不連続変形法による 岩盤斜面における地震時の動的挙動解析

嶋岡 計亮1* · 小山 倫史¹ · 西山 哲¹ · 大西 有三¹

¹京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻(〒615-8540京都市左京区京都大学桂C1-2棟) *E-mail: shimaoka@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

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.そこで本研究では、 不連続体解析手法の一つである不連続変形法を用いて、多層ブロックを用いた振動台実験解析を行い、本 手法の斜面の動的挙動に対する適用性を検討した.また、実問題への適用性を高めるために、水平方向の みならず、鉛直方向への振動解析に対しても、本手法適用に際しての知見を得た.

Key Words : DDA, dynamic problem, earthquake response analysis, rock slope, shaking table test

1. 序論

日本では地震が頻発しており,絶えず我々の生活を脅 かしている.兵庫県南部地震や新潟県中越地震等に代表 される大地震では各種構造物に被害が発生している.し たがって,各種構造物の地震時の安全性を評価する必要 があり,特に発電所等の重要構造物の安全性を評価する ことは重要な責務である.そのためには,地震動に対す る施設の耐震強度のみではなく,地震時の周辺地盤や隣 接斜面の安定性,さらに地震に起因する斜面崩壊による 岩塊の崩落等,地震随伴事象である斜面崩壊の二次的影響を評価する事が重要である.この二次的影響を評価す るためには,斜面崩壊時の岩塊の到達距離と分布状況の 把握が必要となり,地震時の不連続性岩盤斜面の動的挙 動を正確に把握する事が重要となってくる.

一般に岩盤は、数多くの断層、割れ目や亀裂を有した 不連続体である.したがって、岩盤の挙動を正確に把握 するには、これら不連続面の影響を考慮する必要がある. ここで、従来より斜面の安全性評価手法として用いられ ている有限要素法等の連続体解析手法では十分にその挙 動を追跡できず、不連続体解析手法による評価が必要で ある.

本研究では、1985年にShiと Goodman¹⁾²によって提案 された不連続変形法 (DDA)を用いた.不連続変形法 とは不連続体解析手法の一種であり、これまでにトンネ ルの安定性解析等の静的解析や落石問題等の動的解析に も適用され、幅広い汎用性を秘めている.しかし、地震 応答解析に関しては実用化に至っておらず,地震を起因 とする地すべりや落石問題等への解析事例はあるものの, その適用性に関しては詳細な検討がなされていないのが 現状である.したがって,本研究では,岩盤斜面を模擬 した多層ブロックモデルを用い,不連続変形法による振 動台実験解析を行うことで,岩盤斜面における地震時の 動的挙動解析への適用を検討する.

2. 不連続変形法の一般理論

不連続変形法^{1)2/3}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て定式化を行う. 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で表わされる.

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

ここに、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り、 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)のように展開され,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.

$$\widetilde{K} \cdot \Delta u = \widetilde{F}$$

$$\widetilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2\eta}{\Delta t} + K_e + K_f$$

$$\widetilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M \dot{u} + (\Delta F - f)$$
(2)

ここに、 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および 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、接触ばね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する.

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て振動台実験を行った.また、不 連続変形法による解析との比較を行うため、ビデオカメ ラによる撮影を行い、着目ブロックの変位を算定した.

(1) 実験モデルと実験装置

実験には、図-1、図-2 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た.モデルの奥行きは 50mm であり、基礎部分と要素部分から成る.基礎部分は図-1 に示すように、水平面と三つの傾斜面から構成されてい る.要素部分は直方体のブロックと三角柱のブロックか ら構成されており、自重崩壊を防ぐため図の斜線で示し た要素ブロックを基礎部分に固定した.要素部分,基礎 部分ともに、アルミニウムを材料として用いており、物 性値は表-1 に示すとおりである.



図-2 実験モデル(撮影図)

表-1 材料の物性値						
単位体積重量(kN/m³)	26.4	摩擦角(°)	20			
弹性係数(kN/m²)	62000	粘着力(kN/m)	0			
ポアソン比	0.2	引張強度(kN/m ²)	0			



加振装置として、図-3 に示す小型振動台を用いた. 実験では、水平用の振動台(奥行き 80cm×150cm)にモ デルを設置し、水平方向に加振させ、対象の挙動を確認 した.加振は、ファンクションジェネレーターにより作 成した加速度波形をデジタル値からアナログ値に変換し、 振動台制御装置に入力して行った.また、モデルの基礎 部分は固定板により水平振動台に固定した.

(2) 加振波形

加振波形には、1968年に発生した十勝沖地震時に八 戸市で観測された加速度記録をベースに振幅を変化させ、 長周期成分を除去した最大加速度が約800Galの地震動 再現波を用いた.加振波形を図-4に示す.

(3) 実験結果

撮影したビデオデータから得られた,地震動再現波加 振時のモデルの挙動を図-5 に示す.実験結果からモデ ルの挙動は図-5(a)に示す二つの領域,①:大規模なトッ プリングとすべりが生じる領域,②:すべりのみが生じ る領域,に分けることができる.加振開始直後から4秒 後までは,ブロック全体で徐々にすべりが生じる.加振 波形の振幅が大きくなる4秒後から7秒後にかけて,領 域①で大規模なトップリングが生じ,領域②では引き続 きすべりが生じる.その後は加振波形の振幅が小さい状 態が続き,ブロック全体の形状はほとんど変化せず最終 的に図-5(e)のようになる. 領域①での大規模なトップリングの発生は,自重崩壊を 防ぐために基礎部分の傾斜面に要素ブロックを固定した ことが大きな要因と考えられる.すなわち,要素ブロッ クを固定したことにより,領域①の下層部が斜面にそっ た方向にすべりにくくなり,大規模なトップリングが誘 発されたと推測できる.また,領域②ですべりのみが生 じた理由としては,加振中に領域②の最下層ブロックの すべりが止まり,結果としてトップリングが発生しやす くなったが,トップリングが発生しない程度の加振波形 の小さな振動が続いたことが考えられる.



(a) 0秒後

(b) 4秒後





(d) 7秒後



(e) 加振終了後 図-5 地震動再現波加振時のモデルの挙動

4. 不連続変形法による解析

前節で示した振動台実験時のブロックモデルの挙動と, 解析結果を比較することにより,不連続変形法による斜 面の地震応答解析に関する検討を行った.

これまで、不連続変形法の地震応答解析への適用に関 して、振動台実験とその比較検討には単一ブロックモデ ル⁴、もしくは単純な二段積みブロックモデル⁵が用い られてきた.そこで、本研究では従来の研究から得られ た地震応答解析に関する知見を、多層ブロックモデルの 地震応答解析にも適用可能かについて検討を行い、その 適用性と課題を明らかにする.以下では、不連続変形法 における接触ばね剛性設定に関する指標について説明し、 その後に多層ブロックモデルの地震応答解析を行う.

また、不連続変形法のパラメータ設定に関する考察を 加えることにより、不連続変形法の特性を検討する.

(1) 接触ばね剛性設定に関する指標

不連続変形法では、ブロック間に過大な貫入を起こさ ないようにするため、比較的大きな接触ばね剛性の値が 推奨されてきた.

振動台実験時のブロック挙動を考える場合,ブロック の境界に沿って作用する力は主にブロック間の摩擦力で ある.また,実際の岩盤斜面においても不連続面に沿っ て作用する力は摩擦力によるものが大きいので,不連続 体に関する数値解析法において摩擦力をうまく作用させ ることが重要となる.そこで,精度良い地震応答解析を 行うには摩擦力を正確に作用させることが必要となる. 単純な二段積みブロックモデルの摩擦力検討解析から得 られた結果⁵⁵を図-6 に示す.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(t)と接触ばね剛性 kn(KN/m)の比 kn/M が, 10⁵から1オーダー程度の値域に なるよう接触ばね剛性を設定すれば,摩擦力を正確に作 用させられることが報告されており⁵,これを接触ばね 剛性設定に関する指標として本解析への適用を考える.



本解析で用いるモデルでは接触面が多く存在し、そこ に作用する応力が異なることから、指標を用いて接触ば ね剛性を一つに定めることができない.そこで、指標の 適用法についての工夫が必要となる.このことに関して は次項で述べる.

また,現実の地震動は水平のみならず鉛直方向にもお よぶことを考慮し,不連続変形法の実問題へのさらなる 適用性を示すため,鉛直方向の振動応答解析を行った.

鉛直振動時のブロック挙動を考える場合,ブロックの境 界に沿って作用する力は主にブロック間の垂直抗力であ る.そこで,精度良い鉛直方向の振動応答解析を行うに は垂直抗力を正確に作用させることが必要となる.解析 に用いたモデルと加振波形をそれぞれ図-7 と図-8 に示







す. 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(t)と接触ばね剛性 kn(KN/m)について感度解析を行 った結果を図-9 に,これと摩擦力検討解析結果³を比較 したものを図-10 にそれぞれ示す. 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(t)と接触ばね剛性 kn(KN/m)の比 kn/M が,10⁵から1オーダー程度の値域に なるよう接触ばね剛性を設定すれば,垂直抗力を正確に 作用させられることが分かり、これは摩擦力検討解析結 果³と一致している. 以上より、水平と鉛直、両成分を 組み合わせた加振波形を用いた振動応答解析に対しても、 不連続変形法は適用可能と考えられる。

(2) 振動台実験解析

a) 解析モデル、加振波形、物性値とパラメータ

解析モデルは図-11 に示すように,実寸法をそのまま 反映させ,実験時に基礎部分に固定した要素ブロックは, 基礎ブロックと同一化させた

加振波形として、振動台実験から得られた振動台の水 平変位の時刻暦を用い、振動はモデルの基礎部分に変位 の時刻暦を入力することで表現した.振動台実験から得 られた振動台の水平変位データをもとに作成した加振波 形を図-12に示す.

解析で用いた物性値とパラメータを表-2 に示す.物 性値は前節での値を用いた. 接触ばね剛性 kn の設定に 関して,本実験は多層ブロックモデルを用いており,接 触面が多く存在するため、どの接触面で指標を適用する かで、その値は大きく異なる. そこで今回は、ブロック 間に過大な貫入が起こらないような接触ばね剛性を設定 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,図-11の接触面Aで指標を適用し, 接触ばね剛性を 6.2×10³ kN/m とした. しかしこの場合, 上層部の接触面に作用する接触力が過大になり、ブロッ ク同士の過度な反発が起こりうる.ここで、不連続変形 法における接触状態について考えてみる. 接触機構を示 した図-13 において, OPEN 基準・CLOSE 基準・許容貫 入量はそれぞれブロック表面からの距離で表わされてい る. ブロックが鉛直下向きに変位し CLOSE 基準を越え ると、CLOSE 状態となり接触していると判定され、ブ ロック間に接触ばねが導入される. この時, ばねの変形 量はブロック表面からの距離で定義され、ブロックが CLOSE 状態である限りは接触ばねが作用する. つまり, CLOSE 状態にあるブロックが接触力によりブロック表 面まで押し返されても、OPEN 基準を越えるまでは負の 接触力である引張力が働き、ブロック同士の過度な反発 を防ぐ.しかし、接触ばね剛性がブロックの質量に対し て大きいと、過大な接触力が作用しブロックの上向きの 変位が大きく計算され OPEN 基準をまたいでしまい OPEN 状態となり、ブロック同士の過度な反発が出力さ

れる. このことから, 接触判定時に接触ばねが導入され るまでの距離を短くし, 過大な接触力に起因するブロッ ク同士の過度な反発を防ぐために, CLOSE 基準をパラ メータとして変動させ小さく設定する. この際, CLOSE 基準を変動させることによる, 接触ばね剛性設 定に関する指標への影響を考慮しなければならない. そ こで, 前述の摩擦力検討解析⁹を基に, CLOSE 基準と接 触ばね剛性に関する感度解析を行った. その結果を図-14 に示す. この結果より, CLOSE 基準を小さく設定す

━_2	励州估	レ鼦杆	パラ	メータ
7 <u>7</u> 72	10/11/11/11	く 円生(1)ノ /	~ /	<u>~</u> _/

単位体積重量(kN/m³)	26.4	摩擦角(°)	20.0
弾性係数(kN/m²)	62000	時間刻み(s)	0.0005
ポアソン比	0.2	接触ばね剛性(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 ⁻⁶



図-13 ブロックの接触機構

ることで、摩擦力が正確に作用するような接触ばね剛性 の値域が拡大することが示された.結論として、 CLOSE 基準を小さく設定することにより、摩擦力が正 確に作用するような kn/M の値域は拡大することが示さ れ、CLOSE 基準をデフォルト値の 10⁴から小さくし 10⁶ に設定することにより、接触ばね剛性 6.2×10³ kN/m が モデル上層部の接触面に関して過大となることを防いだ.

b)解析結果

地震動再現波加振時の実験モデルの挙動と解析モデル の挙動を比較したものを図-15 に示す.実験時に見られ た崩壊モードが精度良く再現できていることが分かる. また,加振終了後の斜面形状を実験モデルと比較する と,解析モデルの方がブロック全体の変位が若干大き く計算されているが,概ね近い形状となっていること が分かる.しかし,解析モデルでは実験時と比較して 早い時間帯にトップリングが発生している.

実験モデルの挙動と比較して、解析モデルの方が変



図-15 振動台解析結果

位が大きく計算されており、ブロック全体のすべり量が 大きくなる傾向が見られた.このことより、振動応答は 解析モデルの方が大きく出やすいことが推測できる.こ れが原因で、解析モデルでは実験時と比較して早い時間 帯にトップリングが生じたのではないかと考えられる.

5. まとめ

本研究では、斜面を模擬した多層ブロックモデルを用 いて振動台実験を行い、その挙動を確認した.また、振 動台実験におけるモデルの挙動を不連続変形法により解 析し、実験結果との比較を行った.そして、解析による モデルの挙動の再現性を示し、不連続変形法による斜面 の地震応答解析に関する検討を行った.以下に本研究で 得た知見をまとめる.

初期状態で最も大きな質量が作用する接触面に上載す るブロックの単位奥行きあたりの総質量 M に対して, kn/M がおよそ 10⁵程度になるような接触ばね剛性 kn を 設定し,接触ばねによる過度な接触力に起因する反発を 抑えるために CLOSE 基準をデフォルト値よりも小さく 設定することで,多層ブロックモデルを用いた振動台実 験解析を精度良く行える.

また、本検討では加振波形として実際に観測された地 震波を元にした地震動再現波を用いたケースでありなが ら、斜面を模擬した多層ブロックモデルの振動台実験解 析は精度の高い結果が得られた.これにより、地震波を 入力波として用いた岩盤斜面の地震応答解析への適用性 を示すことができた.

ここで、地震応答解析に適用する際の課題として以下 のことがあげられる.

1) モデルの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.この原因を考察し検討を行う 必要がある. 2) 現実の岩盤斜面のモデルにおいては,形状の複雑さ により接触面に上載するブロックの単位奥行きあたりの 総質量を求めるのは困難である.従って,これを解決で きるような手法を考案する必要がある.

2)においては、例えば接触面に作用する応力に応じ て適切な接触ばね剛性を定める手法が考えられる.この 場合、鉛直方向の不連続面に作用する水平方向の接触力 も適切に出力できると考えられ、その有用性は高い.

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 ともにおおむね精度良く再現することができた.よって、 実斜面において地震応答問題に対する不連続変形法の適 用性は高く、今後、上記の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.

参考文献

- Shi, G. H. and Goodman, R. E. : "Discontinuous Deformation Analysis-A new Method for Computing Stress, Strain and Sliding of Block Systems", *Key Questions in Rock Mechanics*, Cundall et. al. eds, Balkema, pp. 381-393, 1988.
- Shi, G. H.: "Discontinuous Deformation Analysis- A New Numerical Model for the Static and Dynamics of Block System", Ph.D Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1989.
- 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua Shi 著, 日本計算工学会 編: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
- Tsesarsky, M. : "Stability of underground openings in stratified and jointed rock", Ph. D Dissertation, Department of Geological and Environmental Sciences, Ben Gurion University of the Negev, 2004.
- 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.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES ON EARTHQUAKE RESPONSE OF ROCK SLOPES

Keisuke SHIMAOKA, Satoshi NISHIYAMA, Tomofumi KOYAMA, Yuzo OHNISHI

Rock failure caused by the earthquake happens frequently in Japan and in order to assess the erthquake resistance of various infrastructures such as electric power plants, understanding the behavior of rock slopes around them during earthquake is required. In this study we performed the shaking table tests using multilayer block model and simulated them by using discontinuous deformation analysis (DDA). The results obtained from laboratory and numerical simulations were compared and the applicability of DDA to earthquake response analysis was examined and discussed.