

不連続変形法の 地震起因の地すべりへの適用に関する研究

嶋岡 計亮^{1*}・小山 倫史¹・西山 哲¹・入江 敬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災害が多発しており、各種構造物の地震時の安全性を評価するためには、隣接する斜面の地震時安定性や崩壊時の災害状況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、岩手・宮城内陸地震に起因して岩手県内陸部において発生した、荒砥沢地すべりの挙動を追跡し、本手法の斜面災害に対する適用性を検討した。また、解析結果から、本地すべり発生のメカニズムに関する知見を得た。

Key Words : DDA, dynamic analysis, landslide, The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008

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。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、不連続面の影響を十分に追跡できず、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。一方、斜面崩壊に関しては、その適用事例が少ないのが現状である。そこで、本研究では、2008年6月14日に発生した、M7.2の岩手・宮城内陸地震に起因する荒砥沢地すべり

への本手法の適用性を検討し、また、解析結果から、本地すべり発生のメカニズムに関する知見を得た。

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。

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

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。

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

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、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. 荒砥沢地すべり

解析対象である荒砥沢地すべりは、2008 年 6 月 14 日に発生した M7.2 の岩手・宮城内陸地震に起因して、岩手県内陸部において発生した。

(1) 地すべりの規模

荒砥沢地すべりの規模大略は以下のようになっている。

幅：900m、長さ：1,300m

すべり面深度：最大127m

主滑落崖：最大150m

移動土塊：約6,700 万m³

すべり面形成層：砂岩・シルト岩互層

すべり面傾斜角：0~2°。

(2) 地すべりの特徴

本研究では、図-1中のD測線に沿って解析を行った。D測線に沿った、すべり発生後前後の縦断面図を図-2示す。D測線は全長約1.5kmであり、すべり面の角度は2°と低角度である。また、周辺は集水域となっており、地下水が多く存在する。二つのリッジの間で構成されている陥没帯は、地すべり発生後に東西にのびており、両リッジの滑动距離に差があることが分かる。また、地すべりの末端部で、移動体が圧縮及び変形している。

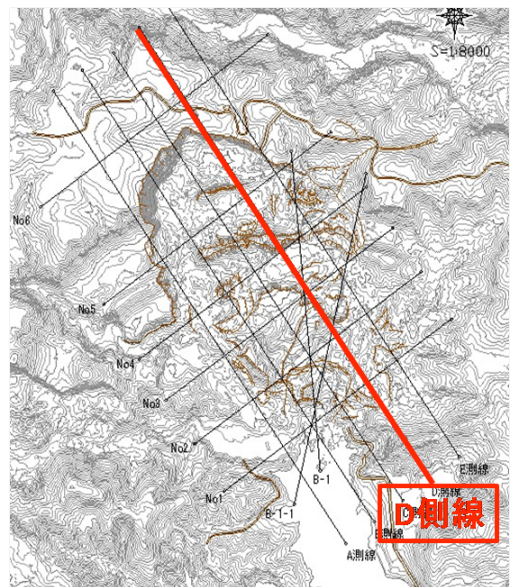


図-1 岩手県内陸部

4. 不連続変形法による解析

前節で示した地すべりの発生前後の地形の再現を試みるにより、不連続変形法による斜面災害への適用を検討した。解析にあたっては、不連続変形法による地震応答解析に関する従来の研究によって得られた知見⁴⁾⁵⁾を適用した。

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ふれて後、地すべり解析について説明する。また、解析結果より、本地すべり発生メカニズムに関する知見を得た。

(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。

地震動が水平及び鉛直成分からなることを考えると、接触面において摩擦力及び抗力をうまく作用させることが、精度良い地震応答解析を行う上で必要となる。ここで、著者らの過去の研究⁴⁾⁵⁾により、接触面上に載るブ

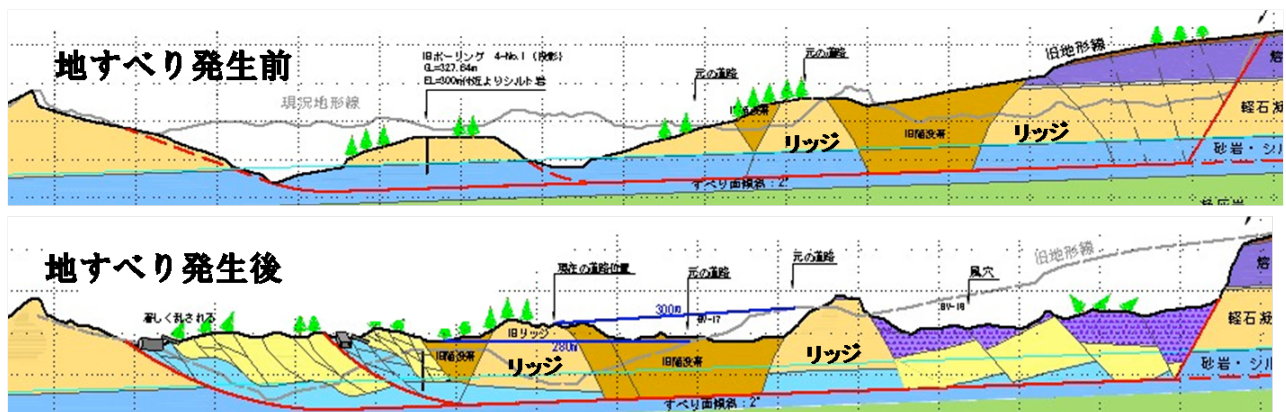


図-2 地すべり発生前後の縦断面図

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、 10^5 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、摩擦力及び抗力を正確に作用させられることがわかっている(図-3)。以上より、本解析において、接触ばね剛性の値を $7.2 \times 10^5 kN/m$ と設定した。

(2) 地すべり解析

a) 解析モデル、加振波形、物性値及びパラメータ

解析モデルは実寸法をそのまま反映させ、図-4に示すものを用いた。移動後の土塊を再現できるよう、ブロックの分割を工夫した。

加振波形として、D側線周辺で計測された地震波形を用い、解析モデルの土台部分に入力することにより、地震動を再現した。計測された地震波形を図-5に示す。

解析で用いた物性値及び接触面でのパラメータを、表-1及び2に示す。物性値は各種調査結果を基に、地盤材料毎に設定した。

b) 解析結果

地すべり発生後の縦断面図と解析結果を比較したものを図-6に示す。地すべり上流側の土塊がほとんど滑動しておらず、結果、下流側の土塊は圧縮及び変形していない。中央部から下流側は傾斜角 2° であり、上流側は傾斜角

が 0° であることを考慮すると、傾斜角が 0° の上流においては、地震動のみでは土塊の滑動を再現するのが不可能であることが分かる。ここで、D側線周辺が集水域となっており、地下水が多数存在した事実に着目し、地震発生に伴う動的な間隙水圧の上昇があったと仮定する。また、地震発生から約十分後には、地すべりが治まっていたという地域住民からの調査結果を参考にし、地震発生十分後に地すべり発生後の地形になるような、間隙水圧に相当する強制滑動力を模索した。結果、計42mの水圧に相当する物体力を、両リッジに作用させることにより、図-7に示す解析結果を得た。滑動距離及び土塊毎の形状共に、おおむね精度良く再現できている。しかし、

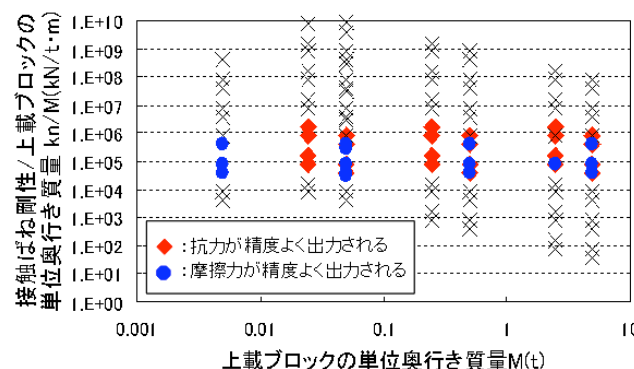


図-3 接触ばね剛性設定に関する指標⁵⁾

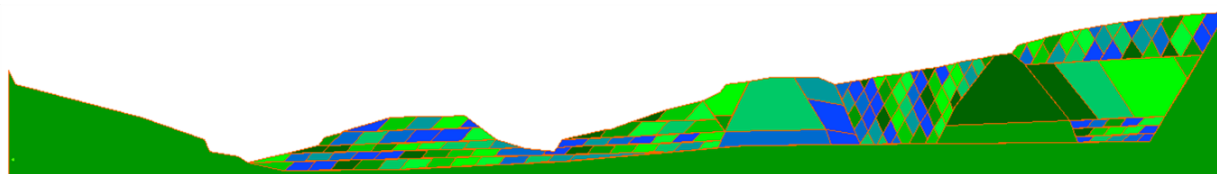


図-4 解析モデル

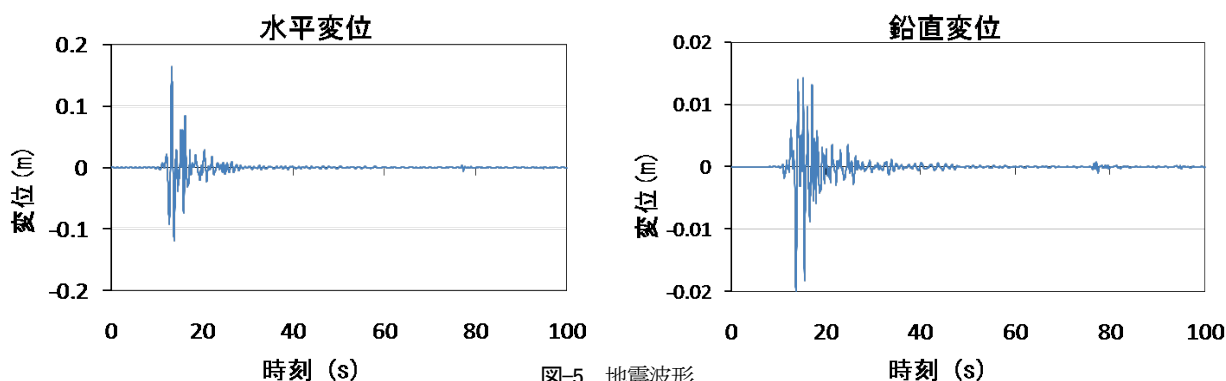


図-5 地震波形

表-1 物性値

	単位体積重量 (kN/m^3)	ヤング率 (Mpa)	ポアソン比
熔結凝灰岩	19.0	1000	0.35
軽石凝灰岩	16.5	80	0.4
砂岩・シルト岩	17.5	700	0.35
旧陥没帯	17	80	0.4

表-2 解析パラメータ

接触ばね剛性 (kN/m)	720000
粘着力 (kN/m)	0
引張強度 (kN/m^2)	0
摩擦角 ($^\circ$)	5
時間刻み (s)	0.0005

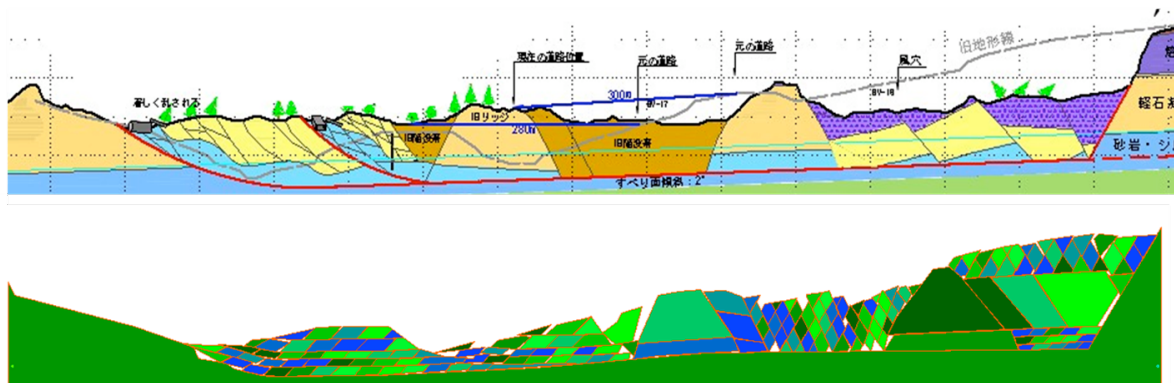


図-6 解析結果（地震動のみ）

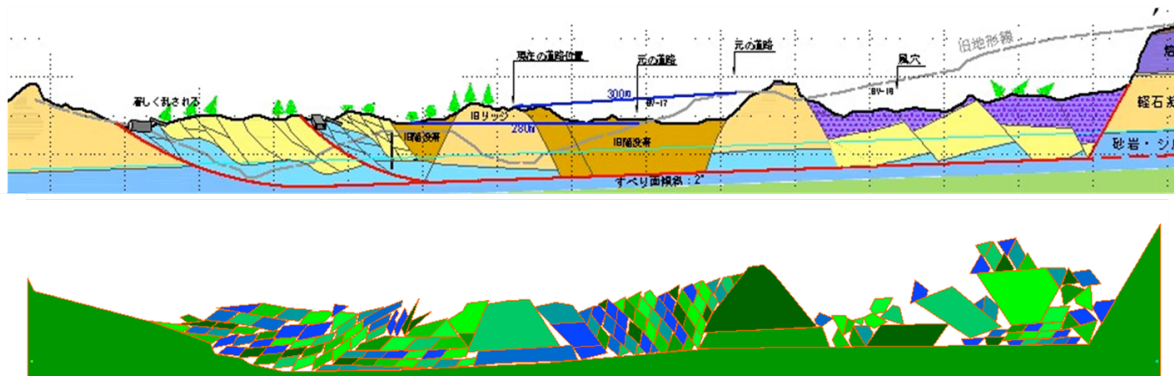


図-7 解析結果（物体力付加）

地すべり上流の土塊においては、実現象程ならかな形状にはならなかった。これは、解析モデルにおけるブロック分割の問題であり、改善が可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、2008年6月14日に発生した、M7.2の岩手・宮城内陸地震に起因する荒砥沢地すべりの挙動を、不連続変形法により追跡した。結果、不連続変形法の斜面災害に関する適用性を示すと共に、本地すべり発生メカニズムに関する知見を得た。以下に、本研究で得た知見をまとめる。

地震動のみを作用させた解析では、地すべり発生後の地形を再現するに至らなかった。特に、傾斜角が0°である地すべりの上流において、土塊の滑動を表現できなかったことが原因である。

両リッジに、計42mの水圧に相当する物体力を付加させ、地震動の十分後まで解析したところ、活動距離及び土塊毎の形状共に、実現象をおおむね精度良く再現できた。このことから、本地すべりの発生原因は、地震動及びそれに起因する滑動強制力であると予想され、周辺が集水域であり地下水が多数存在したという事実から、滑動強制力に相当するのは間隙水圧であると考えられる。また、地すべり上流の土塊において、解析結果が実現象

程ならかな地形にならなかったことに関しては、解析モデルにおけるブロック分割が問題であり、改善が可能であると考えられる。

本研究により、地すべりの滑動距離及び土塊毎の形状をおおむね精度良く再現することができた。よって、斜面災害に対する不連続変形法の適用性の高さを証明することができた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 嶋岡計亮, 小山倫史, 西山哲, 大西有三: 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, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム, 2009

NUMERICAL STUDIES ON LANDSLIDES CAUSED BY EARTHQUAKE USING DDA

Keisuke SHIMAOKA, Tomofumi KOYAMA, Satoshi NISHIYAMA, Kei IRIE and
Yuzo OHNISHI

Slope disaster caused by the earthquake happens frequently in Japan and in order to assess the earthquake resistance of various infrastructures such as electric power plants, understanding the behavior of slopes around them during earthquake is required. In this study we investigated the landslide caused by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 and numerical simulations using discontinuous deformation analysis (DDA). The results obtained from geological survey and numerical simulations were compared. The applicability of DDA to seismic problems was also examined and discussed.