⁷⁾が、この比較では用いられている。

(2) トップリング崩壊の表現

(1)に述べた解析手法を用いて、不連続面が斜面内部に存在する場合のモデル化および解析を実施した。図-2に示す青色部分が弱面を示しており、一様勾配の斜面に対して、一定間隔および一様勾配の弱層が差し目状に交差する例である。図-3は、弱面にある部分の要素間結合強度を基準の値の75%(図(a))および25%(図(b))とした場合である。崩壊形態に注目すると、図(a)ではすべり破壊が卓越した崩壊を呈しているが、図(b)では表面付近の変位が大きく、トップリングに類似した崩壊形態を示している。 H_d についてみると、弱面の無い場合に対して図(a)で約95%、図(b)で約70%となっていた。以上より、弱面の存在により H_d が低くなること、さらに、その強度設定によりすべりのみならずトップリングも表現可能な手法であることが示された。

3. 衝撃破壊解析

2.に記述した解析では、重力加速度を段階的に増加させ、各段階で静的安定状態に至るか否か判定しているので、準静的解析と言える。この鉛直方向の増加に加え、水平方向外荷重による加速度を考慮すれば震度法に相当する解析が可能である。ここでは、その外荷重の作用が極めて短時間、すなわち衝撃荷重とされる条件で解析を実施した。1.に記載した振動実験は、準静的載荷と衝撃載荷の中間的状态と位置づけられている⁸⁾。解析には振動荷重の入力も可能であるが、(i)片方向衝撃

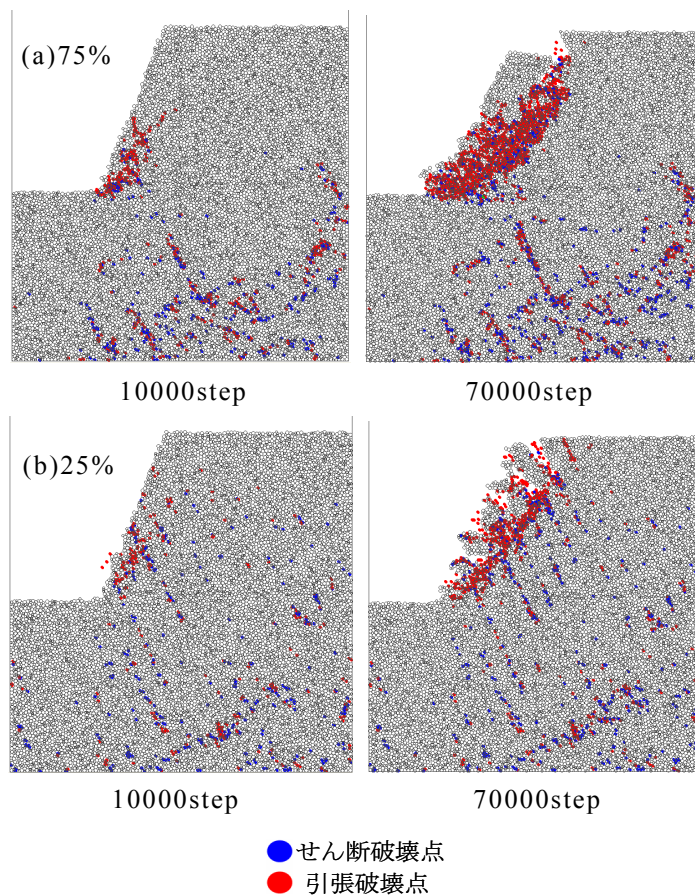


図-3 弱面を有する斜面モデルの崩壊形態

荷重の繰返しを模擬した時，各衝撃荷重間では，破壊面が保存されている，(ii)簡易な模型実験との対比が容易である，などの理由から，この载荷条件を採用した．衝撃荷重の入力は，鉛直方向加速度 $a_v=ng$ に対して，水平方向加速度 $a_h=k(ng)$ が，モデルに一樣に， $T(s)$ 間作用するとした． T 経過後は， $a_h=0$ として，斜面モデルが静的安定状態に復するか，それとも，崩壊に至るかを鉛直方向加速度 $a_v=ng$ のもと解析を続行した． $n_0=75$ とした基準状態に対して，図-4 の左列に $n=115, k=0$ とした解析を，中央と右列に衝撃破壊解析として $n_0=75$ のまま， $k=40$ の例を示す．衝撃荷重継続時間 T は，時間差分間隔 $\Delta t=1.0\times 10^{-5}(s)$ の 15step 分とした．これは，表-1 に示す解析条件より計算される一自由度振動系の固有周期 $2.9\times 10^{-4}(s)$ に対して，1/2 程度である．図-4 中の数値は，衝撃荷重の载荷回数である．11 回までは，斜面は静的安定状態に復するが，12 回目の载荷による破壊面の進展により斜面は崩壊に至る．

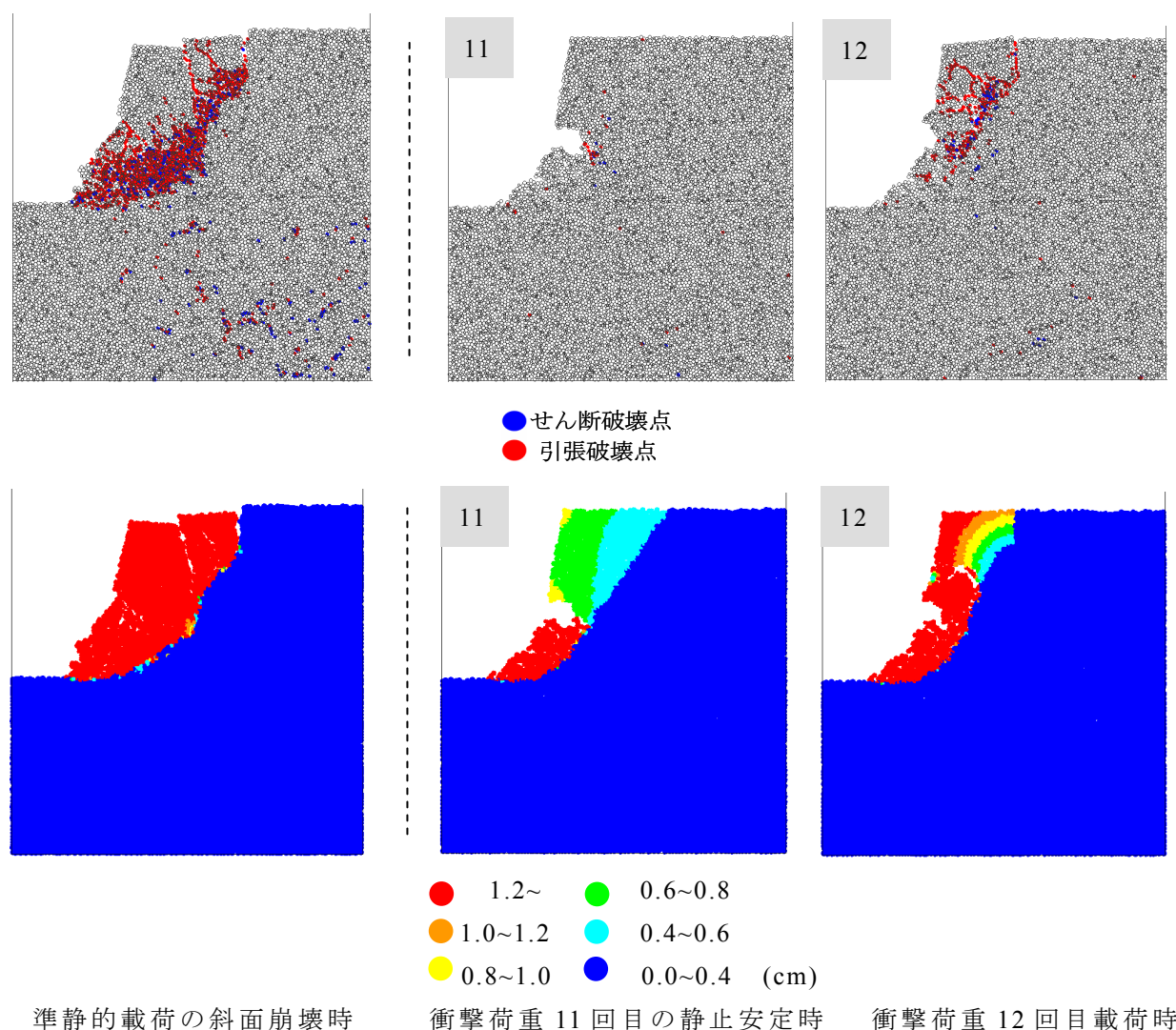


図-4 準静的载荷および衝撃荷重载荷による崩壊解析例（上：破壊点分布図，下：変位分布図）

《参考文献》1)Sagaseta, C. (1986). 2)Alzo'ubi, A.K., Martin, C.D. & Cruden D.M. (2010). 3)日下部祐基他(2007). 4)石丸真，河井正(2009). 5)Nishimura, T. (2010). 6)栢野伸也他(2011). 7)榎 明潔(2007). 8)石川信隆他(2008).