

不連続変形法による斜面崩壊振動実験の検討

サンコーコンサルタント(株) 正会員 ○萩原 育夫
 サンコーコンサルタント(株) フェロー会員 佐々木 猛
 京都大学大学院工学研究科 フェロー会員 大西 有三
 (財)電力中央研究所 正会員 伊藤 洋

1. はじめに

我が国では、地震による斜面崩壊の災害が多く発生している。このため、斜面崩壊の規模や到達距離、到達時間などが予測できれば、有効な防災対策が可能と思われる。著者らはこれまで、不連続変形法を用いた地震による大規模な斜面崩壊²⁾や室内振動実験モデルなどの解析³⁾を行い、適用性の検討を行って来た。これらのモデルは比較的規則的なブロック構造を対象としたものであった。ここでは、斜面上に不規則に積み重ねられた碎石の振動実験⁴⁾の不連続変形法による解析結果の一部を報告する。

2. 不連続変形法による弾性不連続体の運動方程式

不連続面を含む弾性体の釣合方程式を Shi¹⁾は式(1)に示す Hamilton の原理による接触を含む運動方程式をひずみエネルギー最小化原理により釣合い方程式を求めて定式化している。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \tag{1}$$

ここに、 M : 質量マトリックス, C : 減衰マトリックス, K : 剛性マトリックス, F : 外力ベクトル, \ddot{u} : ブロック重心加速度, \dot{u} : ブロック重心速度, u : ブロック重心の剛体変位, 剛体回転, ひずみである。

式(1)の運動方程式は, Newmark の β, γ 法で, $\beta=0.5, \gamma=1.0$ とし、これを増分変位に対する連立方程式の式(2)を各時間刻みで解くことにより得られる。

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F} \tag{2}, \quad \tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{\eta}{\Delta t} M + \frac{\rho^c}{\rho^0} [K_e] \tag{3}$$

$$\tilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M \cdot \dot{u} + (\Delta F - \sum \int \sigma dv) - M \alpha(t) \tag{4}$$

ここに、 Δu : 増分変位, K_e : 線形項の剛性マトリックス, $M \alpha(t)$: 入力加速度である。

3. 解析モデル⁴⁾

図-1 に解析モデルを示す。実験は鉄骨チャンネルで組まれたフレーム上に模擬斜面を設定し、その上に砂岩の一边が 20-40mm の碎石を任意に積み上げている。解析モデルでは、碎石を積み上げた領域を、斜面上 40cm で、斜面に平行および直交する傾斜角を設定し、その間隔が 20-40mm になるように乱数を発生させ、四角形を中心とするブロックを生成させた。その後、これらを自由落下させ、初期の不整を与えた。図中の上方から垂直に伸びる数本の軌跡が初期不整の計算

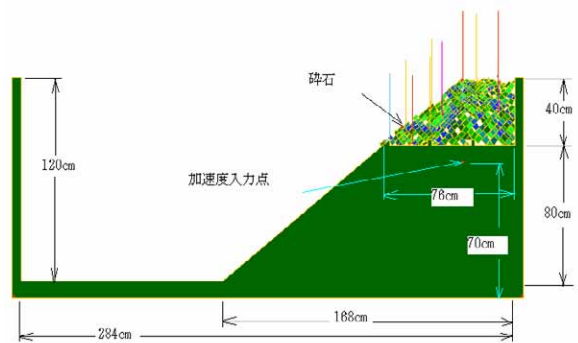


図-1 解析モデル

表-1 解析物性

弾性係数	15*10 ³ N/mm ²
ポアソン比	0.2
密度	2.57g/cm ³
減衰定数	0.1
摩擦角	40deg., 35deg
時間刻み	0.001
ペナルティ	15*10 ³ N/mm ³
時間ステップ	15000
最大変位比	0.001

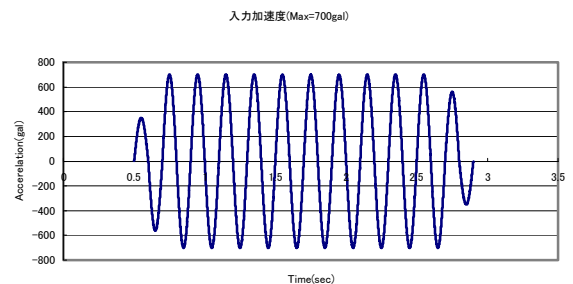


図-2 入力加速度波形

キーワード 斜面崩壊, 振動実験, 不連続変形法

連絡先 〒136-3683 東京都江東区亀戸1-8-9 サンコーコンサルタント(株) TEL03-3683-7139

を示している。図-2に入力点の加速度波形を示す。入力波形は5Hzで最大加速度が700galを10波の前後に立ち上がり終了の波を付加している。表-1に解析物性に示す。加速度入力は、斜面ブロック下端左右を固定し、下端からH=70cmの点で与えた。斜面ブロックの弾性係数を砕石と同じとすると、斜面ブロックの応答周波数は次式で与えられる³⁾。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)Hm}} \quad (5)$$

斜面ブロックの加速度の応答倍率が入力波と1対1になるように、斜面ブロックの密度mを調整した。本モデルでは4.7mとなった。また、砕石の摩擦角は自然積実験から40度とした。図-3に入力周波数に対する増幅率の関係を示す。今回のモデルの砕石の固有振動数は約10-20Hzで、これに対する応答倍率は0.1-0.2程度である。図-4に斜面ブロックの入力点の応答加速度を示す。減衰定数はc=0.1、時間刻みΔt=0.001、ペナルティは砕石の弾性係数と同じとし、15000ステップの計算を行った。

4. 解析結果

図-5に解析結果を示す。図中の空色の線は加震前、赤色の線は加震後の砕石の表面形状である。これらの形状や落石の量は概ね良い合致を示している。実験、解析は本モデルの他に、斜面高さが40cmの場合、最大加速度が400galの場合も実施し、これらの結果も概ね良く合致している。しかし、詳細に見ると、崩落パターンが表面付近で多少異なっている。この原因は、砕石の初期形状や積み方が実際のモデルと微妙に違うためと考えられる。また、図-3に示すように、一定以下の砕石のサイズの固有振動数は高くなるので、増幅率がゼロに近くなり応答しない。本モデルでは、砕石の形状、大きさ、初期状態に依存する。砕石の初期設定について、現在数種類の方法を検討中である。

5. むすび

著者らはこれまで不連続変形法による斜面崩壊の適用性の検討を実施してきた。不連続体の解析では、モデルの形状が結果に大きく影響することが分かっている。また、入力周波数とブロックの固有周波数の共振特性も重要である。今後はこれらの点の検討を中心に進める予定である。

参考文献

- 1)G.H.Shi,R.E.Goodman : Two Dimensional Discontinuous Deformation Analysis , Int. J. Anal. Methods Geomech., Vol.9,pp.541-556,1985
- 2)R. Yoshinaka, T. Sasaki, K. Sasaki, S. Horikawa: Consideration on stability and collapse at earthquake of soft rock slope based on an example, 11th ISRM Congress Lisbon, Portugal , pp. 1109-1112, 2007.
- 3)萩原, 佐々木, 大西, 伊藤 : DDAによるブロック構造の動的応答に関する基礎的検討, 土木学会, 第37回岩盤力学シンポジウム, pp.153-158, 2008.
- 4)栃木, 中島, 大鳥ほか : 地震時斜面崩壊による崩土の到達距離に関する影響要因の検討—斜面高さや加速度の影響について, 土木学会, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.187-192, 2008.

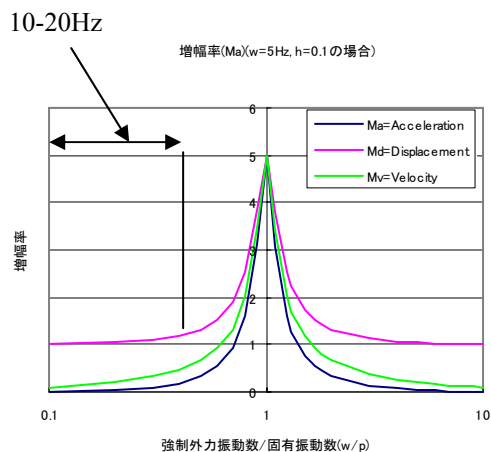


図-3 入力周波数に対する増幅率の関係

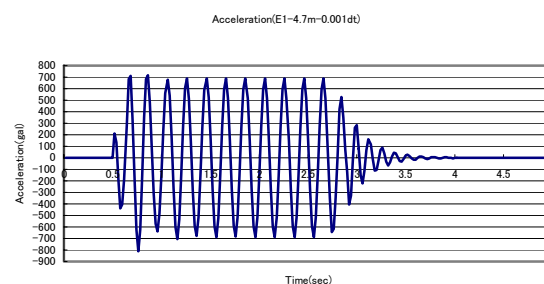


図-4 斜面ブロックの入力点の応答加速度

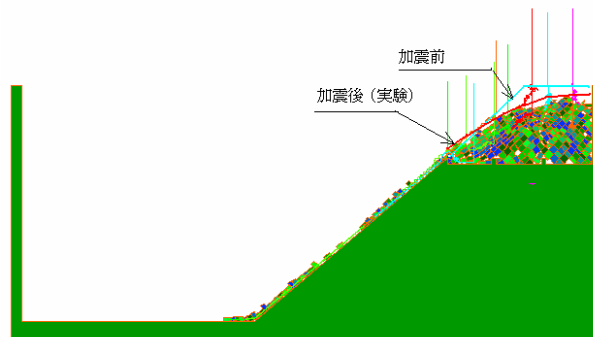


図-5 実験結果と解析結果の比較