

第Ⅲ部門 不連続変形法による岩盤斜面の動的挙動解析に関する研究

京都大学工学部	学生員	○嶋岡	計亮
京都大学大学院工学研究科	正会員	大西	有三
京都大学大学院工学研究科	正会員	西山	哲
京都大学大学院工学研究科	正会員	小山	倫史
京都大学大学院工学研究科	学生員	赤尾	悟史

1. はじめに

日本では地震を起因とする斜面崩壊が多発しており、各種構造物の地震時の安全性を評価するためには、隣接する岩盤斜面の地震時安定性や崩壊時の岩塊の到達距離等を評価する必要がある。そこで、多層ブロックを用いた振動台実験を行い、振動時のブロックの挙動を確認した上で、不連続体の解析手法の一つである不連続変形法¹⁾を用いてブロックの挙動を解析し、本手法の斜面の動的挙動に対する適用を検討した。

2. 不連続変形法

不連続変形法は、解析対象をブロックの集合体で表し、ブロック重心で定義された剛体変位、剛体回転、およびブロックのひずみを主変数とした定式化を行う。定式化にはポテンシャルエネルギー最小化原理を用いており、接触を含む運動方程式は式(1)のようなハミルトンの原理に基づいた方程式となる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

ここで、 M は質量マトリックス、 C は減衰マトリックス、 K は剛性マトリックス、 F は外力ベクトルである。また u はブロック重心における変位、 \dot{u} は変位速度、 \ddot{u} は変位加速度である。

また式(1)の運動方程式はニューマーク β 法により式(2)のように変換され、変位増分に関する連立方程式を各時間刻みで解くことで解が得られる。

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F} \quad , \quad \tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2\eta}{\Delta t} + K_e + K_f \quad , \quad \tilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M\dot{u} + (\Delta F - f) \quad (2)$$

ここで、 Δt は時間刻み、 Δu は変位増分、 K_e はブロックの弾性、 K_f はブロックの変位拘束・接触などに関する剛性マトリックスである。また f と ΔF はそれぞれブロックの初期応力に関するベクトル、体積力や点荷重などに関するベクトルである。なお、接触にはペナルティ法を導入し接触バネ剛性を定めることにより接触力を再現している。また、本研究では変位拘束点に変位の時刻歴を入力することで振動を表現している。

3. 振動台実験

不連続体である斜面を模擬した多層ブロックモデルが振動時にどのような挙動を示すのか検討するため、多層ブロックモデルを用いた振動台実験を行った。実験には、図-1(a)に示すような斜面を模擬した多層ブロックモデルを用い、図-2に示すような地震動再現波を用い水平方向に加振を行った。加振時のモデルの挙動は図-3に示すとおりである。これより、モデルの挙動は崩壊のモードで、①：すべりと大規模なトップリングが発生する領域、②：すべりのみが発生する領域、に区別することができた。

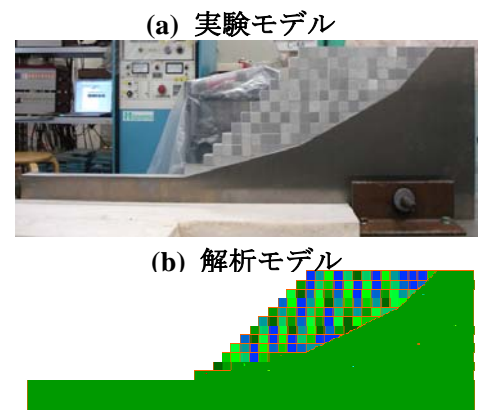


図-1 実験モデルと解析モデル

4. DDA による解析

不連続変形法を用いて実験時のブロックの挙動を解析した。実験時にブロックの境界に沿って作用する力は主に摩擦力である。従来の研究²⁾から、単純な二段積みブロックモデルの振動台実験解析では、接触面に上載するブロックの単位奥行きあたりの質量 $M(\text{ton})$ と接触バネ剛性 $kn(\text{KN/m})$ の比、 kn/M が約 10^5 程度になるように接触バネ剛性を設定すれば、摩擦力を正確に働かせることができると結論づけられている。そこで指標として、 M と kn の関係図(図-4)を参考にする。しかし、本実験のモデルでは接触面が多く存在するので、接触バネ剛性が一つに定まらない。そこで今回は、ブロック間に過大な貫入を起ささないようにすることを重視し、上載ブロックの単位奥行きあたりの総質量が最も大きい接触面で指標を適用し、接触バネ剛性を $6.2 \times 10^3 \text{ kN/m}$ と設定した。解析に用いたモデルを図-1(b)に、パラメータを表-1に示す。図-3に示すように、実験時に見られた崩壊モードと崩壊後の形状が精度よく再現できていることが分かる。しかし、ブロック上層部の振動応答が解析時の方が実験時より大きく出たことは課題である。

5. まとめ

本研究によって、斜面を模擬した多層ブロックモデルを用いた地震応答解析で崩壊モード、崩壊後の斜面形状ともにおおまかに再現することができた。よって、実斜面において地震応答を含む動的挙動に対する不連続変形法の適用性は高く、今後、課題を解決することによりさらにその解析精度を高めることが可能であるといえる。

参考文献

- 1)日本計算工学会編, 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua Shi 著: 不連続変形法 (DDA) 計算レクチャーシリーズ 6, 丸善株式会社, 2005.
- 2)Akao, S., Ohnishi, Y., Nishiyama, S. and Nishimura, T.: "Comprehending DDA for a block behavior under dynamic condition", Proc. of the Eighth International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-8), pp. 135-140, 2007.

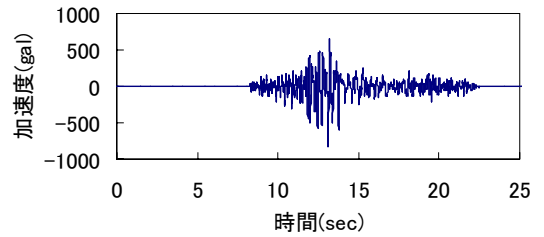


図-2 加振波形

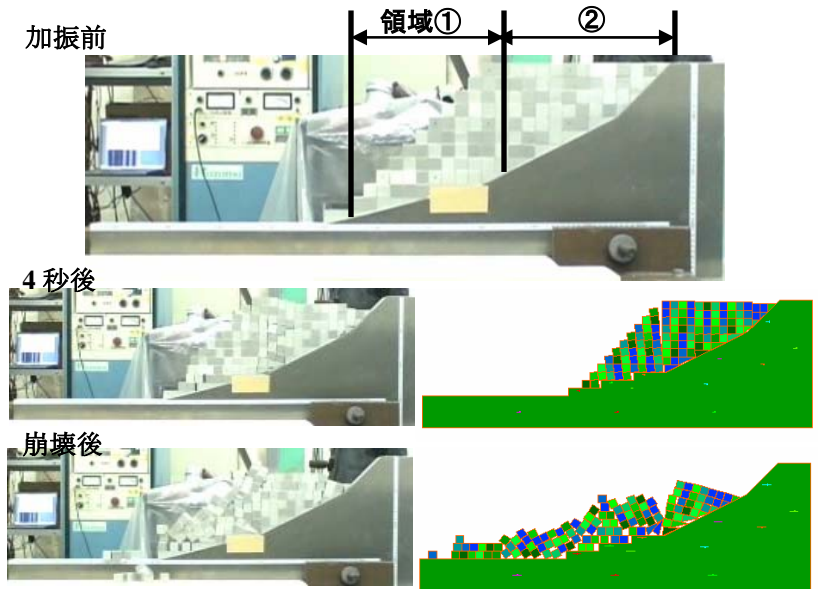


図-3 加振時のモデルの挙動と解析結果の比較

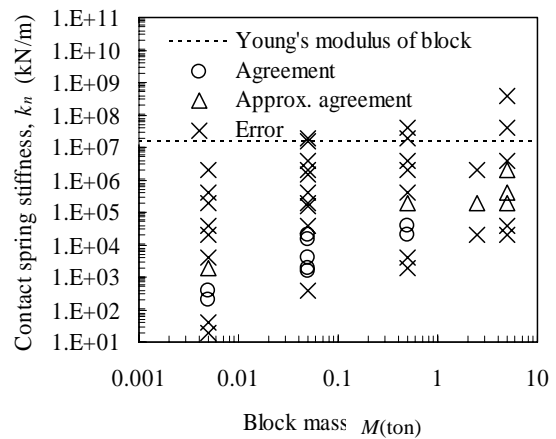


図-4 質量 $M(\text{ton})$ と接触バネ剛性 $kn(\text{kN/m})$ の関係図

表-1 物性値とパラメータ

単位体積重量(kN/m^3)	26.4	摩擦角 ($^\circ$)	20.0
弾性係数(kN/m^2)	62000	時間刻み(sec)	0.0005
ポアソン比	0.2	接触バネ剛性(kN/m)	6200
粘着力(kN/m)	0	OPEN 基準	1.0×10^{-7}
引張強度(kN/m^2)	0	CLOSE 基準	1.0×10^{-5}