

不連続変形法による積層ブロックの振動解析

京都大学大学院工学研究科	学生員	○赤尾	悟史
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	矢野	隆夫
ハザマ技術研究所	正会員	浦野	和彦

1. 概要

日本では地震を起因とする斜面崩壊が多発しており，それによる被害から人間の生活を守るためには何らかの防災対策を行う必要がある．そのためには，岩盤斜面を構成する複雑な不連続性岩盤の地震時の挙動を正確に把握することが不可欠であり，その手法として数値解析法が挙げられる．本研究では積層ブロックを用いた振動台実験を行い，ブロックの振動時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（DDA）¹⁾を用いて振動時のブロックの挙動を解析し，本手法の地震動問題に対する適用性とその特性を検討する．

2. 解析手法

不連続変形法（DDA）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．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

不連続体である積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を検討するため，積層ブロックを用いた振動台実験を行った．実験モデルは図-1に示すような積層ブロックを用い，図-2に示すような正弦波を用いて水平方向に加振を行った．実験ケースと各ケースに対するブロックの挙動は表-1に示す通りである．これより加振条件の違いによって安定や転倒などブロックの挙動が変化していることがわかる．

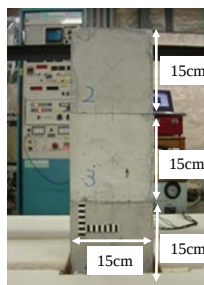


図-1 実験モデル

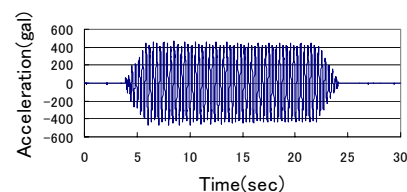


図-2 加振波形（3Hz-400gal）

4 DDA による解析

次に，DDA を用いて振動台実験時のブロックの挙

キーワード 不連続変形法，地震応答解析，岩盤

連絡先 〒606-8051 京都府京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科ジオフロント環境工学講座 TEL 075-753-5129

動を解析した。実験時にブロックの境界面に沿って作用する力は主にブロック間の摩擦力であり、この摩擦力がブロックの運動に大きく影響する。そこで、まず摩擦力が正確に作用する解析パラメータを設定するため、実験で用いたブロックと物性値を等しくした図-3のようなモデルを用いて摩擦力の検討解析を行い、解析から得られた上段ブロックの水平変位と逐次計算により求めた単一ブロックすべりの数値解との比較を行った。その結果、弾性係数のおよそ1/1000以下のばね剛性では摩擦力が正確に作用するがそれより大きいばね剛性では数値解と大きく外れた値をとることがわかった（図-4に結果の一部を示す）。そこで、摩擦力が正確に作用する結果が得られた解析パラメータを用いて振動台実験の解析を行った。解析に用いたモデルを図-5に、解析パラメータを表-2に示す。表-3は解析結果をまとめたものであるが、これによると、実験時における加振条件の違いによるブロック挙動の変化を再現できていることがわかる。また、図-6は上段ブロックの水平変位及び水平加速度スペクトルの解析結果と実験結果を比較したものであるが、どちらも概ね再現できていることから、振動解析を行う際には、摩擦力が正確に作用するような小さなばね剛性を用いる必要があることがわかる。

5. まとめ

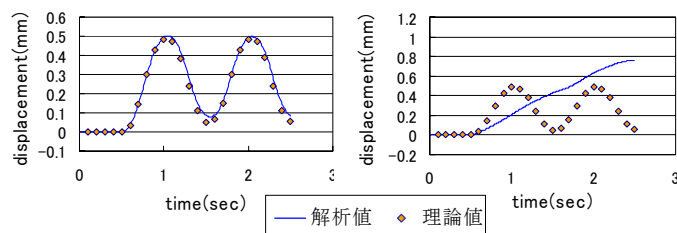
本研究では、積層ブロックを用いた振動台実験を行い、DDAによる解析結果との比較を行った。その結果、DDAを地震動問題に適用する際の特性として摩擦力が正確に作用する小さなばね剛性を用いる必要があることがわかり、ペナルティばね剛性の設定に関する知見が得られ、その適用の可能性が示された。今後の課題として、ばね剛性だけでなく時間刻みの影響によるブロック挙動の変化の検討すること、解析パラメータを定量的に設定するため解析データの整理と蓄積を行うこと、そして実現象に対応した斜面モデルにおける地震動問題に取り組み、地震波に対する斜面の応答性状を検討することが挙げられる。

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。



図-3 摩擦検討解析モデル



(1) $kn=2 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ (2) $kn=2 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$

図-4 摩擦検討解析結果（ kn :ペナルティばね剛性）

表-1 実験ケースとブロック挙動

	300gal	400gal	500gal	700gal
3Hz	安定	安定	転倒	転倒
5Hz	安定	変位するが 転倒せず	変位するが 転倒せず	転倒



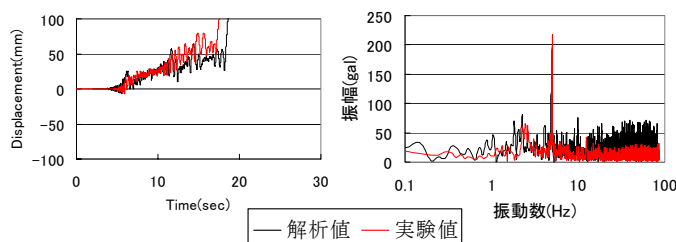
図-5 解析モデル

表-2 解析パラメータ

項目	
密度(t/m^3)	2.2
弾性係数(kN/m^2)	1.49×10^7
ポアソン比	0.2
摩擦角($^\circ$)	36.4
時間刻み(sec)	0.001
ペナルティばね剛性(kN/m^2)	2×10^4
せん断ばね比	1.1

表-3 解析結果（ブロック挙動）

	400gal	700gal
3Hz	安定	転倒
5Hz	変位するが 転倒せず	転倒



(a) 水平変位 (b) 水平加速度スペクトル

図-6 解析結果と実験結果の比較
(5Hz-700gal：上段ブロック)