

不連続変形法によるすべり面 せん断抵抗角減少を考慮した地すべりの解析

ANALYSIS OF HUGE LANDSLIDE CAUSED BY EARTHQUAKE
CONSIDERING DECREASE OF SHEAR RESISTANCE
BY USING DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS

入江 敬¹・小山 倫史¹・西山 哲¹・安田 祐樹¹・大西 有三²

Kei IRIE, Tomofumi Koyama, Satoshi NISHIYAMA, Yuki YASUDA and Yuzo OHNISHI

¹ 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

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

² 京都大学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Key Words: huge landslide, seismic analysis, DDA

1. はじめに

国土のおよそ七割が山地・丘陵地である日本は、四つのプレートが衝突する世界有数の地殻変動帯に位置しており、地震に起因する斜面災害が頻繁に発生する。中でも地すべりは規模が大きいため、発生時には他の斜面災害に比べて大規模な被害が発生する。地すべり発生時の周辺地域の被害を予測し、その地域の安全性を評価することは、避災の観点だけでなく、発電所等の重要構造物の建設場所の選定のような国土計画上も非常に重要であるといえる。

一般に斜面をなす岩盤は、数多くの断層、割れ目、亀裂を有した不連続体である。従って、岩盤の挙動を正確に把握するためには、これらの不連続面の影響を考慮する必要がある。従来から斜面の安全性評価手法として使われている有限要素法等の連続体解析手法では、不連続面が挙動を大きく支配するような岩盤の安全性を評価することは不可能である。そのような不連続性岩盤の挙動を解析する手法として、1985年に Shi と Goodman によって不連続変形法 (DDA: Discontinuous Deformation Analysis) が提案された¹⁾。不連続変形法は不連続体解析手法の一つであり、これまでにトンネル

の安定性解析等の静的問題のみならず、落石解析や地震応答解析のような動的問題にも適用され、幅広い汎用性が認められている^{2,3,4)}。そこで、本研究では、不連続体解析手法による斜面災害の被害予測に貢献すべく、不連続変形法を地震起因の地すべりに適用した。具体的には、2008年に岩手・宮城内陸地震に起因して発生した荒砥沢における地すべりを対象にして、不連続変形法を用いて解析を行い、地震発生時の地下水を有する地盤の強度低下に関する検討を行った。

2. 不連続変形法の一般理論

不連続変形法は解析対象をブロックの集合体として表現し、各ブロック重心で定義された剛体変位、剛体回転及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)に示す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。

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

ただし、 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、 u はブロック重心におけ

る変位, \dot{u} は速度, \ddot{u} は加速度である.

さらに, 式 (1) はニューマークの β, γ 法によって時間に関して離散化され, 式 (2) になる.

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

ただし, 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 及び ΔF はそれぞれの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.

3. 荒砥沢における地すべりの概要

(1) 地すべりの特徴

本研究で解析対象とする地すべりは 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発生した. 発生規模は全長約 1,500m, 幅約 900m, 最大落差 150m, 総移動土砂量 7,000 万 m^3 と非常に大規模である. また, 砂岩・シルト岩互層に形成されたすべり面傾斜角は平均して 2° 程度と, 非常に緩勾配であることが特徴である^{5,6)}. 地すべりの全景を図-1 に, ボーリング等による調査範囲を図-2 に, 地すべり発生前後の D 測線における地形の変化を図-3 に示す.

(2) 地すべりの発生原因及び過程

荒砥沢の地質学的・地理的な特徴から, 地すべり発生の素因は以下のようなものが挙げられている⁵⁾.

1. 軟質な軽石凝灰岩の上位に硬質な熔結凝灰岩が堆積するキャップロック構造
2. 斜交した流れ盤を形成する砂岩・シルト岩互層
3. ダム湖に隣接しており, 地下水位が高かった
4. 旧滑落崖から下部にかけて, すべり面が存在

本地すべりはこれらの素因に加え, 最大 1000gal を超える強い地震動が引き金となって発生したものと推測される⁵⁾. 実際, 地すべり地形上流部の熔結凝灰岩層と軽石凝灰岩層の層界付近には湧水が見られ, 地下水の存在を裏付けていると言える.

さらに, 地質学的な特徴や地震発生前後の地形変化(図-3 参照) 及び 3 次元 RBSM による安全率の計算⁶⁾ から, 地すべりの発生過程は次のようであると推測できる.

1. 地震動による繰り返しせん断力の付与

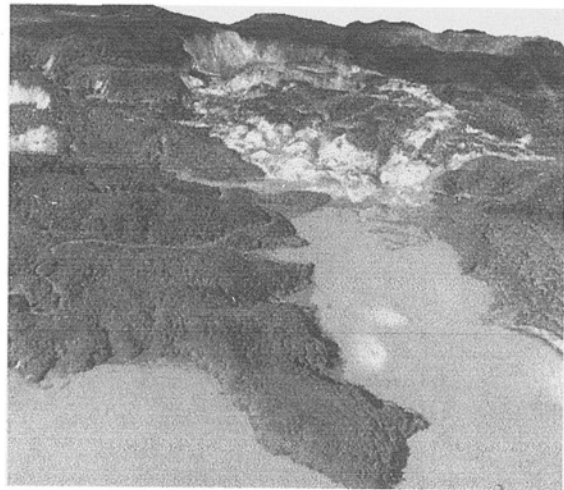


図-1 荒砥沢における地すべりの全景^{5,6,7)}

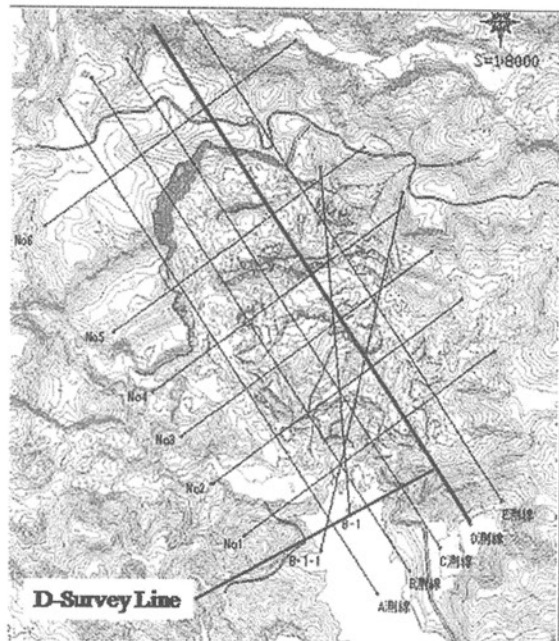


図-2 調査範囲^{5,6,7)}

2. せん断変位に伴う間隙水圧の上昇
3. 砂岩・シルト岩層における弱線部の破壊
4. リッジより下方の岩体がすべり面に沿って移動
5. 4. に伴い, 上方の岩体が下側に傾動しながらすべり, 新たな滑落崖を形成する.

4. 不連続変形法による解析

(1) 数値解析モデルの構築

地すべりの主たる運動方向は S35E 方向であること⁶⁾ と, 地すべり発生前後の地形の変化から, 地すべりの運動方向に沿った測線と垂直な方向からの土砂の流出

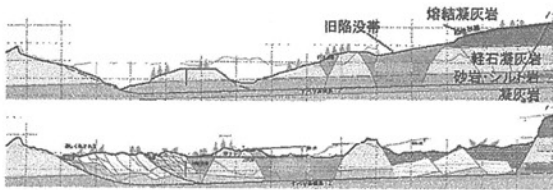


図-3 D 測線での地震発生前後の地形変化^{5,7)}



図-4 D 測線における数値解析モデル

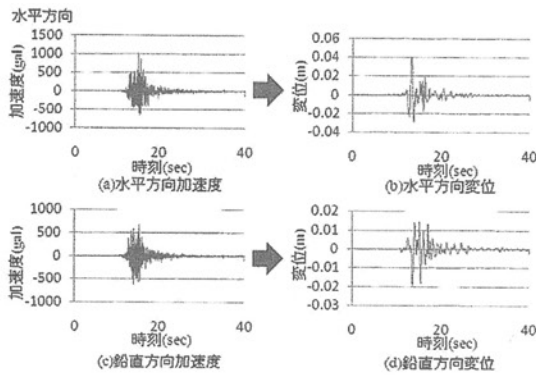


図-5 地震波 (a) 水平方向の加速度, (b) 水平方向の変位, (c) 鉛直方向の加速度, (d) 鉛直方向の変位

入が最も少ないと考えられる、図-2 中の D 測線において 2 次元の数値解析モデルを作成した。岩体内の亀裂が少なく、地すべり時に大きな塊で動いたと思われる上流部分は大きなブロックで、下流部分の擾乱・圧縮された部分及び旧陥没帯は小さなブロックを用いて図-4 に示すようにモデル化した。図中の線は不連続面を表し、線で隔られた (色の異なる) ブロックはそれぞれ独立している。解析に用いた各岩盤とすべり面の物性値を表-1 に、不連続変形法の解析パラメータを表-2 に示す。各物性値は室内実験によって計測されたものであり、ブロック貫入時のペナルティ係数は既往の研究^{9,10)}に基づき、720,000(kN/m)とした。また、地震波データに関しては、計測された加速度データ⁷⁾を 2 階積分することによって変位に変換し (図-5)、強制変位として図-4 中の土台ブロックの丸で示した箇所に入力した。

(2) 不連続変形法によるパラメータスタディ

すべり面でのせん断抵抗力は、繰り返し一面せん断試験により、10° (表-1 参照) と計測されたが、これは静止かつ乾燥状態での計測結果である。前節でも述べた

表-1 各岩盤及びすべり面の物性値⁸⁾

種類	種類	値
熔結凝灰岩	単位体積重量 (kN/m ³)	19.0
	ヤング率 (MPa)	1,000
	ポアソン比	0.35
軽石凝灰岩	単位体積重量 (kN/m ³)	16.5
	ヤング率 (MPa)	80
	ポアソン比	0.40
砂岩・シルト岩	単位体積重量 (kN/m ³)	17.5
	ヤング率 (MPa)	700
	ポアソン比	0.35
凝灰岩	単位体積重量 (kN/m ³)	22.5
	ヤング率 (MPa)	2,000
	ポアソン比	0.30
旧陥没帯	単位体積重量 (kN/m ³)	17.0
	ヤング率 (MPa)	80
	ポアソン比	0.40
すべり面	摩擦角 (degree)	10
	粘着力 (kPa)	0
	引張強度 (kPa)	0

表-2 不連続変形法のパラメータ

パラメータ	値
時間刻み (sec)	0.0005
最大許容変位比	0.001
垂直方向ペナルティ係数 (kN/m)	720,000
せん断方向ペナルティ係数 (kN/m)	720,000
速度エネルギー比	1

ように、本地すべりは地下水の影響が大きいと考えられ、その影響を考慮する必要がある。しかしながら、現在のところ、不連続変形法は間隙水との連成はなされておらず、地下水の影響を直接的に考慮することは難しい。そこで、本研究では、間隙水による影響をすべり面のせん断強度を下げることで表現した、即ち、すべり面のせん断抵抗力を減少させた。しかしながら、地下水の影響によって、どの程度せん断抵抗力が減少するかということは現在のところ研究されていない。そこで、本節ではすべり面のせん断抵抗力に関するパラメータスタディを行い、地下水がせん断抵抗力に及ぼす影響の評価を行った。

解析パターンとしては、地震動のみを再現したもの (せん断抵抗力を低減しないもの) の他、すべり面のせん断抵抗力を解析開始 15 秒後にそれぞれ、5°, 4°, 3°, 2°, 1° に低減したものの解析を行った。解析開始 15 秒

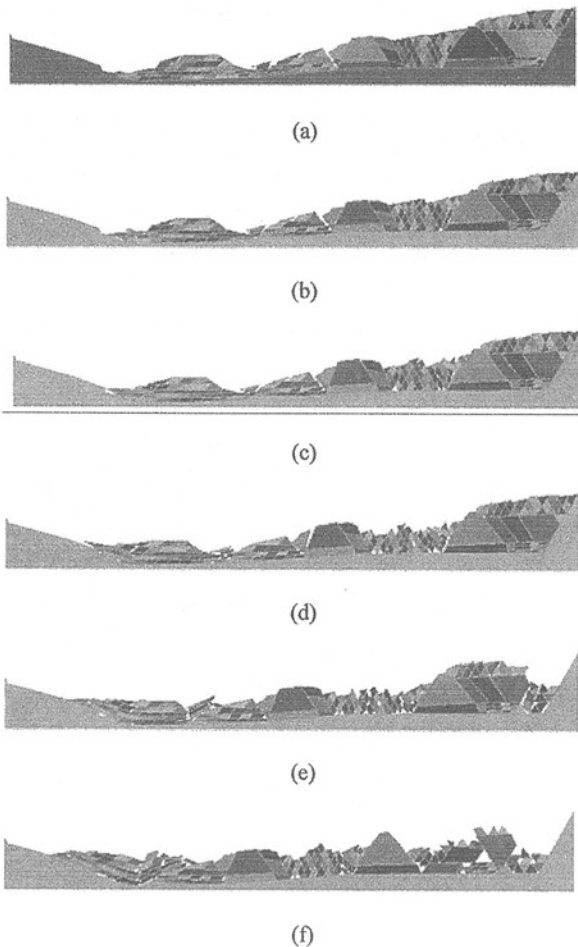


図-6 パラメータスタディの解析結果

後にせん断抵抗角を変化させたのは、地震波が解析開始15秒後に最大となるためである。以上の解析結果（解析開始後120秒後の結果）をそれぞれ図-6に示す。尚、図-6中の(a)～(f)はそれぞれ、地震波のみを再現したものと、低減後のせん断抵抗角が5°、4°、3°、2°、1°であるものの解析結果を示している。

これらの結果から、低減後の摩擦角が3°以上である場合は、滑動距離に大きな変化は見られないことがわかる。しかし、低減後の摩擦角が2°以下になると、滑動距離に大きな変化が見られるようになる。本地すべりのすべり面傾斜角は平均2°である⁵⁾ことと定性的に一致しており、妥当な解析結果であると言える。言い換えれば、せん断抵抗角がすべり面の傾斜角よりも小さい値になったとき、地すべりの滑動距離は大きく変化する可能性があることが分かった。

5. 結論と今後の課題

本研究では、数値解析手法による斜面災害の予測に寄与すべく、2008年の岩手・宮城内陸地震に起因して

発生した荒砥沢における地すべりを対象にして、不連続変形法による解析を試みた。本地すべりは荒砥沢ダムの上流で発生しており、その発生には地下水が強く影響していたと考えられるが、現在のところ、不連続変形法では地盤内の水の挙動を直接的に解析することは難しい。そこで、地下水が存在する地盤内では、地震発生時に過剰間隙水圧が発生し、すべり面でのせん断強度を低下させる、即ちすべり面でのせん断抵抗角を減少させると考えた。しかしながら、現在のところ、地震発生時にすべり面のせん断抵抗角換算でどの程度地盤の強度が減少するのかという知見はない。そこで、本研究では、地震に起因する地すべり発生時には、せん断抵抗角換算でどの程度地盤強度が低減するのかという評価を行うために、不連続変形法を用いてせん断抵抗角に関するパラメータスタディを行った。

その結果、地すべりの滑動距離はせん断抵抗角の減少とともに線形的に増大していくのではなく、ある閾値の前後で大きく変化することが分かった。本研究の対象とした荒砥沢地すべりの場合、せん断抵抗角2°が閾値となっており、これはすべり面傾斜角の平均値と一致している。従って、一般的に地震発生時のせん断抵抗角の値がすべり面傾斜角の値よりも小さくなったときに地すべりの滑動距離が大きくなり、それに伴って地すべりによる被害が大きくなる可能性があることが分かった。

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

1. 地すべりの滑動距離はせん断抵抗角の減少とともに、線形的に増大するのではない。
2. 滑動距離はある閾値の前後で大きく変化する。
3. 2.の閾値はすべり面傾斜角と一致している。

今後は、地盤内の水がどの程度すべり面のせん断強度を低下させるのかということを中心に検討するために、室内での降雨・地すべり実験の解析を行う予定である。

謝辞：本論文の執筆にあたり、多くの方の助力を頂きました。特に、株式会社アドバンテクノロジーの濱崎英作様、ならびに大野亮様をはじめとする国土防災株式会社の皆様からは、荒砥沢地すべりの発生機構や物性値について助言を頂きました。深く感謝申し上げます。また、サンコーコンサルタント株式会社の佐々木猛様と基礎地盤コンサルタント株式会社三木茂様からは不連続変形法全般についてアドバイスを頂きました。感謝の意を表します。

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) 大西有三・山向薫・佐々木猛：不連続変形法 (DDA) によるトンネルを含む岩盤斜面モデルの解析，土木学会年次学術講演概要集第 3 部 Vol.47, 1992
 - 3) Shimauchi, T., Nakamura, K., Sakai, N., Hagiwara, I., Ohnishi, Y. and Nishiyama, S.: Studies on the property of impact velocity ratio and application to the rockfall simulation by DDAball, Proceedings of International Mini-Symposium for Numerical Analyses, 2008
 - 4) Sasaki, T., Hagiwara, K. and Horikawa, S.: Earthquake response analysis of a rock-fall by discontinuous deformation analysis, Proceedings of 7th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, 2005
 - 5) 大野亮一・山科真一・山崎孝成・小山倫史・江坂文寿・笠井史宏：地震時大規模地すべりの発生機構—荒砥沢地すべりを例として—，日本地すべり学会誌，第 47 巻，第 2 号
 - 6) 濱崎英作・山科真一・大野亮一・江坂文寿・山崎孝成：荒砥沢地すべりの発生機構に関する研究—RBSM3D 解析結果から—，第 48 回日本地すべり学会研究発表会講演集，2009
 - 7) Irie, K., Koyama, T., Hamasaki, E., Nishiyama, S., Shimaoka, K. and Ohnishi, Y.: DDA simulations for huge landslides in Aratozawa Area, Miyagi, Japan caused by Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, Proceedings of The 9th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, 2009
 - 8) 長谷川陽一・笠井史宏・柴崎達也・山崎孝成：荒砥沢地すべりのすべり面および地質ごとの土質・岩石特性，第 48 回日本地すべり学会研究発表会講演集，2009
 - 9) Akao, S., Ohnishi, Y., Nishiyama, S. and Nishimura, T.: Comprehending DDA for a block behavior under dynamic condition, Proceedings of The 8th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, 2007
 - 10) Shimaoka, K., Koyama, T., Nishiyama, S. and Ohnishi, Y.: Earthquake response analysis of rock slopes by Discontinuous Deformation Analysis (DDA), Proceedings of International Mini-Symposium for Numerical Analyses, 2008

(2010.5.14 受付)

