

65. 不連続変形法による岩盤斜面の崩壊挙動解析

Collapse Analysis of Rock Slope, Using DDA Method

○萩原育夫, 佐々木猛, 佐々木勝司, 堀川滋雄 (サココンサルタント(株))

西山 哲, 大西有三 (京都大学大学院工学研究科)

Ikuko Hagiwara, Takeshi Sasaki, Katsuji Sasaki, Shigeo Horikawa,
Satoshi Nishiyama, Yuzo Ohnishi

1.はじめに

岩盤斜面崩壊の防災対策を講ずる上で、崩壊時の挙動特性を把握することが重要な検討項目の一つとなっている。岩盤斜面の変形解析では地震時や豪雨時の安定性評価に加え、2004年新潟県中越地震で問題となった崩壊土砂による河道閉塞等のように、崩落岩塊の到達距離等の影響把握も重要な予測事項である。

筆者らは不連続性岩盤斜面の崩壊を対象として、岩塊の崩落エネルギーの減衰や地震動条件のモデル化並びに不連続変形法(DDA)による挙動解析について検討してきた²⁾³⁾⁴⁾。本報告では、これまで検討したモデル・解析手法について、実際に発生した崩壊現象を対象とした事例解析を行い、モデル並びに解析手法の適用性について検討した結果を報告する。

2.解析方法の概要

不連続変形法(DDA)は解析対象をブロックの集合体で表し、ブロック内部の弾性変形並びにブロック重心変位についてエネルギー最小化原理によって運動を定式化したものであり、運動方程式は最終的に式(1)のようになる⁵⁾。

$$M \ddot{u}^{t+\Delta t} + C \dot{u}^{t+\Delta t} + K u^{t+\Delta t} = R^{t+\Delta t} \quad (1)$$

ここに、 M : 質量マトリックス, C : 粘性マトリックス, K : 剛性マトリックス, R : 外力マトリックス, \ddot{u} : 重心加速度, \dot{u} : 重心速度, u : 重心変位, t : 任意時刻, Δt : 時間刻みである。ブロック間の接触に関しては、ブロック間の空間的な制約違反に応じた抗力を式(1)中の外力として加えることで(ペナルティバネ)、ブロック間の接触・反発をモデル化している。解析コードとしては、不連続性岩盤研究会開発の解析コード⁶⁾に、地震時の外力条件(加速度時系列データ)の入力機能等を付加した解析コードを使用した。以下に、崩壊挙動解析と関連した解析手法の特徴を示す。

(1)接触時エネルギー減衰比の導入

崩落岩塊の落下エネルギーは、岩塊と斜面との接触時の破碎等によって低減され、既存の落石実験では反発係数としてこれらのエネルギー減衰の程度や特性が報告されている。岩塊と斜面との接触過程は複雑で、個々の過程をモデル化することは困難であり、(2)式に示すエネルギー減衰比を導入して落石実験等で報告されている反発係数を解析に反映させている。

$$\gamma = V_{out}^2 / V_{in}^2 \quad (2)$$

ここに、 γ : 接触時エネルギー減衰比, V_{out} : 接触後速度, V_{in} : 接触前速度である。

(2)粘性抵抗の導入

自然斜面においては、崩落岩塊と斜面との接触に加えて、立木との接触によっても落下エネルギーが低下する。このような植生などによる崩落エネルギーの減衰をモデル化するものとして、(3)式に示す粘性係数を導入している。

$$C = \eta M \quad (3)$$

ここに、 η : 粘性係数である。

(3)地震動条件

式(1)の運動方程式は、ニューマークの β , γ 法を用いて増分変位に関する連立方程式に変換され、これらを各時間刻みで解くことによってブロックの運動が求まる。地震動条件に関しては、地震計によって得られた加速度記録を(1)式右辺の外力項に与えて解析に反映させている。

3.崩壊解析

3.1 落石事例

(1)崩壊データ

植林斜面で降雨に伴って発生した落石を対象として事例解析を実施した(図-1参照)。落石は1.20m×0.95m×0.80m程度の岩塊(転石)の抜け落ちによるもので、比高=約60m, 平均傾斜=約38度の斜面中を、立木(胸高径=15~25cmの杉)に接触しながら落下し、斜面末端部の家屋に衝突して停止したものである。落石の経路は、立木の擦痕(10箇所)や地表の窪み(12箇所)によって追跡された。立木の擦痕は地表から1~2m程度の高さであり、地表の窪みは深さ20~30cm程度であった。落石経路上における落石と立木との接触回数は1回/10m程度(平均)である。

落石は硬質な花崗岩の岩塊で、落下経路沿いの斜面は軟質な表層土砂で覆われ岩盤の露出は認められなかった。斜面上の植生は杉の植林(間隔=1.8m程度、一部間伐)の他、草本類や幹径=φ1~2cmの雑木が疎らに認められる程度であった。

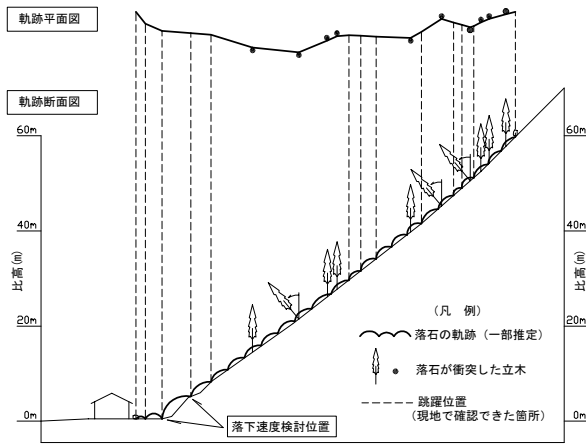


図-1 落石事例 (軌跡図)

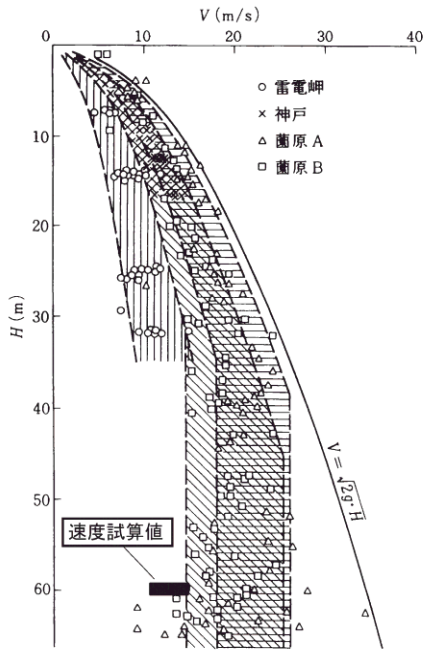


図-2 斜面末端部の落石速度(推定)
既存資料⁷⁾に加筆

斜面末端部での跳躍位置 (地表の窪み) と跳躍量 (0.5~1.5m, 想定値) から, 質点に関する運動方程式を用いて落石の運動方向・速度並びに運動エネルギーを試算した結果を図-2 に示す. 着地点での試算結果は速度=10.9~15.4m/s, 運動エネルギー=140~280kN・m となり, 既存落石実験データ⁷⁾の下限程度以下となった. また試算結果は, 落石対策便覧⁷⁾で示されている等価摩擦係数による落石速度推定値=25m/s (等価摩擦係数=0.35, 比高=60m) の 1/2 程度となった. 既存の落石実験や落石便覧評価式は, いずれも立木の無い斜面の落石データをもとにしており, 本事例においては, 落石と立木の接触によって落石の落下エネルギーが低減されたものと捉えることができる⁸⁾.

(2) 解析

解析モデルを解析結果例とともに図-3 に示す. 形状

表-1 落石事例の解析パラメータ

設定項目	落石	斜面表層
ブロック表面の内部摩擦角	度	35
ブロック表面の粘着力	kN/m ²	0
ブロックの単位体積重量	kN/m ³	18
崩壊ブロックのヤング率	kN/m ²	2,000
崩壊ブロックのポアソン比		0.50
粘性係数	0.00~0.20で変化	
接触時エネルギー減衰比	0.12	

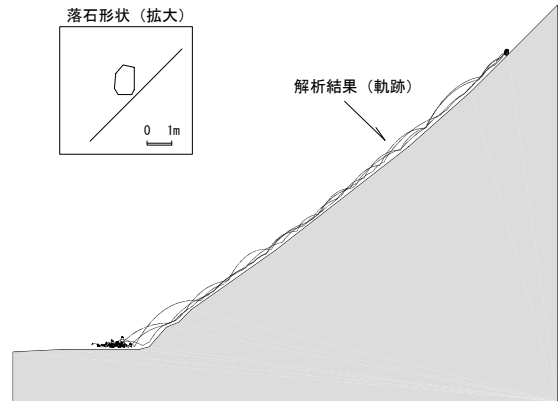


図-3 落石事例の解析モデルおよび解析結果

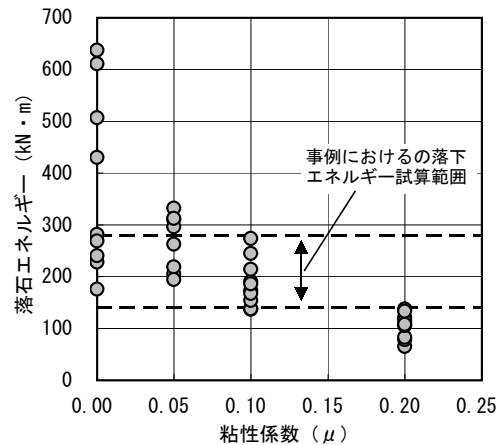


図-4 粘性係数と落下エネルギー

モデルは落石と斜面の2ブロックとし, 各物性値は現地状況及び既存資料⁹⁾をもとに設定した. 立木との接触による落下エネルギーの低減は粘性抵抗によって考慮するものとし, 粘性係数を 0.00~0.20 で変化させて解析した. さらに落石の姿勢の解析結果への影響を考慮して, 初期状態の姿勢を変化 (36度ずつ回転) させて解析を行った (1つの粘性係数に対して 10 ケース). 解析結果の落石エネルギーと現地状況からの試算値との比較を図-4 に示す. 解析では粘性係数を 0.10 程度とすることにより, 落石事例で想定した落石エネルギーと同程度の解析結果を得ることができた.

(3)解析結果の評価

樹木等をブロックモデルとして落石の衝突を直接的に解析することも数値解析としては可能であるが, これには詳細なモデル検討が必要であり, 複雑で多様性に富む自然斜面の落石問題への適用には困難を要する. 上記事例解析から, 立木との衝突による落石エネルギーの低減を粘性抵抗によって評価できることが確認され, 植生斜面中の落石挙動予測への本手法の適用が期待できる. なお, 事例解析と植生状況や地質状況が同様で, 地形断面形状の異なる斜面での解析結果を図-5 に示す. 当該箇所では過去の落石とみられる転石が比高=40m から斜面下方側約 50m の範囲内に認められており, 粘性係数=0.10 のとした解析結果(落石の停止位置)は現地での転石の分布状況に概ね一致する結果が得られている.

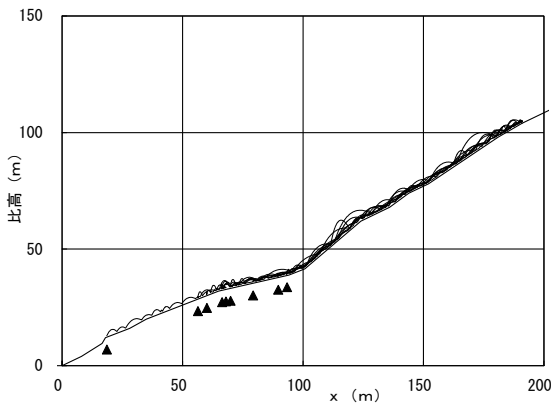


図-5 類似斜面における解析結果 (▲: 停止位置)

3.2 岩盤すべり

(1)崩壊データ

2004 年新潟県中越地震における斜面崩壊箇所について事例解析を実施した. 当該箇所は本震の震源から約 8km の位置にあり, 周辺には軟岩相当の新第三紀堆積岩類が 25 度程度の傾斜 (当該斜面では流れ盤構造) で分布する. 現地状況をもとに推定した検討箇所の想定断面図を図-6 に示す. 崩壊土塊は数 m~10m 規模の岩塊と岩屑等からなり, 崩壊土塊の中央からやや前方 (移動方向側) は凸状の形状を呈し, 崩壊前斜面末端(想定)から 100~150m 程度の位置まで到達した. 検討箇所周辺では流れ盤構造をなす斜面でのすべり崩壊が報告されており¹⁾, 当該箇所においても同様の崩壊形態が想定された.

図-7 及び表-2 に解析モデルを示す. 想定すべり面から上位の移動土塊については, 現地状況をもとに 5m 程度の規模のブロックの集合体とし, 不動地盤は単一ブロックとしてモデル化した. 地盤物性については, 既存資料¹⁰⁾を参考にして類似地質の一般値を設定し, 地震動条件としては気象庁が公開している近傍

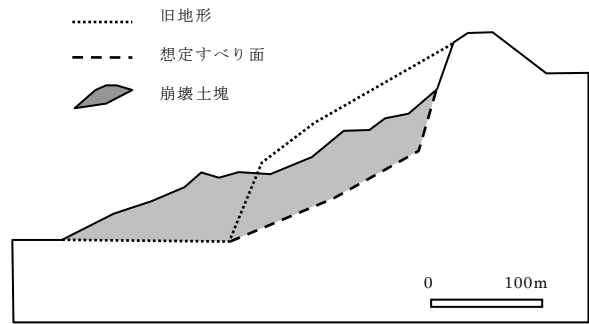


図-6 岩盤すべり事例の想定断面図

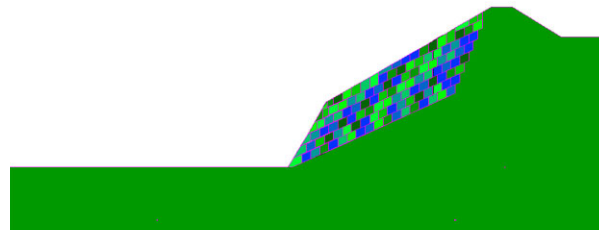


図-7 岩盤すべり事例の解析モデル形状

丘陵部での加速度波形記録¹¹⁾を不動地盤に外力条件として入力した. 解析では, 崩落ブロックの接触時のエネルギー減衰に着目し, 接触時エネルギー減衰比を変化させて崩壊挙動を解析した.

(2)解析結果

解析の結果, 接触時エネルギー減衰比が 0.95(岩盤 vs 岩盤)・0.40(岩盤 vs 未固結堆積物)の条件において, 崩壊土塊の到達位置が現地状況に概ね合致した. 上記の条件における解析結果を図-3 に示し, 解析結果における崩壊特性を以下に示す.

- a)地震動とともに想定すべり面上の土塊全体の変形が始まる.
- b)初期段階では, 全体の滑動に加えて斜面先端部におけるすべり~崩落状のブロック変形が卓越する.
- c)初期~中間段階では, 滑落崖付近においてすべり状の変形よりも崩落~バックリング状のブロック変形が卓越する.
- d)中間段階では, 上位のブロックほどすべり変形が相対的に進展する. これに伴って崩壊土塊中の小規模凹地形の形成や岩盤ブロックの重畳的な崩積が進む.
- e)終期段階では, 崩壊土塊先端付近のブロック崩落が継続しながら全体の変形が収束し, 崩落ブロックが中央付近で集積する. (崩壊土塊先端位置の見掛け移動速度は, 解析時間=30 秒までで 10~20km/h 程度, 30 秒以降では数 km/h 程度以下.)

崩壊土塊最上部の土塊形状等には現地状況と若干の差違が認められるが, 上記の a)~e)の解析結果は

表-2 岩盤すべり事例の解析パラメータ

設定項目	新第三紀堆積岩類 (斜面構成岩盤)	未固結堆積物 (平坦地構成地盤)
ブロック表面の 内部摩擦角 度	30	30
ブロック表面の 粘着力 kN/m ²	20	0
崩壊ブロックの 単体積重量 kN/m ³	20	—
崩壊ブロックの ヤング率 kN/m ²	3,000,000	—
崩壊ブロックの ポアソン比	0.35	—
粘性係数	0.05	
接触時エネルギー減衰比	岩盤vs岩盤 : 0.6~1.0 岩盤vs未固結堆積物 : 0.2~0.6	
地震動条件	気象庁による水平加速度記録(30sec) 最大振幅=576gal	

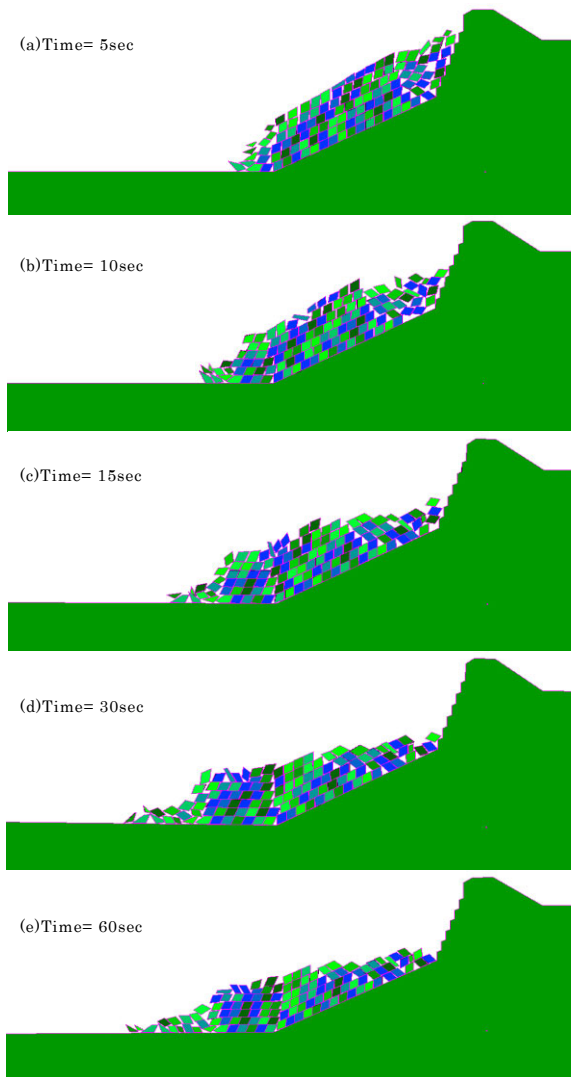


図-8 岩盤すべり事例の解析結果例

崩壊土塊の特徴(立木を伴う残丘状ブロック, 樹幹の山側への転倒等)に対応しており, 解析によって当該箇所の崩壊特性の概略を再現できたものと捉えられる。

(3) 解析結果の評価

大規模岩盤崩壊では, 岩盤ブロックの形成(断裂)・

衝突・破砕など, 様々な形態の変形が複雑に組み合わさって崩壊が進展するものと想定される。これに対し今回の解析は, 平面型すべり崩壊に関して移動土塊を平均的な規模のブロックの集合体としてモデル化して崩壊挙動を解析したものと位置づけられる。事例解析結果から, 崩壊土塊の形状を単純化したモデルによって崩壊挙動を再現できることが確認され, 崩壊土塊の到達範囲予測等における本手法の適用が期待できる。岩盤ブロックの接触時の挙動特性(反発係数等)に関しては, 既存落石実験等によるデータが利用可能となっており, このような点が本手法の適用上のメリットとして上げられる。

4. まとめ

本検討では, 落石崩壊と平面すべり型崩壊の事例を対象として, 不連続変形法(DDA)による崩壊挙動解析を実施し, 解析結果から崩落岩塊の到達位置予測等における同手法の適用性を確認した。不連続変形法(DDA)による崩壊挙動解析では, ブロックの形状が解析結果に大きく影響することから, 適切な形状モデルを構築することが重要と考えられる。また, 現段階では岩盤崩壊(ブロック集合体による解析モデル)に関するデータが限られており, 崩壊事例データの収集等を行って, 解析精度の向上等を図ることが今後の課題としてあげられる。

(参考文献)

- 1) 地盤工学会・土木学会合同調査団：平成 16 年新潟県中越地震第一次調査団調査速報(Ver.1), 土木学会, 2005
- 2) 萩原育夫他：DDA による落石解析事例, 日本応用地質学会平成 12 年度研究発表会講演論文集, p.253-256, 2000
- 3) 佐々木勝司他：不連続変形法を用いた落石シミュレーションの基礎的研究, 日本応用地質学会平成 14 年度研究発表会講演論文集, p.371-374, 2002
- 4) 佐々木猛他：不連続変形法(DDA)による落石問題の検討, 計算工学講演会論文集, Vol.7, p.423-426, 2002
- 5) G.H.Shi, R.E.Goodman : Two Dimensional Discontinuous Deformation Analysis , Int. J. Anal. Methods Geomech., Vol.9, pp.541-556, 1985
- 6) 不連続性岩盤研究会：DDA version6.02 ユーザーズマニュアル, 2002
- 7) 日本道路協会：落石対策便覧, 丸善, 2000
- 8) 右城猛他：高知県における落石災害と落石の運動特性, 土木学会論文集, Vol.37, No.581, pp.39-48, 1997
- 9) 日本道路公団：設計要領第一集, 道路厚生会, 2000
- 10) 土木学会：軟岩評価—調査・設計・施工への適用—, 土木学会, 1992
- 11) 気象庁ホームページ
(http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/index.html)