

D.D.A による落石対策工の検討

EXAMINATION OF THE DESIGN OF ROCK FALL PREVENTION USING D.D.A

江良隆一*・助田勅史**・畑中義人***

Ryuichi ERA, Tadashi SUKEDA, Yoshito HATANAKA

ABSTRACT

In the mountainous country like Japan, rock fall is a very serious problem for maintaining roads, buildings and houses. It is obvious that the knowledge about the motion behavior of falling stones, such as the falling paths, velocities jump heights, is necessary for the design of these structures. While D.D.A (Discontinuous Deformation Analysis) developed by Goodman and Shi has attracted geotechnical engineers since it can handle static and dynamic behavior of arbitrary shape block. This model is appropriate for high order displacement problem such rock fall. This paper studied rock fall simulation and the design of rock fall prevention. using D.D.A

1. はじめに

日本では道路や鉄道, その他構造物に隣接し, かつ落石や岩盤崩落の危険性のある斜面が数多く存在している. そのため, 落石の挙動を検討することは防災や道路計画, 落石対策工を設計するにあたって非常に重要となってくる. これまで, 落石の挙動を検討するためには, 落石対策便覧[1]等に記載されている実験により得られた結果をもとに検討するというのが主に用いられてきた. しかし, 落石実験の数が限られているため多種多様な形状, 性質を有する斜面に対して適用を試みた場合, その適用に不安が残る.

一方, 近年のコンピューター技術の進歩に伴い数値解析手法が飛躍的に進歩しているが, その中でも不連続変形法 (D.D.A) [2]は落石などの物体の運動が主となる問題に適している. 本研究は, D.D.A を落石挙動の検討や落石対策工選定に用いたものである.

2. D.D.A の概要

D.D.A (Discontinuous Deformation Analysis: 不連続変形法) は Goodman と Shi[2]により開発された解析手法であり, 不連続面により分割されたブロックの挙動について解析を行うモデルである. D.D.A は図-1 に示すように, 各不連続面により区切られたブロックに対して剛体変位, ひずみ変形を考慮することにより, 各ブロックは自由に移動することが可能である. そのため, 落石などの大移動を伴う問題に適している

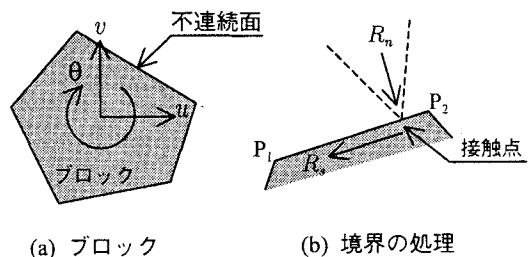


図-1 D.D.A の概要

* 基礎地盤コンサルタンツ (株) 岩盤工学センター
** 基礎地盤コンサルタンツ (株) 関東支社 設計二課
*** 基礎地盤コンサルタンツ (株) 関東支社 地質部地質課

また、D.D.A は境界面（不連続面）に Mohr-Culomb 則が適用されており、内部摩擦角、粘着力、垂直接触力、せん断接触力をそれぞれ ϕ , c , R_n , R_s とすると、図-2 に示すように $R_s > R_n \tan \phi + c$ の場合は境界辺 P_1P_2 に沿って滑動することを許し、 $R_s < R_n \tan \phi + c$ の時は接触点において固定される。その結果、境界面における挙動をより厳密に考慮することができる。

3. エネルギー損失

落石問題を解析する場合、落石と斜面、樹木との接触、空気抵抗など様々な要因で生じるエネルギー損失を考慮に入れる必要がある。しかし、実際の落石においてはこれらの要因が複雑にからみあっており、個々に分析してエネルギー損失を解析に取り込むことは不可能である。そこで、本研究では、便宜的に以下のエネルギー損失[3][4][6]を解析に取り込むこととした。

斜面との衝突

①速度エネルギー比

その他の要因によるエネルギー損失

②粘性力

③抵抗力

①速度エネルギー比による方法：速度エネルギー比による方法では、落石同士の衝突や落石と斜面が衝突する場合に、衝突前の速度 v_1 と衝突後の速度 v_2 が次の様な関係にあるとしてエネルギー損失が考慮されている[3]。

また、速度エネルギー比 γ は実験により求められている[3]。一方、速度エネルギー比は斜面と

$$v_1 = \gamma \cdot \sqrt{v_2}$$

v_1 : 衝突前速度

v_2 : 衝突後速度

γ : 速度エネルギー比

落石との接触角（入射角）が小さい場合、すなわち、比較的滑動しながら落下して行くようなケースでは、斜面との摩擦力や粘性力、抵抗力にその効果が含まれていると判断し、考慮する必要はないものと思われる。逆に、跳躍しながら落下して行くようなケースでは考慮する必要がある。解析時にはブロック境界辺ごとに速度エネルギー比の設定が可能であり、同一斜面内でも植生や堆積物の種類等によって値を変える。

②粘性力による方法：粘性力は物体の運動速度に比例した力であり、粘性係数を比例定数としている。物体を自由落下させた場合、落下の速度-高さの関係は図-3 のように表される。ここで η を粘性係数と呼び、 $\eta=0.0$ の時は自由落下を表す。この粘性力は斜面との衝突以外のエネルギー損失（樹木との衝突や空気抵抗など）を表現するのに用いる。解析では全ブロックに対して同一の粘性力を作用させている。したがって、各ブロックごとに粘性力を変更することはできない。

③抵抗力による方法：これは基本的に粘性力と同じものであるが、粘性力は物体の質量にその効果が依存する。しかし、実際の落石実験の結

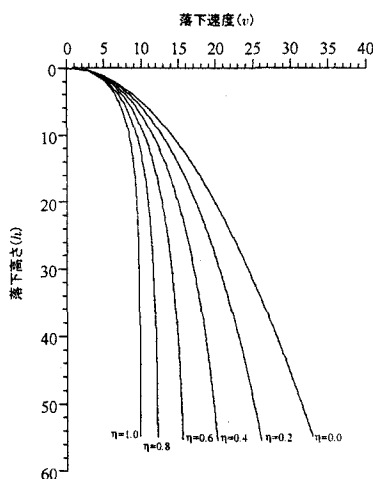


図-3 粘性効果

表-1 既往の現場落石実験の概要（抜粋）[3]

地名	実験年	斜面特性				落石の特性			運動特性	
		斜面種類	地質	立木	平均勾配	落差	石質	形状	残存係数	速度エネルギー比
東伊豆	不明	自然	崖すい	有	42	42	自然	角状	0.75	0.2-0.7
圃原 A	1973	自然	軟岩	伐採	55	65	河床	丸状	0.95	0.53±0.22
愛岐	1973	自然	土砂	伐採	27-35	30	自然	角上	0.75	0.2-0.7
北川村	1988	自然	崖すい	有	43	48	自然	塊状	0.5	0.2-0.6
大月町	1988	自然	軟岩	有	56	46	自然	塊状	0.74	0.3-0.5

果を見てみると、落石の大きさ（質量）はそれほど落下速度に影響しない[4]、そこで、粘性力と同じ効果を表現でき、さらに質量に依存しない粘性力を考え、この粘性力を抵抗力と呼ぶことにする。

以上が本研究で用いたエネルギー損失の表現方法であるが、次に各パラメータの決定方法について述べる。

落石対策便覧[1]では過去の実験結果に基づいた斜面や落石の特性、すなわち、斜面形状、落石形状等から速度エネルギー比を求めた結果が記載されており、速度エネルギー比はそれらを参考にして設定すれば良い（表-1 参照）。

一方、粘性力や抵抗力は過去に求められたものがないため、直接的には求められないが、落石対策便覧には次式に示す自由落下式の比例定数にあたる速度残存係数 α というものが記載されている。

$$v = \alpha \cdot \sqrt{2gh}$$

α :速度残存係数, g :重力加速度, h :落下高さ, v :落下速度

図-4 のように抵抗効果のグラフと重ね合わせるにより、おおまかな目安を得ることが出来る。図-4 において●印は速度残存係数を表している。また、粘性力と抵抗力の選択方法は通常は粘性力を選択すれば問題は無いと思われるが、落石の大きさが極端にばらついている場合などは、抵抗力を選ぶ必要がある。

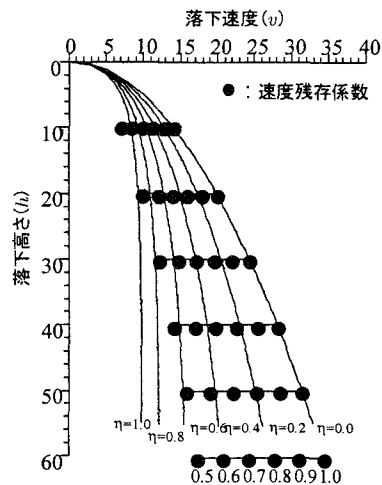


図-4 速度残存係数と抵抗力

4. 実斜面への適用

解析の対象とした地点は急崖部、緩傾斜部、水路、道路、鉄道から構成されている。急崖部には新第三紀の凝灰角礫岩、緩斜面には崖錘堆積物が堆積している。

不連続面は急崖部斜面に平行、斜交する縦系の不連続面および、水平系の三方向の不連続面によって板状の大きなブロックに分けられている。また、斜面表面はこれらの不連続面によって 10～30cm 四方のブロックになっており、不安定な状態となっている。

この地点は不安定岩塊の存在する急崖部から道路までの距離は比較的長い、不安定岩塊の存在する急崖斜面の比高は遷緩線から 30m ほど

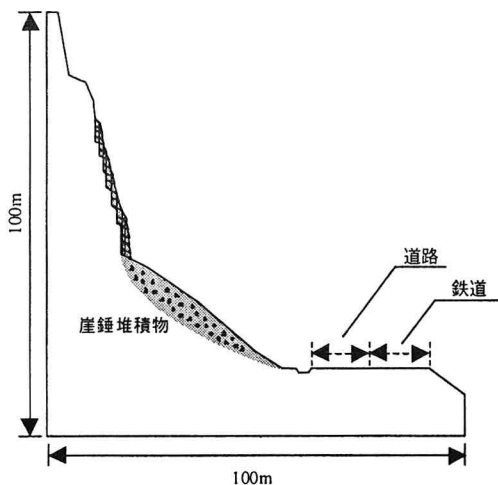


図-5 解析に用いたモデル

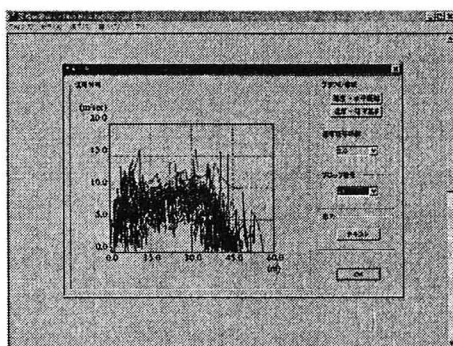
表-2 解析に用いたパラメータ

岩盤物性値	
弾性係数	3.6×10^6 (MPa)
ポアソン比	0.25
単位体積重量	2.5 (N/m ³)
境界条件	
内部摩擦角	25.0 (deg.)
粘着力	0.0 (N/m ²)
引張強度	0.0 (N/m ²)

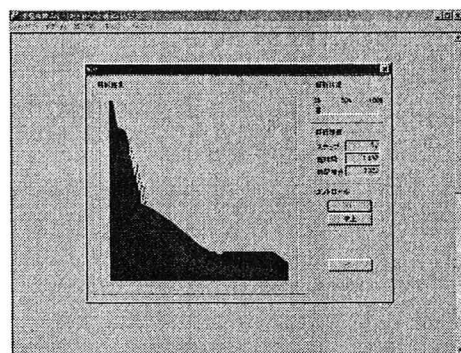
あり、崩壊規模が大きいと想定されるため、崩落後道路まで到達する可能性が十分に考えられる。解析に用いたモデルを図-5に示す。

解析に用いた岩盤物性値は、室内試験の結果を参考にし、また、不連続面強度は既往の文献[5]を参考にし、表-2のような値を用いた。

一方、落石の運動に関するパラメータであるが、表-1を参考にし、過去の実験結果から東伊豆のケースと斜面の性質が似ていると判断し、速度エネルギー比は0.2～0.7と得られるが、エネルギー損失の要因があまり見られないため、0.75と設定した。次に粘性力、抵抗力であるが、この解析では落石の大きさにそれほど違いが見られず比較的均一であると判断し、粘性力を用いることとした。粘性力は速度残存係数 α を0.75と定め、落石の平均落下高さを40mとし、図-4のグラフより粘性係数が0.3程度と得られるが、東伊豆では立ち木が存在するのに対して、解析対象斜面は、緩斜面に至るまでは落石にエネルギー損失を与える要因が比較的少ないと判断し0.1と決定した。一方、解析には、D.D.Aを用いた落石解析を効率的に行うため開発した落石解析システムを用いた。このシステムは、Windows

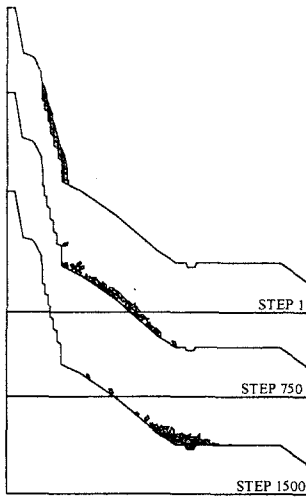


(b)速度分布

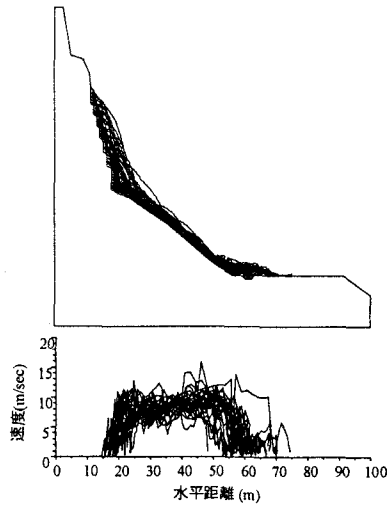


(a)解析中

図-6 落石解析システム



(a)崩落過程



(b)軌跡と速度分布

図-7 解析結果

上で動作が可能であるため、高速かつ手軽に解析を行うことができる（図-6 参照）。

本システムを用いて解析を行った結果を図-7に示す。図-7(a)では急崖部から崩落後、緩傾斜部をすべりながら移動し一部は水路によって止められるものの岩塊の崩壊量が多いため水路を乗り越えて道路まで到達している。図-7(b)に落石の軌跡と速度分布を示した。

これらの結果から対策工として次のようなことが考えられる。これら岩塊を排除することは、背後にある岩塊等が応力解放等により不安定化し、落石を生じさせる恐れがあるため、不適当である。また、崩壊が生じた場合、解析結果から道路に到達することが考えられるが、崩壊量が防護工で対応できる規模ではないため、予防工の適用が望ましいとして、アンカー工を採用し、施工中の安全性を確保する目的で岩盤接着工を採用することにした。

5. まとめ

本研究では不連続体を対象とした解析手法である D.D.A を用いて落石対策工の選定、または

設計支援を試みた。今回のケースでは落石の影響範囲を確認することにより対策工の選定を行うにとどまったが、D.D.A では落石のエネルギーや跳躍量等も計算することが可能であり、フェンス強度や高さの設定の際の基礎的データとして用いることができる。

一方、問題となってくるのは落石の運動特性パラメータの設定方法である。これらパラメータは解析に大きな影響を与えるものの、設定の行い方が非常にあいまいであるため、現在では経験的に設定しているのが実情である。今後は数値シミュレーションを想定した実験や基準の策定などが必要と思われる。

参考文献

- [1] (社) 日本道路協会：落石対策便覧, 1983.7
- [2] G.H. Shi : Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis, 1989
- [3] (社) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法, pp.160, 1993
- [4] (財) 高速道路調査会：落石防護施設の設置に関する調査研究報告書, pp.39-pp44, 1974
- [5] (社) 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測, pp.119, 1994
- [6] 大西有三, 陳光肅他: 不連続変形法による落石解析, pp37-pp38, 1996, 第31回地盤工学研究発表会講演集