

不連続変形法の地震応答解析への適用に関する基礎的研究

赤尾 悟史^{1*}・大西 有三¹・西山 哲¹・矢野 隆夫¹・浦野 和彦²・西村 毅³

¹京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

²ハザマ 技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市苅間515-1)

³ハザマ 広島支店 倉敷貯槽 作業所 (〒711-0935 岡山県倉敷市児島宇野津字長島新田2203-1)

*E-mail: akao@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

日本では地震を起因とする斜面崩壊や落石が多発しており、人間の生活に重大な被害をもたらしている。これらの被害から人間の生活を守るためには、岩盤斜面の地震時の安全性評価を行い、何らかの防災対策を行うことが不可欠である。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必要であり、その手法として数値解析法が挙げられる。そこで、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) 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。

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

1. はじめに

日本では地震を起因とする斜面崩壊や落石が多発しており、人間の生活に重大な被害をもたらしている。これらの被害から人間の生活を守るためには、岩盤斜面の地震時の安定性評価を行い、何らかの防災対策を行うことが不可欠である。一般的に岩盤斜面の安定性評価手法は大きく経験的手法と数値解析的手法に分けられるが、未だに多くが経験的手法によるものである。しかし、地震時の岩盤斜面の安定性を経験的手法だけで評価することは困難であり、今後は数値解析的手法による定量的かつ定性的な安定性評価が不可欠である。さらに、岩盤斜面は複雑な不連続性を有しているため、不連続面での変形や、不連続面で囲まれた岩石のブロックが個別に運動するような問題を解析できる必要がある。そのような点から、対象を不連続体として扱い、かつ大変位、大変形問題を扱うことができる不連続変形法 (DDA)^{1), 2)}は岩盤斜面に対する数値解析手法として有効である。DDAは静的問題だけでなく落石などの動的問題の解析も精度良く行うことができ、今後実用化が期待されているが、地震動問題への適用性はまだ十分に検討されていない。

そこで、不連続変形法の地震動問題への適用性とその適用に際しての特性を検討することを本研究の目的とする。本研究では、積層ブロックを用いた振動台実験を行

いブロックの挙動を確認した上で、DDAによる解析を行い、地震動問題に対する適用性と特性を検討した。なお、DDAによる解析に用いるパラメータを適切に設定するため、振動台上の単一ブロックの振動応答挙動の数値解とDDAによる解析結果との比較を行った後、振動台実験のシミュレーションを行った。

2. 解析手法の概要

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)、(3)、(4)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．

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F} \quad (2)$$

$$\tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2\eta}{\Delta t} + K_e + K_f \quad (3)$$

$$\tilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M \dot{u} + (\Delta F - f) \quad (4)$$

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．また，ブロック間の接触にはペナルティ法が導入されており，接触ばねによりブロック同士の貫入を防いでいる．従来の研究²⁾では，接触ばねの剛性として静的な解析の場合にはブロックの弾性係数より大きな値が推奨されており，動的な解析のうち落石解析の場合にはブロックの弾性係数と同じ程度の値が推奨されている．なお，ブロック表面に沿った摩擦力はモール・クーロンの破壊基準が採用されている．さらに，振動はブロック内の変位拘束点に変位の時刻歴を入力することで表現している．

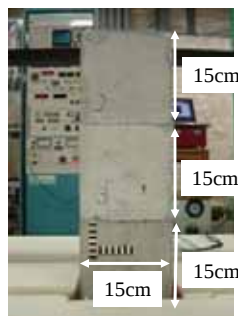


図-1 実験モデル

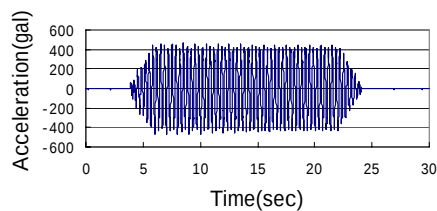


図-2 加振波形（例：3Hz-400gal）

表-1 実験ケース

Case	周波数 (Hz)	振幅 (gal)	Case	周波数 (Hz)	振幅 (gal)
1	3	300	5	5	300
2	3	400	6	5	400
3	3	500	7	5	500
4	3	700	8	5	700

3. 振動台実験

不連続体である積層ブロックが振動時にどのような挙動を示すかを検討するため，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に示すような立方体のコンクリート（15cm角，7.4kg）を3段に積んだモデルを用いた．加振波形は図-2に示すような正弦波を用い，水平方向に加振を行った．実験ケースを表-1に示す．

表-2はブロック挙動の実験結果をまとめたものである．これによると小さな加速度振幅ではブロックは安定しているのに対し，大きな加速度振幅に対しては転倒が起きており，入力加振波形の違いによりブロックが様々な挙動を示していることがわかる．また，図-3は5Hz-700gal加振時のブロックの挙動を表したものであるが，これよりブロックがすべりや回転を伴いながら徐々に変位していく様子がわかる．

表-2 実験結果（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



(a) 0 sec



(e) 13.8 sec



(b) 6.1 sec



(f) 15.5 sec



(c) 8.6 sec



(g) 16.4 sec



(d) 10.1 sec



(h) 17.5 sec

図-3 5Hz-700gal加振時のブロック挙動

4. DDAによる解析

(1) 単一ブロックの振動応答解析

a) 解析条件

振動台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応答挙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適切な接触ばね剛性を設定するため、実験で用いたブロックと物性値を等しくした図-4のようなモデルを用いて単一ブロックの振動応答解析を行い、逐次計算により求めた単一ブロックのすべりの数値解³⁾との比較を行った。解析に用いた物性値と解析パラメータを表-3に示す。なお加振波形は図-5に示す正弦波を用い、下段ブロックに水平方向の強制変位として入力している。

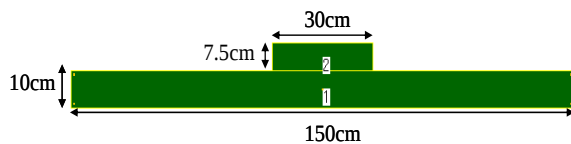


図-4 解析モデル

表-3 物性値と解析パラメータ

単位体積重量(kN/m ³)	21.56
弾性係数(kN/m ²)	1.49×10^7
ポアソン比	0.2
摩擦角(°)	36.4
時間刻み(sec)	0.001
接触ばね剛性(kN/m ²)	$2 \times 10^3, 2 \times 10^4, 2 \times 10^5, 2 \times 10^6$
せん断ばね比	0.5, 1.0, 1.5

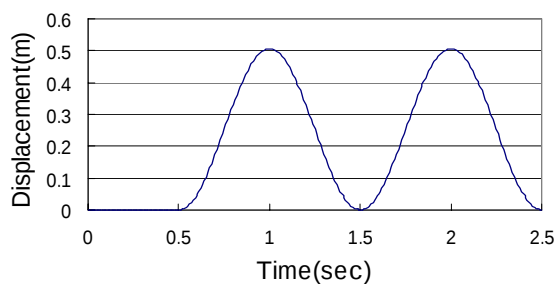
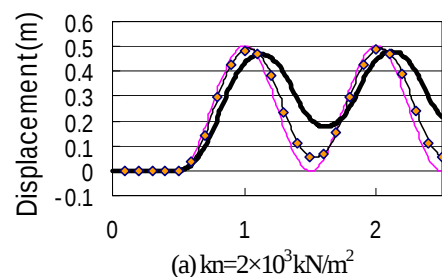


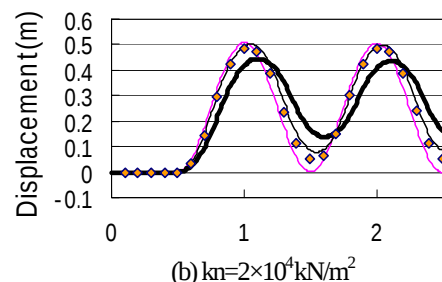
図-5 加振波形

b) 解析結果

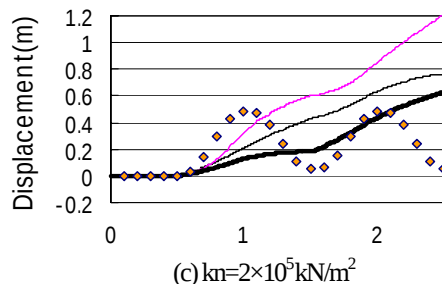
図-6は上段ブロックの水平変位のDDA解析結果と数値解との比較を表したものである。これによると接触ばね剛性 kn が 2×10^5 kN/m²よりも大きい場合、解析値は数値解と大きくはずれた値を示しており、摩擦力が正確に働いていないことがわかる。それに対し、接触ばね剛性が 2×10^4 kN/m²よりも小さい場合、解析値は数値解と非常に近い値を示しており、摩擦力が正確に働いていることがわかる。したがって、摩擦力を正確に作用させるためには接触ばね剛性を 2×10^4 kN/m²よりも小さい値に設定する必要があることがわかった。この値はブロックの弾性係数のおよそ1000分の1に相当する。



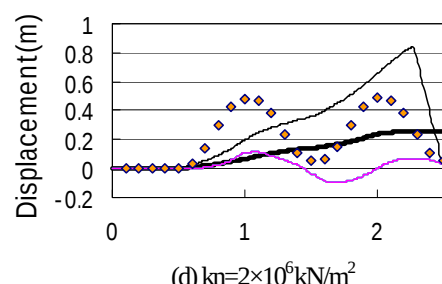
(a) $kn=2 \times 10^3$ kN/m²



(b) $kn=2 \times 10^4$ kN/m²



(c) $kn=2 \times 10^5$ kN/m²



(d) $kn=2 \times 10^6$ kN/m²

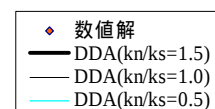


図-6 上段ブロック水平変位のDDA解析結果と数値解の比較
(縦軸：上段ブロック水平変位，横軸：時間)

c) 接触ばね剛性に関する考察

解析の結果、ブロックの弾性係数の 1000 分の 1 より小さい接触ばね剛性を用いることで、ブロック境界面における摩擦力を正確に作用させることができた。この値は静的解析や落石解析時に従来より推奨されている値に比べ、非常に小さい値である。ただし、本研究で用いたブロックの質量は実際の斜面を構成する岩盤ブロックに比べて小さいため、それに対応した小さな接触ばね剛性を用いる必要があるとも考えられ、より大きな質量を持ったブロックに対してはより大きい接触ばね剛性を用いる必要がある可能性がある。そこで、単一ブロックの振動応答解析と同じモデルを用いて、ブロックの単位奥行きあたりの質量 M を様々に変化させて解析を行い、ブロックの質量に対する適切な接触ばね剛性の範囲を考察した。その結果を図-7 に示すが、 M/k_n がおよそ 10^{-5} 程度のときには解析値と数値解はほぼ一致しており、摩擦力が正確に作用しているという結果が得られた。この指標を用いると、例えば物性値が本研究で用いたブロックと等しく、断面積が 10m^2 という大きな岩塊を扱う場合には適切なばね剛性が約 $2.2 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ となり、ブロックの弾性係数よりも大きいという従来の指標と整合する

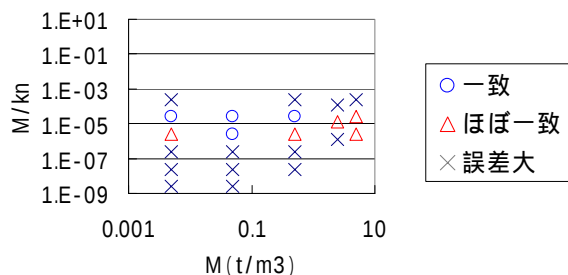


図-7 単位奥行きあたりの質量 M に対する適切な k_n の範囲

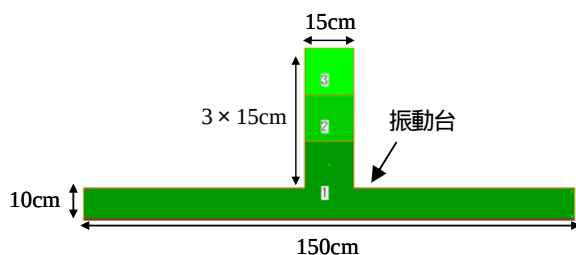


図-8 解析モデル

表-4 解析パラメータ

時間刻み(sec)	0.001
接触ばね剛性(kN/m ²)	2×10^4
せん断ばね比	1.0

ものになる。しかし、今回の解析のように断面積が小さい場合には、従来の指標では接触ばね剛性が適切な値よりも大きく設定され、精度良い解析を行うことができないため、 M/k_n を 10^{-5} 程度に設定するという指標を用いるべきであると考えられる。

(2) 振動台実験におけるブロックの応答挙動解析

a) 解析条件

単一ブロックの振動応答解析より、摩擦力が正確に作用する結果が得られた接触ばね剛性を用いて振動台実験におけるブロックの応答挙動解析を行った。解析に用いたモデルを図-8に、解析パラメータを表-4に示す。本解析では接触ばね剛性を $2 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ 、せん断ばね比を1.0に設定した。

b) 解析結果

表-5はブロック挙動の解析結果をまとめたものであり、解析を行ったすべてのケースにおいてブロックの挙動は実験時の挙動と一致している。また、図-9は解析における5Hz-700gal加振時のブロック挙動を示したものであるが、実験時に見られたすべりや回転を伴いながらブロックが変位していく様子を再現できている。

表-5 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

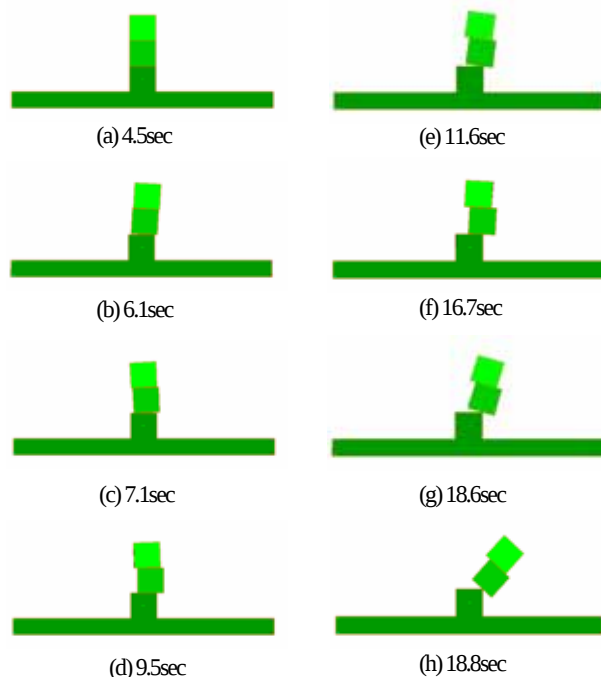


図-9 DDAによるシミュレーション（5Hz-700gal加振時）

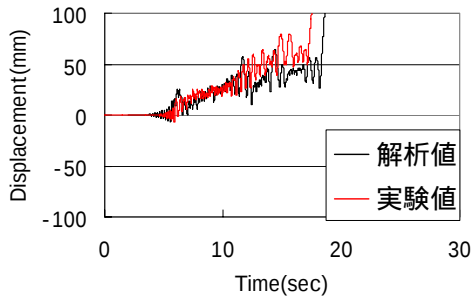


図-10 上段ブロック水平変位のDDA解析値と実験値の比較（5Hz-700gal）

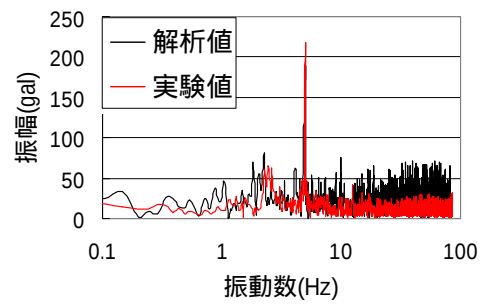


図-11 上段ブロック水平加速度スペクトルのDDA解析値と実験値の比較（5Hz-700gal）

さらに図-10，図-11は5Hz-700gal加振時の上段ブロックの水平変位及び水平加速度スペクトルのDDA解析結果と実験結果を比較したものであり，どちらも概ね再現できている．以上より，摩擦力が正確に作用するような小さい接触ばね剛性を用いることでDDAは振動台実験時のブロック挙動を精度良く解析できることがわかった．

5. まとめ

本研究ではDDAの地震応答解析への適用性とその特性を検討することを目的とし，不連続体である積層ブロックを用いた振動台実験で振動時のブロック挙動を確認した後，DDAによる解析を行った．DDAによる解析を行う際には，まず摩擦力が正確に作用する接触ばね剛性を検討し，適切な接触ばね剛性を用いて振動台実験時のブロック挙動を解析した．その結果，ブロックの弾性係数のおよそ1000分の1という従来推奨されている接触ばね剛性に比べて非常に小さな接触ばね剛性を用いることで摩擦力が正確に作用し，振動台実験時のブロック挙動をうまく表現することができた．さらに，今後接触ばね剛性を定量的に設定できるようにするため，ブロックの単位奥行きあたりの質量Mに関する感度解析を行い， M/kn が 10^{-5} 程度の値になるようにばね剛性を設定すればよいという結果が得られた．以上より，地震応答解析におけるDDAのパラメータ設定に関する知見が得られ，それに対するDDAの適用の可能性を示すことができた．今後の課題として，実斜面を対象とした解析を行う際にも適切なパラメータを定量的に設定できるよう解析データの蓄積及び整理を行うこと，及び複雑なモデルを用いた実験・解析を行い，接触条件がより複雑な問題に対するDDAの適用性を検討することが挙げられる．

付録 単一ブロックのすべりの数値解

4(1)で引用した水平に振動する台上の単一ブロックの数値解³⁾に関して説明する．

ブロックに水平方向に作用する力は振動台から受ける摩擦力だけであることを考慮して，時刻 t における振動台の加速度，速度を a_1, v_1 ，ブロックの加速度，速度を a_2, v_2 ，境界における摩擦係数を μ ，重力加速度を g とし，以下の状態に場合分けしてブロックの加速度を求める．ただし右向きを正としている．

- 1) 相対速度 $v_1^* = v_1 - v_2$ が0の場合，振動台の加速度の大きさと方向でブロックの加速度は決定される．振動台の加速度の絶対値が μg よりも小さい時は $a_2 = a_1$ となる．また振動台の加速度の絶対値が μg より大きい時， $a_1 > 0$ ならばブロックは右向きの力を受け， $a_2 = \mu g$ となる．また $a_1 < 0$ ならばブロックは左向きの力を受け， $a_2 = -\mu g$ となる．
- 2) 相対速度 $v_1^* = v_1 - v_2$ が0以外の場合， $v_1 - v_2 > 0$ であればブロックは右向きの力を受け， $a_2 = \mu g$ となる．また $v_1 - v_2 < 0$ であればブロックは左向きの力を受け， $a_2 = -\mu g$ となる．

以上の場合分けをまとめると次のようになる．

$$\begin{aligned}
 & \text{if } v_1^* = 0 \text{ and } |a_1| \leq \mu g & a_2 = a_1 \\
 & \text{and } |a_1| > \mu g \text{ and } a_1 > 0 & a_2 = \mu g \\
 & \text{and } a_1 < 0 & a_2 = -\mu g \\
 & \text{if } v_1^* \neq 0 & \text{and } v_1^* > 0 & a_2 = \mu g \\
 & \text{and } v_1^* < 0 & a_2 = -\mu g
 \end{aligned}$$

この条件に従い，時間ステップごとの変位，速度，加速度を逐次計算することでブロックの変位を計算することができる．

参考文献

- 1) Shi, G. H. and Goodman, R.E. : Discontinuous Deformation Analysis, *Proc. 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp. 269-277, 1984.
- 2) 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), 計算力学レクチャーシリーズ 6, 丸善, 2005.
- 3) Kamai, R. and Hatzor, Y. H. : Dynamic back analysis of structural failures in archeological sites to obtain paleo-seismic parameters using DDA, *Proc. of ICADD-7*, pp. 121-136, 2005.
- 4) Tsesarsky, M. and Hatzor, Y. H. : Dynamic block displacement prediction – validation of DDA using analytical solutions and shaking table experiments, *Proc. of ICADD-5, BALKEMA*, pp. 195-203, 2002.
- 5) Nishiyama, S., Ohnishi, Y., Yanagawa, T., Seki, F. and Ikeya, S. : Study on stability of retaining wall of masonry type by using Discontinuous Deformation Analysis, *Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS*, vol.2, pp. 1221-1226, 2004.
- 6) 佐々木猛, 萩原育夫, 佐々木勝司, 吉中龍之進, 大西有三, 西山哲: 不連続変形法による斜面崩落モデルの地震応答解析, 第 9 回計算工学講演会論文集, pp.201-204, 2004.

VIBRATION ANALYSIS OF LAMINATED BLOCKS BY DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS

Satoshi AKAO, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO,
Kazuhiko URANO and Tsuyoshi NISHIMURA

An earthquake is one of the triggers of rock slope failure and rockfall which cause heavy damage to human beings. In order to conduct a safety assessment for the sake of protecting human beings against these disasters, simulation of the behavior of rock masses during earthquakes is necessary. This paper describes the applicability of discontinuous deformation analysis (DDA) to vibration analysis and its characteristics. By comparing vibration response of the laminated blocks in the shaking table tests with results of simulation by DDA, the applicability was proved and knowledge about applying DDA to vibration analysis was acquired.