

67. DDAによる落石解析事例

A case study of falling rock analysis, using the DDA method.

○萩原 育夫, 吉田 淳 (サンコーコンサルタント株式会社)
寺尾 友宏 (建設省 長野国道工事事務所)
大西 有三 (京都大学)

Ikuo Hagiwara, Jun Yoshida, Tomohiro Terao, Yuzo Ohnishi

1. はじめに

最近の斜面災害事故等を経て, 岩盤斜面の安定に関する社会的な関心が高まり, 防災点検等による危険箇所抽出や斜面災害防止策の検討が進められている。岩盤斜面の崩壊形態は, 落石等の崩落, 滑り崩壊やトップリング等に一般に区分され, これらのうち落石(崩落)は, 最も普通に認められる崩壊現象の一つである。

落石の安定性評価には, 実験データ等に基づいた経験的な判定方法¹⁾が一般に用いられるが, 斜面形状が概ね一様な箇所に適用範囲が限られている。また, 施工条件等が制限される斜面では詳細な設計条件の抽出が必要となるが, 経験的な手法によって落石経路や運動エネルギー等の詳細を絞り込むには限界がある。このような箇所の防災対策の検討に対して, 最近では数値解析が適用されている。

落石現象のような大変形問題を扱う数値解析手法として, DEM (Distinct Element Method; 個別要素法) や DDA (Discontinuous Deformation Analysis; 不連続変形法) が知られているが, 解析に当たっては, 如何に適切な解析モデル・データを作成するかが課題となっている。本報告では, 落石解析に DDA を適用した事例を示すとともに, 解析モデル・データの構築方法等について検討した結果について報告する。

2. 解析手法概要

DDA は Shi and Goodman^{2) 3)} によって開発された, 弾性体多角形ブロックの相互運動を動的(準静的)に解析する手法である。DDA におけるブロック運動系は, 基本的には

$$[K_i][D_i] = [F_i]$$

$[K_i]$: 係数マトリックス

$[D_i]$: 変形マトリックス

$[F_i]$: 外力マトリックス

の釣り合いの式によって表現され, タイムステップ毎のブロックの接触・変形状態等から, 係数マトリックス及び外力マトリックスを組立て, 時々刻々のブロックの変形(変位・変形・歪み)を求めるものである。ブロックの接触(貫入)問題には剛体バネの概念が導入されており, 剛体バネに関するひずみエネルギー最小化原理を用いて釣り合い式が解かれる。

DDA の工学的な適用性に関しては, 不連続性岩盤の変形解析や落石解析等に対して有効性が示されるとともに, 解析機能の追加等が提案されている^{4) 5)}。本報告では, Shi が開発した 2 次元解析コード(Unix 版, 1995 年)に, 速度減衰に関する改良を加えた解析コード⁶⁾を使用した。

3. 解析対象斜面の概要

解析対象となった斜面は防災点検によって対策工の検討が必要と判定された箇所で, ボーリング等による地質調査を実施して崩壊形態・規模等を想定した後, 安定性の評価及び対策工の検討を行った。

(1) 地形地質概要

当該斜面は, 比高=40~50m, 傾斜=70°程度の岩盤斜面を主体とし, 斜面下部には傾斜=20°程度の崖錐斜面が分布し, 斜面末端部には斜面と平行に道路が伸びている。

岩盤は新第三紀の硬質な流紋岩質凝灰岩からなり, 数 10cm~2m 程度の間隔で割れ目が発達しブロック化している。崖錐斜面は未固結の礫質土から構成され, 概ね植生に覆われる。

(2) 地質調査結果の概要

表-3.1 に実施した地質調査の概要を示す。岩盤の性状, 割れ目の卓越方向や緩み範囲等を把握することを目的として, ボーリングとともにボアホールTVや真空透気試験を実施した。また, 斜面表層の岩盤状況, 割れ目状況や不安定ブロックの有無等を把握すること目的として岩壁登攀調査を実施した。

表-3.1 地質調査の概要

地質調査	内容・目的
ボーリング	地質・岩盤状況の確認 (斜面前面: 水平孔, 斜面上部: 鉛直孔)
ボアホールTV	割れ目分布・方向の把握
真空透気試験	透過特性(緩み域)の把握
岩壁登攀調査	斜面表層の岩盤状態・割れ目状態の把握
室内岩石試験	基本的な物理・力学特性の把握

調査結果から想定された崩壊形態・規模を表-3.2に示す。落石の安定性評価に関しては、崖錐斜面で斜面の形状が大きく変化し、経験的な評価方法の適用が困難と考えられたことから、数値解析(DDA)によって落石の経路や速度を把握し道路への影響を評価するものとした。なお、平面すべり型崩壊に関しては、極限平衡式による安定解析を別途実施して評価するものとした。

表-3.2 崩壊形態・規模の想定

小規模	φ10~30cm程度の落石(崩落)
中規模	φ1.5~2m程度の落石(崩落) 上部斜面のオーバハング部
大規模	緩傾斜の流れ盤割れ目を滑り面とした 平面すべり

4. DDAによる落石解析

(1) 解析フロー

数値解析のモデルやデータの検討においては、過去に発生した崩壊事例等が有効な検証資料となり得る。これに対し今回の対象斜面では、転石の発生箇所や落下経路等の特定が困難であったことから、予備的な解析を通して、解析上の落石挙動傾向や各種データ項目の解析結果に対する影響等を把握し、解析データや解析手順を検討する際の基礎資料とした。また、現況斜面モデルと対策工を考慮したモデルによる2種類の解析を行い、これらの解析結果から対策工の効果や設計条件について検討した。

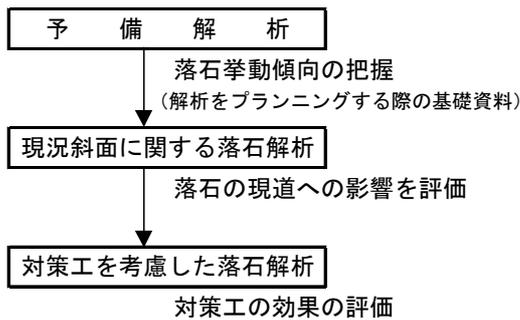


図-4.1 解析フロー

(2) 予備解析

解析対象斜面では、傾斜が大きく変化する崖錐斜面での落石の挙動が重要なポイントと考えられたことから、予備解析のモデルは、落石と崖錐斜面を想定したモデルとした(図-4.2参照)。また解析データのうち、落石の姿勢(崖錐斜面の傾斜)と表-4.1に示す各物性データを解析パラメータとして扱い、これらに対応した解析結果の変動を捉えるものとした。

表-4.1 予備解析 検証データ項目(数値項目)

データ項目	設定した範囲
ヤング率(崖錐) [kN/m ²]	1,000~10,000
"(落石) [kN/m ²]	1,000,000~10,000,000
剛体パネ定数 [kN/m]	1,000,000~5,000,000

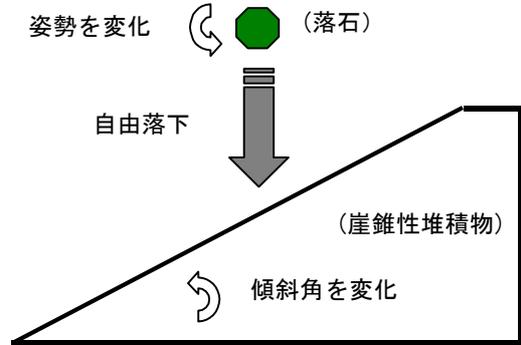


図-4.2 予備解析モデル概念図

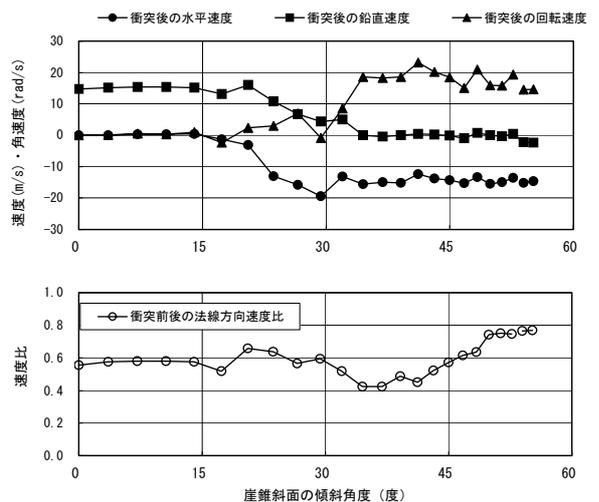


図-4.3 予備解析結果例

表-4.2 データ項目の解析結果に与える影響

データ項目	衝突前後の法線方向速度比 変動巾
ヤング率 剛体パネ定数	0.1程度
落石・斜面の姿勢	0.4程度

予備解析結果例を図-4.3に、また各パラメータの解析結果に与える影響の程度を表-4.2に示す。予備解析結果から、衝突時の落石の姿勢によって落石の回転の程度と反発の仕方が変化することが確認された。また、衝突前後の速度比(斜面法線方向)に示されるように、ヤング率等の物性データよりも衝突時の落石の姿勢が解析結果を大きく左右することが確認された。

(3) 現況斜面に関する落石解析

予備解析の結果, 落石及び斜面形状が解析上重要であることが確認された。これに対し当該斜面では, 斜面が急峻で調査資料が限られ, 落石等の詳細な形状モデルを設定(特定)することが困難であったことから, 落石の姿勢を解析パラメータとして扱い, 複数の解析結果を集計して落石の挙動を評価するものとした。具体的には, 落石及び斜面の形状モデルは現地調査結果をもとにある程度単純化して作成し, 全体に影響の無い範囲で落石に射出速度を与えて落下経路・姿勢を変化させるものとした。また, ヤング率等の物性データに関しては, 室内岩石試験結果と予備解析結果をもとに, 落石の姿勢によって変化する衝突前後の速度比(斜面法線方向)が, 既存の現場実験資料⁷⁾で報告されている反発係数と同程度となるように設定した。

主要な解析データを表-4.3に示し, 解析結果例を図-4.4に示す。解析結果図からは, 落石の初期速度をわずかに変化させることによって落下経路(跳躍の仕方)が明瞭に変化する状況が読みとれる。また, 崖錐斜面上方の形状が比較的一様な箇所での解析結果は

跳躍量 = 1~ 3m 程度

落下速度 = 18~20m/s 程度 (落下高=30m)

を示しており, 落石便覧¹⁾で示されている経験値と概ね同様の値を示した。

図-4.5に, 解析結果をもとに道路到達地点での落石の跳躍量と運動エネルギーをまとめた結果(全101ケース)を示す。集計結果から,

跳躍量 = 5m 程度

運動エネルギー = 600 kN・m 程度

の落石が道路に到達する可能性が高いものと考えられ, 現況の防護柵の仕様と比較することによって, 対策工の必要性が確認された。

(4) 対策工を考慮した落石解析

落石防護策として, 崖錐斜面の整形(落石ポケットの設置)も落石対策上有効と考えられ, 崖錐斜面を整形した際の地形モデルを使って上記と同様な解析を実施し, 防護効果について検討した。

図-4.6に解析結果例を, 図-4.7に解析結果をもとに道路到達地点での落石の跳躍量と運動エネルギーをまとめた結果(全101ケース)を示す。解析結果から, 斜面の整形によって落石の横方向の跳躍が小さくなる傾向が認められるとともに, 落石の跳躍量等は現況斜面の場合よりも低下し, 落石ポケットとしての効果が確認された。

対策工の検討においては, 跳躍量や運動エネルギーに関する頻度分布から, 配置位置, 高さ, 設計強度等の設計条件を定量的に抽出するとともに, これをもとにして各種対策工の仕様を定め, さらに経済性や施工性等に関する比較検討を行った。

表-4.3 主要解析データ

データ項目	データ値
単位体積重量 (崖錐) [kN/m ³]	25
" (落石) [kN/m ³]	19
ヤング率 (崖錐) [kN/m ²]	500,000
" (落石) [kN/m ²]	3,500
速度減衰係数 [kN・s/m]	0.5
落石の初期速度 [m/s]	0.0~2.0 (0.02刻みで変化)
時間刻み巾 [s]	0.01
許容最大変位率 [-]	0.002

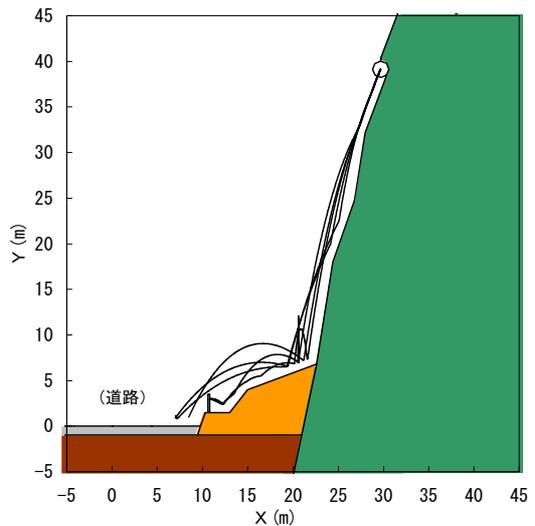


図-4.4 解析結果例(現況斜面)

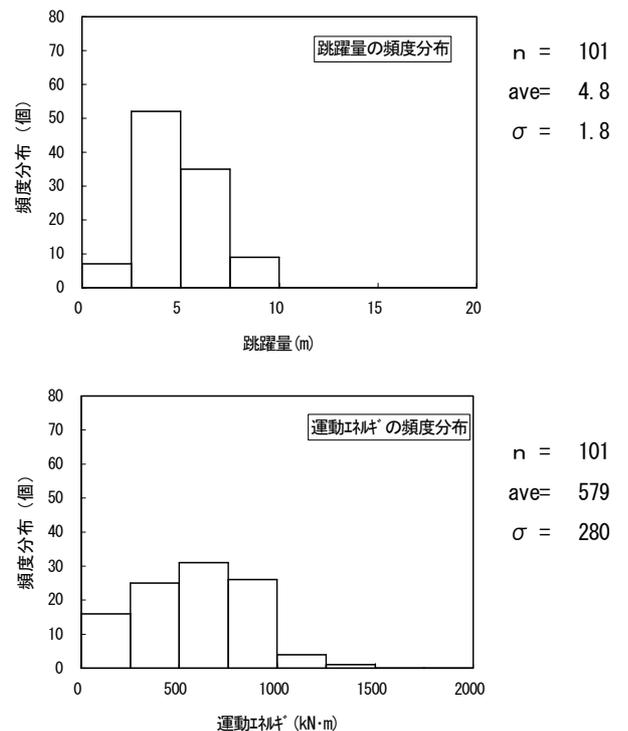


図-4.5 解析結果集計例(現況斜面)

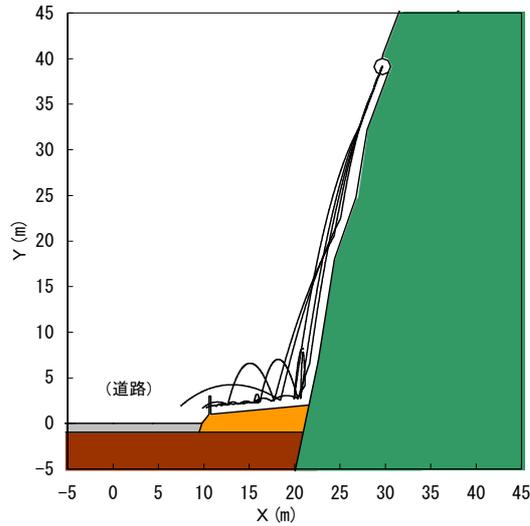


図-4.6 解析結果例 (落石ポケット)

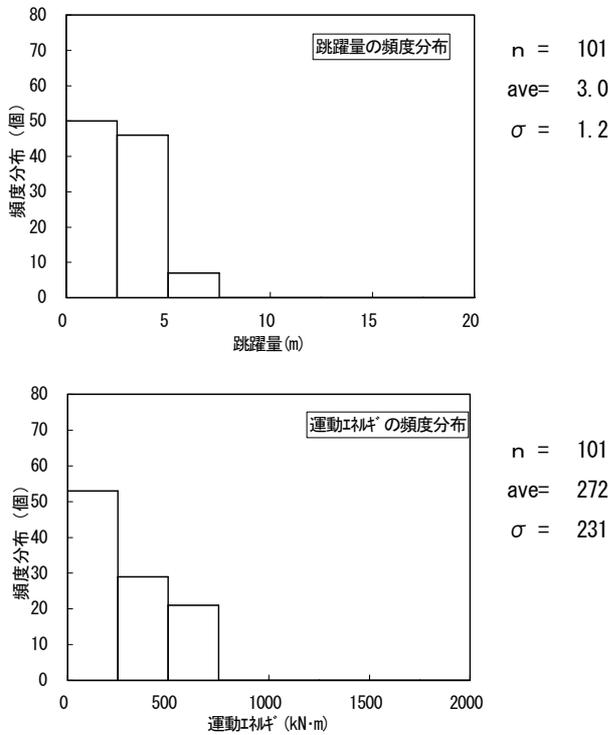


図-4.7 解析結果集計例 (落石ポケット)

5. 考 察

今回の落石解析は、解析データに関する検証資料が限られたことから、解析パラメータを用いて落石挙動の範囲を推定したものであり、解析データに関する不確定要素を、解析パラメータを介在させることによってシミュレートした解析として位置づけられる。比較的規模な小さな落石に関しては、詳細な形状モデルを作成 (特定) することが通常困難であり、データの検証に用いる現場資料等も一般に限られることが多いことから、このような解析パラメータを介在させたシミュレーションが効果的と考えられる。今回の解析では、落石の経路・姿勢を解析パラメータとしたが、落石の

挙動傾向は、斜面形状や地盤物性によって変化するものと考えられ、予備解析等によって解析箇所毎に落石挙動傾向を把握することが必要と考えられる。

また今回の予備解析においては、衝突時の落石の姿勢によって回転の仕方が変わるとともに、法線方向の速度比も変動することが確認された。既存文献資料等における落石実験では、反発係数を使って落石挙動が整理される場合が多いが、落石の回転状況に関するデータは限られている。DDA等による落石解析の精度を向上する点からは、落石の回転運動の観測を含めた現場実験等を行うとともに、数値解析結果と対応付けて落石挙動データを収集することが、今後有効と考えられる。

6. おわりに

解析の実施に当たっては、鹿島建設(株)佐々木猛氏より貴重なご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 日本道路協会, 落石便覧, 1983
- 2) G. H. Shi, R. E. Goodman, Discontinuous Deformation Analysis, Proc. 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 269-277, 1984
- 3) G. H. Shi, R. E. Goodman, Two Dimensional Discontinuous Deformation Analysis, Int. J. Anal. Methods Geomech., Vol. 9, pp. 541-556, 1985
- 4) 大西有三, 佐々木猛, 不連続変形法 (DDA) とその岩盤工学への適用について, 第 24 回岩の力学に関するシンポジウム, pp. 296-300, 1992
- 5) 大西有三, 三木茂, 不連続変形法 (DDA) による落石解析, 地盤工学研究発表会発表論文集, pp. 37-38, 1996
- 6) 大西有三, 不連続性を有する岩盤の解析手法の変遷, 電力土木, No. 270, pp. 3-11, 1997
- 7) 古賀泰之, 伊藤良弘, 鷲田修三, 森下義, 落石の運動軌跡の予測法に関する検討, 土木技術資料, Vol. 31, No. 8, 1989