

## 長大斜面における落石の個別要素法による再現解析と機構の検討

Distinct Element Analysis of rockfalls in Long Slopes

牧野孝久\*, 倉岡千郎\*\*, 河合政岐\*\*\*, 中根昌士\*\*\*\*

Takahisa MAKINO, Senro KURAOKA, Masaki KAWAI, Masashi NAKANE

- \* 工修 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)
- \*\* 工博 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)
- \*\*\* 理修 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)
- \*\*\*\* 工修 日本工営株式会社 北陸事務所 (〒920-0025 石川県金沢市駅西本町 5-1-43)

キーワード: 落石、個別要素法、長大斜面  
rock fall, distinct element method, long slope

### 1. はじめに

近年、DEM (個別要素法) は落石調査および対策工の検討手法として広く用いられてきている。しかしながら、落下高さ数百mにおよぶ斜面や、数m規模の落石の挙動は十分把握されておらず、適切な入力物性値や落石形状の設定方法は明確ではない。

著者らは、落下高さ約 300m、水平距離約 400m の長大斜面で発生した落石をもとに、2つの落石について現場の落下痕から落下軌跡を把握し、2次元DEMによってそれぞれの軌跡の再現をすることで入力物性値の逆算を行った。なお、本解析では新たに回転運動を制御する抵抗式を導入することによって再現が可能になった。

本報告では、これらの再現解析の過程と回転抵抗についての説明を行う。

### 2. 落石解析手法の概要

本解析で用いた数値解析手法は2次元個別要素法である。本手法では、落石を多角形のブロック要素として取り扱い、ブロック要素間の接触メカニズムは、図1に示すように斜面法線方向とせん断方向のばね、ダッシュポット、およびせん断方向のスライダ (モールクーロン則に基づくせん断破壊機構) でモデル化される。ばねにより、斜面法線方向、およびせん断方向の衝突力が計算され、ダッシュポットにより落石と

斜面の衝突によるエネルギー損失をモデル化する。スライダはモールクーロンの破壊基準に従い、せん断力が抵抗力より大きければすべりが発生し、この時のエネルギー損失は摩擦に起因するものと考え、ダッシュポットは働かないものとする。粘性 (減衰) 係数については、反発係数と粘性 (減衰) 係数の関係から設定できる。反発係数  $e$  と粘性 (減衰) 係数  $C$  の関係はエネルギー損失と衝突前後の運動エネルギーとの関係から求める (式1)。DEMの詳細については文献<sup>1)</sup>に記載があるので本論文では省略する。

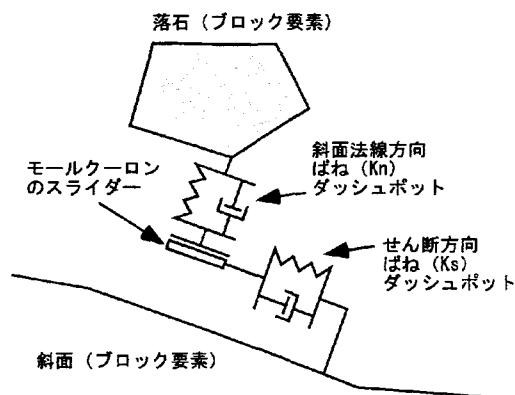


図-1 2次元DEMモデル (落石と斜面の接触)

$$C_n = \frac{2|\ln e|\sqrt{K_n m}}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}} \dots (式1)$$

### 3. 対象落石および斜面の概要と落下経路の推定

図-2に対象斜面の平面図と、落下痕から推定した落下軌跡を示す。落石発生現場は、古第三系の安山岩質溶岩・火砕岩からなる地すべり崩壊跡斜面である。斜面内には崩壊土砂と共に、 $\phi=1\sim 3\text{m}$ の安山岩転石が多数存在しており、部分的に $\phi=5\text{m}$ 程度の巨転石も認められる。傾斜は約 $30\sim 45^\circ$ 程度、河川までの標高差約 $300\text{m}$ 、水平距離約 $400\text{m}$ の長大斜面である。対象とした落石は河川に到達した2つの落石(図-3、4)であり、斜面上部で発生した地すべりに伴い落石が発生したと推定される。斜面形状から落下経路を推定し、その経路を測線1、2と定めた。測線1のA点付近は待受擁壁が施工されており、その背部に落石が堆積し

ている。また、測線2のB点付近(標高 $250\text{m}$ 付近)も落石が堆積している領域がある。なお、両測線とも植生はほとんど認められず、立ち木との衝突はないものと考えられる。

### 4. 再現解析

#### 4.1 解析モデルと入力物性値

2つの測線断面形状から解析モデルを作成した(図-5、6)。落石の落下経路、到達位置を再現することで反発係数等の物性値の逆算を行った。初期物性値については、反発係数、摩擦係数が落石挙動(速度や跳躍)を支配するパラメータと考え、既往の解析事例や文献等を参考に設定した(表-1)。

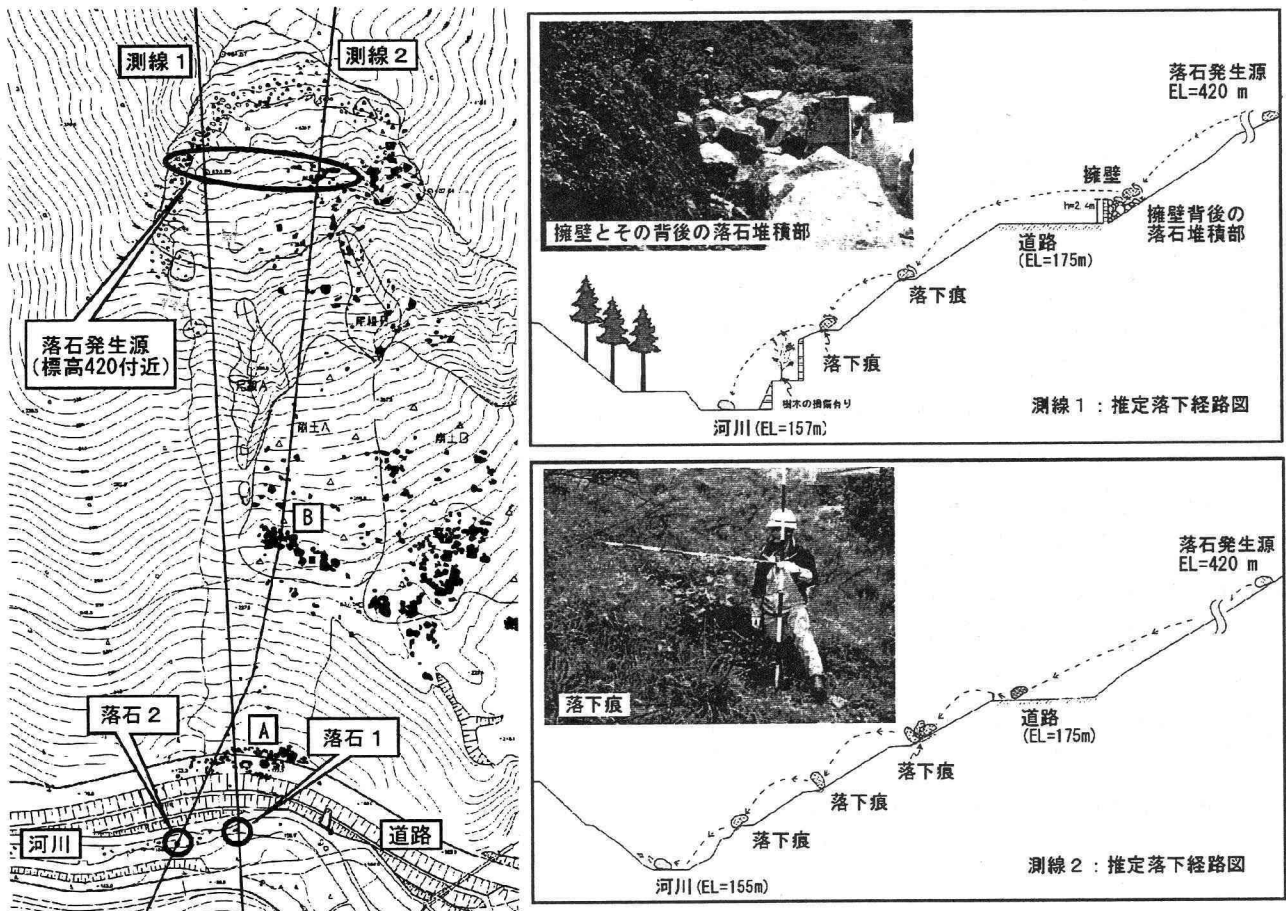


図-2 平面図および落石の推定落下経路図

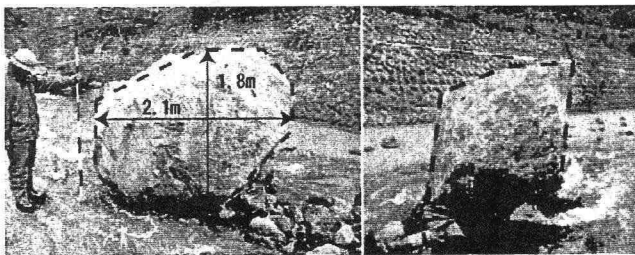


図-3 落石1(長軸および短軸方向)

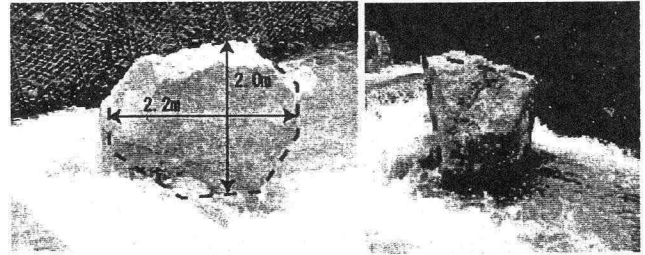


図-4 落石2(長軸および短軸方向)

ばね係数については既往の例を参考に各ケース50,000kN/mに固定した。なお、2つの測線断面では物性値は等しいものと想定する。よって両断面において再現性を満たす物性値を逆算する必要がある。2断面を同時に満たすパラメータを求めることで、信頼性の高い物性値が得られると考えられる。

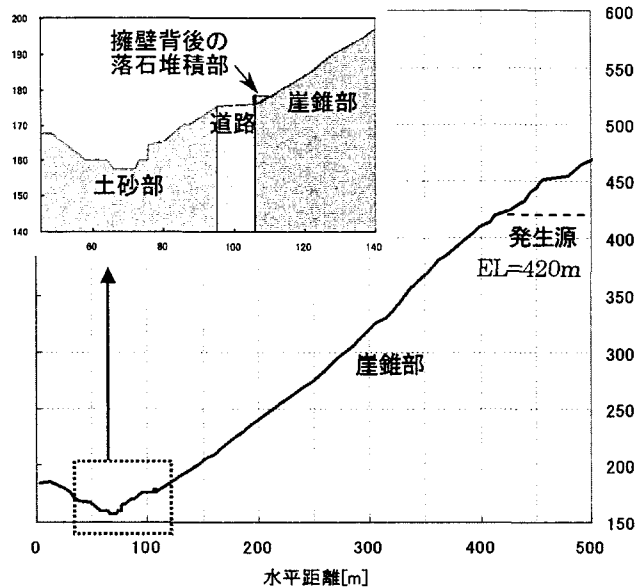


図-5 断面図および物性区分図 (測線1)

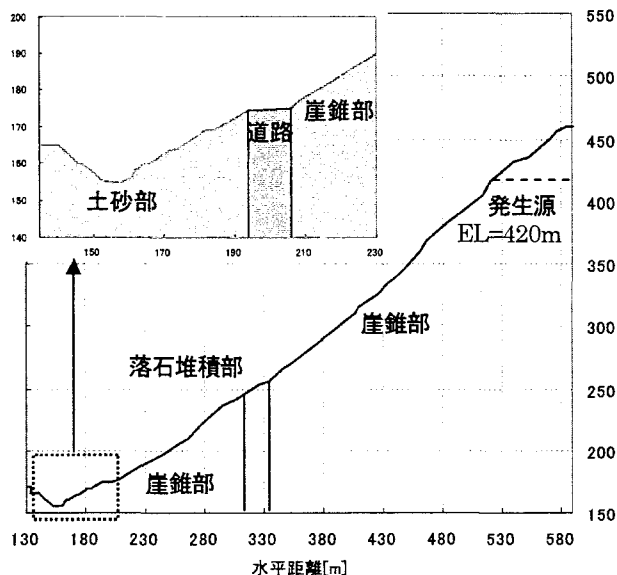


図-6 断面図および物性区分図 (測線2)

表-1 初期設定物性値

	反発係数	摩擦係数
土砂部	0.1~0.3	0.6~0.8
道路	0.2~0.4	0.6~0.8
崖錐部	0.1~0.3	0.6~0.8
落石堆積部	0.1~0.3	0.6~0.8

## 4.2 落石形状のモデル化

2次元解析で落石形状をモデル化する場合、多角形に近似してモデル化することが多い。ただし、落石の長軸方向の形状と短軸方向の形状が異なる場合、用いた形状が結果に影響を及ぼす可能性がある。本解析では長軸・短軸の両方の形状(図3、4の破線形状)のモデルを作成して結果の比較を行った。その結果、以下の理由により長軸方向の形状モデルを採用した。

- 短軸方向で回転し落下してきたならば、落下途中の斜面との衝突時によって角がやや丸くなると考えられるが、実際の短軸方向の形状は角ばった形状を呈しているため、矛盾しているため。
- 短軸方向形状で解析を実施した結果、落石は回転せずにすべり運動を呈し、斜面途中で停止してしまっただけのため。

## 4.3 回転抵抗モーメントの設定

本解析では主要パラメータである反発係数、摩擦係数の組み合わせを変えることで再現を試みたが、実際の落石停止位置を大きく越える結果となった。また、河川で停止させるために上記パラメータを小さく設定すると、落石の挙動がすべり運動となり、想定される回転と跳躍を伴う挙動と矛盾する。

ここで、落石の角速度に注目してみると、既往の観測例に比べて極めて大きな値が示されていた。右城ら(2001)の実験では、角速度はある落下高さまでは増加するが、それ以降は一定値(最大50rad/s)であるのに対して<sup>1)</sup>、本解析で示された角速度は最大70rad/s以上まで増加した。これは、DEMでは接触が点でモデル化されているため回転が自由であるのに対して、実際の斜面では衝突時のめり込み等による回転に対する抵抗が作用しているためと考えた。

同様の問題は、下呂実験<sup>1)</sup>の再現解析でも認められており、この問題点を改善するために角速度 $\omega$ を抑制するための重心まわりの回転抵抗モーメント( $M_r$ )を導入している。この回転抵抗モーメントは回転抵抗係数( $K_r$ )を用いて、式2で定義されており<sup>1)</sup>、本解析では、落石と斜面の衝突時のみ作用するように設定している。

$$M_r = -k_r \cdot \omega \quad \dots (式2)$$

なお、本解析では解析結果と既往の実験結果が矛盾しないように回転抵抗係数を決定することにより、軌跡の再現も可能となった。

## 5. 解析結果

再現した軌跡を図-7、8に示す。また、逆算された物性値を表-2に示す。逆算された物性値が既往の解析例に比べて小さい値を示しているのは、落石径が大きいことや、衝突痕の大きさから考えてエネルギー損失が大きいためと考えられる。また、中島ら(2004)が落石実験から求めた反発係数<sup>2)</sup>においても同程度の値が示されている。

なお、測線1の擁壁背後の落石堆積部、および測線2の斜面中腹の落石堆積部については、衝突後の落石挙動にばらつきがあると考えられるため、一定値ではなく、範囲として算定した。

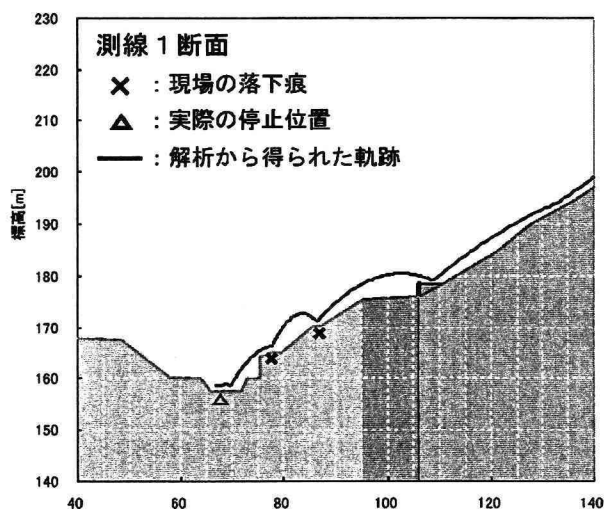


図-7 測線1の再現結果(軌跡)

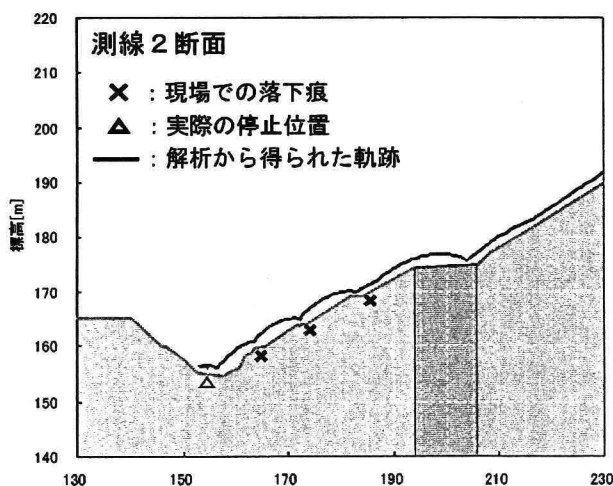


図-8 測線2の再現結果(軌跡)

表-2 逆算された物性値一覧

	土砂部	道路	崖錐部	落石堆積部
反発係数	0.05	0.20	0.10	0.10
摩擦係数	0.60	0.60	0.60	0.60~1.00
回転抵抗係数	20.0	22.0	30.0	10.0~20.0

## 6. まとめ

本報告では、長大斜面で発生した落石をもとに、2つの落石について想定される軌跡の再現解析を行い、入力物性値の逆算を行った。本報告のまとめを以下に示す。

- 落下高さ数百 m の長大斜面でのDEM解析では、角速度が過大になる可能性がある。
- 回転抵抗式を用いることで、実際の斜面での衝突時のめり込み等による回転に対する抵抗作用を表現することができ、角速度の上昇を抑えることが出来た。
- 隣接する2つの断面において再現解析を行ったことにより、信頼性の高い物性値が逆算できたと考えられる。

なお、今後は物性値の設定根拠となるような落石実験を行うことが望ましいが、このような長大斜面での実験は安全性の点からも困難であるため、実際の落石事例を収集し解析事例を増やすことにより、回転抵抗係数を含めた物性値の信頼性を高めていく必要がある。

謝辞：本検討を行うにあたり、金沢工業大学の川村國夫教授、金沢大学の榎谷浩教授、および石川県土木部道路整備課には多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 落石対策便覧に関する参考資料—落石シミュレーション手法の調査研究資料—、社団法人日本道路協会、pp68~80、pp353~363、2002
- 2) 垂直落下実験による落石の運動エネルギーと衝突姿勢が衝突挙動に及ぼす影響：中島祐一、河合政岐、倉岡千郎、松島亘志、第7回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、2004(投稿中)