

不連続変形法による斜面崩落モデルの地震応答解析

斜面安定 不連続面 地震応答

サンコーコンサルタント(株) 正会員 佐々木 猛
 同 正会員 萩原 育夫
 同 正会員 佐々木勝司
 埼玉大学 正会員 吉中龍之進
 京都大学大学院 正会員 大西 有三

1. はじめに

わが国では、斜面崩落事故の引き金の約30%以上が地震を原因としている¹⁾。また、これらの斜面の大部分が道路や鉄道に接している。このような事故を事前に予測し、適切な対策を講ずることは、国民の生命や産業活動を守るために極めて重要である。本研究では、不連続変形法(DDA)を用い地震の斜面崩落への影響解析を目的とし、DDA解析における地震外力の入力法、均質、不均質な斜面モデルの地震応答性状、斜面上部に存在する落石の崩落性状などについて検討した。

2. 不連続変形法(DDA)による地震応答解析

DDAは不連続体で構成されるブロックを弾性体と仮定し、これらの接触を大変形問題として解析し、運動方程式は最終的に式(1)のようになる²⁾。

$$M\ddot{u}^{t+\Delta t} + C\dot{u}^{t+\Delta t} + Ku^{t+\Delta t} = R^{t+\Delta t} \tag{1}$$

ここに、 M : 質量マトリックス、 C : 粘性マトリックス、 K : 剛性マトリックス、 R : 外力マトリックス、 \ddot{u} : 重心加速度、 \dot{u} : 重心速度、 u : 重心変位、 t : 任意時刻、 Δt : 時間刻みである。また、粘性マトリックス C は粘性係数 η と質量マトリックス M を用いて、式(2)で表される。

$$C = \eta M \tag{2}$$

粘性係数 η の物理的意味は、弾性体のブロック自身や斜面上の植生や樹木による速度に比例した減衰として評価される。

式(1)の運動方程式は、Newmarkの法により増分変位に対する連立方程式を各時間刻みで解くことにより得られる。

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F}, \quad \tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C + K, \quad \tilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M \cdot \dot{u} + (\Delta F - \sum \int \sigma dv) - M \alpha(t) \tag{3}$$

ここに、 $\beta = 0.5$, $\gamma = 1.0$ における、 Δu : 増分変位、 K : ブロックの全体剛性マトリックス、 $\alpha(t)$: 地震加速度である。

また、 i ステップでのブロック内の任意点の時刻 t の変位、速度、加速度の関係は式(4)で表される。

$$u_i = [D_i] = \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 [D(t)]}{\partial t^2} + \Delta t \frac{\partial [D(t)]}{\partial t}, \quad \dot{u}_i = \frac{\partial [D(t)]}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} [D_i] - \frac{\partial [D(t - \Delta t)]}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} [D_i] - \dot{u}_{i-1}$$

$$\ddot{u}_i = \frac{\partial^2 [D(t)]}{\partial t^2} = \frac{2}{\Delta t^2} [D_i] + \frac{2}{\Delta t} \frac{\partial [D(t - \Delta t)]}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t^2} [D_i] - \frac{2}{\Delta t} \dot{u}_{i-1} \tag{4}$$

3. 解析事例

図-1は地震時の岩盤斜面崩落モデルを示す。斜面は高さ、幅を100mと仮定した。斜面上部法面に10個の岩盤ブロックが存在するとし、これらの地震時の挙動の検討を行った。表-1に解析に用いた各条件を示す。時間刻みを0.001秒とし、入力地震波はEL-Centro波の東西(EW)と上下(UD)を斜面ブロック下部に同時に入力した。境界条件として斜面ブロック下端は水平ローラーとし、左右側方は自由とした。岩盤ブロックの表面の摩擦係数は $\phi = 35^\circ, 20^\circ$ の2種類を比較した。

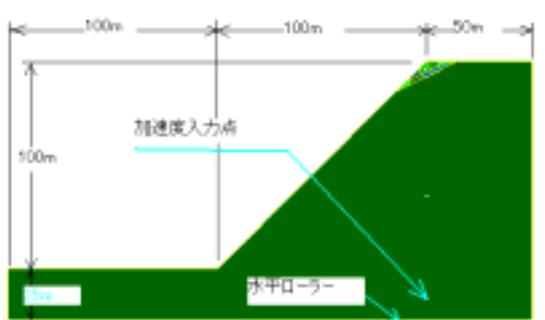


図-1 地震時岩盤斜面崩落モデル

表-1 解析条件

時間刻み	0.001sec
入力地震波	EL-Centro-EW(東西),UD(上下)
弾性係数,摩擦係数	1GPa, $\nu=0.25, \phi=35,20^\circ$
ペナルティ係数	10GN
減衰定数	0.02
速度エネルギー比	0.81
斜面の単位体積重量	25000.0kN/m ³
落石の単位体積重量	25.0kN/m ³

Earthquake response analysis of rock falling models by Discontinuous Deformation Analysis, Takeshi Sasaki, Suncoh Consultant Co.,
 Ikuro Hagiwara, Katsuji Sasaki, Suncoh Consultant Co.,
 Ryunoshin Yoshinaka Saitama Univ., Yuzo Ohnishi Kyoto Univ.

本モデルでは斜面の弾性係数を1GPaとし、ペナルティは10GPaとした。斜面の固有振動数は約2Hz、落石の固有振動数は8~10Hz程度である。これは1質点系の理論解に近く、接触ばね（ペナルティ係数）の影響は高周期側に移動する。その程度はペナルティの値に依存するが、ブロックの弾性係数の約10%程度であった。また、斜面の質量を落石の10000倍、自重を0とし、入力加速度の波形が計測値と同一になるようにした。

図-2は斜面入力点の加速度応答である。これらの応答値は入力波形と完全に一致していることをFourierスペクトル分析により確認した。摩擦角 35° の場合には、斜面上部のブロックは約 20° の緩斜面上に存在し、1.2秒間斜面からの加速度を受け、その後、衝突を繰り返しながら下方に移動し、5秒後には図-3のように約半数のブロックが 45° の急斜面上に到達している。本モデルの静的解析では、ブロックの摩擦角をそれぞれ 35° および 20° としているためブロックは緩斜面上に静止している。

図-4は10秒後の落石位置である。落石の先端は斜面法尻に到達しており、後続の落石も全て急斜面上に到達している。図中の青および赤の線は当初落石群中央部に存在した代表的な斜面に接している落石(3)およびその上の(9)の軌跡である。

図-5は15秒後の落石位置である。落石の大半は斜面下部の平場に到達している。また、大きな質量の落石(3)が先頭に達しているのが分かる。

図-6は落石(9)の速度応答である。縦軸が速度、横軸は斜面に沿った水平(X)座標である。当初、緩斜面上で滑動前には斜面ブロックから伝わる水平(X)および上下方向(Y)の加速度に応答しているのが分かる。落石が一旦、斜面上を滑動し始めると、重力による落下運動が支配し、地震波の影響は小さくなる。また、落石が法尻の平場に到達すると、再び斜面からの地震による加速度が伝わる。EL-Centro波では、10秒前後で水平加速度成分は大きいですが、上下成分は水平成分の1/3程度で小さくなっており、落石の加速度応答にもその性質が反映されている。

回転成分(W)の速度(Rad/sec)はブロックの形状が扁平なため急斜面上では比較的小さく、水平および鉛直速度の10%以下であるが、滑動前の緩斜面上と法尻の平場では斜面からの地震波の影響があり、水平、上下の30%と比較的大きくなっている。

また、紙面には載せていないが、摩擦角 20° 度の場合には、斜面落下時の跳躍量が小さく、落石が法尻の平場に達した後、落石の到達距離が 35° の場合より大きいことが確認された。

4. 結論および今後の課題

本研究ではDDAによる地震時の均質モデルの斜面安定解析法を提案し、地震外力が斜面崩落の引き金となる事例を示した。また、摩擦角の違いによる落石挙動の特徴について比較し、これらの結果、物理現象を定性的に概ね良く表現できることを示した。今後の課題として、入力地震波の周波数特性と斜面および落石の固有振動数、応答性状との関係、多層地盤の斜面モデルにおける基本的な振動性状などを明らかにし、本手法の適用性の検討を更に進める予定である。

参考文献

- 1)土木学会岩盤力学委員会:岩盤斜面の調査と対策,土木学会,平成11年
- 2)佐々木、佐々木、吉中:不連続変形法(DDA)による落石問題の検討、計算工学講演会論文集、Vol.7, pp.423-426,2002.

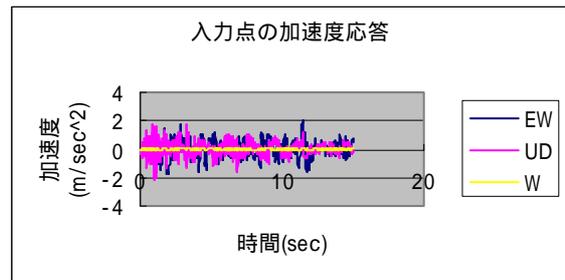


図-2 入力点の加速度応答



図-3 5秒後の落石位置($=35^\circ$)

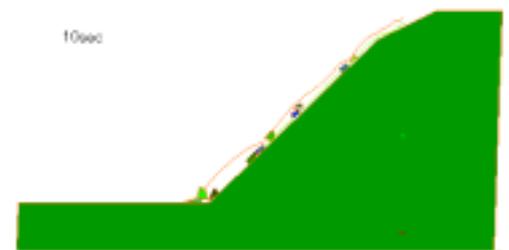


図-4 10秒後の落石位置($=35^\circ$)

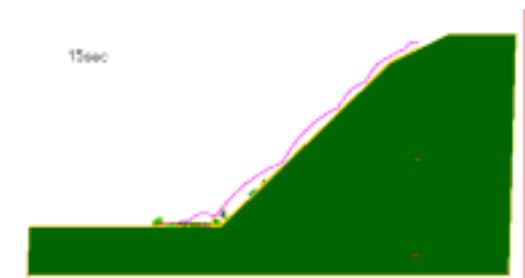


図-5 15秒後の落石位置($=35^\circ$)

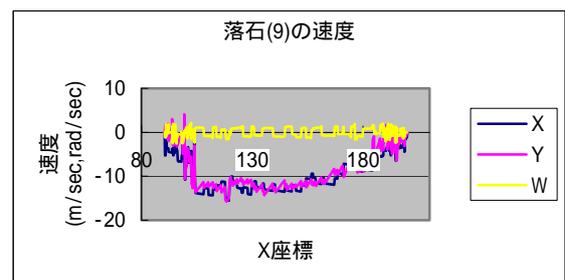


図-6 落石(9)の速度応答