

# 急崖斜面における大岩塊の落下機構の調査および数値解析

## FIELD INVESTIGATION AND NUMERICAL SIMULATION OF LARGE ROCK FALL

倉岡千朗\*・藤原一啓\*\*・小野慎吾\*\*\*

Senrou KURAOKA, Kazuhiro FUJIWARA and Shingo ONO

Mitigation measure of rock fall was assessed for large unstable jointed rock blocks formed at 50m high steep rock slope. The site investigation of rock fall in 1999 indicates that the geometry of the rock blocks and slope have significant influences on the path, velocity, jump height, and travel distance of the falling blocks. Hence, the distinct element method (DEM) was applied to examine the effects of the geometry and also to estimate the path and dynamic behavior of rock fall.

**Key Words** : rock fall, distinct element method

### 1. はじめに

本岩盤斜面においては、写真-1~3に示すように卓越した亀裂により数mを越す大岩塊の集合が急崖の頂上部(比高差約50m)に形成されている。平成11年11月に一部の岩塊が落下したこともあり、落石対策の立案を目的として調査と数値解析を行った。

対策の検討にあたっては、落石対策便覧<sup>1)</sup>などを参考にして落下経路、速度、跳躍量が設定されることが多い。ところが、本斜面では調査から次のような特徴が認められ、落石対策便覧などでその挙動を推定することが難しいと考えられた。まず第一点目として写真-1に示すように落石と斜面の最初の衝突地点によって経路が東西に分かれること、第二点目として、落石対策便覧などで対象としている落石の大きさ(50cm程度)に対してここで取り扱う落石が大きいこと(数m)、第三点目として図-3に示すように上部の急崖部分に対して下部斜面の勾配が大きく異なるので、落石運動が上部と下部で変化することが挙げられる。

そこで、落石対策の検討にあたり、以上の要因を考慮するために、まず発生した落石の痕跡から落石運動の特徴を推定した。次に、今後発生しうる落石の経路の検討にあたっては、落石と斜面との第一衝突地点を調査と数値解析から推定し、その位置から経路を想定した。また、勾配が顕著に変化する斜面における大きな落石の挙動については、形状の影響を反映できる個別要素法(DEM)によるシミュレーションを実施して検討した。ただし、ここで取り扱うような大きな岩塊の落下挙動を詳細に観測して解析した事例

がほとんどないことから、解析結果と実現象の整合性の検証が不十分であり、本稿における予測解析結果は推測の域に留まる。しかしながら、従来の落石実験結果や簡易な式ではモデル化できない機構や要因を反映した解析結果は、対策工の検討にあたってDEMの利用方法を示す一例となったものと考えられる。

本稿では、まず、対象斜面と落石の概要を地質と地形の点から説明した後、発生した落石の調査と、落下経路を推定するための数値解析結果を示し、最後に他の岩塊が落下した場合の予測解析について述べる。

### 2. 対象斜面の特徴

#### (1) 地形・地質的特徴

不安定岩塊を形成する地質は、新生代新第三紀中新世中期に噴出した火成岩類の流紋岩質結晶凝灰岩である。長さ約27km、幅は500~800mの規模でゆるやかに弧を描いたような形状で、中新世前期~中期にかけて堆積した海成の厚い碎屑岩類を貫入している(図-1)。岩塊は岩脈南縁のこれらの境界部に位置し、標高50~100mの位置に尖塔形に取り残されたような形状で露岩している。このような地形は以下のような要因や機構に起因しているものと推察される。

- ① 地質の強度的な差異により生じる差別侵食
- ② 岩脈の急冷時の堆積収縮に伴う冷却節理の存在
- ③ 節理面の風化による過去の岩盤崩落

#### (2) 斜面の状況

東側は比高差約50mの急崖が形成され、この直下に平坦地が存在する(図-3)。平坦地には数10cm~50cm程度の転石が溜まっており、一部に数m程度の大きい岩塊も認めら

\* 中央研究所 総合技術開発部  
\*\* 四国支店 技術部  
\*\*\* 大阪支店 技術部



写真-1 全景写真(正面上方より)



写真-3 全景写真(斜め後方より)



写真-2 不安定岩塊(上空より)

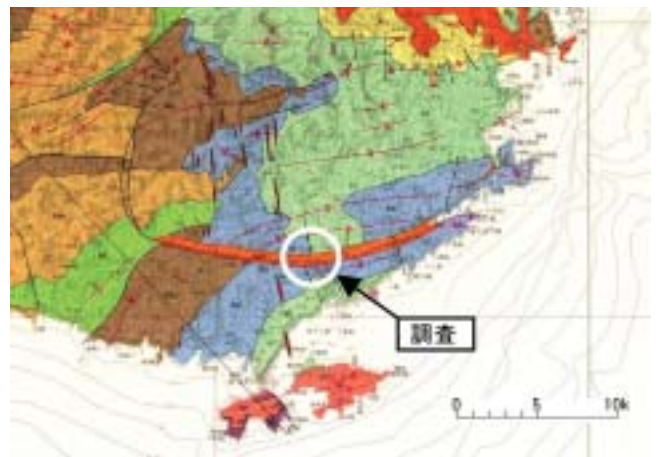


図-1 地質平面図における現場の位置

表-2 代表的な亀裂系

れる。この平坦地から2方向に沢筋が伸びており、一方は南方に、もう一方は南東方向に伸びる。南方に伸びる沢には、直径15~20cmの杉が約1本/4m<sup>2</sup>の割合で植林され、沢は県道に至る。南東方向に伸びる沢は直径10cm程度の雑木が密に繁茂している(図-3および写真-5)。

### (3) 不安定岩塊

不安定岩塊を形成する代表的な亀裂系の走向傾斜を表-1に示す。連続性の最も卓越した亀裂系1は岩塊を板状に分離し、亀裂系2、3は岩塊の底部を形成している。これらの亀裂系により岩塊は、写真-2のようにいくつかの岩塊に分離しており、主な岩塊の大きさと安定度を表-2に示す。

表-1 代表的な亀裂系

亀裂系	概要	走向傾斜(度)
亀裂系1	東西方向の垂直亀裂	EW±20, 垂直±10
亀裂系2	南北方向で東側に傾斜	N30E±15, 35E±15
亀裂系3	南北方向で西側に傾斜	N10W±10, 35W±5

岩塊番号	規模(大きさ、体積)	隣接岩塊	現状の安定度
①	7~8m×10m×2~6m	②, ⑨	A
②	14m×15m×3.5m	①, ③, ⑤, ⑨	A
③	13m×10m×1.5m	②, ④-1, ④-2,	C
④-1	7m×9m×2~4m	③, ④-2, ⑥	B
④-2	6m×3m×3m	③, ④-1	C
⑤	1.5m×3.5m×1~3m	③	A
⑥	3m×6m×3m	④-1	A
⑦	1.8m×3.5m×0.8~1.2m	③, ④-1, ④-2	C
⑧	3m×2m×0.4~0.8m	③, ④-2	C
⑨	6~8m×8m×2~5m	①, ②	B

A: 開口亀裂が連続し非常に不安定な岩塊  
 B: 所々に開口亀裂が認められやや不安定な岩塊  
 C: 亀裂は認められるものの密着している岩塊

亀裂は30~50cm開口しているものが多く、最大で1m程度開口している箇所も認められる。また、亀裂は目視で表面から2m以上開口している部分が多く、亀裂を介して岩塊が相対的にずれていることから、これらの岩塊が過去に変動したことを示している。これらの観察から表-2に示す岩塊のなかで、不安定と想定される岩塊は①、②、⑤、⑥、⑨であり、ハードあるいはソフト対策が必要と判断された。

対策の検討にあたっては、落石挙動の傾向を想定するため、平成11年に発生した落石の特徴および影響因子を分析し、次に落下して最初に斜面と衝突する地点を数値解析により推定して落石の経路を検討した。

### 3. 平成11年の落石状況

ここでは、平成11年11月に発生した落石の現場調査結果について述べる。落石の形状と大きさは、写真-4、6および図-2に示す長径約2.7m、厚さ約1.2mの盤状である。発生位置において側面から見ると長方形(図-2中の面B)を呈し、正面からは6~8の辺(図-2中の面A)からなる多角形である。踏査結果に基づく落石の落下状況は図-3および4の通りである。斜面上に認められる痕跡から落石の運動形態は大きく4つのステージに分けられる。ここで、番号は図-1および4中の位置を示す。

#### (1) 第1ステージ(図-3および4の①)

落石は図-3に示す広い面(面A)を底面として、側面からは、長方形に見える姿勢で自由落下し、転石溜まりに衝突し、この時、移動方向が変化(約40°)した。

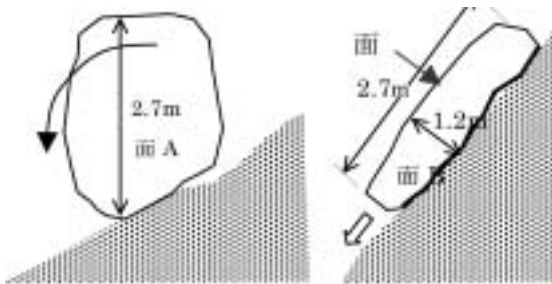


図-2 落石の落下時の姿勢

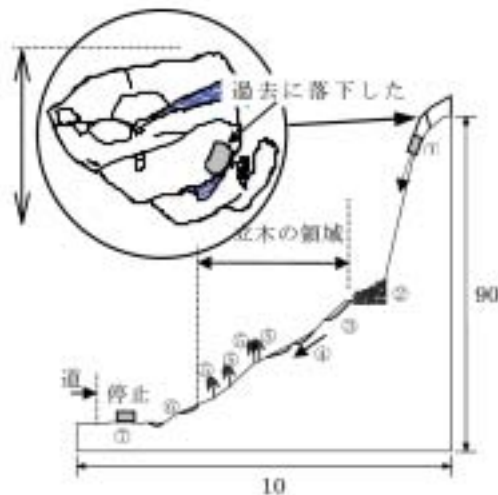


図-3 落石経路に沿った断面図

#### (2) 第2ステージ(図-3および4の②~③)

尾根と衝突し、移動方向が大きく変化(約110°)するとともに、落石の姿勢も大きく変化し、広い面が縦向きに変わったと考えられる。

#### (3) 第3ステージ(図-3および4の④~⑥)

樹木に残された擦過痕は、地表より2.6~3.0mの位置に残されている。これは落石の長軸方向の最大長より高い位置にある(写真-5)。また、斜面方向に伸びた楕円形の衝突跡が断続的に残されていることより、落石は車輪の様に回転と跳躍を伴って落下したと推察される。

#### (4) 第4ステージ(図-3および4の⑦)

平坦地に入り、杉と斜面との衝突によりエネルギーを減じて、道路から約5m手前で停止した(写真-4)。

落石の原因としては、それ以前に地震・降雨は発生していないことから、亀裂面の劣化に起因しているものと考えられた。すなわち、岩塊群の落石跡を観察すると、茶色の部分と白色の部分とが認められた。この茶色を呈する部分は亀裂表面が物理的風化を受けて土砂状となり、それが降雨

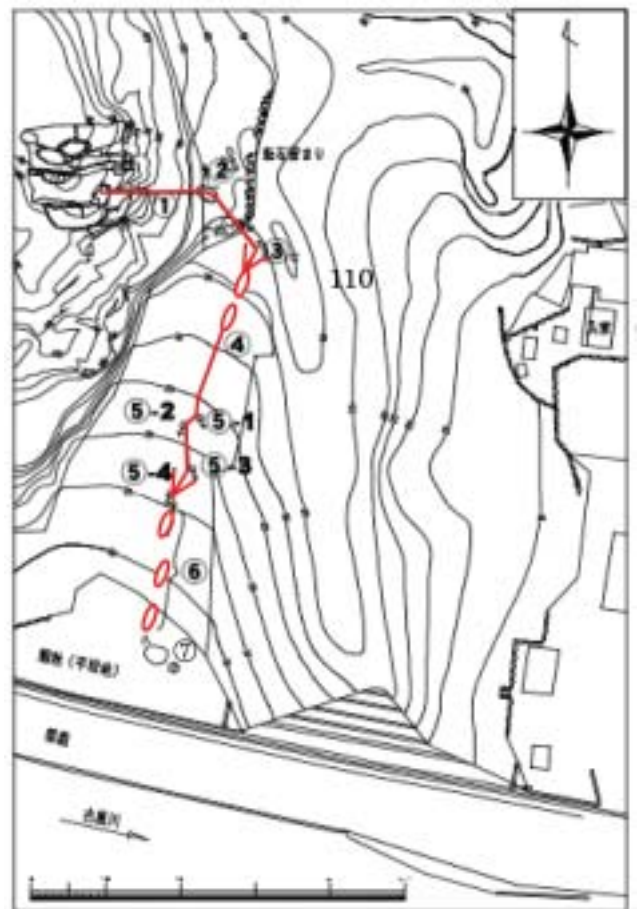


図-4 平面図と過去に発生した落石の経路



写真一4 停止位置での落石



写真一6 停止位置での落石



写真一5 落石の痕跡



写真一7 発生位置での落石と斜面の接触

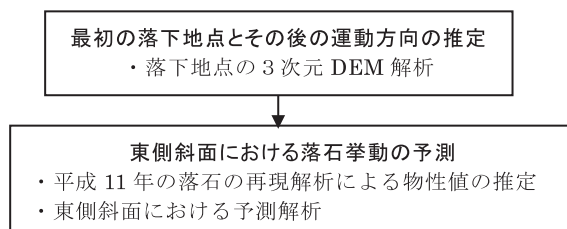
により流出して開口状態になった部分である。また、白色の部分は落石と岩塊群とが密着し、落石を斜面に結び付けていた部分と推察されるが、その面積は亀裂面全体に比して小さい(写真一7)。その結果、もともと限界状態にあった接触面がわずかに劣化して、今回の落石が発生したと推測される。

以上の観察結果から、本斜面において発生する落石は、地震などの外力が作用しなくても劣化の進行により落下しうること、また、形状が平板状である場合、縦横比の小さい面を側面として回転しながら落下しうることが示された。落下経路については、尾根の西側に衝突すれば沢に沿って落下すると推定された。しかし、不安定岩塊の底面の走向傾斜によっては、一回目の衝突地点が尾根の東側となる可能性があり、その場合は、尾根の東側を落下することになる。そこで、次に述べるように3次元DEM解析により、今後発生しうる落石の初回衝突位置を推定した。

#### 4. 落石の数値解析

落石の予測解析にあたり、最初の衝突地点までの落下方向は、岩塊底面の走向傾斜に支配されるものと考えた。そこで、3次元DEMにより亀裂をモデル化して衝突地点の予測を行った。ただし、回転慣性モーメントは、落石を球と

して近似計算しているため、衝突中と衝突後の運動方向が正しくない。したがって、3次元解析は衝突瞬間の位置を求めるまでの解析に制約されるので、衝突後の予測解析は2次元解析で行った。予測解析で用いる入力物性値は、平成11年に生じた落石の再現解析を行って推定した(図一5)。



図一5 概略解析手順

#### (1) DEMの概要

落石の数値解析手法は多種多様であるが、大きくは以下の2つの手法に分けることができる。①落石を大きさのない質点としてモデル化する手法、②落石を大きさや形状のある多角形としてモデル化する手法。前者を一般に質点系の手法と呼び後者を非質点系の手法と呼ぶ<sup>3)</sup>。

本解析で用いた個別要素法(DEM)は非質点系の手法であり、その特徴としては、落石を多角形要素によって離散化し、落石形状を反映することにより、①接触時に接触力が

重心を通らない場合に発生する回転モーメント、②並進速度が0でも回転する角が衝突して発生する法線方向力およびせん断力、③回転軸と重心が一致しないで回転する場合の遠心力を考慮することができる(図-6)。

DEMモデルは図-7に示すとおりであり、ブロック要素間の接触メカニズムは、斜面法線方向とせん断方向のバネ、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。バネにより、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。

DEMの詳細理論については、他の文献<sup>3)</sup>に詳しく記載があるので本論文では略する。

DEMの解析パラメーターとしては、バネ定数、粘性(減衰)係数、斜面方向のせん断強度(粘着力、すべり摩擦係数)が挙げられる。すべり摩擦係数は等価摩擦係数や既往の事例を参考にする。粘性減衰係数については、観測に基づいて推定された統計データがないことから、反発係数から間接的に設定するものとした。この際、反発係数(e)と粘性減衰係数の関係は、衝突時の機構を自由度1のモデルで表わし、

$$C^N = \frac{2|\ln e|\sqrt{K^N m}}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}} \quad (1)$$

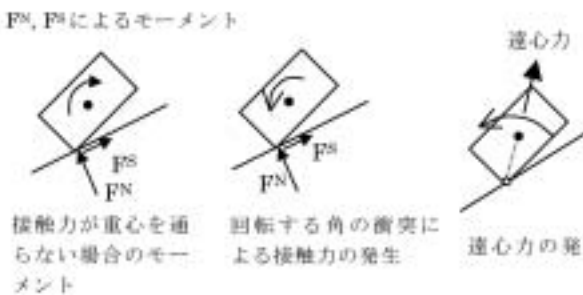


図-6 回転に起因した力の発生



図-7 2次元DEMモデル(落石と斜面の接触)

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ことができる<sup>4)</sup>。

ここで、mは質量である。粘性減衰係数は法線方向と接線方向では独立したパラメーターであるが、現段階では定量的に別々の値を設定する根拠が薄いため、同じ値としている。一方、バネ係数の標準的な設定方法は確立されていない。一つの方法としては弾性体の接触理論から、衝突時の法線方向の最大圧縮力と最大変位の割線の傾きを設定する方法<sup>3)</sup>が示されているので、本解析では、岩盤等級を参考にバネ係数を固定した。ただし、エネルギー損失を規定する粘性減衰係数は、バネ係数の値に関わらず、式(1)を入力する反発係数相当の値を設定することができるので、エネルギー損失に与えるバネ係数の影響は小さいものと考えられる。

(2) 上部の不安定岩塊の3次元解析

解析ソフトとしては、3次元DEMの解析コード3DECを用いた。3次元DEMの力学モデルは2次元の場合と同じであり、ブロックとブロックの接触機構を面の法線方向と面上の方向のバネ、ダッシュポット、およびモールクーロン則に基づくスライダでモデル化している。

ただし、前述のように回転慣性モーメントの計算については、落石を球として近似計算しているため、衝突時と衝突後の速度と方向が厳密でない。したがって、3次元解析は最初の衝突位置を求めるまでの解析に制約される。

1) 3次元解析モデルの作成

対象領域は崩落経路を規制すると考えられる尾根および沢地形を含む約100m四方の領域とした。ブロック形状は、5m~10m間隔の縦断面図より作成し、さらに踏査より求められた亀裂系のデータから亀裂面を設定して不安定岩塊を作成した。本解析では、主に危険度のランクAおよびBランクの岩塊を選定した(表-2)。図-8にDEMモデル用に作成された崩落ブロックを示す。

2) 解析手順と結果

まず重力を加えて安定した静的均衡状態を計算し、次に岩塊底面の粘着力を0、摩擦角を20°に低下させることにより崩落を発生させ岩塊の軌跡を求めた。バネ係数は、CM級とCL級岩盤の変形係数の中間値(5×10<sup>3</sup>kg/cm<sup>2</sup>)を参考に設定した。単位体積重量は2.3tf/m<sup>3</sup>である。

落下形態は図-9に示すようにブロック1(①)が先にすべりだし、続いて②、⑨、⑤の順にすべる。①が動かないと側面形状の影響で残りのブロックが移動できないことから、①はキーブロックと考えることができる。いったん滑りだすと岩塊底面の傾斜は②が一番きついで、②の速度が①よりも大きくなって先に尾根に衝突する。衝突位置は、複数の落石が落下した場合と1つの落石が落下した場合では、異なると考えられたので、①のみが落下するケースについても実施し

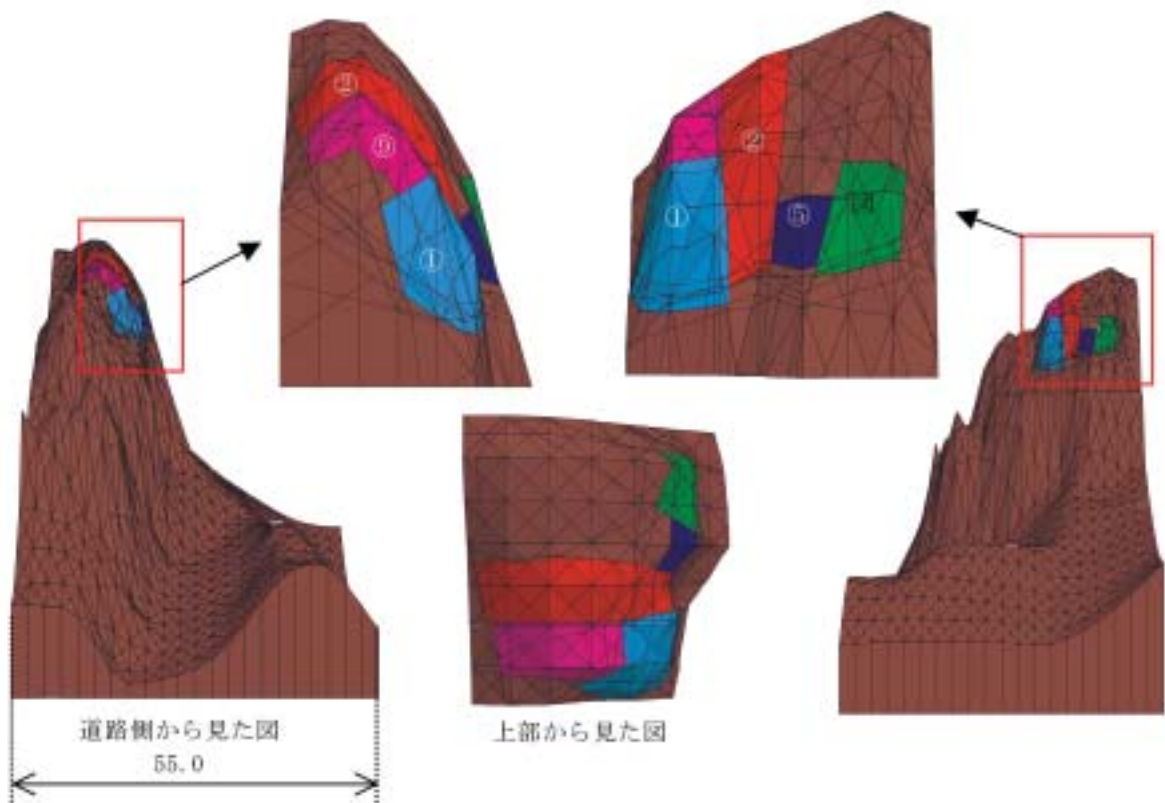


図-8 3次元解析モデル

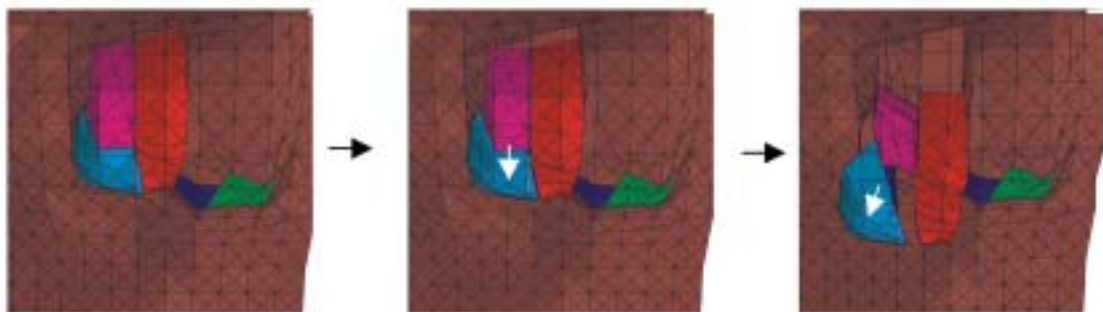


図-9 上部から見た初動の傾向

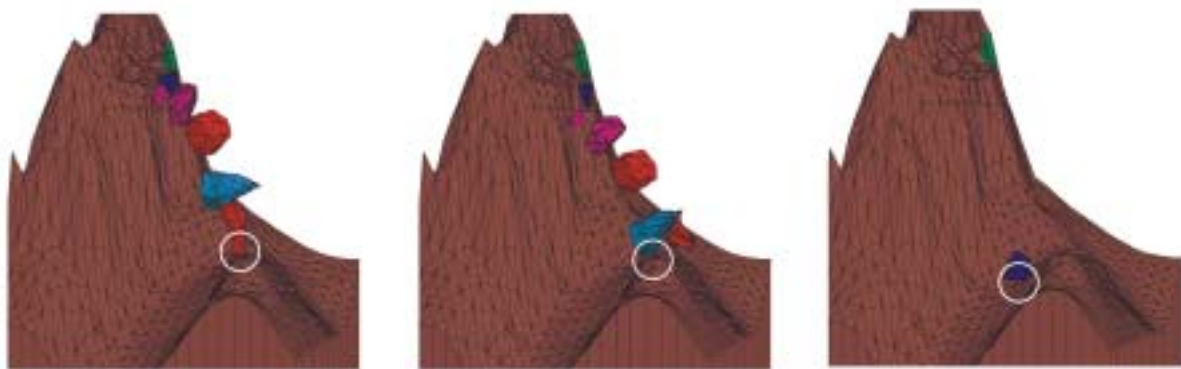


図-10 自由落下と初回の衝突位置(3番目の図ではB5意外の落石を消去している)

た。しかし、結果は同様に尾根の上部近傍であった。

斜面と衝突する位置は、いずれの落石も尾根の頂上周辺であるが、前述のように回転慣性モーメントの計算の問題から、初回の衝突以後の計算ができないため、その後の落下経路が沢沿いになるか尾根の東側になるかは、明確にできなかった(図-10)。そこで、対策の検討にあたって、沢沿いの運動については、過去に生じた落石を参考にするものとし、尾根の東側に転落する場合については、以下のように2次元解析により、その挙動を推定した。

### 5. 落石が尾根の東側に転落するケースの予測解析

尾根の東側に転落する落石の運動をシミュレートするにあたり、まず過去に生じた落石の再現解析を行った。再現解析の目的は、予測解析で適用する物性値の妥当性を確認すること、また、落石形状の影響を分析し、予測解析にあたって適切な断面形状を選定することである。

#### (1) 過去の落石の再現解析

##### 1) 転石溜りおよび落石のモデル化方法

解析は2次元とし、過去に生じた落石の経路に沿った斜面モデルについて行った。急崖斜面直下の転石領域は、落下した岩塊が停止して堆積したものと推定される。したがって、転石溜りは落石運動を抑制する効果があると考えられ、10cm～50cm程度の落石は停止しするが、過去に発生したような数m規模の岩塊については転石部を乗り越えて落下するようなモデルが必要である。そこで、落石が停止するのは、転石溜り部の凹凸の効果および衝突時に転石が崩れることによるエネルギー吸収によるものと考え、複数の岩塊の集合体としてモデル化した(図-11)。この際、岩塊の大きさを50cm～100cmの範囲でばらつきをもって発生させ、一部分を除去して崩壊させることにより不規則な接触状態になるようにした。

一方、落石のモデル化については、2次元であるため、落石運動の側面形状を仮定して設定しなければならない。落ちた落石は偏平な形状をしており、前述のように初期落下時と転石溜りとの衝突後では、姿勢が変化している。初期落下時は広い面が上向きで側面は長方形型であるが、斜面との衝突直後に向きを変え、広い面(図-2中の面A)を縦方向とし、回転を伴った跳躍運動により落下したと考えられる。この想定機構を裏付けるために、図-12に示すいくつかの形状により解析を行った。

##### 2) 物性値の設定

落石挙動は、衝突前後の速度変化によって跳躍量や速度が大きく変化する。したがって衝突時のエネルギー損失をモデル化する粘性減衰定数の選択によって解析結果が大きく左右される。この際、粘性減衰定数は直接その値を選定

するのではなく、反発係数から式(1)より算定して設定する。一方、反発係数は、衝突時の速度が速く重量が大きいほど、エネルギー損失が大きく低い値になる傾向が示されている<sup>3)</sup>。そこで、本斜面では当初の自由落下直後の衝突速度が大きいこと、さらに小さい50cm程度の落石の場合と数mの大きな落石の場合では、衝突時のエネルギーロスが後者のほうが大きくなることを考慮して、既往の文献を参考に50cmの場合は、0.2とし、大きな落石の場合は0.1とした<sup>3)</sup>。ただし、最初の衝突後は衝突速度が低下するので、緩斜面においては、大きな落石の反発係数を0.3とした。

バネ係数と摩擦係数は、類似斜面で適用した値を用いるものとして、それぞれ50,000kN/m、0.3とした<sup>5)</sup>。また、落石の密度は2.0とした。

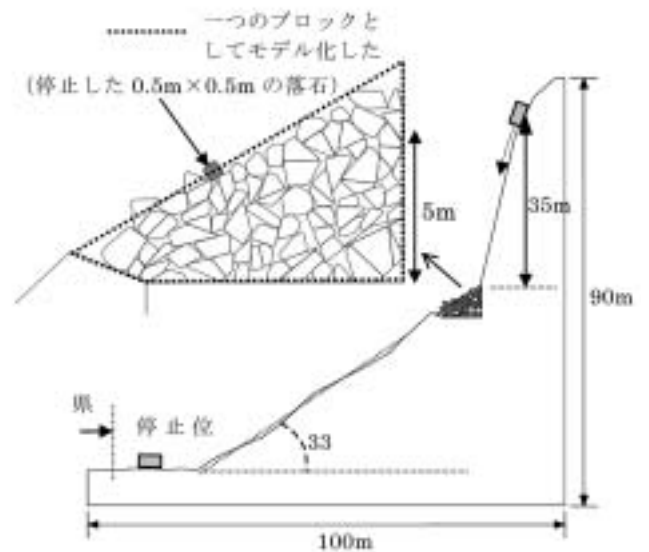


図-11 転石溜りを岩塊の集合とした斜面モデル

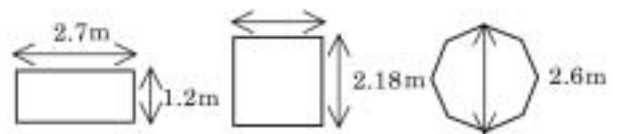


図-12 DEM解析に用いた落石形

#### 3) 再現解析結果

解析の結果、50cmの落石は、衝突によるエネルギーロスと凹凸部に落石がはまり込む効果により停止した。次に、大きな岩塊であれば、慣性力により転石溜り部分を乗り越えることを検証した。そこで、側面からみた形状として長方形のモデル、上からみた形状として正方形と8角形を用いた(図-11)。

計算の結果、正方形と8角形の場合については、回転して転石溜り部分を乗り越える挙動を示したが、長方形の落石は転石溜り部分で停止した(図-13)。これは、長方形は回転しにくいと考えられる(図-16)。以上の結果は、落石は当初の自由落下時には側面が長方形の姿勢であ

ったが、衝突時点で回転しやすい縦横比の小さい姿勢に変化して落下したことを裏付けている。

停止位置や軌跡について見ると、8角形の落石は実際に停止した位置を越えたが、正方形の落石のケースでは図-14のように跳躍量が大きいものの停止位置が実現象とおおむね整合している(図-13)。正方形落石の跳躍量が大きい原因は、立木の影響が反映されていないためと考えれば、斜面と落石の衝突機構は再現できており、本解析で用いた物性値はほぼ妥当と考えられる。

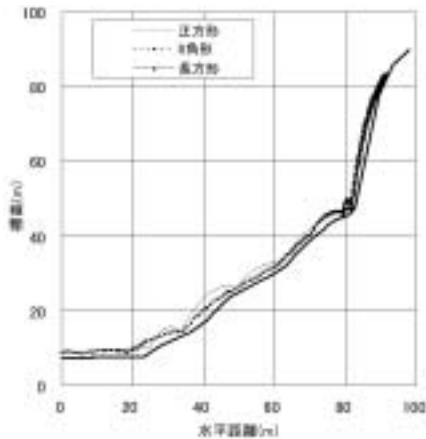


図-13 DEM解析から求められた大岩塊の軌跡

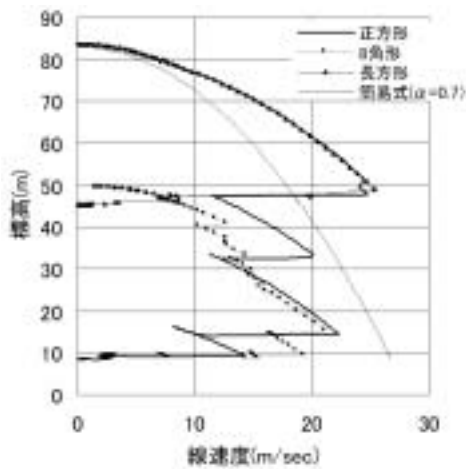


図-14 DEM解析から求められた大岩塊の速度

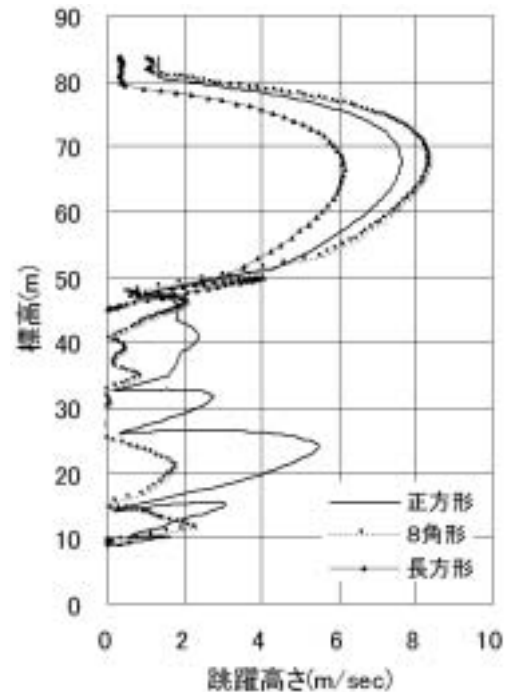


図-15 DEM解析から求められた大岩塊の跳躍

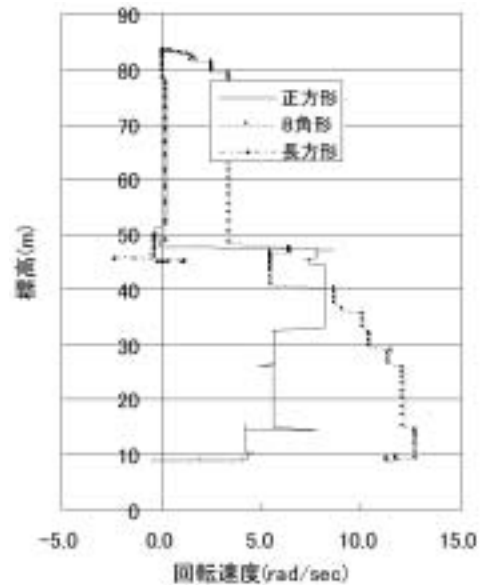


図-16 DEM解析から求められた大岩塊の回転速度

(2) 尾根の東側に転落するケースの予測解析

1) 斜面および落石のモデル

モデル化の方法は、前述の再現解析とほぼ同様であるが、自由落下後の衝突位置において転石溜りはないので、地形コンターにしたがって尾根上部は平坦な領域としてモデル化した(図-17)。斜面形状は、再現解析で用いた斜面形状とよく似ており急崖からの落下高さは両方ともおおむね40mであり、尾根から下の斜面傾斜は33~45°の範囲である。植生は、径の小さいかん木程度なので植生の抵抗効果はモデル化しなかった。

落石形状と大きさは、表-2中の①、②相当の大きさとし、形状は長方形とした。落石形状は厳密に長方形ではないが、詳細な落石形状の影響は、斜面の詳細な凹凸、強度特性や植生の不均一性などに起因したバラツキの要素の効果に比べて小さいものと想定した。

さらに大きさの影響を調べる目的で50cmおよび2mの正方形型の落石を落下させた。また、いずれの場合も落石が平坦部の端のほぼ同じ位置で衝突して斜面の最下部まで落下するように発生位置の底面摩擦を調整した。

反発係数やバネ係数は再現解析と同様の設定であり、第



一回目の衝突時の反発係数は、50cmの落石を0.2とし、その他の大落石の反発係数は0.1に設定した。斜面下部における反発係数も本来は大落石と50cmの落石では異なるが、反発係数は一律に0.3として、大きさに起因した影響を調べるものとした。

2) 解析結果

速度はいずれのケースについても自由落下した第一回目の衝突で半分以下に低下している(図-17)。これは、第一回目の衝突角度が斜面の法線方向に近いからである。すなわち、法線方向で衝突すると、重心の進行を止める向きに斜面があるので、すべりも生じにくく運動エネルギー損失が大きい。それに対して、接線方向の衝突であれば、たとえ摩擦が働いても落石が進行方向に回転あるいはすべって、重心の速度はそれほど低下しない。

落石対策便覧などに掲載されている速度残存係数( $\alpha$ )を用いた簡易式では、衝突角に依存した衝突時のエネルギー損失が反映されないため、本斜面のように急崖の下部に緩やかな部分がある場合は、速度が実際より大きく算定される傾向がある(図-17)。したがって、防護工を検討する場合は、この点に留意しないと、過大な設計となる。

落石の大きさの影響について見ると、下部斜面における速度は、小さい50cmの落石に続いて2mの落石が早い。また、10m規模の落石は、2mの正方形型の落石の速度に比べて遅い。これは、10mの落石運動がすべりを主体とした運動になっているためと考えられる(図-18)。すなわち、落石が大きくなるにつれて、回転と逆向きのモーメントが大きくなることによるためと考えられる(図-20)。

到達距離についても、速度の大きい50cmの落石に続いて2mの落石が大きく、10m規模の落石は、下部斜面の法尻で停止した(図-19)。すなわち、同様の形状であれば大きな落石の方が回転しにくく、速度も低くなるので、到達距離も短くなる傾向が認められる。

3) 落石が尾根の東側に転落するケースの対策

DEM解析から求められた速度から落石の運動エネルギーを算定すると数1,000kJを越える値となり、ハード対策で落石を抑止あるいは防護するには限界がある。そこで、本斜面の上部にある不安定岩塊については、破断センサーと警報装置によるソフト対策で対応するものとしている。ただし、破断してから最下部に到達すれまでの時間は、5秒程度のオーダーであることから、普段から小落石の発生などの兆候に十分注意すべきことを周知させる必要がある。

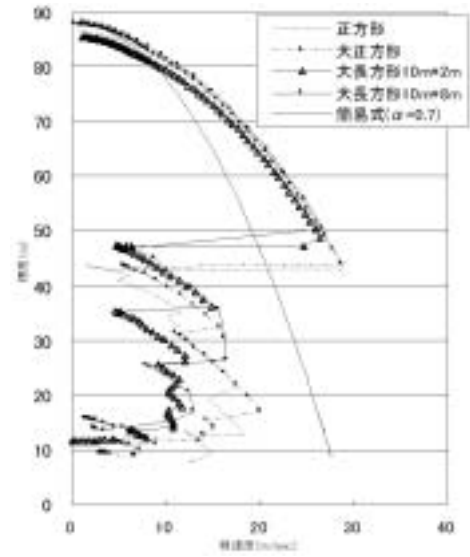


図-17 尾根の東側に転落する落石の速度

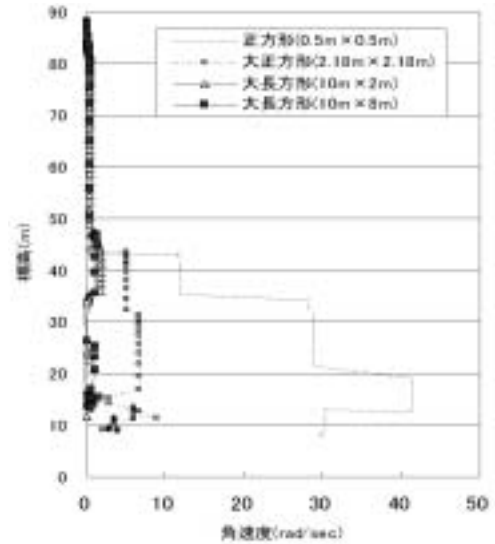


図-18 尾根の東側に転落する落石の角

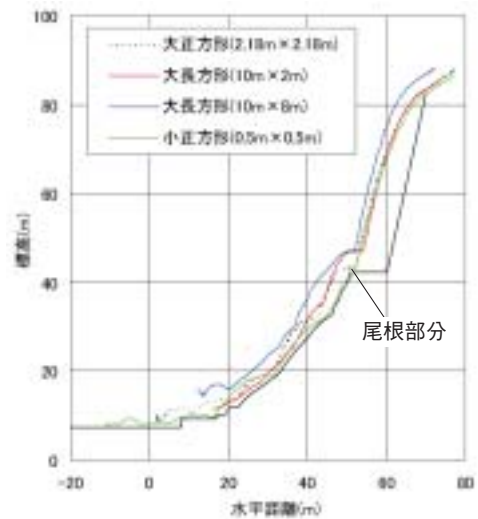


図-19 尾根の東側に転落する落石の軌

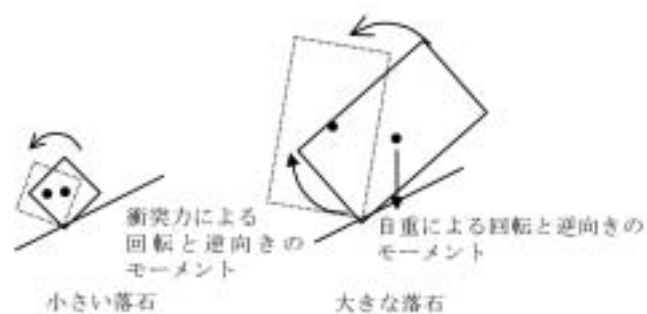


図-20 回転を抑制するモーメントの発生

## 6. まとめ

本斜面で生じた落石の現場踏査と数値解析は、今後、落石対策を検討する上でいくつかの重要な機構を示した。現場踏査から、当初の自由落下時は、大きな面を底面とし側面からは長方形に見える姿勢で落下した。次に尾根との衝突時点で姿勢が変化し、縦横比の小さい面を縦方向として車輪のように回転しながら落下したものと推察された。DEM解析からも、側面形状が長方形であれば尾根の平坦部で落石は停止するが、縦横比の小さい正方形あるいは八角形であれば跳躍と回転を伴って落下することが示された。以上の結果から、一般に落石挙動を推定する場合は、落石の形状と姿勢変化を考慮する必要がある、数値解析においても安全側の結果となるように形状と姿勢を数通り変えて計算する必要があることが示された。

斜面形状の落石挙動に対する影響も極めて大きいことが示され、急崖から落下する落石は、下部の平坦部において速度が大きく低減する。このような斜面形状の影響は、落石対策便覧などの簡易式では反映できないので、過大な速度条件を対策で設定することになりうる。一方、DEMを適用すれば落石の形状および大きさの影響が反映され、斜面上の位置によっては速度が十分低下するので大きな岩塊でも合理的な防護方法の可能性が示される。また、到達域が推定されることから、危険区域を判定する一助となりうる。

過去に発生した落石は、南東の沢に沿って落下した。しかしながら、残っている不安定岩塊は底面の走向傾斜によっては、最初の平面的な衝突位置が異なり、その後の落石経路が大きく左右される。そこで、3次元DEM解析により、最初の衝突位置を推定した結果、必ずしも沢方向に落下しないことが示された。しかしながら、回転慣性モーメントの計算が、球として近似されているので、その後の衝突運動の推定はできなかった。

今後の課題としては、落石の大きさや形状の影響を定量的に分析するための調査・実験、さらに任意形状の落石を動的に解析できる3次元数値解析手法の開発や、大きな落石

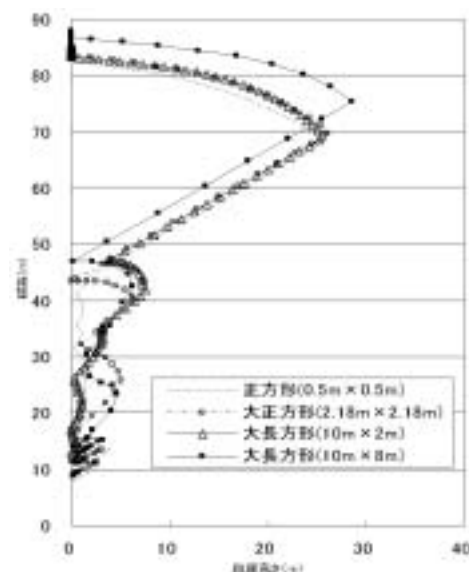


図-21 尾根の東側に転落する落石の跳躍高

が衝突した際の落石自体の破壊と分離のモデル化方法などが挙げられ、数値解析技術の向上を図ることにより、合理的な対策に役立つ数値解析の確立を目指すものである。

謝辞：本稿の執筆にあたり、東京農工大学の中村浩之教授には、その方向性と妥当性について貴重なご指導をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。また、和歌山県土木部砂防課の松本司班長には、本業務の実施にあたり大変お世話になったことに対し、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、2000年
- 2) 中島裕一、倉岡千郎、野田貴久：個別要素法による落石運動における落石形状の影響分析、地すべり学会研究発表会、2002年。
- 3) 日本道路協会：落石対策便覧に対する参考資料（落石シミュレーション手法の調査研究資料）2002年
- 4) 大町達夫、荒井靖博：個別要素法で用いる要素定数の決め方について、構造工学論文集、Vol.32A、pp.715-723、1986年
- 5) 倉岡千郎、太田敬一：立ち木の影響をモデル化した落石の個別要素法による解析、土木学会、第五回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム、2000年、pp.428-429