

鳥取県西部地震で発生した落石と 3 次元個別要素解析例

Three-Dimensional Numerical Simulation for Rockfalls -Application to a Rockfall due to the Western Tottori Earthquake 2000-

谷口洋二*・西村 強**・精山誉志***・木山英郎**

Yoji TANIGUCHI, Tsuyoshi NISHIMURA, Takashi SEIYAMA and Hideo KIYAMA

Rockfalls are of interest to engineers if they endanger human lives or structures. A numerical model using Distinct Element Method has been developed for the study of the spatical movement of blocks striking a three-dimensional topography. Uncertainties related to ground characteristics are treated with the Monte-Carlo Method, generating probabilistic values on their predefined distributions.

This paper describes one application of this model to a rockfall which happened due to the western Tottori earthquake 2000. The result permits a delimitation of end -points (maximum reach) and possible trajectories. The topography of the rockfall slope is briefly described with other rockfall slopes.

Key Words: Western Tottori Prefecture Earthquake, DEM, Rockfall, Monte-Carlo Simulation

1. はじめに

山地が多い我が国においては、落石に対する予防策・防護策は重要な問題である。2000 年 10 月 6 日に発生した鳥取県西部地震においても落石が発生し、被害が発生した。落石による被害軽減のためには、発生の素因、誘因を把握することが重要であるが、発生時の運動形態を予測しておくことも助けとなろう。落石運動は、落石形状、発生地点の地形や地表面の特性（植生の有無等）に影響を受ける。しかし、実際の斜面において斜面の性状や落石形状等を詳細にモデル化することは困難である。

本報告では、鳥取県西部地震において発生した落石の事例より 4 地点について発生斜面の地形的特徴を示した。そして、そのうちの 1 斜面に対して、3 次元個別要素法（Distinct Element Method；DEM）¹⁾ による落石軌跡の解析を行った。解析に際しては、斜面性状を表現する試みとして、解析に用いた斜面を 5 つの領域に分割し、各領域ごとに接触剛性係数 η が中央値と分散を有する量として与え、モンテカルロ法を併用する工夫を導入した。

2. 鳥取県西部地震における大規模落石地域の地形地質的特徴

2000年10月6日に鳥取県西部地方の山岳部を震源とするM7.3の地震が発生した。この地震では図-1, 2に示す震源地に近い山間部において多くの落石や斜面崩壊が見られた。これらのうち、本章では、発生した落石崩壊（径5

* 正会員 サンイン技術コンサルタント（鳥取大学大学院社会人課程）

正会員 鳥取大学工学部土木工学科 *学生会員 鳥取大学大学院土木工学専攻

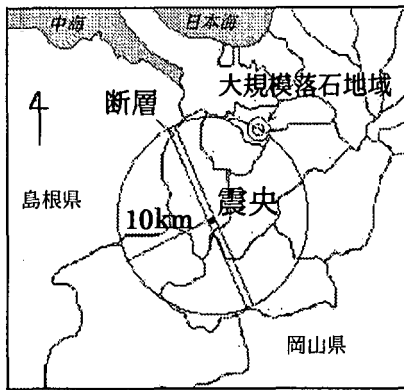


図-1 空中写真判読による斜面崩壊位置

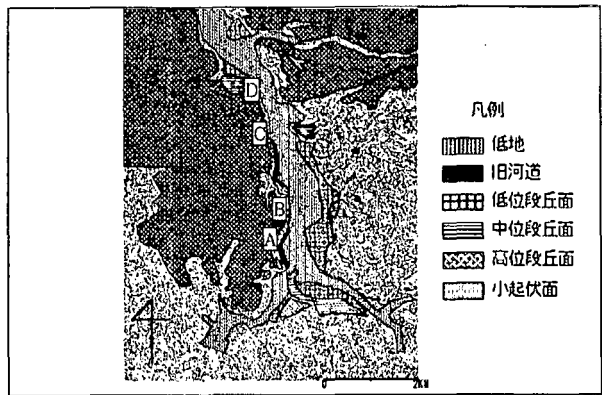


図-2 落石発生地域の地形区分図

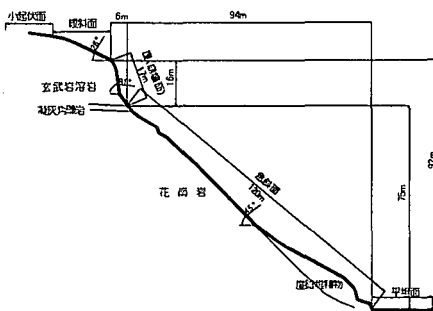


図-3 地形地質断面図 1 (B 地点)

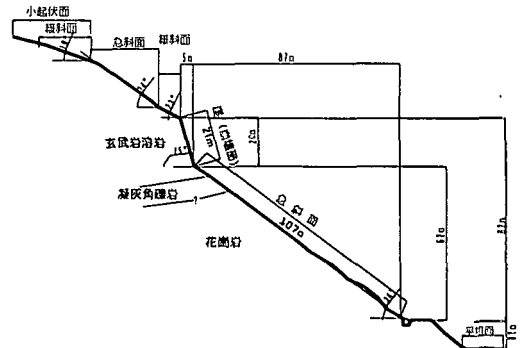


図-4 地形地質断面図 2 (C 地点)

m以上の落石発生)について地形的特徴、落石の状況について述べる。これらの落石地点は、震源地の北東約10kmに位置する急傾斜地にある(図-1)。落石地点は、地形地質的な観点で分類すると、以下に述べるような特徴的に類似する要因がみられる。落石地点の周辺を2万5千分の1地形図を用いて地形区分を行ったものを図-2に示す。地形区分の分類要素としては低地、旧河道、低位段丘面、

中位段丘面、高位段丘面、小起伏面とし、約7km四方を地形図上で分類した。この結果得られた地形区分図によると、崩壊地は広い小起伏面(平坦面)を持つ山地の周縁部に位置していることが分かる。

次に、図-3、図-4に落石崩壊地4箇所のうち2箇所の地形地質断面図を示す。図-3、図-4によると、崩壊地は小起伏面直下の急崖部を崩壊面(落石供給源)とし、その下に落石の落下する急傾斜面が位置し、最下部は平坦面となる。地質的に見ると、花崗岩の上にキャップロック的構造で亀裂の発達した玄武岩溶岩が覆っている。この玄武岩が落石供給源の急崖部を形成している。

図-5に、大規模落石地点4つの地形断面線を示す。これは、各地形の選緩点(斜面勾配が急勾配から緩勾配へと急に変化する地点)を合わせて投影したものである。これによると、4地点の地形線がほぼ同様の地形であることがよく分かる。そして、これらの地形的(幾何学的)特徴をまとめると、表-1のようになる。表-1で表す崩

表-1 斜面特徴

地点	崩壊斜面		落下斜面		全体斜面	
	高さ(m)	勾配	高さ(m)	勾配	高さ(m)	平均勾配
A	27	73°	73	37°	100	44°
B	16	81°	75	45°	91	42°
C	20	75°	62	36°	82	42°
D	16	75°	26	39°	42	49°

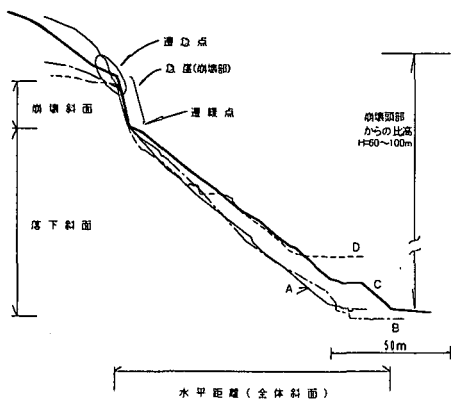


図-5 地形断面線投影図

壊斜面とは、図-5では、遷急点から遷緩点までの急崖を示し、落下斜面とは急崖から続く平坦面までの斜面を表す。また高さは各斜面の鉛直方向に投影した高さである。各地点で調査された落石個数はA地点35個、B地点81個、C地点423個、D地点321個、計860個である。これらの資料をもとに落石状況をまとめると以下のようなものである。

この4地点のうち、C地点について発生した落石の体積分布と到達距離を示すと、図-6、図-7のようになる。体積で見れば、 $V=1\text{m}^3$ 程度、到達距離で見れば、崩壊斜面から水平距離（基点は崩壊頭部）にして30m程度までに多く分布している。なお、体積は、最大長（H）、最小長（B）、および最小長に直交する辺長を計測し、直方体として算出されている。C地点における落石は、そのほとんどが斜面途中で停止しており、落下斜面を越えて平坦面まで達したものは僅かであった。但し、平坦面に達した転石は最大径3m以上の大径のものがあつた。図-8、図-9および図-10は4地点の落石体積、最大径と最小径の比（B/H）、到達距離に関して結果をまとめたものである。この図では各地点の地形的特徴（斜面長、高さ）が異なるので、各地点における全斜面長の水平距離（遷急点から平

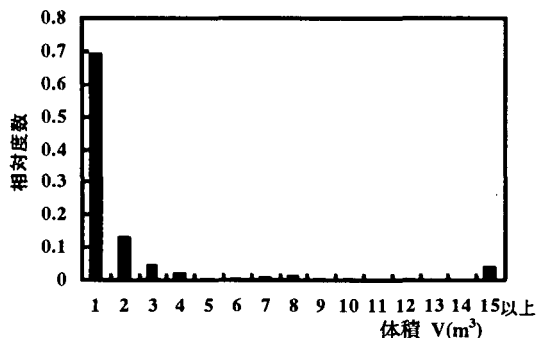


図-6 落石体積の分布（C地点）

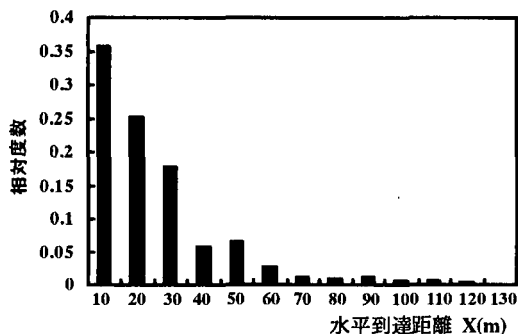


図-7 水平到達距離の分布（C地点）

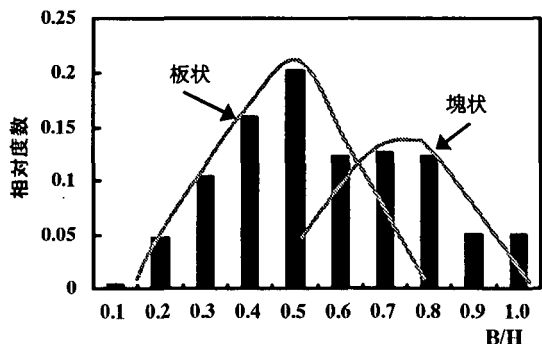


図-9 落石の最大径と最小径の比の分布（4地点）

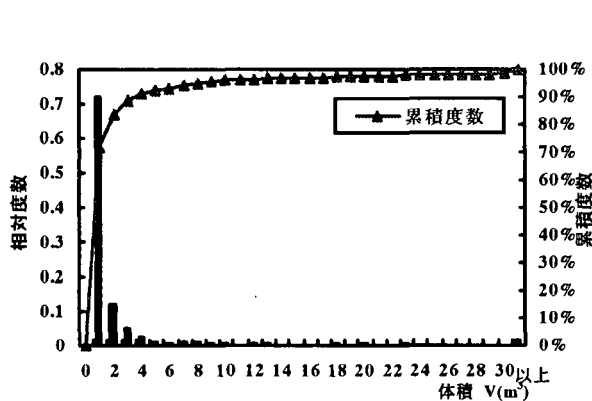


図-8 落石体積の分布（4地点）

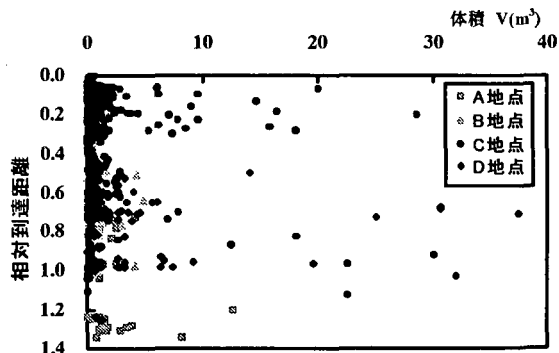


図-10 体積と相対到達距離の関係（4地点）

表-2 解析に関する定数

	K (kN/m)	ϕ	$\bar{\eta}/\eta_0$ (解析Ⅰ)	$\bar{\eta}/\eta_0$ (解析Ⅱ)
Zone_1	200.0	35°	0.5	0.8
Zone_2	150.0	35°	0.6	0.8
Zone_3	100.0	35°	0.7	0.8
Zone_4	25.0	35°	0.8	0.8
Zone_5	12.5	35°	1.0	1.0

坦面までの水平距離)で相対化した値を用いて比較している。落石の水平到達距離に関しては、落石発生源である急崖部の頂点(遷急点)からの水平距離とした。この図の縦軸は、遷急点から平坦面までの水平距離で個々の落石の到達距離を相対化したもので表わしている。転石のほとんどは急崖部直下から平坦面に達するまでの斜面上で停止しているが、相対到達距離が1.0以上、つまり平坦面まで達しているものも確認できる。図-8を見れば、1m³程度の体積を有する例が非常に多くっており、その割合は70%にも達しているが、なかには非常に大きな体積を有するものもあり、最大 84m³ (3×4×7m) を有するものも計測されている。現地踏査では、落石形状には塊状と板状の2種類があると観察できた。図-9に記入したように考えると、B/H=0.5程度の板状、B/H=0.8程度の塊状が多かったのではないかと推察している。図より、各地点ごとに崩壊斜面付近に集中する、あるいは、平坦面付近に集中するような特徴が見られるが、体積の大きなものが平坦面へ達している傾向がある。

3. 3次元個別要素法による解析例

上記の資料よりC地点の斜面を選び、3次元個別要素解析を試みた。これは、他の3地点が植生の影響を除き、地形的には2次元計算で十分な斜面であったことによる。落石の運動解析が可能な解析法はいくつか存在するが、要素を剛体と仮定し、解析定数の変化が運動形態及び解析結果へどのように影響するかを検討するため個別要素法を用いた。これは、要素の変形を考慮せず、地形と要素形状、解析定数を重視し、落石要素の運動にのみ着目するのに適していたためである。用いたプログラム²⁾では、接触粘性係数 η や表面摩擦角 ϕ が空間的に分布するものであり、正規分布あるいは対数正規分布に従う確率変数として取り扱えるという仮定を表現できるものである。落石解析においては、ブロック形状、斜面の形状および斜面の表面性状等(反発係数、摩擦角等)が不確定要因として挙げることができる。今回の解析では、これらのうち、前者の2つについては確定的に取り扱い、最後の表面性状についてのみ上述の2つの定数に代表させている。C地点を3次元的に表現した解析モデルを図-11に示す。落石要素は簡単のため、一辺が1mの立方体とした。C地点で転石した落石特徴は図-6、図-8で示したが、ここでは落石要素をB/H=1と仮定した例を示す。平坦面をZ=0mとし鉛直上向きにZ軸、落下方向にX軸を採った。要素は解析初期($t=0$ s)において、重心座標が(X, Y, Z) = (11.1, 86.0, 75.5)の位置に有り、初速度0m/sで地表面に1頂点が接触する状態にした。C地点では多くの落石が計測されている。次章の解析結果は、この座標値を落石の初期位置の一つとして仮定したとき、生じる軌跡等の例を示すものである。要素は重力作用によって運動を開始する。また、要素重心の軌跡を求めるとともに、傾斜地形から水平面に至る地点(図-11で示すA-A'断面)に照査断面を設けて、運動エネルギーや跳躍高さを出力させた。本例では、接触地盤要素を5つの小領域に分割し、

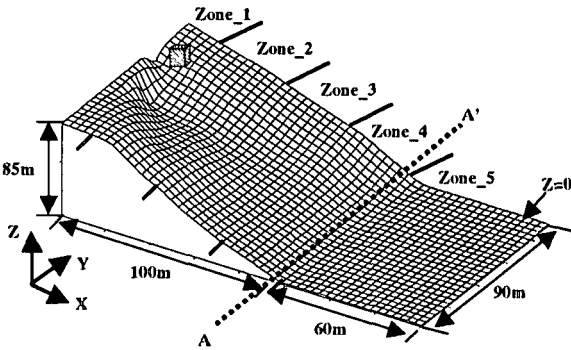


図-11 解析モデル図

その領域ごとに剛性係数 K ，粘性係数 η を与えている。 η が中央値 $\bar{\eta}$ を有し，変動係数 $v(\eta)=0.2$ の正規分布に従うとして，モンテカルロ法により各試行ごとに变化させている．表-2には η_0 （運動方程式に無振動解を与える臨界値）に対する比で $\bar{\eta}/\eta_0$ を示した．なお， η が η_0 より大きくなるときには，差分解の収束性の観点から η_0 を上回らないようにしている．表面摩擦角についてはボーリングコアを用いたチルト試験を実施して，最小測定値の 35° とした．表面摩擦角 ϕ に対しては， $\bar{\phi}=35^\circ$ ，変動係数 $v(\phi)=0.2$ の対数正規分布を仮定している．時間増分については， $\Delta t=10^{-4}$ (sec) を用い，また，このような Δt に対して計算可能な K の値として最大値 $K=200\text{kN/m}$ を仮定した． $\bar{\eta}/\eta_0$ の値を変化させた解析 I と解析 II の比較を行っている．

4. 解析結果

解析結果を図-12~図-18に示す．これらは表-2の解析定数を用いた場合の解析 I および解析 II の 500 回の試行をまとめたものである．本例では，全試行において落石要素は平坦面に到達し，A-A'断面通過時の跳躍高さおよび運動エネルギーは図-12~図-15のような分布となった．解析 I において，設定した A-A'断面における跳躍高さは，3m 程度が最も多く，図-12のような分布を示した．なかには，非常に大きな跳躍高さを示したものもあり，解析定数の変化が影響している．解析 II における跳躍高も 3m 程度が最も多くなっているが，解析 I と比較すると，2~4m 程度に集中しており，大きな跳躍をするものが少なくなっている．これは $\bar{\eta}/\eta_0$ の値を大きく設定したことによって，斜面と落石要素の接触時にエネルギー減衰が大きくなったためである．また，これは図-14，図-15に示した運動エネルギーの分布からもうかがえ，2つの例を比較すると，僅かではあるが，解析 II のほうが A-A'断面でのエネルギーは小さいといえる．C 地点で発生した落石の到達距離と比較すると，実斜面では落石のほとん

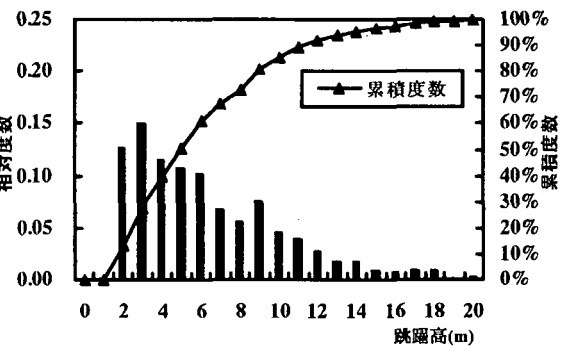


図-12 A-A' 断面における跳躍高の分布 (解析 I)

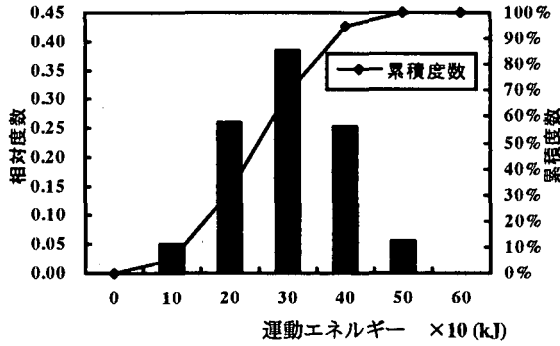


図-14 A-A' 断面における運動エネルギーの分布 (解析 I)

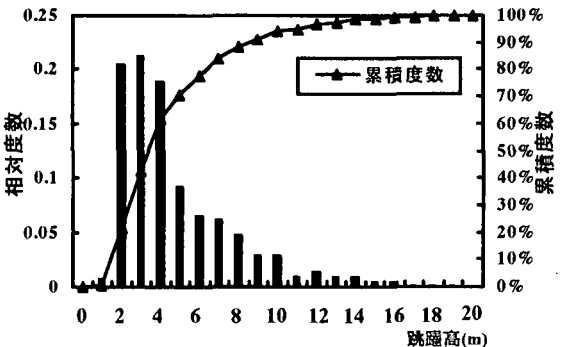


図-13 A-A' 断面における跳躍高の分布 (解析 II)

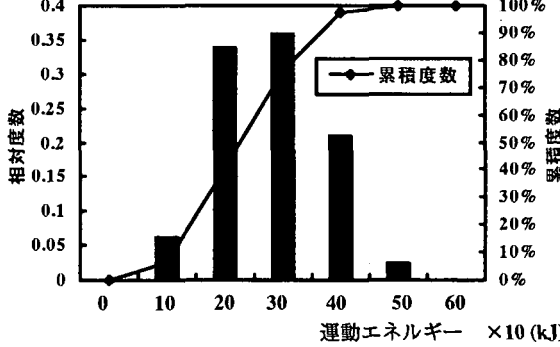


図-15 A-A' 断面における運動エネルギーの分布 (解析 II)

どが斜面途中で停止しているのに対し、解析結果は斜面上では停止せず、 $Z=0\text{m}$ の平坦面上で停止した。これは、本解析においては、斜面の植生条件や落石形状の複雑さ、または分裂を表現していないためであると考えられる。また、図-16によってある1試行における要素の運動エネルギー推移の様子を示した。図から要素は跳躍運動を繰返ししながら落下していると判断できる。これは、落石が発生するような斜面は急斜面であり、植生を考慮しない場合は、実際でもこのような跳躍運動を繰り返すことが考えられる。この図から、落石の持つエネルギーの小さい領域が予測され、その位置に対策工を設置するなどを考慮できることを示唆している。また、斜面から平面へ移り変わる地点の手前で最大の運動エネルギーを持つこともわかる。図-17および図-18は解析Iでの要素重心の軌跡の例を示したものである。図-17は要素運動の軌跡を水平平面へ投影したものであり、様々な軌道を描いている。要素は谷の地形となる辺りへ転がってから落下していく例が多い。図-18は要素運動の軌跡を鉛直平面へ投影したものである。斜面では跳躍運動し、 $Z=0\text{m}$ の平坦面に到達してから急激にそのエネルギーを損失して停止していることがわかる。

5. まとめ

本文では、鳥取県西部地震で発生した落石のうち、4地点について資料を示すとともに、そのうちの1地点について3次元個別要素解析例を示した。以下に、得られた結果を列記し、まとめとする。

1) 4地点の斜面を遷緩点として基準に重ねると、4斜面は同様の特徴を有することが示された。そして、遷緩点上部急崖地が岩塊の供給源となっていた。

2) 落石解析における不確定要因を落石形状、斜面形状および斜面の表面性状の3つとして、そのうち表面性状を粘性係数 η 、摩擦角 ϕ の変動としてモデル化し、3次元個別要素解析を実施した。

最後に貴重な資料の提供を頂いた鳥取県米子地方農林振興局ならびに県土整備局に謝意を表します。

参考文献：

- 1) P.A.Cundall, A computer for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Symposium ISRM, Nancy, pp.129~136, 1971.
- 2) 倉橋正樹他, 個別要素法を用いた落石の運動解析, 第37回地盤工学研究発表会(大阪)講演概要集, pp.2251~2252, 2002.

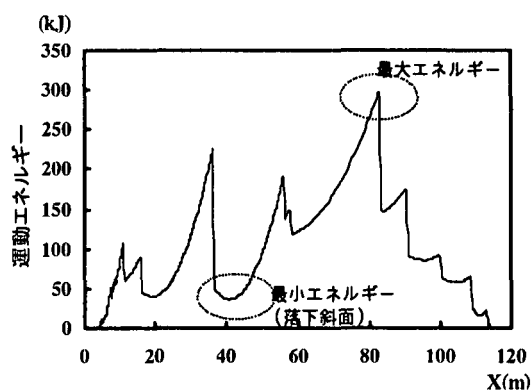


図-16 落石要素の運動エネルギー推移

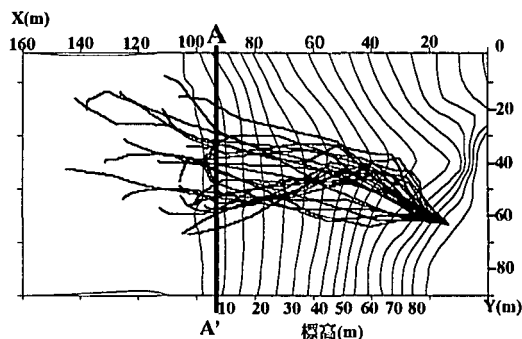


図-17 要素重心軌跡の水平面への投影図

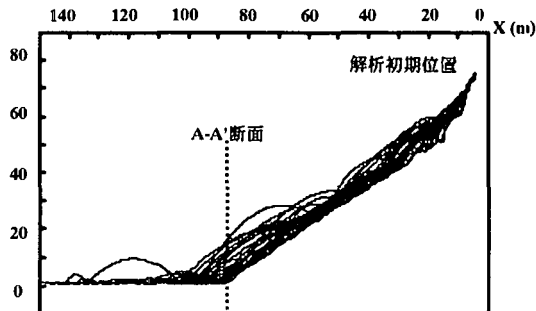


図-18 要素重心軌跡の鉛直面への投影図