

ブロックモデルによる三次元落石シミュレーションの構造

Structure of 3-D rock fall simulation program using block model

氏平増之*・川村洋平**

Masuyuki UJIHIRA and Youhei KAWAMURA

Authors have studied on the 3-dimensional rock fall simulation method to evaluate rock fall characteristics such as falling velocity, falling trajectory, jumping height, horizontal spread and traveling distance correctly. In this paper, the ways how to compose a slope model using measured data, how to judge the triangle number over which the block is moving, how to judge the falling block is in contact condition or not to the element triangle and so on are discussed. It is concluded that reasonable rock fall trajectories and also horizontal spread could be calculated when the initial posture of the block and slope angle were changed randomly.

Key Words: rock fall, 3-D simulation, horizontal spread, travel distance

1. はじめに

落石の危険性がある斜面が凹凸のある複合型斜面である場合は、落下軌跡が直線的にならない場合が多い。このような斜面の脚部に防護構造物を構築する場合、横方向に広がる確率を知る必要がある。横方向への分散確率を求めるためには二次元シミュレーション法を適用することが出来ない。三次元シミュレーション法を用いる必要がある。しかし、三次元シミュレーション法に関しては現在研究途上にある。梶谷ら(1997¹⁾)は球状モデルを用いた方法を提案しており、著者ら(1997²⁾、2004³⁾)は落石をブロックモデルで近似する方法で研究を進めている。ブロックモデルを用いた場合には落石の形状を変えることが可能であり形状を変量とした解析が可能という長所がある。本報文ではブロックモデルを用いた場合の三次元落石シミュレーションの構造について述べる。

2. 運動方程式とシミュレーションのアルゴリズム

本シミュレーションでは(1)、(2)の並進運動と回転運動の運動方程式を離散化して加速度、速度、変位、回転角加速度、角速度、回転角度等を計算する。

$$W \cdot \ddot{u} + \eta \cdot \dot{u} + \kappa \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$I \cdot \ddot{\theta} + \eta \cdot \dot{\theta} + \kappa \cdot r^2 \cdot \theta = 0 \quad (2)$$

具体的には、(1)、(2)式を(3)、(4)式のように差分近似して用いる。ただし、 W :質量、 u :変位量、 κ :バネ定数、 η :粘性減衰定数、 θ :回転角、 r :回転半径 とおく。

$$W [\ddot{u}]_t = -\eta [\dot{u}]_{t-\Delta t} - \kappa [u]_{t-\Delta t} \quad (3)$$

$$I [\ddot{\theta}]_t = -\eta \cdot r^2 [\dot{\theta}]_{t-\Delta t} - \kappa \cdot r^2 [\theta]_{t-\Delta t} \quad (4)$$

この計算における斜面とブロックの位置関係は

図-1(a)に示すようであり、斜面全体は三角形要素で構成する。衝突機構は同図(c)のようにブロックと斜面間のX,Y,Z方向にバネ、ダッシュポット、スライダーを配置しており、(1),(2)式の κ がバネの剛性、 η がダッシュポットの粘性減衰定数である。放物運動時には κ と η が無視される。本シミュレーションにおいては、回転運動計算時に慣性モーメントを計算しやすくするため9つの座標系を用いている。重要な座標系は図-1(a)で用いている座標系1、三角形平面上にX,Y軸を重ね合わせた図-1(b)の座標系4、ブロック重心を原点とし三辺と平行な座標軸を持つ座標系9の3種類である。他の座標系は座標系1⇔座標系9間の補助的な座標系である。

シミュレーションにおけるメインルーチンの流れをプログラム構成に沿って描いたのが図-2である。

* 正会員 工博 北大大学院工学研究科

** 正会員 博士(工学) 筑波大機能工学系

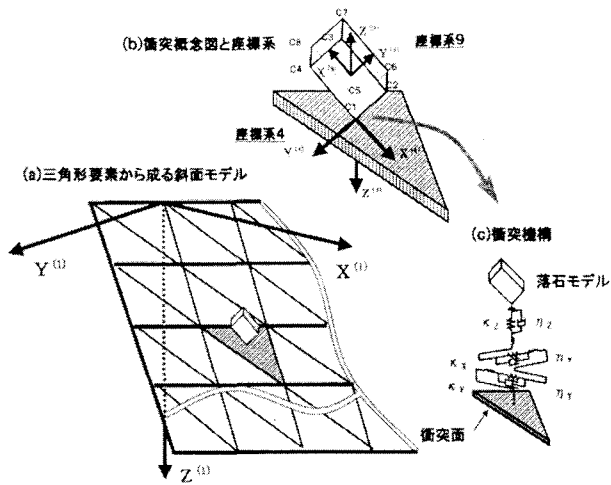


図-1 斜面のモデルと衝突機構

メインルーチンの(1)～(7)はブロックを落下させる前の処理である。同図(1),(2)で変数の宣言を行うとともに計算結果保存用ファイルを開いておく。(3),(4),(5)ではブロック三軸径、初期重心座標、密度、斜面を表す測定点の座標を読み込む。かつ斜面モデルを作成、各座標値に乱数を加え斜面を構成する各三角形要素に凹凸の変化を与える。(6),(7)では落下前のブロック8頂点の座標値を算出しておくとともに三軸回りに回転、初期姿勢に変化を与える。(8)～(10)の太線で区分した範囲が放物運動サブルーチンであり、時刻を進めながら放物運動の計算を進める。各時刻ごとにブロック重心が設定した範囲内にあるか、設定した下限の速度以上であるかを判定し設定範囲外、下限速度以下であれば(14)でデータファイルを閉じて計算を終了する。終了条件を満たしていなければ(10)で斜面との接触判定を行う。接触していなければ、放物運動の計算を繰り返す。接触していれば(11)の衝突運動の計算に移る。衝突運動においても、放物運動の計算と同じく(12)の終了判定と(13)の接触判定を行い、接触していなければ、放物運動のサブルーチンを呼び出し、接触していれば衝突運動の計算を繰り返す。計算終了と判定された後は(14)で計算結果を書き込んだデータファイルを閉じて計算を終了する。

メインルーチンの(8)～(10)に相当する放物運動のサブルーチンを図-3に示す。同図(i),(ii)では、座標系ごとで区別して使う変数の宣言、放物運動サブルーチンでの時間刻み、接触反力を0とする初期化を行っている。図-3の(iii)～(ix)が放物運動の主要部分である。(iii)で並進運動の速度、変位量、ブロック頂点、重心の新たな座標値を

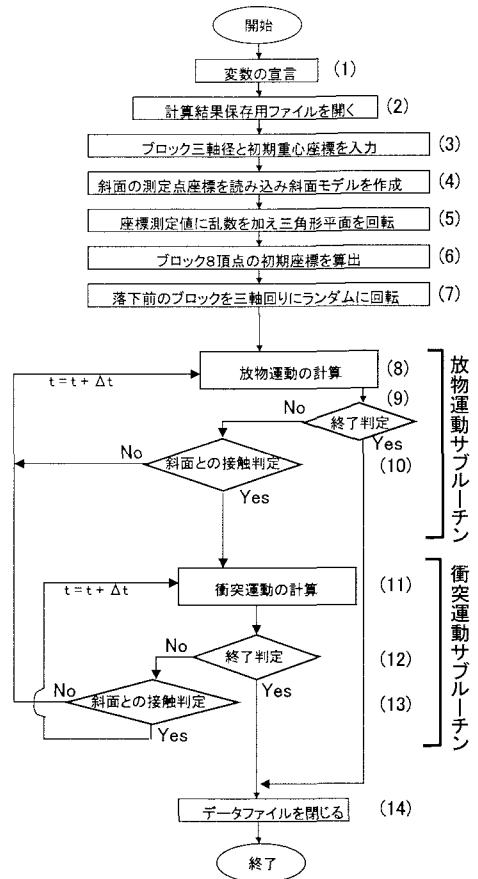


図-2 計算プログラムのメインルーチン

計算し、(iv)ですべての計算値を座標系1から座標系9へ座標変換する。(v)では、ブロック座標系である座標9上で、ブロックに対する外力モーメント、慣性モーメントを計算し、(vi)で回転運動の回転角増分、角速度、回転角を求め、(vii)で並進変位と回転変位を加え合わせた座標系9上での新たなブロック頂点座標を求める。(viii)ではブロック頂点座標等の計算値を座標系9から全体座標系である座標系1に逆座標変換する。(ix)では Δt 後のブロックの重心がどの三角形上に投影されるかの位置判定を行っている。(x)、(xi)はメインルーチン中の(9),(10)を再度掲げており、終了と判定された場合はメインルーチンの(14)へもどる。また、斜面と接触していると判定された場合はメインルーチンの(11)へ進む。

次に、図-4は図-2のメインルーチン中の(11)～(13)の部分に相当する衝突運動のサブルーチンである。

図-4の①、②はこのサブルーチンで用いる変数の宣言、時間刻み、バネ定数、摩擦係数の設定を行う。③では、

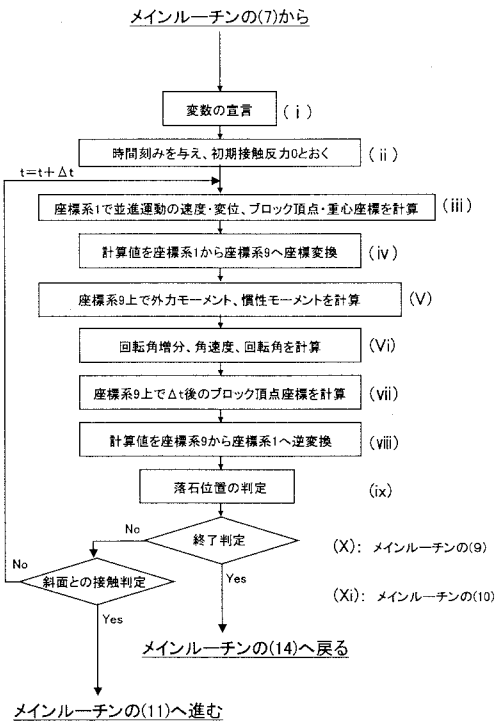


図-3 放物線運動のサブルーチン

図-1(b)に示す C1～C8 のどの頂点が衝突した場合でも衝突頂点の番号を C1 とするように、規則的に頂点番号を入れ替える操作を行っている。これにより、接触点の変位量を追跡できる。④は衝突運動中も現在の三角形から隣接する三角形へ重心位置が切り替わる場合があるため、位置判定を行う。⑤では、ブロック頂点、重心座標、三角形頂点座標を全体座標系である座標系 1 から三角形上に原点がある座標系 4 へ座標変換する。⑥では座標系 4 上で(1)式による並進変位増分、変位後の新たなブロック座標、加速度を計算する。次いで、⑦において一旦斜面との接触判定を行い、接触していなければメインルーチンの放物線運動サブルーチン(8)へ移る。接触中と判定されれば⑧で接触力の増分とその累積を計算する。⑨で計算値を座標系 4 からブロック座標系 9 へ座標変換する。⑩において座標系 9 上で外力モーメント、慣性モーメントを求め、回転の角加速度、角度増分、ブロック頂点変位、新たな座標値を計算する。⑪で、計算値を座標系 9 から座標系 1 へ逆変換する。その後⑫で終了判定を行い、衝突運動終了と判定されればメインルーチンの(14)へ進む。終了と判定されなければ斜面との接触判定を行う。

接触と判定されれば、時刻を 1 つ進めて同じ計算を繰返す。接触していないと判定されればメインルーチンの(8)へ戻り放物運動のサブルーチンへ進む。衝突運動のサブルーチンにおける⑫、⑬は説明の都合上、メインルーチンの(12)、(13)を再掲したものである。

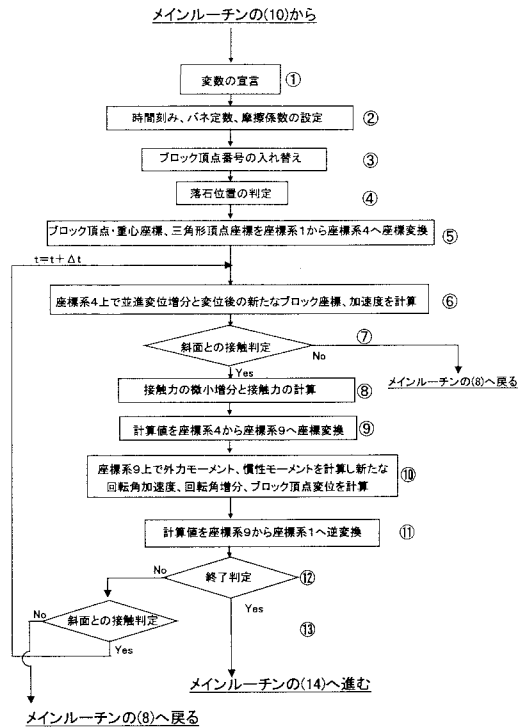


図-4 衝突運動のサブルーチン

以上が、パソコン内での数値計算の流れである。プログラム中に含まれる、斜面モデルの作成法、凹凸の変化を斜面に与える方法、ブロックの位置判定法、斜面への接触判定法を次章以降に述べる。

3. 座標測定と斜面モデルの作成

シミュレーションに用いる斜面モデルをつくるためにはノンプリズム型レーザ測距儀とセオドライトを用い三次元座標を測定する。ここでは、図-5 の写真に示すような碎石場の斜面をモデルの原型とした。実際には写真の長方形で囲んだ範囲を横に 11 列 10 分割、縦に 23 行 22 分割し、縦横の交点 253 点の X,Y,Z 座標を測定した。一旦、測距儀位置を原点とするが、測定後、斜面頂部中央付近に原点を持つ座標系に座標変換する。縦横 1 スパン

Figure 1: A black and white photograph of a geological outcrop. A rectangular area is outlined with a white border. Above the rectangle, a label "風標の原点" (Origin of the wind gauge) points to a specific location. To the left of the rectangle, a label "測点253点" (Measurement point 253) points to a location. Below the rectangle, a label "幅: 8m" (Width: 8m) indicates the width of the area. The outcrop shows various rock formations and textures.

4. ブロック位置の判定法

$$\begin{aligned} \text{点}q_1: & \quad x_1=\text{ep}(i,j,1), & y_1=\text{ep}(i,j,2) \\ \text{点}q_2: & \quad x_2=\text{ep}(i,j+1,1), & y_2=\text{ep}(i,j+1,2) \\ \text{点}q_3: & \quad x_3=\text{ep}(i+1,j,1), & y_3=\text{ep}(i+1,j,2) \\ \text{点}q_4: & \quad x_4=\text{ep}(i+1,j+1,1), & y_4=\text{ep}(i+1,j+1,2) \end{aligned} \quad (5)$$

まず、図-6(b)の $\triangle q_1q_2q_4$ においてブロック重心が直線 q_1q_2 のどちらにあるかを判定する。判定では q_1q_2 の直線

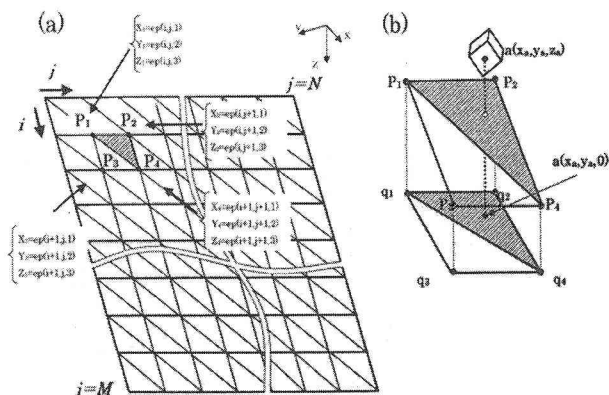


図-6 斜面の概念図と鉛直投影図

$$f_{12}(x, y) = y - y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (6)$$
$$f_{24}(x, y) = y - y_2 - \frac{y_4 - y_2}{x_4 - x_2}(x - x_2) \quad (7)$$
$$f_{41}(x, y) = y - y_1 - \frac{y_1 - y_4}{x_1 - x_4}(x - x_1) \quad (8)$$

あれば重心が直線 q_4q_1 に対し q_2 側にあると判定する。

$$\begin{aligned} f_{12}(x_a, y_a) \times f_{12}(x_4, y_4) &\geq 0 \\ f_{24}(x_a, y_a) \times f_{24}(x_1, y_1) &\geq 0 \\ f_{41}(x_a, y_a) \times f_{41}(x_2, y_2) &\geq 0 \end{aligned}$$

- 258 -

5. ブロック頂点の三角形平面への接触判定

ブロックの8つの頂点のどれか一つが上で位置判定された三角形平面に接触しているかどうかを Δt ごとに判定し、接触していなければ図-2における(8)の跳躍運動サブルーチンへ、接触していれば図(11)の衝突運動サブルーチンへ進む。接触状態の判定には、まず、ブロック重心が位置している三角形平面の平面式をつくる。ブロック重心が図-6(b)の $\triangle P_1P_2P_4$ の範囲内に位置している場合を例にあげて示すと次のようである。三角形平面式を

$$ax + by + cz = d \quad (9)$$

とする。図-6(b)の三角形 $\triangle P_1P_2P_4$ の場合であれば、式(9)の係数は P_1 から P_2 と P_4 へのベクトル成分を夫々、

$$\begin{aligned} Ve.g &= x_2 - x_1, & Ve.h &= y_2 - y_1, & Ve.i &= z_2 - z_1 \\ Ve.j &= x_4 - x_1, & Ve.k &= y_4 - y_1, & Ve.l &= z_4 - z_1 \end{aligned}$$

(10)

とした場合、

$$\begin{aligned} a &= Ve.h \times Ve.l - Ve.i \times Ve.k \\ b &= Ve.i \times Ve.j - Ve.g \times Ve.l \\ c &= Ve.g \times Ve.k - Ve.h \times Ve.j \end{aligned} \quad (11)$$

と表せ、三角形三頂点のX,Y,Z座標値から平面式を決定できる。ブロックの三角形平面に一番近い頂点座標を下式

$$h(x, y, z) = ax + by + cz - d \quad (12)$$

に代入した時、 $h(x, y, z) \geq 0$ であればブロック頂点は三角形平面に接触しており、 $h(x, y, z) \leq 0$ であれば接触していないと判定する。接触判定はブロックの8頂点全てについて行い、 $h(x, y, z)$ が最も大きい頂点を図-1(b)のようにに接触点C1とおき、他の頂点番号は一定の規則に従い入れ替える。

6. 斜面に与える凹凸の変化

斜面に局所的な凹凸がある場合の落石では、凹凸が著しいほど落下軌跡が複雑な形になると予想される。走向方向へ広がる確率も高くなると考えられ、これを考慮に入れた防護工の設計が必要である。凹凸の表現を正確に行うには座標測点数を増やし三角形要素による斜面の分割を細かくする方法がある。しかし、計算時間を10min/回前後に抑制できる測点数は300点以内である。幾何学上、凹凸が存在することは衝突点の傾斜が異なることのみを意味するので、三角形平面をランダムに変化させることで表現する手法をとった。本論文では斜面の凹凸を

変化させる方法として碎石場で測定した253点のX,Y,Z座標値に直接乱数を加えることとした。本計算では凹凸の測定値が、平均値0、標準偏差0.07mであることを参考に3種類の乱数を発生させることにする。すなわち図-7に示す $\sigma=0.07m$ 、 $0.14m$ 、 $0.28m$ の分布に従う乱数をつくり、これを、測定点ごとに与えることとした。この方法は、実測したデータと凹凸の対応関係が分かりやすく実用的な方法と考えられる。

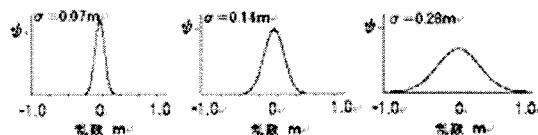


図-7 初期座標値に与える乱数の分布例

7. 計算条件と計算結果

本解析では、3.で述べた比高83m、平均傾斜39°の沢型斜面の頂部中央付近からブロックを落下させる設定とした。斜面中央部の斜面長は約132mであり斜面脚部に60mの平坦部を設けた。走向方向の幅は58mとしている。ブロック形状は塊状岩塊を想定し、 $0.5m \times 0.5m \times 0.5m$ で質量330kgとした。計算における時間刻み Δt は表-1に示すように跳躍運動時は $1 \times 10^{-3}s$ 、衝突運動時は $1 \times 10^{-4}s$ とした。

表-1 計算条件

	形状	塊状	
		長軸径	0.5 m
岩石	寸法	中軸径	0.5 m
		短軸径	0.5 m
	質量		330 kg
	密度		$2.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	初動時の落下高さ		2.0 m
	初動時の落下速度		0 m/s
	初動時の回転速度		0 rad/s
解析条件	シミュレーション回数	各 case 100 回	
	時間刻み	跳躍時	$1.0 \times 10^{-3} \text{ s}$
		衝突時	$1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$
	剛性定数	κ_x	$2.0 \times 10^6 \text{ N/m}$
		κ_y	$2.0 \times 10^6 \text{ N/m}$
		κ_z	$2.0 \times 10^6 \text{ N/m}$
	粘性減衰定数に乘ずる定数*	α_x	1/2000
		α_y	1/2000
		α_z	1/200
斜面	摩擦係数		0.3
	斜面高さ		83 m
	斜面角		39°
	局所三角形の頂点座標に与える乱数の標準偏差	$\sigma \text{ case1}$	0 m
		$\sigma \text{ case2}$	0.07 m
		$\sigma \text{ case3}$	0.14 m
		$\sigma \text{ case4}$	0.28 m

※ α は粘性減衰定数 $\eta = \alpha V_m^2 / (2(W\kappa)^{0.5})$ とした時の定数。

剛性定数は $\kappa = 2 \times 10^6 \text{ N/m}$ とした。粘性減衰定数 η については、 $\eta = \alpha V_m^2 (2\sqrt{W\kappa})$ とおいた。 V_m は衝突速度

である。岩塊の鉛直落下によるリバウンド量と飛び出し速度には限界があるとみなし、ここでは、自由落下による飛び出し速度が落下高さ 2~20mで 3.0~4.0m/sになるよう α を 1/200~1/2000 と設定した。接線方向のスライダーに与える摩擦係数は $c=0.3$ とした。また、ブロックは斜面の 2.0m上部に重心を設定して自由落下させた。ブロック姿勢は、三辺が座標軸と平行になるように設置させた後、X,Y軸回りに 45° ずつ回転させ落下させた。

計算プログラムは VisualBasicVer.6.を用いて書いており、図-8 上半部のように PC 画面からブロック三軸径、初期のブロック重心座標、剛性定数、粘性減衰定数の決定方法、ブロック密度、計算回数、斜面に凹凸を与えるかどうか、ブロック初期姿勢をランダムに変化させるかの計算条件を書き込む。Start ボタンをクリックして計算を開始させる。一般のパソコン上で計算できる。計算開始と同時に図-8 中段のテキストボックスに刻々のブロック重心座標、三軸方向の並進速度、放物運動中か衝突運動計算中かの区別、実時間を表示させている。また、図-8 下部のボックスには斜面脚部からの到達距離、脚部での並進速度、回転速度、跳躍量を表示させている。また、刻々のブロック頂点座標からブロック軸径を計算させ、与えた軸径初期値と一致しているかのチェックを行っている。

計算結果の三次元表示プログラムを別途作製し、任意の角度から落下軌跡を見ることが出来るようにした。

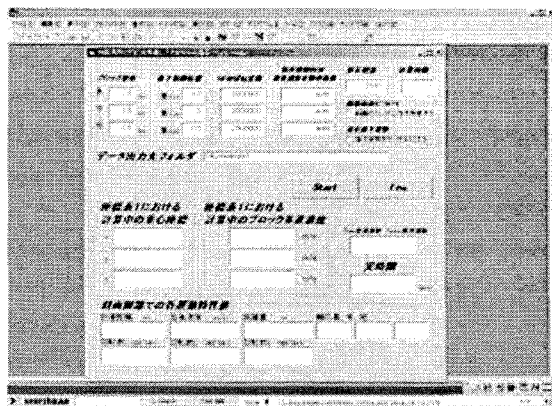
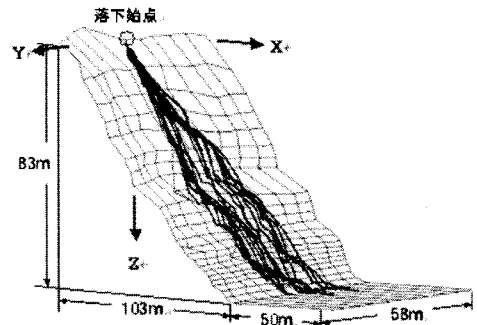


図-8 計算条件と主な計算結果を表示させる PC 画面

図-9 が $\sigma=0.07m$ の凹凸を斜面に与えて 30 回計算させた時の落下軌跡である。同図(A)は Z 軸周り 45° の位置から見た軌跡であり、同図(B)は Z 軸方向から見た軌跡である。冒頭で述べたように三次元数値シミュレーション

法の最大の利点は落石の走行方向への広がりを知ることができる点にある。図-9 の条件下における走行方向への広がり標準偏差は $\sigma=9.27m$ である。両側 $\pm 2\sigma$ の幅は 37mであり、95%はこの範囲に収まると推定される。

(A)三次元的に見た塊状ブロックの落下軌跡 $\sigma=0.07m$ 。



(B)真上から見た塊状ブロックの落下軌跡 $\sigma=0.07m$ 。

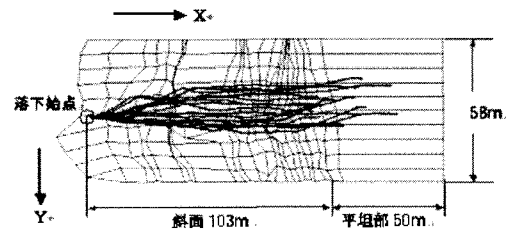


図-9 落下軌跡の計算事例

8. まとめ

本報文ではブロックモデルを用いた三次元落石シミュレーションプログラムにおける、運動方程式計算法、斜面モデル作成法、重心位置判定法、接触判定法、斜面における凹凸の表現法等を示した。また、走行方向への落石の広がりに関しては、複数回の計算値による標準偏差から 95%等の確率で分散する幅を評価することが出来ることを示した。

参考文献

- 1) 樹谷浩・福田尚晃・堤下克彦(1997):斜面上の落石の運動解析手法の開発, 構造工学論文集,43A,pp.1589-1596.
- 2) 氏平増之・細谷昭悟・鈴木新吾(1997): 三次元落石シミュレーションの試み,北海道応用地学合同研究会論文集, No.8, pp.169-175.
- 3) 細谷省悟・中根昌士・松本直樹・氏平増之・樋口澄志(2004): 落石の三次元数値シミュレーションに関する研究(続報) -凹凸のある碎石場の斜面へ適用した場合-, 応用地質, 45, 1, pp. 2-12.