

(81) 落石防護工設計への不連続変形法の適用

建設省 新潟国道工事事務所	関 博
建設省 土木研究所	笹原 克夫
財) 道路保全技術センター	伊藤 興一
埼玉大学 工学部	吉中 龍之進
応用地質 (株) 川本地盤工学研究所	○進士 正人

An Application of Discontinuous Deformation Analysis for a Design of Rock Prevention Work

Hiroshi, SEKI	Niigata Highway Construction Work Office
Katsuo, SASAHARA	Public Works Research Institute
Yoichi, ITO	Road Management Technology Center
Ryunoshin, YOSHINAKA	Saitama University
Masato, SHINJI	OYO Corporation

Abstract

There are a lot of dangerous slopes where the possibility generating a large-scale rock fall is high. In this case, a detailed examination is required to estimate the external force which acts on the prevention works for the design of the rock fall prevention works. In the design of the prevention works on such a large-scale rock fall slopes, authors executed the numerical simulation of the rock fall by "Discontinuous Deformation Analysis" which is one of numerical method for the discontinuous rock media and estimate external force from the result.

The numerical simulation assumed the size and the scale of the rock fall and obtained the trace of the rock fall to the position where the prevention works was scheduled to set up. The calculation presumed the speed of the rock fall which capitalized on the traces.

To verify the validity of the external force, the fall speeds which had been obtained by the site experiment of the loosening stone drop executed on the same site were compared with the result of the numerical simulation. As a result, because the coefficient of viscosity was assumed to be 0.1, both were almost corresponding. Therefore, it has been verified that the validity of the rock fall simulation used here is confirmed and DDA analysis is effective for the rock fall measures works to design.

1. はじめに

急峻な山岳地帯では、大規模でかつ落下高さが高い落石が発生する可能性が高い斜面が数多く認められる。このような斜面の落石防護工の設計では、防護工に作用する外力の設定が重要である。著者らは、このような大規模落石斜面の防護工に作用する外力の設定に、不連続体岩盤の解析手法を適用した。

防護工の設計対象とした斜面の平面図を図-1に示す。斜面上部には一部トップリングし節理が開いた流紋岩が分布している。数値シミュレーションは、図中のA-1断面で実施した。この断面は、過去にも何度も崩落した履歴を有している。これまで発生した落石の最大径は $4.0 \times 3.0 \times 1.5\text{m}$ (重量45t)で図中に示すJ-1洞門上部の擁壁背後に到達している。また、この断面では、落石発生後、浮き石除去工事が実施され、その状況がビデオに収録された。本論文では、解析手法の適用のための基礎的検討、並びに数値シミュレーションと浮き石の落下状況のビデオ分析を行った結果¹⁾を比較・検討し、落石防護工設計への不連続体岩盤の解析手法の適用性について検討した。

2. 不連続変形法による落石シミュレーション

数値シミュレーションでは、落石発生源での岩塊の大きさ、規模を想定し、防護工の設置が予定されている位置までの落石の軌跡を追跡した。その軌跡から岩塊の落石速度を算出することは容易であり、防

Analysis 以下、
DDAと呼ぶ。
を採用した。

DDAは、Shi

とGoodmanにより開発された不連続岩盤の相互のブロックの力学的挙動を数値解析することができる手法である。入力データは、岩盤ブロックの幾何学形状、荷重、変形係数、ポアソン比と岩盤ブロックにおける境界条件および拘束条件である。数値解析の結果は、各ブロックの変位、変形、応力、ひずみと岩盤ブロック間相互の接触力、すべり、分離、接触として得られる。岩盤ブロック接触部のすべりや分離は破壊の主要な要因であり、一般に、DDAは岩盤ブロックにおける破壊メカニズムの評価に利用できると言われている。

外力や他の岩盤ブロックとの接触により岩盤ブロックに作用している力は、平衡条件を満たしている。また、外力とブロック内部の応力も平衡条件を満たしている。さらに、解析は、ブロック間において引っ張り力は働かず、ブロック同士が食い込むことがないという条件を満足するもので、ブロックの接触部においては、静的・動的計算過程を問わずモール・クーロンの摩擦則が組み込まれている。

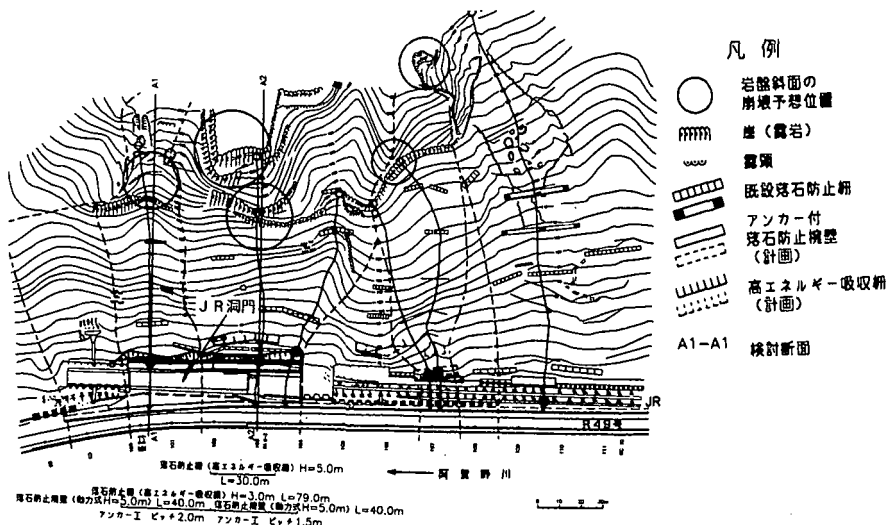
有限要素法とDDAの定式化を比較すると、主変数を除き同じである。それぞれのブロックは定応力、定ひずみであると仮定し、ブロック内の任意の点(x,y)における変位(u,v)を以下の6個の変位変数で表している。(図-2(a)参照)

$$\{Di\} = \{u_0, v_0, r_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$$

(u_0, v_0) は、ブロック内のある点 (x_0, y_0) の剛体変位を、 r_0 は、点 (x_0, y_0) を中心とする回転角を示す。ここで、回転角 r_0 の単位はラジアンである。 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ はそれぞれブロックの垂直ひずみ、せん断ひずみを表す。

また、岩盤ブロックが食い込んだ場合には、食い込んだ節点にバネを自動的に挿入し食い込みが解消されるメカニズムを採用している。(図-2(b)参照)すなわち、これらの平衡条件と拘束条件を満たすため、接触条件が生じる毎に連立方程式の係数を部分的に修正し、繰り返し連立方程式を解くことになる。

DDAは新しい手法であり、最近、種々な岩盤問題に対する解析の適用例がはじまったもので実績はまだ少ない。また、DDAでは落石中に発生すると考えられる岩石ブロックの新たな分割を扱うことは難しいため、DDAを工学的に適用するには有限要素法との比較や例題を通しての実測との比較が必要である。ここでは、落石問題にDDAを適用する際



図一 1 対象断面における平面図

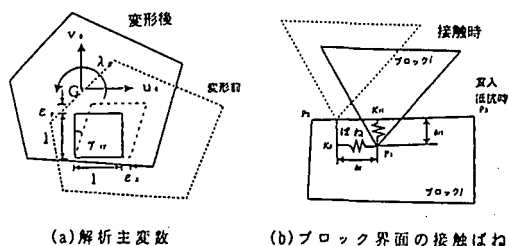


図-2 DDA解析の基本理念

に現実問題との整合がとれるように諸パラメータを浮き石落とし工事のビデオ解析結果から同定した。

これまでに実施された落石実験では、落下ブロックの落下高さが50mを超えると斜面跳躍の際のエネルギーロスや空気抵抗により落下速度も平均19m/秒の一定速度となる²⁾。DDAを落石シミュレーションに適用する際、斜面跳躍の際のエネルギーロスや空気抵抗ような抵抗力を解析に組み込むため、今回の落石シミュレーションでは、大西、山

向らが粘性力としてそれらの効果を取り込むために改良したDDAを使用した³⁾。具体的には、粘性による抵抗力は、ブロックの体積と移動速度に比例して大きくなるため、単位時間ステップにおける変位の増分が与えられているとき、粘性力は、以下の式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \frac{\mu}{\Delta t} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

ここで、 f_x 、 f_y は、単位体積あたりに作用する粘性力、 μ は粘性係数、 Δt は時間ステップ、 u と v は変位の増分である。粘性抵抗により蓄えられるポテンシャルエネルギーは以下の式で表される。

$$\Pi_v = \int_s (u \ v) \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} ds$$

ここで、 S は、岩盤ブロックの面積である。このポテンシャルエネルギーを変位変数で微分し、これまでのDDAの定式化に組み込むことにより粘性の影響を考慮した解析を行うことができる。

3. 数値シミュレーション

3. 1 予備数値シミュレーション

図-3に、過去に発生した落石崩壊(平成4年3月)の際に、斜面に分布する転石と発生源である流紋岩の割れ目状態から推定した落石前の重量の頻度分布を示す。このように、発生源には、既往最大落石以上の岩の存在の可能性も考えられるため、予備数値シミュレーションとして落石の形状と落石量の違いによる検討を行った。解析では、落石落としのビデオ解析によって得られた地形図によって得られたA1横断面を用いた。シミュレーションの目的は以下の通りである。

- (1) 落石の形状がどのように影響を受けるか?
- (2) 落石の規模により解析結果がどのように影響を受けるか?

シミュレーションで用いた諸定数の一覧を表-1に示す。シミュレーションケースを表-2、図-4に示す。図-5に落石形状を変化させた時の落下速度の経時変化の比較を示す。これらの図から明らかに、落石形状の相違はほとんどなく、小規模な形状変化や落石量の影響は解析にほとんど影響しな

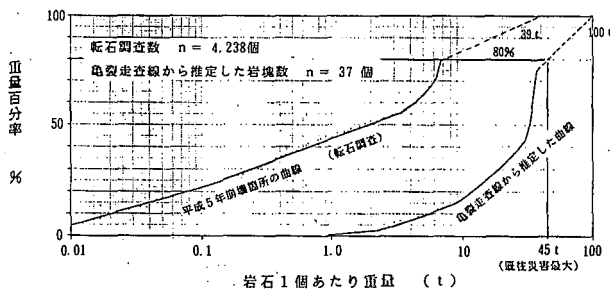


図-3 落石サイズ調査結果

表-1 解析に用いた物性値一覧表

単位体積重量	2.5t/m ³
内部摩擦角	40度
ヤング率	10,000 kgf/cm ²
ポアソン比	0.3
粘性係数	0.05, 0.10, 0.15

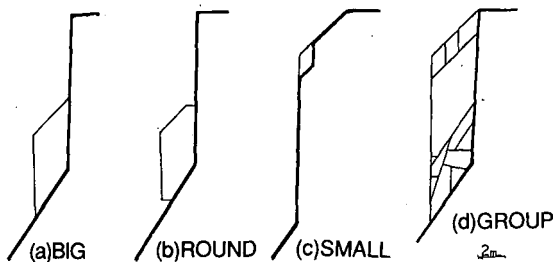


図-4 落石形状

いことがわかる。従って、今後の落石シミュレーションでの落石規模は、平成4年の履歴最大礫径 $4.0 \times 3.0 \times 1.5\text{m}$ （重量45t）が斜面上部より1個単独で落下するものとした。衝突による落下エネルギーの消散や運動エネルギーの低下も無視できないと考えられるが、このシミュレーションではそれらを考慮されていないため、解析では、安全側の結果を与えるものと考えられる。

表一 2 落石の形状と特徴

落石モデル	落石のサイズ	落石形状	特徴
1	$4.0 \times 3.0 \times 1.5\text{m}$ (45tf)	(a)	平成4年の最大落石サイズ
2	$4.0 \times 3.0 \times 1.5\text{m}$ (45tf)	(b)	モデル1の角を丸める
3	$1.0 \times 1.0 \times 1.0\text{m}$ (2.5tf)	(c)	浮石落としの最大落石サイズ
4	$19.7\text{m}^3/\text{m}$	(d)	平成4年の最大落石規模

3. 2 シミュレーション結果の検証

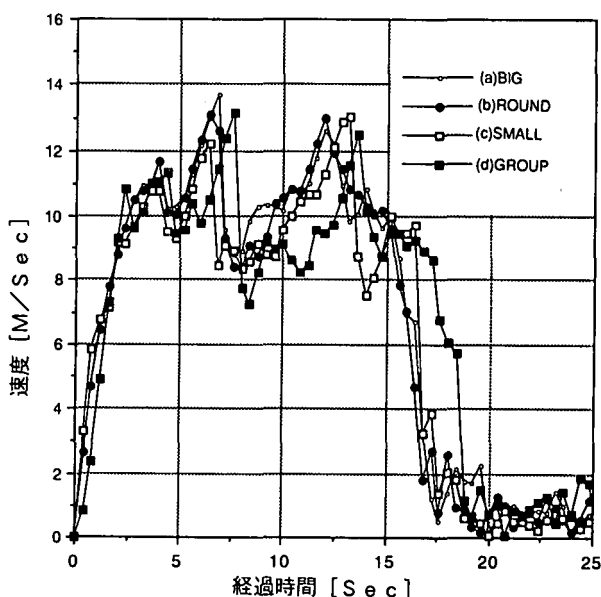
落石シミュレーションと同じ場所で実施した崩壊後の浮き石除去時に撮影したビデオから解析した浮き石の落下状況（以下この解析を「ビデオ解析」と呼ぶ。）とを比較した。図一6に粘性係数を変化させた時の落石の軌跡を示す。図中には、ビデオ解析の際の岩石の跳躍範囲を合わせて示す。図から明かなように粘性係数を変化させるとその軌跡が変化するが、粘性が低くなるにつれて斜面に沿った軌跡を描くことがわかる。また、跳躍高も6～7mとほぼビデオ解析の結果と一致している。図一7に、落石の速度分布を示す。この図にもビデオ解析による2回の跳躍時の平均的な跳躍標高における速度の分布を示す。図から明かなように、粘性係数を0.1としたときの落石速度と第1跳躍時のビデオ解析結果は一致し、第2跳躍時のビデオ解析結果と粘性係数を0.15としたときの速度分布はほぼ一致することがわかる。これは、跳躍場所が第一跳躍時には流紋岩の岩盤斜面、第2跳躍時には崖錐という地盤状況の違いによるものと考えられる。

これらの結果より、DDAによる落石のシミュレーションが、ある程度可能であることが明らかとなった。この結果に基づき落石防護工の設計では、落石規模礫径 $4.0 \times 3.0 \times 1.5\text{m}$ （重量45t）崩壊土量200 m^3 、落石設計速度13.5 m/sec 、落石エネルギー460 $\text{tf} \cdot \text{m}$ とし、設計を行った。設計は、この箇所が大規模のロックシェッドが構築できないことも考慮し、アンカー付き待ち受け擁壁を基本とした⁹⁾。

4. まとめ

落石による防護工に作用する外力の妥当性を検証するために、同じ現場で実施したビデオ解析で得られた落下速度と数値シミュレーション結果得られた落下速度を比較した。その結果、両者はほぼ一致したため、ここで用いた落石シミュレーションの妥当性が確認され、この解析手法が落石対策工の設計外力算定に有効であることがわかった。

今後の課題としては、落下時の岩石衝突による落石エネルギーの消散効果を考慮した不連続体解析や岩盤の強度の不均質性を考慮した解析、地表面付近の雑木などの落



図一 5 落石形状の違いによる落下速度と経時変化図

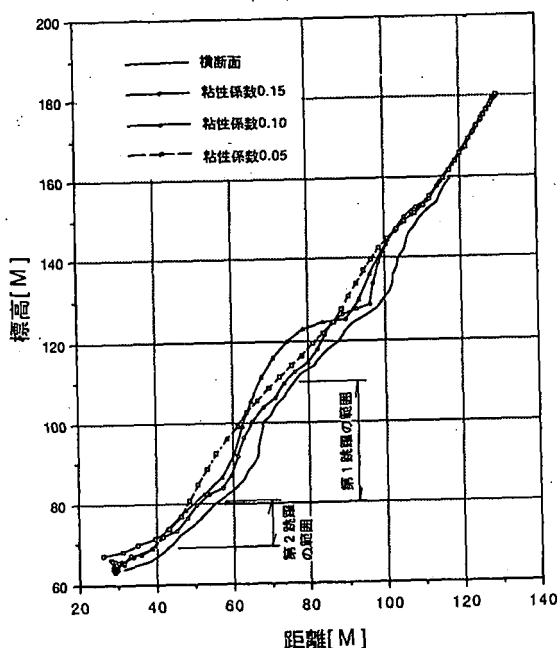


図-6 粘性係数の違いによる落石の軌跡比較図

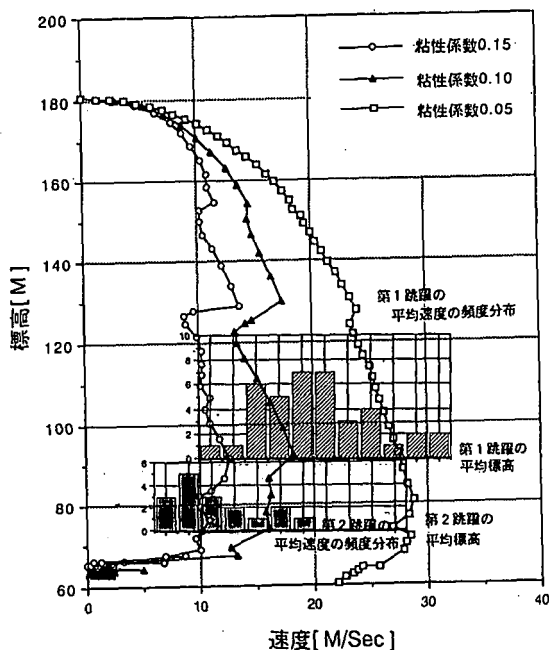


図-7 粘性係数の違いによる落石の速度とビデオ解析の結果の比較

石に対する粘性を適切に考慮した解析。それに加えて、落石防護工の効果を取り込んだ不連続体解析手法の開発が望まれる。また、岩盤ブロック内を要素分割し、衝突の際の応力集中を解析できるマニホールド法の適用も十分期待できる。

本解析を行うにあたり、京都大学大西教授、元大学院生山向さんには種々のご指導を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 関 博、伊藤 興一、笹原 克夫、吉中 龍之進、下村 博之「ビデオによる落石運動の解析」、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集。
- 2) 三上 善蔵「落石防止防護工法」、pp.26~27、理工図書
- 3) 山向 薫「不連続変形法を用いた斜面落石シミュレーションとその適用に関する研究」、京都大学大学院修士論文
- 4) 岩井 一夫、高橋 忠夫、川口 広司、堀 伸三郎「一般国道49号を例とした落石のシミュレーションについて」、第12回土木学会新潟会研究調査発表会論文集, pp.523~528, 1994