

## 10. 土砂の流動試験および岩塊の転動試験の検証解析

### 10.1 検証解析の概要

#### 10.1.1 解析手法の概要

転動、流動実験で捉えたデータに基づいた検証解析を実施し、岩塊および土砂の転動、流動挙動を評価するのに有効な解析手法について検討した。解析手法としては、個別要素法 (DEM) と粒子法 (MPM) を用いた。これらの解析を実施することで、異なる地盤種別に対する各解析手法の適用性を検討することを目的とした。

図 10.1.1 に示すように、DEM では粒子間をばねおよびダッシュポット、MPM では応力ひずみ関係でモデル化する。これらから得られる解析結果について、試験結果に対しどれほど再現性を有するか検討した。モデル化については、図 10.1.2 に示すように、土砂の要素試験、岩塊の跳ね返り試験および摩擦試験を基に入力パラメータを決定し、解析を行った。

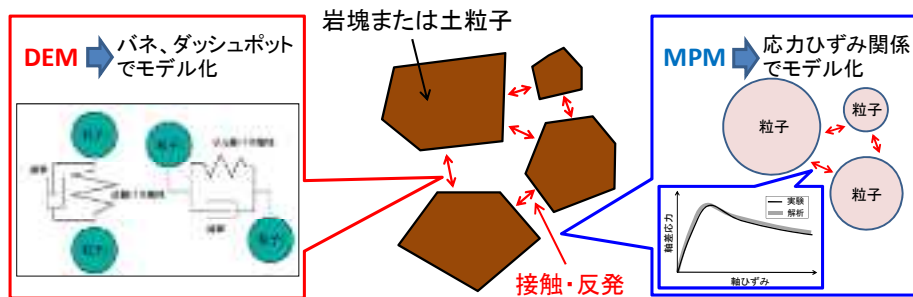


図 10.1.1 DEM または MPM による岩塊または土砂のモデル化の概要

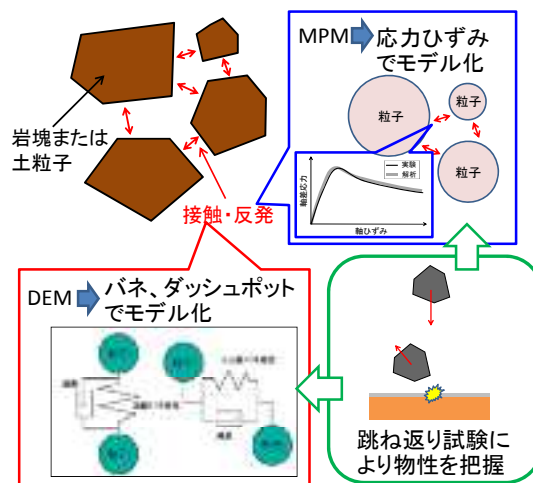


図 10.1.2 入力パラメータの決定方法の概要

### 10. 1. 2 解析ケース

解析ケースを表 10. 1. 1 に示す。岩塊の転動実験 6 ケース，土砂の流動実験 4 ケースの計 10 ケースとし，それぞれのケースに対し，DEM および MPM による解析を行った。解析モデルは 3 次元上で作成し，岩塊模型は，球形，板状，塊状の 3 種類の形状に対し，それぞれ代表径 20cm および 40cm のもの，土砂模型は碎石と土砂の 2 種類とした。

表 10. 1. 1 解析ケース

	実験の種類	模型材料	反力壁の有無
Case1	転動試験	球形岩塊 (20cm, 40cm)	有
Case2		板状岩塊 (20cm, 40cm)	
Case3		塊状岩塊 (20cm, 40cm)	
Case4		球形岩塊 (20cm, 40cm)	無
Case5		板状岩塊 (20cm, 40cm)	
Case6		塊状岩塊 (20cm, 40cm)	
Case7	流動試験	碎石	有
Case8		土砂 (山砂+水+碎石)	
Case9		碎石	無
Case10		土砂 (山砂+水+碎石)	

### 10. 1. 3 検証項目

上述の解析ケースに対し実験結果との比較を行い，実験結果と解析結果に差が生じた原因について検証した。検証する項目としては以下のものとした。

- ①岩塊の転動距離の時刻歴 (流下方向、流下直角方向、上下方向)
- ②岩塊の回転量の時刻歴
- ③土砂の流動距離の時刻歴 (流下方向、流下直角方向、上下方向)
- ④土砂の堆積深さの時刻歴
- ⑤岩塊が反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴
- ⑥土砂が反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

#### 10.1.4 岩塊模型のモデル化

##### (1) 岩塊模型

岩塊の転動のシミュレーションにおける岩塊模型の数値モデルの作成に向け、岩塊模型の形状計測を3次元レーザースキャナにより行い、岩塊模型の3次元数値データを作成した。形状計測の対象となった岩塊模型の一覧を表10.1.2に示す。また、岩塊模型外観を写真10.1.1に示す。

表 10.1.2 岩塊模型一覧

No.	形状	サイズ
1	板状	20cm
2	塊状	20cm
3	板状	40cm
4	塊状	40cm



(a)板状岩塊 20cm



(b)塊状岩塊 20cm



(c)板状岩塊 40cm



(d)塊状岩塊 40cm

写真 10.1.1 岩塊模型外観

(2) 使用機材

岩塊模型の形状計測には、FARO 社製 FOCUS 3D レーザースキャナを用いた。計測機材の外観と仕様を以下に示す。



図 10.1.3 計測機材外観

仕様	
<b>測定ユニット</b> 測定範囲距離: 15.24m (50ft) (60%) 測定範囲 (Focus) ①: 120° / 0.6m~120m (測内, 測外は標準精度の約10%精度) 測定範囲 (Focus) ②: 30° / 0.6m~25m, 10%を越える精度は保証しない 測定精度: 122,300 / 244,600 / 489,200 / 978,400ポイント/秒 測定精度: ±2mm @15mおよび±25mm, それぞれ反射率90%, 10%において <b>回転ノイズ</b> ※10mにおける測定エラー: 0.3mm ※反射率90% / 1.2mm ※反射率10% ※15mにおけるノイズ距離: 0.3mm ※反射率90% / 0.6mm ※反射率10% ※25mにおける測定エラー: 0.35mm ※反射率90% / 2.2mm ※反射率10% ※25mにおけるノイズ距離: 1.5mm ※反射率90% / 1.2mm ※反射率10%	<b>偏向ユニット</b> 測定視野: 300° 水平視野: 360° 垂直視野: ±0.09° (360°あたり40,360個の3Dピクセル) 水平精度: 0.009° (360°あたり40,360個の3Dピクセル) 最大測定スキャン速度: 5,000rpmもしくは90°/秒
<b>カメラユニット</b> 解像度: 最大70メガピクセルカラー デイナミックレンジ: 自動調整機能	<b>レーザー (光学トランスミッター)</b> レーザー出力 (Class 2) 20mW (レーザークラス2) 波長: 905nm ビーム径が1m距離0.10mrad (0.011°) ビーム径 (10m): 3.0mm, 円形
<b>マルチセンサー</b> ①傾斜センサー: 精度±0.01° / 測定範囲±3° 高度センサー: 測定面に対する高度を測出し、スキャンに適用 エンベス: 方向検出を保持, キャリブレーション機能も搭載	<b>データ処理</b> データ記録: SD, SDHC™, SDXC™, 32GBのSDカードが推奨です スキャナに3.5インチハードディスクドライブ (HDD) が含まれます Wi-Fiアクセス: PlayStation®3のネットワーク機能での遠隔操作, スキャンの 複製は、ダウンロードが可能です

図 10.1.4 計測器材の仕様



### (3) 計測作業

岩塊模型の形状計測作業は以下の手順で行った。まず、岩塊模型の底部を浮かせた形で計測治具に固定し、スキャナを移動しながら、周囲を複数回計測した。複数回計測したデータはソフトを使い合成処理し、合成処理が終了したデータから、塵や飛び跳ねたデータを削除した。その後、データが一定間隔の密度になるようにサンプリング処理を行い、処理が終わったデータにポリゴンメッシュを張りデータの確認を行った。

以下に、合成処理後の状況を図 10.1.5~図 10.1.8 に、サンプリング処理後(数値データ後)の状況を図 10.1.9 に示す。

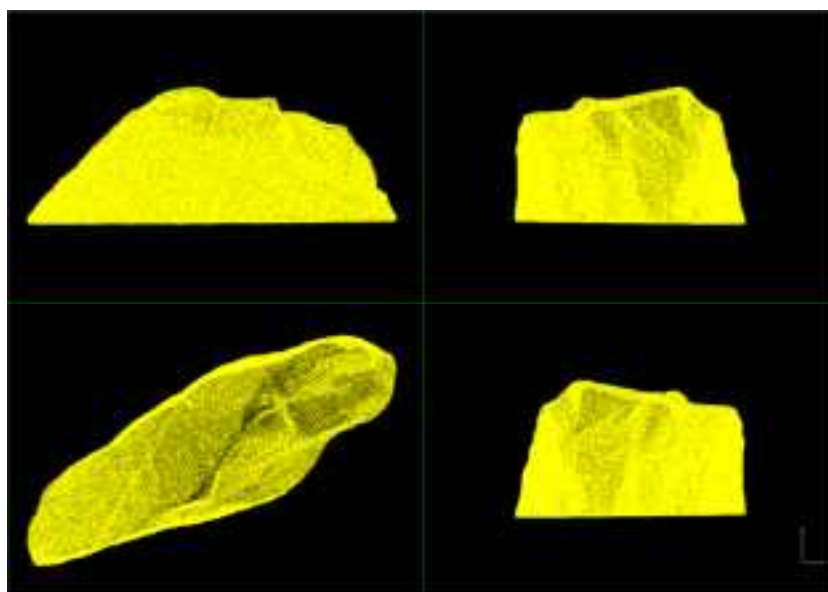


図 10.1.5 No.1 合成処理後

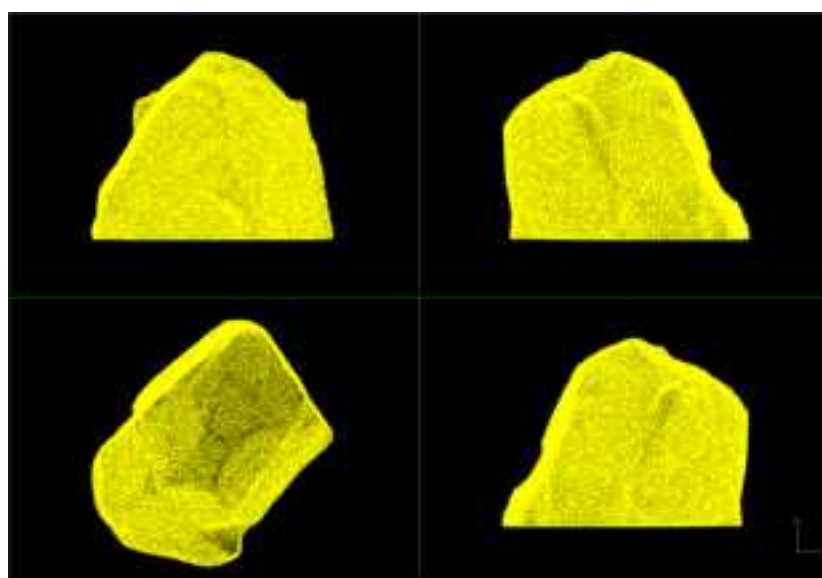


図 10.1.6 No.2 合成処理後

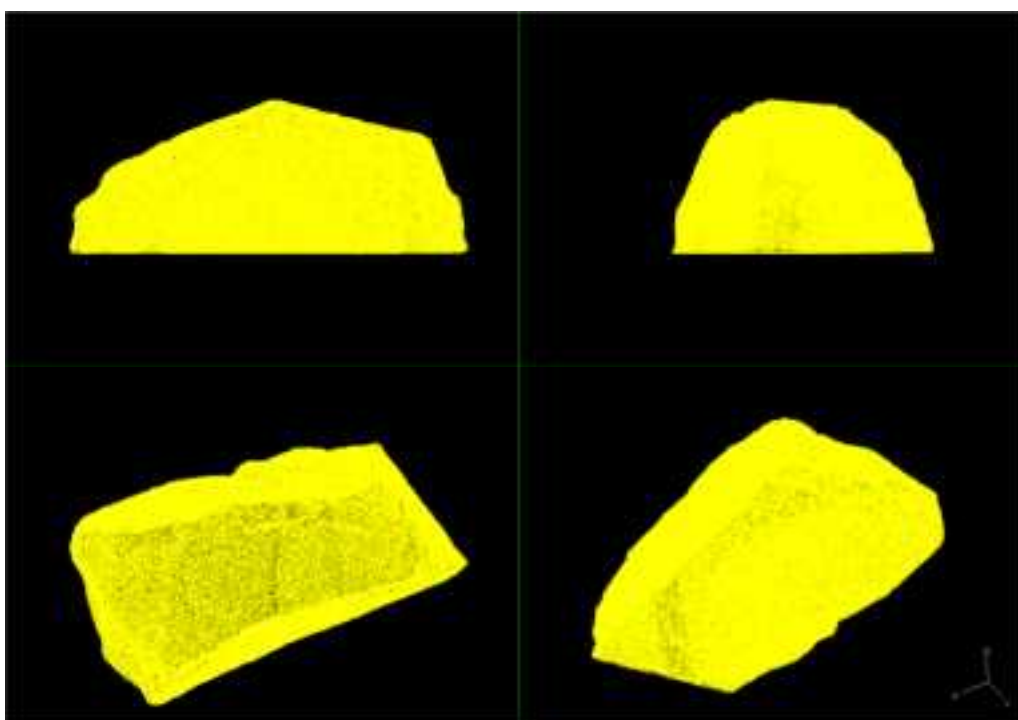


图 10.1.7 No.3 合成处理後

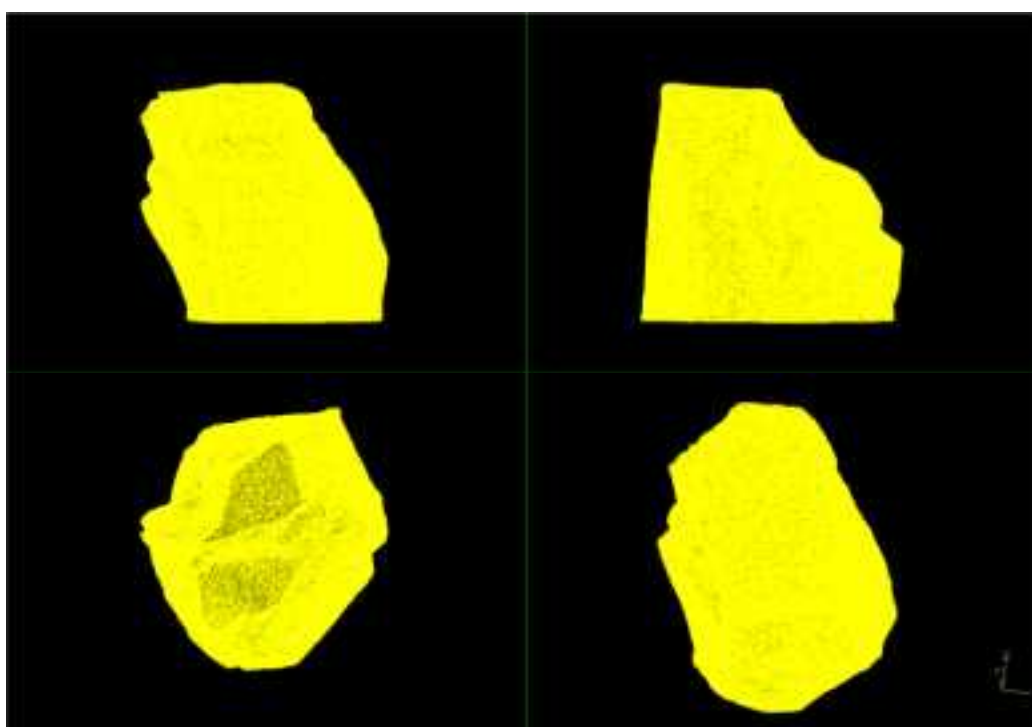


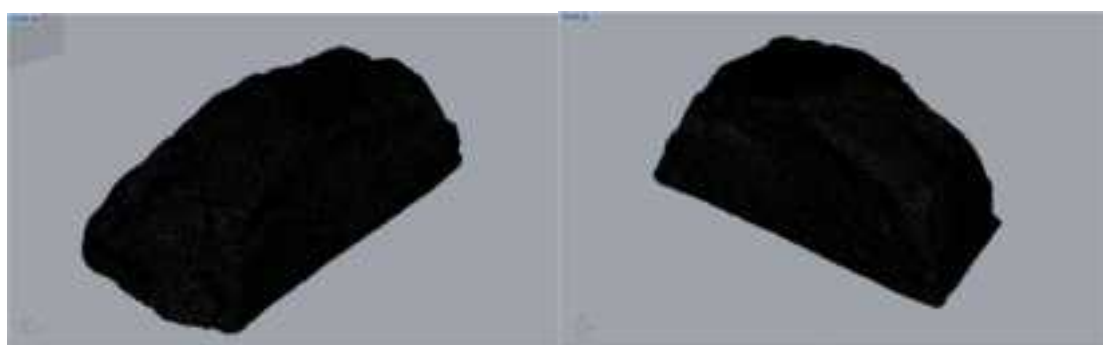
图 10.1.8 No.4 合成处理後



(a)板状 20cm



(b)塊状 20cm



(c)板状 40cm



(d)塊状 40cm

図 10.1.9 サンプルング処理後

## 10.2 個別要素法による検証解析

### 10.2.1 個別要素法 (DEM) の概要

本作業では、独立行政法人海洋研究開発機構が開発した個別要素法プログラム **Hidem** を用いて、転動挙動衝撃試験の再現解析を行うことを目的とした。個別要素法の概要を以下に示す。

#### (1) DEMの概要

DEM (Distinct Element Method) は、Cundall<sup>1)</sup>によって開発された不連続体解析手法である。解析の構成要素となる DEM の要素のイメージは図 10.2.1 のようである。それは、質点から  $r$  の自然長を持つばねが放射状に無数に伸びている。このようなものを床に落とせば半径  $r$  のボールが反発するように挙動し、互いにぶつかり合えばやはりボールが反発するように別々の方向に跳ね返るであろう。個別要素法とは、このような要素の多数の集合(図 10.2.2)により、図 10.2.3 のようなマウンドの捨石や土粒子等の粒状体の挙動を表現しようとする手法である。この手法は、これらの、変形の初期から粒状体としての特性が重要となる材料に適用されるだけでなく、コンクリートのような材料に対して、要素間のばねに所定の引張抵抗を持たせることによって(目黒・伯野<sup>2)</sup>,1988)、载荷初期の変形から破壊後、すなわち、連続体的な挙動から離散体の挙動といった一連の現象に対するシミュレーション検討も行われている。



図 10.2.1 DEM 要素のイメージ

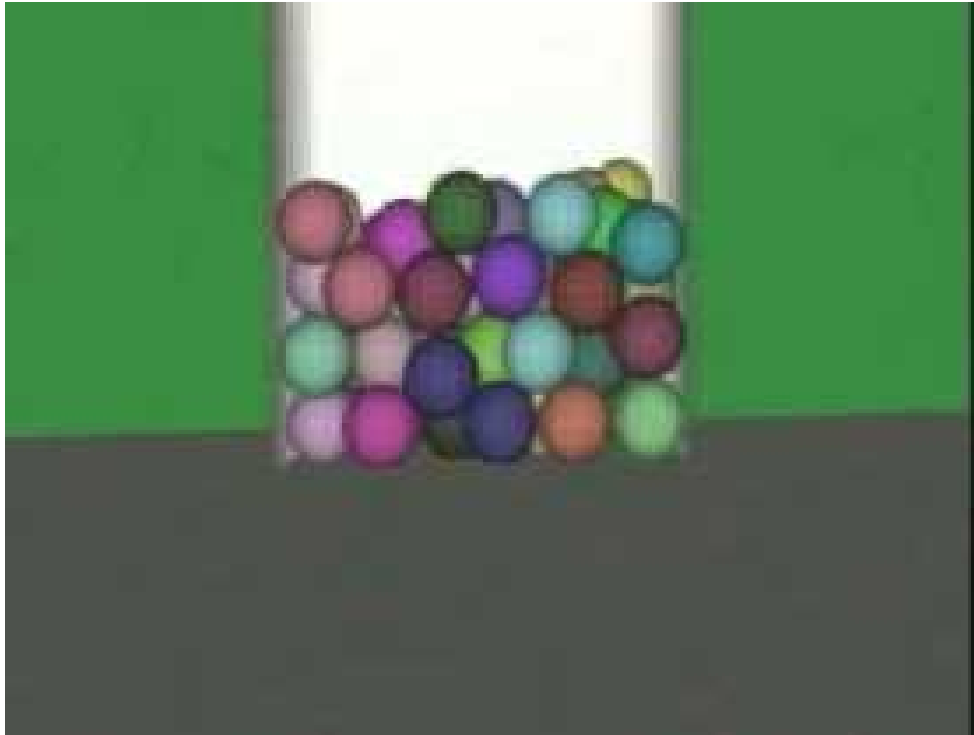


図 10.2.2 DEM 要素の集合イメージ



図 10.2.3 マウンドの捨石

## (2) 個別要素法のアルゴリズム

まず，個別要素法について一般的なアルゴリズムを図 10.2.4 に示し，この図の各処理に関して以下に説明する。ここでは簡略化のため，2次元を対象として説明する。

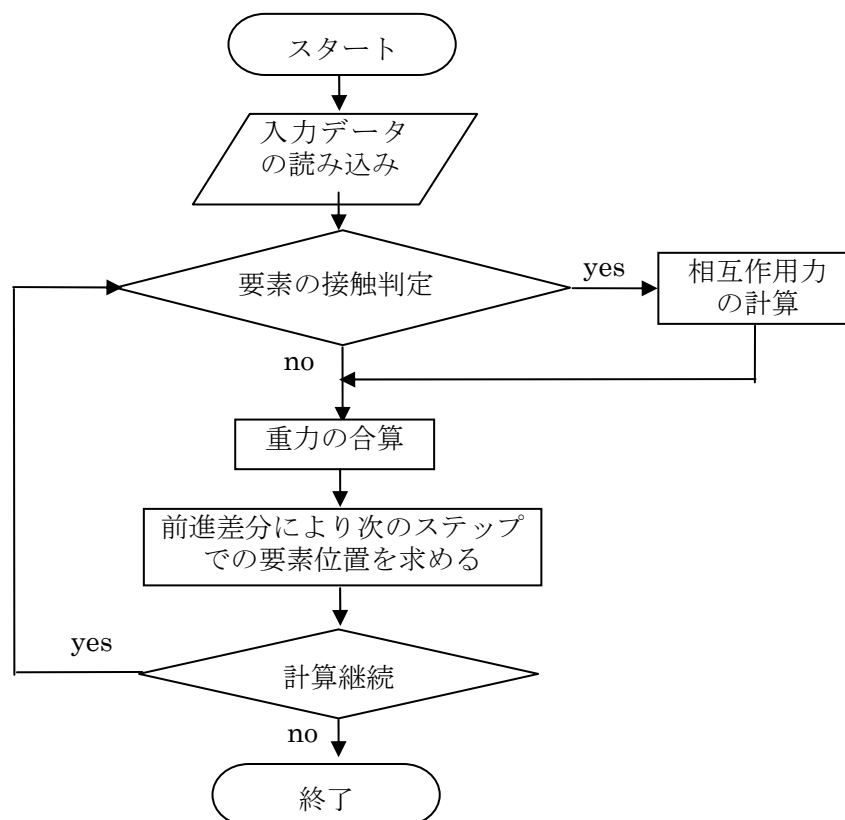


図 10.2.4 個別要素法のプログラムの流れ

### ・要素の接触と相互作用力について

ここでは，要素に相互作用力が働く条件としての要素接触の判定と接触した場合の相互作用力の計算方法について述べる。

#### (a)要素接触判定

はじめに，要素間の相互作用が働く条件として，要素間の接触判定を行っている。

時刻  $t$  における要素  $i$  と要素  $j$  の中心の座標をそれぞれ  $([X]_t^i, [Y]_t^i)$ ， $([X]_t^j, [Y]_t^j)$

とし，回転変位量を  $([\theta]_t^i, [\theta]_t^j)$ ，半径をそれぞれ  $r_i$ ， $r_j$  とした時，式(1)を満たすと要素  $i$  と要素  $j$  は接触したものとする。

$$r_i + r_j \leq [L_{ij}]_t \quad (1)$$

ここに,

$$[L_{ij}]_t = \sqrt{([X]_t^i - [X]_t^j)^2 + ([Y]_t^i - [Y]_t^j)^2} \quad (2)$$

である。

すべての粒子間の接触判定を行うと要素数が  $n$  個である場合は  $nC_2$  回の接触判定が必要となる。このため要素数の 2 乗のオーダーで計算時間が増加する。そのため、要素をグループに分けて接触判定を行う手法を用いている(澤田・岩崎<sup>3)</sup>, 1990)。全要素を一辺が最大粒径と同程度の正方形のグループに分け、ある要素の接触判定は、その要素の属するグループとそれに隣接するグループに属する要素とのみ接触判定を行うことにより、計算時間の増加を  $n$  の 1 乗オーダーにとどめることができる。

さらに、本検討で用いる個別要素法計算プログラム Hidem(阪口<sup>4)</sup>, 2003)では、リンクリストを用いた Cik 法(阪口<sup>4)</sup>, 2003)と呼ばれる手法による、接触候補粒子の登録作業の省力化が図られている。これにより、計算速度が大幅に高速化されている。

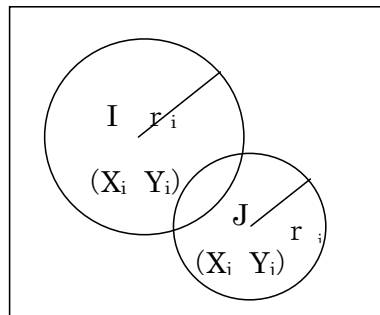


図 10.2.5 接触判定

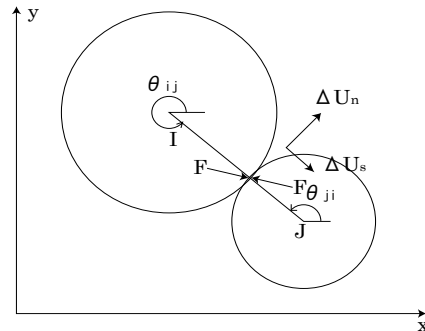
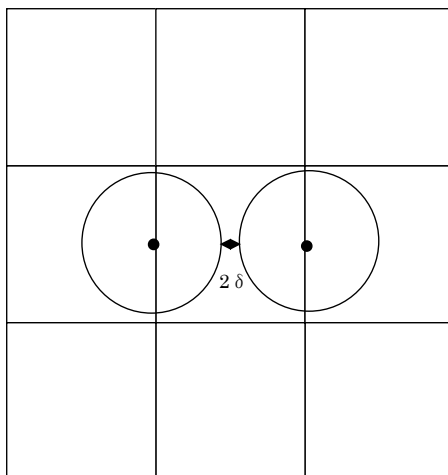


図 10.2.6 相互作用力



- 1) 解析領域を最大要素粒径より  $2\delta$  大きいマイクロゾーンに区分けし、対象とするゾーンおよび近接 8 ゾーン(三次元では 27 ゾーン)に、中心点のある要素群を、接触候補粒子として登録する。
- 2) 全要素のうち、各軸方向の累積変位量が  $\delta$  をこえる要素が一つでも発生したら、接触候補粒子を登録し直し、累積変位量を 0 クリアする。従来法では、毎ステップ接触候補粒子の更新が行われていた。
- 3) さらに、接触候補粒子をリンクリスト形式で保存することにより、メモリの省スペース化が図られている。従来法では、配列が用いられていた。

図 10.2.7 Cik 法

(b)要素間相互作用力の計算

接触した要素間には相互作用力が働く相互作用力の粒子間に弾性スプリングと粘性ダッシュポットを仮定している。接触力は，法線方向と接線方向とに分けてそれぞれ計算する。

図 10.2.8 に，一般的な個別要素法の接触モデルを示す。

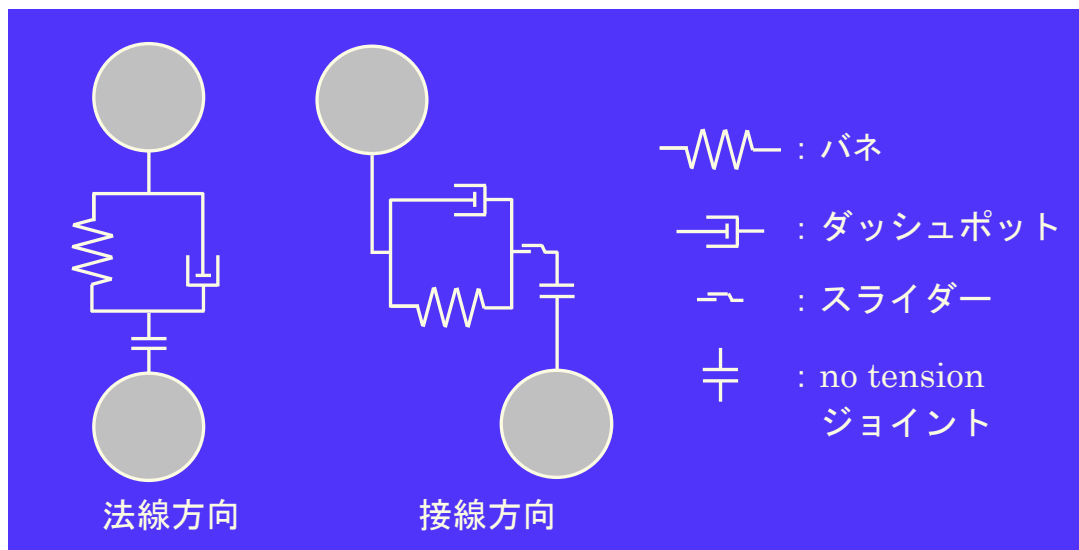


図 10.2.8 一般的な個別要素法の要素間接触モデル

i) 法線方向について

弾性バネによる相互作用力は式(3)で表される。

$$[F_{en}]_t = k_n \times [\Delta U_n]_t \quad (3)$$

ここに， $k_n$ ：法線方向の弾性バネ係数，

$$[\Delta U_n]_t = \frac{(r_i + r_j) - [L_{ij}]_t}{2} \quad (4)$$

である。

粘性ダッシュポットによる相互作用力は式(5)で表される。

$$[F_{dn}]_t = \eta_n \times [\dot{U}_n]_t \quad (5)$$

ここに， $\eta_n$ ：法線方向の減衰係数，

$$[\dot{U}_n]_t = ([\dot{X}]_t^j - [\dot{X}]_t^i) \cos[\theta_{ij}]_t + ([\dot{Y}]_t^j - [\dot{Y}]_t^i) \sin[\theta_{ij}]_t \quad (6)$$

である。

結局，法線方向に働く力は式(7)で示される。

$$[F_n]_t = [F_{en}]_t + [F_{dn}]_t \quad (7)$$



ii) 接線方向について

弾性ばねによって作用する接線方向の力は、接触した時点での値を0とし式(8)に従い接線方向力を要素が接触している間、毎ステップ増減させることによって計算を行っている。

$$[\Delta F_{es}]_t = k_s \times [\dot{U}_s]_t \times \Delta t \quad (8)$$

ここに、 $k_s$ ：接線方向の弾性バネ係数である。

$[\dot{U}_s]_t$ は、接線方向の相対速度であるが、これは並進運動によるものと回転運動によるものと和として式(9)より求める。

$$[\dot{U}_s]_t = -([\dot{X}]_t^j - [\dot{X}]_t^i) \sin[\theta_{ij}]_t + ([\dot{Y}]_t^j - [\dot{Y}]_t^i) \cos[\theta_{ij}]_t - [\dot{\theta}]_t^i \times r_i - [\dot{\theta}]_t^j \times r_j \quad (9)$$

$[F_{es}]_t$ は、式(10)を満たす時、滑りが生じたものとする。

$$[F_{es}]_t \leq C + [F_n]_t \tan \phi \quad (10)$$

また、滑りが生じた場合には、式(11)で示される接線力が働く。

$$[F_{es}]_t = C + [F_n]_t \tan \phi \quad (11)$$

ここに、 $C$ ：粒子間の粘着力（これは、粒状体のマクロな粘着力とは異なる）、 $\phi$ ：粒子間の摩擦角（これは、粒状体のマクロな摩擦角とは異なる）である。経験的には、 $C$ の計算結果に対する貢献度は小さく、常に0とする場合が多い。

粘性ダッシュポッドによって接線方向に働く力は、式(12)で表される。

$$[F_{ds}]_t = \eta_s \times [\dot{U}_s]_t \quad (12)$$

ここに、 $\eta_s$ ：接線方向の減衰係数である。

結局、接線方向に働く力は式(13)で示される。

$$[F_s]_t = [F_{es}]_{t-\Delta t} + [\Delta F_{es}]_t + [F_{ds}]_t \quad (13)$$

iii) 粘着力について

粒状体の粘着力を表現するためには、(11)式に示した粘着力  $C$  を考慮しても、ほとんど効果が無い。粒状体の粘着力を表現するためには、要素接点における法線方向力について、引張に抵抗することによりこれを表すことが一般的に行われている。この引張に抵抗する限界の力： $F_U$ は限界引張力と呼ばれる。このことを考慮することにより、引張応力に対する抵抗だけでなく、せん断に対しても大きな抵抗を示すようになる。これは、微視的にみればせん断的な粒子運動に対して、法線方向のバネが直接作用するためである。しかし、本検討では、限界引張力  $F_U$  を0として、接点における引張に対する抵抗は考慮しないものとした。

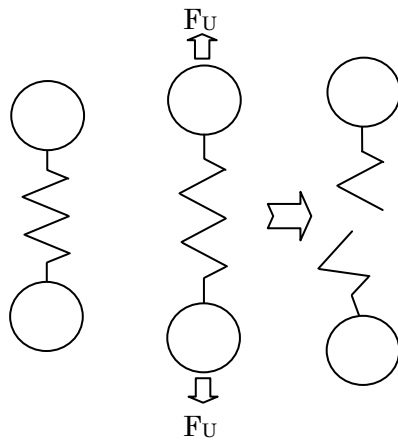


図 10.2.9 接触点で引張に抵抗するモデル

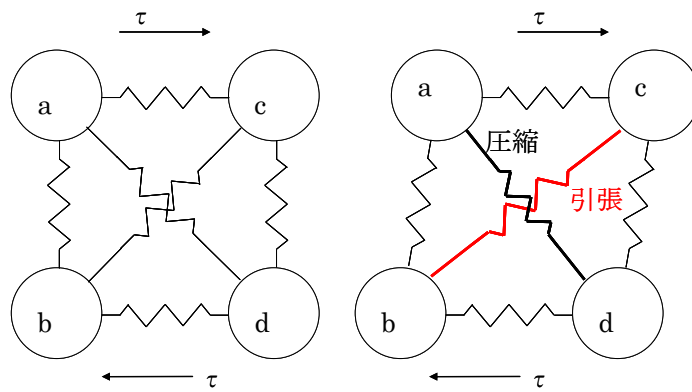


図 10.2.10 せん断に抵抗する法線方向のバネ

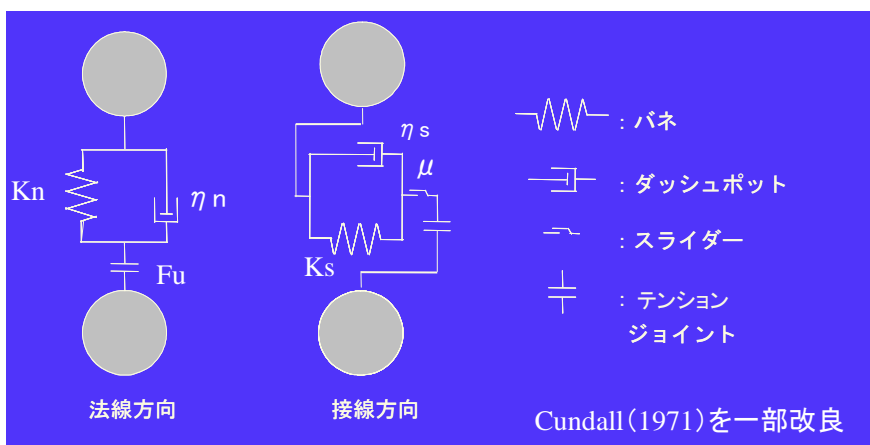


図 10.2.11 せん断に抵抗する法線方向のバネ

#### iv) 転がり摩擦

Cundall(1971)<sup>1)</sup>の要素が球である DEM は、粒状体としてのせん断強度が低いと言う問題がある。これは、図 10.2.12 に示すように実際のマウンド捨石や土粒子の形状は、DEM 要素のような球ではないというところに原因がある。そこで、粒子のモデル化に際して、①これを多面体で表す方法、②解析的にあたかも面接触しているかのように接触力を伝達する「転がり摩擦」を考慮する方法(Sakaguchi<sup>5)</sup>,1993)、③球要素を連結して砂粒子の形状を忠実にモデル化する方法(図 10.2.13) が採られるようになってきた。

しかし、これらの改良型 DEM においても、次なる課題が浮き彫りになっている。すなわち、「DEM は、実際の土に比べて、せん断初期圧縮しにくく、その後のダイラタンシーは大きい」という問題がある。図 10.2.14 に一例を挙げる。これは図 10.2.13 の連結要素からなる DEM 粒状体のせん断試験結果と実験結果の比較を示す。実験と同等の初期間隙比である DEM 粒状体 ( $e_{ini}=0.793$ ) のダイラタンシー関係を見るとこの傾向が顕著に現れている。このように、DEM の接触モデルについては、いまだ発展途上といって良い。

以上を踏まえつつ、本検討では、粒子形状の影響を図 10.2.15 に示す「転がり摩擦」を考慮する方法で考慮することにした。このモデルでは、図のように粒子が面接触すると仮定する。この面積は転がり摩擦係数  $\mu_r$  で規定される。この粒子に作用するモーメント  $\mathbf{M}$  に丁度釣り合う抵抗モーメント  $\mathbf{M}_r$  を生じる鉛直力  $\mathbf{F}^*$  が面の端部において動員される。ただし、 $\mathbf{F}^* < \mathbf{F}$  であり、 $\mathbf{F}^*$  による逆回転は許さない。 $\mathbf{M}$  が最大抵抗モーメント ( $\mathbf{F} \times \delta$ ) を超えた場合、 $\mathbf{M} - (\mathbf{F} \times \delta)$  のモーメントがこの粒子に回転を生じせしめる。

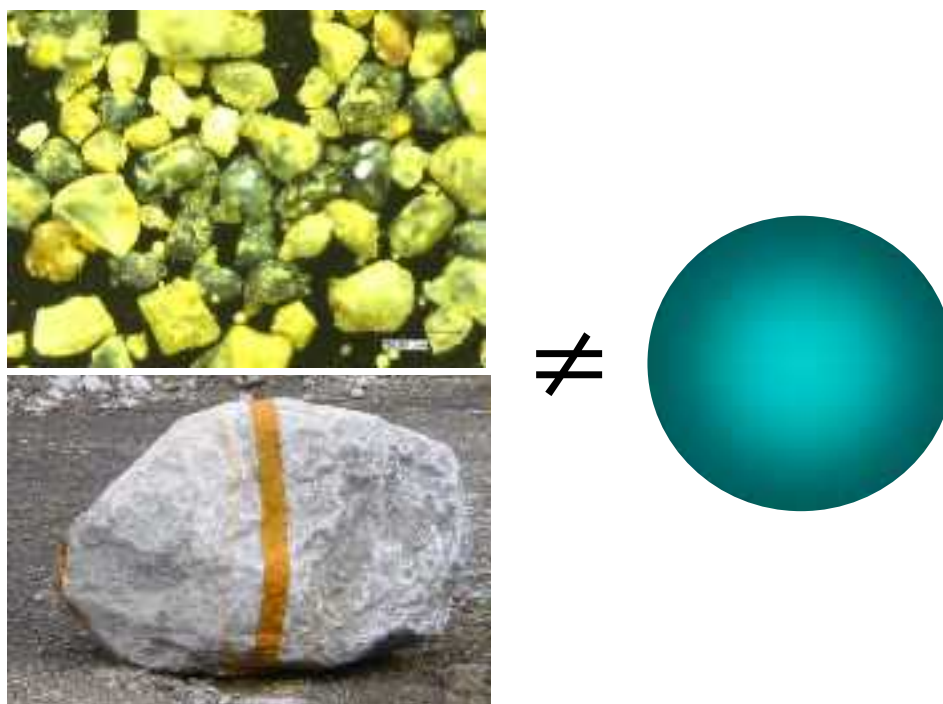


図 10.2.12 砂粒子やマウンド捨石の形状

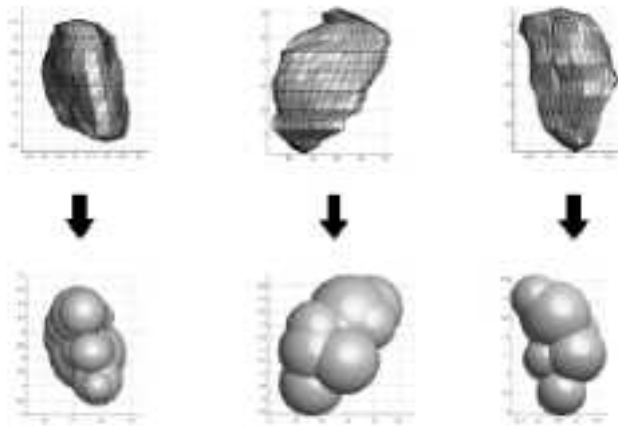


図 10.2.13 球要素連結による土粒子のモデル化

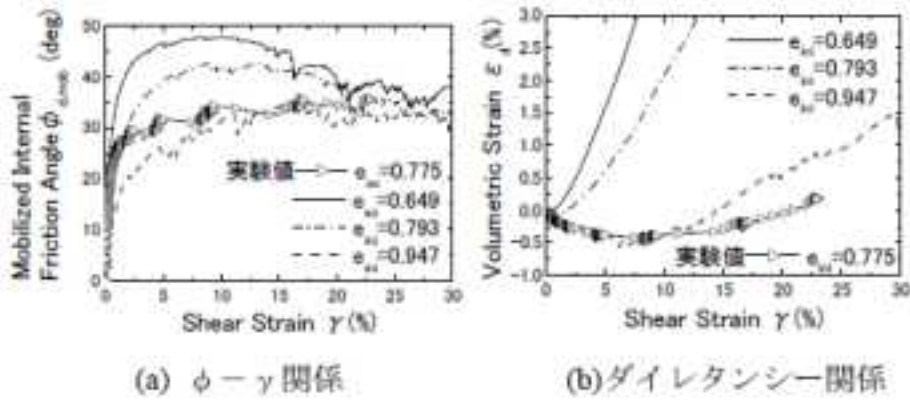


図 10.2.14 連結要素を用いた DEM によるせん断試験シミュレーション

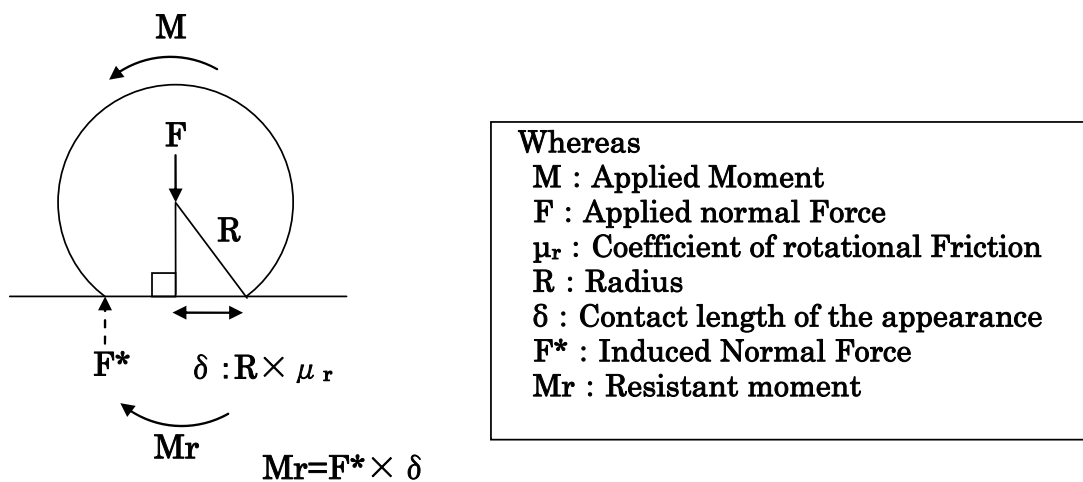


図 10.2.15 転がり摩擦(阪口,2003)<sup>4)</sup>

・運動方程式

前節までの計算により, 時刻  $t$  での要素座標から相互に作用する力を求めることができた。次に, 求めた力から運動方程式を用いて粒子加速度を求める。ある要素  $i$  に関して, 運動方程式(15)~(17)が成り立つ。

$$[F_x]_t^i = m_i \cdot [\ddot{X}]_t^i \quad (15)$$

$$[F_y]_t^i = m_i \cdot [\ddot{Y}]_t^i \quad (16)$$

$$[M]_t^i = I_i \cdot [\ddot{\phi}]_t^i \quad (17)$$

ここに,  $[F_x]_t^i$ : 要素に働く力の  $x$  方向成分,  $[F_y]_t^i$ : 要素に働く力の  $y$  方向成分,  $[M]_t^i$ : 要素に働くモーメント,  $m_i$ : 質量,  $I_i$ : 慣性モーメントである。したがって, 粒子加速度は式(18)~(20)で表すことができる。

$$[\ddot{X}]_t^i = \frac{[F_x]_t^i}{m_i} \quad (18)$$

$$[\ddot{Y}]_t^i = \frac{[F_y]_t^i}{m_i} \quad (19)$$

$$[\ddot{\phi}]_t^i = \frac{[M]_t^i}{I_i} \quad (20)$$

本検討で用いる個別要素法計算プログラム Hidem(阪口,2003)では, この時間積分にあたり蛙跳び法を用いている。

### (3) 適用範囲

#### ・接触モデルによる物性の再現性の限界

本検討における手法では、限界引張力  $F_U$  を 0 として、接点における引張に対する抵抗は考慮しないものとするので、細粒分や、メニスカスによる粒子間の吸着力、経年変化による粒子間の固着は考慮できない。また、前述したように、実際の地盤材料の圧縮性に対する再現性は悪い。

#### ・粒子径の限界

10～20 秒程度の現象を対象とした場合、計算時間の関係から現状で扱える実務的に扱える最大の粒子数は 20 万程度である。この数で解析領域を占めるための粒子径が最小となる。数十 m 程度の斜面を解析する場合、限界の粒子径として 1～2m 程度が目安である。粒度分布も、このことにより拘束される。最大にばらつかせたとして  $U_c:2.0$  程度が目安である。

#### ・粒子速度

粒子が相手の粒子や境界をすり抜けないという条件から、式(21)の粒子速度制限がある。 $v$  は固定している粒子に対しての相対速度である。

$$mv^2 < kr^2 \quad (21)$$

## 10.2.2 解析ケース

表 10.2.1 にDEMで実施した解析ケースを示す。

表 10.2.1 解析ケース一覧

ケース	実験の種類	模型材料	サイズ等	反力壁の有無
1	転動実験	球形岩塊	代表径 20cm, 40cm	有
2		板状岩塊	代表径 20cm, 40cm	
3		塊状岩塊	代表径 20cm, 40cm	
4		球形岩塊	代表径 20cm, 40cm	無
5		板状岩塊	代表径 20cm, 40cm	
6		塊状岩塊	代表径 20cm, 40cm	
7	流動実験	碎石	厚さ 0.116m, 長さ 2.315m, 奥行 1.855m, 体積 0.5m <sup>3</sup>	有
8		土砂	厚さ 0.116m, 長さ 2.315m, 奥行 1.855m, 体積 0.5m <sup>3</sup>	
9		碎石	厚さ 0.116m, 長さ 2.315m, 奥行 1.855m, 体積 0.5m <sup>3</sup>	無
10		土砂	厚さ 0.116m, 長さ 2.315m, 奥行 1.855m, 体積 0.5m <sup>3</sup>	

### 10.2.3 解析モデル

#### (1) 岩塊のモデル化

##### ・球形岩塊

球形岩塊は図 10.2.16 に示すように DEM の球要素一個であらわす。この球形岩塊モデルの解析パラメータを表 10.2.2 に示す。ばね係数は、文献 6)を参照した。所定の反発係数を発揮させるためには、次式を満足する必要がある、この関係から半径方向粘性係数が定まる。接線方向粘性係数は簡単のため半径方向粘性係数と同値とした。

$$h = \sqrt{\frac{(\ln R)^2}{(\ln R)^2 + \pi^2}}$$

$$\eta = 2h\sqrt{m \cdot K} \quad (22)$$

ここで、 $h$  : 粘性減衰定数,  $R$  : 反発係数,  $\eta$  : 粘性係数,  $m$  : 質量,  $K$  : ばね係数

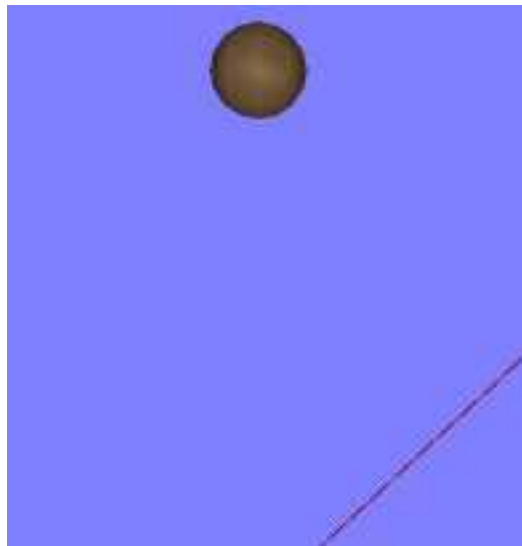


図 10.2.16 球形岩塊の解析モデル (斜面上にある DEM の球要素)

表 10.2.2 球形岩塊モデルの解析パラメータ

半径(m)	反発係数	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	半径方向 ばね係数 (N/m)	接線方向 ばね係数 (N/m)	半径方向 粘性係数 (N・s/m)	接線方向 粘性係数 (N・s/m)	摩擦係数
0.1	0.343	2,180	2.0×10 <sup>6</sup>	2.0×10 <sup>6</sup>	2.8×10 <sup>3</sup>	2.8×10 <sup>3</sup>	0.411*
0.2	0.151	2,180	2.0×10 <sup>6</sup>	2.0×10 <sup>6</sup>	2.8×10 <sup>3</sup>	2.8×10 <sup>3</sup>	0.411*

\* (黒スプレー、動摩擦係数)



・塊状岩塊および板状岩塊

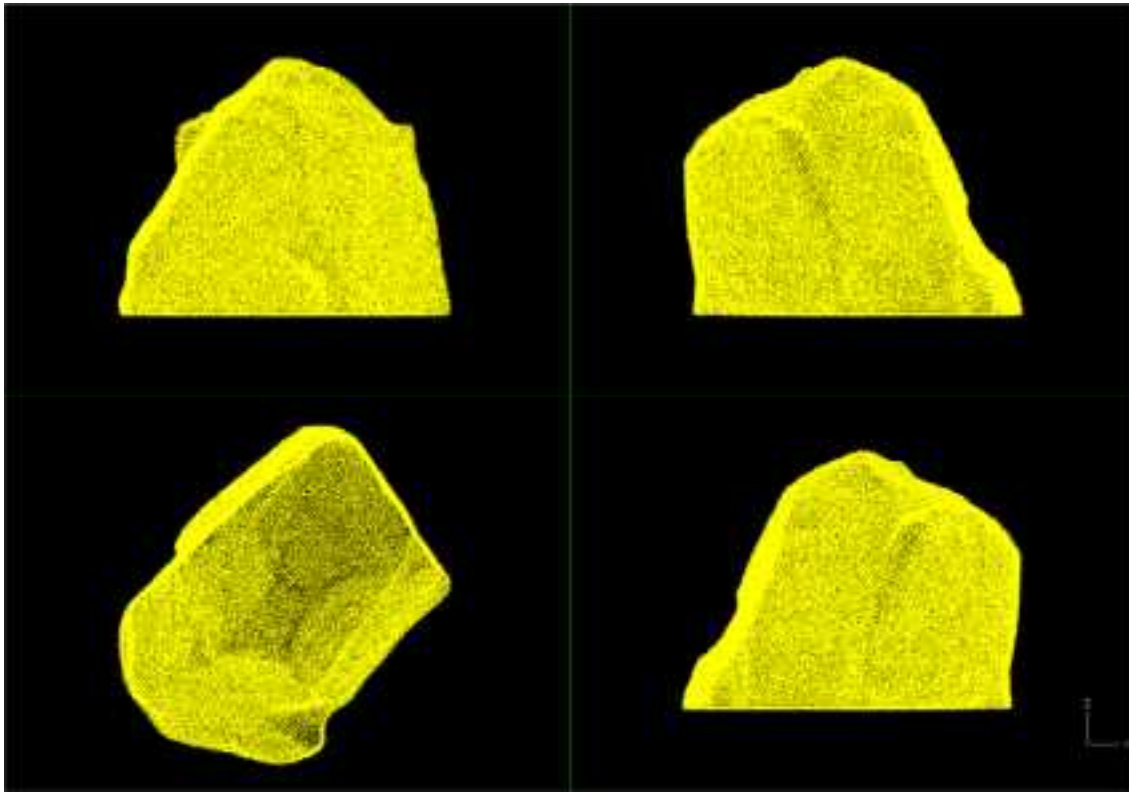
レーザプロファイリングによる塊状岩塊および板状岩塊の外形とこれらに対する解析モデルを図 10.2.17～図 10.2.20 に示す。解析モデルは、約 5cm の球要素を最密充填に配置し、岩塊の外形が崩落面となるように粒径を微調整して作成した。隣り合うすべての要素同士をばねで連結し一つの塊とした。粒子間は表 10.2.3 に塊状岩塊モデルおよび板状岩塊モデルの解析パラメータを示す。半径方向粘性係数は、式 (22) を用いて岩塊質量と同じ質量をもつ球形岩塊が表中の反発係数を発揮する値とした。

表 10.2.3 塊状岩塊モデルおよび板状岩塊モデルの解析パラメータ

岩塊種類	岩塊質量 (kg)	要素半径 (m)	要素数 (個)	反発係数	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
塊状 20cm	8.454	0.0137	381	0.343	2625
板状 20cm	10.768	0.0116	485	0.343	2645
塊状 40cm	31.896	0.0137	1011	0.151	2532
板状 40cm	27.320	0.0129	1437	0.151	2480

岩塊種類	半径方向 ばね係数 (N/m)	接線方向 ばね係数 (N/m)	半径方向 粘性係数 (N・s/m)	接線方向 粘性係数 (N・s/m)	摩擦係数
塊状 20cm	$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$5.35 \times 10^3$	$5.35 \times 10^3$	0.411*
板状 20cm	$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$2.65 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$	0.411*
塊状 40cm	$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$7.62 \times 10^3$	$7.62 \times 10^3$	0.411*
板状 40cm	$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$8.24 \times 10^3$	$8.24 \times 10^3$	0.411*

\* (黒スプレー、動摩擦係数)

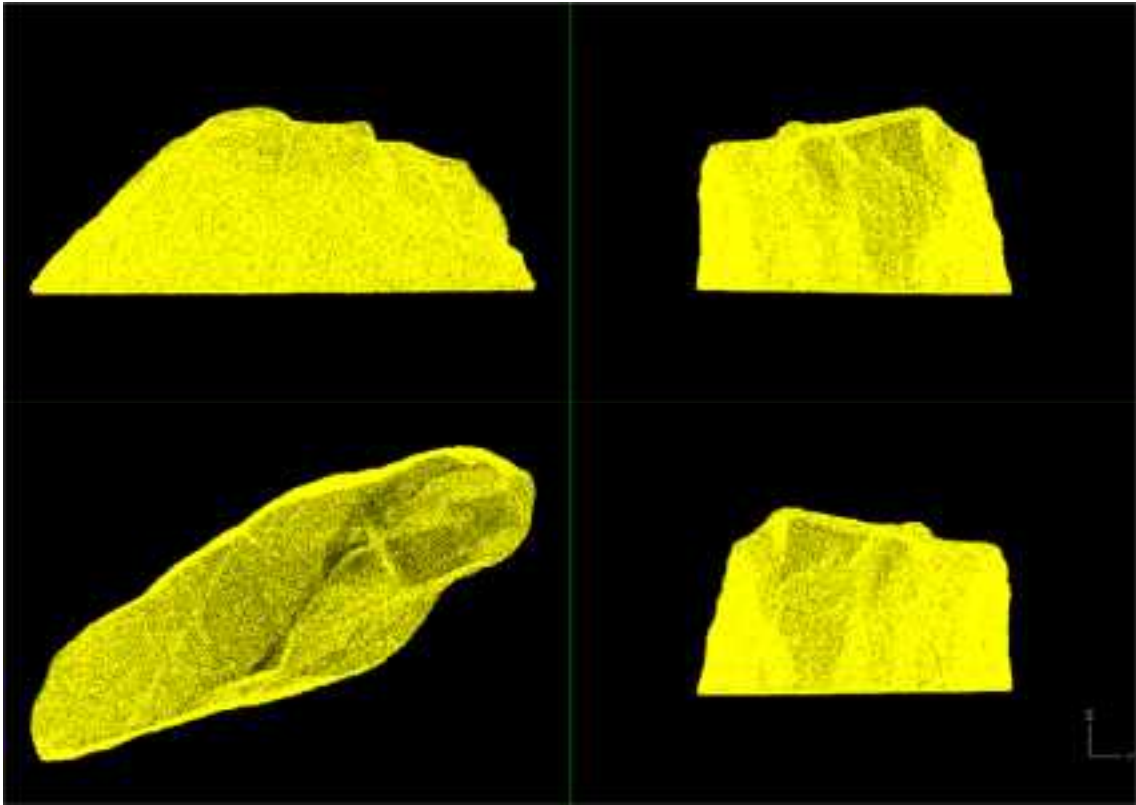


(a) 20cm 塊状岩塊の外形

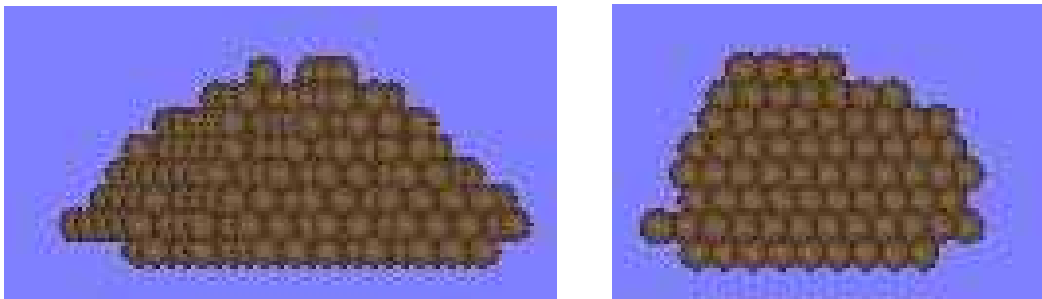


(b) 解析モデル

図 10.2.17 20cm 塊状岩塊の外形と解析モデル

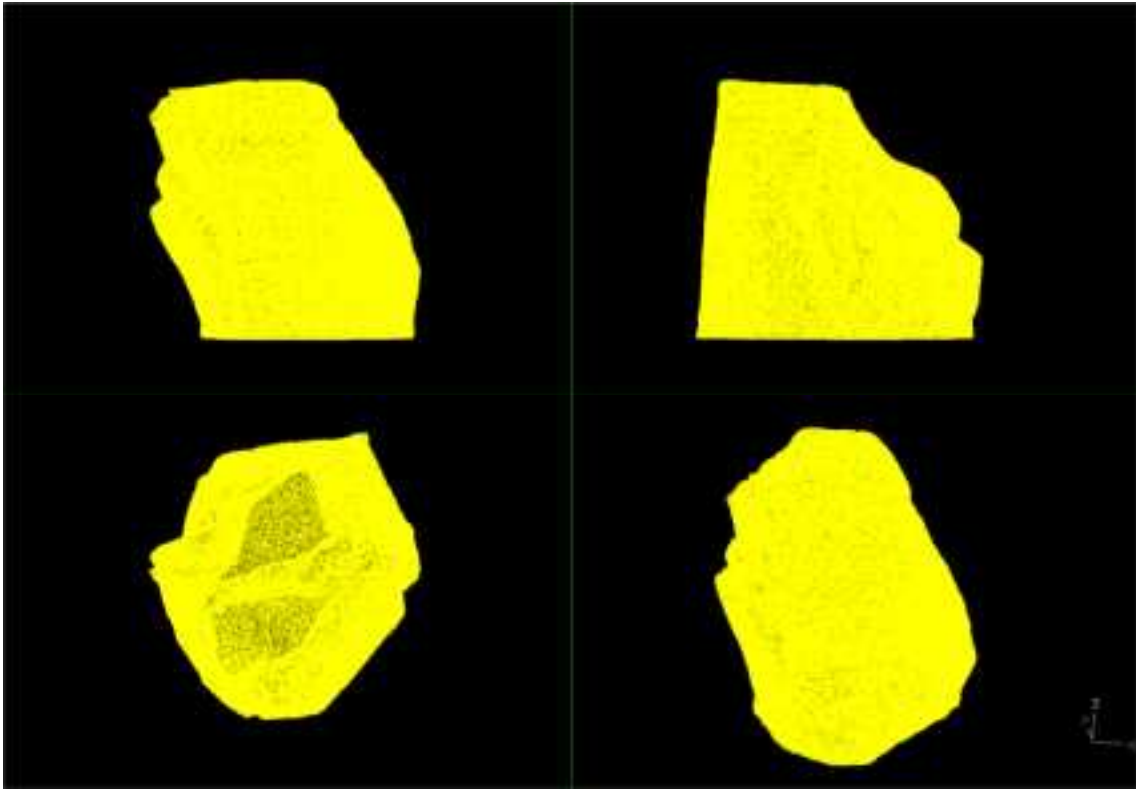


(a) 20cm 塊状岩塊の外形



(b) 解析モデル

図 10.2.18 20cm 板状岩塊の外形

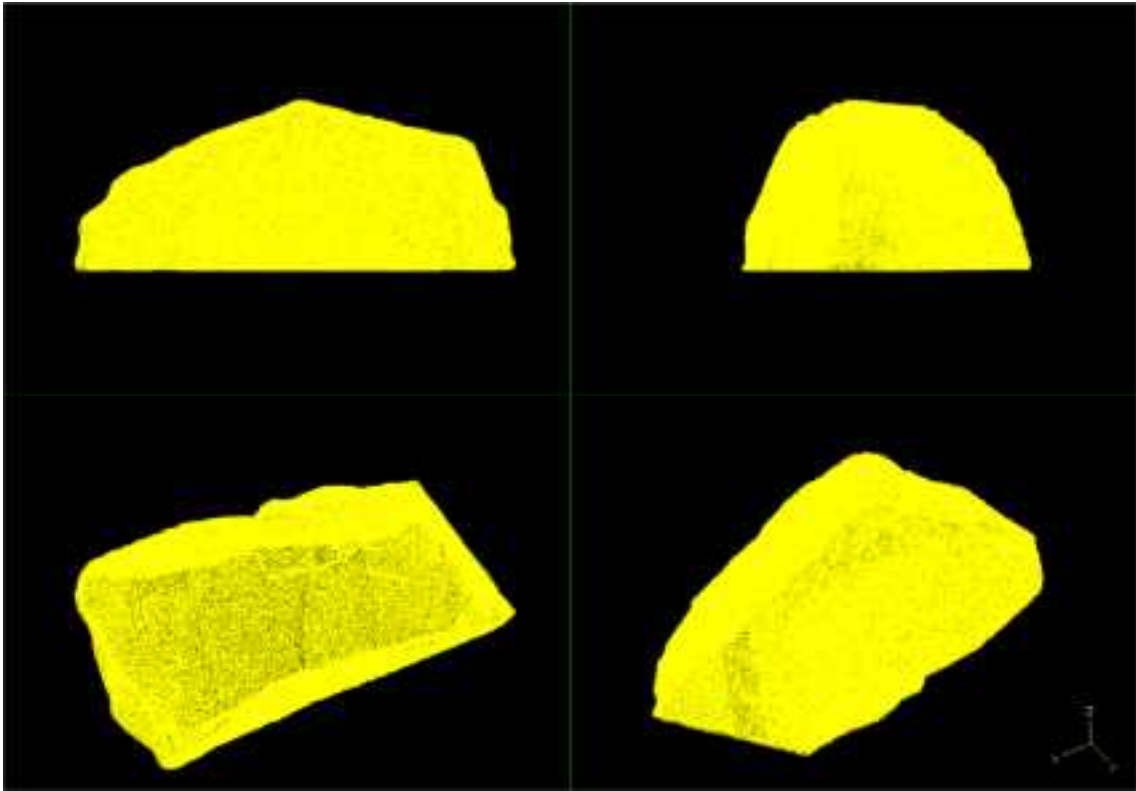


(a) 40cm 塊状岩塊の外形



(b) 解析モデル

図 10.2.19 40cm 塊状岩塊の外形



(a) 40cm 板状岩塊の外形



(b) 解析モデル

図 10.2.20 40cm 板状岩塊の外形

・岩塊モデルの反発係数

式 (22) を満足していれば、球形岩塊モデルは正確に所定の反発係数を発揮するが、実験で用いた岩塊や、シミュレーションの塊状岩塊モデルおよび板状岩塊モデルは、図 10.2.21 の模式図のように不規則に反発し、表 10.2.3 の球を仮定した反発係数（最大反発係数）よりかなり小さい見かけの反発係数を取り、衝突の方向によりかなりばらつく。ここでは、反発試験のシミュレーション検討を実施し、それぞれの岩塊モデルの見かけの反発係数の平均値を求めた。シミュレーションの様子を図 10.2.22 に示す。シミュレーションの結果得られた平均の見かけの反発係数を表 10.2.4 に実験のそれと比較して示す。実験とシミュレーションの見かけの反発係数は、おおむね対応している。

表 10.2.4 見かけの反発係数

形状	サイズ	反発係数 実験	反発係数 DEM
塊状	20cm	0.185	0.187
塊状	40cm	0.0	0.090
板状	20cm	0.121(横), 0.081(縦)	0.169
板状	40cm	0.118(横), 0.015(縦)	0.092

20cm 岩塊は高さ 1m、40cm 岩塊は高さ 0.5m から落下させた値。

## 最大反発係数と見かけの反発係数

球状に削り出した試料の反発係数 → 最大反発係数  
 岩体の反発係数 → 見かけの反発係数  
 と考えると

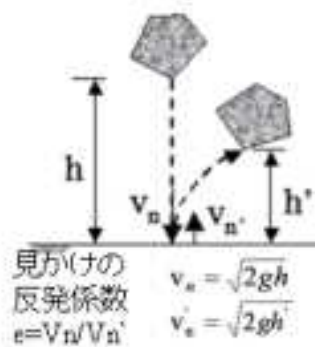


図 10.2.21 最大反発係数と見かけの反発係数

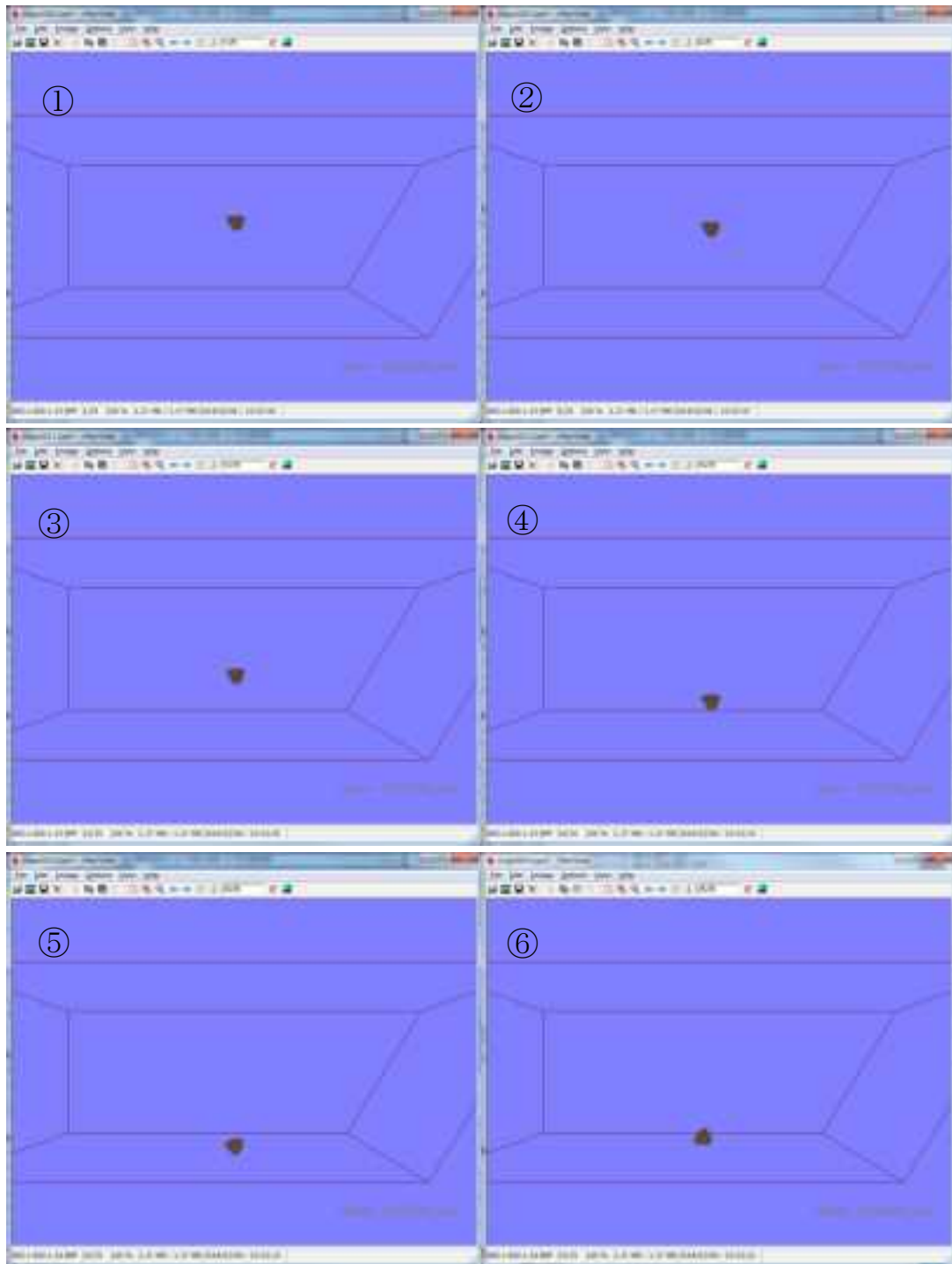


図 10.2.22 反発試験のシミュレーション例 (20cm 塊状岩塊)

(2) 砕石および土砂のモデル化

砕石および土砂は、球要素の集合体でモデル化した。解析のパラメータは、三軸試験の再現解析 (図 10.2.23) が、良好に実験結果を再現するパラメータを試行錯誤で決定した。フィッティングの結果を図 10.2.24 に、決定した解析パラメータを表 10.2.5 に示す。

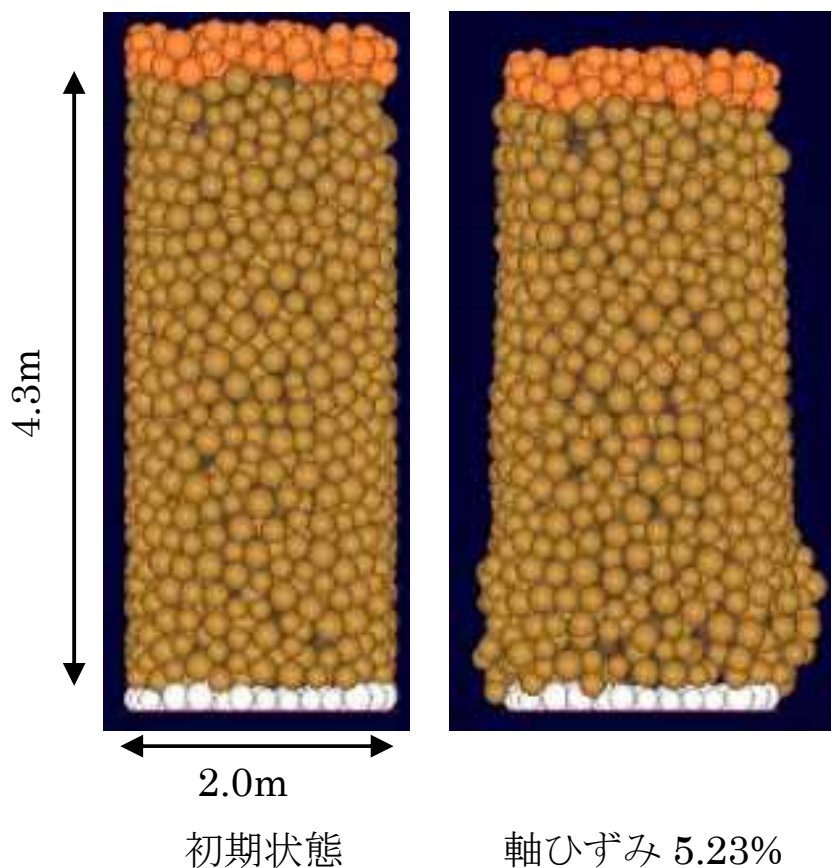


図 10.2.23 三軸試験の再現解析

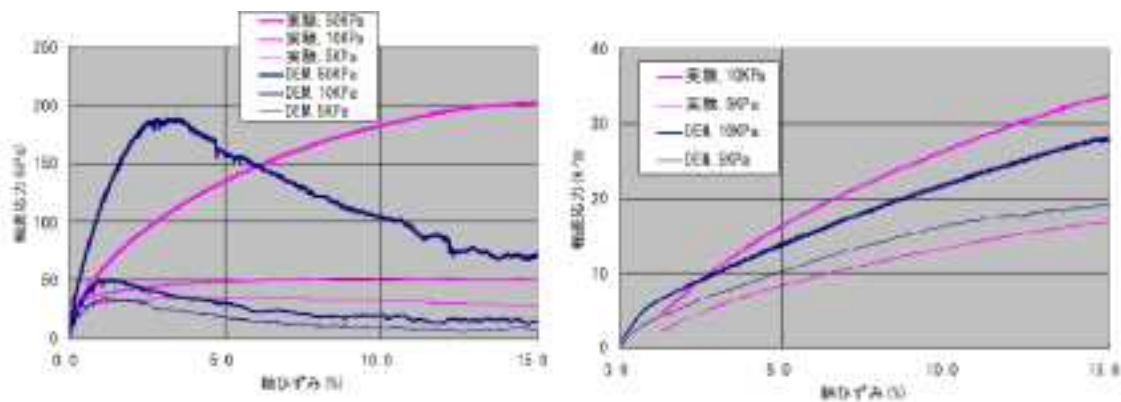


図 10.2.24 フィッティングの結果



表 10.2.5 砕石および土砂モデルの解析パラメータ

	半径 (m)	反発 係数	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	半径方向 ばね係数 (N/m)	接線方向 ばね係数 (N/m)	半径方向 粘性係数 (N・s/m)	接線方向 粘性係数 (N・s/m)	摩擦係数	引張限界力 (N)
砕石	0.1	0.1	3,044	$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$5.97 \times 10^3$	$5.97 \times 10^3$	0.411*	250
土砂	0.1	0.1	2,200	$2.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$	$5.08 \times 10^2$	$5.08 \times 10^2$	0.411*	30

\* (黒スプレー、動摩擦係数)

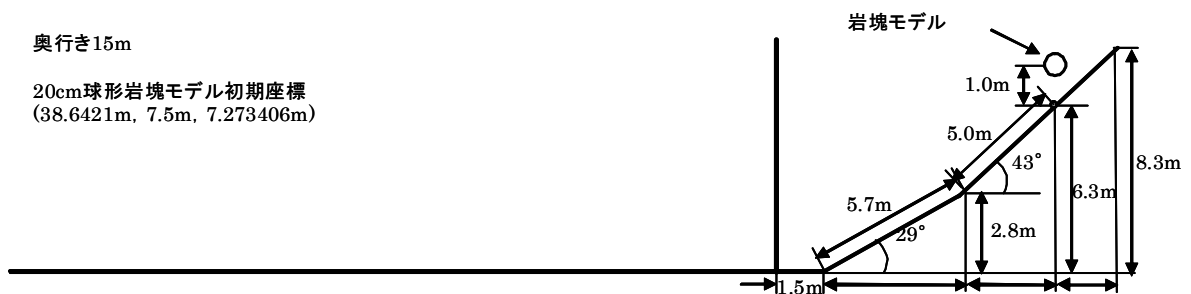
(3) 斜面および底板等のモデル化

・球形岩塊

球形岩塊モデル用の斜面、底板および反力壁のモデルを図 10.2.25 に示す。斜面、底板および反力壁は剛な平面境界である。反力壁では、岩塊が壁に作用する力を計算した。



(a) 反力壁無しモデル



(b) 反力壁有りのモデル

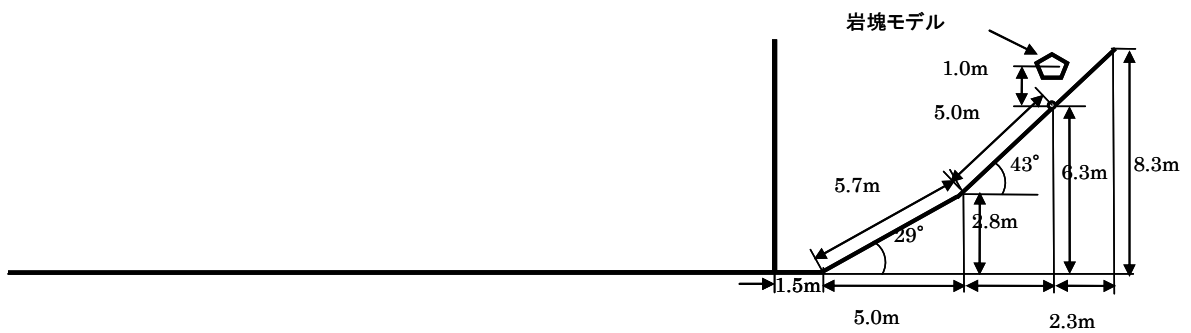
図 10.2.25 球形岩塊モデル用の斜面および底板のモデル

・塊状岩塊および板状岩塊

塊状岩塊および板状岩塊モデル用の斜面、底板および反力壁のモデルを図 10.2.26 に示す。斜面、底板および反力壁は剛な平面境界である。反力壁では、岩塊が壁に作用する力を計算した。



(a) 反力壁無しモデル



(b) 反力壁有りのモデル

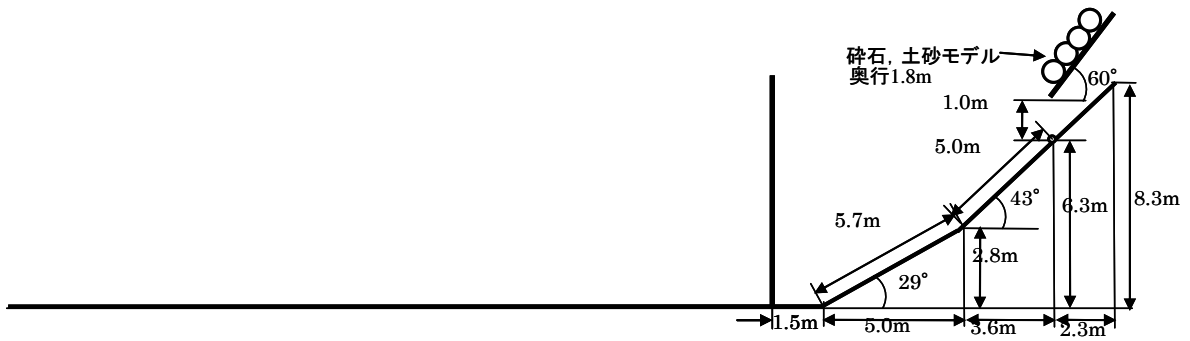
図 10.2.26 塊状岩塊および板状岩塊モデル用の斜面および底板のモデル

・ 砕石および土砂

砕石および土砂モデル用の斜面、底板および反力壁のモデルを図 10.2.27 に示す。斜面、底板および反力壁は剛な平面境界である。反力壁では、岩塊が壁に作用する力を計算した。



(a) 反力壁無しモデル



(b) 反力壁有りのモデル

図 10.2.27 砕石および土砂モデル用の斜面および底板のモデル

#### 10.2.4 計算結果（変形図）

##### (1) 岩塊に対するシミュレーション結果、反力壁なし

20cm 球形岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.28 に示す。

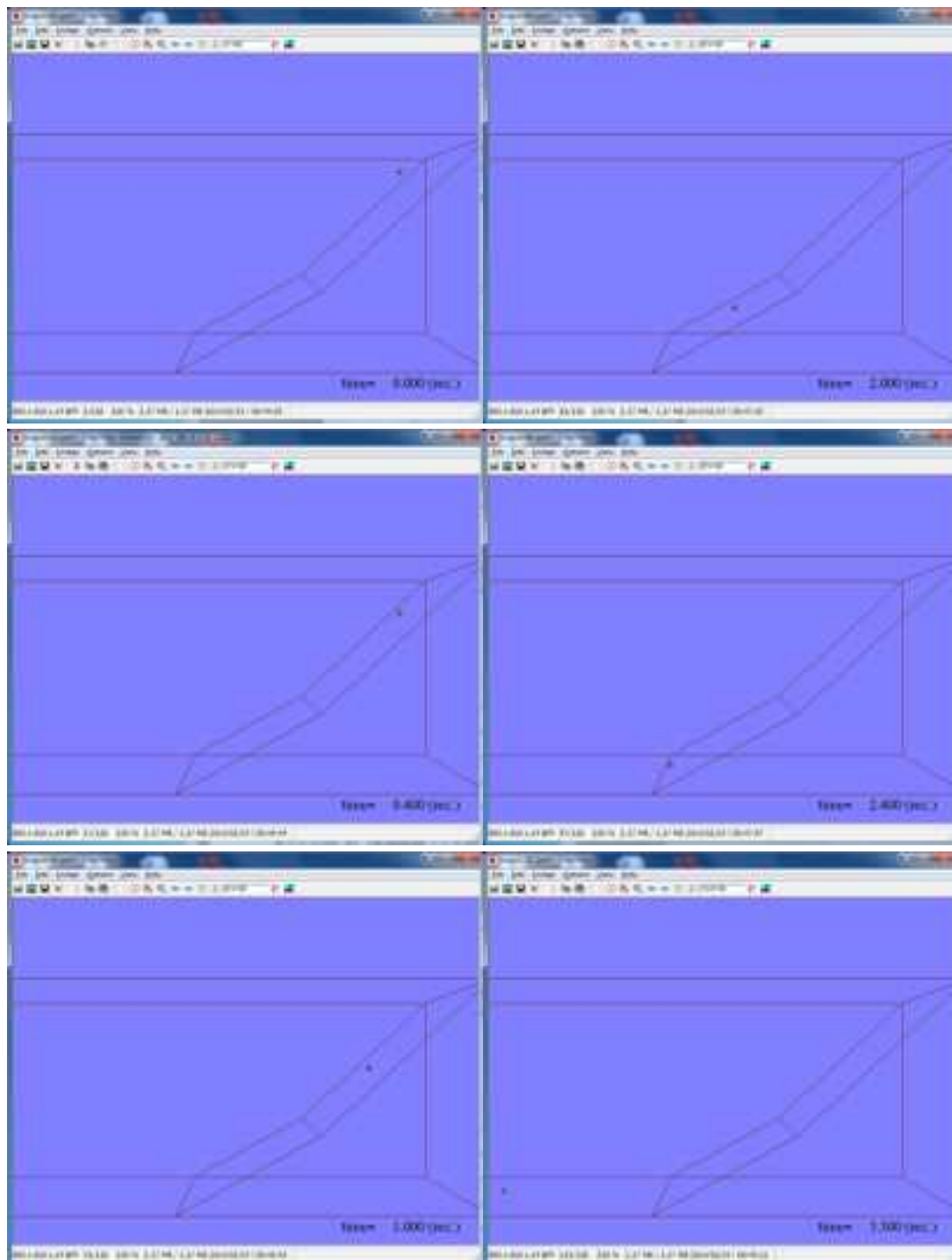


図 10.2.28 20cm 球形岩塊

40cm 球形岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.29 に示す。

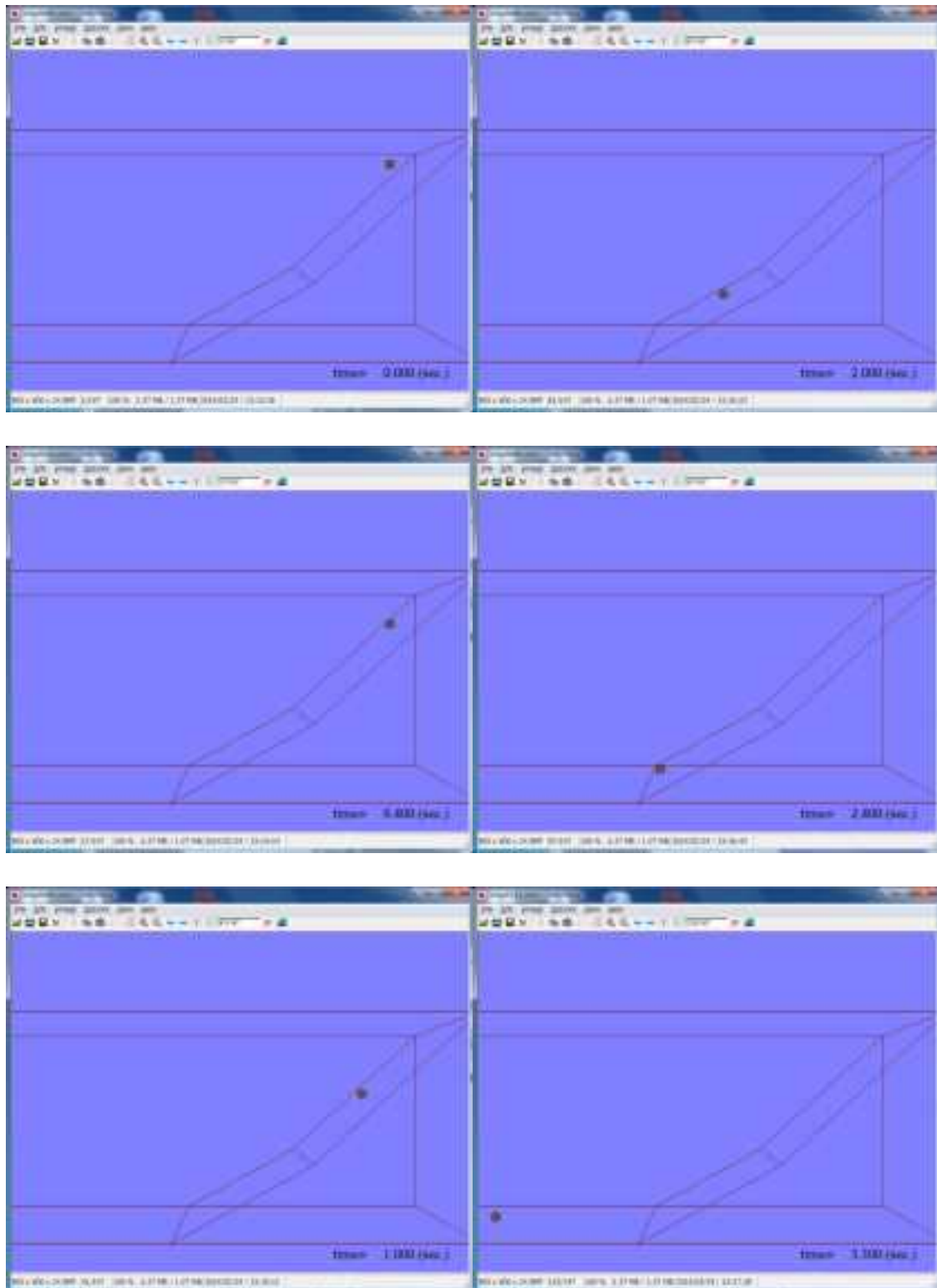


図 10.2.29 40cm 球形岩塊

20cm 塊状岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.30 に示す。

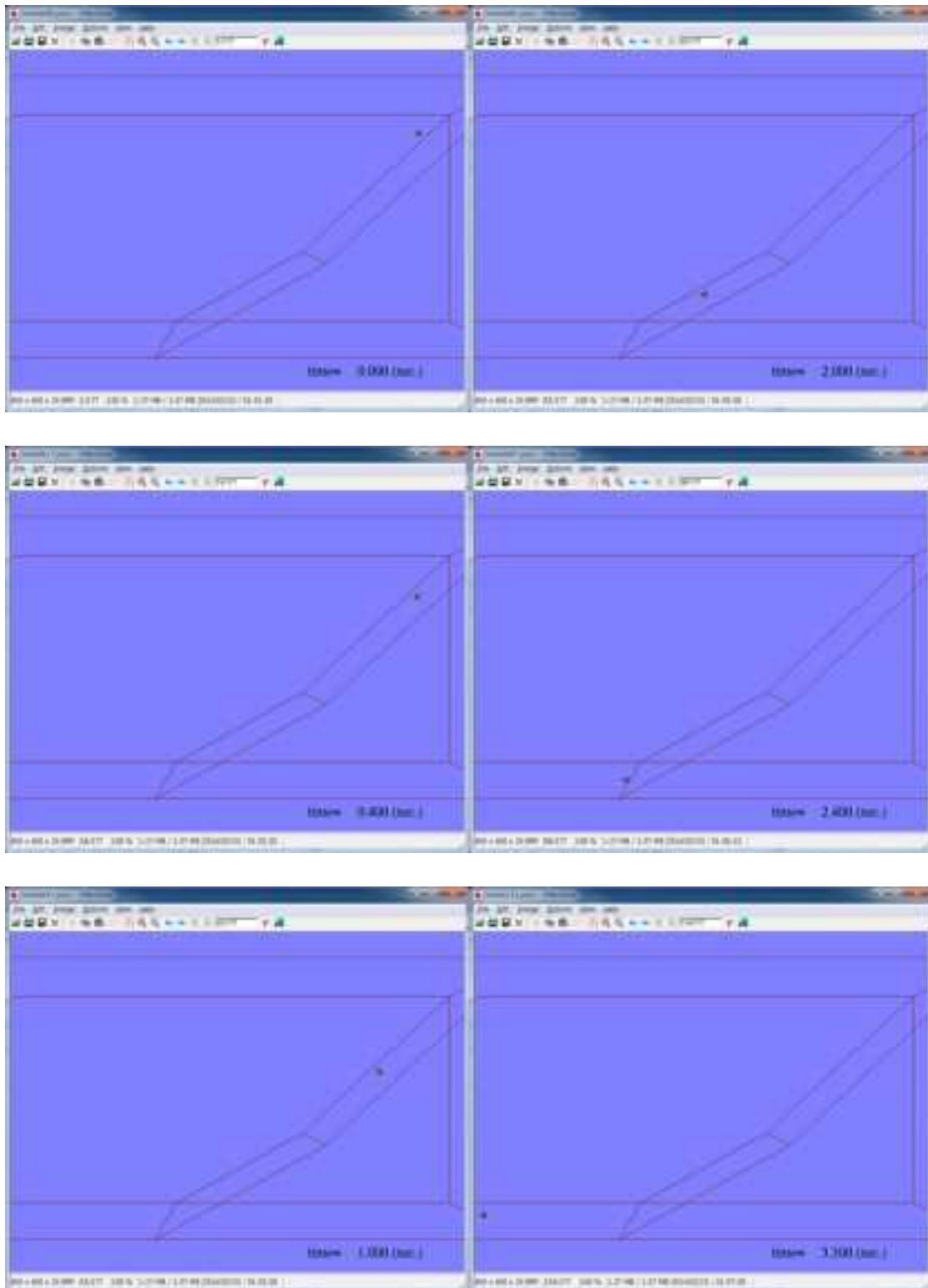


図 10.2.30 20cm 塊状岩塊

20cm 板状岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.31 に示す。

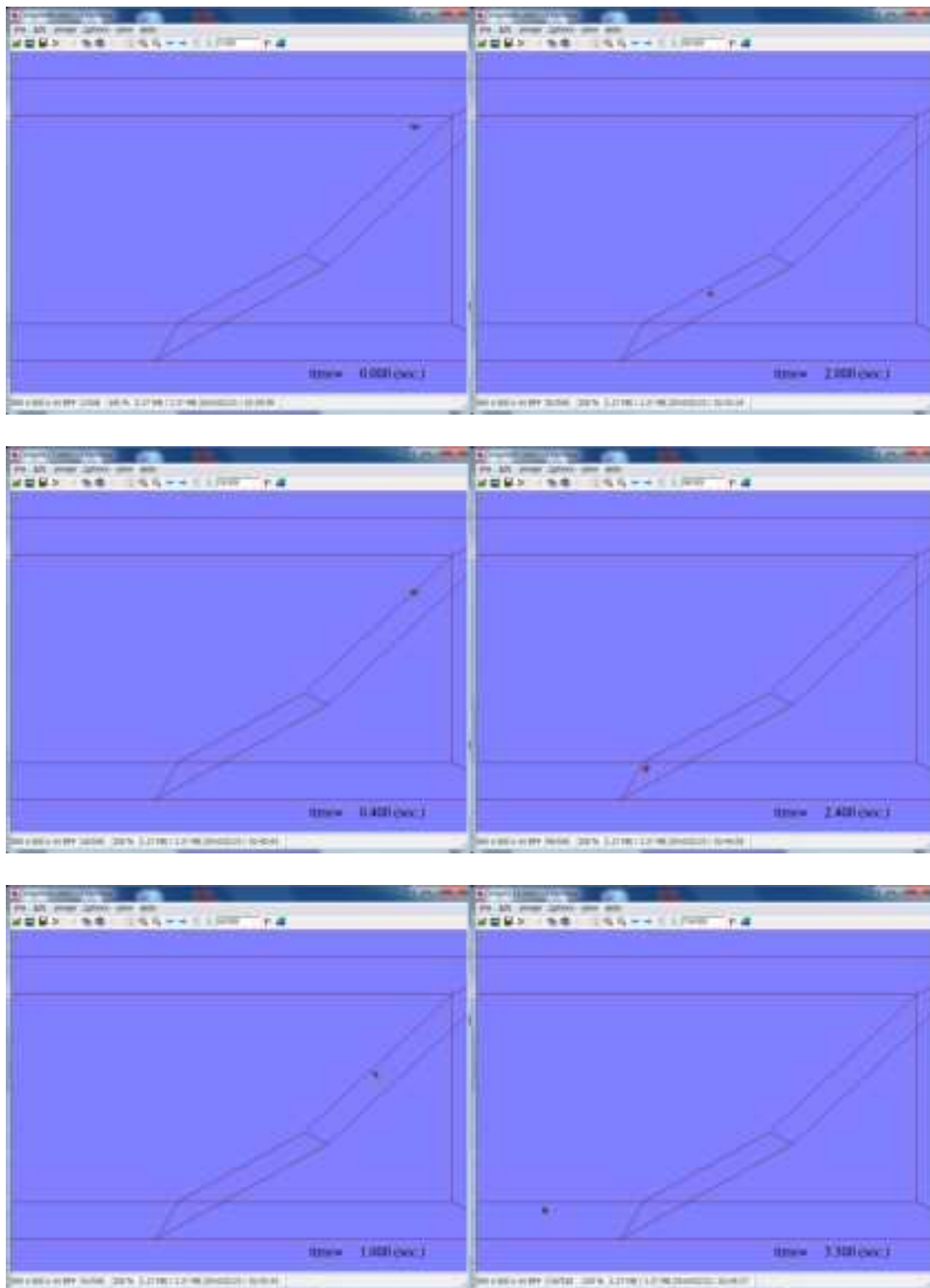


図 10.2.31 20cm 板状岩塊

40cm 塊状岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.32 に示す。

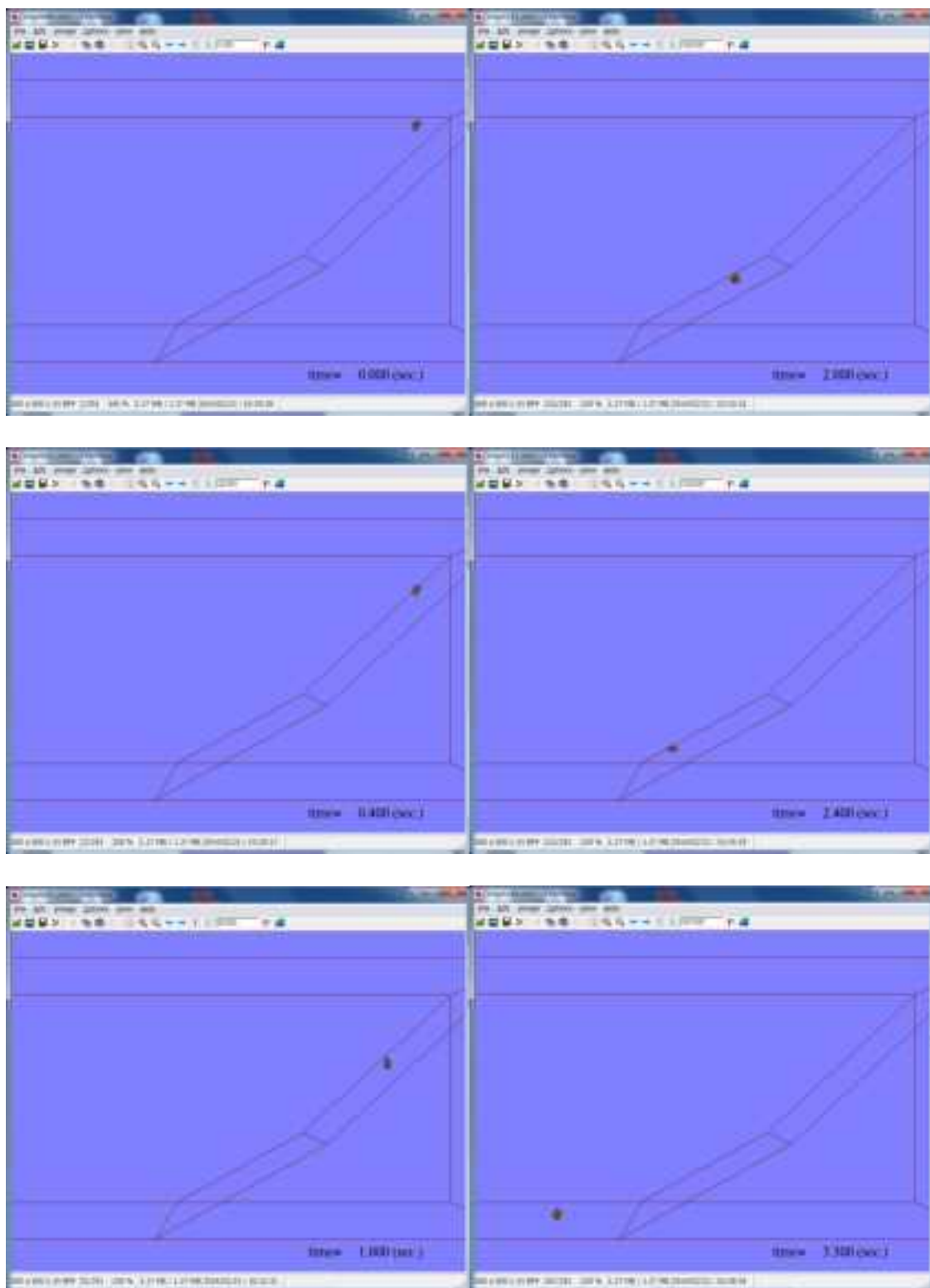


図 10.2.32 40cm 塊状岩塊



40cm 板状岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.33 に示す。

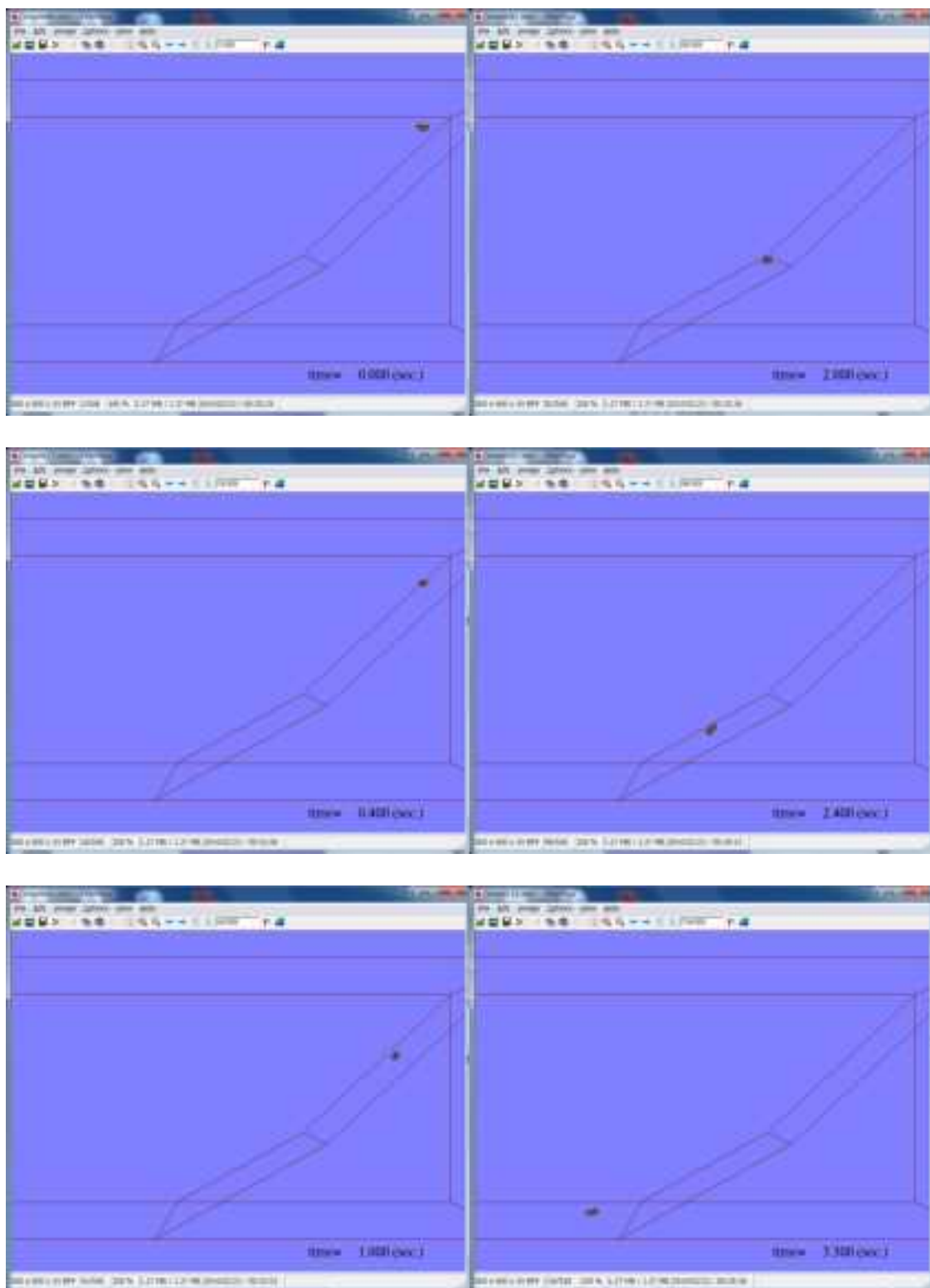


図 10.2.33 40cm 板状岩塊

(2) 岩塊に対するシミュレーション結果、反力壁あり

20cm 球形岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.34 に示す。

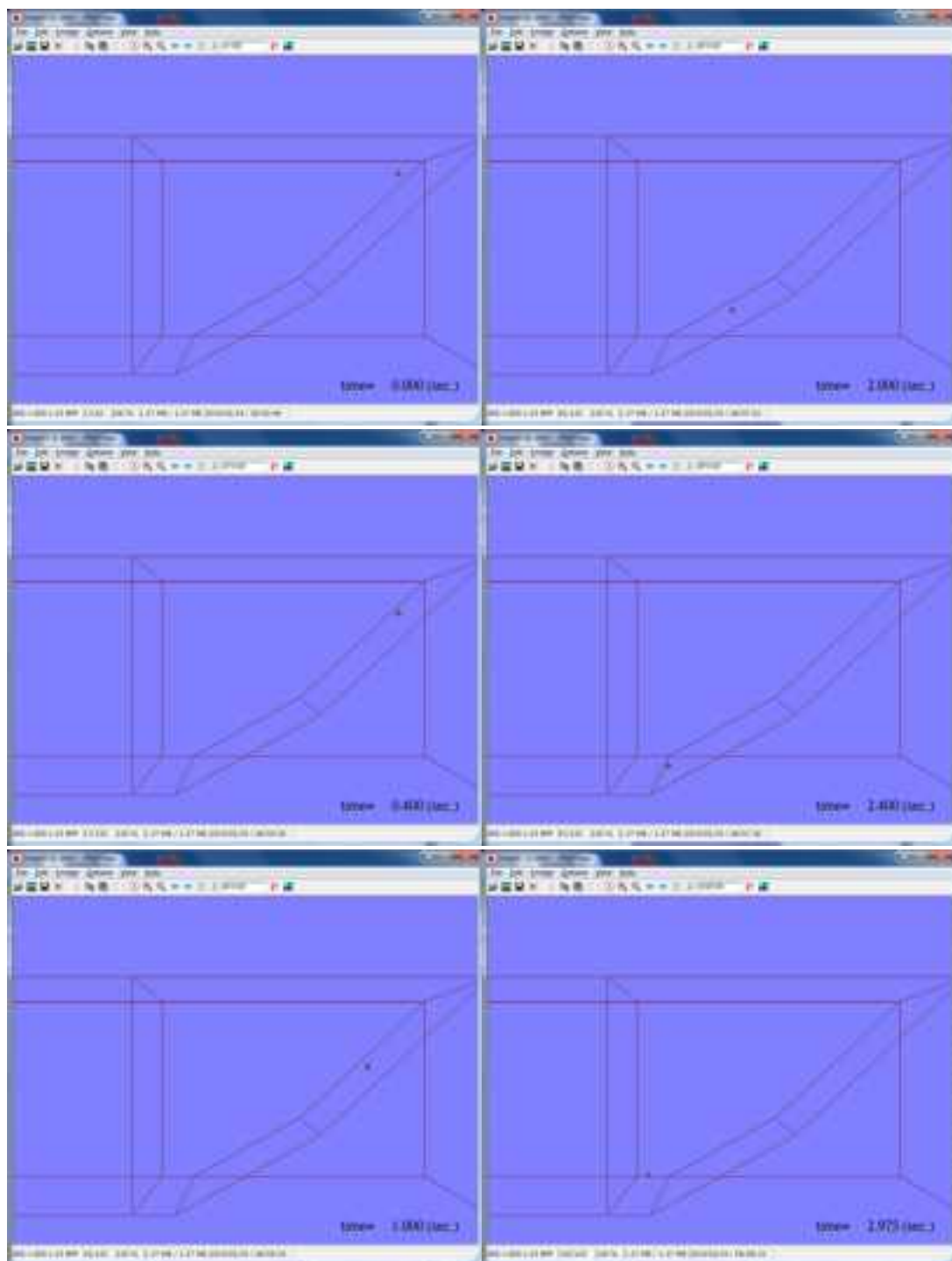


図 10.2.34 20cm 球形岩塊

40cm 球形岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.35 に示す。

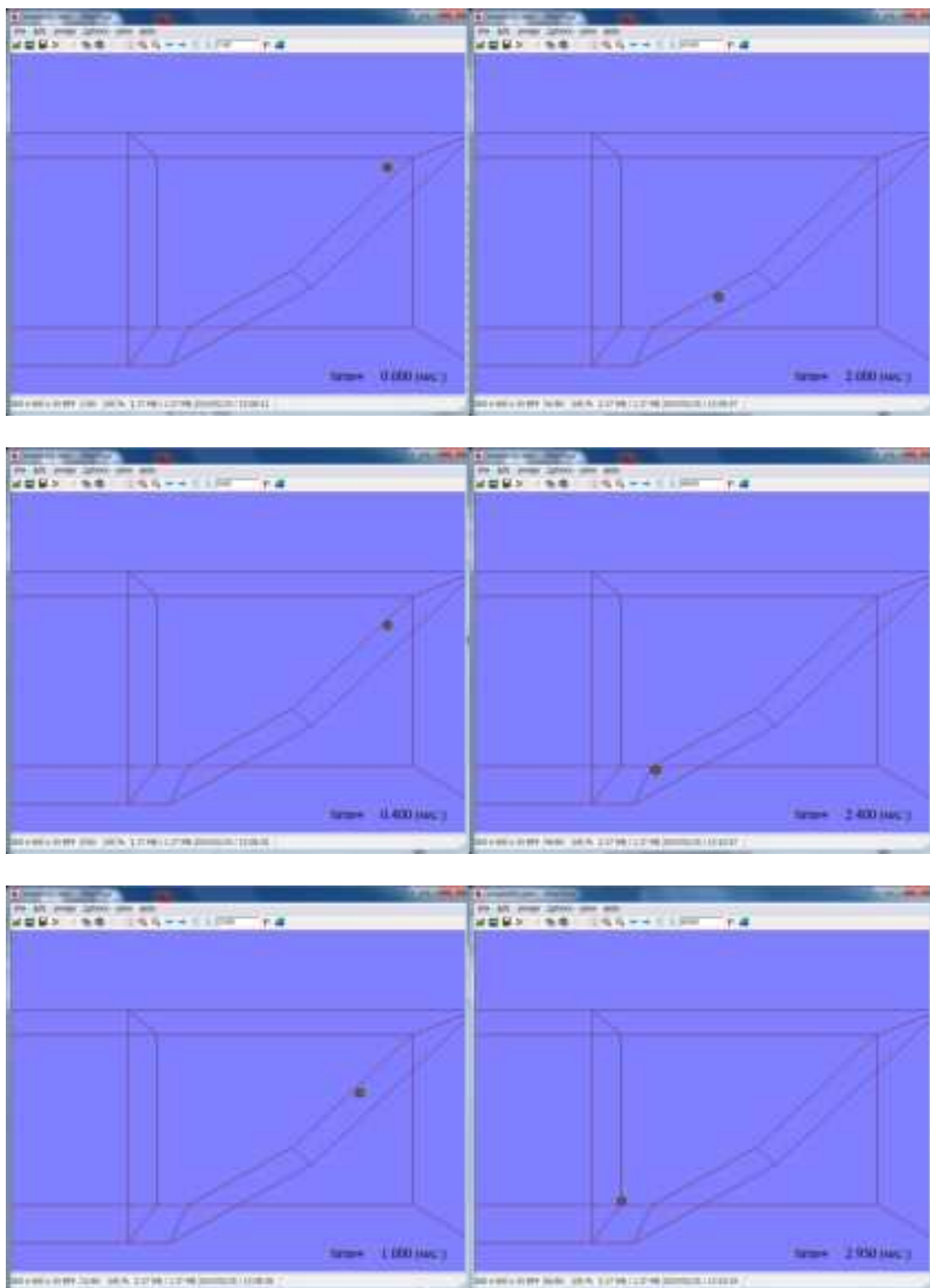


図 10.2.35 40cm 球形岩塊

20cm 塊状岩塊直撃タイプのシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを図 10.2.36 に示す。

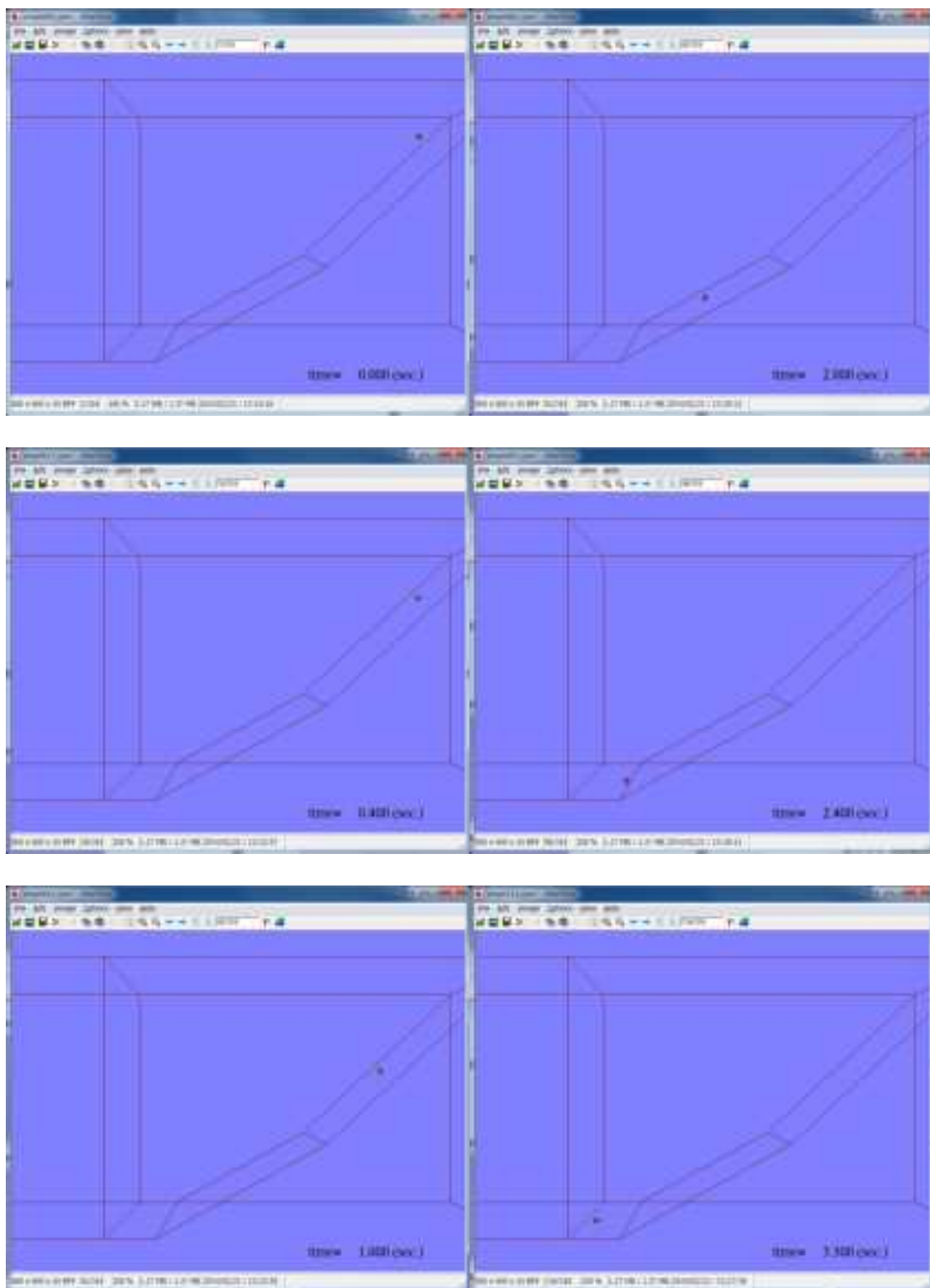


図 10.2.36 20cm 塊状岩塊直撃タイプ

20cm 塊状岩塊滑動タイプのシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを図 10.2.37 に示す。

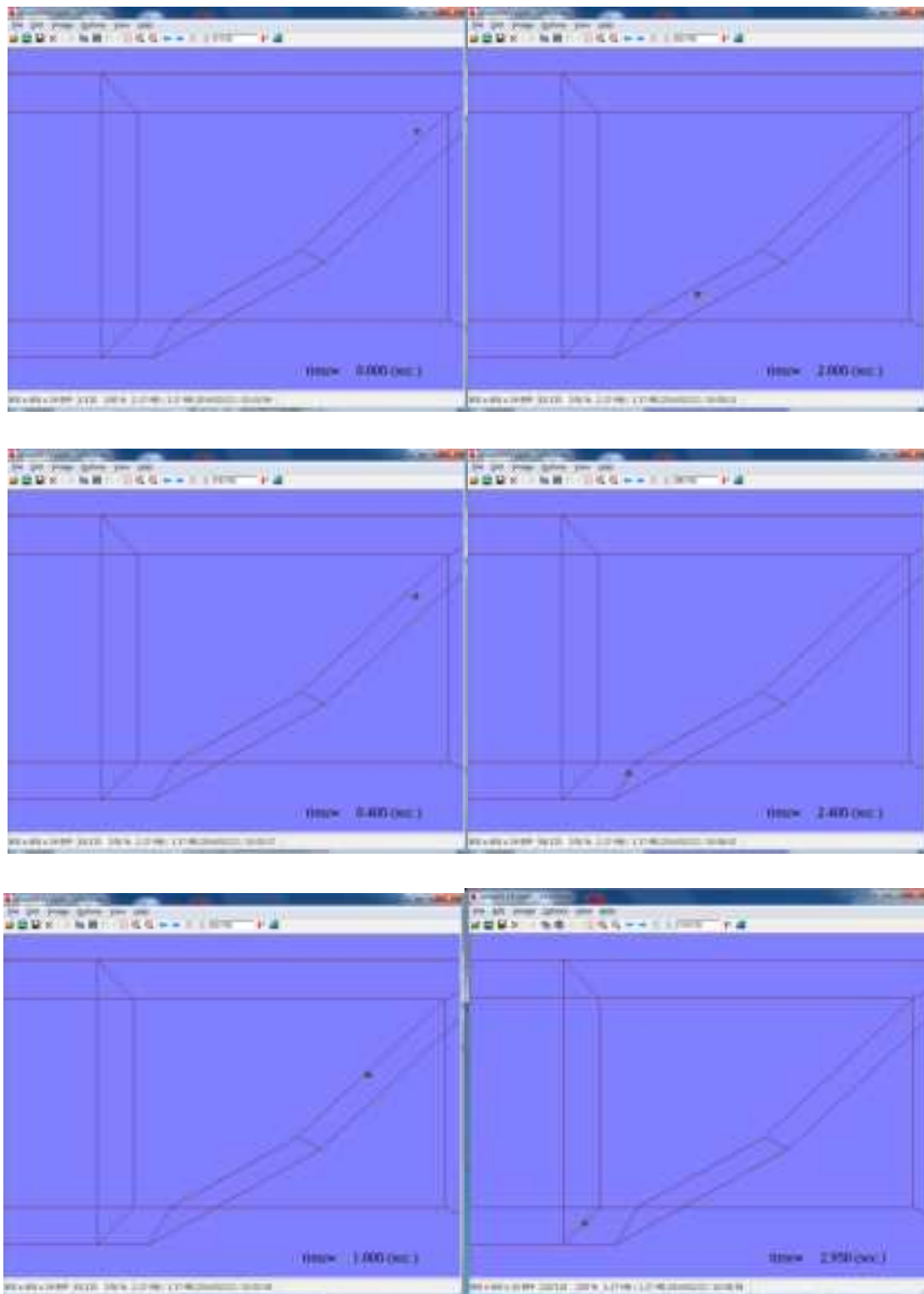


図 10.2.37 20cm 塊状岩塊滑動タイプ

20cm 板状岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.38 に示す。

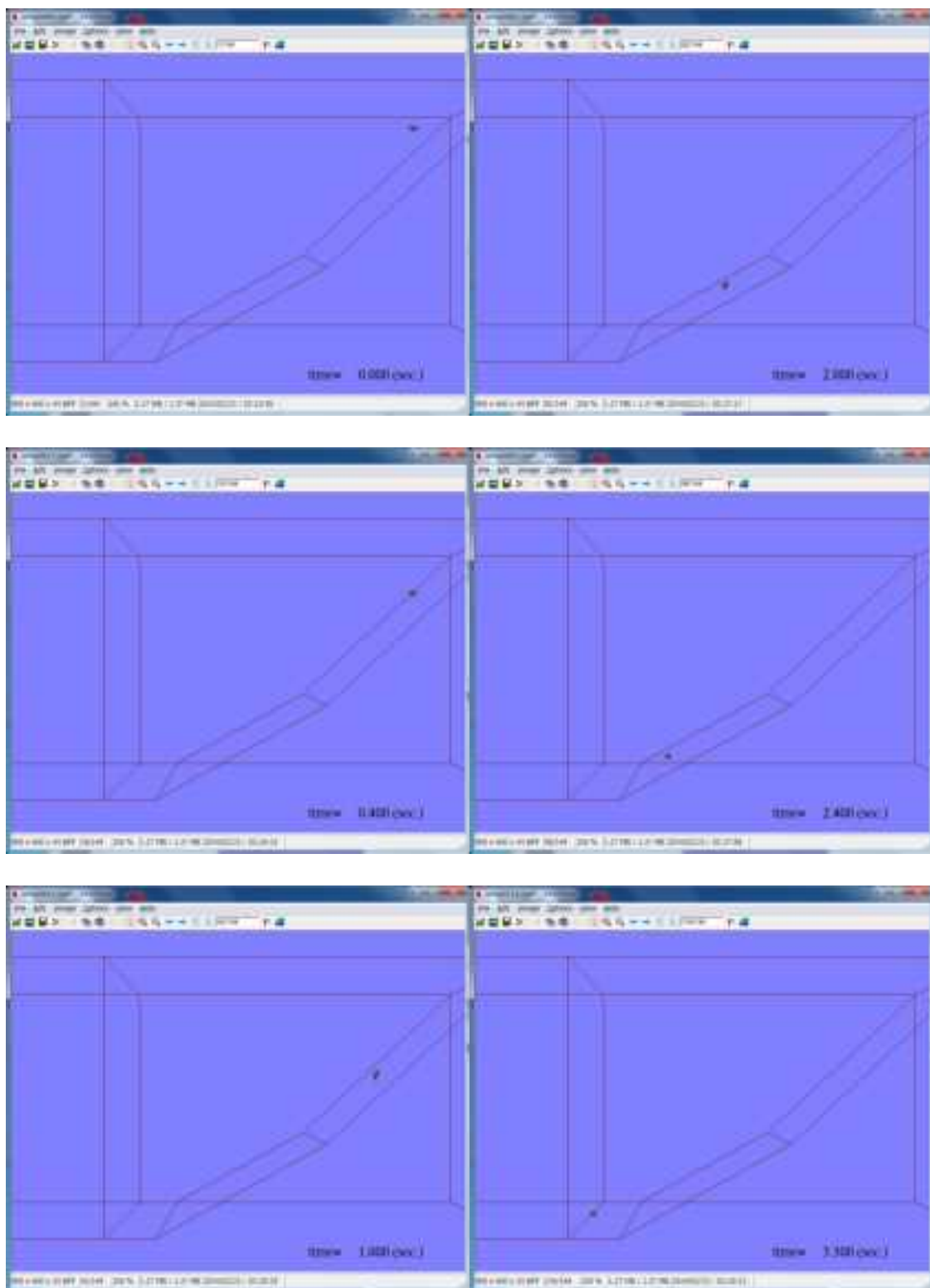


図 10.2.38 20cm 板状岩塊



40cm 塊状岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.39 に示す。

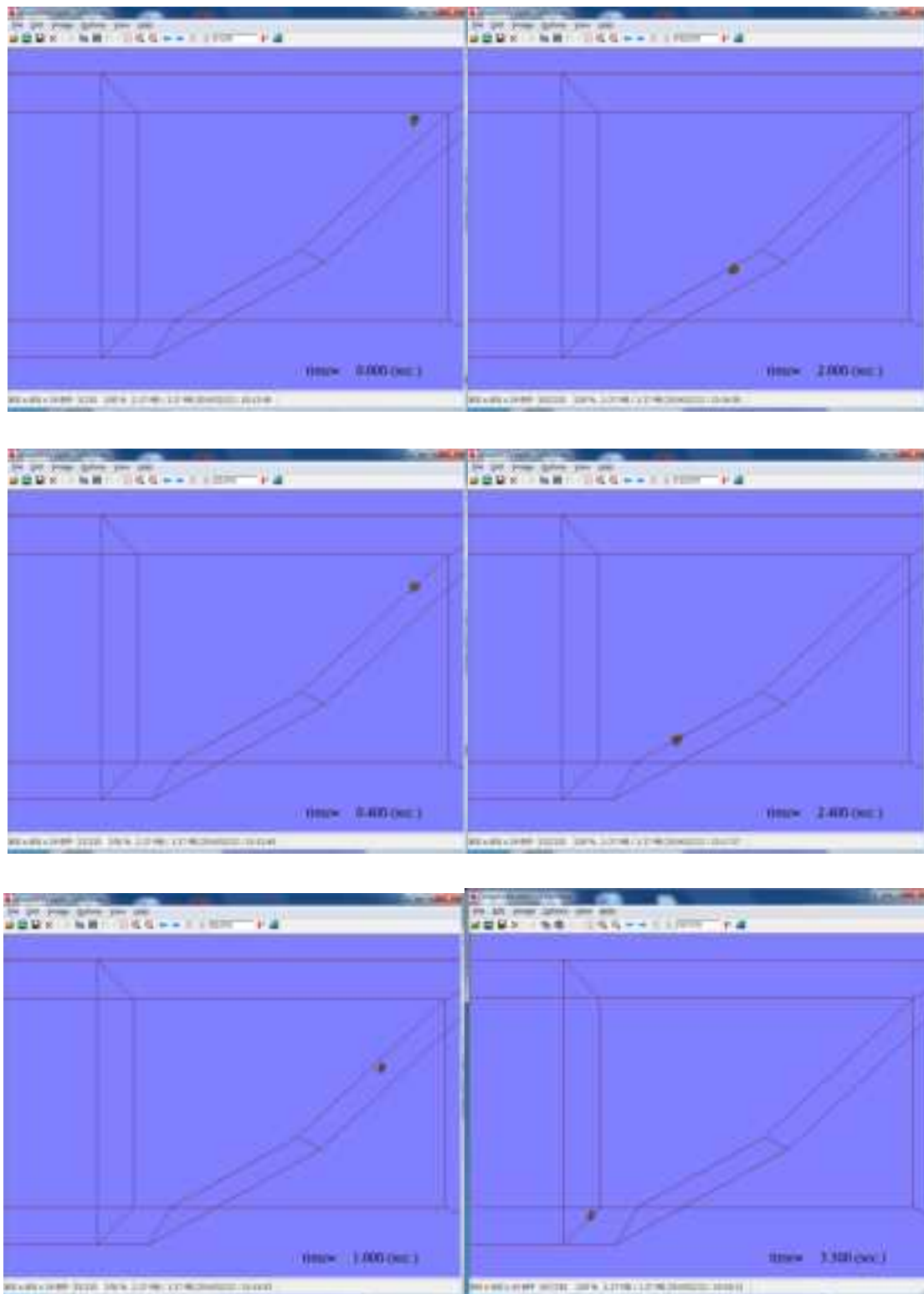


図 10.2.39 40cm 塊状岩塊

40cm 板状岩塊のシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを  
図 10.2.40 に示す。

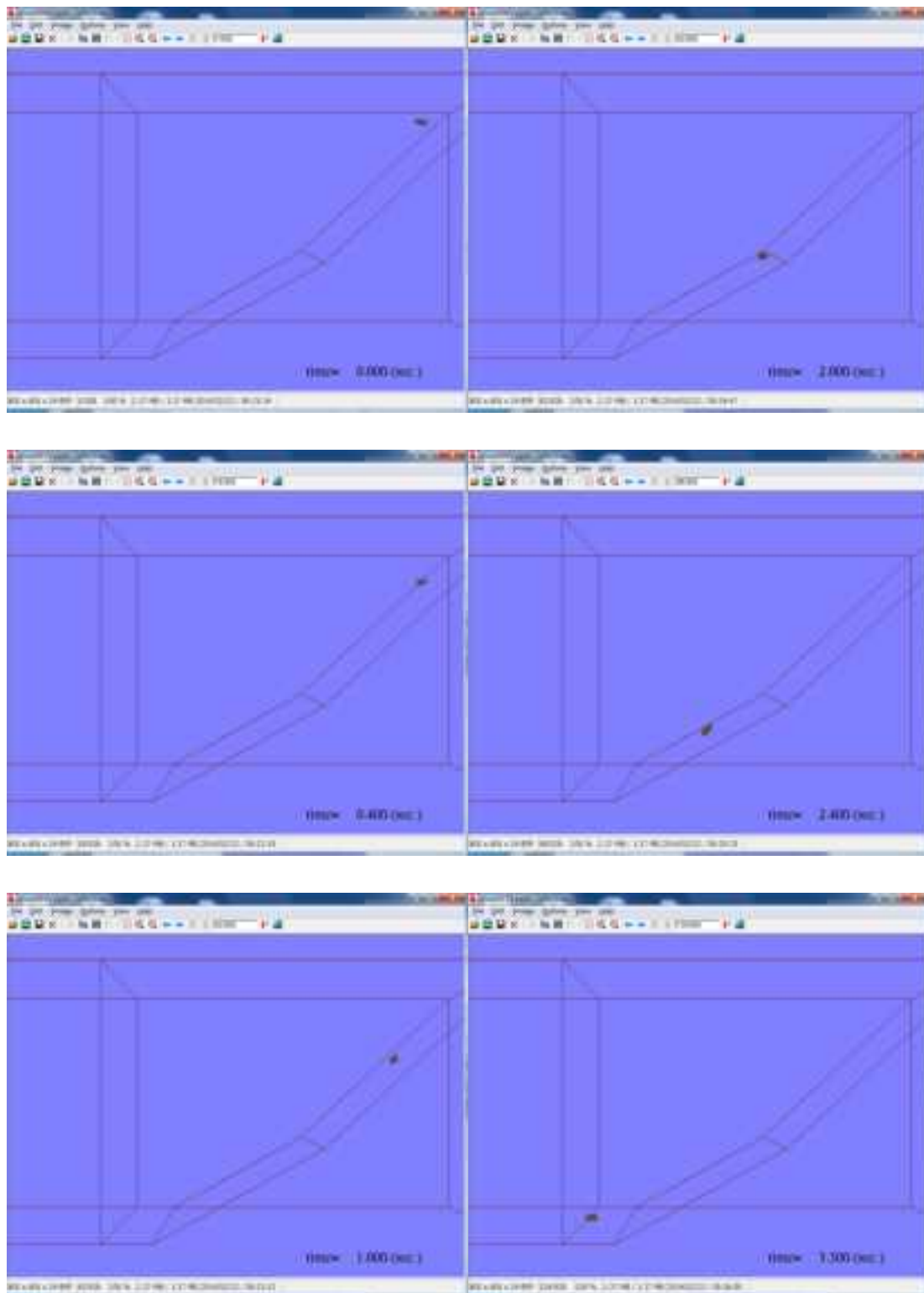


図 10.2.40 40cm 板状岩塊



(3) 碎石および土砂に対するシミュレーション結果、反力壁なし

碎石の反力壁無しのシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを図 10.2.41 に示す。

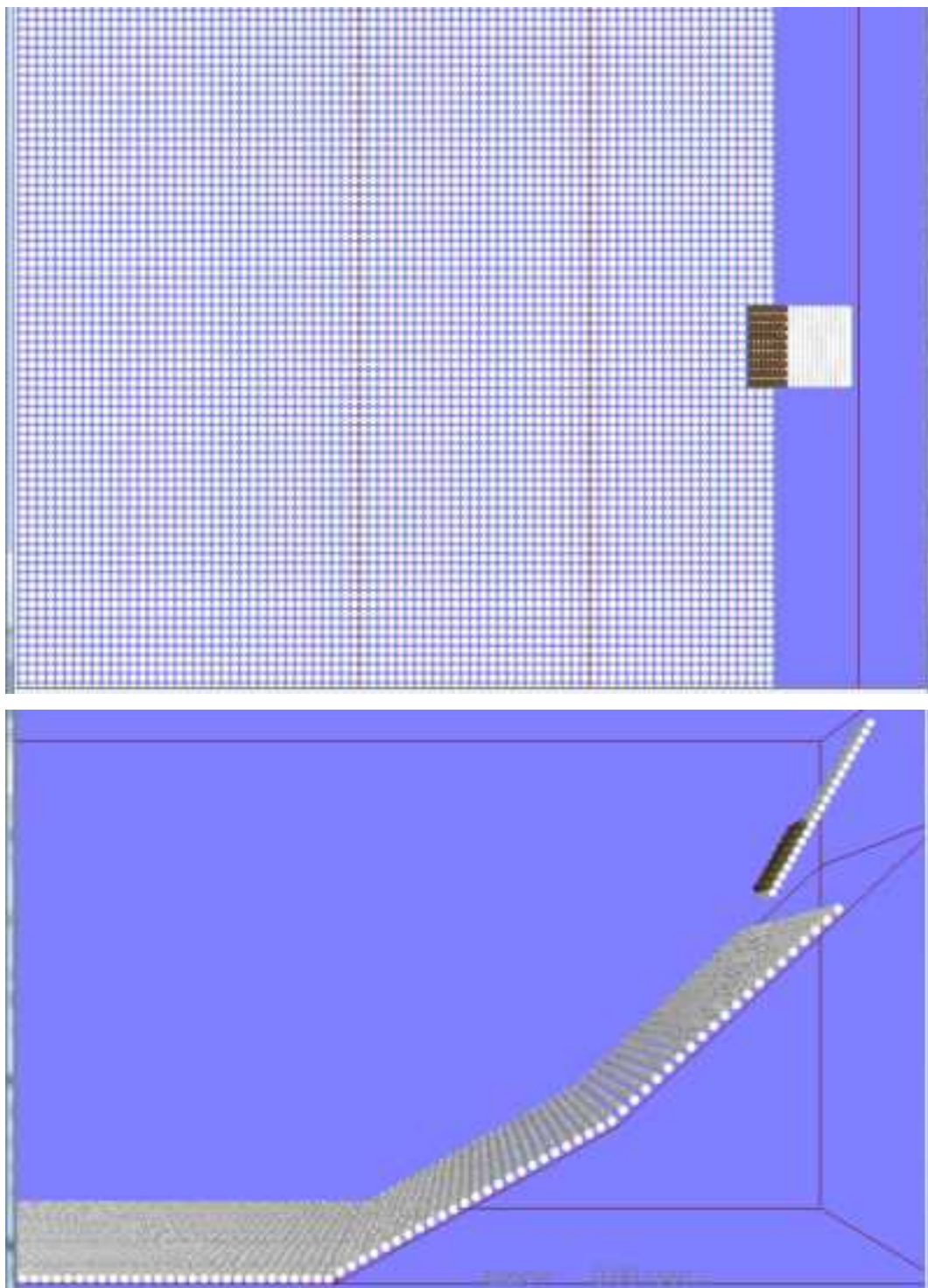


図 10.2.41(a) 碎石（初期状態）

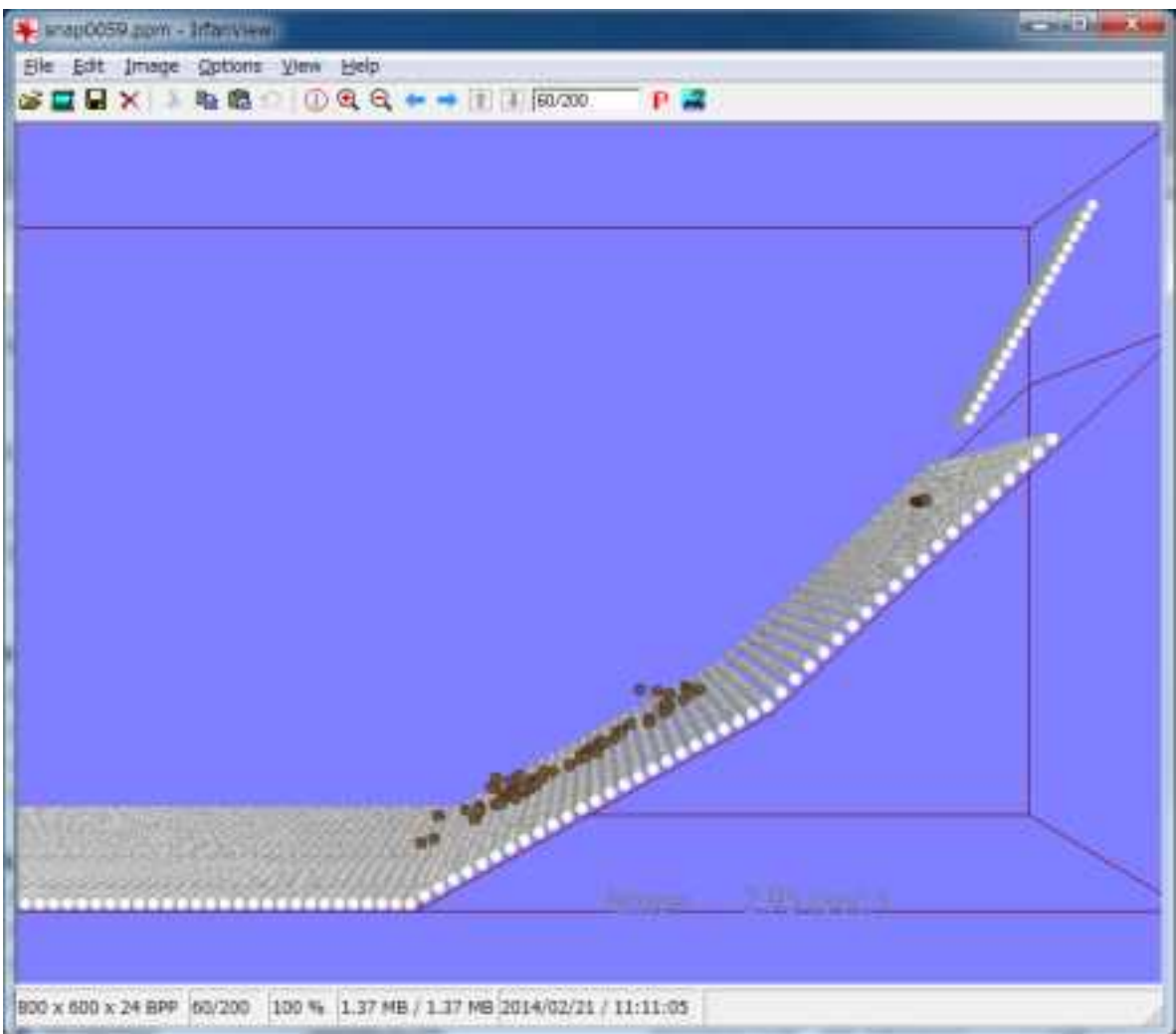
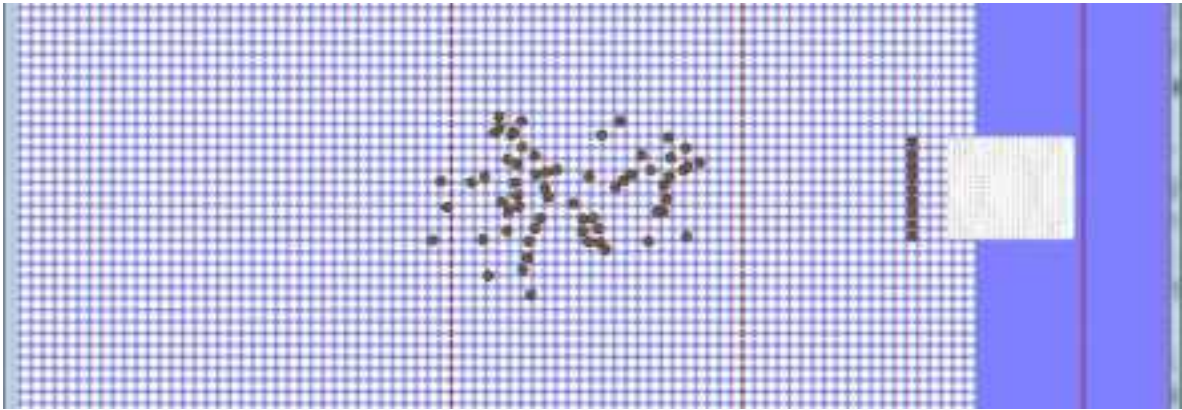


图 10.2.41(b) 碎石 (2.95 秒)

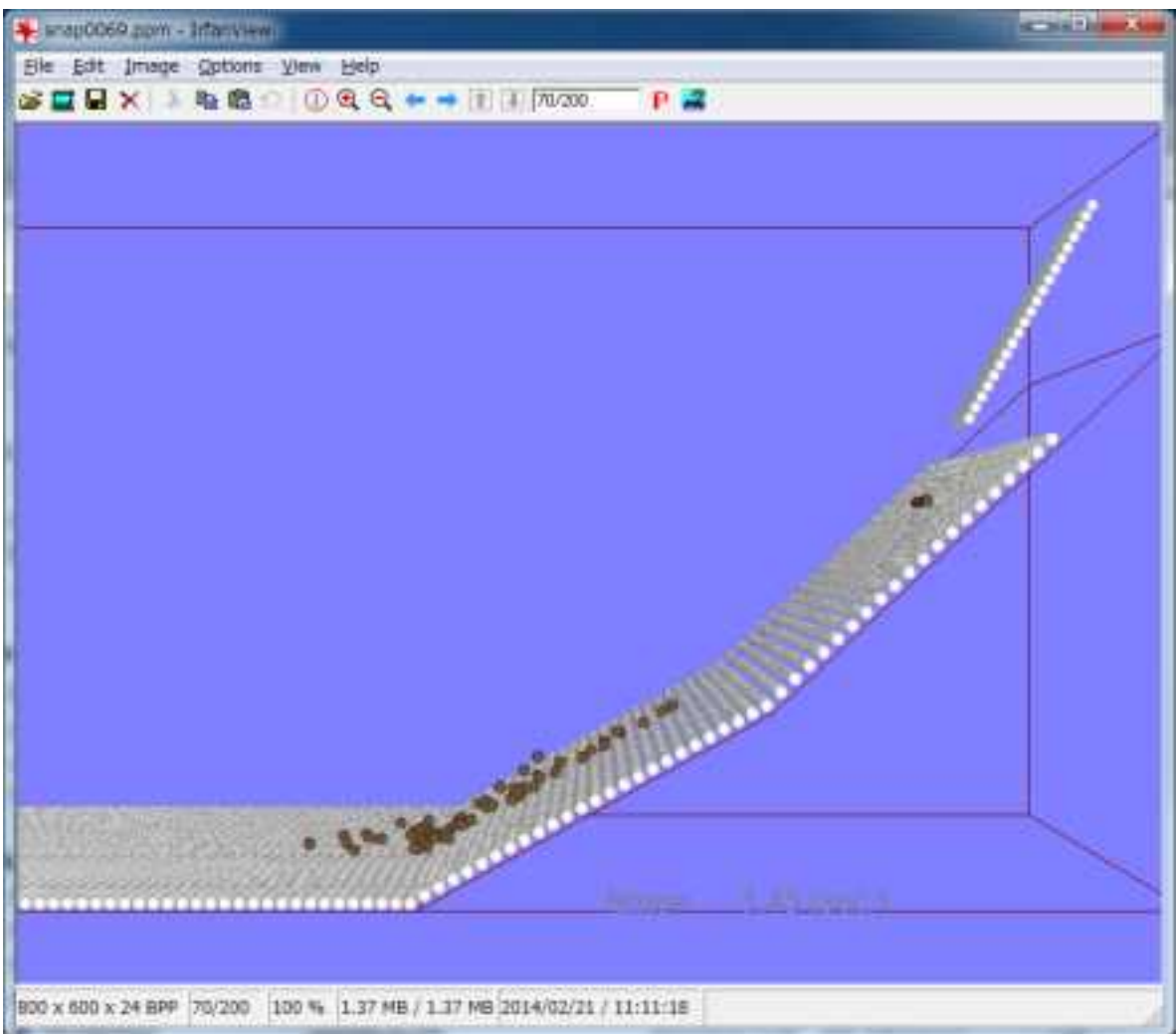


图 10.2.41(c) 碎石 (3.45 秒)



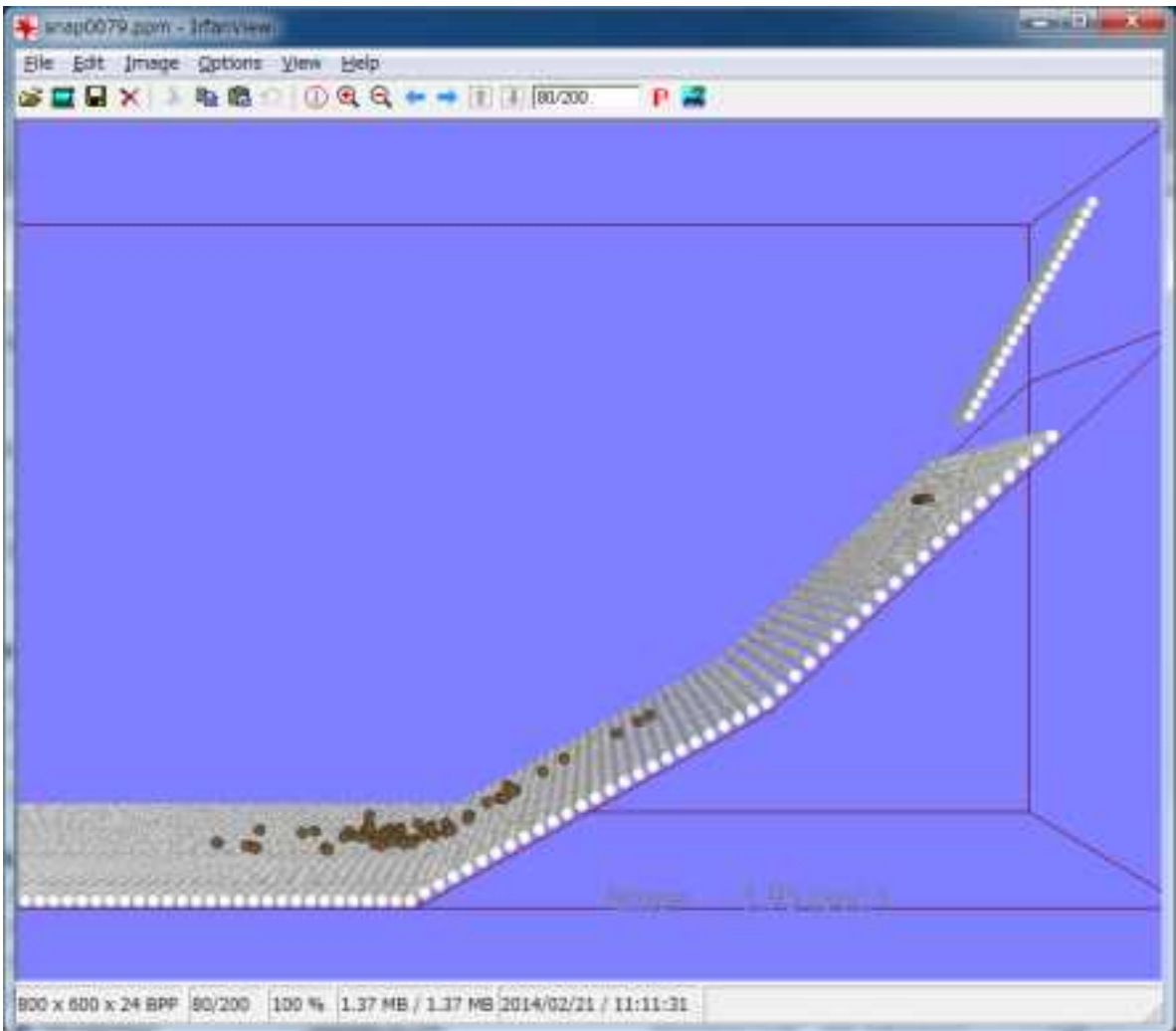


图 10.241(d) 碎石 (3.95 秒)

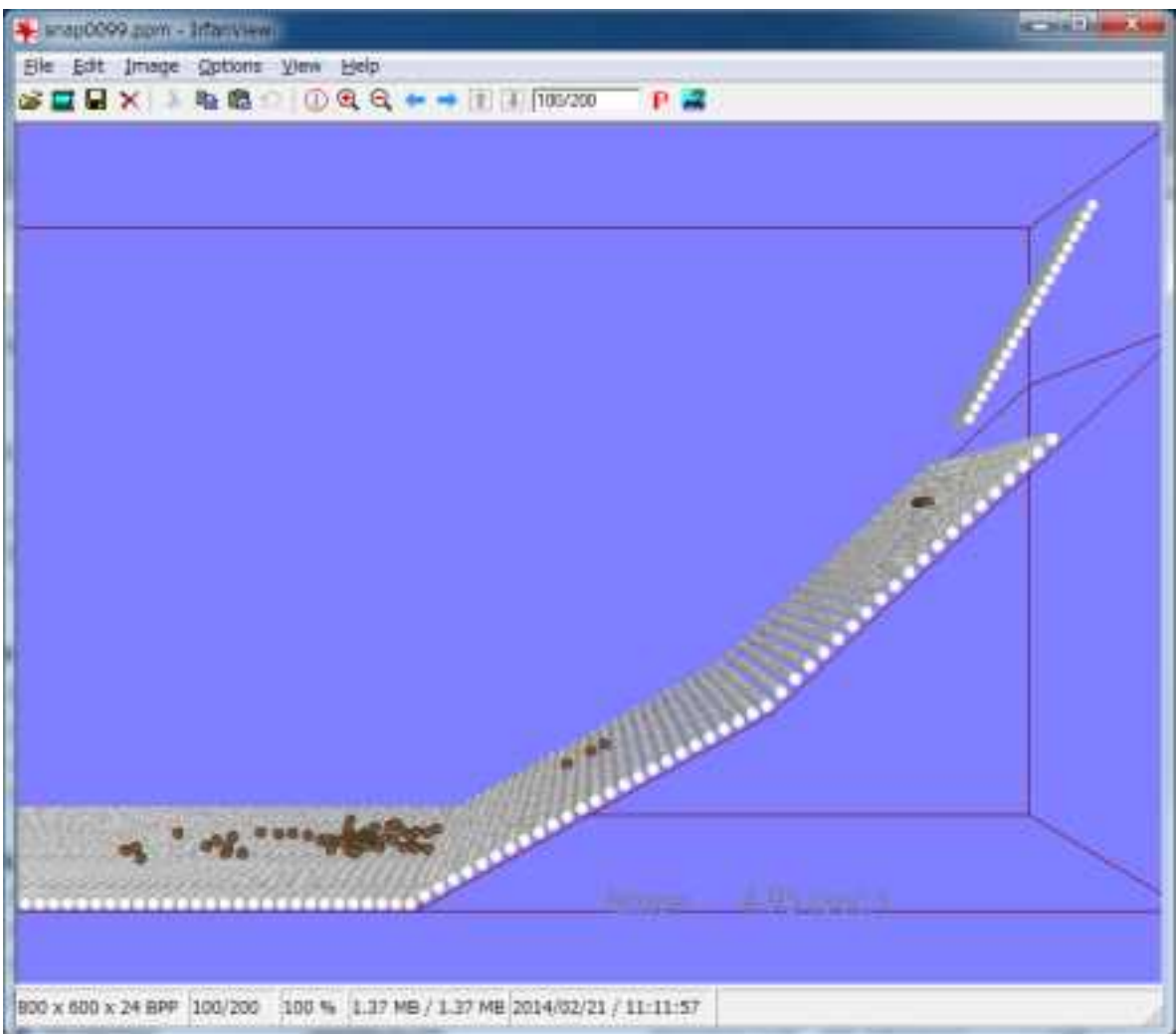
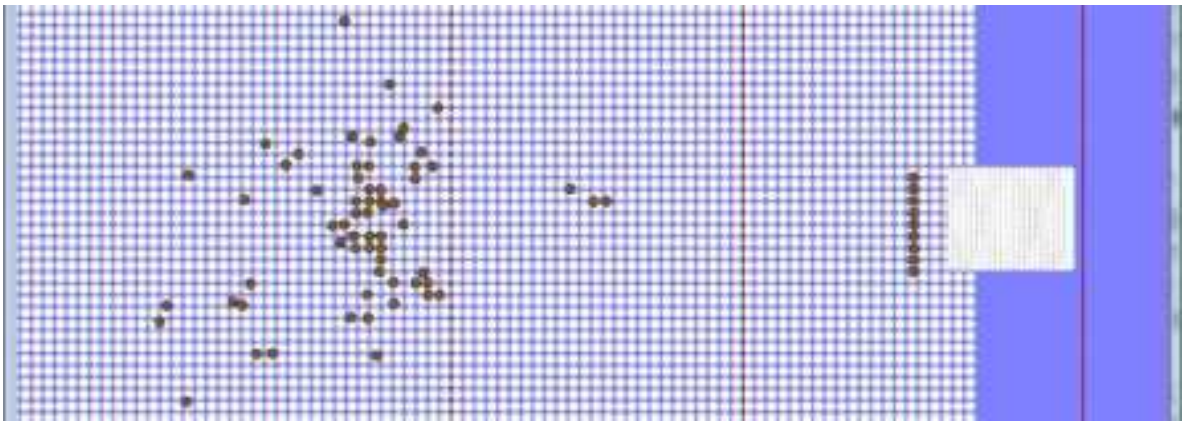


图 10.2.41(e) 碎石 (4.95 秒)

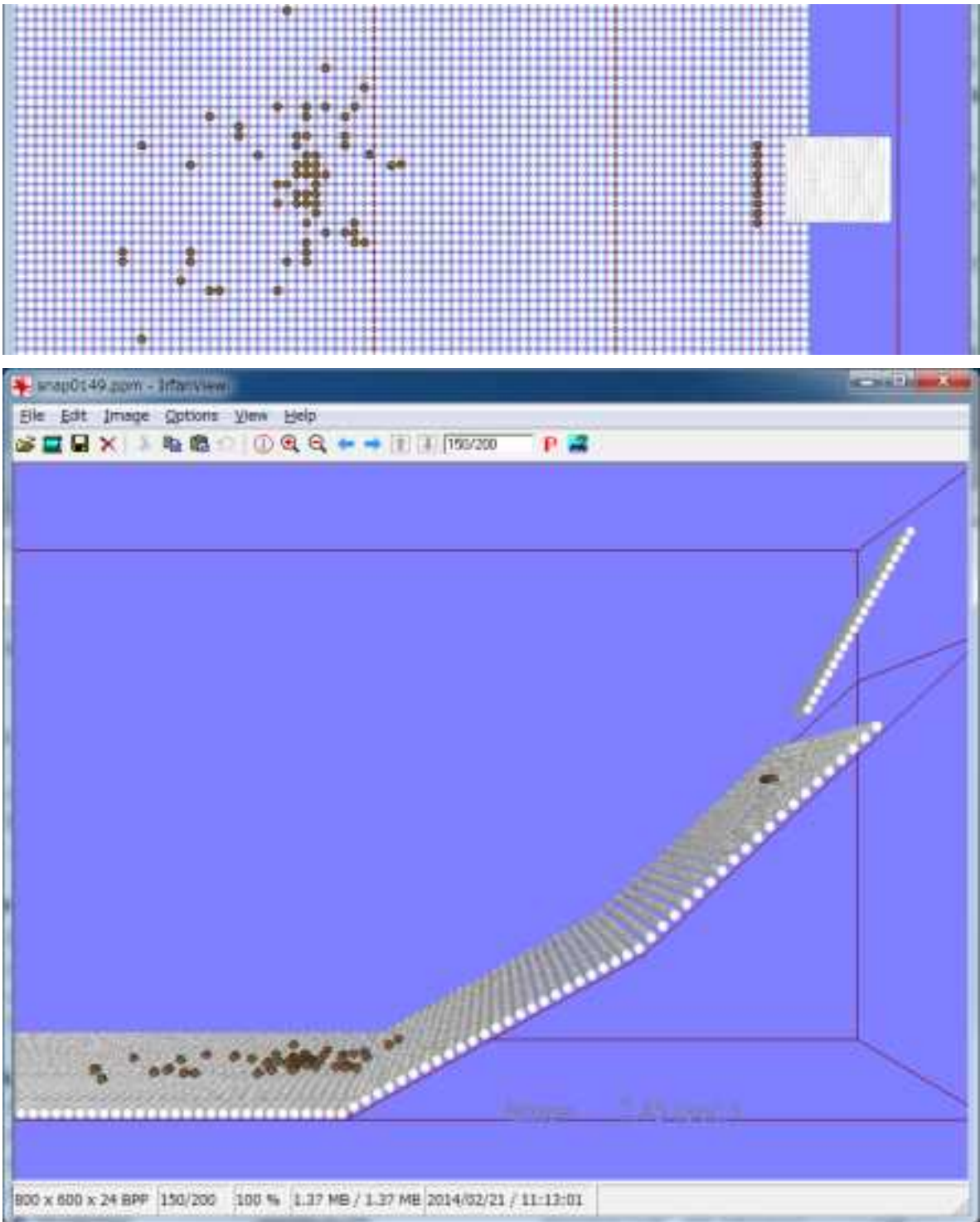


图 10.2.41(f) 碎石 (7.95 秒)



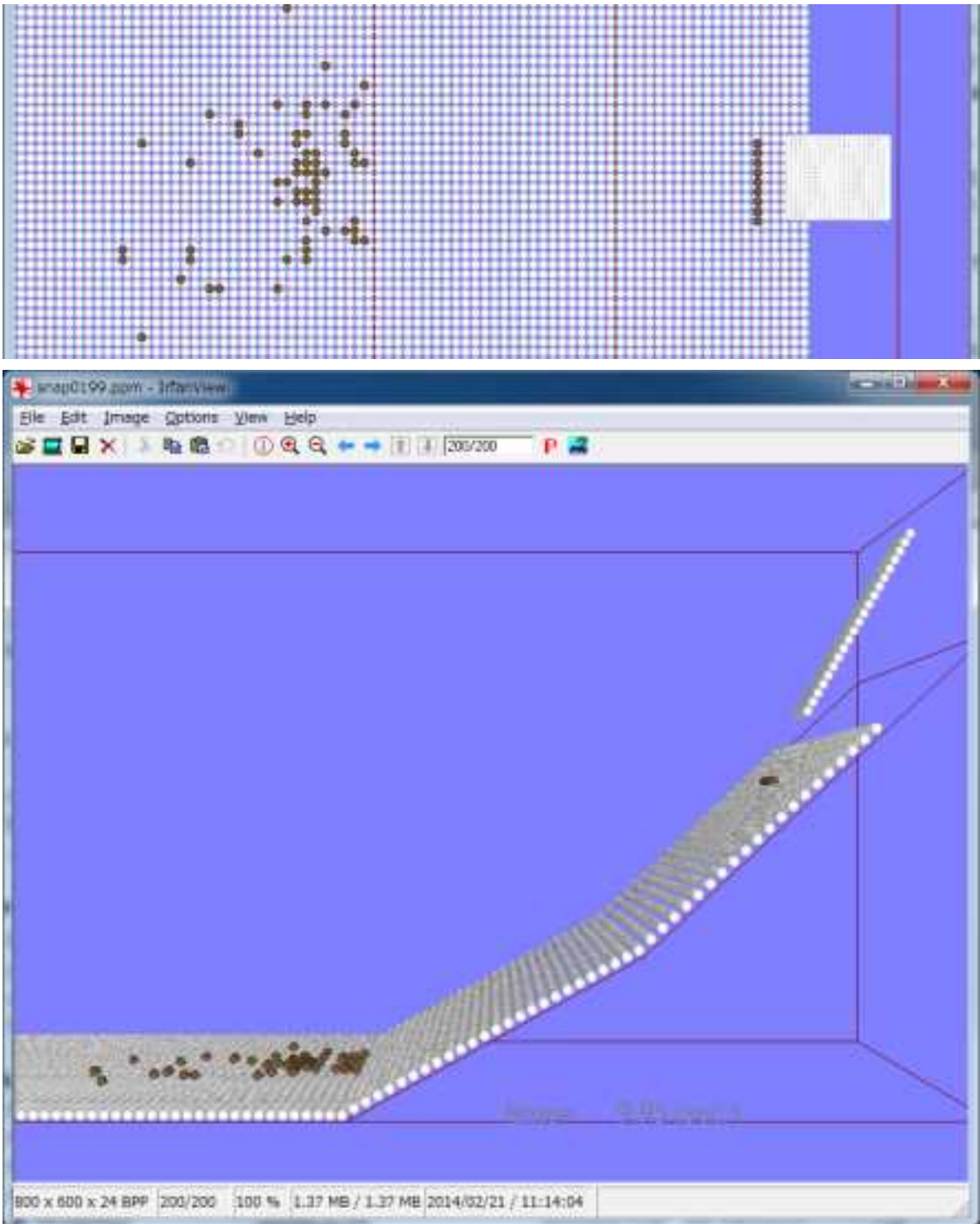


图 10.241(g) 碎石 (9.95 秒)

土砂の反力壁無しシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを図 10.2.42 に示す。

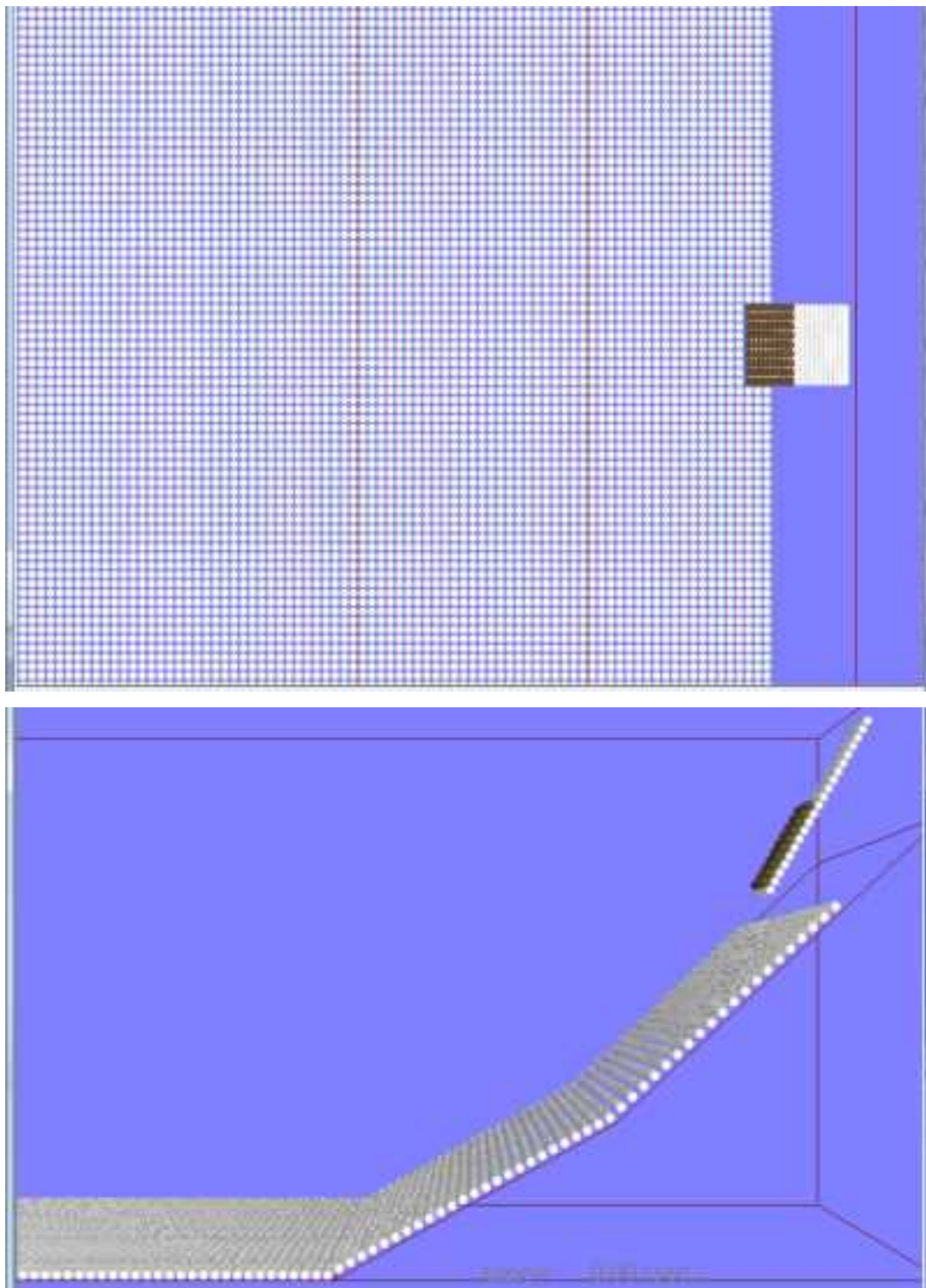


図 10.2.42(a) 土砂（初期状態）



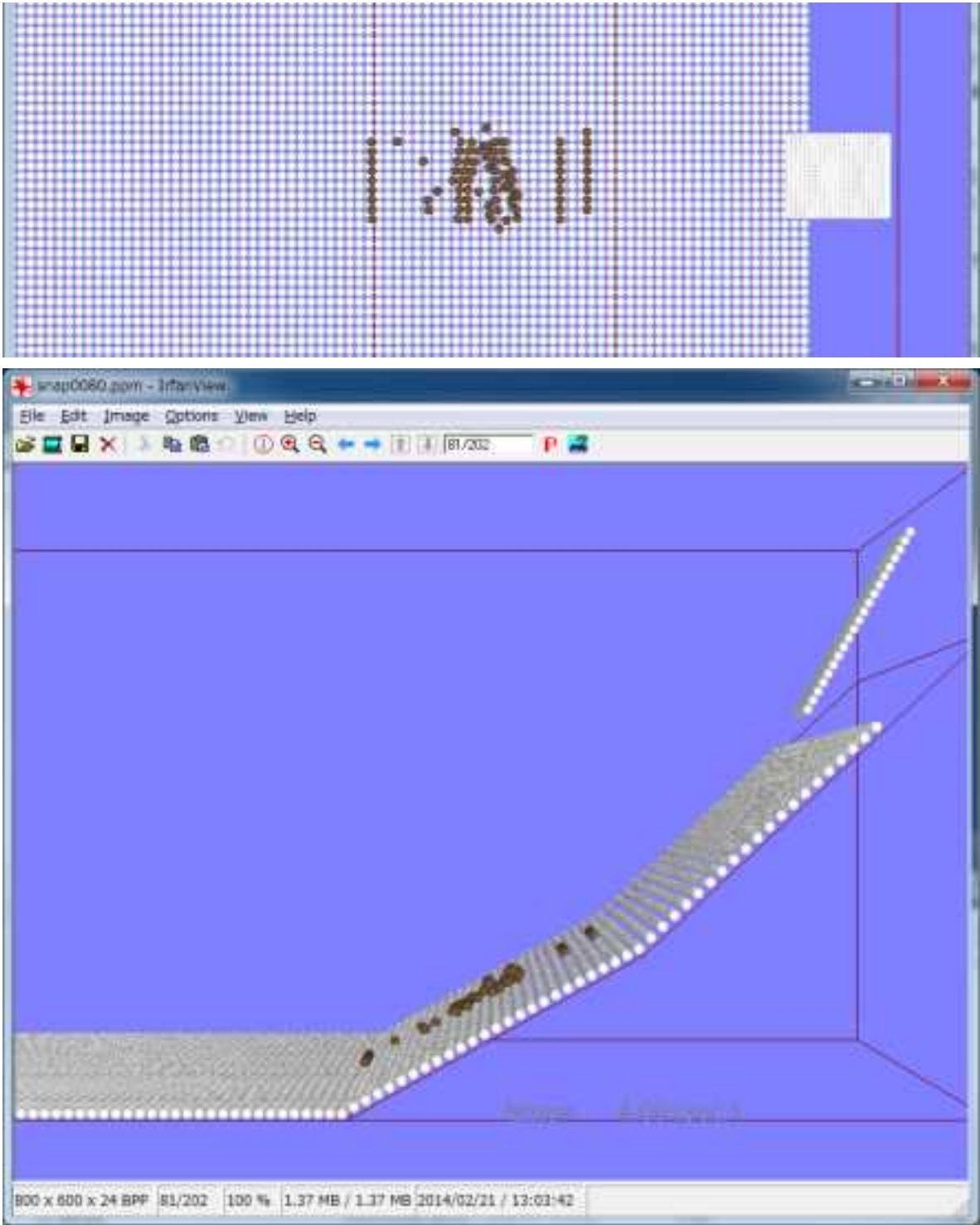


图 10.242(b) 土砂 (4.00 秒)

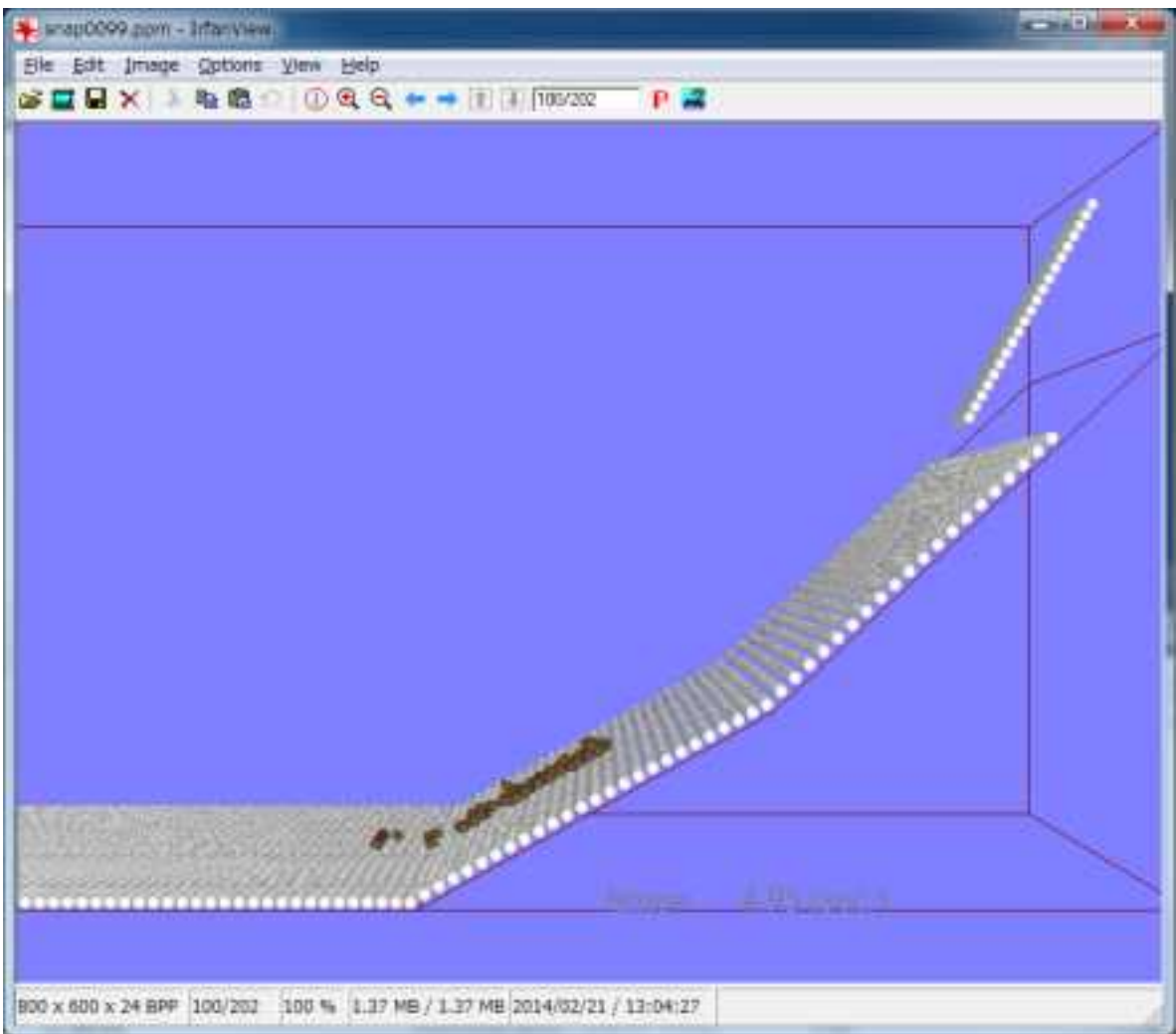
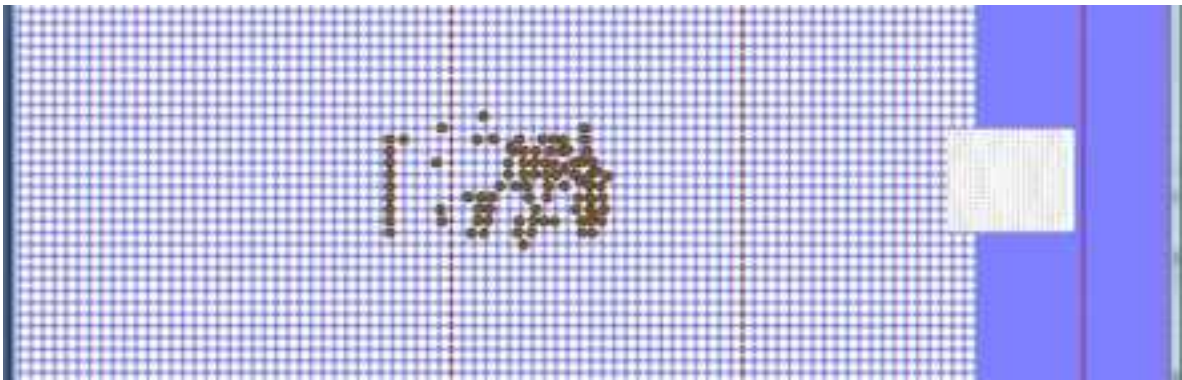


图 10.2.42(c) 土砂 (4.95 秒)

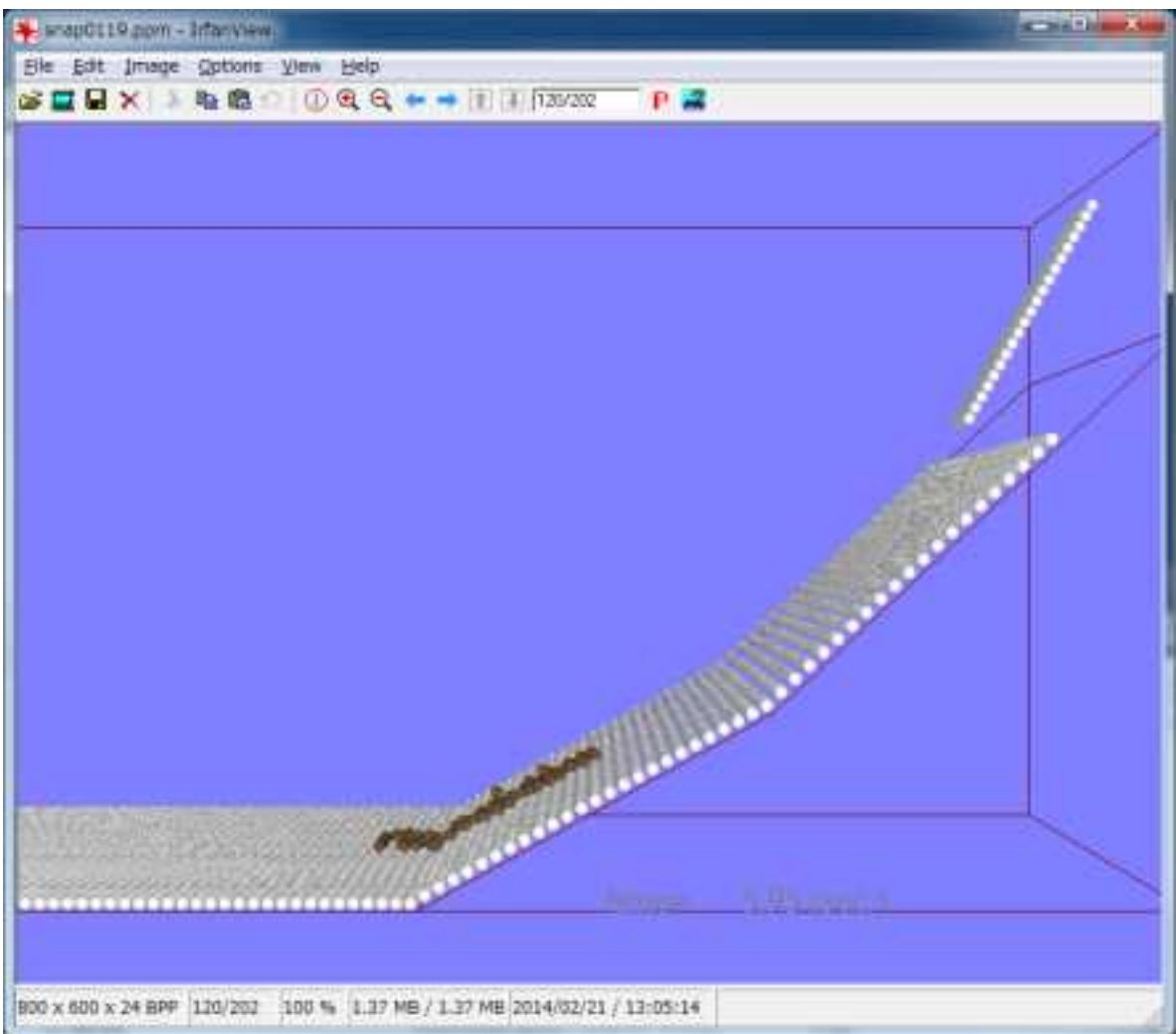


图 10.2.42(d) 土砂 (5.95 秒)



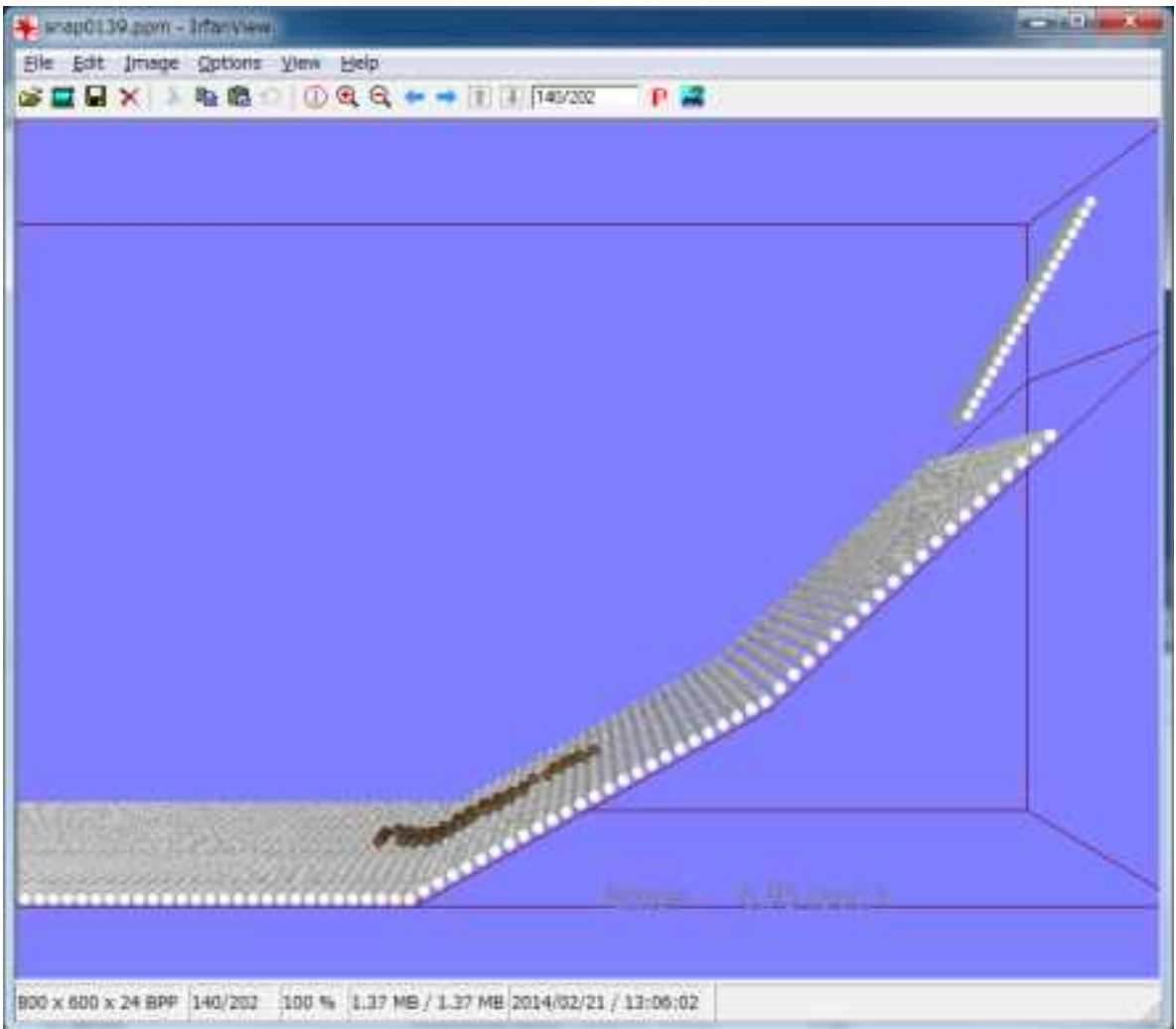


图 10.2.42(e) 土砂 (6.95 秒)

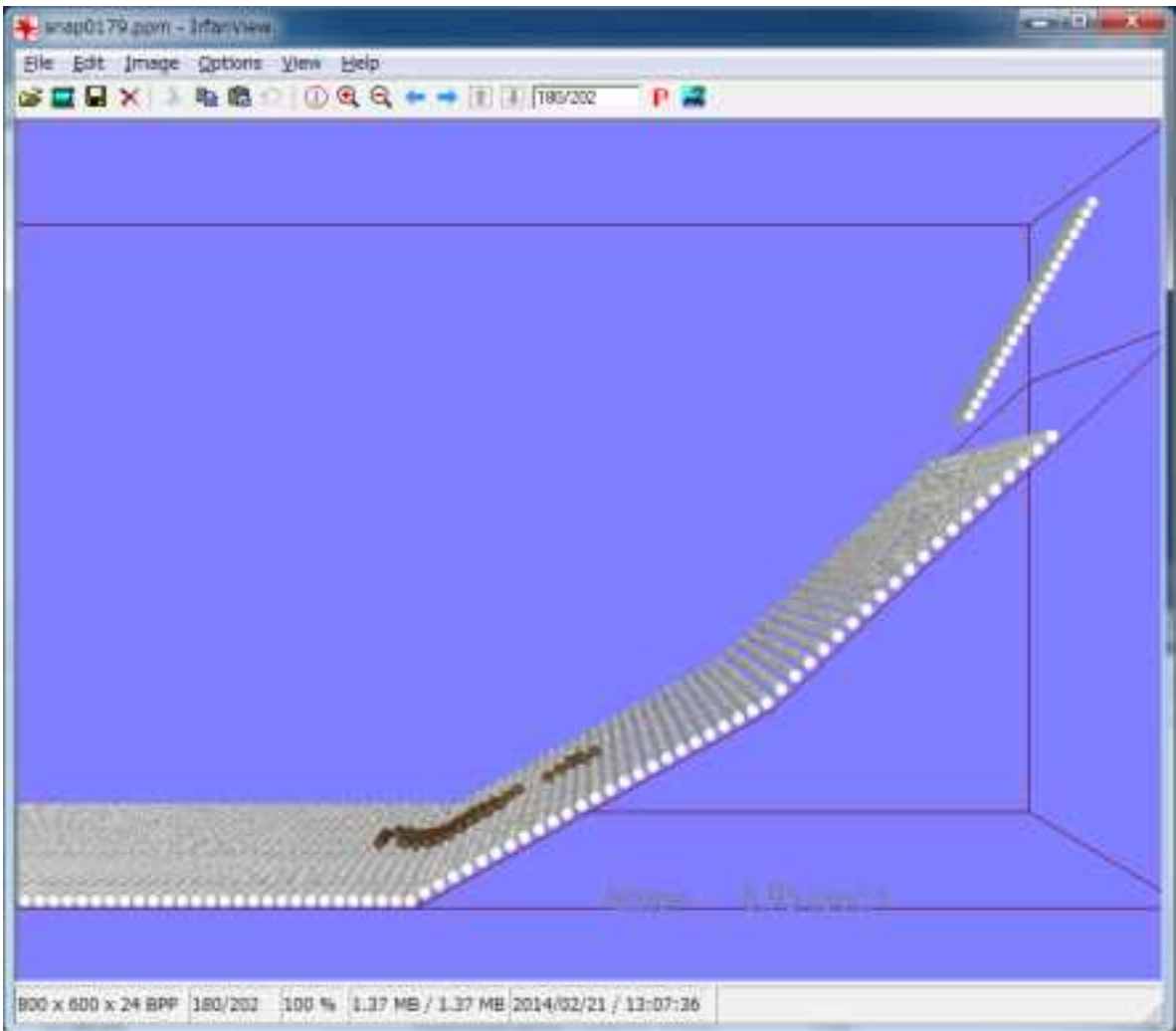
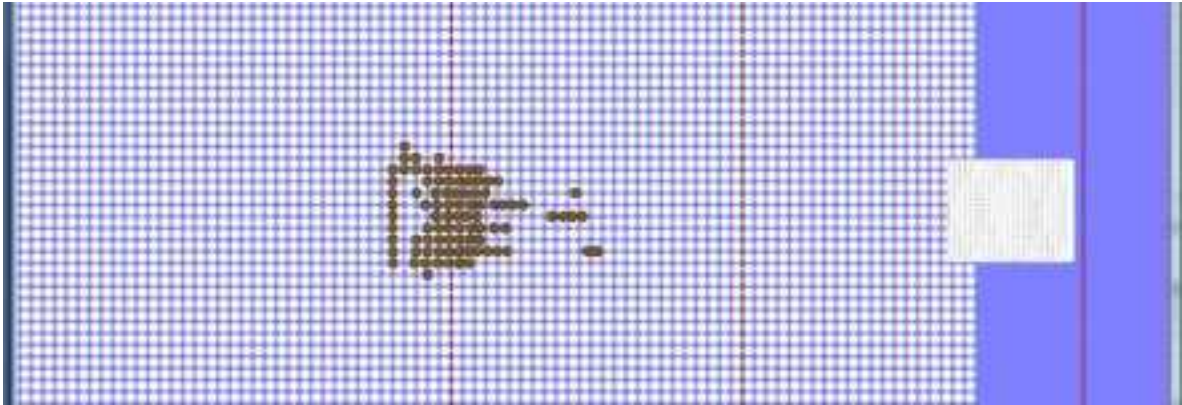


图 10.2.42(f) 土砂 (8.95 秒)

(4) 碎石および土砂に対するシミュレーション結果、反力壁あり

碎石の反力壁有りのシミュレーション結果について、アニメーションのスナップショットを図 10.2.43 に示す。

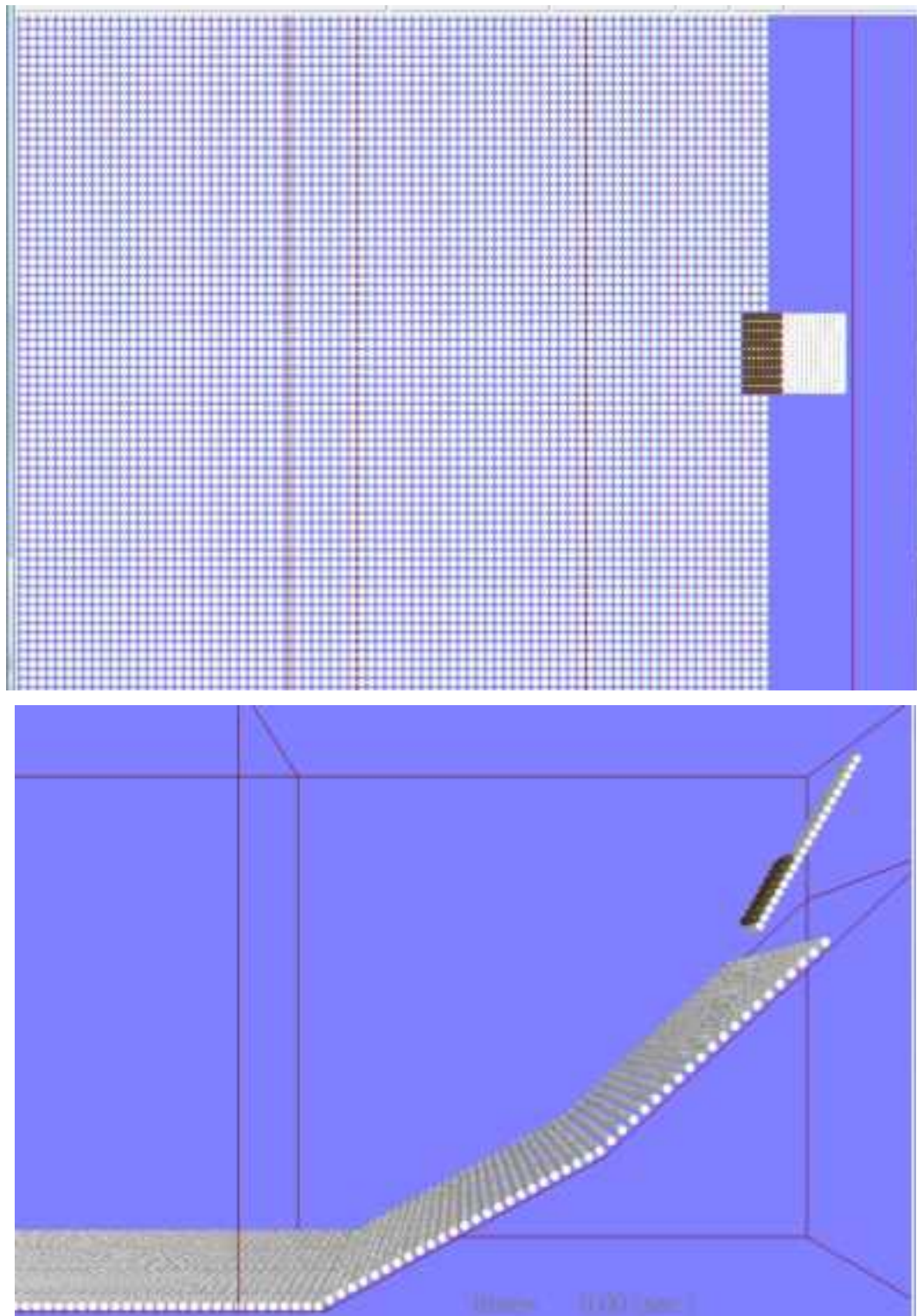


図 10.2.43(a) 碎石 (初期状態)



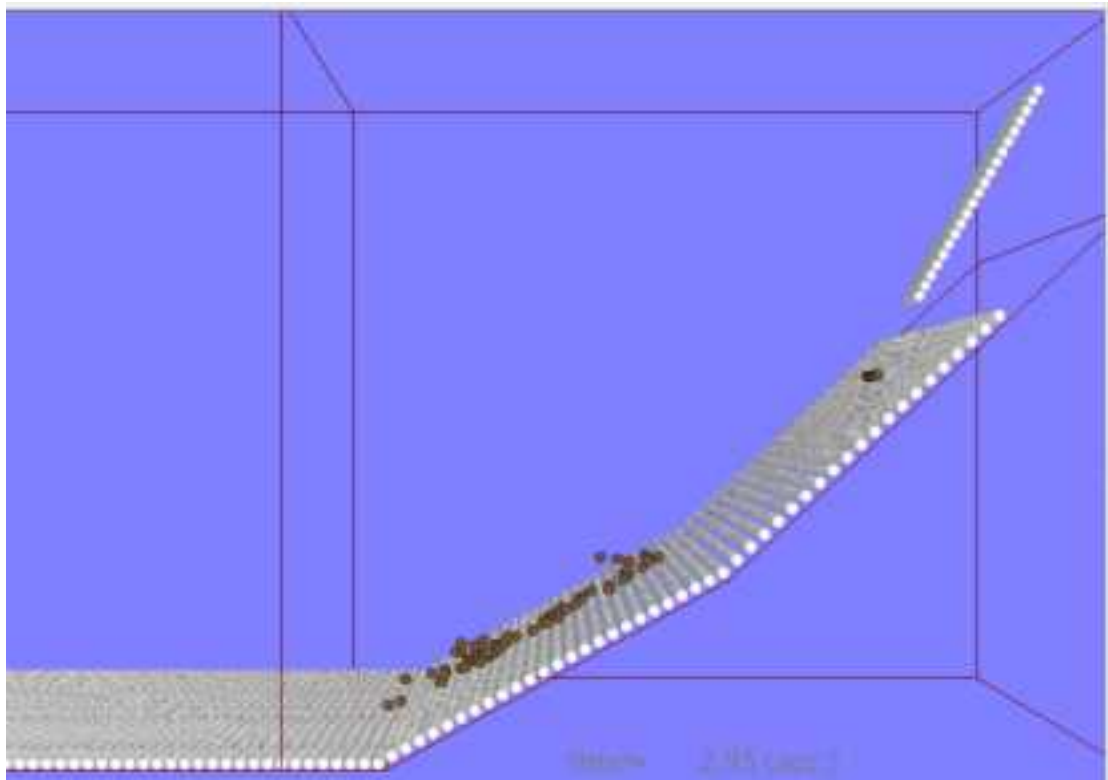
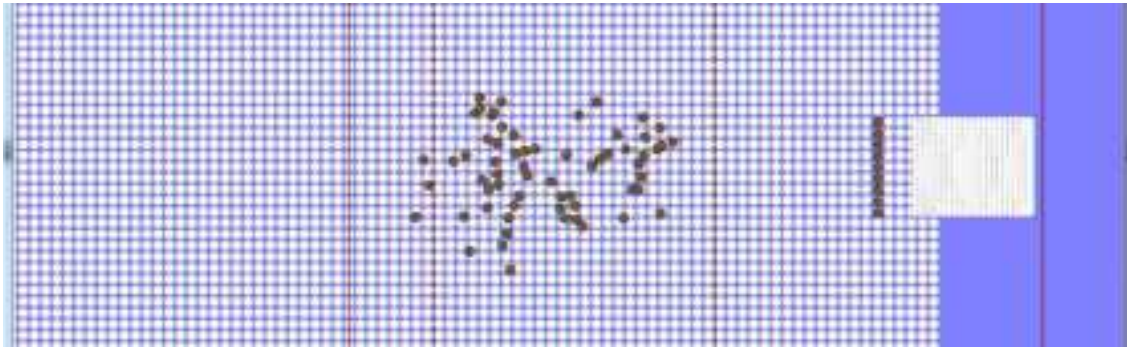


图 10.2.43(b) 碎石 2.95 秒

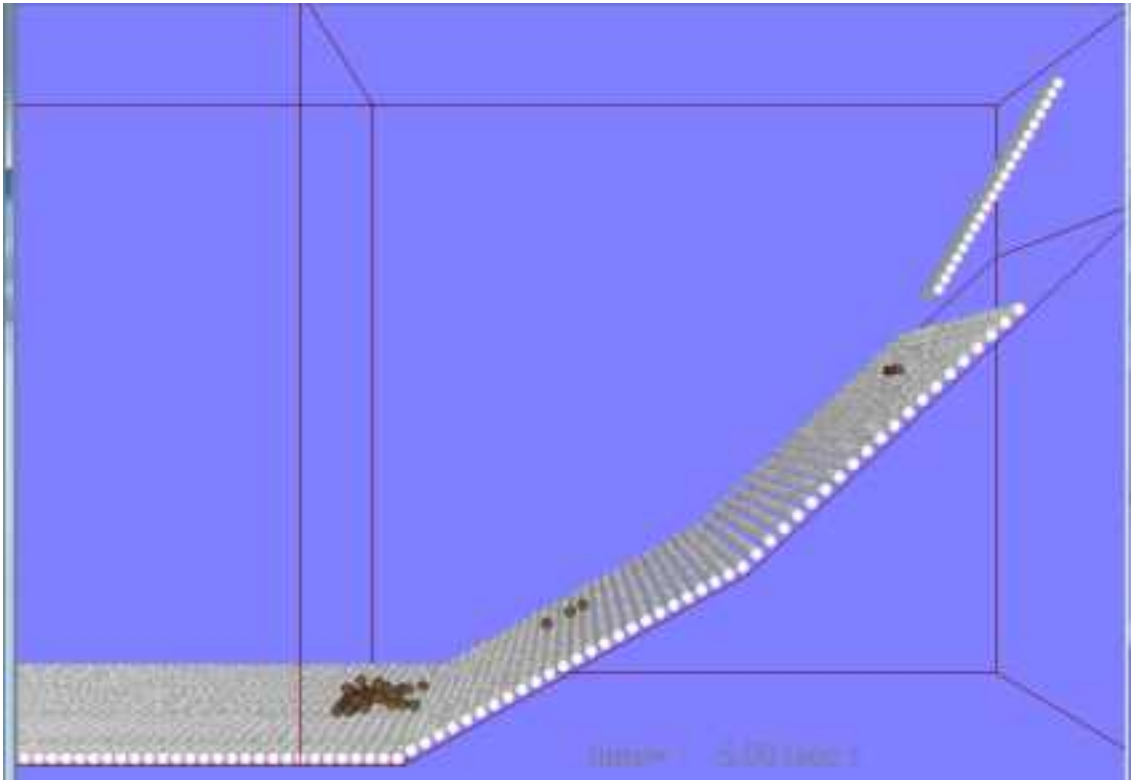
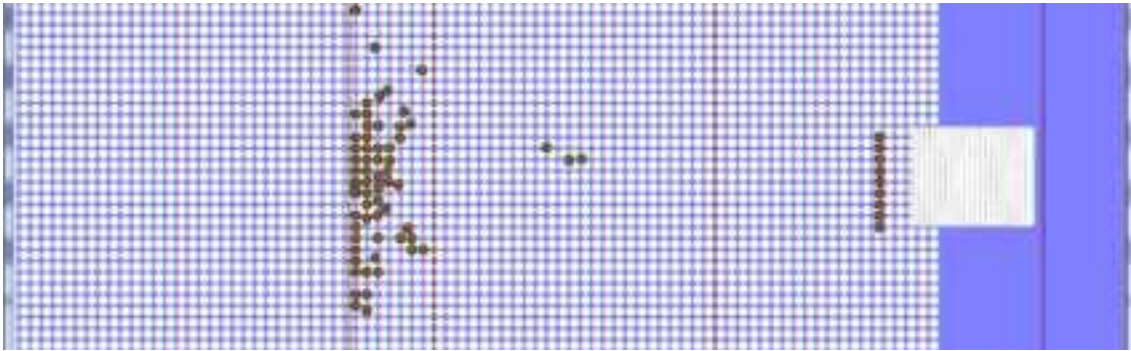


图 10.2.43(c) 碎石 5.0 秒



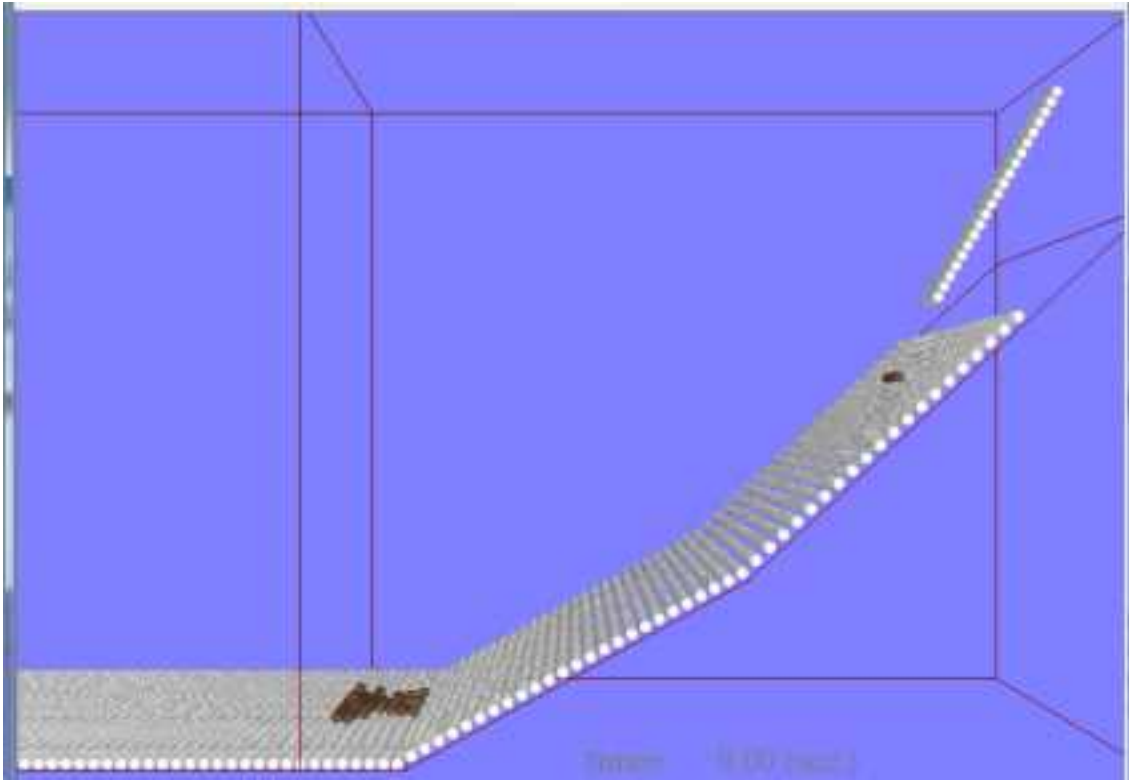
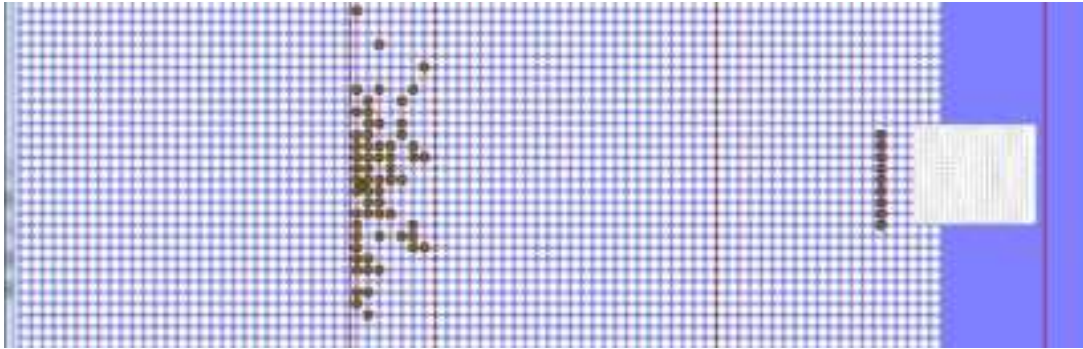
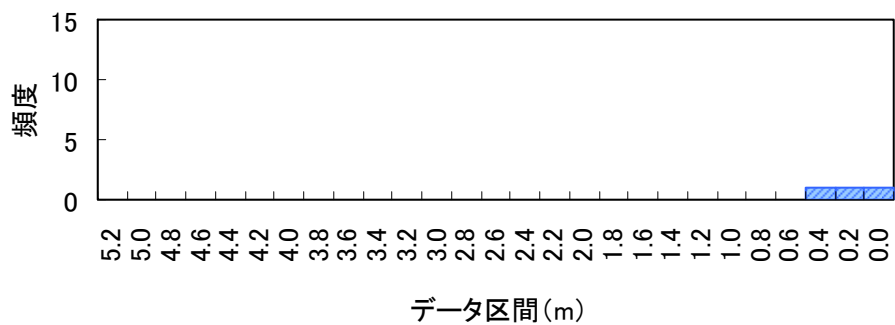


図 10.2.43(d) 碎石 9.0 秒

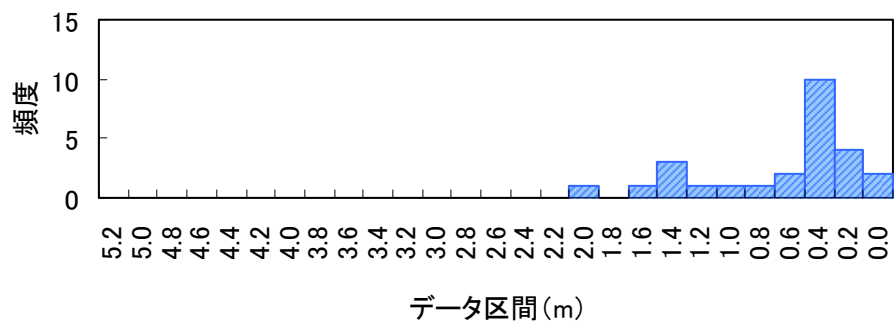
土砂の反力壁有りのシミュレーション結果については、土砂が反力壁に到達しなかった  
ので省略した。結果は土砂の反力壁無しと同じである。

### 10.2.5 計算結果（土量の時刻歴）

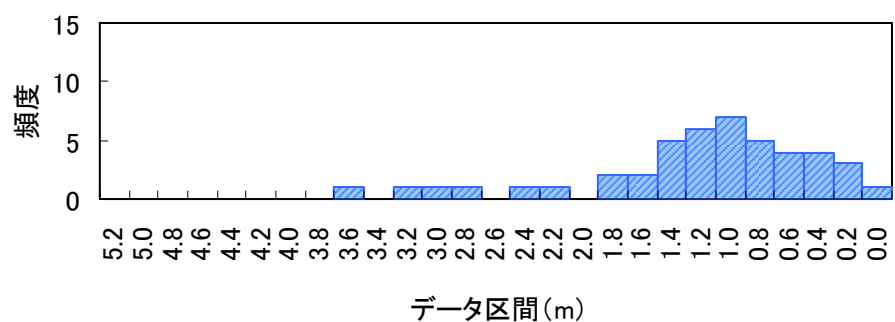
土砂模型の堆積状況を確認するため、碎石のシミュレーション結果について、土量の時系歴を図 10.2.44 に示す。



(a) 0.95 秒

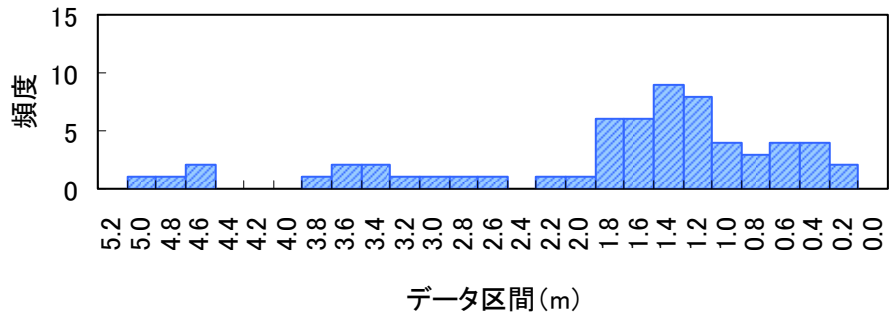


(b) 3.45 秒

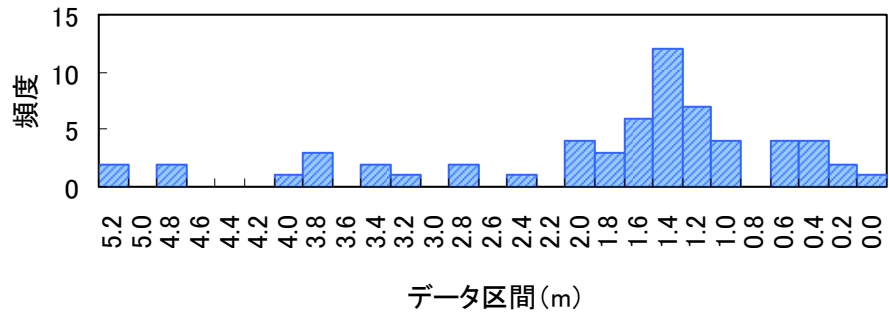


(c) 3.95 秒

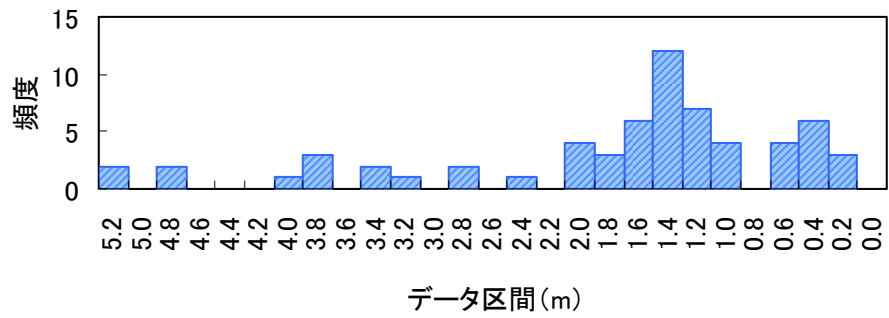
図 10.2.44 土量の時系列（碎石）



(d)4.95 秒



(e)7.95 秒



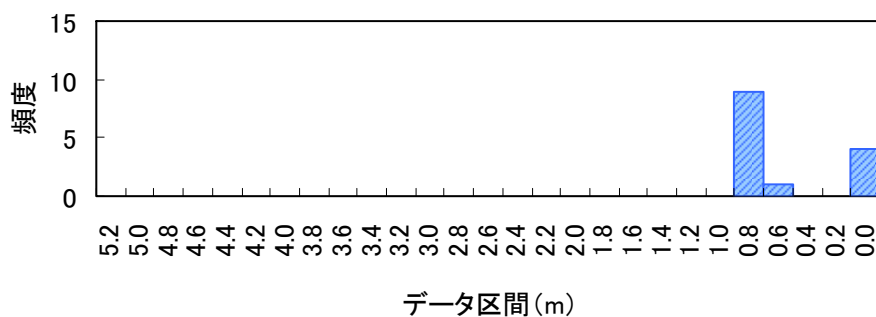
(f)9.95 秒

図 10.2.44 土量の時系列 (碎石)

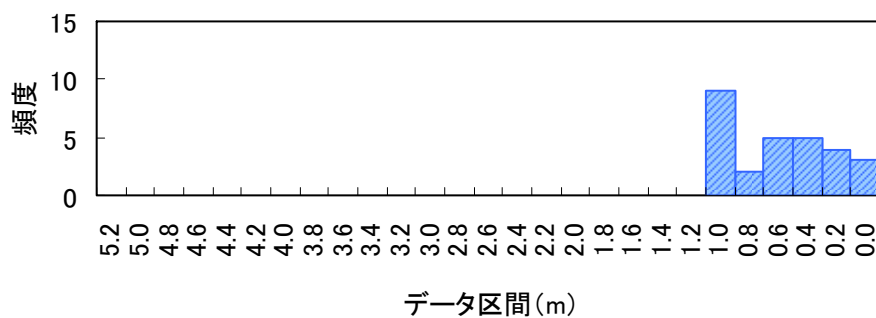
土砂模型の堆積状況を確認するため、土砂のシミュレーション結果について、土量の時系歴を図 10.2.45 に示す。



(a) 2.95 秒

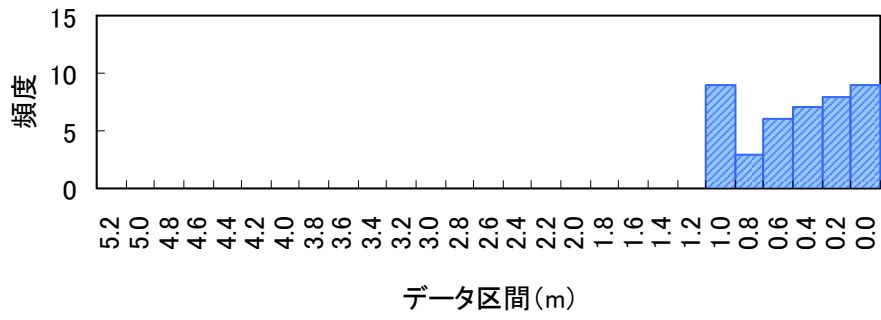


(b) 4.95 秒

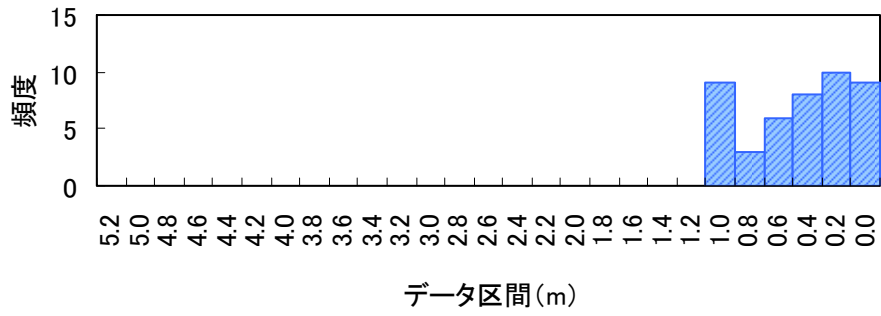


(c) 5.95 秒

図 10.2.45 土量の時系列 (土砂)



(d)6.95 秒



(e)8.95 秒

図 10.2.45 土量の時系列 (土砂)

10.2.6 計算結果（転動距離および回転量等の時刻歴）

ここでは、転動距離の時刻歴として岩塊モデルの変位量水平2成分 (X,Y) と鉛直成分 (Z) の時刻歴を示す。それぞれの極性を図 10.2.46 に示す。回転量としては Y 軸周りの回転速度  $\omega_y$  の時刻歴を示す。極性は奥行きに向かって右手が正である。以下他の岩塊モデルについても同様である。また、回転量以外に転動係数の時刻歴を示す。転動係数の定義を以下に示す。

$$C_r = \frac{\omega r}{v'} \quad (23)$$

ここで、 $C_r$ ：転動係数、 $v'$ ：衝突面に平行な反射速度、 $\omega$ ：回転角速度、 $r$ ：球形岩塊の半径である。 $C_r = 1$  のとき、滑らずに転がっており、 $C_r = 0$  のとき、転がらずに滑っていると判断できる。

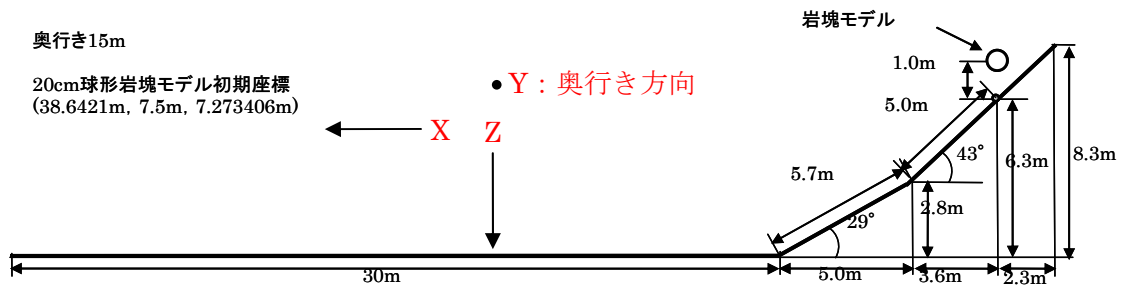


図 10.2.46 変位の極性

20cm 球形岩塊のシミュレーション結果について、変位および回転量等の時刻歴を図 10.2.47～図 10.2.51 に示す。球形岩塊については、奥行き方向に変動がないので Y 変位成分の時刻歴は省略した。

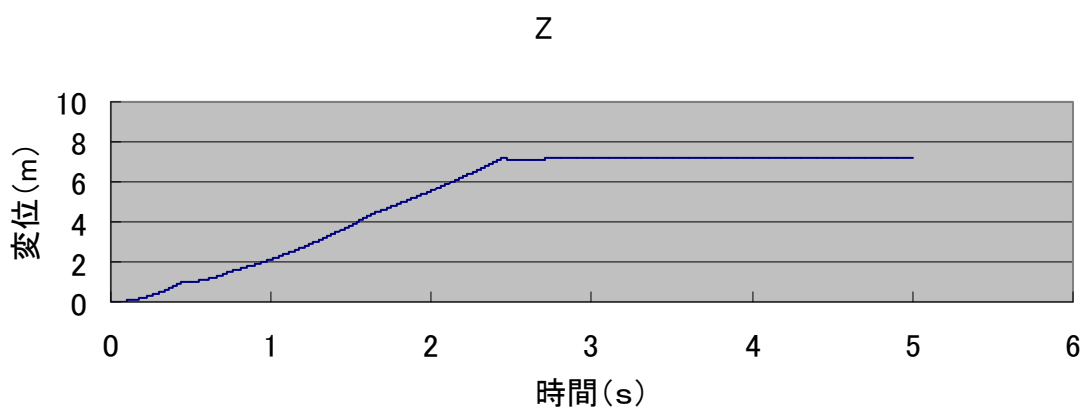
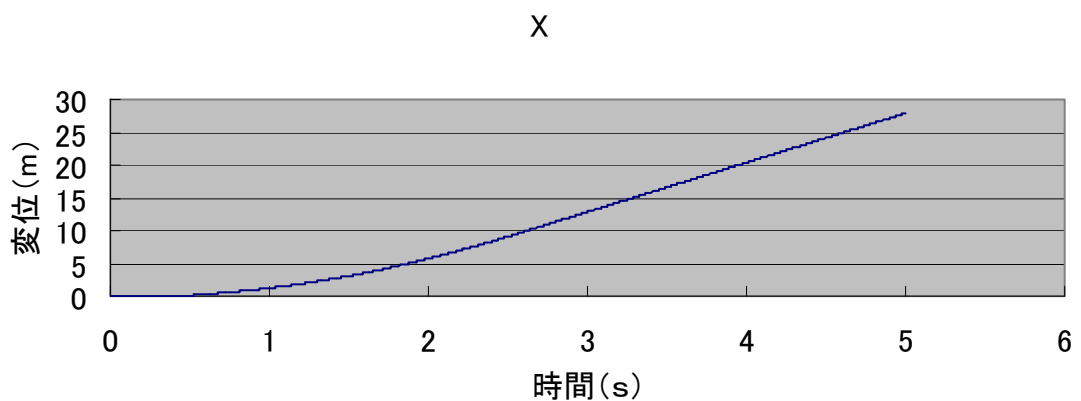


図 10.2.47 変位時刻歴 (20cm 球形岩塊)

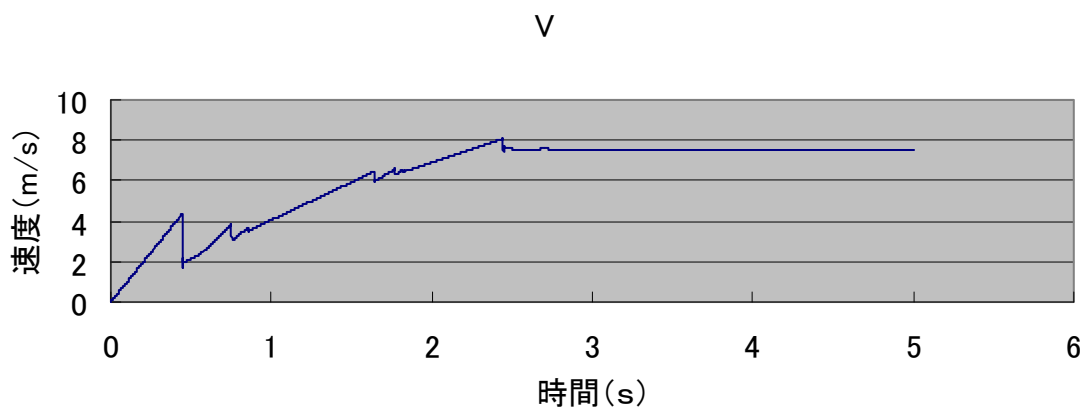


図 10.2.48 流下方向速度時刻歴 (20cm 球形岩塊)

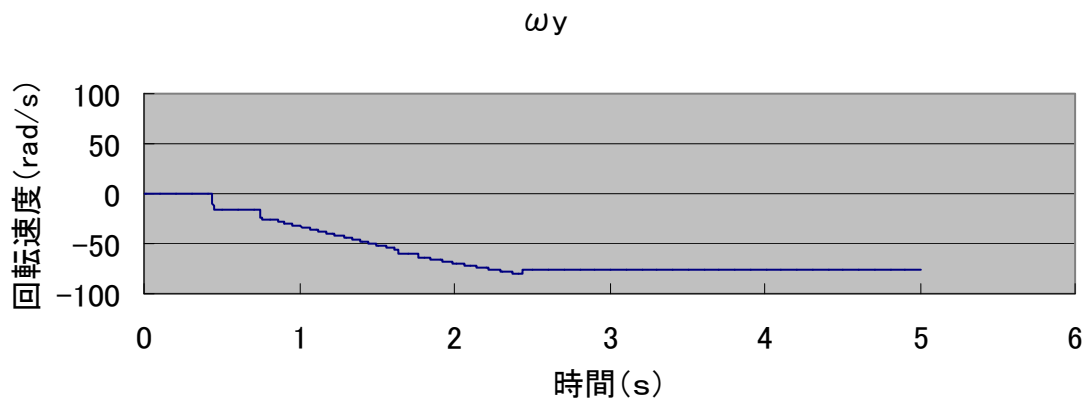


図 10.2.49 回轉速度時刻歴 (20cm 球形岩塊)

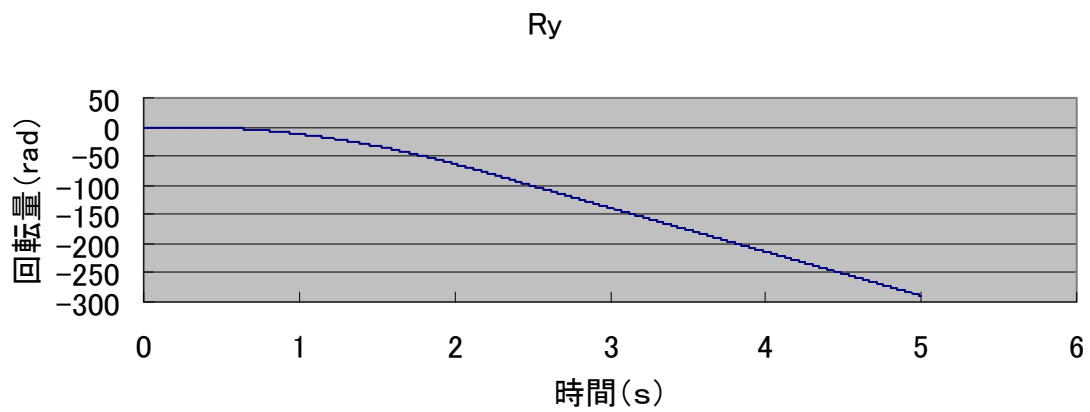


図 10.2.50 回轉量時刻歴 (20cm 球形岩塊)

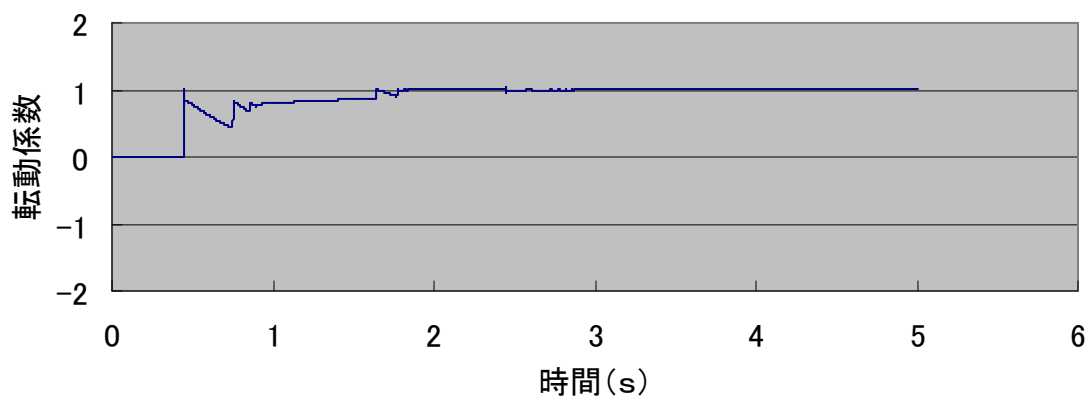


図 10.2.51 回轉係数の時刻歴 (20cm 球形岩塊)



40cm 球形岩塊のシミュレーション結果について、変位および回転量等の時刻歴を  
 図 10.2.52～図 10.2.56 に示す。

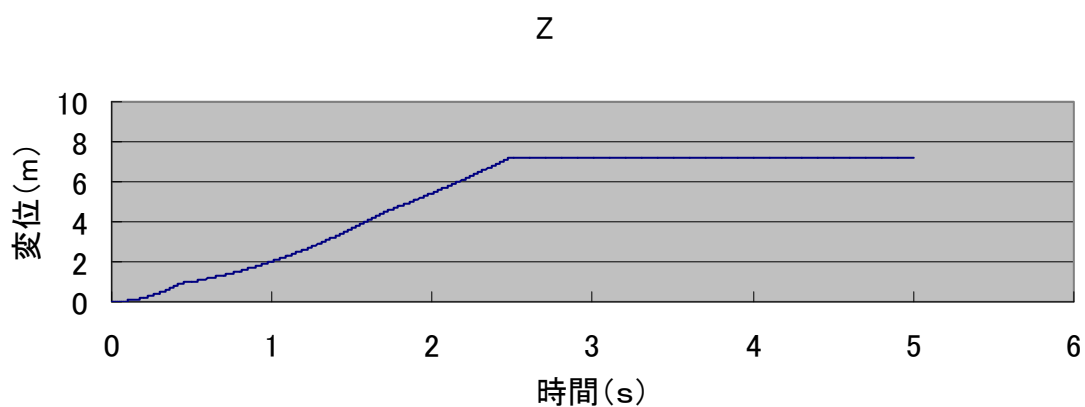
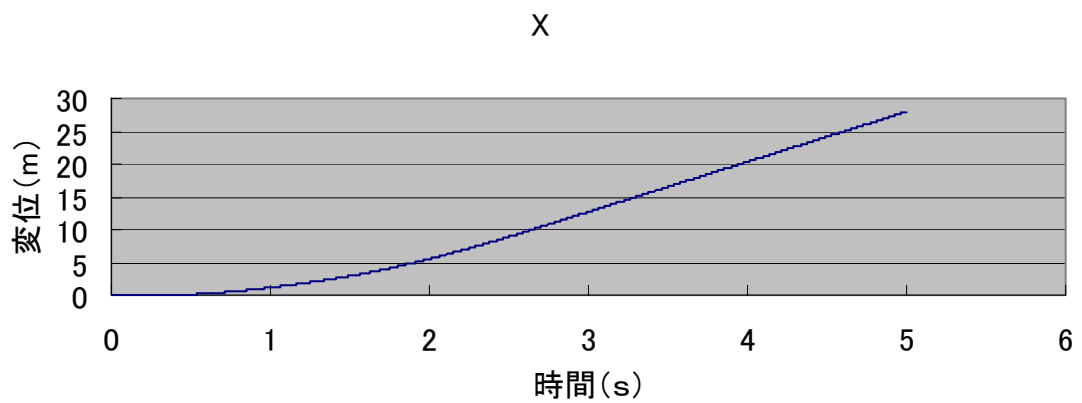


図 10.2.52 変位時刻歴 (40cm 球形岩塊)

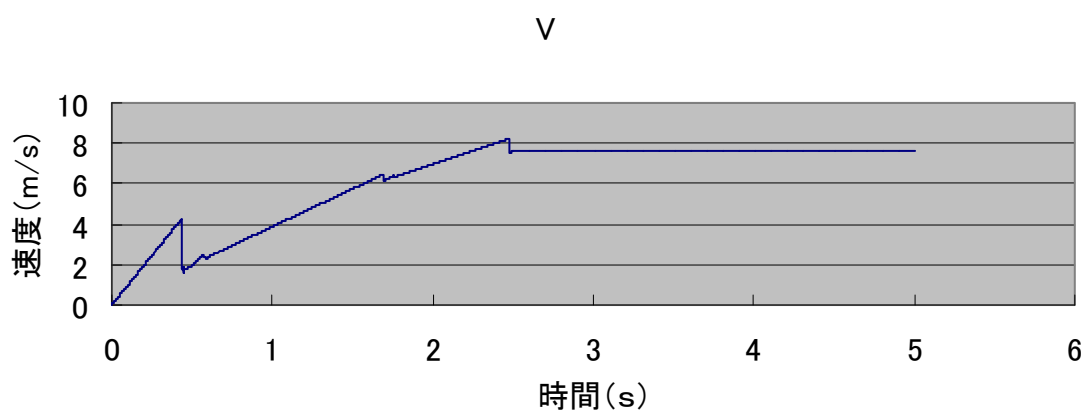


図 10.2.53 流下方向速度時刻歴 (40cm 球形岩塊)

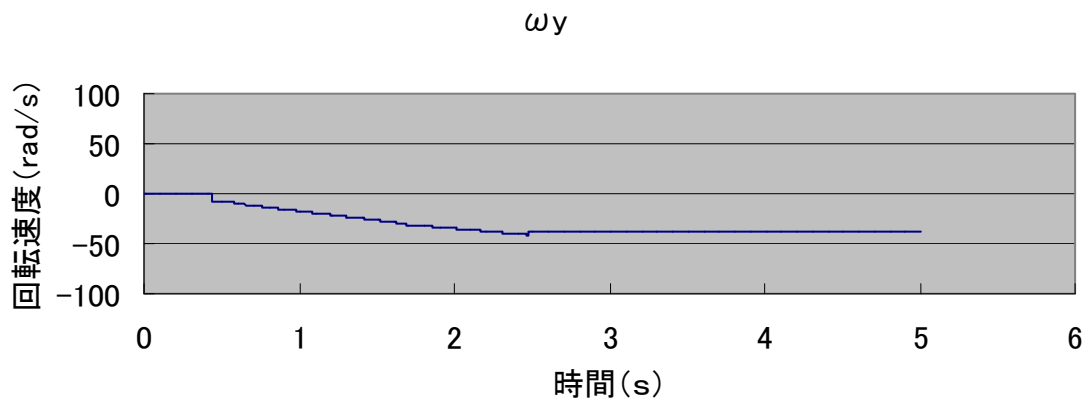


図 10.2.54 回轉速度時刻歴 (40cm 球形岩塊)

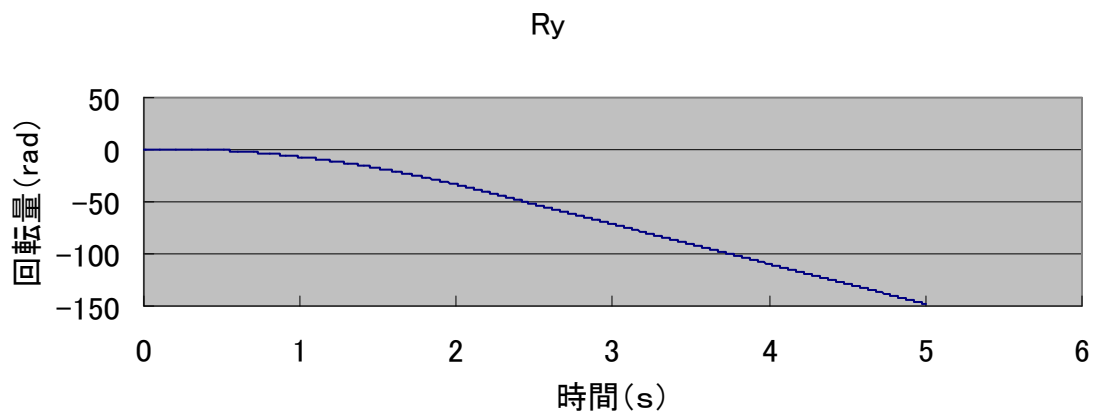


図 10.2.55 回轉量時刻歴 (40cm 球形岩塊)

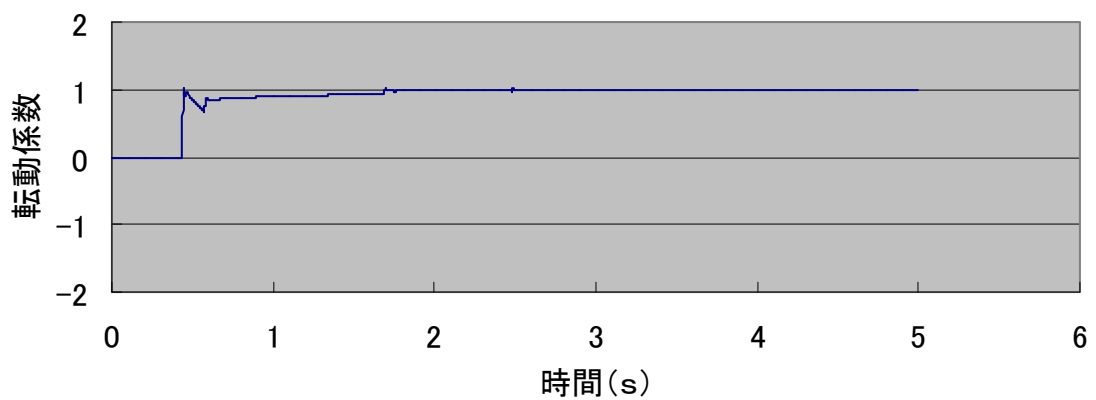


図 10.2.56 回轉係数の時刻歴 (40cm 球形岩塊)

20cm 塊状岩塊のシミュレーション結果について、変位および回転量等の時刻歴を  
図 10.2.57～図 10.2.60 に示す。

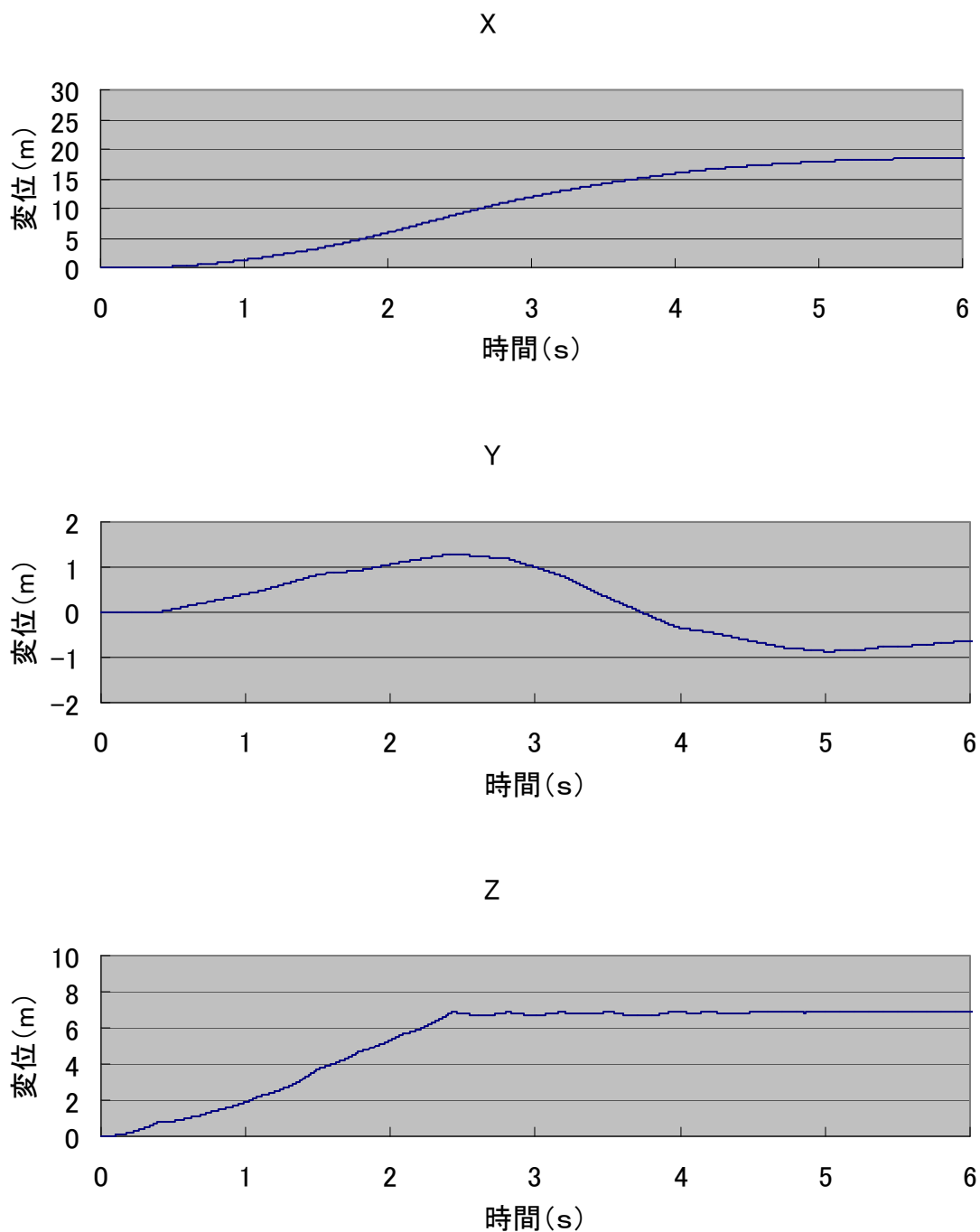


図 10.2.57 変位時刻歴 (20cm 塊状岩塊)

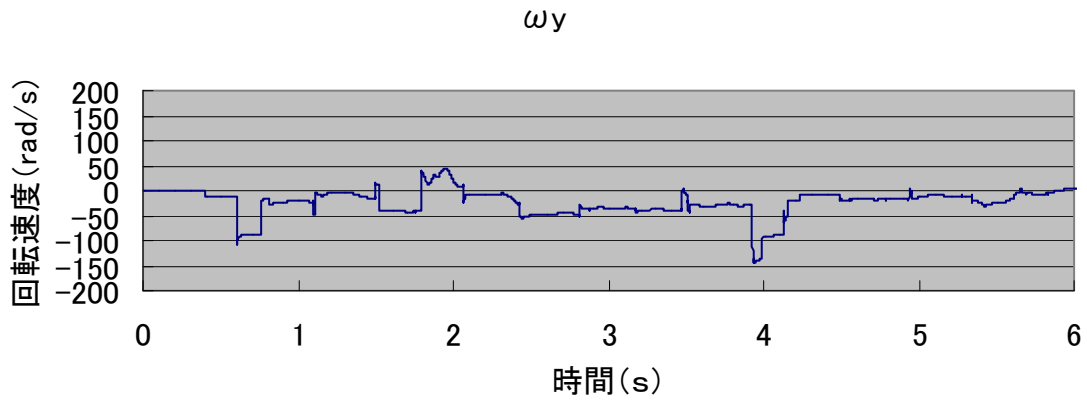


図 10.2.58 回轉速度時刻歴 (20cm 塊状岩塊)

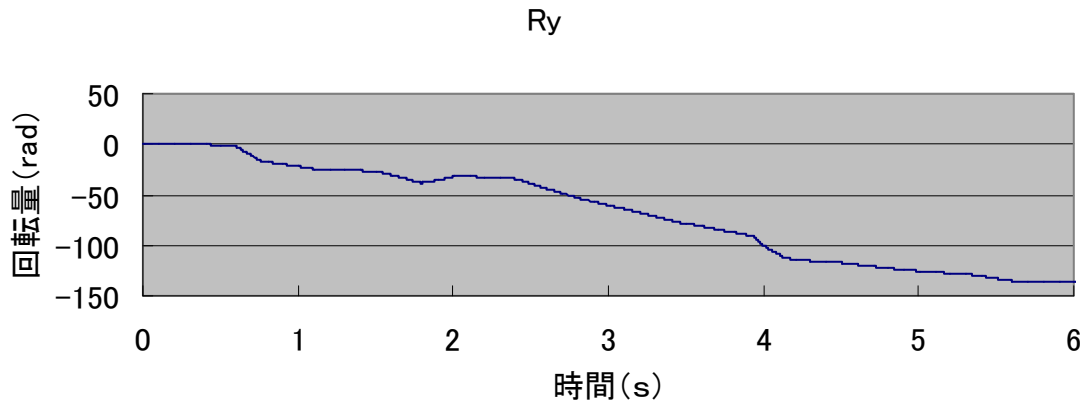


図 10.2.59 回轉量時刻歴 (20cm 塊状岩塊)

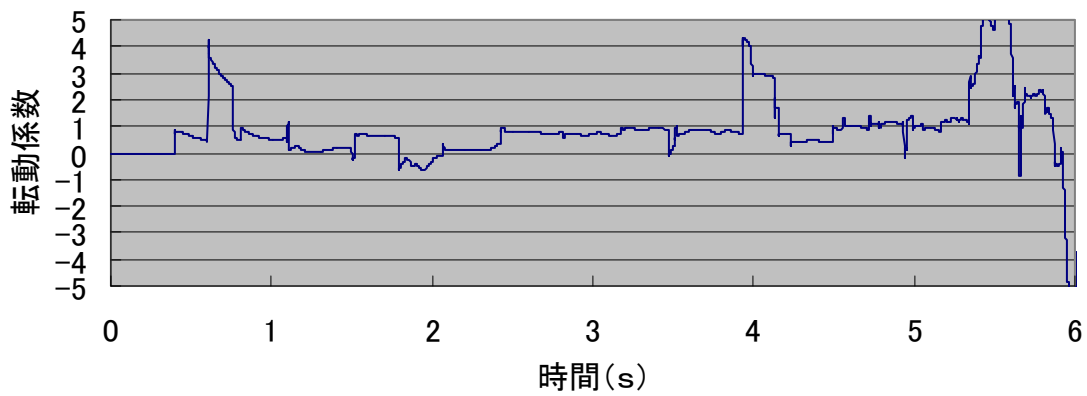


図 10.2.60 回轉係数の時刻歴 (20cm 塊状岩塊)

20cm 板状岩塊のシミュレーション結果について、変位および回転量等の時刻歴を  
図 10.2.61～図 10.2.64 に示す。

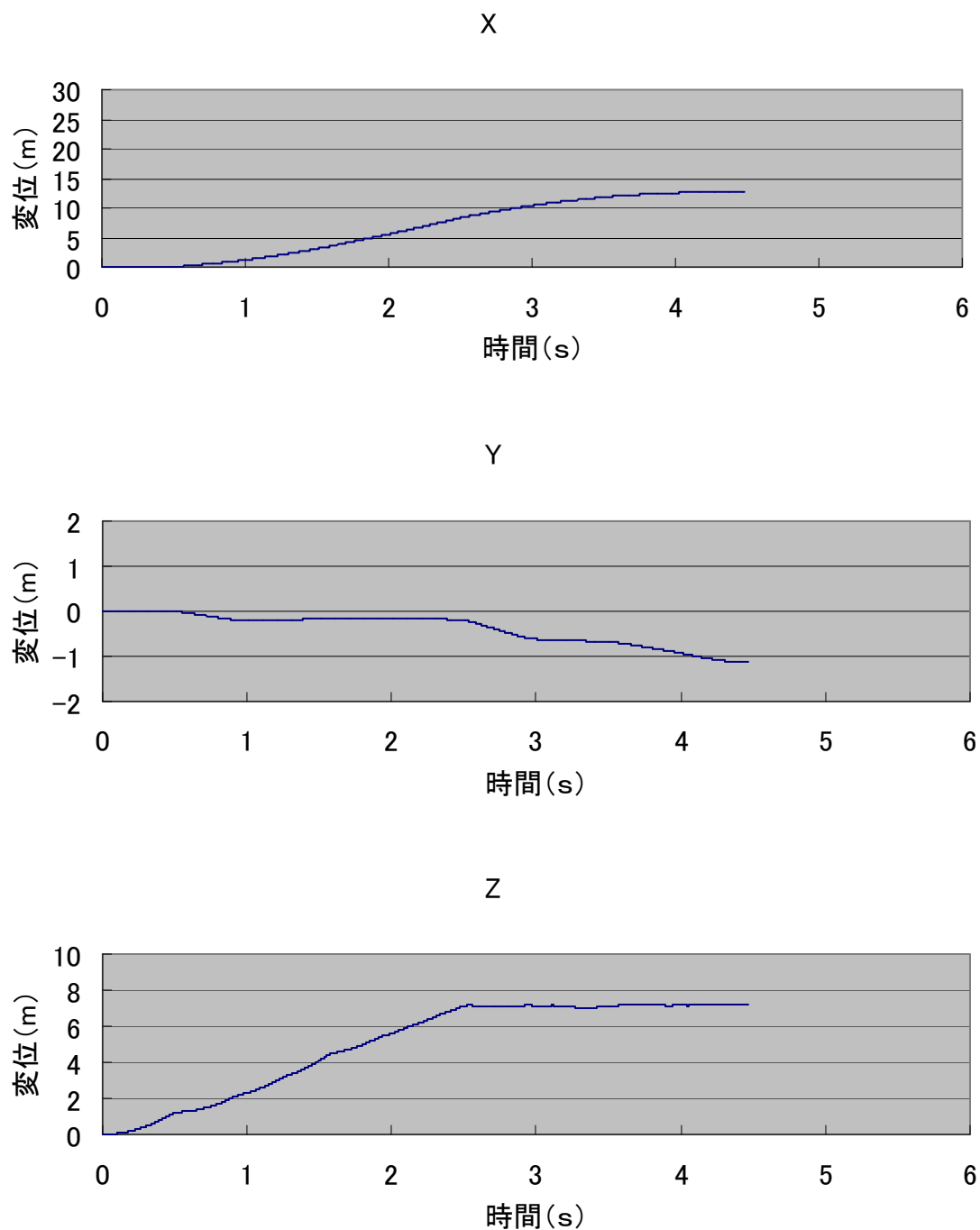


図 10.2.61 変位時刻歴 (20cm 板状岩塊)

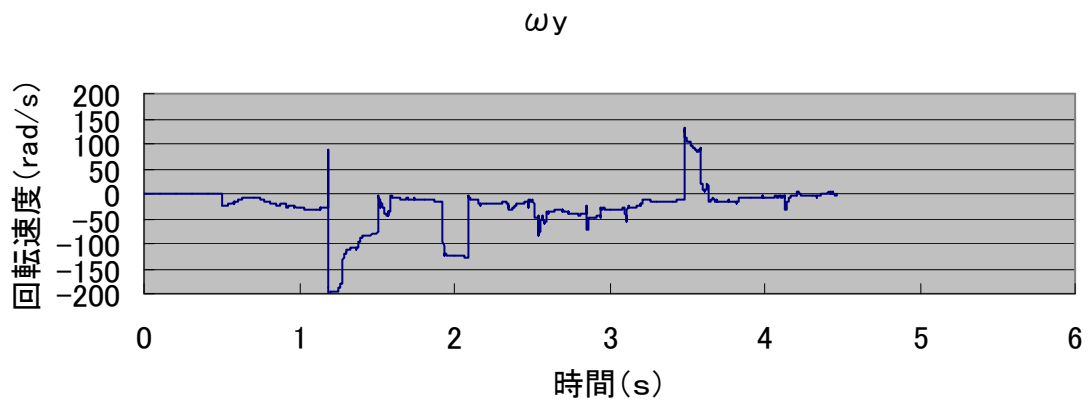


図 10.2.62 回轉速度時刻歴 (20cm 板状岩塊)

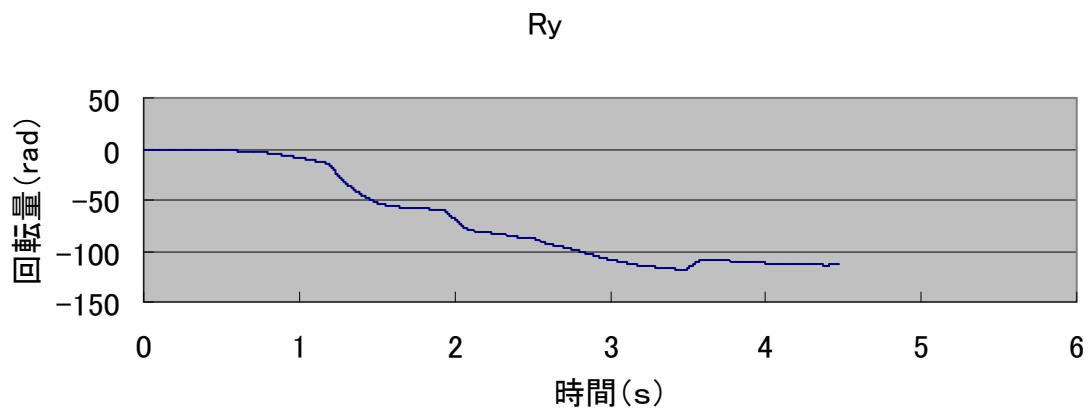


図 10.2.63 回轉量時刻歴 (20cm 板状岩塊)

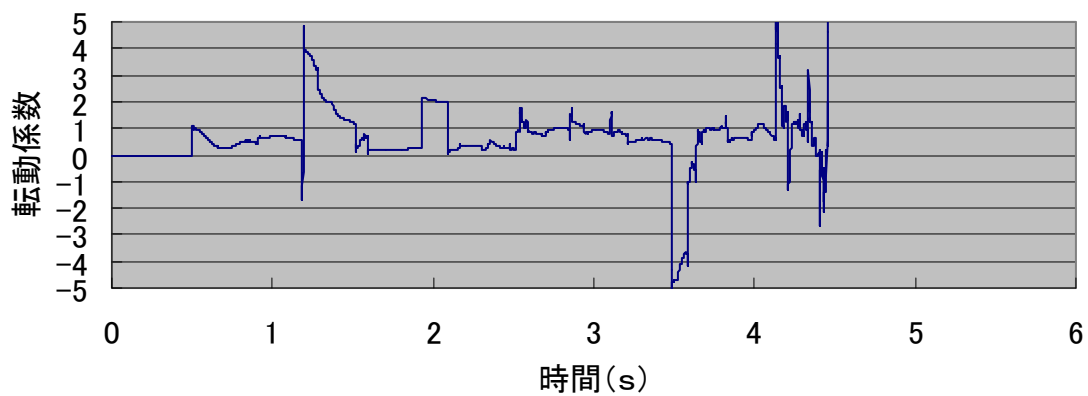


図 10.2.64 回轉係数の時刻歴 (20cm 板状岩塊)

40cm 塊状岩塊のシミュレーション結果について、変位および回転量等の時刻歴を  
図 10.2.65～図 10.2.68 に示す。

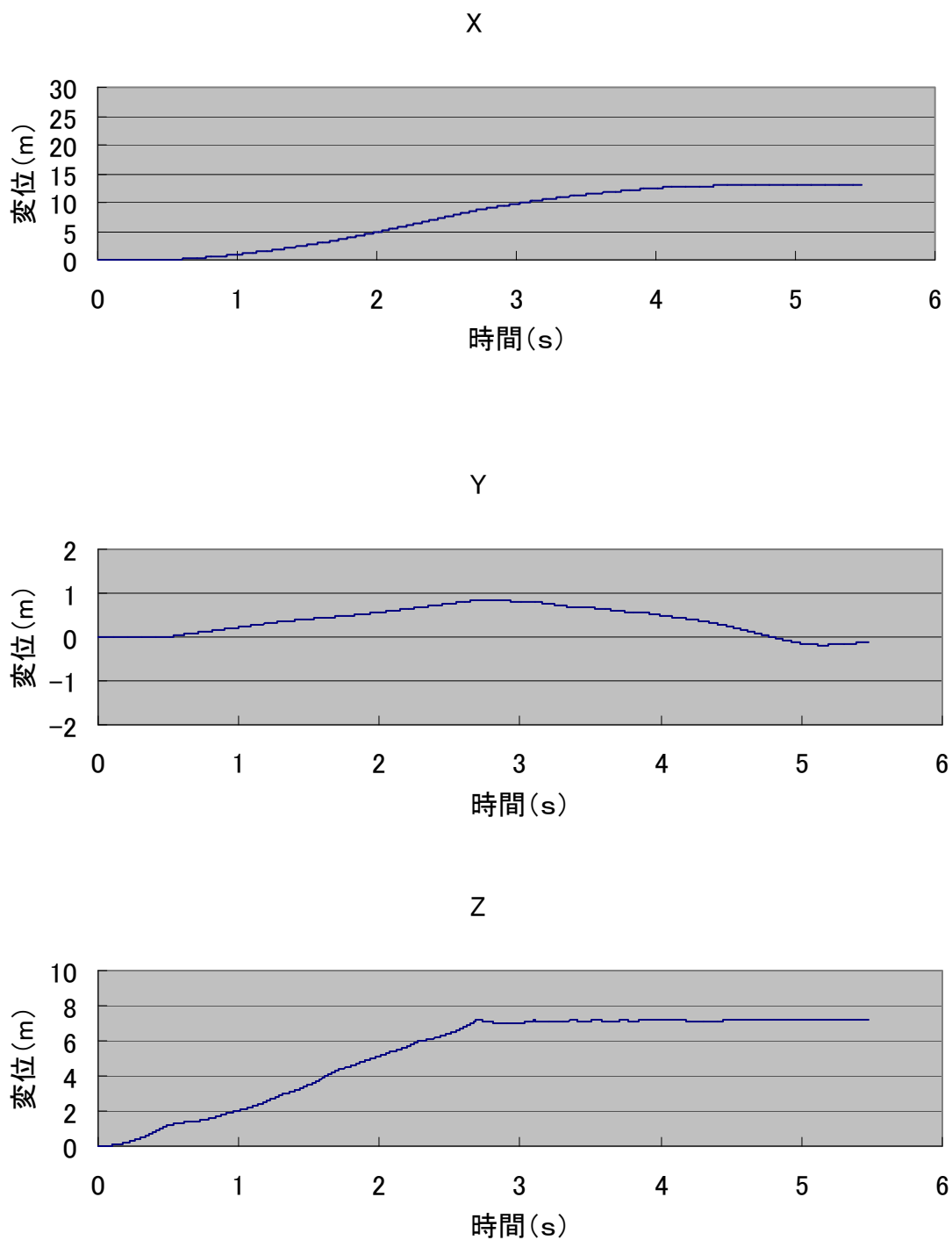


図 10.2.65 変位時刻歴 (40cm 塊状岩塊)

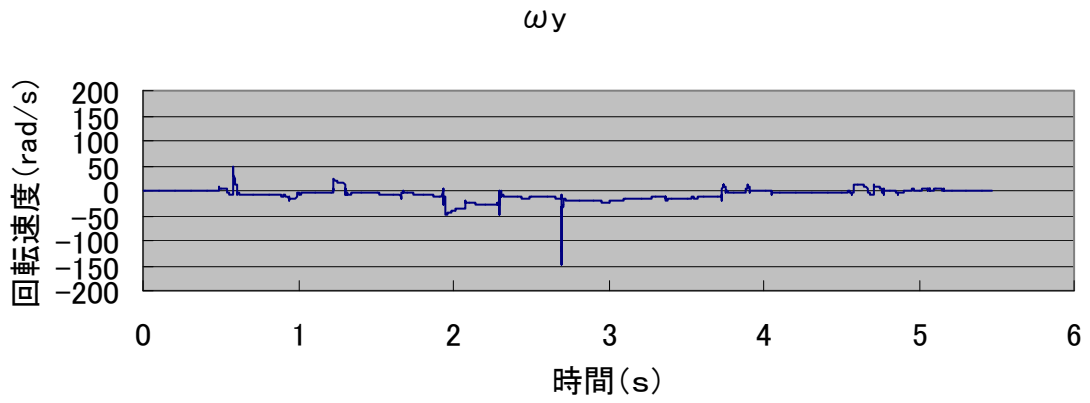


図 10.2.66 回轉速度時刻歴 (40cm 塊状岩塊)

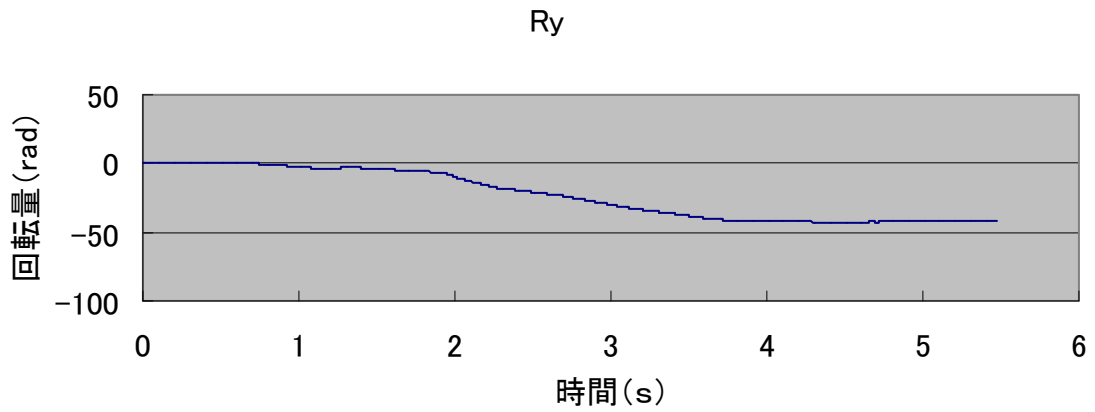


図 10.2.67 回轉量時刻歴 (40cm 塊状岩塊)

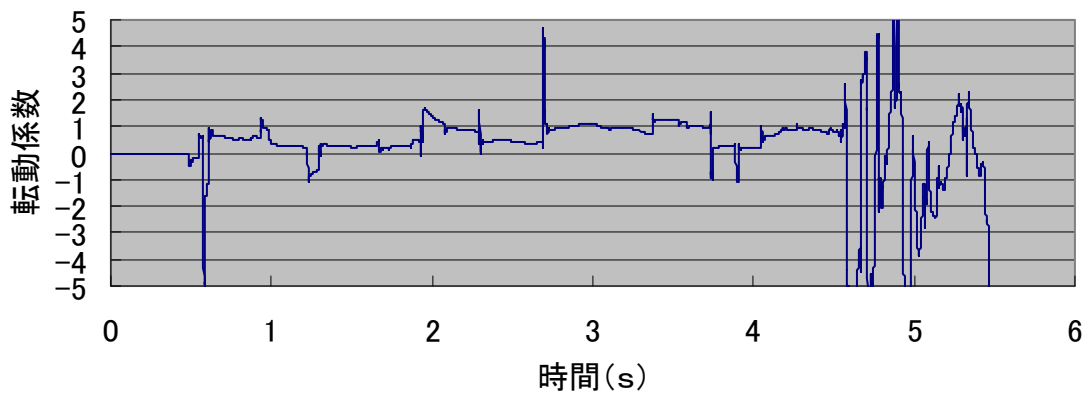


図 10.2.68 回轉係数の時刻歴 (40cm 塊状岩塊)



40cm 板状岩塊のシミュレーション結果について、変位および回転量等の時刻歴を  
図 10.2.69～図 10.2.72 に示す。

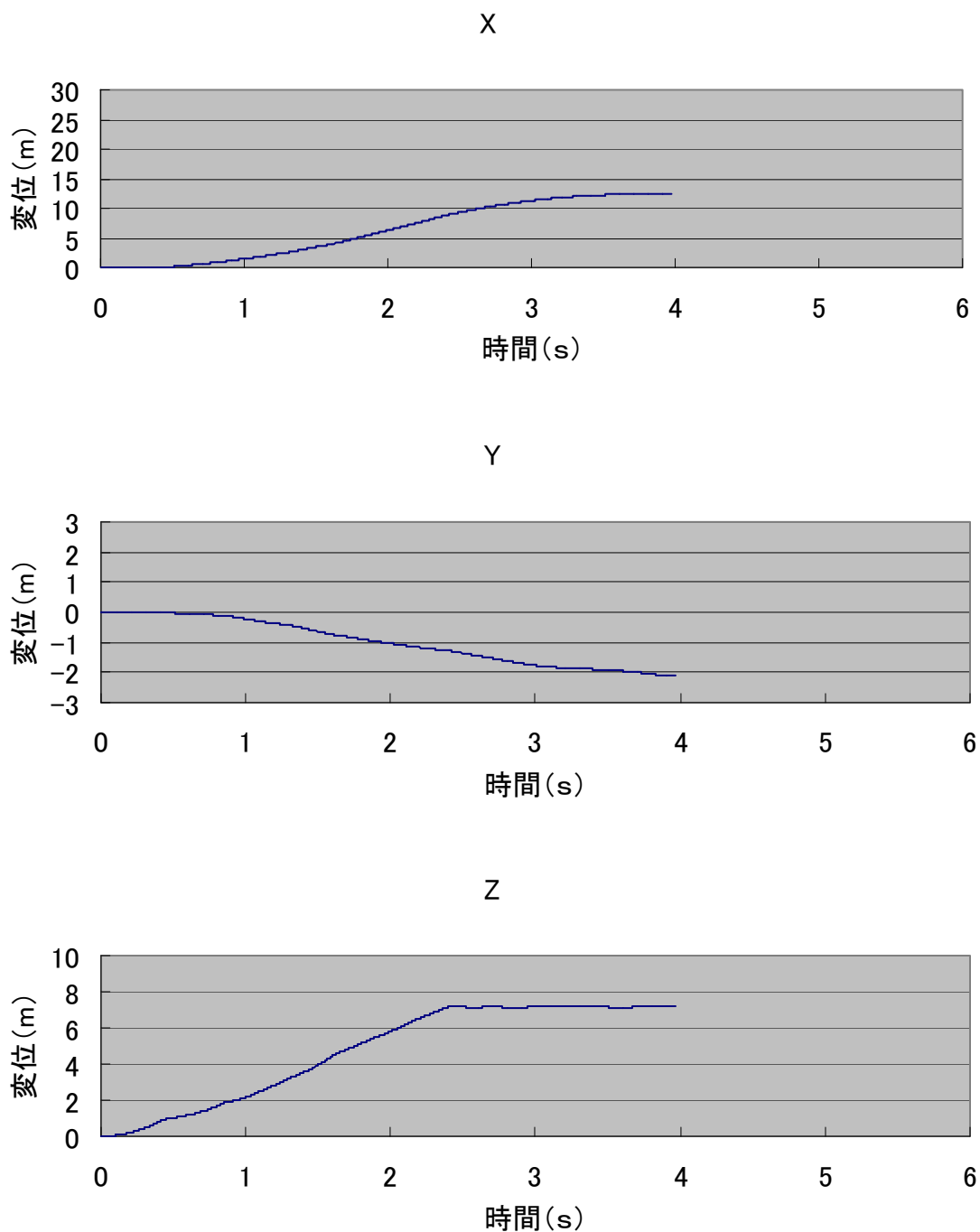


図 10.2.69 変位時刻歴 (40cm 板状岩塊)

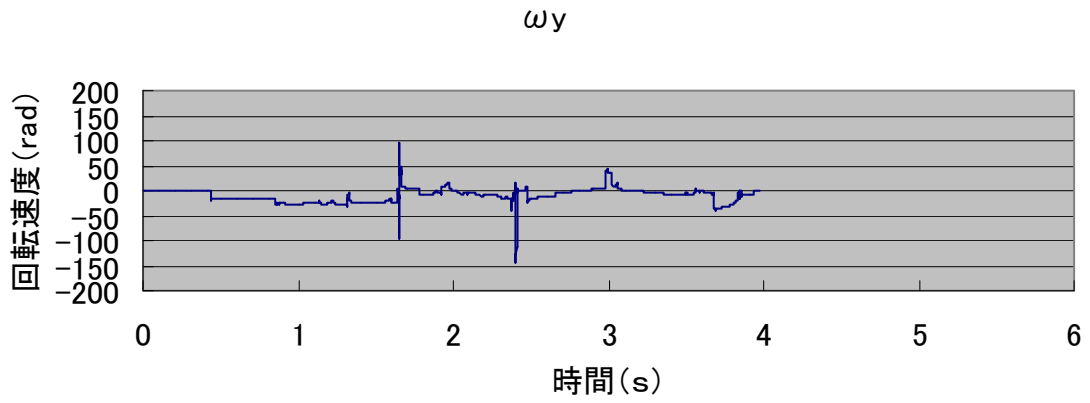


図 10.2.70 回転速度時刻歴 (40cm 板状岩塊)

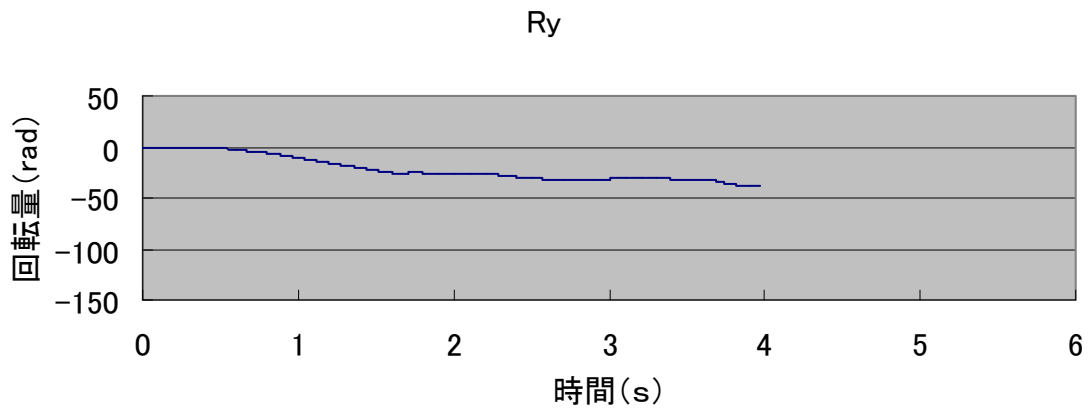


図 10.2.71 回転量時刻歴 (40cm 板状岩塊)

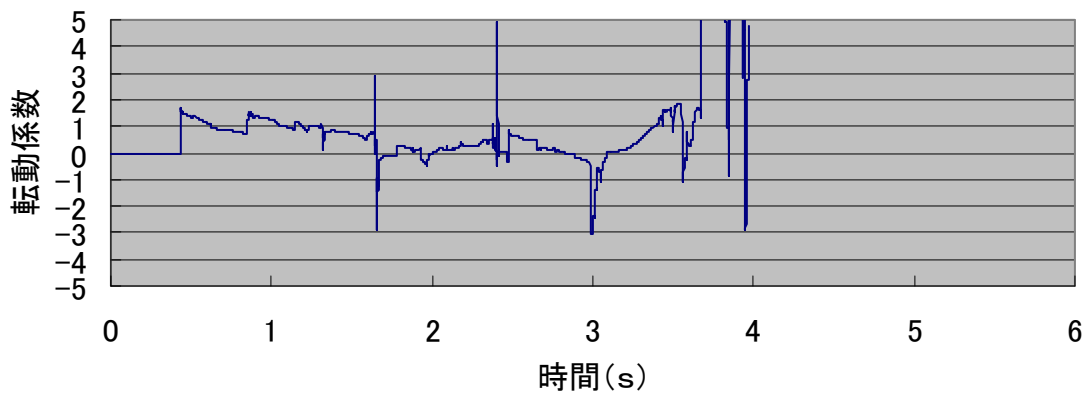


図 10.2.72 転動係数の時刻歴 (40cm 板状岩塊)

碎石のシミュレーション結果について、変位の時刻歴を図 10.2.73 に示す。これは、先端中央の要素の時刻歴である。

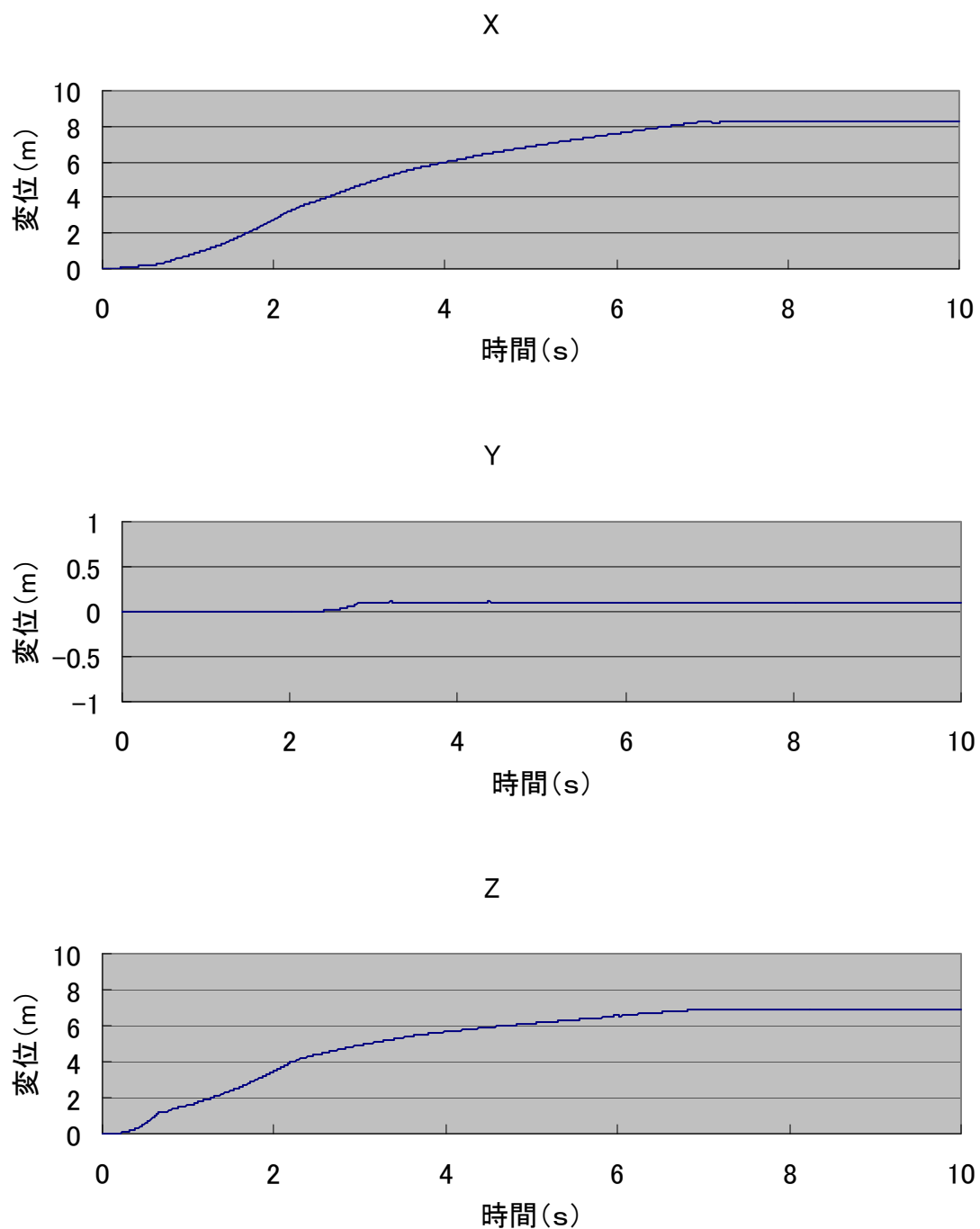


図 10.2.73 変位時刻歴 (碎石)

土砂のシミュレーション結果について、変位の時刻歴を図 10.2.74 に示す。これは、先端中央の要素の時刻歴である。

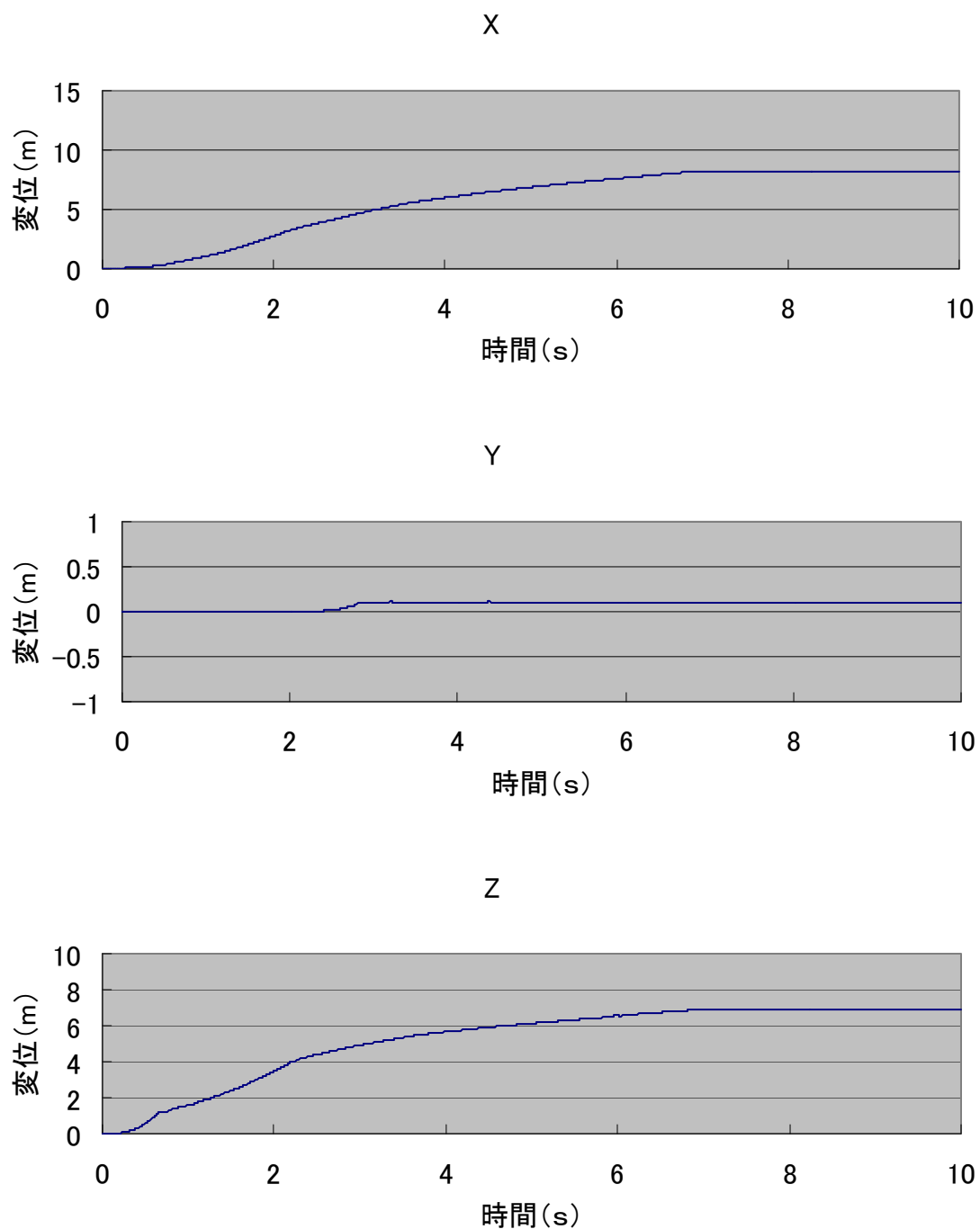


図 10.2.74 変位時刻歴 (土砂)

### 10.2.7 反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

ここでは、反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴を示す。

20cm 球形岩塊のシミュレーション結果について、反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.75 に示す。Y 方向成分はほとんど発生していなかったため省略した。

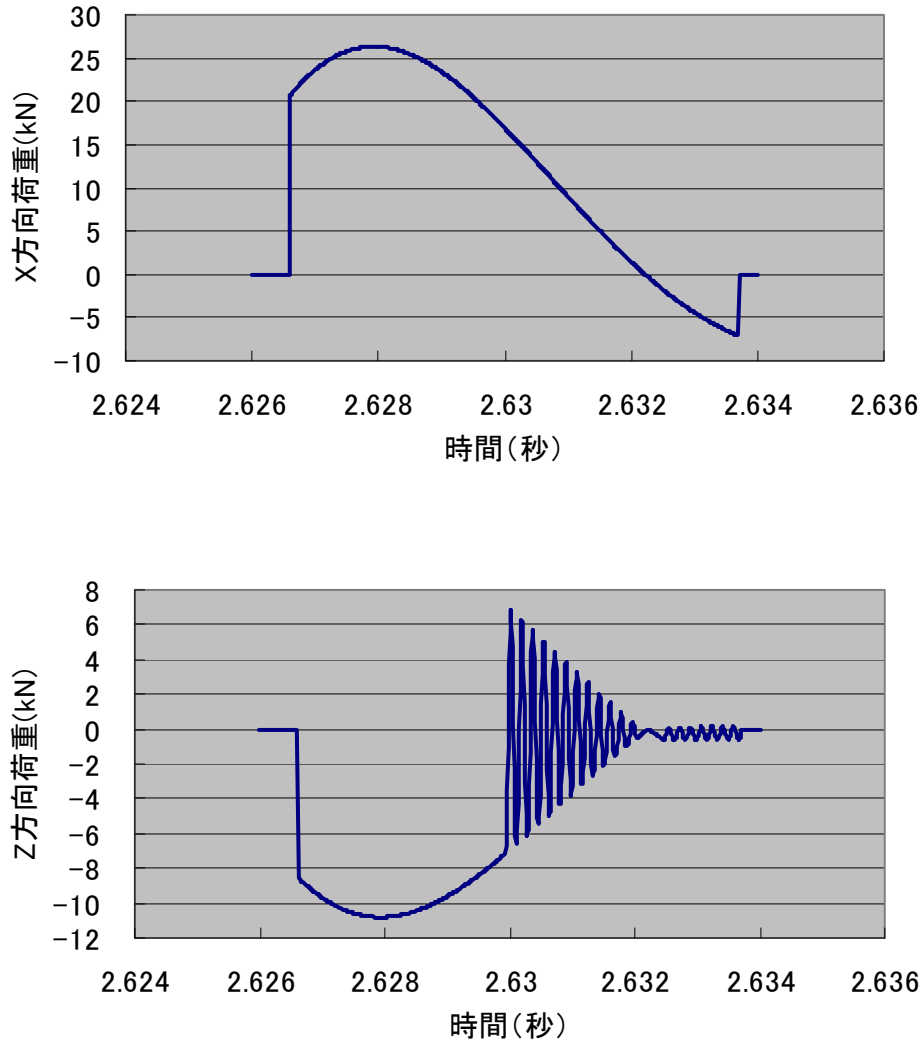


図 10.2.75 20cm 球形岩塊

40cm 球形岩塊のシミュレーション結果について、反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.76 に示す。Y 方向成分はほとんど発生していなかったため省略した。

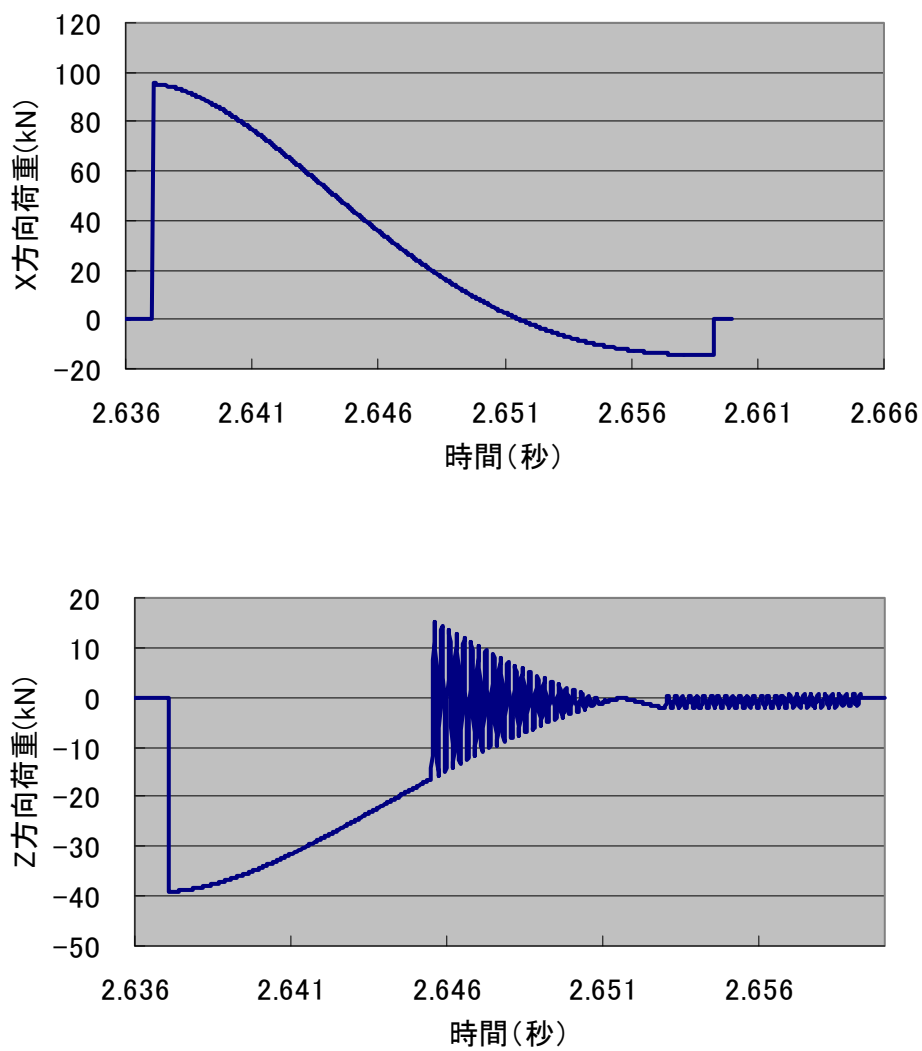


図 10.2.76 40cm 球形岩塊

20cm 塊状岩塊のシミュレーション結果について、反力壁に斜面からバウンドして直接衝突した時の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.77 に示す。

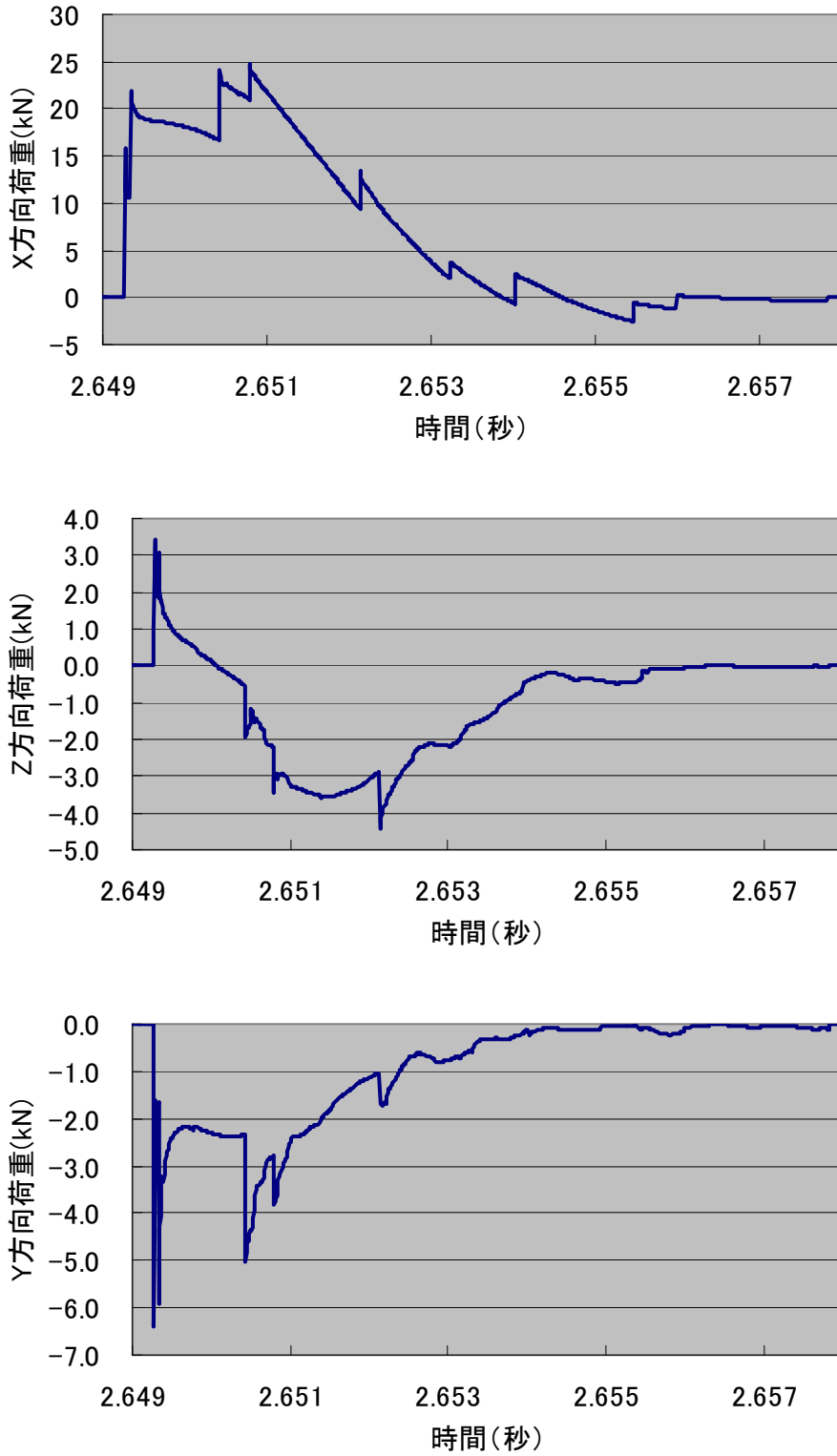


図 10.2.77 20cm 塊状岩塊 (直撃タイプ)

20cm 塊状岩塊のシミュレーション結果について、反力壁に底面を滑動しながら衝突した時の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.78 に示す。

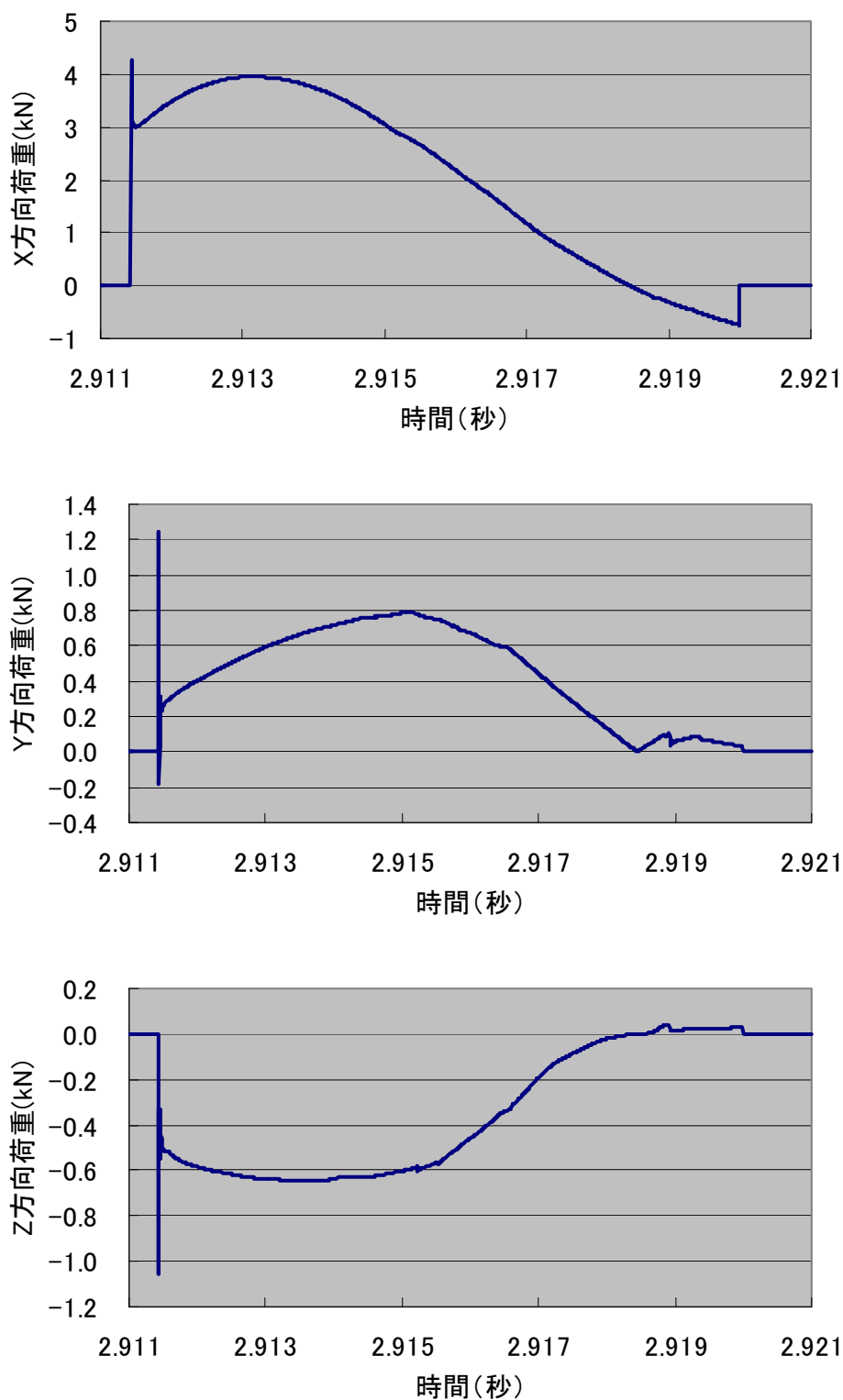


図 10.2.78 20cm 塊状岩塊 (滑動タイプ)



40cm 塊状岩塊のシミュレーション結果について、反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.79 に示す。

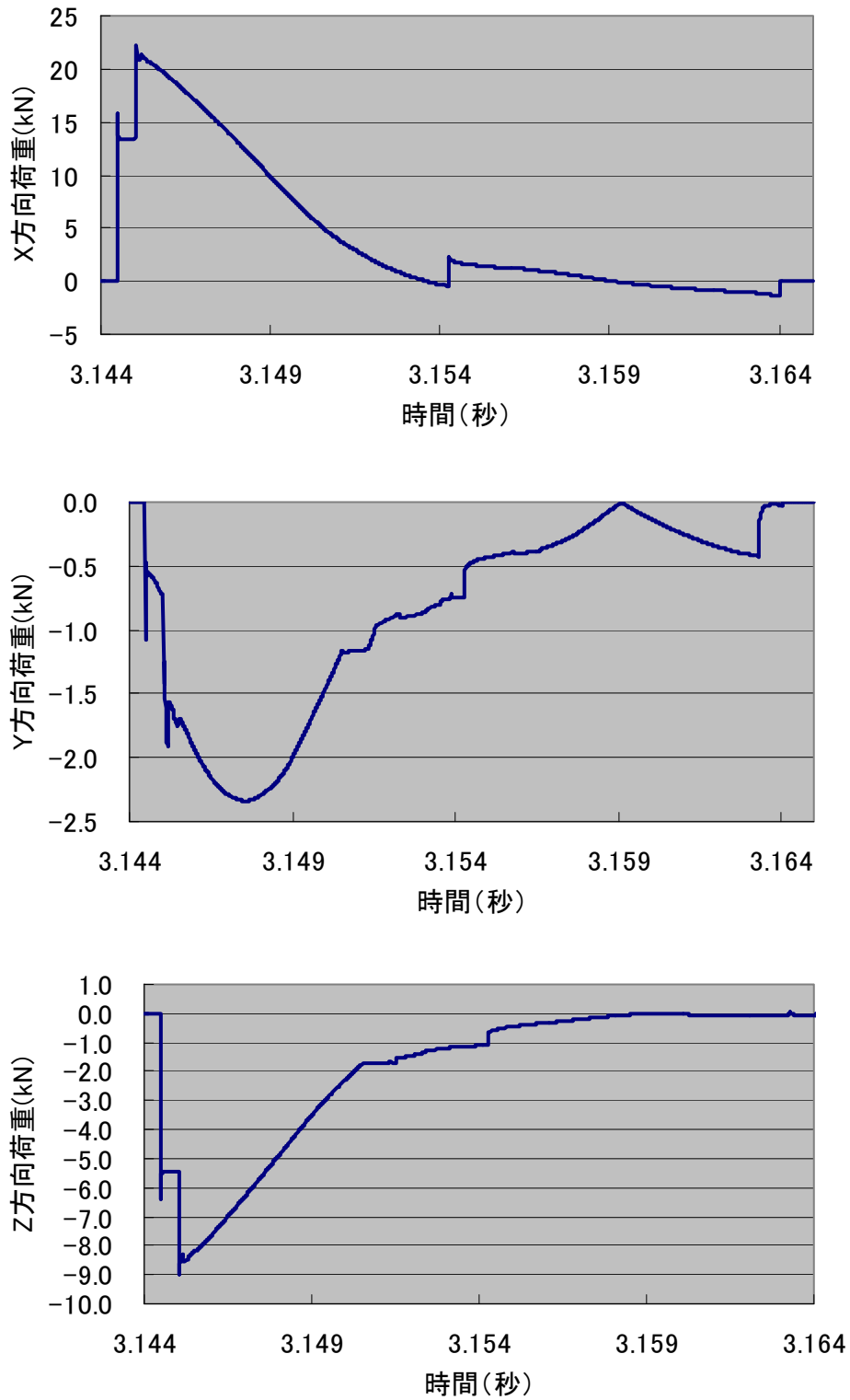


図 10.2.79 40cm 塊状岩塊

20cm 板状岩塊のシミュレーション結果について、反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.80 に示す。

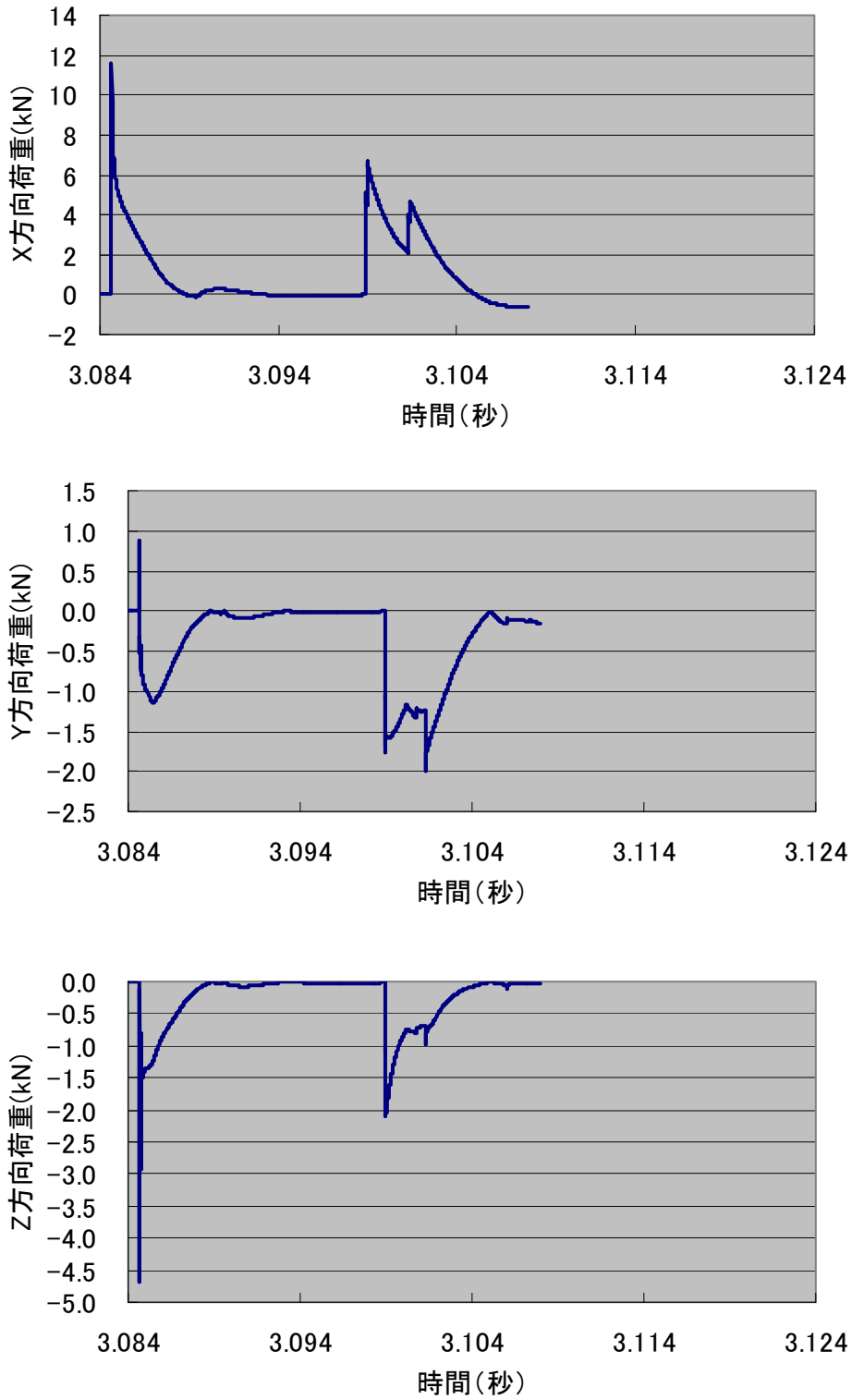


図 10.2.80 20cm 板状岩塊

40cm 板状岩塊のシミュレーション結果について、反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.81 に示す。

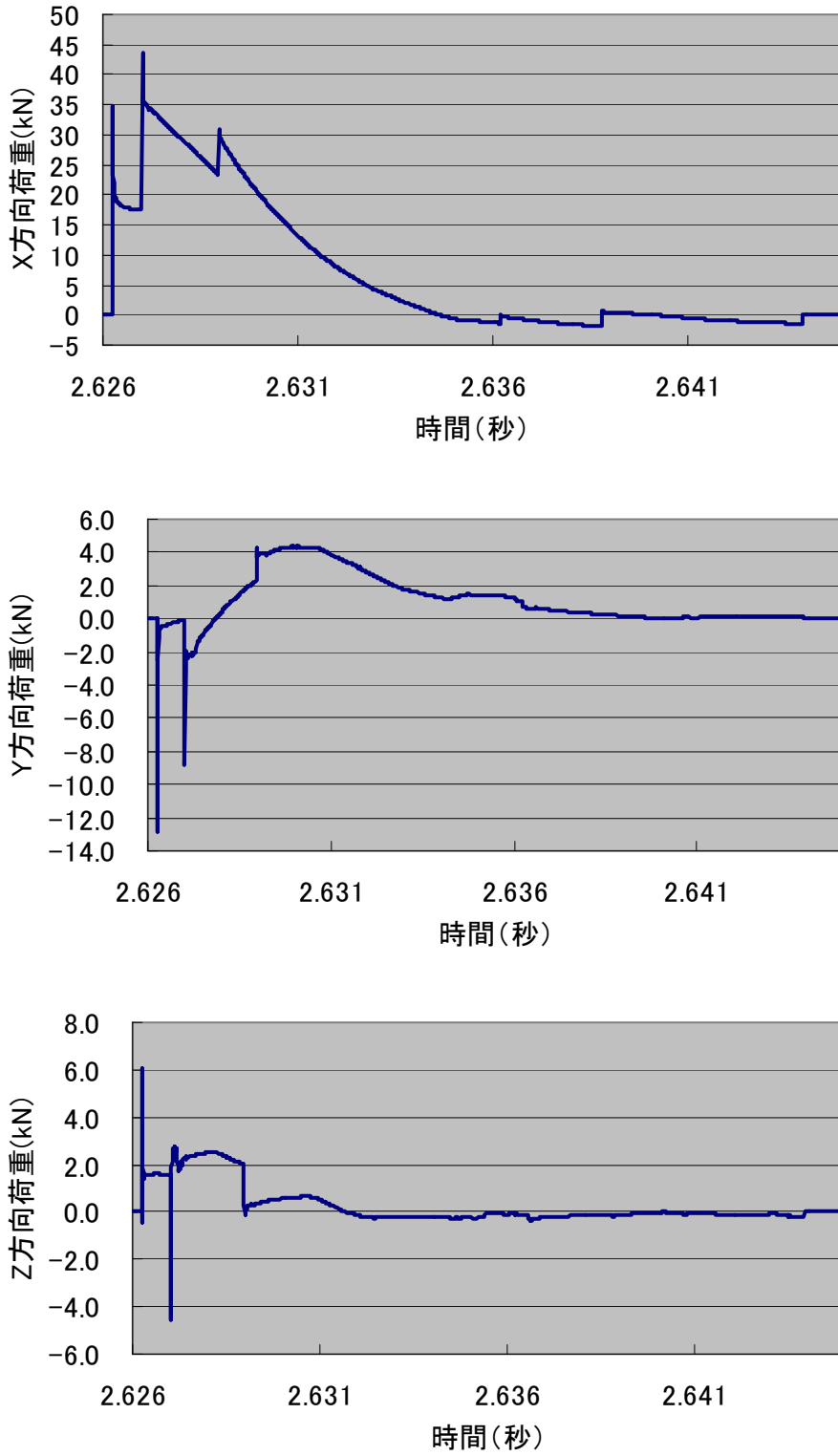


図 10.2.81 40cm 板状岩塊

碎石のシミュレーション結果について、反力壁に衝突した時の X 方向の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.82 に示す。

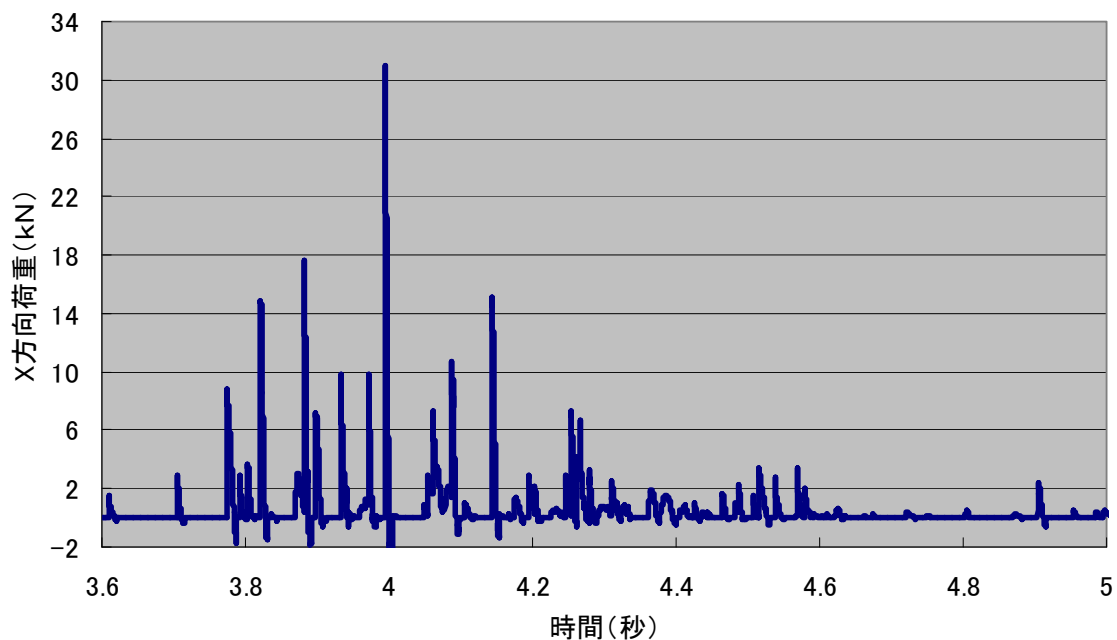


図 10.2.82 碎石 0.5m<sup>3</sup>の合力荷重履歴 (X 方向)

土砂のシミュレーション結果について、反力壁に衝突した時の X 方向の衝撃荷重の時刻歴を図 10.2.83 に示す。土砂は、反力壁にまで到達しなかったため衝撃荷重は 0 であった。

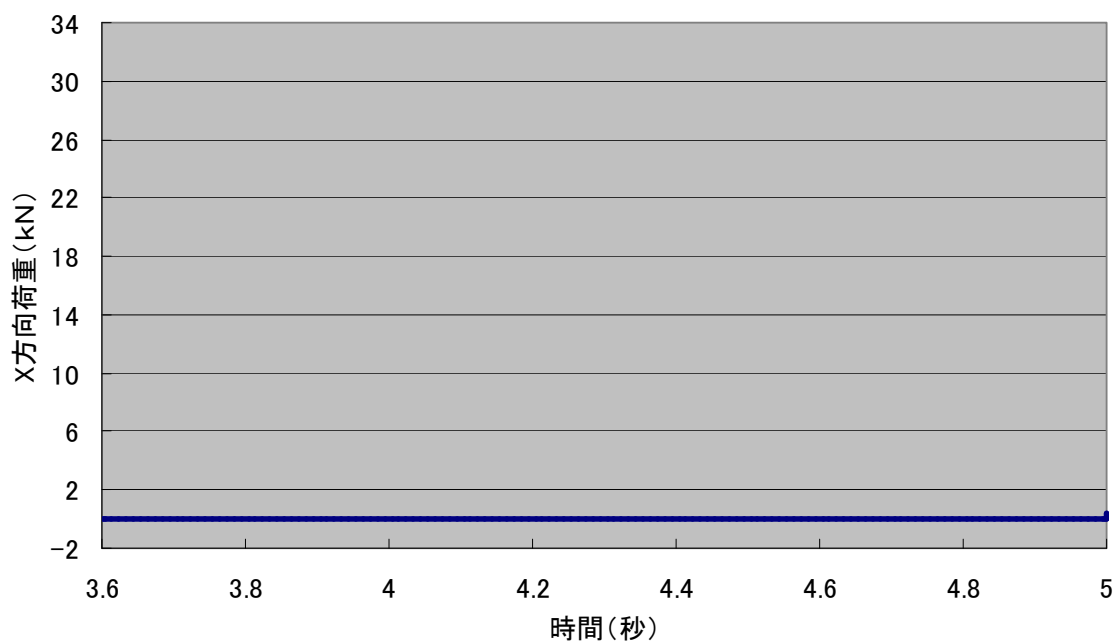


図 10.2.83 土砂 0.5m<sup>3</sup>の合力荷重履歴 (X 方向)

### 10.2.8 塊状岩塊モデルの初期傾斜のばらつきによる転動挙動のばらつき

20cm 塊状岩塊モデルを対象として、初期状態において奇数試行では、x 軸周りに  $0^\circ \sim 360^\circ$  一様なばらつきで岩塊モデルを回転させ、次に z 軸周りに  $0^\circ \sim 360^\circ$  回転させる、偶数試行では、y 軸周りに  $0^\circ \sim 360^\circ$  一様なばらつきで回転させ、次に z 軸周りに  $0^\circ \sim 360^\circ$  回転させる一様なばらつきで回転させることにより、岩塊モデルに様々な初期傾斜を 94 種類作成し、その後の転動挙動がどのようにばらつくかをシミュレーションした。

斜面上の転動挙動を表す指標としては、斜面の傾斜が変わる 30m 断面、35m 断面（図 10.2.84）の  $V_x$ ,  $V_z$ ,  $\omega_y$  と流下方向速度および転動係数が重要であるので、それらについてばらつきを検討した。

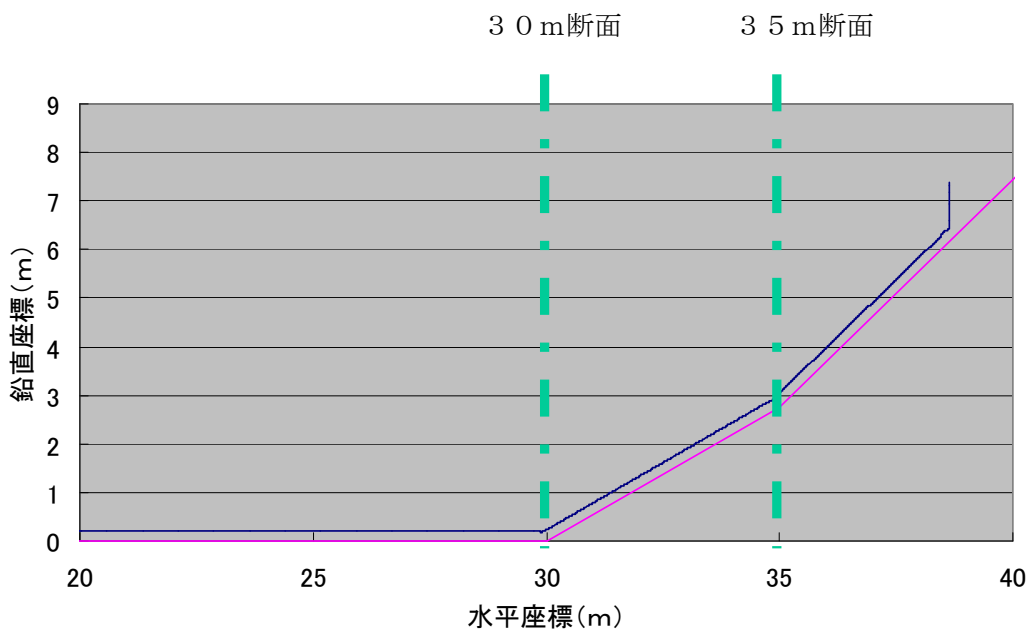


図 10.2.84 着目断面

図 10.2.85～図 10.2.94 に 30m 断面、35m 断面の  $V_x$ ,  $V_z$ ,  $\omega_y$  と流下方向速度および転動係数のそれぞれ分布を示す。岩塊モデルの軌跡(図 10.2.84 の青、この例では 40cm 球形岩塊のものが、系統的に斜面(図 10.2.84 の赤)とほぼ平行なので、流下方向速度は、 $(V_x * V_x + V_z * V_z)^{0.5}$  で近似した。斜面下の 30m 断面では、速度が大きく、転動係数が 1 に近づく傾向が見て取れる。

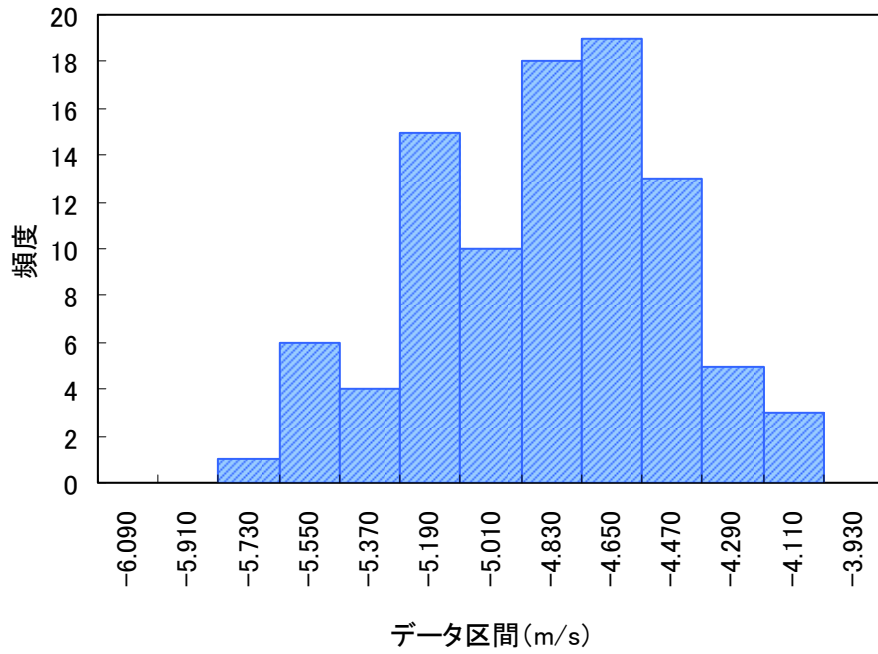


図 10.2.85 Vx の分布 (35m 断面)、平均-4.9m/s、標準偏差 0.37m/s

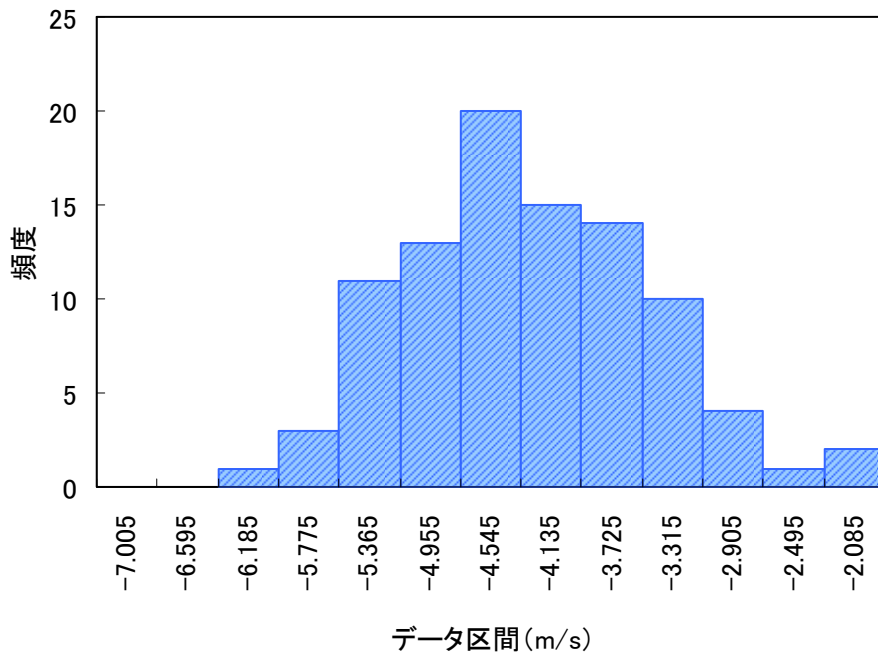


図 10.2.86 Vz の分布 (35m 断面)、平均-4.3m/s、標準偏差 0.82m/s

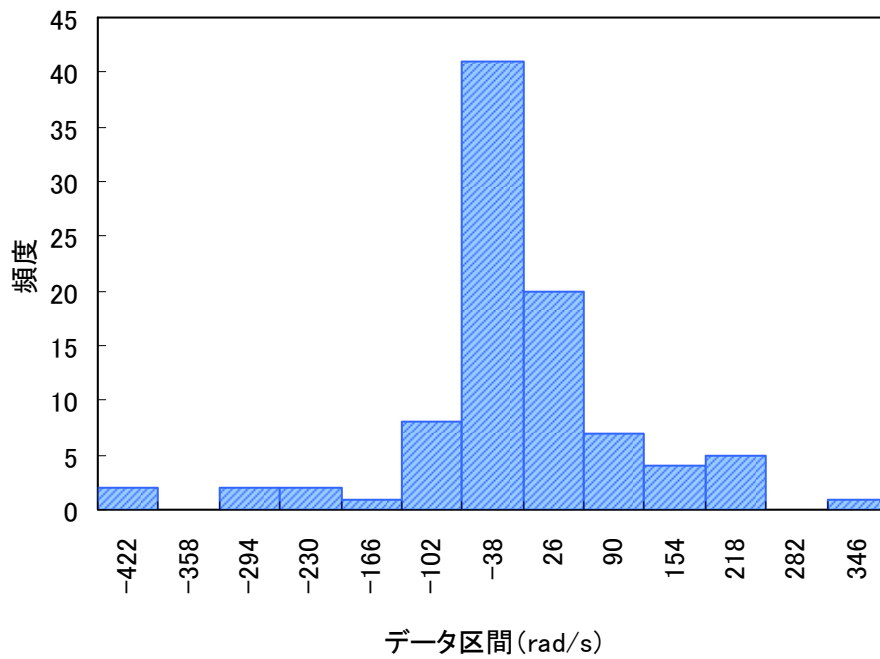


図 10.2.87  $\omega_y$  の分布 (35m 断面)、平均-8.7rad/s、標準偏差 127rad/s

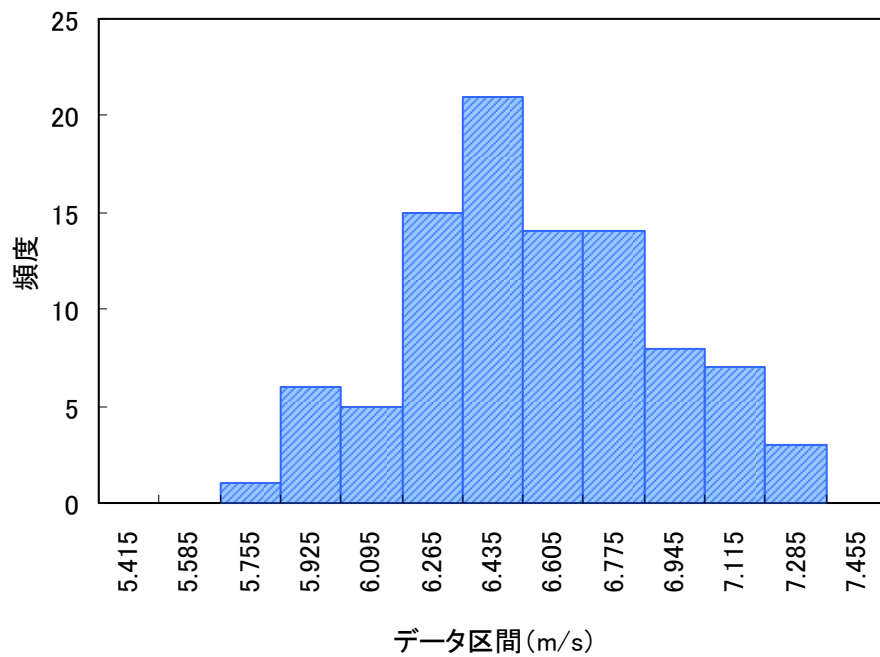


図 10.2.88 流下方向速度の分布 (35m 断面)、平均 6.5m/s、標準偏差 0.34m/s



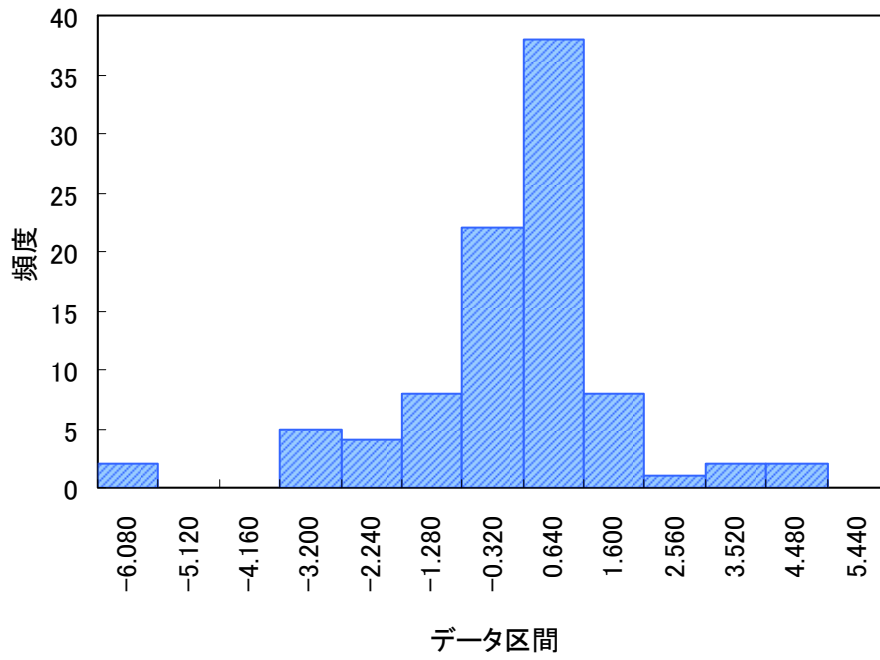


図 10.2.89 転動係数の分布 (35m 断面)、平均 0.13、標準偏差 1.91

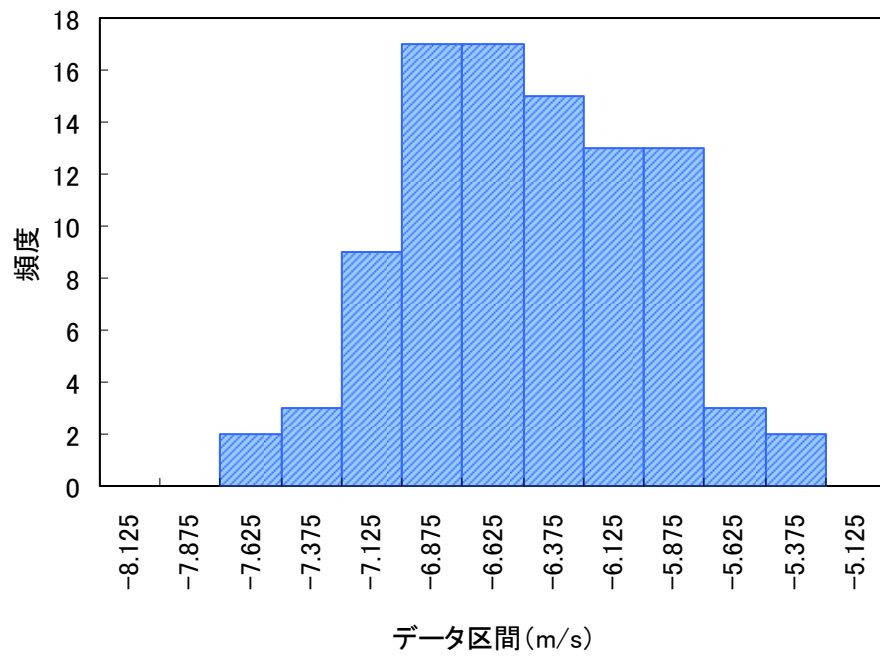


図 10.2.90  $V_x$  の分布 (30m 断面)、平均-6.4m/s、標準偏差 0.5m/s

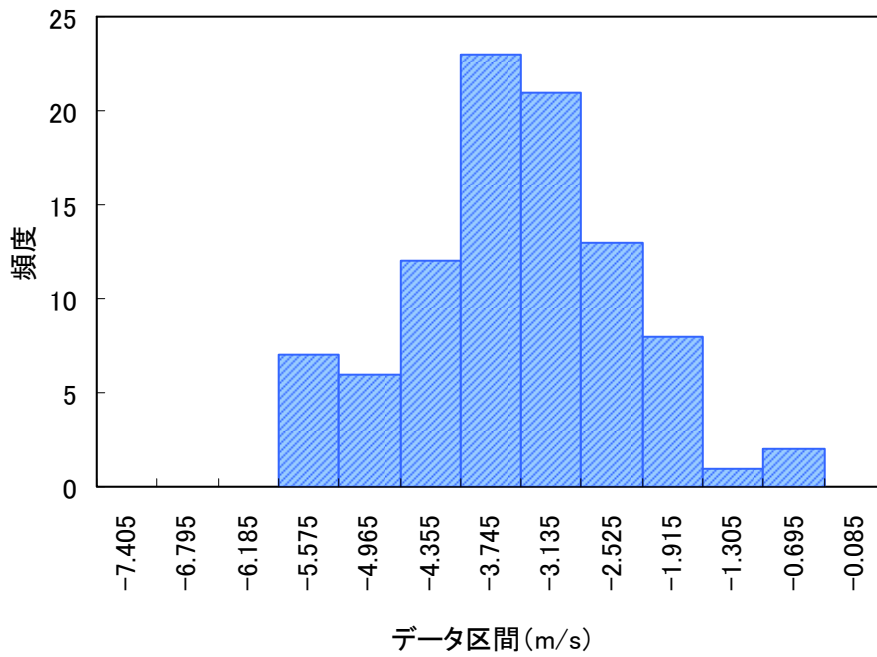


図 10.2.91 Vz の分布 (30m 断面)、平均-3.4m/s、標準偏差 1.2m/s

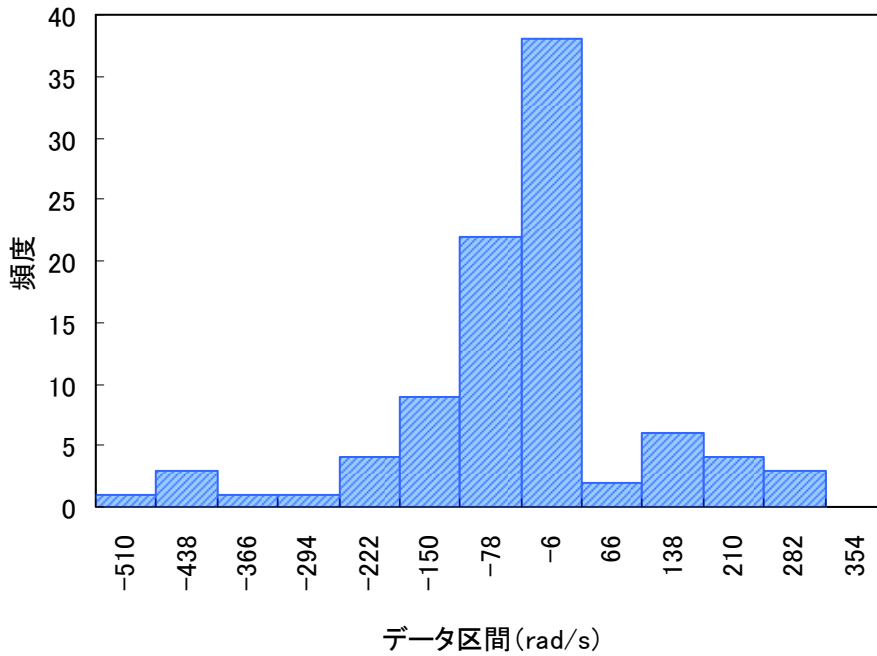


図 10.2.92 ωy の分布 (30m 断面)、平均-43.9rad/s、標準偏差 143.3rad/s

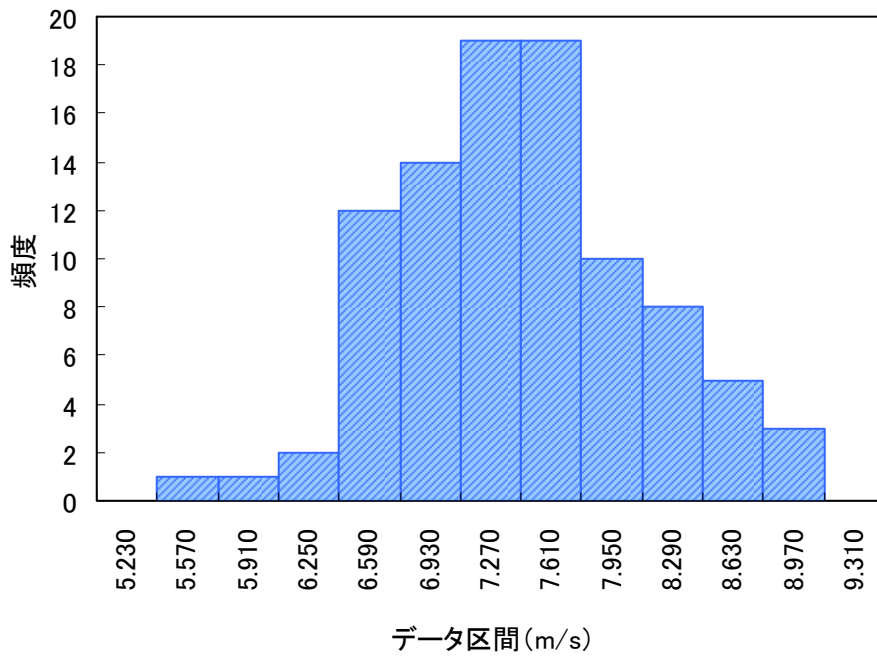


図 10.2.93 流下方向速度の分布 (30m 断面)、平均 7.4m/s、標準偏差 0.68m/s

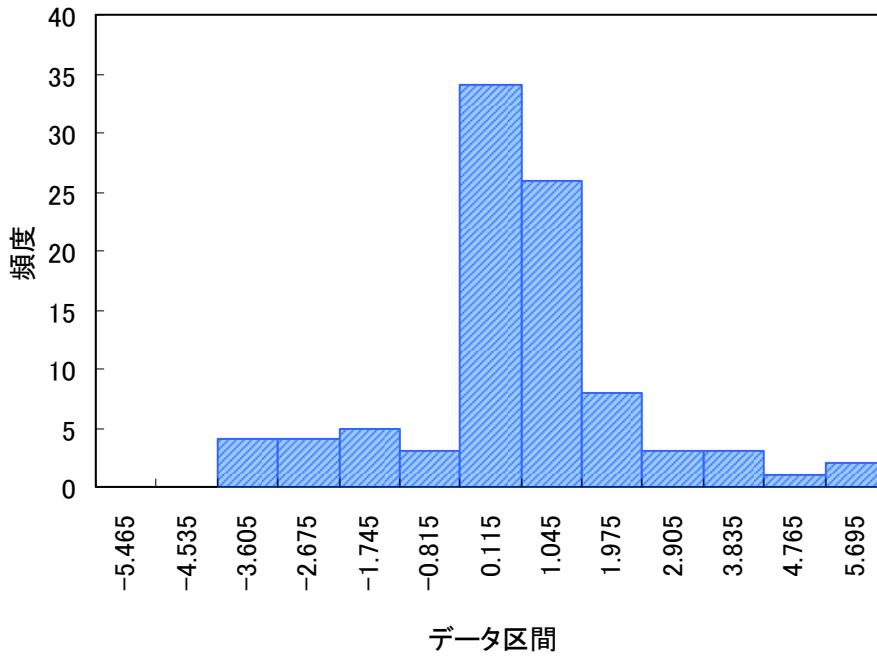


図 10.2.94 転動係数の分布 (30m 断面)、平均 0.58、標準偏差 1.9

図 10.2.95 には岩塊モデルの最終位置の分布を示す。斜面法尻からの離隔距離を、岩塊の「到達距離」、Y 座標を「拡がり」と呼ぶ。

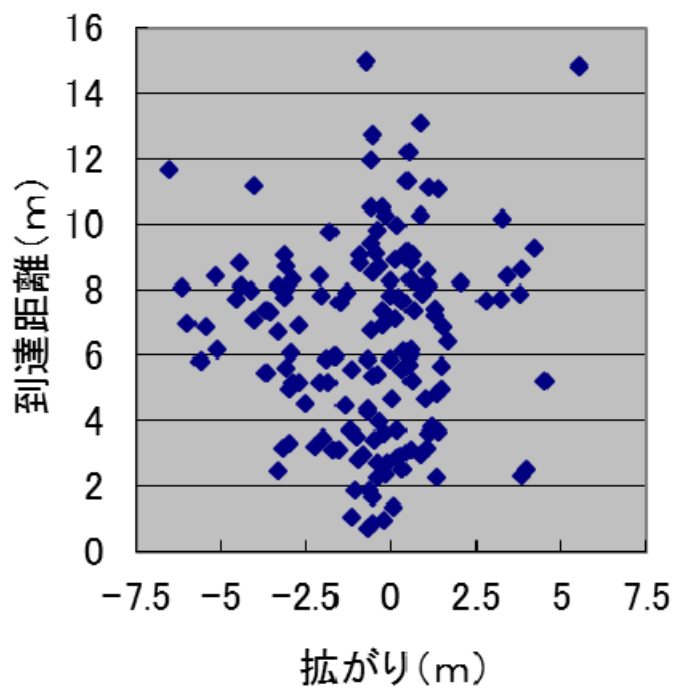


図 10.2.95 最終位置

## 10.2.9 塊状岩塊モデルの球要素によるモデル化

### (1) モデルの概要

前項では、複数の球要素を組み合わせて岩塊の形状を忠実にモデル化したが本項では、これを一個の球要素で表すことを考える。実際の岩塊が斜面や底版に衝突した際、それ自身の凸部が面に接するので、ほとんどすべて図 10.2.96(a)に示すように、面直行方向からずれて不規則な方向に飛び出す。この現象を、岩塊を一個の球要素で表す代わりに、球要素を空間や底面に固定し凹凸のある斜面や底版を模擬することにより表現できると考えた。

岩塊が底版に衝突した際、衝突前に鉛直方向の速度  $V_n$  として保持していたエネルギーが、水平方向への速度エネルギーへと変換され、鉛直方向への反発速度  $V_n'$  は、固定球を真上から落としたときの反発に比べて小さくなる。この反発係数を見かけの反発係数と呼ぶ。

図 10.2.96(b)のように、固定球の真上からずらせた位置から球要素を落下させると、底面に衝突前に鉛直方向の速度  $V_n$  として保持していたエネルギーが、水平方向への速度エネルギーへと変換され、岩塊が底版に衝突した際と同様、鉛直方向への反発  $V_n'$  は、固定球を真上から落としたときの反発に比べて小さくなる。この考えに基づき、見かけの反発係数を求める実験のシミュレーション検討を別途実施した結果を次に示す。

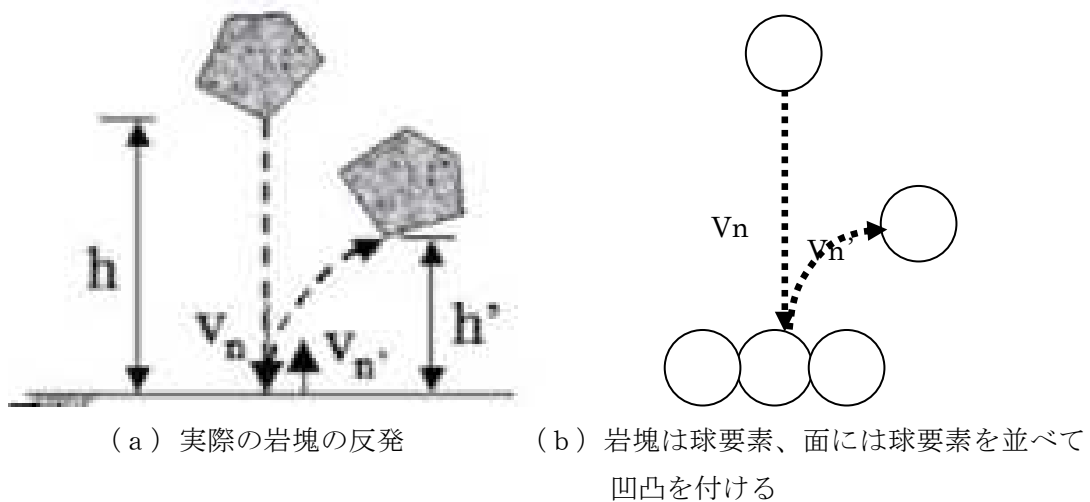
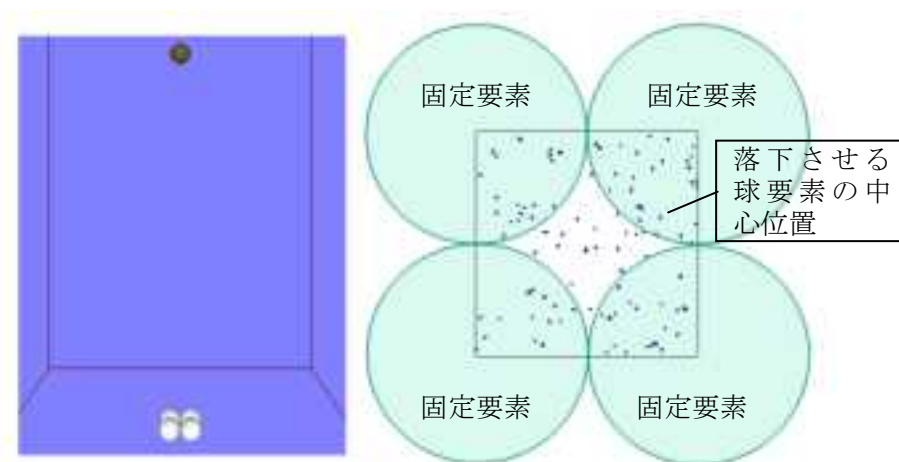


図 10.2.96 面に衝突する岩塊と球要素によるモデル化

(2) みかけの反発係数

図 10.2.97 にシミュレーションモデルを示す。床に 4 個球要素を直径の離隔で格子配置に固定し、落下させる球要素の初期位置をばらつかせる。球を固定球の真上から落としたときの反発係数(最大反発係数)が 0.48 となるよう物性を設定した。見かけの反発係数の分布を図 10.2.98 に示す。



(a) 反発実験の初期状態：  
床に 4 個球要素を固定し、落下させる球要素の初期位置をばらつかせる

(b) 上から見た 4 個の固定要素と、落下させる球要素の中心の初期位置 (100 地点)

図 10.2.97 球一個モデルの反発実験のシミュレーション

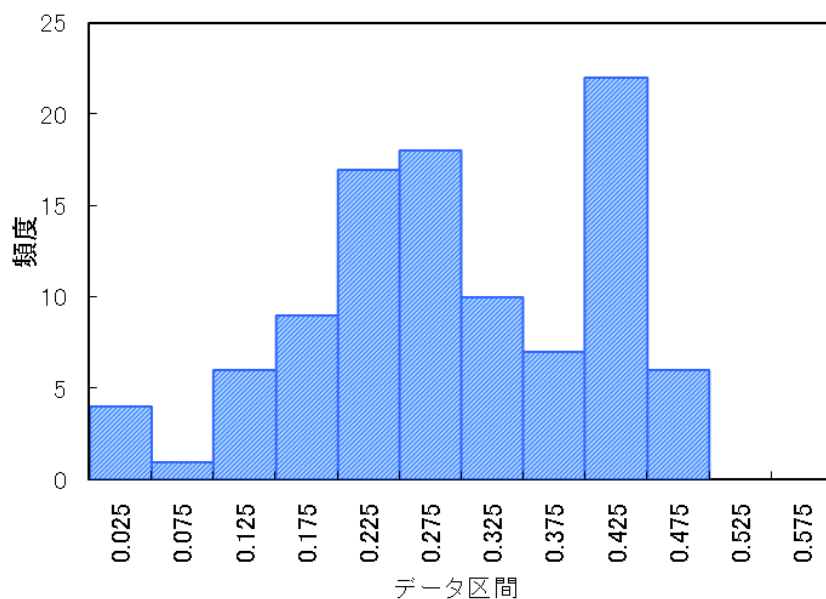


図 10.2.98 見かけの反発係数の分布、平均:0.294、標準偏差 : 0.12

同様の検討を他の最大反発係数についても実施した。最大反発係数に対する見かけの反発係数の平均値の関係を図 10.2.99 に示す。赤い丸は、前述検討結果のプロットである。この関係は、固定粒子の離隔距離に依存する。

一方、今回実施した 20cm 塊状岩塊の反発試験や、他機関が実施した岩塊の反発試験結果<sup>7),8)</sup>を、図 10.2.99 にプロットすると、図 10.2.100 のようになり、実際の岩塊の最大反発係数—見かけの反発係数関係とここで実施した反発試験シミュレーションにおけるそれとが良好に対応している。つまり、実際の岩塊の平板に対する見かけの反発係数を再現するために、底版の固定粒子の離隔距離を落下球体の直径とした格子配置モデルとすることは妥当であると言える。

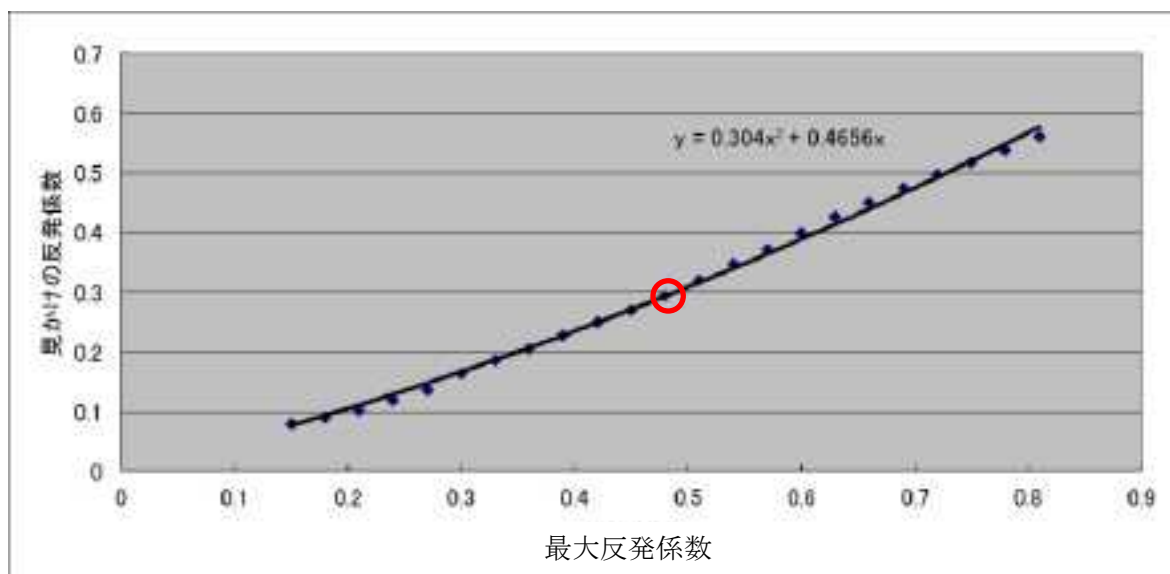


図 10.2.99 最大反発係数に対する見かけの反発係数の平均値

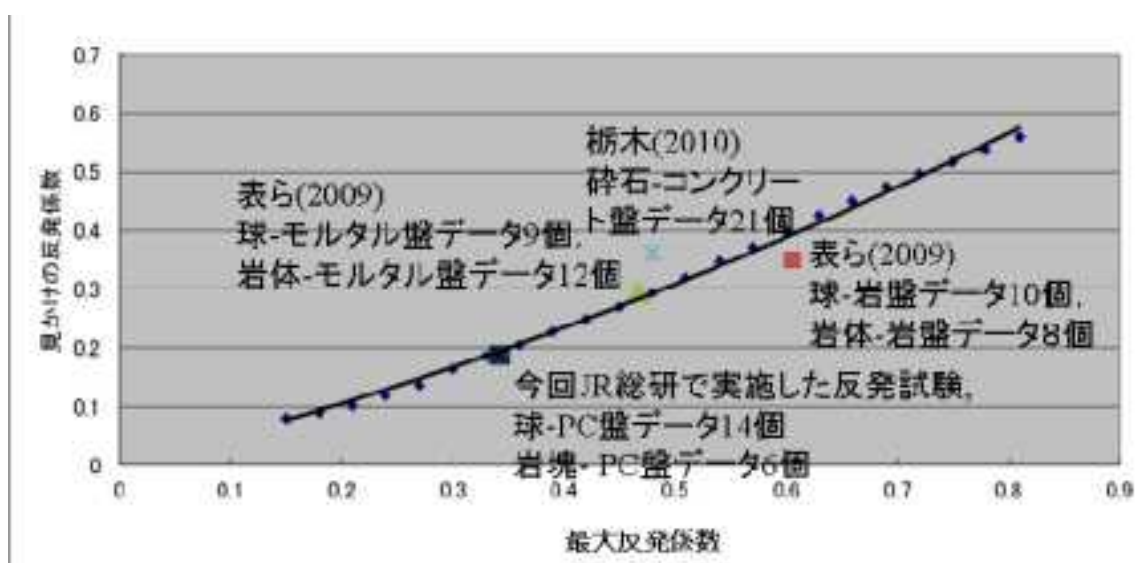


図 10.2.100 岩塊の最大反発係数と見かけの反発係数の図 10.2.99 上のプロット



### (3) 解析モデルとシミュレーション結果

20cm 塊状岩塊の流下実験を再現するため、底版および斜面のモデルとして、固定要素を XY 座標における離隔距離を落下球体の直径とした格子に配置した。解析モデルを図 10.2.101 に示す。初期位置を XY 平面で 20cm 四方 (図 10.2.97 (b)の四角形の範囲) の領域でばらつかせ、100 回の落下試験のシミュレーションを実施した。反発係数は、20cm 球形岩塊のそれを用いた。結果を球 485 個連結モデルのシミュレーション結果と比較する。図 10.2.102 に岩塊最終到達地点の比較を、図 10.2.103 に拡がりおよび到達距離の累積の比較を示す。球 1 個の拡がりやや大きく、到達距離はおおむね対応している。

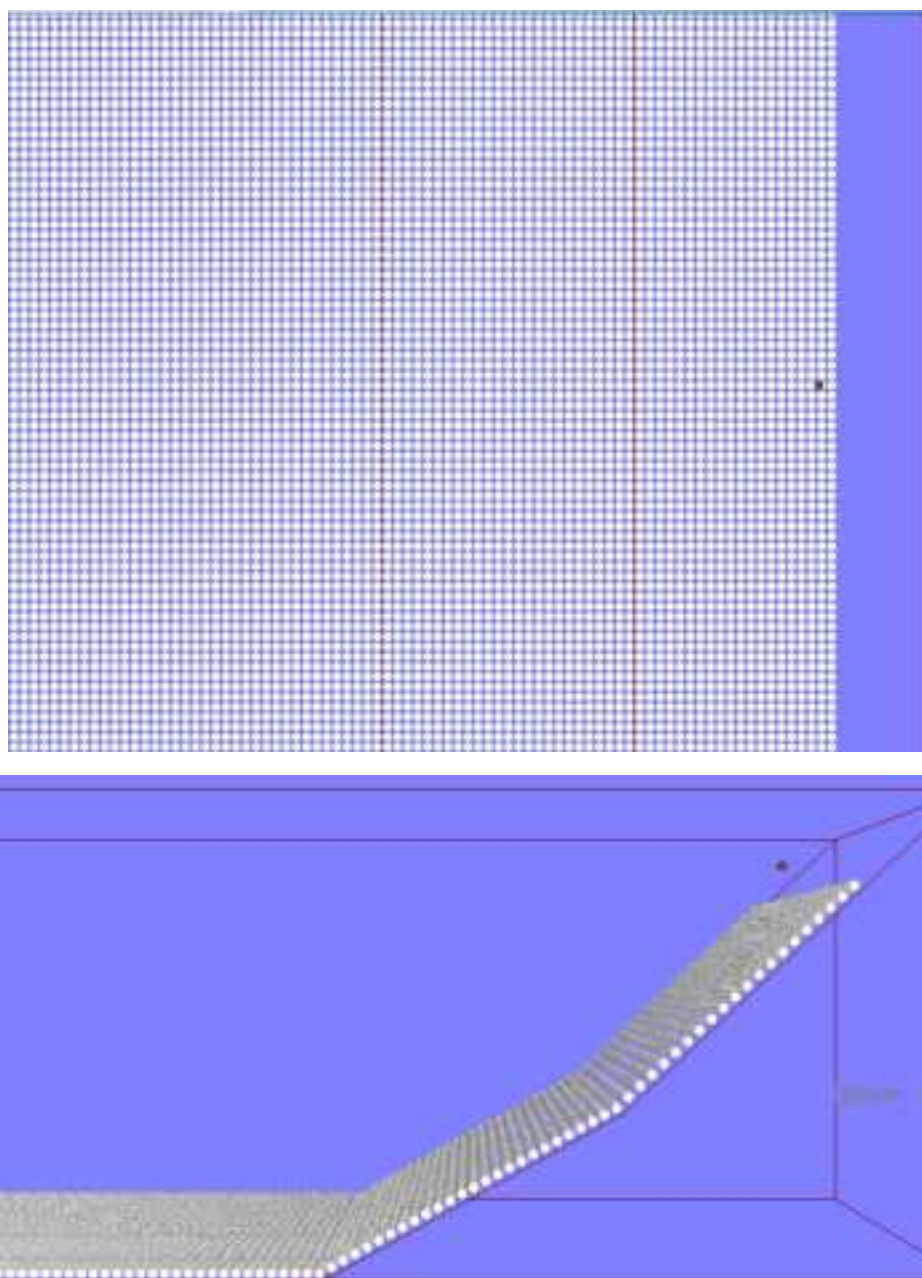
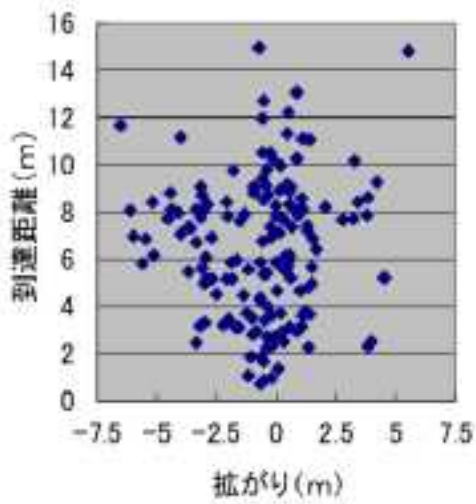
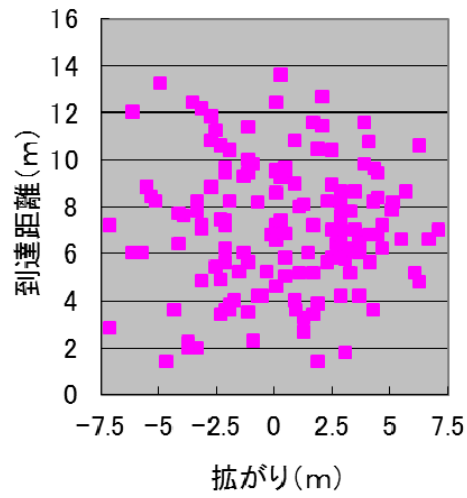


図 10.2.101 解析モデル



(a) DEM、485 個の球要素連結モデル  
斜面、底版は剛な平面境界



(b) DEM、直径 20cm の球要素 1 個  
斜面、底版球要素 20cm 格子状に固定

図 10.2.102 岩塊最終到達地点の比較

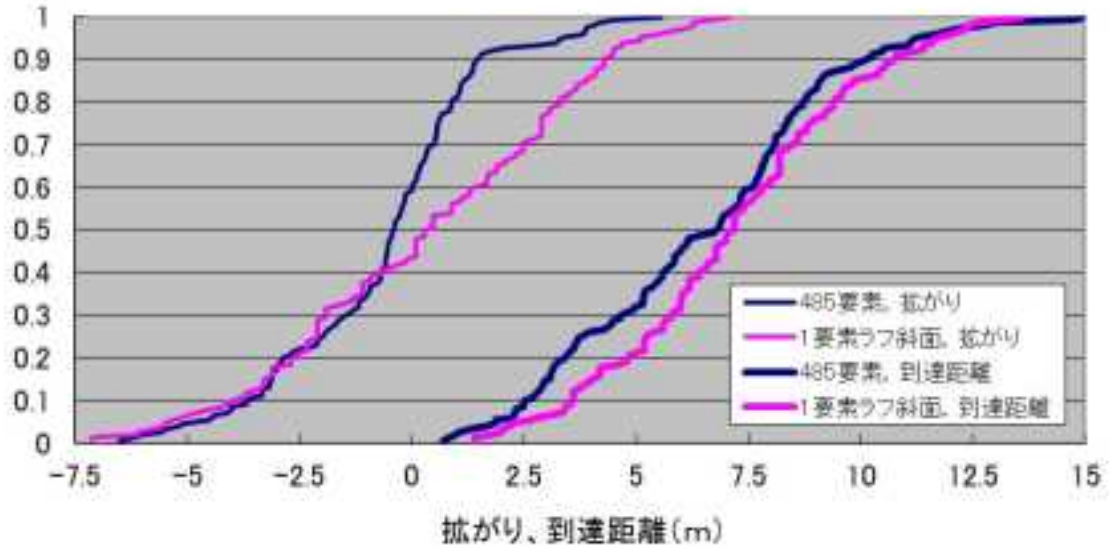


図 10.2.103 拡がりおよび到達距離の累積の比較

## 10. 2. 10 個別要素法による検証解析のまとめ

以下に、個別要素法による検証解析から得られた結果および考察をまとめる。

### (1) 球形岩塊

球形岩塊は、DEM の球要素 1 個で簡単にモデル化できる。転動係数の時系列をみれば、今回設定したパラメータでは、上部斜面のみすべりが生じるものの、法尻辺りではほとんど滑らずに転がる結果となっている。斜面法尻の流下方向速度は、20cm 岩塊が 8.1m/s、40cm 岩塊が 8.2m/s であり反発係数がかなり異なる割には両者にほとんど差がない結果となった。

### (2) 塊状および板状岩塊

小さい球要素を複数連結し、岩塊の外形を忠実にモデル化した。20cm 岩塊のパラメトリックスタディでは、実験のように滑動するタイプの挙動をする事例も見られた。斜面法尻の流下方向速度の平均は、7.4m/s であった。

### (3) 碎石

0.5m<sup>3</sup> 碎石流下実験の再現解析において、今回設定したパラメータでは、碎石のモデル要素の到達距離や広がり、実験に比べてかなり大きくなった。

### (4) 土砂

0.5m<sup>3</sup> 土砂流下実験の再現解析において、今回設定したパラメータでは、土砂のモデル要素が反力壁に到達しなかった。しかしこれことは、ビデオを観察した限りにおいては、実験と対応しているようにみえた。

### (5) 20cm 塊状岩塊を球 1 個でモデル化する手法

底版および斜面モデルとして、固定要素を XY 座標における離隔距離を落下球体の直径とした格子に配置し、20cm の球要素 1 個を塊状岩塊のモデルとして落下させるシミュレーション検討を行った。小さい球要素を複数連結し他モデルに比べて、「広がり」は大きくなったものの、「到達距離」はおおむね対応する結果となった。

以下に、個別要素法による検証解析から考えられる課題をまとめる。

(1) 実験結果との比較

各ケースとも、実験と定量的に比較し、キャリブレーションの必要があれば、実施する必要がある。

(2) 塊状岩塊を球1個でモデル化する手法

平面に対するモデルとしては妥当であると言えるかも知れないが、特に斜面において、起伏や粗度がある場合について、更なる検討が必要である。

(3) 碎石、土砂

碎石、土砂を表す粒子サイズが、相対的に大きすぎるので、少なくとも現状の0.5倍の要素半径で再現検討する必要がある。碎石のパラメータ設定では、応力ひずみ関係の対応がよくないので、今一度物性のキャリブレーションをする必要がある。

### 10.3 粒子法 (MPM) による検証解析

#### 10.3.1 粒子法 (MPM) の概要

粒子法による解析手法には、鉄道総研が開発している動的解析対応の 3 次元 Material Point Method(MPM)<sup>9), 10), 11)</sup>を用いた。当該手法は、図 10.3.1 に示すように空間に固定された格子上を自由に移動できる粒子により物体をモデル化する手法であり、要素試験より得られる地盤の諸数値と従来の地盤材料の構成則を用いて、連続体および不連続体としての地盤の挙動を解析できる。以下に解析の流れを示す。図 10.3.2 に解析フローの概要を示す。

変数の更新の準備として内挿関数  $N_i(\mathbf{x}_p^k)$  ( $=N_{ip}^k$ )とその勾配関数  $\mathbf{G}_{ip}^k$ を計算し、粒子の質量  $M_p$ を用いて格子点の質量  $m_i^k$ を次式で求める。なお、 $N_n$ は一格子がもつ格子点の個数である。

$$m_i^k = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_{ip}^k \quad (24)$$

粒子の応力  $\boldsymbol{\sigma}_p^k$ を用いて式(2a), (2b)から格子点の内力  $\mathbf{f}_i^{\text{int},k}$ と外力  $\mathbf{f}_i^{\text{ext},k}$ を求め、格子点の加速度  $\mathbf{a}_i^k$ を求める。なお、 $\mathbf{b}_p^k$ は粒子の単位体積力である。

$$\mathbf{f}_i^{\text{int},k} = - \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{G}_{ip}^k \cdot \boldsymbol{\sigma}_p^{s,k} \quad (25a)$$

$$\mathbf{f}_i^{\text{ext},k} = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{b}_p^k N_i(\mathbf{x}_p^k) \quad (25b)$$

ここで、

$$\mathbf{a}_i^k = (\mathbf{f}_i^{\text{int},k} + \mathbf{f}_i^{\text{ext},k}) / m_i^k \quad (26)$$

$\mathbf{a}_i^k$ を用いて節点の速度  $\mathbf{v}_i^k$ を次式で更新する。

$$\mathbf{v}_i^L = \mathbf{v}_i^k + \mathbf{a}_i^k \Delta t \quad (27)$$

$\mathbf{v}_i^L$ を用いて粒子の座標  $\mathbf{x}_p^k$ と速度  $\mathbf{v}_p^k$ を次式で更新する。

$$\mathbf{x}_p^{k+1} = \mathbf{x}_p^k + \Delta t \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{v}_i^L N_{ip}^k \quad (28)$$

$$\mathbf{v}_p^{k+1} = \mathbf{v}_p^k + \Delta t \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{a}_i^k N_{ip}^k \quad (29)$$

$\mathbf{v}_p^{k+1}$ を用いて次ステップでの節点の速度  $\mathbf{v}_i^{k+1}$ を求める。

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \sum_{p=1}^{N_p} m_p \mathbf{v}_p^{k+1} N_{ip}^k / m_i^k \quad (30)$$

$\mathbf{v}_i^{k+1}$ を用いて次ステップでのひずみ増分  $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1}$ を求める。

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1} = \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=1}^{N_n} \left\{ \mathbf{G}_{ip}^k \mathbf{v}_i^{k+1} + (\mathbf{G}_{ip}^k \mathbf{v}_i^{k+1})^T \right\} \quad (31)$$

応力増分  $\Delta \boldsymbol{\sigma}_p^{k+1}$  を計算し  $\boldsymbol{\sigma}_p^{k+1}$  に更新する.

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}_p^{k+1} = \mathbf{T} : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1} \quad (32)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_p^{k+1} = \boldsymbol{\sigma}_p^k + \Delta \boldsymbol{\sigma}_p^{k+1} \quad (33)$$

また, 粒子の密度  $\rho_p^k$  を式(11)で更新する.

$$\rho_p^{k+1} = \rho_p^k / \{1 + \text{tr}(\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1})\} \quad (34)$$

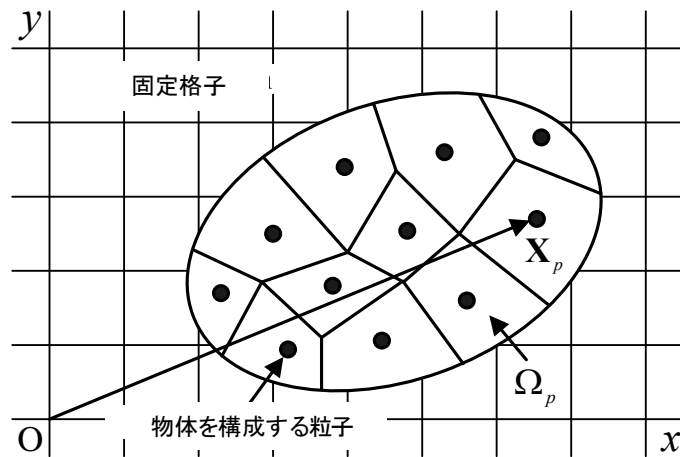


図 10.3.1 固定格子上的粒子集合モデル

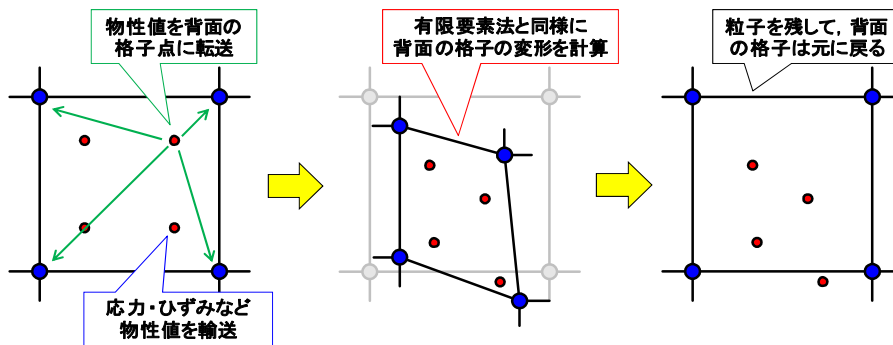


図 10.3.2 粒子法の解析フローの概要

### 10.3.2 解析ケース

表 10.3.1 に粒子法で実施した解析ケースを示す。

表 10.3.1 解析ケース一覧

ケース	実験の種類	模型材料	サイズ等	反力壁の有無
1	転動実験	球形岩塊	代表径 20cm, 40cm	有
2		板状岩塊	代表径 20cm, 40cm	
3		塊状岩塊	代表径 20cm, 40cm	
4		球形岩塊	代表径 20cm, 40cm	無
5		板状岩塊	代表径 20cm, 40cm	
6		塊状岩塊	代表径 20cm, 40cm	
7	流動実験	碎石	厚さ 0.116m, 長さ 2.315m, 奥行 1.855m, 体積 0.5m <sup>3</sup>	有
8		土砂	厚さ 0.116m, 長さ 2.315m, 奥行 1.855m, 体積 0.5m <sup>3</sup>	
9		碎石	厚さ 0.116m, 長さ 2.315m, 奥行 1.855m, 体積 0.5m <sup>3</sup>	無
10		土砂	厚さ 0.116m, 長さ 2.315m, 奥行 1.855m, 体積 0.5m <sup>3</sup>	

### 10.3.3 岩塊模型の転動挙動のシミュレーション（壁有ケース）

(1) 粒子数, 解析ステップ数, 時間間隔

表 10.3.2 に転動実験の 3 種類 6 ケースの粒子数、解析ステップ数、時間間隔を示す。解析時間は反力壁もしくは流路模型の端に届くまでとし全ケース 4 秒間とした。時間間隔は後述する跳ね返りシミュレーションにおいて発散しないことを確認し決定した。

表 10.3.2 粒子数、解析ステップ数、ステップ間隔

ケース	模型材料	粒子数 0内は岩塊の 粒子数	初期応力解析	
			解析ステップ数	時間間隔(s)
1	球形 20cm	3,803(503)	200,000	$2.0 \times 10^{-5}$
	球形 40cm	5,301(2,001)	400,000	$1.0 \times 10^{-5}$
2	板状 20cm	4,034(734)	400,000	$1.0 \times 10^{-5}$
	板状 40cm	4,269(969)	200,000	$2.0 \times 10^{-5}$
3	塊状 20cm	3,858 (558)	200,000	$2.0 \times 10^{-5}$
	塊状 40cm	4,334(1,034)	200,000	$2.0 \times 10^{-5}$

(2) 構成則

岩塊、反力壁をそれぞれ弾性モデルで定義した。入力データは以下のとおりとした。

岩塊はコンクリートの弾性係数から 2 オーダー小さくした値を採用した。これは、流路模型との衝突時に岩塊モデル内部に過大な応力が発生することを防ぐためである。

粒子の剛性に対するレイリー減衰係数  $\beta s$  は跳ね返りシミュレーションによって模型毎に決定した。詳細は後述する。反力壁は鉄材部とコンクリート部に分けてモデル化した。表 10.3.3~10.3.5 に岩塊および反力壁の入力値を示す。

表 10.3.3 岩塊弾性モデル

項目説明	項目名	入力値
弾性係数(kN/m <sup>2</sup> )	E	2.35E+05
ポアソン比	$\nu$	0.167
単位質量(t/m <sup>3</sup> )	$r_0$	2.18
引張強度(kN/m <sup>2</sup> )	cc	1.0E+10
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	$\alpha s$	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	$\beta s$	岩塊ごとに決定



表 10.3.4 反力壁(鉄材部)弾性モデル

項目説明	項目名	入力値
弾性係数(kN/m <sup>2</sup> )	E	2.0E+08
ポアソン比	$\nu$	0.3
単位質量(t/m <sup>3</sup> )	r0	7.85
引張強度(kN/m <sup>2</sup> )	cc	1.0E+08
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	$\alpha s$	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	$\beta s$	0.0

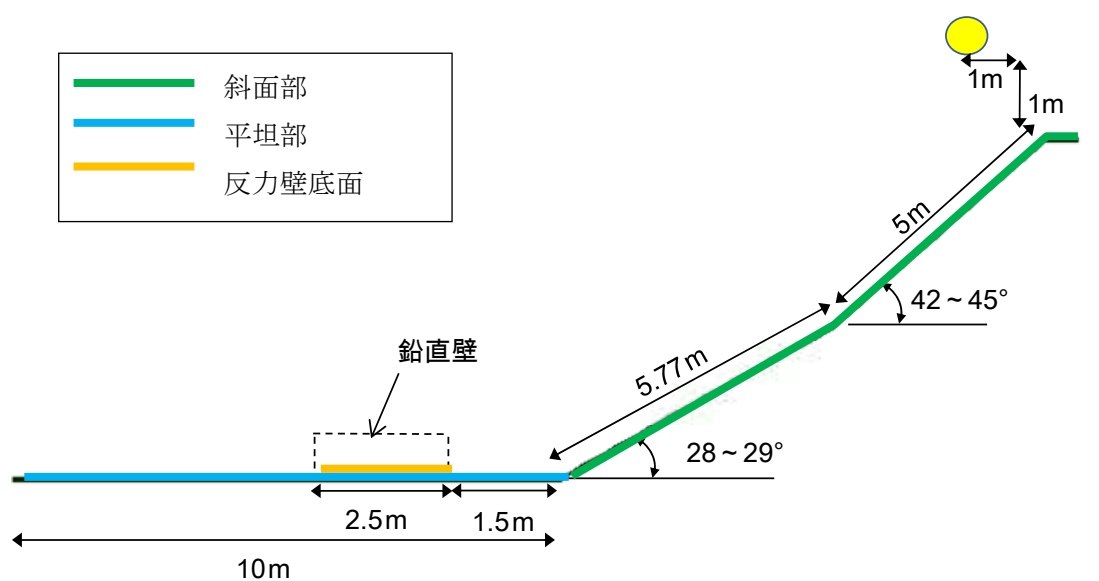
表 10.3.5 反力壁(コンクリート部)弾性モデル

項目説明	項目名	入力値
弾性係数(kN/m <sup>2</sup> )	E	2.35E07
ポアソン比	$\nu$	0.167
単位質量(t/m <sup>3</sup> )	r0	2.35
引張強度(kN/m <sup>2</sup> )	cc	1.0E+08
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	$\alpha s$	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	$\beta s$	0.0

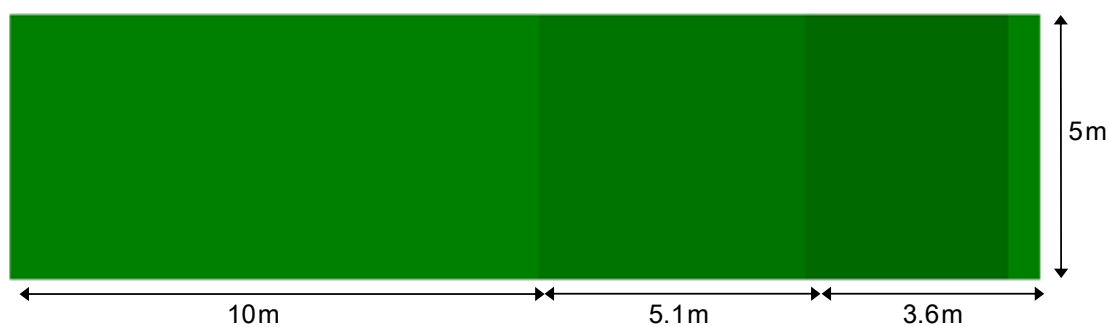
### (3) 流路模型のモデル化

流路模型は境界条件データにより再現した。図 10.3.3 に作成した流路模型の形状を示す。境界条件において、表 10.3.6 に示すように、底面の格子における摩擦角  $22.3^\circ$  (動摩擦係数 0.411 相当) を入力した。ただし、反力壁底面部は摩擦角  $30.0^\circ$ 、平坦部は摩擦角  $0.0^\circ$  とした。拘束条件は反力壁設置位置のみ拘束条件を設定し、それ以外の位置は自由とした。

反力壁位置は傾斜終了位置から 1.5m 離れた位置に幅 2.5m 奥行 2.2m 厚さ 0.6m の範囲で粒子群として設定した。図 10.3.4 に反力壁の設置位置を示す。詳細な形状については後述する。



(a) 流路模型断面図



(b) 流路模型平面図

図 10.3.3 流路模型の解析モデル

表 10.3.6 底面摩擦角

	底面摩擦角
斜面部	22.3°
平坦部	0.0°
反力壁底面	30.0°

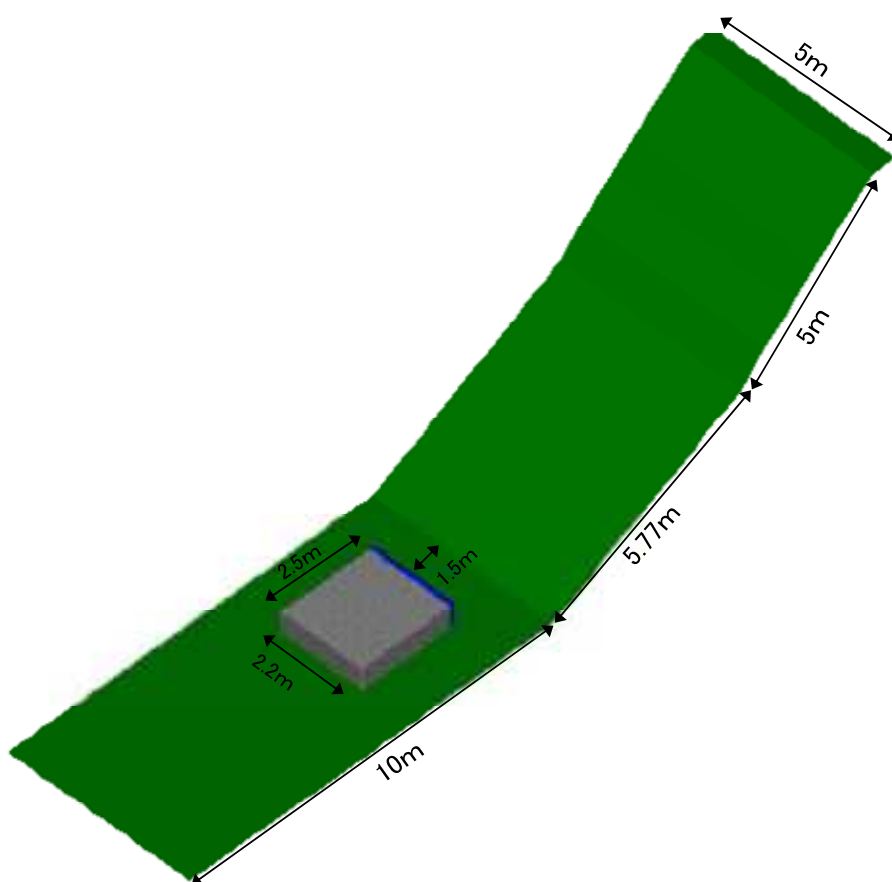


図 10.3.4 流路模型の反力壁設置位置

#### (4) 岩塊模型と反力壁のモデル化

以下に岩塊モデル形状を示す。各モデルは背面格子条件として、格子幅 0.2m とし、粒子数を 20cm 級では  $10 \times 10 \times 10$  とし、40cm 級では  $8 \times 8 \times 8$  と設定した。板状、塊状の岩塊についてはレーザープロファイルの座標値を基に作成した。

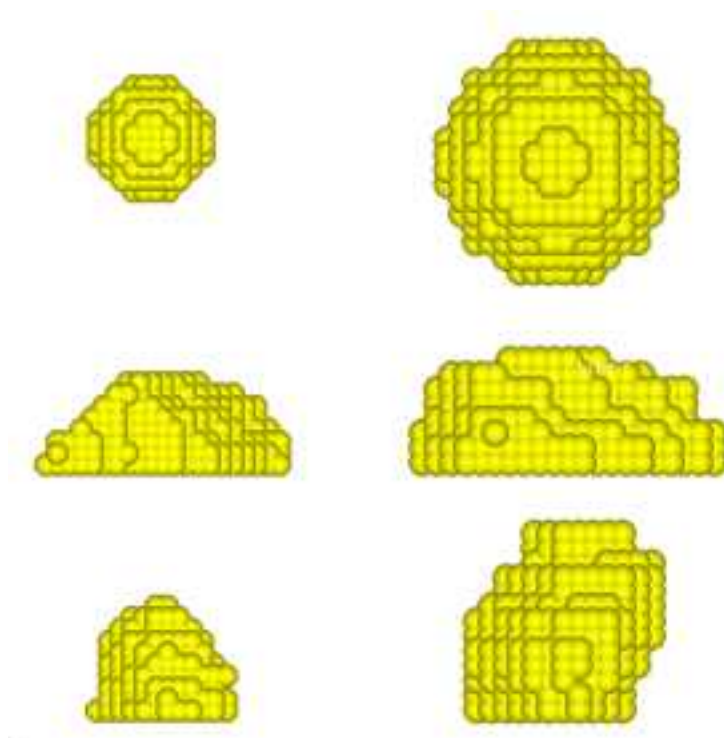


図 10.3.5 岩塊模型一覧

(上段 左：球形 20cm、右：球形 40cm)

(中段 左：板状 20cm、右：板状 40cm)

(下段 左：塊状 20cm、右：塊状 40cm)

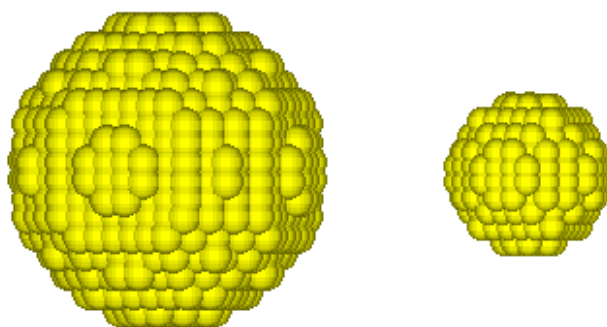


図 10.3.6 球形 20cm と球形 40cm のモデル形状

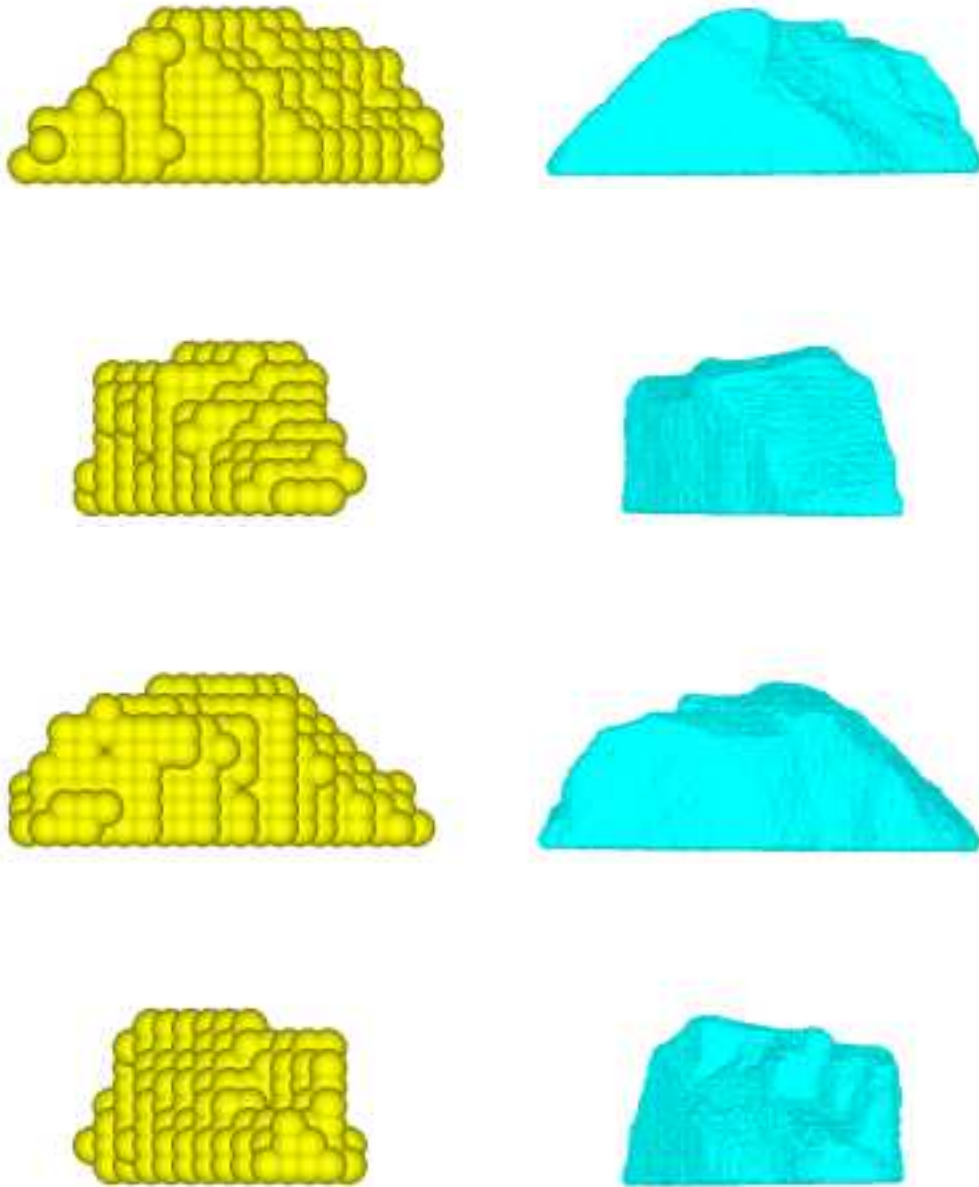


図 10.3.7 板状 20cm の形状(左 : MPM、右 : レーザープロファイル)

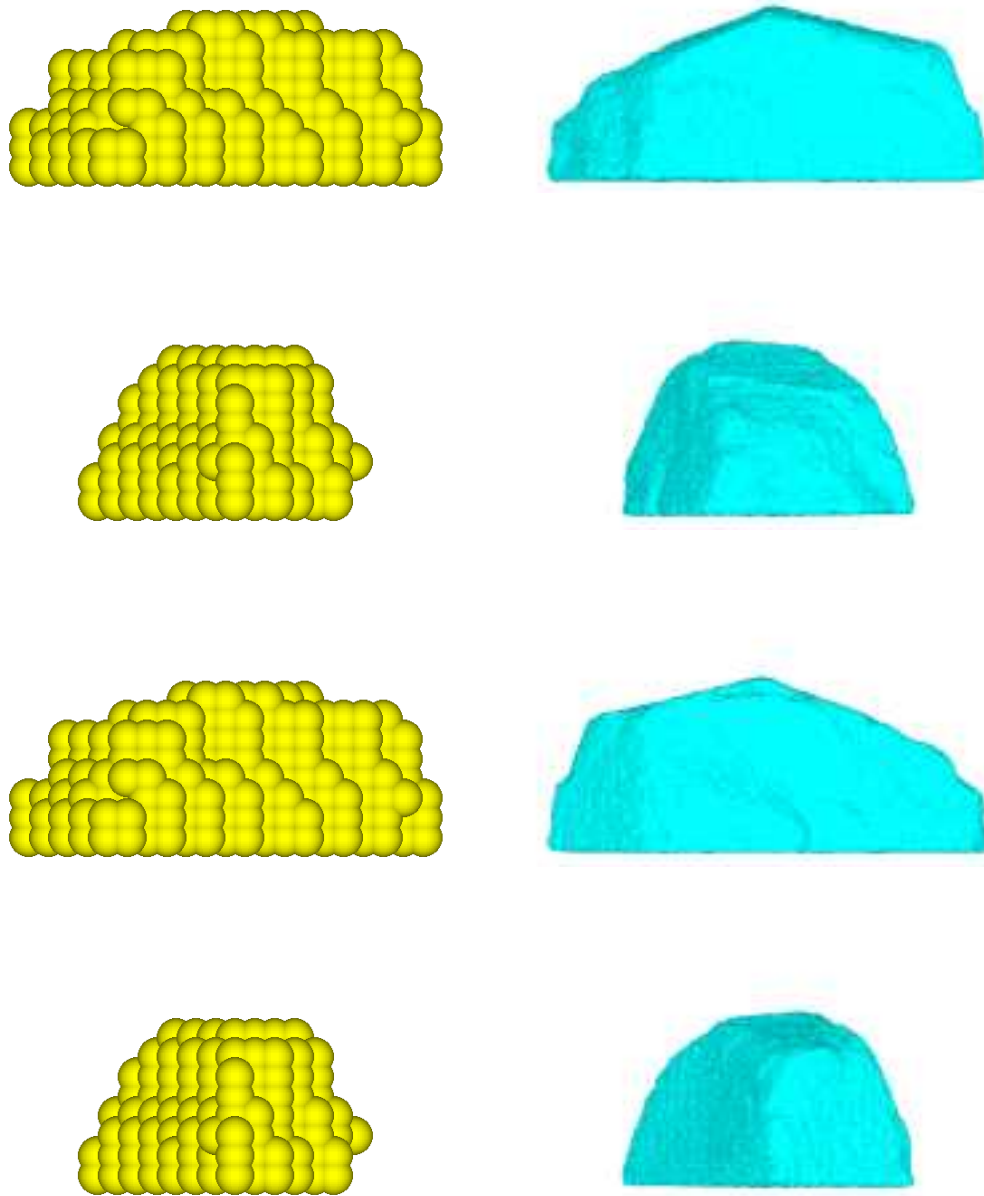


図 10.3.8 板状 40cm の形状(左 : MPM、右 : レーザープロファイル)

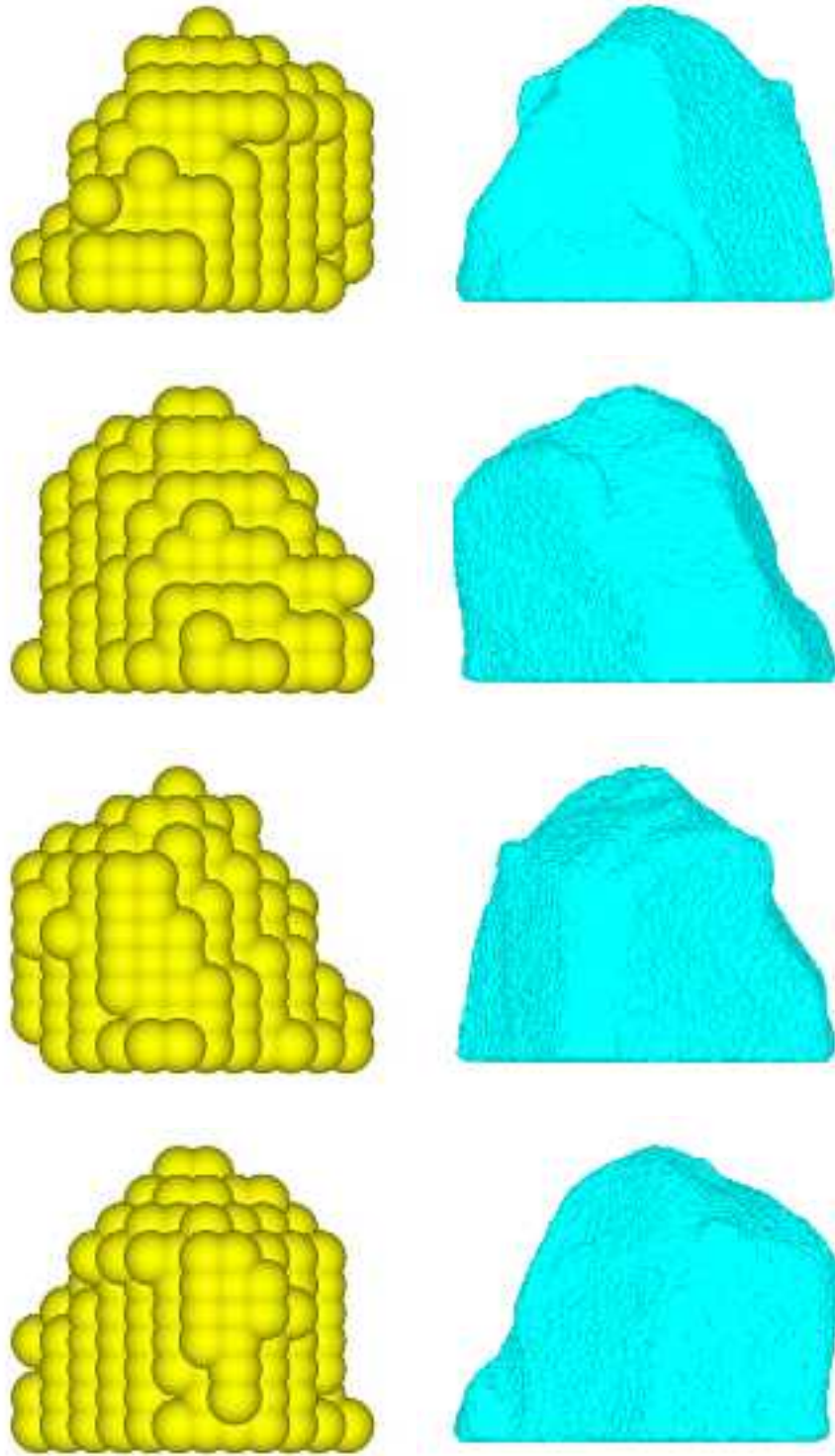


図 10.3.9 塊状 20cm の形状(左 : MPM、右 : レーザープロファイル)

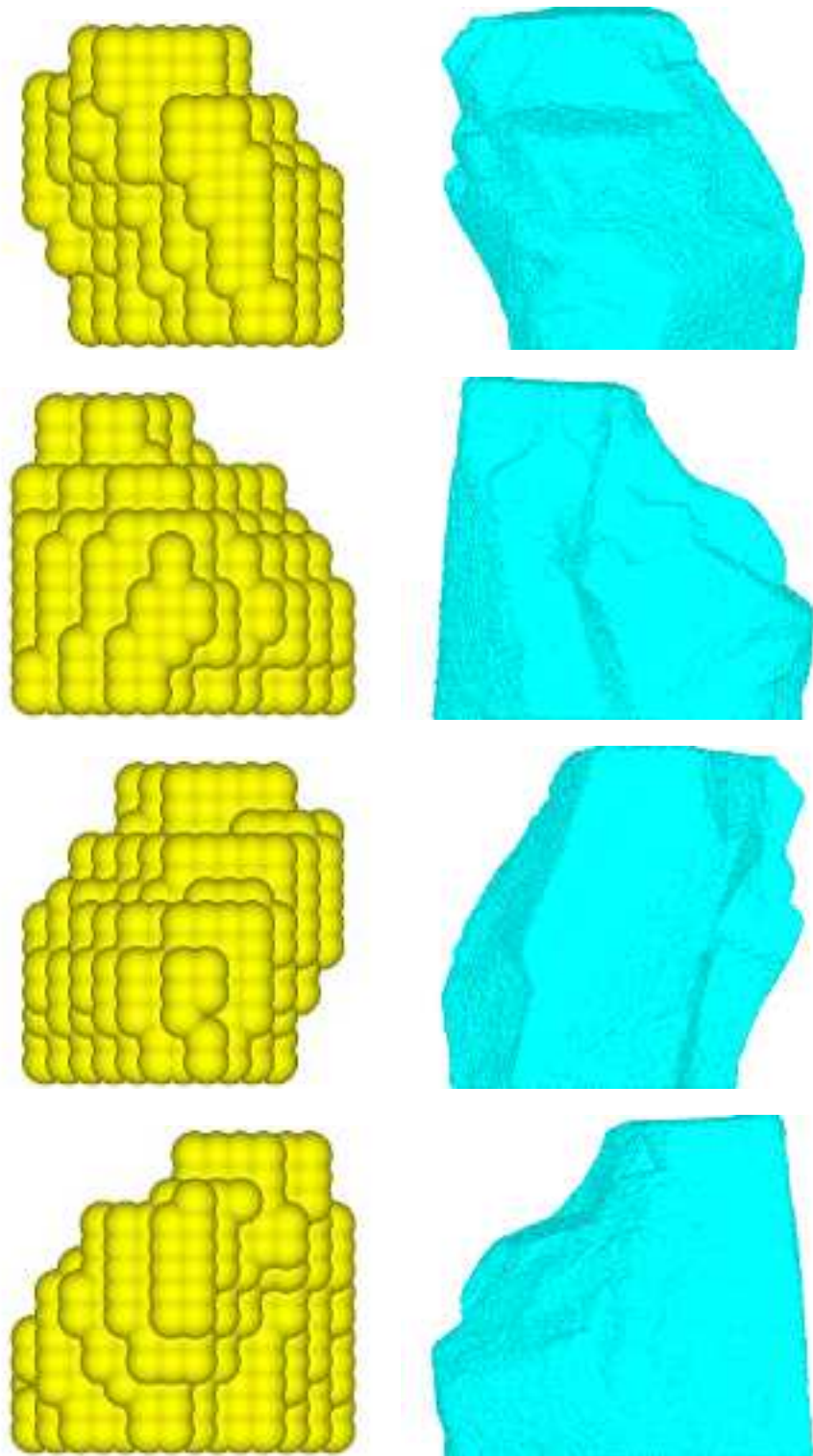


図 10.3.10 塊状 40cm の形状(左 : MPM、右 : レーザープロファイル)



以下にシミュレーションの初期状態時の断面図と、変位、速度、加速度、応力-ひずみ関係出力用のデータを出力する位置を示す。出力位置は岩塊中央部の上端、中心、下端の計3か所に設定した(赤点)。

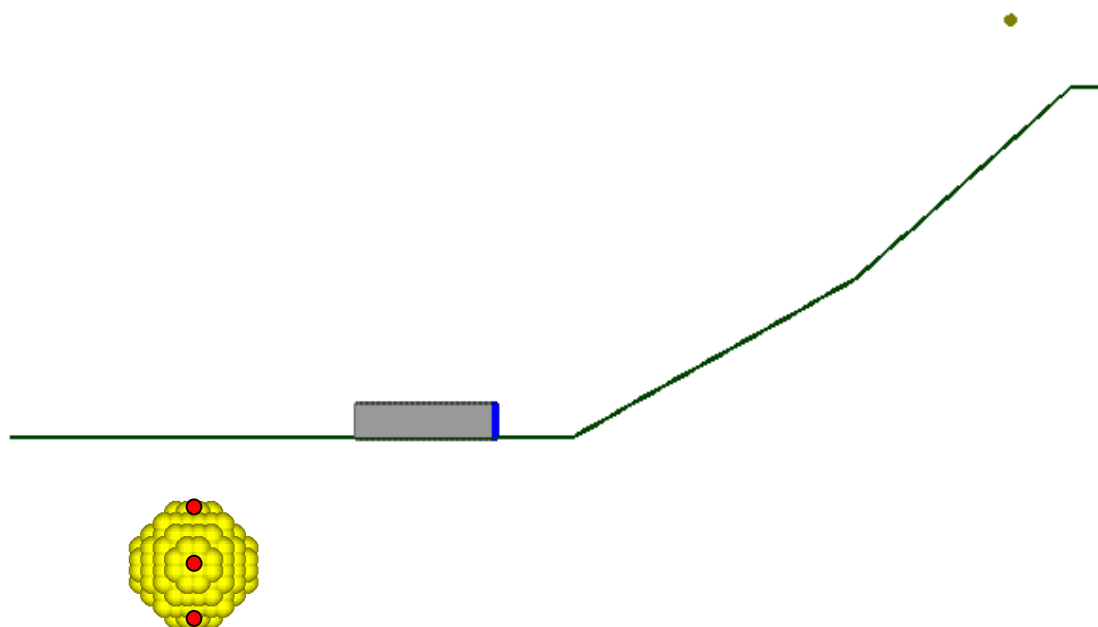


図 10.3.11 初期状態と粒子出力位置(球形 20cm)

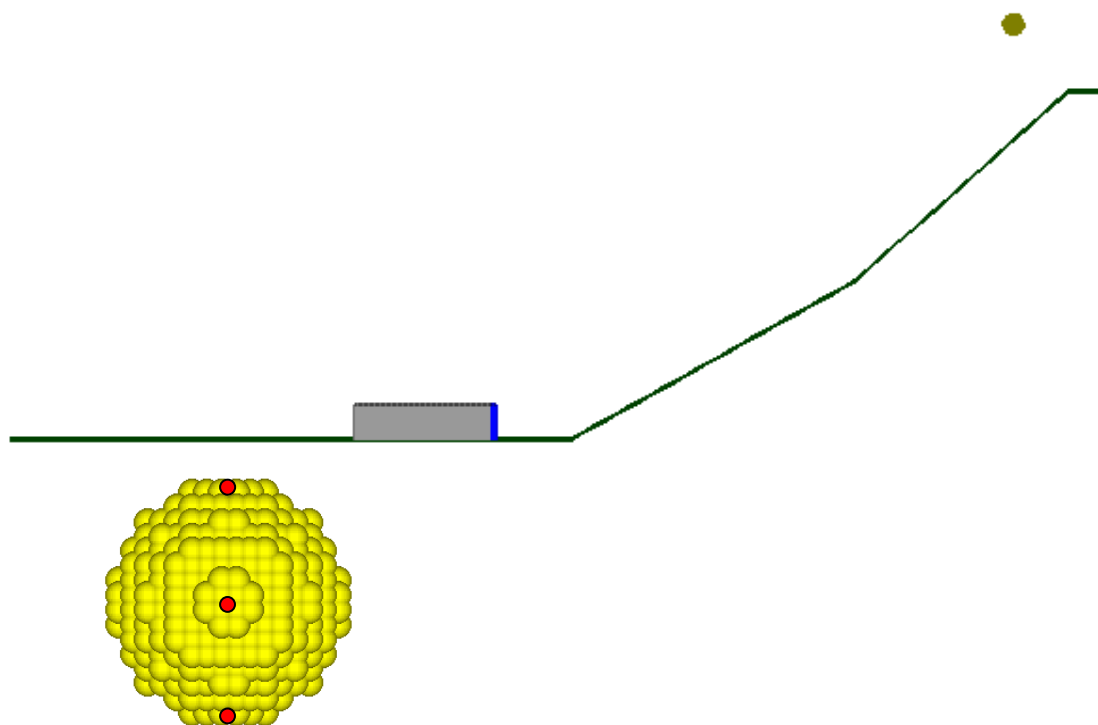


図 10.3.12 初期状態と粒子出力位置(球形 40cm)

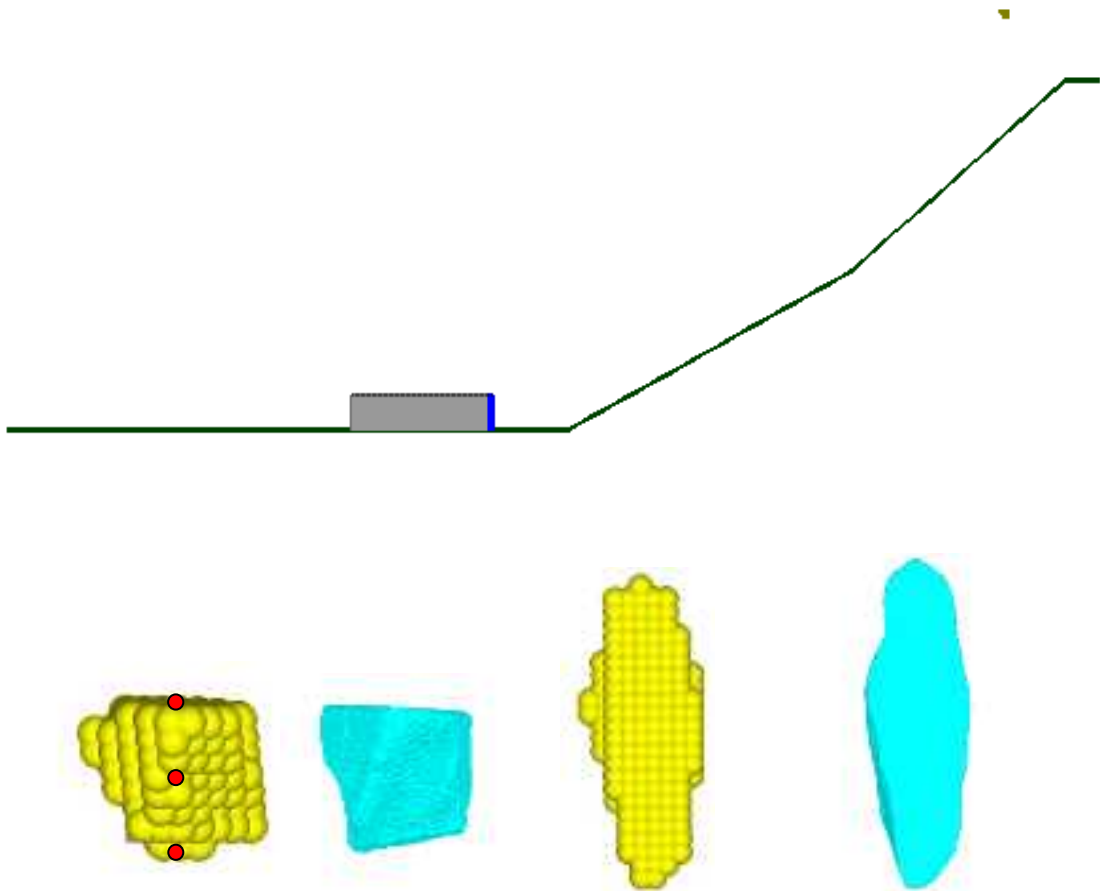


図 10.3.13 初期状態と粒子出力位置(板状 20cm)  
 下図左：手前から見た岩塊形状、下図：上から見た岩塊形状  
 (黄色：MPM,水色：レーザープロファイル)

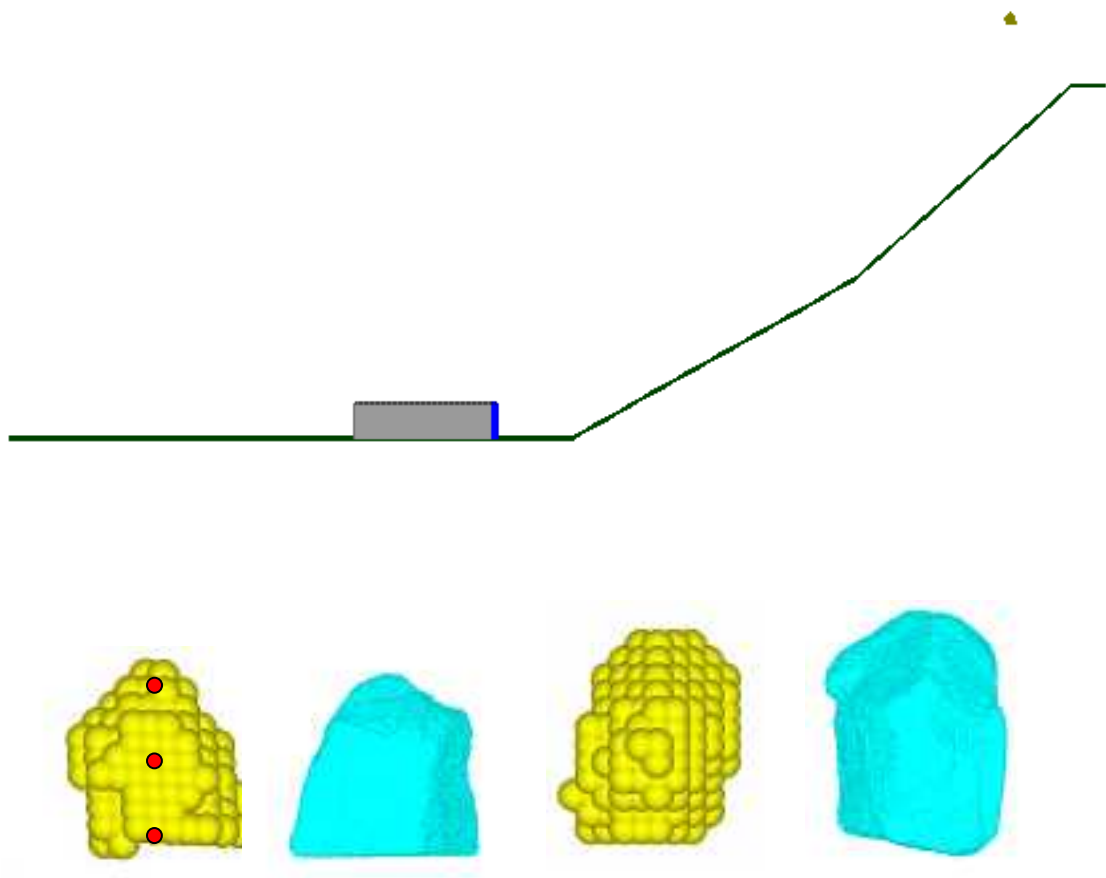


図 10.3.14 初期状態と粒子出力位置(塊状 20cm)  
 下図左：手前から見た岩塊形状、下図：上から見た岩塊形状  
 (黄色：MPM,水色：レーザープロファイル)

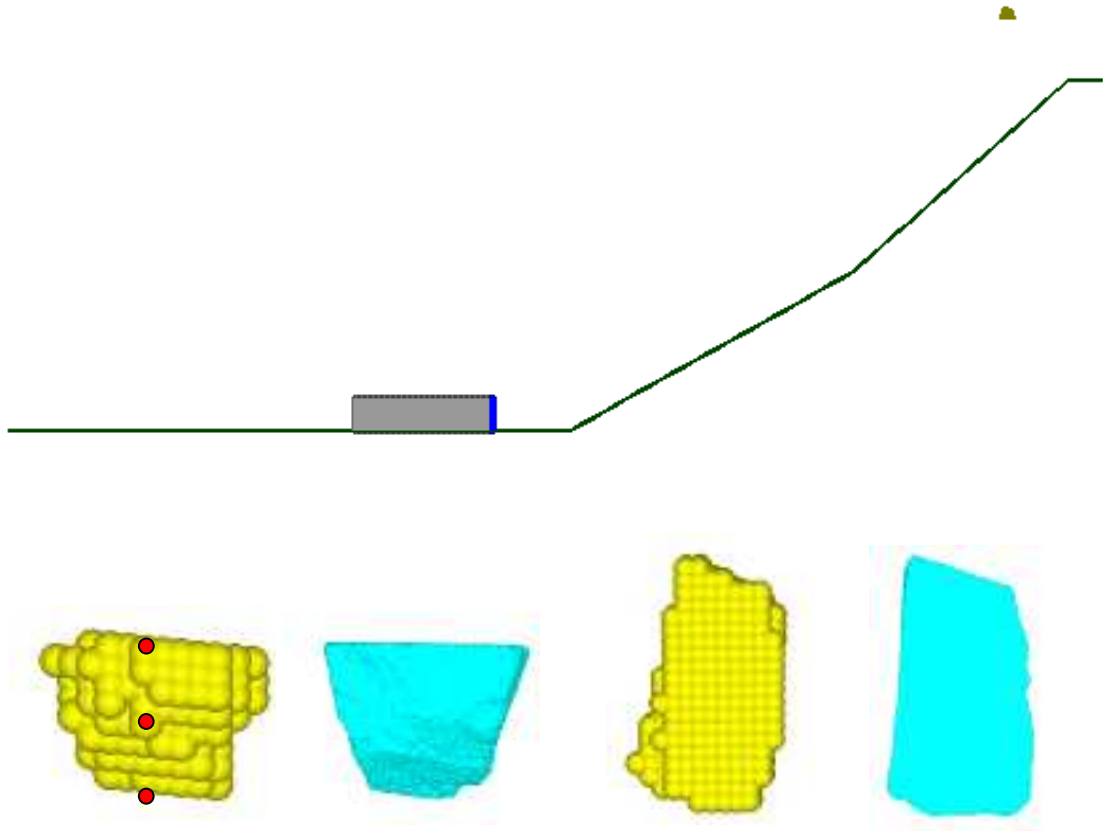


図 10.3.15 初期状態と粒子出力位置(板状 40cm)  
 下図左：手前から見た岩塊形状、下図：上から見た岩塊形状  
 (黄色：MPM,水色：レーザープロファイル)

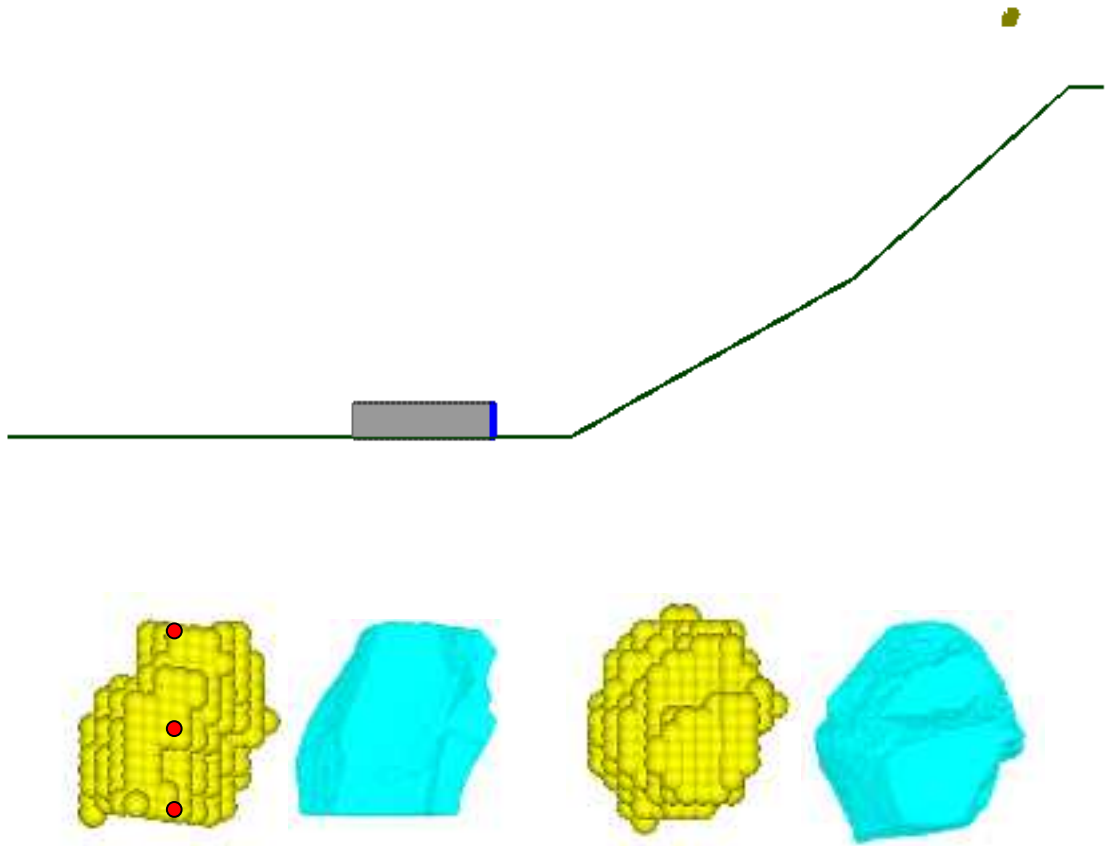


図 10.3.16 初期状態と粒子出力位置(塊状 40m)  
 下図左：手前から見た岩塊形状、下図：上から見た岩塊形状  
 (黄色：MPM,水色：レーザープロファイル)

反力壁は格子あたりの粒子数を  $2 \times 2 \times 2$  と設定した。衝突面(青)は鉄材、それ以外(灰色)はコンクリートとしてモデル化を行った。

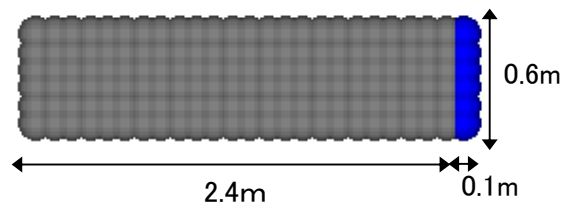


図 10.3.17 反力壁形状

(5) 跳ね返り試験のシミュレーション

検証解析に用いる減衰定数  $\beta s$  は、岩塊の跳ね返り試験のシミュレーションに基づき決定した。岩塊はあらかじめ下図のような跳ね返り試験をシミュレーションし、最も再現性の良い  $\beta s$  および計算が安定する時間間隔を決定した。

岩塊形状は検証解析に用いるものと同様とした。背面格子条件は格子幅 0.2m 粒子数は 20cm 級は  $8 \times 8 \times 8$ 、40cm 級は  $10 \times 10 \times 10$  で設定した。境界条件では、底面の格子位置の摩擦角を、岩塊無地の摩擦係数試験結果に基づき  $32.0^\circ$  (摩擦係数 0.626 相当)、拘束条件は自由として跳ね返り試験の底板部を再現した。

試験結果の跳ね返り係数  $e$  は以下の式から求められる。

$$e = \sqrt{\frac{H'}{H}}$$

ここで、

H : 初期高さ

H' : 跳ね返り高さ

である。シミュレーションでは岩塊中心に最も近い粒子の鉛直方向 (Z 方向) 変位を出力し、変位最小値(跳ね返り時)と跳ね返り後の変位との差を跳ね返り高さとして算出した。

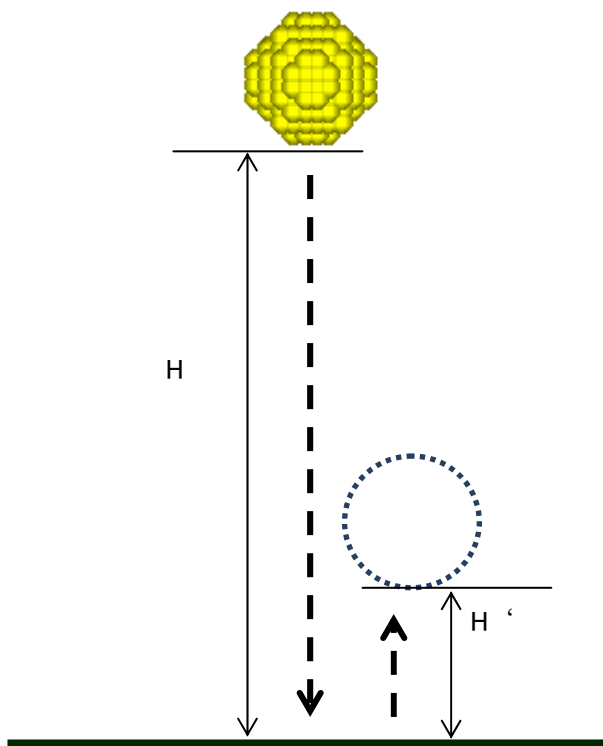


図 10.3.18 跳ね返り試験シミュレーション(CASE1 球形 20cm)

以下に各岩塊の実験値とシミュレーション結果を示す。

表 10.3.7 実験値とシミュレーション結果一覧

ケース	模型材料	落下高さ	実験結果		MPM シミュレーション結果	
			跳ね返り係数	跳ね返り高さ	減衰定数 $\beta s$	跳ね返り高さ
1	球形 20cm	1.0	0.343	0.118	2.1E-03	0.1194
	球形 40cm	1.0	0.151	0.023	6.8E-03	0.0226
2	板状 20cm	1.0	0.121	0.015	4.8E-03	0.0150
	板状 40cm	0.5	0.118	0.007	3.5E-03	0.0068
3	塊状 20cm	1.0	0.187	0.035	4.1E-03	0.0346
	塊状 40cm	0.5	0.000	0.000	5.0E-03	0.0056

以下に各岩塊の跳ね返りシミュレーションの結果を示す。 $\beta$ の値を変化させた場合の跳ね返り高さ(粒子のZ方向変位量)を時刻歴としたものを図示した。球 20cm 以外の岩塊は 1 回目の着地時の中心高さと 2 回目以降の着地時中心高さに差が生じている。これは跳ね返りの最中に岩塊自体に傾きが生じるためである。

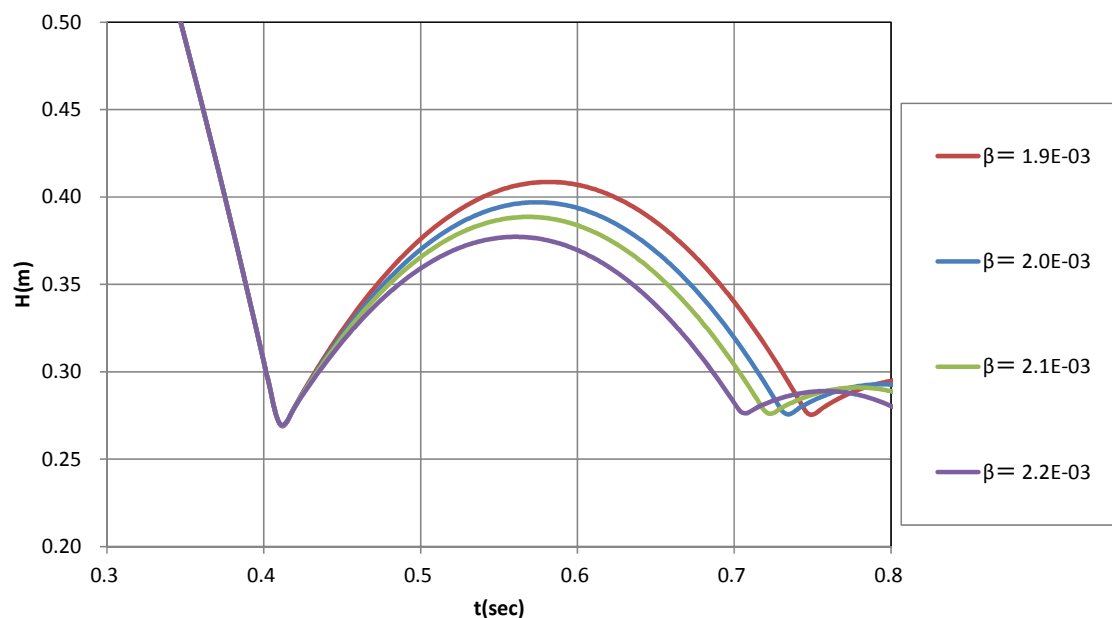


図 10.3.19 CASE1 球形 20cm 跳ね返り結果

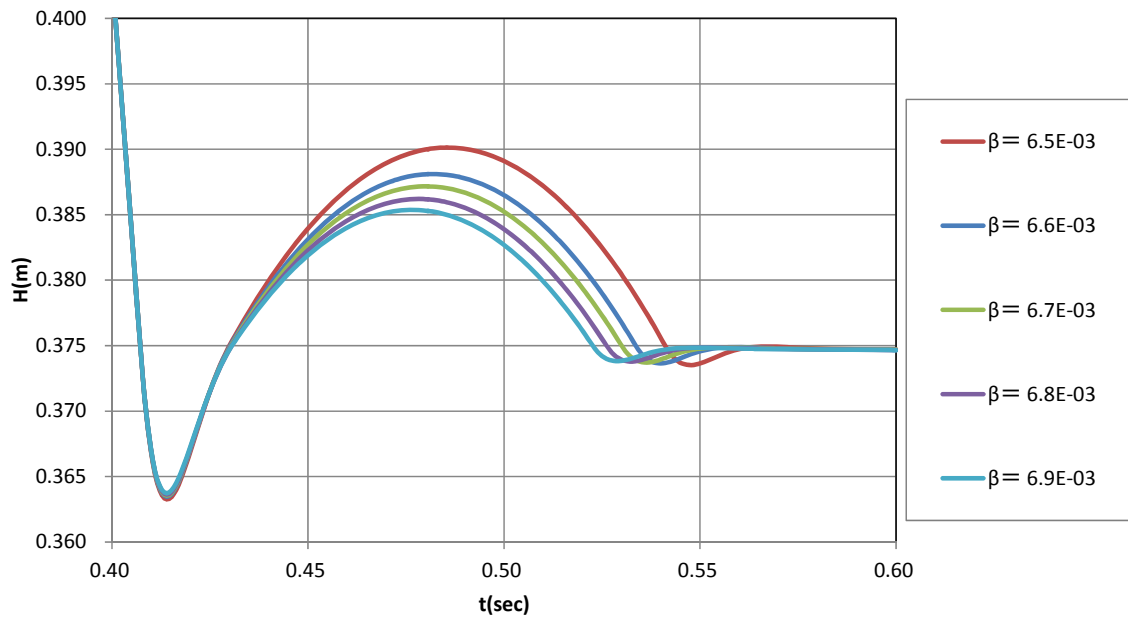


図 10.3.20 CASE1 球形 40cm 跳ね返り結果

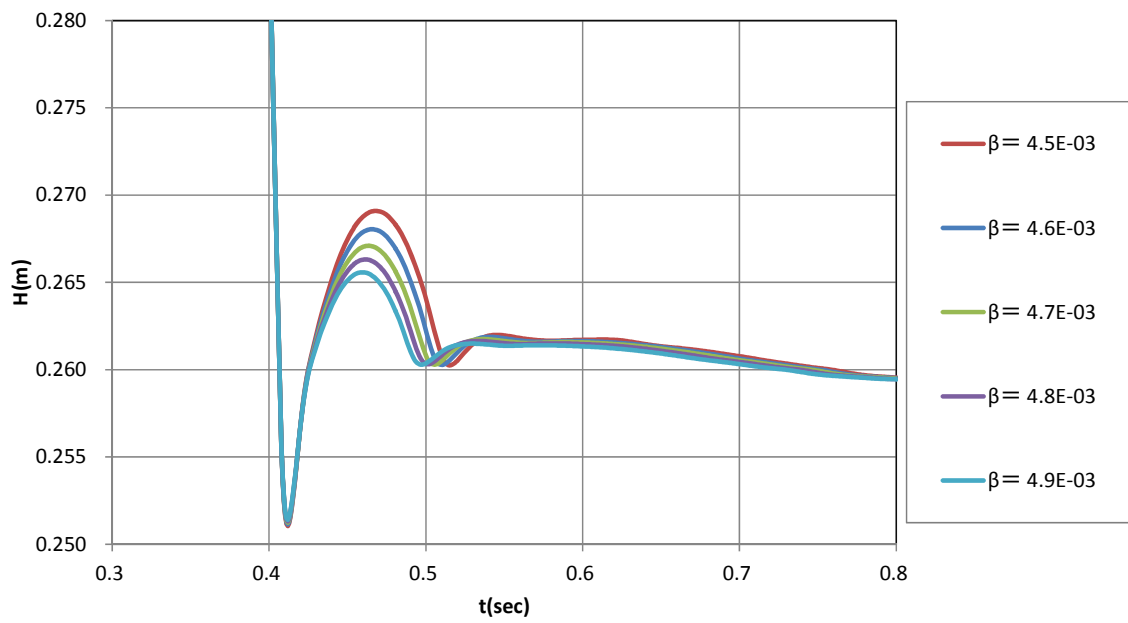


図 10.3.21 CASE2 板状 20cm 跳ね返り結果



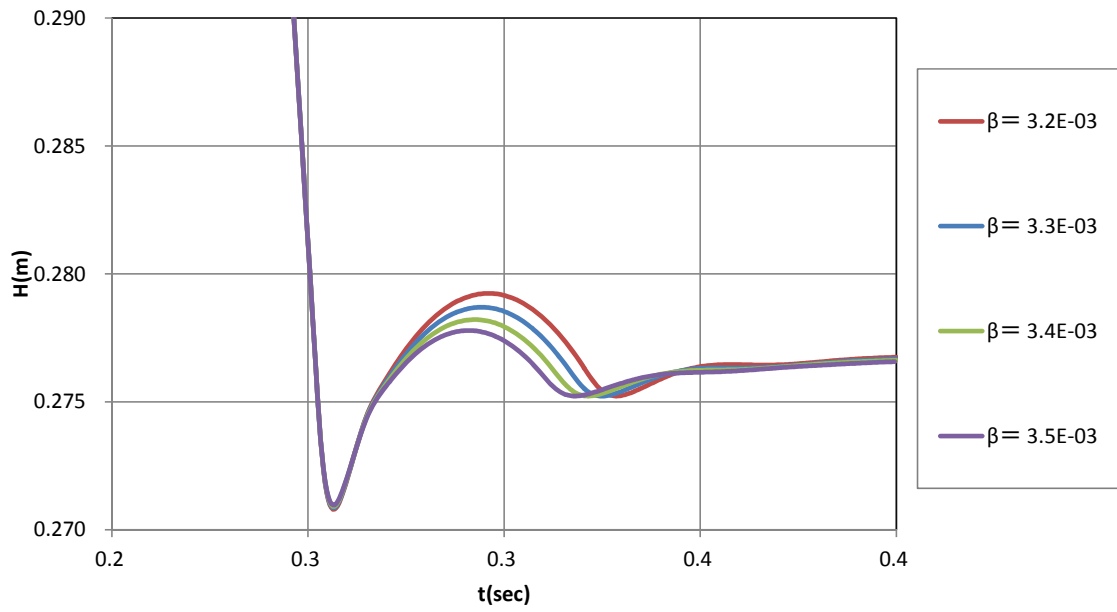


図 10.3.22 CASE2 板状 40cm 跳ね返り結果

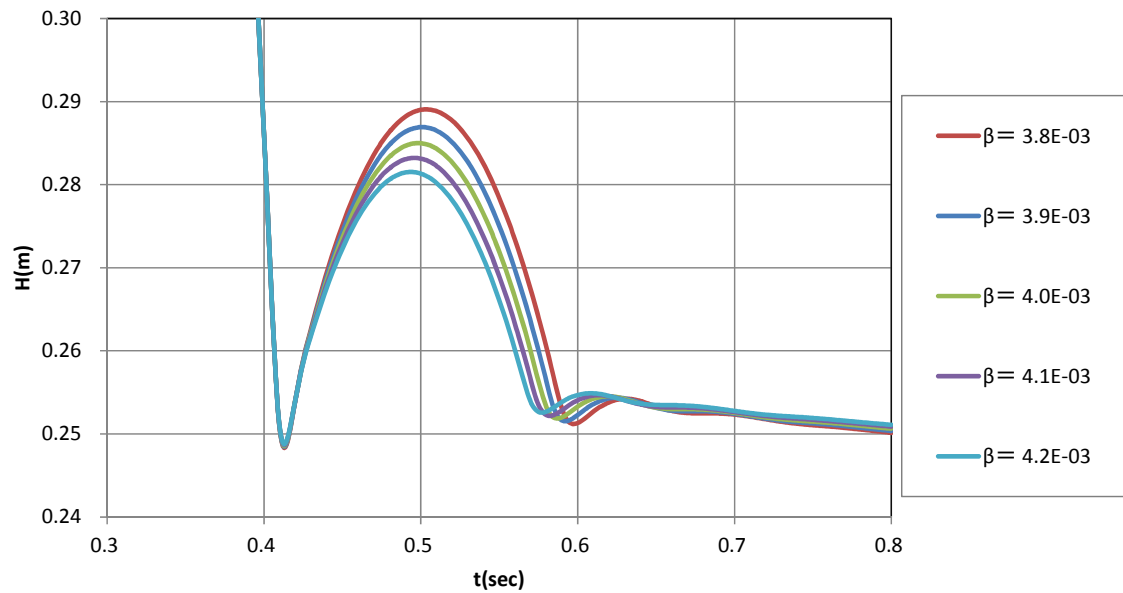


図 10.3.23 CASE3 塊状 20cm 跳ね返り結果

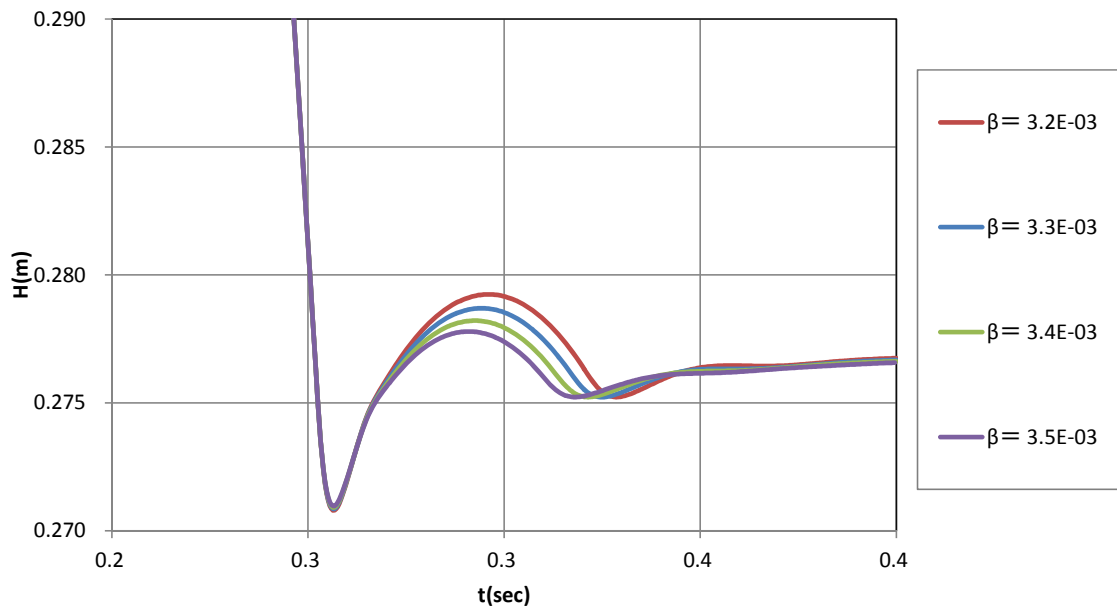


図 10.3.24 CASE3 塊状 40cm 跳ね返り結果

(6) 解析結果出力

解析結果出力項目の説明を以下に示す。

・変形図

流路模型を横から見た様子と真上から見た様子を 0.4 秒間隔で出力し、転動の様子を示した。

・時刻歴結果

(a) 岩塊の転動距離の時刻歴

岩塊中の 3 粒子(中心、上端、下端)の変位を、流下方向(X 方向)、流下直角方向(Y 方向)、上下方向(Z 方向)の 3 方向の時刻歴として示した。

(b) 岩塊の回転量の時刻歴

岩塊の中心に位置する粒子を基準とし、岩塊の上端に位置する粒子を対象点として、Y-Z 平面、X-Z 平面、X-Y 平面での角度および対象点の軌跡を求めた (図 10.3.25)。

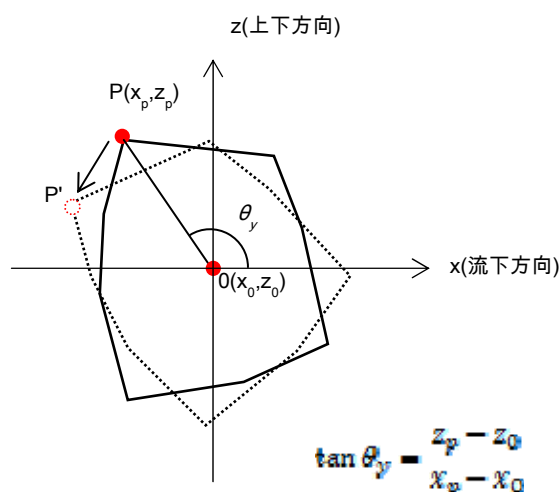


図 10.3.25 X-Z 平面における岩塊の回転角( $\theta_y$ )と軌跡(P-P')

(c) 岩塊の反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

反力壁の運動量を該当する粒子の速度と質量から求め、運動量の時間変化率を岩塊が衝突した際の反力壁の衝撃力とした。

(7) 壁有ケースにおける解析結果 (変形図)

• CASE1 球形 20cm

time = 4.00000E-02sec

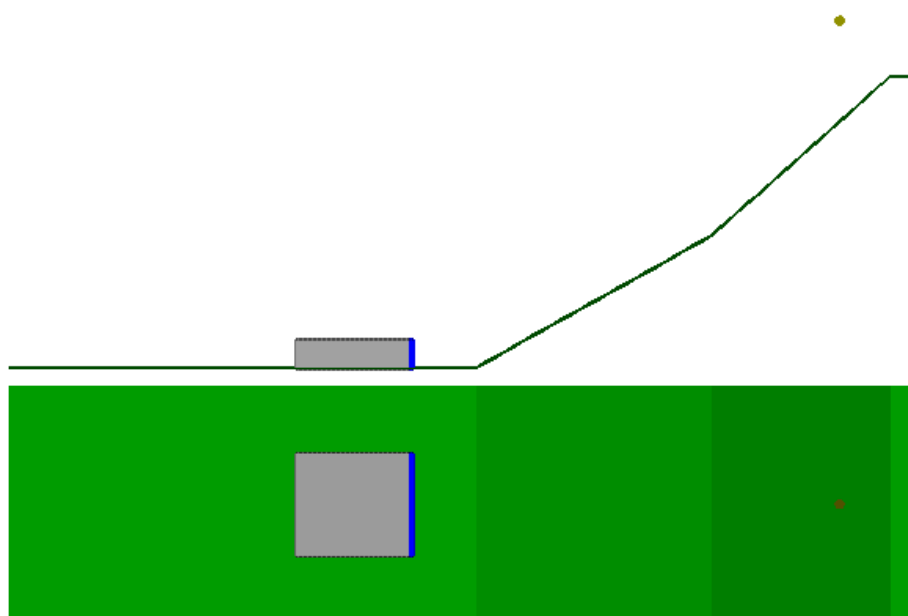


図 10.3.26 変形図(0.0sec)

time = 4.00000E-01sec

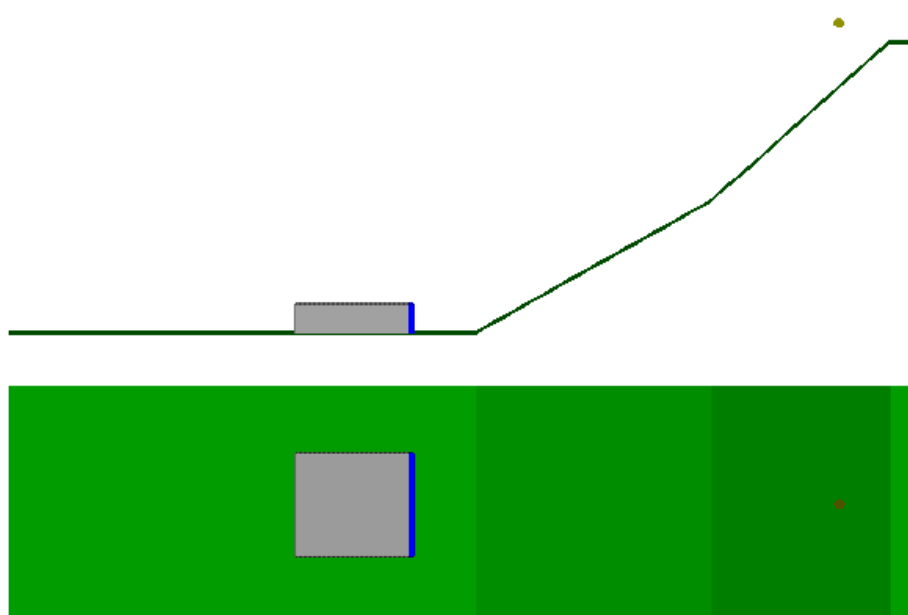


図 10.3.27 変形図(0.4sec)

time = 8.00000E-01sec

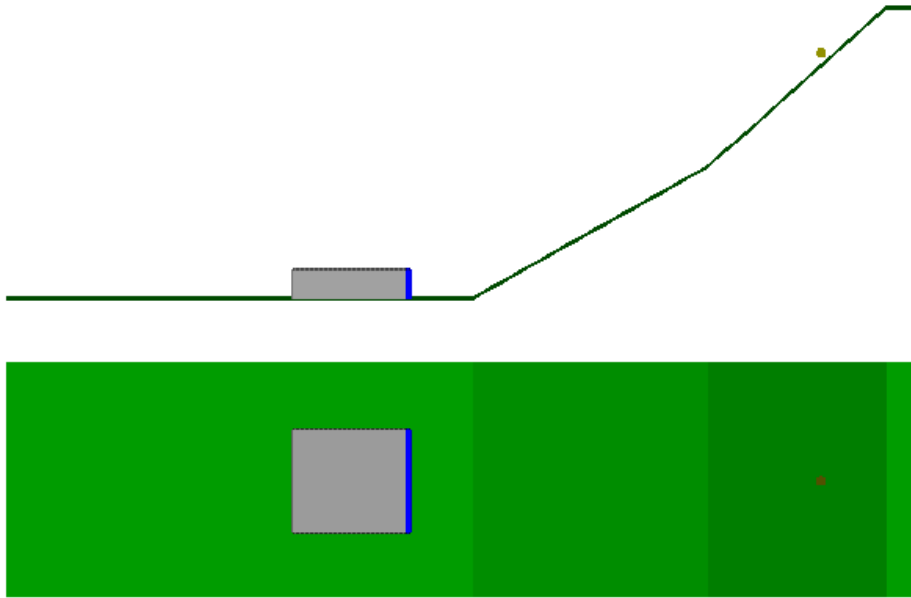


图 10.3.28 变形图(0.8sec)

time = 1.20000E+00sec

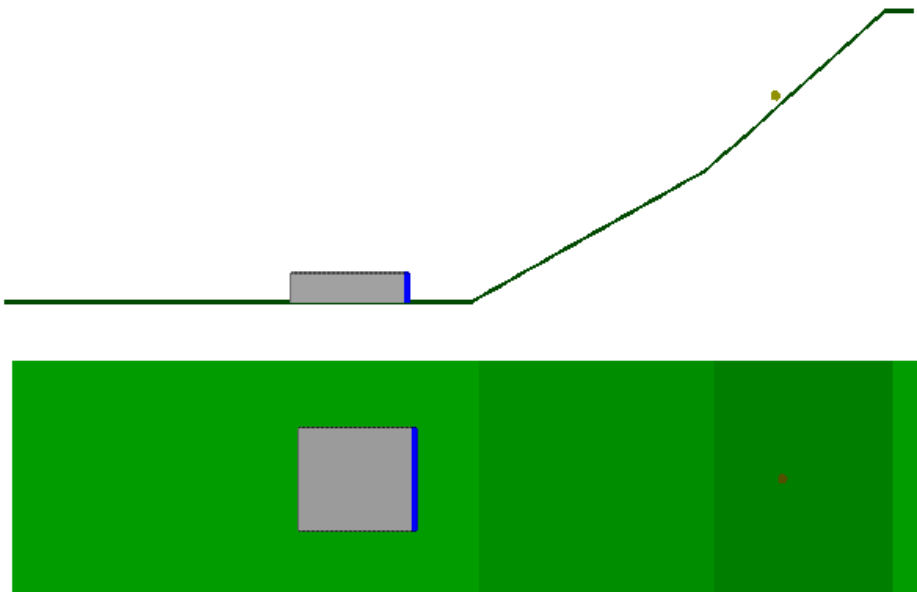


图 10.3.29 变形图(1.2sec)

time = 1.60000E+00sec

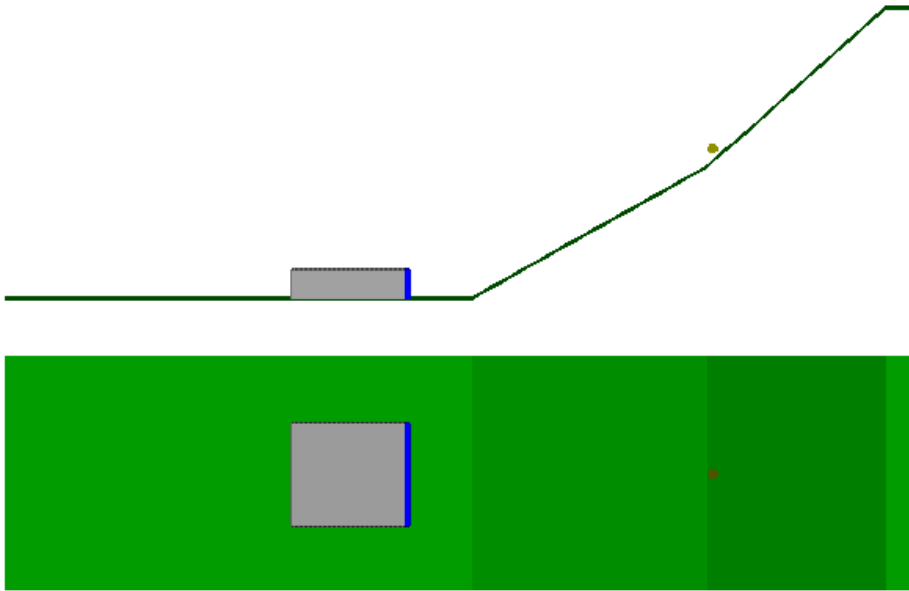


图 10.3.30 变形图(1.6sec)

time = 2.00000E+00sec

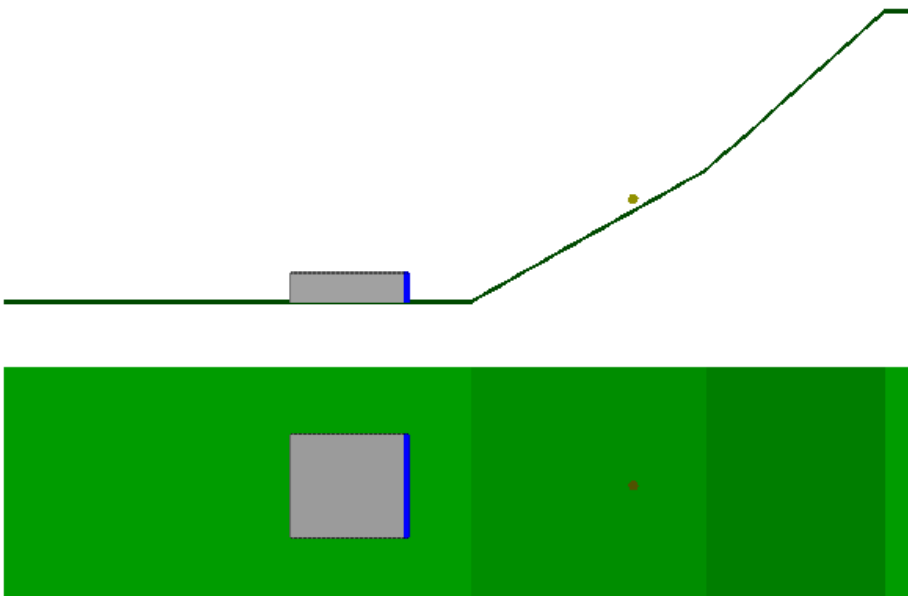


图 10.3.31 变形图(2.0sec)

time = 2.40000E+00sec

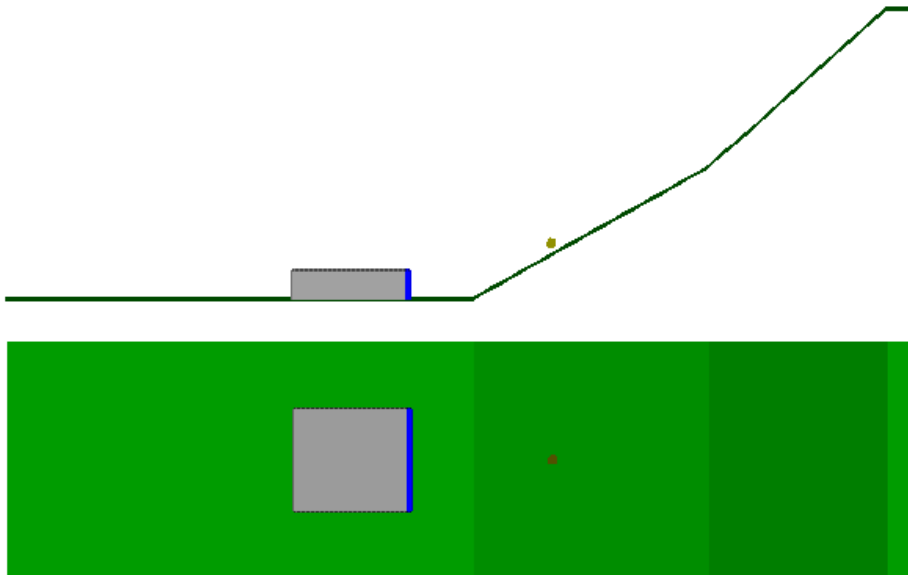


图 10.3.32 变形图(2.4sec)

time = 2.80000E+00sec

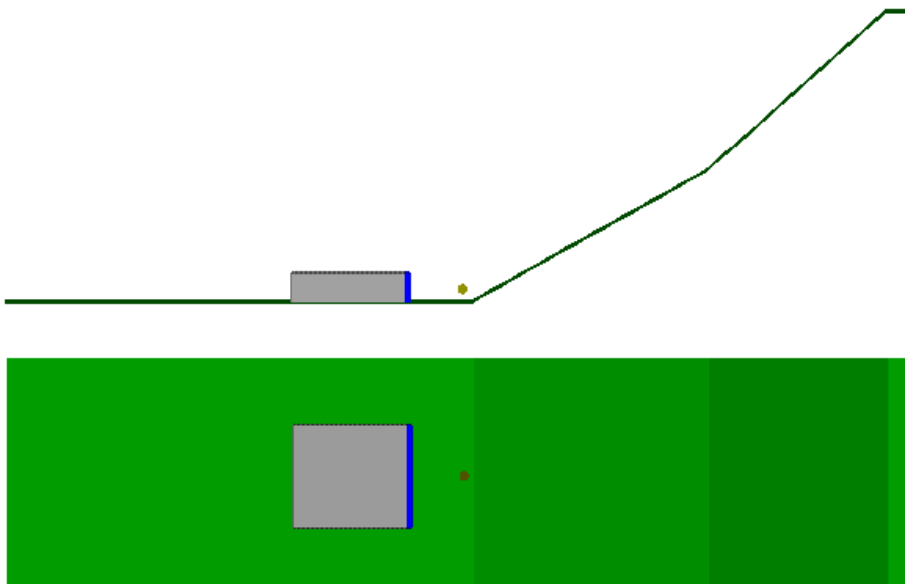


图 10.3.33 变形图(2.8sec)

time = 3.20000E+00sec

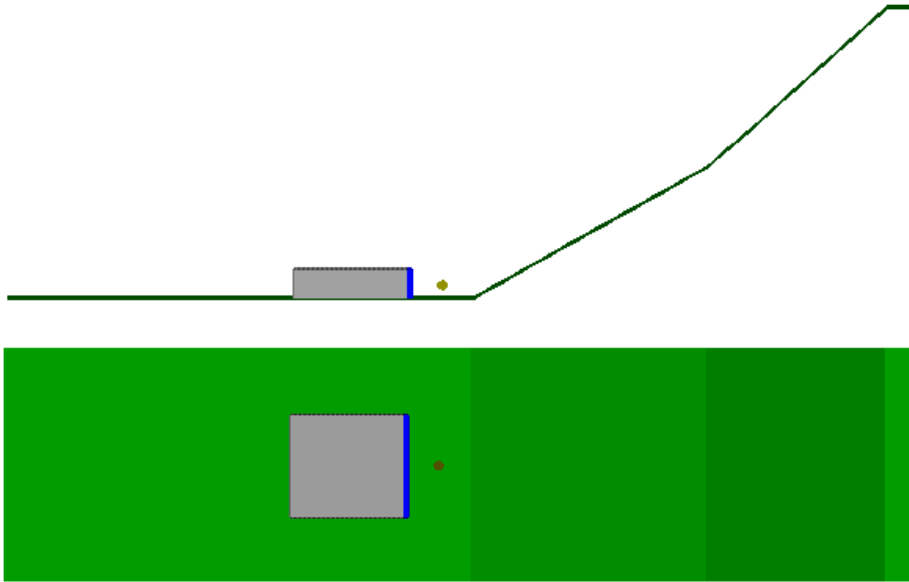


图 10.3.34 变形图(3.2sec)

time = 3.60000E+00sec

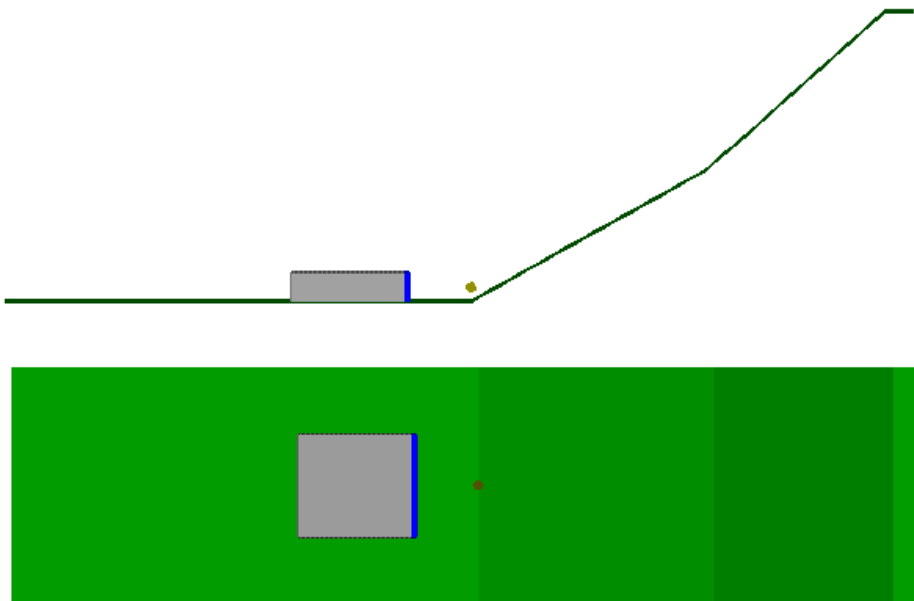


图 10.3.35 变形图(3.6sec)



time = 4.00000E+00sec

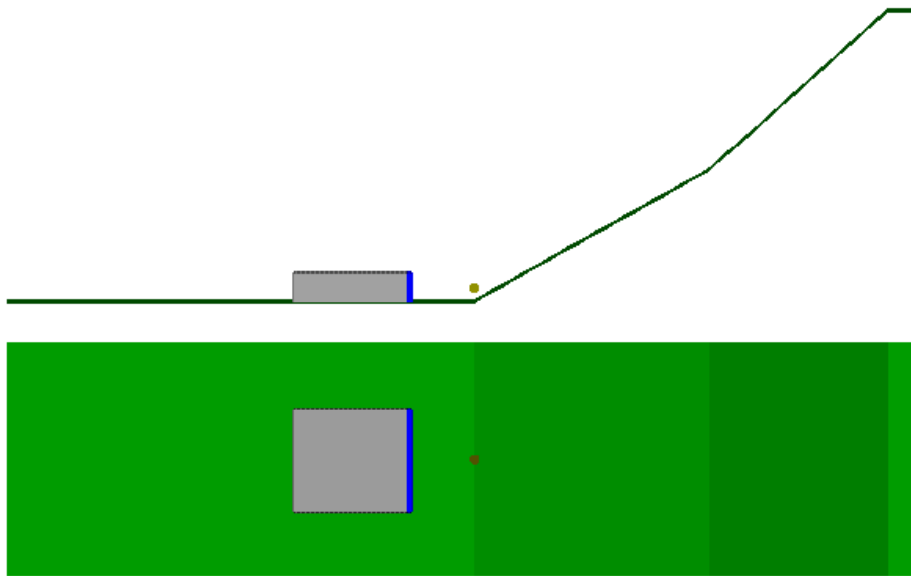


图 10.3.36 变形图(4.0sec)

• CASE1 球形 40cm

time = 4.00000E-02sec

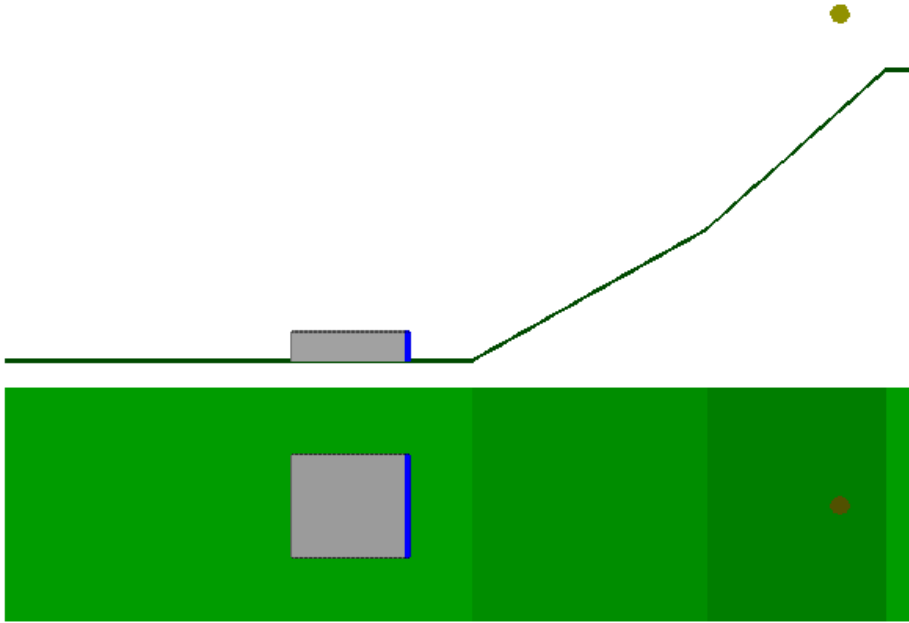


图 10.3.37 变形图(0.0sec)

time = 4.00000E-01sec

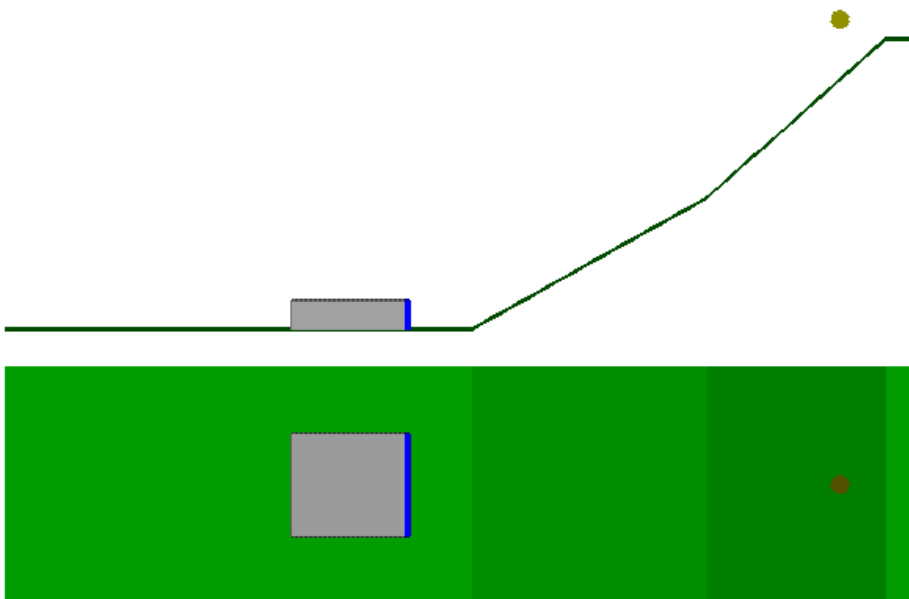


图 10.3.38 变形图(0.4sec)

time = 8.00000E-01sec

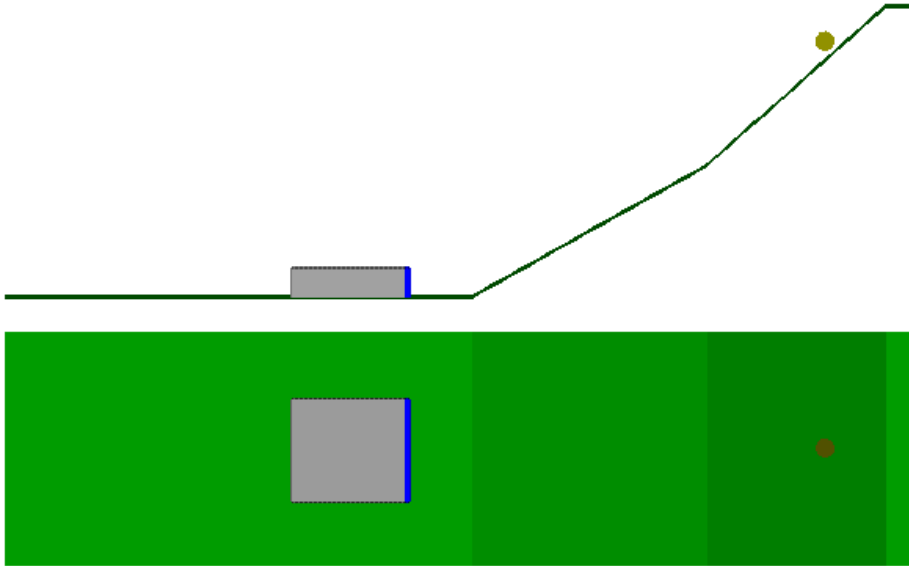


图 10.3.39 变形图(0.8sec)

time = 1.20000E+00sec

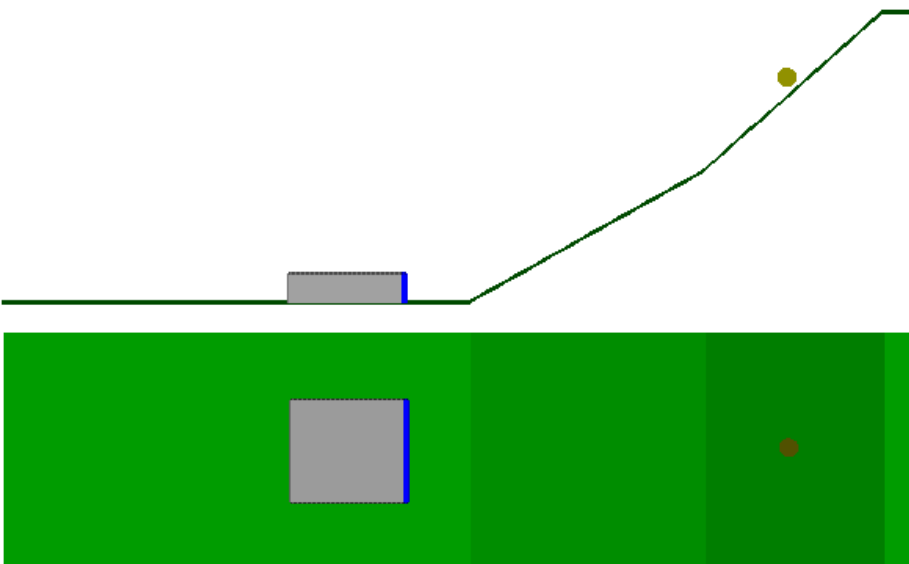


图 10.3.40 变形图(1.2sec)

time = 1.60000E+00sec

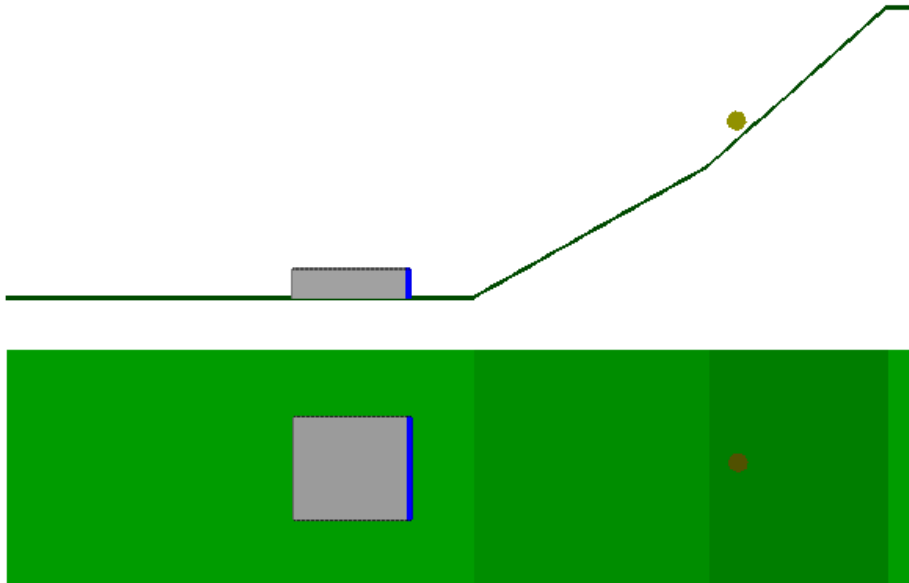


图 10.3.41 变形图(1.6sec)

time = 2.00000E+00sec

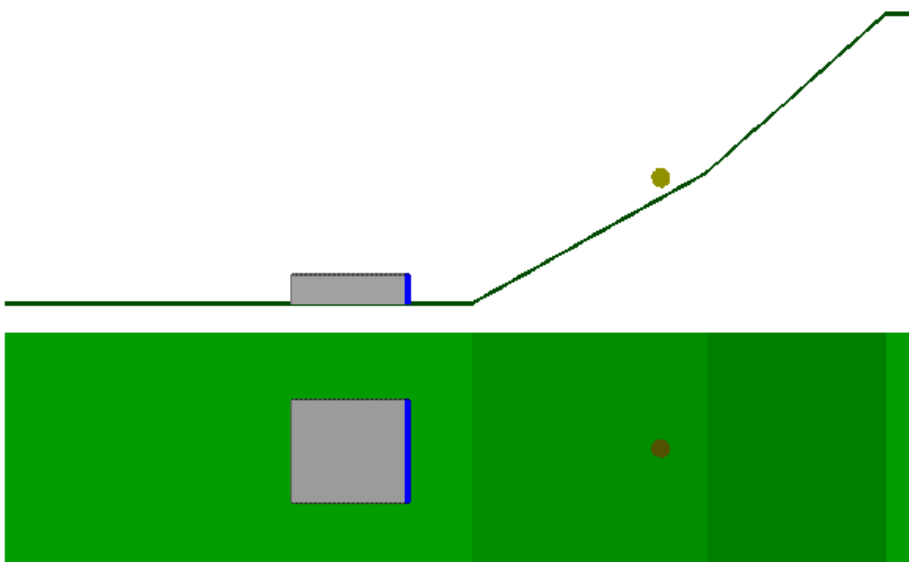


图 10.3.42 变形图(2.0sec)

time = 2.40000E+00sec

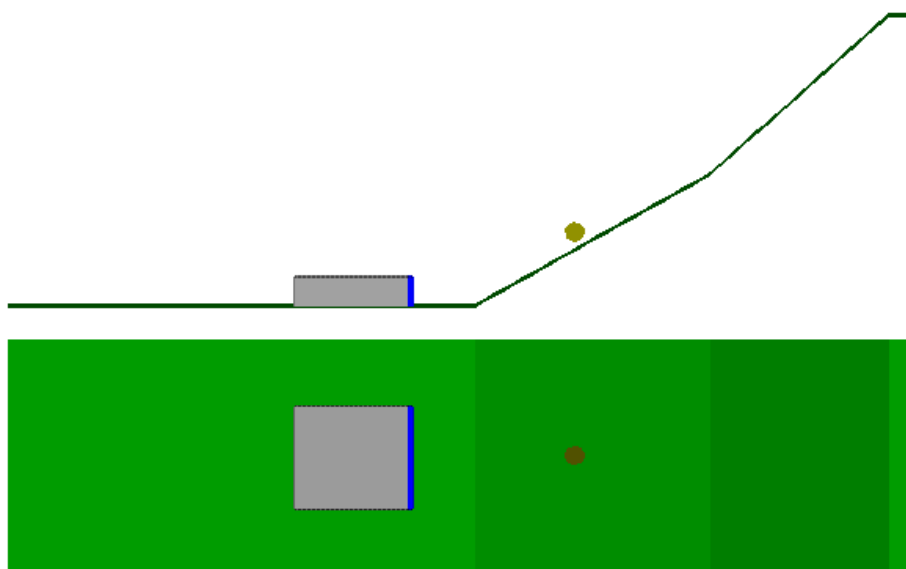


图 10.3.43 变形图(2.4sec)

time = 2.80000E+00sec

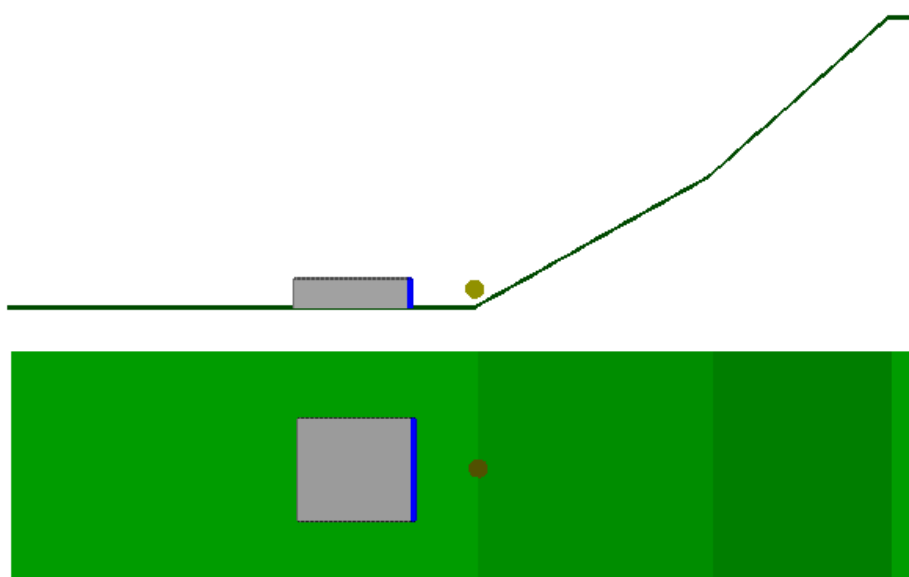


图 10.3.44 变形图(2.8sec)

time = 3.20000E+00sec

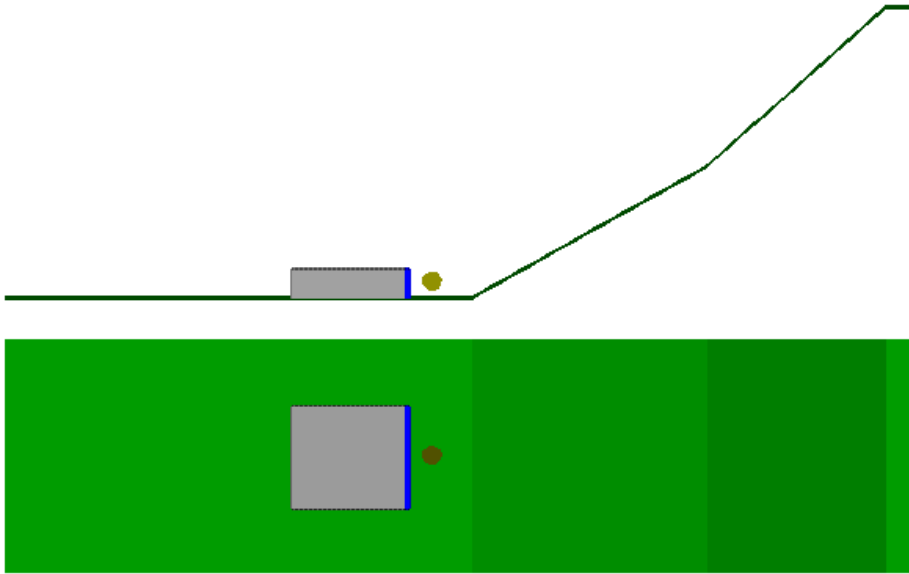


图 10.3.45 变形图(3.2sec)

time = 3.60000E+00sec

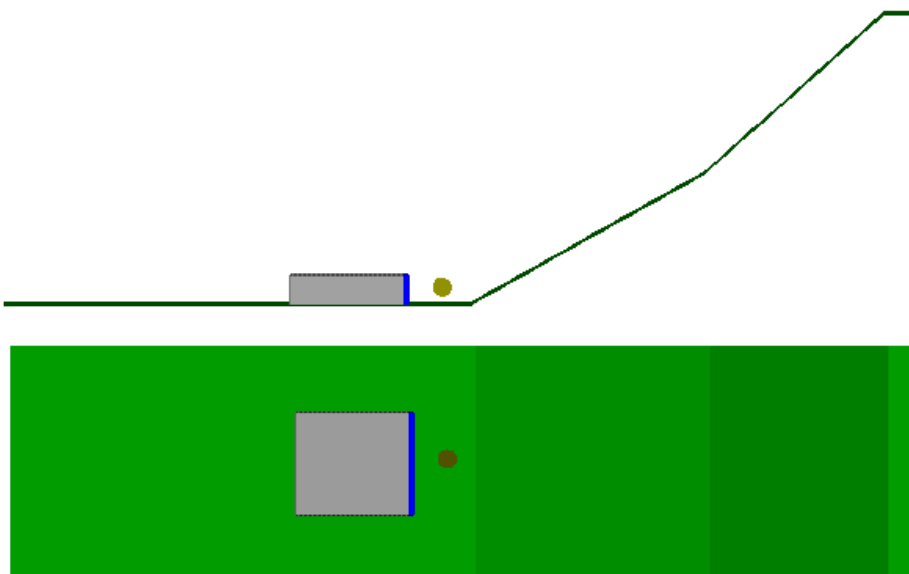


图 10.3.46 变形图(3.6sec)

time = 4.00000E+00sec

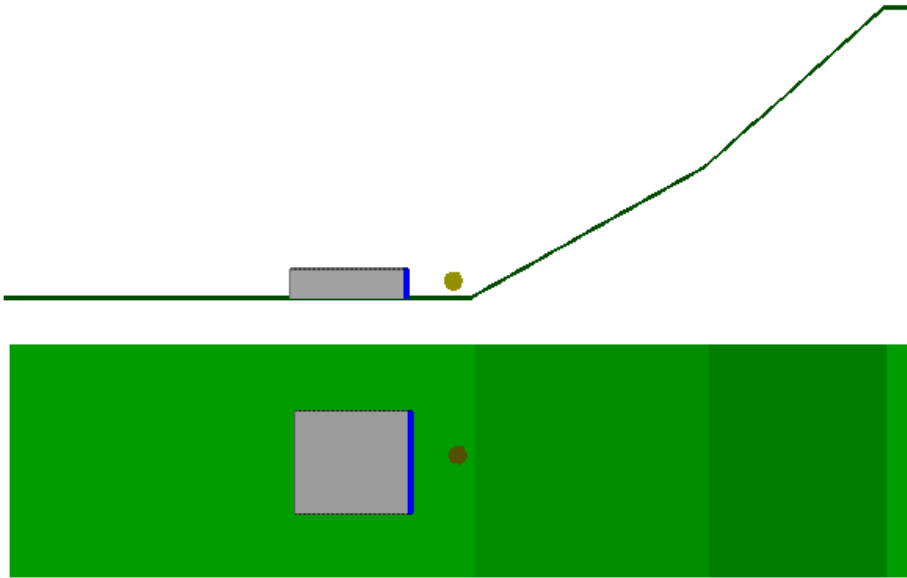


图 10.3.47 变形图(4.0sec)

• CASE2 板状 20cm

time = 4.00000E-02sec

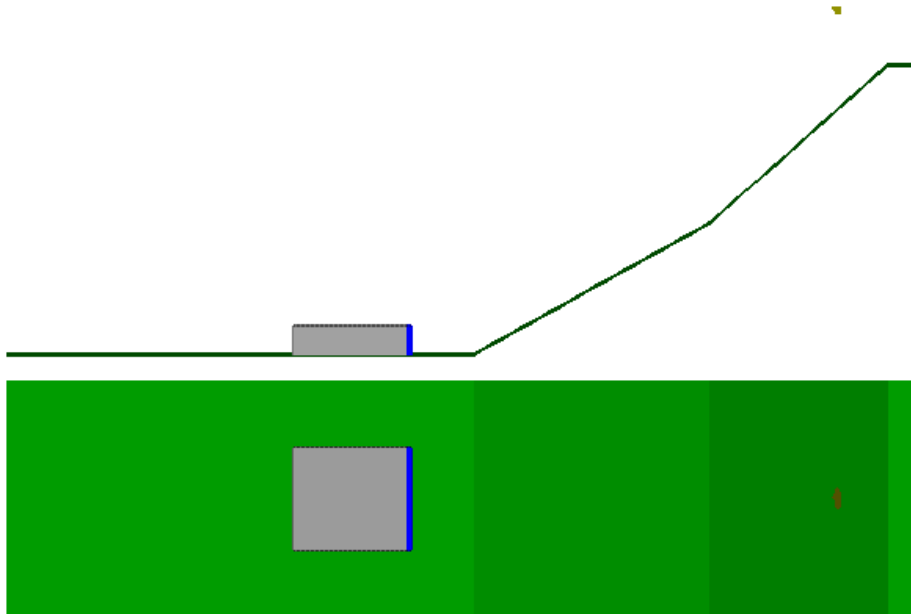


图 10.3.48 变形图(0.0sec)

time = 4.00000E-01sec

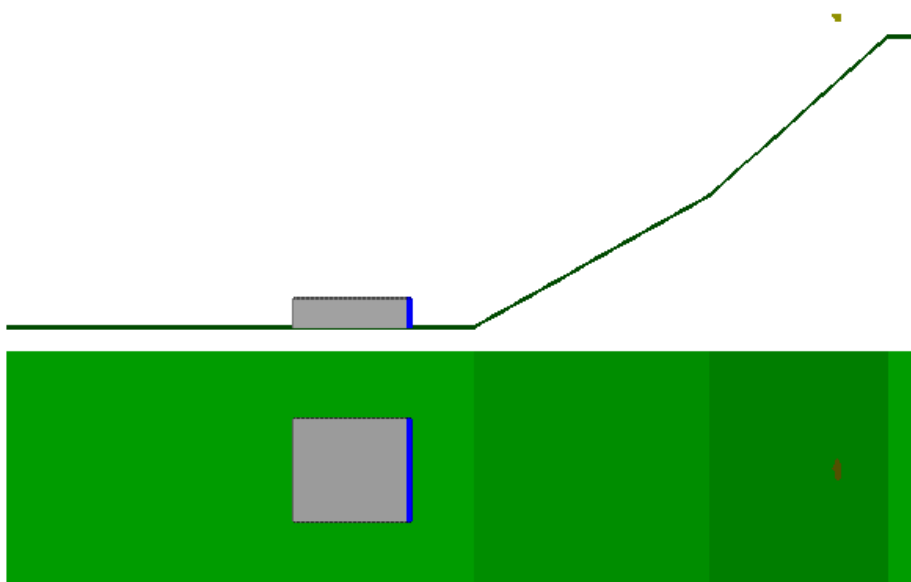


图 10.3.49 变形图(0.4sec)



time = 8.00000E-01sec

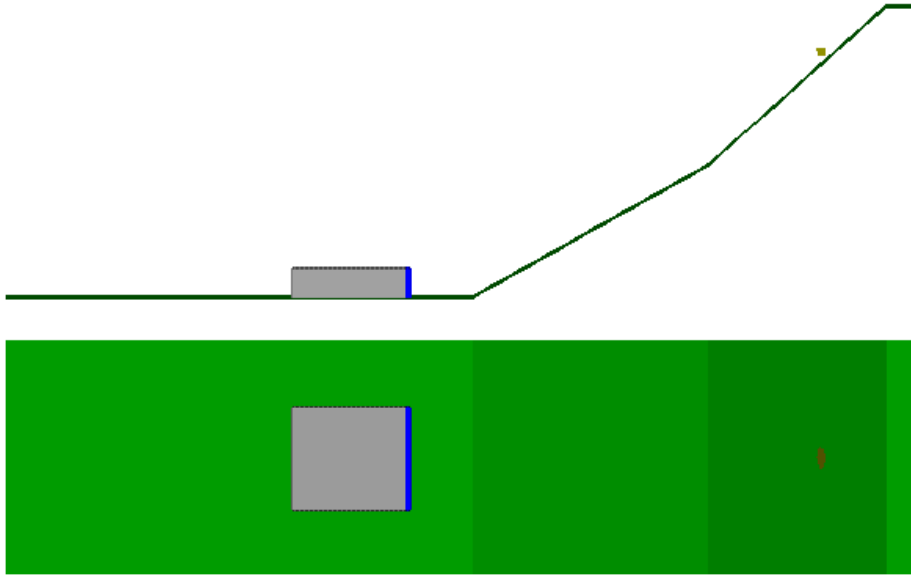


图 10.3.50 变形图(0.8sec)

time = 1.20000E+00sec

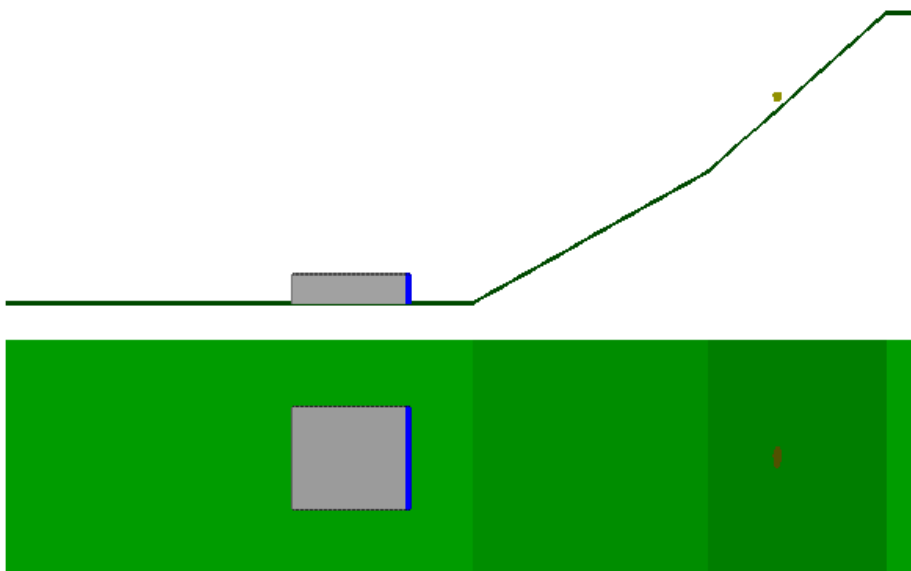


图 10.3.51 变形图(1.2sec)

time = 1.60000E+00sec

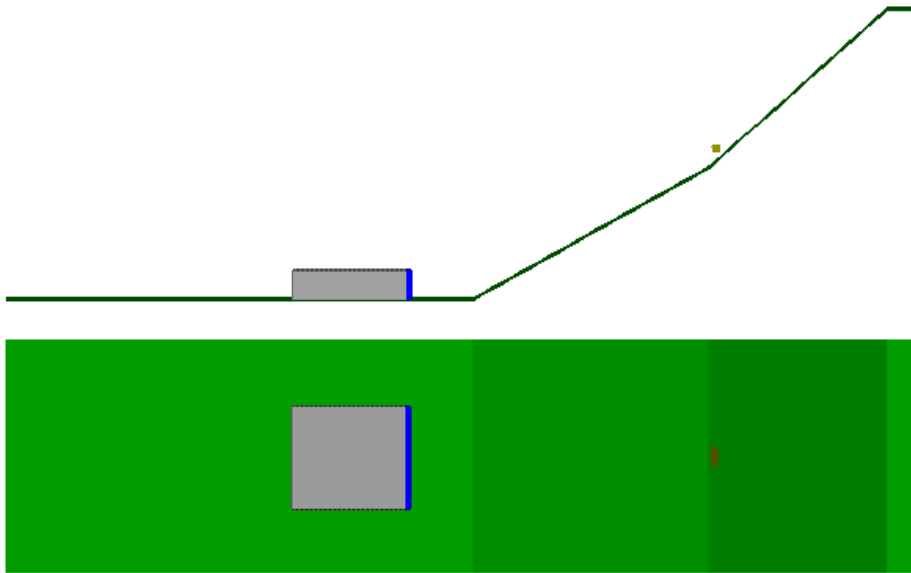


图 10.3.52 变形图(1.6sec)

time = 2.00000E+00sec

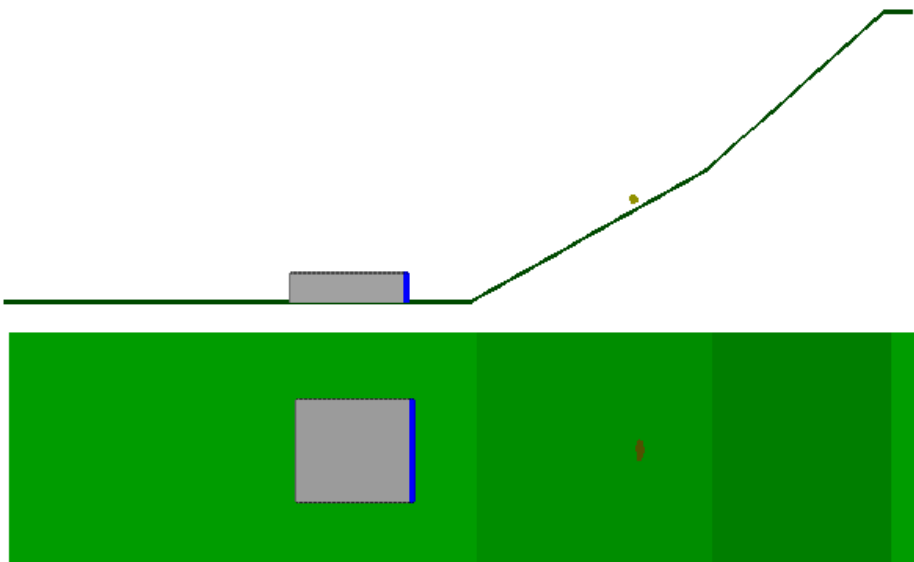


图 10.3.53 变形图(2.0sec)

time = 2.40000E+00sec

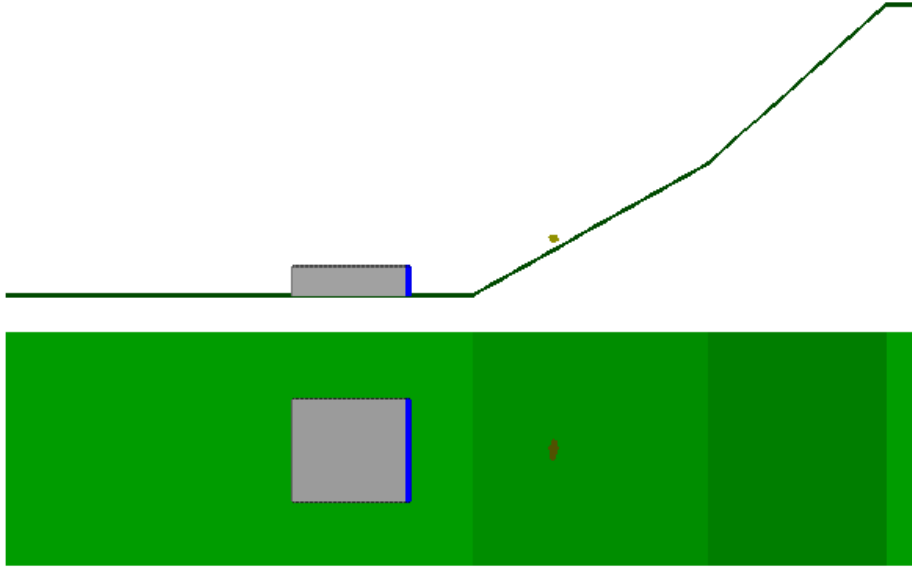


图 10.3.54 变形图(2.4sec)

time = 2.80000E+00sec

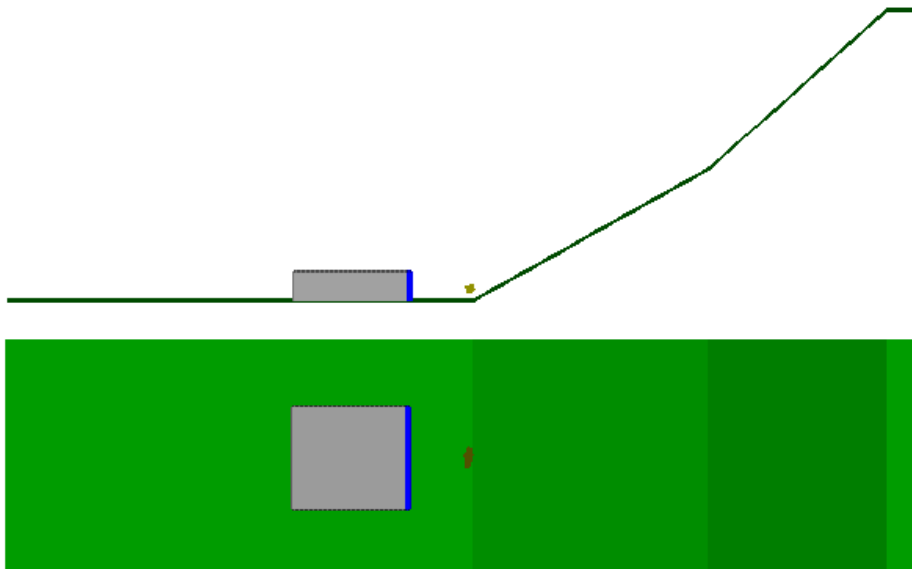


图 10.3.55 变形图(2.8sec)

time = 3.20000E+00sec

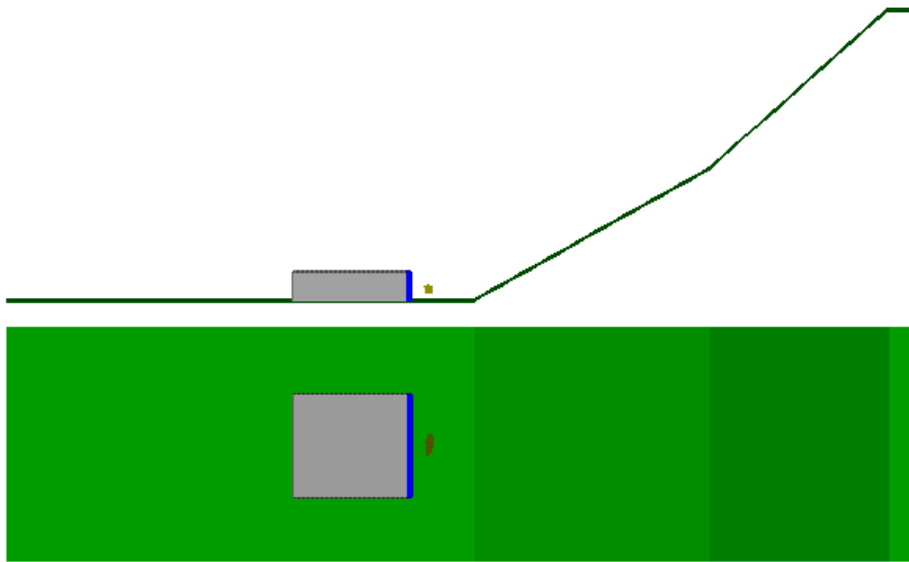


图 10.3.56 变形图(3.2sec)

time = 3.60000E+00sec

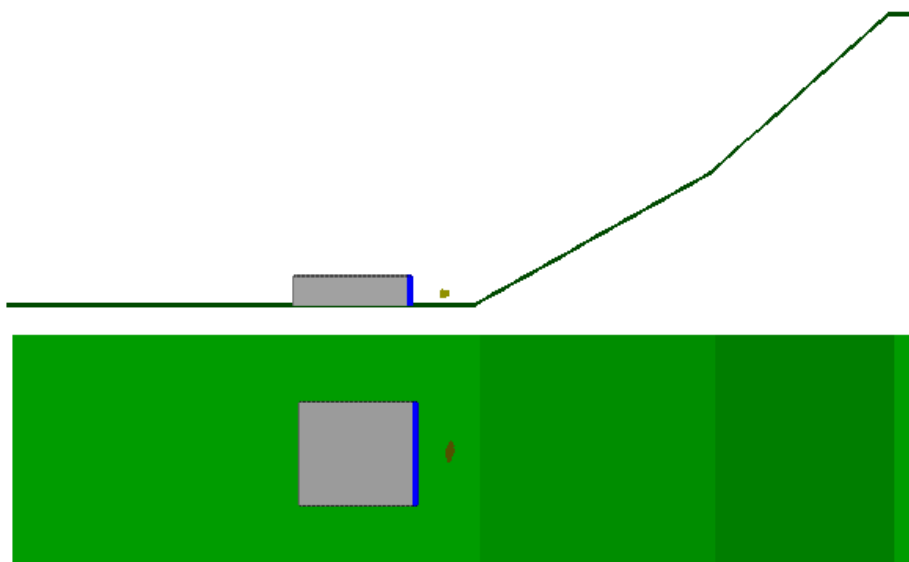


图 10.3.57 变形图(3.6sec)

time = 4.00000E+00sec

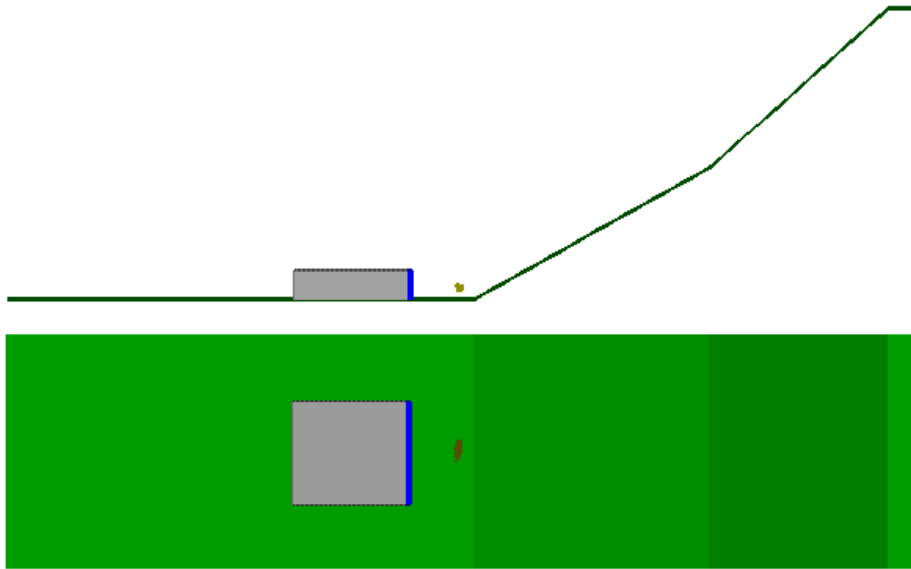


图 10.3.58 变形图(4.0sec)

• CASE2 板状 40cm

time = 4.00000E-02sec

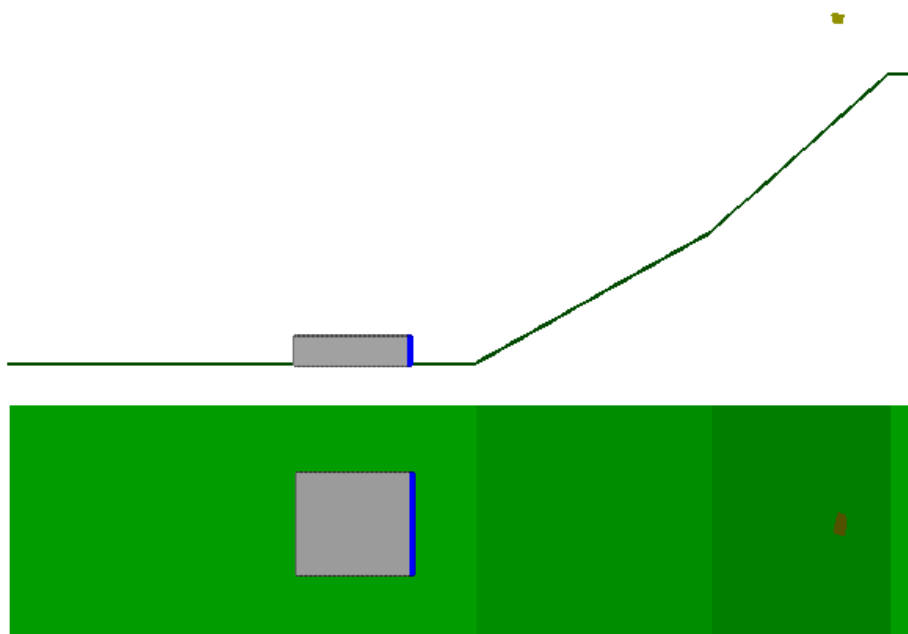


图 10.3.59 变形图(0.0sec)

time = 4.00000E-01sec

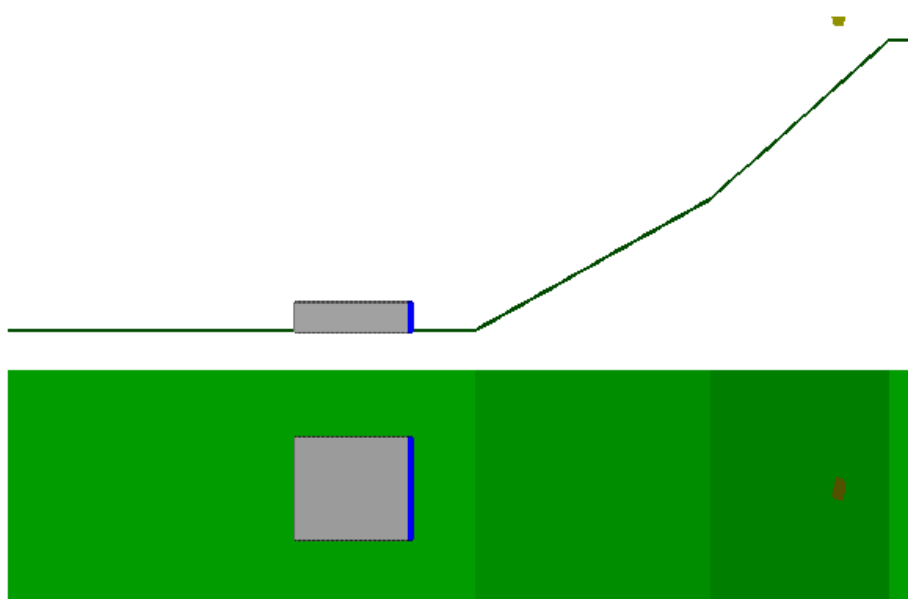


图 10.3.60 变形图(0.4sec)

time = 8.00000E-01sec

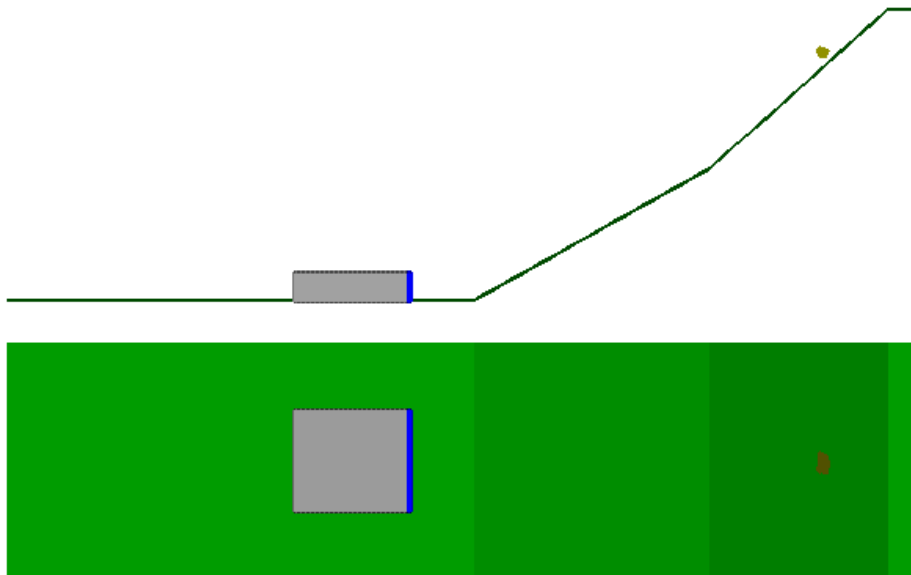


图 10.3.61 变形图(0.8sec)

time = 1.20000E+00sec

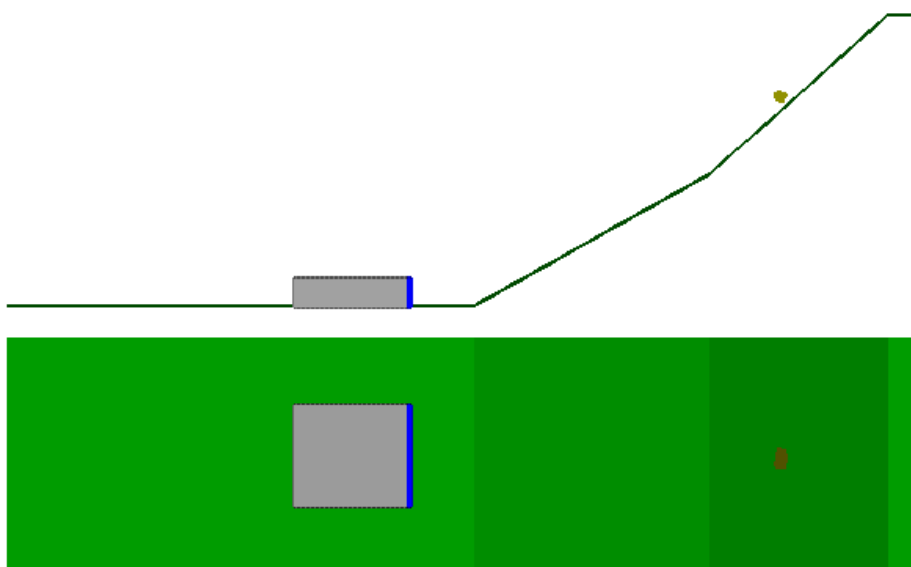


图 10.3.62 变形图(1.2sec)

time = 1.60000E+00sec

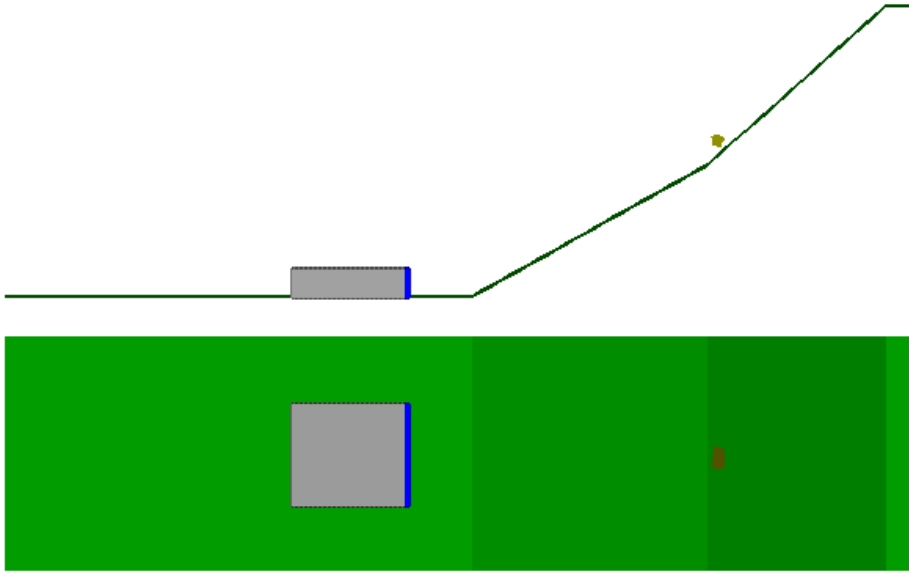


图 10.3.63 变形图(1.6sec)

time = 2.00000E+00sec

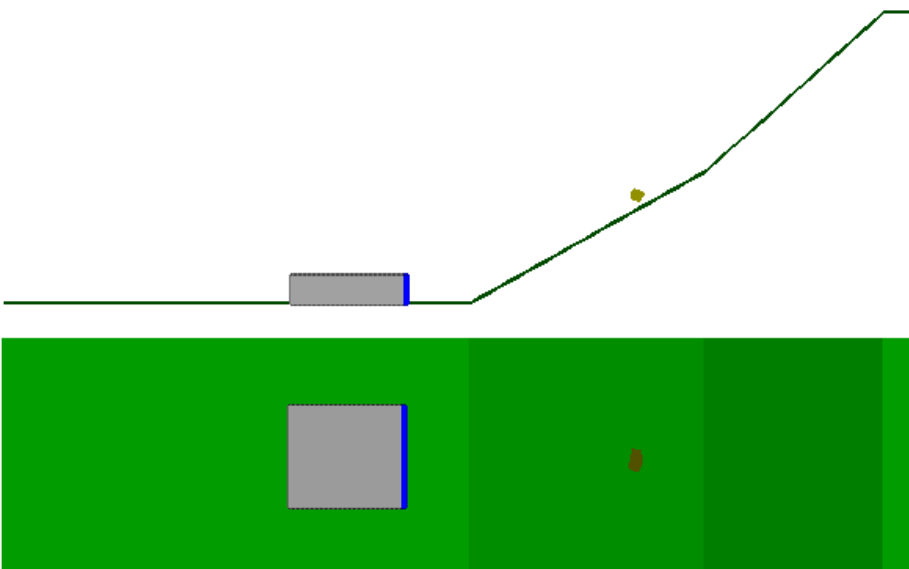


图 10.3.64 变形图(2.0sec)



time = 2.40000E+00sec

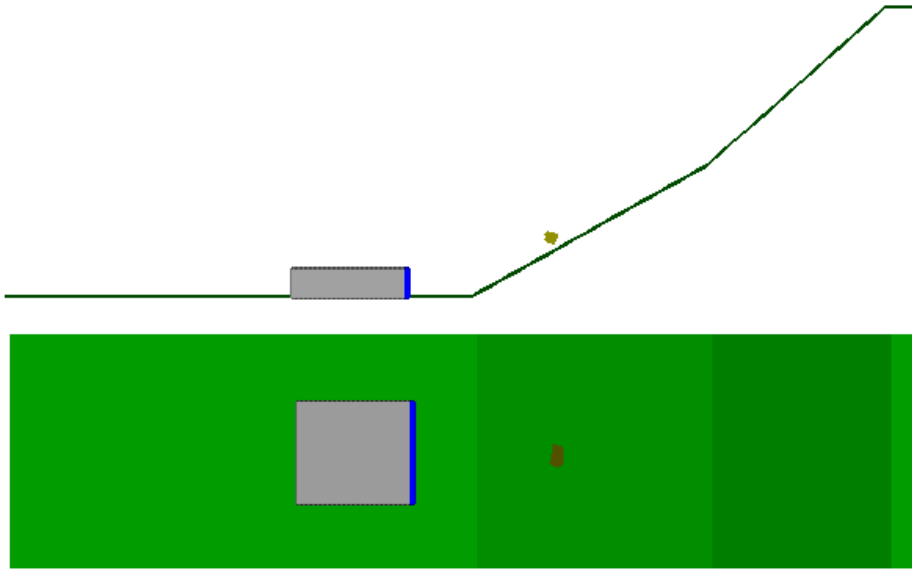


图 10.3.65 变形图(2.4sec)

time = 2.80000E+00sec

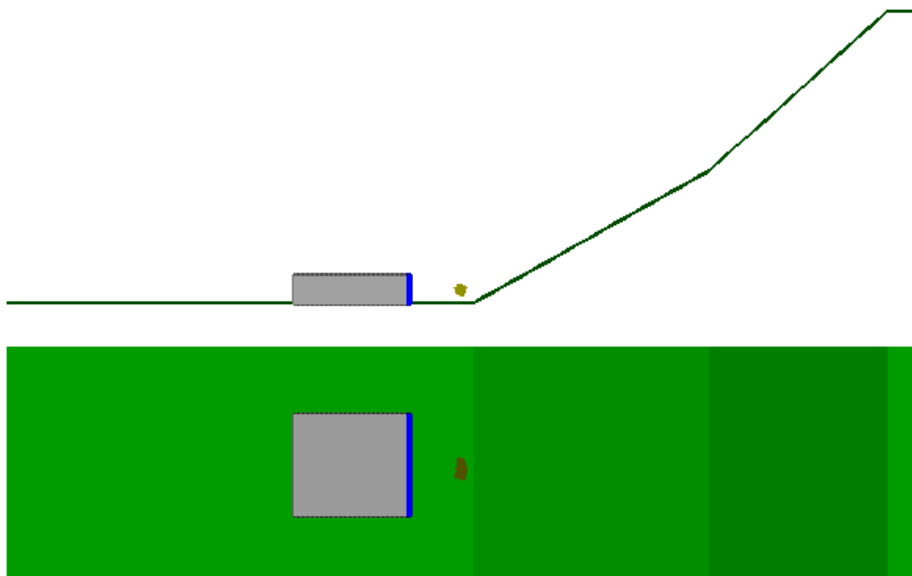


图 10.3.66 变形图(2.8sec)

time = 3.20000E+00sec

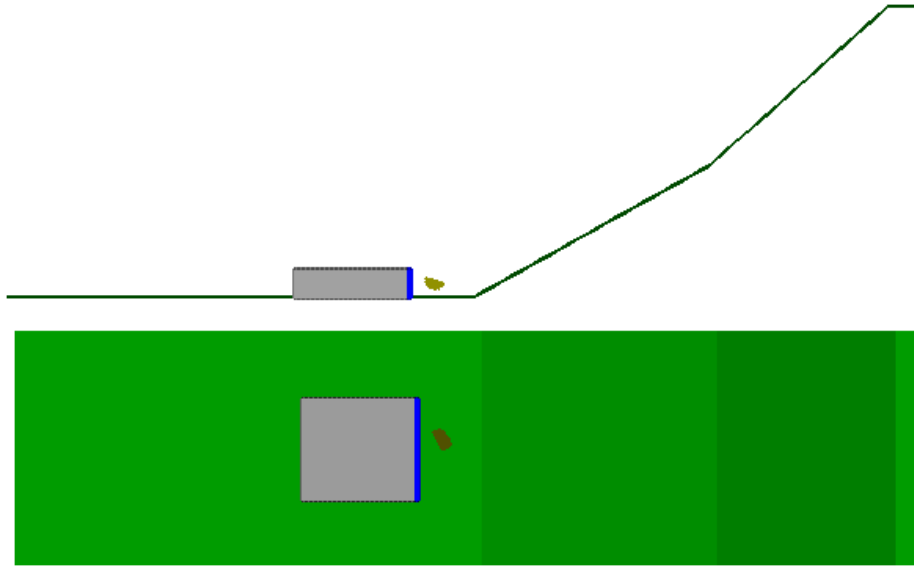


图 10.3.67 变形图(3.2sec)

time = 3.60000E+00sec

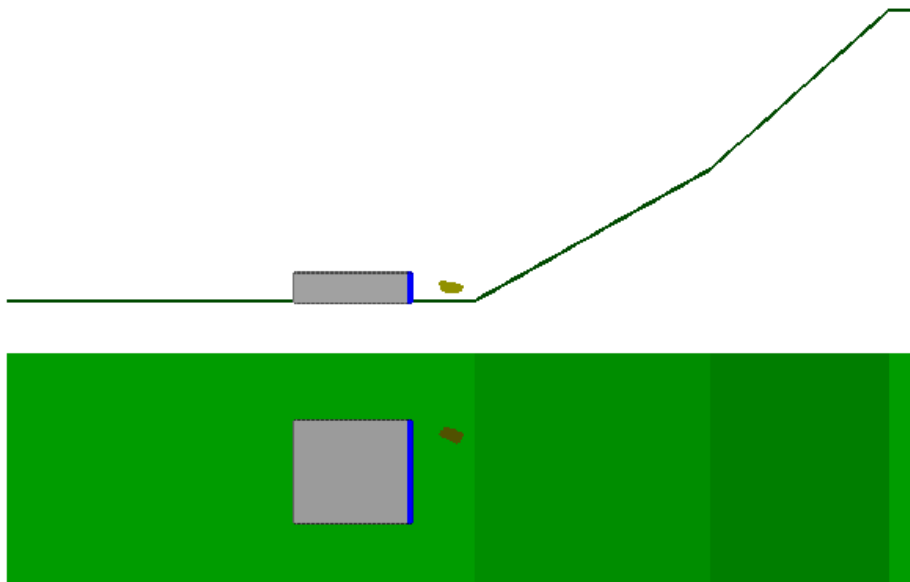


图 10.3.68 变形图(3.6sec)

time = 4.00000E+00sec

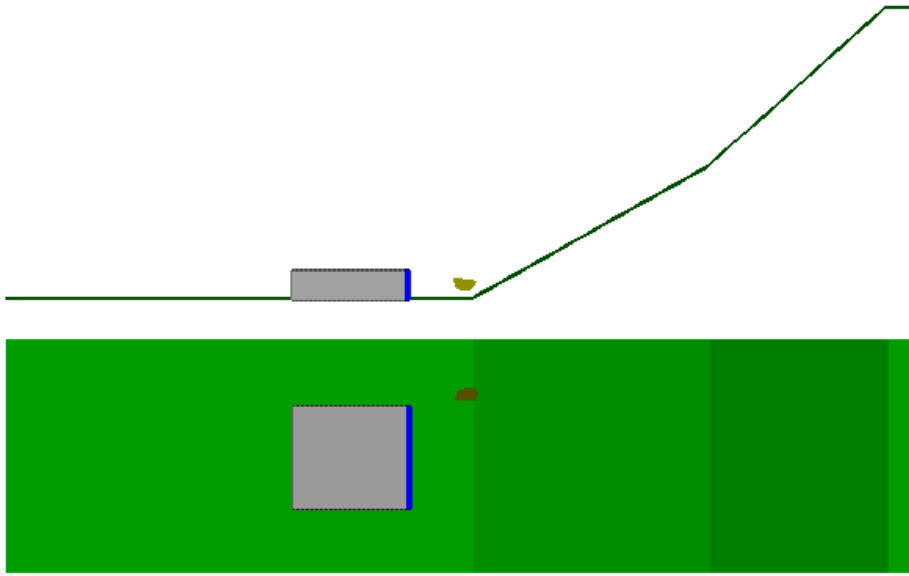


图 10.3.69 变形图(4.0sec)

• CASE3 塊状 20cm

time = 4.00000E-02sec

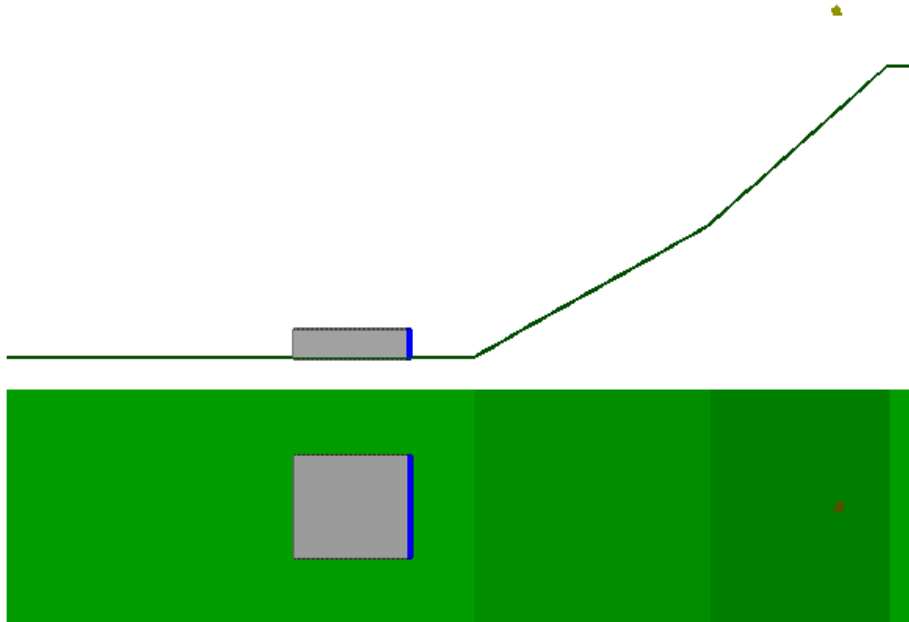


图 10.3.70 变形图(0.0sec)

time = 4.00000E-01sec

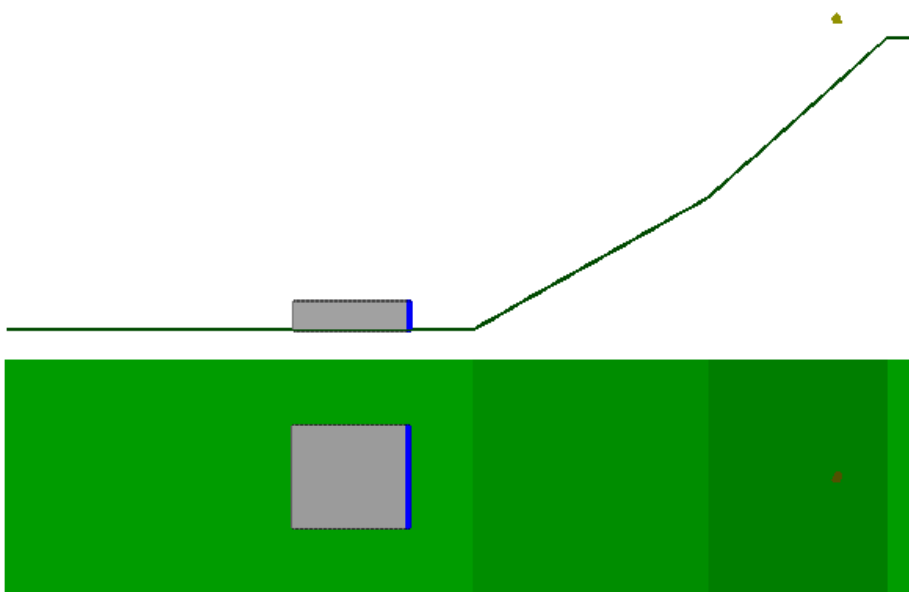


图 10.3.71 变形图(0.4sec)

time = 8.00000E-01sec

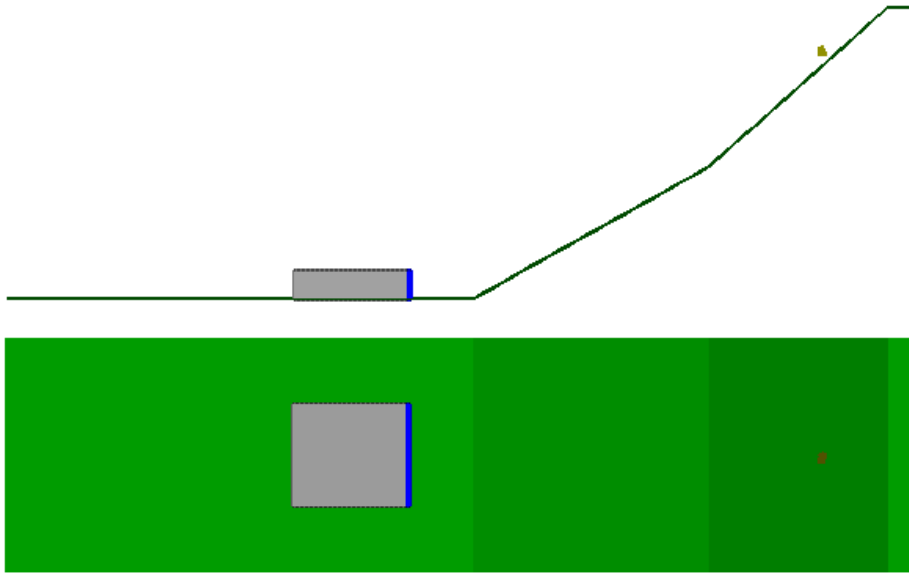


图 10.3.72 变形图(0.8sec)

time = 1.20000E+00sec

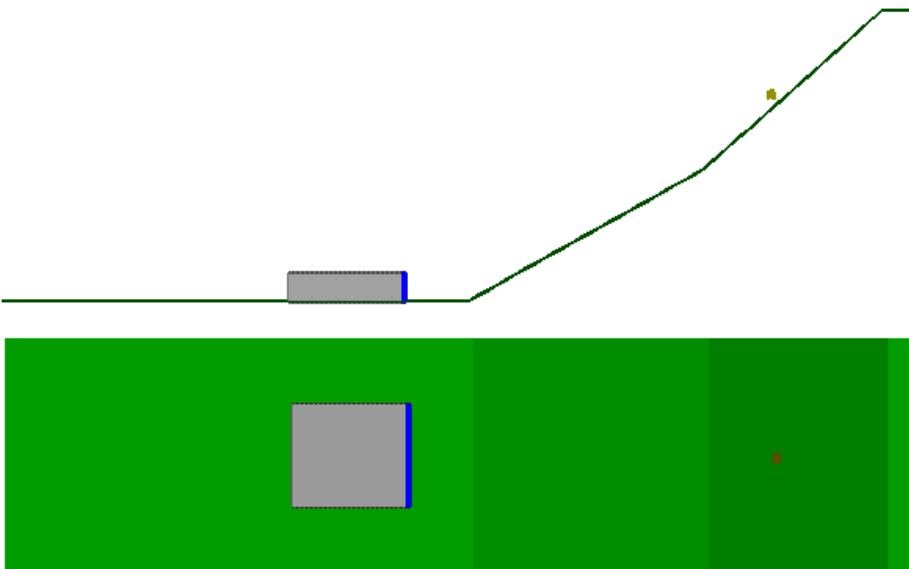


图 10.3.73 变形图(1.2sec)

time = 1.60000E+00sec

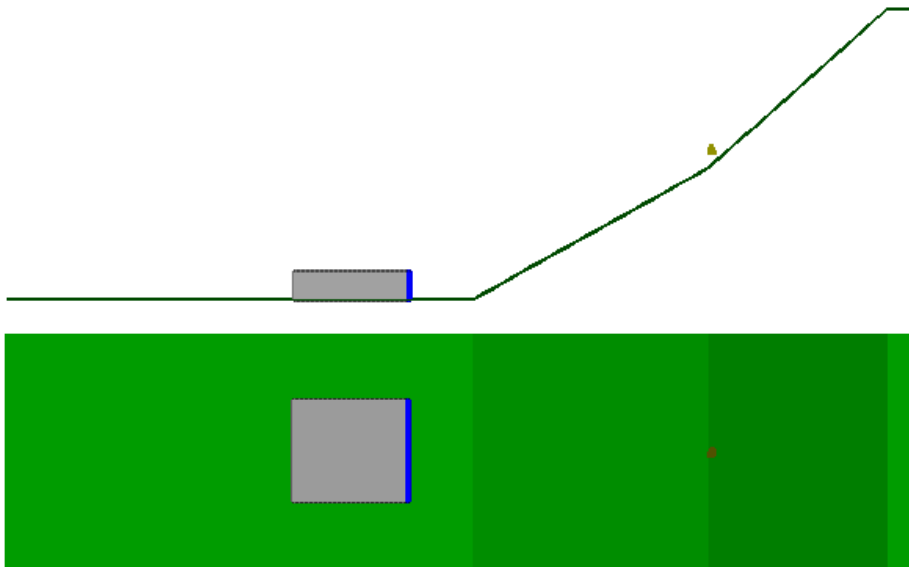


图 10.3.74 变形图(1.6sec)

time = 2.00000E+00sec

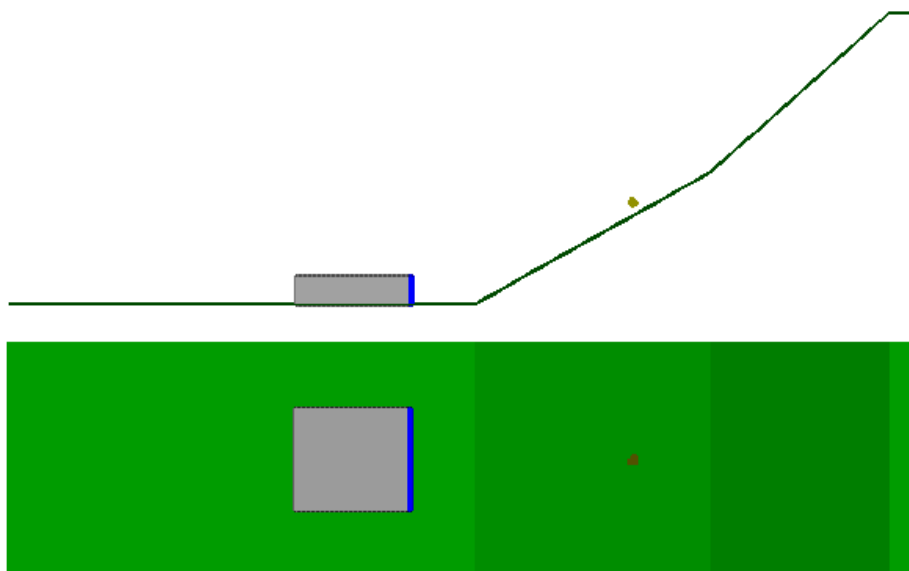


图 10.3.75 变形图(2.0sec)

time = 2.40000E+00sec

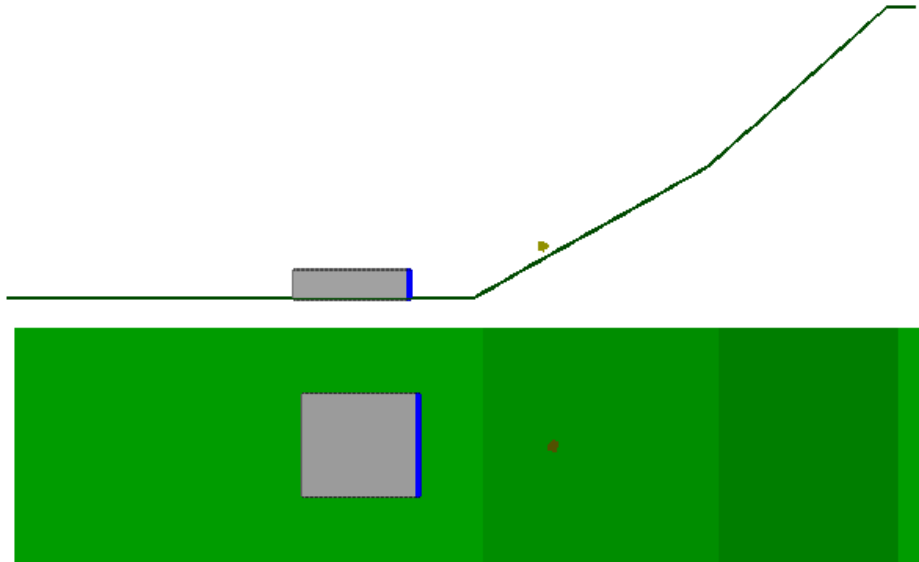


图 10.3.76 变形图(2.4sec)

time = 2.80000E+00sec

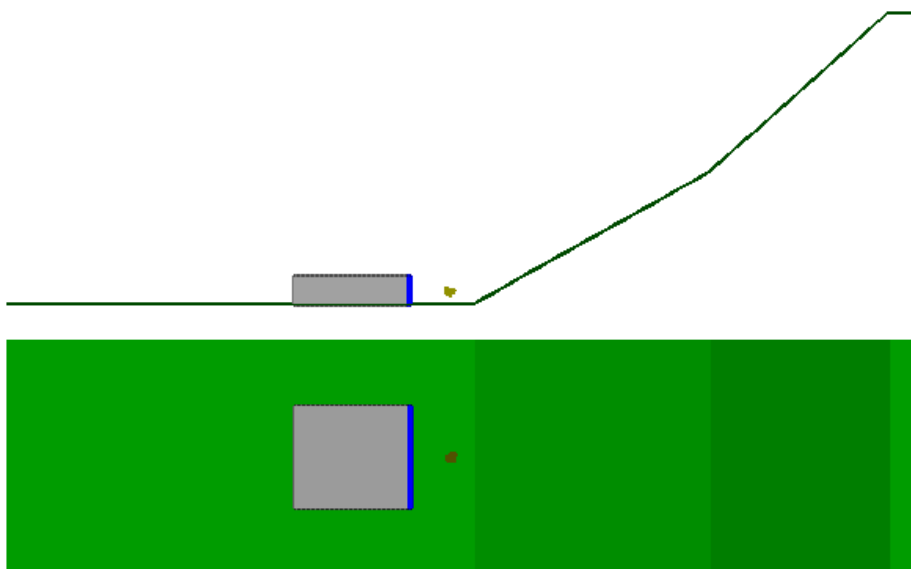


图 10.3.77 变形图(2.8sec)

time = 3.20000E+00sec

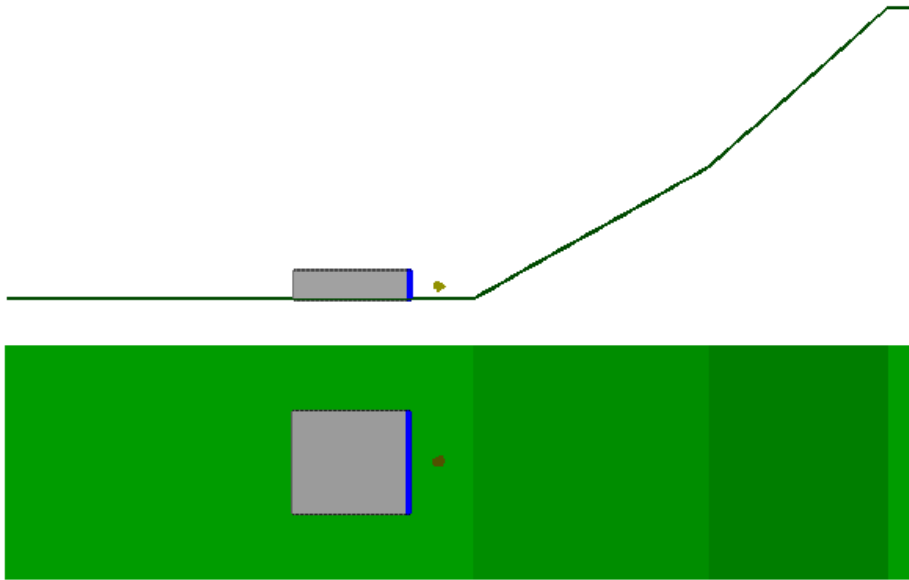


图 10.3.78 变形图(3.2sec)

time = 3.60000E+00sec

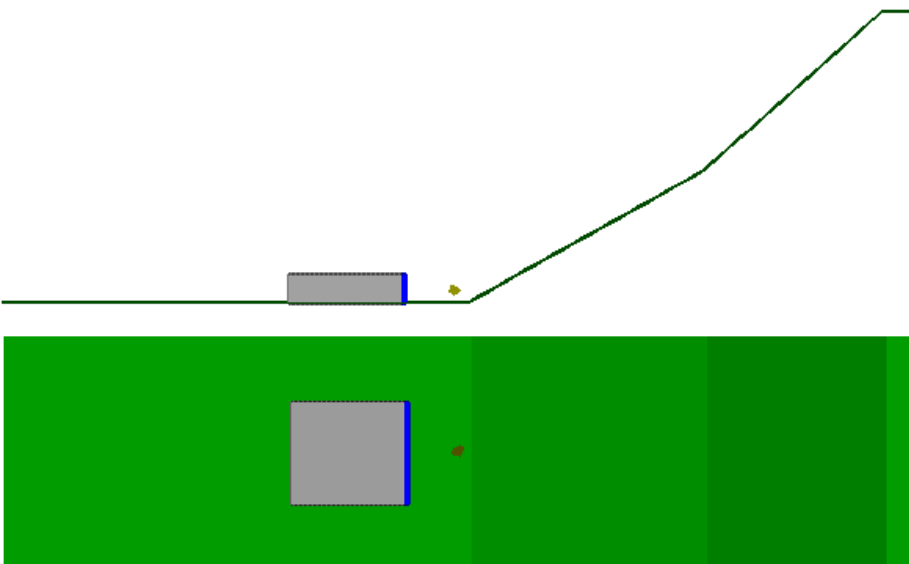


图 10.3.79 变形图(3.6sec)



time = 4.00000E+00sec

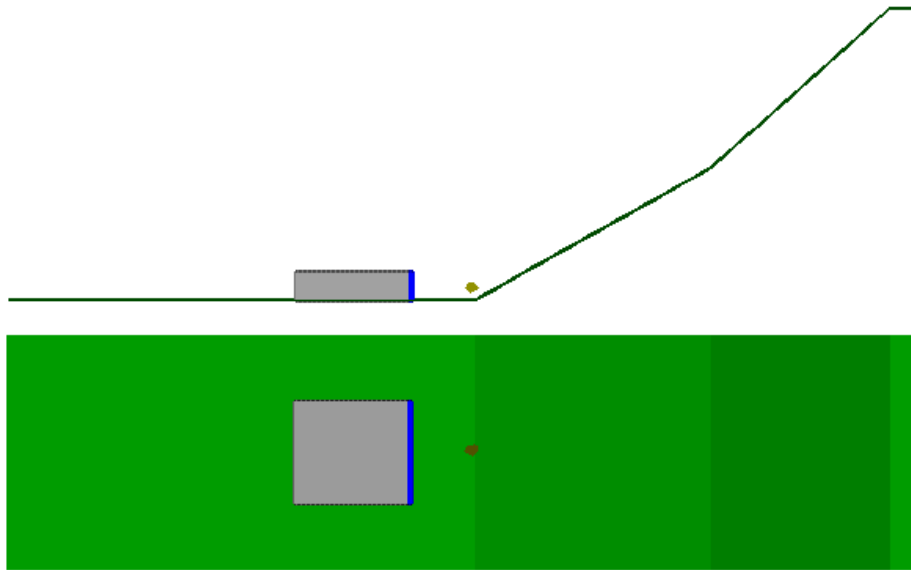


图 10.3.80 变形图(4.0sec)

• CASE3 塊状 40cm

time = 4.00000E-02sec

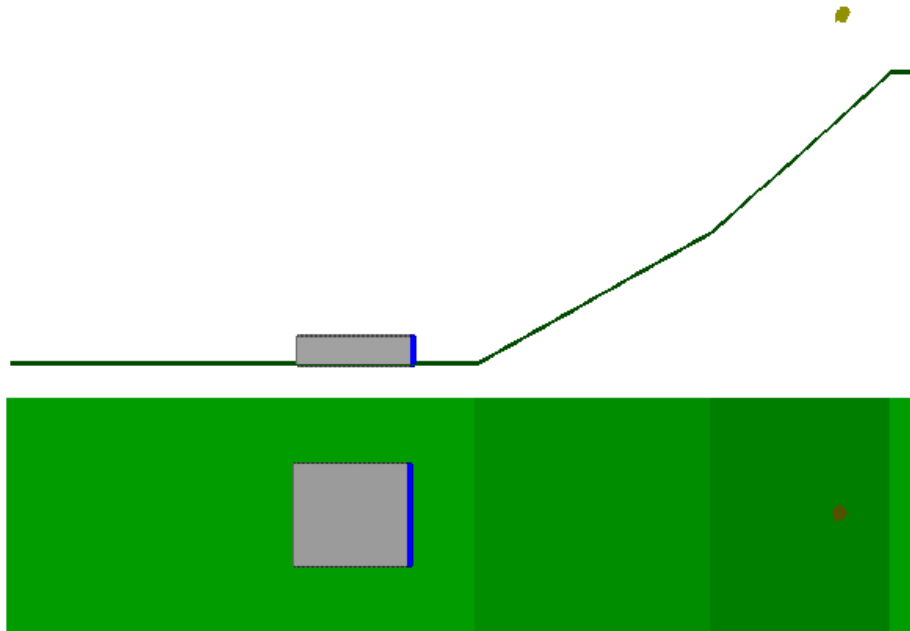


図 10.3.81 変形図(0.0sec)

time = 4.00000E-01sec

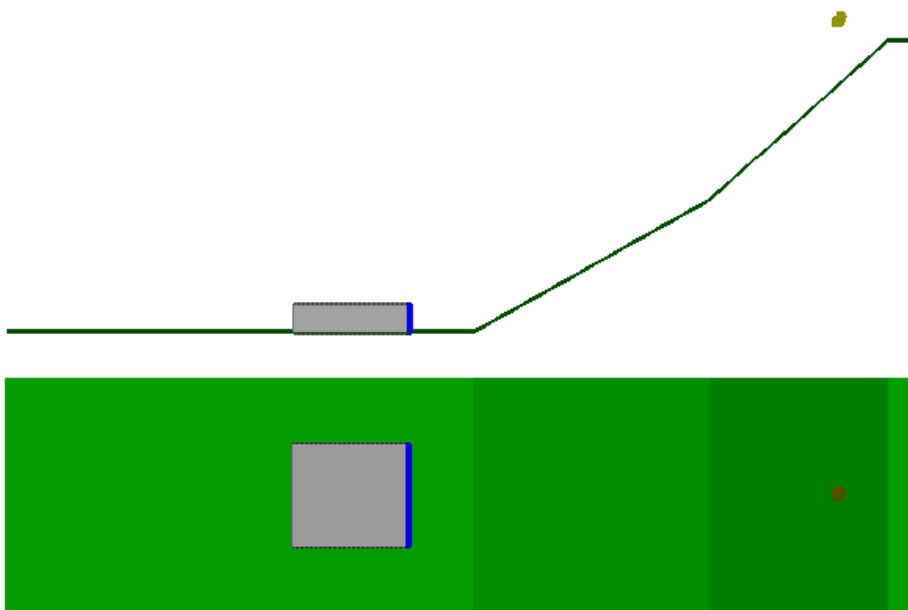


図 10.3.82 変形図(0.4sec)

time = 8.00000E-01sec

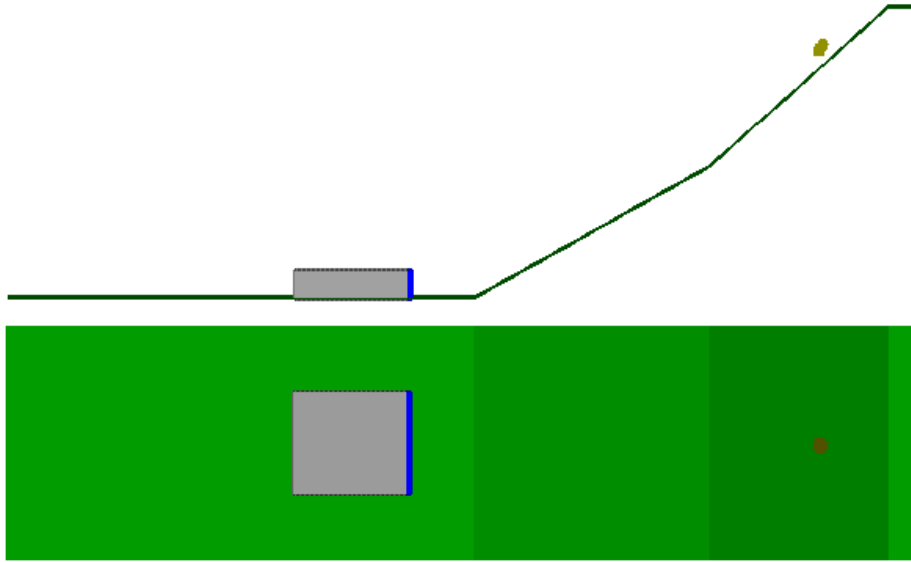


图 10.3.83 变形图(0.8sec)

time = 1.20000E+00sec

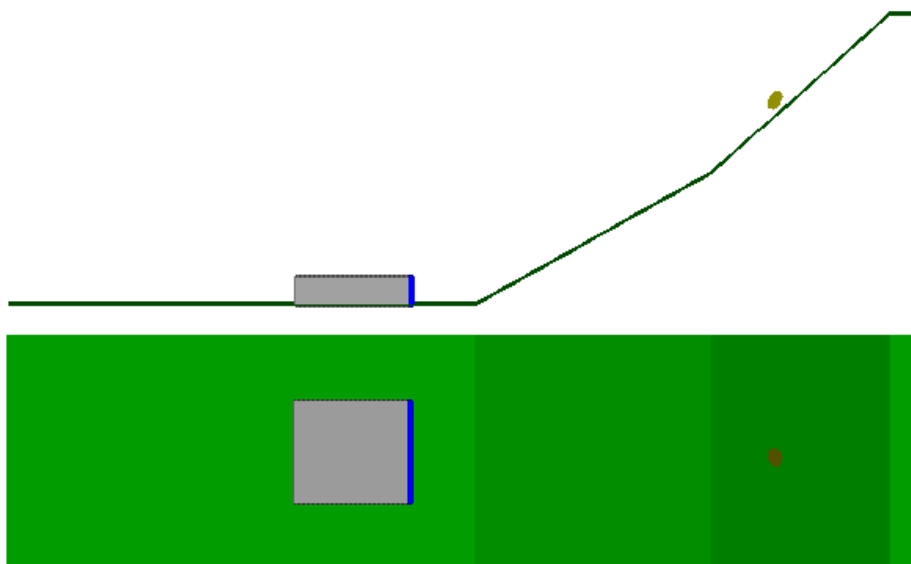


图 10.3.84 变形图(1.2sec)

time = 1.60000E+00sec

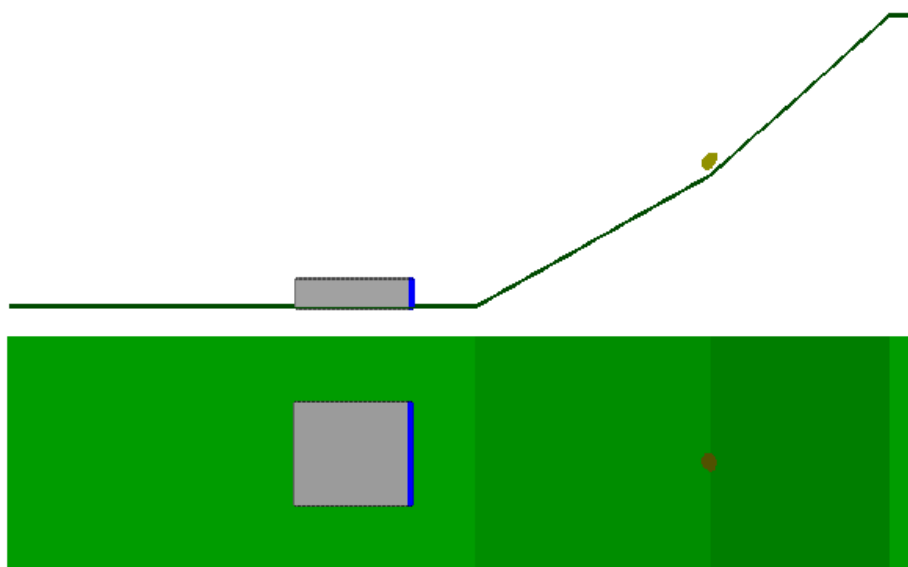


图 10.3.85 变形图(1.6sec)

time = 2.00000E+00sec

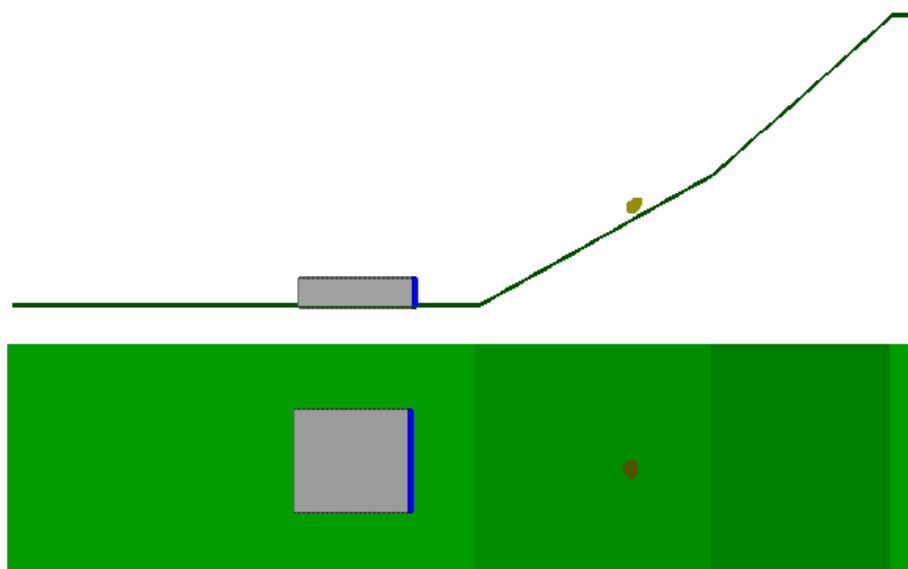


图 10.3.86 变形图(2.0sec)

time = 2.40000E+00sec

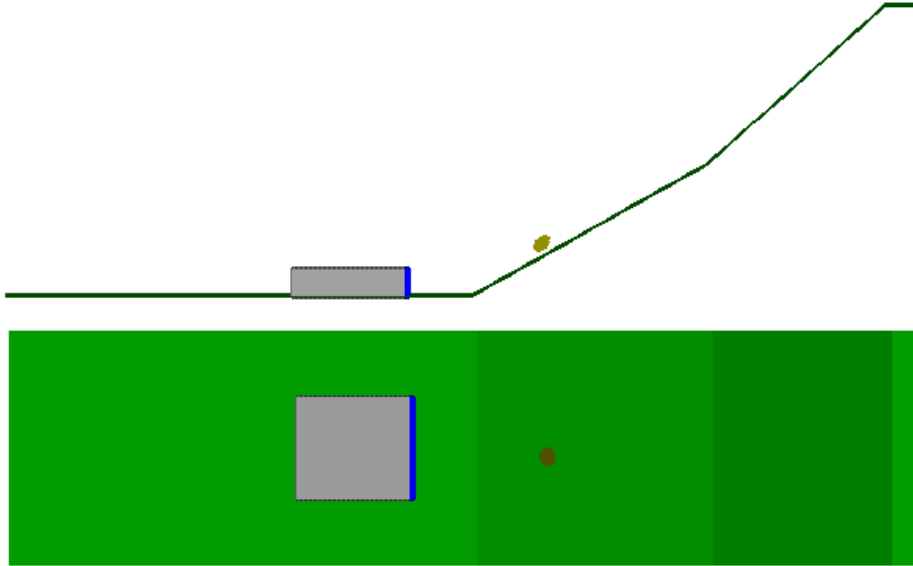


图 10.3.87 变形图(2.4sec)

time = 2.80000E+00sec

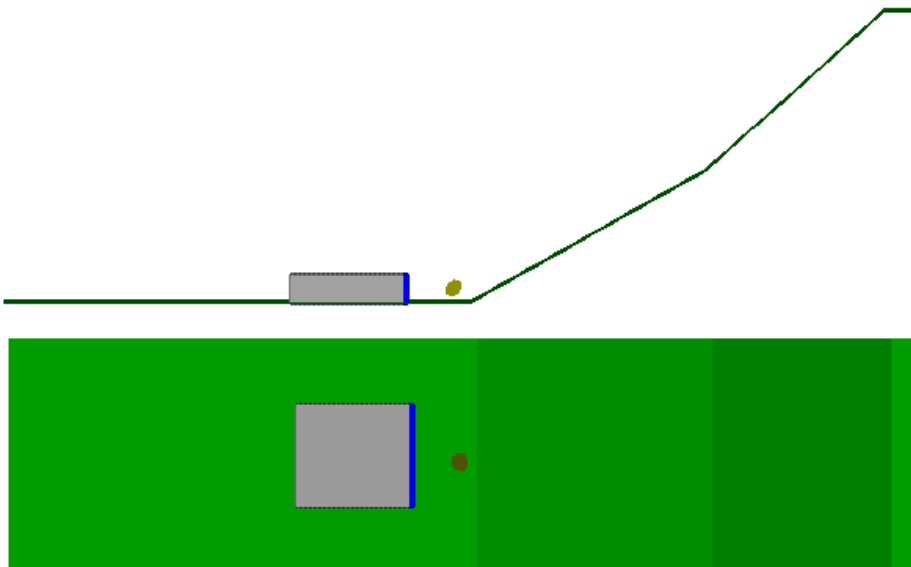


图 10.3.88 变形图(2.8sec)

time = 3.20000E+00sec

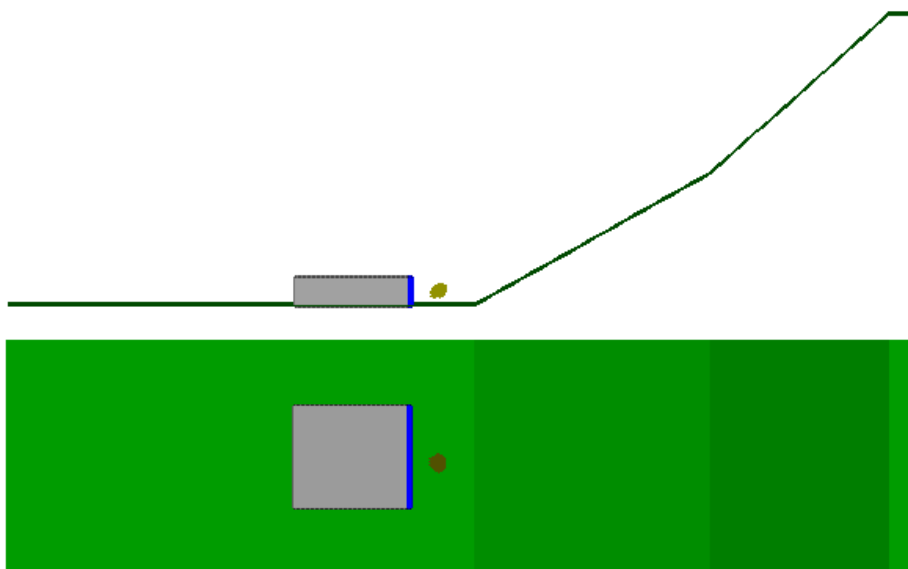


图 10.3.89 变形图(3.2sec)

time = 3.60000E+00sec

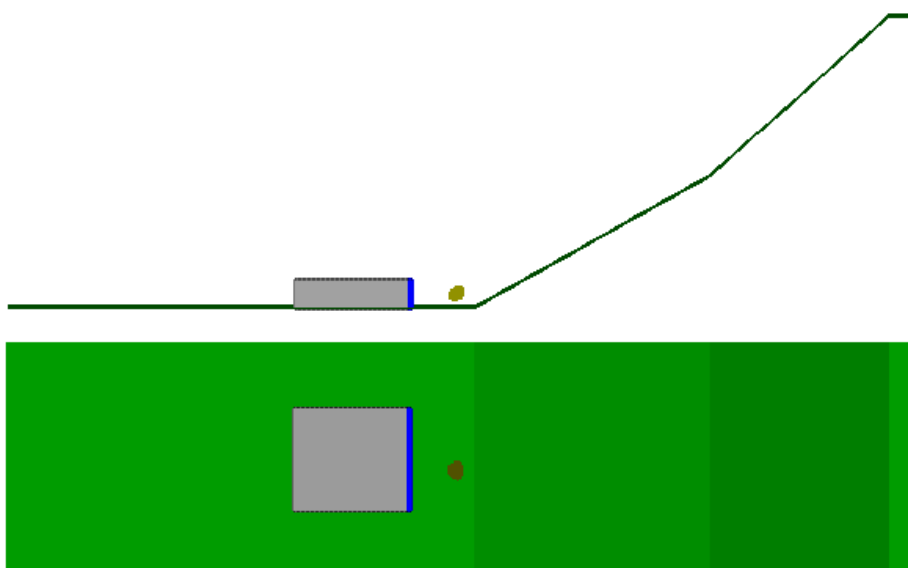


图 10.3.90 变形图(3.6sec)

time = 4.00000E+00sec

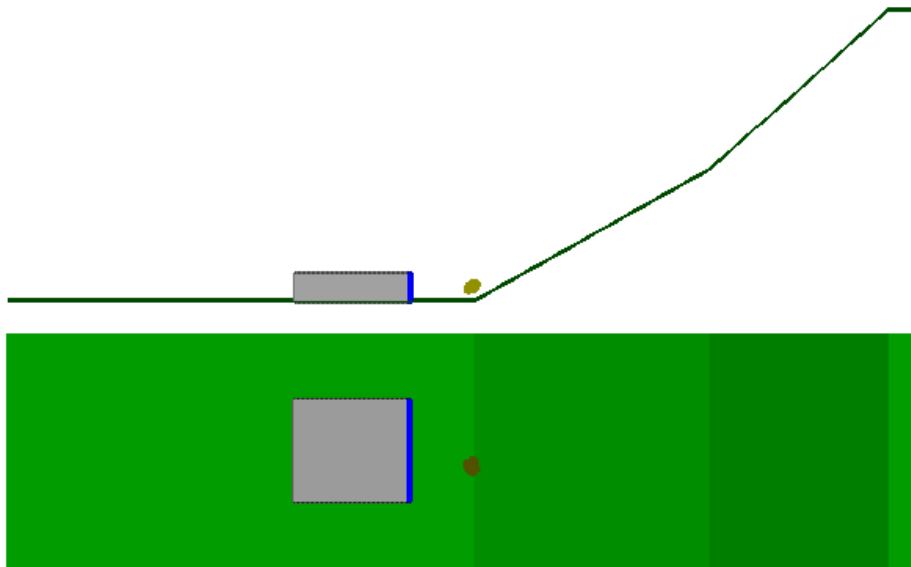


图 10.3.91 变形图(4.0sec)

(8) 壁有ケースにおける解析結果 (時刻歴)

・ CASE1 球形 20cm

以下に出力粒子位置を示す。図の矢印は回転角を算出した際の粒子の位置と方向を示す。

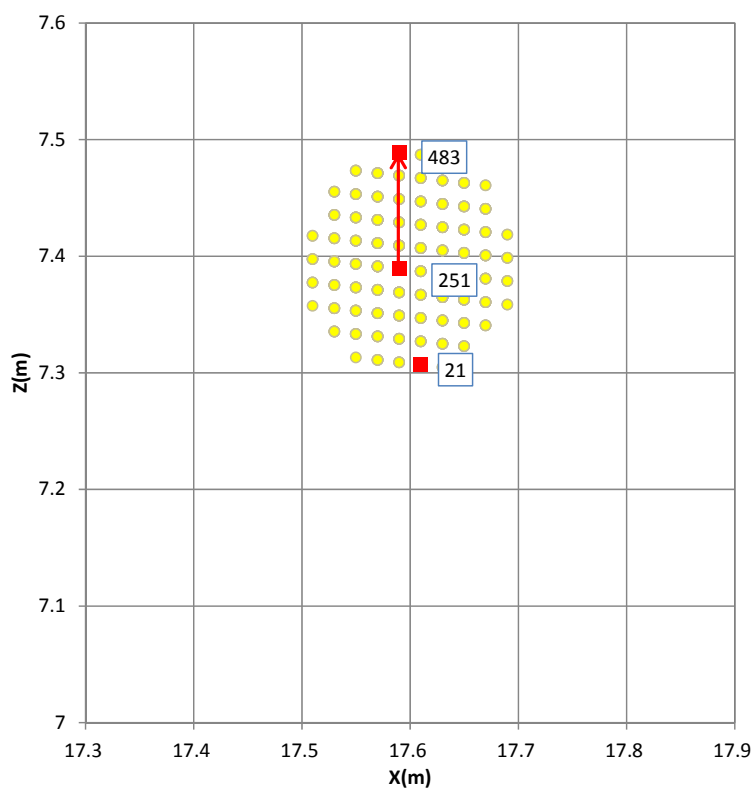


図 10.3.92 出力粒子位置

表 10.3.8 出力粒子一覧

粒子番号	X 座標(m)	Y 座標(m)	Z 座標(m)
483	17.59	2.49	7.489
251	17.59	2.49	7.389
21	17.61	2.49	7.3069



(a) 岩塊の転動距離の時刻歴

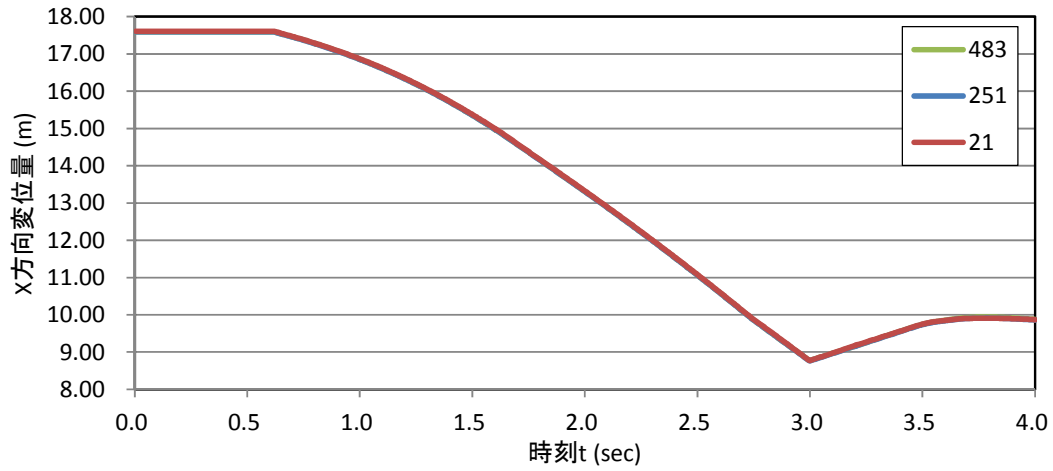


図 10.3.92 X 方向(流下方向)変位時刻歴

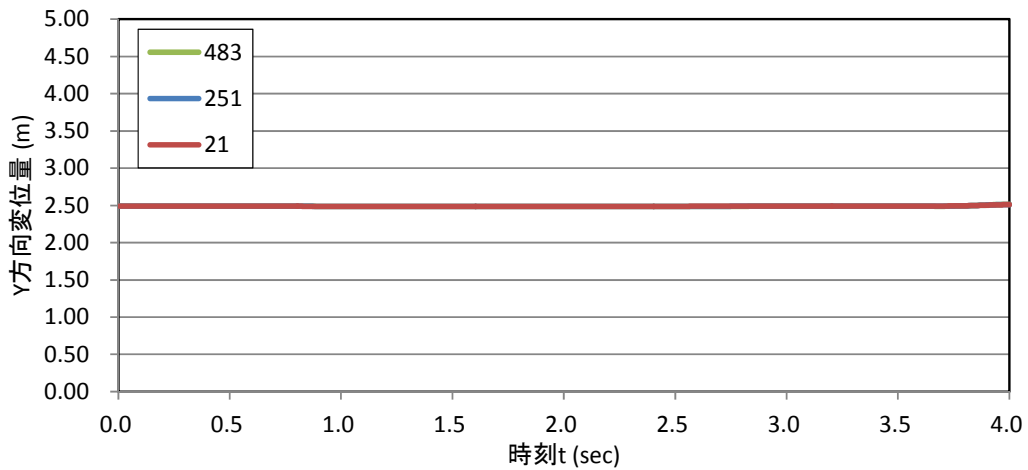


図 10.3.93 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

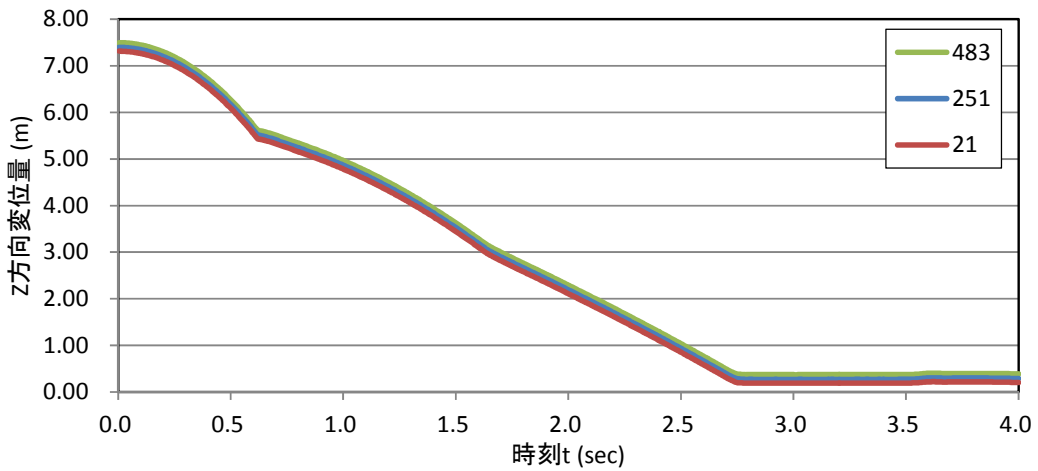


図 10.3.94 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

(b)岩塊の回転量の時刻歴

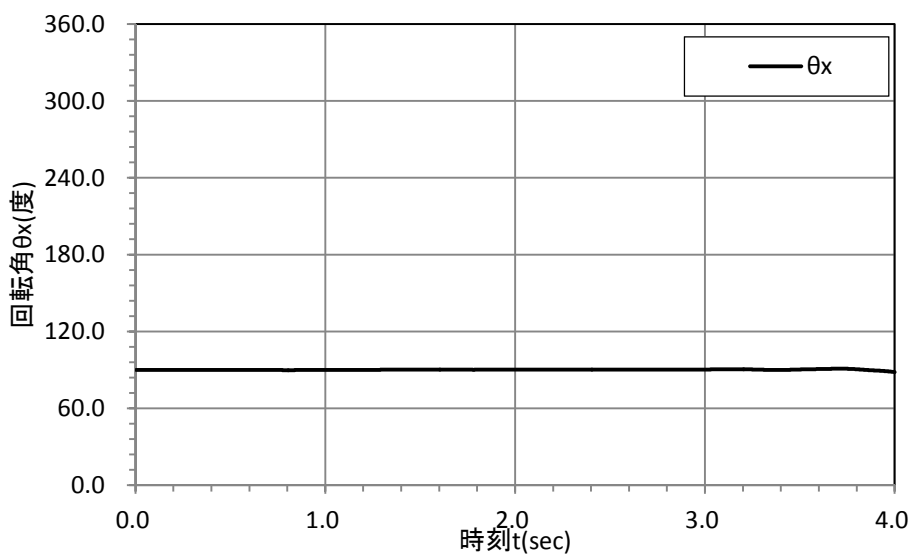


図 10.3.95 X 軸周りの回転角の時刻歴

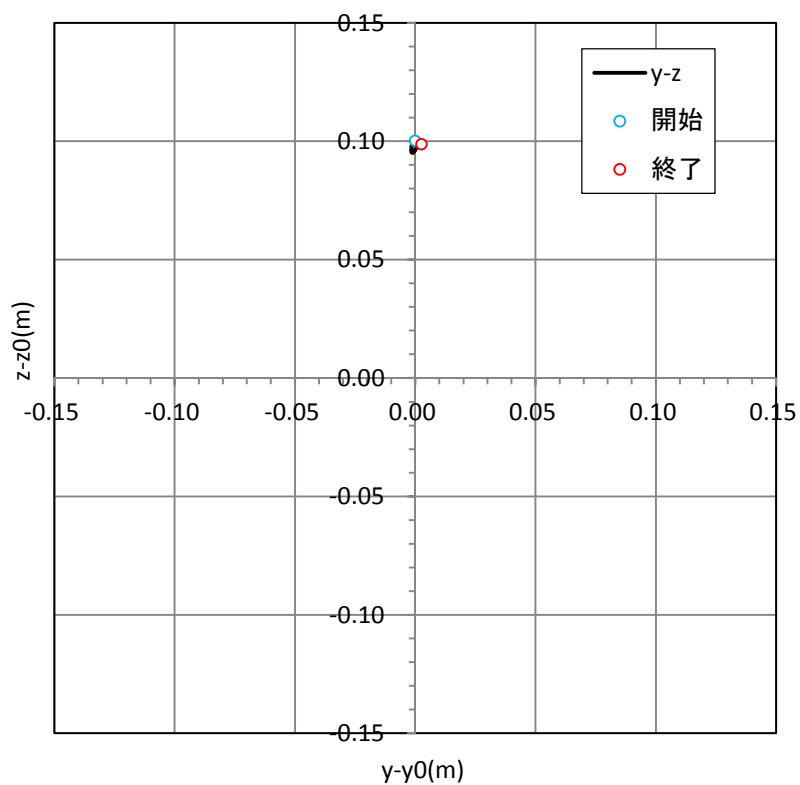


図 10.3.96 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

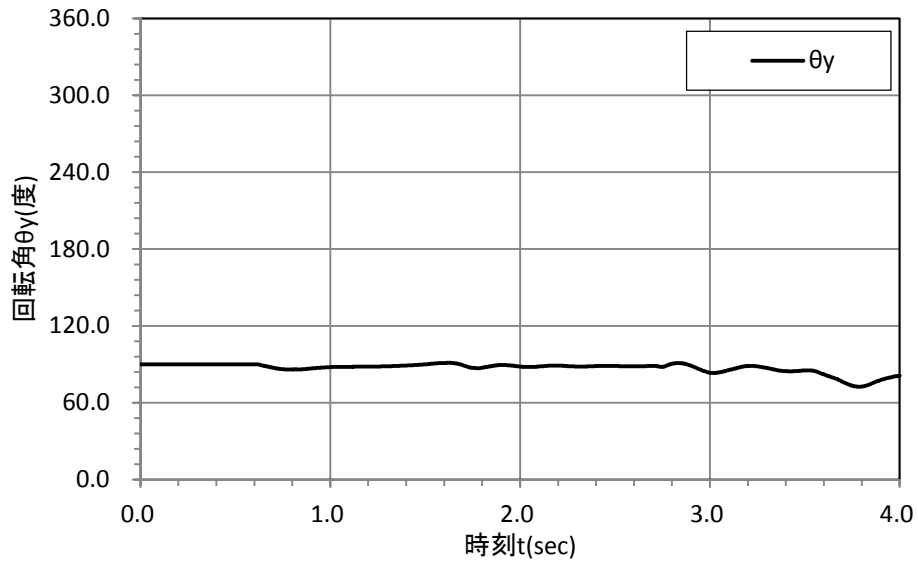


図 10.3.97 Y 軸周りの回転角の時刻歴

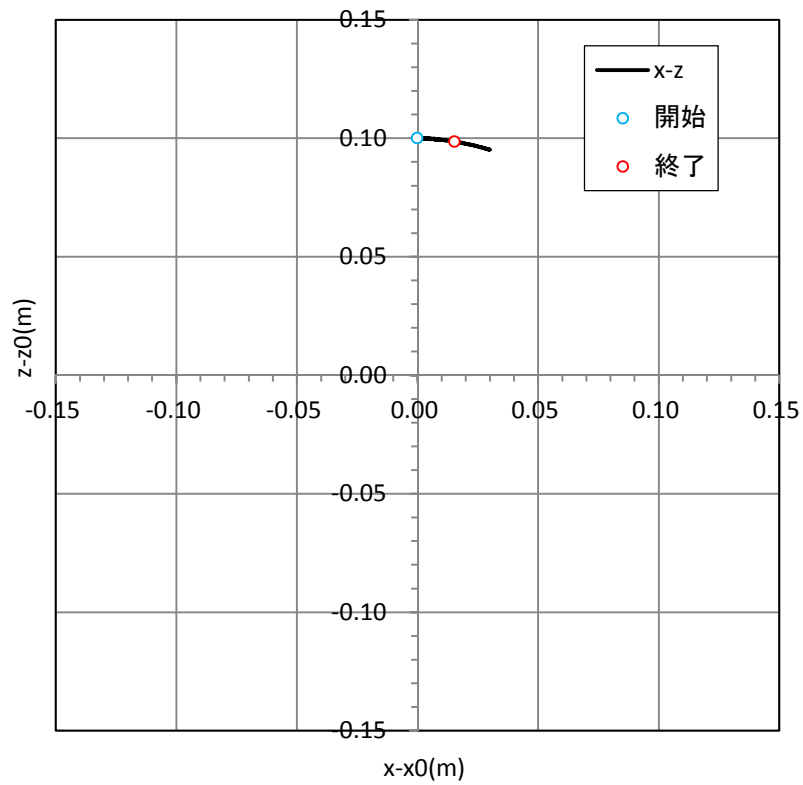


図 10.3.98 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

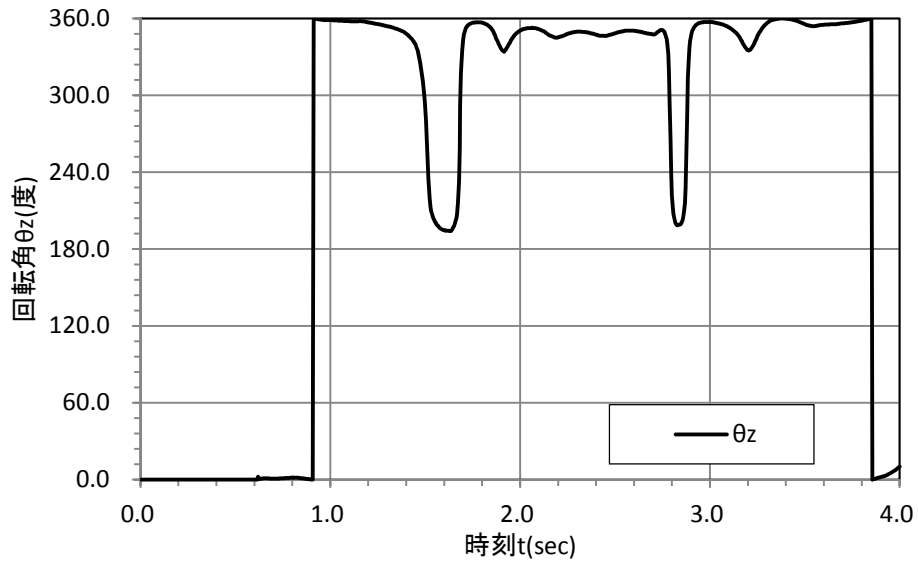


図 10.3.99 Z 軸周りの回転角の時刻歴

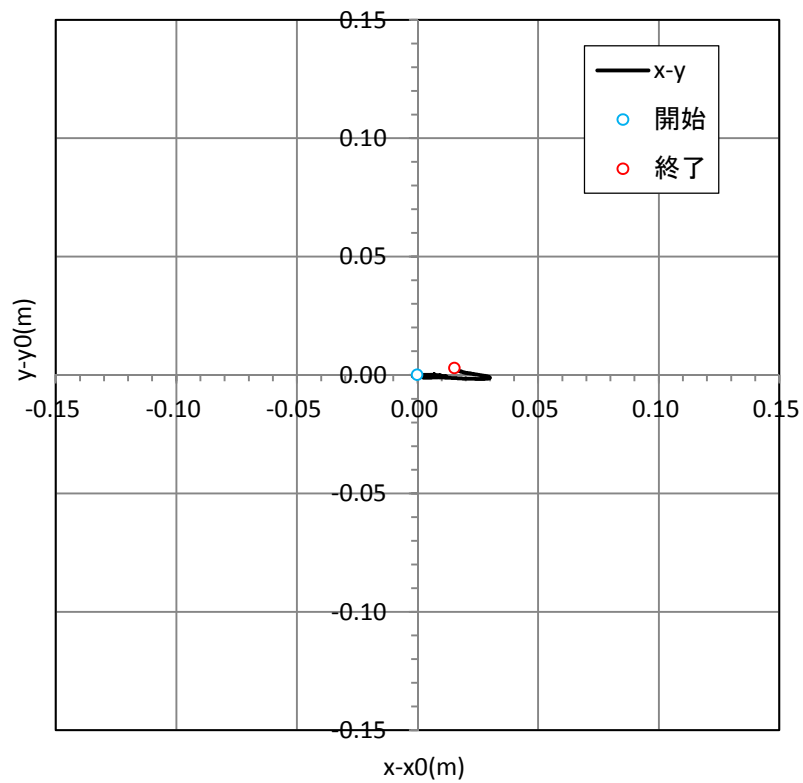


図 10.3.100 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

(c)岩塊の反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

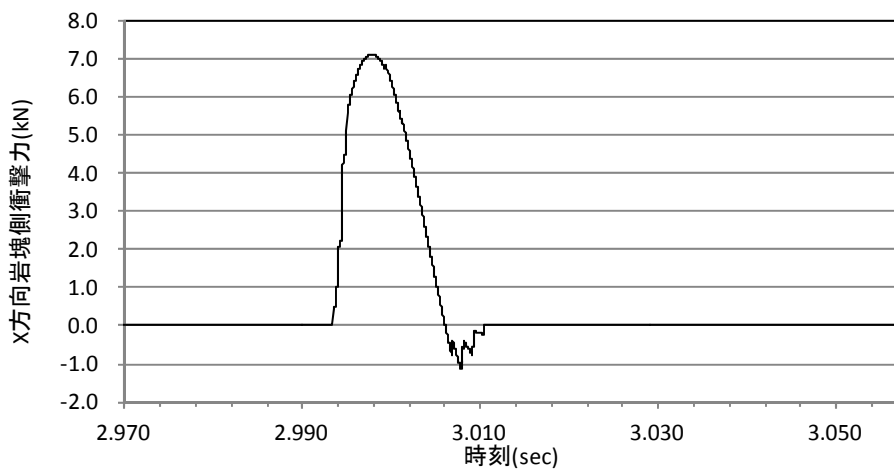


図 10.3.101 X方向(流下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

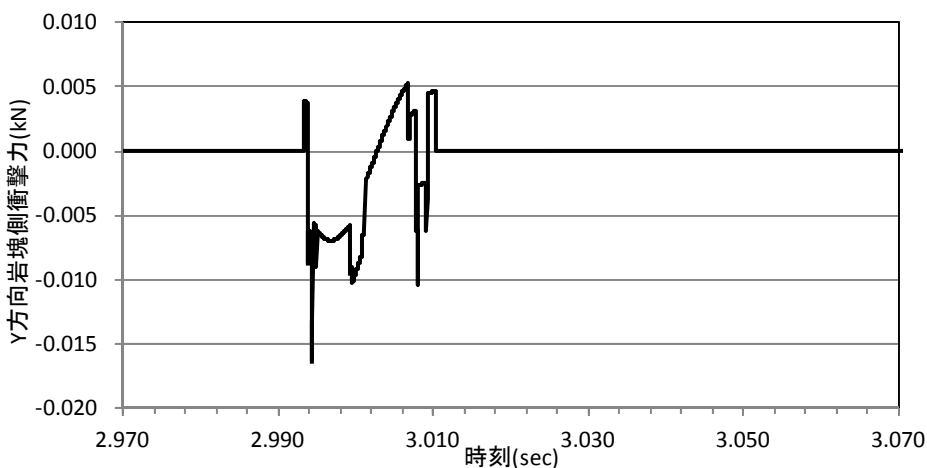


図 10.3.102 Y方向(流下直角方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

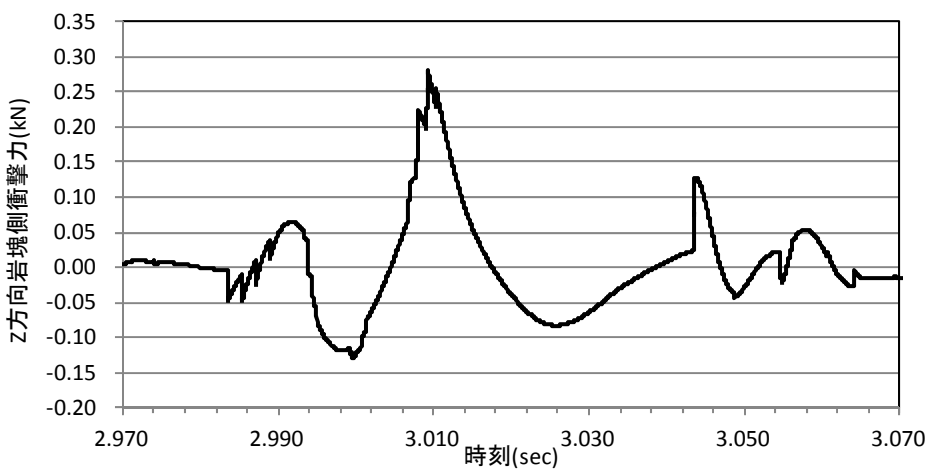


図 10.3.103 Z方向(上下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

・ CASE1 球形 40cm

以下に出力粒子位置を示す。図の矢印は回転角を算出した際の粒子の位置と方向を示す。

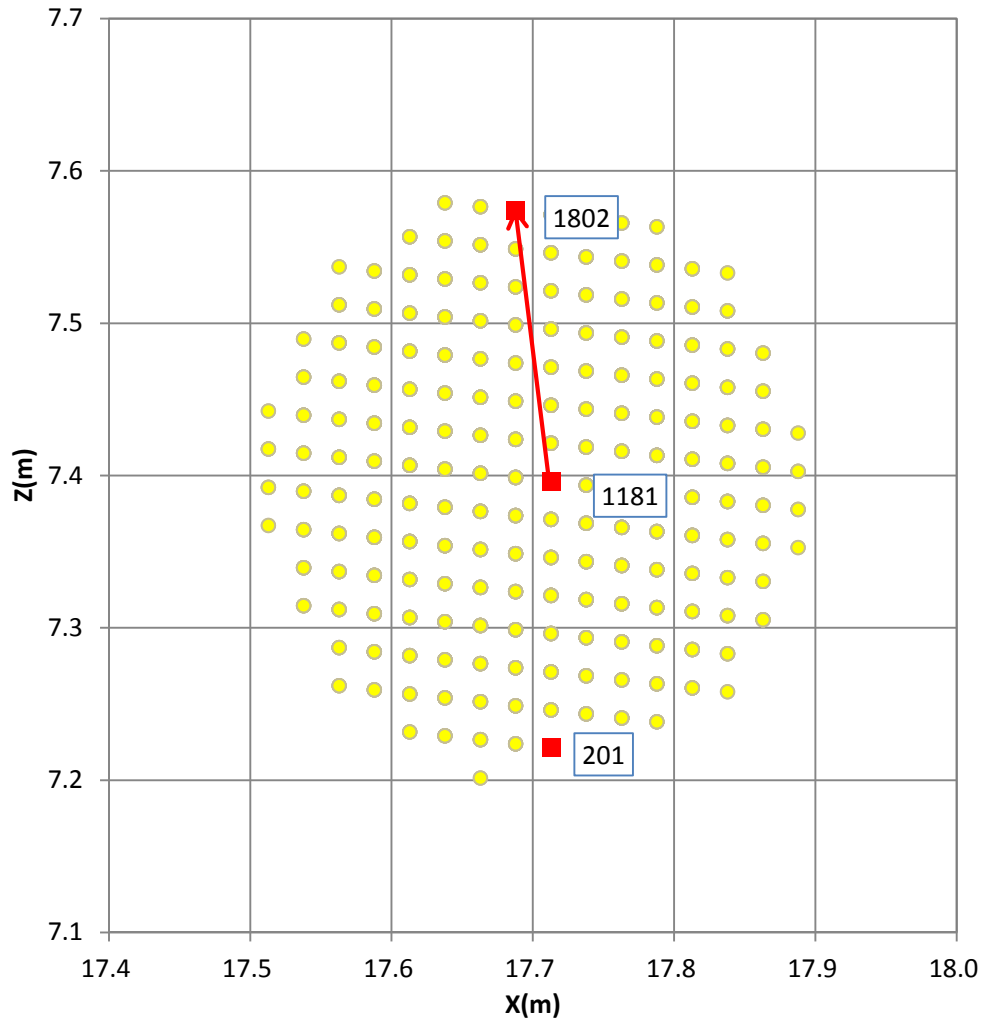


図 10.3.104 出力粒子位置

表 10.3.9 出力粒子一覧

項目	粒子番号	X 座標(m)	Y 座標 (m)	Z 座標(m)
出力点	1802	17.688	2.4875	7.5737
出力点	1181	17.713	2.4875	7.3961
出力点	201	17.713	2.4875	7.2211

(a) 岩塊の転動距離の時刻歴

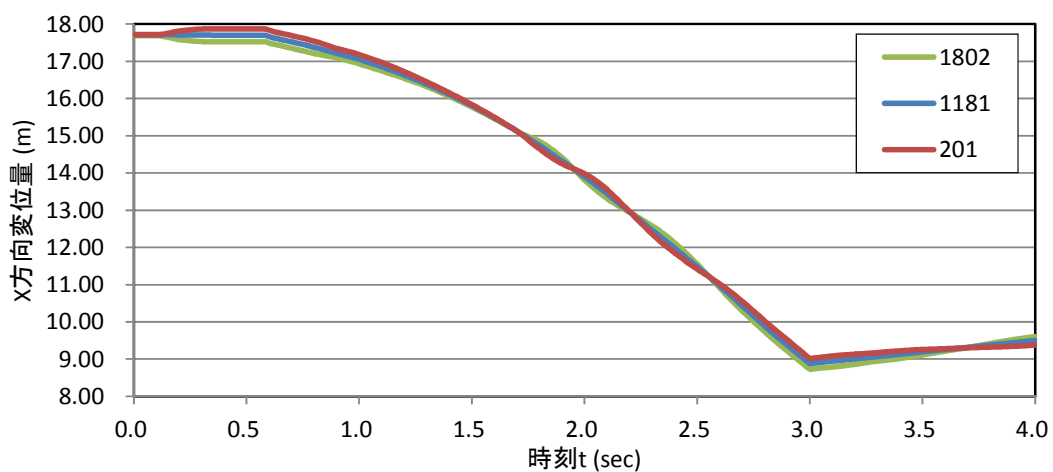


図 10.3.105 X 方向(流下方向)変位時刻歴

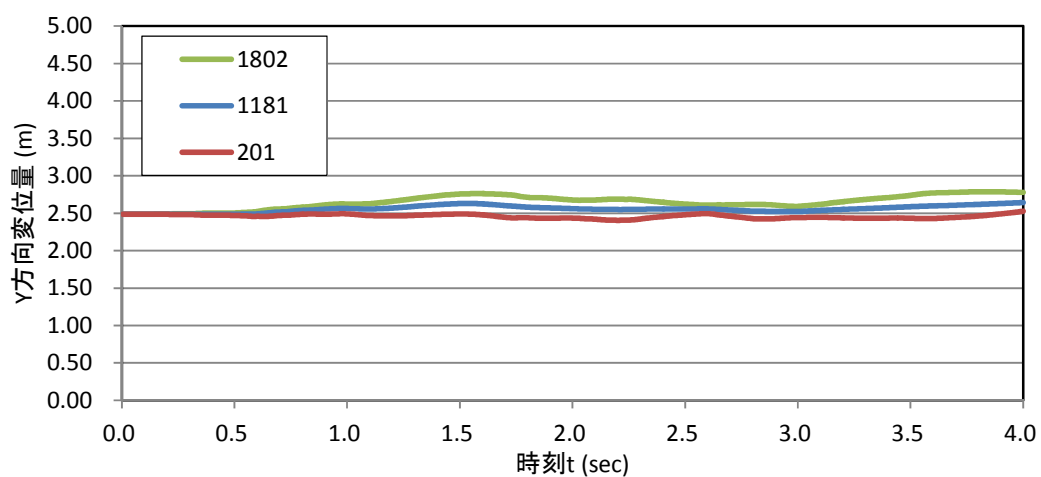


図 10.3.106 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

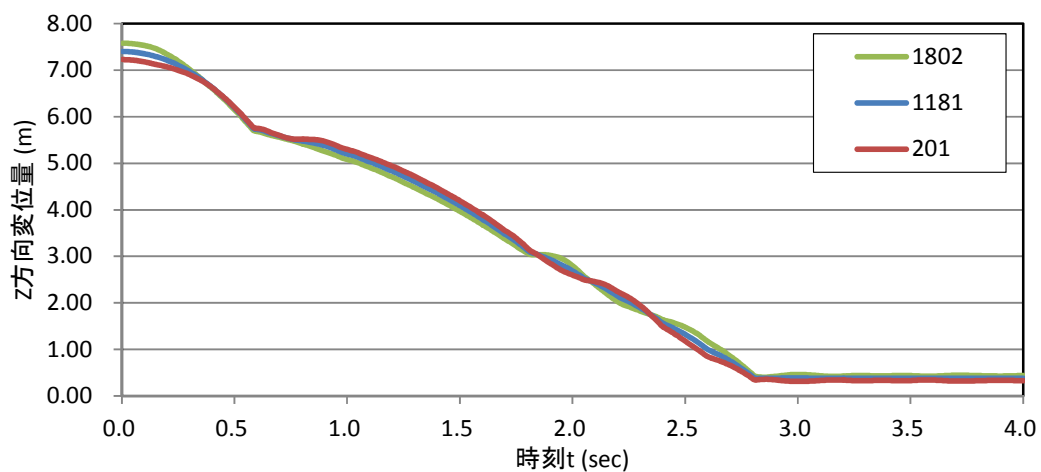


図 10.3.107 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

(b)岩塊の回転量の時刻歴

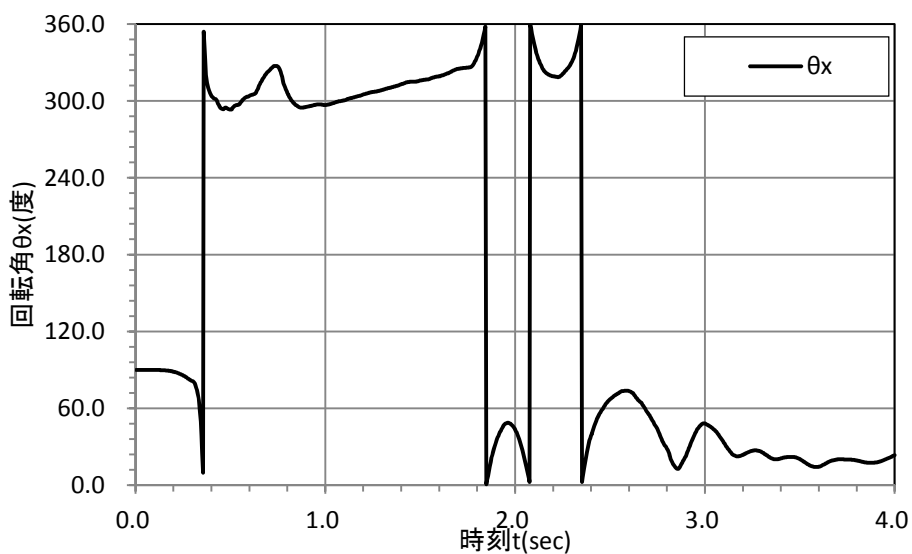


図 10.3.108 X 軸周りの回転角の時刻歴

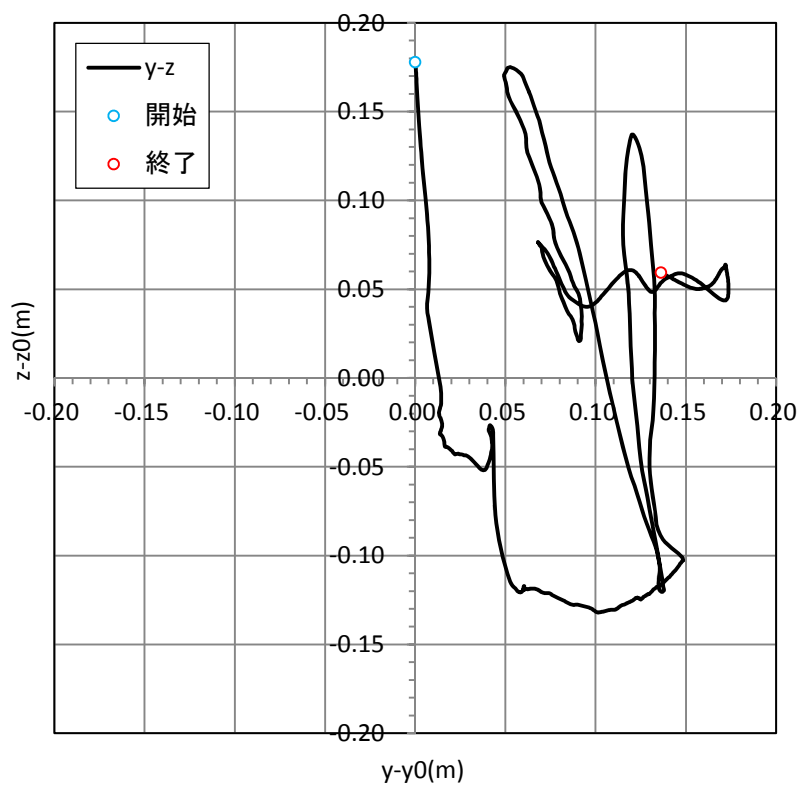


図 10.3.109 X 軸周りの回転の粒子の軌跡



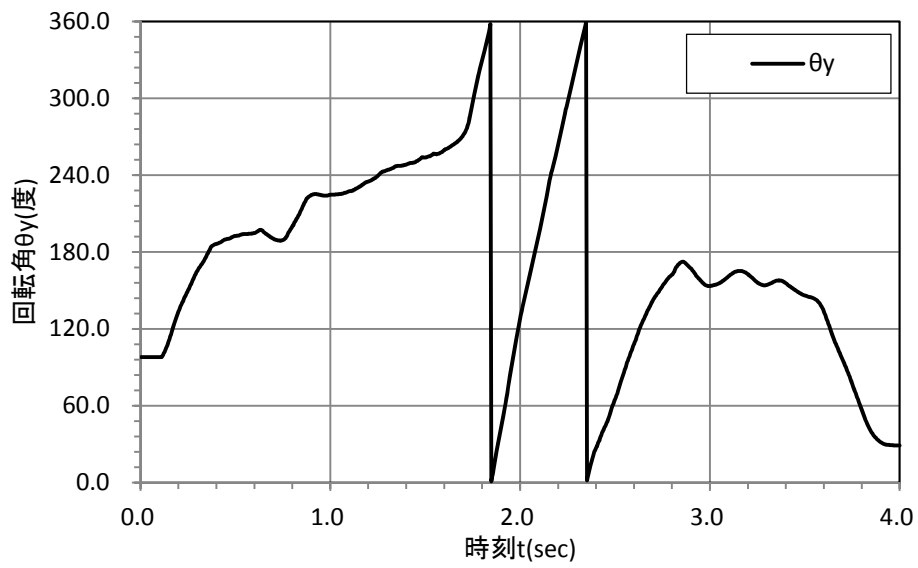


図 10.3.110 Y 軸周りの回転角の時刻歴

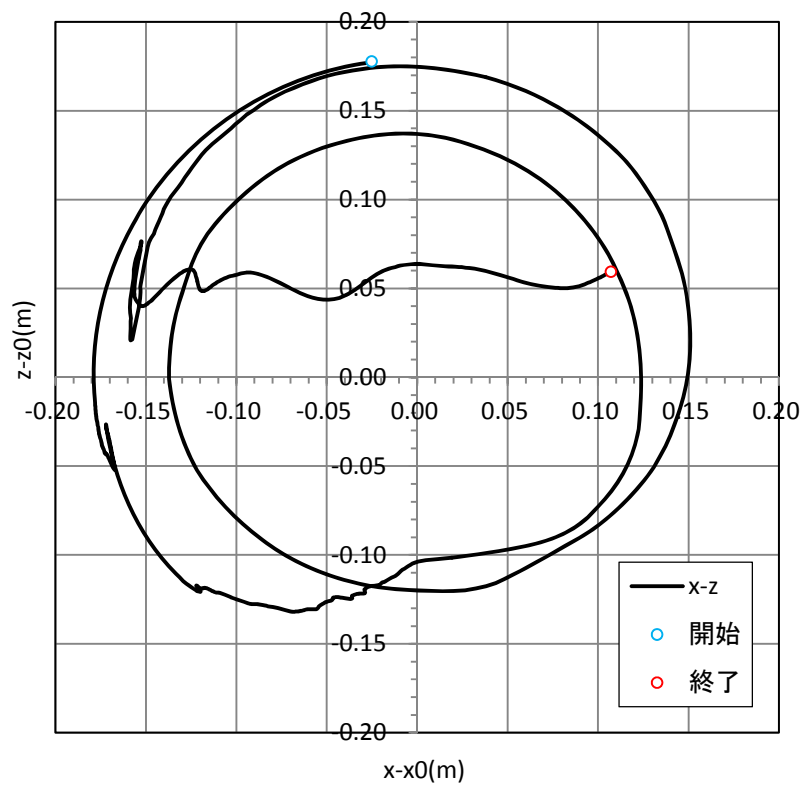


図 10.3.111 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

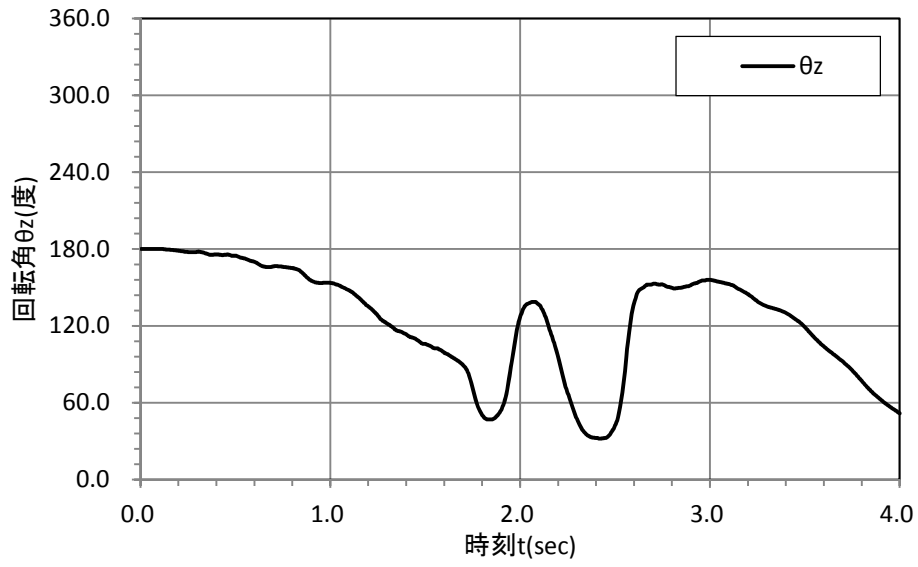


図 10.3.112 Z 軸周りの回転角の時刻歴

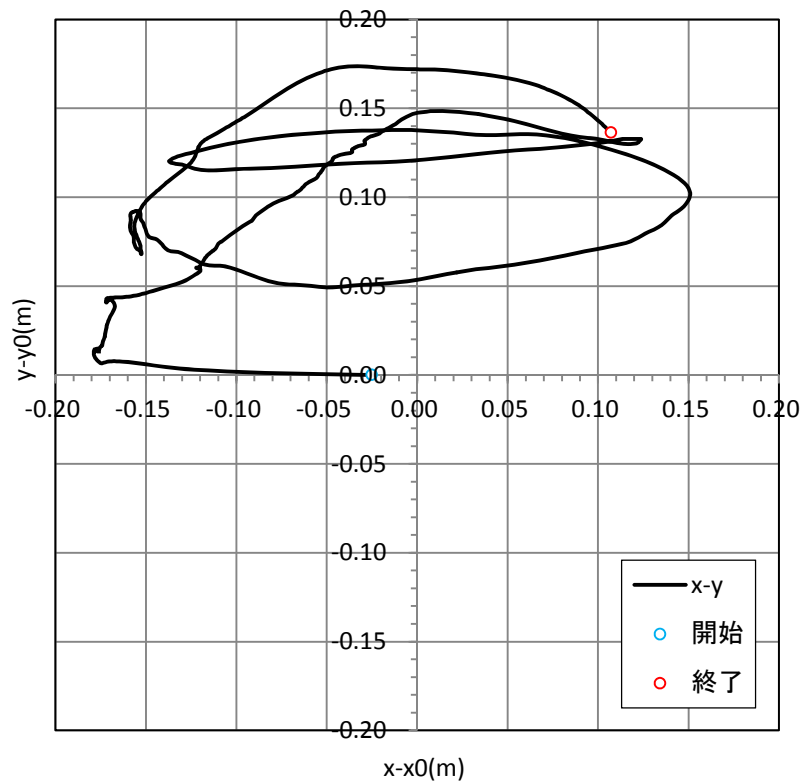


図 10.3.113 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

(c)岩塊の反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

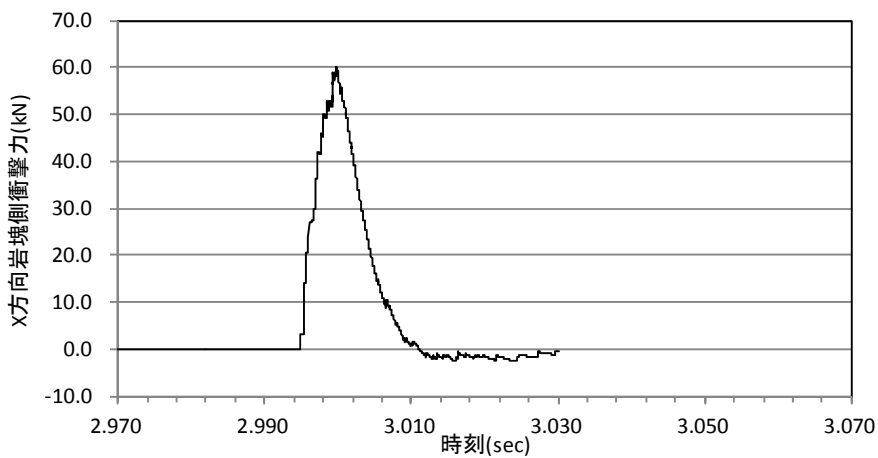


図 10.3.114 X方向(流下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

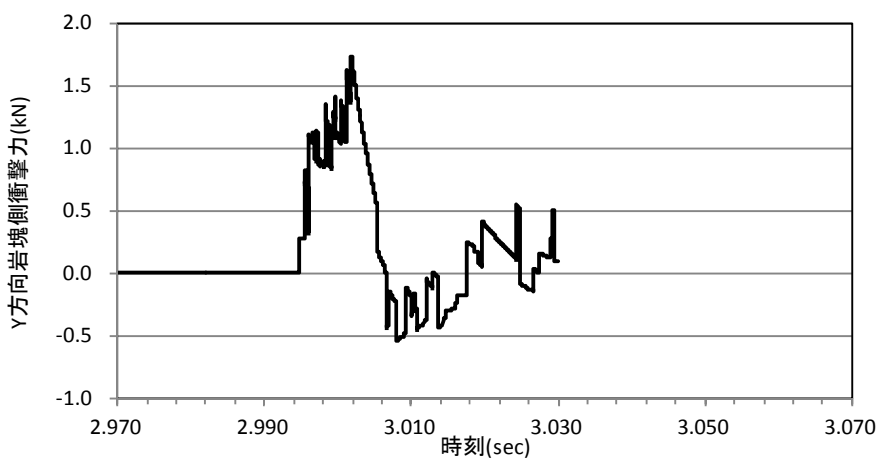


図 10.3.115 Y方向(流下直角方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

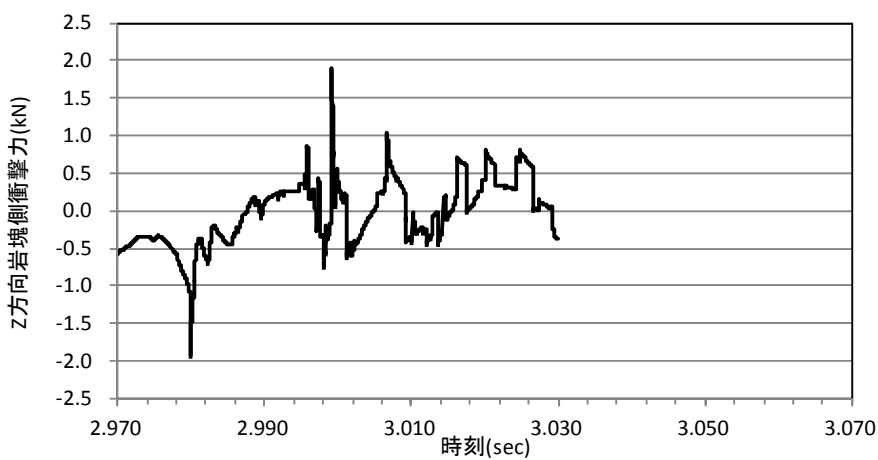


図 10.3.116 Z方向(上下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

• CASE2 板状 20cm

以下に出力粒子位置を示す。図の矢印は回転角を算出した際の粒子の位置と方向を示す。

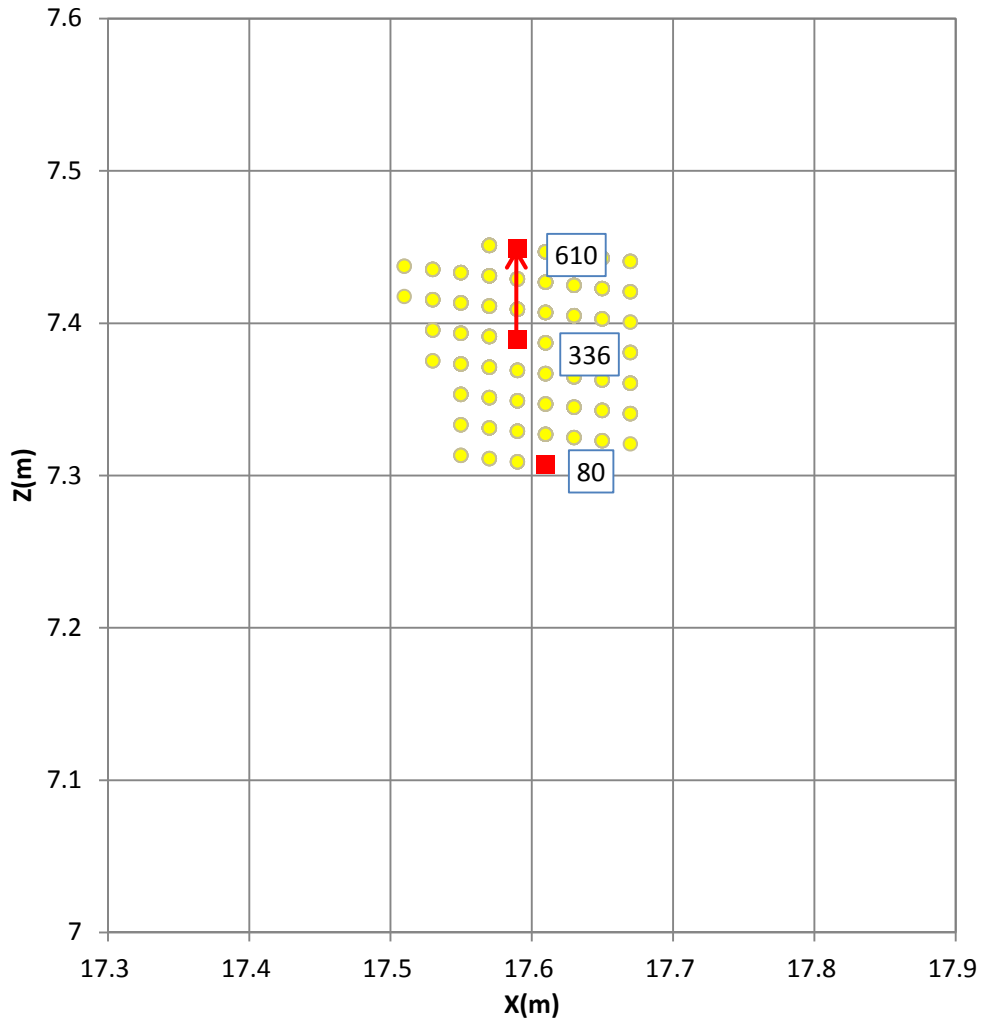


図 10.3.117 出力粒子位置

表 10.3.10 出力粒子一覧

粒子番号	X 座標(m)	Y 座標(m)	Z 座標(m)
610	17.59	2.51	7.449
336	17.59	2.49	7.389
80	17.61	2.49	7.3069

(a) 岩塊の転動距離の時刻歴

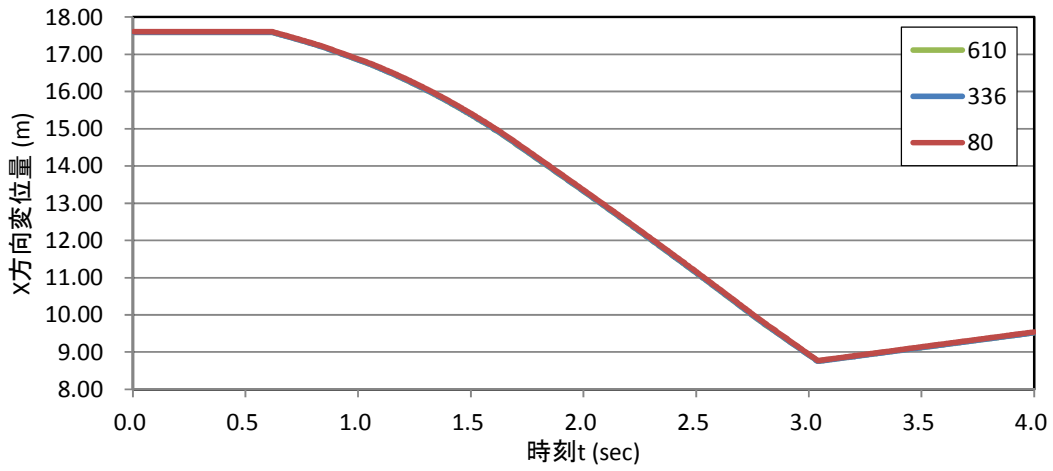


図 10.3.118 X 方向(流下方向)変位時刻歴

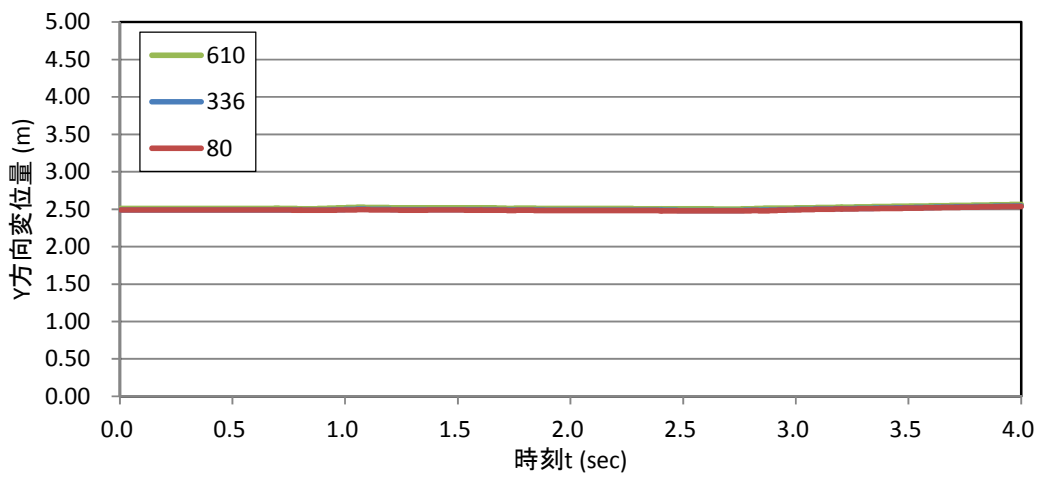


図 10.3.119 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

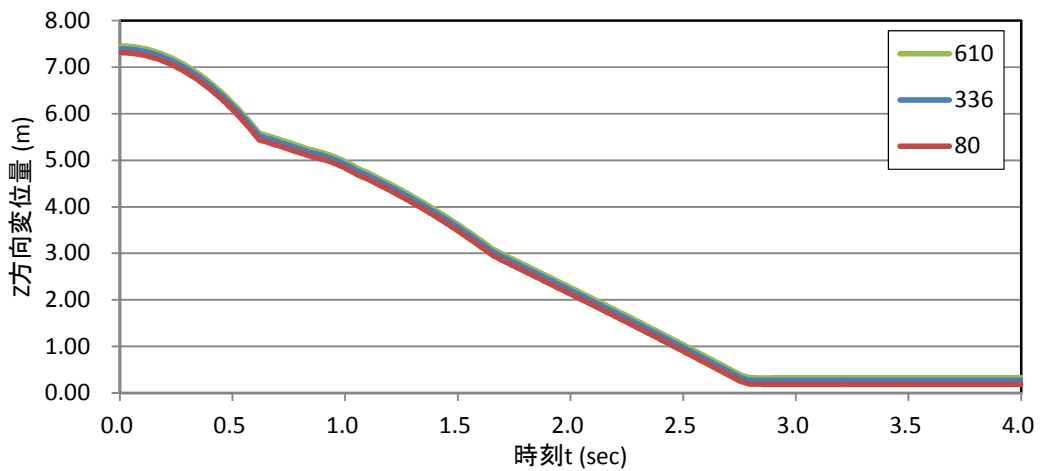


図 10.3.120 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

(b)岩塊の回転量の時刻歴

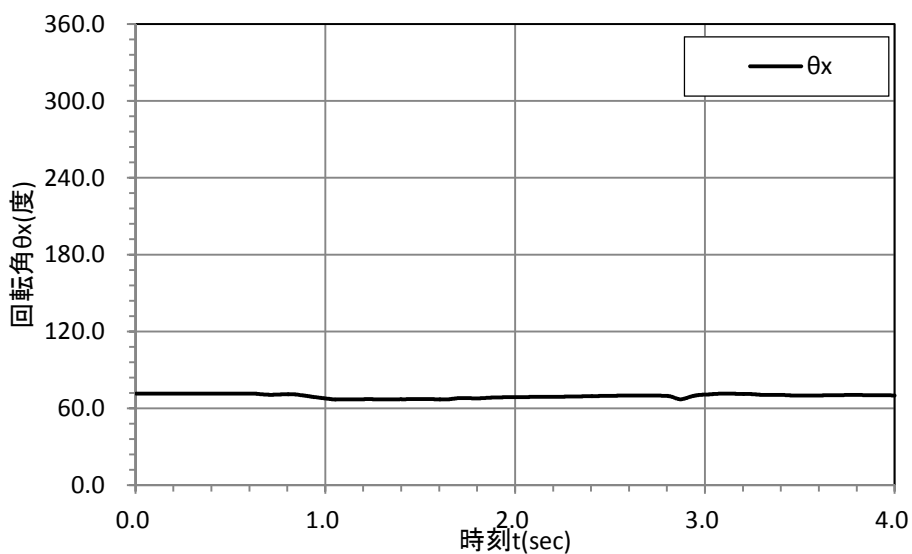


図 10.3.121 X 軸周りの回転角の時刻歴

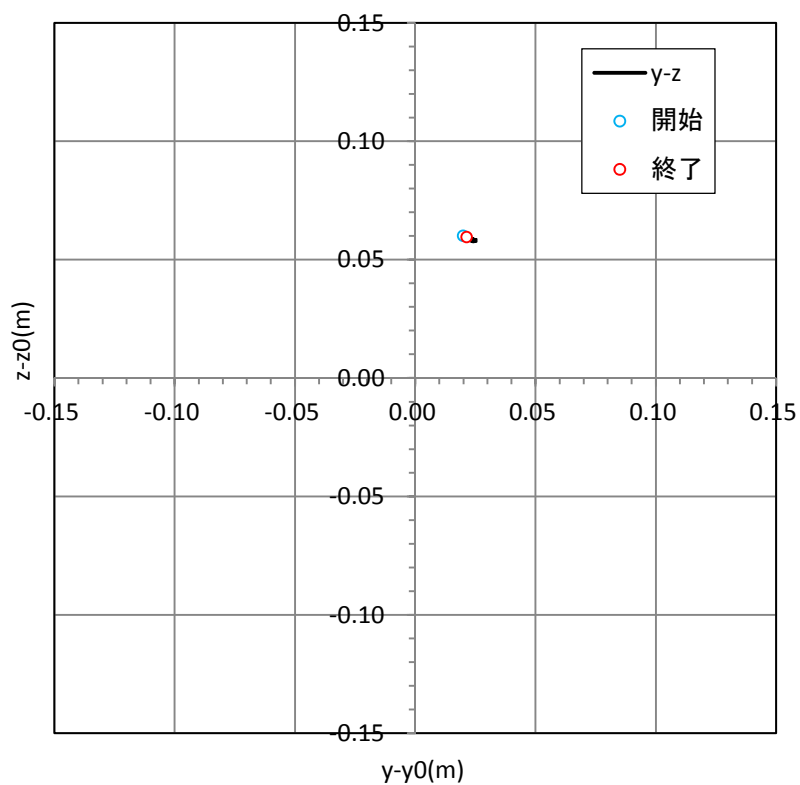


図 10.3.122 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

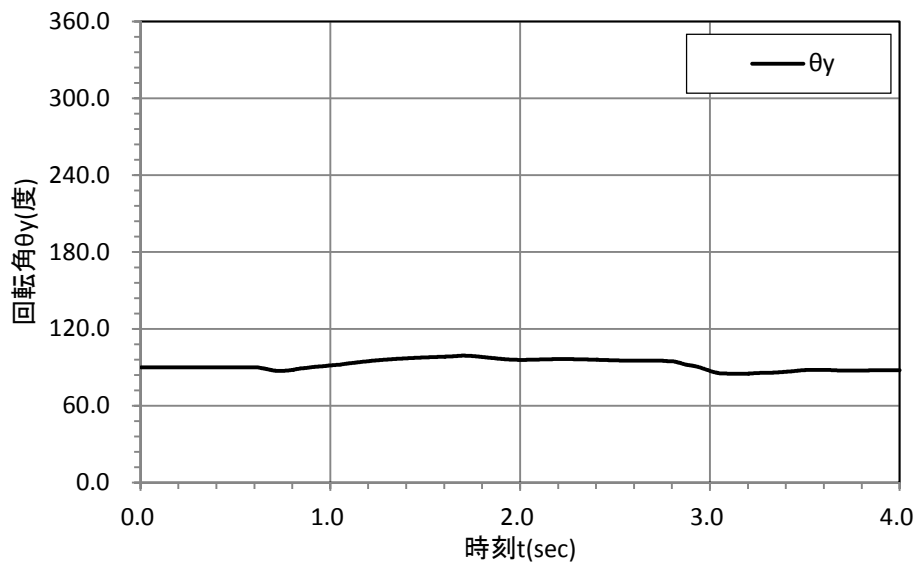


図 10.3.123 Y 軸周りの回転角の時刻歴

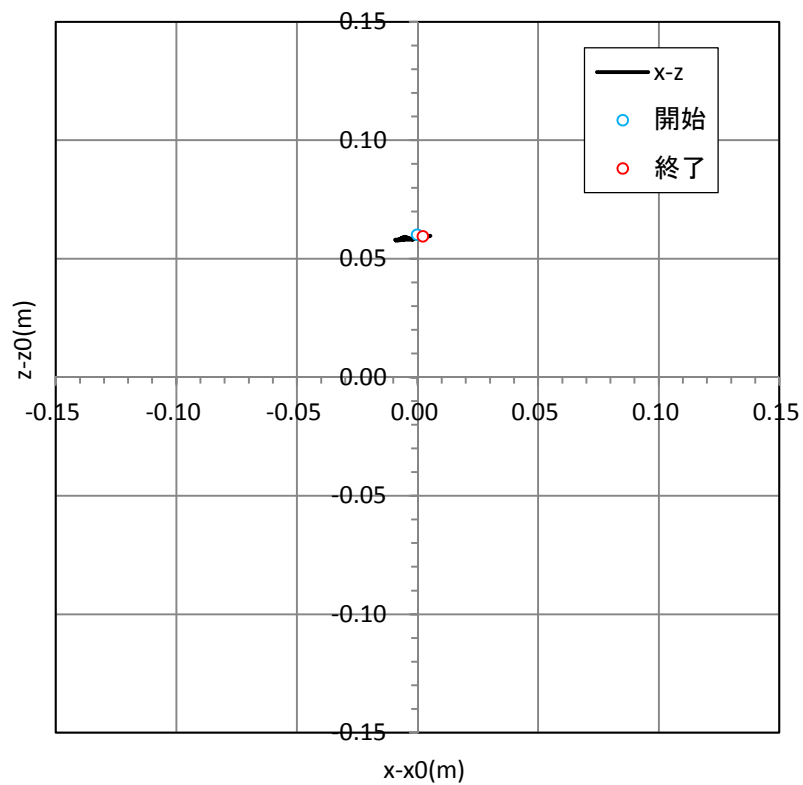


図 10.3.124 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

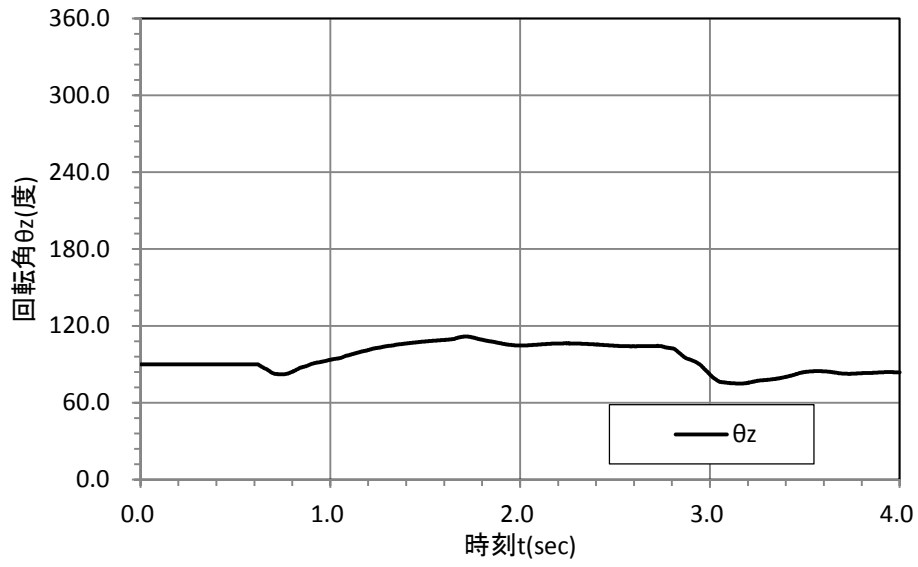


図 10.3.125 Z 軸周りの回転角の時刻歴

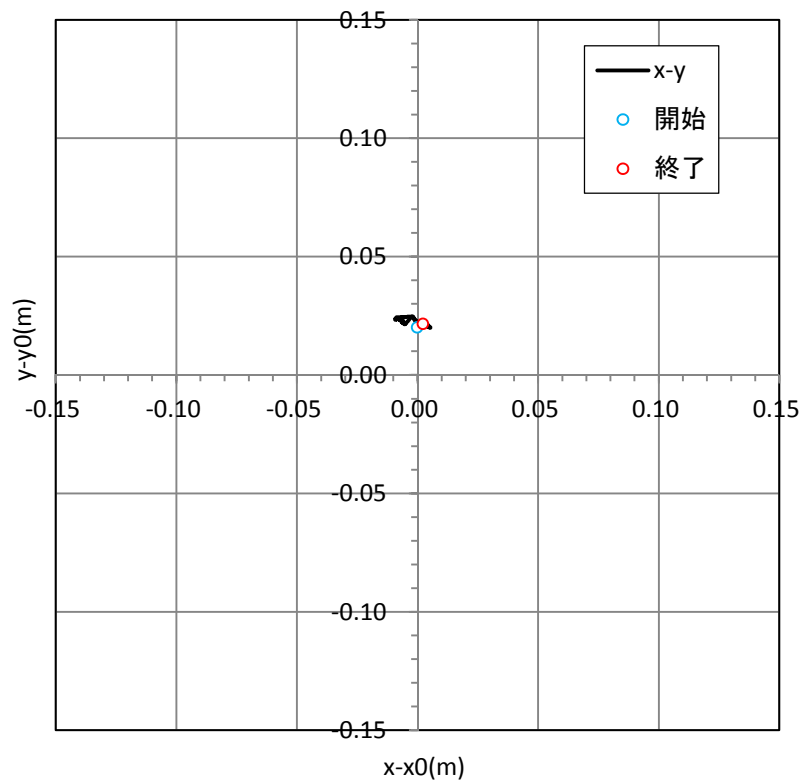


図 10.3.126 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡



(c)岩塊の反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

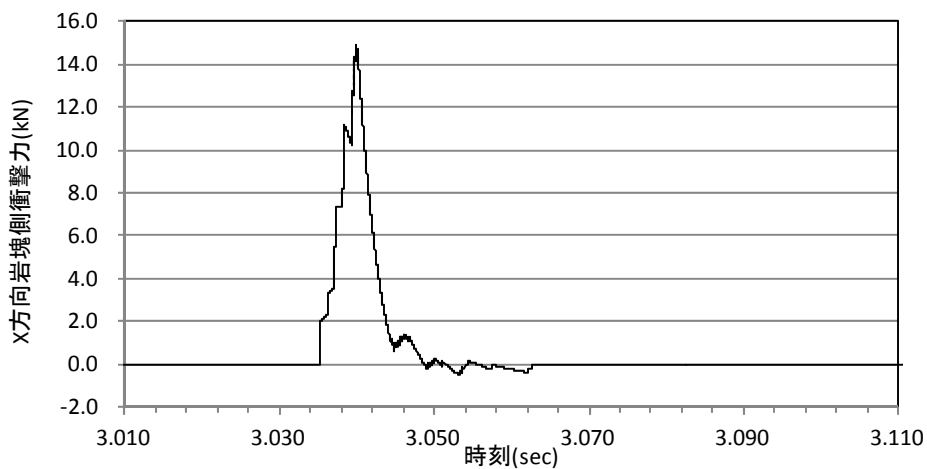


図 10.3.127 X方向(流下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

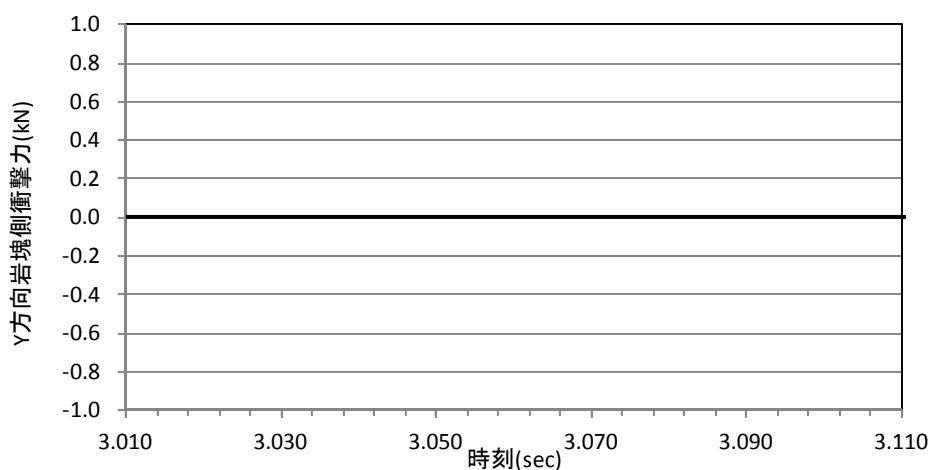


図 10.3.128 Y方向(流下直角方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

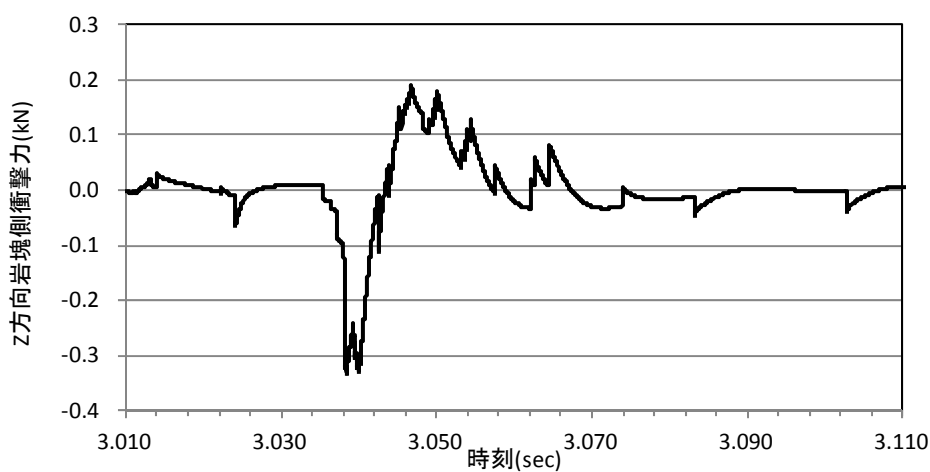


図 10.3.129 Z方向(上下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

・CASE2 板状 40cm

以下に出力粒子位置を示す。図の矢印は回転角を算出した際の粒子の位置と方向を示す。

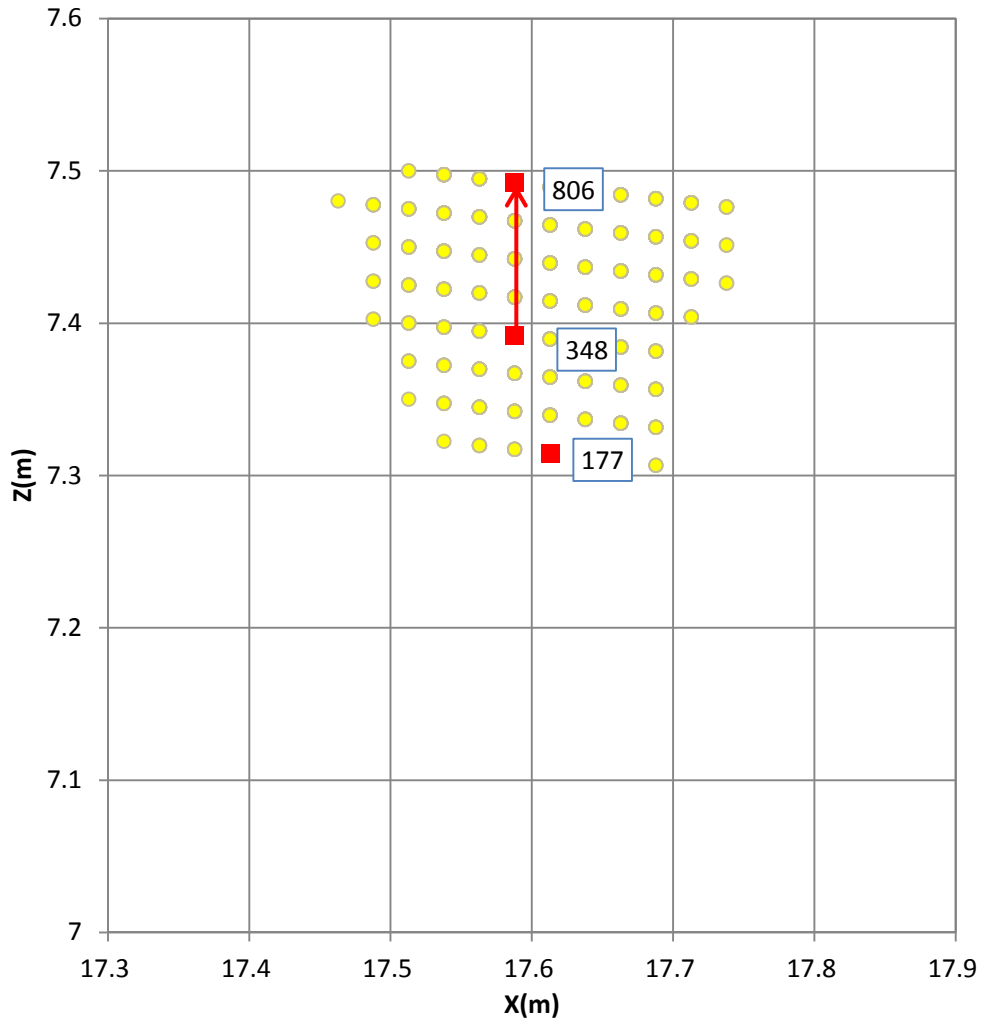


図 10.3.130 出力粒子位置

表 10.3.11 出力粒子一覧

粒子番号	X 座標(m)	Y 座標 (m)	Z 座標(m)
806	17.588	2.4875	7.4921
348	17.588	2.4875	7.3921
177	17.613	2.5125	7.3145

(a) 岩塊の転動距離の時刻歴

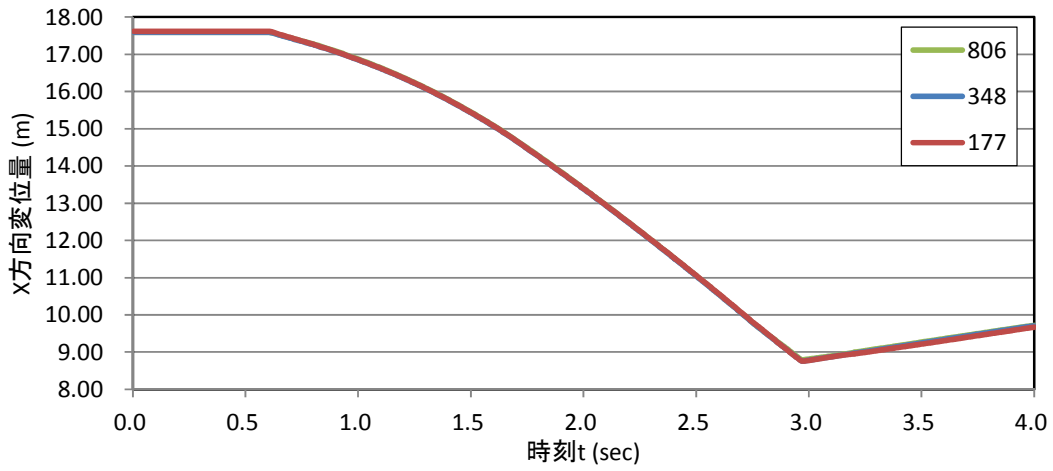


図 10.3.131 X 方向(流下方向)変位時刻歴

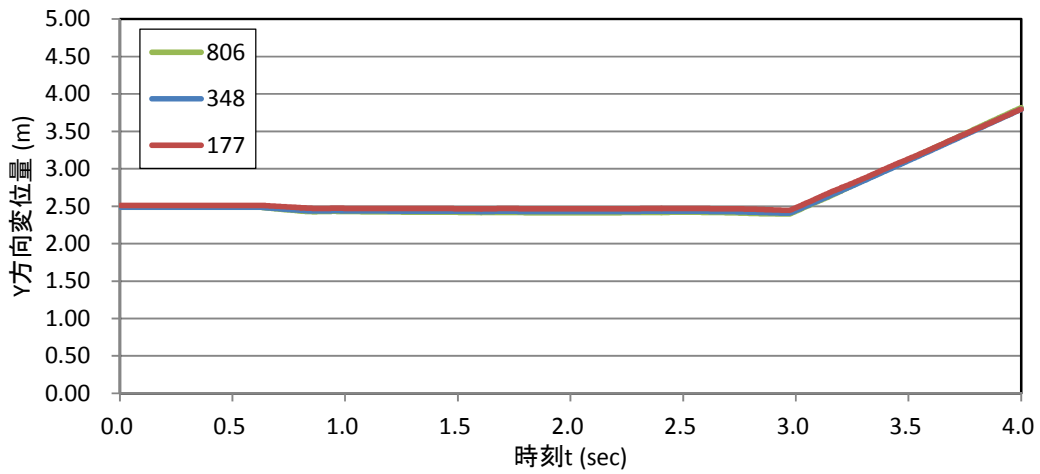


図 10.3.132 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

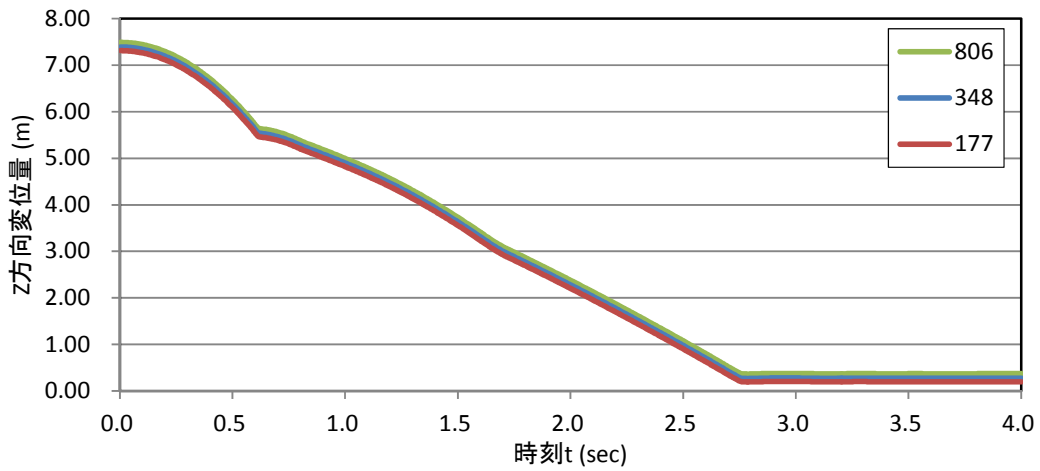


図 10.3.133 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

(b)岩塊の回転量の時刻歴

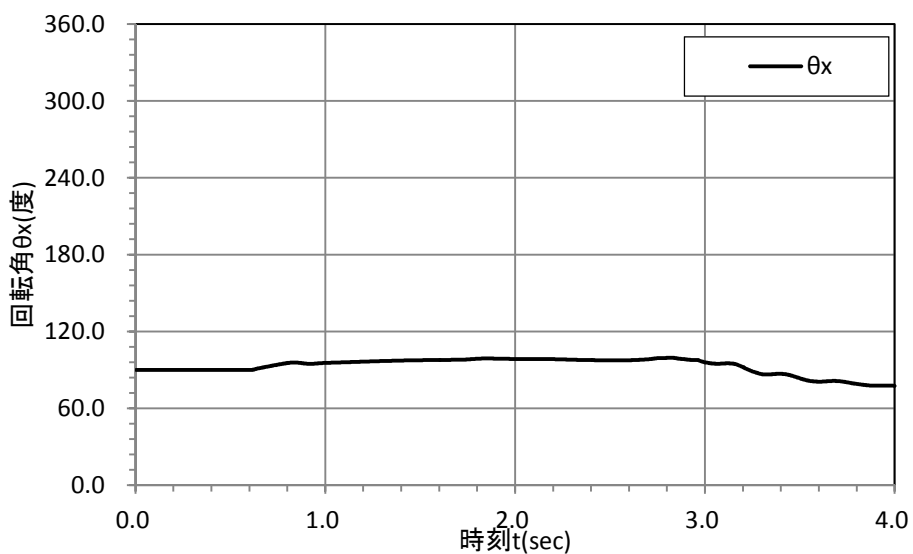


図 10.3.134 X 軸周りの回転角の時刻歴

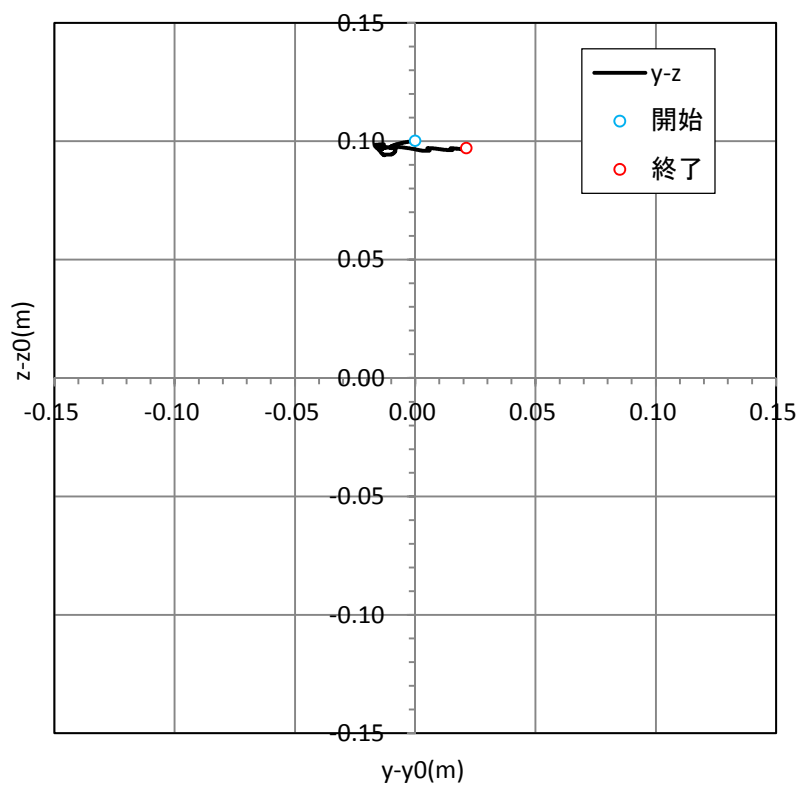


図 10.3.135 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

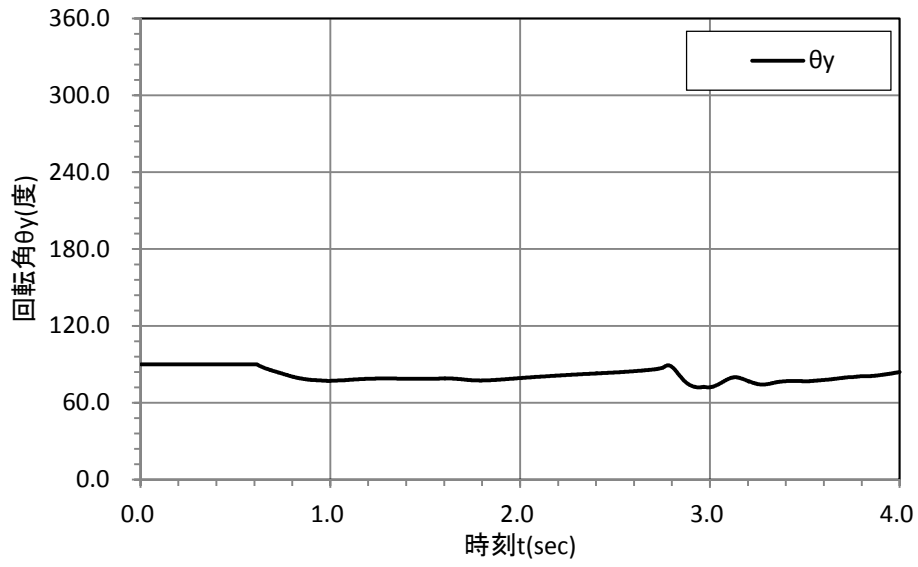


図 10.3.136 Y 軸周りの回転角の時刻歴

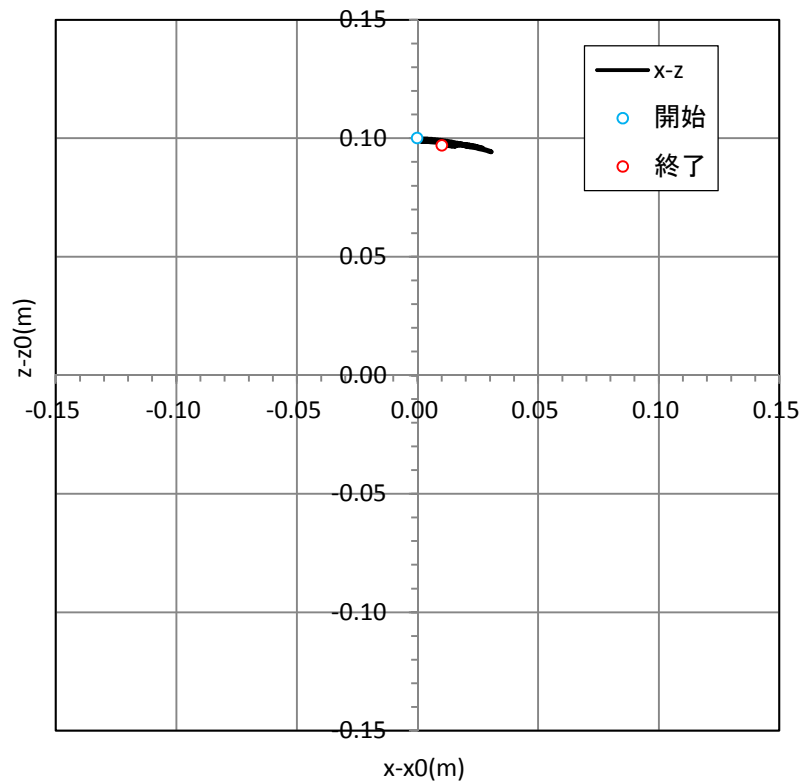


図 10.3.137 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

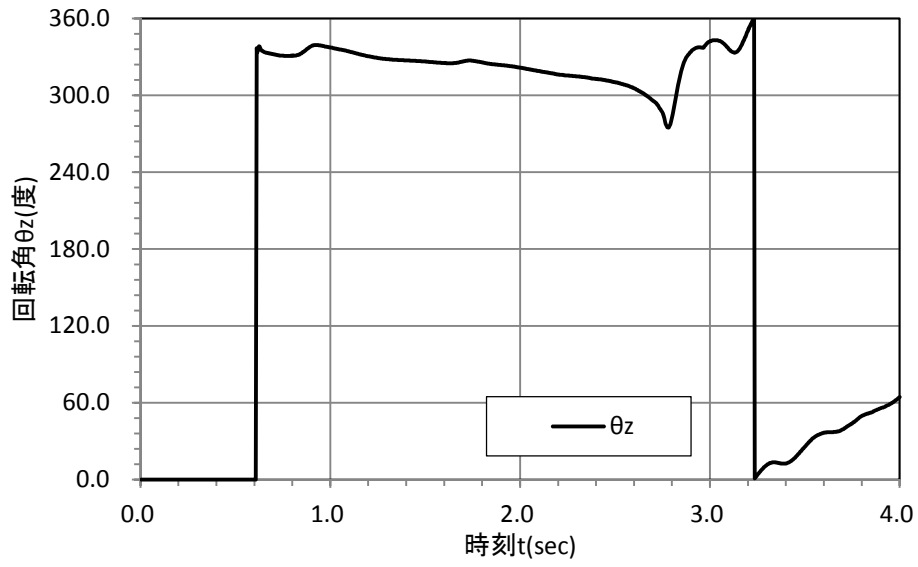


図 10.3.138 Z 軸周りの回転角の時刻歴

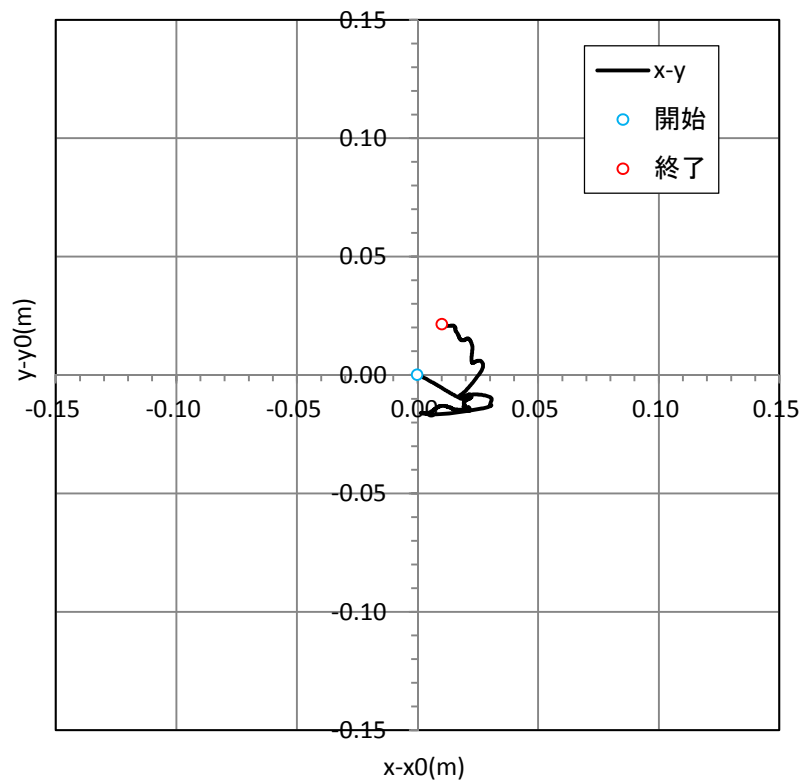


図 10.3.139 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

(c)岩塊の反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

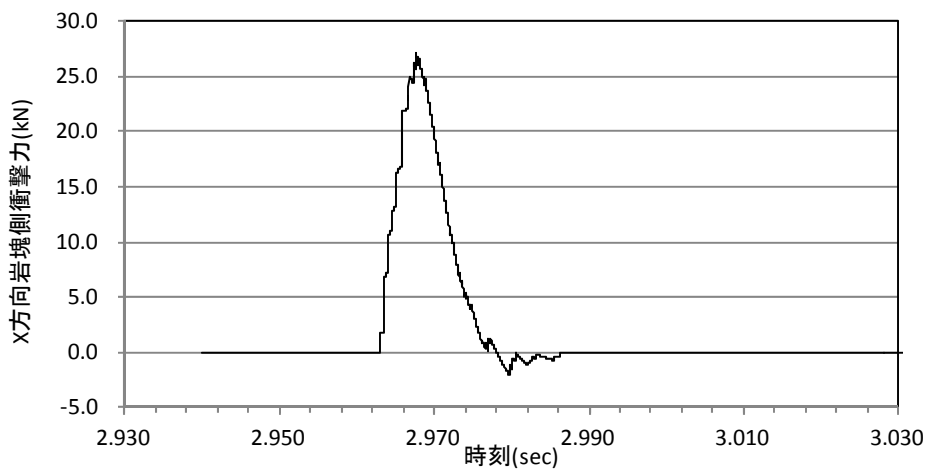


図 10.3.140 X方向(流下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

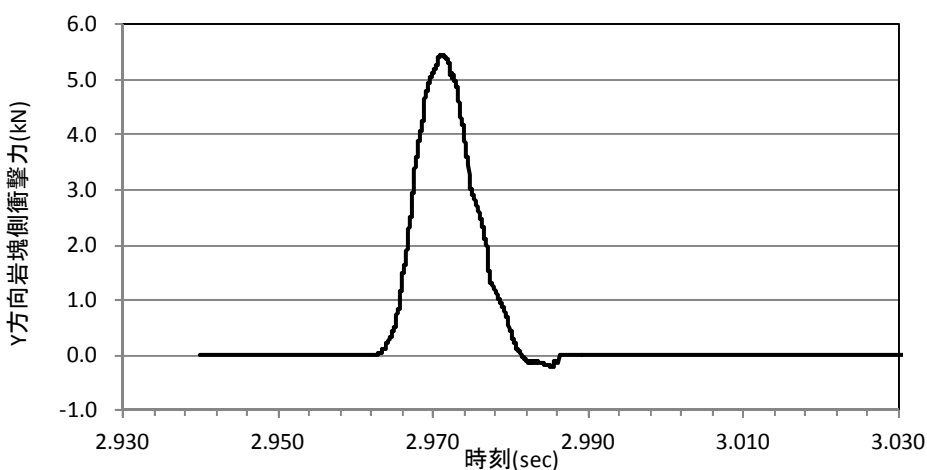


図 10.3.141 Y方向(流下直角方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

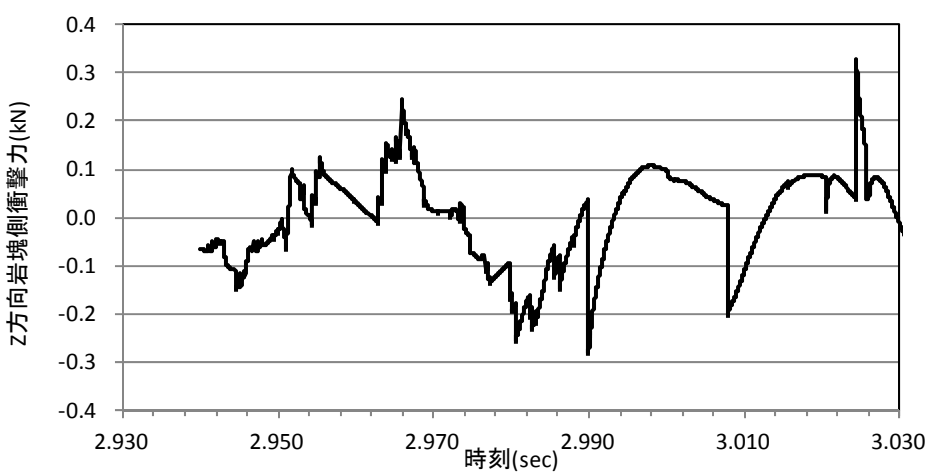


図 10.3.142 Z方向(上下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

・ CASE3 塊状 20cm

以下に出力粒子位置を示す。図の矢印は回転角を算出した際の粒子の位置と方向を示す。

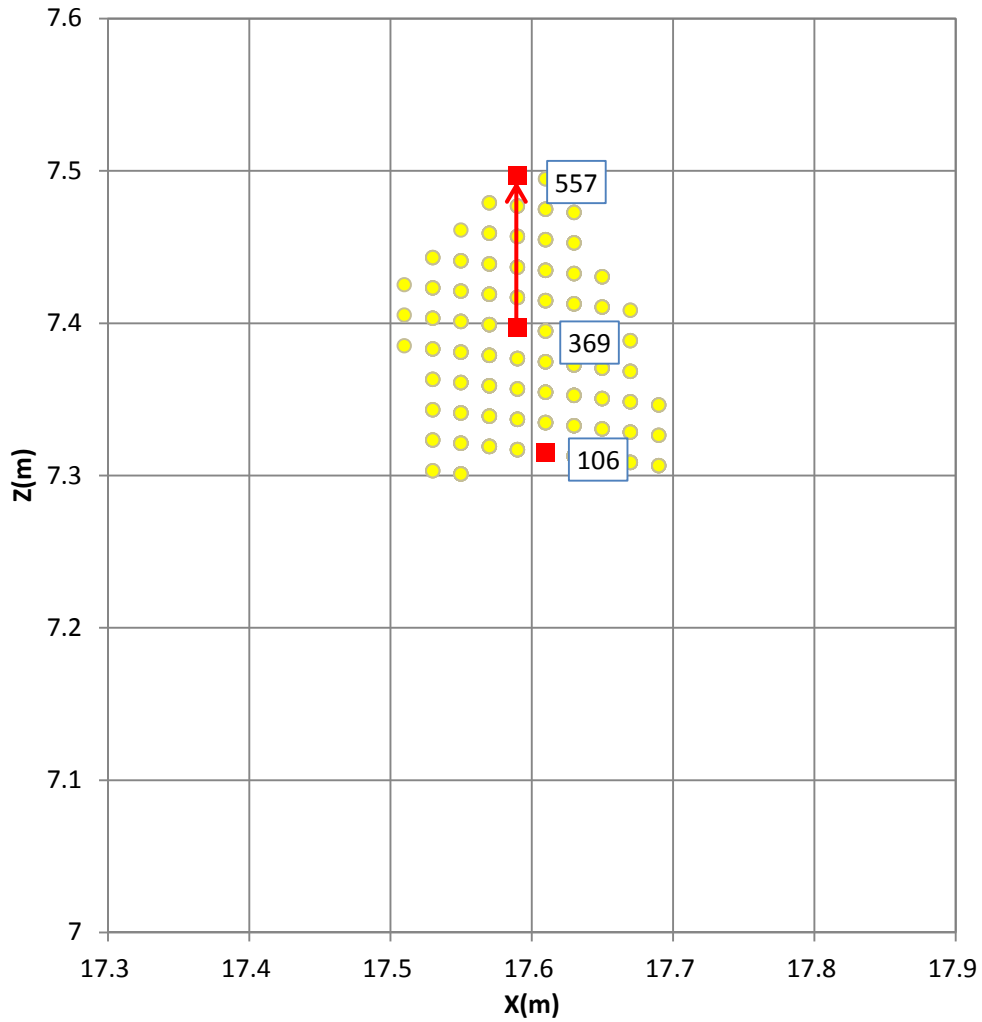


図 10.3.143 出力粒子位置

表 10.3.12 出力粒子一覧

粒子番号	X 座標(m)	Y 座標 (m)	Z 座標(m)
557	17.59	2.49	7.4968
369	17.59	2.49	7.3968
106	17.61	2.49	7.3147



(a) 岩塊の転動距離の時刻歴

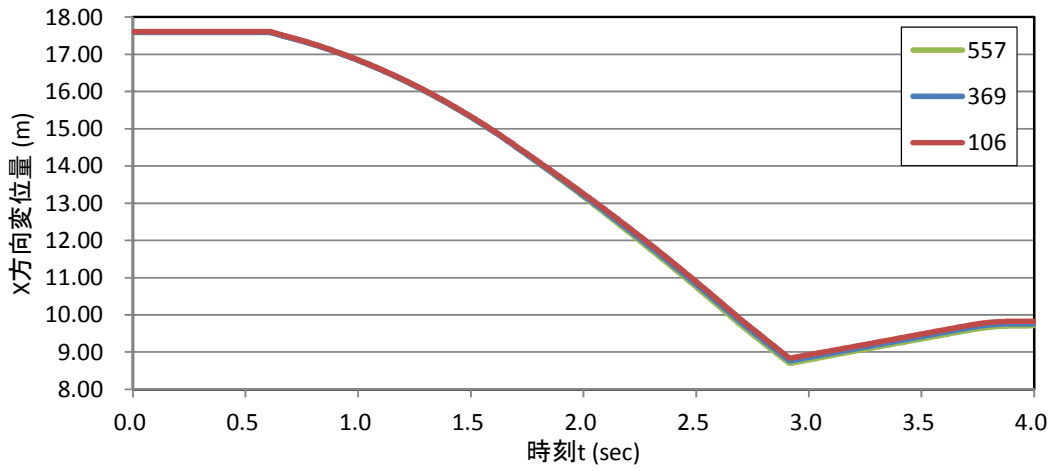


図 10.3.144 X 方向(流下方向)変位時刻歴

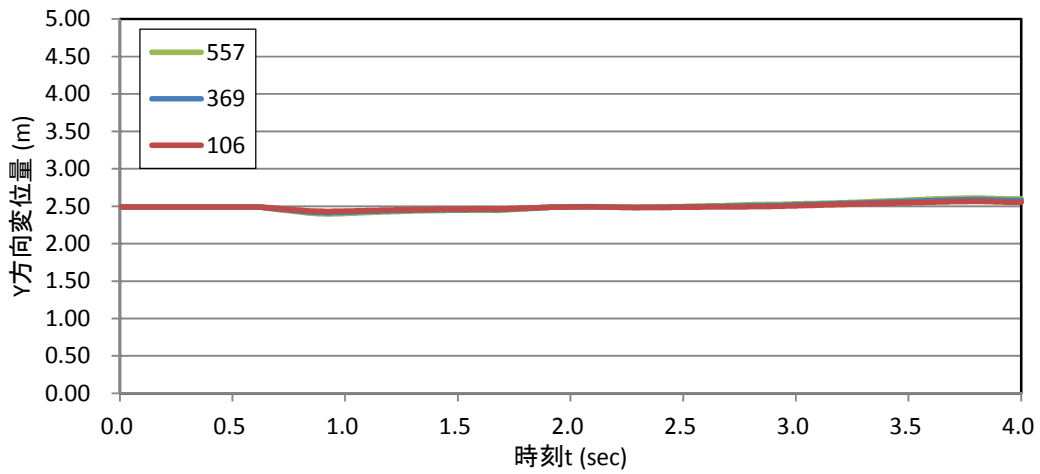


図 10.3.145 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

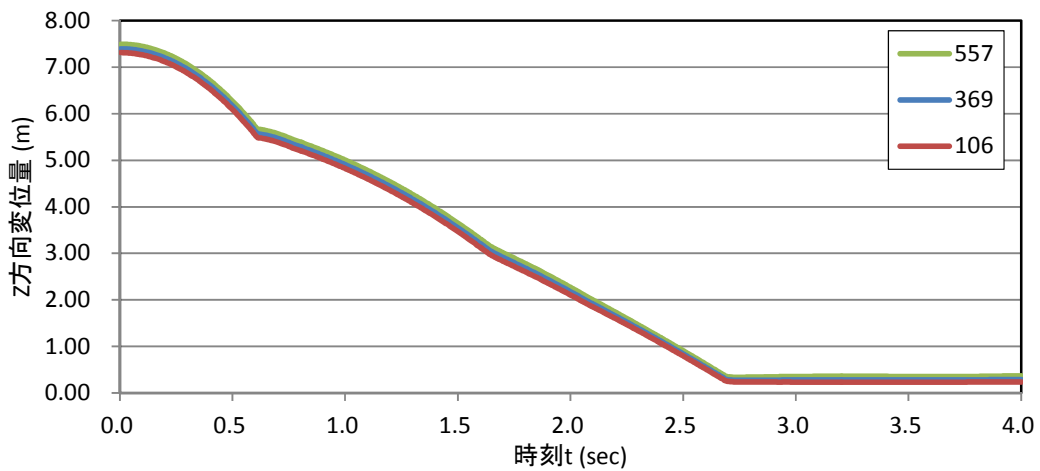


図 10.3.146 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

(b)岩塊の回転量の時刻歴

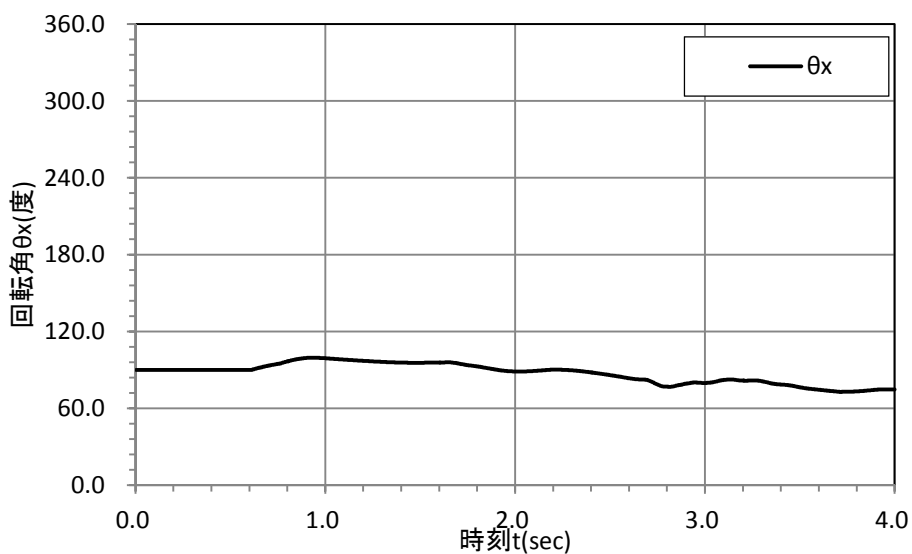


図 10.3.147 X 軸周りの回転角の時刻歴

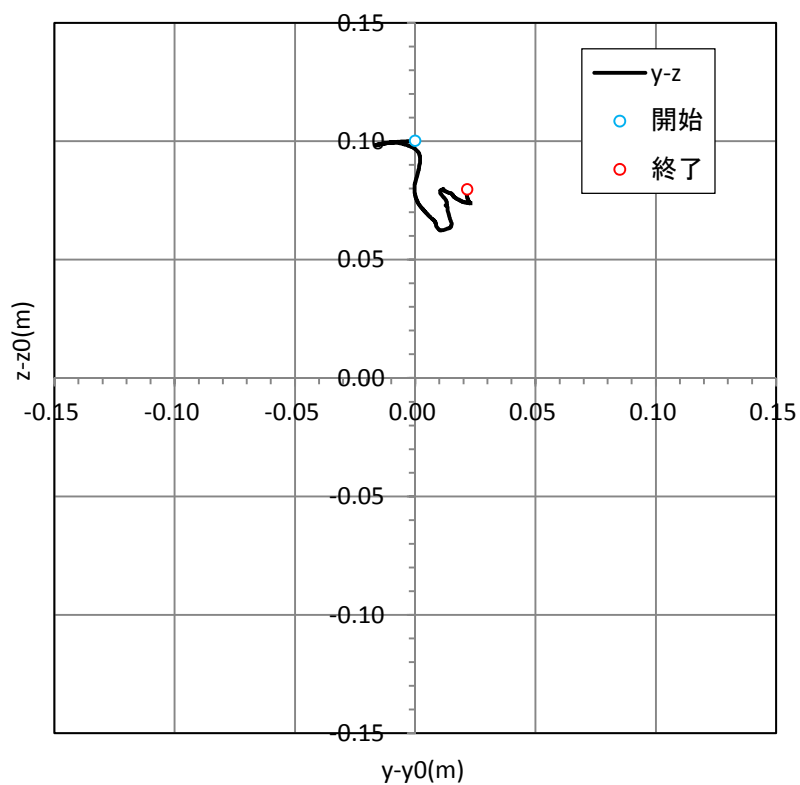


図 10.3.148 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

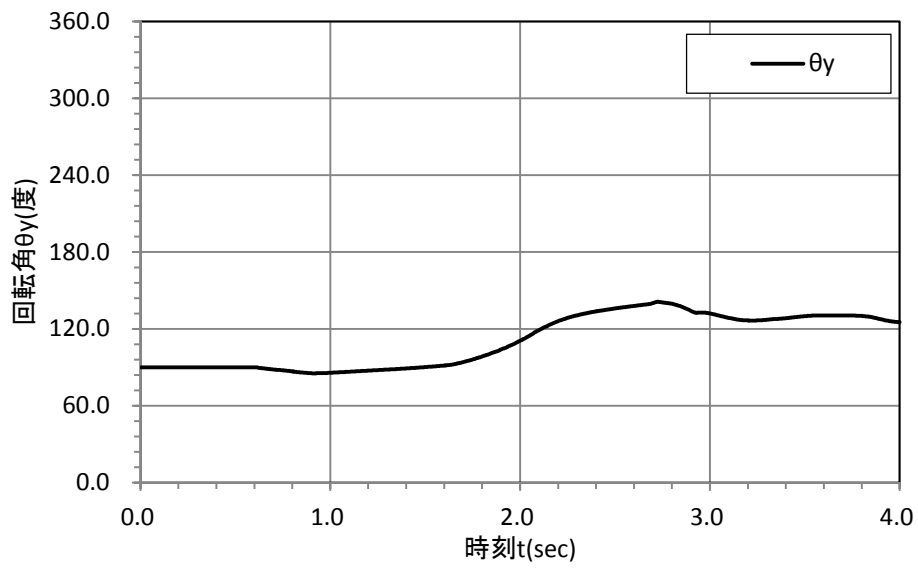


図 10.3.149 Y 軸周りの回転角の時刻歴

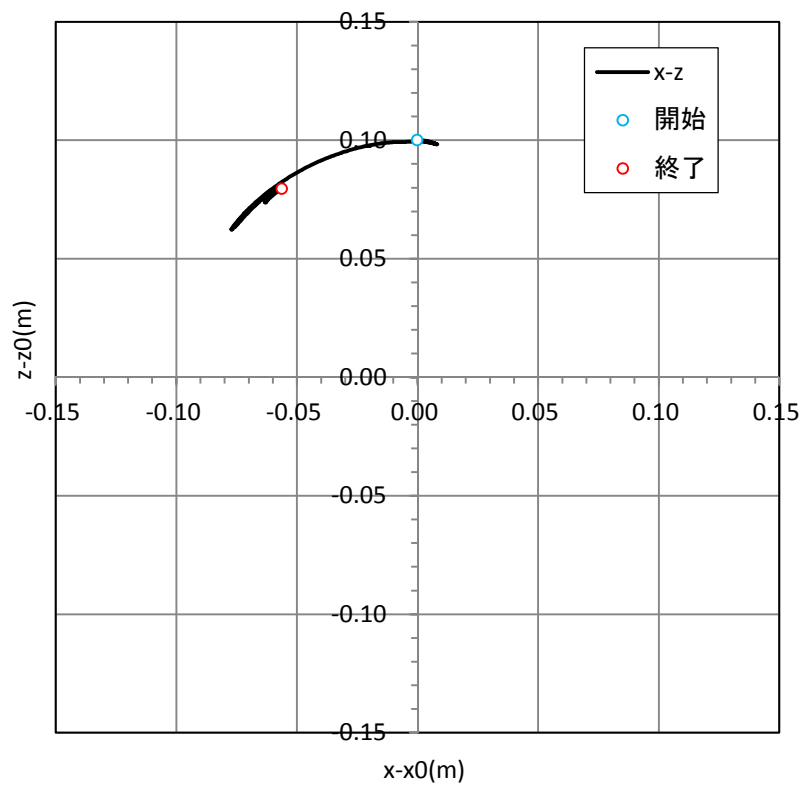


図 10.3.150 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

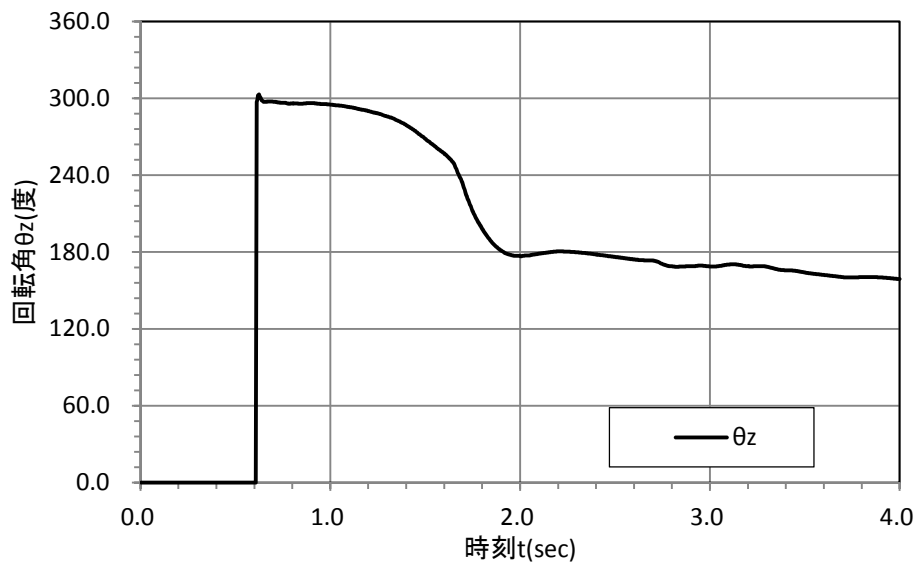


図 10.3.151 Z 軸周りの回転角の時刻歴

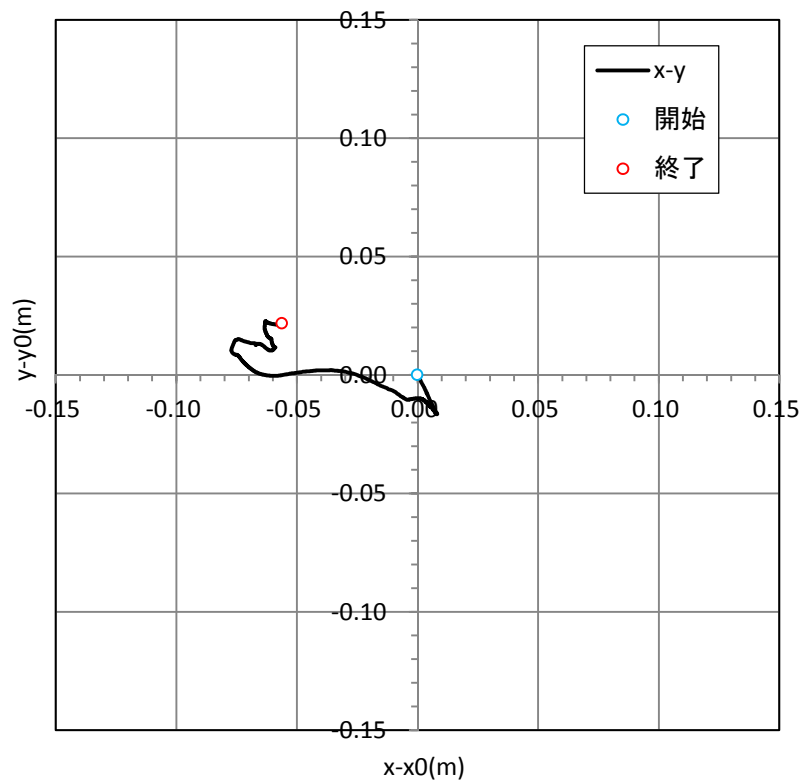


図 10.3.152 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

(c)岩塊の反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

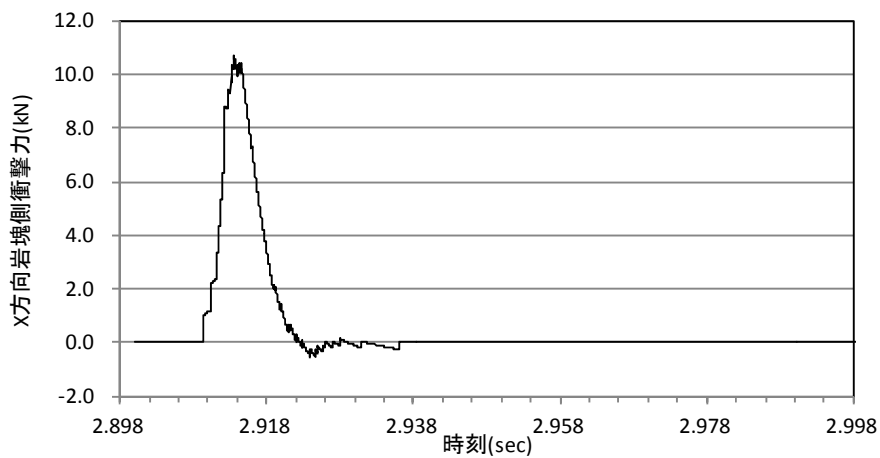


図 10.3.153 X方向(流下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

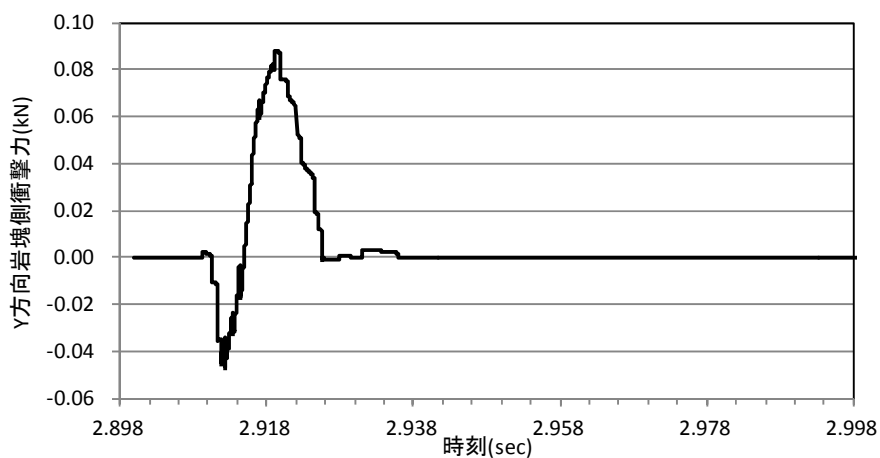


図 10.3.154 Y方向(流下直角方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

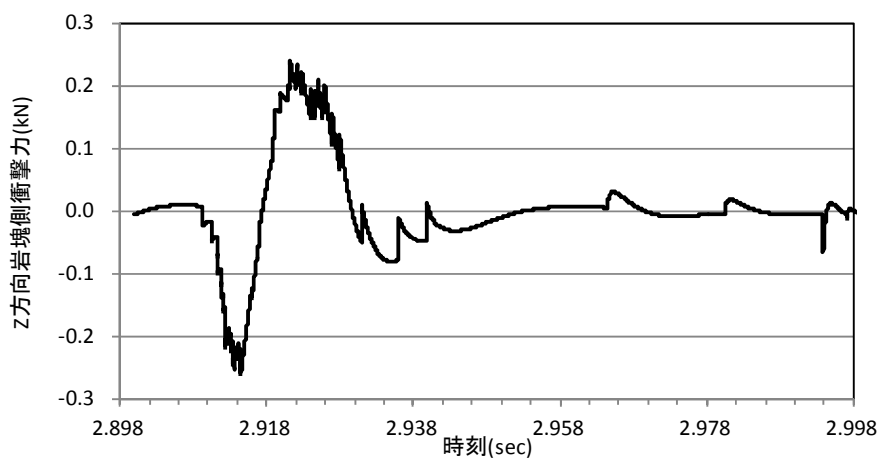


図 10.3.155 Z方向(上下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

• CASE3 塊状 40cm

以下に出力粒子位置を示す。図の矢印は回転角を算出した際の粒子の位置と方向を示す。

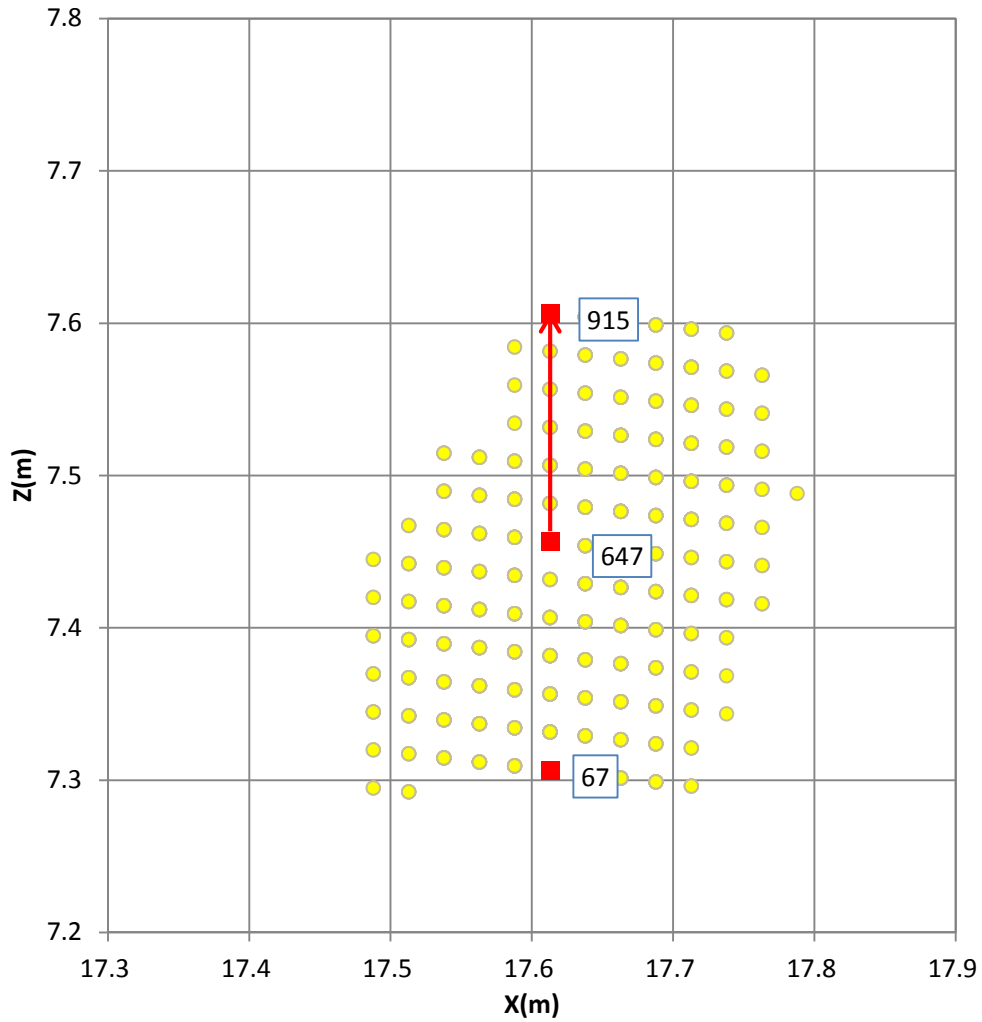


図 10.3.156 出力粒子位置

表 10.3.13 出力粒子一覧

粒子番号	X 座標(m)	Y 座標(m)	Z 座標(m)
915	17.613	2.4875	7.6066
647	17.613	2.4875	7.4566
67	17.613	2.5125	7.3066

(a) 岩塊の転動距離の時刻歴

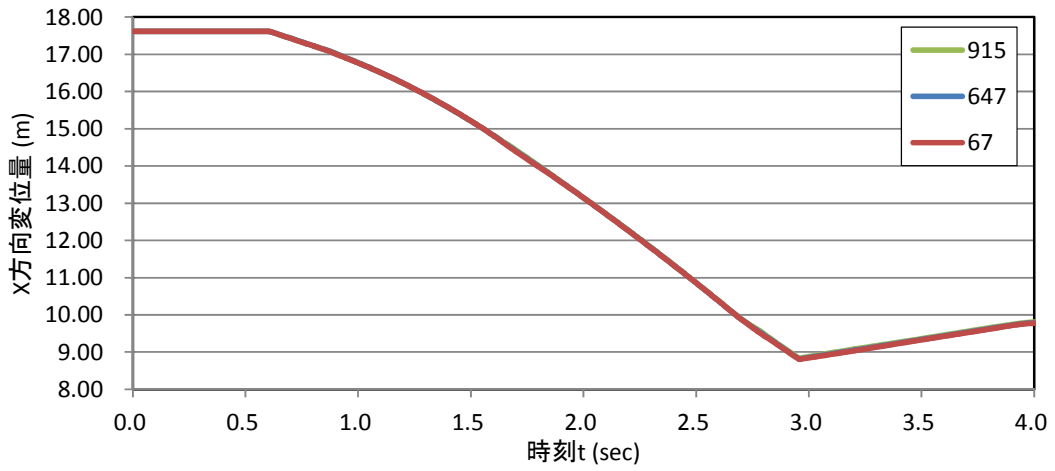


図 10.3.157 X 方向(流下方向)変位時刻歴

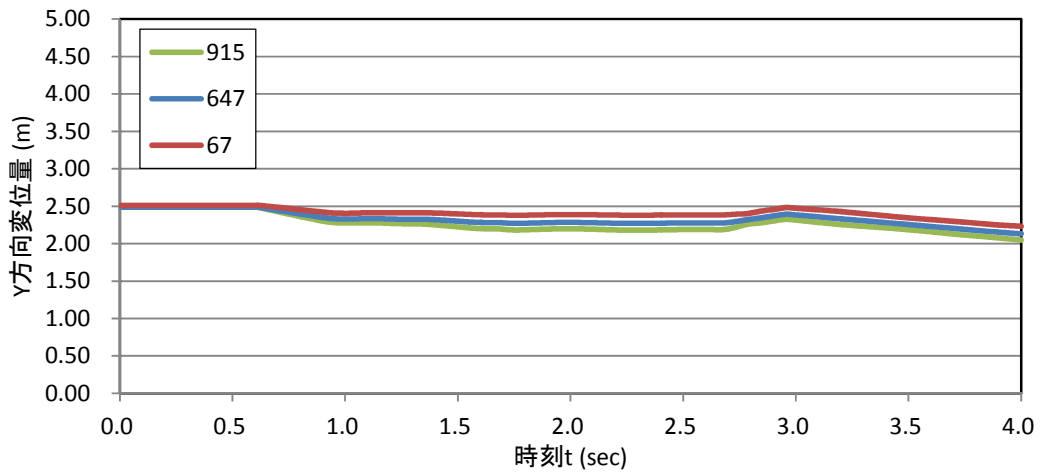


図 10.3.158 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

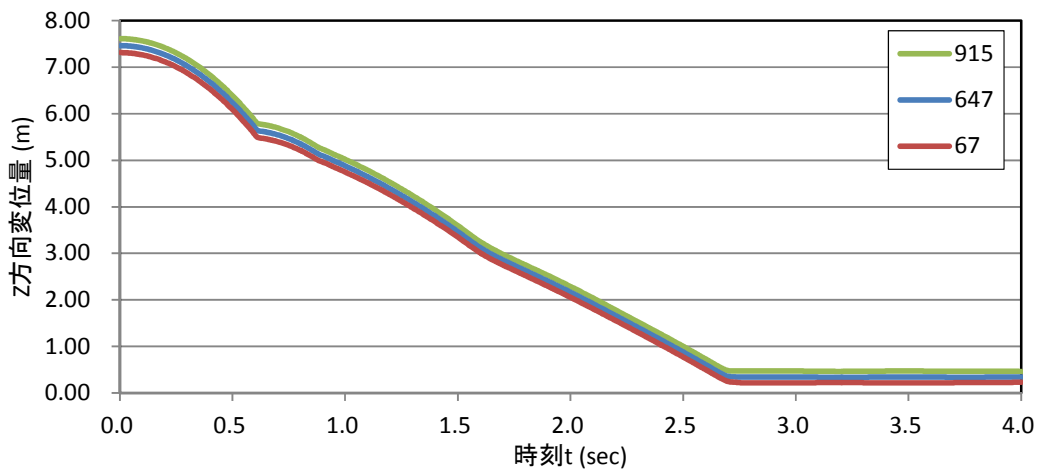


図 10.3.159 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

(b)岩塊の回転量の時刻歴

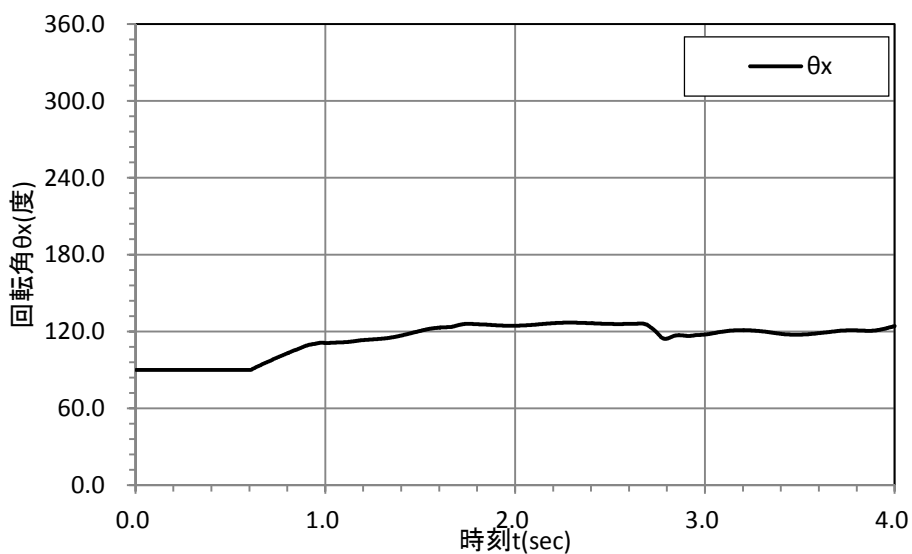


図 10.3.160 X 軸周りの回転角の時刻歴

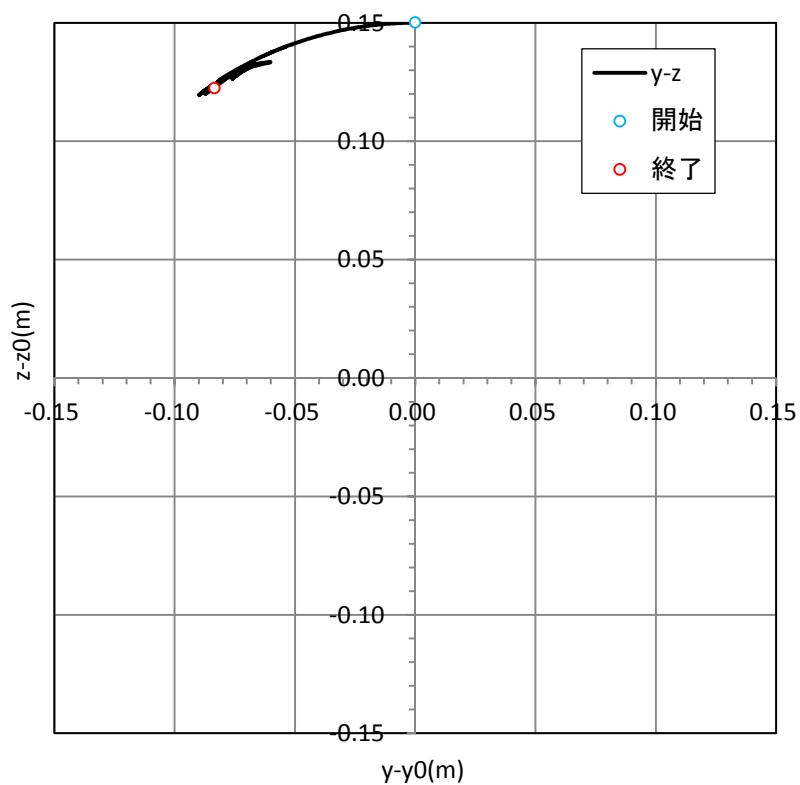


図 10.3.161 X 軸周りの回転の粒子の軌跡



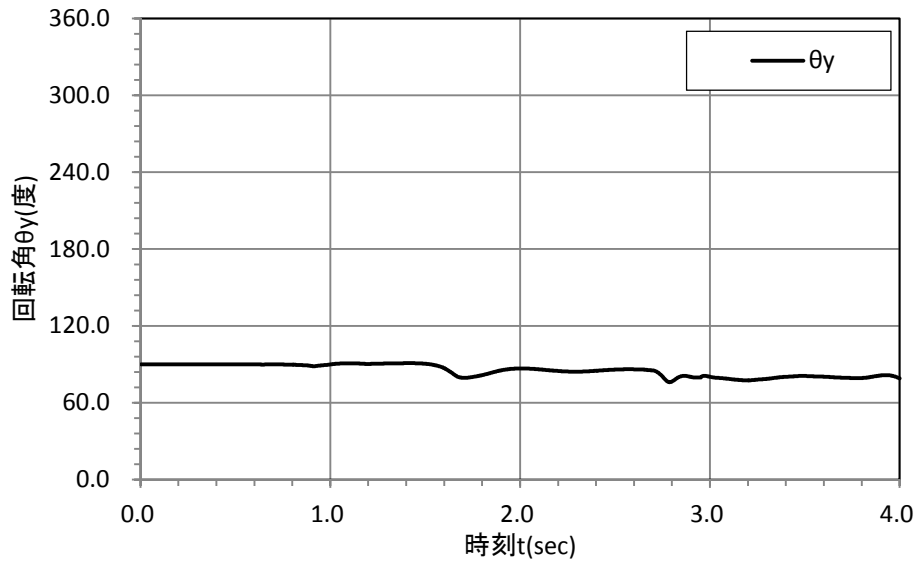


図 10.3.162 Y 軸周りの回転角の時刻歴

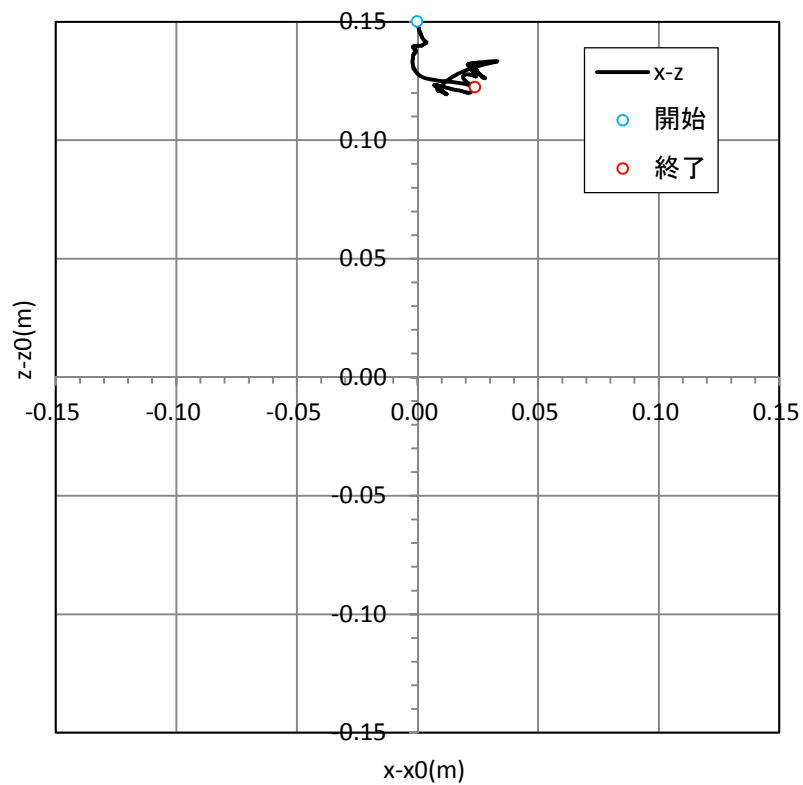


図 10.3.163 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

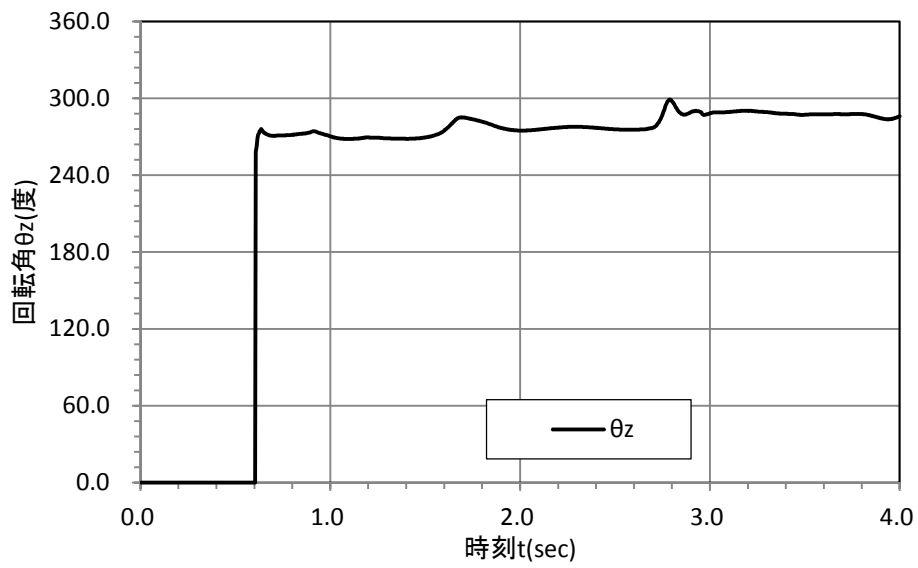


図 10.3.164 Z 軸周りの回転角の時刻歴

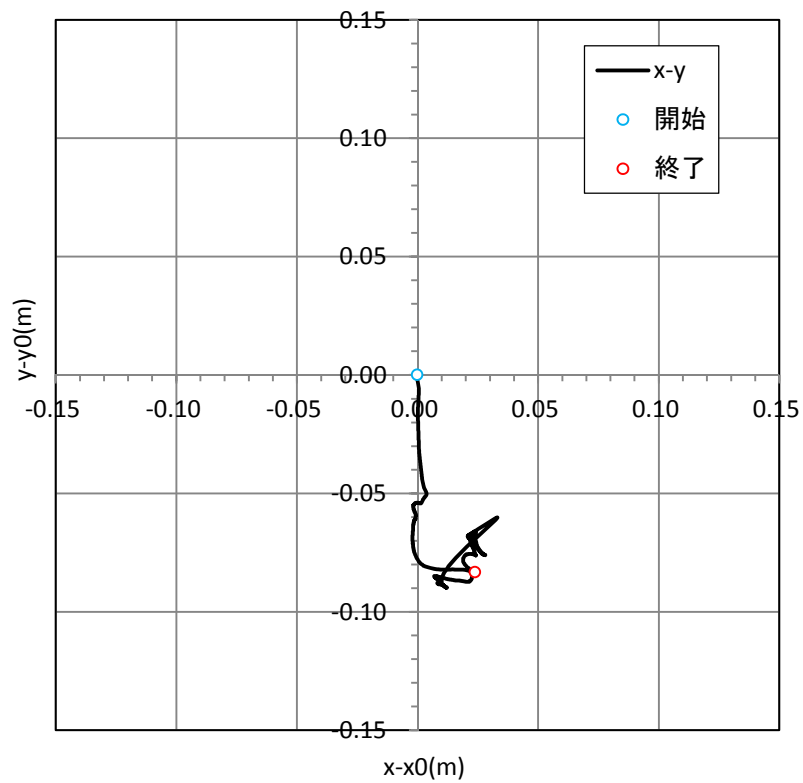


図 10.3.165 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

(c)岩塊の反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

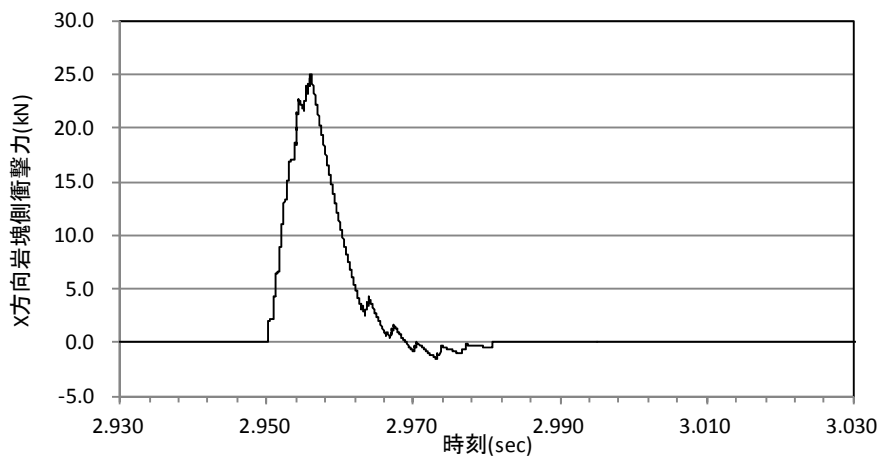


図 10.3.166 X 方向(流下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

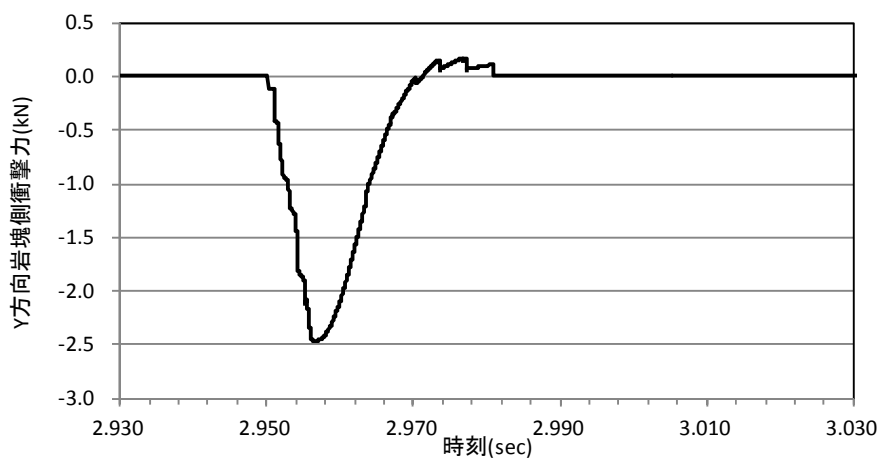


図 10.3.167 Y 方向(流下直角方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

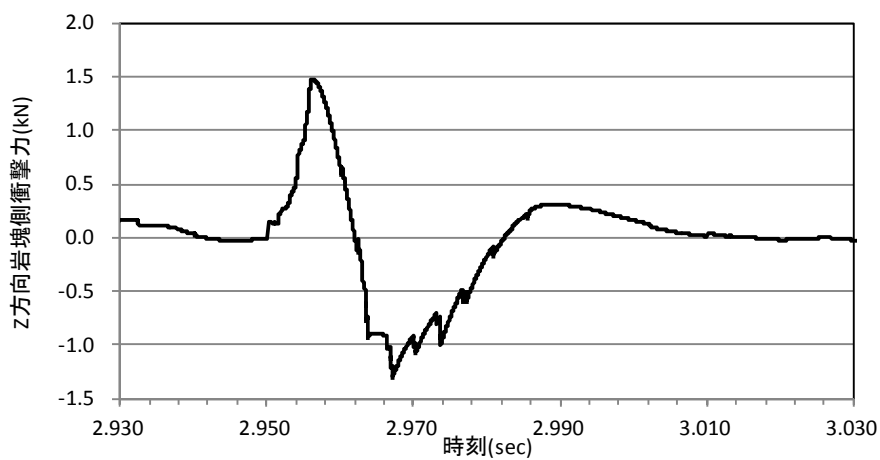


図 10.3.168 Z 方向(上下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

### 10.3.4 岩塊模型の転動挙動のシミュレーション（壁無ケース）

(1) 粒子数, 解析ステップ数, 時間間隔

表 10.3.14 に転動実験の 3 種類 6 ケースの粒子数、解析ステップ数、時間間隔を示す。これらの設定は壁有ケースの場合と同じである。

表 10.3.14 粒子数、解析ステップ数、ステップ間隔

ケース	模型材料	粒子数 0内は岩塊の 粒子数	初期応力解析	
			解析ステップ数	時間間隔(s)
4	球形 20cm	3,803(503)	200,000	$2.0 \times 10^{-5}$
	球形 40cm	5,301(2,001)	400,000	$1.0 \times 10^{-5}$
5	板状 20cm	4,034(734)	400,000	$1.0 \times 10^{-5}$
	板状 40cm	4,269(969)	200,000	$2.0 \times 10^{-5}$
6	塊状 20cm	3,858 (558)	200,000	$2.0 \times 10^{-5}$
	塊状 40cm	4,334(1,034)	200,000	$2.0 \times 10^{-5}$

(2) 構成則

壁有ケースの岩塊模型モデルに用いたものと同じである。

(3) 流路模型のモデル化

流路模型形状は、壁有ケースで反力壁を除いたものと同じである。

境界条件において、表 10.3.15 に示すように、底面の格子における摩擦角  $22.3^\circ$  (動摩擦係数 0.411 相当)を入力した。壁有ケースとの違いは、平坦部の底面摩擦角を斜面部と同じ値としたことである。

表 10.3.15 底面摩擦角

	底面摩擦角
斜面部	$22.3^\circ$
平坦部	$22.3^\circ$
反力壁底面	$30.0^\circ$

(4) 岩塊模型のモデル化

壁有ケースの岩塊模型モデルに用いたものと同じである。

(5) 跳ね返り試験のシミュレーション

壁有ケースの岩塊模型モデルに用いたものと同じである。

(6) 解析結果出力

解析結果出力項目の説明を以下に示す。

・変形図

流路模型を横から見た様子と真上から見た様子を 0.8 秒間隔で出力し、転動の様子を示した。

・時刻歴結果

壁有ケースと同様に整理した。ただし、重心近傍粒子の速度履歴も整理した。

(7) 壁無ケースにおける解析結果 (変形図)

• CASE4 球形 20cm

time = 4.00000E-02sec

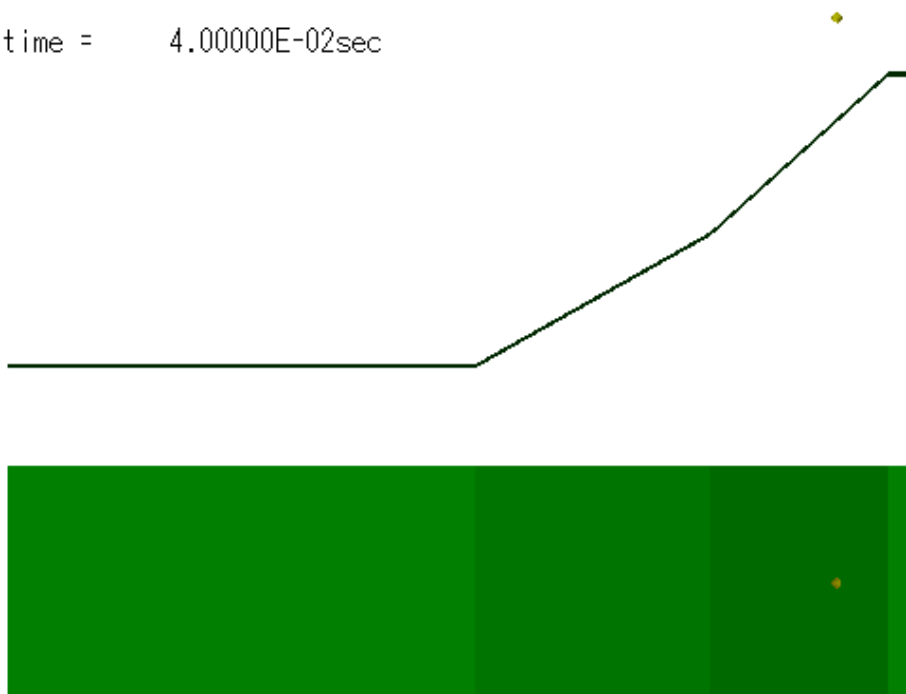


図 10.3.169 変形図(0.04sec)

time = 8.00000E-01sec

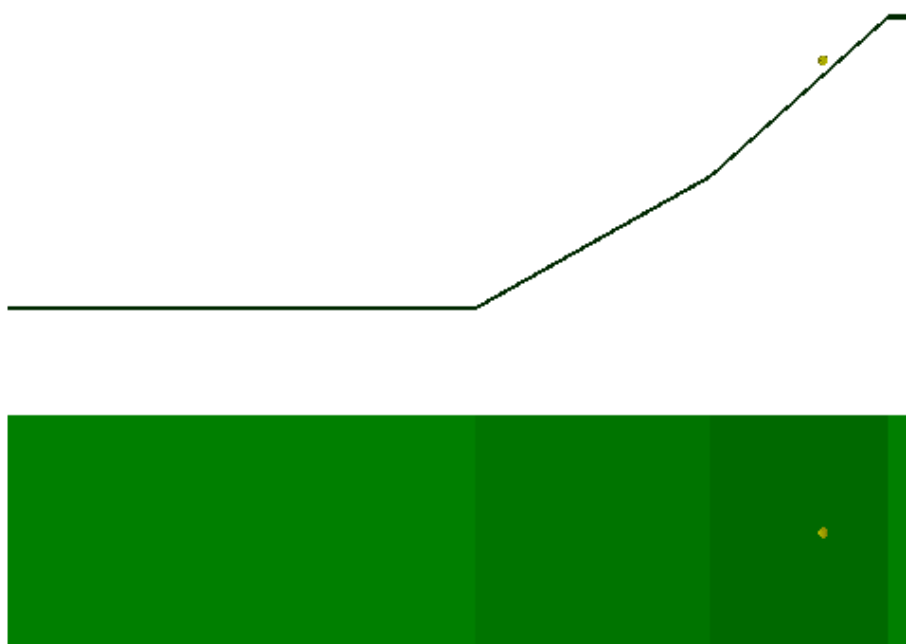


図 10.3.170 変形図(0.8sec)

time = 1.60000E+00sec

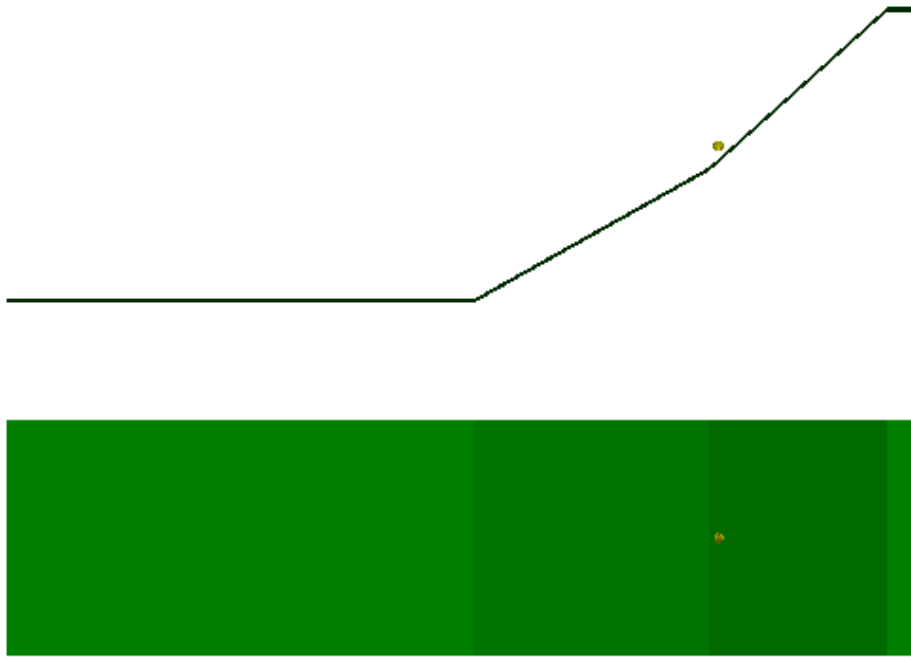


图 10.3.171 变形图(1.6sec)

time = 2.40000E+00sec

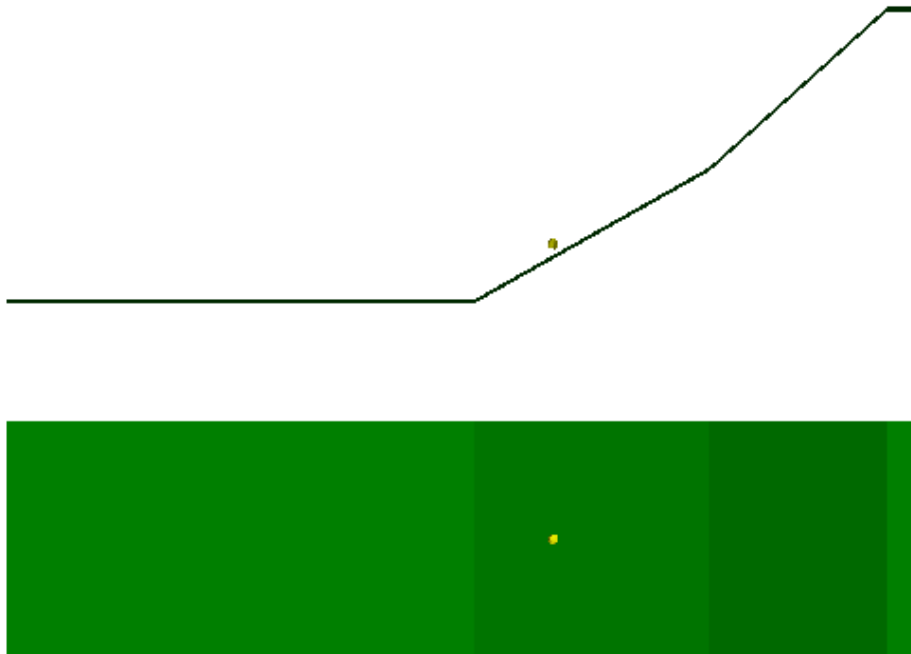


图 10.3.172 变形图(2.4sec)

time = 3.20000E+00sec

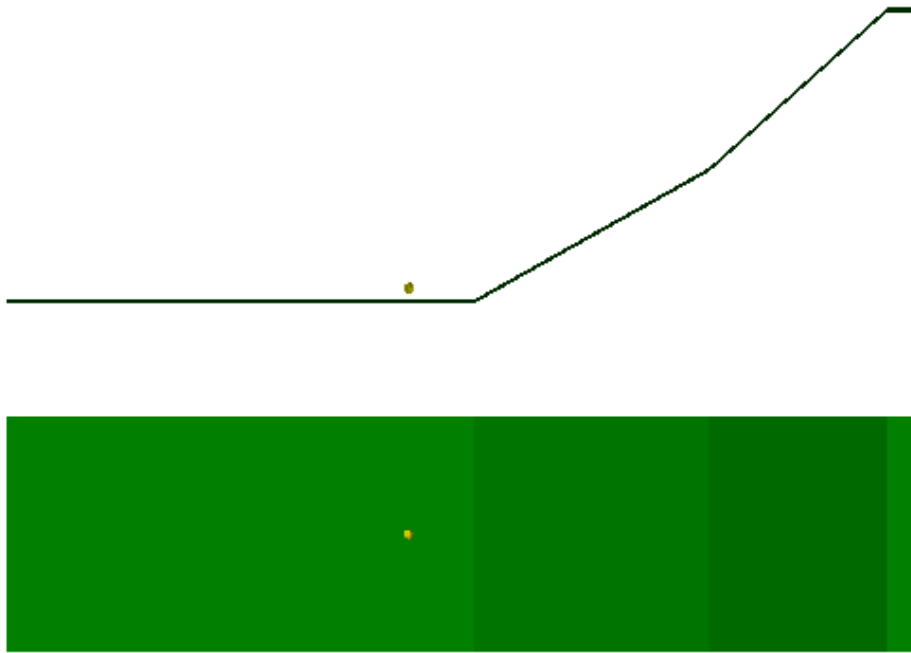


图 10.3.173 变形图(3.2sec)

time = 4.00000E+00sec

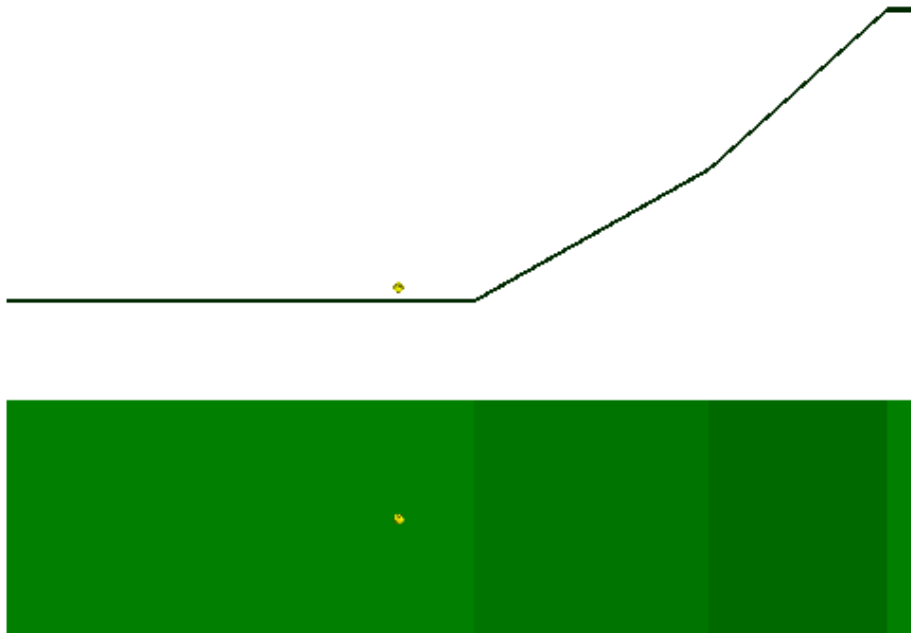


图 10.3.174 变形图(4.0sec)



• CASE4 球形 40cm

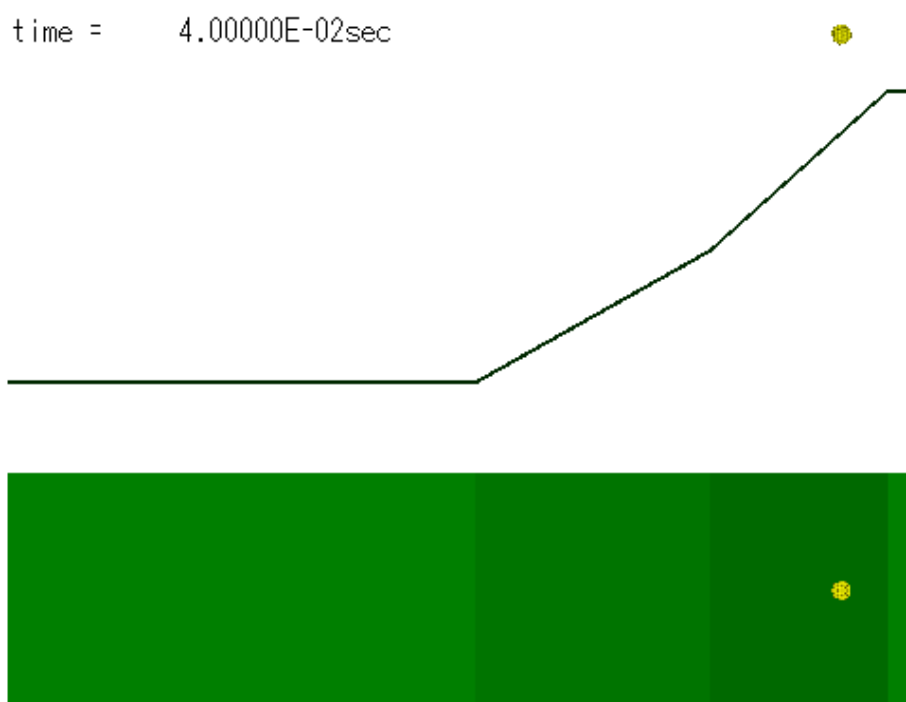


图 10.3.175 变形图(0.04sec)

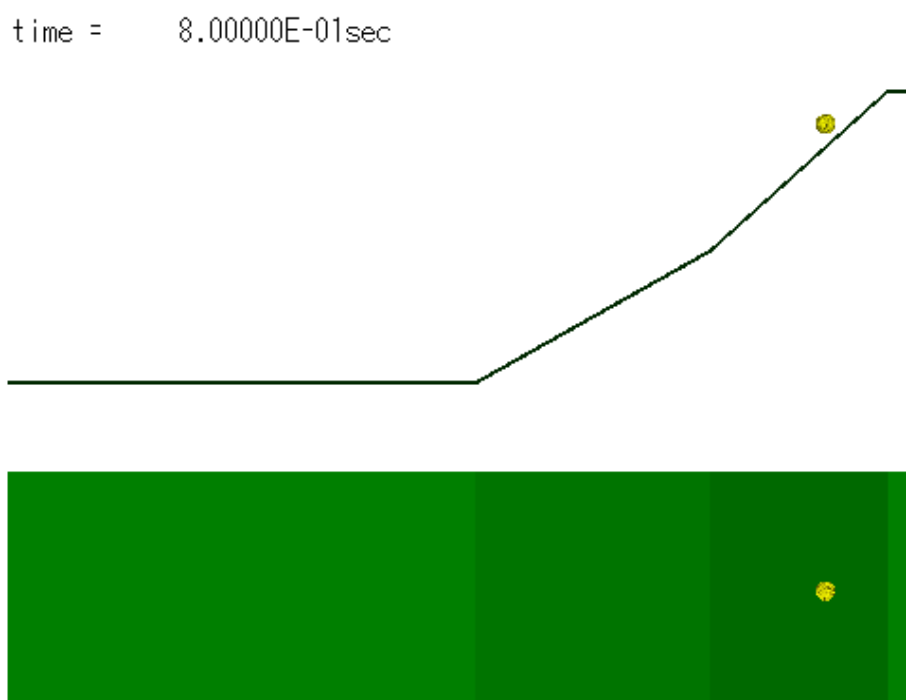


图 10.3.176 变形图(0.8sec)

time = 1.60000E+00sec

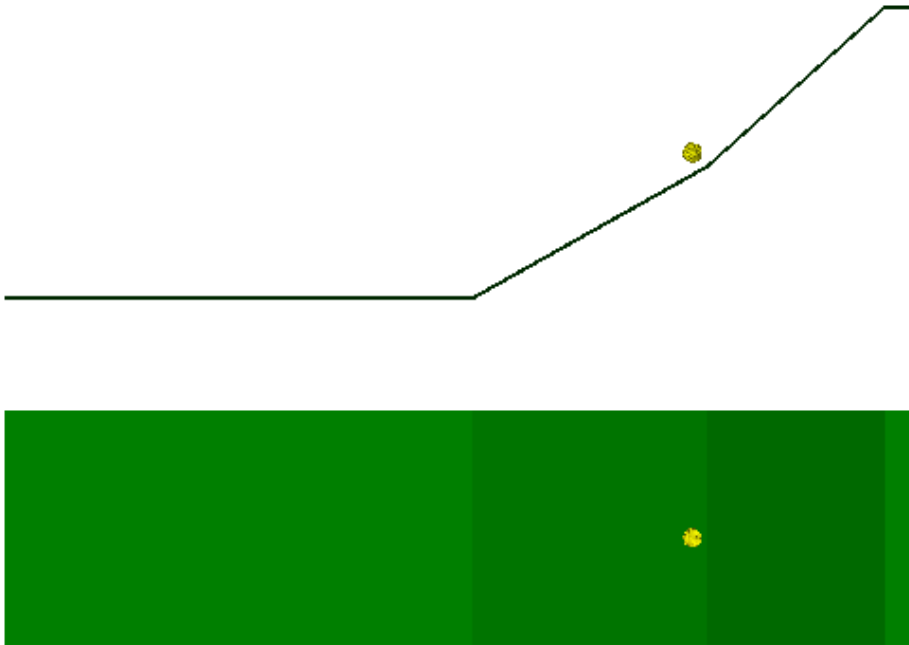


图 10.3.177 变形图(1.6sec)

time = 2.40000E+00sec

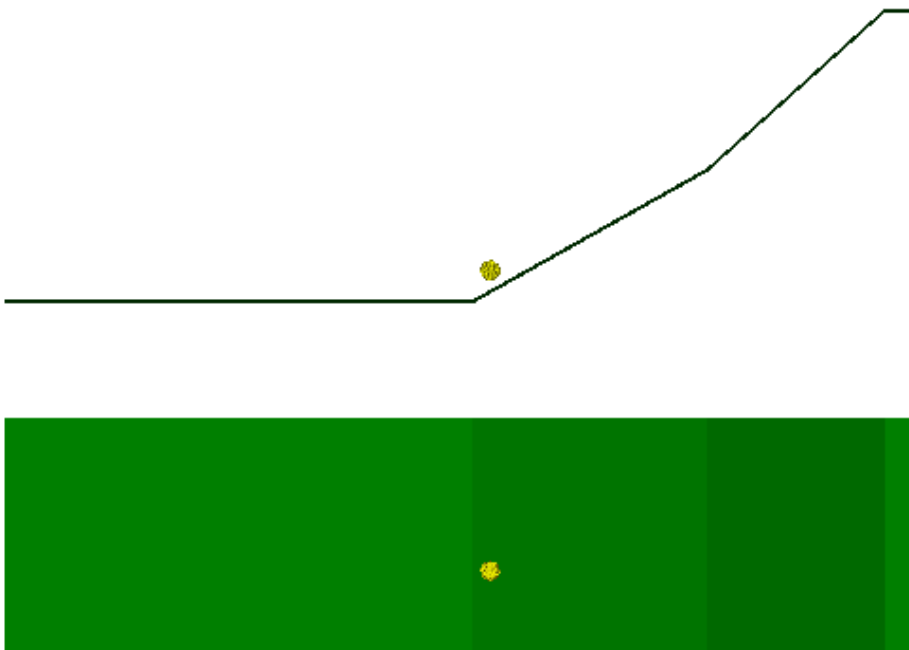


图 10.3.178 变形图(2.4sec)

time = 3.20000E+00sec

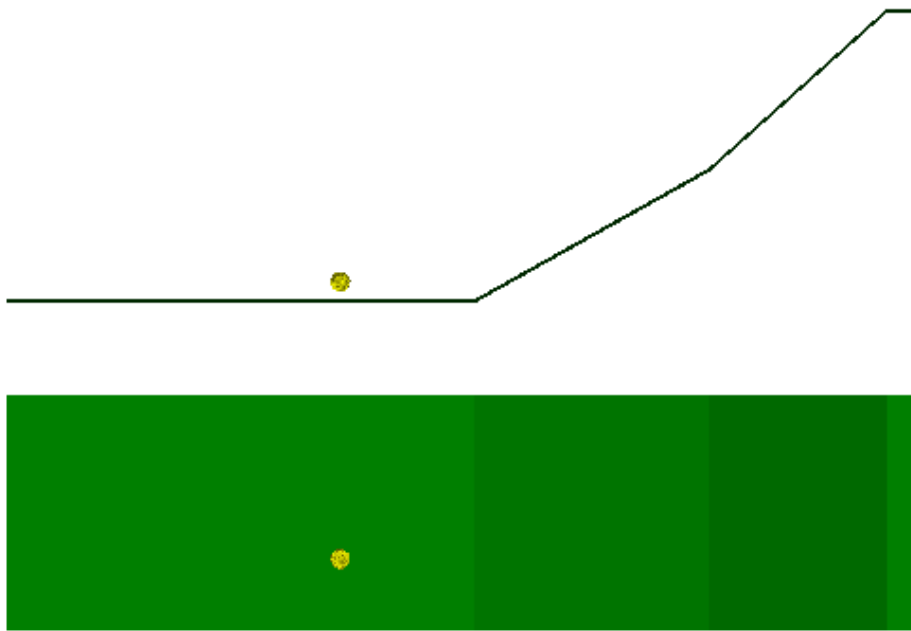


图 10.3.179 变形图(3.2sec)

time = 4.00000E+00sec

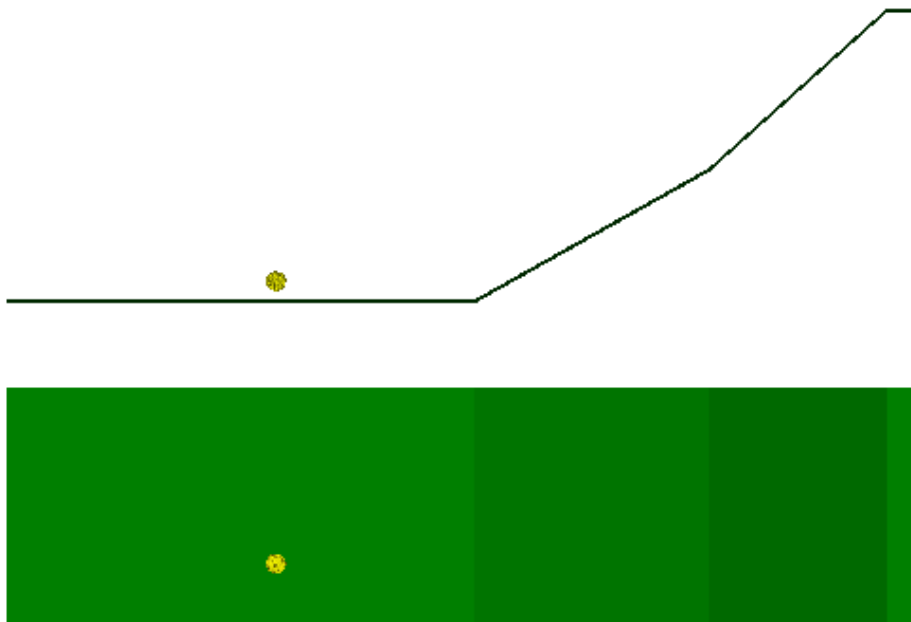


图 10.3.180 变形图(4.0sec)

• CASE5 板状 20cm

time = 4.00000E-02sec

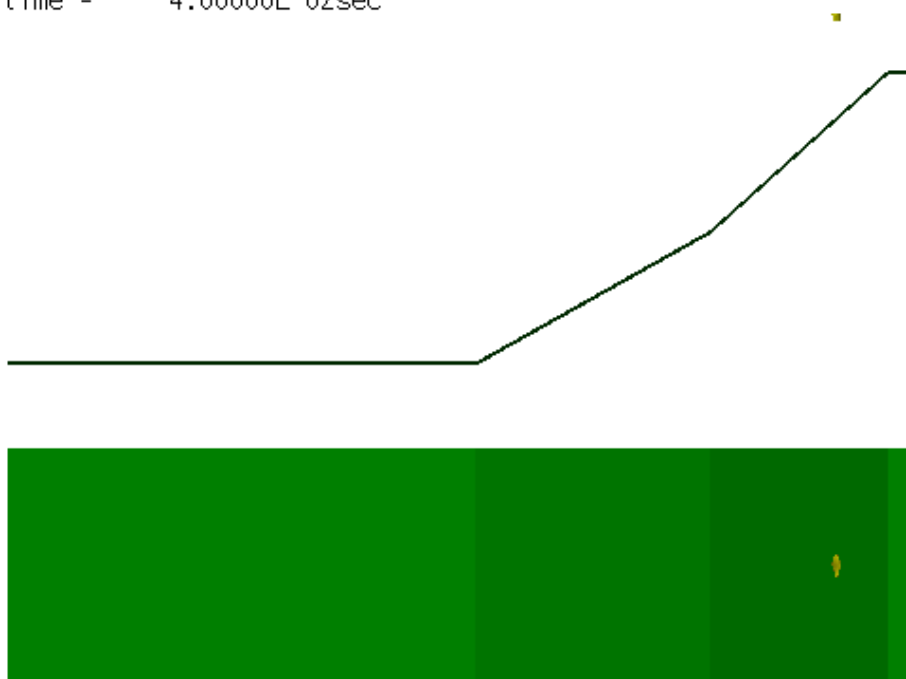


图 10.3.181 变形图(0.04sec)

time = 8.00000E-01sec

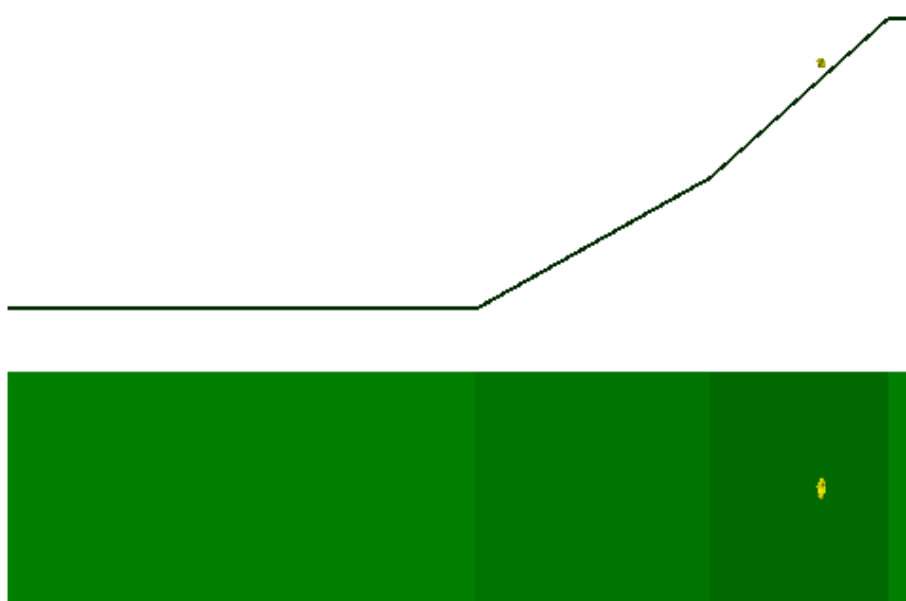


图 10.3.182 变形图(0.8sec)

time = 1.60000E+00sec

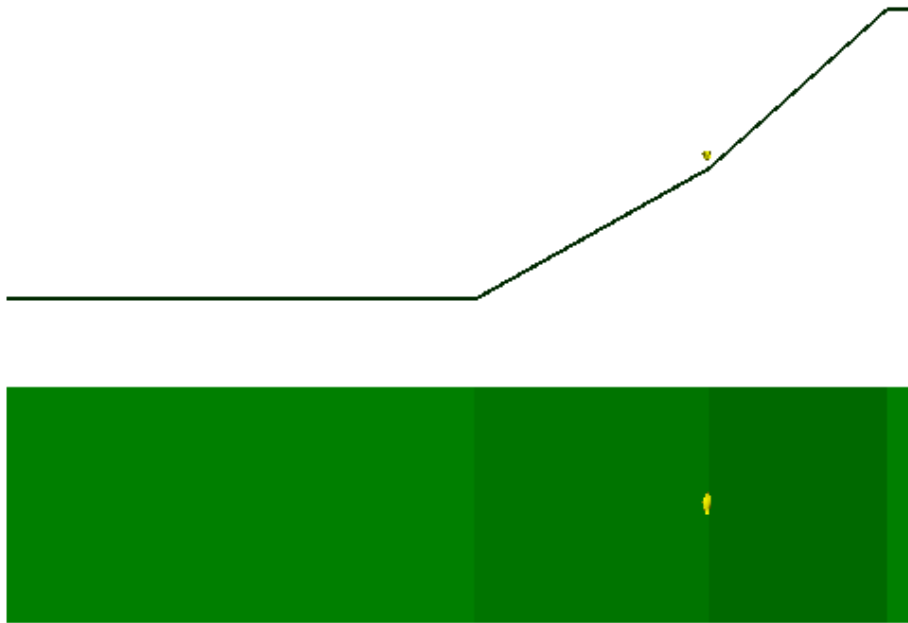


图 10.3.183 变形图(1.6sec)

time = 2.40000E+00sec

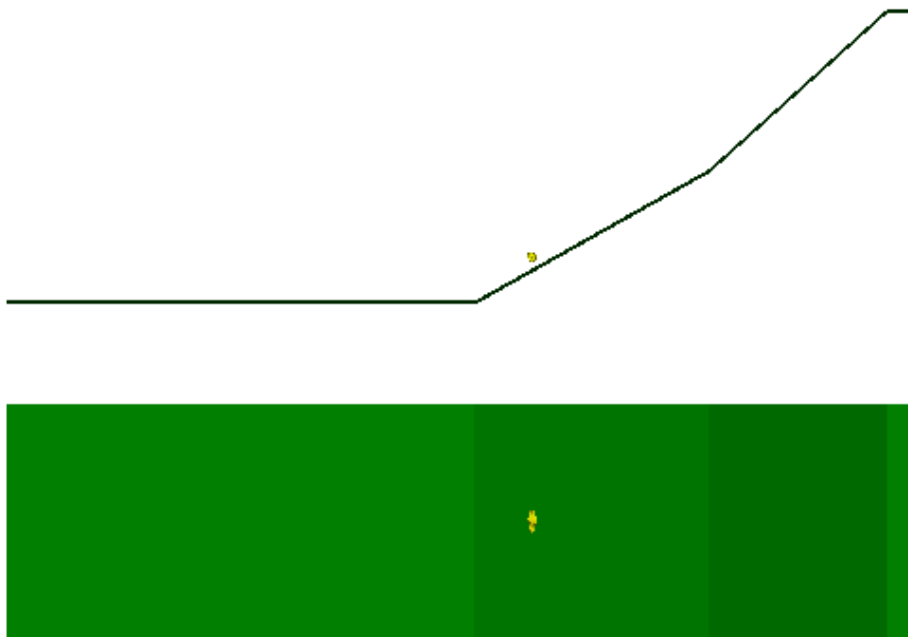


图 10.3.184 变形图(2.4sec)

time = 3.20000E+00sec

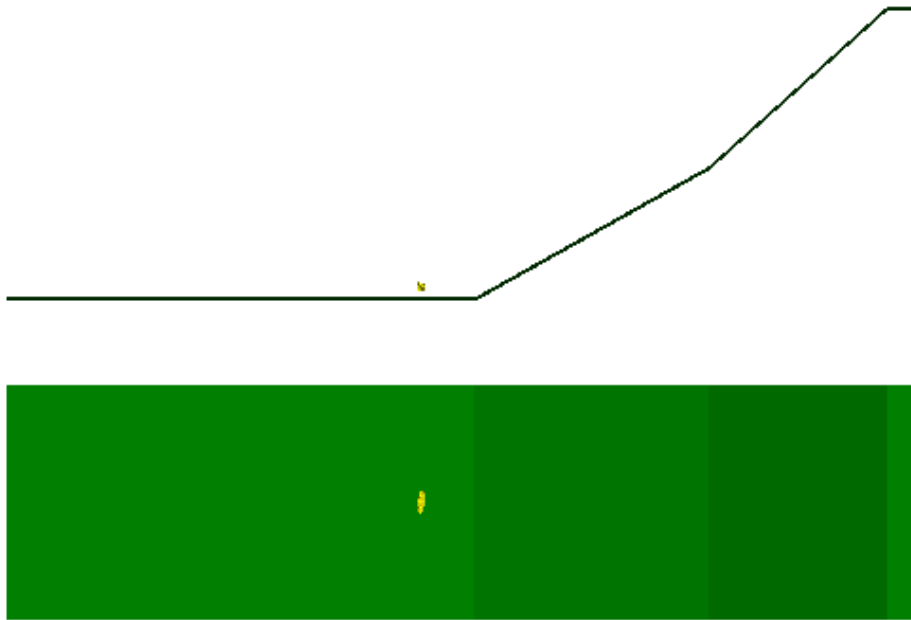


图 10.3.185 变形图(3.2sec)

time = 4.00000E+00sec

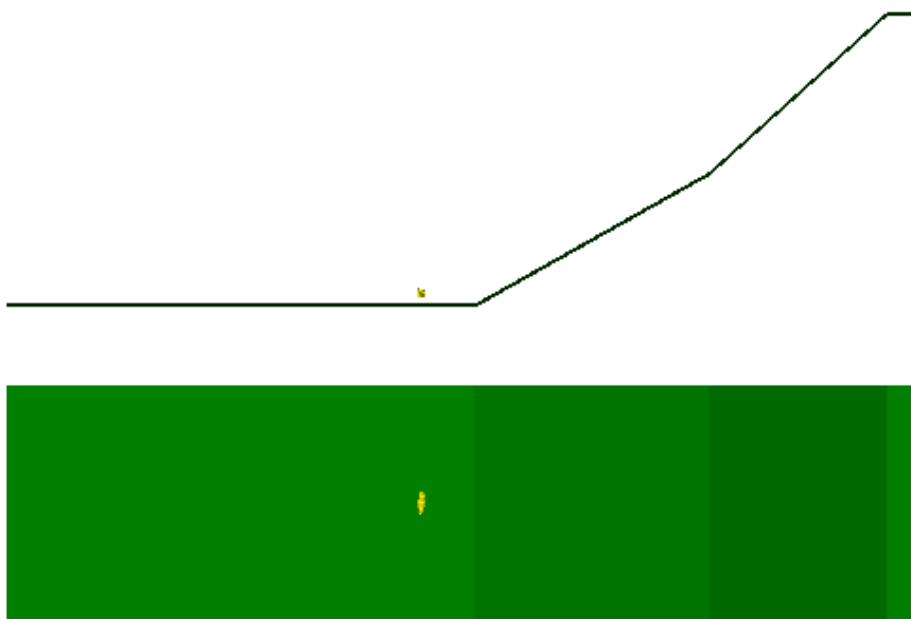


图 10.3.186 变形图(4.0sec)

• CASE5 板状 40cm

time = 4.00000E-02sec

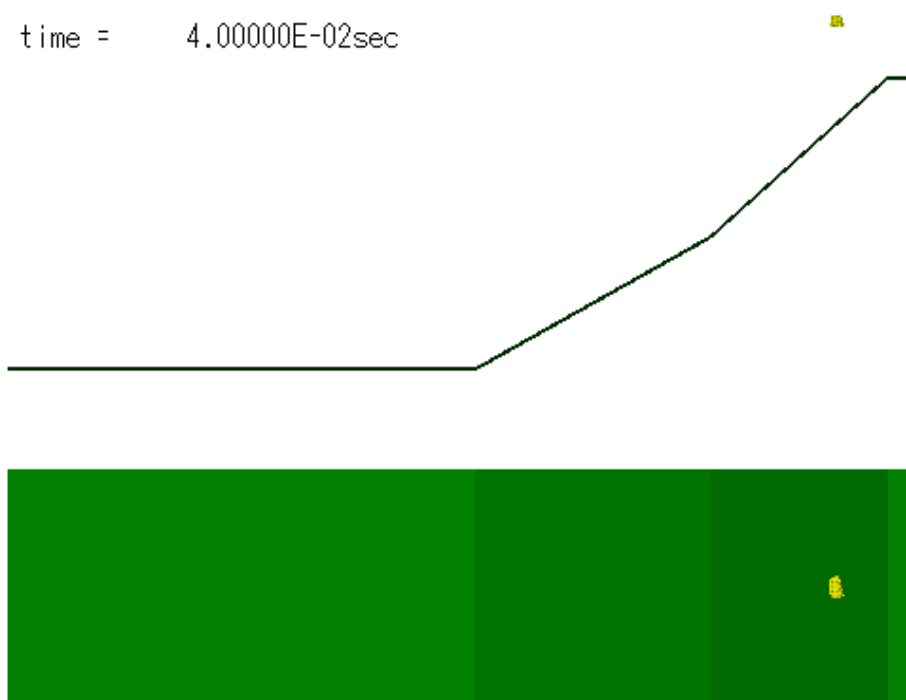


图 10.3.187 变形图(0.04sec)

time = 8.00000E-01sec

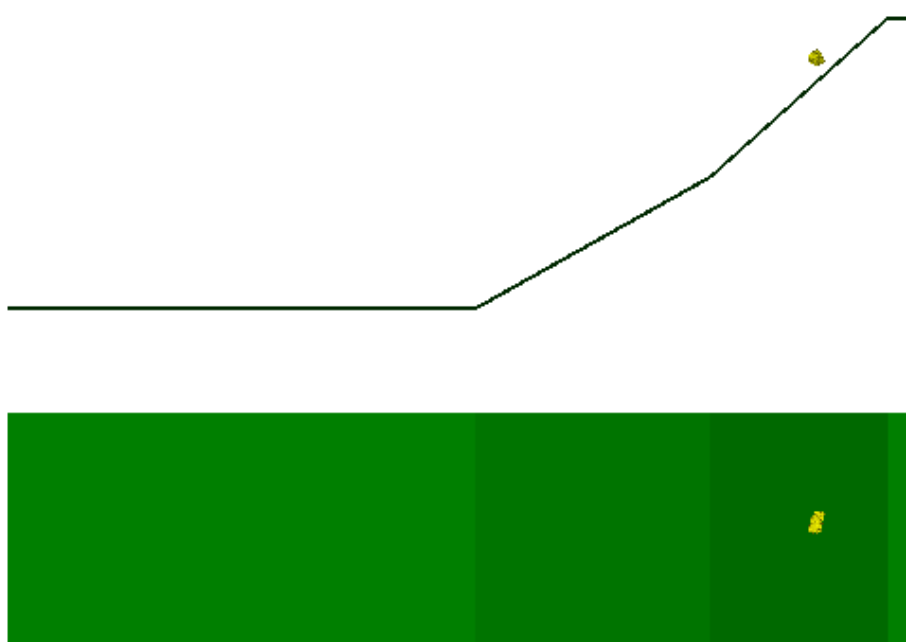


图 10.3.188 变形图(0.8sec)

time = 1.60000E+00sec

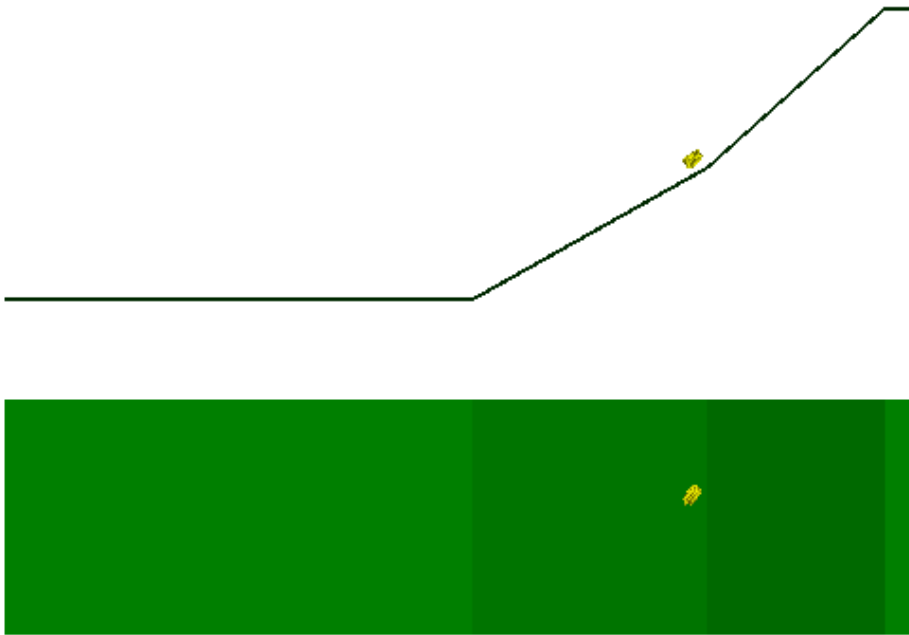


图 10.3.189 变形图(1.6sec)

time = 2.40000E+00sec

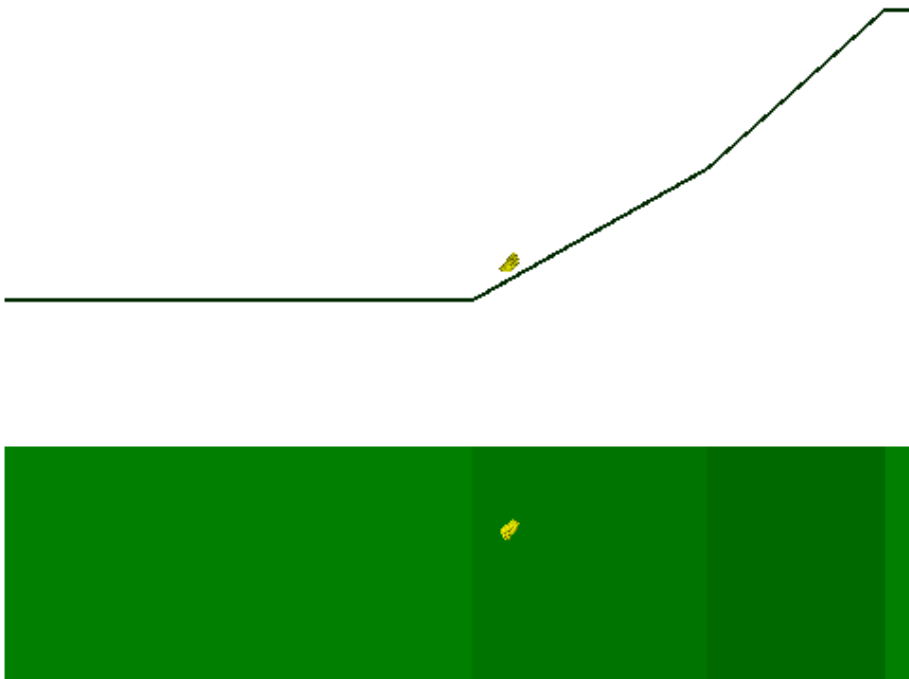


图 10.3.190 变形图(2.4sec)



time = 3.20000E+00sec

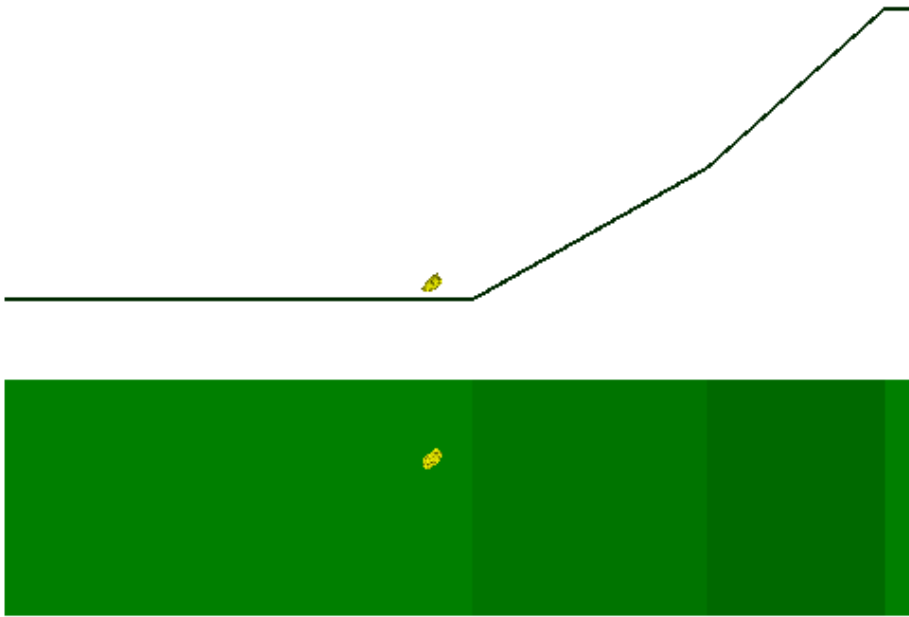


图 10.3.191 变形图(3.2sec)

time = 4.00000E+00sec

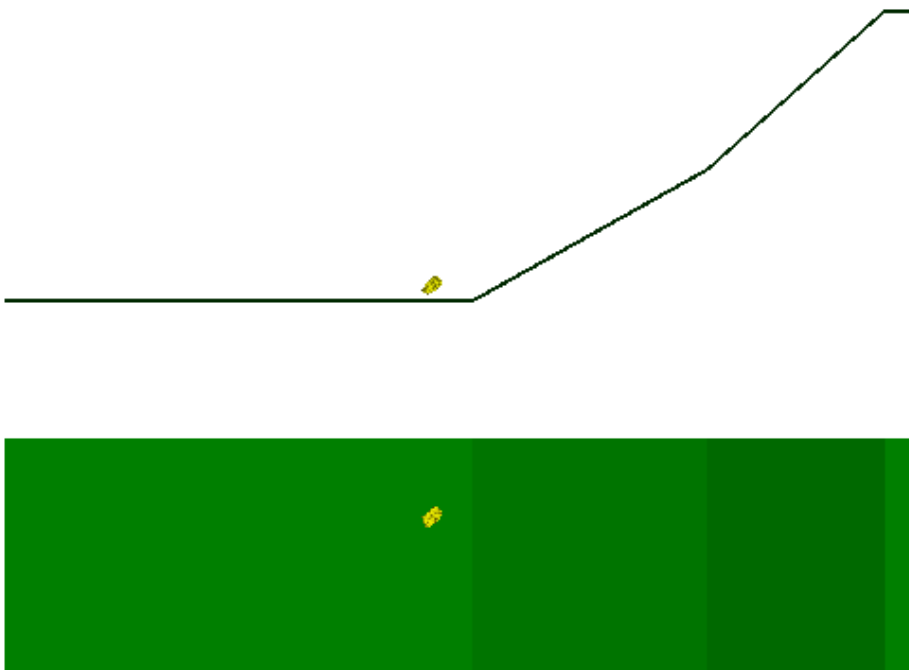


图 10.3.192 变形图(4.0sec)

• CASE6 塊状 20cm

time = 4.00000E-02sec

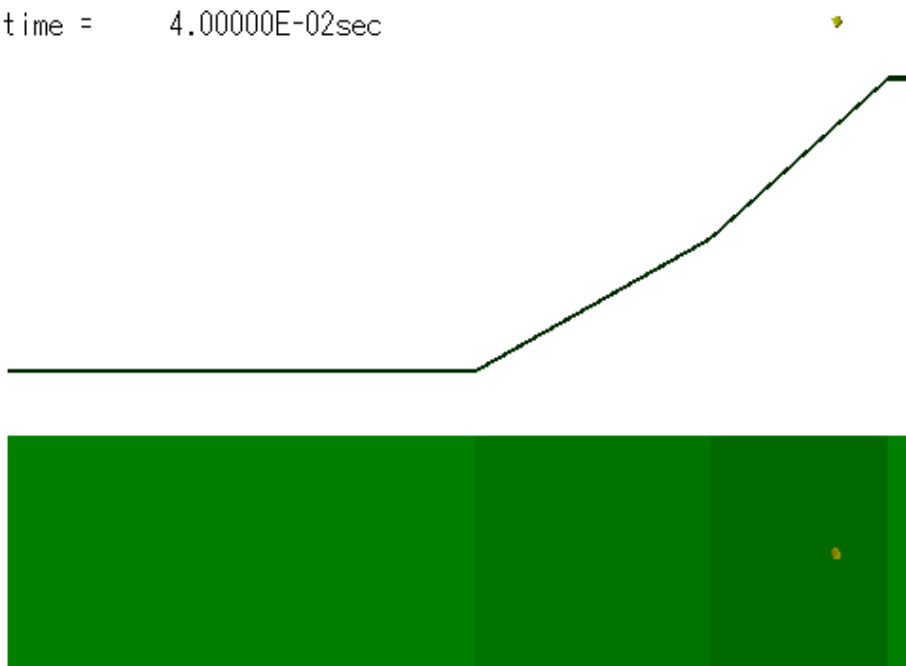


図 10.3.193 変形図(0.04sec)

time = 8.00000E-01sec

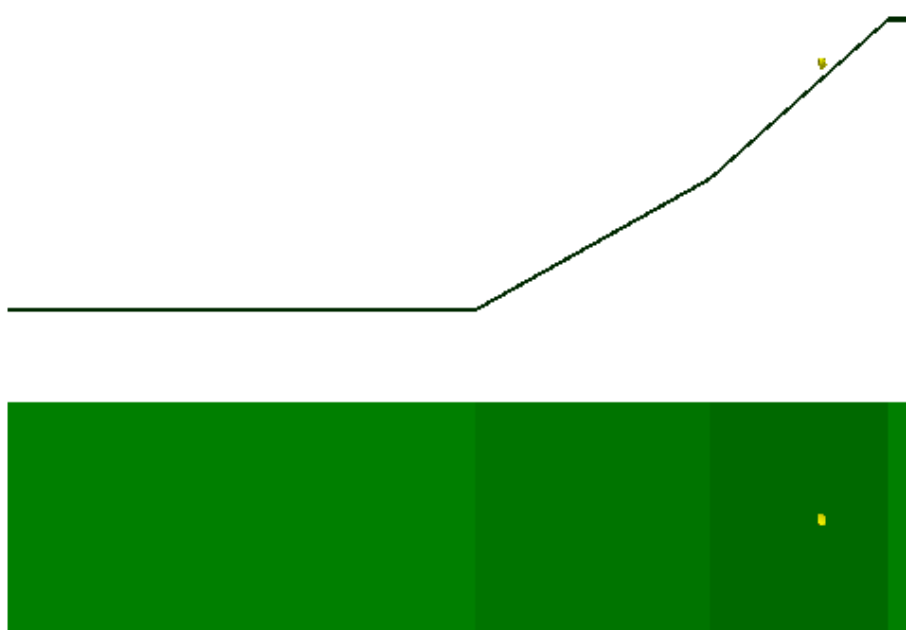


図 10.3.194 変形図(0.8sec)

time = 1.60000E+00sec

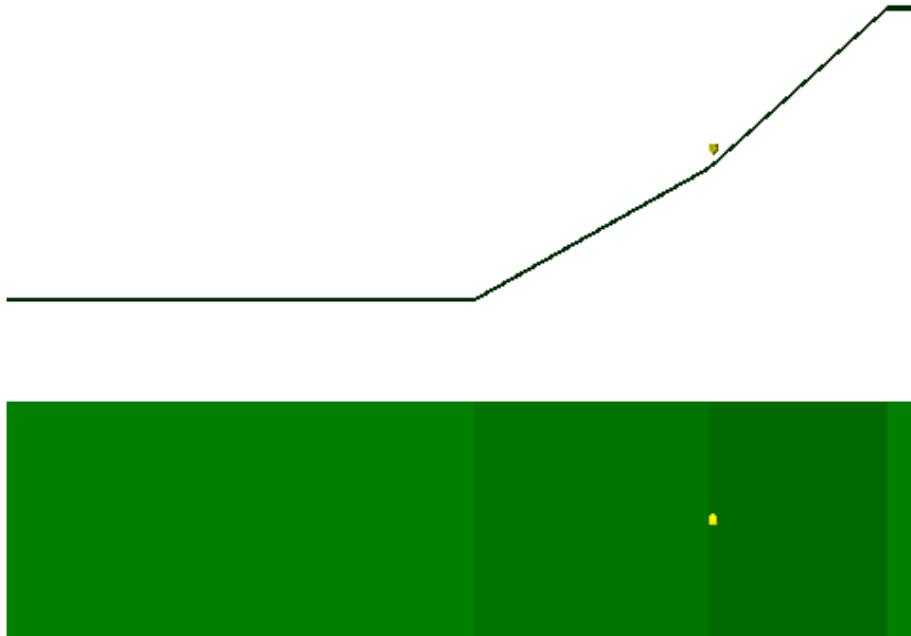


图 10.3.195 变形图(1.6sec)

time = 2.40000E+00sec

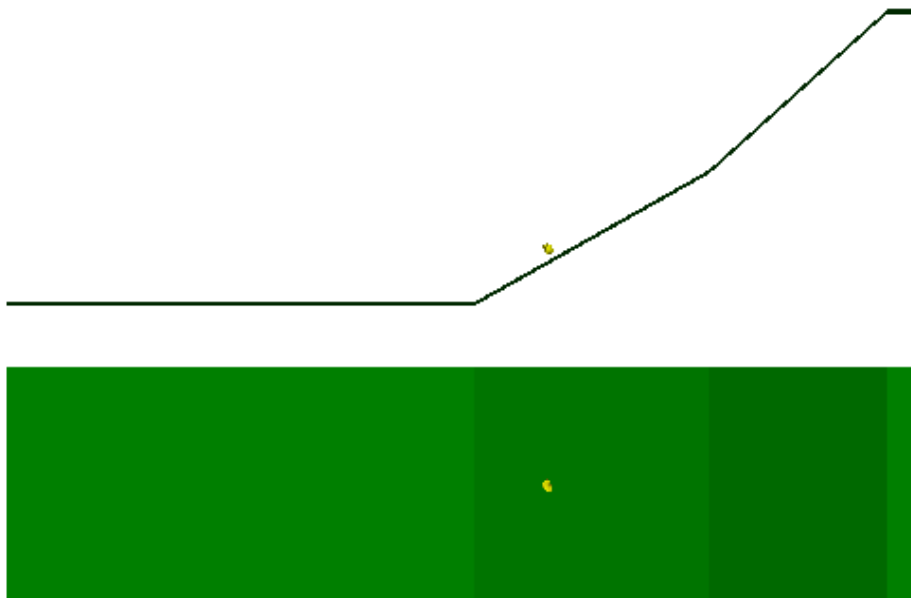


图 10.3.196 变形图(2.4sec)

time = 3.20000E+00sec

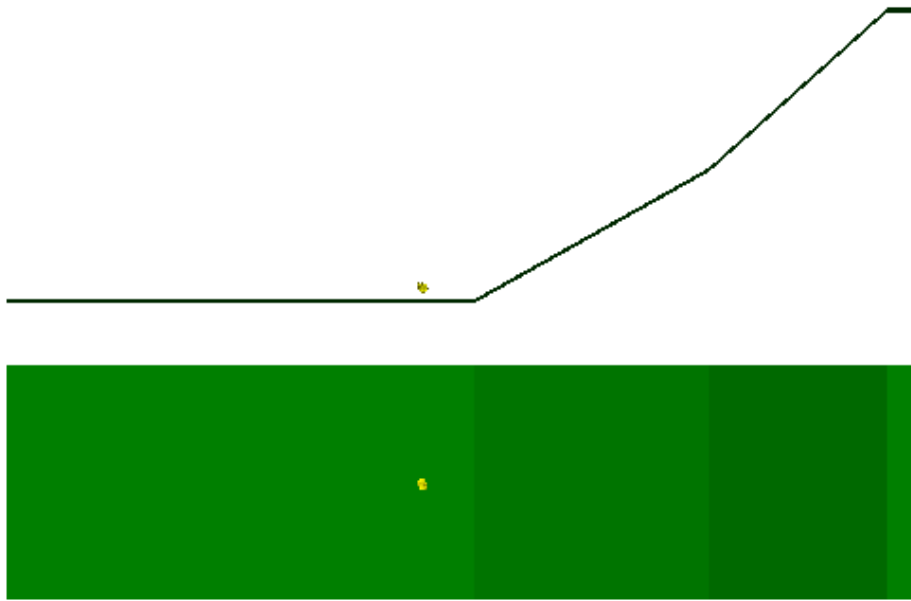


图 10.3.197 变形图(3.2sec)

time = 4.00000E+00sec

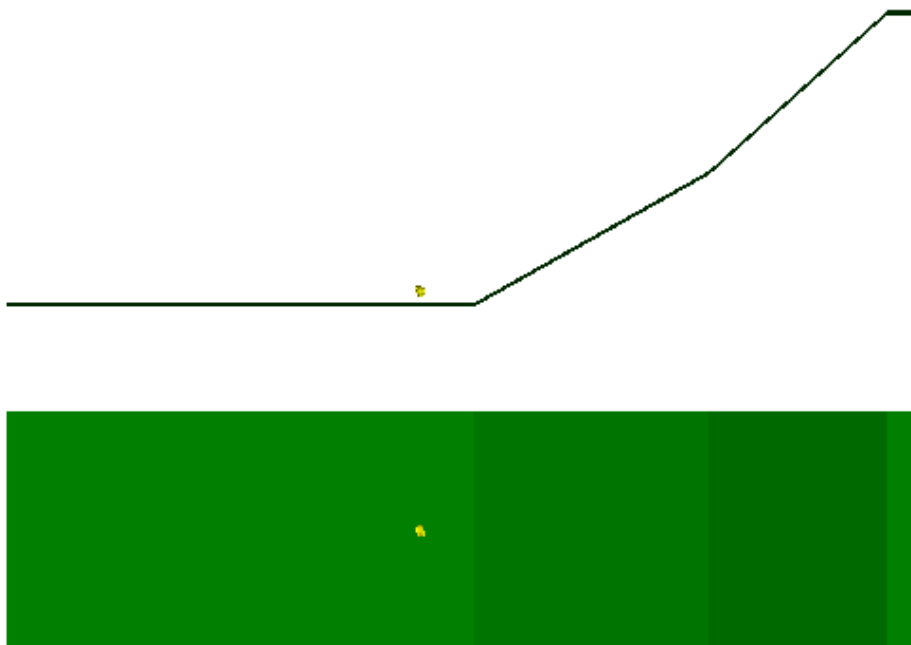


图 10.3.198 变形图(4.0sec)

• CASE6 塊状 40cm

time = 4.00000E-02sec

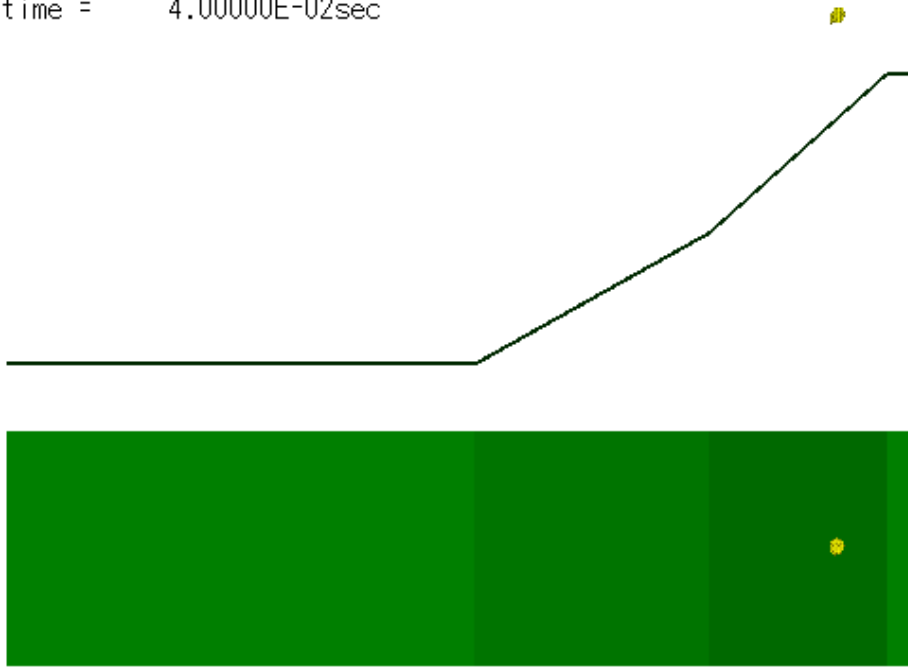


図 10.3.199 変形図(0.04sec)

time = 8.00000E-01sec

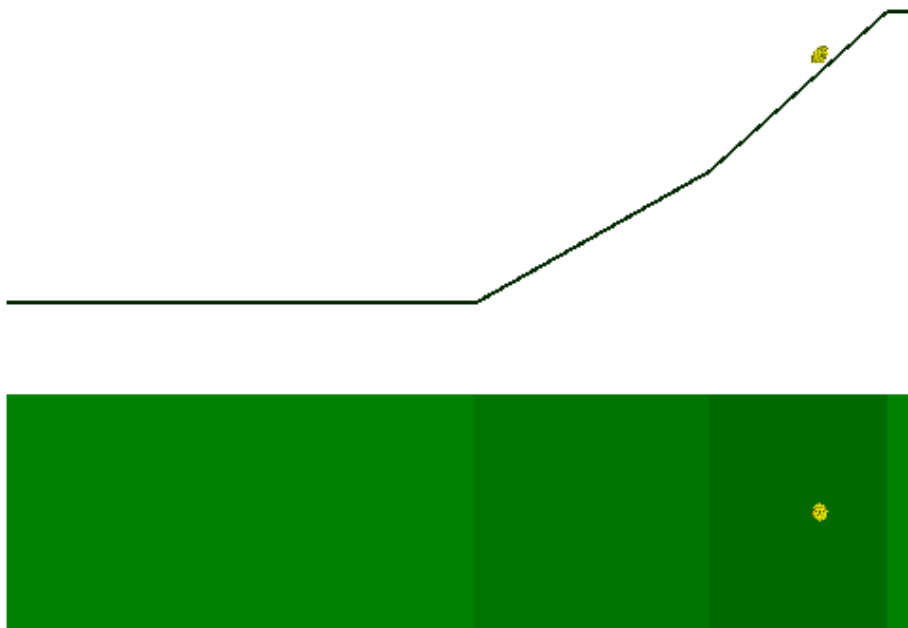


図 10.3.200 変形図(0.8sec)

time = 1.60000E+00sec

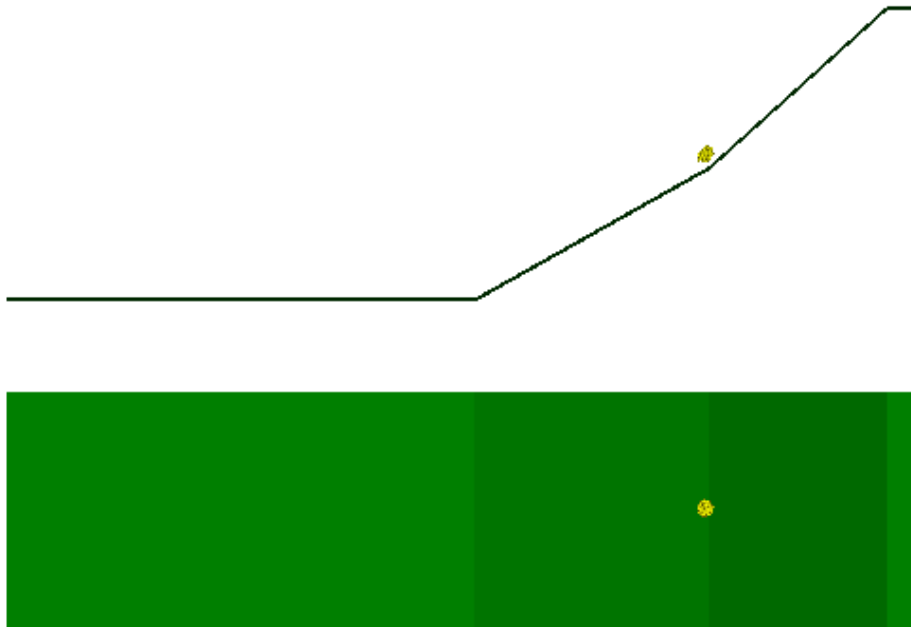


图 10.3.201 变形图(1.6sec)

time = 2.40000E+00sec

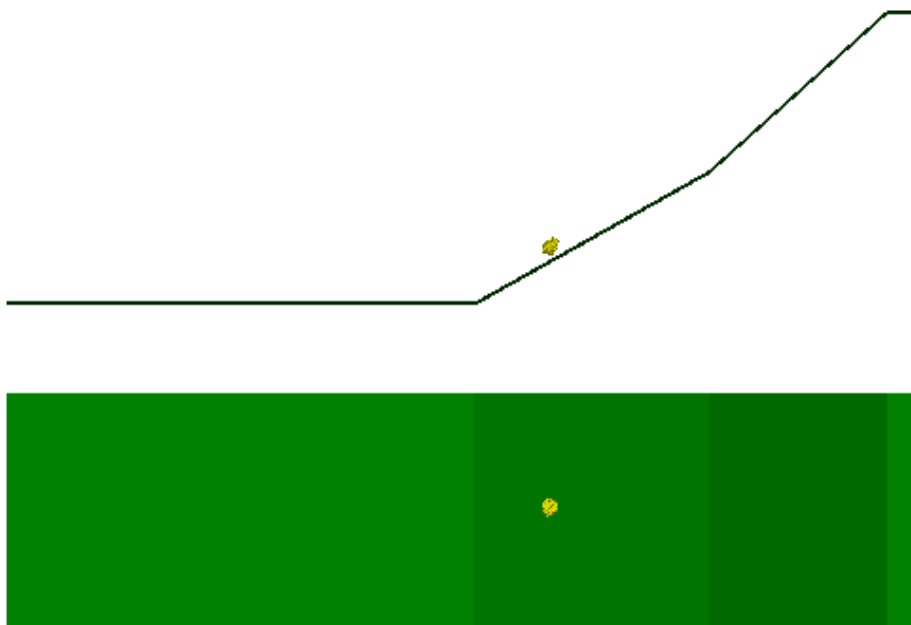


图 10.3.202 变形图(2.4sec)

time = 3.20000E+00sec

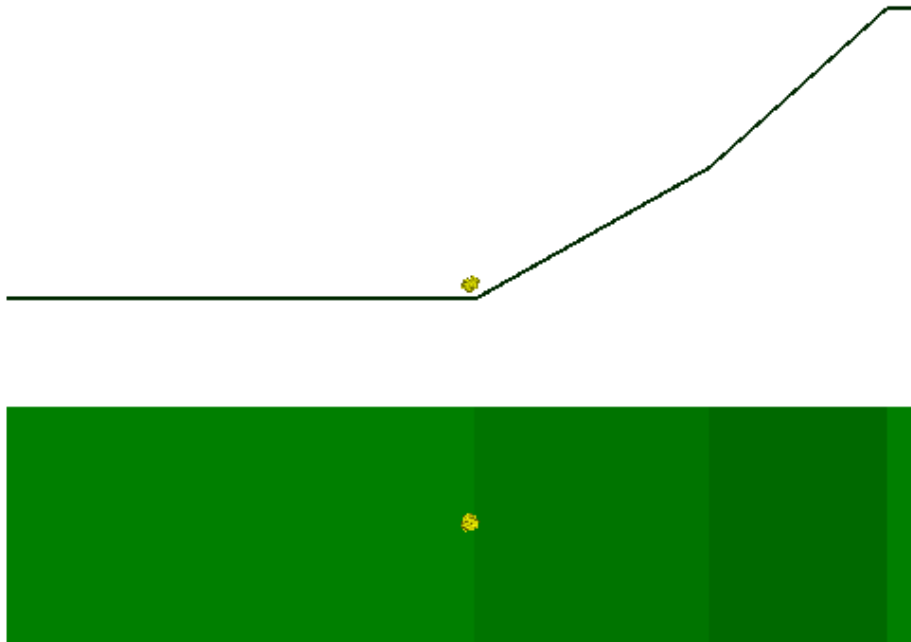


图 10.3.203 变形图(3.2sec)

time = 4.00000E+00sec

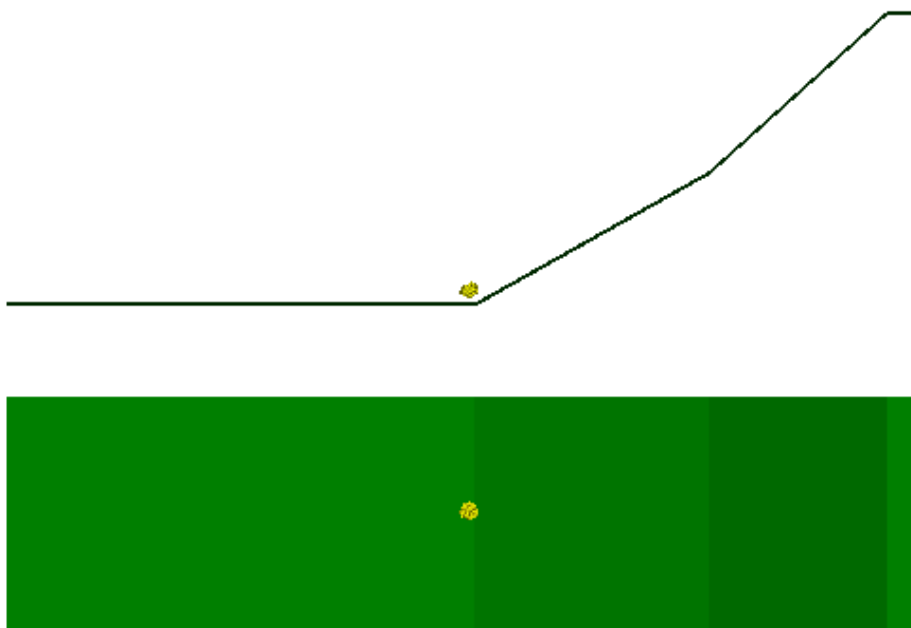


图 10.3.204 变形图(4.0sec)

(8) 壁無ケースにおける解析結果 (時刻歴)

・CASE4 球形 20cm

(a) 岩塊の転動距離、速度の時刻歴

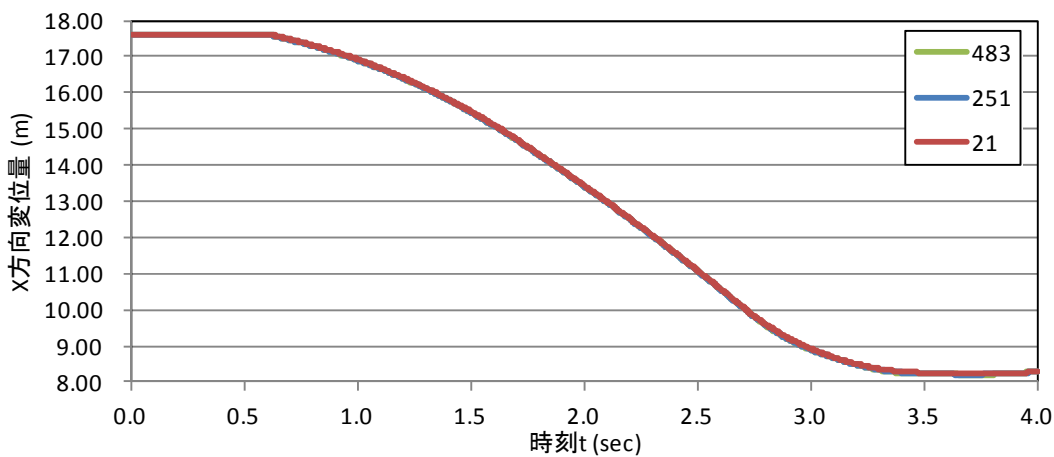


図 10.3.205 X 方向(流下方向)変位時刻歴

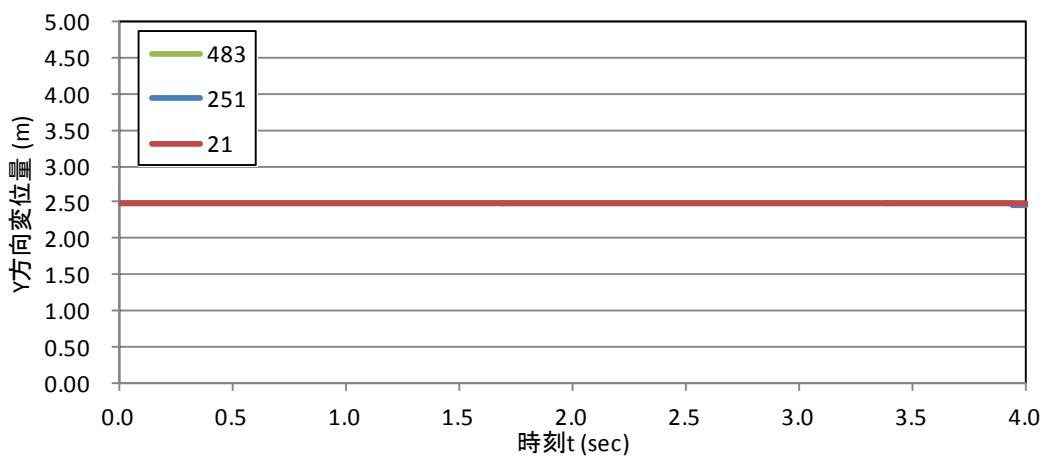


図 10.3.206 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

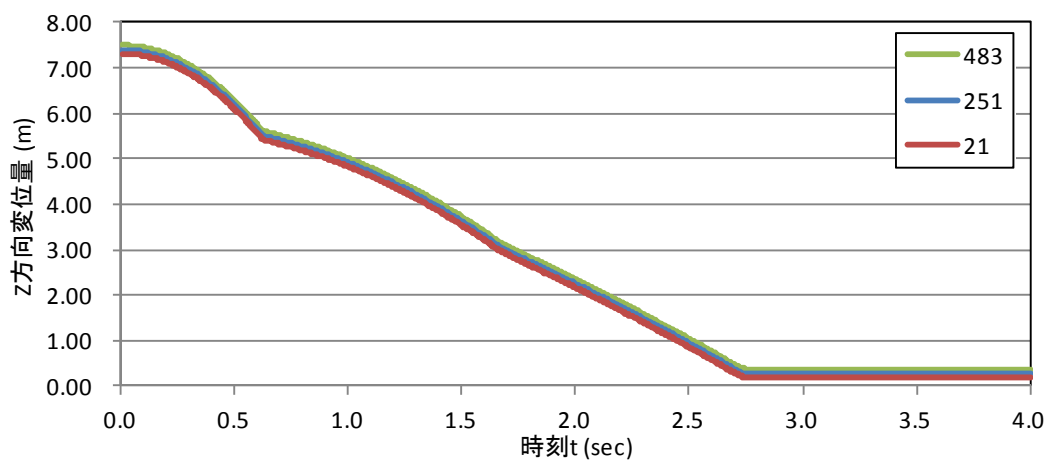


図 10.3.207 Z 方向(上下方向)変位時刻歴



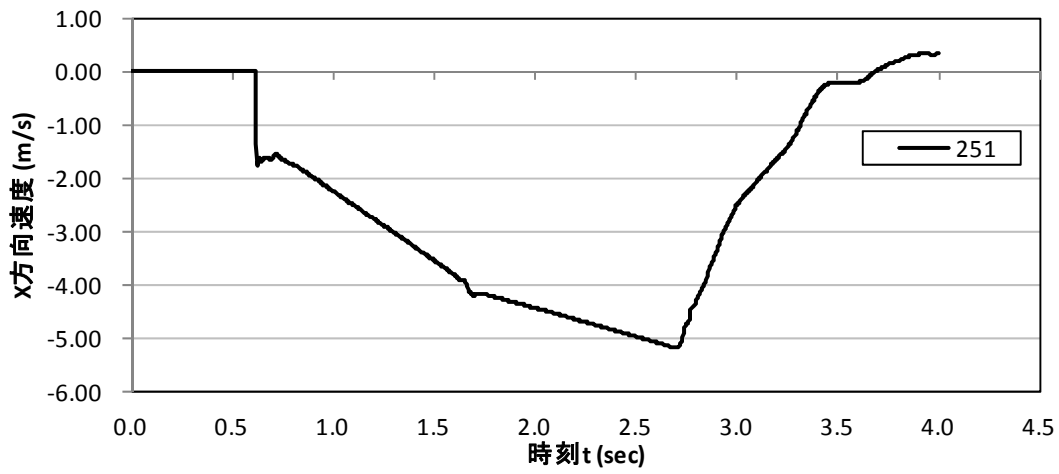


图 10.3.208 X 方向(流下方向)速度時刻歷

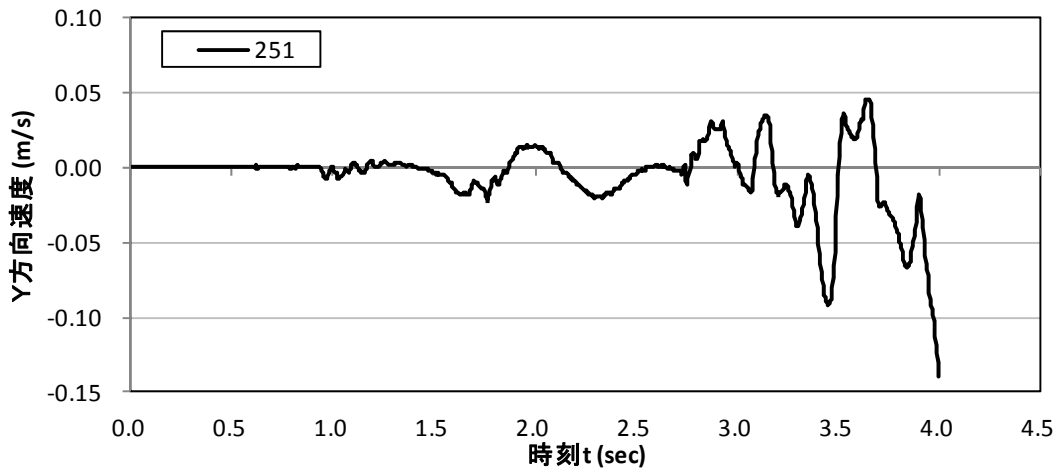


图 10.3.209 Y 方向(流下直角方向)速度時刻歷

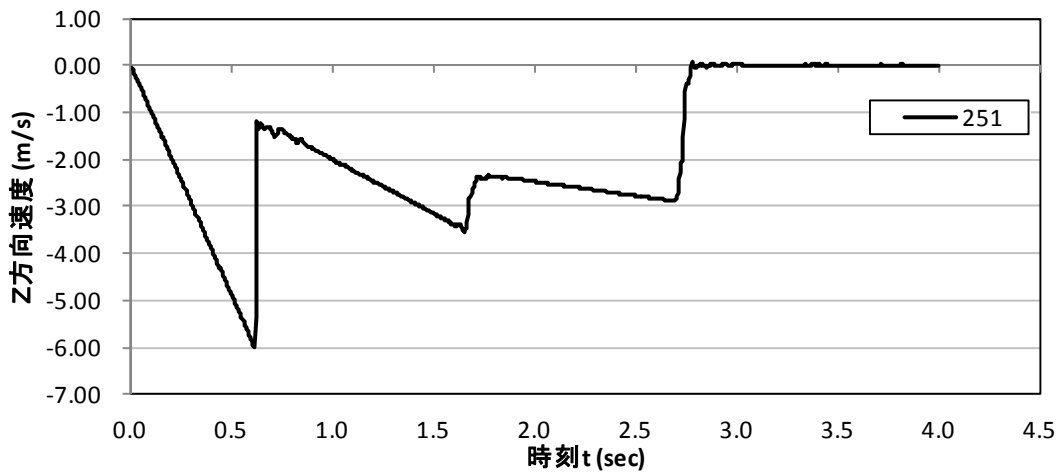


图 10.3.210 Z 方向(上下方向)速度時刻歷

(b) 岩塊の回転量の時刻歴

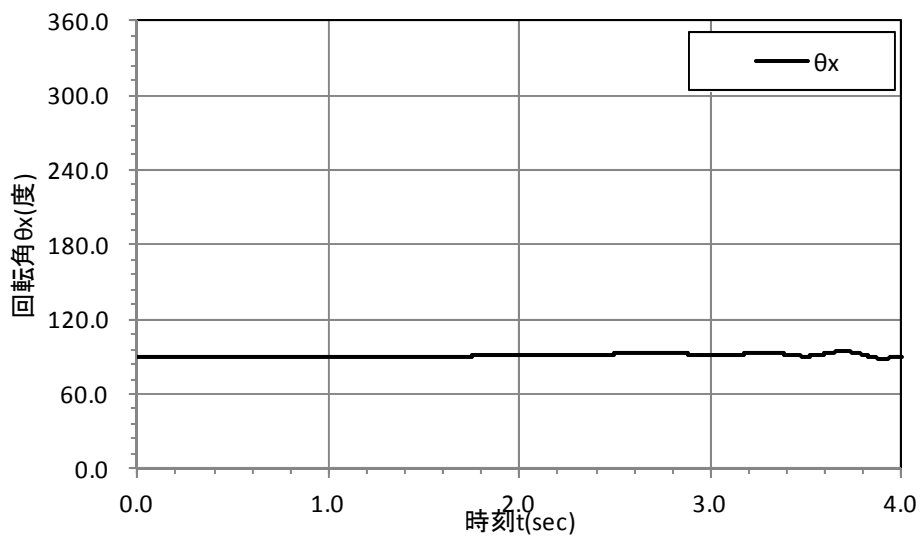


図 10.3.211 X 軸周りの回転角の時刻歴

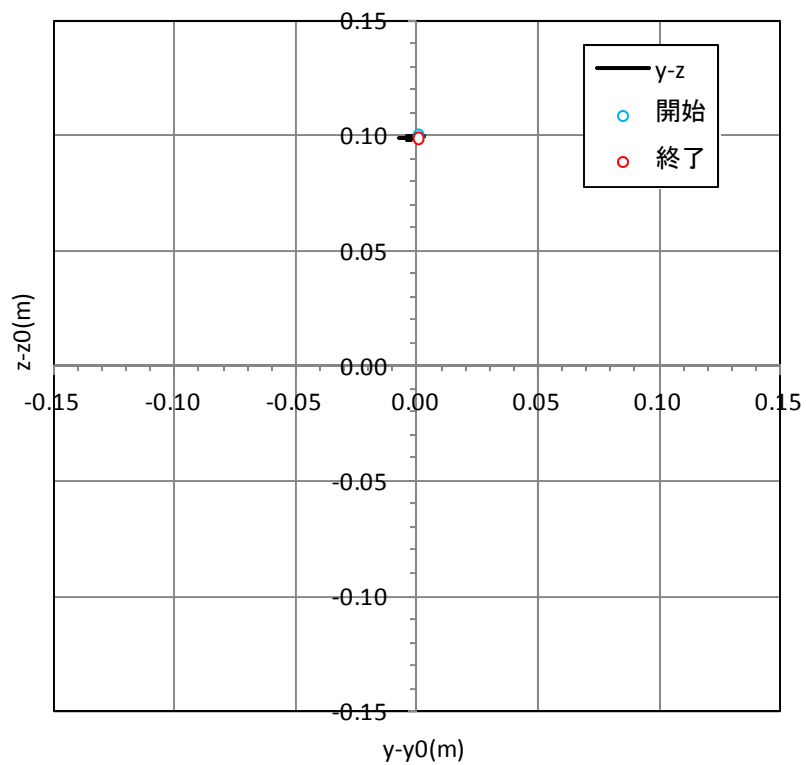


図 10.3.212 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

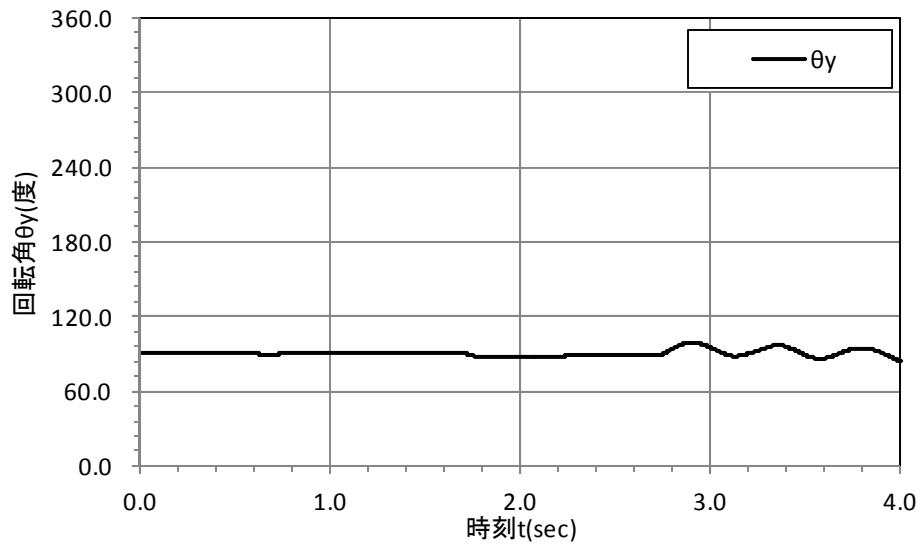


図 10.3.213 Y 軸周りの回転角の時刻歴

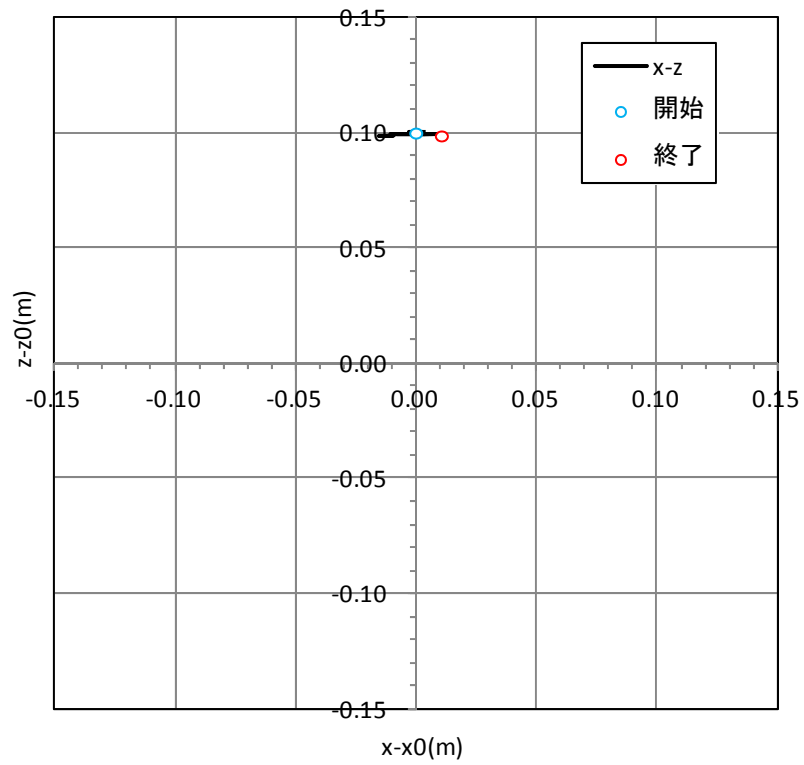


図 10.3.214 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

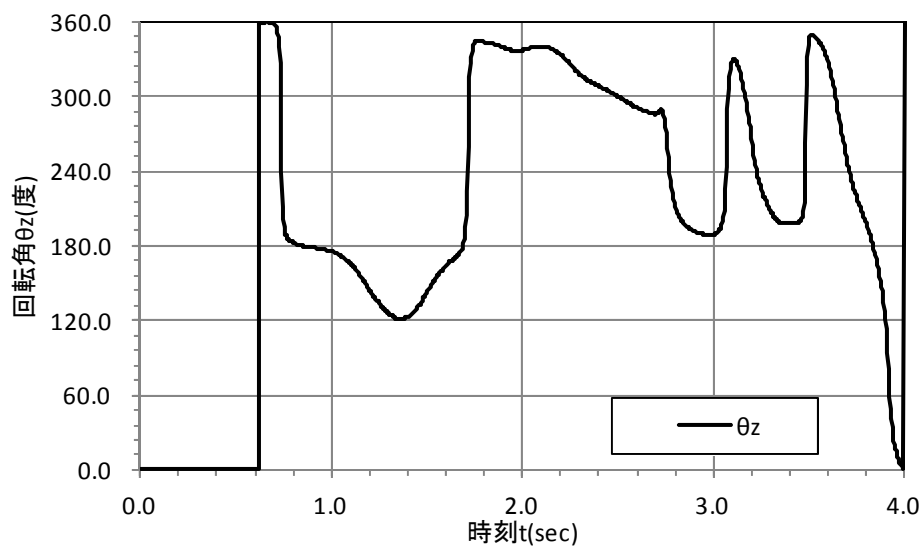


図 10.3.215 Z 軸周りの回転角の時刻歴

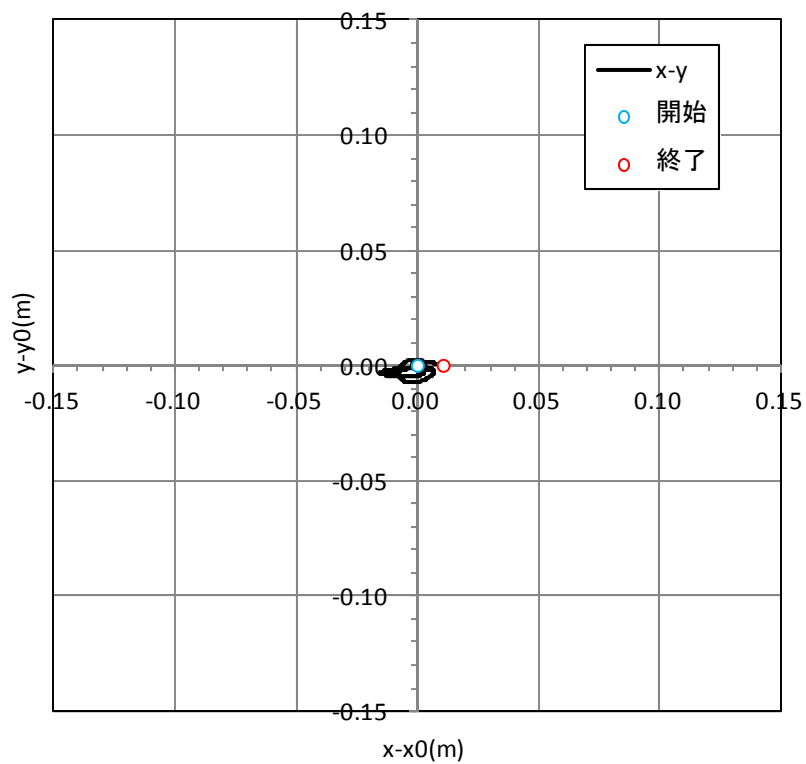


図 10.3.216 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

・CASE4 球形 40cm

(a) 岩塊の転動距離、速度の時刻歴

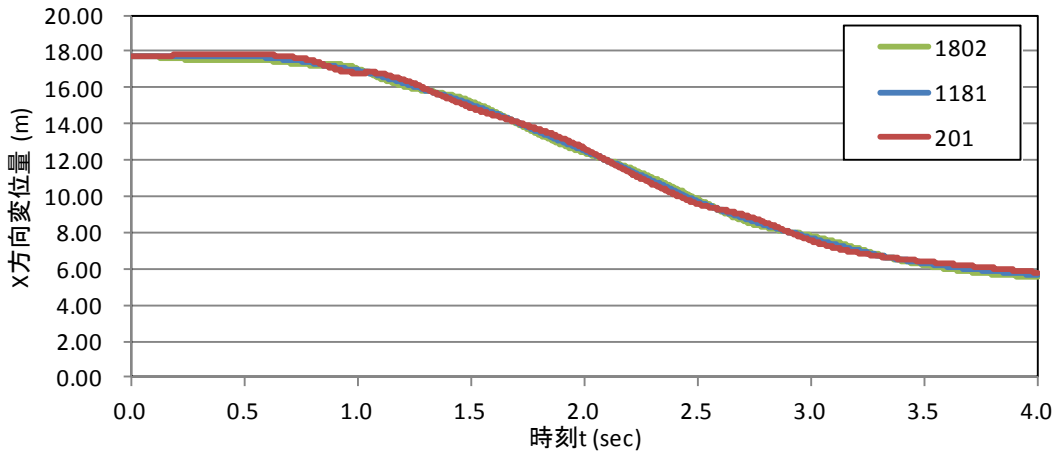


図 10.3.217 X 方向(流下方向)変位時刻歴

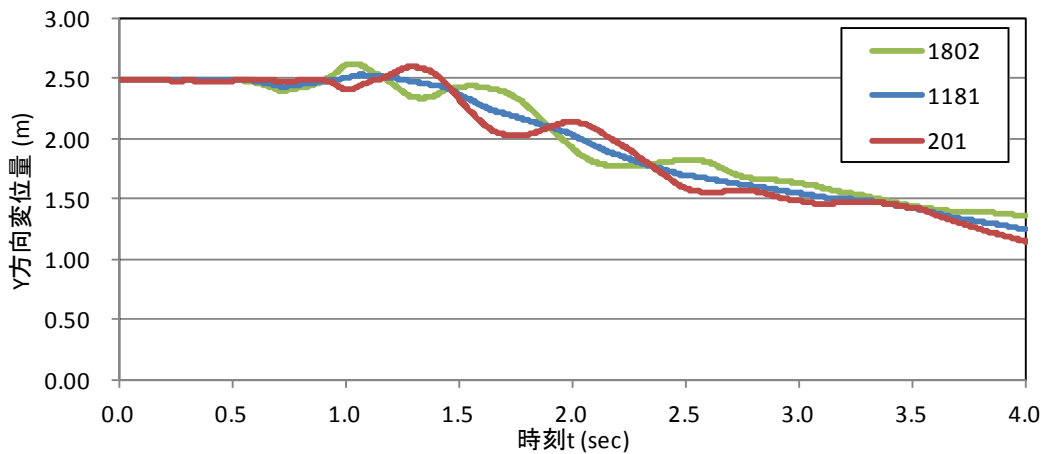


図 10.3.218 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

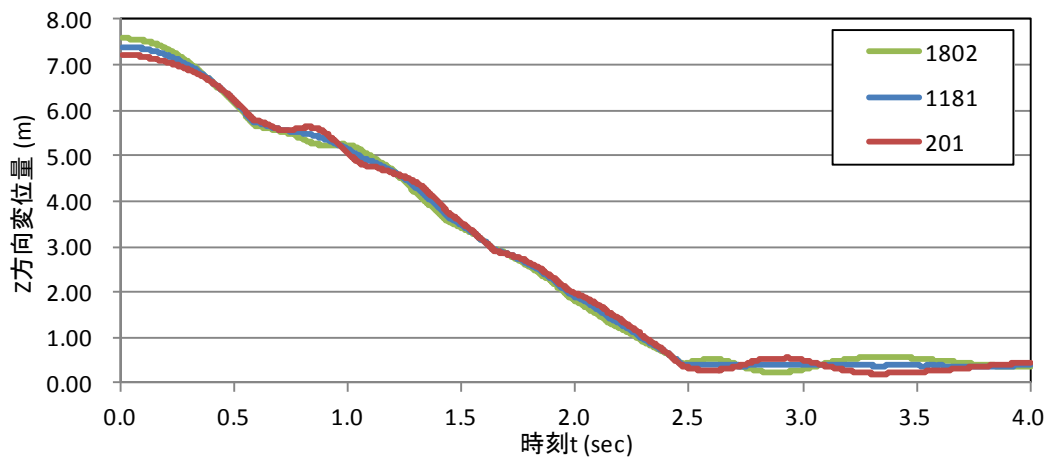


図 10.3.219 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

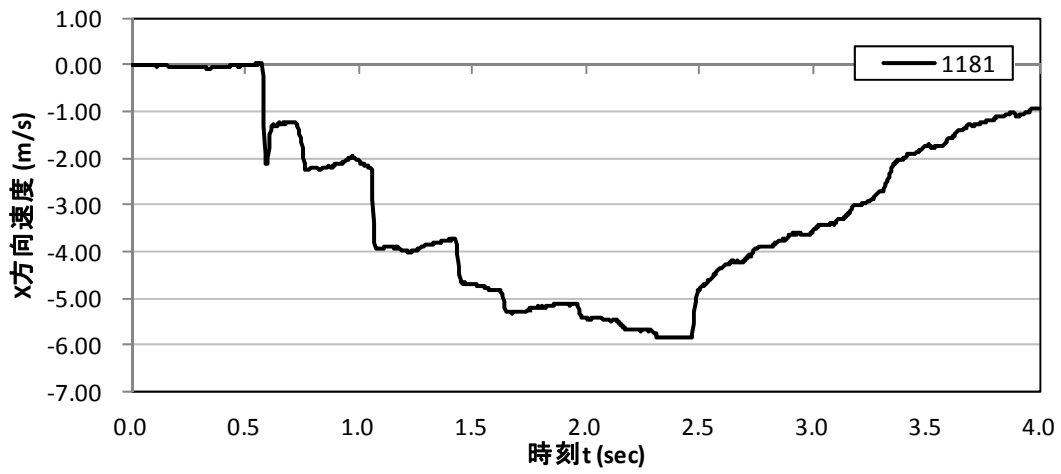


图 10.3.220 X 方向(流下方向)速度時刻歴

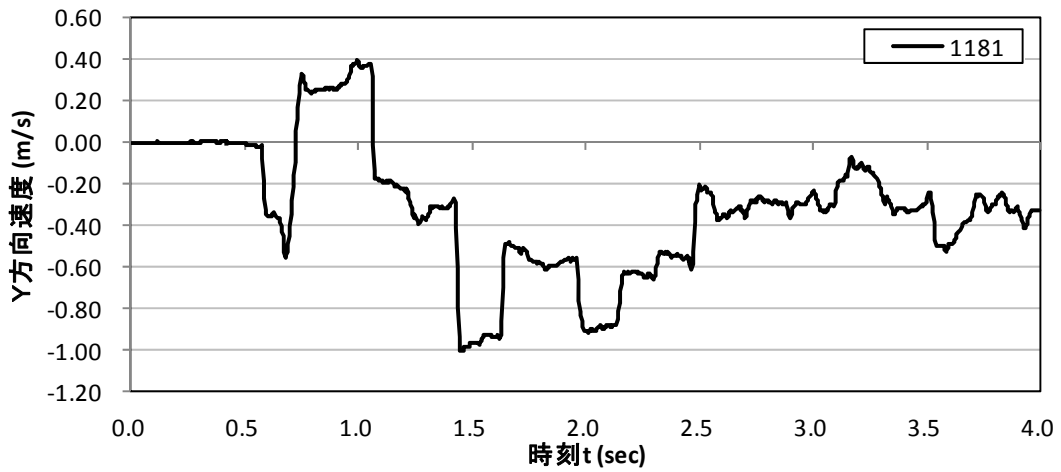


图 10.3.221 Y 方向(流下直角方向)速度時刻歴

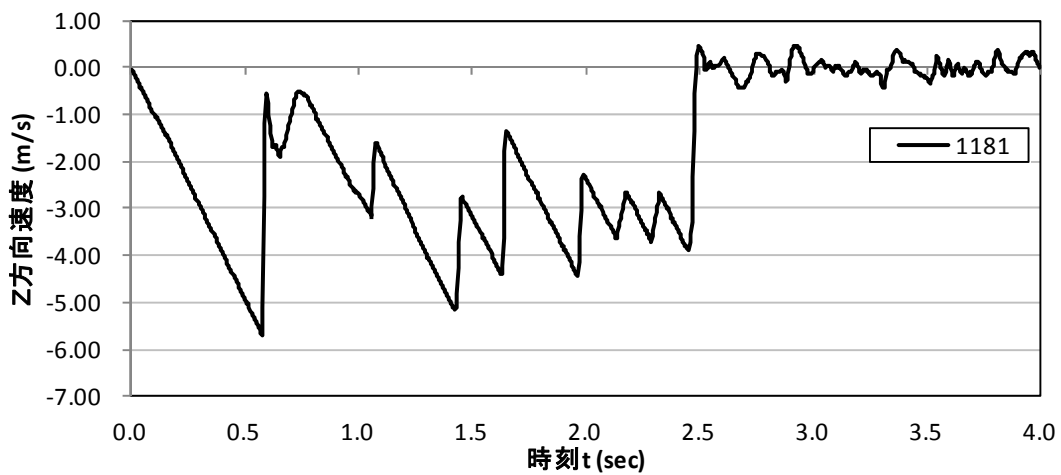


图 10.3.222 Z 方向(上下方向)速度時刻歴

(b) 岩塊の回転量の時刻歴

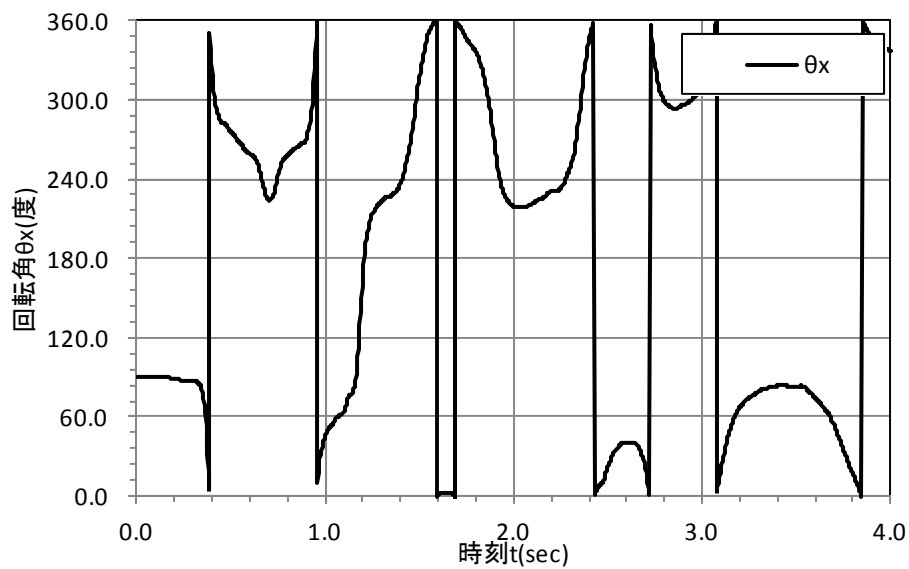


図 10.3.223 X 軸周りの回転角の時刻歴

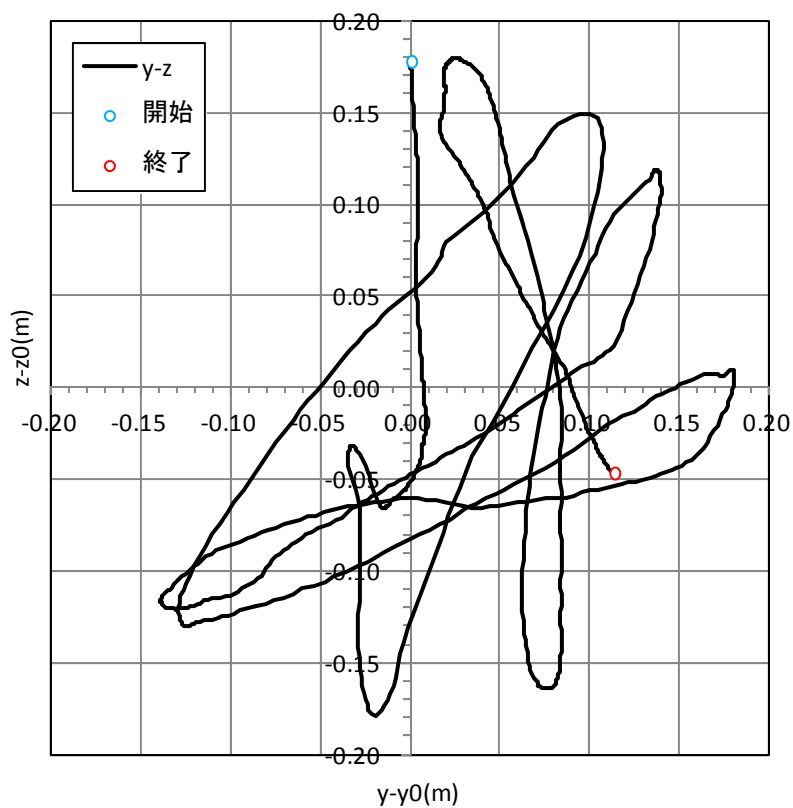


図 10.3.224 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

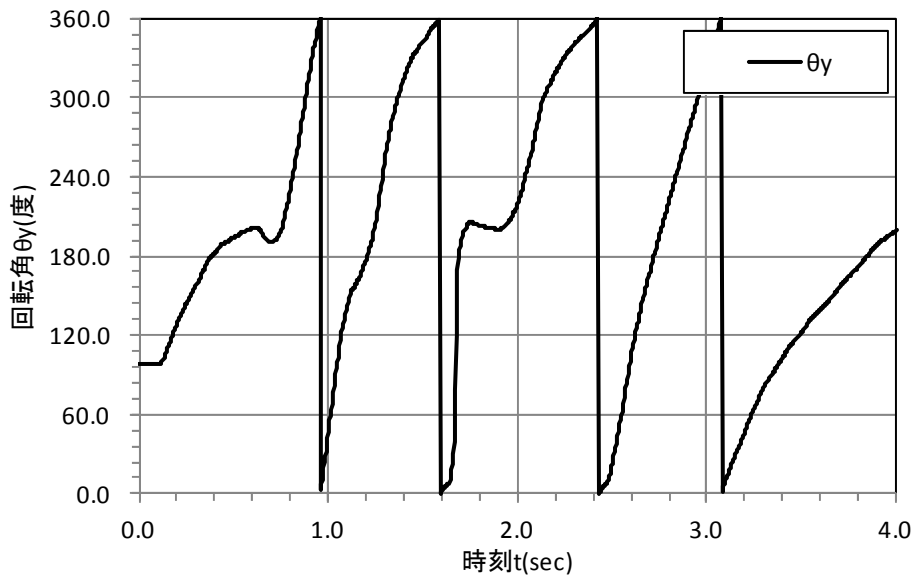


図 10.3.225 Y 軸周りの回転角の時刻歴

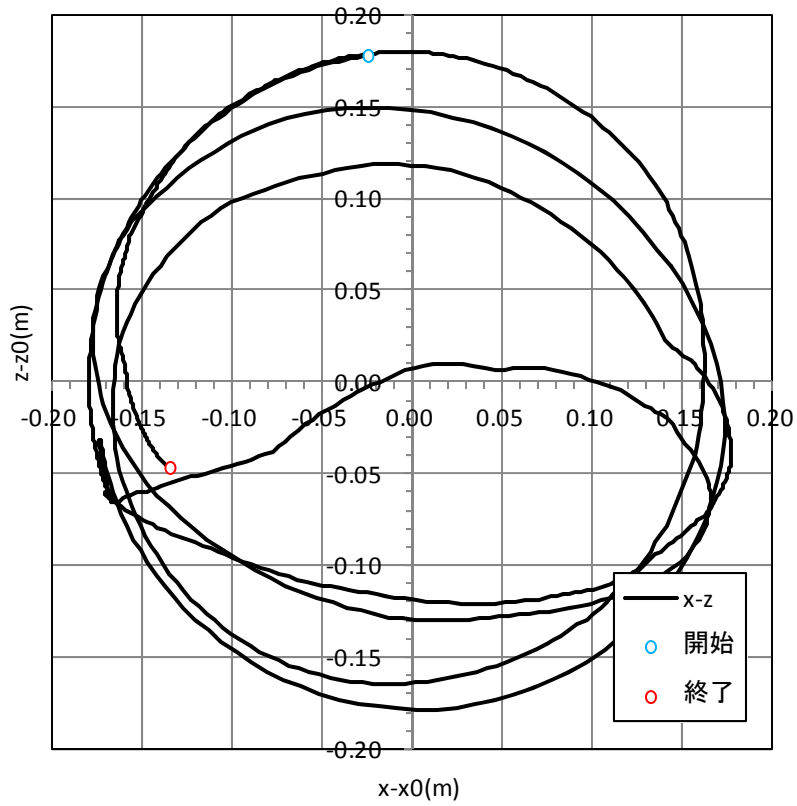


図 10.3.226 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡



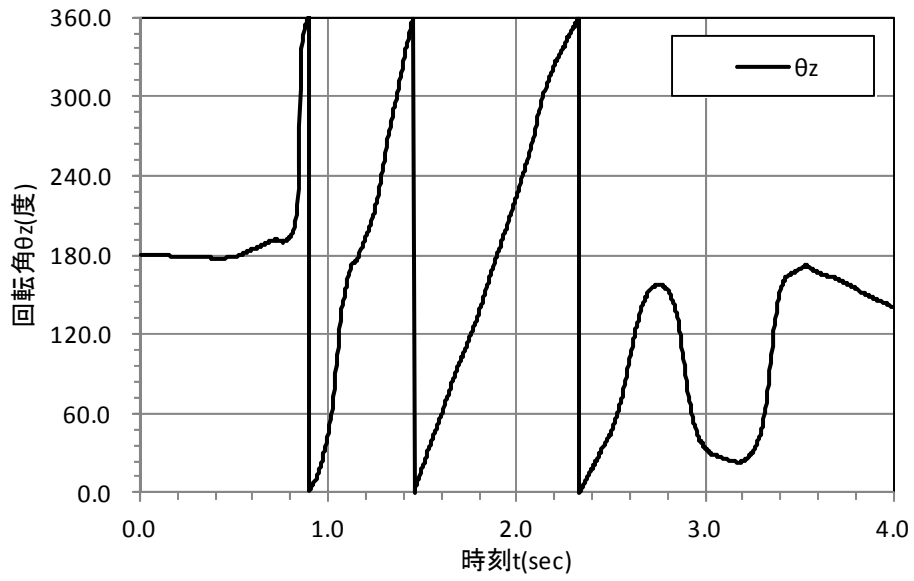


図 10.3.227 Z 軸周りの回転角の時刻歴

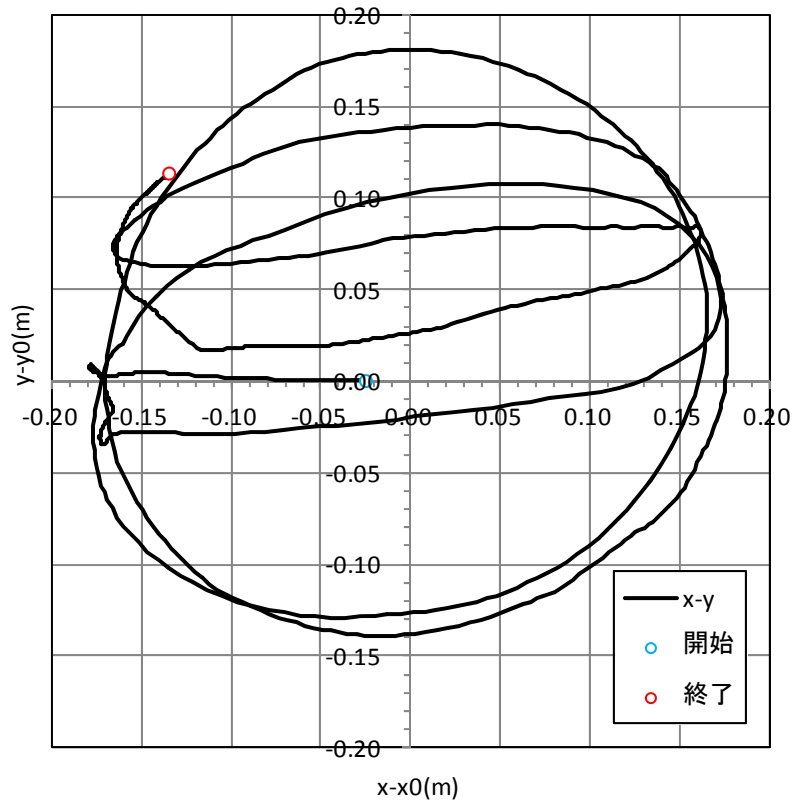


図 10.3.228 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

・CASE5 板状 20cm

(a) 岩塊の転動距離、速度の時刻歴

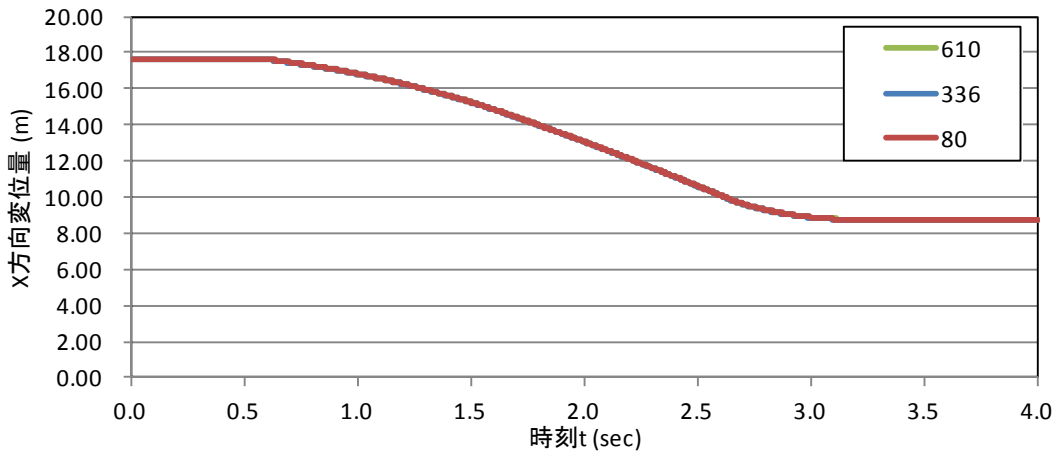


図 10.3.229 X 方向(流下方向)変位時刻歴

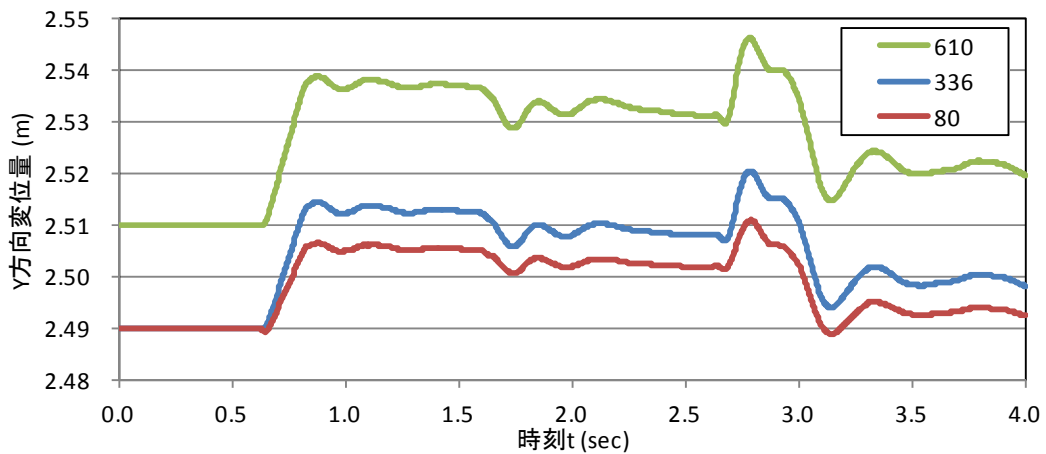


図 10.3.230 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

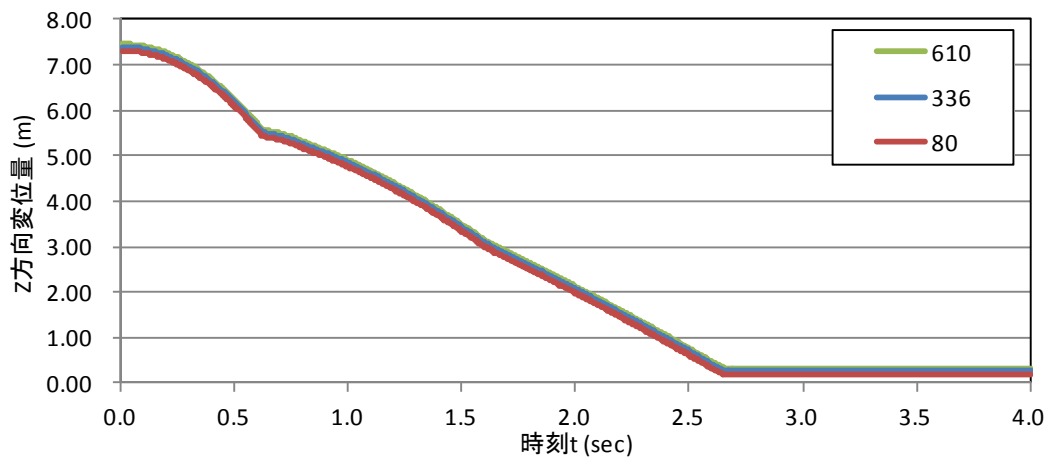


図 10.3.231 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

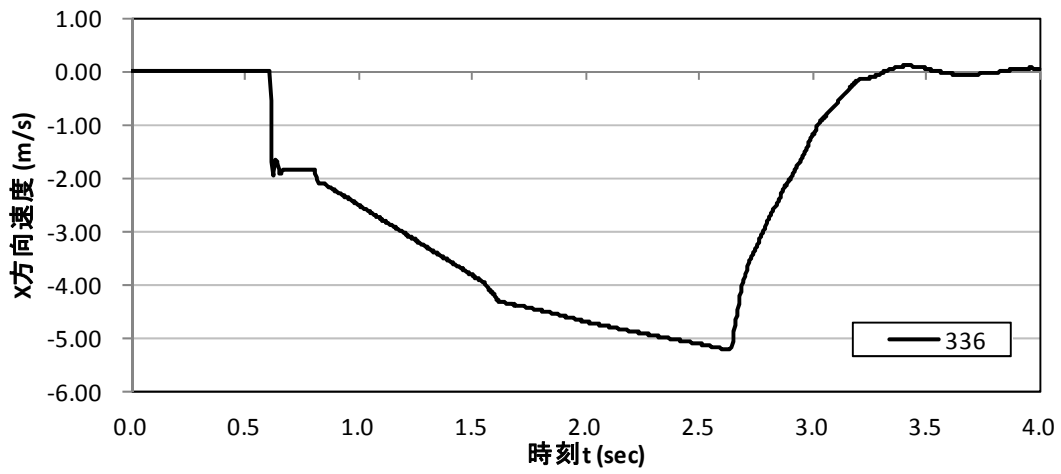


图 10.3.232 X 方向(流下方向)速度時刻歴

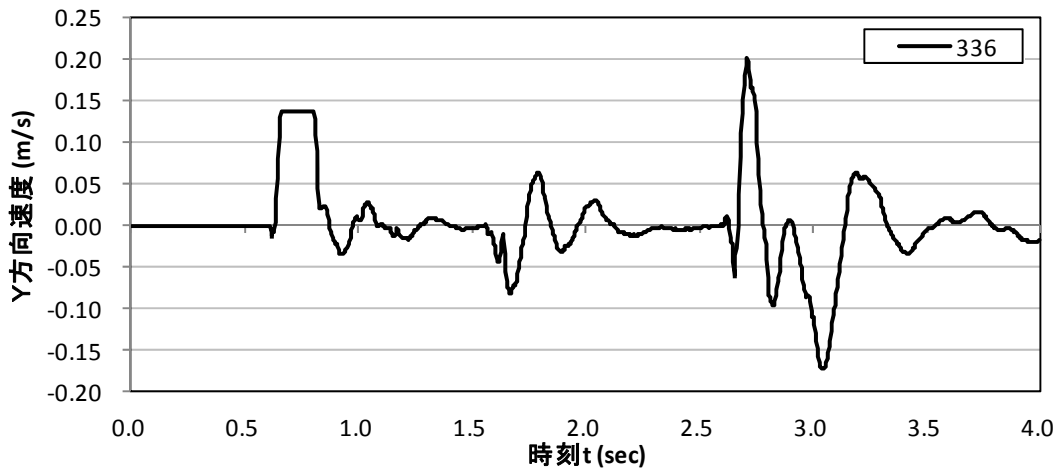


图 10.3.233 Y 方向(流下直角方向)速度時刻歴

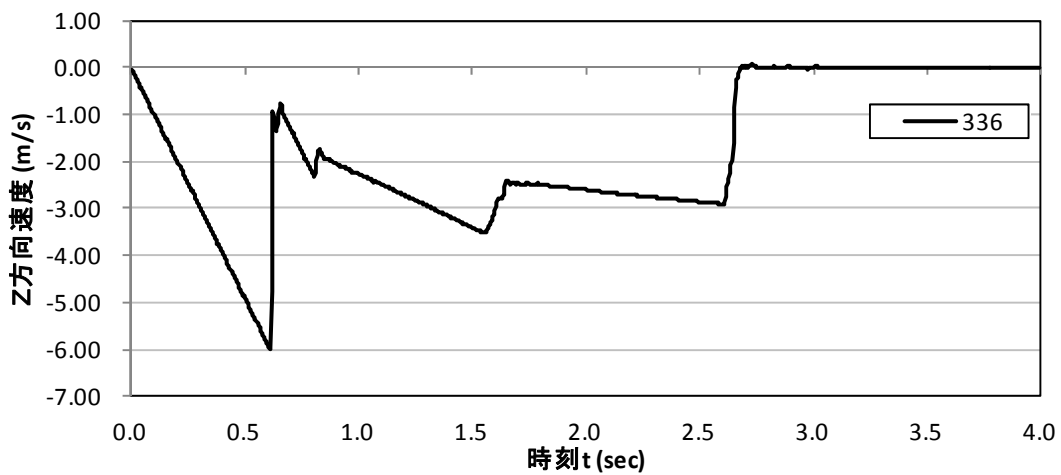


图 10.3.234 Z 方向(上下方向)速度時刻歴

(b) 岩塊の回転量の時刻歴

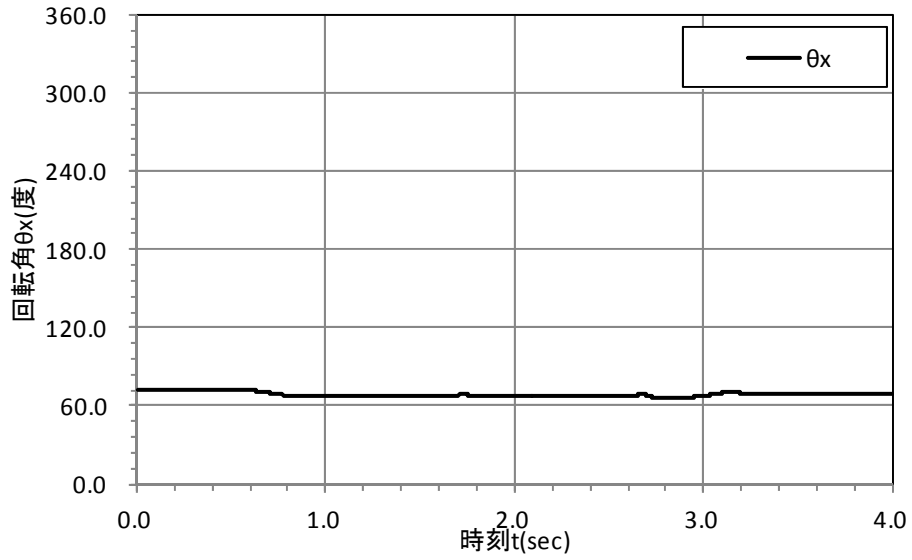


図 10.3.235 X 軸周りの回転角の時刻歴

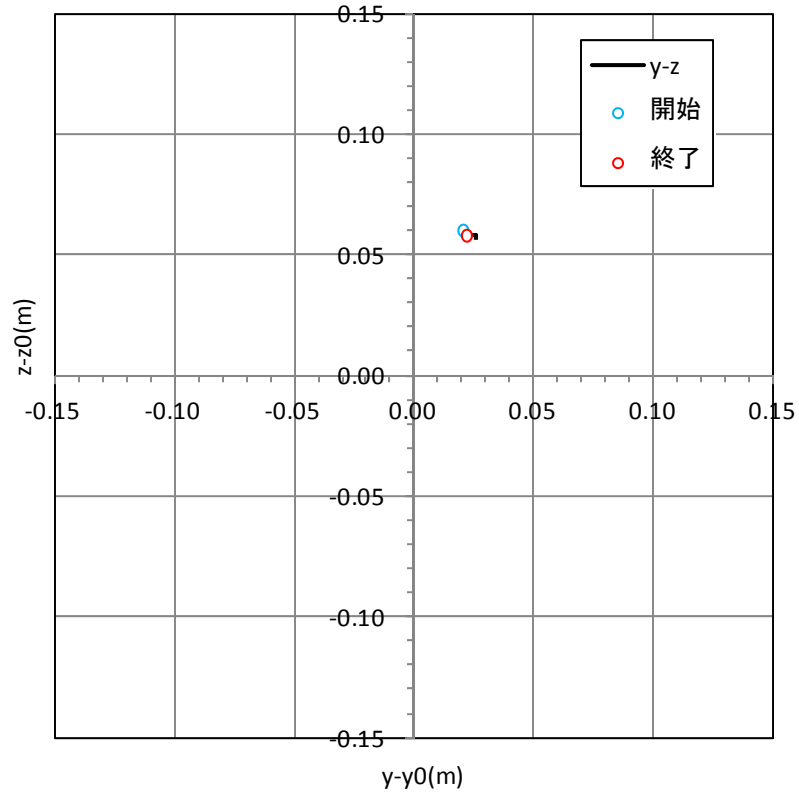


図 10.3.236 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

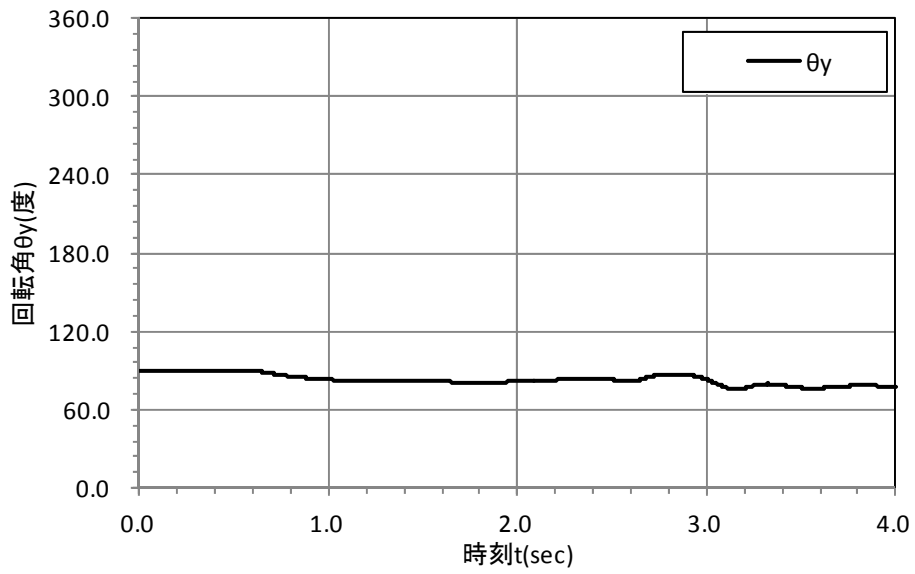


図 10.3.237 Y 軸周りの回転角の時刻歴

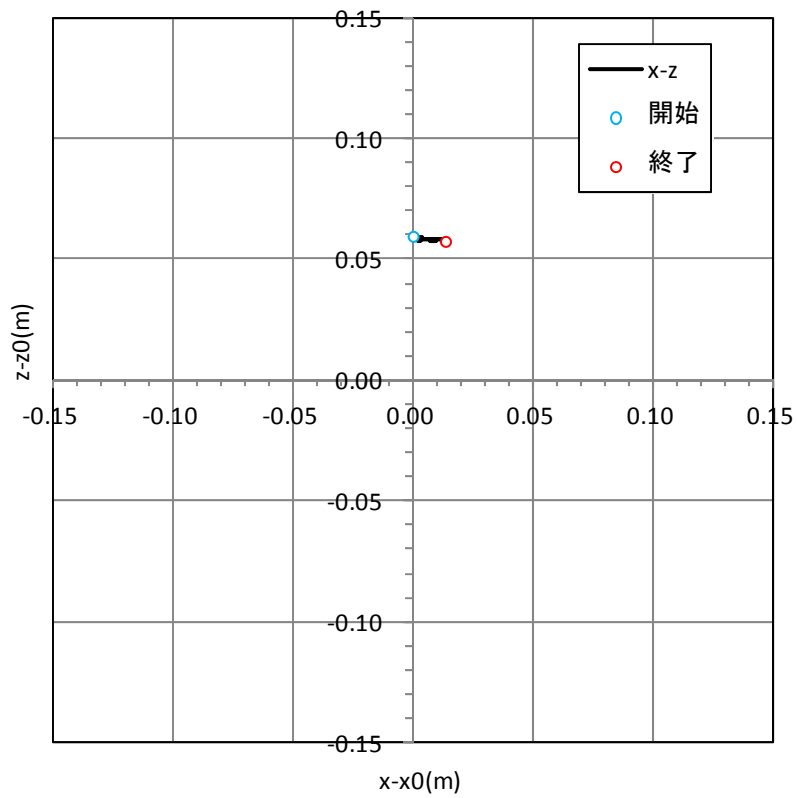


図 10.3.238 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

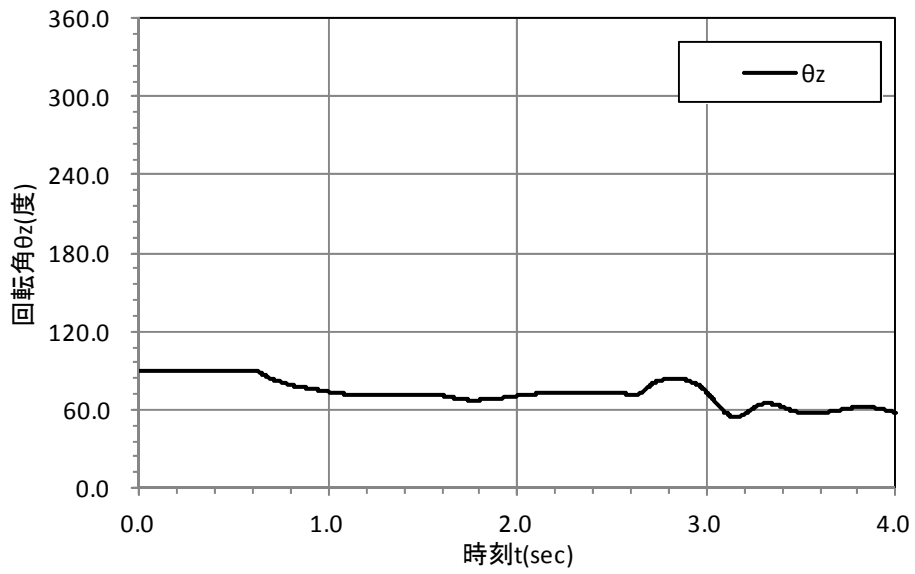


図 10.3.239 Z 軸周りの回転角の時刻歴

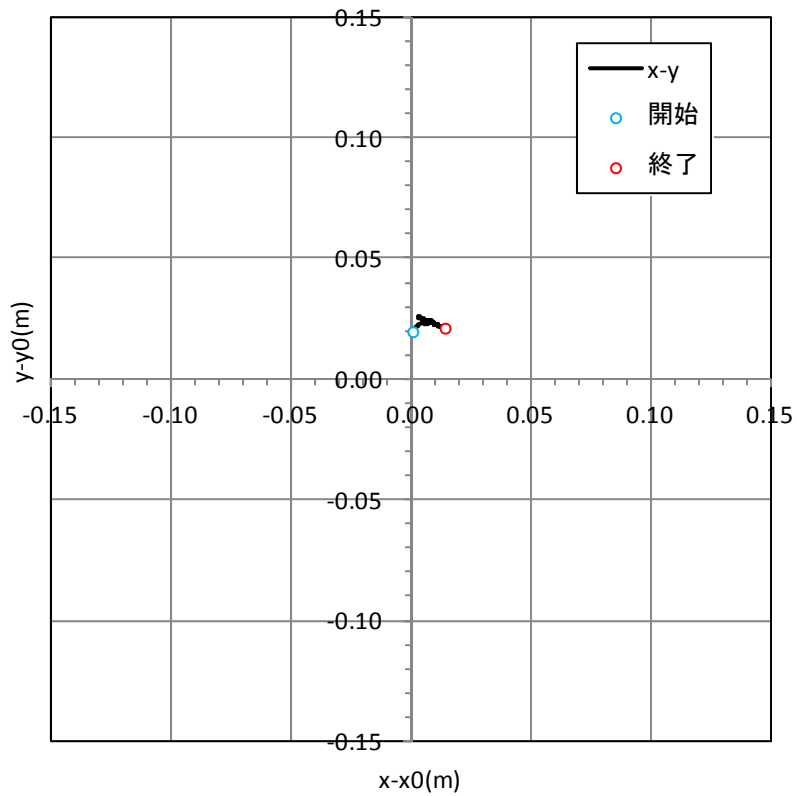


図 10.3.240 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

・CASE5 板状 40cm

(a) 岩塊の転動距離、速度の時刻歴

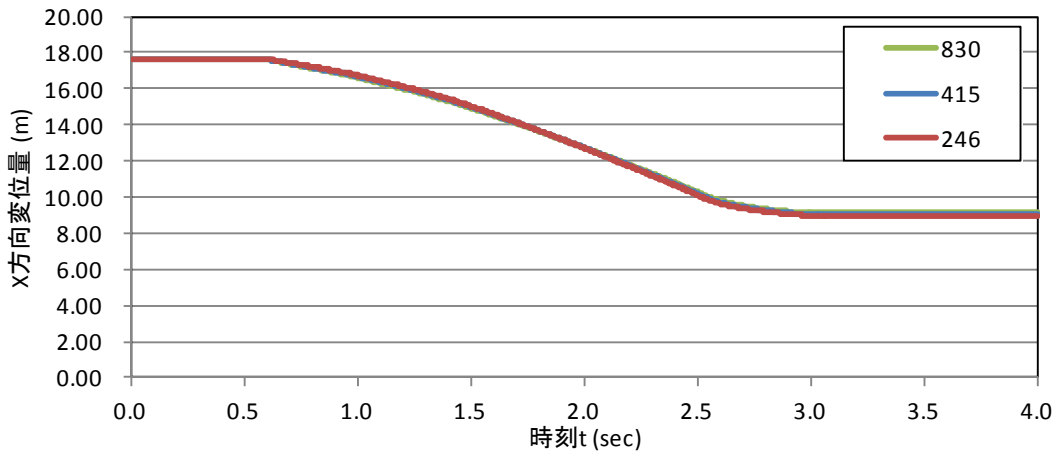


図 10.3.241 X 方向(流下方向)変位時刻歴

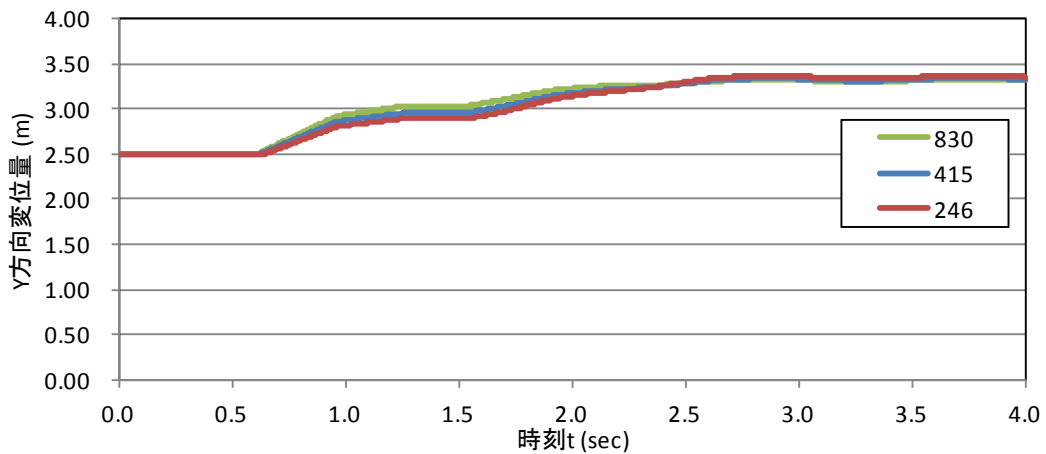


図 10.3.242 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

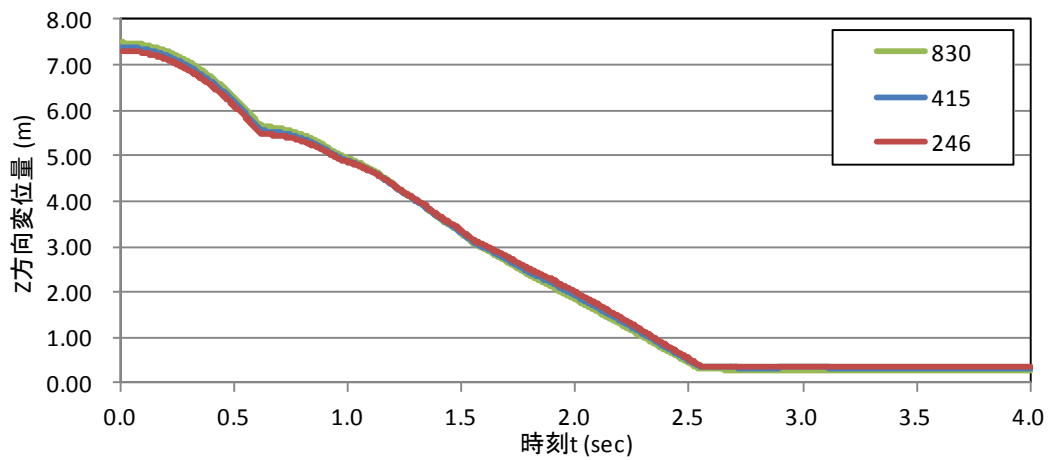


図 10.3.243 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

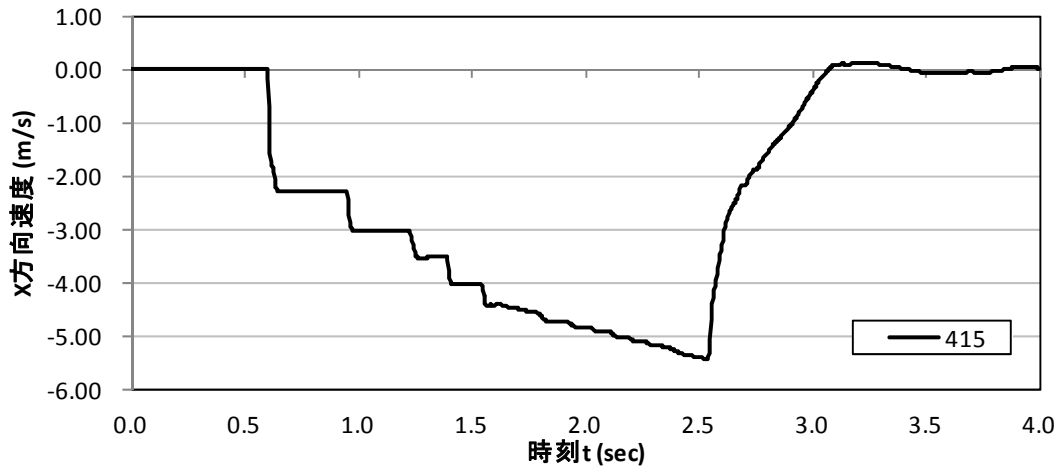


图 10.3.244 X 方向(流下方向)速度时刻历

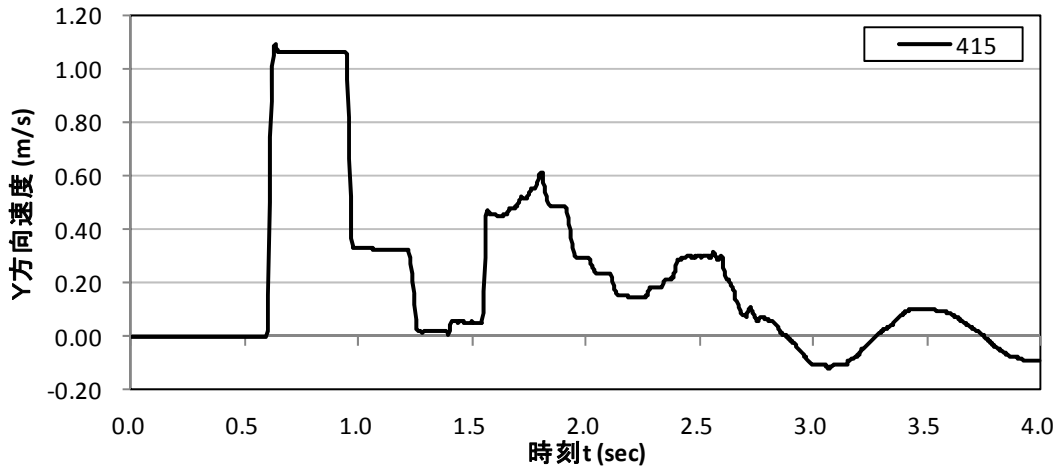


图 10.3.245 Y 方向(流下直角方向)速度时刻历

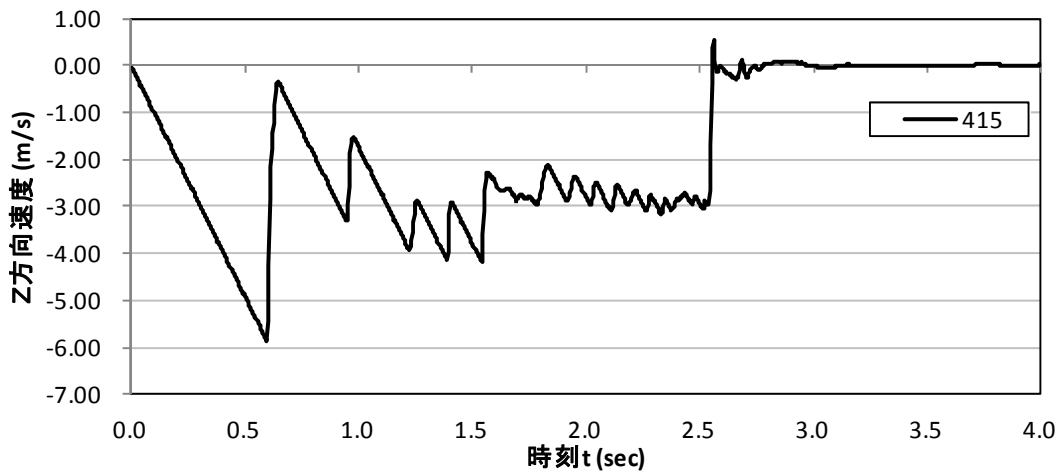


图 10.3.246 Z 方向(上下方向)速度时刻历



(b) 岩塊の回転量の時刻歴

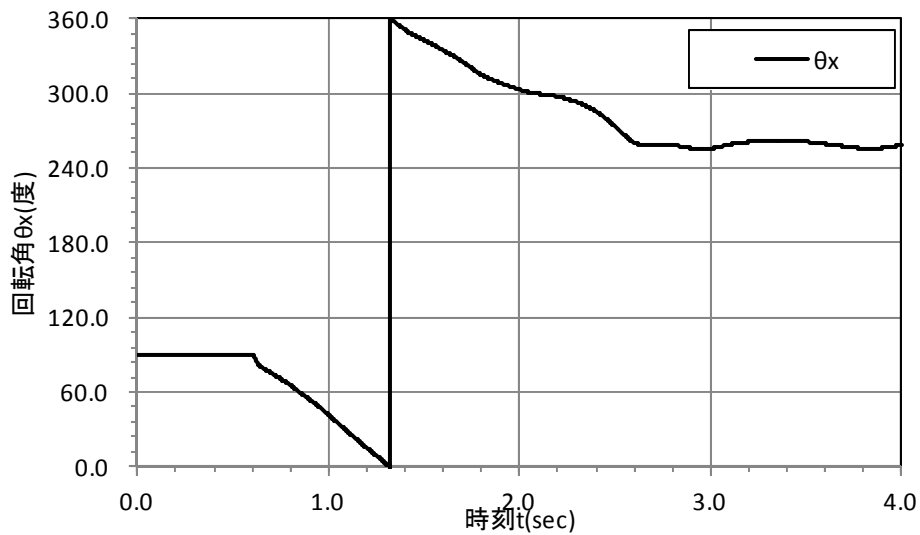


図 10.3.247 X 軸周りの回転角の時刻歴

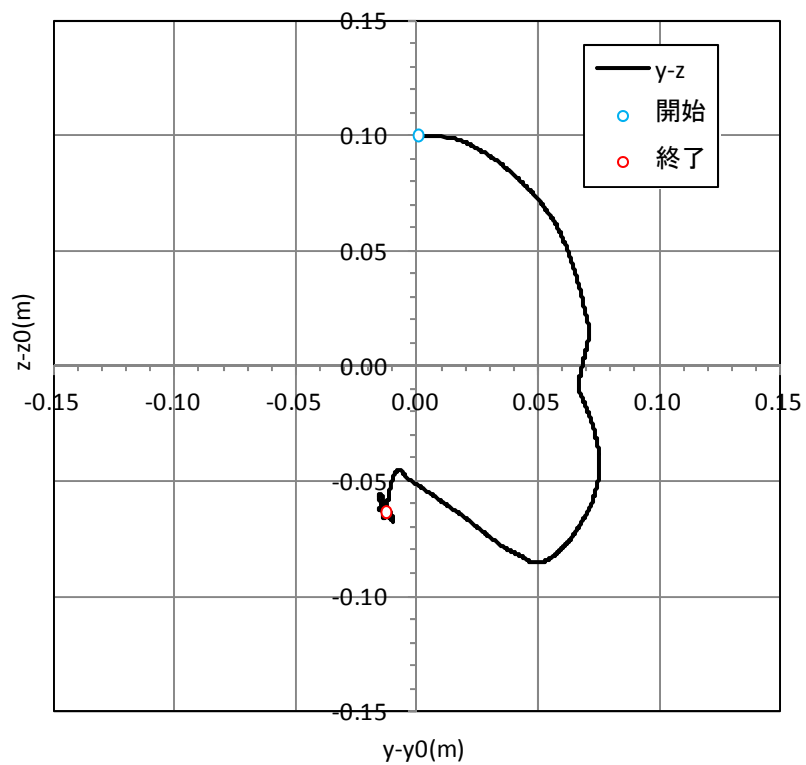


図 10.3.248 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

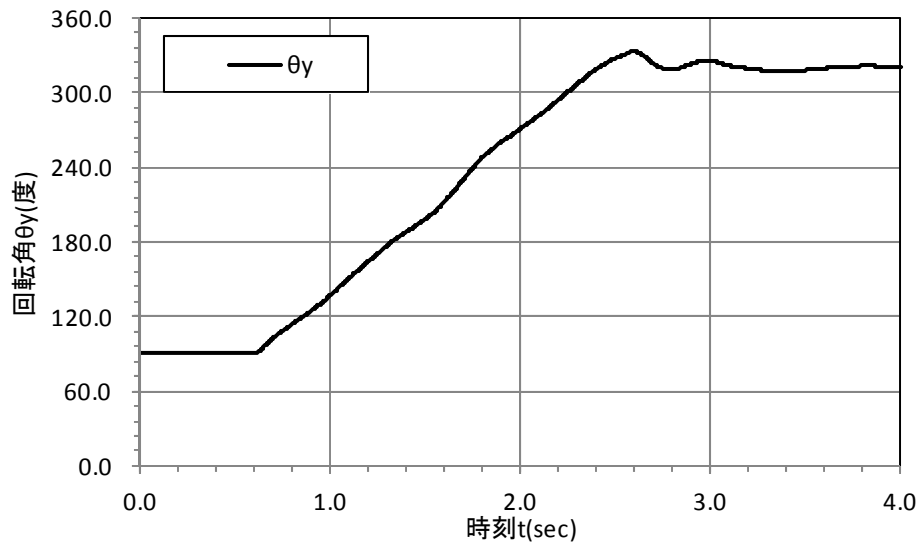


図 10.3.249 Y 軸周りの回転角の時刻歴

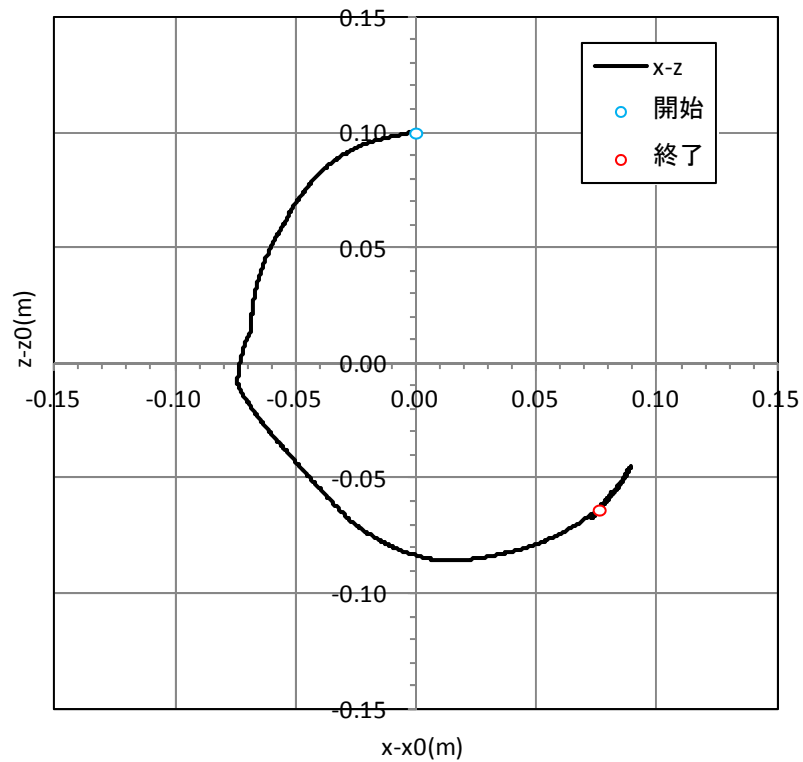


図 10.3.250 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

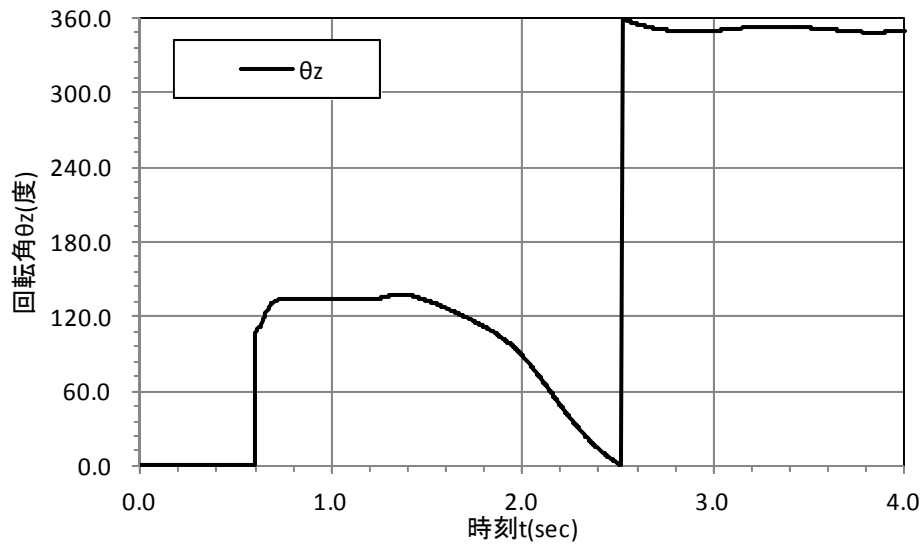


図 10.3.251 Z 軸周りの回転角の時刻歴

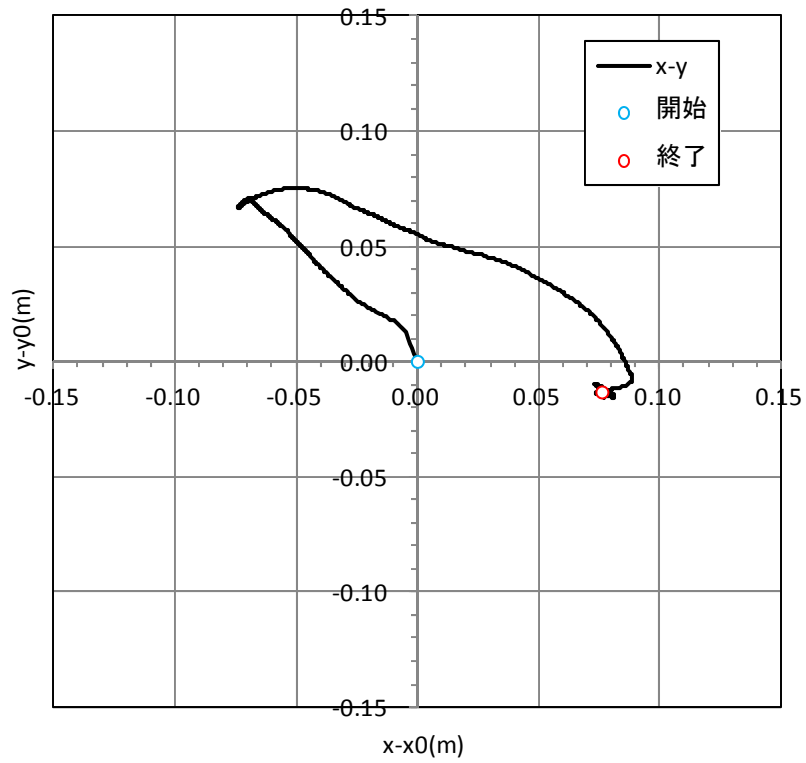


図 10.3.252 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

・CASE6 塊状 20cm

(a) 岩塊の転動距離、速度の時刻歴

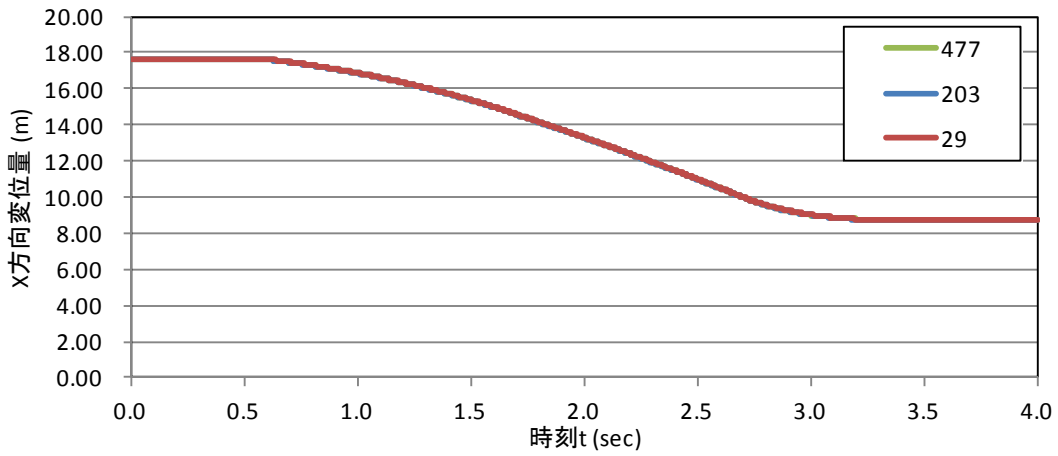


図 10.3.253 X 方向(流下方向)変位時刻歴

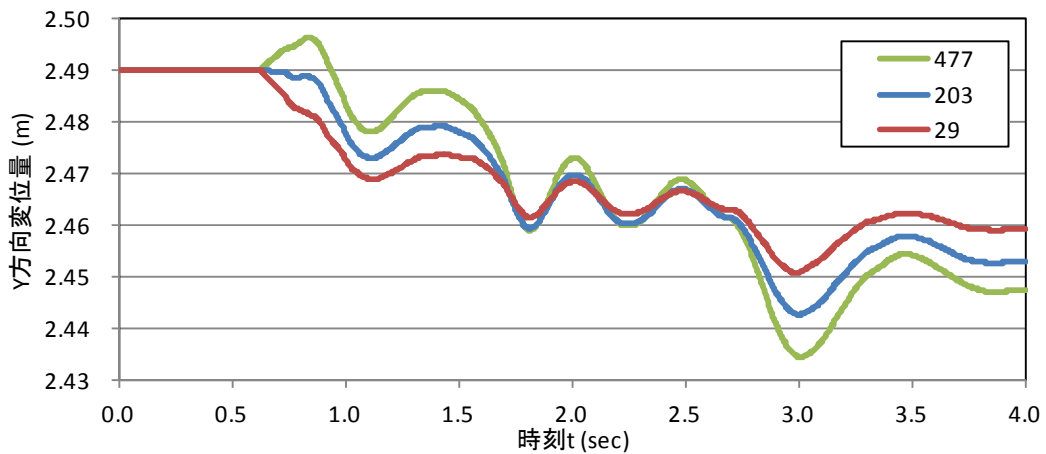


図 10.3.254 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

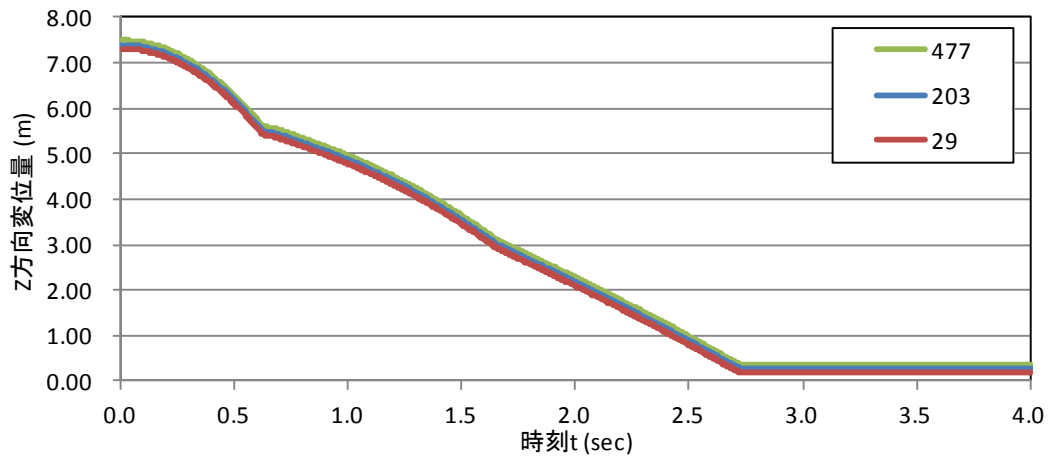


図 10.3.255 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

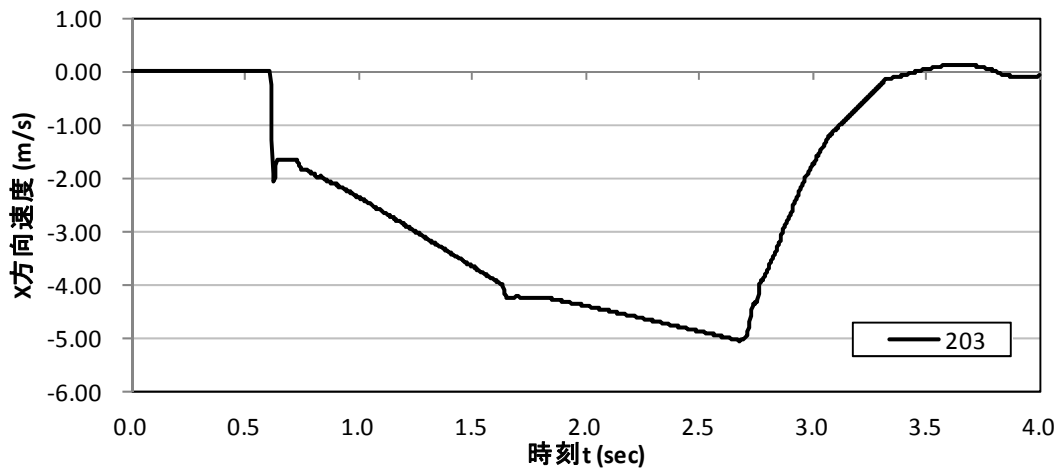


图 10.3.256 X 方向(流下方向)速度時刻歷

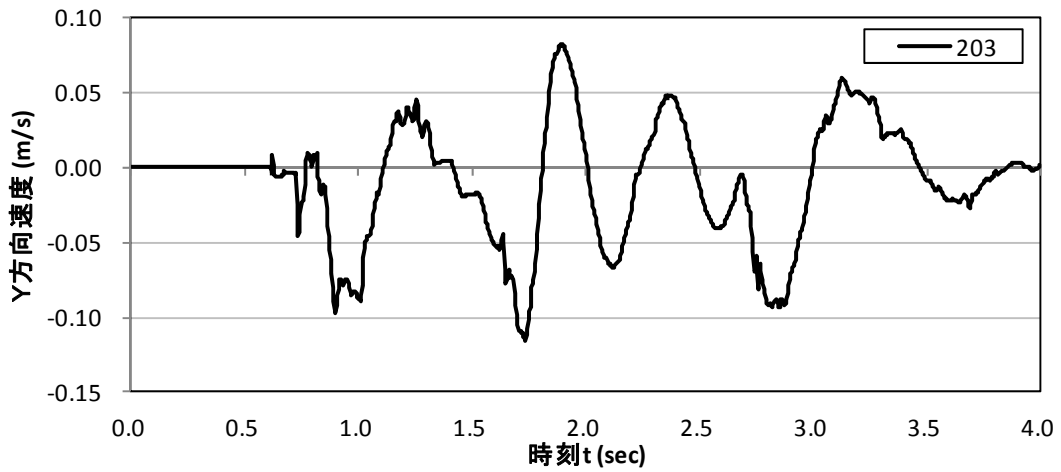


图 10.3.257 Y 方向(流下直角方向)速度時刻歷

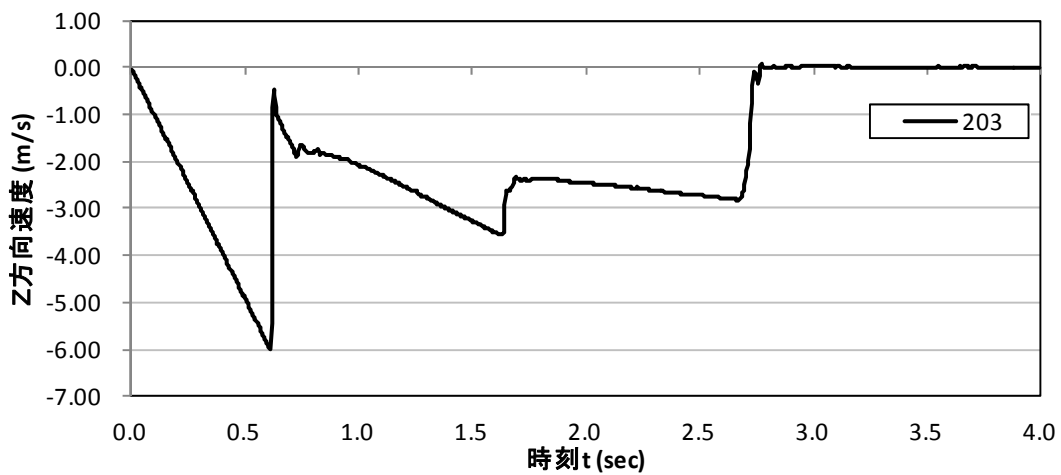


图 10.3.258 Z 方向(上下方向)速度時刻歷

(b) 岩塊の回転量の時刻歴

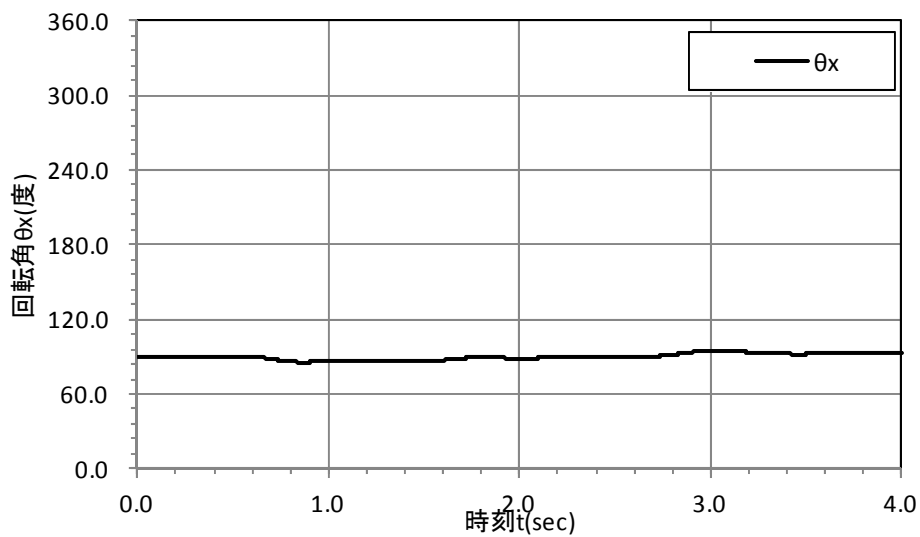


図 10.3.259 X 軸周りの回転角の時刻歴

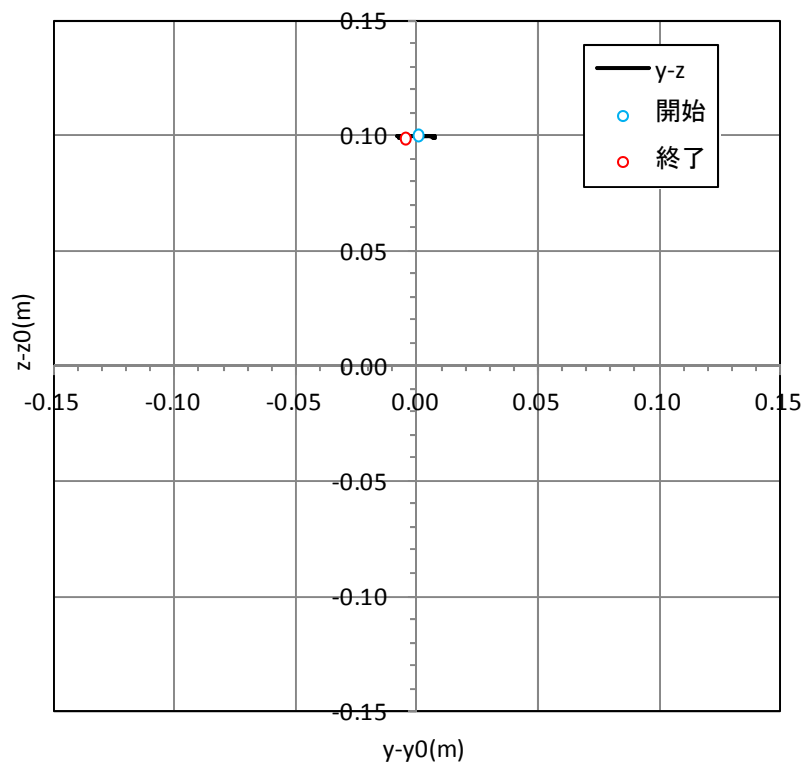


図 10.3.260 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

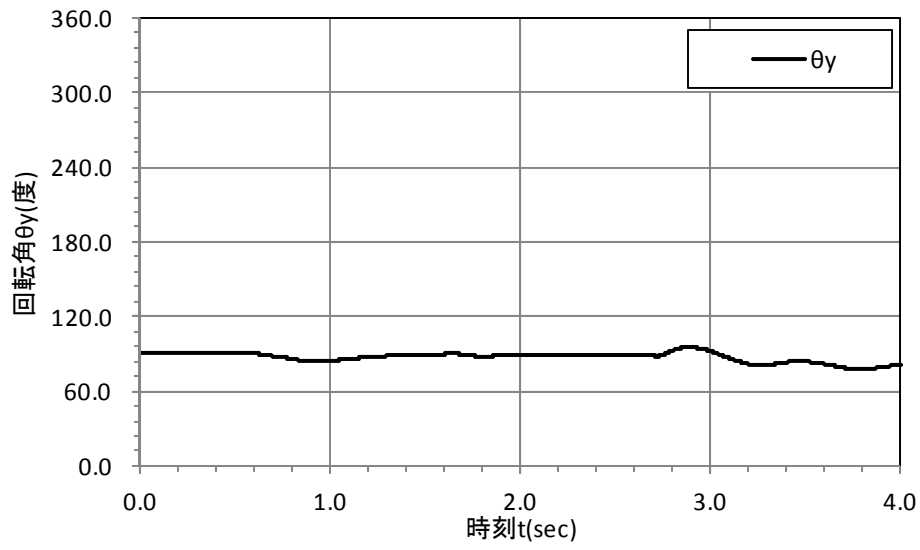


図 10.3.261 Y 軸周りの回転角の時刻歴

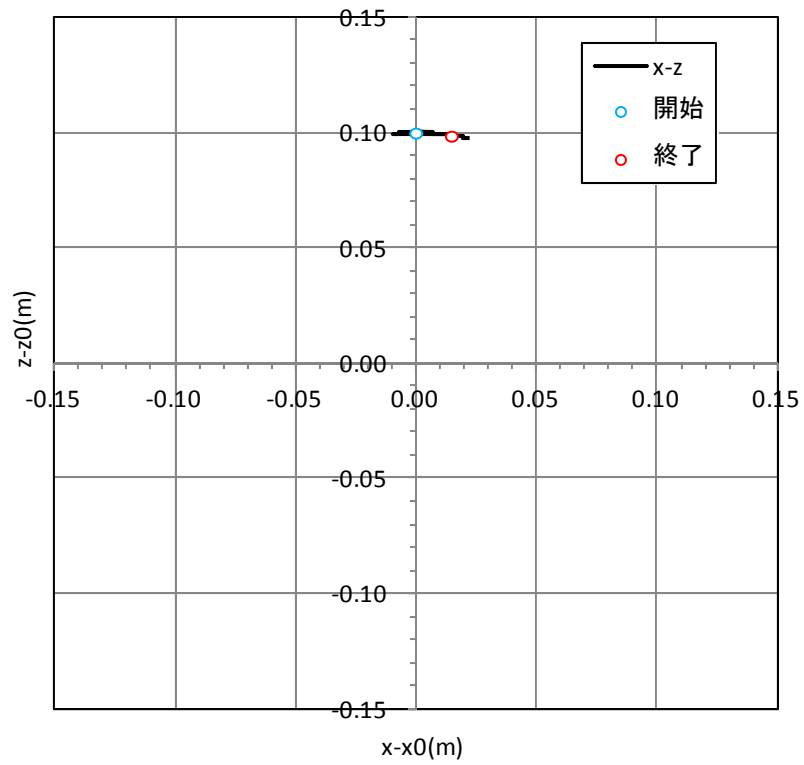


図 10.3.262 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

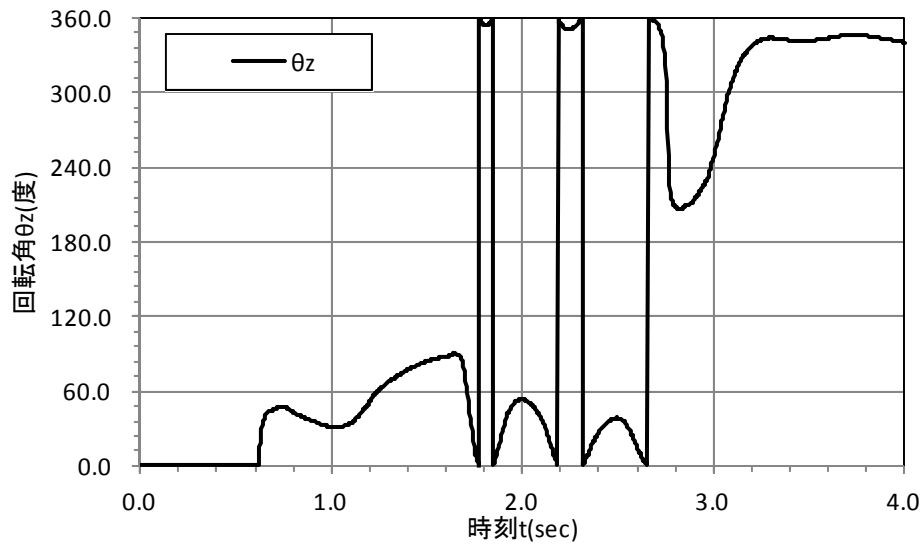


図 10.3.263 Z 軸周りの回転角の時刻歴

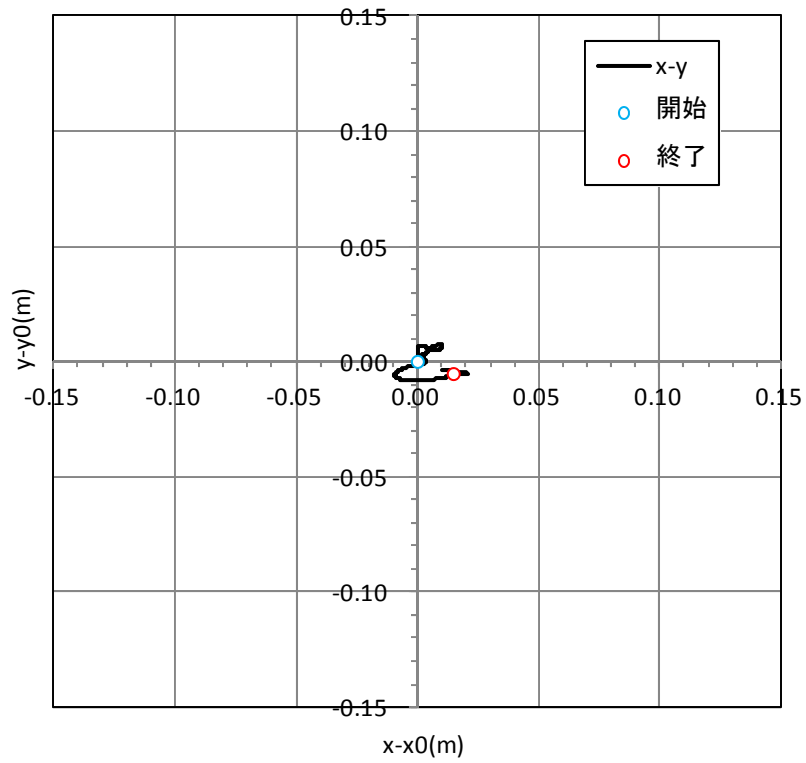


図 10.3.264 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡



・CASE6 塊状 40cm

(a) 岩塊の転動距離、速度の時刻歴

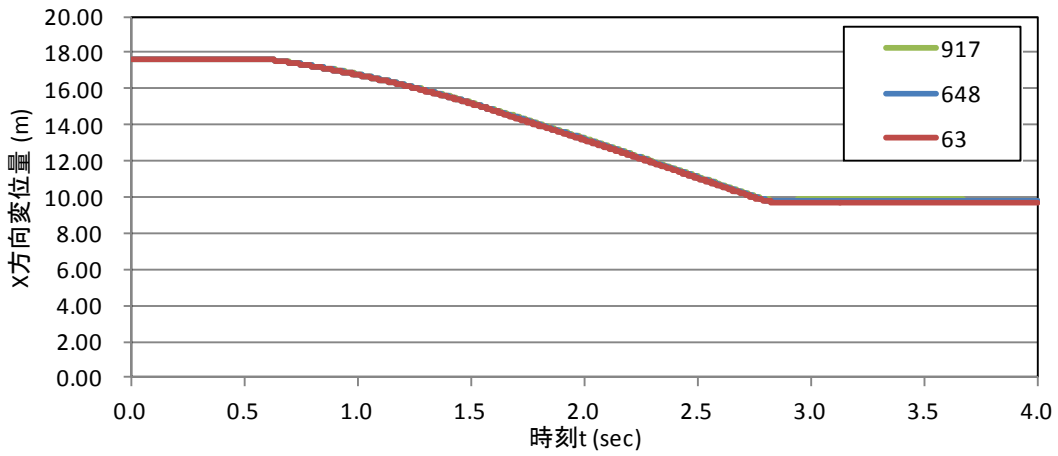


図 10.3.265 X 方向(流下方向)変位時刻歴

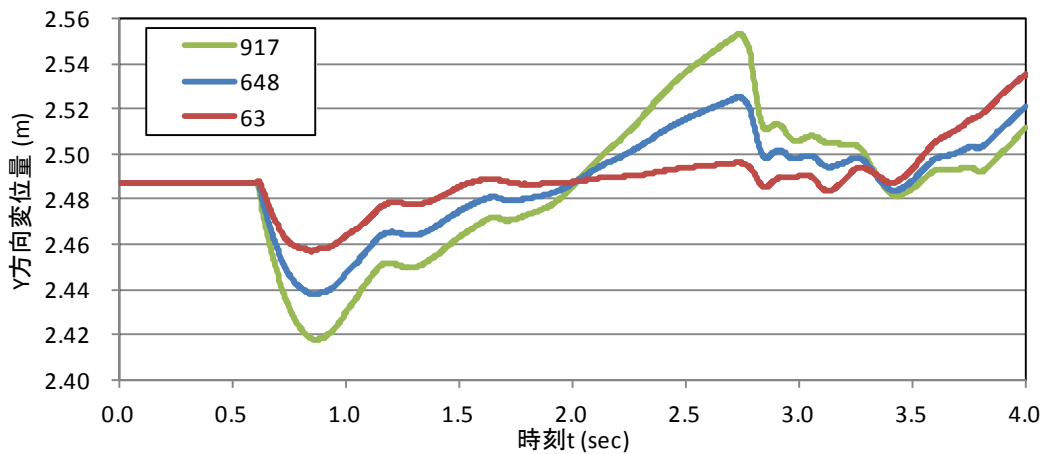


図 10.3.266 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

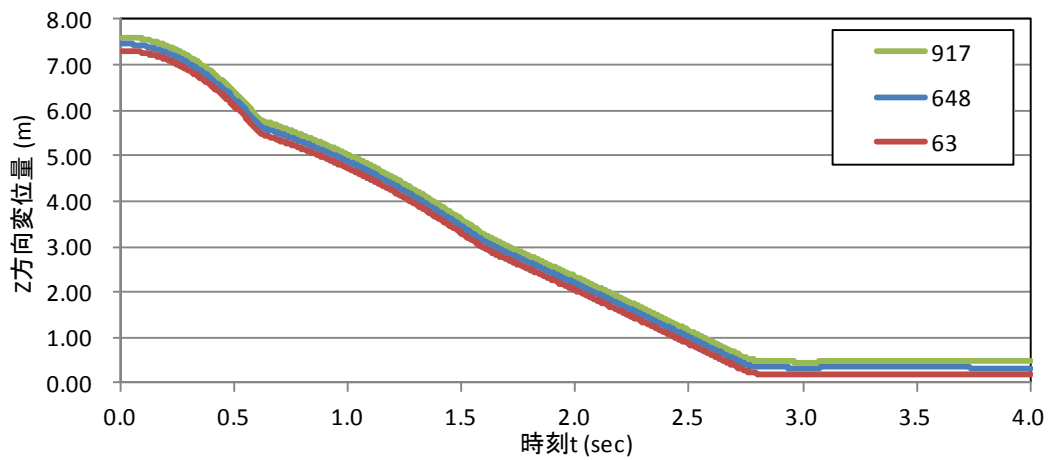


図 10.3.267 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

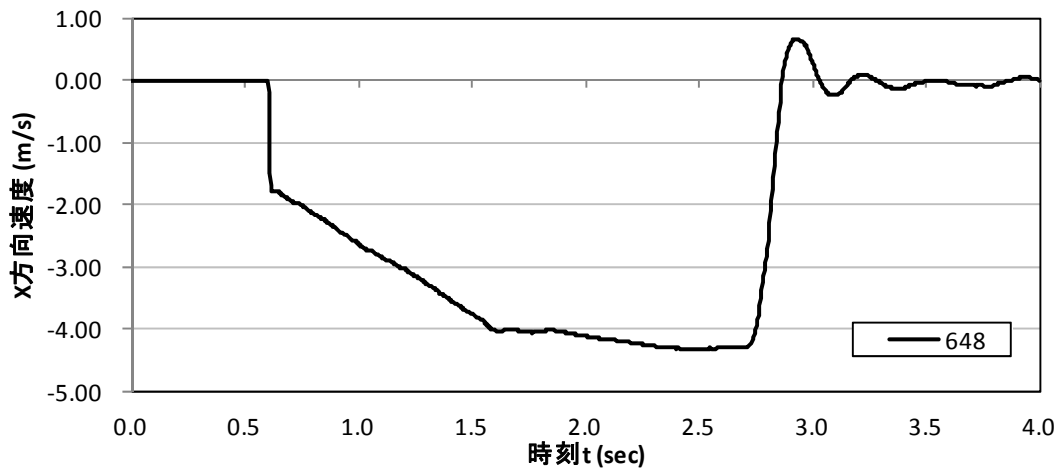


图 10.3.268 X 方向(流下方向)速度時刻歴

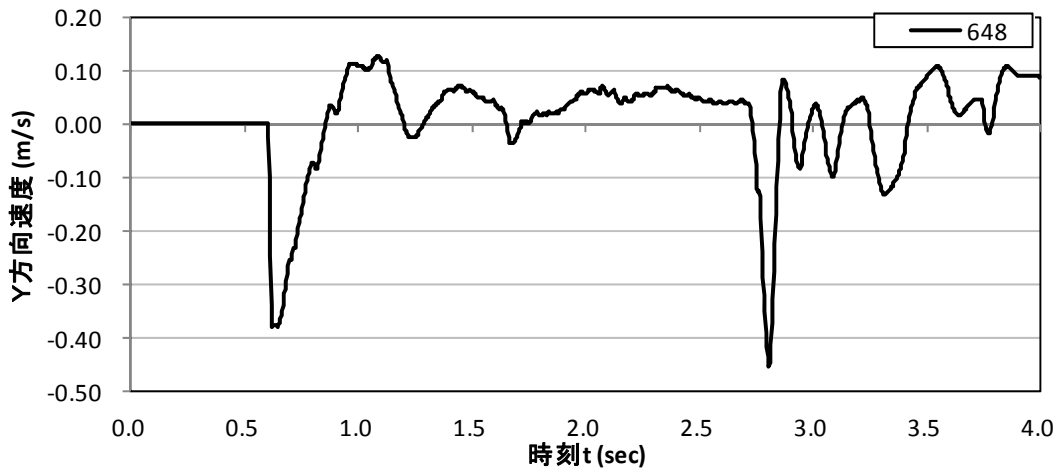


图 10.3.269 Y 方向(流下直角方向)速度時刻歴

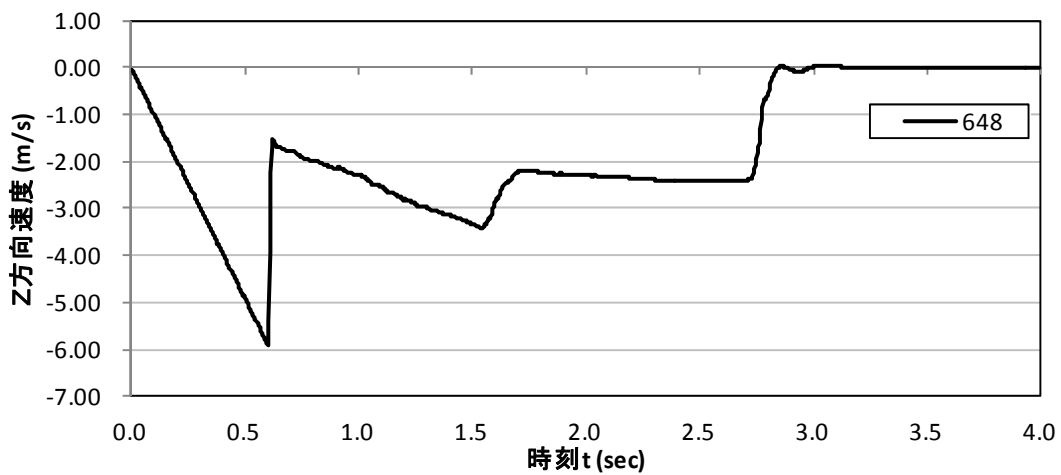


图 10.3.270 Z 方向(上下方向)速度時刻歴

(b) 岩塊の回転量の時刻歴

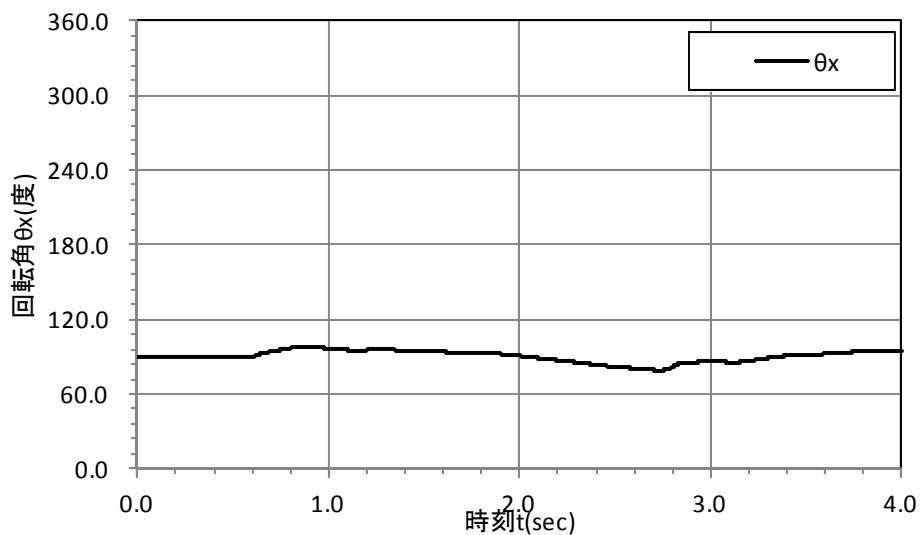


図 10.3.271 X 軸周りの回転角の時刻歴

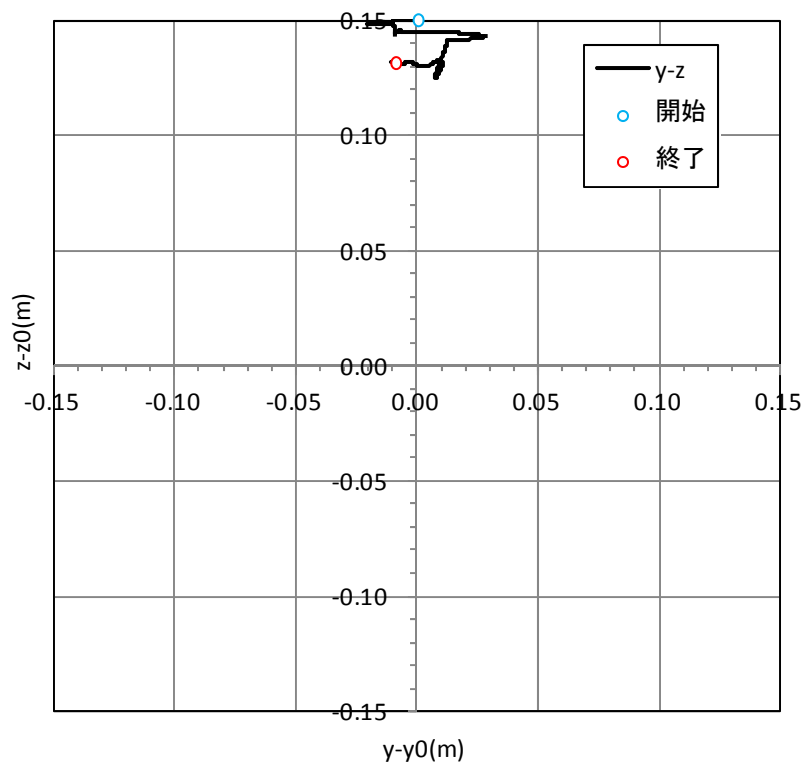


図 10.3.272 X 軸周りの回転の粒子の軌跡

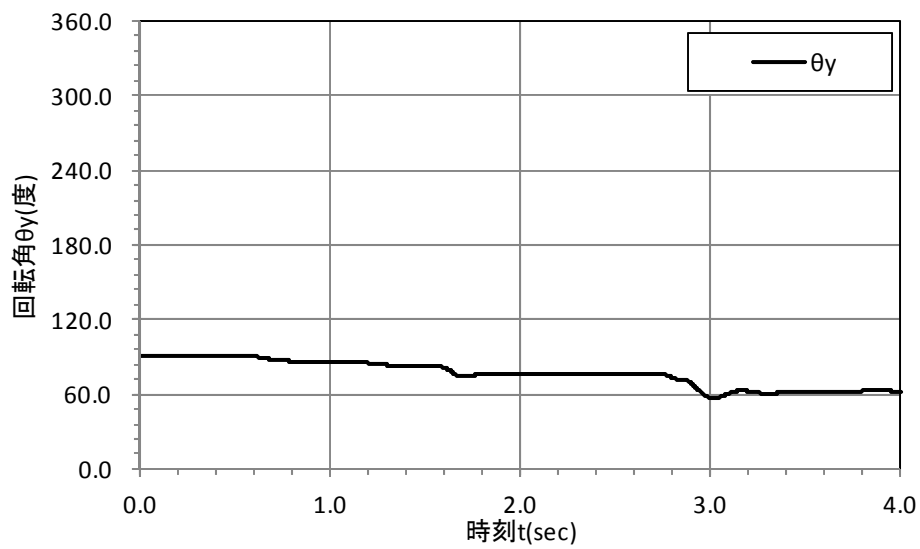


図 10.3.273 Y 軸周りの回転角の時刻歴

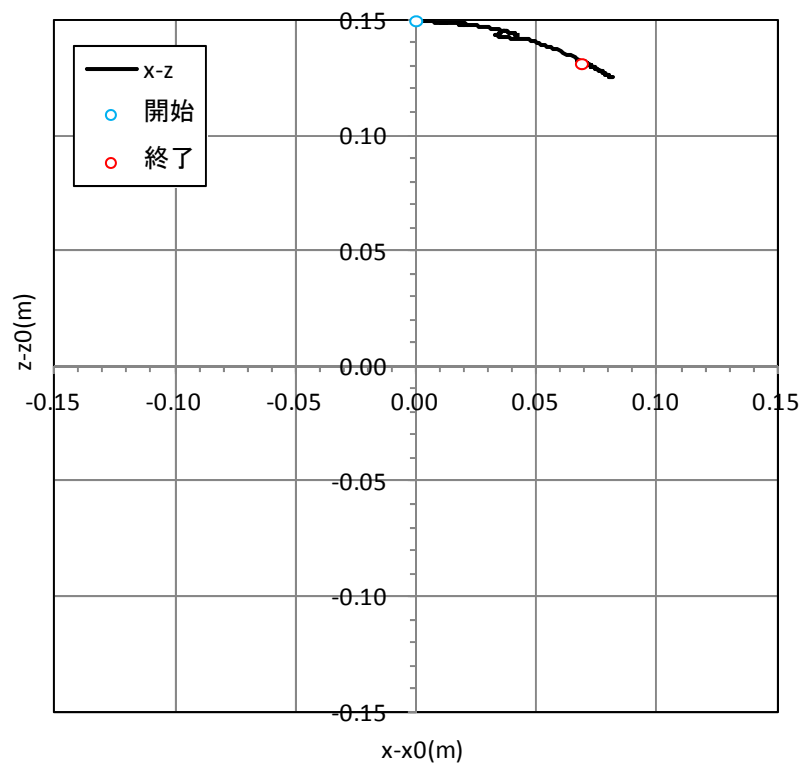


図 10.3.274 Y 軸周りの回転の粒子の軌跡

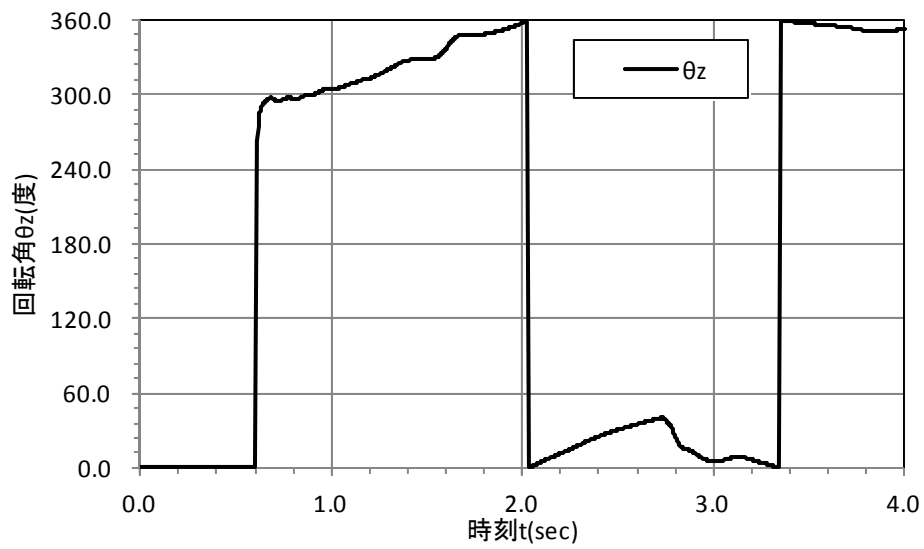


図 10.3.275 Z 軸周りの回転角の時刻歴

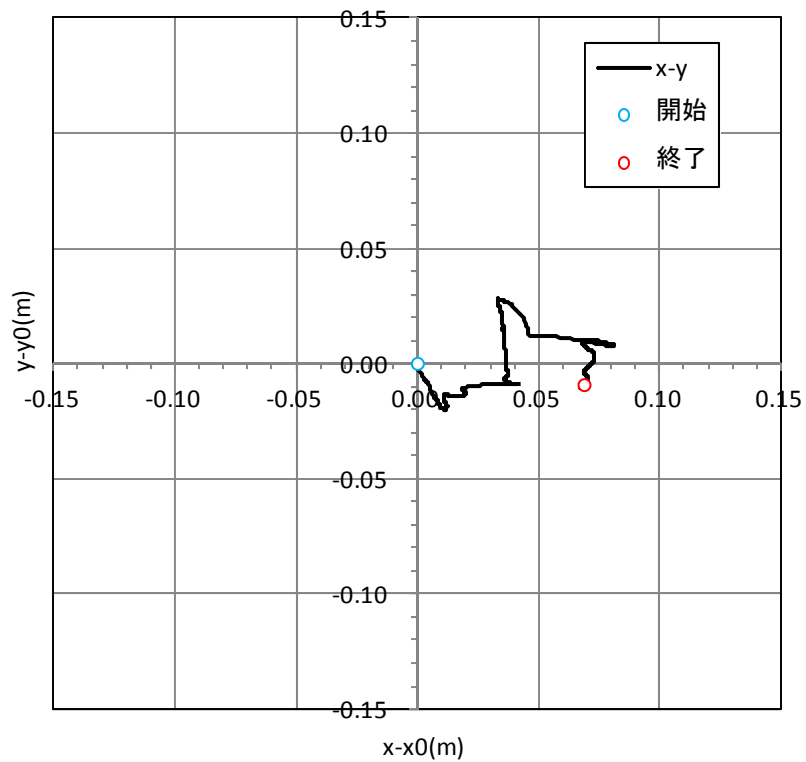


図 10.3.276 Z 軸周りの回転の粒子の軌跡

### 10.3.4 土砂模型の流動挙動のシミュレーション（壁有ケース）

#### （1） 粒子数，解析ステップ数，時間間隔

以下に土砂実験の2ケースの粒子数、解析ステップ数、時間間隔を示す。解析時間は反力壁もしくは流路模型の端に届くまでとし全ケース4秒間とした。時間間隔は後述する跳ね返りシミュレーションにおいて発散しないことを確認して決定した。

表 10.3.16 粒子数、解析ステップ数、ステップ間隔

ケース	模型材料	粒子数 (内は土砂の 粒子数)	初期応力解析	
			解析 ステッ プ数	ステップ 間隔(s)
7	碎石	7,222(3,922)	200,000	2.0E-05
8	土砂	7,222(3,922)	200,000	2.0E-05

(2) 構成則

土砂、碎石はドラグープラガー弾塑性モデルで定義した。物性データは以下のとおりとした。図 10.3.277 に碎石と土砂の応力ひずみ関係を示す。

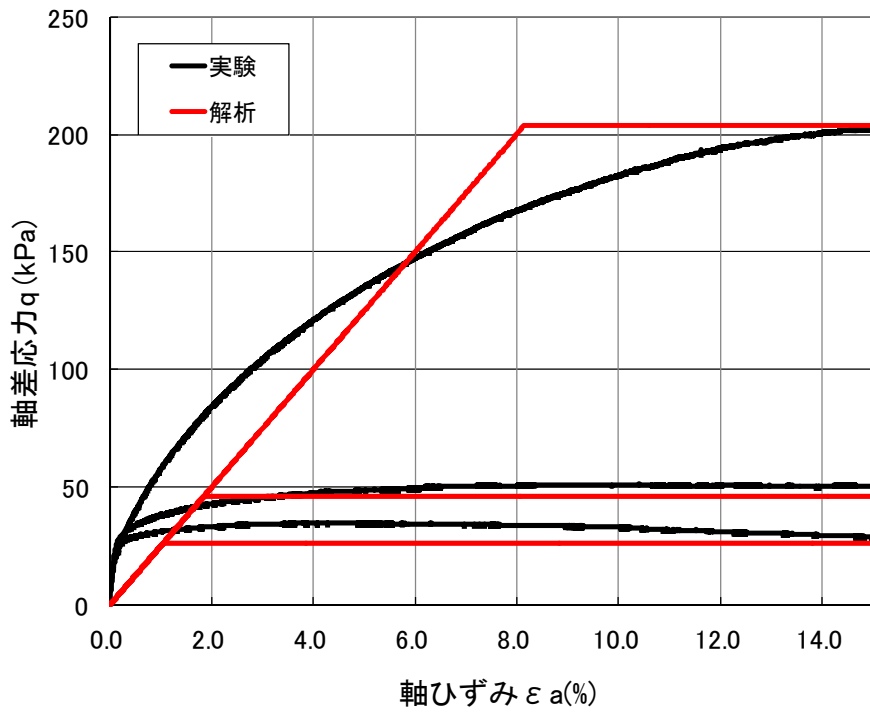
表 10.3.17 土砂弾塑性モデル

項目説明	項目名	碎石	土砂
$E=E_0 (\sigma'_m / \sigma'_{m0})^n$ の応力依存の弾性係数(kN/m <sup>2</sup> )	$E_0$	2500	1000
$E_0$ となる値の平均主応力 (kN/m <sup>2</sup> ) $\sigma'_{m0}=(\sigma'_x+\sigma'_y+\sigma'_z)/3$	$\sigma'_{m0}$	98.0	98.0
応力依存の弾性係数の式の n	n	0.0	0.0
$\sigma'_m$ の下限値(kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_m(\min)$	0.00185	0.00164
単位質量(t/m <sup>3</sup> )	$r_0$	1.85	1.64
ポアソン比	$\nu$	0.3	0.3
せん断摩擦角(°)	ph	41.5	34.6
塑性ポテンシャル(°)	psic	0.0	0.0
粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	CC	1.5	2.1
引張強度(kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_t$	0.0	0.0
側圧係数 (初期応力状態での $K_0, 0$ の場合= $\nu/(1-\nu)$ )	$K_0$	0.0	0.0
ハードニング係数 H の係数 h $H=h \cdot E_0 (\sigma'_m / \sigma'_{m0})^n$ として評価	h	0.0	0.0
減衰に使用する弾性係数(kN/m <sup>2</sup> )	$E_c$	0.0	0.0
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	$\alpha_s$	0.0	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	$\beta_s$	0.000	0.000
粘着力の下限値	Cmin	0.0	0.0

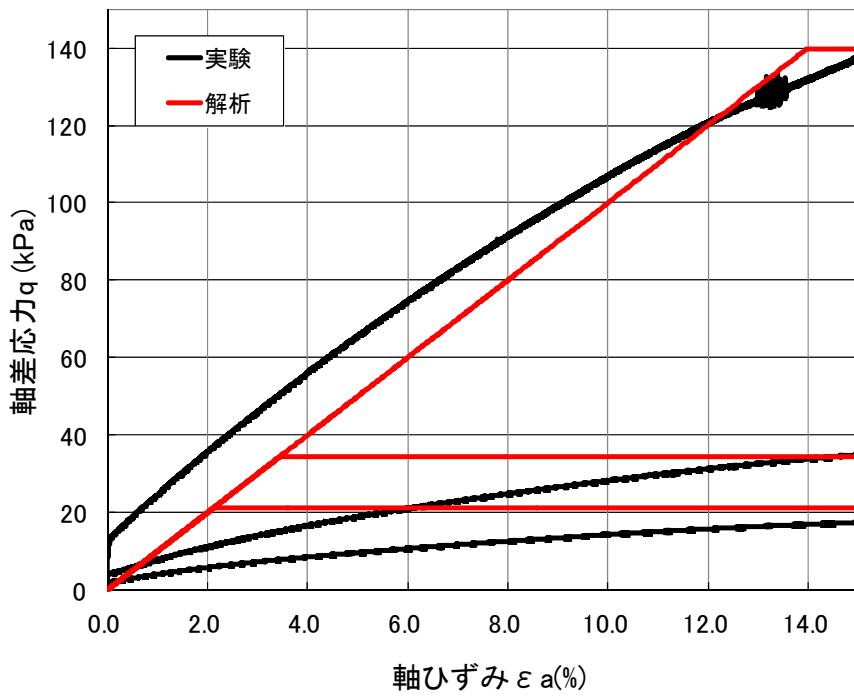
反力壁は岩塊転動シミュレーションの際と同様に、鉄材部とコンクリート部に分けてモデル化した。

表 10.3.18 反力壁弾性モデル

項目説明	項目名	コンクリート部	鉄材部
弾性係数(kN/m <sup>2</sup> )	E	2.35E+07	2.0E+08
ポアソン比	$\nu$	0.167	0.3
単位質量(t/m <sup>3</sup> )	$r_0$	2.35	7.85
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	$\alpha_s$	0.0	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	$\beta_s$	6.30E-06	6.30E-06



(a) 砕石



(b) 土砂

図 10.3.277 砕石と土砂の応力ひずみ関係



### (3) 流路のモデル化

流路模型は境界条件データにより再現した。下図に作成した流路模型の形状を示す。境界条件において、底面の格子における摩擦角は以下の通り設定した。摩擦角は静止摩擦角と動摩擦角の平均値程度である  $30^\circ$  と設定した。

表 10.3.19 底面摩擦角

ケース	底面摩擦角(動摩擦角と静摩擦角の平均)
碎石	$30.0^\circ$
土砂	$30.0^\circ$

拘束条件は反力壁設置位置のみ拘束条件を設定し、それ以外の位置は自由とした。土砂の投入位置は、流路模型上部から高さ 1m の位置に  $60^\circ$  の傾斜を持たせた境界条件を設定し、底面摩擦角は 0 とした。

反力壁位置は傾斜終了位置から 1.5m 離れた位置に幅 2.5m 奥行 2.2m 厚さ 0.6m の範囲で粒子群として設定した。詳細な形状については後述する。

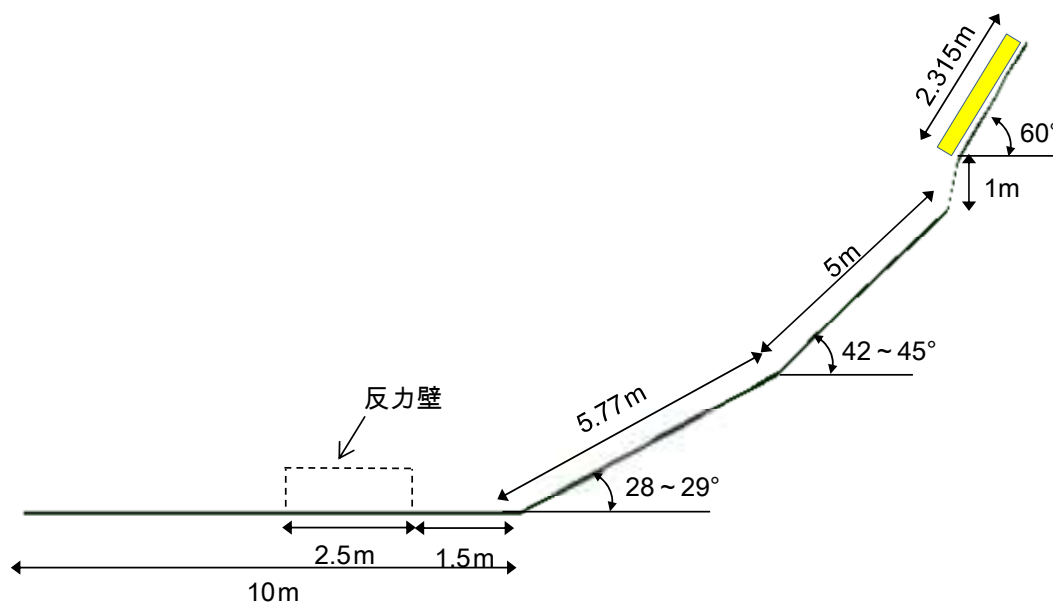


図 10.3.278 流路模型断面図

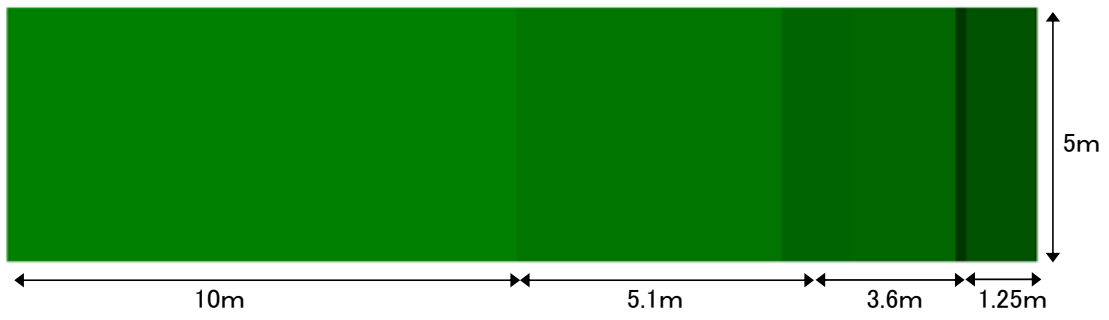


図 10.3.279 流路模型平面図

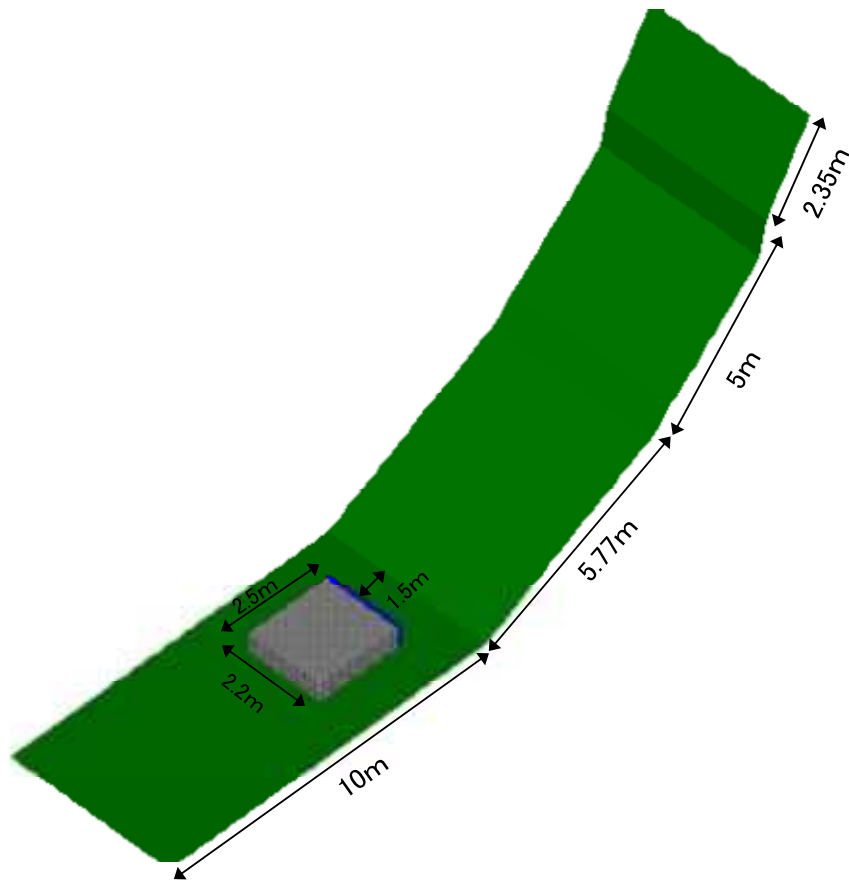


図 10.3.280 流路模型の壁設置位置

(4) 土砂模型, 反力壁のモデル化

以下にモデル形状を示す。各モデルは背面格子条件として、格子幅 0.2m とした。

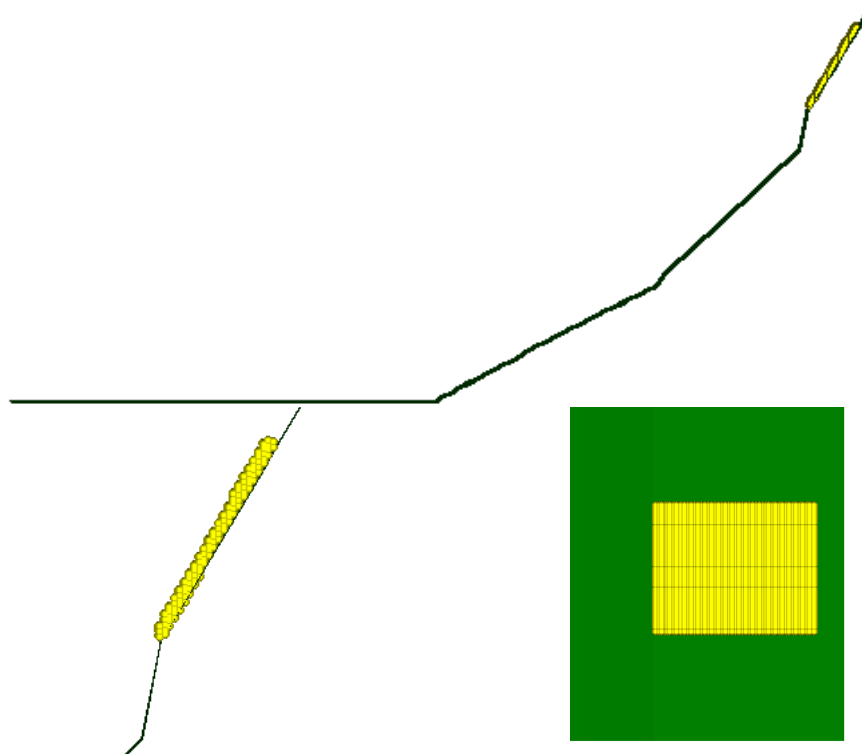


図 10.3.281 初期状態

(上段: 断面図、下段左:モデル拡大断面、下段右:モデル正面拡大)

以下に、変位、速度、加速度、応力-ひずみ関係出力用のデータを出力する位置を示す。出力位置は土砂中層部の位置に等間隔に全 18 点を抽出した。

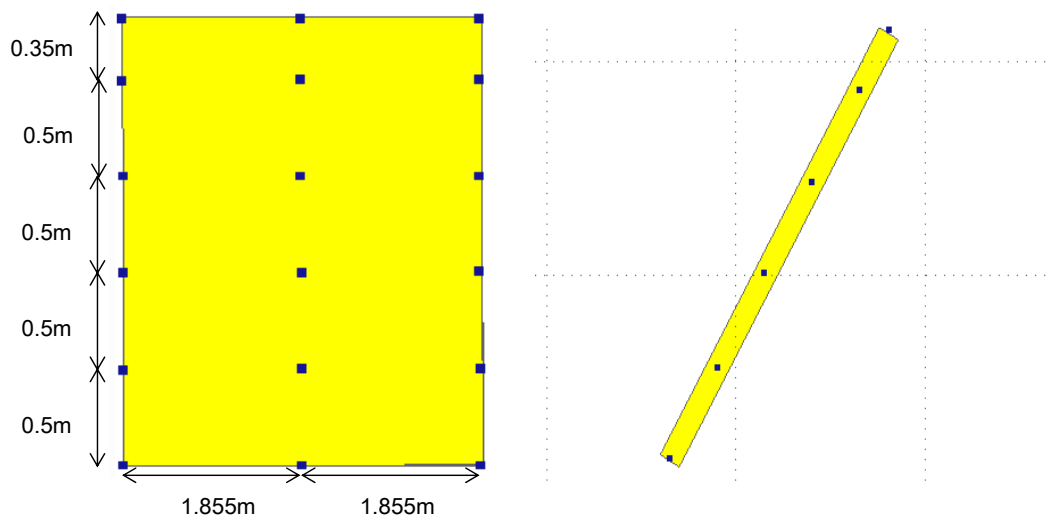


図 10.3.282 土砂、土石出力位置 (左: 正面図、右: 断面図)

(5) 解析結果の整理方法

変位図と時刻歴について以下のように解析結果を整理した。

・変形図

流路模型を横から見た様子と真上から見た様子を 0.4 秒間隔で出力し、転動の様子を示した。

・時刻歴結果

(a) 流動距離の時刻歴

碎石・土砂中の粒子全 18 点の変位を、流下方向(X 方向)、流下直角方向(Y 方向)、上下方向(Z 方向)の 3 方向の時刻歴として示した。

(b) 堆積深さの時刻歴

碎石・土砂の堆積深さを時刻歴として示した。垂直壁の前方 0.4m (2 格子分に相当)の範囲の粒子の z 座標最大値が堆積深さに対応する。

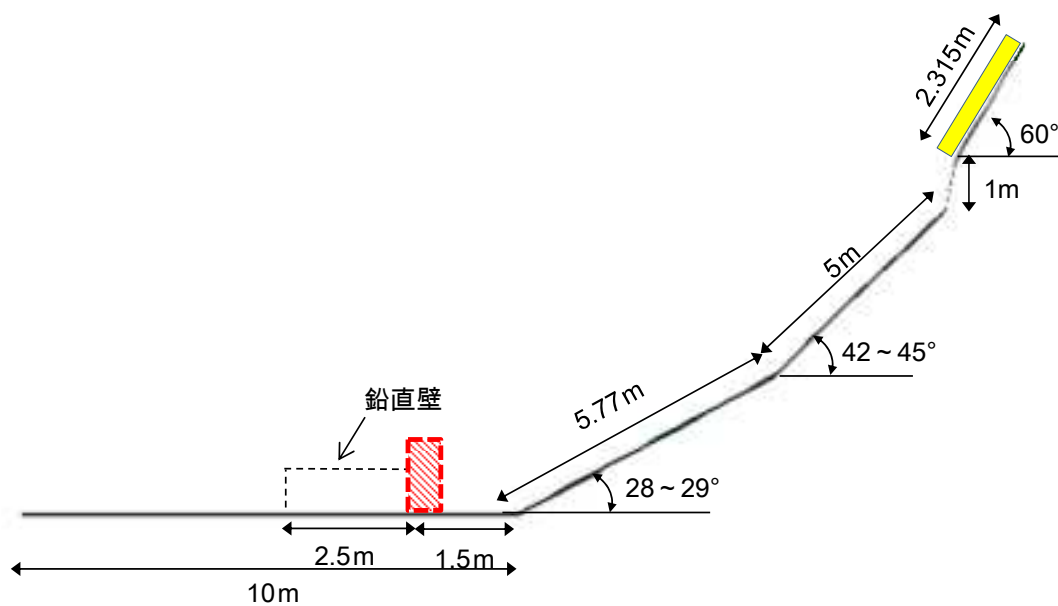


図 10.3.283 堆積深さ観測範囲

・鉛直壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

鉛直壁の運動量を該当する粒子の速度と質量から求め、運動量の時間変化率を碎石・土砂が衝突した際の鉛直壁の衝撃力とした。

(6) 解析結果 (変形図)

• CASE7 碎石

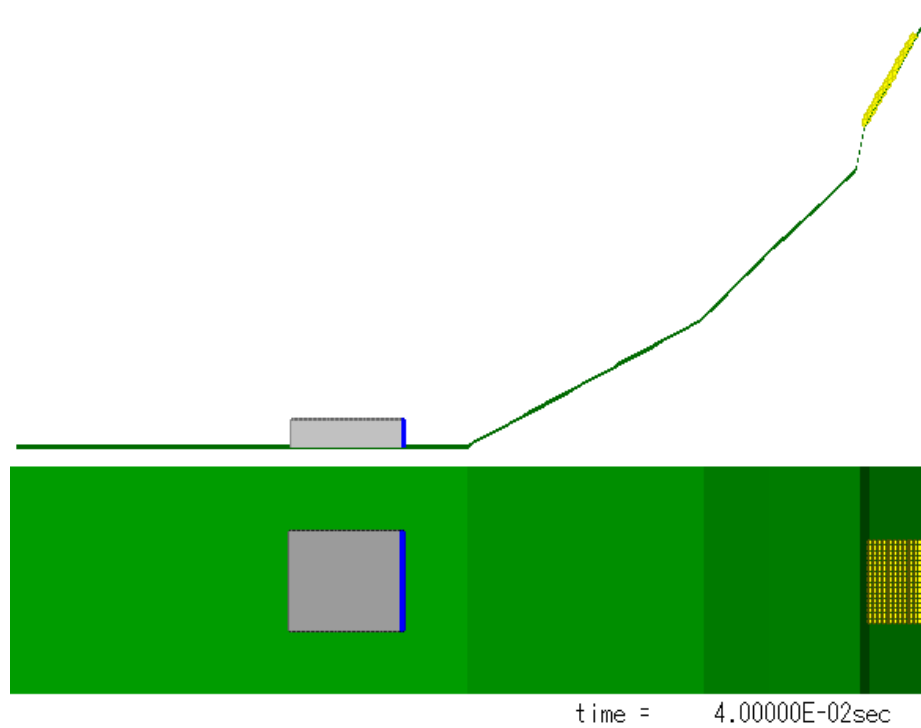


図 10.3.289 変形図(0.0sec)

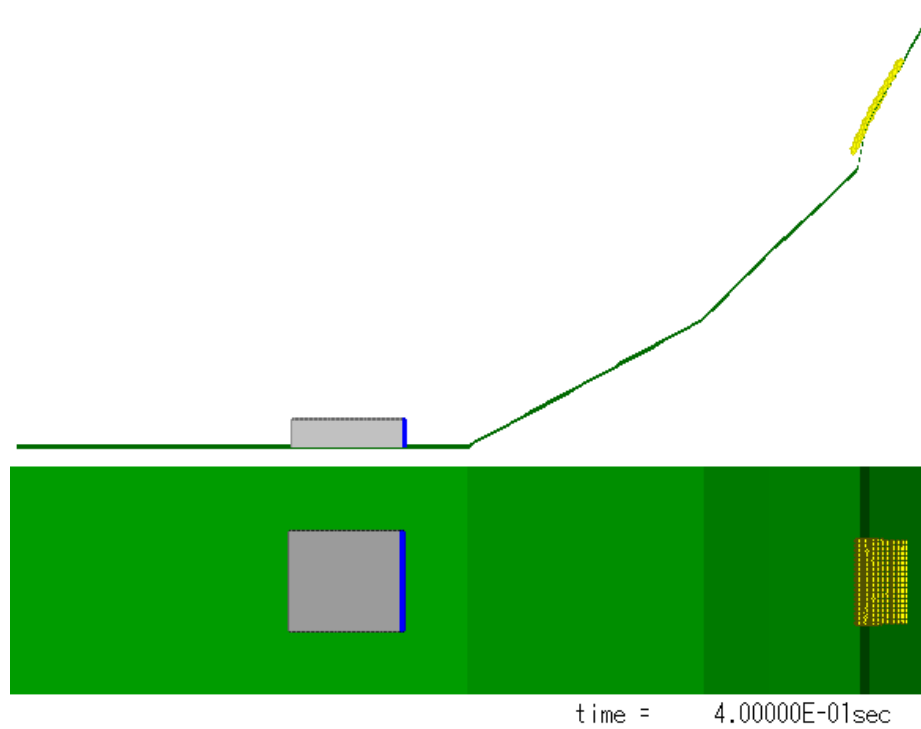


図 10.3.290 変形図(0.4sec)

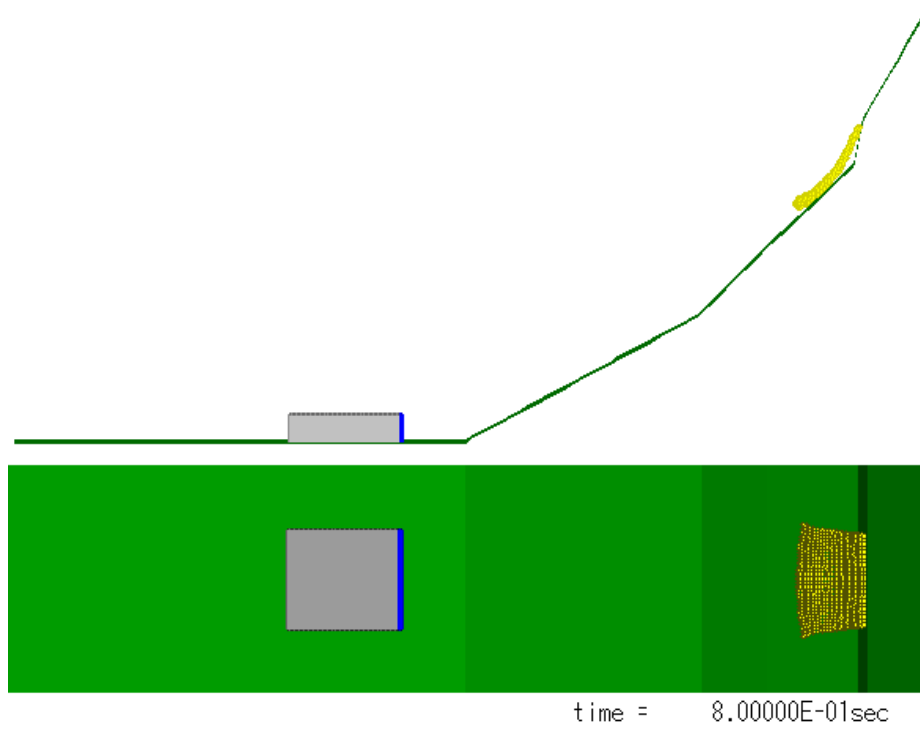


图 10.3.291 变形图(0.8sec)

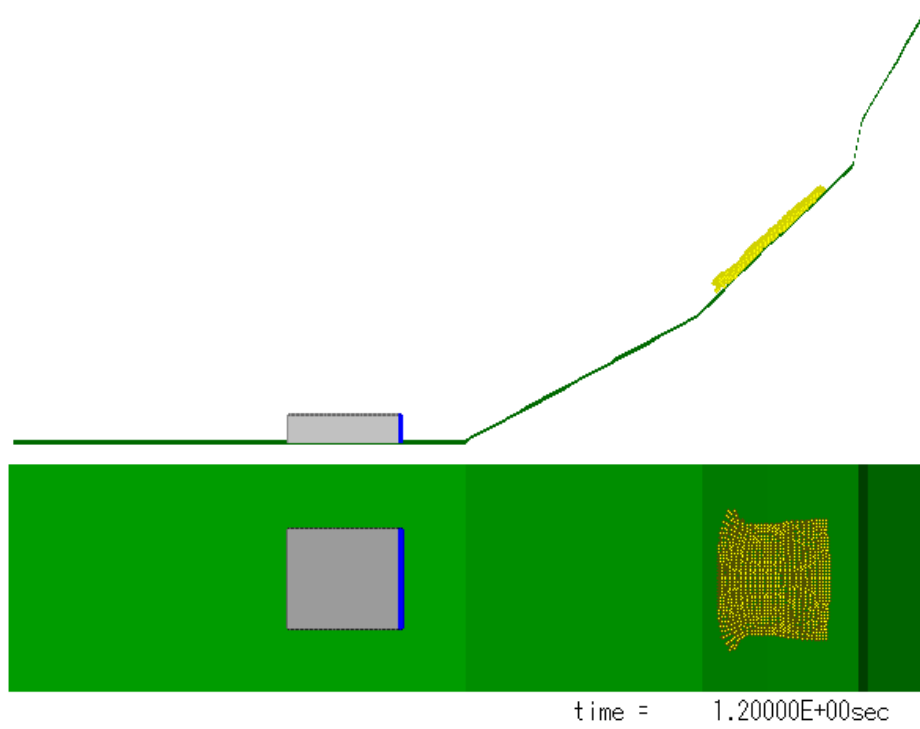


图 10.3.292 变形图(1.2sec)

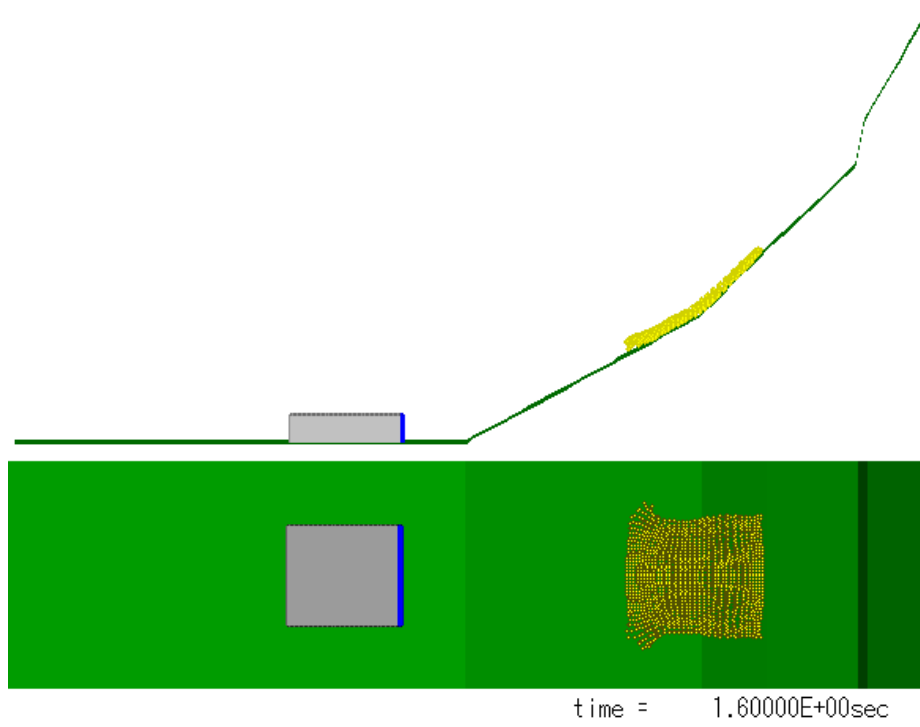


图 10.3.293 变形图(1.6sec)

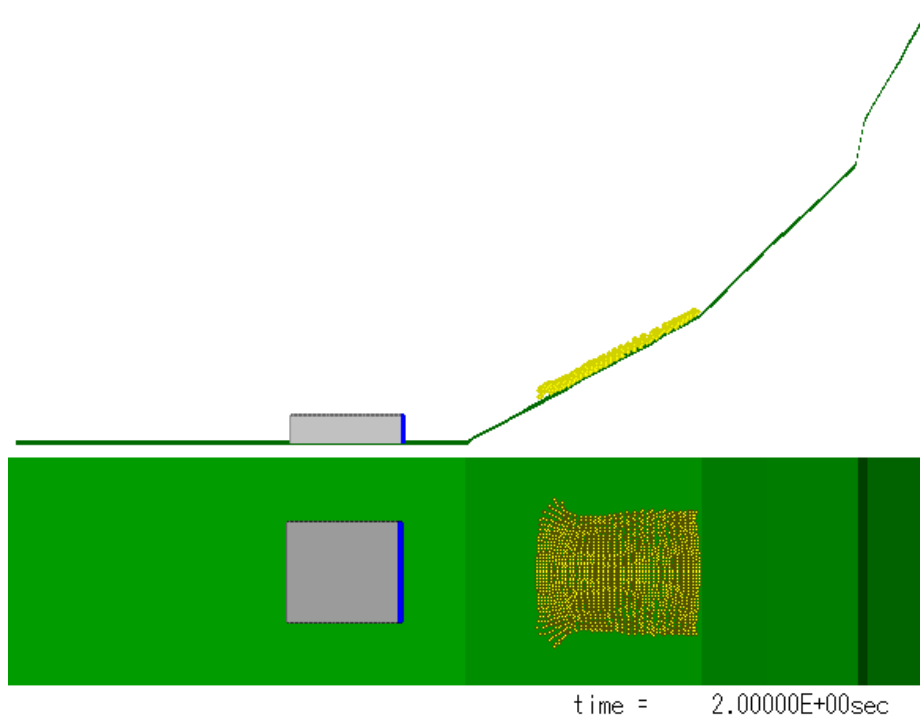


图 10.3.294 变形图(2.0sec)

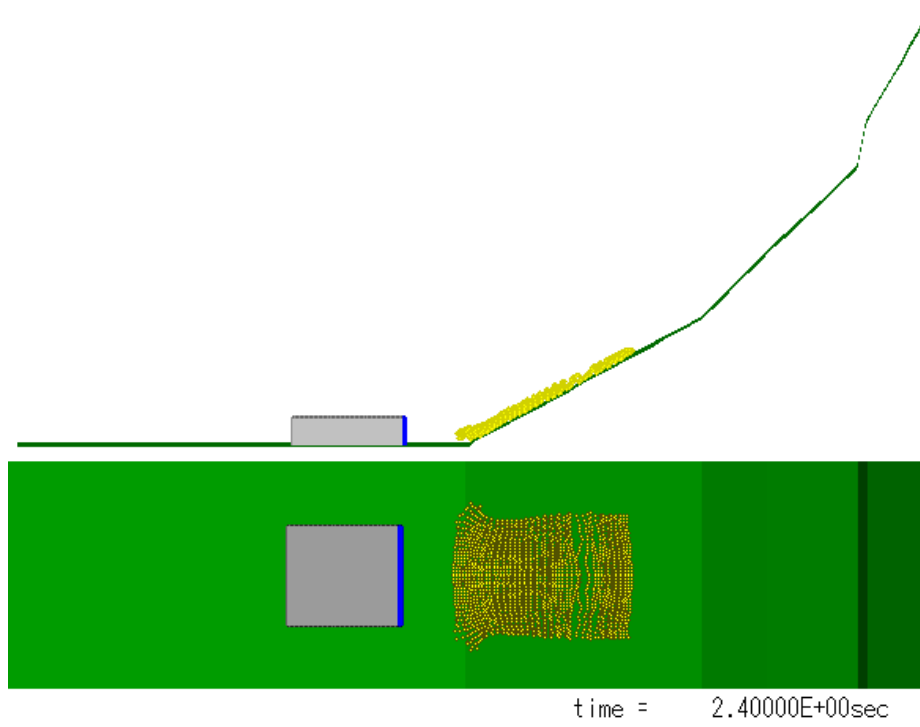


图 10.3.295 变形图(2.4sec)

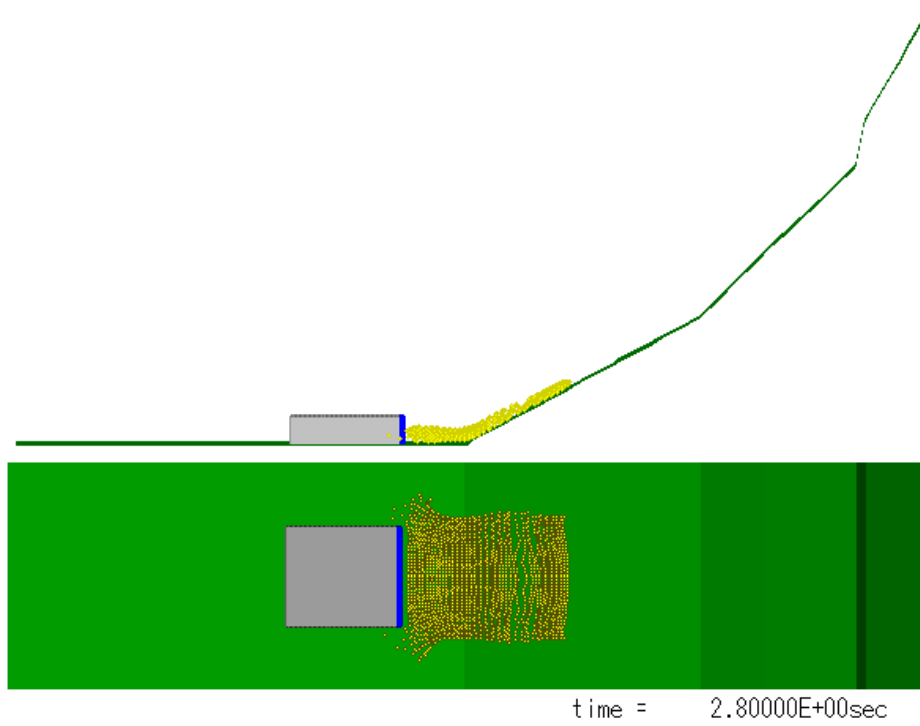


图 10.3.296 变形图(2.8sec)



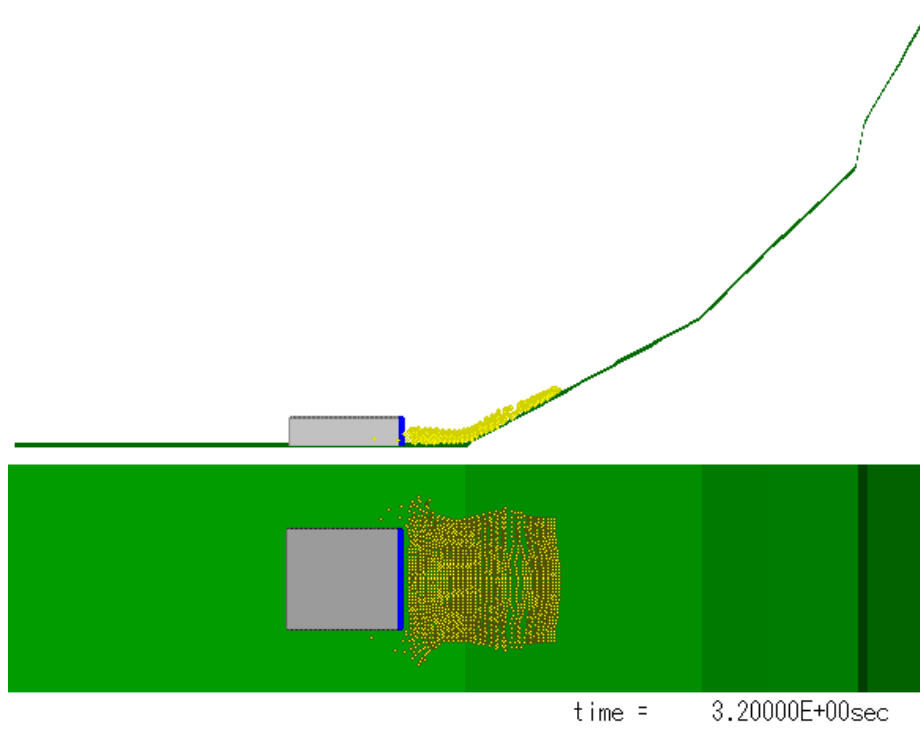


图 10.3.297 变形图(3.2sec)

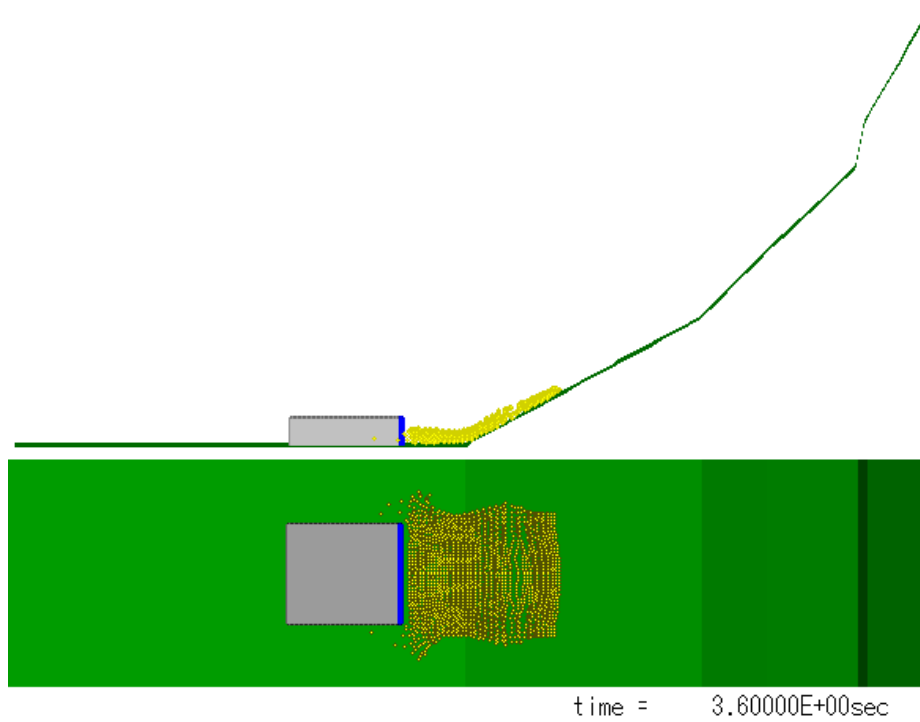


图 10.3.298 变形图(3.6sec)

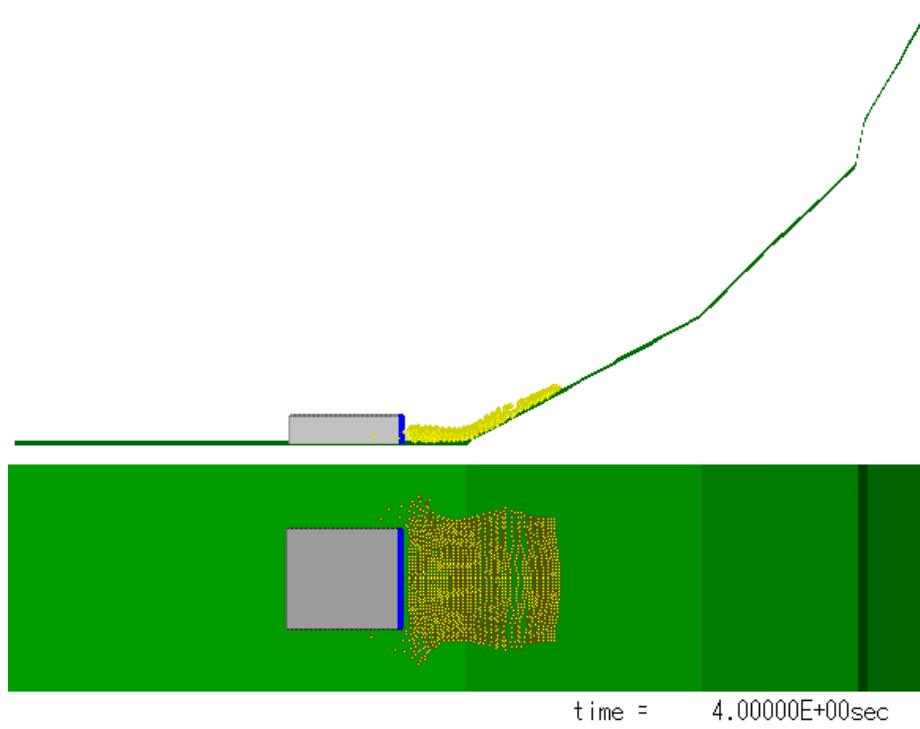


图 10.3.299 变形图(4.0sec)

• CASE8 土砂

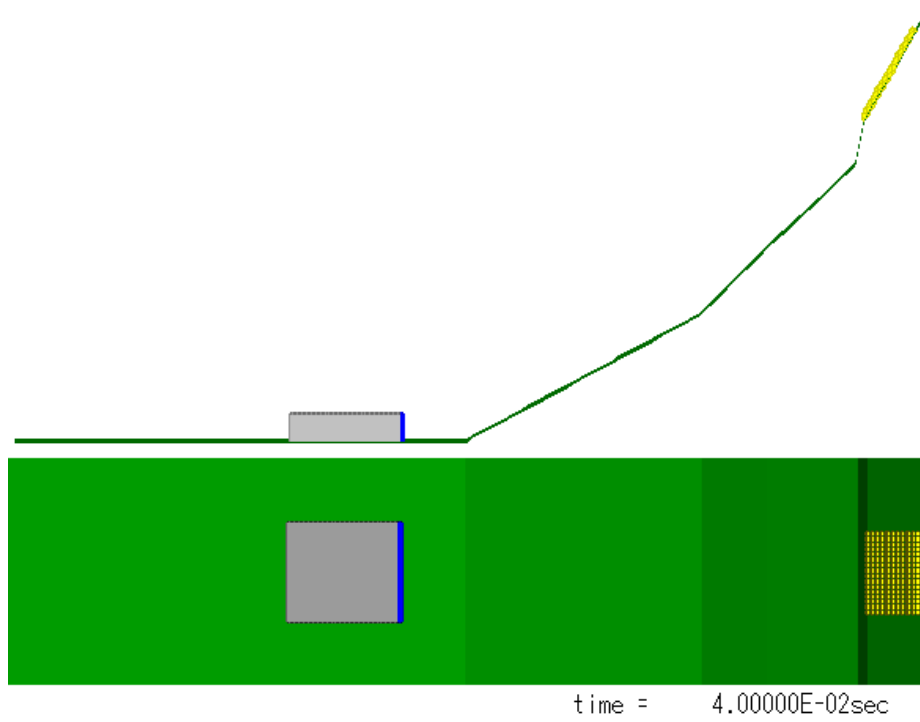


图 10.3.300 变形图(0.0sec)

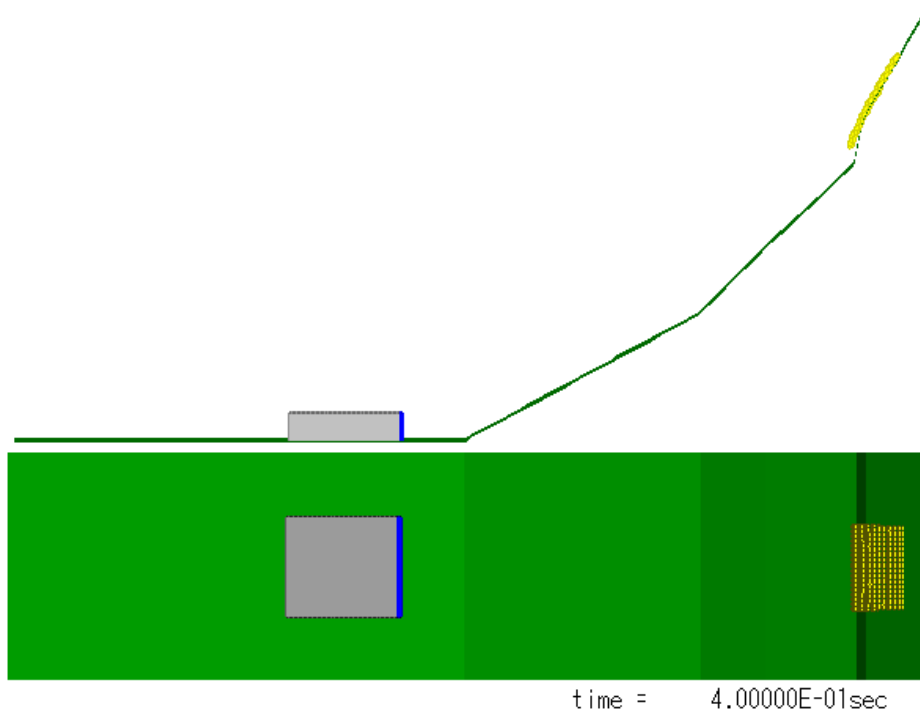


图 10.3.301 变形图(0.4sec)

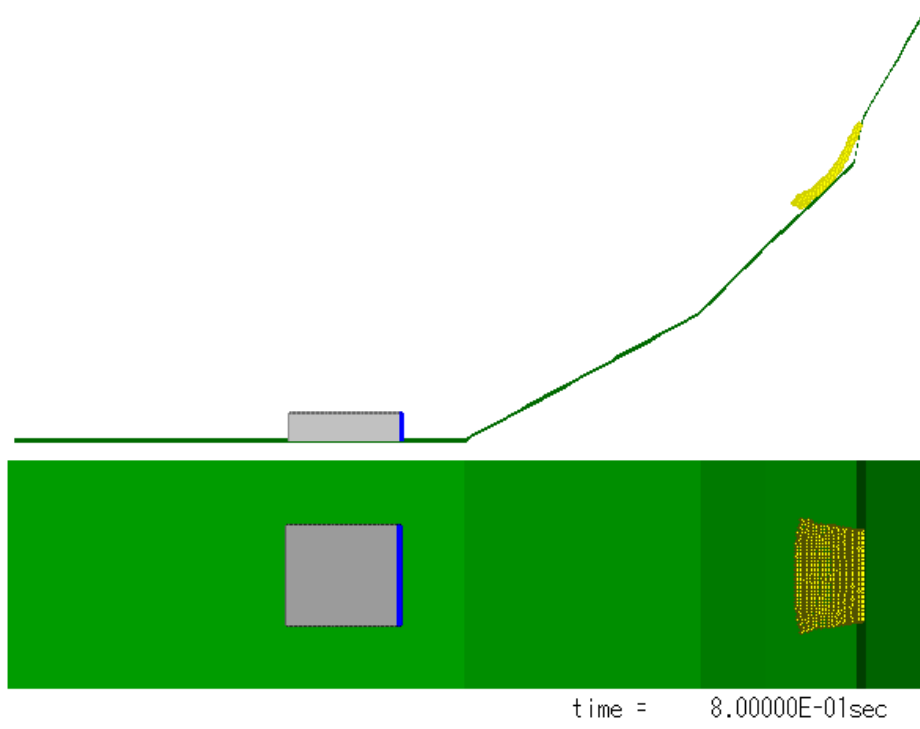


图 10.3.302 变形图(0.8sec)

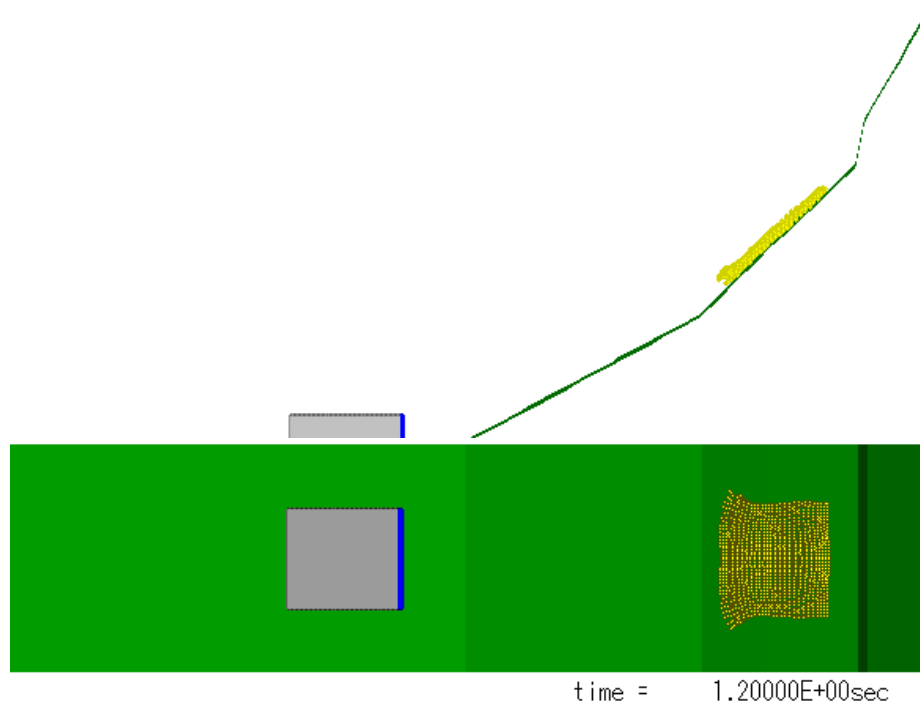


图 10.3.303 变形图(1.2sec)

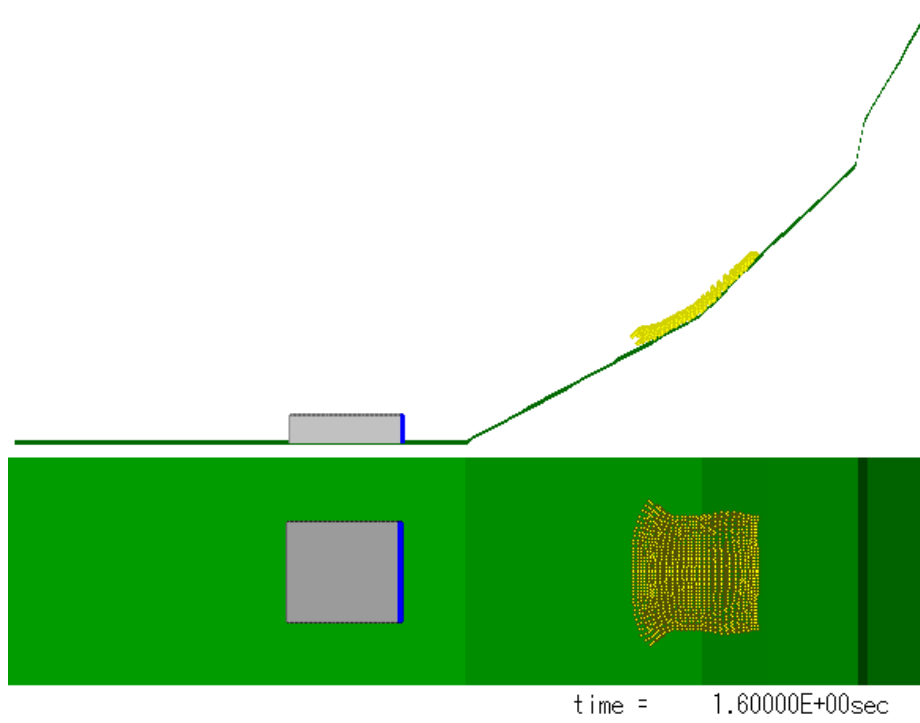


图 10.3.304 变形图(1.6sec)

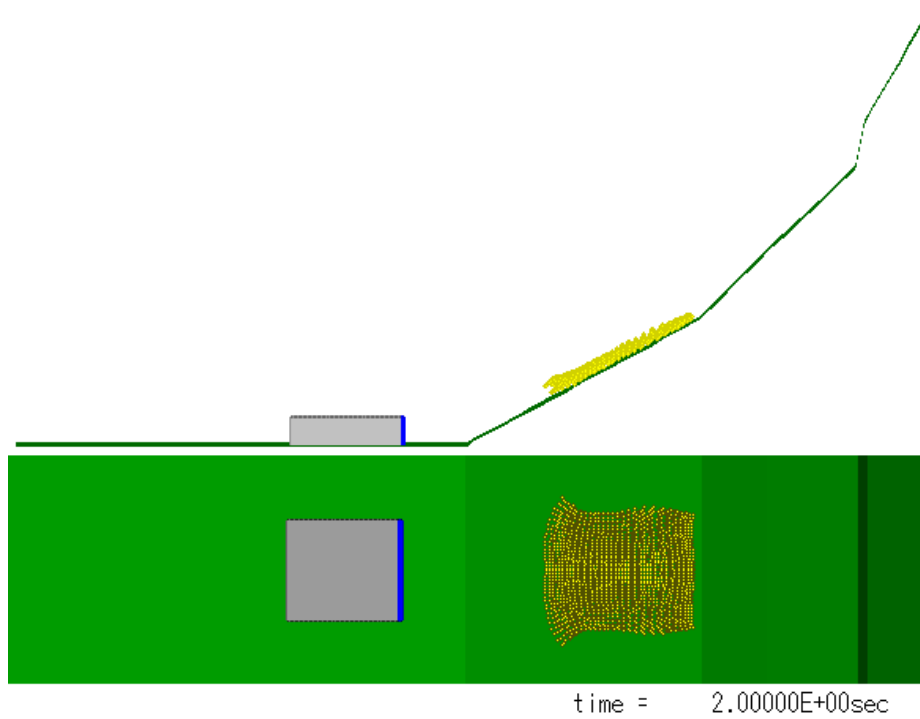


图 10.3.305 变形图(2.0sec)

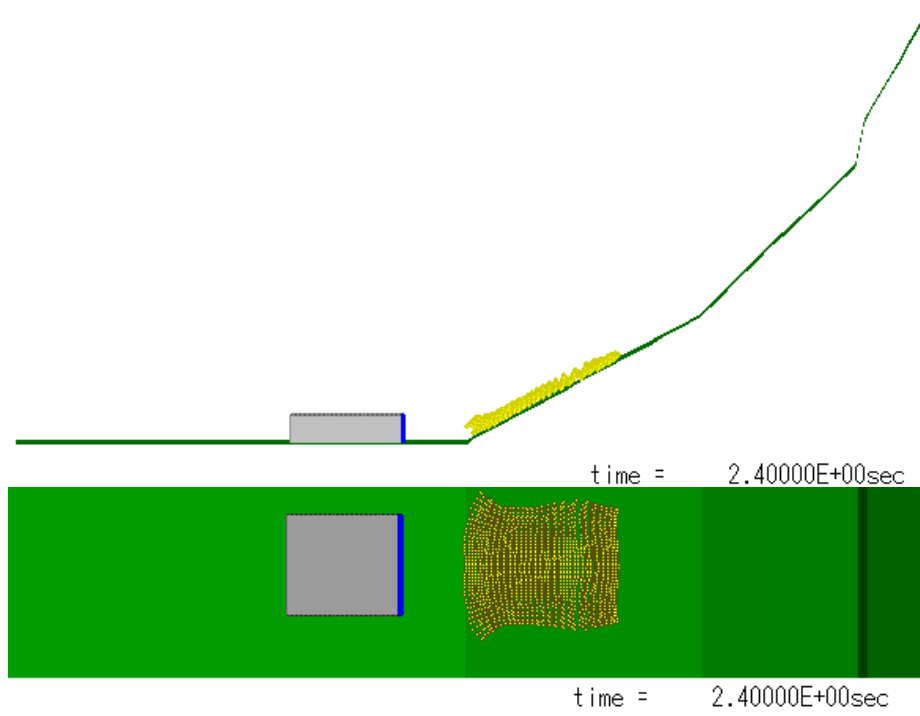


图 10.3.306 变形图(2.4sec)

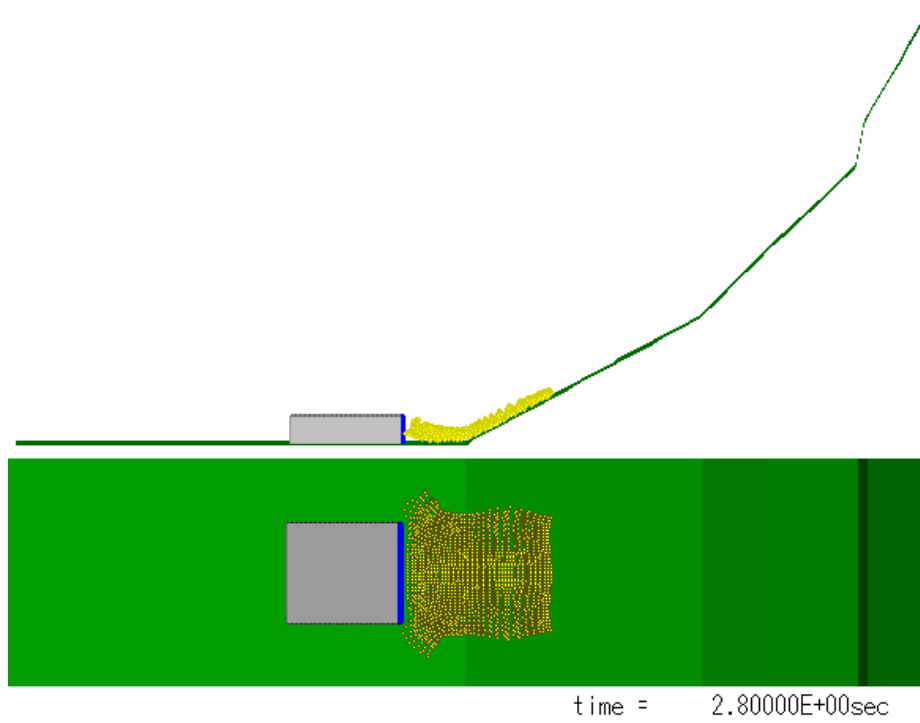


图 10.3.307 变形图(2.8sec)

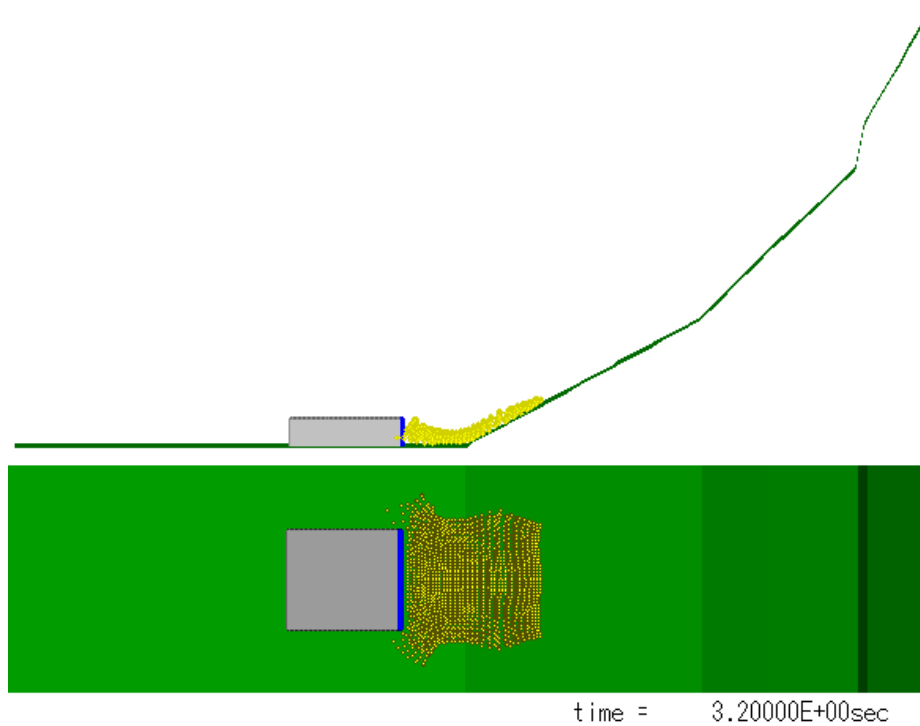


图 10.3.308 变形图(3.2sec)

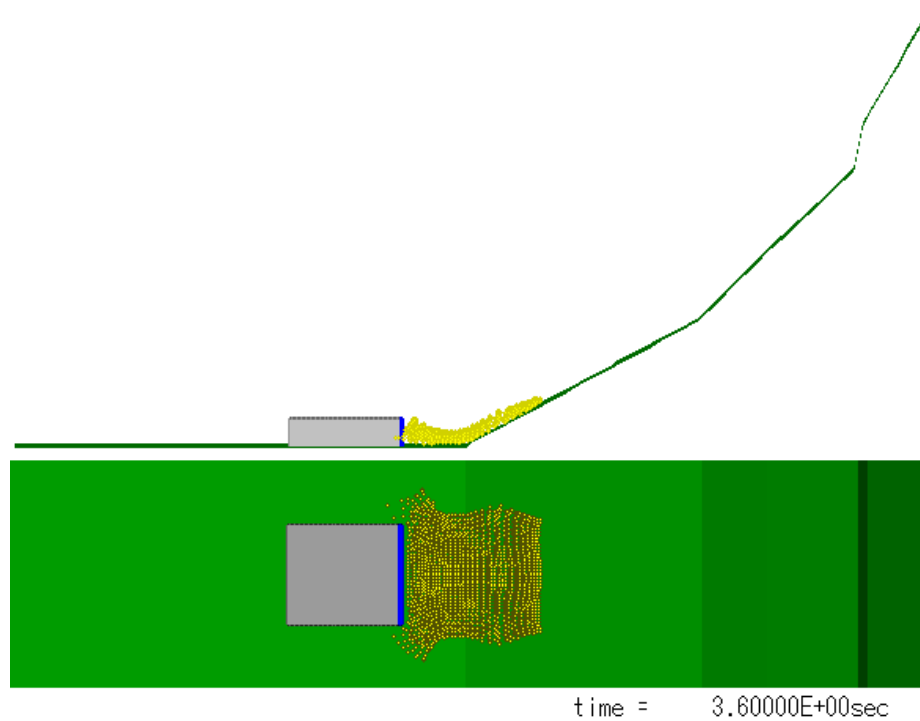


图 10.3.309 变形图(3.6sec)

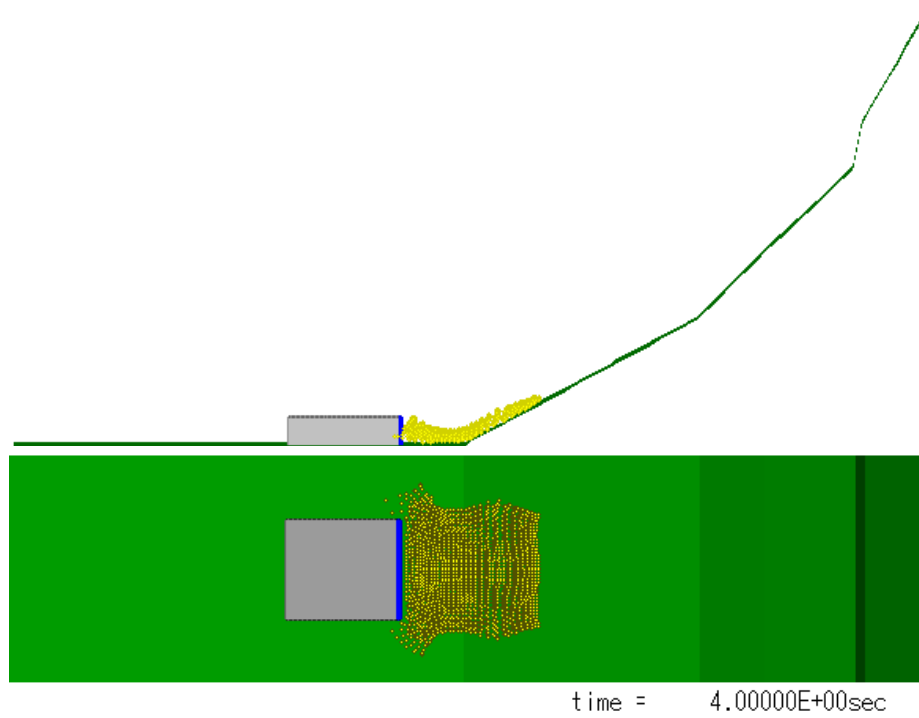


图 10.3.310 变形图(4.0sec)



(7) 解析結果 (時刻歴)

・ CASE7 碎石

(a) 流動距離の時刻歴

碎石において、解析結果を出力した位置およびその位置に対応する粒子座標を図 10.3.311、表 10.3.20 に示す。またそれらの注目位置粒子の X 方向 (下流方向)、Y 方向 (流下直角方向)、Z 方向 (上下方向)の時刻歴を示す。土塊はほぼ一体で流動する結果となった。

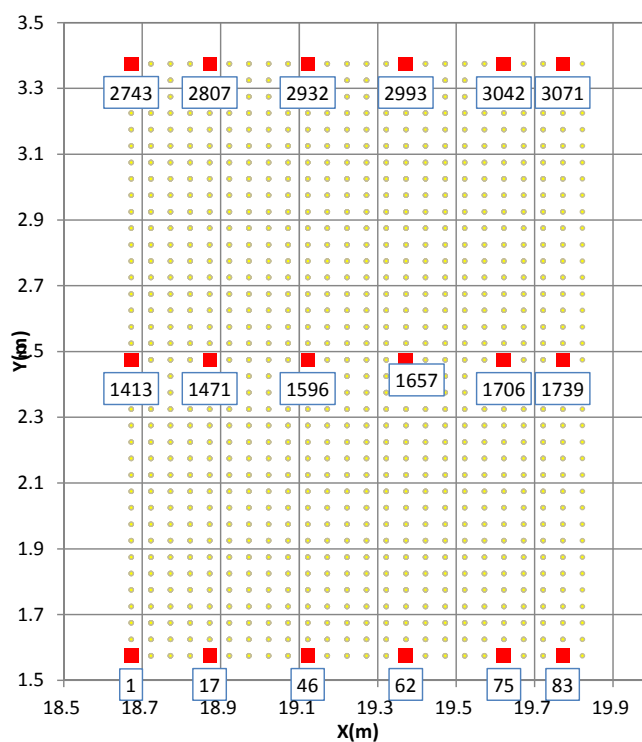


図 10.3.311 結果出力位置

表 10.3.20 出力粒子一覧

粒子番号	X 座標(m)	Y 座標 (m)	Z 座標(m)
1	18.672	1.5747	7.1436
17	18.872	1.5748	7.569
46	19.122	1.5748	7.9977
62	19.372	1.5748	8.4263
75	19.622	1.5748	8.8549
83	19.772	1.5748	9.1121
1413	18.672	2.475	7.1436
1471	18.872	2.475	7.569
1596	19.122	2.475	7.9977
1657	19.372	2.475	8.4263
1706	19.622	2.475	8.855
1739	19.772	2.475	9.1122
2743	18.672	3.3753	7.1436
2807	18.872	3.3752	7.569
2932	19.122	3.3752	7.9977
2993	19.372	3.3752	8.4263
3042	19.622	3.3752	8.855
3071	19.772	3.3752	9.1121

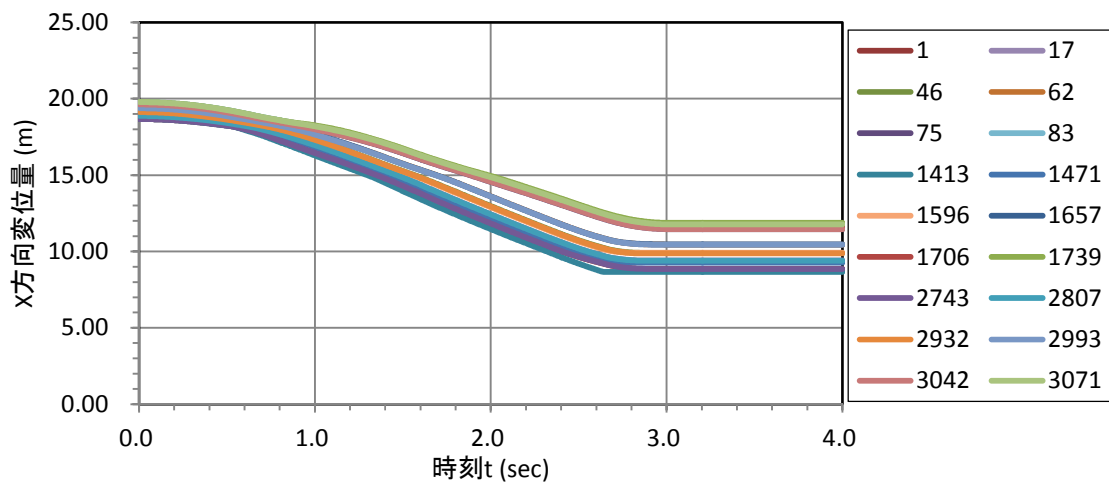


图 10.3.312 X 方向(流下方向)变位时刻历

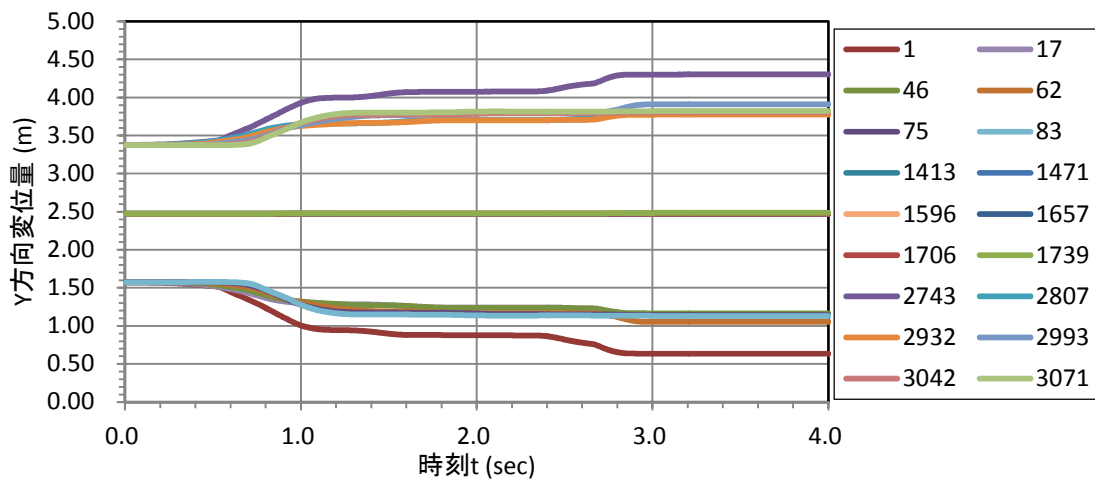


图 10.3.313 Y 方向(流下直角方向)变位时刻历

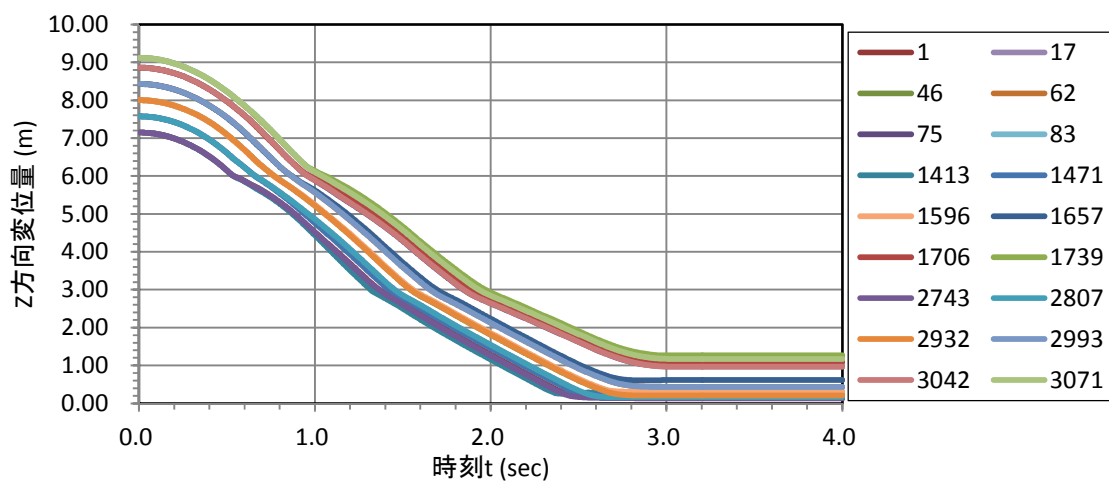


图 10.3.314 Z 方向(上下方向)变位时刻历

(b)堆積深さの時刻歴

堆積深さの時刻歴を下図に示す。体積深さは最大で約 0.4m となった。

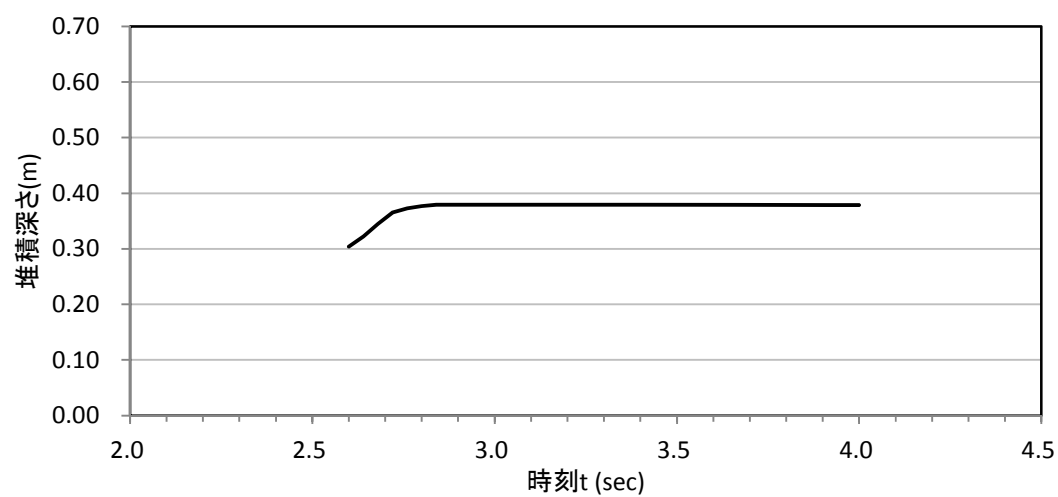


図 10.3.315 堆積深さ時刻歴

(c)反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

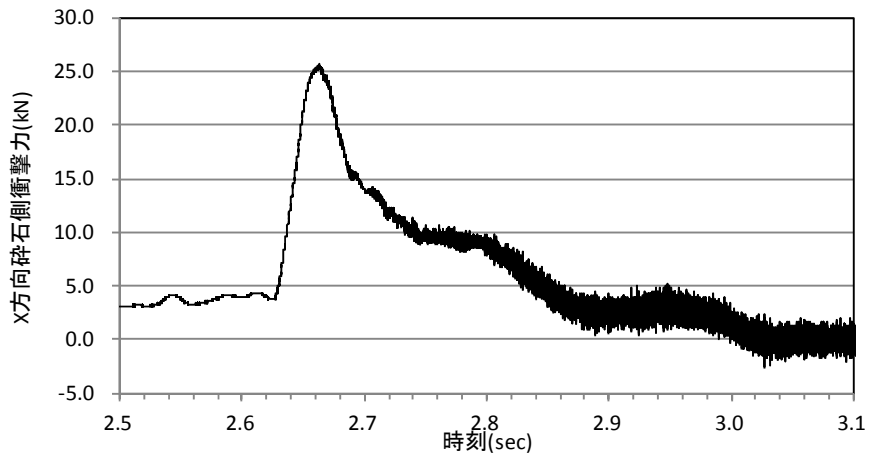


図 10.3.316 X方向(流下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

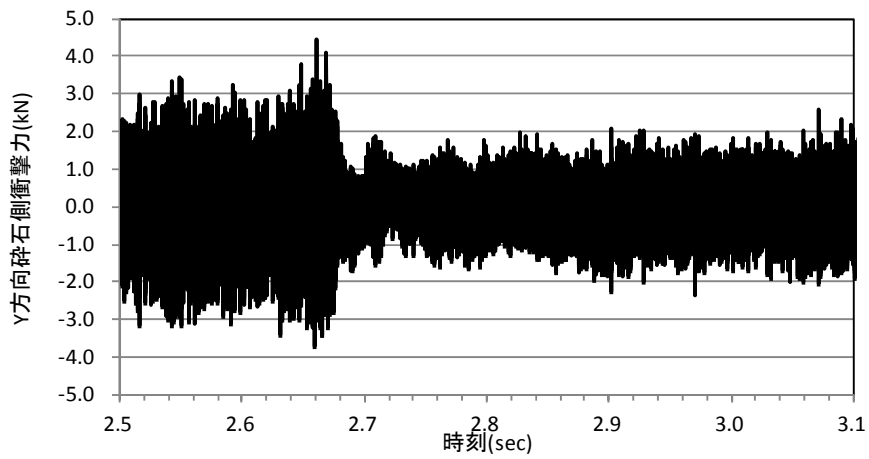


図 10.3.317 Y方向(流下直角方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

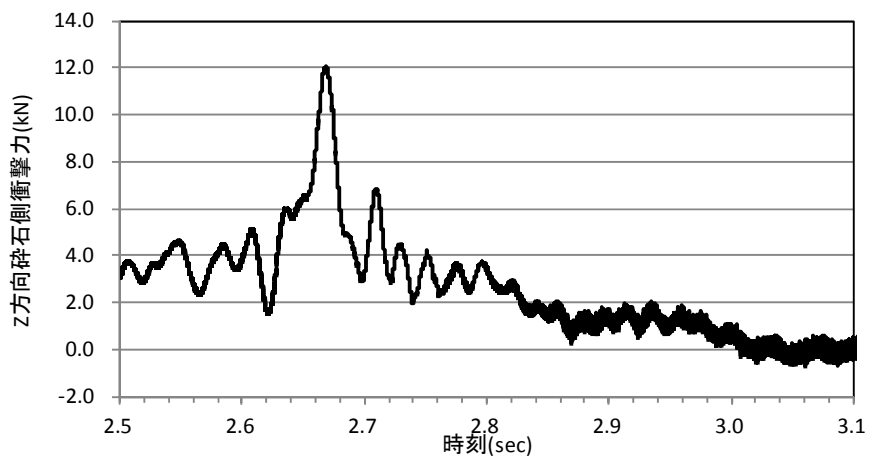


図 10.3.318 Z方向(上下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

・ CASE8 土砂

(a)流動距離の時刻歴

土砂において、解析結果を出力した位置およびその位置に対応する粒子座標を図 10.3.319、表 10.3.21 に示す。またそれらの注目位置粒子の X 方向（下流方向）、Y 方向（流下直角方向）、Z 方向（上下方向）の時刻歴を示す。土塊はほぼ一体で流動する結果となった。

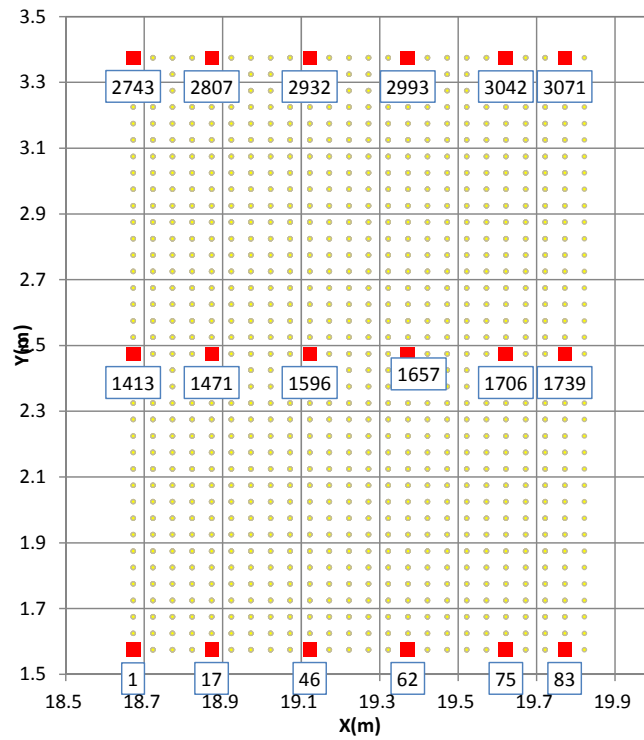


図 10.3.319 結果出力位置

表 10.3.21 出力粒子一覧

粒子番号	X 座標(m)	Y 座標 (m)	Z 座標(m)
1	18.672	1.5747	7.1436
17	18.872	1.5748	7.569
46	19.122	1.5748	7.9977
62	19.372	1.5748	8.4263
75	19.622	1.5748	8.8549
83	19.772	1.5748	9.1121
1413	18.672	2.475	7.1436
1471	18.872	2.475	7.569
1596	19.122	2.475	7.9977
1657	19.372	2.475	8.4263
1706	19.622	2.475	8.855
1739	19.772	2.475	9.1122
2743	18.672	3.3753	7.1436
2807	18.872	3.3752	7.569
2932	19.122	3.3752	7.9977
2993	19.372	3.3752	8.4263
3042	19.622	3.3752	8.855
3071	19.772	3.3752	9.1121

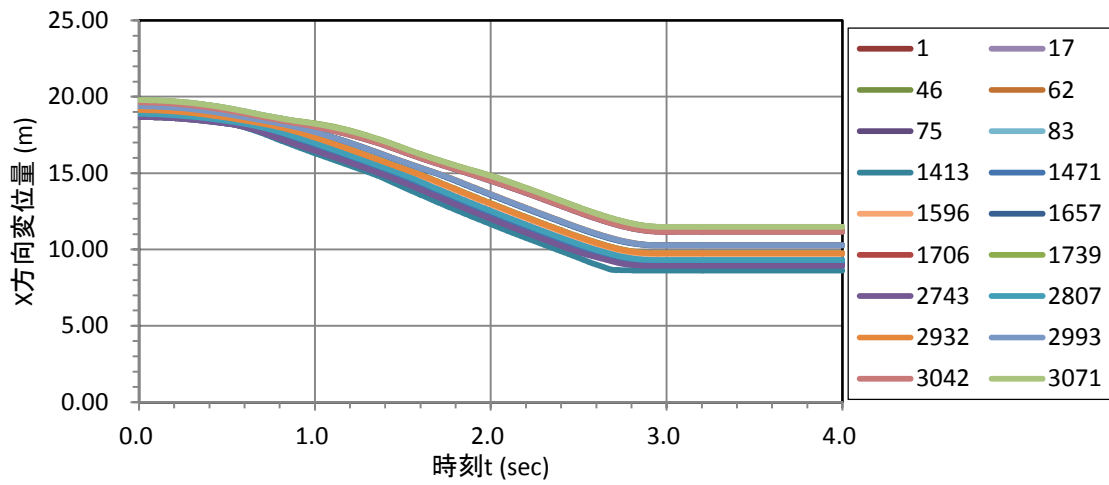


图 10.3.320 X 方向(流下方向)变位時刻歴

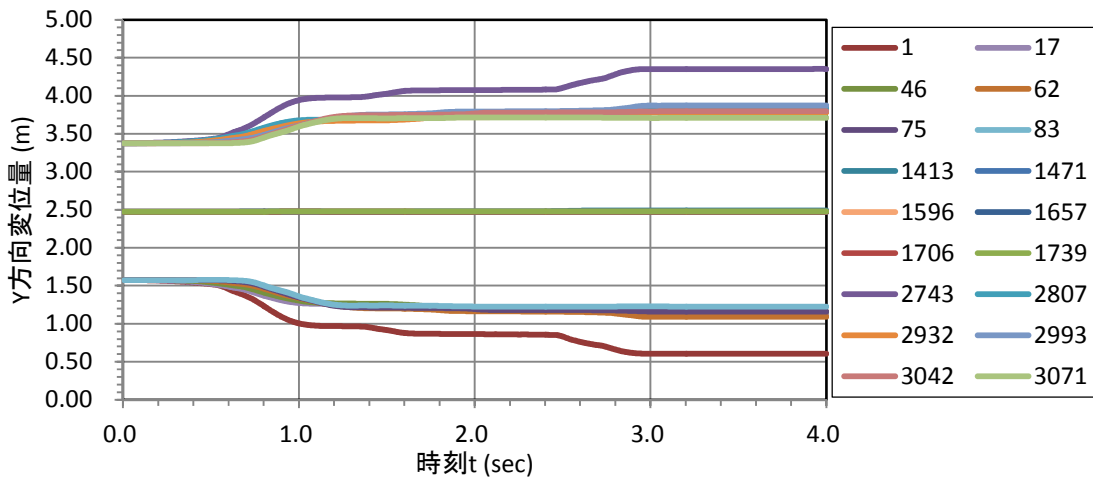


图 10.3.321 Y 方向(流下直角方向)变位時刻歴

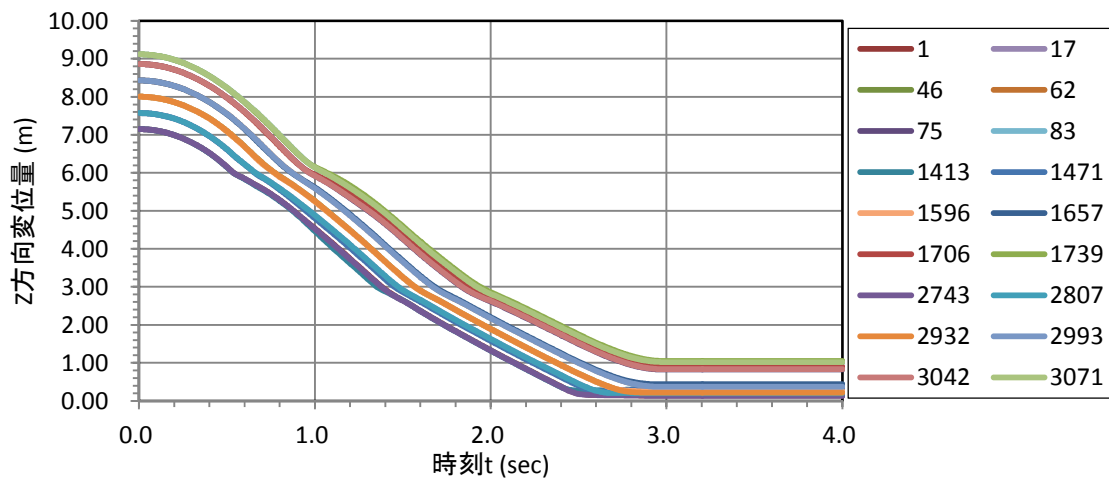


图 10.3.322 Z 方向(上下方向)变位時刻歴



(b)堆積深さの時刻歴

堆積深さの時刻歴を下図に示す。堆積深さは最大で約 0.6m となった。

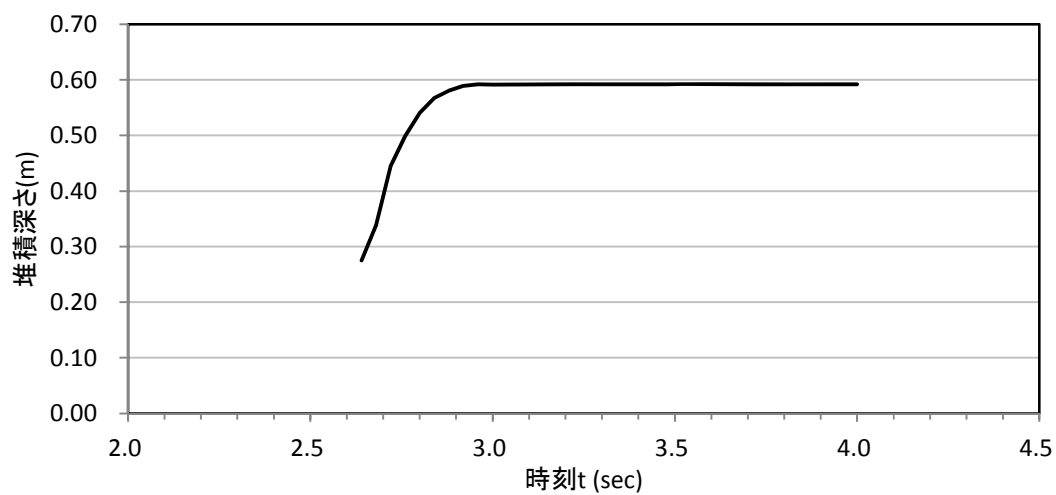


図 10.3.323 堆積深さ時刻歴

(c)反力壁に衝突した時の衝撃荷重の時刻歴

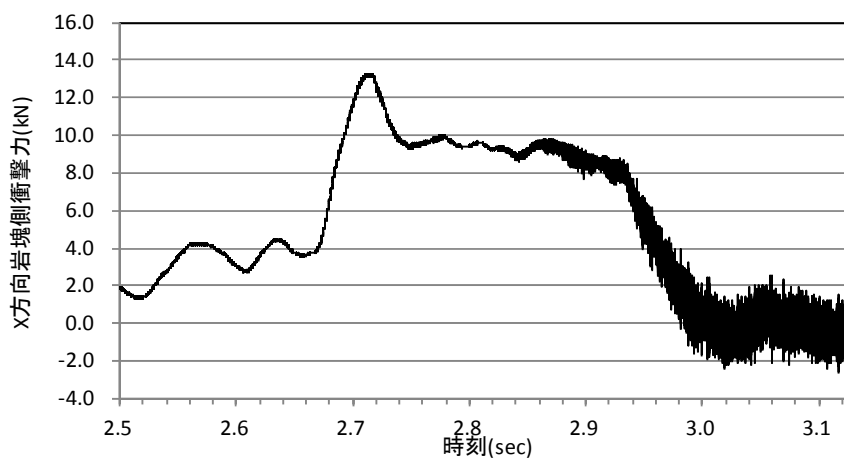


図 10.3.324 X方向(流下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

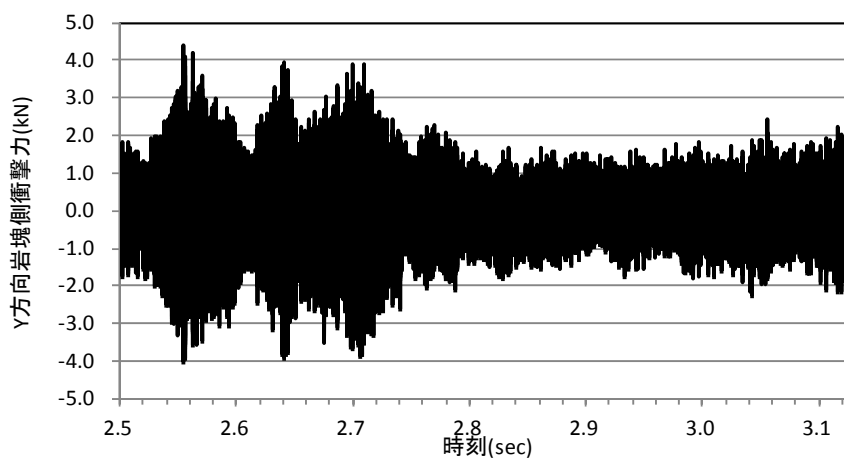


図 10.3.325 Y方向(流下直角方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

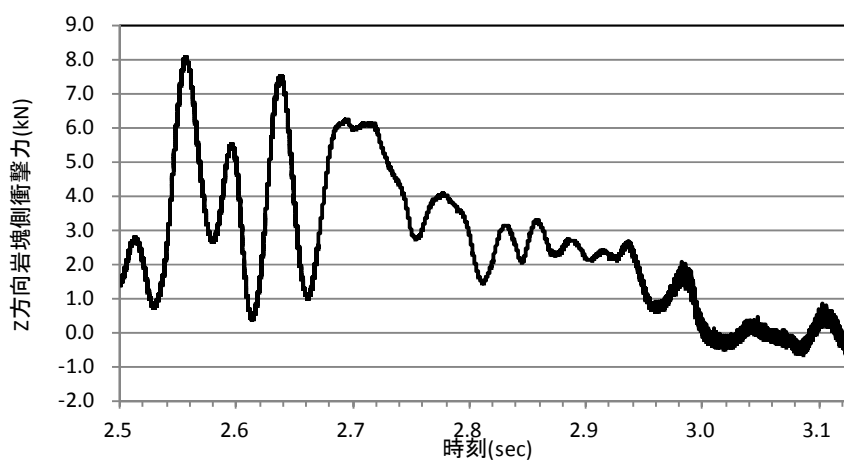


図 10.3.326 Z方向(上下方向)の鉛直壁側衝撃力の時刻歴

### 10.3.4 土砂模型の流動挙動のシミュレーション（壁無ケース）

#### （1）粒子数，解析ステップ数，時間間隔

以下に土砂実験の2ケースの粒子数、解析ステップ数、時間間隔を示す。解析時間は反力壁もしくは流路模型の端に届くまでとし全ケース4秒間とした。時間間隔は後述する跳ね返りシミュレーションにおいて発散しないことを確認して決定した。

表 10.3.22 粒子数、解析ステップ数、ステップ間隔

ケース	模型材料	粒子数 ()内は土砂の 粒子数	初期応力解析	
			解析 ステッ プ数	ステップ 間隔(s)
9	碎石	7,222(3,922)	200,000	2.0E-05
10	土砂	7,222(3,922)	200,000	2.0E-05

#### （2）構成則

碎石、土砂の構成則は壁有ケースと同じである。

#### （3）流路のモデル化

壁有ケースの場合と同じである。

#### （4）土砂模型，反力壁のモデル化

壁有ケースの場合と同じである。

#### （5）解析結果の整理方法

変位図と時刻歴について以下のように解析結果を整理した。

##### ・変形図

流路模型を横から見た様子と真上から見た様子を0.8秒間隔で出力し、流動の様子を示した。

##### ・時刻歴結果

##### (a)流動距離の時刻歴

碎石・土砂中の粒子全18点の変位を、流下方向(X方向)、流下直角方向(Y方向)、上下方向(Z方向)の3方向の時刻歴として示した。

(b) 堆積深さの時刻歴

砕石・土砂の堆積深さを時刻歴として示した。下図の赤点線枠内における、粒子のz座標最大値を堆積深さとして出力した。

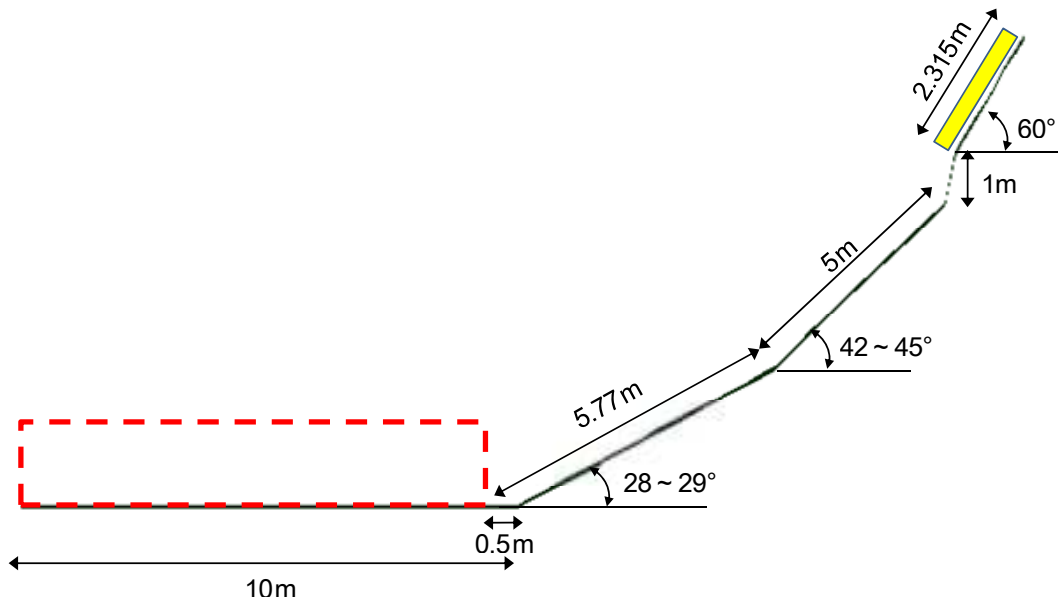


図 10.3.327 堆積深さ観測範囲

(6) 解析結果 (変形図)

• CASE9 碎石

time = 4.00000E-02sec

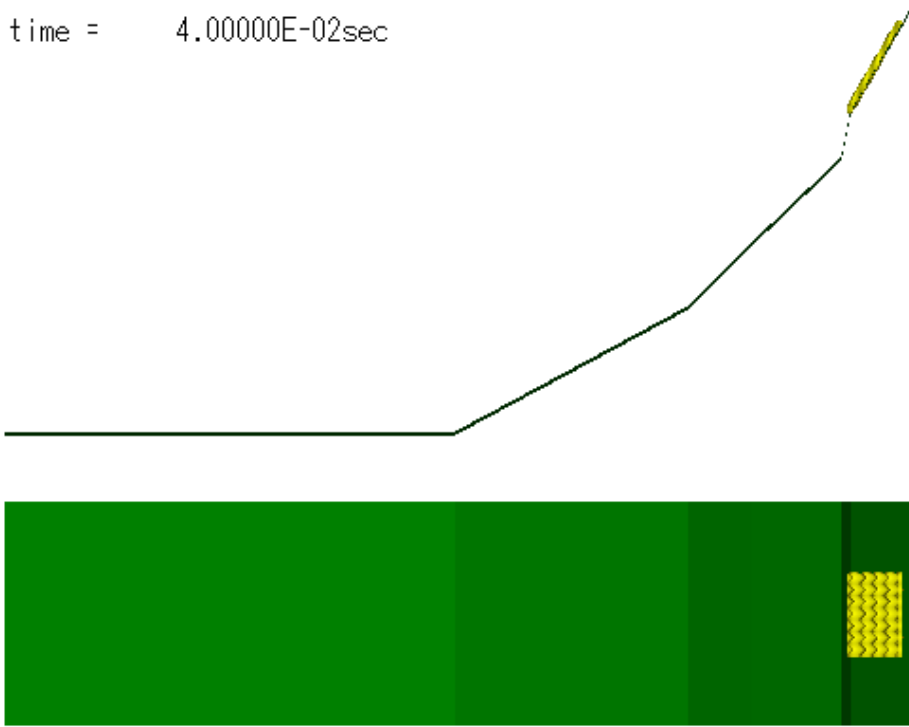


図 10.3.328(a) 変形図(0.04sec)

time = 8.00000E-01sec

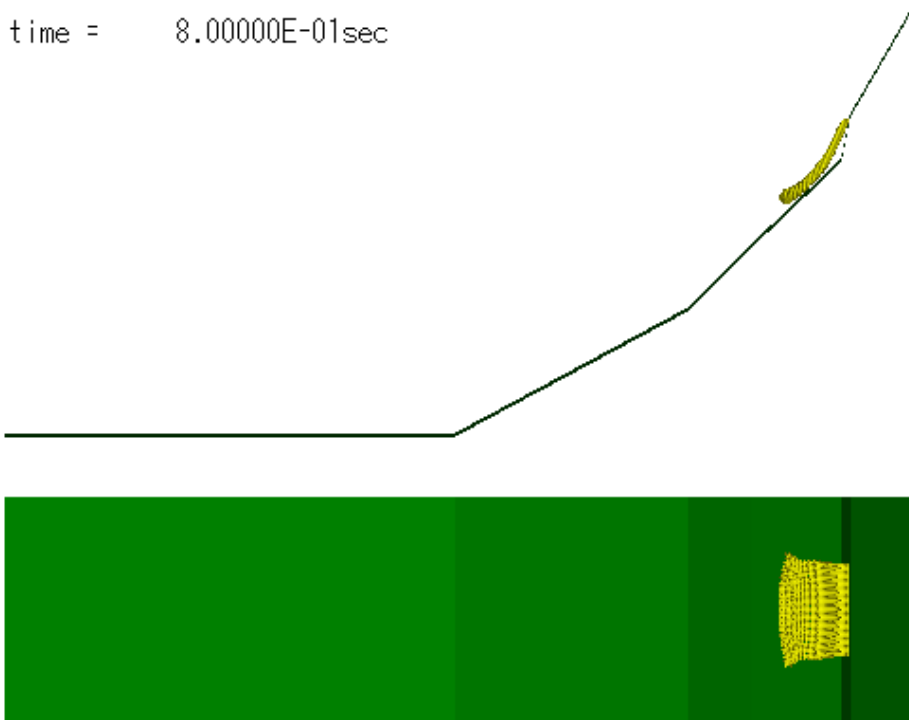


図 10.3.328(b) 変形図(0.8sec)

time = 1.60000E+00sec

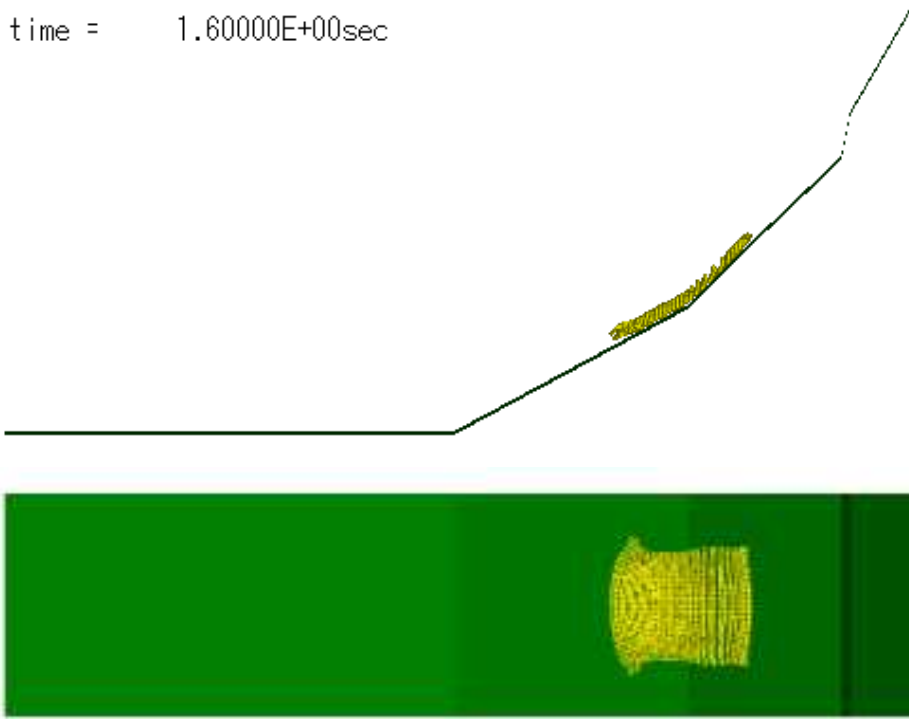


图 10.3.329 变形图(1.6sec)

time = 2.40000E+00sec

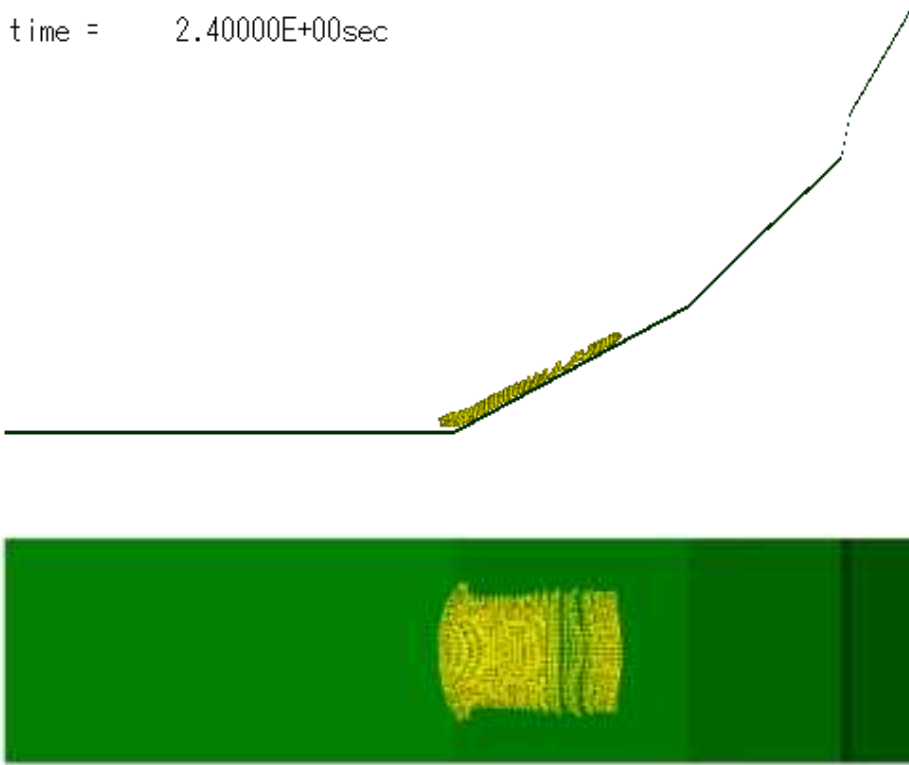


图 10.3.330 变形图(2.4sec)

time = 3.20000E+00sec

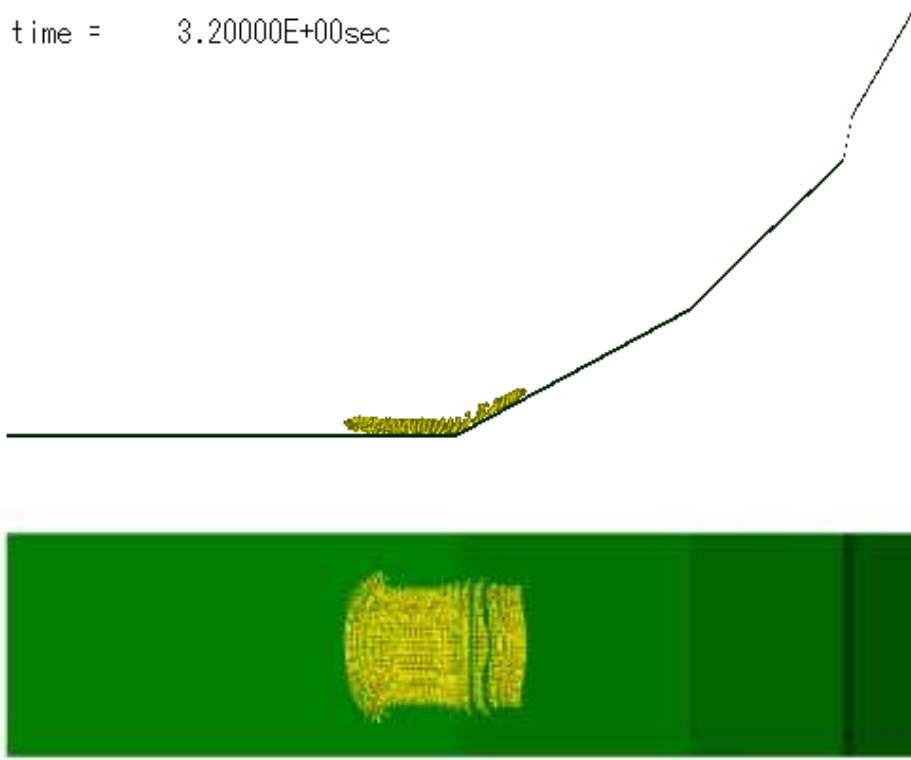


图 10.3.331 变形图(3.2sec)

time = 4.00000E+00sec

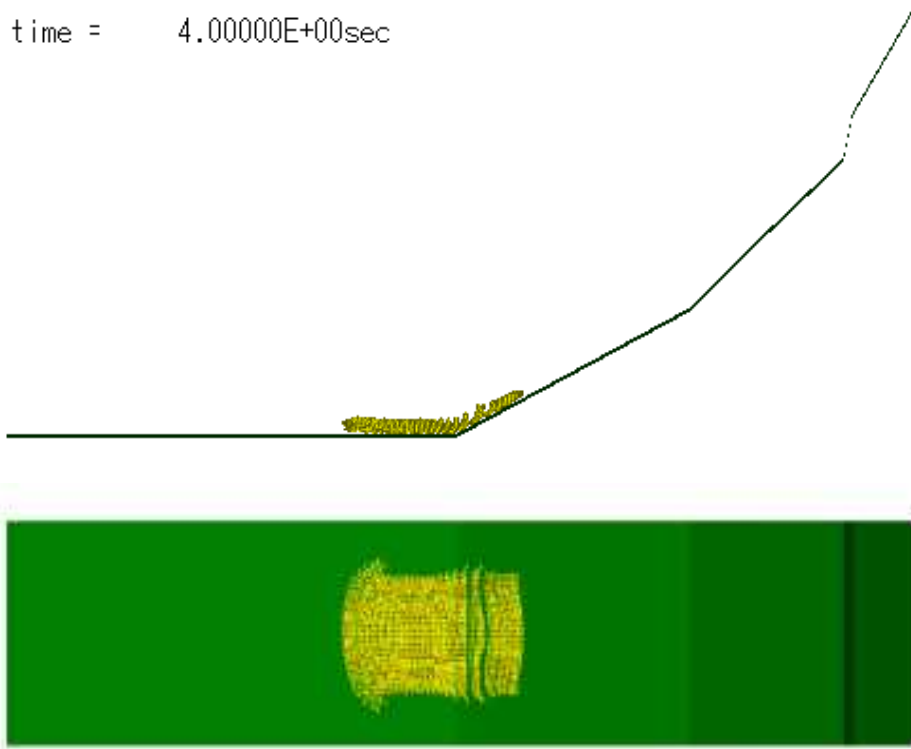


图 10.3.332 变形图(4.0sec)

• CASE10 土砂

time = 4.00000E-02sec

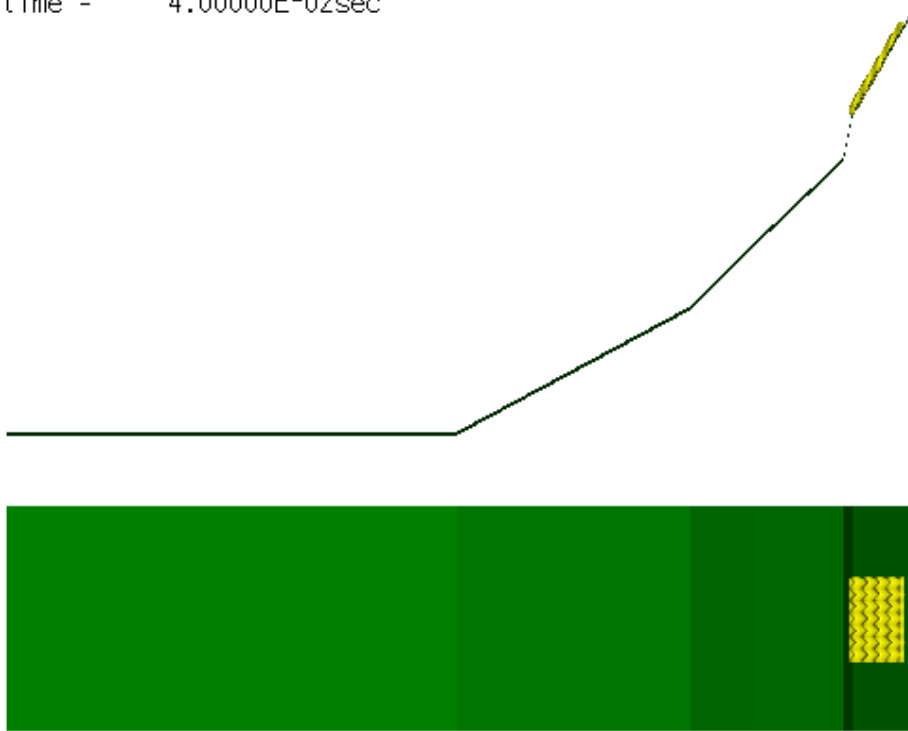


図 10.3.333 変形図(0.04sec)

time = 8.00000E-01sec

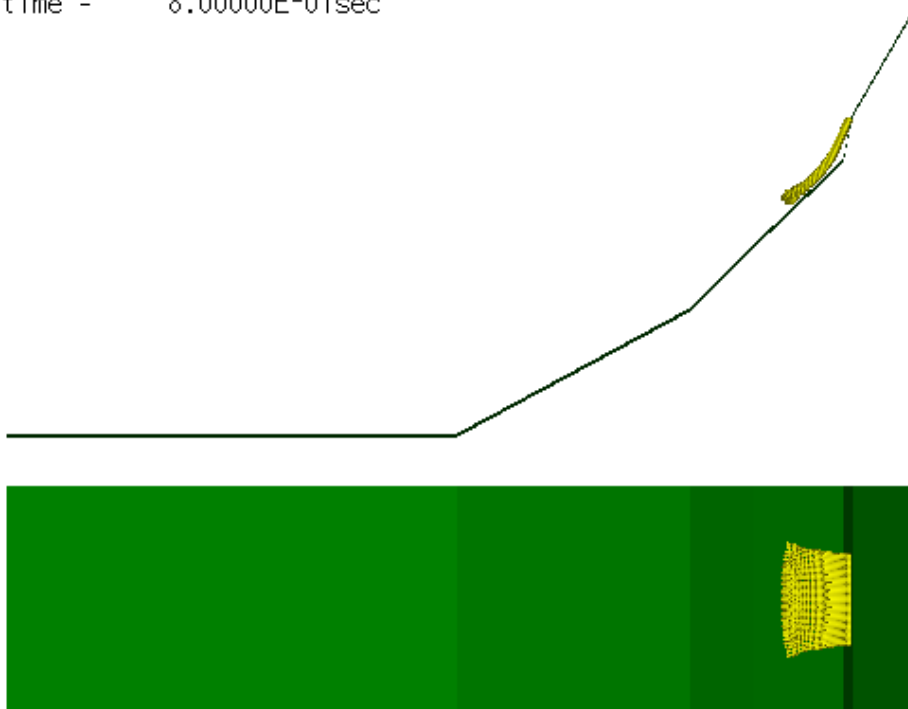


図 10.3.334 変形図(0.8sec)



time = 1.60000E+00sec

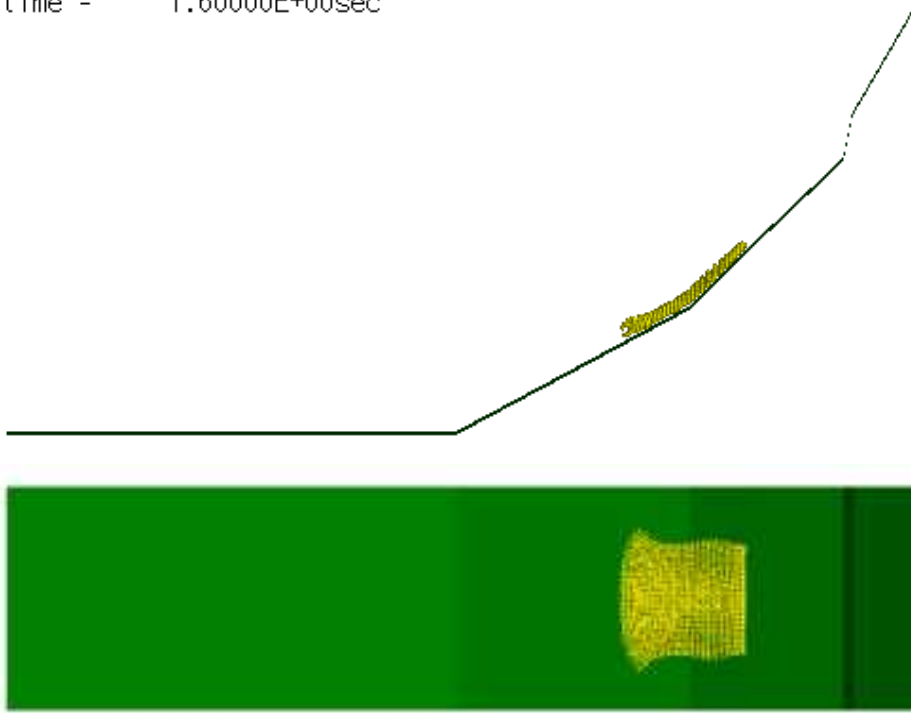


图 10.3.335 变形图(1.6sec)

time = 2.40000E+00sec

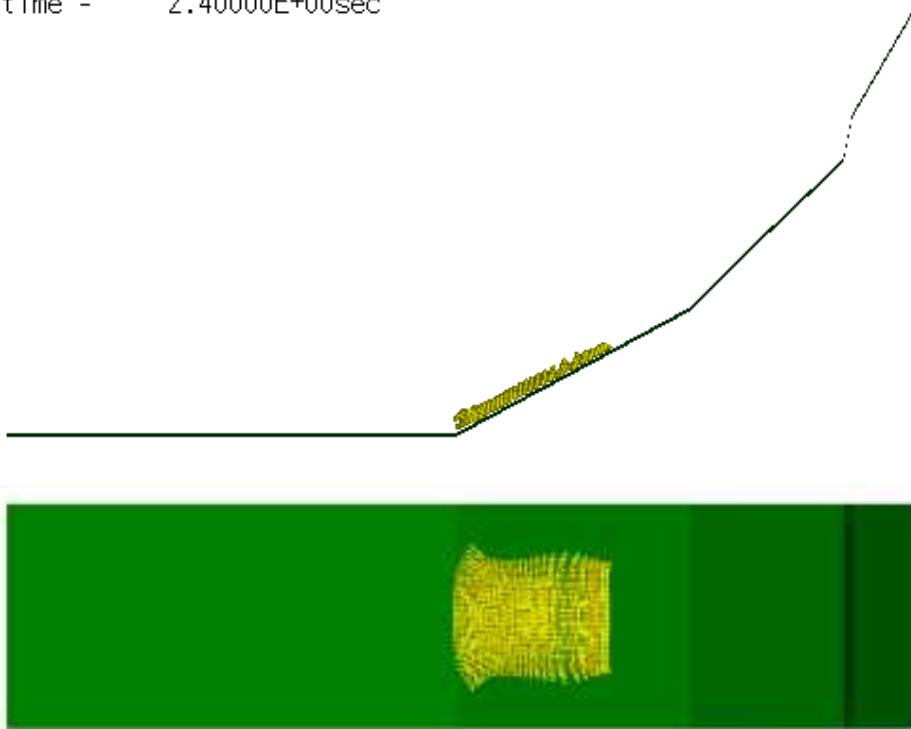


图 10.3.336 变形图(2.4sec)

time = 3.20000E+00sec

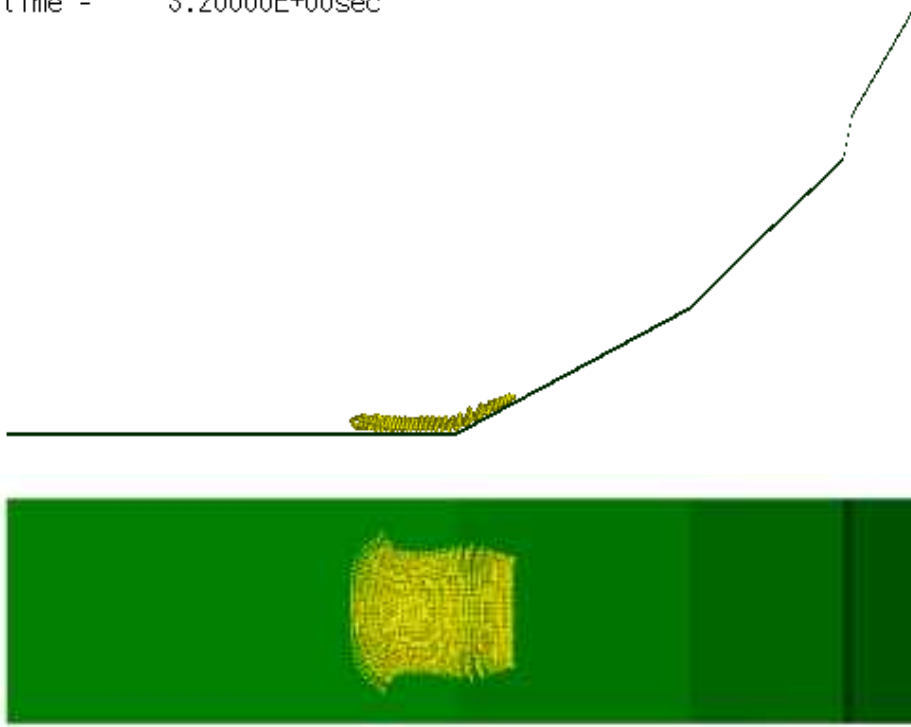


图 10.3.337 变形图(3.2sec)

time = 4.00000E+00sec

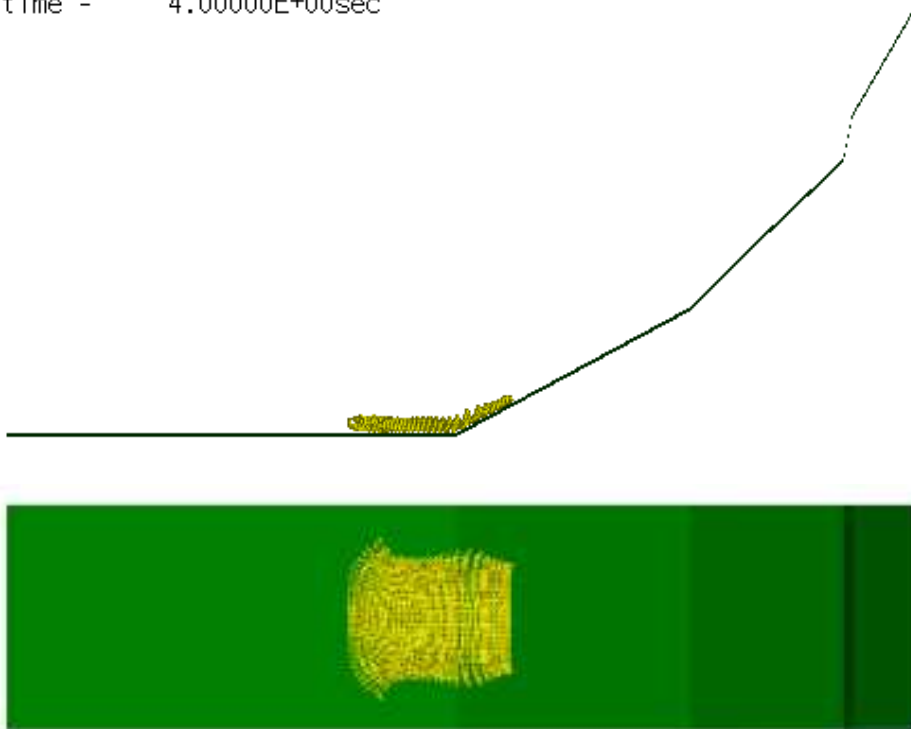


图 10.3.338 变形图(4.0sec)

(7) 解析結果 (時刻歴)

・CASE9 碎石

(a) 流動距離の時刻歴

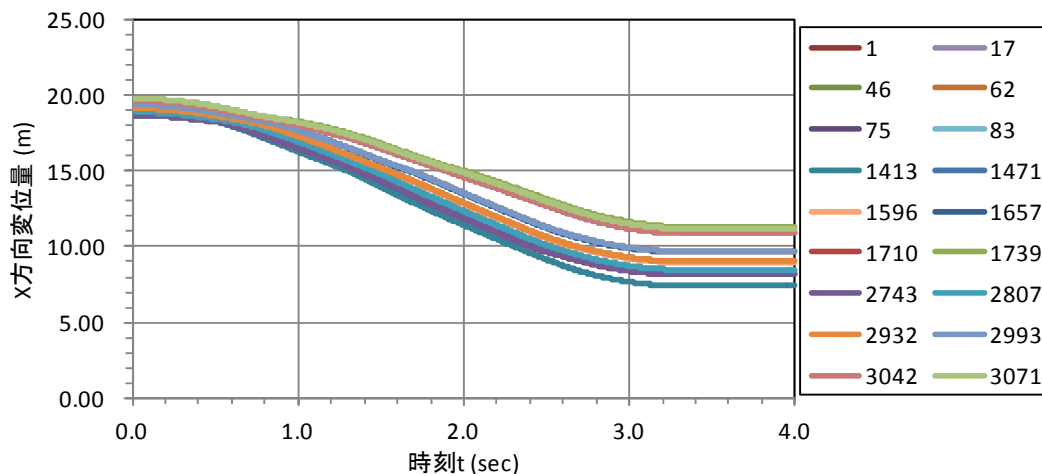


図 10.3.339 X 方向(流下方向)変位時刻歴

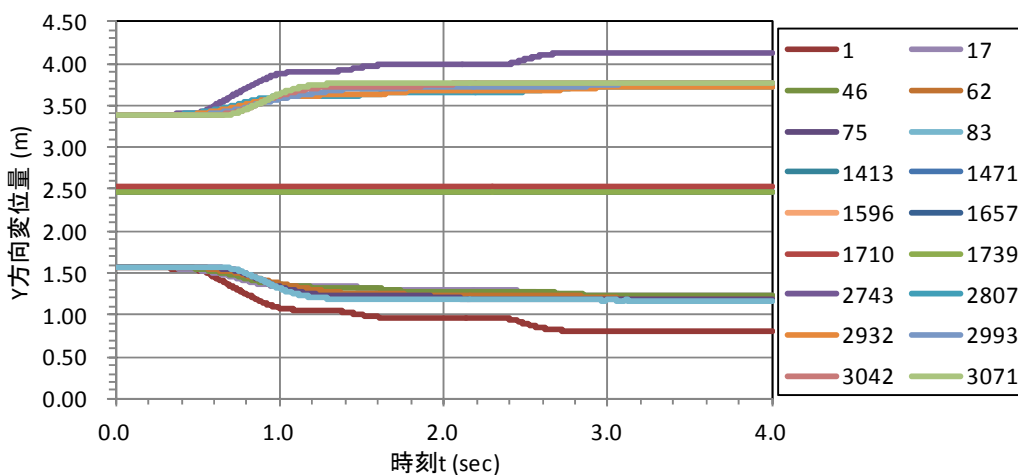


図 10.3.340 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

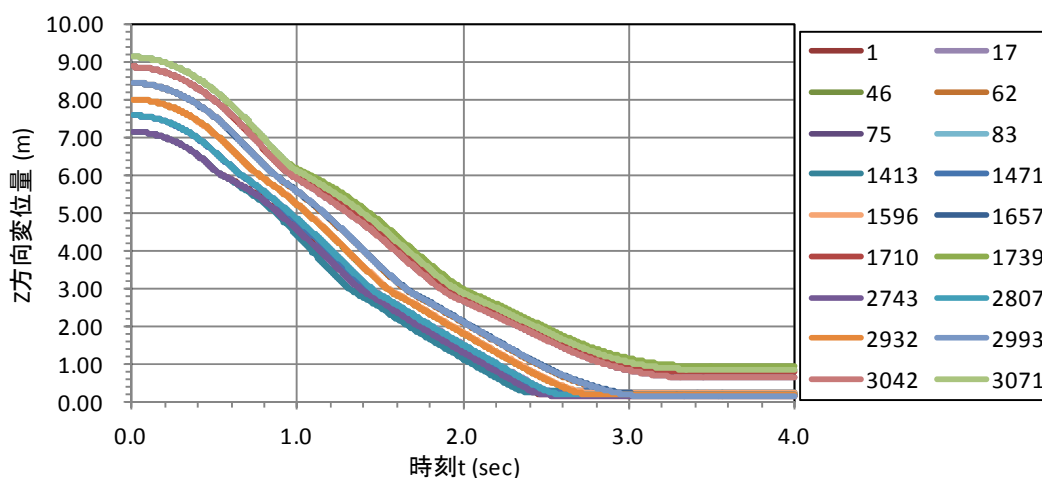


図 10.3.341 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

(b)堆積深さの時刻歴

堆積深さの時刻歴を下図に示す。体積深さは最大で0.38m となった。

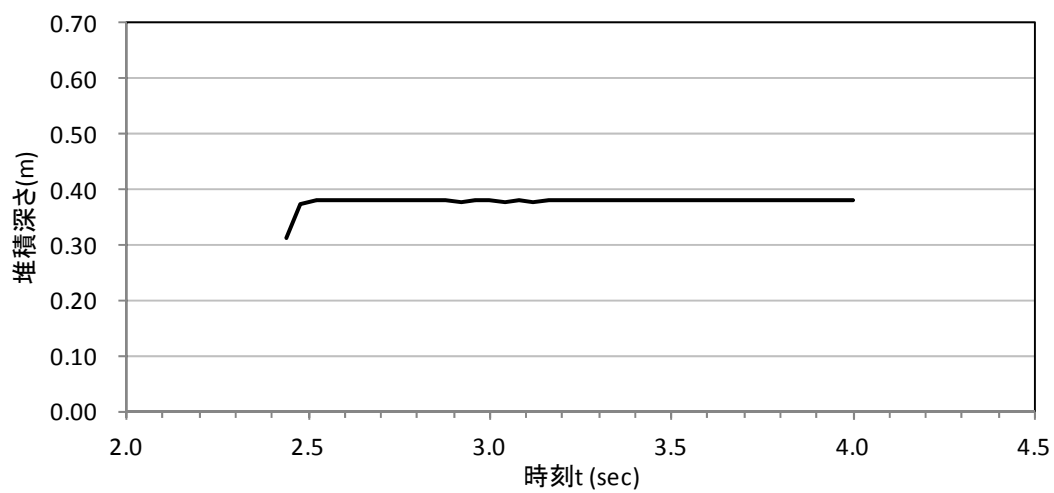


図 10.3.342 堆積深さ時刻歴

・CASE10 土砂

(a) 流動距離の時刻歴

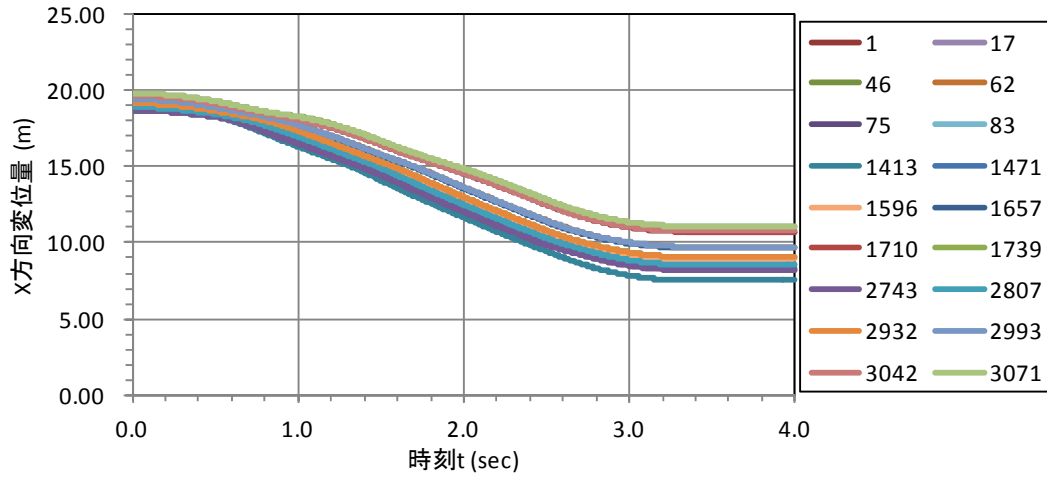


図 10.3.343 X 方向(流下方向)変位時刻歴

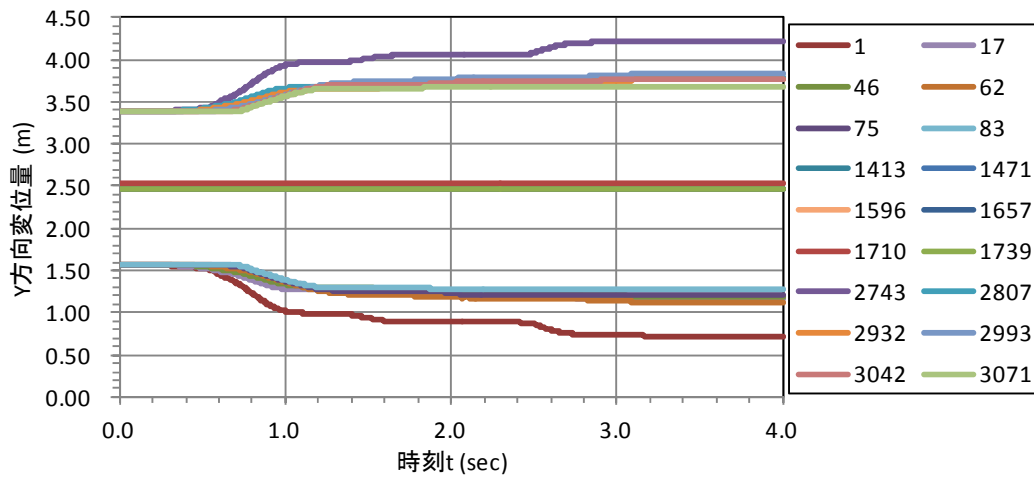


図 10.3.344 Y 方向(流下直角方向)変位時刻歴

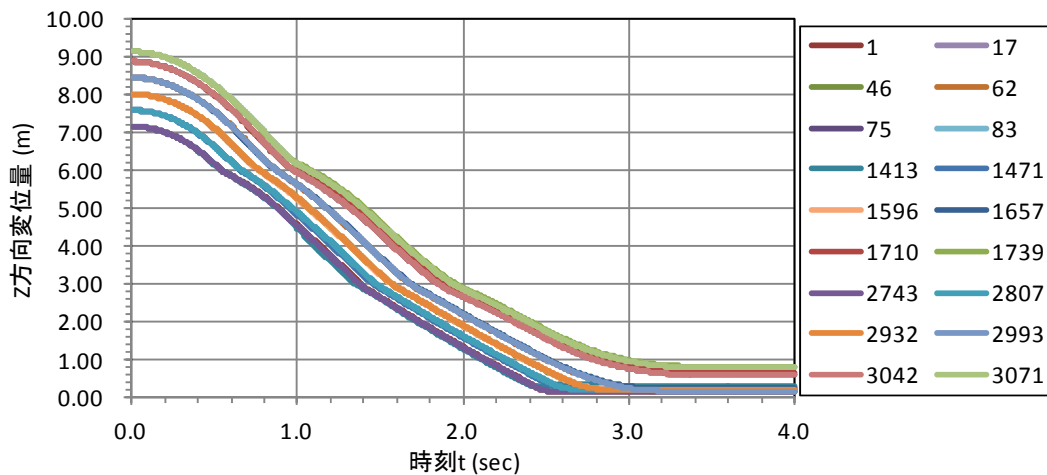


図 10.3.345 Z 方向(上下方向)変位時刻歴

(b)堆積深さの時刻歴

堆積深さの時刻歴を下図に示す。堆積深さは最大で0.41mとなった。

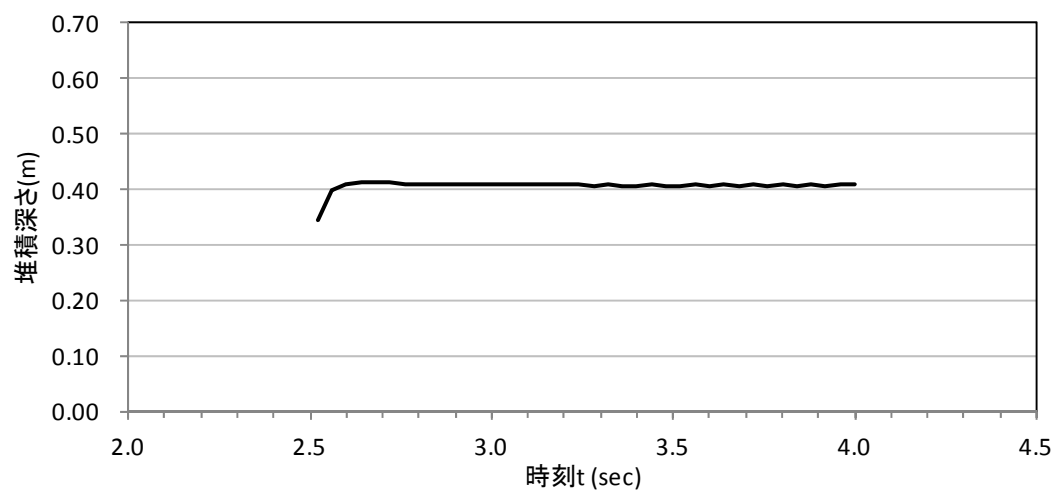


図 10.3.346 堆積深さ時刻歴

### 10. 3. 5 粒子法 (MPM) による検証解析のまとめ

粒子法 (MPM) による検証解析の結果より、以下の点が言える。

- 1) 岩塊の転動シミュレーションにおいては、岩塊模型形状をレーザースキャナで精緻にモデル化し、3次元上で解析を行った。その結果、岩塊の材料であるコンクリートの弾性係数を用いて解析を行うと、斜面の途中特に30度と45度斜面部境界で停止してしまうという、非現実的な結果となった。原因追求のため、岩塊のエネルギー履歴を確認したところ、勾配が変化する箇所に岩塊モデルが達した時、ひずみエネルギーが急増し、運動エネルギーがほぼゼロになるまで消費されていることを確認した。これは、MPMでは岩塊モデルを弾性体モデルでモデル化しているため、少しでも岩塊に変形が生じると運動エネルギーがひずみエネルギーに消費されてしまうためである。
- 2) 1)で示した現象を解決するために、ひずみエネルギーの発生抑制を目的として、岩塊モデルの弾性係数を従来のものから100分の1に低減して解析を行った。その結果、既述したように斜面途中で停止する現象を回避できた。しかしながら、平坦部では底面の摩擦角により力が作用して変形する影響が発生し、実験結果より最終到達距離を過小評価する結果となった。また、40cm径球形岩塊以外、滑動挙動となった。20cm径球形でも滑動挙動になったことを考えると、回転の自由度が過度に拘束されている傾向がある。これは、MPMでは、DEMのように回転運動の方程式を陽に解いていないことが一因と考えられる。
- 3) 2)のように岩塊モデルの剛性を小さくしたことにより、反力壁に岩塊モデルが衝突した際、衝突時間が長くなり、結果、最大荷重の値を過小評価する結果となった。この原因には、岩塊形状が実際のものとも異なることも影響していると考えられるが、DEMの結果よりも過小に評価していることを考えると、剛性低下の影響も大きく関与しているものと考えられる。
- 4) 以上のように、MPMで岩塊の転動シミュレーションを行うには、剛性の低減と、それに伴う衝撃荷重の過小評価への影響を考慮する必要がある。実用化に向けては、さらなる課題解決に向けた検討が必要である。この課題が生じる最大の原因は、岩塊を弾性体でモデル化していることであり、DEMにおけるように剛体によるモデル化や、弾性体でモデル化しても剛性以外で改善を図る方法など今後検討が必要である。
- 5) 土砂の流動シミュレーションについては、要素試験から得られた物性を基にモデル化することで流動の様相については概ね再現することができた。しかしながら、衝撃荷重については、過大評価する傾向がある。これは、反力壁を弾性体でモデル化していることも影響している可能性があるが、この点も含めてさらなる検討が必要である。
- 6) MPMではメッシュ依存性について考慮する必要がある。今回は比較的大きめのメッシュサイズで解析を行ったが、より小さいメッシュ長で解析することで改善が図られる可能性がある。

## 参考文献

- 1) Cundall, P. A : A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movement in Blocky Rocksystem,symp.ISRM,Nancy France, Proc., Vol2,pp.129-136,1971.
- 2) 目黒公郎, 伯野元彦 : 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 63 No4, pp. 409-468, 1988.
- 3) 澤田純男, 岩崎好規, プラダン テージ B. S. : 個別要素法による砂の単純せん断の静的解析, 第25回土質工学研究発表会, pp.525-526, 1990.
- 4) 阪口秀 : 高速個別要素法プログラム Hidem-ver.3, 海洋開発研究機構, 2003
- 5) Sakaguchi, H., Ozaki, E. & Igarashi, T., Plugging of the Flow of Granular Materials during the Discharge from a Silo, Int. J. Mod. Phys. B, 7, 1949-1963, (1993).
- 6) 栃木均 : 地震時崩落岩塊の到達距離に及ぼす岩塊の大きさと形状の影響, 電力中央研究所報告, N09021, 2010.
- 7) 表ら : 個別要素法を用いた落石シミュレーションの定数設定法に関する検討, 土木学会, 2009.
- 8) 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号6, 2009.
- 9) 阿部慶太・Johansson Jorgen・小長井一男、MPMを応用した高速長距離土砂流動の運動範囲予測のための数値解析手法、土木学会論文集C、Vol.63、No.1、93-109,2007、1.
- 10) Sulsky, D.・Chen, Z.・Schreyer, H.L., A particle method for history dependent materials,Computer methods in applied mechanics and engineering, 118, pp.179-196, 1994.
- 11) Sulsky, D.・Zhou, S.J.・Schreyer, H.L., Application of a particle-in-cell method to solid mechanics, Computer Physics Communications, 87, pp236-252, 1995.



## 11. 技術資料の作成

### 11.1 斜面安定・変形解析ツールの構築

本ツールでは、2次元 FEM 地盤応答解析から得られる加速度履歴および応力履歴を反映し、以下の 4 種類の手法を用いて斜面の安定計算を実施可能とした。

- 1) 加速度履歴を用いた円弧すべりによる安定計算ツール
- 2) 応力履歴を用いた円弧すべりによる安定計算ツール
- 3) 加速度履歴を用いた非円弧すべりによる安定計算ツール
- 4) 応力履歴を用いた非円弧すべりによる安定計算ツール
- 5) Newmark 法による変位量計算ツール

### 11.1.1 ツール構成

安定ツールは以下の環境で開発した、ツールの構成図を図 11.1.1 に示す。

<ソルバー部>

言語：Fortran90

開発環境：VisualStudio2008 SP1

<GUI>

言語：C#

開発環境：VisualStudio2005 SP1

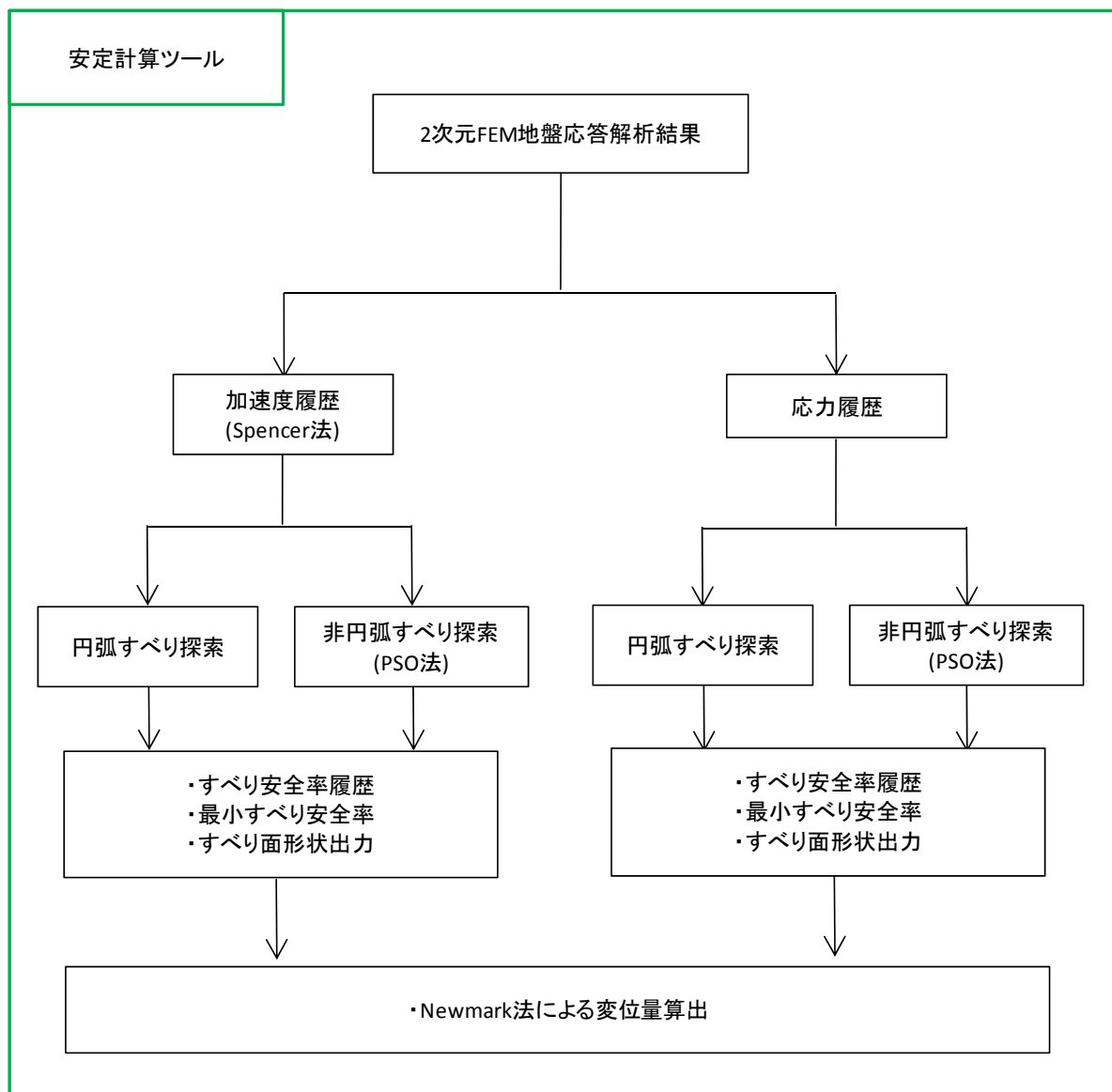


図 11.1.1 安定計算ツール 構成図

表 11.1.1 安定計算ツールの主要機能

項目1	項目2	機能
ファイル	解析モデル	解析モデル・結果読込
	地震応答解析結果	
強度設定	ピーク強度・残留強度の設定	解析モデルの材料IDと対応するC、 $\phi$ を表示する
すべり線探索	円弧	すべり線の形状の選択・条件設定
	非円弧	
探索条件設定	テンションクラック	要素を選択、テンションクラックを設定する
計算実行	計算実行	計算条件・計算実行・Newmark法の実行の有無の選択
解析結果	最小すべり安全率出力	安全率の出力
	最小すべり安全率履歴出力	安全率時刻歴の出力
	すべり面形状の出力	すべり面形状の出力
	残留変位量の出力	残留変位量の出力

## 11.1.2 地震応答解析結果の読み込み

### (1) インプットファイル形式

SoilPlus 解析時の指定時刻結果の値を用いる。以下のフォーマットに対応した。

モデルデータは、SoilPlus の dat 形式に対応した。

表 11.1.2 使用する SoilPlus のデータ

ファイル拡張子	ファイル種類	結果種類
*.dat	解析データ	モデル形状、材料
*.f53	指定時刻節点結果	変位、速度、加速度
*.f55	指定時刻要素結果	応力、断面力
*.f57	静的解析結果	応力、断面力

#### ① 地震応答解析結果(SoilPlus 形式)

SoilPlus の表 11.1.2 のデータファイルを使用する。

加速度履歴(f53 形式)、応力履歴(f55 形式)をそれぞれ選択する。

#### ② 地震応答解析結果(csv 形式)

csv 形式のファイルにも対応した。フォーマットを下記に示す。(応力、加速度共通)

要素番号(節点番号)を 1 行目に記述、2 行目以降は出力値を step 数分記述する。

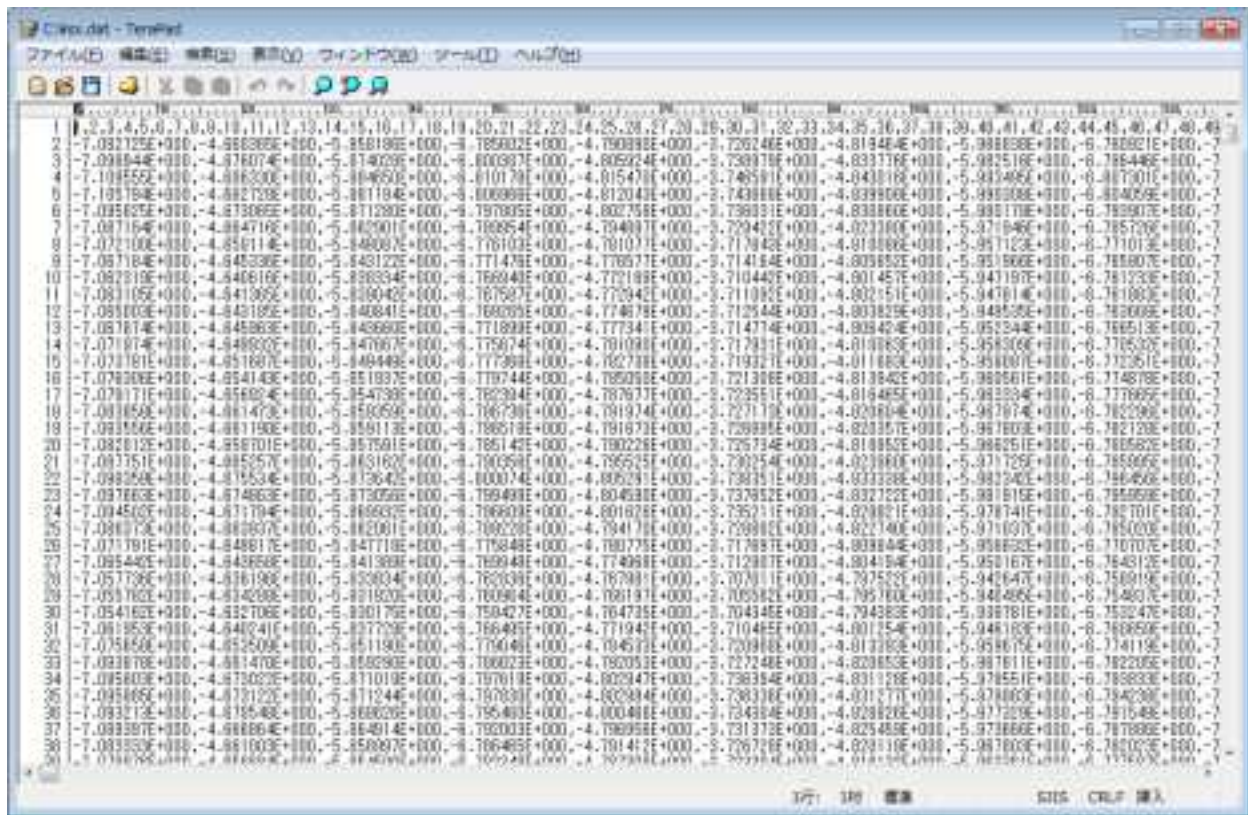


図 11.1.2 地震応答解析結果(csv 形式) ox の例

③ 初期応力結果(SoilPlus 形式)

- Soil Plus の静的解析結果を読み込む場合：静的解析データを指定し、f57 形式のファイルを読み込む。  
(動的解析時に読み込んでいる場合は、読み込む必要はない)

④ 初期応力結果(csv 形式)

- csv 形式のファイルにも対応した。フォーマットは地震応答解析結果(図 11.1.2)と同様である。

モデルの読み込み時の画面を図 11.1.3 に示す。

応力履歴ファイル、加速度履歴ファイルの読み込み時の画面を図 11.1.4 に示す。

応力履歴結果から Newmark 法を用いた変位量計算を用いる場合は、加速度結果も指定する。

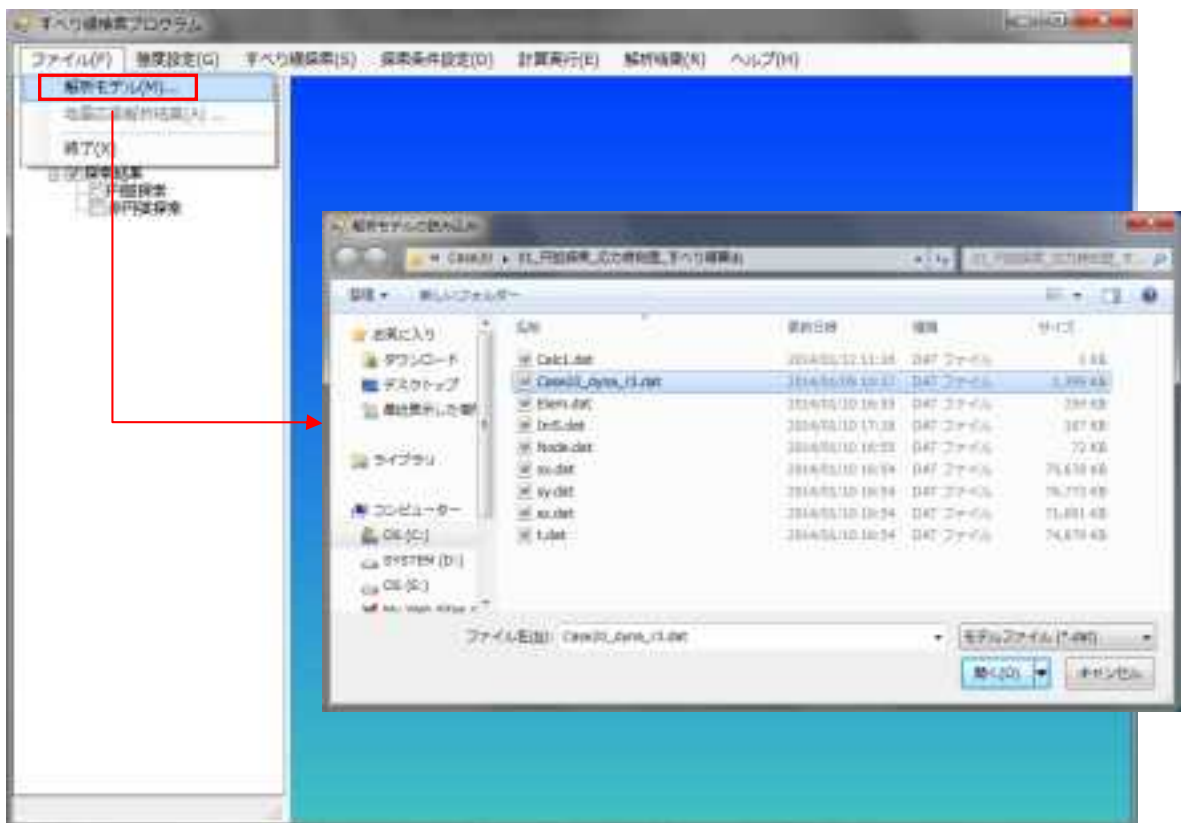


図 11.1.3 モデルの読み込み (dat ファイル指定)

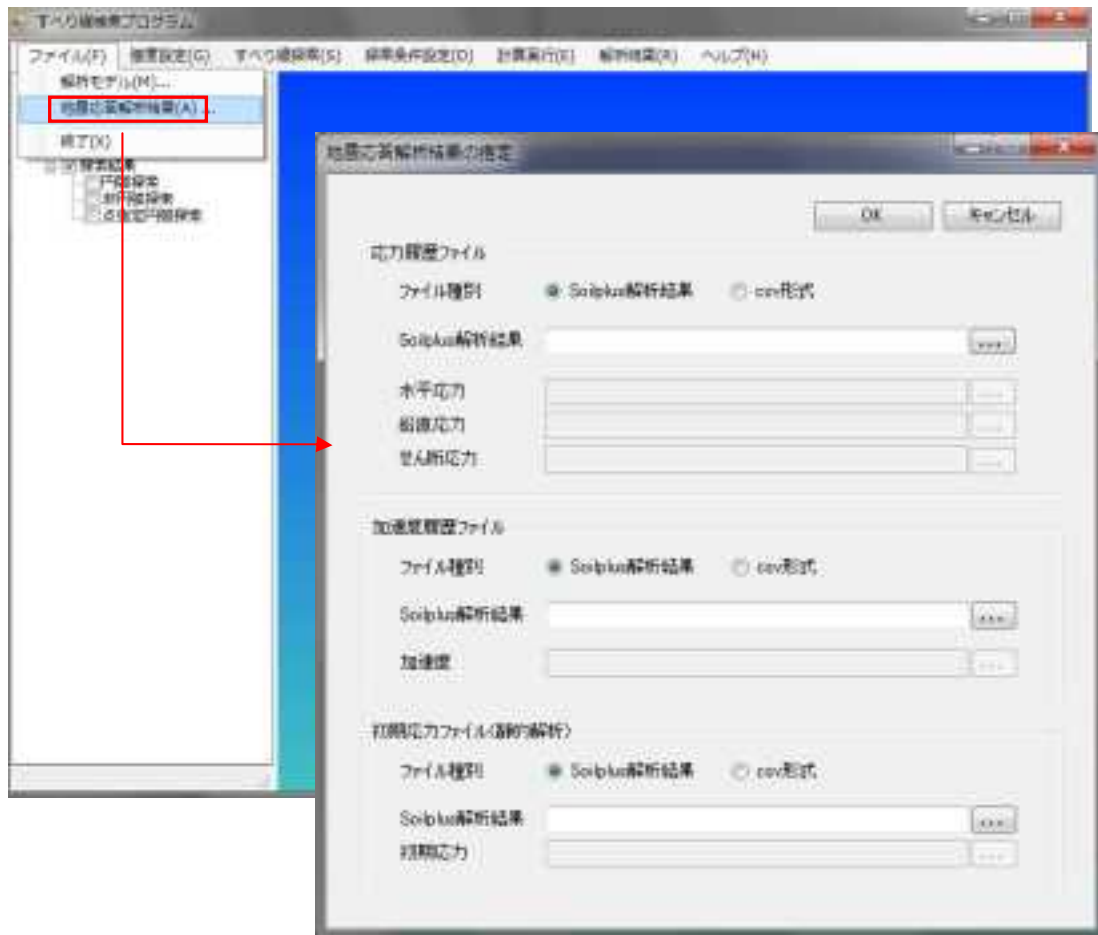


図 11.1.4 地震応答解析結果ファイルの読み込み

### 11.1.3 加速度履歴を用いた円弧すべりによる安定計算ツール

すべり円弧を仮定し、有限個の短冊土塊に分割した後、動的解析から得られる各節点での応答加速度と各要素の重量で重み付けを行い、合計してすべり土塊の重量で除した等価加速度を算出し、地震作用として設定する。安全率の算定には Spencer 法を用いた。安全率算定時に用いる一様乱数は超一様分布列とした。

#### (1) 円弧による探索機能

円弧による探索は、円弧の中心点を格子点上に複数定義し安全率が最小となるすべり線を探査する。探索の入力パラメータは下記の項目となる。

探索パラメータの画面を図 11.1.6 に、実際設定した探索条件を図化したものを図 11.1.7 に示す。

探索条件を図化したものは、格子の 4 隅の最大最小半径を図化する。

- ・ 最小要素数：円弧が通る最小要素数(デフォルト 1)(最小要素数 or 最小半径の指定)
- ・ 最小半径：すべり線探索の円弧の最小半径(最小要素数 or 最小半径の指定)
- ・ 最大半径：すべり線探索の円弧の最大半径(省略可)
- ・ 分割数：最大半径と最小半径の間の分割数
- ・ 中心点位置：格子点の分割数

方法 1：格子点の四隅の座標値を入力

方法 2：格子点の左下隅の座標値と X 方向、Y 方向の幅を入力

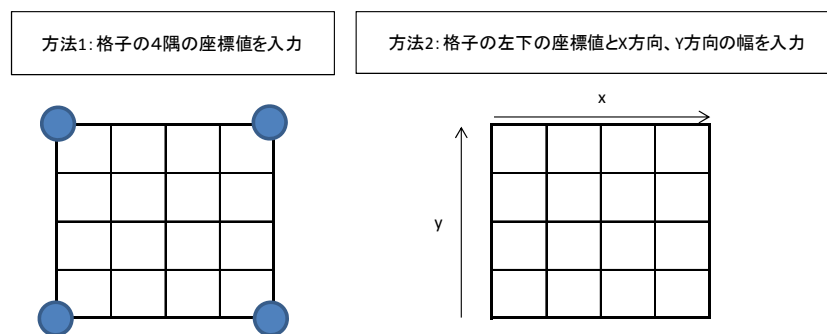


図 11.1.5 格子の設定イメージ

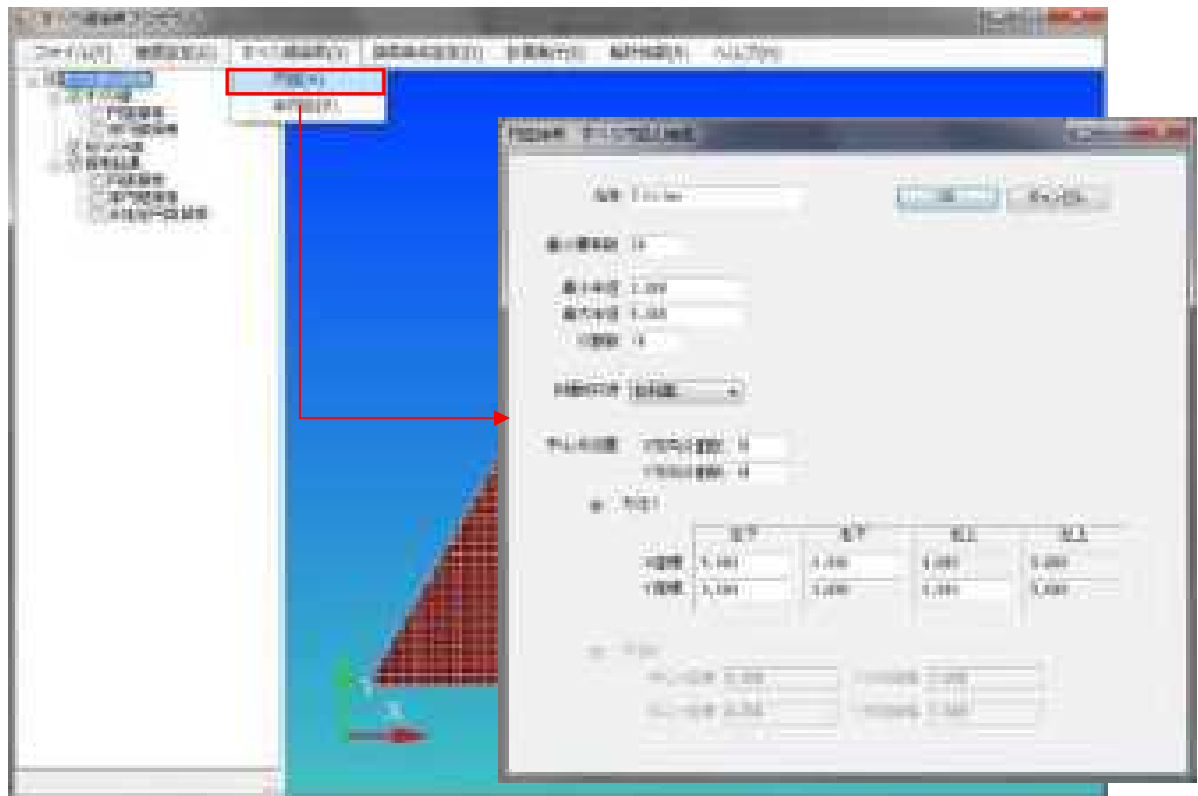


図 11.1.6 円弧探索の設定画面

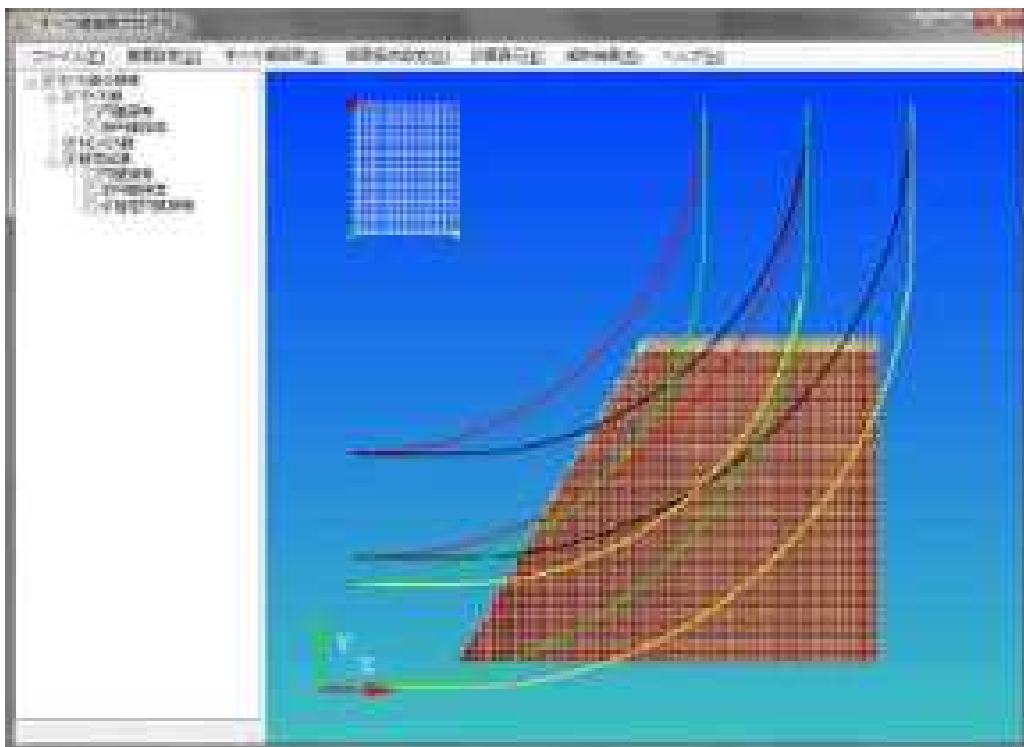


図 11.1.7 円弧による探索条件図



## (2) 探索条件設定

### ・テンションクラック設定

テンションクラックの領域指定方法は、多角形による選択で設定する。(図 11.1.8)

抵抗は無視し、その分の土塊重量も安全率の計算に含めない。

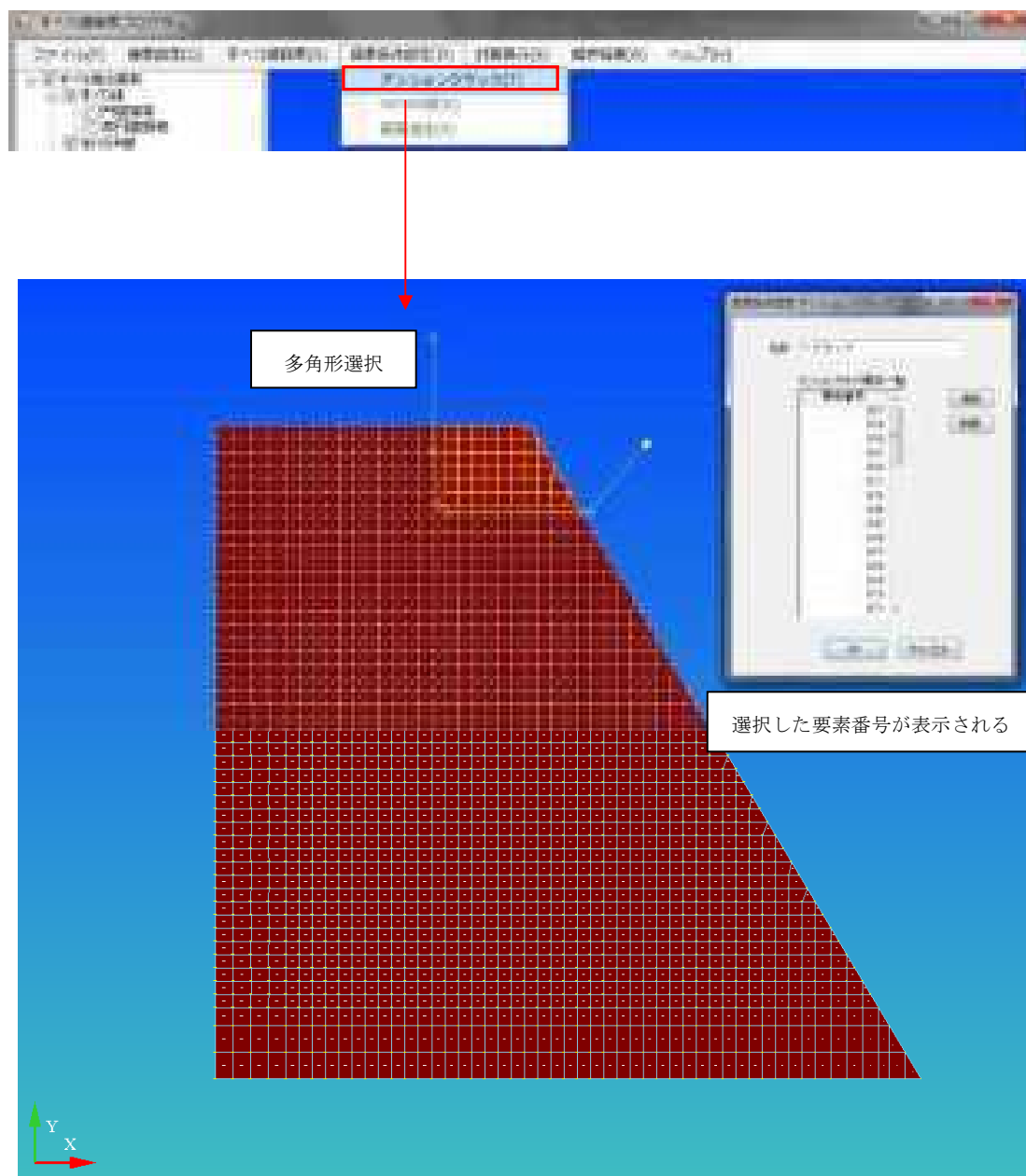


図 11.1.8 テンションクラックの領域選択イメージ図

### (3) 等価加速度の設定

安定計算における加速度は、水平・鉛直両方に対して指定された以下の方法により算出した等価加速度を用いる。

#### ① すべり土塊内の節点抽出

地震応答解析により得られた各節点の応答加速度波形データから、すべり線で設定したすべり土塊内に含まれる節点の応答加速度波形を取り出す。

#### ② 等価加速度の算出

抽出した節点の支配面積を算出し、各応答加速度を、最小スライス幅、計算用の地層高さで設定した領域毎に、各時刻で等価加速度を算出する。

それぞれの領域で算出された等価加速度をさらに平均化し、安定計算に用いる。

図 11.1.9 に算出イメージを示す。

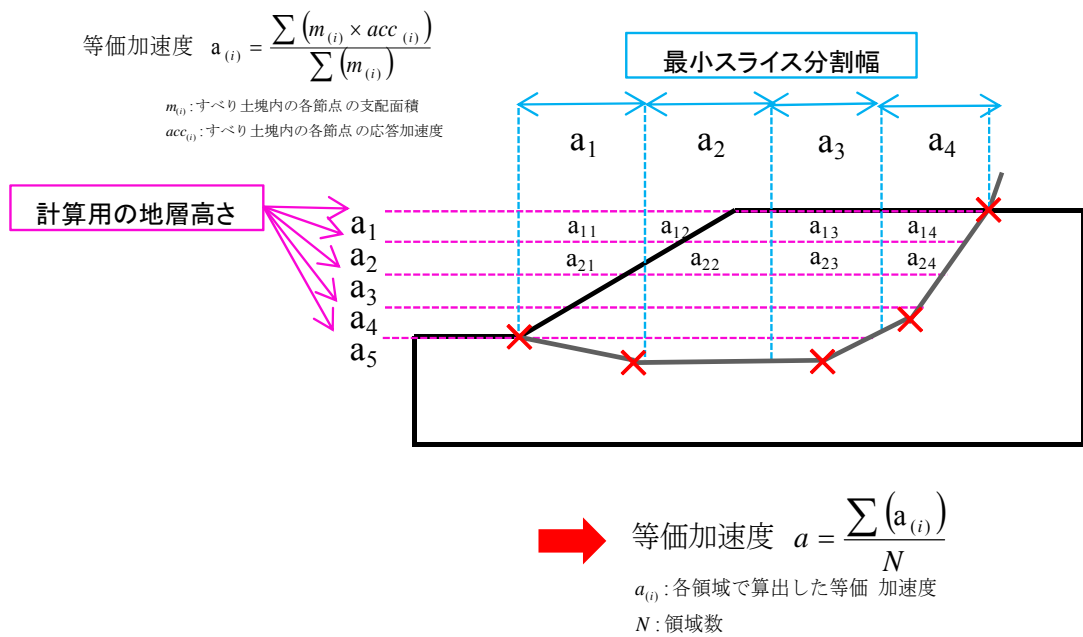


図 11.1.9 安定計算に用いる等価加速度算出のイメージ

#### ③ 等価加速度の算出条件設定

- ・ 最小スライス分割幅  
すべり線(X 軸方向)の分割幅
  
- ・ 計算用の地層高さ  
震度計算の地層高さ

#### (4) 計算実行

計算実行時の設定パラメータは下記の項目となる。

- ・解析結果保存先：解析結果を保存する場所の指定
- ・探索方法：円弧・非円弧探索の選択
- ・テンションクラック：テンションクラックの考慮の有無
- ・Newmark 法：Newmark 法を用いた残留変位計算の実行の有無
- ・計算範囲ステップ指定：安定解析を実施する計算ステップの指定
- ・変位量算出：等価加速度算出時の設定パラメータ

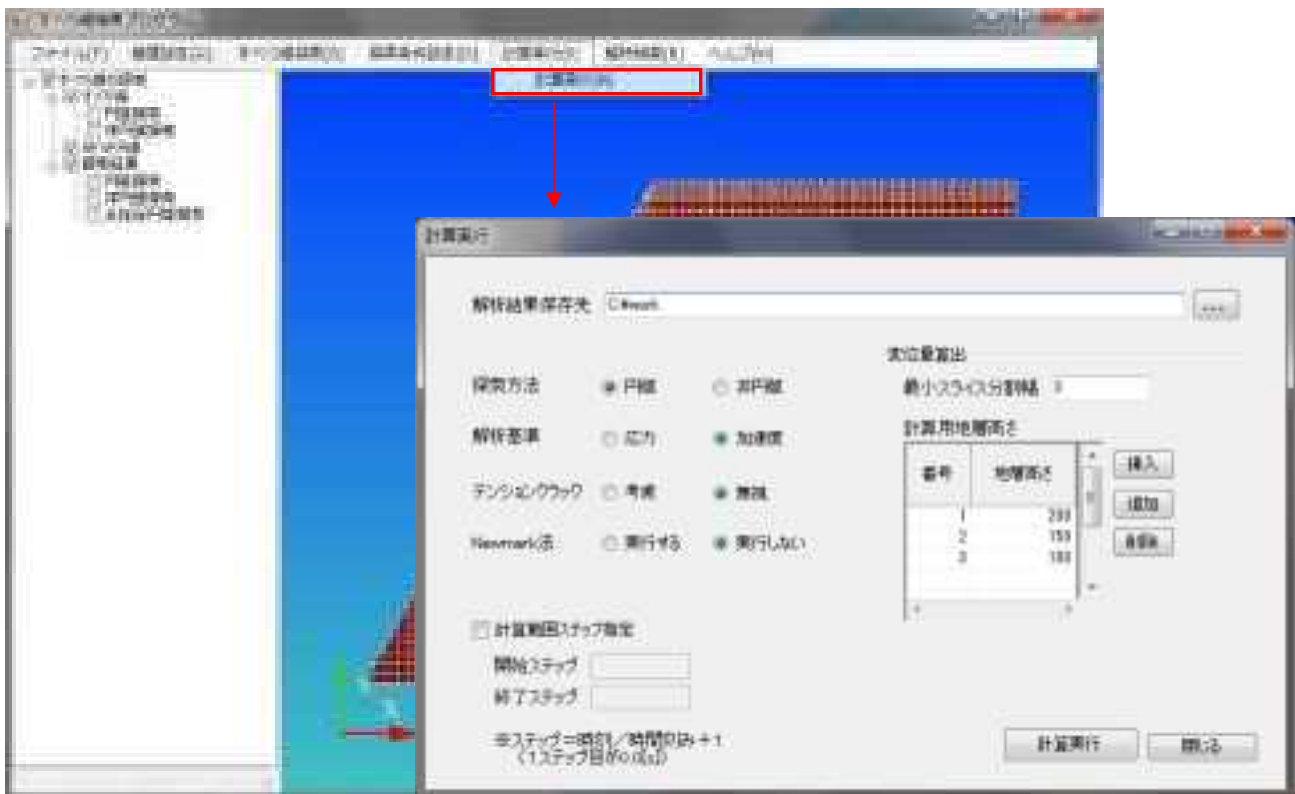


図 11.1.10 計算実行画面

### (5) 強度設定

強度設定は、解析モデル(dat ファイル)を読み込み以下の項目を表示する。強度設定画面を図 11.1.11 に示す。

- ・材料番号：定義されている材料 ID 番号
- ・ $\sigma_t$ ：引張強度  $\sigma_t$  を入力
- ・ $C, \varphi$ ：ピーク強度  $C$ 、 $\varphi$  を入力
- ・残留強度  $C', \varphi'$ ：残留強度  $C', \varphi'$  を入力



図 11.1.11 強度設定の設定画面

(6) 結果出力

① すべり安全率

最小すべり安全率はその時刻を出力する。出力は下記の2項目に対応した。

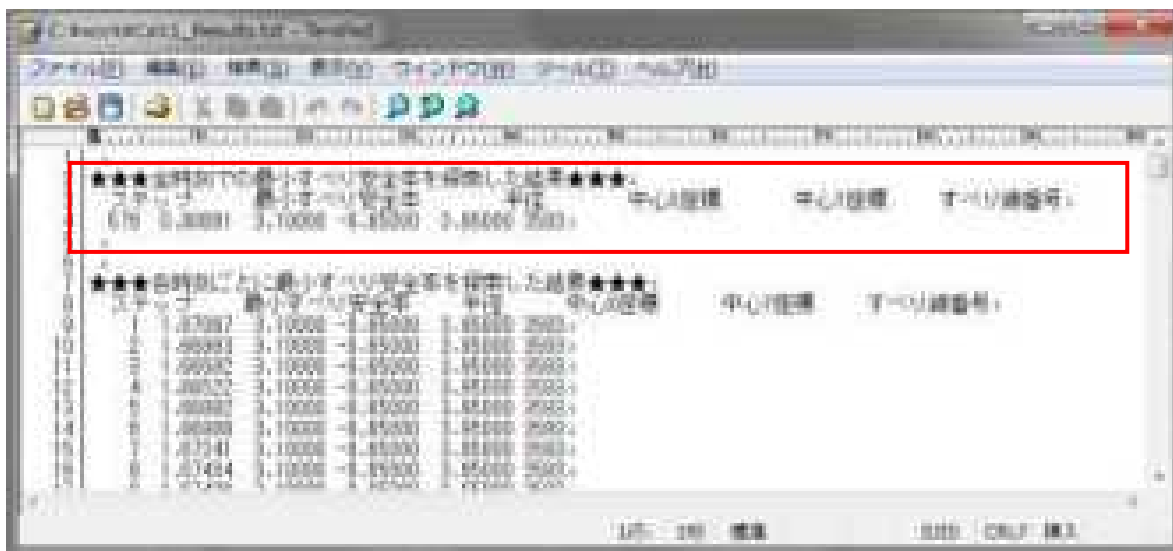
GUIでは安全率が小さい順に10個表示する。

- ・画面表示(図 11.1.12)
- ・テキスト出力(図 11.1.13)



時刻	安全率	すべり面番号
1	0.7000	0.00000
2	0.7000	0.00000
3	0.7000	0.00000
4	0.7000	0.00000
5	0.7000	0.00000
6	0.7000	0.00000
7	0.7000	0.00000
8	0.7000	0.00000
9	0.7000	0.00000
10	0.7000	0.00000

図 11.1.12 最小すべり安全率の表示画面



■ 時刻ごとの最小すべり安全率を求めた結果表書書:  
スライス 最小すべり安全率 平均 中心の位置 中心の位置 すべり面番号:  
(1) 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000

■ 時刻ごとの最小すべり安全率を求めた結果表書書:  
スライス 最小すべり安全率 平均 中心の位置 中心の位置 すべり面番号:  
1 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
2 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
3 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
4 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
5 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
6 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
7 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
8 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
9 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000  
10 0.70000 0.70000 0.70000 0.00000 0.00000

図 11.1.13 最小すべり安全率のテキスト出力

② すべり安全率時刻歴

・最小すべり安全率の時刻歴図、デジタル値を出力する。出力は下記の2項目に対応した。

- ・画面表示(図 11.1.14)
- ・テキスト出力(図 11.1.15)

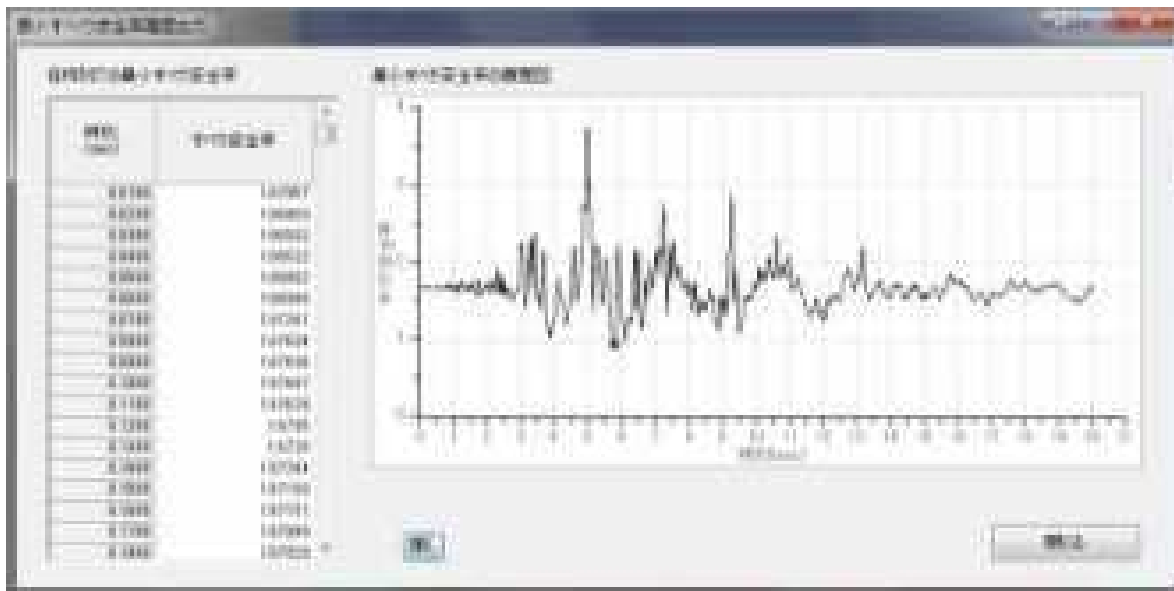


図 11.1.14 すべり安全率履歴の表示イメージ

時刻	すべり安全率	すべり履歴番号
1	3.7587	3.10000
2	3.8588	3.10000
3	3.9589	3.10000
4	3.9577	3.10000
5	3.9587	3.10000
6	3.9589	3.10000
7	3.7441	3.10000
8	3.7434	3.10000
9	3.7436	3.10000

図 11.1.15 最小すべり安全率履歴のテキスト出力

③ すべり線形状の出力

最小すべり線の図化、すべり線の座標値出力(テキスト出力)に対応した。

すべり線の図化イメージを図 11.1.16、座標値の出力図を図 11.1.17 に示す。

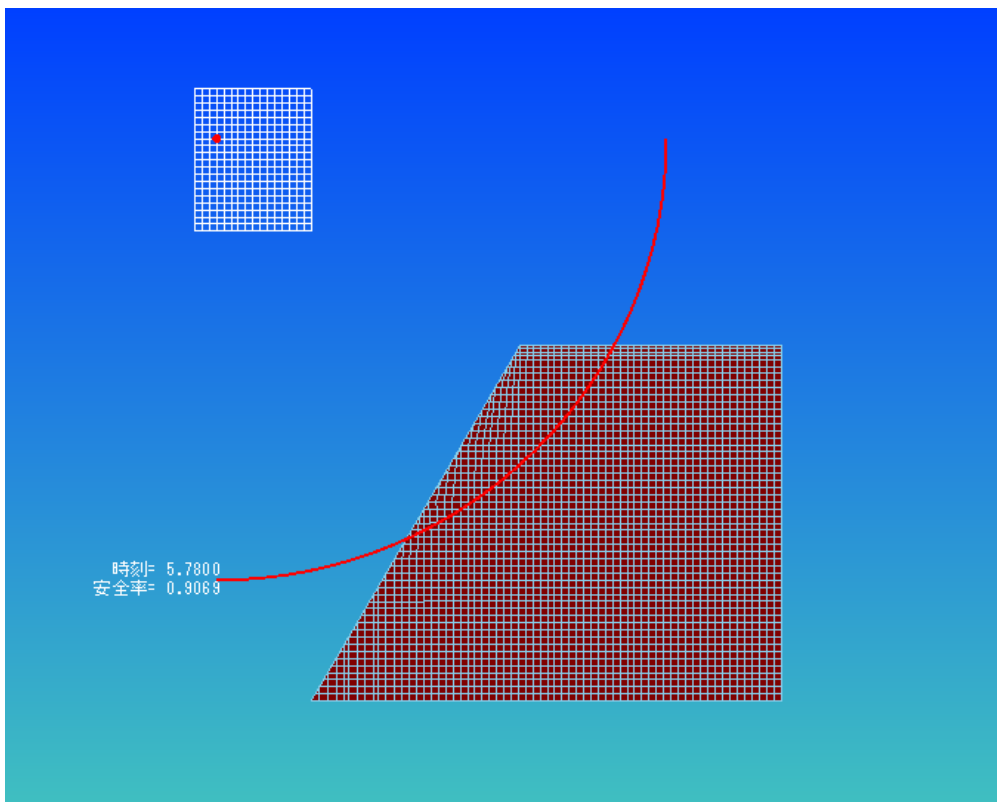


図 11.1.16 すべり線形状の表示イメージ

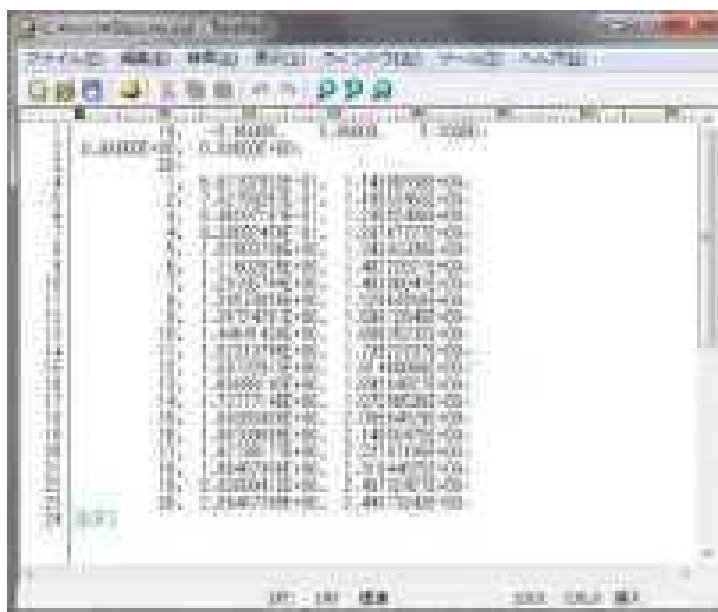


図 11.1.17 すべり線の座標出力

### 11.1.4 応力履歴を用いた円弧すべりによる安定計算ツール

すべり円弧を仮定し、地盤応答解析から得られる応力履歴を用いて以下の手順で安全率を算出する。

- ①各要素毎にせん断応力  $\tau$  に円弧の横切る長さを掛けて、全要素足し合わせる。
- ②各要素毎にせん断抵抗強さ  $S$  に円弧の横切る長さを掛けて、全要素足し合わせる。
- ③②を①で除して、すべり安全率とする。

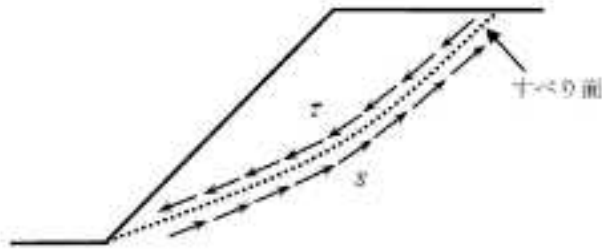


図 11.1.18 すべり線上のせん断応力とせん断抵抗強さ

#### (1) 円弧による探索機能

加速度履歴を用いる場合と同様、探索の入力パラメータは下記の項目となる。

- ・ 最小要素数：円弧が通る最小要素数(デフォルト 1)(最小要素数 or 最小半径の指定)
- ・ 最小半径：すべり線探索の円弧の最小半径(最小要素数 or 最小半径の指定)
- ・ 最大半径：すべり線探索の円弧の最大半径(省略可)
- ・ 分割数：最大半径と最小半径の間の分割数
- ・ 中心点位置：格子点の分割数

方法 1：格子点の四隅の座標値を入力

方法 2：格子点の左下隅の座標値と X 方向、Y 方向の幅を入力

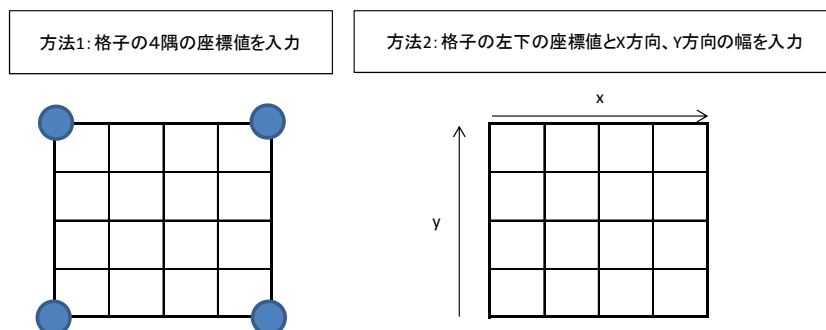


図 11.1.19 格子の設定イメージ



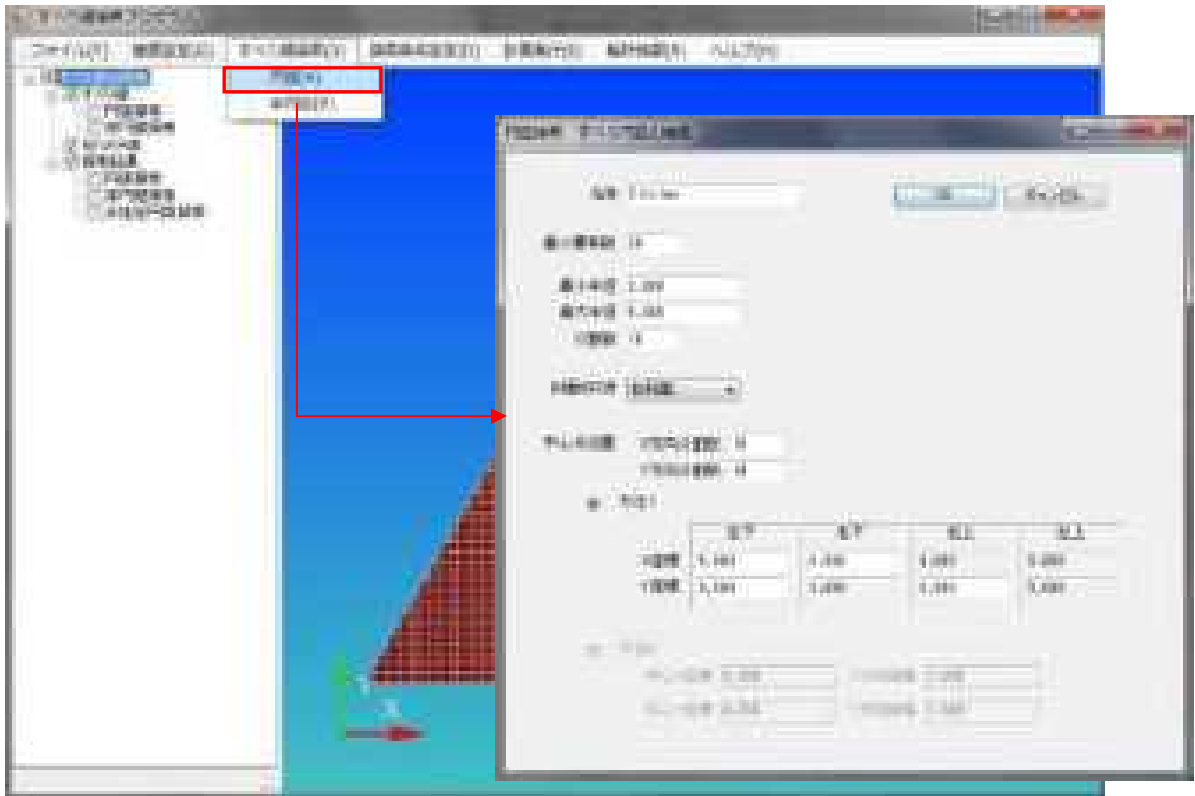


図 11.1.20 円弧探索の設定画面

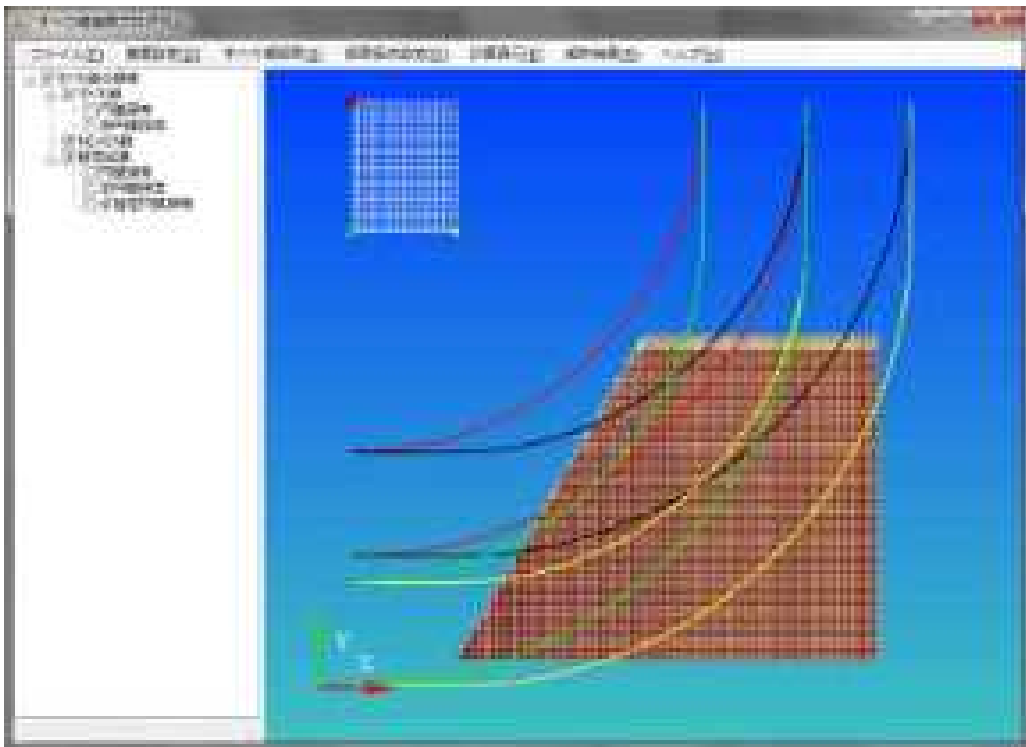


図 11.1.21 円弧による探索条件図

## (2) 探索条件設定

### ・テンションクラック設定

テンションクラックの領域指定方法は、多角形による選択で設定する。(図 11.1.22)

抵抗は無視し、その分の土塊重量も安全率の計算に含めない。

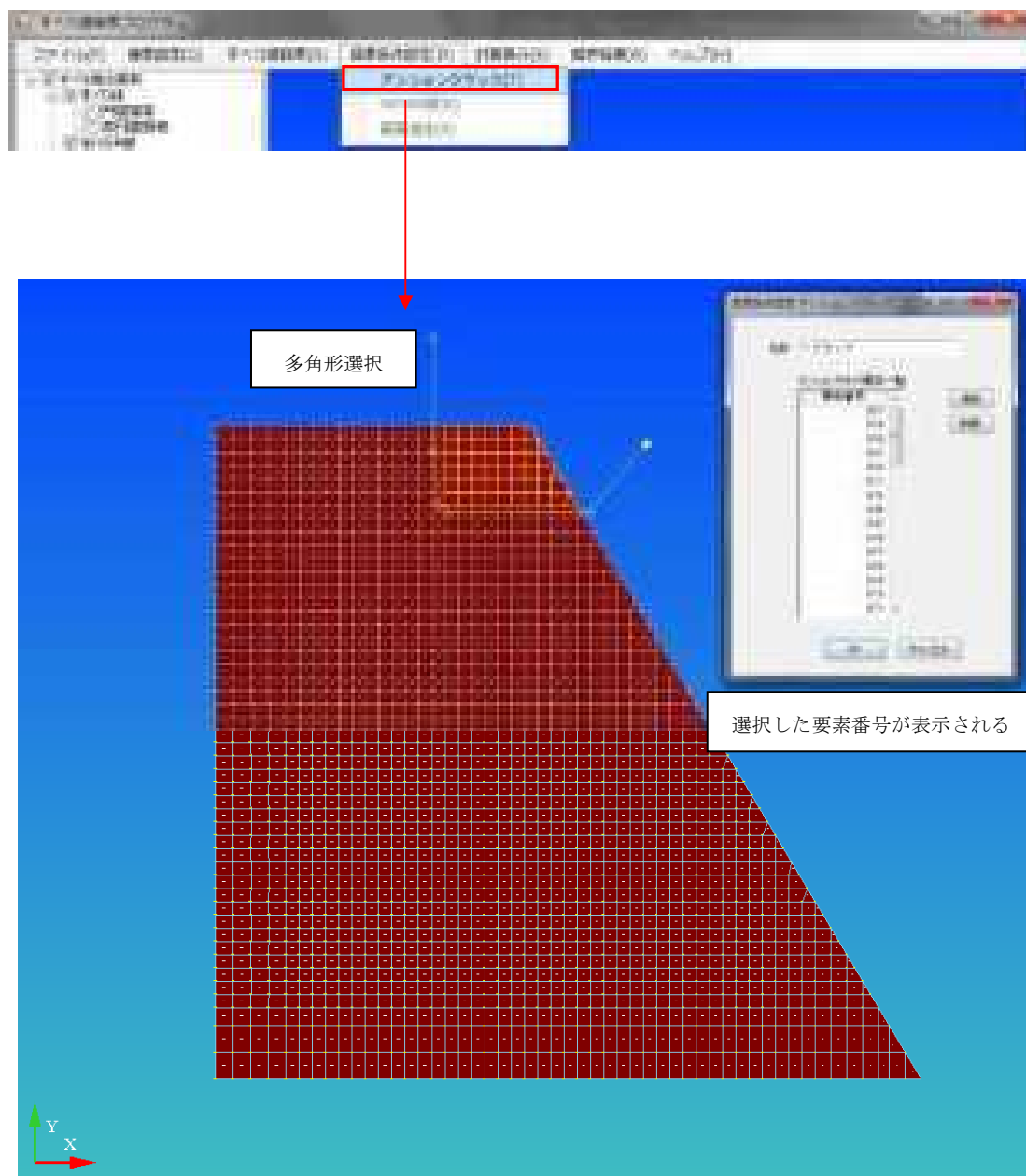


図 11.1.22 テンションクラックの領域選択イメージ図

### (3) 計算実行

計算実行時の設定パラメータは下記の項目となる。

- ・解析結果保存先：解析結果を保存する場所の指定
- ・探索方法：円弧・非円弧探索の選択
- ・テンションクラック：テンションクラックの考慮の有無
- ・Newmark法：Newmark法を用いた残留変位計算の実行の有無
- ・計算範囲ステップ指定：安定解析を実施する計算ステップの指定
- ・変位量算出：等価加速度算出時の設定パラメータ

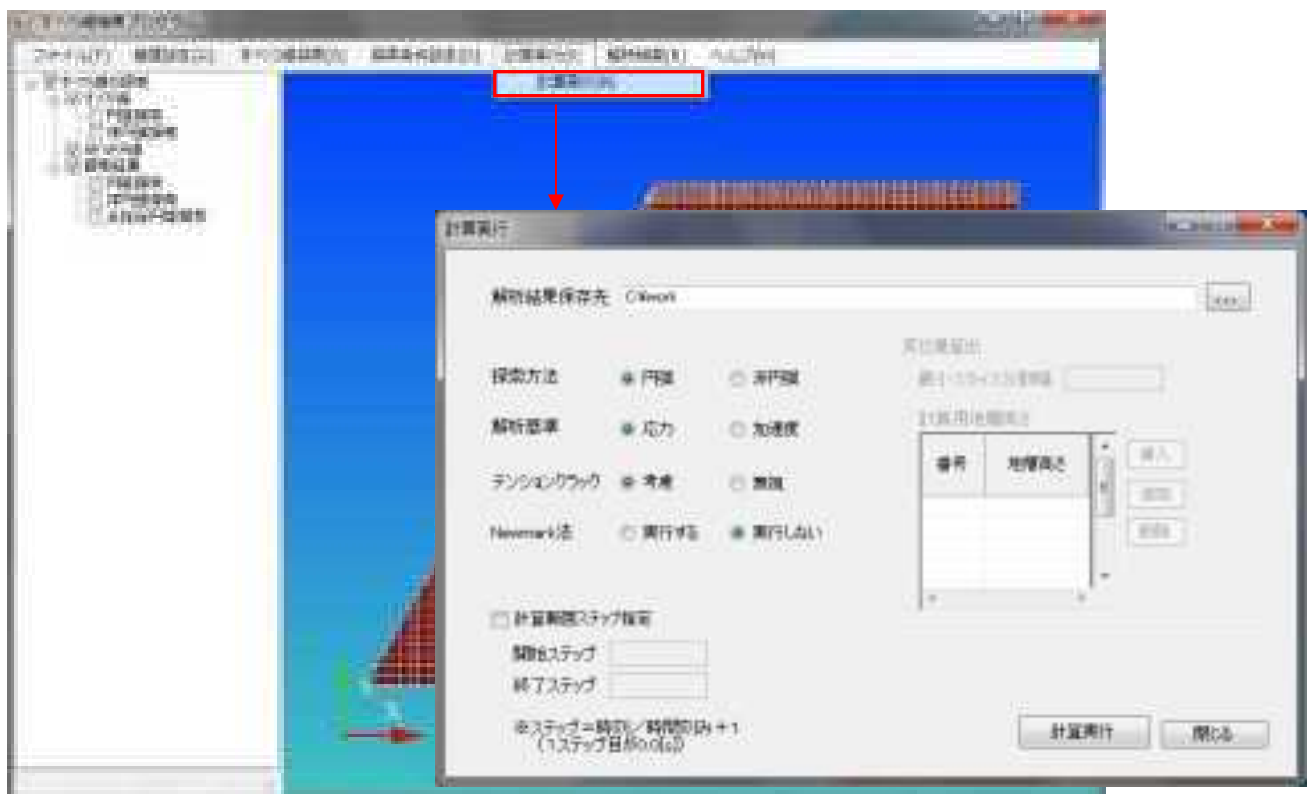


図 11.1.23 計算実行画面

#### (4) 強度設定

強度設定は、解析モデル(dat ファイル)を読み込み以下の項目を表示する。強度設定画面を図 11.1.24 に示す。

- ・材料番号：定義されている材料 ID 番号
- ・ $\sigma_t$ ：引張強度  $\sigma_t$  を入力
- ・ $C, \varphi$ ：ピーク強度  $C$ 、 $\varphi$  を入力
- ・残留強度  $C', \varphi'$ ：残留強度  $C', \varphi'$  を入力

材料番号	引張強度 $\sigma_t$	$C$	$\varphi$	残留強度 $C'$	残留強度 $\varphi'$
材料1	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料2	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料3	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料4	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料5	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料6	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料7	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料8	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料9	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料10	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料11	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料12	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料13	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料14	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料15	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料16	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料17	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料18	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料19	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0
材料20	1.0E+01	1.0E+01	0.0	0.0	0.0

図 11.1.24 強度設定の設定画面

(5) 結果出力

① すべり安全率

最小すべり安全率はその時刻を出力する。出力は下記の2項目に対応した。

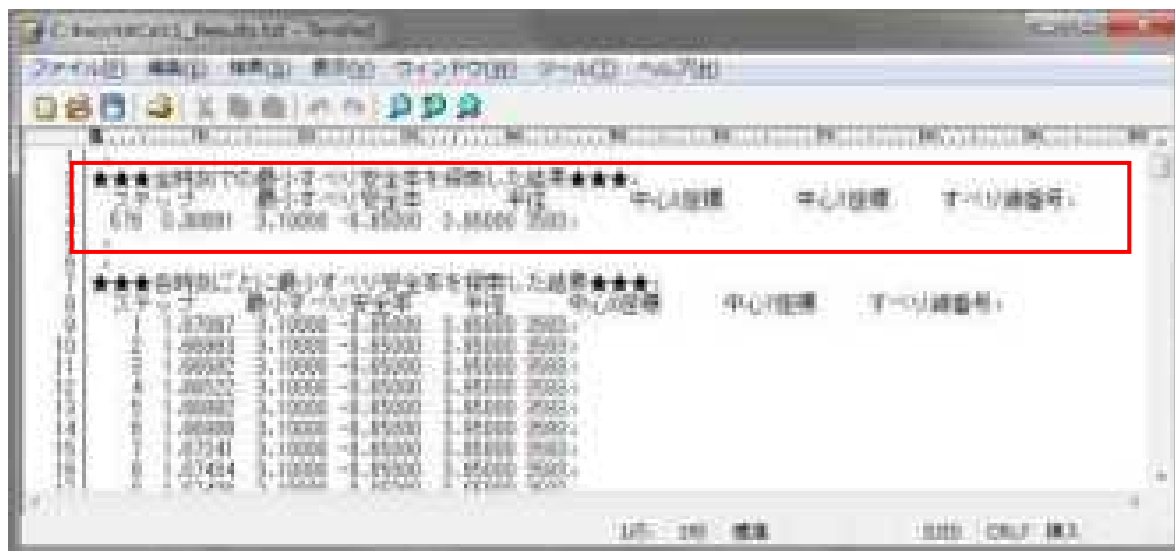
GUIでは安全率が小さい順に10個表示する。

- ・画面表示(図 11.1.25)
- ・テキスト出力(図 11.1.26)



時刻	安全率	すべり面番号
1	0.7000	0.0000
2	0.7000	0.0000
3	0.7000	0.0000
4	0.7000	0.0000
5	0.7000	0.0000
6	0.7000	0.0000
7	0.7000	0.0000
8	0.7000	0.0000
9	0.7000	0.0000
10	0.7000	0.0000

図 11.1.25 最小すべり安全率の表示画面



時刻	最小すべり安全率	平均	中心位置	すべり面番号
1	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000

図 11.1.26 最小すべり安全率のテキスト出力

② すべり安全率時刻歴

・最小すべり安全率の時刻歴図、デジタル値を出力する。出力は下記の2項目に対応した。

- ・画面表示(図 11.1.27)
- ・テキスト出力(図 11.1.28)

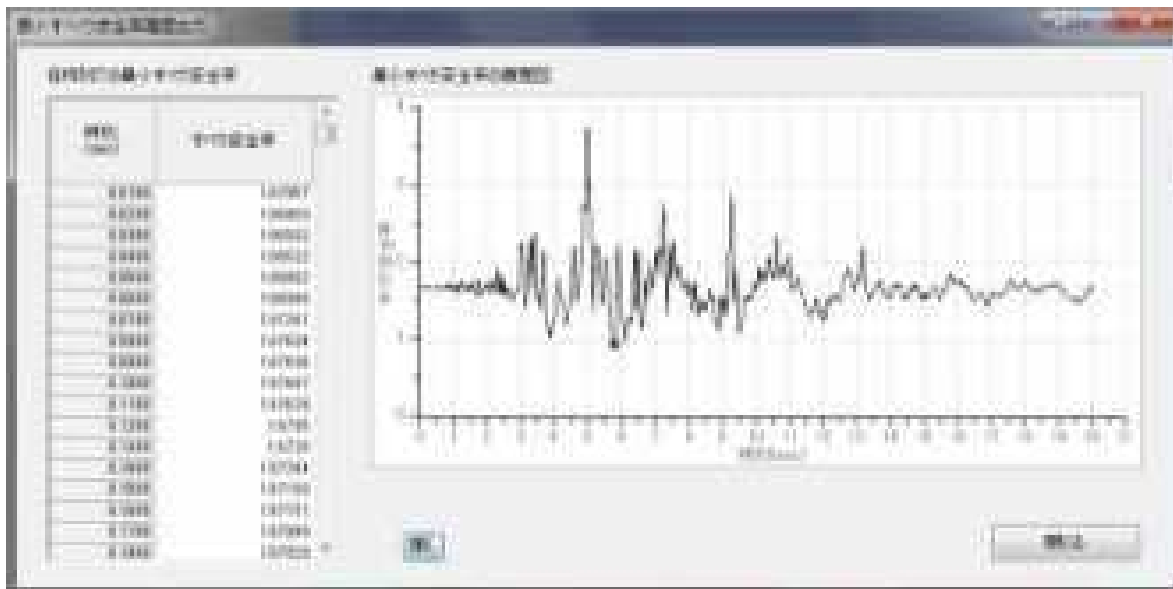


図 11.1.27 すべり安全率履歴の表示イメージ

時刻	最小すべり安全率	平均	中心位置
1	2.7287	3.1000	-0.3713
2	2.8583	3.1000	-0.2417
3	2.9582	3.1000	-0.1418
4	2.9972	3.1000	-0.1028
5	2.9982	3.1000	-0.1018
6	2.9889	3.1000	-0.1111
7	2.7441	3.1000	-0.3559
8	2.7424	3.1000	-0.3576

図 11.1.28 最小すべり安全率履歴のテキスト出力

③ すべり線形状の出力

最小すべり線の図化、すべり線の座標値出力(テキスト出力)に対応した。

すべり線の図化イメージを図 11.1.29、座標値の出力図を図 11.1.30 に示す。

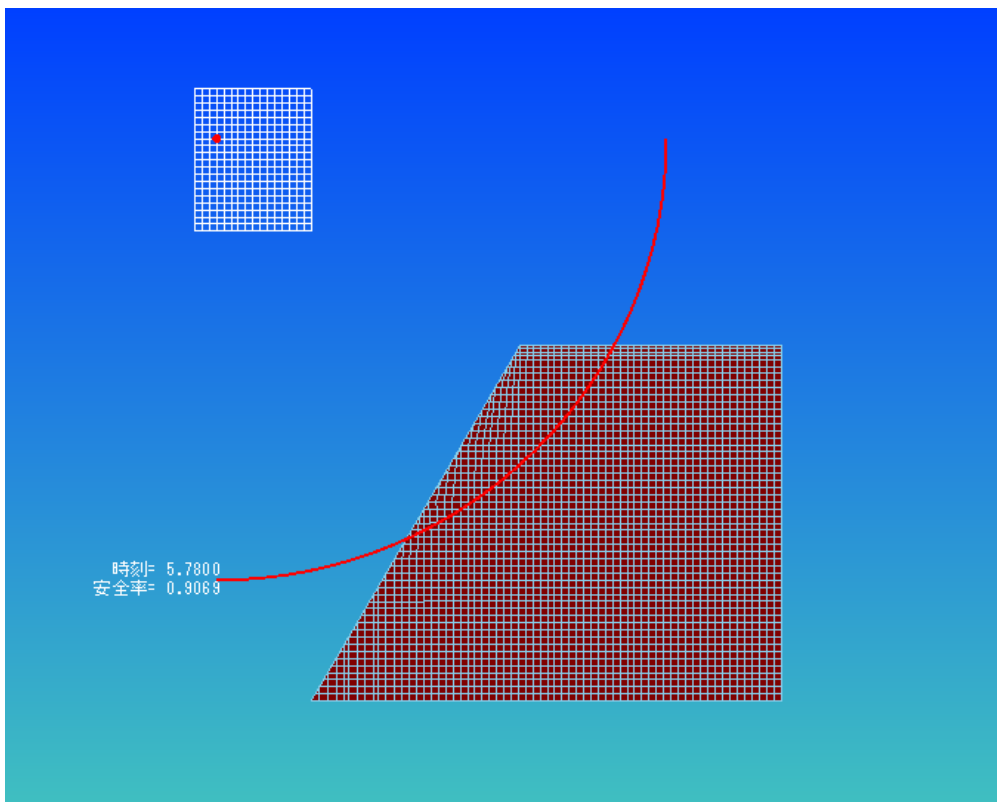


図 11.1.29 すべり線形状の表示イメージ

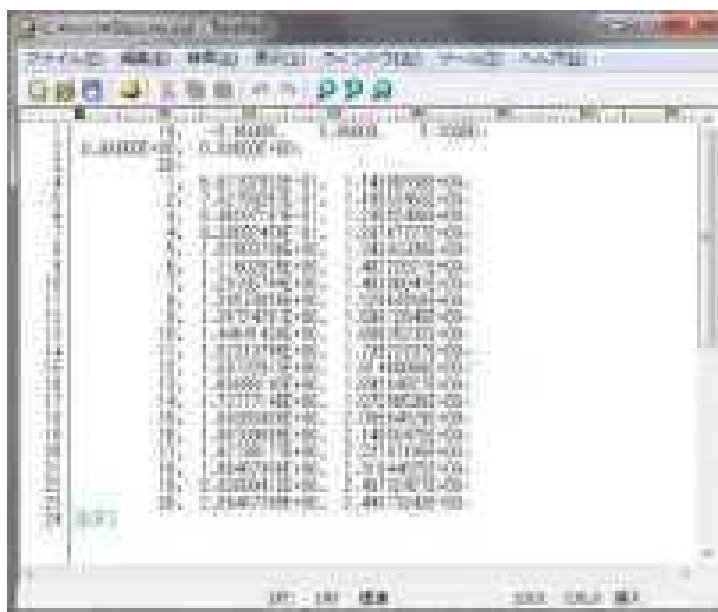


図 11.1.30 すべり線の座標出力

### 11.1.5 加速度履歴を用いた非円弧すべりによる安定計算ツール

非円弧のすべり線探索アルゴリズムにおいては、(PSO法)を用いた。

11.1.3 節同様、安全率の算定には Spencer 法を用いて、一様乱数は超一様分布列とした。

#### (1) 非円弧による探索機能

非円弧の探索パラメータは、下記の項目を設定し探索する。

初期すべり線は、ランダムに 4 点、7 点、13 点～100 点まで自動設定する機能を作成した。

表 11.1.3 非円弧による探索パラメータ

計算条件 入力項目														
スライス数	初期すべり線 節点数	節点数 増加ステップ	入り口 x座標最小値	入り口 x座標最大値	出口 x座標最小値	出口 x座標最大値	安全率 許容誤差	スライス間力 許容誤差	節点速度 許容値	粒子数	打ち切り 回数	慣性 定数	局所解 重み係数	最適解 重み係数

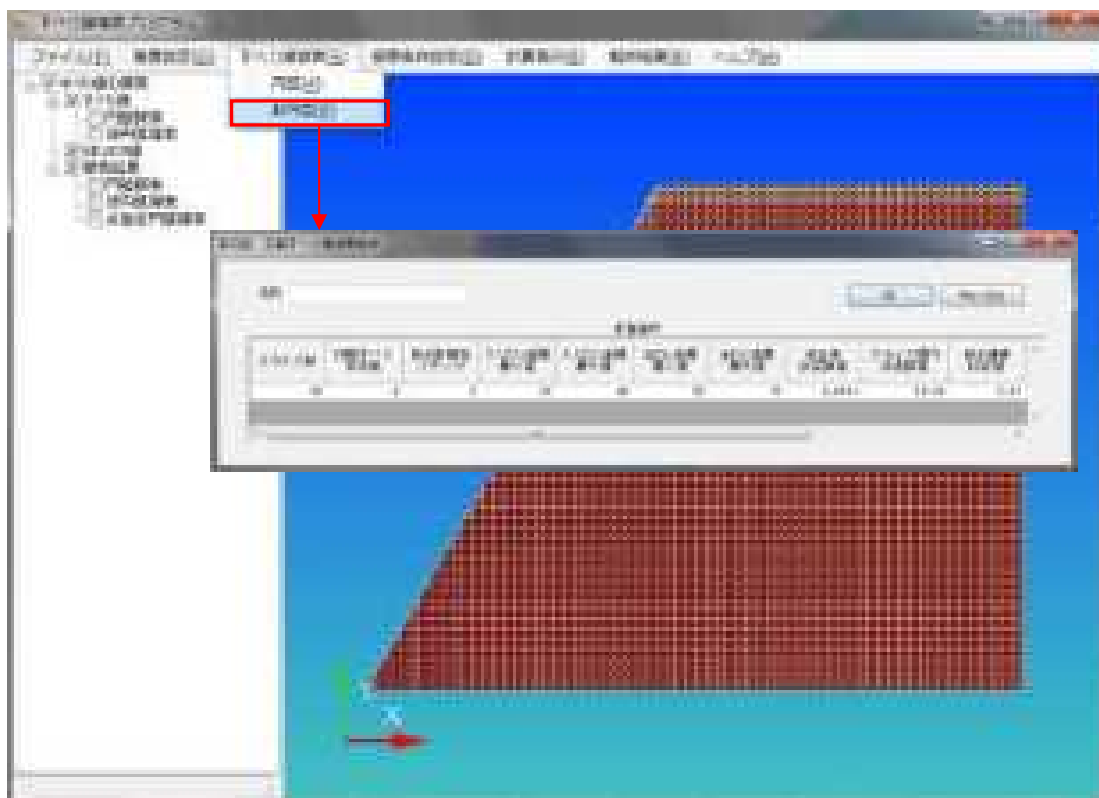


図 11.1.31 非円弧探索の設定画面



## (2) 探索条件設定

### ・テンションクラック設定

テンションクラックの領域指定方法は、多角形による選択で設定する。(図 11.1.32)

抵抗は無視し、その分の土塊重量も安全率の計算に含めない。

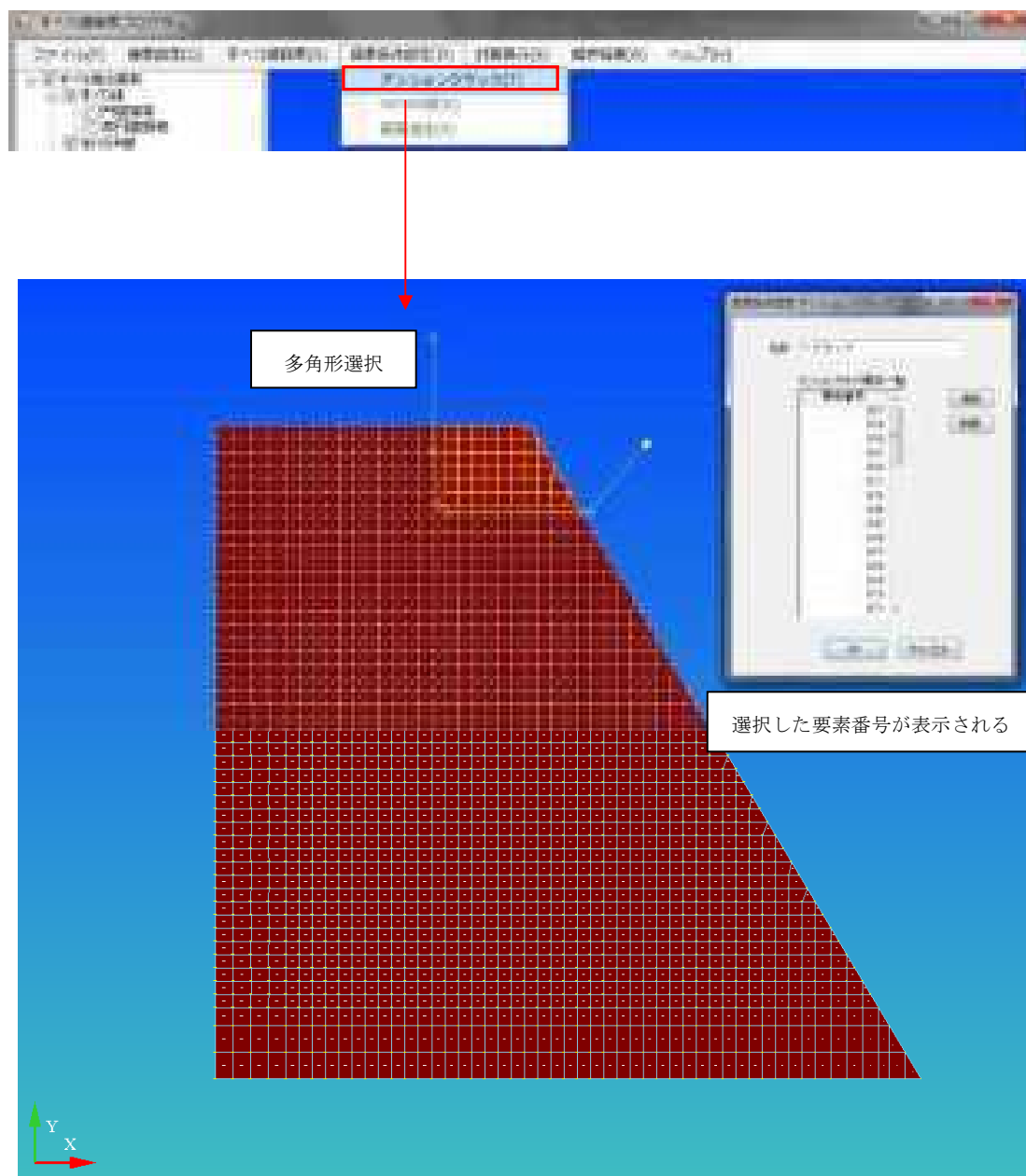


図 11.1.32 テンションクラックの領域選択イメージ図

### (3) 等価加速度の設定

安定計算における加速度は、水平・鉛直両方に対して指定された以下の方法により算出した等価加速度を用いる。

#### ① すべり土塊内の節点抽出

地震応答解析により得られた各節点の応答加速度波形データから、すべり線で設定したすべり土塊内に含まれる節点の応答加速度波形を取り出す。

#### ② 等価加速度の算出

抽出した節点の支配面積を算出し、各応答加速度を、最小スライス幅、計算用の地層高さで設定した領域毎に、各時刻で等価加速度を算出する。

それぞれの領域で算出された等価加速度をさらに平均化し、安定計算に用いる。

図 11.1.33 に算出イメージを示す。

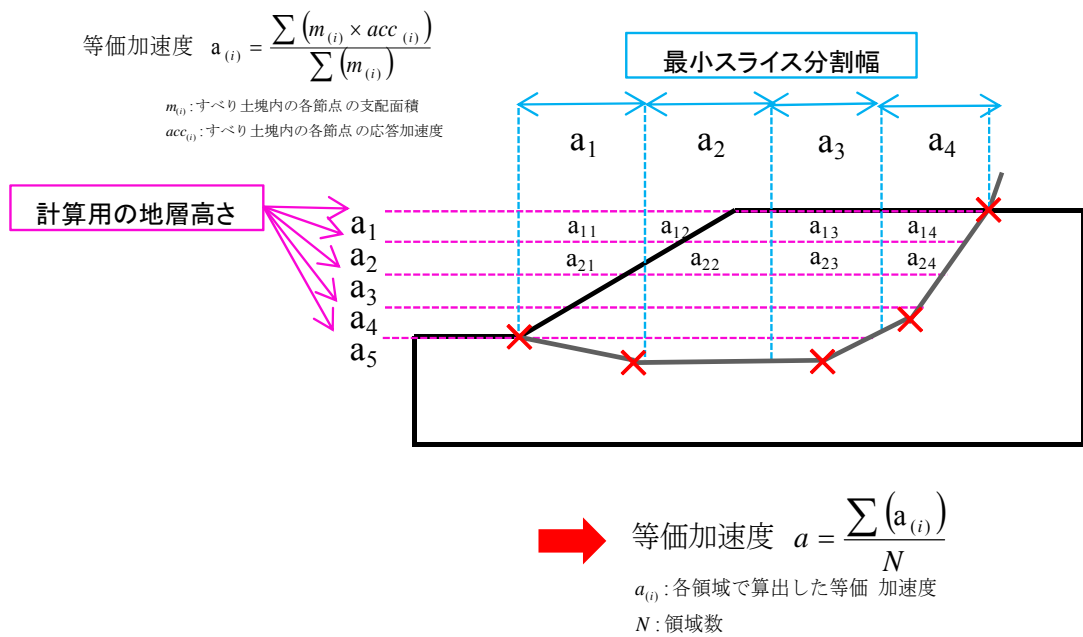


図 11.1.33 安定計算に用いる等価加速度算出のイメージ

#### ③ 等価加速度の算出条件設定

- ・ 最小スライス分割幅  
すべり線(X 軸方向)の分割幅
  
- ・ 計算用の地層高さ  
震度計算の地層高さ

#### (4) 計算実行

計算実行時の設定パラメータは下記の項目となる。

- ・ 解析結果保存先：解析結果を保存する場所の指定
  - ・ 探索方法：円弧・非円弧探索の選択
  - ・ テンションクラック：テンションクラックの考慮の有無
  - ・ Newmark 法：Newmark 法を用いた残留変位計算の実行の有無
- 
- ・ 計算範囲ステップ指定：安定解析を実施する計算ステップの指定
  - ・ 変位量算出：等価加速度算出時の設定パラメータ



図 11.1.34 計算実行画面

### (5) 強度設定

強度設定は、解析モデル(dat ファイル)を読み込み以下の項目を表示する。強度設定画面を図 11.1.35 に示す。

- ・材料番号：定義されている材料 ID 番号
- ・ $\sigma_t$ ：引張強度  $\sigma_t$  を入力
- ・ $C, \varphi$ ：ピーク強度  $C$ 、 $\varphi$  を入力
- ・残留強度  $C', \varphi'$ ：残留強度  $C', \varphi'$  を入力



図 11.1.35 強度設定の設定画面

(6) 結果出力

① すべり安全率

最小すべり安全率はその時刻を出力する。出力は下記の2項目に対応した。

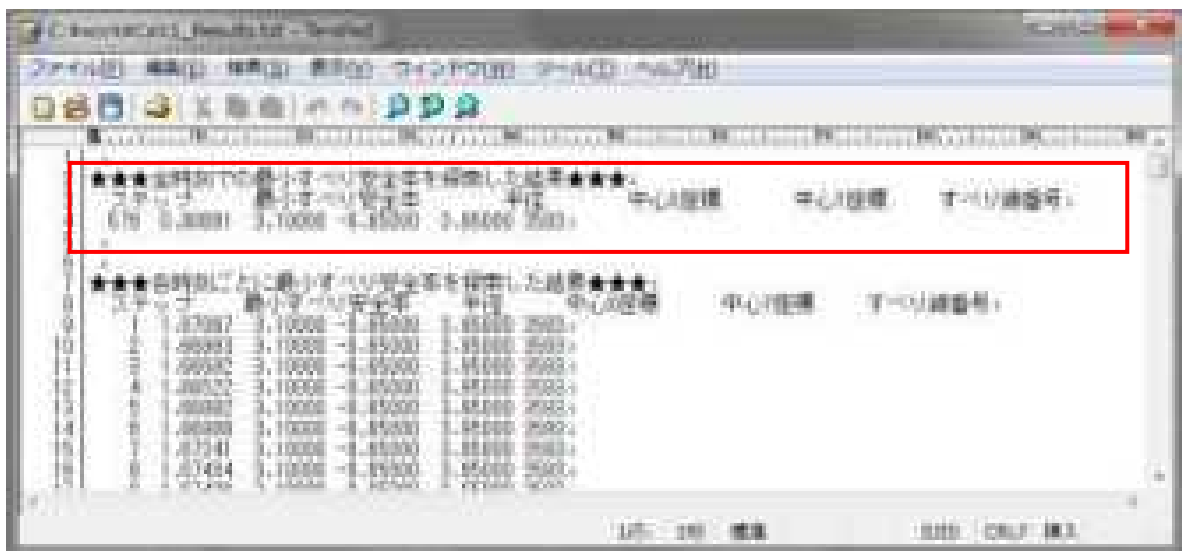
GUIでは安全率が小さい順に10個表示する。

- ・画面表示(図 11.1.36)
- ・テキスト出力(図 11.1.37)



時刻	安全率	すべり面番号
1	0.7000	0.00000
2	0.7000	0.00000
3	0.7000	0.00000
4	0.7000	0.00000
5	0.7000	0.00000
6	0.7000	0.00000
7	0.7000	0.00000
8	0.7000	0.00000
9	0.7000	0.00000
10	0.7000	0.00000

図 11.1.36 最小すべり安全率の表示画面



時刻	安全率	すべり面番号
1	0.7000	0.00000
2	0.7000	0.00000
3	0.7000	0.00000
4	0.7000	0.00000
5	0.7000	0.00000
6	0.7000	0.00000
7	0.7000	0.00000
8	0.7000	0.00000
9	0.7000	0.00000
10	0.7000	0.00000

図 11.1.37 最小すべり安全率のテキスト出力

② すべり安全率時刻歴

・最小すべり安全率の時刻歴図、デジタル値を出力する。出力は下記の2項目に対応した。

- ・画面表示(図 11.1.38)
- ・テキスト出力(図 11.1.39)

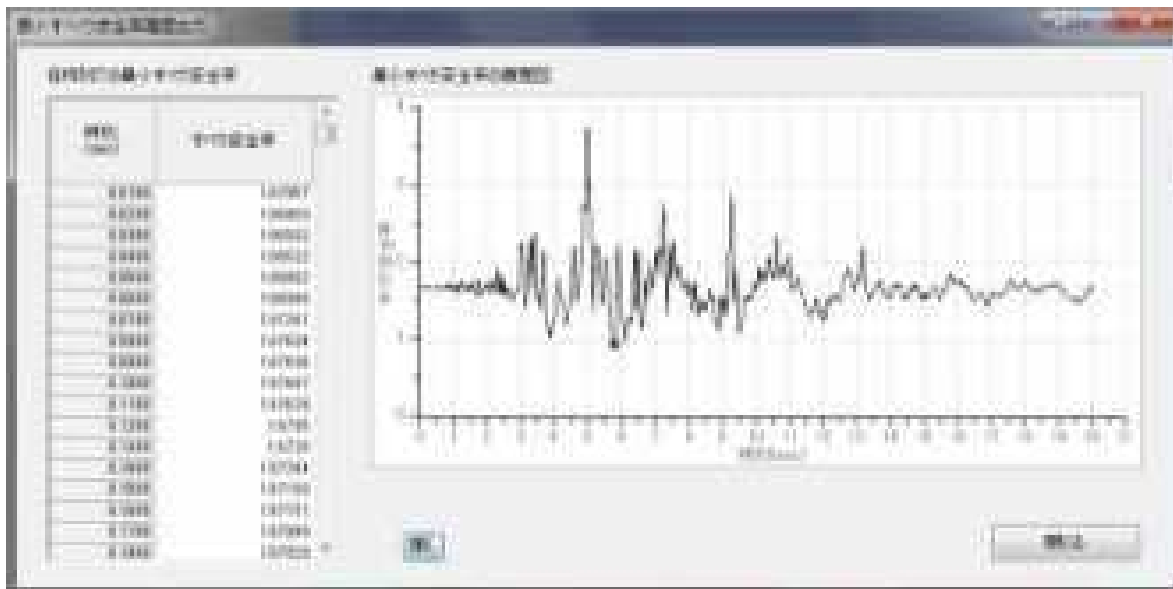


図 11.1.38 すべり安全率履歴の表示イメージ

時刻	最小すべり安全率	平均	中心位置
1	2.7287	3.1000	-0.3713
2	2.8583	3.1000	-0.2417
3	2.9582	3.1000	-0.1418
4	2.9972	3.1000	-0.1028
5	2.9982	3.1000	-0.1018
6	2.9889	3.1000	-0.1111
7	2.7441	3.1000	-0.3559
8	2.7424	3.1000	-0.3576

図 11.1.39 最小すべり安全率履歴のテキスト出力

③ すべり線形状の出力

最小すべり線の図化、すべり線の座標値出力(テキスト出力)に対応した。

すべり線の図化イメージを図 11.1.40、座標値の出力図を図 11.1.41 に示す。

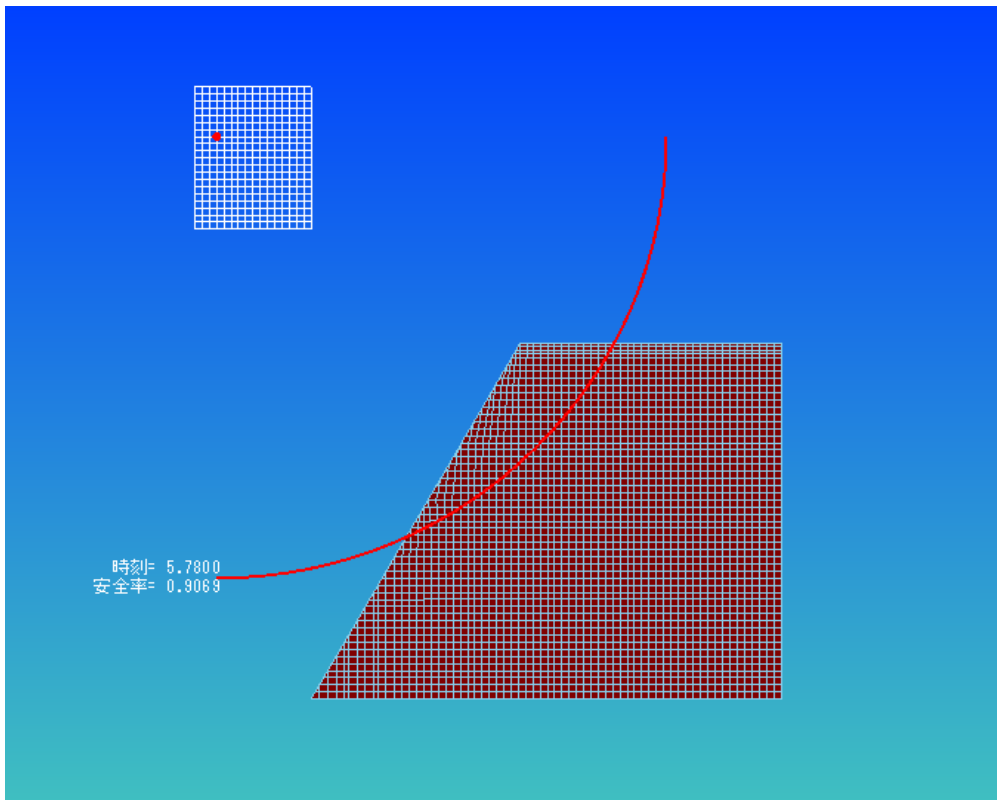


図 11.1.40 すべり線形状の表示イメージ

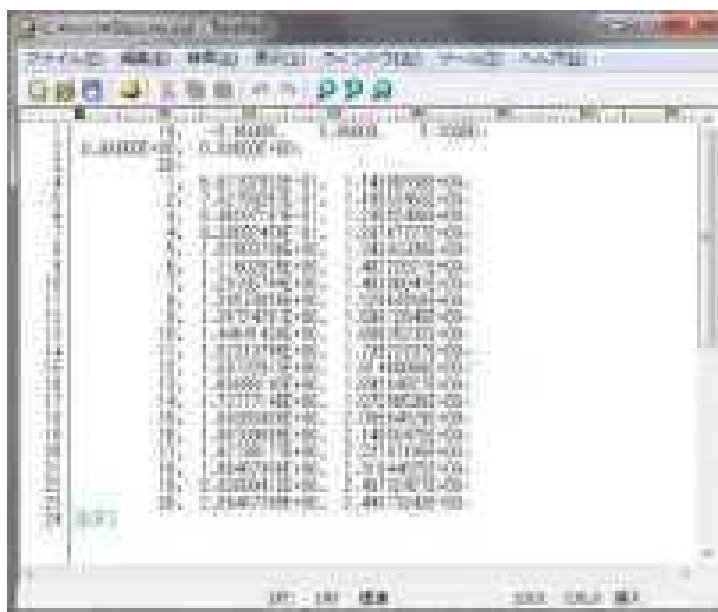


図 11.1.41 すべり線の座標出力

### 11.1.6 応力履歴を用いた非円弧すべりによる安定計算ツール

非円弧のすべり線探索アルゴリズムにおいては、(PSO法)を用いた。

11.1.4 節と同様の方法で安全率は算定した。

#### (1) 非円弧による探索機能

非円弧の探索パラメータは、下記の項目を設定し探索する。

初期すべり線は、ランダムに4点、7点、13点～100点まで自動設定する機能を作成した。

表 11.1.4 非円弧による探索パラメータ

計算条件 入力項目														
スライス数	初期すべり線 節点数	節点数 増加ステップ	入り口 x座標最小値	入り口 x座標最大値	出口 x座標最小値	出口 x座標最大値	安全率 許容誤差	スライス間力 許容誤差	節点速度 許容値	粒子数	打ち切り 回数	慣性 定数	局所解 重み係数	最適解 重み係数

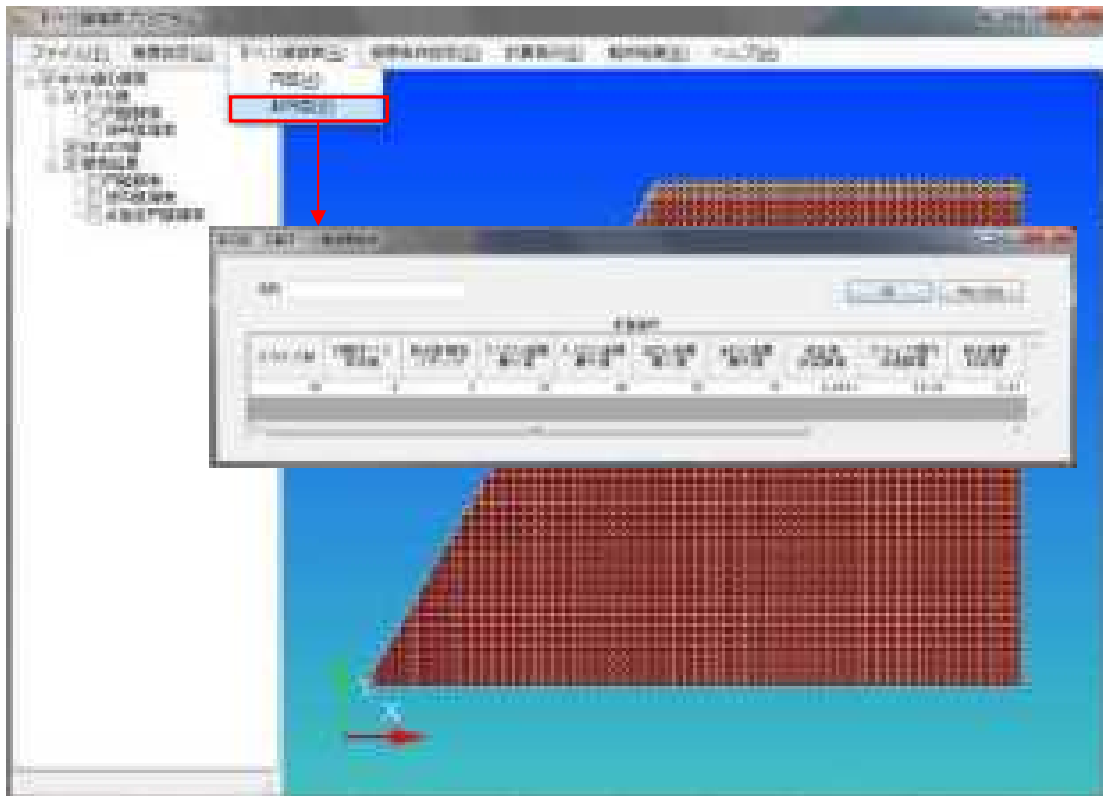


図 11.1.42 非円弧探索の設定画面



## (2) 探索条件設定

### ・テンションクラック設定

テンションクラックの領域指定方法は、多角形による選択で設定する。(図 11.1.43)

抵抗は無視し、その分の土塊重量も安全率の計算に含めない。

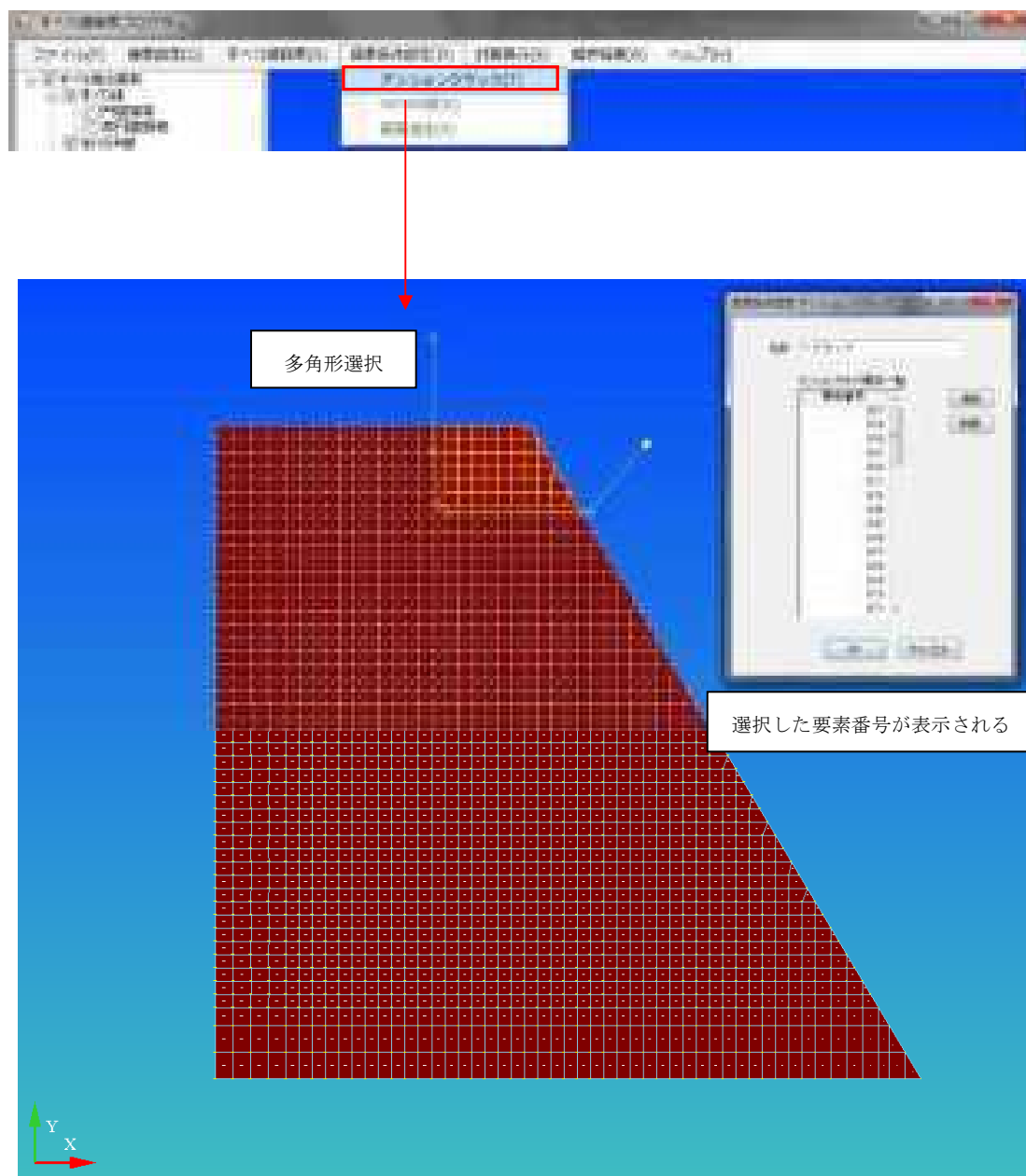


図 11.1.43 テンションクラックの領域選択イメージ図

### (3) 計算実行

計算実行時の設定パラメータは下記の項目となる。

- ・ 解析結果保存先：解析結果を保存する場所の指定
  - ・ 探索方法：円弧・非円弧探索の選択
  - ・ テンションクラック：テンションクラックの考慮の有無
  - ・ Newmark 法：Newmark 法を用いた残留変位計算の実行の有無
- 
- ・ 計算範囲ステップ指定：安定解析を実施する計算ステップの指定
  - ・ 変位量算出：等価加速度算出時の設定パラメータ

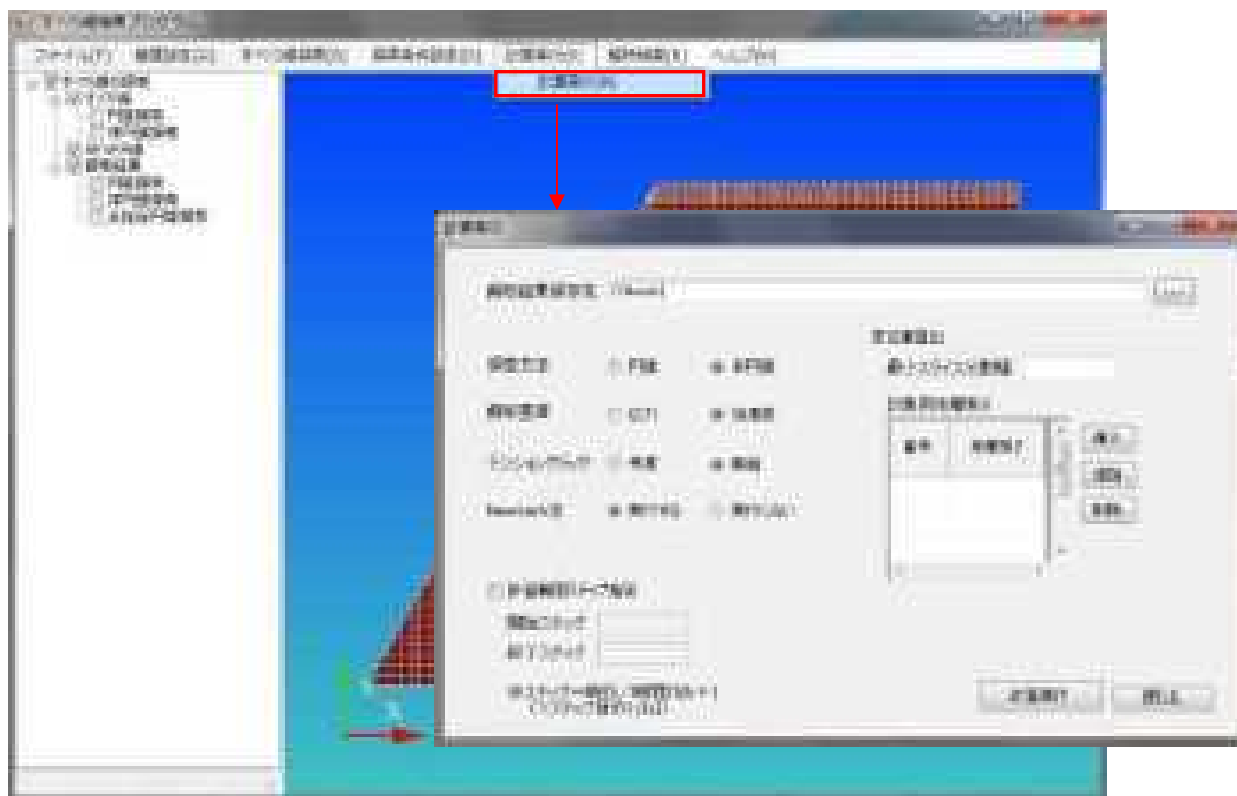


図 11.1.44 計算実行画面

#### (4) 強度設定

強度設定は、解析モデル(dat ファイル)を読み込み以下の項目を表示する。強度設定画面を図 11.1.45 に示す。

- ・材料番号：定義されている材料 ID 番号
- ・ $\sigma_t$ ：引張強度  $\sigma_t$  を入力
- ・ $C, \varphi$ ：ピーク強度  $C$ 、 $\varphi$  を入力
- ・残留強度  $C', \varphi'$ ：残留強度  $C', \varphi'$  を入力

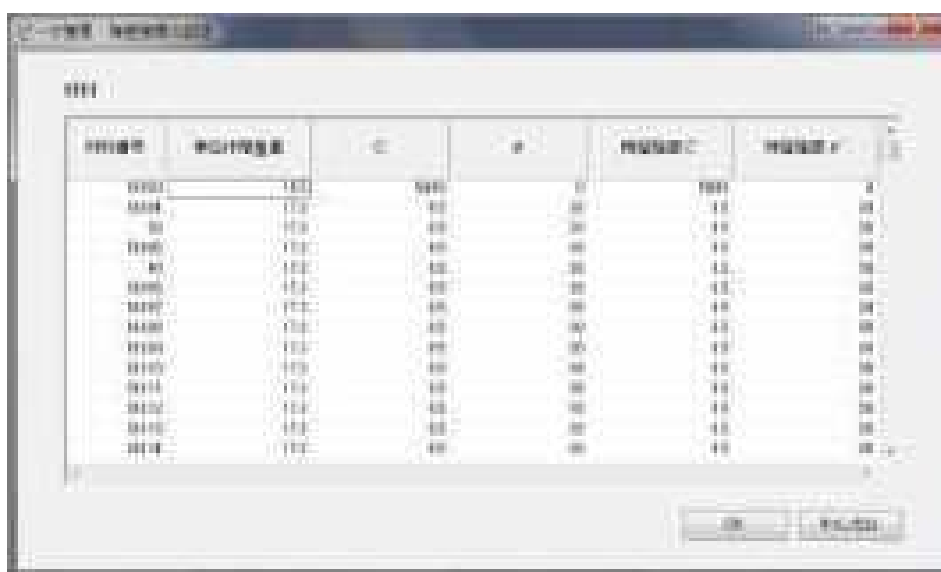


図 11.1.45 強度設定の設定画面

(5) 結果出力

① すべり安全率

最小すべり安全率はその時刻を出力する。出力は下記の 2 項目に対応した。

GUI では安全率が小さい順に 10 個表示する。

- ・画面表示(図 11.1.46)
- ・テキスト出力(図 11.1.47)

ケース	安全率	すべり面番号
1	0.7000	0.00000
2	0.7000	0.00000
3	0.7000	0.00000
4	0.7000	0.00000
5	0.7000	0.00000
6	0.7000	0.00000
7	0.7000	0.00000
8	0.7000	0.00000
9	0.7000	0.00000
10	0.7000	0.00000

図 11.1.46 最小すべり安全率の表示画面

全要素中の最小すべり安全率を求めた結果表					中心座標	すべり面番号
ケース	最小すべり安全率	平均	中心座標	すべり面番号		
1	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.7000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

図 11.1.47 最小すべり安全率のテキスト出力

② すべり安全率時刻歴

・最小すべり安全率の時刻歴図、デジタル値を出力する。出力は下記の2項目に対応した。

- ・画面表示(図 11.1.48)
- ・テキスト出力(図 11.1.49)

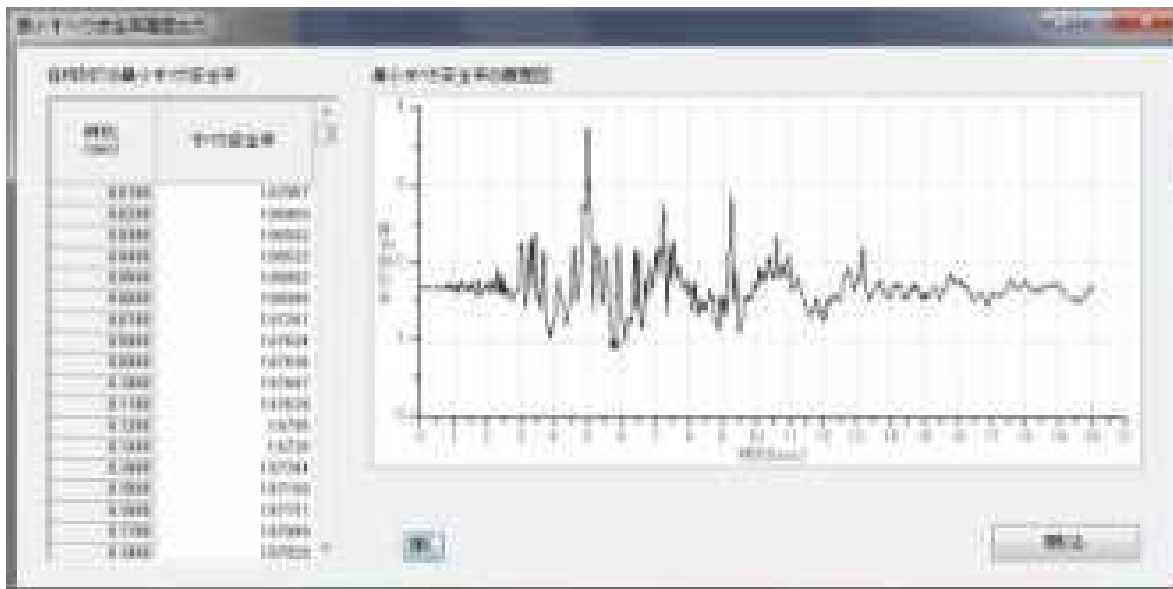


図 11.1.48 すべり安全率履歴の表示イメージ

時刻	最小すべり安全率	中心位置
1	2.7287	3.1000
2	2.8583	3.1000
3	2.9582	3.1000
4	2.9952	3.1000
5	2.9982	3.1000
6	2.9889	3.1000
7	2.7441	3.1000
8	2.7424	3.1000

図 11.1.49 最小すべり安全率履歴のテキスト出力

③ すべり線形状の出力

最小すべり線の図化、すべり線の座標値出力(テキスト出力)に対応した。

すべり線の図化イメージを図 11.1.50、座標値の出力図を図 11.1.51 に示す。

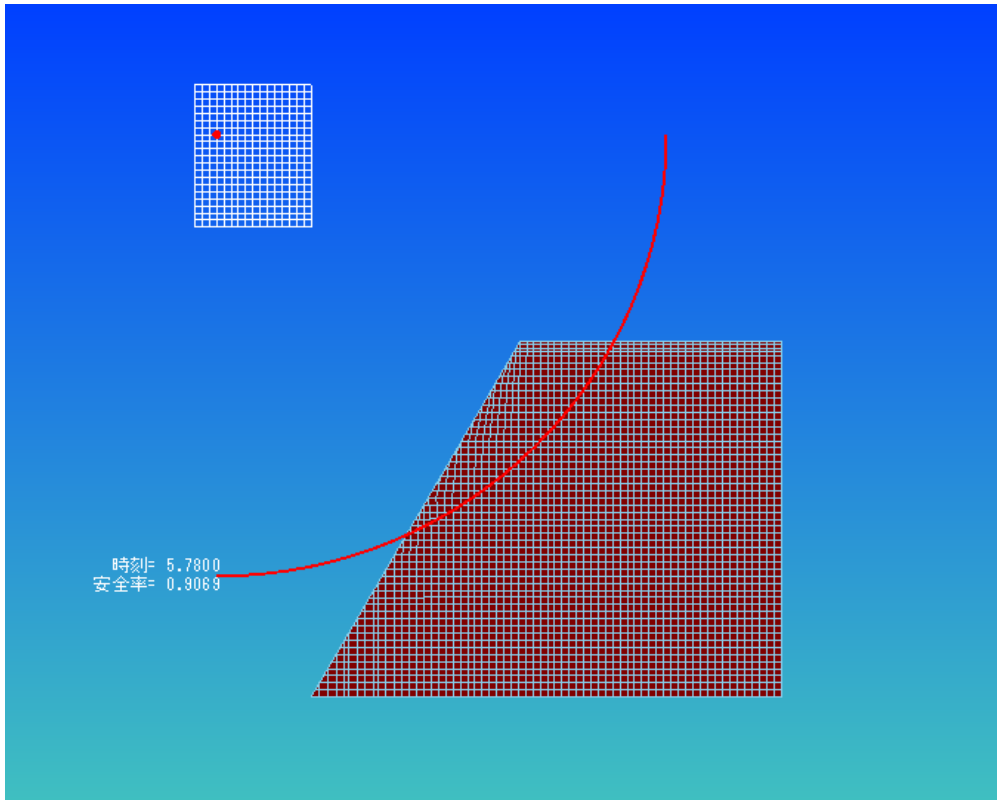


図 11.1.50 すべり線形状の表示イメージ



図 11.1.51 すべり線の座標出力

## 11.1.7 Newmark 法による変位量計算ツールの作成

### (1) 円弧すべり

11.1.3 節および 11.1.4 節から算出される任意の安全率のすべり線および地震応答解析から得られる応答加速度を用いて Newmark 法による変位量を算出可能とした。

計算実行画面で Newmark 法を「実行する」を選択すると、残留変形量を計算する。  
残留変形量の出力は下記の 2 項目に対応した。

- ・画面表示(図 11.1.52、図 11.1.53)
- ・テキスト出力(図 11.1.54)

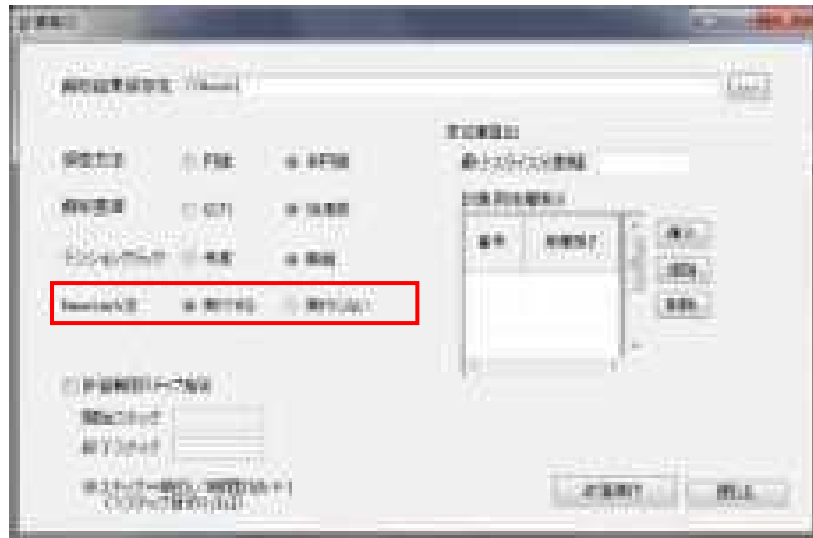


図 11.1.52 計算実行画面





(2) 非円弧すべり

Spencer 法による非円弧のニューマーク法により、非円弧すべり線に対する変位量を算出可能とした。

計算実行画面で Newmark 法を「実行する」を選択すると、残留変形量を計算する。  
残留変形量の出力は下記の 2 項目に対応した。

- ・画面表示(図 11.1.55、図 11.1.56)
- ・テキスト出力(図 11.1.57)

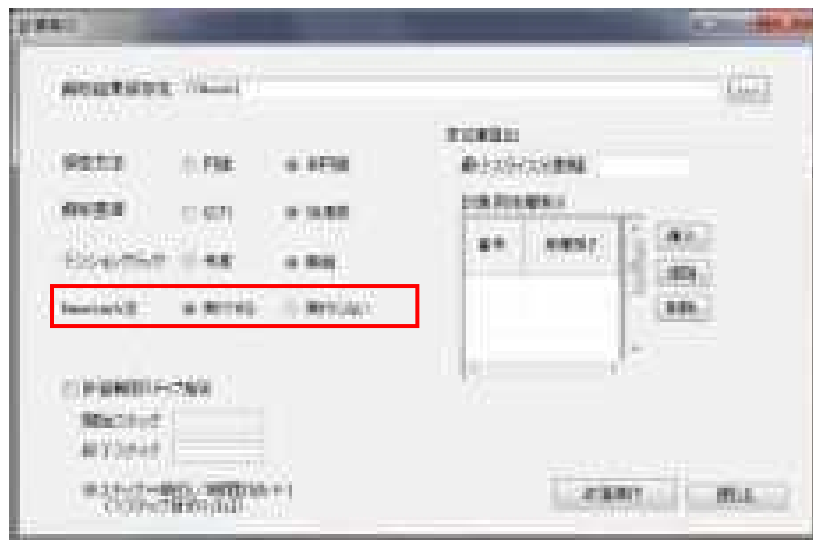


図 11.1.55 計算実行画面



## 11.2 FEM 解析による斜面の応答の評価

### 11.2.1 解析条件

#### (1) 逐次非線形動的解析

##### ① Case19

- 境界条件：底面 固定  
基盤層側面 鉛直ローラー
- 継続時間：20sec( $\Delta T=0.02$ )

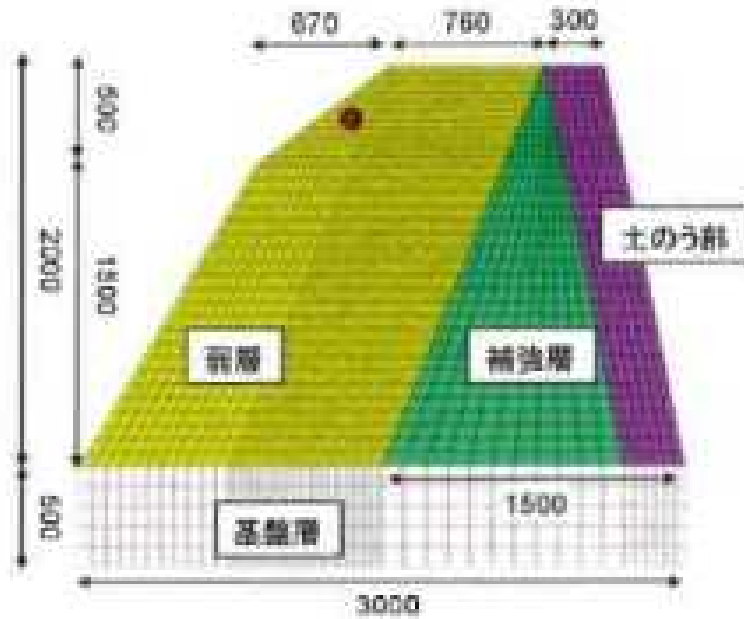


図 11.2.1 中型1層斜面 (Case19) モデル図

表 11.2.1 中型1層斜面 (Case19) 物性値

地層	土質	ポアソン比 $\nu_d$ (-)	ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G0 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 Vs (m/s)	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
1	弱層	0.333	84562	31719	17.3	134	8.5	38.0
2	弱層(補強)	0.333	84562	31719	17.3	134	17.0	57.4
3	土のう	0.333	84562	31719	17.3	134	17.0	57.4
4	基盤	0.333	2507060	940383	18.5	706	280.5	57.3

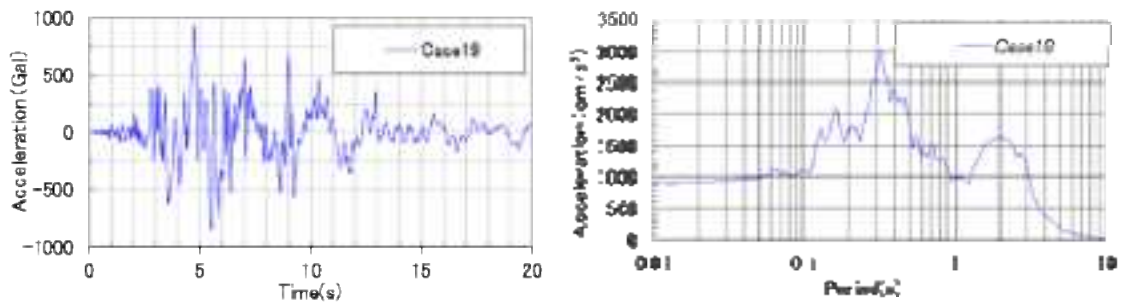


図 11.2.2 中型1層斜面 (Case19) 入力波形図及び加速度応答スペクトル(h=5%)

GHE-S 設定資料

TITLE		斜面地帯別 9999A					
基本物性値 $\gamma$ 17.3 (kN/m <sup>3</sup> ) $\gamma_{sat}$ 20.00 (kN/m <sup>3</sup> ) $c_{max}$ 0.18 $v_d$ 0.2308				基底土の土力 $\sigma_{v0}$ 25.0 (kN/m <sup>2</sup> ) $\gamma_{sat}$ 20.0 (kN/m <sup>3</sup> ) $\phi$ 35.0 (°) $c_{max}$ 24.0 (kN/m <sup>2</sup> )		GHE-Sパラメータ $C(0)$ 1.0 $C(1)$ 0.80 $C(2)$ 0.30 $C(3)$ 1.00 $\beta$ 1.8 $\beta \times \beta \neq 0$	
等価 減衰比 $k$		等価 せん断力 $G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )		せん断力 係数 $\gamma$		せん断力 係数 $\gamma$	

No.	せん断 力係数 $\gamma$	$G/G_0$	等価 減衰比 $k$	せん 断力 係数 $\gamma$	$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma/c$	$c_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	せん 断力 係数 $\gamma$	$\gamma/\gamma_r$	$c/c_{max}$
1	8.20E-6	1.808	0.030	0.00E+0	20.00	20.00	0.26	3.4E-05	16.31	0.01E-4	1.48E-2	0.035
2	1.11E-5	0.963	0.031	0.00E+0	20.00	20.00	0.33	3.5E-05	16.31	0.01E-4	1.60E-2	0.036
3	2.13E-5	0.306	0.031	0.00E+0	20.00	20.00	0.50	3.8E-05	16.31	0.01E-4	2.00E-2	0.034
4	3.31E-5	0.047	0.029	0.00E+0	20.00	20.00	0.82	4.1E-05	16.31	0.01E-4	3.00E-2	0.030
5	4.60E-5	0.008	0.027	0.00E+0	20.00	20.00	1.06	4.30E-05	16.31	0.01E-4	4.00E-2	0.034
6	7.24E-5	0.736	0.021	0.00E+0	20.00	20.00	1.95	4.7E-05	16.31	0.01E-4	7.00E-2	0.035
7	1.01E-4	0.005	0.021	0.00E+0	20.00	20.00	2.95	4.8E-05	16.31	0.01E-4	1.01E-1	0.035
8	1.31E-4	0.003	0.014	0.00E+0	20.00	20.00	4.02	5.1E-05	16.31	0.01E-4	1.31E-1	0.037
9	1.74E-4	0.003	0.017	0.00E+0	20.00	20.00	5.06	5.7E-05	16.31	0.01E-4	1.74E-1	0.037
10	2.10E-4	0.001	0.023	0.00E+0	20.00	20.00	6.50	6.1E-05	16.31	0.01E-4	2.10E-1	0.036
11	2.74E-4	0.003	0.027	2.00E-4	20.00	16.73	4.04	6.8E-05	16.31	0.01E-4	4.00E-1	0.038
12	3.40E-4	0.004	0.022	0.00E+0	20.00	13.17	4.92	7.6E-05	16.31	0.01E-4	6.11E-1	0.037
13	4.30E-4	0.006	0.005	0.00E+0	20.00	1.00	9.08	8.7E-05	16.31	0.01E-4	7.70E-1	0.036
14	5.50E-4	0.015	0.007	0.00E+0	20.00	0.27	1.00	1.00E-04	16.31	0.01E-4	1.01E+0	0.037
15	8.57E-4	0.041	0.194	0.00E+0	20.00	78.3	0.01	1.4E-04	16.31	0.01E-4	1.50E+0	0.036
16	0.0010054	0.13736	0.1541155	0.00E+0	20.00	3007	0.00	2.5E-04	16.31	0.01E-4	2.00E+0	0.036

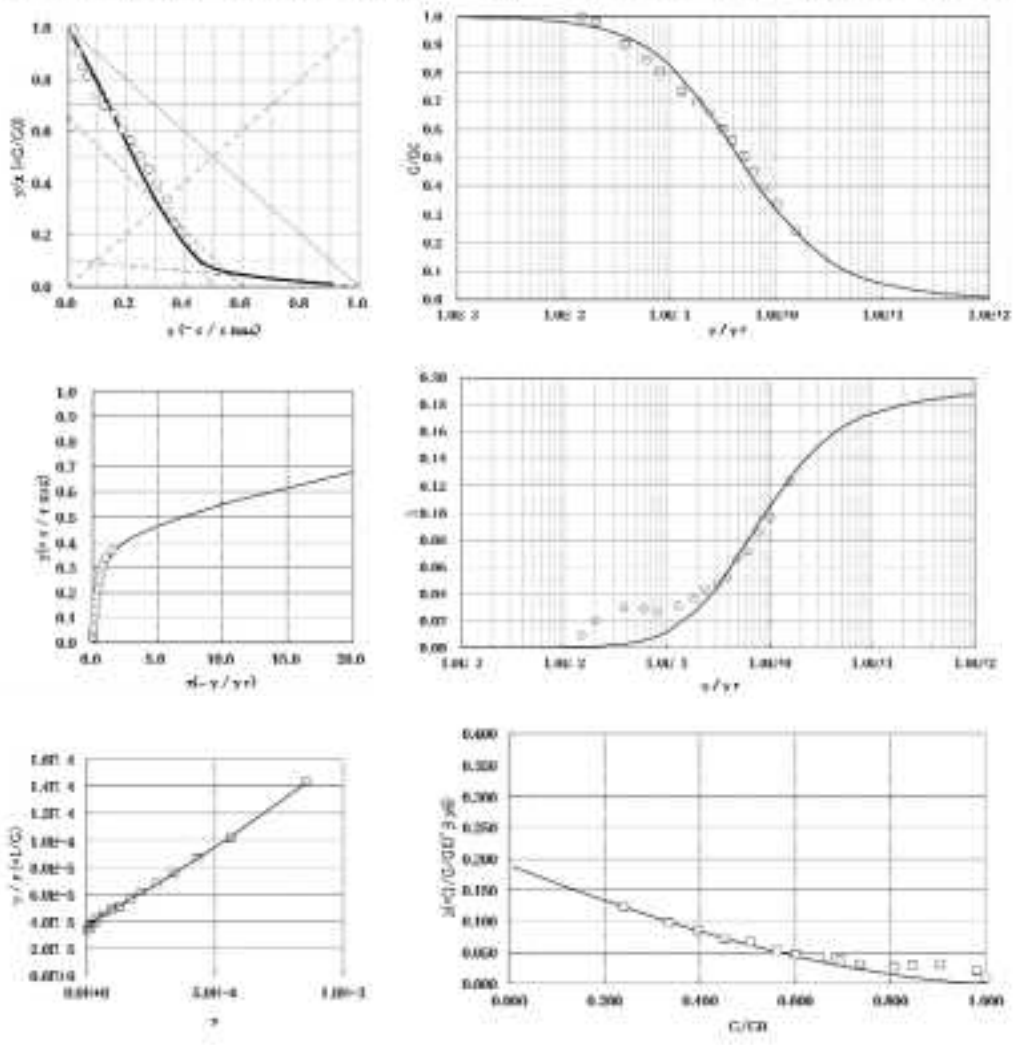


図 11.2.3 中型 1 層斜面 (Case19) GHE-S パラメータの設定

② Case20

- 境界条件：底面 固定  
基盤層側面 鉛直ローラー
- 継続時間：20sec( $\Delta T=0.04$ )

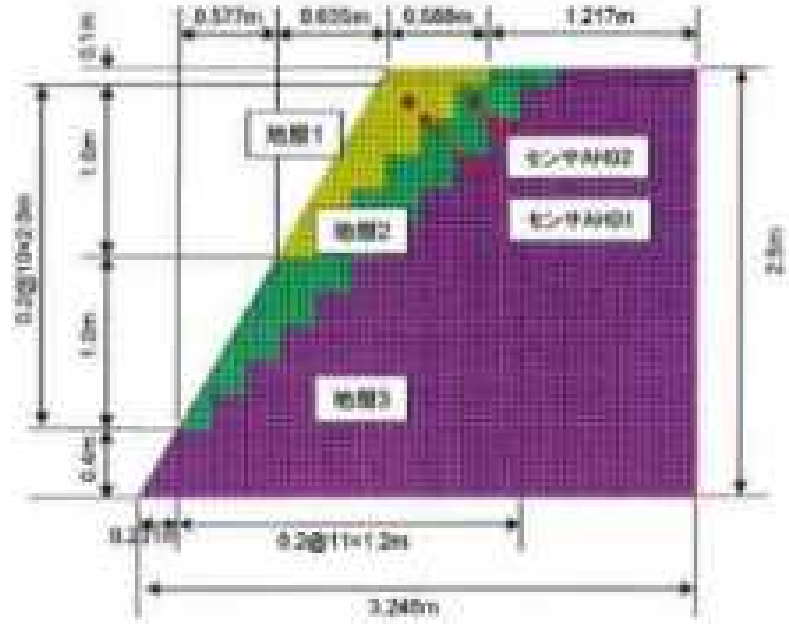


図 11.2.4 中型3層斜面 (Case20) モデル図

表 11.2.2 中型3層斜面 (Case20) 物性値

地層	土質	ポアソン比 $\nu_d$ (-)	ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G0 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 Vs (m/s)	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
1	表層	0.321	82583	31258	29.4	102	107.4	0.0
2	弱層	0.333	84562	31719	17.3	134	8.5	38.0
3	基盤	0.333	2507060	940383	18.5	706	280.5	57.3

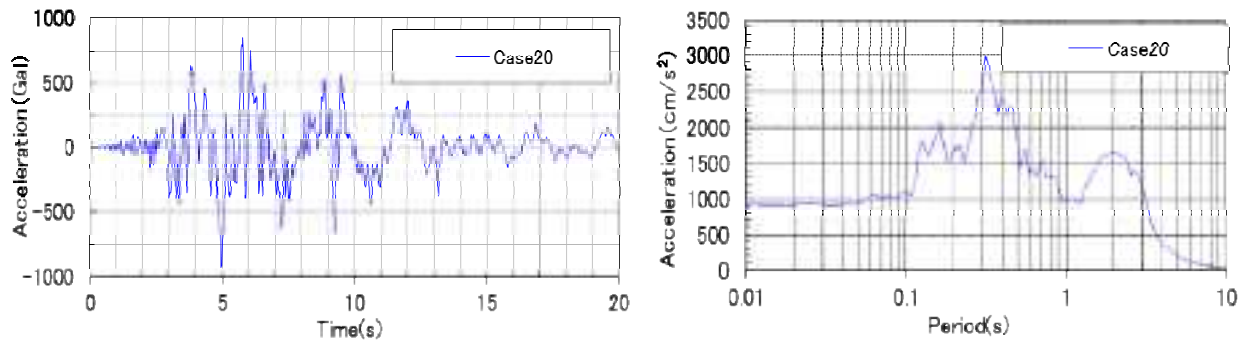


図 11.2.5 中型3層斜面 (Case20) 入力波形図及び加速度応答スペクトル(h=5%)

GHE-S 設定資料

TITLE 斜面安定解析 盛土A

■基本物性値		■Mohr-Coulombの破壊基準より		■GHEパラメータ	
$\gamma$	17.3 (kN/m <sup>3</sup> )	有効土圧止力 $\sigma_v'$	15.0 (kN/m <sup>2</sup> )	C1(0)	0.50 $\alpha$
$V_u$	( $\alpha/\mu$ )	$\sin\phi$	0.85 (kN/m <sup>2</sup> )	C2(0)	0.50 $\beta$
Coax	291.00 (kN/m <sup>2</sup> )	C	8.5 (kN/m <sup>2</sup> )	C1( $\infty$ )	0.10 C1(L)
hmax	0.19	$\phi$	38.0 (°)	C2( $\infty$ )	0.50 C2(L)
v d	0.3300	$\tau$ max	14.2 (kN/m <sup>2</sup> )	$\beta$ I ( $\beta$ p0)	1.6

No.	せん断ひずみ 深層 $\gamma$	$C/C_0$	等価減衰比 $h$	50% ひずみ	$C_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$C$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma/c$	$c$ max (kN/m <sup>2</sup> )	基準ひずみ $\gamma_c$	$\gamma/\gamma_c$	$c/c$ max
1	8.20E-6	1.000	0.010	0.00E+0	291.00	291.00	0.21	3.4E-06	16.31	6.01E-4	1.40E-2	0.016
2	1.11E-5	0.982	0.021	0.00E+0	291.00	29576	0.32	3.6E-06	16.31	6.61E-4	1.98E-2	0.019
3	2.13E-5	0.905	0.031	0.00E+0	291.00	95344	0.56	3.8E-06	16.31	6.61E-4	3.80E-2	0.034
4	3.31E-5	0.847	0.029	0.00E+0	291.00	24637	0.82	4.1E-06	16.31	6.61E-4	5.90E-2	0.050
5	4.48E-5	0.806	0.027	0.00E+0	291.00	23462	1.06	4.3E-06	16.31	6.61E-4	7.99E-2	0.064
6	7.24E-5	0.736	0.031	0.00E+0	291.00	21421	1.55	4.7E-06	16.31	6.61E-4	1.29E-1	0.095
7	1.01E-4	0.696	0.037	0.00E+0	291.00	20214	2.06	4.9E-06	16.31	6.61E-4	1.81E-1	0.126
8	1.31E-4	0.688	0.044	0.00E+0	291.00	19432	2.85	5.1E-06	16.31	6.61E-4	2.34E-1	0.157
9	1.74E-4	0.602	0.047	0.00E+0	291.00	17606	3.06	6.7E-06	16.31	6.61E-4	3.10E-1	0.187
10	2.10E-4	0.581	0.063	0.00E+0	291.00	16329	3.63	6.1E-06	16.31	6.01E-4	3.85E-1	0.216
11	2.74E-4	0.506	0.067	2.82E-4	291.00	14737	4.04	6.8E-06	16.31	6.61E-4	4.89E-1	0.248
12	3.43E-4	0.454	0.072	0.00E+0	291.00	13197	4.52	7.6E-06	16.31	6.61E-4	6.11E-1	0.277
13	4.34E-4	0.396	0.086	0.00E+0	291.00	11609	5.00	8.7E-06	16.31	6.61E-4	7.75E-1	0.306
14	6.66E-4	0.326	0.097	0.00E+0	291.00	9747	6.60	1.0E-05	16.31	6.61E-4	1.01E+0	0.337
15	8.57E-4	0.241	0.124	0.00E+0	291.00	7013	6.01	1.4E-05	16.31	6.61E-4	1.53E+0	0.368
16	0.0016264	0.13736	0.1541156	0.00E+0	291.00	3997	6.60	2.5E-05	16.31	6.61E-4	2.80E+0	0.398

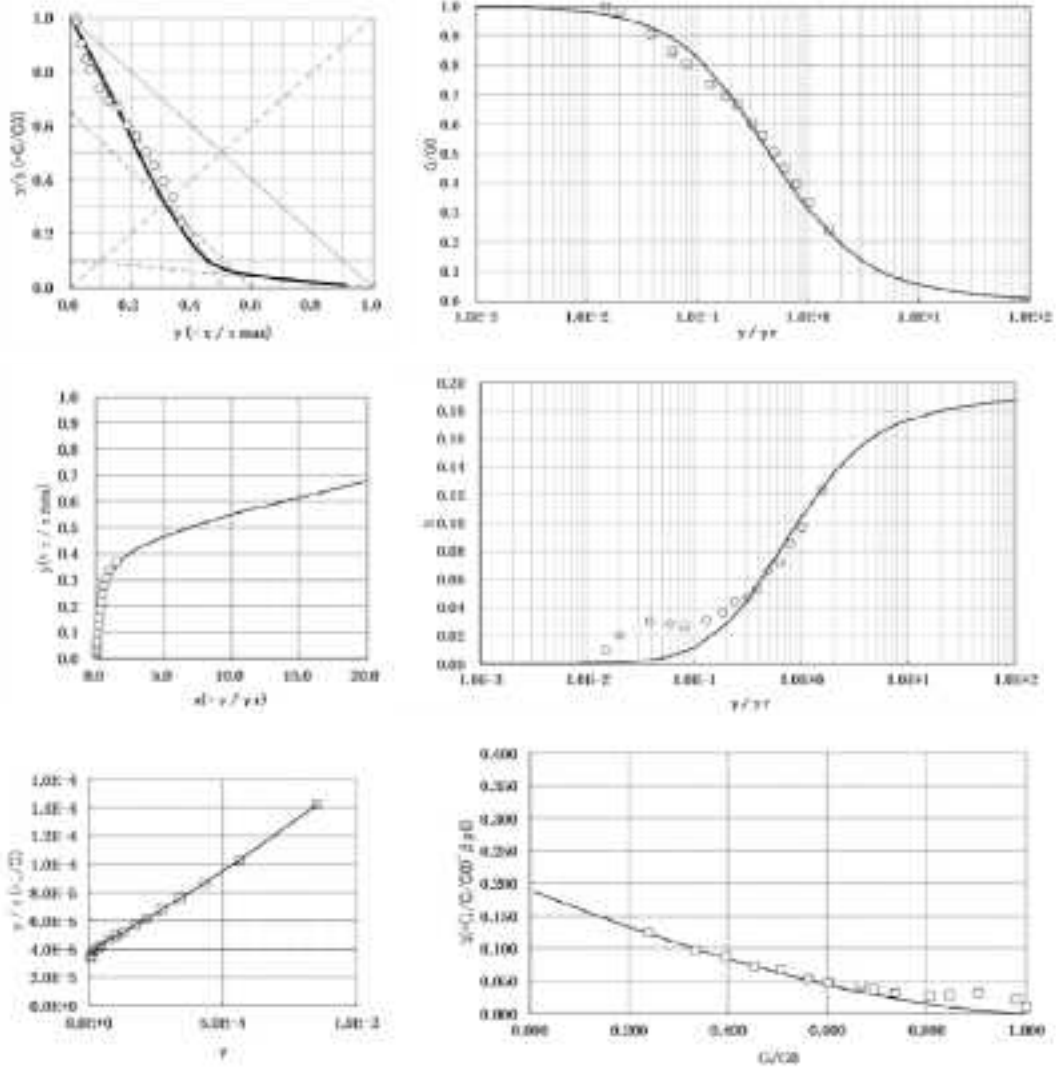


図 11.2.6 中型3層斜面 (Case20) GHE-S パラメータの設定

③ Case21

(3) 大型1層斜面 (Case21)

- ・境界条件：底面 固定  
基盤層側面 鉛直ローラー
- ・継続時間：25sec( $\Delta T=0.04$ )

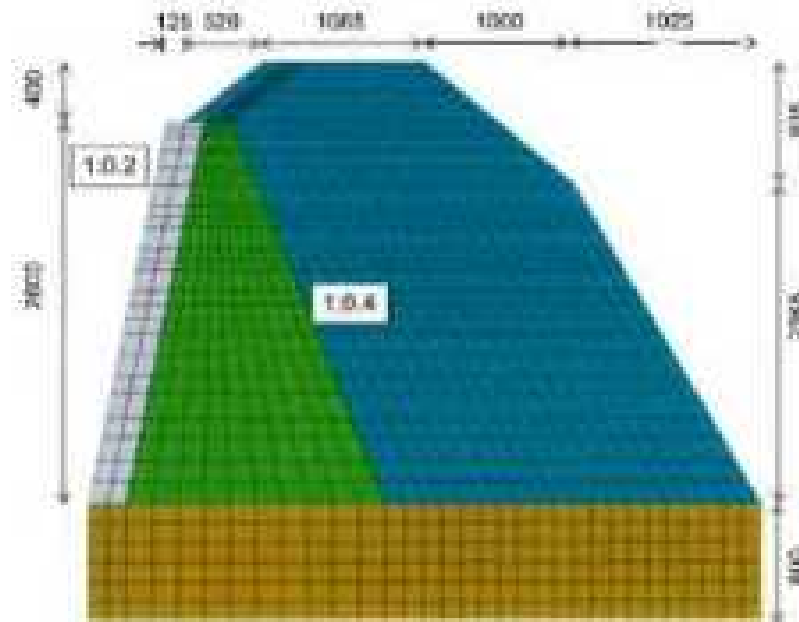
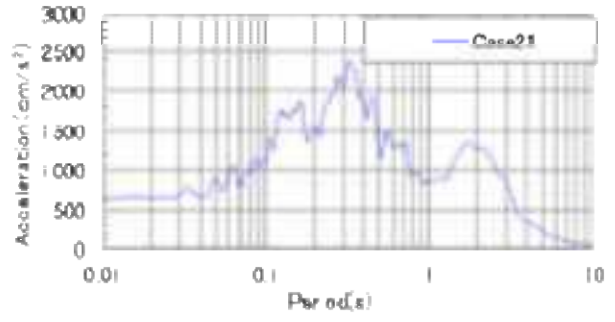
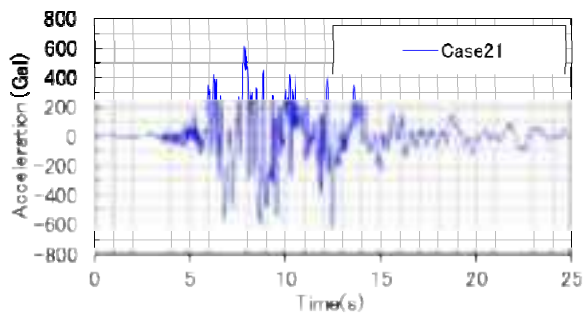


図 11.2.7 大型1層斜面 (Case21) モデル図

表 11.2.3 大型1層斜面 (Case21) 物性値

地層	土質	ポアソン比 $\nu_d$ (-)	ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G0 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 Vs (m/s)	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
1	弱層	0.333	76794	28805	16.3	132	12.9	24.6
2	弱層(補強)	0.333	94200	35334	16.3	146	17.6	19.4
3	土のう	0.333	107853	40455	17.3	151	8.5	38.0
4	基盤	0.333	2507060	940383	18.5	706	280.5	57.3

・水平方向



・鉛直方向

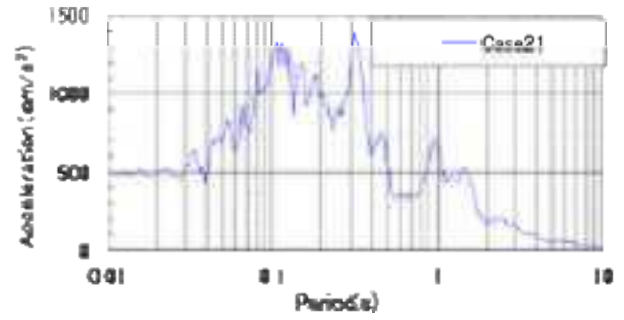
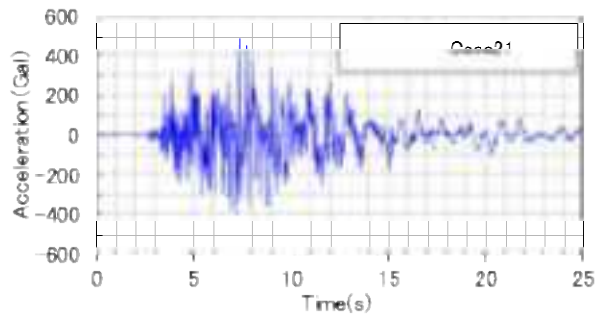


図 11.2.8 大型 1 層斜面 (Case21) 入力波形図及び加速度応答スペクトル(h=5%)



GHE-S 設定資料

TITLE 斜面安定解析 2019C

■基本物性値

$\gamma$	16.3	(kN/m <sup>3</sup> )
$V_s$		(m/s)
Gamma	21.486	(kN/m <sup>3</sup> )
Imax	0.29	
$\nu$	0.264	

■Mohr-Coulombの摩擦角等より

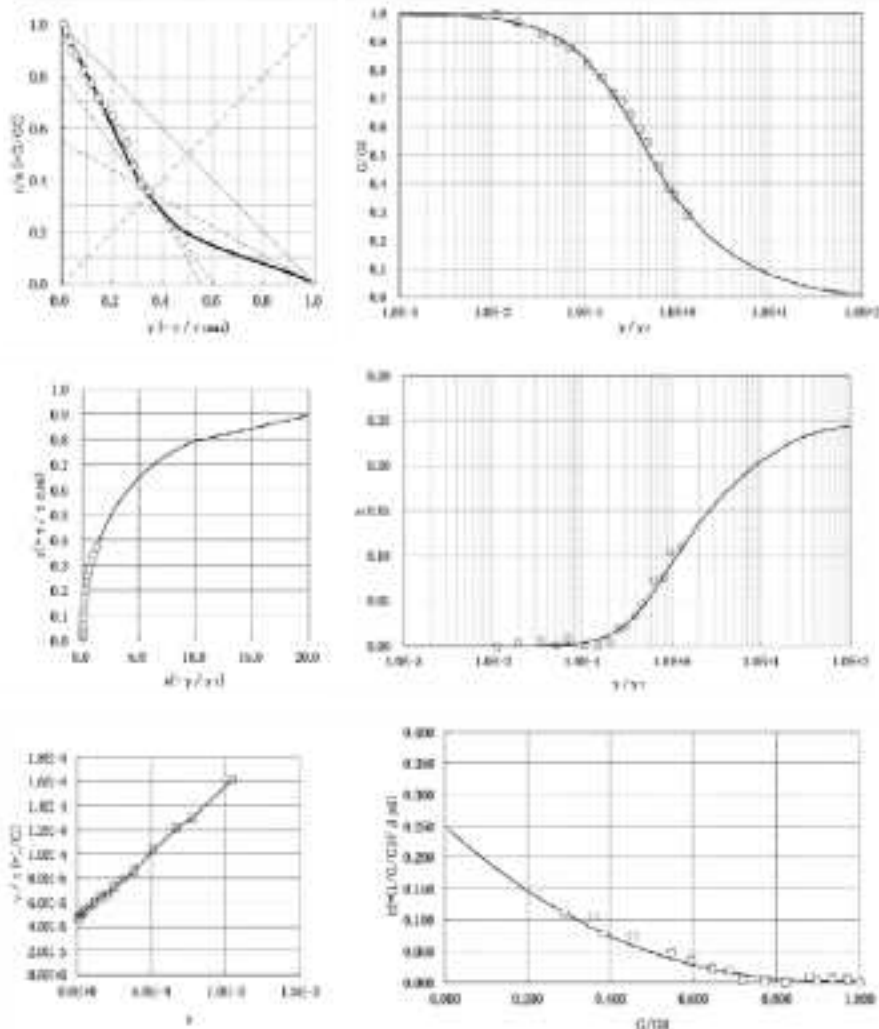
有効土体圧力 $\sigma'$	15.0	(kN/m <sup>2</sup> )
$\gamma'$ の有効土体圧力 $\sigma'$	10.0	(kN/m <sup>2</sup> )
C	12.9	(kN/m <sup>2</sup> )
$\phi$	24.0	(°)
$\tau_{max}$	17.7	(kN/m <sup>2</sup> )

■GHEパラメータ

C1(0)	1.0	$\alpha$	1.153
C2(0)	0.55	$\beta$	3.622
C1(∞)	0.55	C1(1)	0.80
C2(∞)	1.0	C2(1)	0.60
$\beta$ ( $\beta_{p6}$ )	2.4		

■G,  $\tau$ ,  $\gamma$  パラメータ

No.	せん断ひずみ率 $\gamma$	G/G <sub>0</sub>	等価減衰比 k	50% ひずみ $\gamma_{50}$	G <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	G (kN/m <sup>2</sup> )	$\tau$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma/\gamma_{50}$	$\tau_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	累積ひずみ $\gamma_r$	$\gamma/\gamma_r$	$\tau/\tau_{max}$
1	0.1116 6	1.000	0.000	0.000 0	21486	21486	0.28	4.78 05	17.68	8.136 4	1.1216 2	0.011
2	1.551 5	0.972	0.005	0.000 0	21486	20889	0.32	4.85 05	17.48	8.136 4	1.911 2	0.019
3	2.791 5	0.935	0.006	0.000 0	21486	20089	0.36	5.01 05	17.48	8.136 4	3.431 2	0.032
4	4.161 6	0.899	0.002	0.000 0	21486	19319	0.39	5.21 05	17.48	8.136 4	5.101 2	0.046
5	5.561 5	0.860	0.008	0.000 0	21486	18518	1.03	5.31 05	17.48	8.136 4	6.831 2	0.060
6	8.701 5	0.823	0.001	0.000 0	21486	17693	1.64	5.71 05	17.48	8.136 4	1.871 1	0.068
7	1.281 4	0.773	0.002	0.000 0	21486	16614	2.05	6.01 05	17.48	8.136 4	1.521 1	0.117
8	1.691 4	0.718	0.006	0.000 0	21486	15431	2.56	6.51 05	17.48	8.136 4	2.831 1	0.146
9	2.051 4	0.688	0.019	0.000 0	21486	14789	3.03	6.81 05	17.48	8.136 4	2.521 1	0.173
10	2.841 4	0.646	0.022	0.000 0	21486	13880	3.53	7.21 05	17.48	8.136 4	3.121 1	0.202
11	3.151 4	0.595	0.035	0.000 0	21486	12783	4.03	7.61 05	17.48	8.136 4	3.871 1	0.230
12	3.851 4	0.546	0.047	4.491 4	21486	11734	4.51	8.51 05	17.48	8.136 4	4.731 1	0.258
13	5.111 4	0.485	0.073	0.000 0	21486	9773	4.99	1.01 04	17.48	8.136 4	6.281 1	0.286
14	6.661 4	0.385	0.078	0.000 0	21486	8283	5.58	1.21 04	17.48	8.136 4	8.181 1	0.315
15	7.701 4	0.358	0.106	0.000 0	21486	7603	5.99	1.31 04	17.48	8.136 4	9.571 1	0.342
16	1.091 3	0.289	0.111	0.000 0	21486	6206	6.49	1.51 04	17.48	8.136 4	1.281 0	0.371



(a) 弱層部パラメータ

GHE-S 設定資料

TITLE 斜面安定解析 補強土部

■基本物性値

$\gamma$	16.3	(kN/m <sup>3</sup> )
$V_u$		(m/s)
$C_{max}$	26356	(kN/m <sup>2</sup> )
$\tau_{max}$	0.18	
$w_d$	0.383	

■土質-Coulombの強度基準より

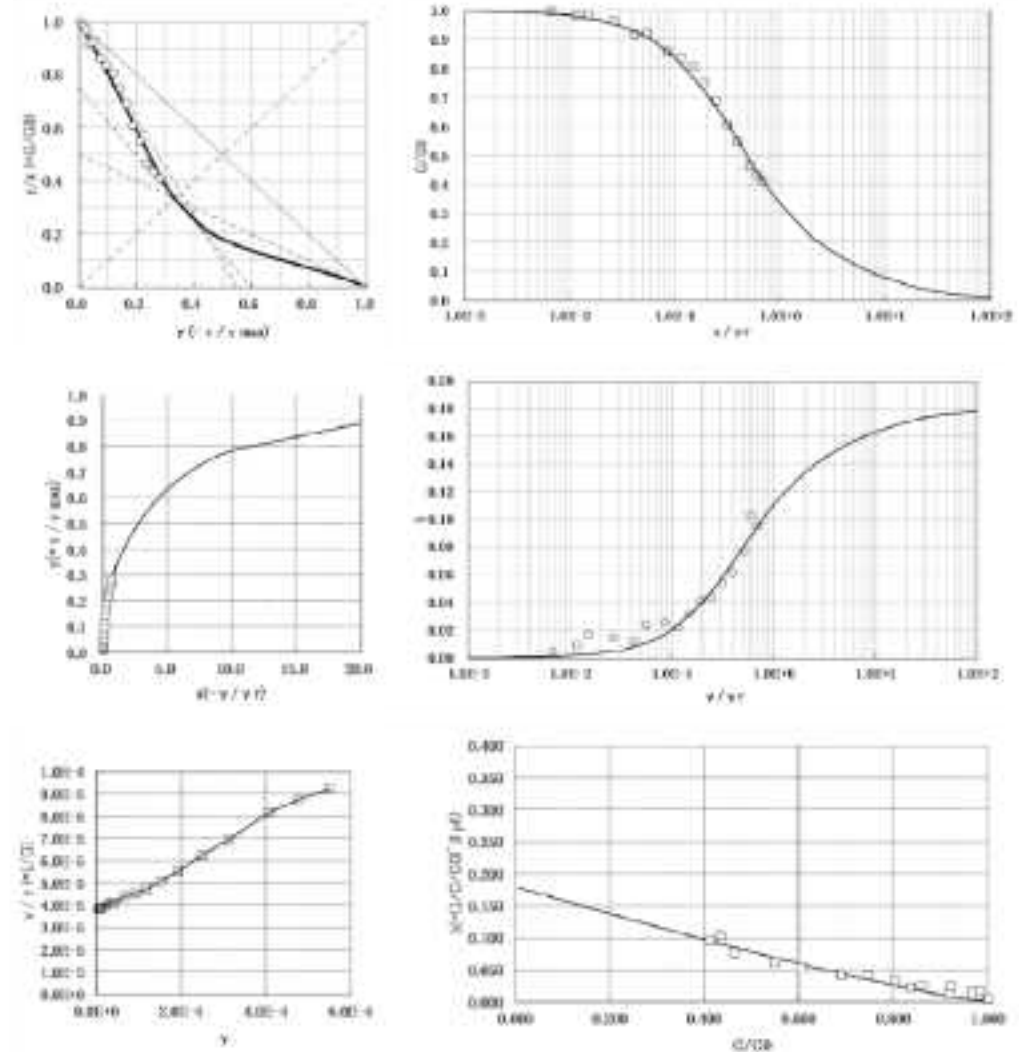
有効土圧力 $\sigma_v'$	15.0	(kN/m <sup>2</sup> )
平均有効土圧力 $P'$	17.6	(kN/m <sup>2</sup> )
C	17.6	(kN/m <sup>2</sup> )
$\phi$	19.4	(°)
$\tau_{max}$	21.1	(kN/m <sup>2</sup> )

■GHE-Sパラメータ

C1(0)	1.00	$\alpha$	1.000
C2(0)	0.60	$\beta$	1.222
C1( $\infty$ )	0.50	C1(1)	0.75
C2( $\infty$ )	1.00	C2(1)	0.60
$\beta$ ( $\beta_{00}$ )	1.2		

■G,  $\tau$ ,  $\tau_{max}$

No.	せん断ひずみ $\gamma$	C/C <sub>0</sub>	寄与減衰比 $b$	50% ひずみ	C <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	G (kN/m <sup>2</sup> )	$\tau$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma/\tau$	$\tau_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	基準ひずみ $\gamma_T$	$\gamma/\gamma_T$	$\tau/\tau_{max}$
1	5.35E-6	1.000	0.005	0.00E+0	26356	26356	0.14	3.8E-05	21.10	8.01E-4	6.82E-3	0.007
2	9.32E-6	0.982	0.009	0.00E+0	26356	25877	0.24	3.9E-05	21.10	8.01E-4	1.18E-2	0.011
3	1.20E-5	0.963	0.017	0.00E+0	26356	25916	0.31	3.9E-05	21.10	8.01E-4	1.50E-2	0.015
4	2.10E-5	0.966	0.015	0.00E+0	26356	25461	0.53	3.9E-05	21.10	8.01E-4	2.62E-2	0.025
5	3.34E-5	0.919	0.012	0.00E+0	26356	24226	0.81	4.1E-05	21.10	8.01E-4	4.17E-2	0.038
6	4.39E-5	0.922	0.024	0.00E+0	26356	24266	1.07	4.1E-05	21.10	8.01E-4	5.48E-2	0.051
7	8.81E-5	0.882	0.025	0.00E+0	26356	22714	1.55	4.4E-05	21.10	8.01E-4	8.51E-2	0.073
8	9.28E-5	0.827	0.022	0.00E+0	26356	22049	2.04	4.5E-05	21.10	8.01E-4	1.16E-1	0.097
9	1.20E-4	0.806	0.032	0.00E+0	26356	21202	2.54	4.7E-05	21.10	8.01E-4	1.49E-1	0.120
10	1.52E-4	0.748	0.042	0.00E+0	26356	19727	3.02	5.1E-05	21.10	8.01E-4	1.91E-1	0.143
11	1.94E-4	0.689	0.043	0.00E+0	26356	18172	3.58	5.6E-05	21.10	8.01E-4	2.42E-1	0.167
12	2.49E-4	0.607	0.054	0.00E+0	26356	16001	3.99	6.2E-05	21.10	8.01E-4	3.11E-1	0.189
13	3.11E-4	0.549	0.062	3.68E-4	26356	14479	4.50	6.9E-05	21.10	8.01E-4	3.88E-1	0.213
14	4.00E-4	0.490	0.074	0.00E+0	26356	12804	5.00	8.2E-05	21.10	8.01E-4	5.00E-1	0.237
15	4.79E-4	0.434	0.103	0.00E+0	26356	11442	5.48	8.7E-05	21.10	8.01E-4	5.98E-1	0.260
16	5.52E-4	0.411	0.095	0.00E+0	26356	10642	5.96	9.2E-05	21.10	8.01E-4	6.99E-1	0.284



(b) 補強土部パラメータ

図 11.2.9 大型1層斜面 (Case21) GHE-S パラメータの設定

④ Case22

- 境界条件：底面 固定  
基盤層側面 鉛直ローラー
- 継続時間：4sec( $\Delta T=0.0004$ )

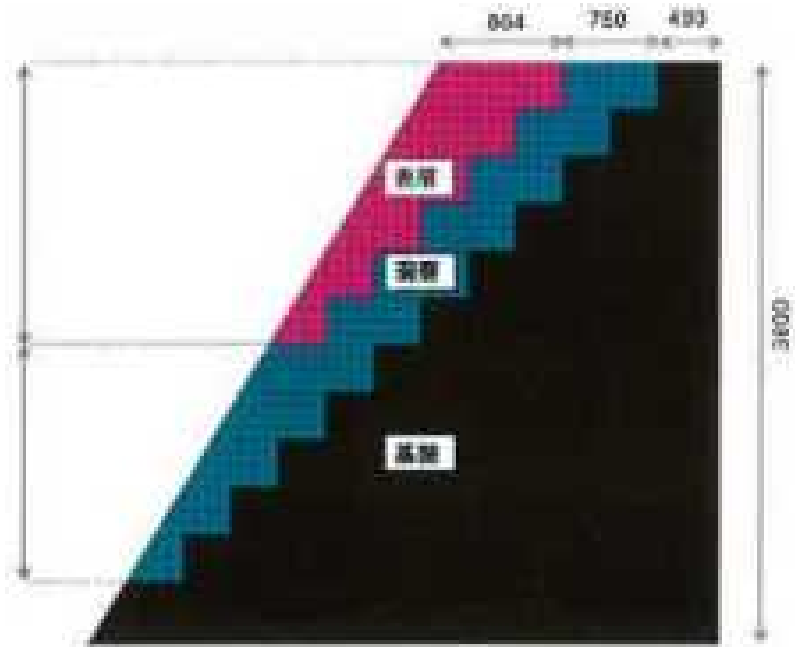


図 11.2.10 大型3層斜面 (Case22) モデル図

表 11.2.4 大型3層斜面 (Case22) 物性値

地層	土質	ポアソン比 $\nu_d$ (-)	ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G0 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 Vs (m/s)	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
1	表層	0.333	76794	28805	16.3	132	12.9	24.6
2	弱層	0.333	76794	28805	16.3	132	12.9	24.6
3	基盤	0.333	2507060	940383	18.5	706	9999.0	0.0

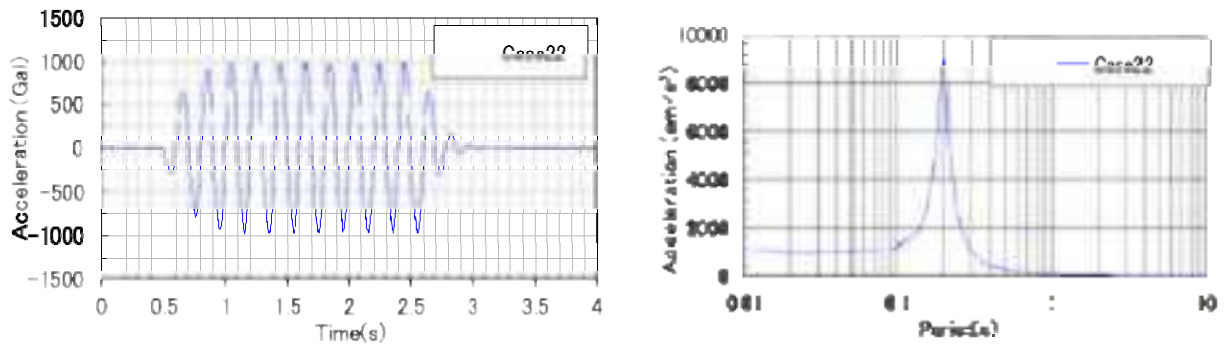


図 11.2.11 大型3層斜面 (Case22) 入力波形図及び加速度応答スペクトル(h=5%)

GHE-S 設定資料

TITLE 斜面安定解析 別冊C

■基本物性値

$\gamma$	16.8	(kN/m <sup>3</sup> )
$V_u$		(m/s)
$G_{max}$	21.986	(kN/m <sup>2</sup> )
$\tan \delta$	0.25	
$\nu_d$	0.264	

■Mohr-Coulombの破壊基準より

右第1層圧力 $\sigma'_v$	16.8	(kN/m <sup>2</sup> )
平均有効軸圧力 $\sigma'_v$	10.9	(kN/m <sup>2</sup> )
$C$	12.9	(kN/m <sup>2</sup> )
$\phi$	24.6	(°)
$\tau_{max}$	24.6	(kN/m <sup>2</sup> )

■GHE-Sパラメータ

$C2(0)$	1.0	$\alpha$	1.153
$C2(1)$	0.55	$\beta$	3.622
$C1(\infty)$	0.66	$C1(1)$	0.80
$C2(\infty)$		$C2(1)$	0.60
$\beta1 / \beta p6$	2.4		

■GHE-Sパラメータ

No.	せん断 ひずみ $\gamma$	$C/C_0$	等価 減衰比 $\beta$	50% ひずみ	$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\tau$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma/\tau$	$\tau_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	基準 ひずみ $\gamma_T$	$\gamma/\gamma_T$	$\tau/\tau_{max}$
1	9.11E-6	1.000	0.000	0.00E+0	21.486	21.486	0.20	4.7E-05	17.48	8.13E-4	1.12E-2	0.011
2	1.66E-5	0.972	0.005	0.00E+0	21.486	20889	0.32	4.8E-05	17.48	8.13E-4	1.91E-2	0.019
3	2.73E-5	0.931	0.006	0.00E+0	21.486	20088	0.56	5.0E-05	17.48	8.13E-4	3.43E-2	0.032
4	4.14E-5	0.890	0.007	0.00E+0	21.486	19319	0.80	5.2E-05	17.48	8.13E-4	5.10E-2	0.046
5	5.66E-5	0.860	0.008	0.00E+0	21.486	18919	1.06	5.3E-05	17.48	8.13E-4	6.83E-2	0.060
6	8.70E-5	0.823	0.001	0.00E+0	21.486	17693	1.54	5.7E-05	17.48	8.13E-4	1.07E-1	0.098
7	1.28E-4	0.773	0.002	0.00E+0	21.486	16614	2.06	6.0E-05	17.48	8.13E-4	1.42E-1	0.117
8	1.66E-4	0.718	0.005	0.00E+0	21.486	14431	2.56	6.5E-05	17.48	8.13E-4	2.03E-1	0.146
9	2.04E-4	0.658	0.019	0.00E+0	21.486	14789	3.03	6.8E-05	17.48	8.13E-4	2.52E-1	0.173
10	2.58E-4	0.646	0.022	0.00E+0	21.486	13889	3.53	7.2E-05	17.48	8.13E-4	3.12E-1	0.202
11	3.15E-4	0.595	0.035	0.00E+0	21.486	12783	4.03	7.8E-05	17.48	8.13E-4	3.87E-1	0.230
12	3.84E-4	0.546	0.047	4.48E-4	21.486	11734	4.51	8.5E-05	17.48	8.13E-4	4.73E-1	0.258
13	5.11E-4	0.495	0.073	0.00E+0	21.486	9773	4.99	1.0E-04	17.48	8.13E-4	6.28E-1	0.286
14	6.68E-4	0.386	0.078	0.00E+0	21.486	8283	5.50	1.2E-04	17.48	8.13E-4	8.18E-1	0.315
15	7.78E-4	0.368	0.106	0.00E+0	21.486	7693	5.99	1.3E-04	17.48	8.13E-4	9.57E-1	0.342
16	1.06E-3	0.289	0.111	0.00E+0	21.486	6205	6.49	1.6E-04	17.48	8.13E-4	1.28E+0	0.371

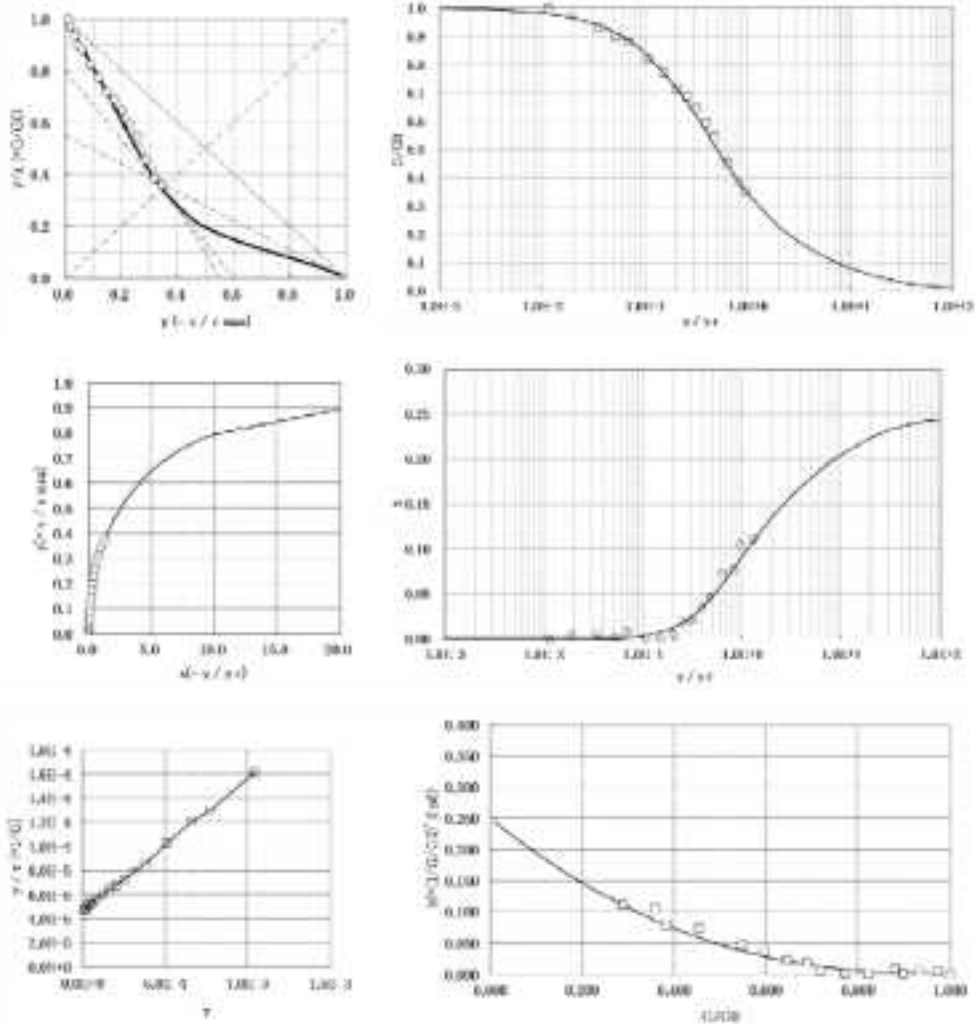


図 11.2.12 大型3層斜面 (Case22) GHE-S パラメータの設定

(2) 等価線形解析

① Case19

- 境界条件：底面 固定  
基盤層側面 鉛直ローラー
- 継続時間：20sec( $\Delta T=0.02$ )

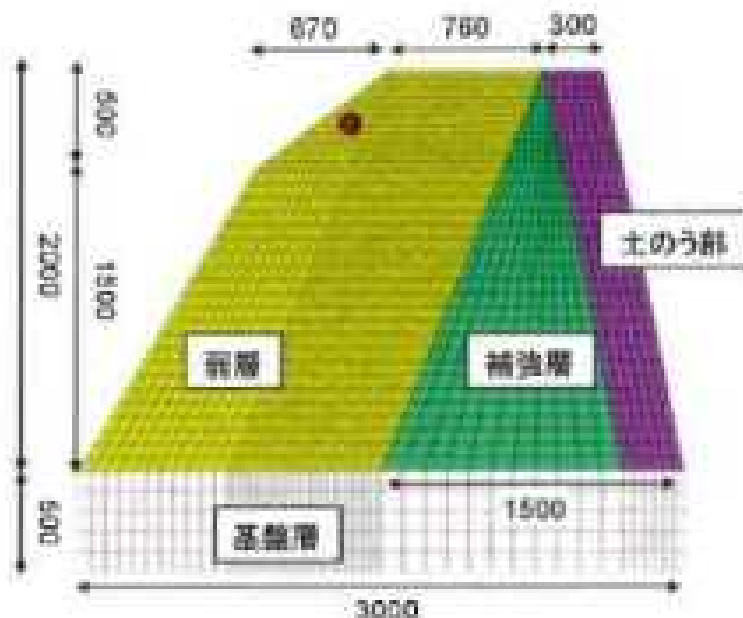


図 11.2.13 中型1層斜面 (Case19) モデル図

表 11.2.5 中型1層斜面 (Case19) 物性値

地層	土質	ポアソン比 $\nu_d$ (-)	ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G0 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 Vs (m/s)	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
1	弱層	0.333	84562	31719	17.3	134	8.5	38.0
2	弱層(補強)	0.333	84562	31719	17.3	134	17.0	57.4
3	土のう	0.333	84562	31719	17.3	134	17.0	57.4
4	基盤	0.333	2507060	940383	18.5	706	280.5	57.3

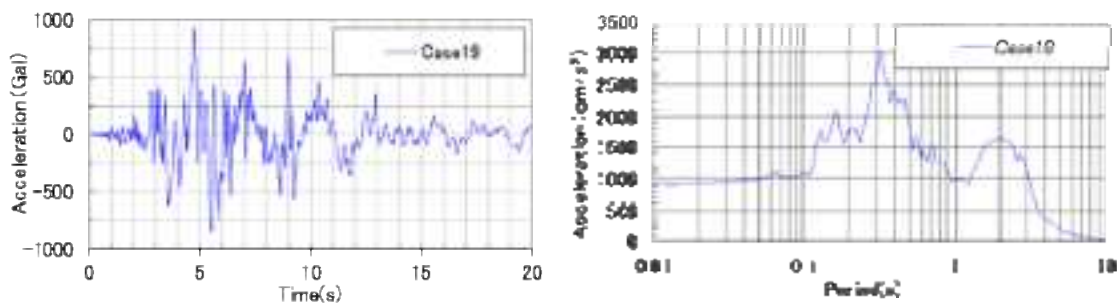


図 11.2.14 中型1層斜面 (Case19) 入力波形図及び加速度応答スペクトル(h=5%)

② Case20

- 境界条件：底面 固定  
基盤層側面 鉛直ローラー
- 継続時間：20sec( $\Delta T=0.04$ )

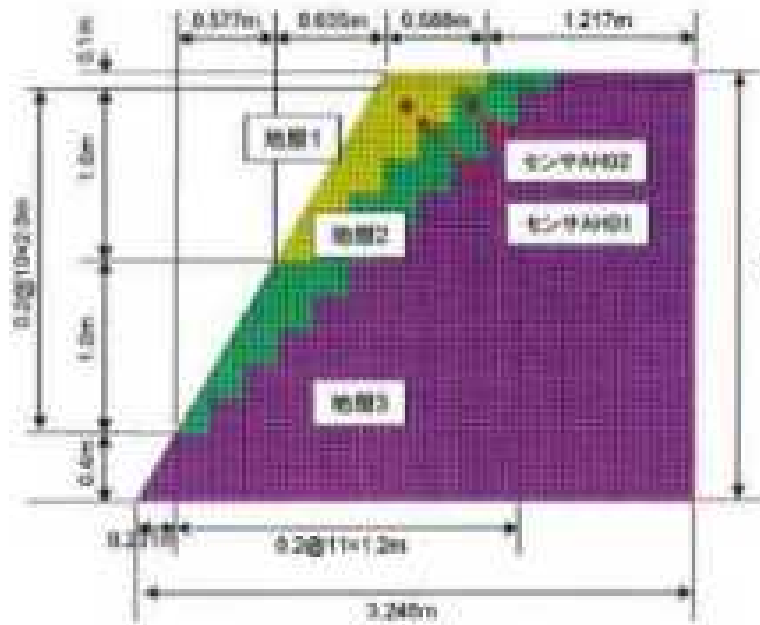


図 11.2.15 中型3層斜面 (Case20) モデル図

表 11.2.6 中型3層斜面 (Case20) 物性値

地層	土質	ポアソン比 $\nu_d$ (-)	ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G0 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 $V_s$ (m/s)	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
1	表層	0.321	82583	31258	29.4	102	107.4	0.0
2	弱層	0.333	84562	31719	17.3	134	8.5	38.0
3	基盤	0.333	2507060	940383	18.5	706	280.5	57.3

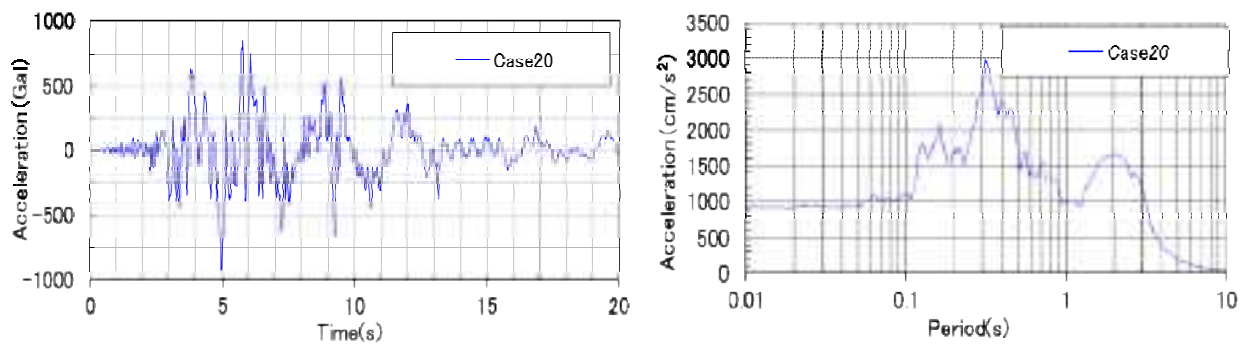


図 11.2.16 中型3層斜面 (Case20) 入力波形図及び加速度応答スペクトル(h=5%)

③ Case21

(3) 大型1層斜面 (Case21)

- ・境界条件：底面 固定  
基盤層側面 鉛直ローラー
- ・継続時間：25sec( $\Delta T=0.04$ )

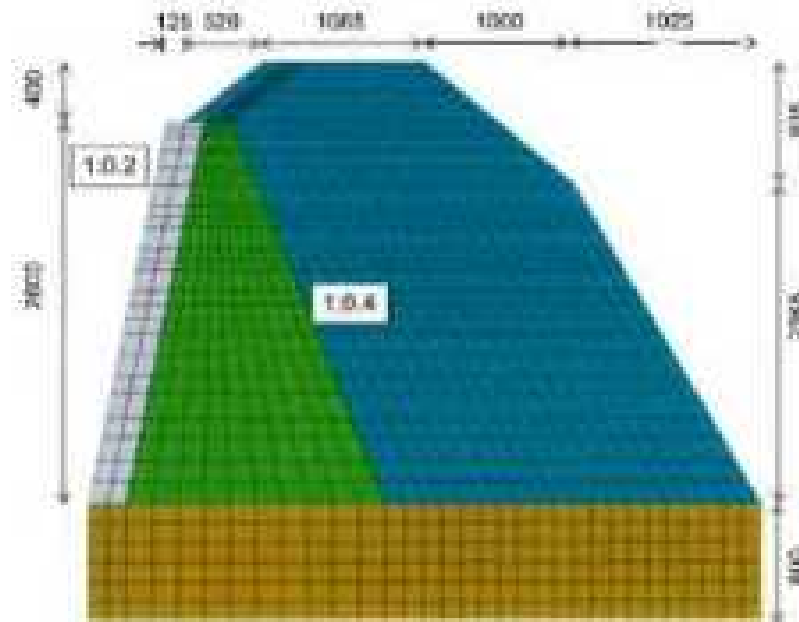
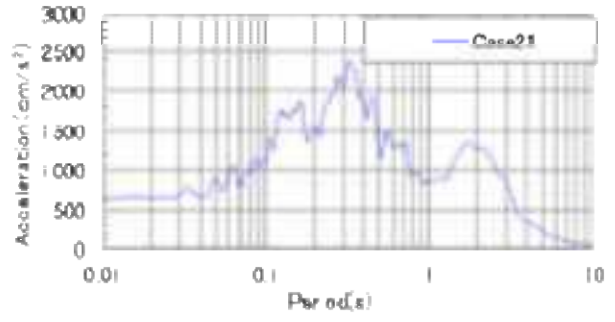
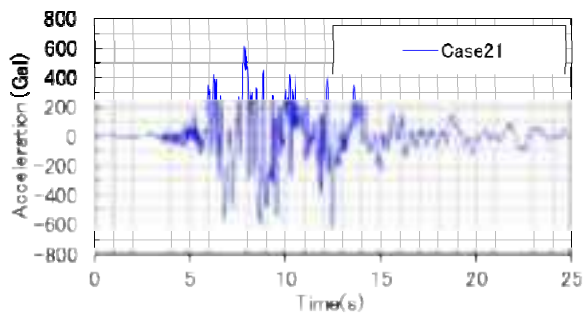


図 11.2.17 大型1層斜面 (Case21) モデル図

表 11.2.7 大型1層斜面 (Case21) 物性値

地層	土質	ポアソン比 $\nu_d$ (-)	ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G0 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 Vs (m/s)	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
1	弱層	0.333	76794	28805	16.3	132	12.9	24.6
2	弱層(補強)	0.333	94200	35334	16.3	146	17.6	19.4
3	土のう	0.333	107853	40455	17.3	151	8.5	38.0
4	基盤	0.333	2507060	940383	18.5	706	280.5	57.3

・水平方向



・鉛直方向

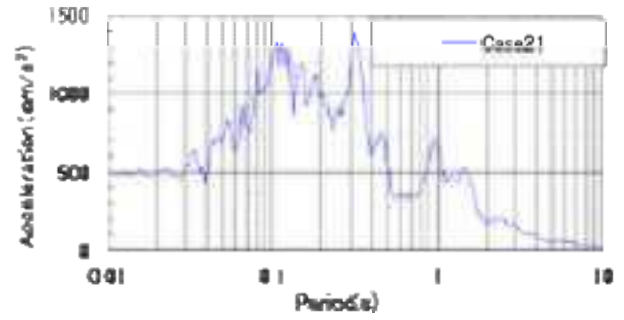
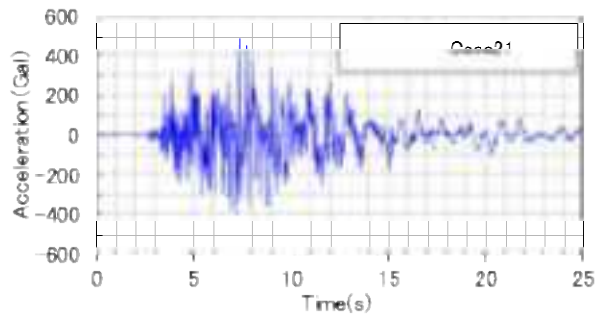


図 11.2.18 大型 1 層斜面 (Case21) 入力波形図及び加速度応答スペクトル(h=5%)



④ Case22

- 境界条件：底面 固定  
基盤層側面 鉛直ローラー
- 継続時間：4sec( $\Delta T=0.0004$ )

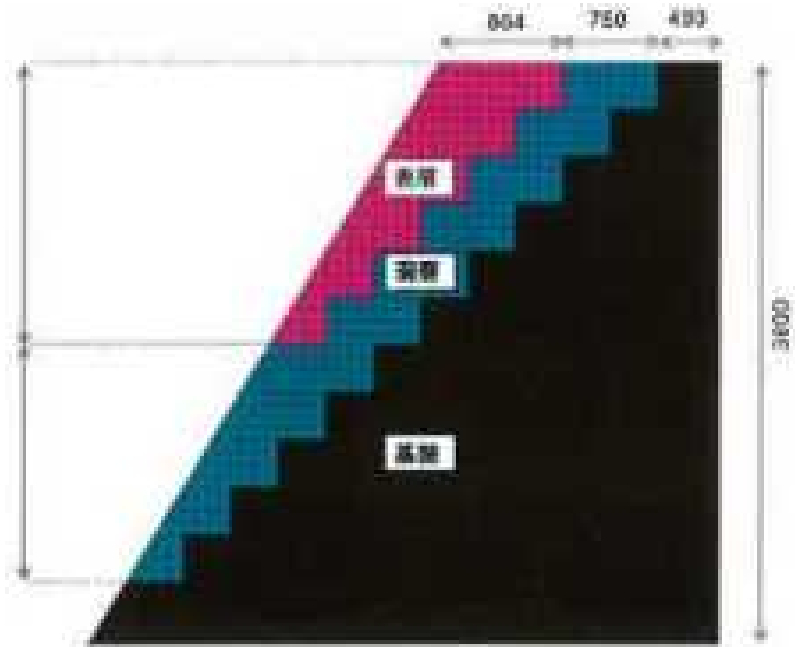


図 11.2.19 大型3層斜面 (Case22) モデル図

表 11.2.8 大型3層斜面 (Case22) 物性値

地層	土質	ポアソン比 $\nu_d$ (-)	ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 G0 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積 重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S波速度 Vs (m/s)	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
1	表層	0.333	76794	28805	16.3	132	12.9	24.6
2	弱層	0.333	76794	28805	16.3	132	12.9	24.6
3	基盤	0.333	2507060	940383	18.5	706	9999.0	0.0

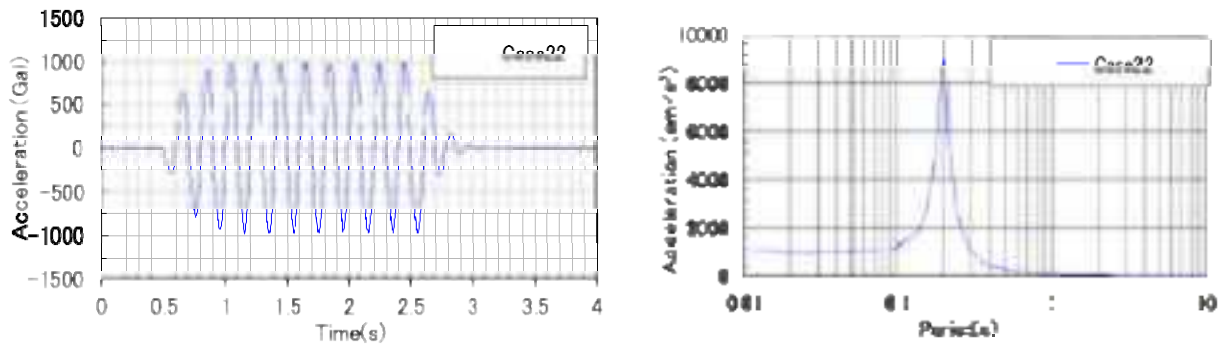


図 11.2.20 大型3層斜面 (Case22) 入力波形図及び加速度応答スペクトル(h=5%)

11.2.2 固有値解析結果

① Case19

表 11.2.9 中型 1 層斜面 (Case19) 固有周期、刺激係数、有効質量比の一覧

モード次数	振動数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 (-)	有効質量比 (-)
1	15.10	0.066	2.179	0.467
2	30.37	0.033	0.216	0.005
3	33.99	0.029	-1.133	0.126
4	45.27	0.022	0.353	0.012
5	49.56	0.020	0.502	0.025

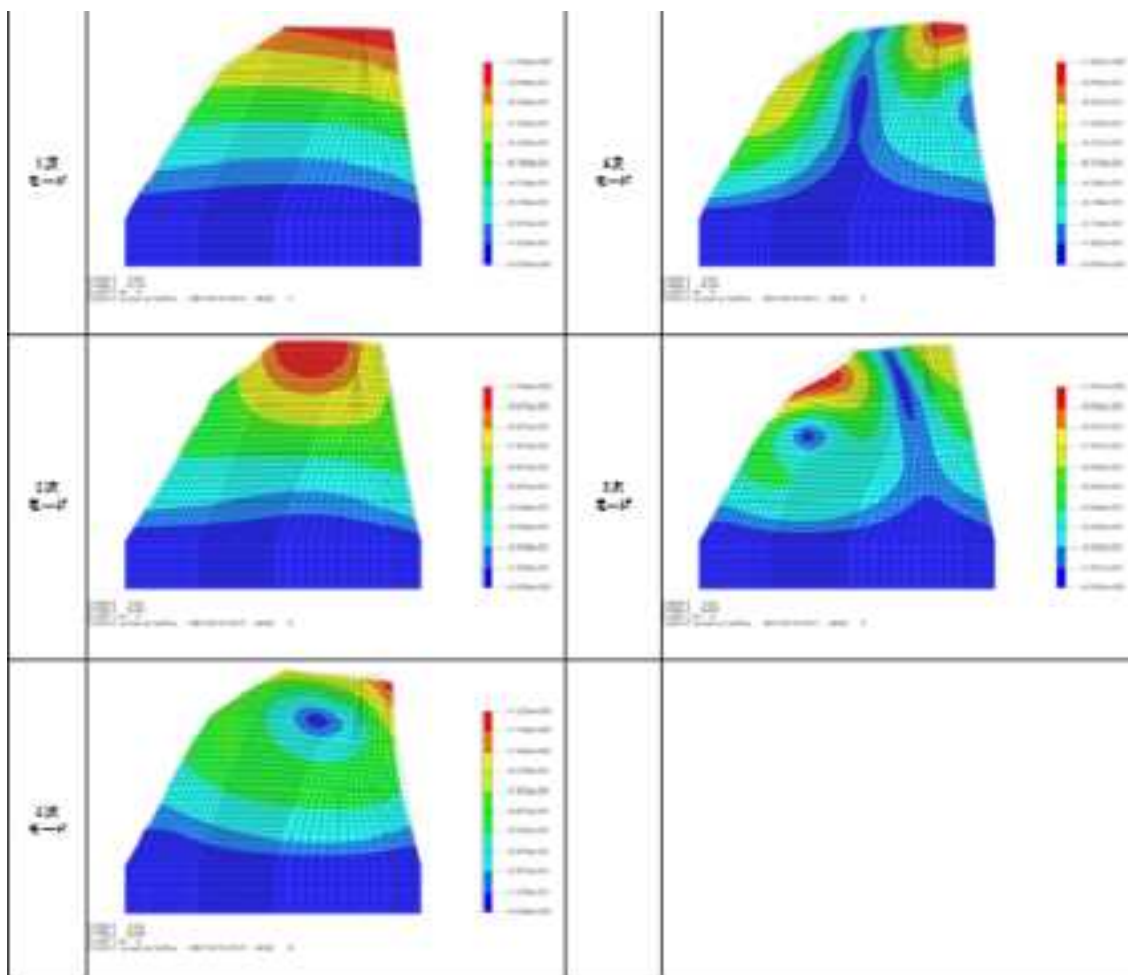


図 11.2.21 中型 1 層斜面 (Case19) 固有モード図 (1 次～5 次)

② Case20

表 11.2.10 中型3層斜面 (Case20) 固有周期、刺激係数、有効質量比の一覧

モード次数	振動数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 (-)	有効質量比 (-)
1	35.32	0.028	1.627	0.219
2	58.05	0.017	-1.367	0.155
3	64.46	0.016	-1.563	0.202
4	73.08	0.014	-0.593	0.029
5	85.46	0.012	0.361	0.011

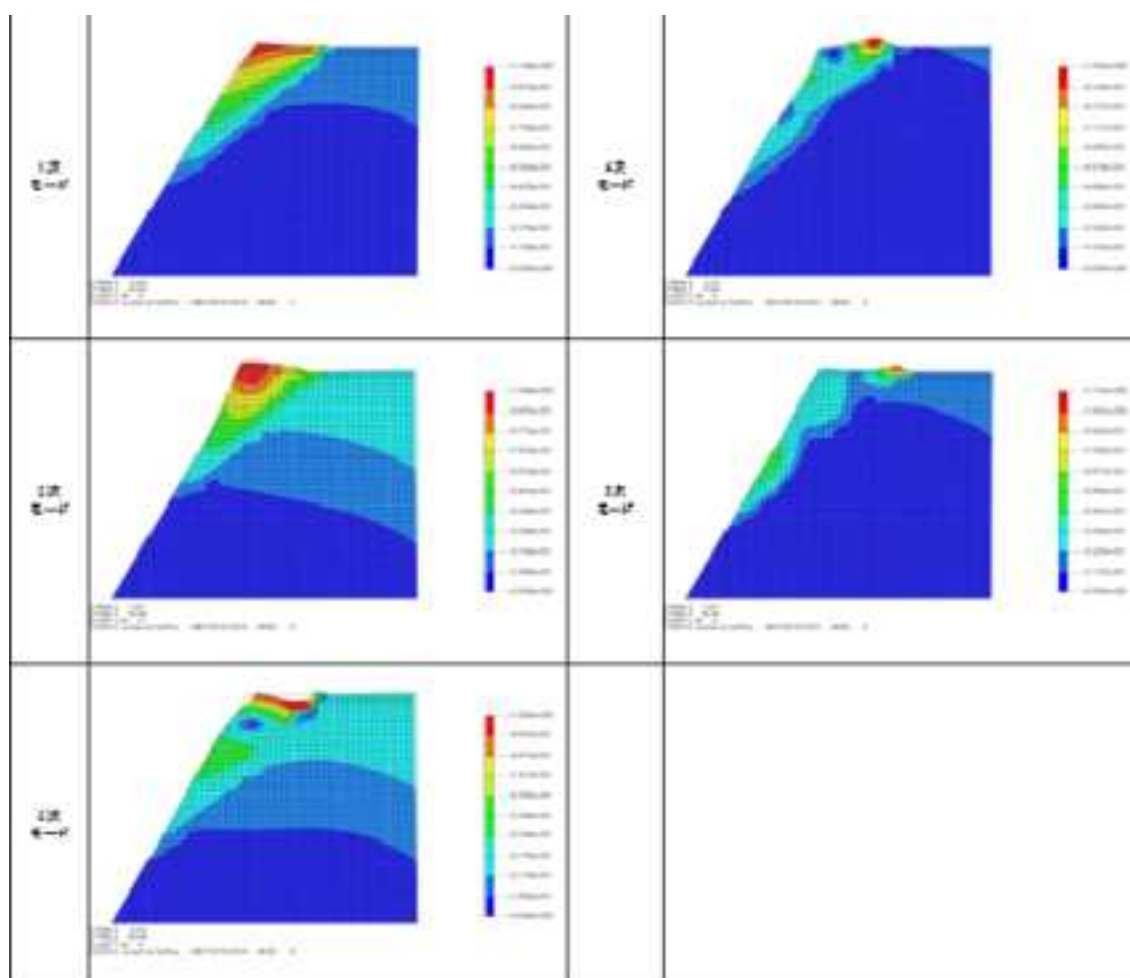


図 11.2.22 中型3層斜面 (Case20) 固有モード図 (1次~5次)

③ Case21

表 11.2.11 大型1層斜面 (Case21) 固有周期、刺激係数、有効質量比の一覧

モード次数	振動数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 (-)	有効質量比 (-)
1	10.66	0.094	3.173	0.451
2	20.89	0.048	-0.035	0.000
3	24.00	0.042	1.635	0.120
4	31.33	0.032	-0.684	0.021
5	33.47	0.030	0.530	0.013

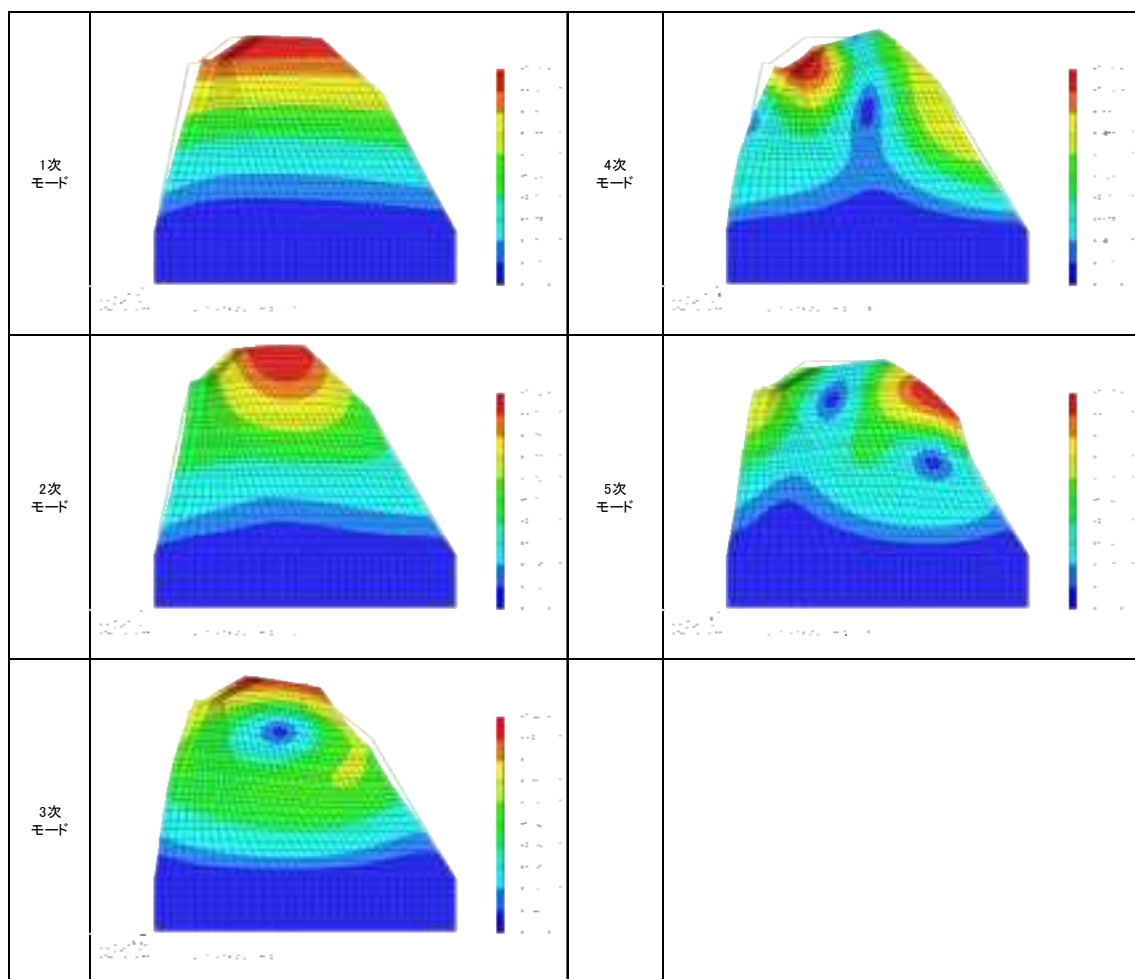


図 11.2.23 大型1層斜面 (Case21) 固有モード図 (1次~5次)

④ Case22

表 11.2.12 大型3層斜面 (Case22) 固有周期、刺激係数、有効質量比の一覧

モード次数	振動数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 (-)	有効質量比 (-)
1	24.68	0.041	2.330	0.287
2	40.00	0.025	1.582	0.133
3	47.37	0.021	1.560	0.129
4	51.73	0.019	0.000	0.000
5	53.22	0.019	-0.105	0.001

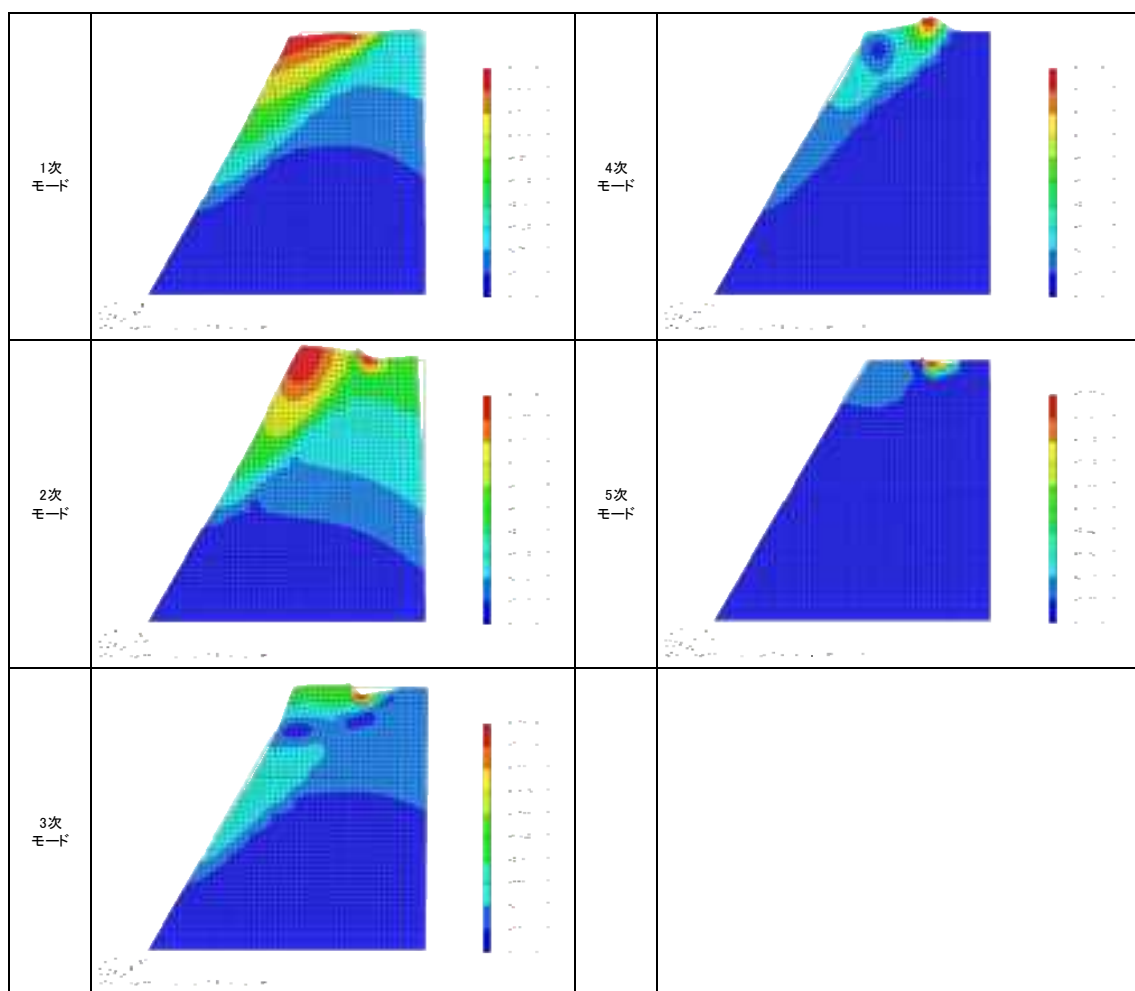


図 11.2.24 大型3層斜面 (Case22) 固有モード図 (1次~5次)

11.2.3 初期応力解析結果

① Case19

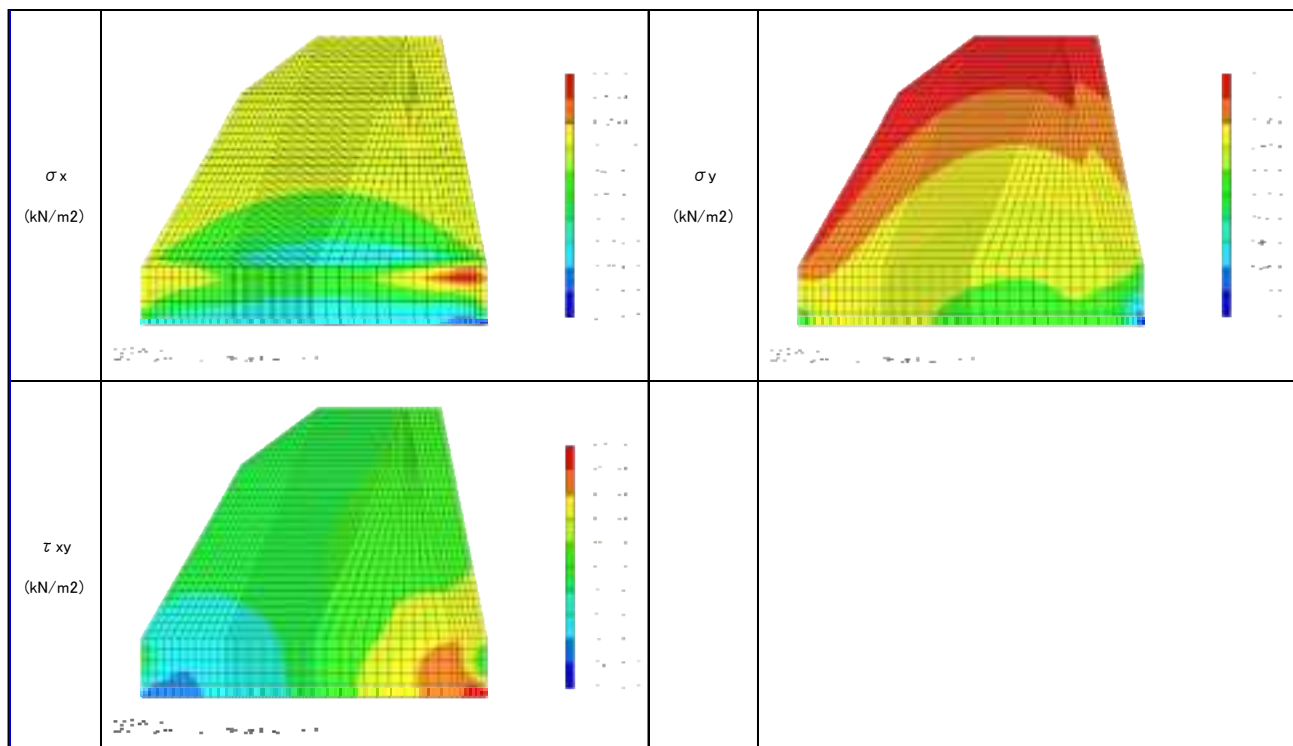


図 11.2.25 中型 1 層斜面 (Case19) 初期応力解析の応力分布

② Case20

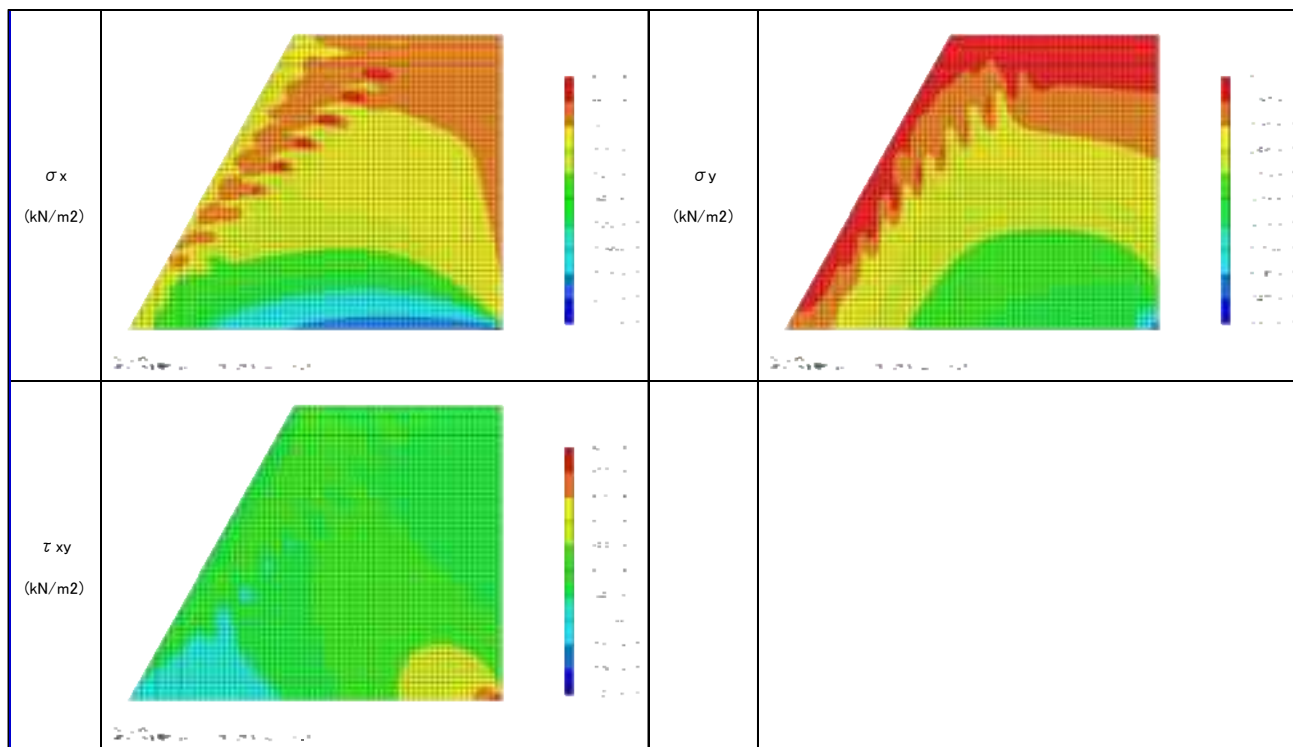


図 11.2.26 中型 3 層斜面 (Case20) 初期応力解析の応力分布

③ Case21

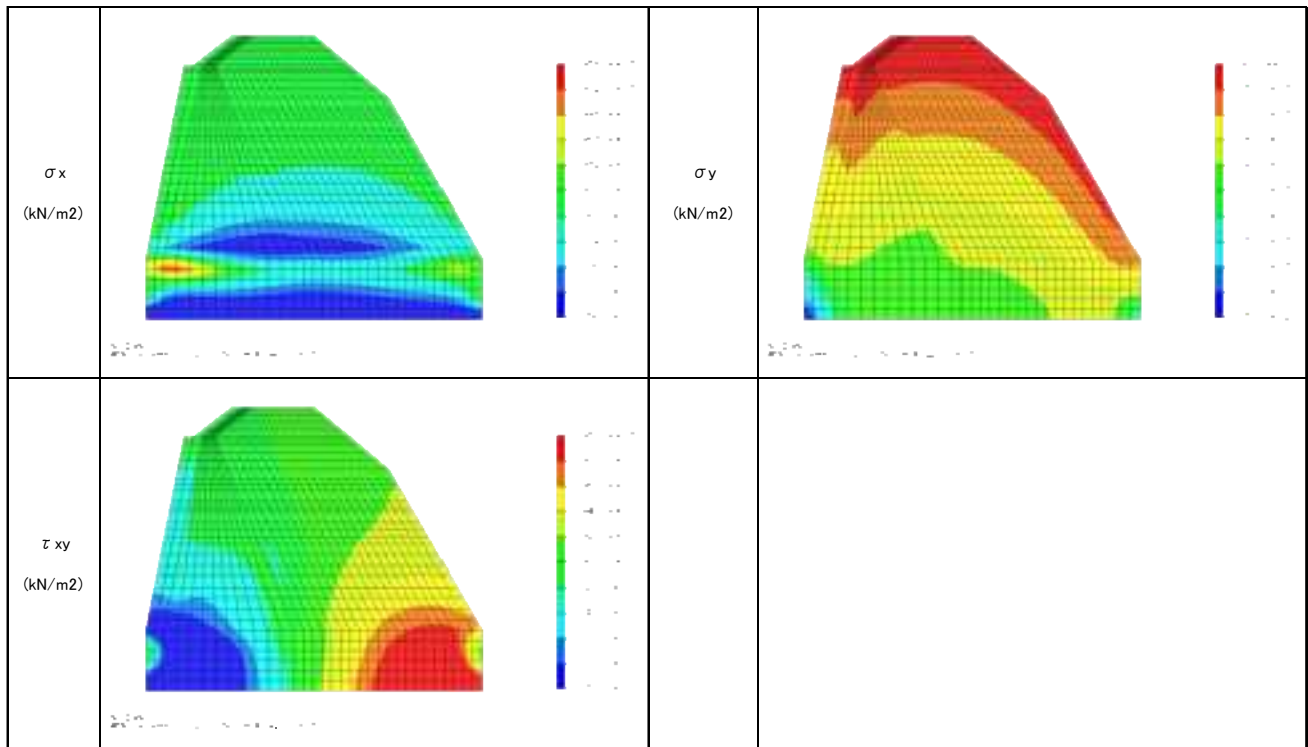


図 11.2.27 大型 1 層斜面 (Case21) 初期応力解析の応力分布

④ Case22

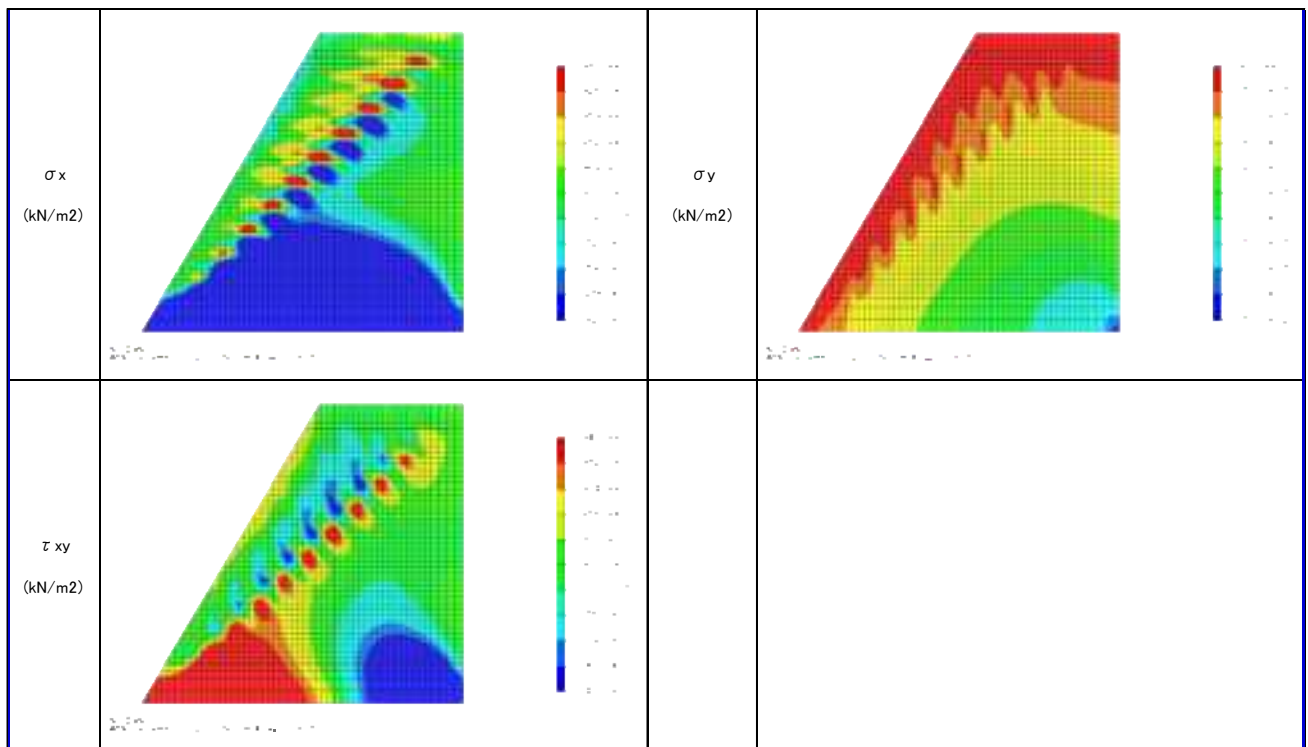


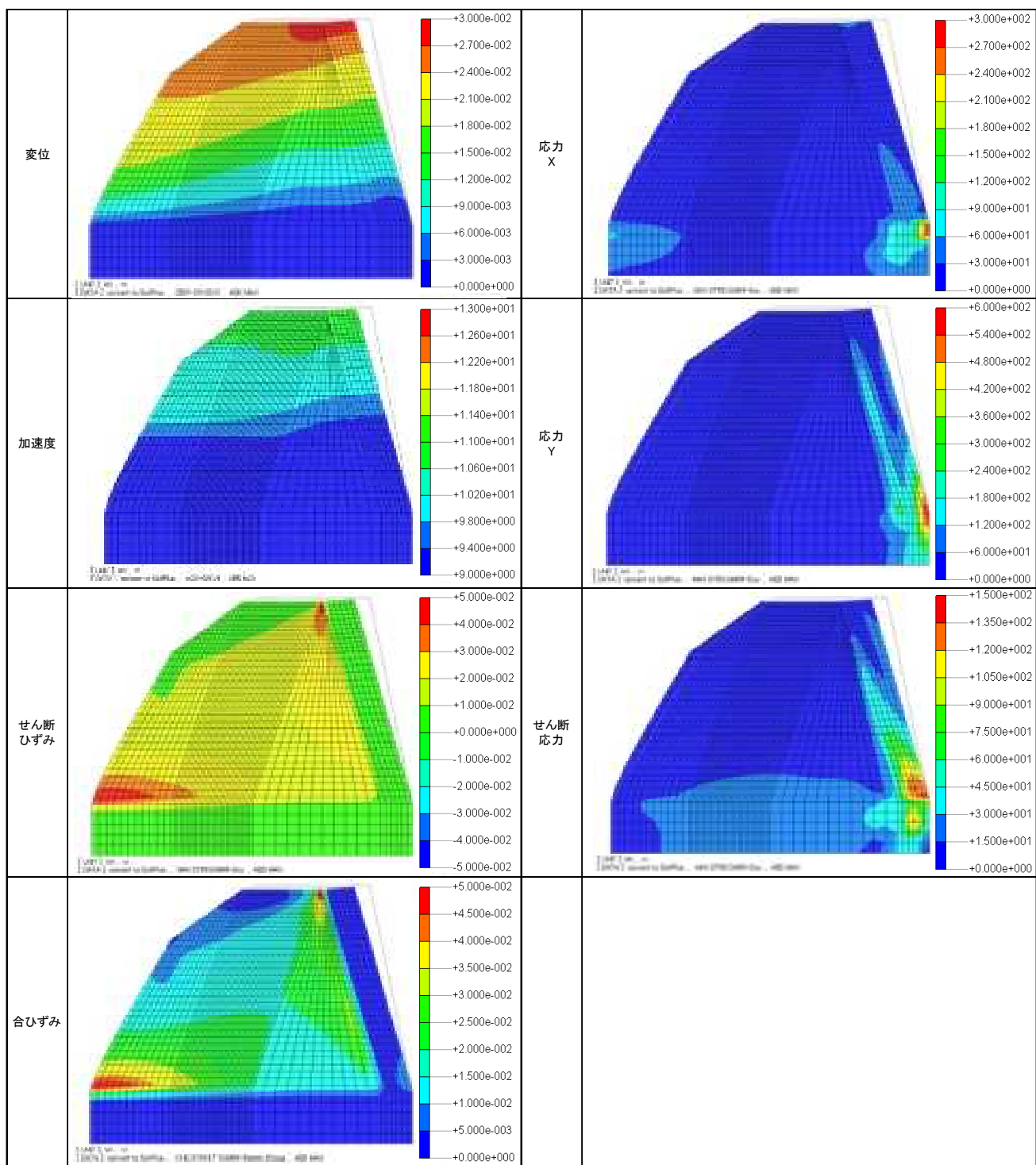
図 11.2.28 大型 3 層斜面 (Case22) 初期応力解析の応力分布



## 11.2.4 動的解析結果

### (1) Case19

#### ① 逐次非線形動的解析

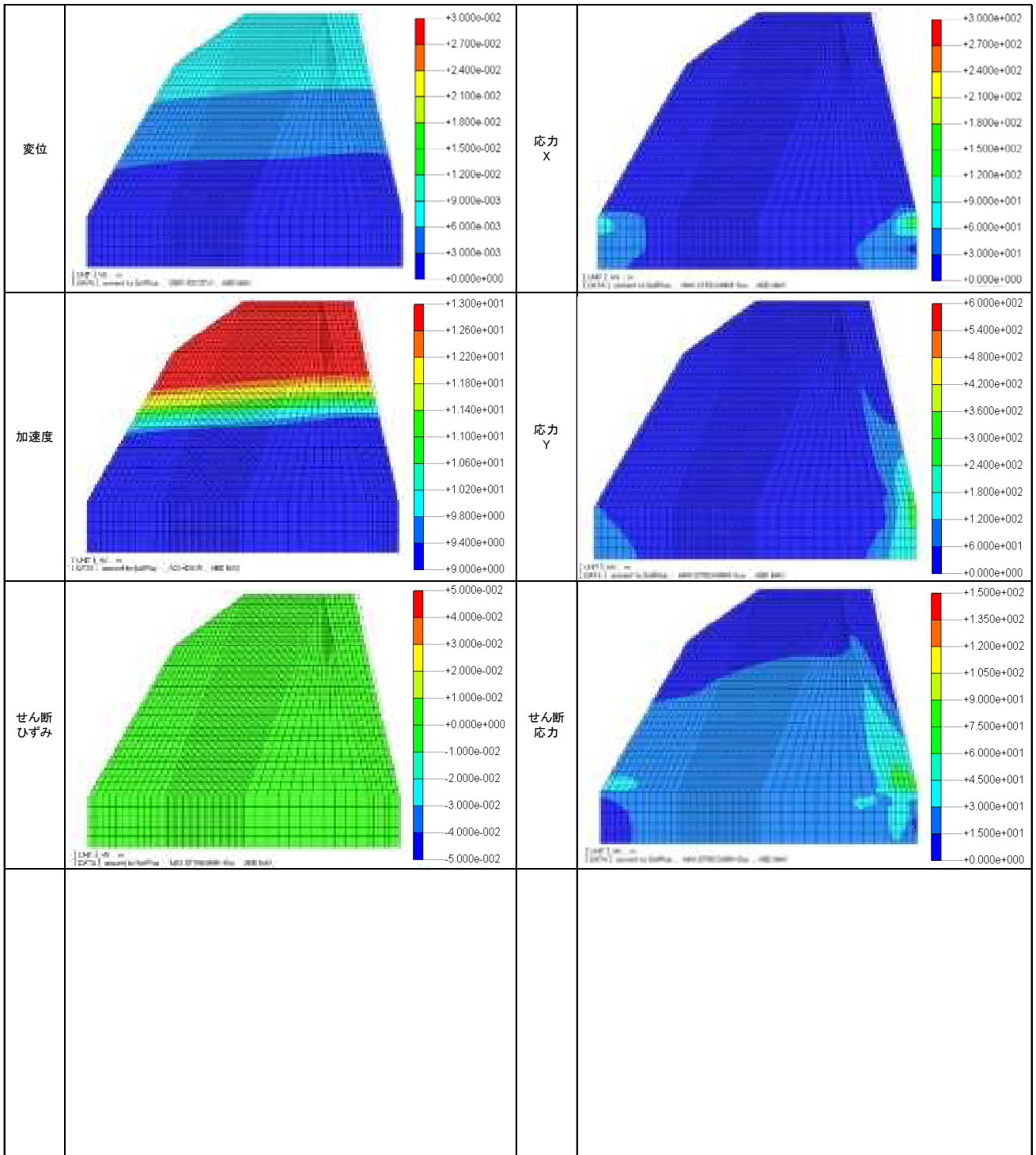


※変形スケール:実寸×5倍

図 11.2.29 中型 1 層斜面 (Case19) 逐次非線形動的解析 最大応答分布図



② 等価線形解析



※変形スケール:実寸×5倍

図 11.2.30 中型 1 層斜面 (Case19) 等価線形解析 最大応答分布図

(2) Case20

① 逐次非線形動的解析

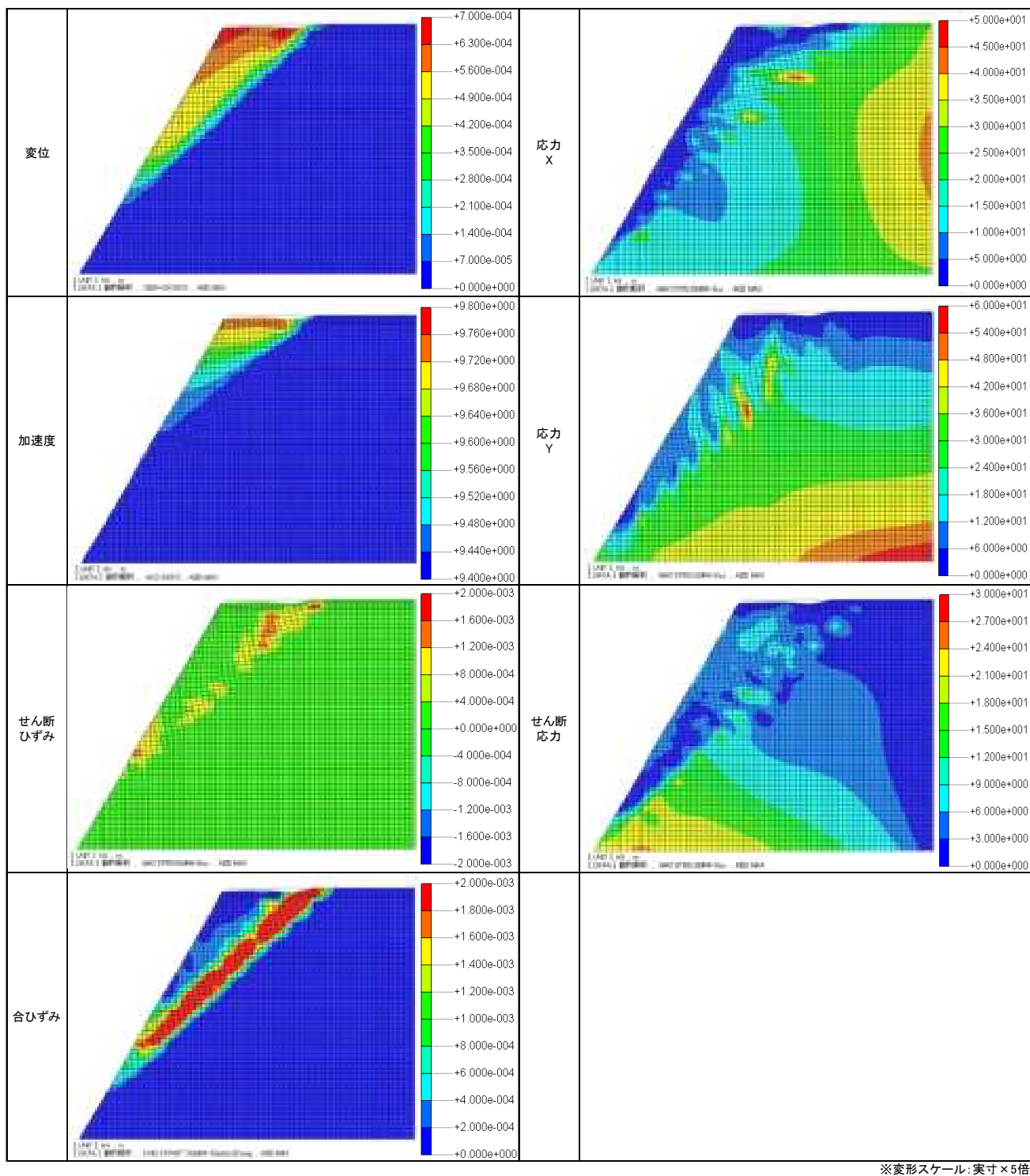
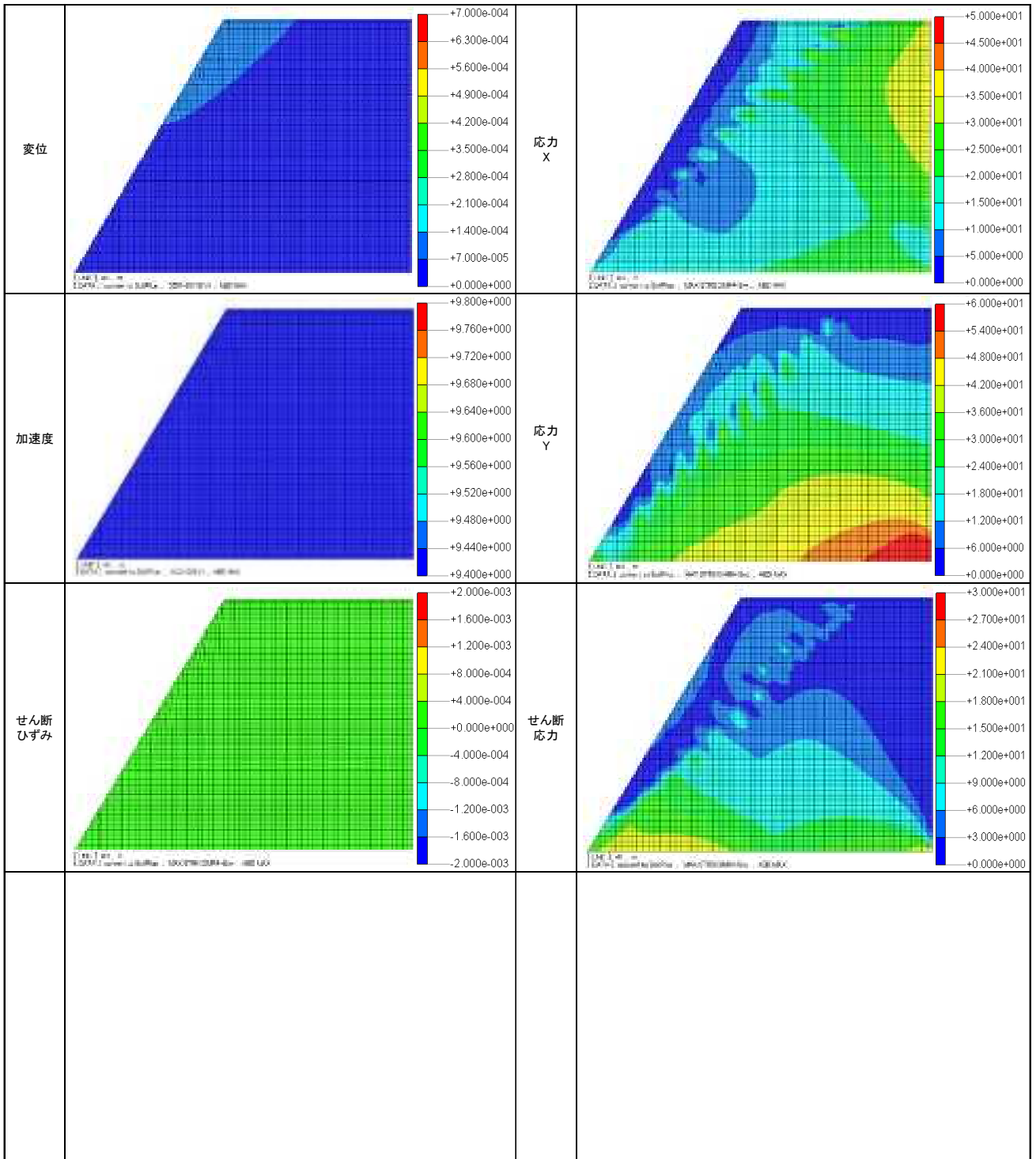


図 11.2.31 中型 3 層斜面 (Case20) 逐次非線形動的解析 最大応答分布図

② 等価線形解析

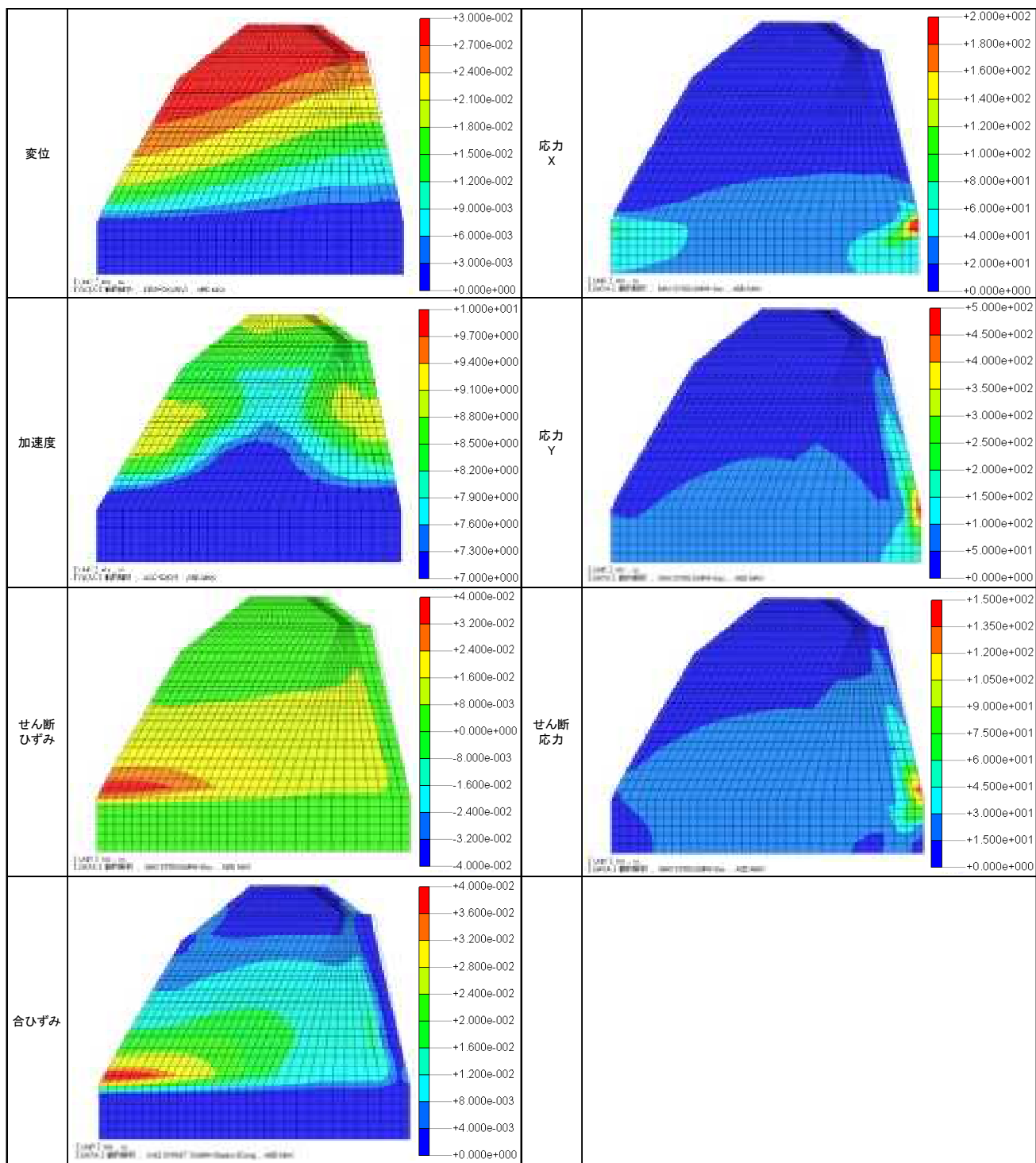


※変形スケール:実寸×5倍

図 11.2.32 中型3層斜面 (Case20) 等価線形解析 最大応答分布図

(3) Case21

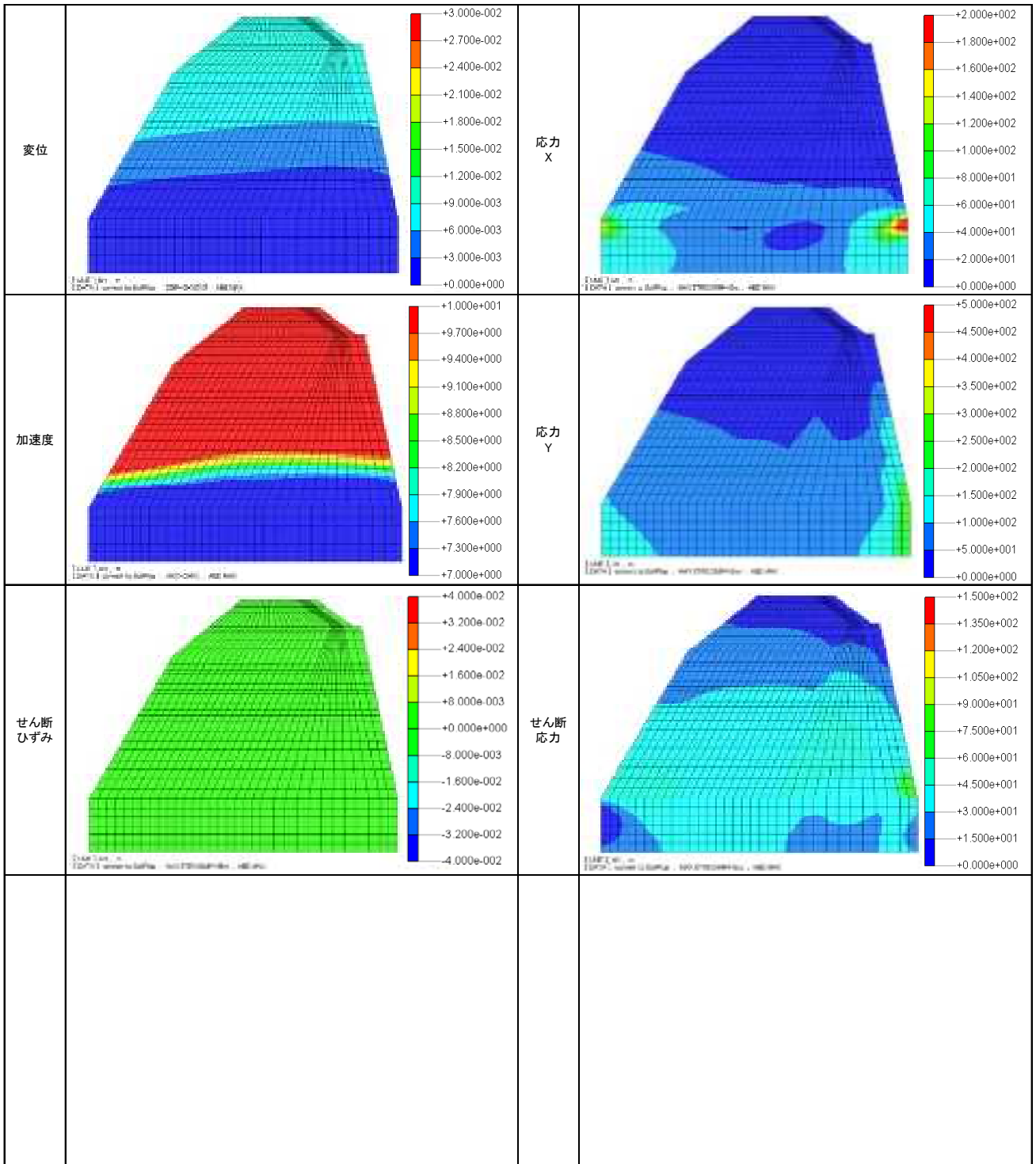
① 逐次非線形動的解析



※変形スケール:実寸×2倍

図 11.2.33 大型 1 層斜面 (Case21) 逐次非線形動的解析 最大応答分布図

② 等価線形解析



※変形スケール:実寸×2倍

図 11.2.34 大型 1 層斜面 (Case21) 等価線形解析 最大応答分布図

(4) Case22

① 逐次非線形動的解析

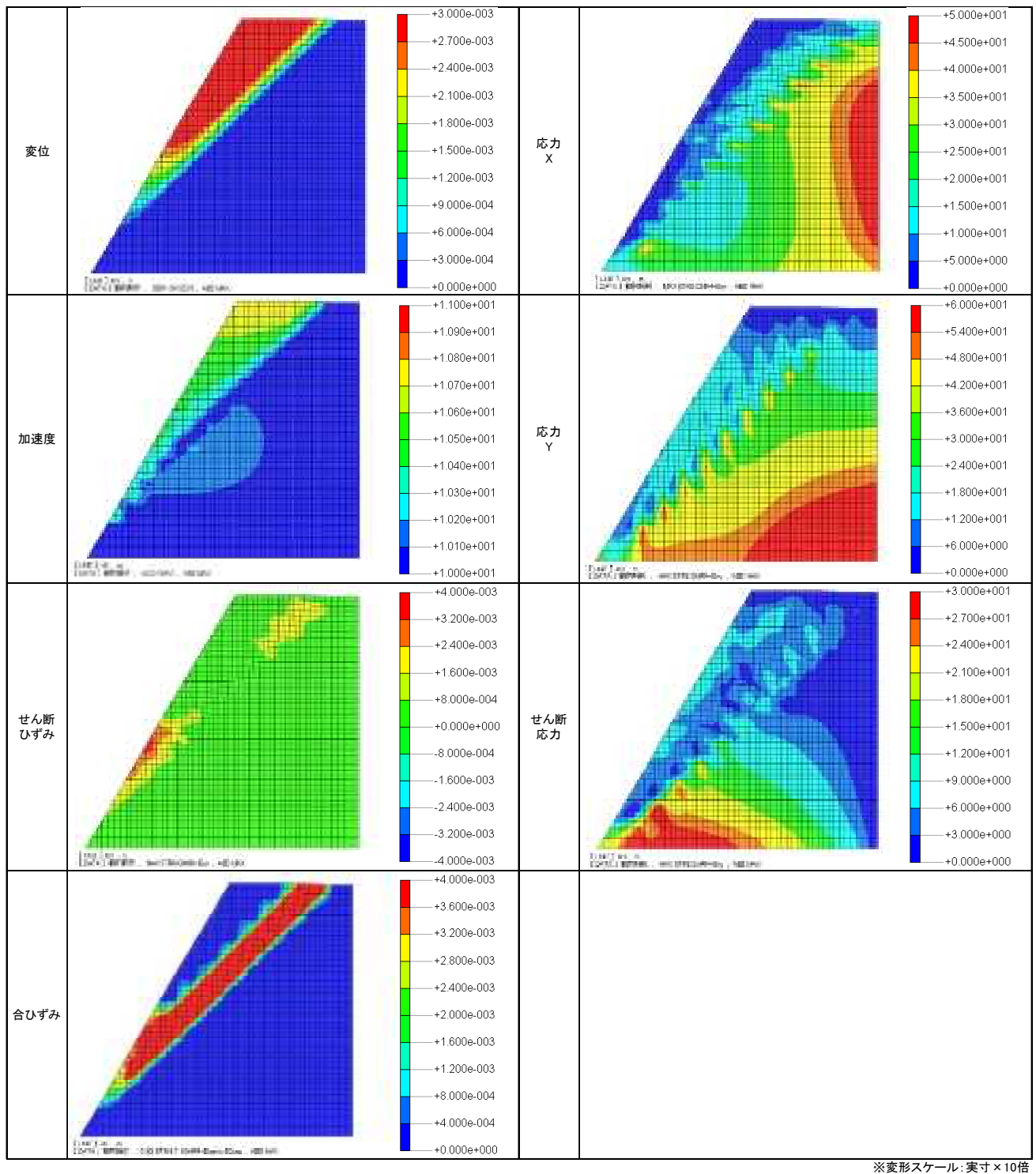
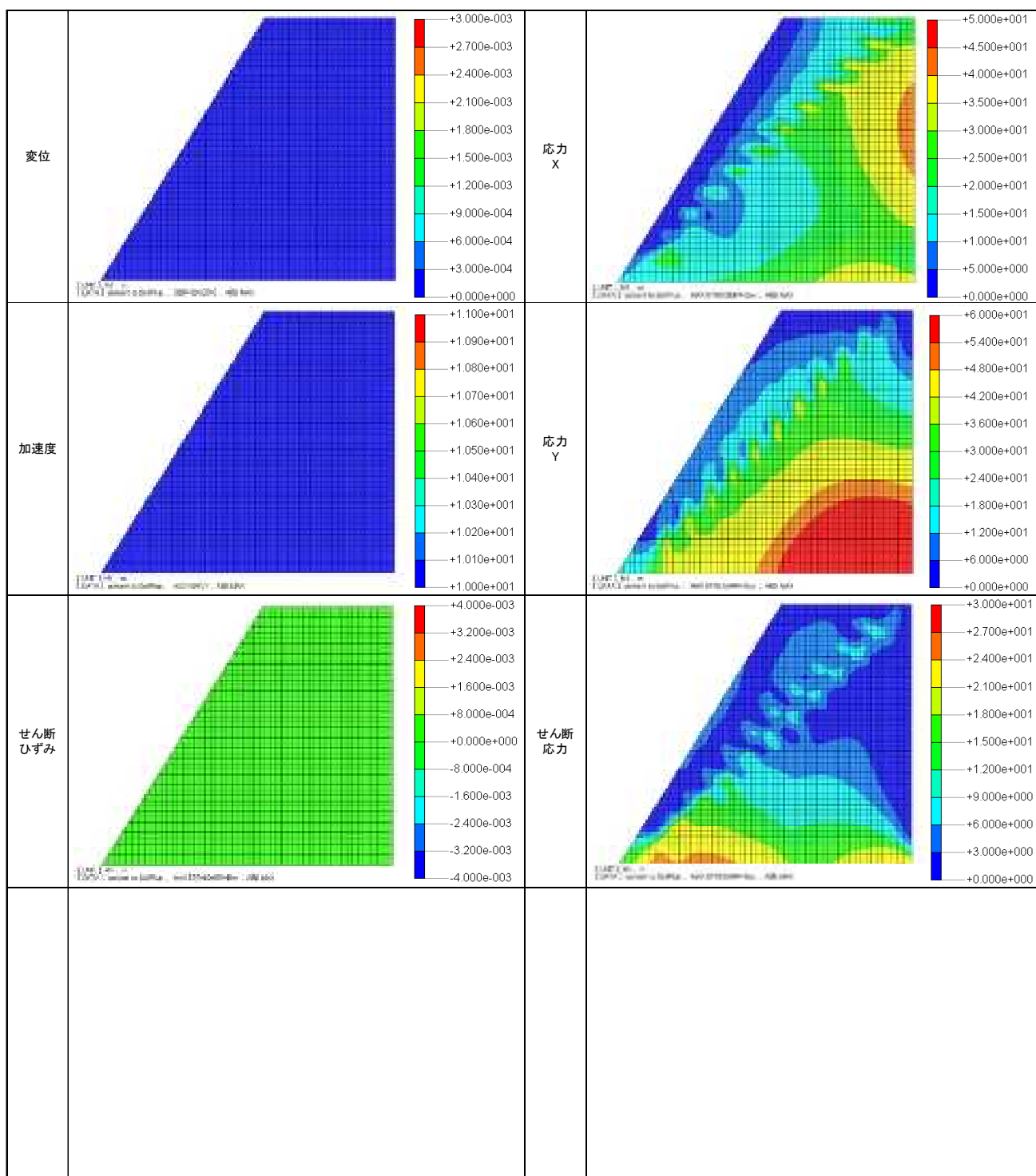


図 11.2.35 大型 3 層斜面 (Case22) 逐次非線形動的解析 最大応答分布図

② 等価線形解析



※変形スケール:実寸×10倍

図 11.2.36 大型 3 層斜面 (Case22) 等価線形解析 最大応答分布図



### 11.3 すべり線の探索・安定計算

#### 11.3.1 円弧による探索-応力履歴

応力履歴結果を用いて、円弧による安定計算を実施した。

##### (1) Case19

###### ① 逐次非線形動的解析

設定した探索条件を図 11.3.1 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.2 に、安全率の代表時刻を表 11.3.1 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.3 に示す。

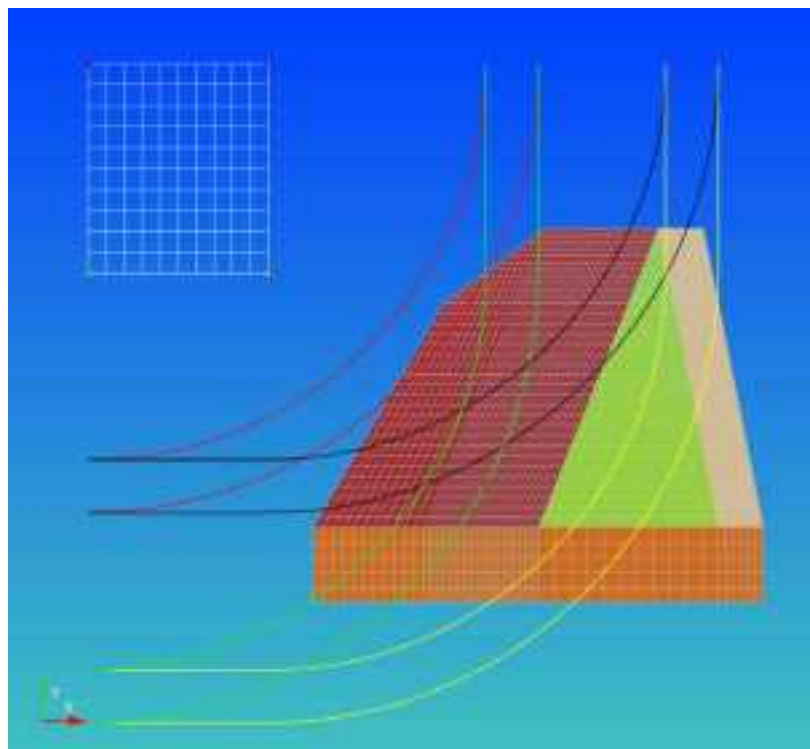


図 11.3.1 中型1層斜面 (Case19) 円弧 探索条件



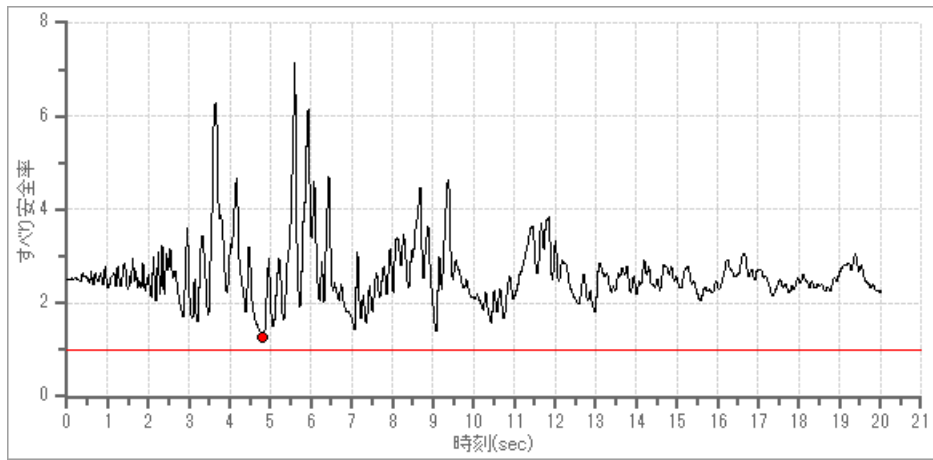


図 11.3.2 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率履歴 円弧-応力(地震時)

表 11.3.1 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率 ワースト10 円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	4.830	1.267
2	4.840	1.270
3	4.820	1.280
4	4.810	1.300
5	4.850	1.302
6	4.800	1.320
7	4.790	1.339
8	4.780	1.356
9	4.770	1.370
10	4.860	1.371

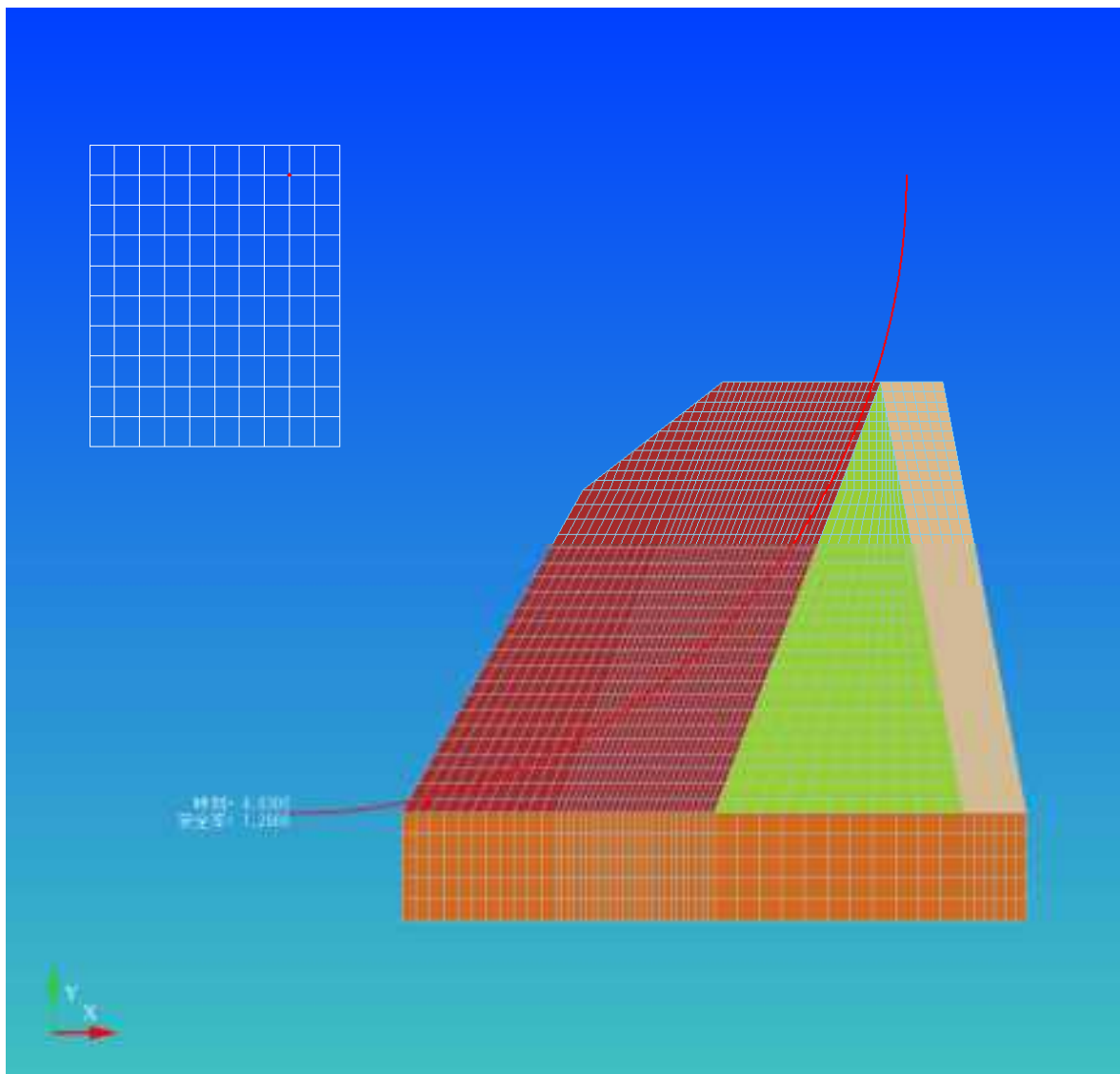


図 11.3.3 中型1層斜面 (Case19) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-応力(地震時)

② 等価線形解析

設定した探索条件を図 11.3.4 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.5 に、安全率の代表時刻を表 11.3.2 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.6 に示す。

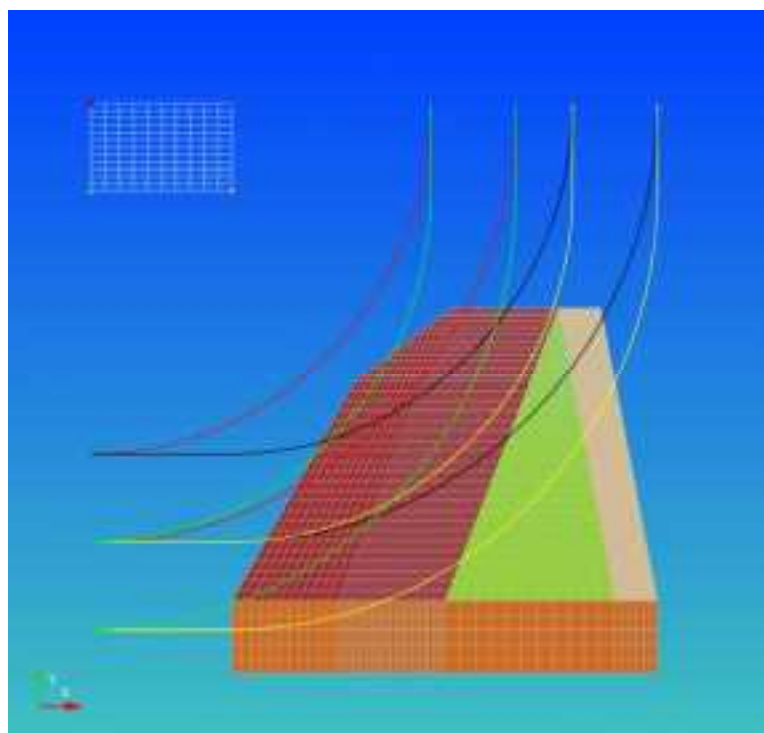


図 11.3.4 中型1層斜面 (Case19) 円弧 探索条件

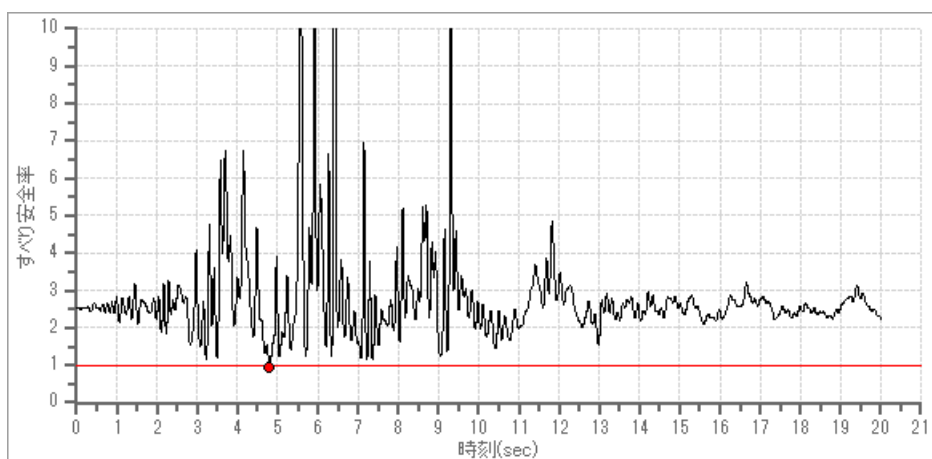


図 11.3.5 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率履歴 円弧-応力(地震時)

表 11.3.2 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率 ワorst 10 円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	4.800	0.955
2	4.810	0.976
3	4.790	0.981
4	4.820	1.031
5	4.780	1.045
6	4.830	1.124
7	7.360	1.145
8	7.220	1.151
9	4.770	1.153
10	3.220	1.164

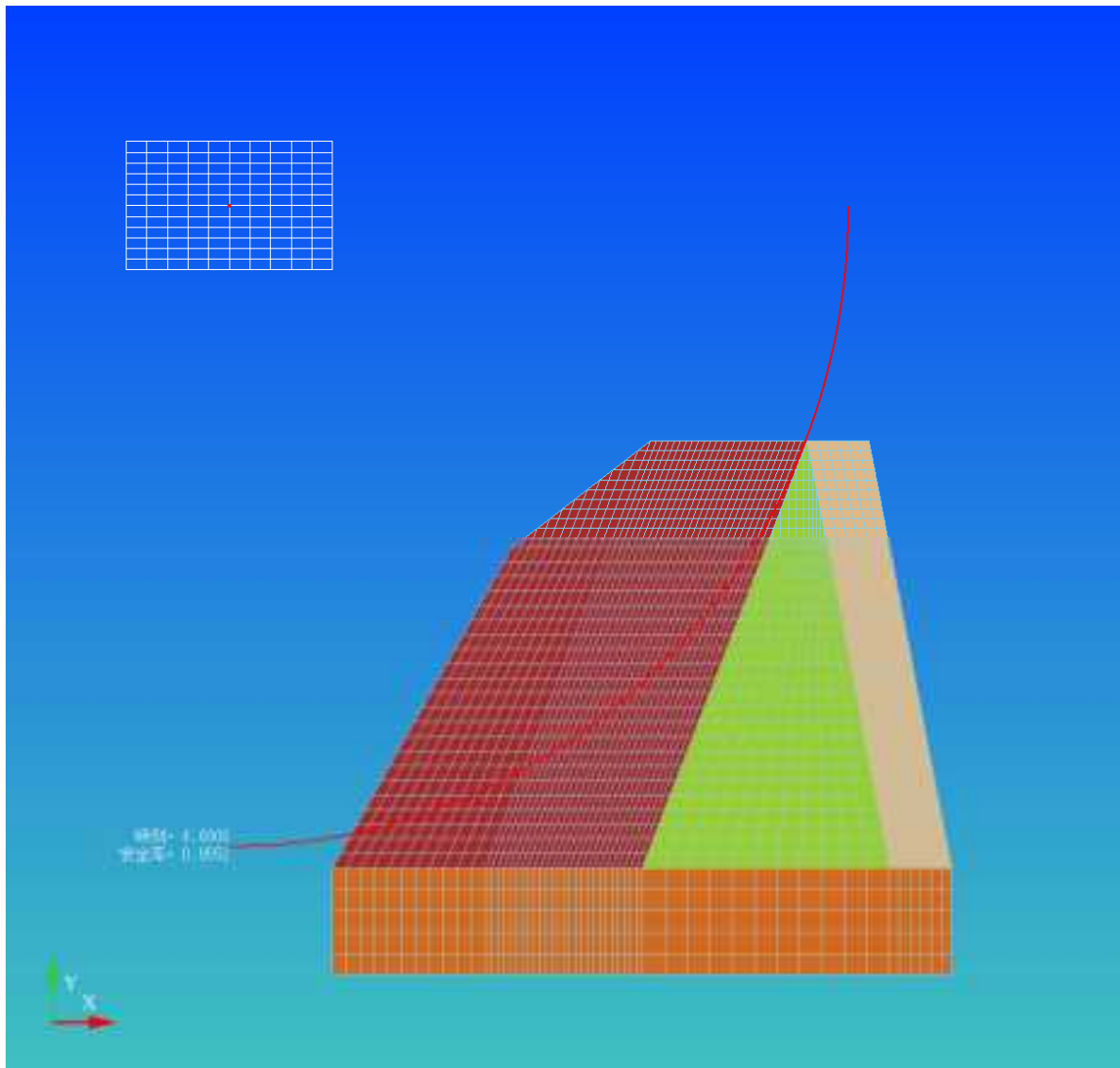


図 11.3.6 中型1層斜面 (Case19) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-応力(地震時)

## (2) Case20

### ① 逐次非線形動的解析

設定した探索条件を図 11.3.7 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.8 に、安全率の代表時刻を表 11.3.3 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.9 に示す。

	定号	定号	定号	定号
円弧探索	1.000	4.000	4.000	1.000
	1.000	2.000	1.000	4.000

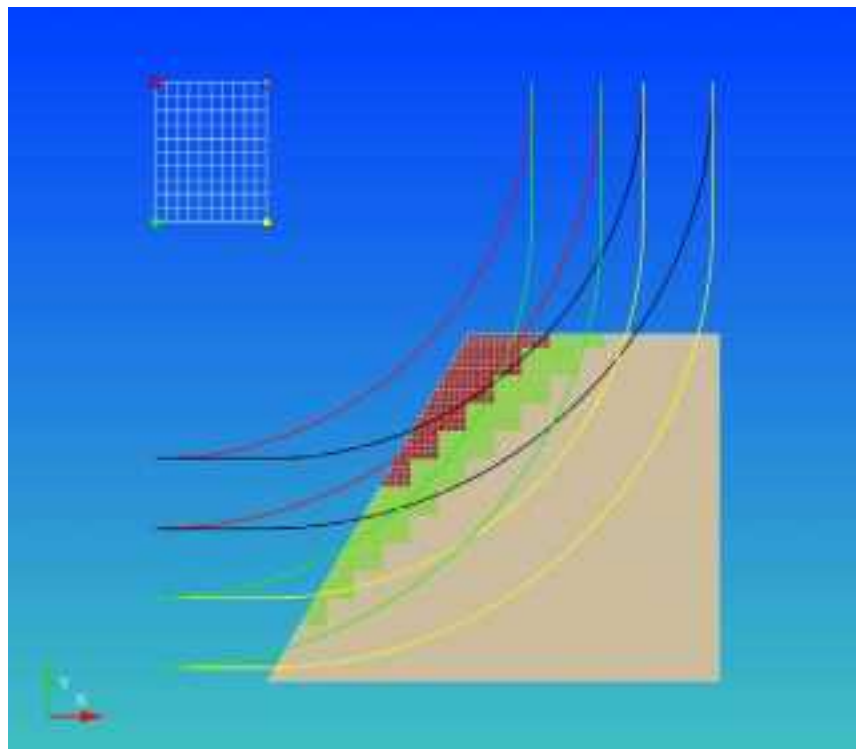


図 11.3.7 中型3層斜面 (Case20) 円弧 探索条件

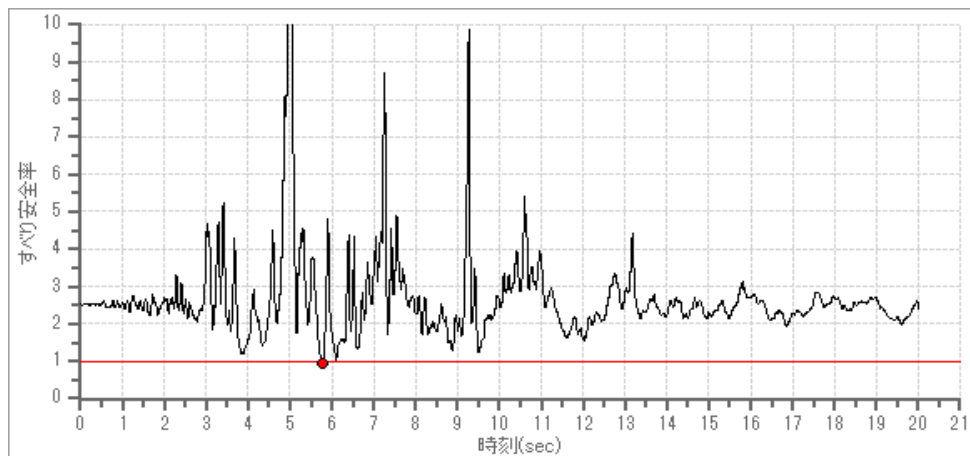


図 11.3.8 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率履歴円弧-応力(地震時)

表 11.3.3 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率 ワースト10 円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	5.790	0.953
2	5.800	0.954
3	5.760	0.984
4	5.780	0.988
5	5.770	0.992
6	5.750	0.994
7	6.100	1.019
8	5.740	1.028
9	5.810	1.037
10	6.110	1.054

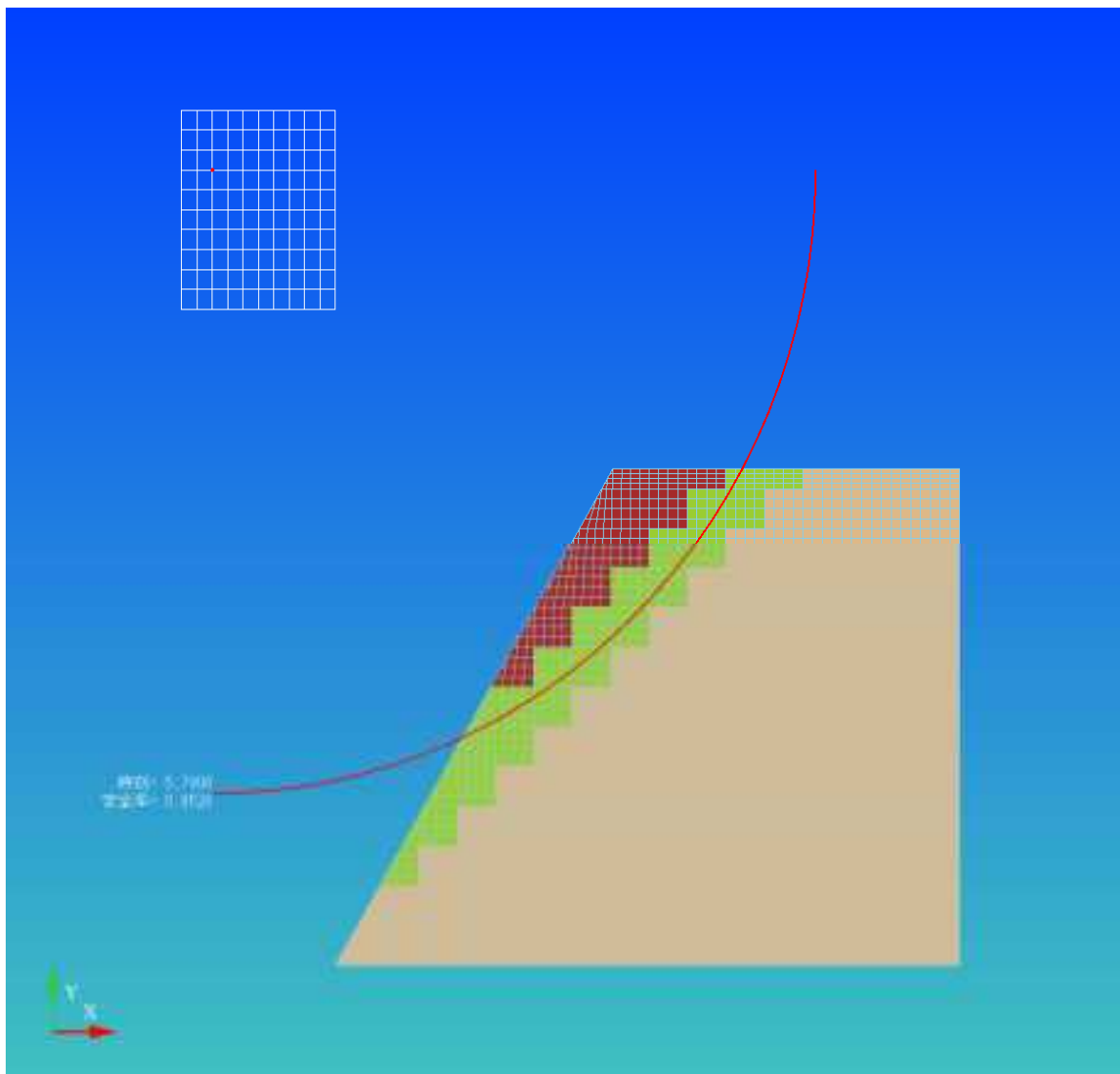


図 11.3.9 中型3層斜面 (Case20) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-応力(地震時)



② 等価線形解析

設定した探査条件を図 11.3.10 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.11 に、安全率の代表時刻を表 11.3.4 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.12 に示す。

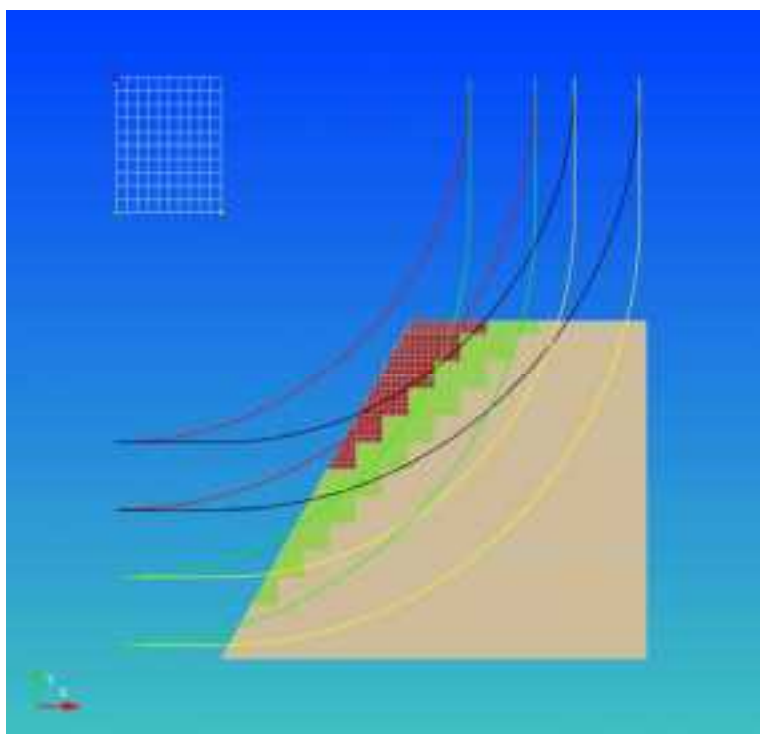


図 11.3.10 中型3層斜面 (Case20) 円弧 探索条件

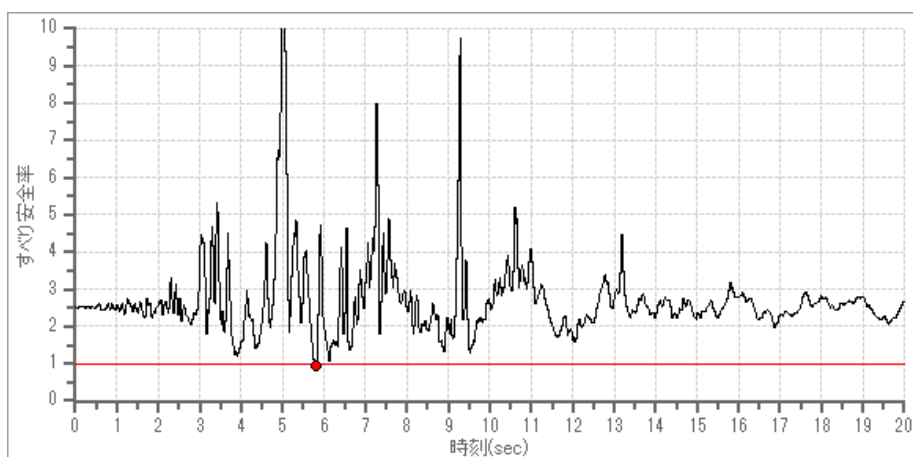


図 11.3.11 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率履歴円弧-応力(地震時)

表 11.3.4 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率 ワースト10 円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	5.810	0.945
2	5.820	0.945
3	5.770	1.035
4	5.780	1.035
5	5.830	1.044
6	5.840	1.044
7	5.790	1.045
8	5.800	1.045
9	6.110	1.075
10	6.120	1.075

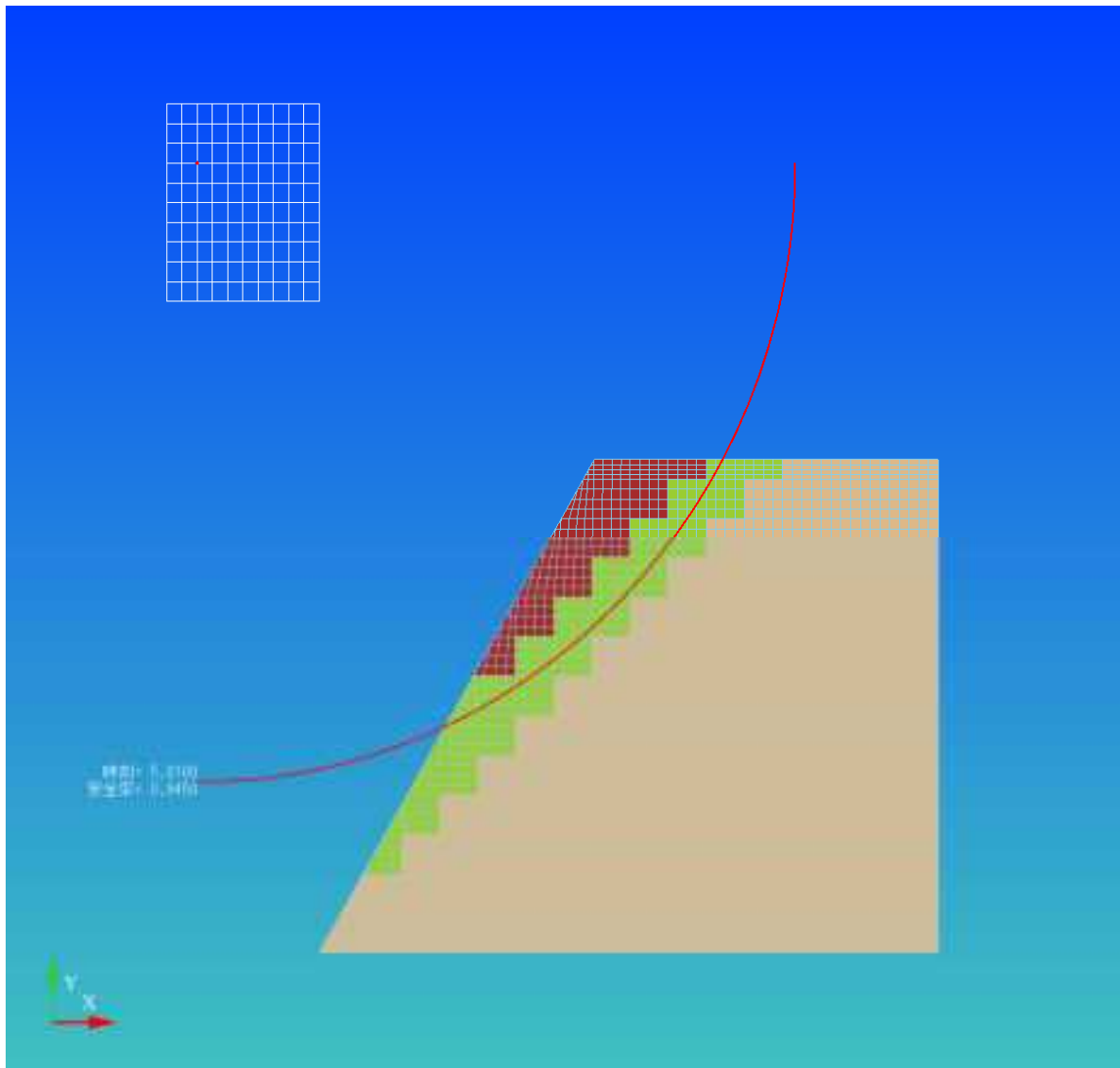


図 11.3.12 中型3層斜面 (Case20) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-応力(地震時)

### (3) Case21

#### ① 逐次非線形動的解析

設定した探索条件を図 11.3.13 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.14 に、安全率の代表時刻を表 11.3.5 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.15 に示す。

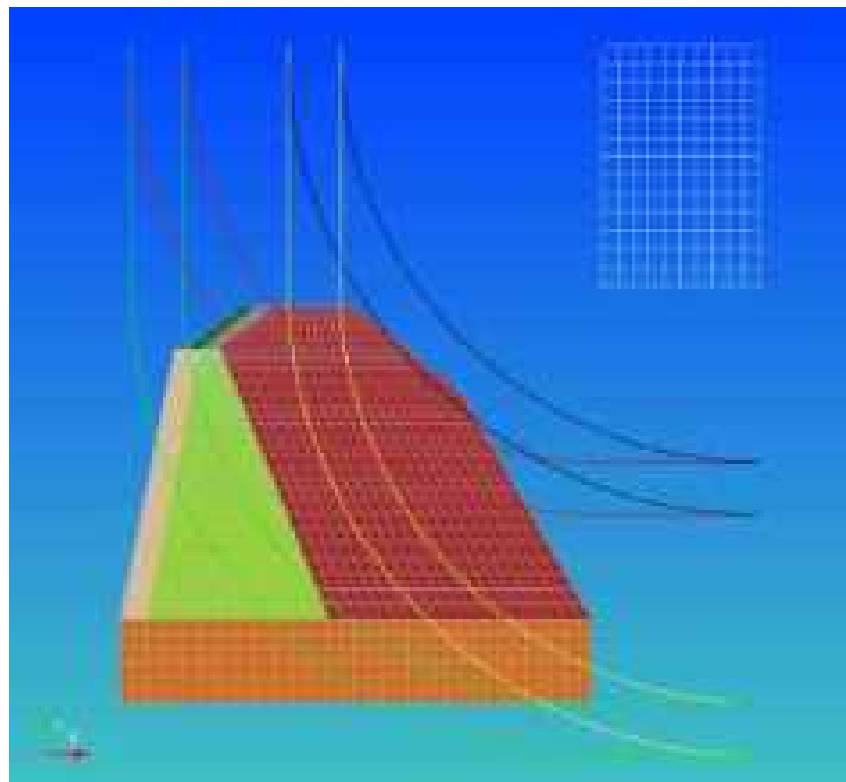


図 11.3.13 大型1層斜面 (Case21) 円弧 探索条件

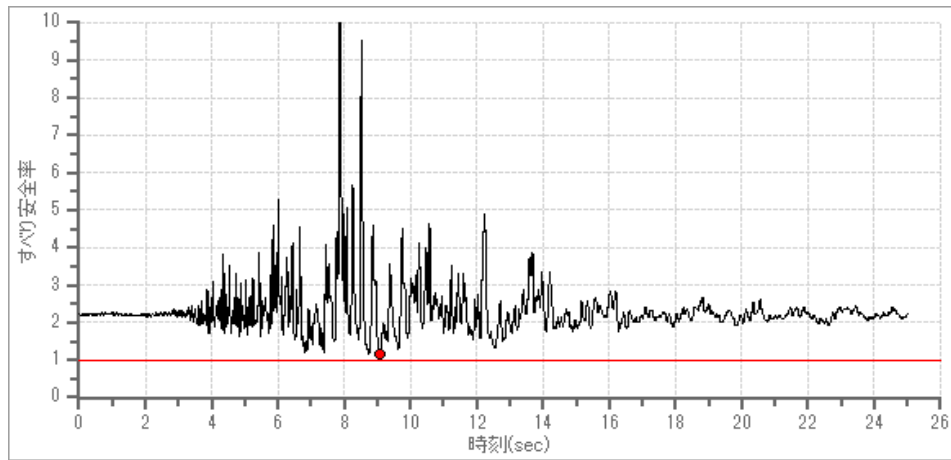


図 11.3.14 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率履歴 円弧-応力(地震時)

表 11.3.5 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率 ワースト10 円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	9.070	1.140
2	9.080	1.141
3	9.090	1.157
4	9.060	1.168
5	8.740	1.172
6	8.750	1.177
7	9.100	1.181
8	6.800	1.189
9	8.760	1.191
10	9.050	1.204

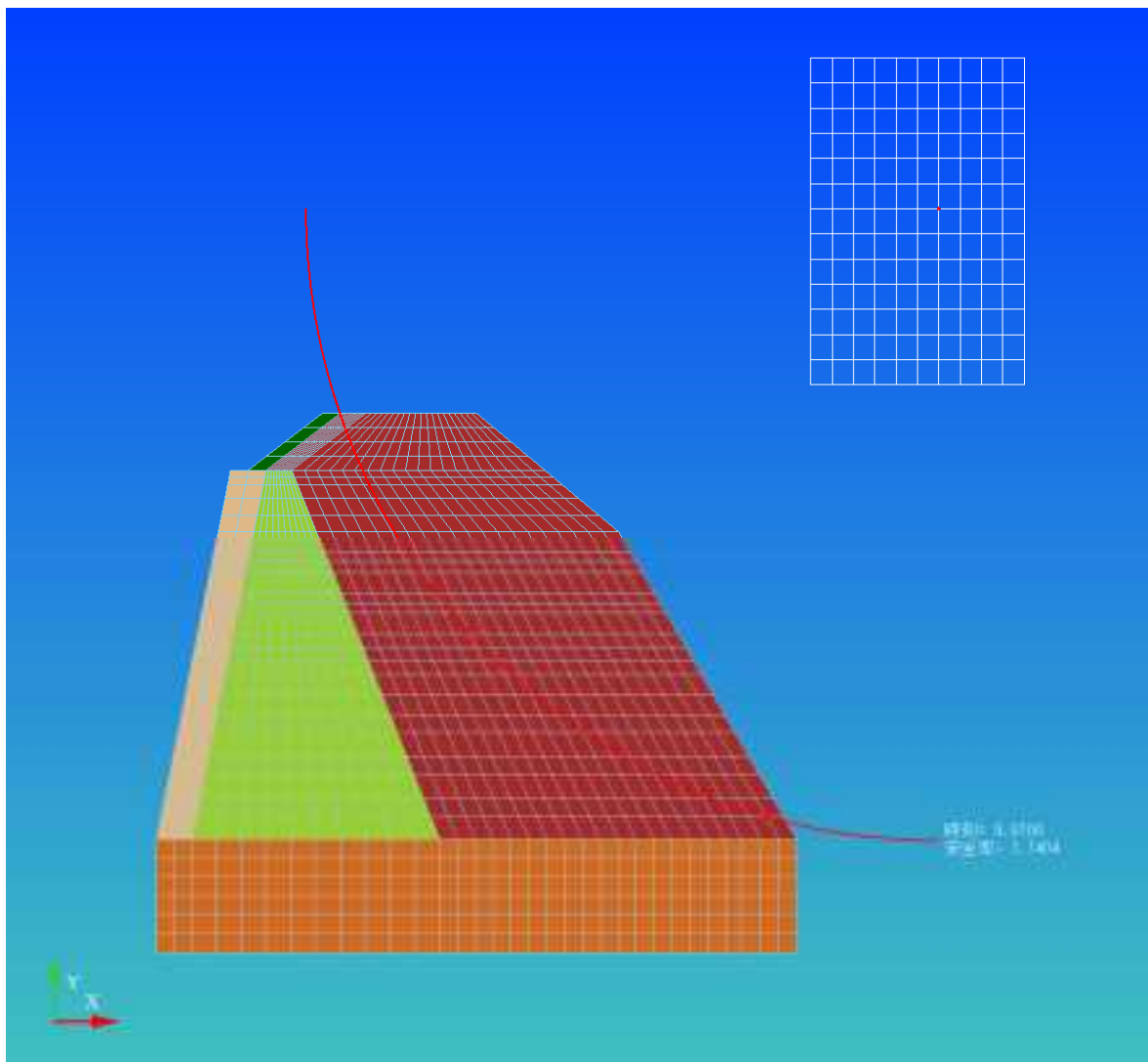


図 11.3.15 大型1層斜面 (Case21) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-応力(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を図 11.3.16 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.17 に、安全率の代表時刻を表 11.3.6 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.18 に示す。

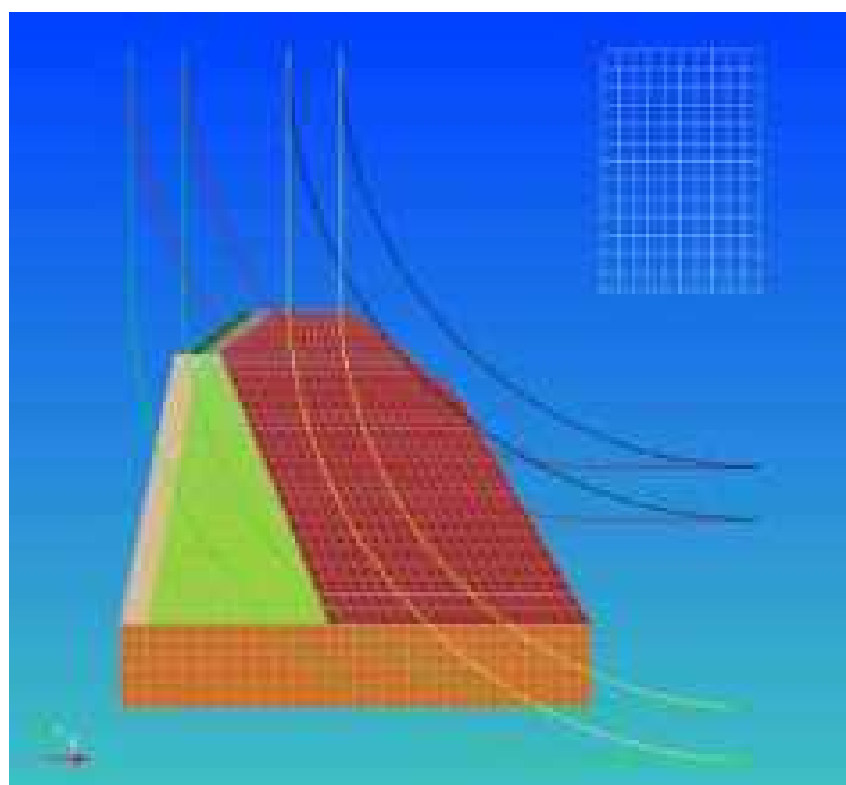


図 11.3.16 大型1層斜面 (Case21) 円弧 探索条件

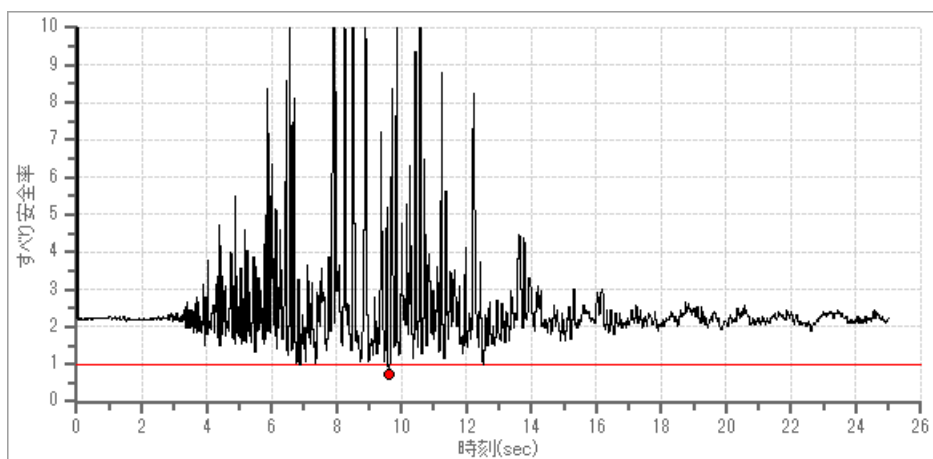


図 11.3.17 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率履歴 円弧-応力(地震時)

表 11.3.6 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率 ワースト10 円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	9.610	0.727
2	9.620	0.727
3	9.630	0.814
4	9.640	0.814
5	9.590	0.958
6	9.600	0.958
7	12.510	0.991
8	12.520	0.991
9	6.870	1.005
10	6.880	1.005



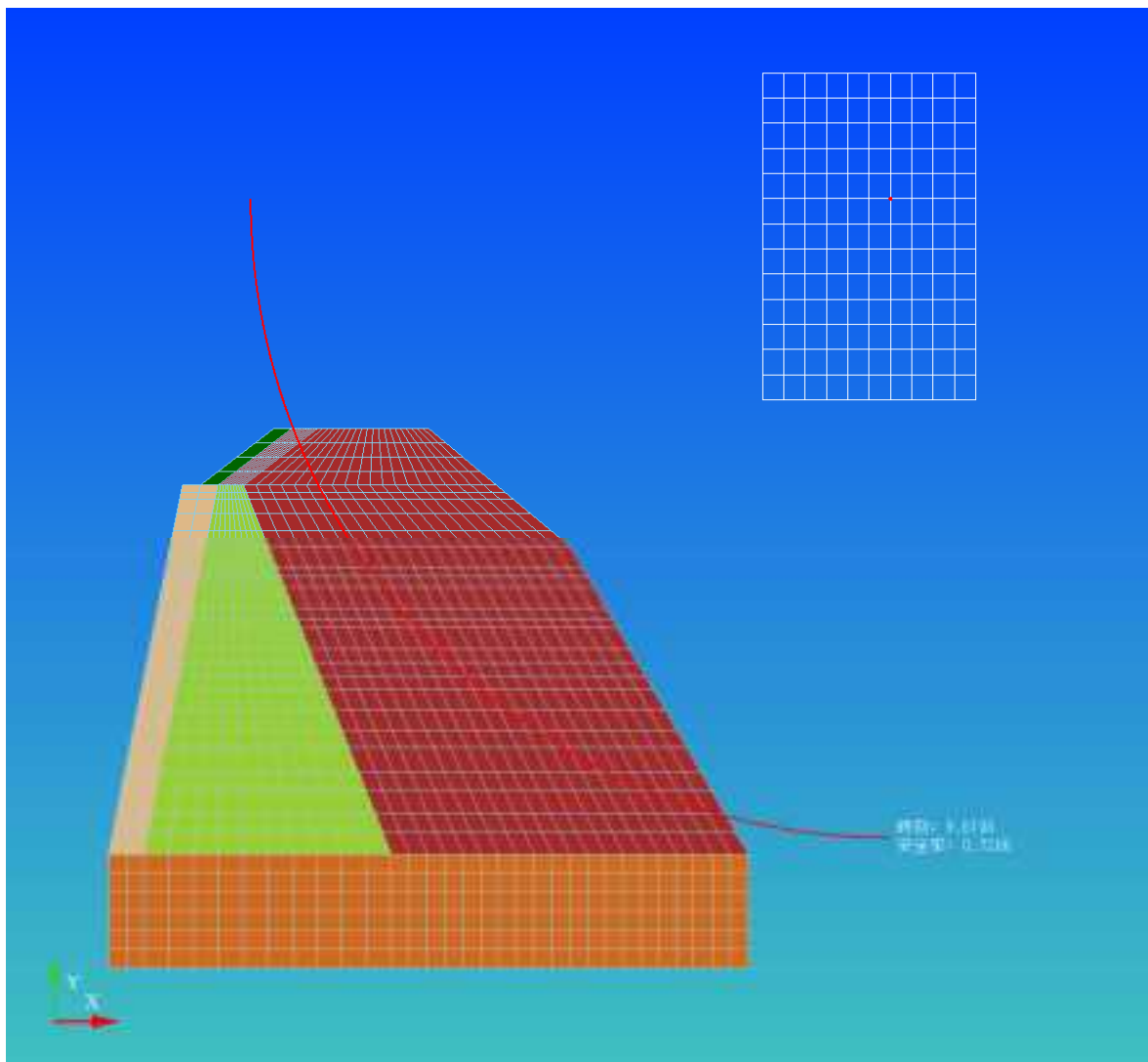


図 11.3.18 大型1層斜面 (Case21) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-応力(地震時)

#### (4) Case22

##### ① 逐次非線形動的解析

設定した探索条件を図 11.3.19 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.20 に、安全率の代表時刻を表 11.3.7 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.21 に示す。

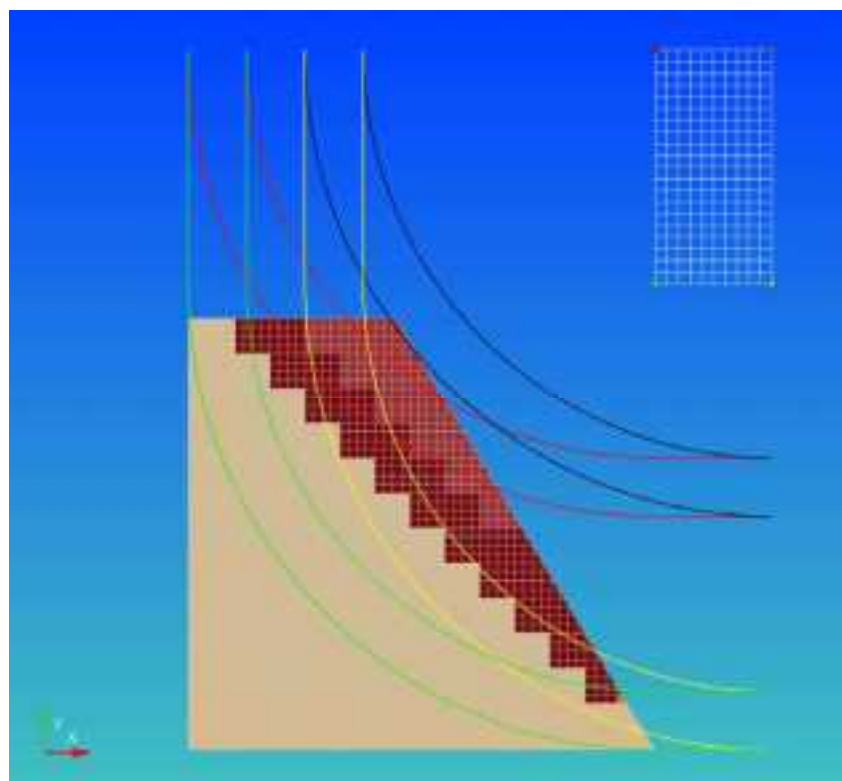


図 11.3.19 大型3層斜面 (Case22) 円弧 探索条件

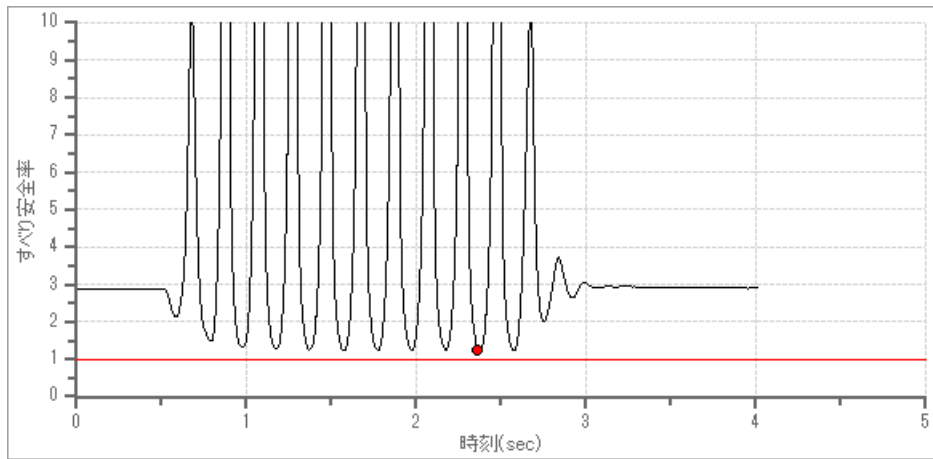


図 11.3.20 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率履歴 円弧-応力(地震時)

表 11.3.7 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率 ワースト10 円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	2.370	1.241
2	2.570	1.243
3	2.580	1.244
4	1.970	1.245
5	2.170	1.245
6	1.770	1.245
7	2.380	1.246
8	1.570	1.249
9	2.180	1.251
10	1.980	1.252

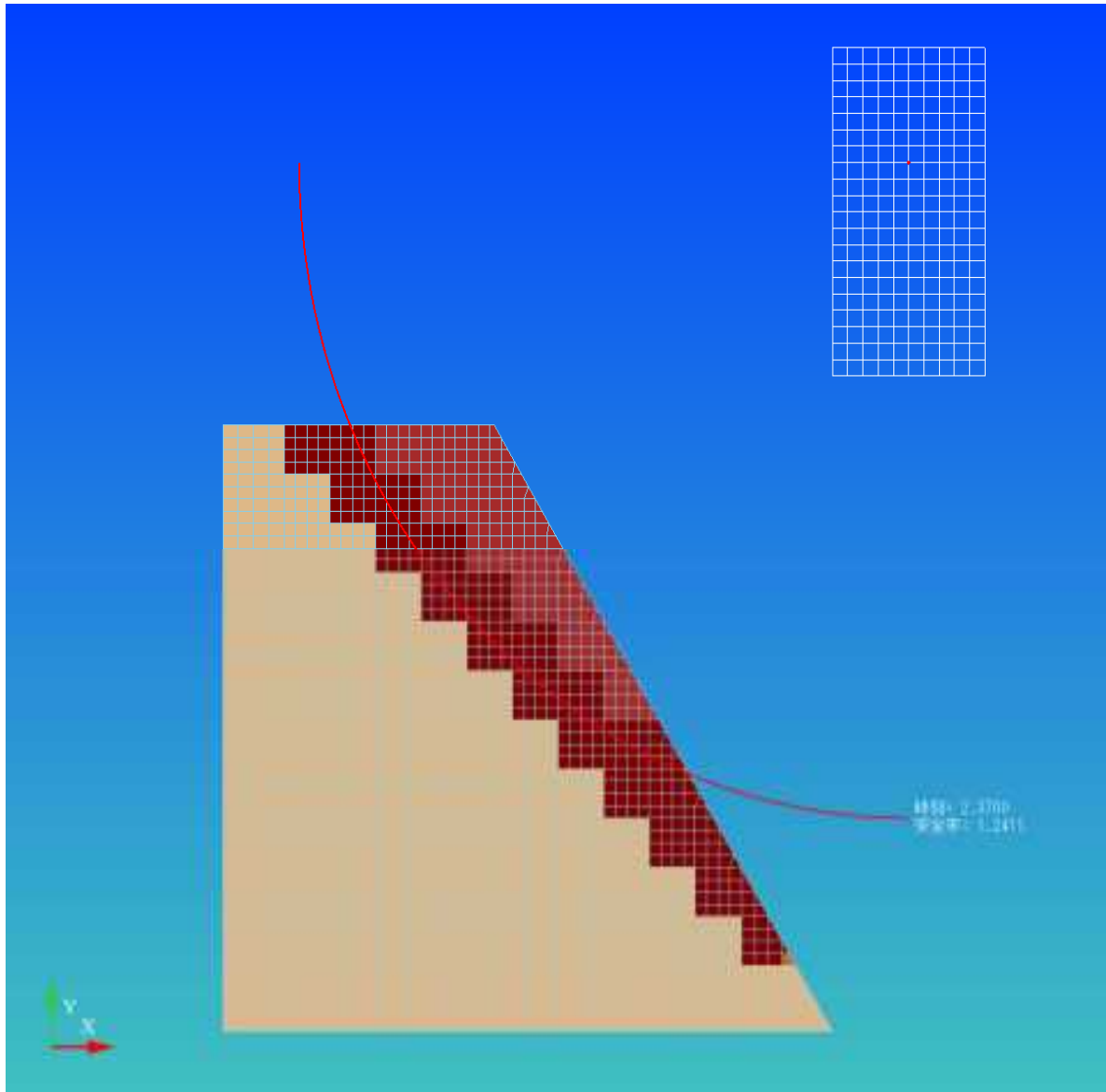


図 11.3.21 大型3層斜面 (Case22) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-応力(地震時)

② 等価線形解析

設定した探索条件を図 11.3.22 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.23 に、安全率の代表時刻を表 11.3.8 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.24 に示す。

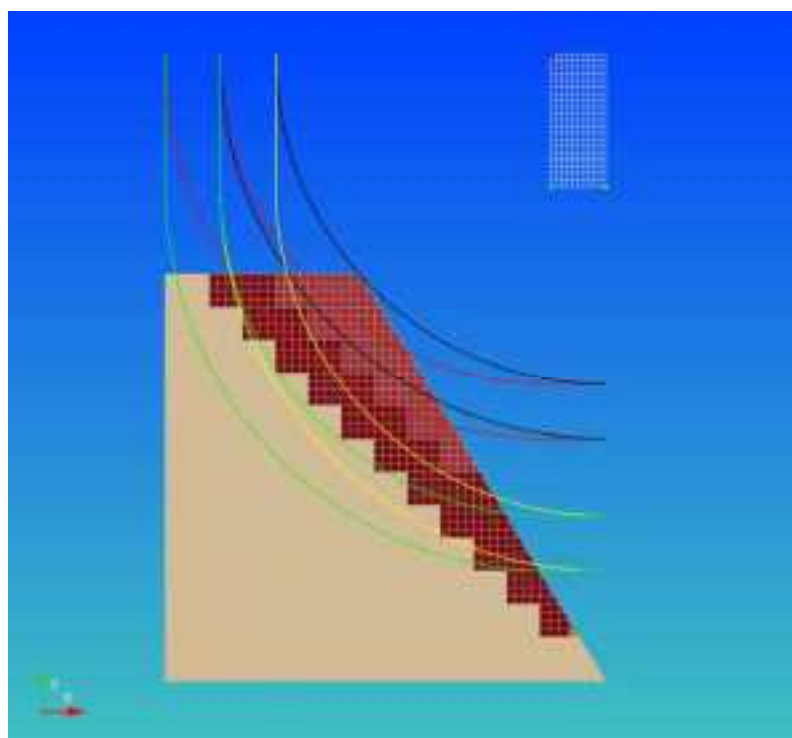


図 11.3.22 大型3層斜面 (Case22) 円弧 探索条件

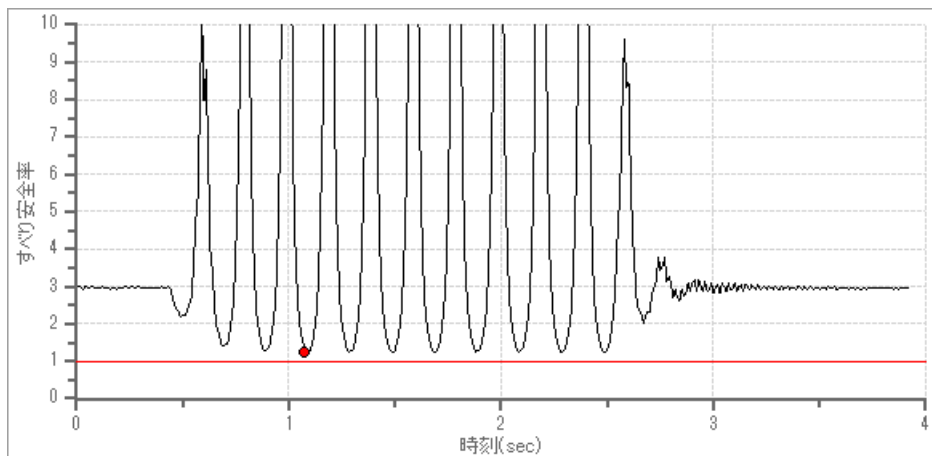


図 11.3.23 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率履歴 円弧-応力(地震時)

表 11.3.8 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率 ワースト10 円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	1.170	1.248
2	1.580	1.253
3	1.370	1.254
4	1.780	1.254
5	2.570	1.255
6	1.970	1.258
7	2.380	1.259
8	1.770	1.259
9	2.370	1.261
10	1.180	1.263

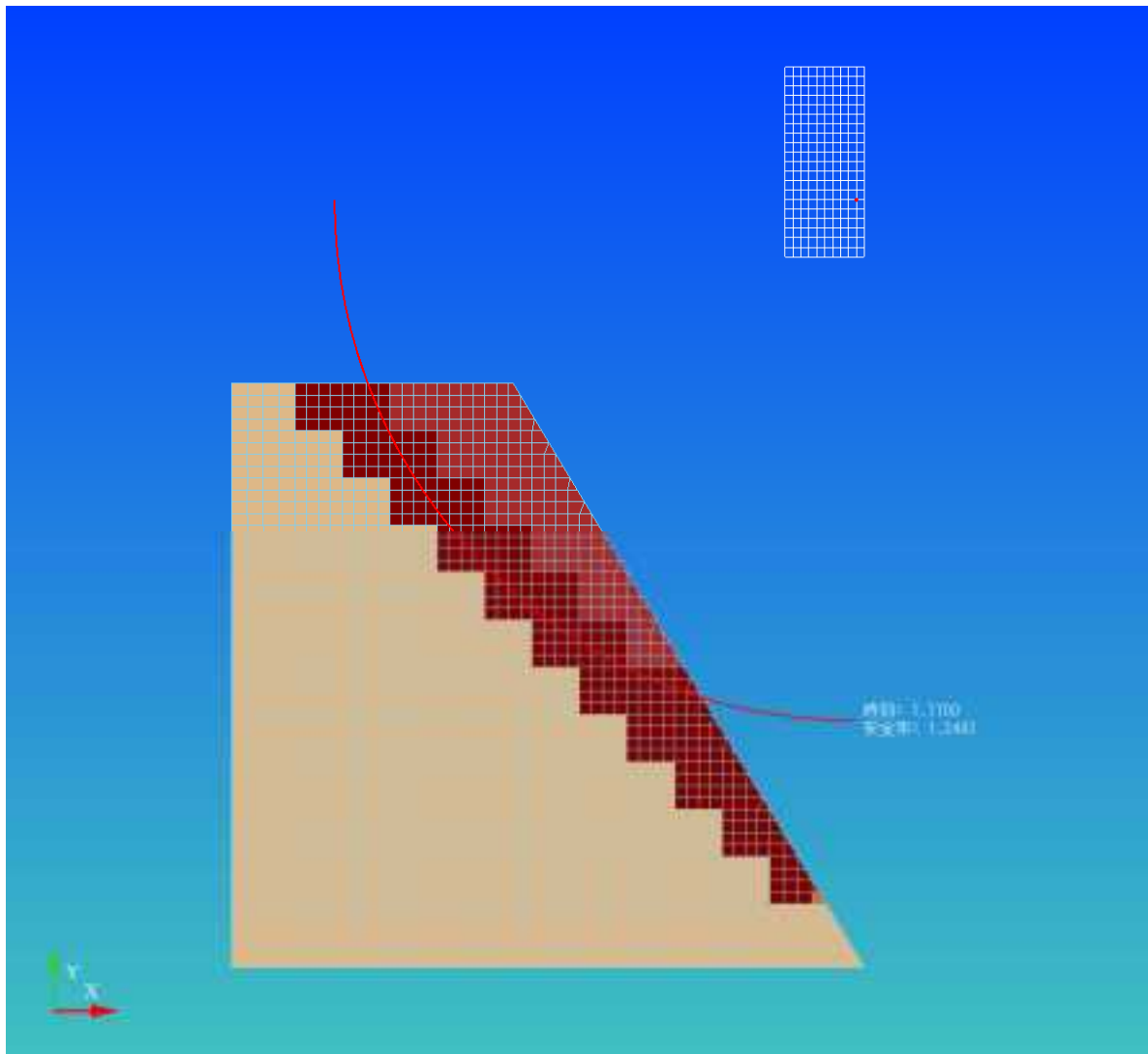


図 11.3.24 大型3層斜面 (Case22) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-応力(地震時)

### 11.3.2 円弧による探索-加速度履歴

加速度履歴結果を用いて、円弧による安定計算を実施した。

#### (1) Case19

##### ① 逐次非線形動的解析

設定した探査条件を図 11.3.25 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.26 に、安全率の代表時刻を表 11.3.9 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.27 に示す。

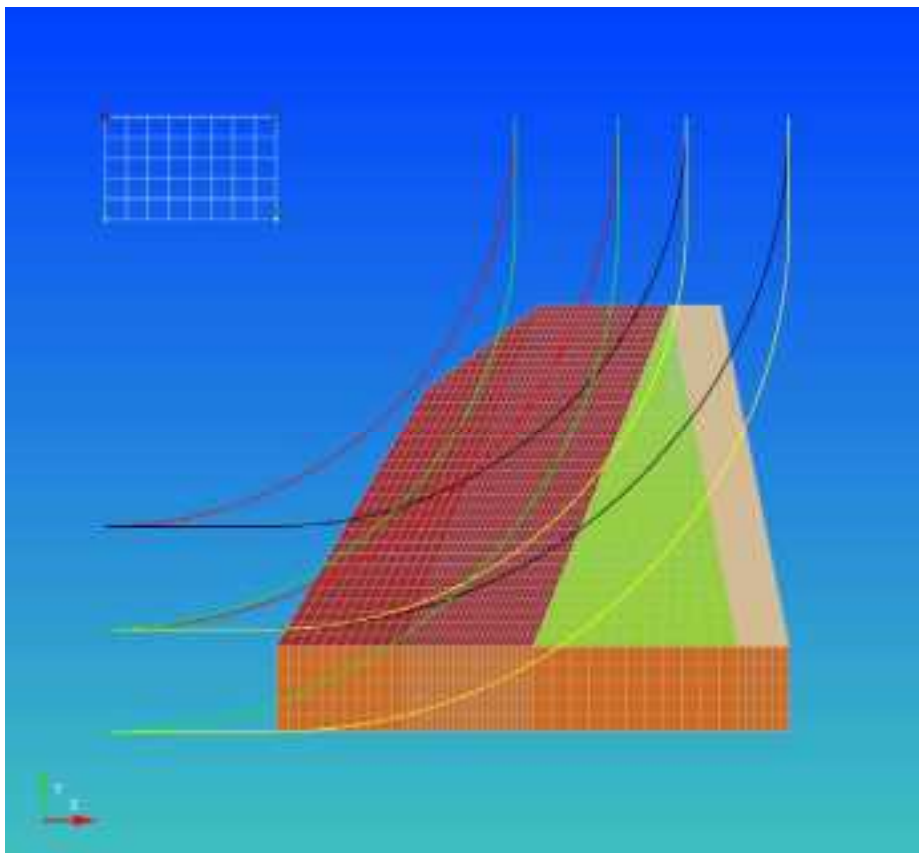


図 11.3.25 中型1層斜面 (Case19) 円弧 探索条件



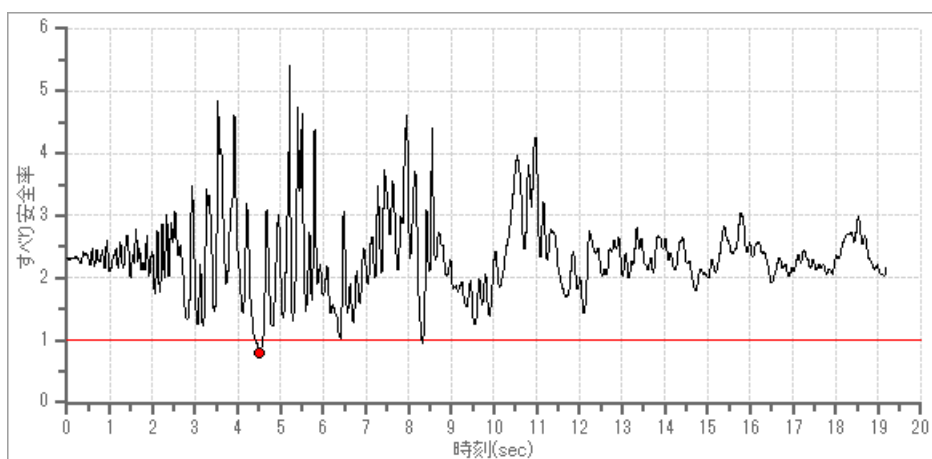


図 11.3.26 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率履歴 円弧-加速度(地震時)

表 11.3.9 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率 ワースト10 円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	4.750	0.795
2	4.740	0.802
3	4.760	0.813
4	4.770	0.828
5	4.730	0.837
6	4.780	0.843
7	4.790	0.852
8	4.800	0.864
9	4.720	0.884
10	4.810	0.890

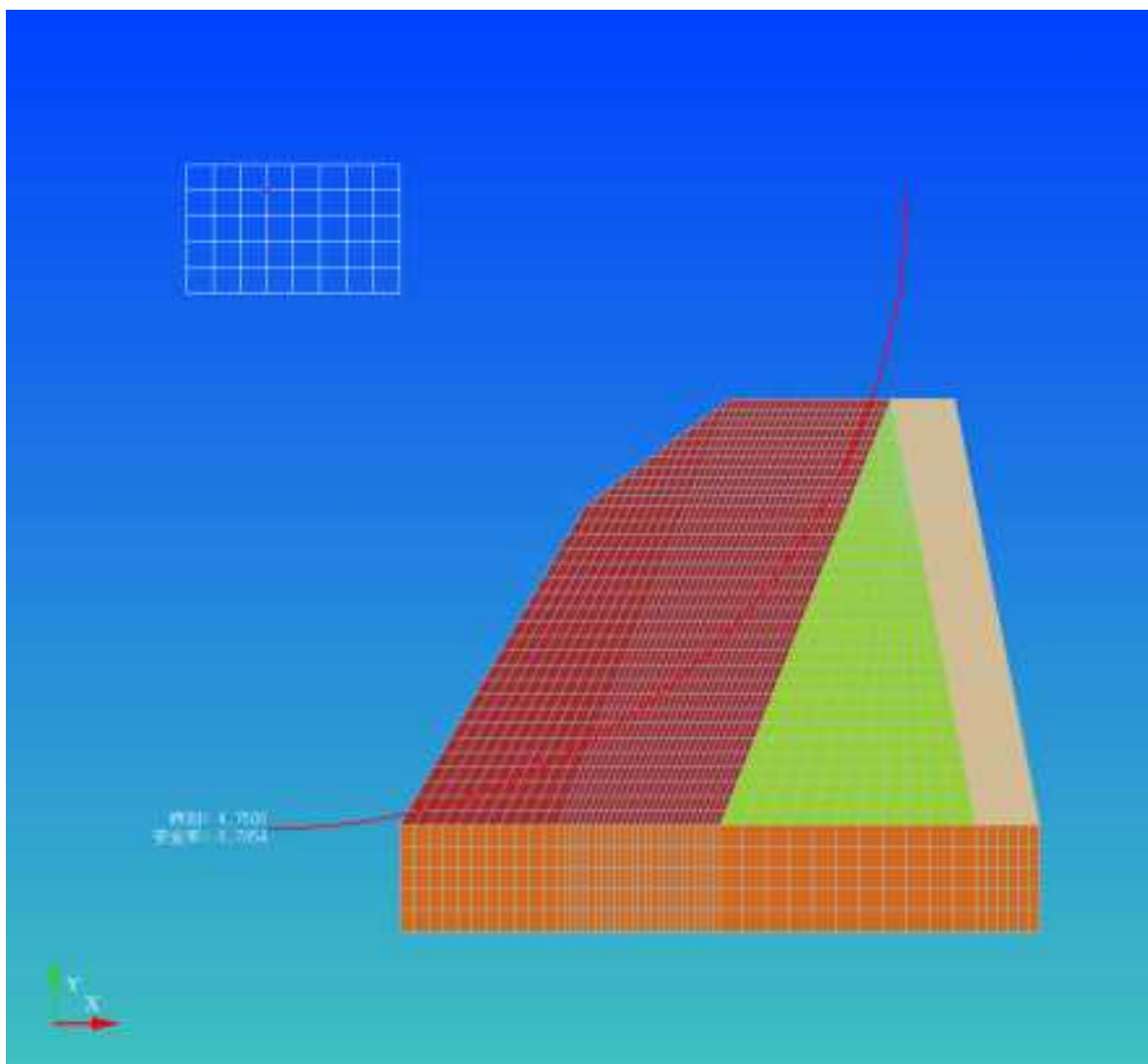


図 11.3.27 中型1層斜面 (Case19) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-加速度(地震時)

② 等価線形解析

設定した探索条件を図 11.3.28 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.29 に、安全率の代表時刻を表 11.3.10 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.30 に示す。

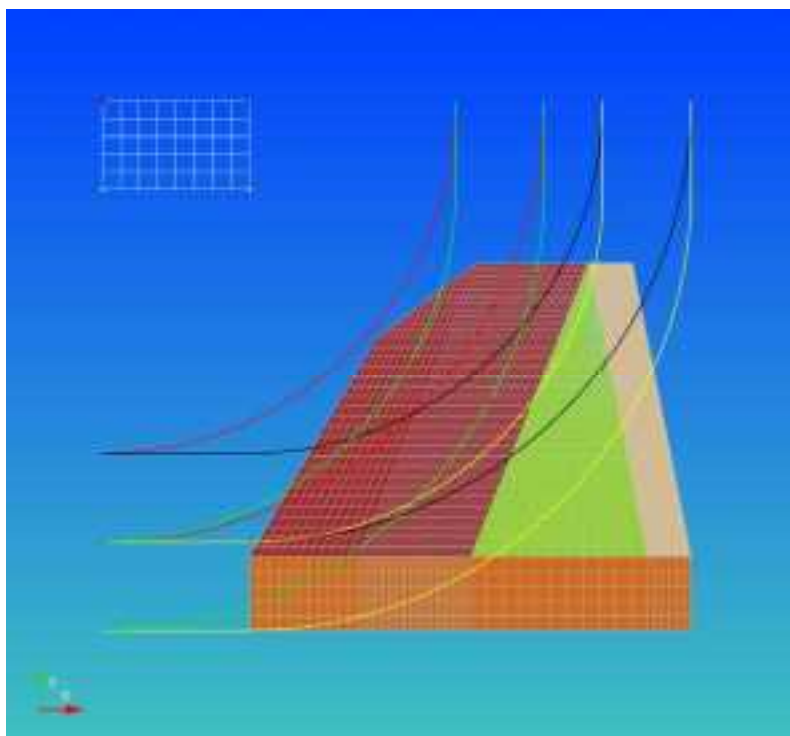


図 11.3.28 中型1層斜面 (Case19) 円弧 探索条件

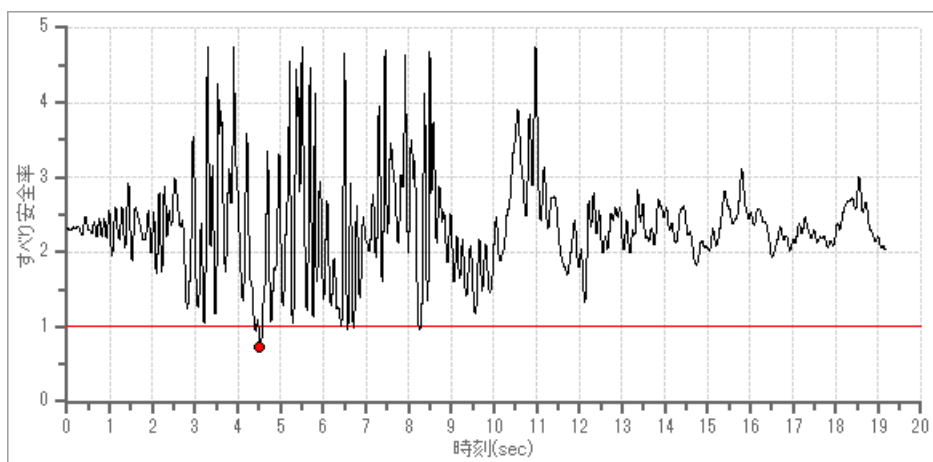


図 11.3.29 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率履歴 円弧-加速度(地震時)

表 11.3.10 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率 ワースト10 円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	4.790	0.730
2	4.780	0.736
3	4.800	0.751
4	4.770	0.767
5	4.810	0.799
6	4.760	0.834
7	4.820	0.878
8	4.750	0.930
9	4.670	0.940
10	4.680	0.946

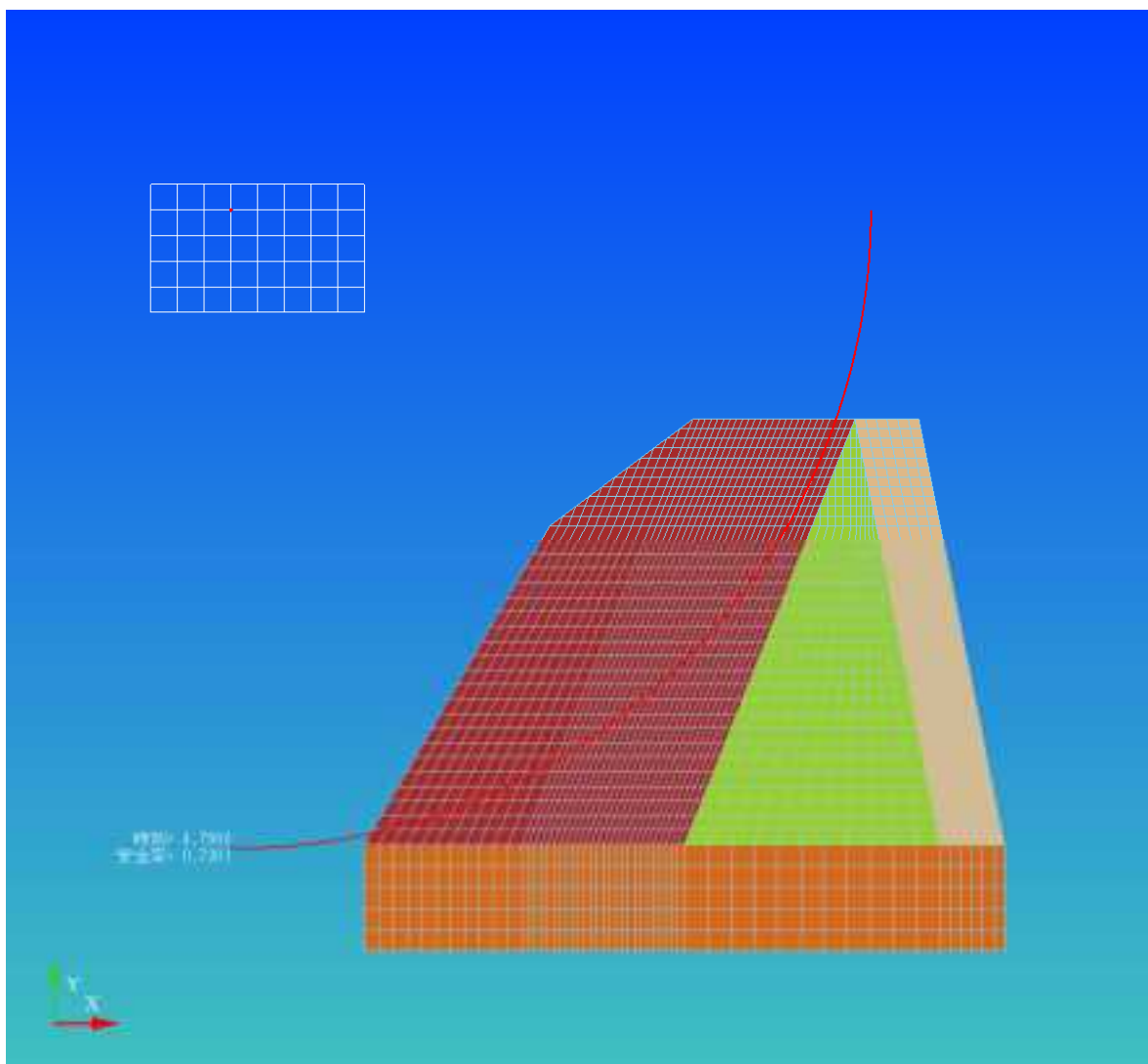


図 11.3.30 中型1層斜面 (Case19) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-加速度(地震時)

(2) Case20

① 逐次非線形動的解析

設定した探索条件を図 11.3.31 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.32 に、安全率の代表時刻を表 11.3.11 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.33 に示す。

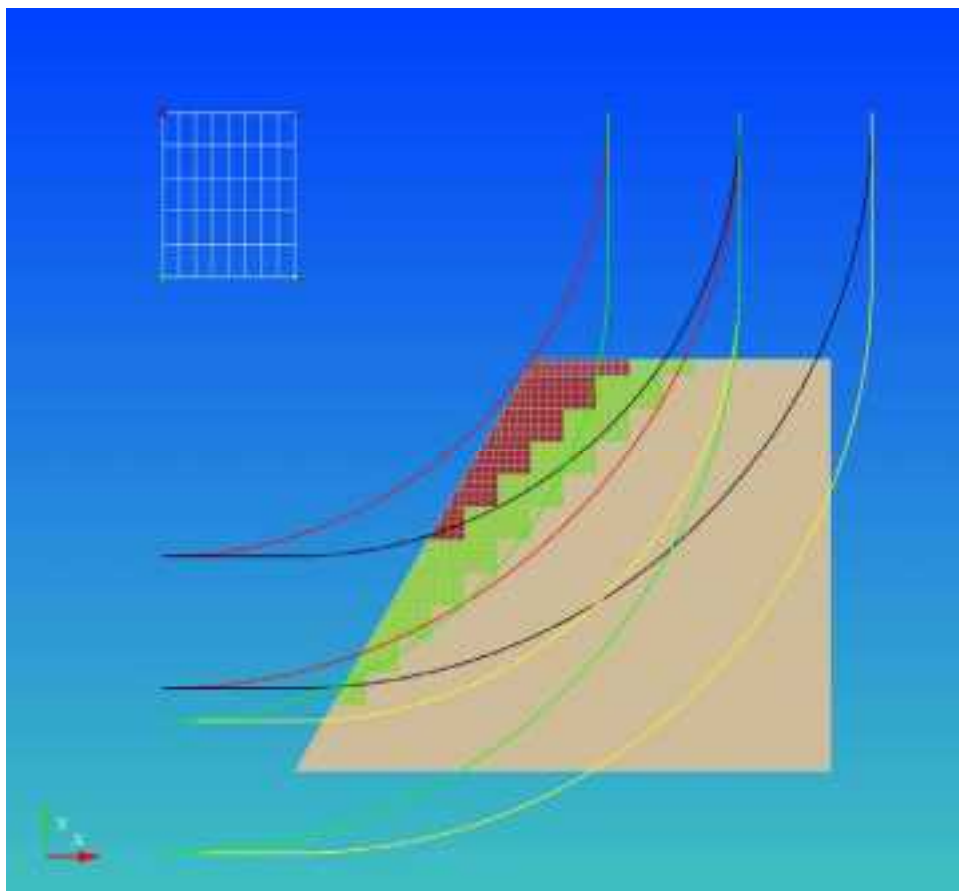


図 11.3.31 中型3層斜面 (Case20) 円弧 探索条件

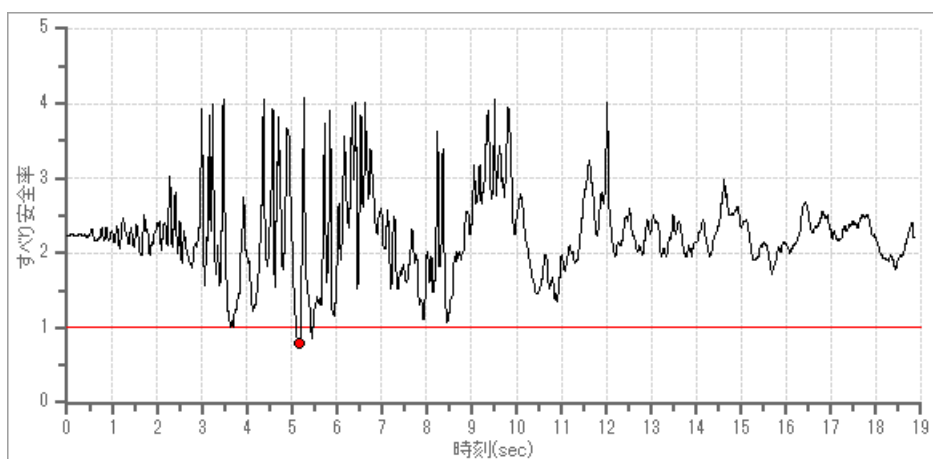


図 11.3.32 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率履歴円弧-加速度(地震時)

表 11.3.11 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率 ワースト10 円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	5.790	0.791
2	5.800	0.816
3	5.750	0.829
4	5.780	0.832
5	5.760	0.832
6	5.770	0.845
7	5.740	0.849
8	6.100	0.868
9	5.730	0.876
10	6.090	0.879

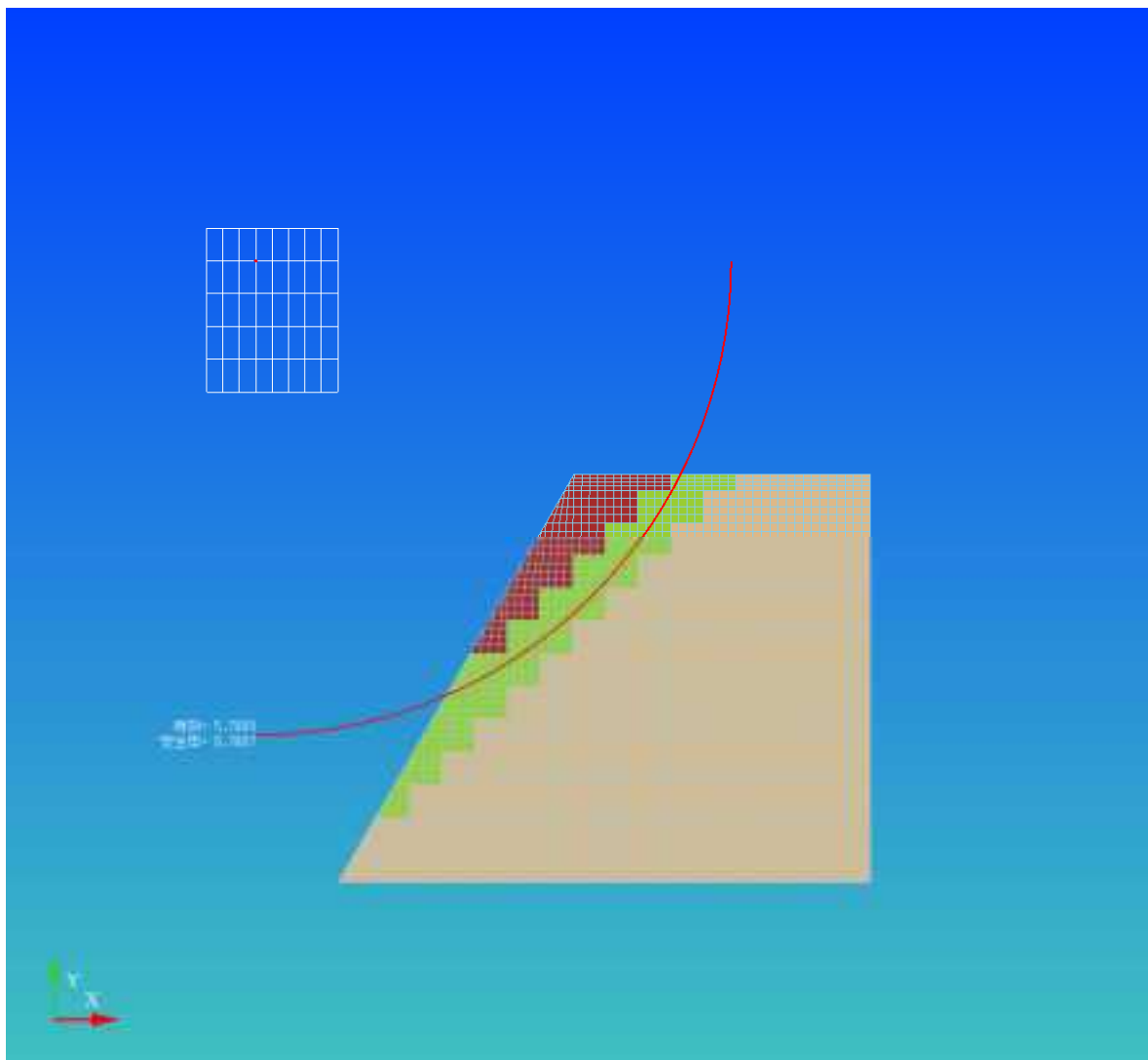


図 11.3.33 中型3層斜面 (Case20) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-加速度(地震時)



## ② 等価線形解析

設定した探索条件を図 11.3.34 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.35 に、安全率の代表時刻を表 11.3.12 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.36 に示す。

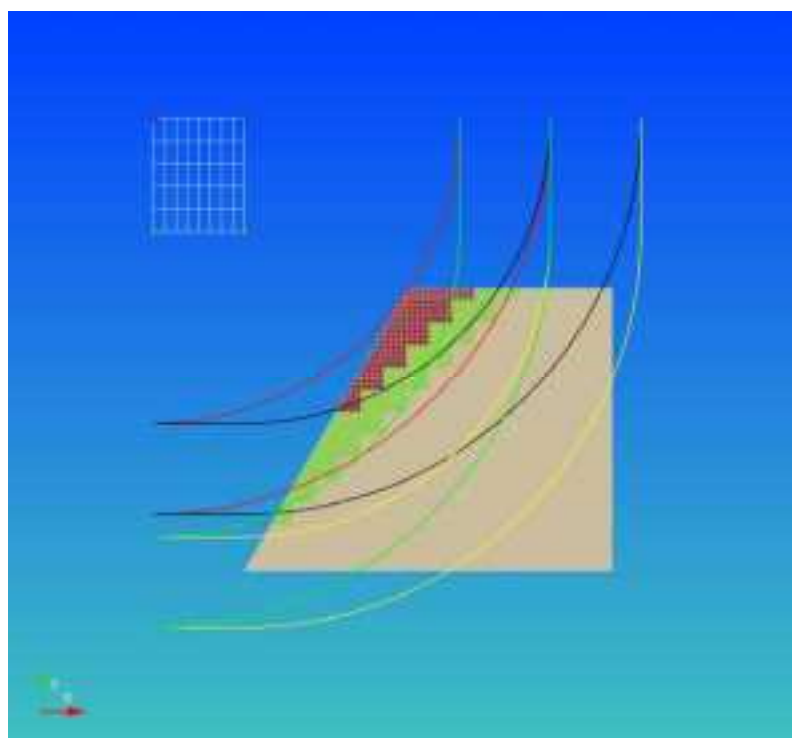


図 11.3.34 中型3層斜面 (Case20) 円弧 探索条件

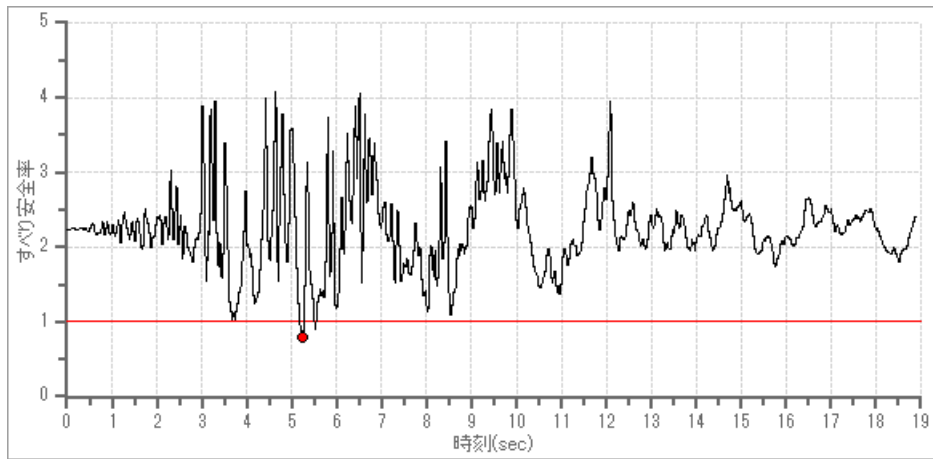


図 11.3.35 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率履歴円弧-加速度(地震時)

表 11.3.12 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率 ワースト10 円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	5.810	0.804
2	5.820	0.804
3	5.770	0.851
4	5.780	0.851
5	5.790	0.872
6	5.800	0.872
7	5.750	0.892
8	5.760	0.892
9	6.110	0.893
10	6.120	0.893

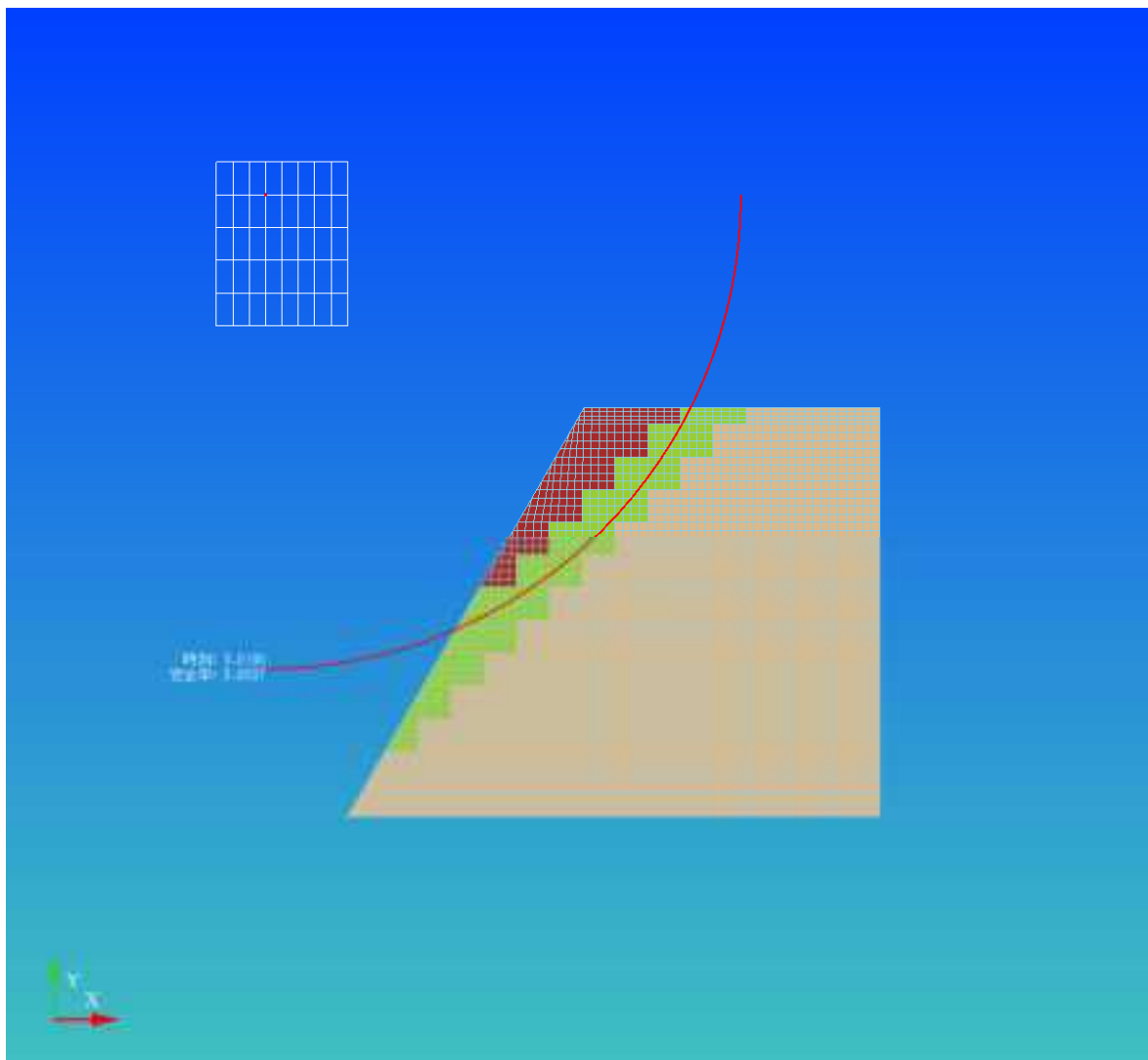


図 11.3.36 中型3層斜面 (Case20) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-加速度(地震時)

### (3) Case21

#### ① 逐次非線形動的解析

設定した探索条件を図 11.3.37 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.38 に、安全率の代表時刻を表 11.3.13 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.39 に示す。

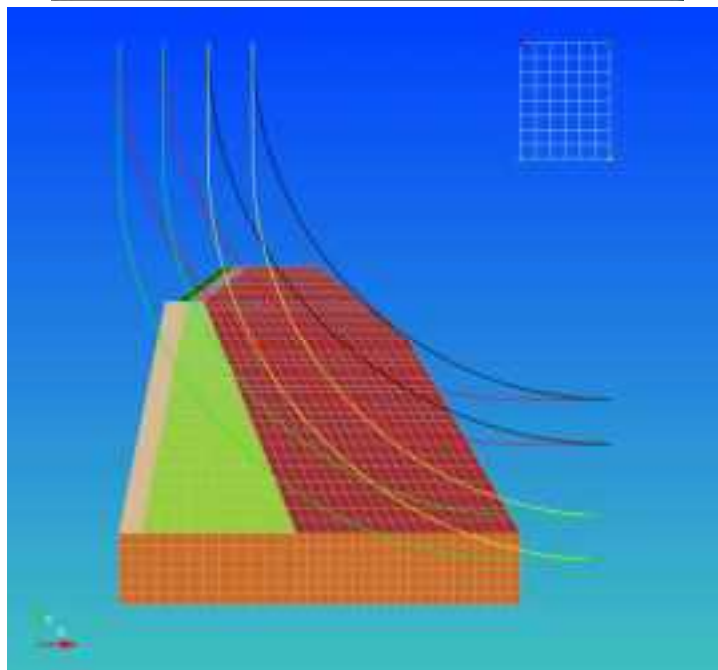


図 11.3.37 大型1層斜面 (Case21) 円弧 探索条件

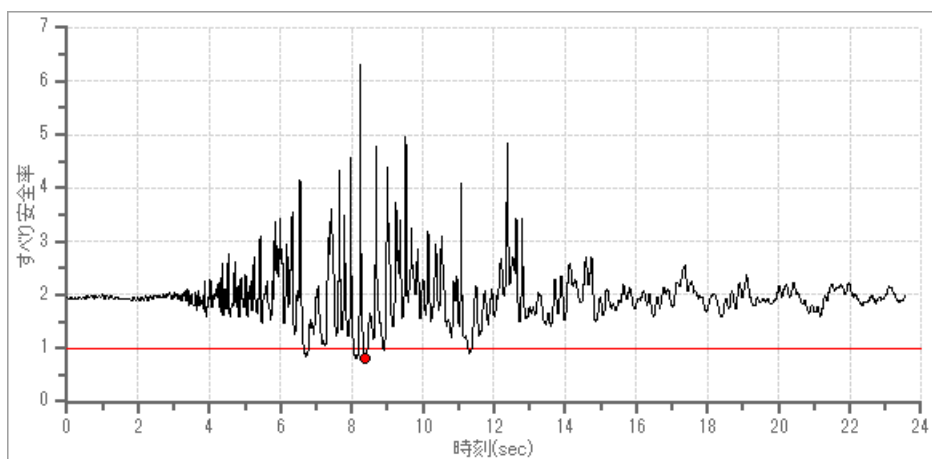


図 11.3.38 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率履歴 円弧-加速度(地震時)

表 11.3.13 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率 ワースト10 円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	9.050	0.915
2	9.060	0.915
3	9.040	0.924
4	9.070	0.933
5	8.700	0.936
6	9.030	0.940
7	8.710	0.944
8	8.690	0.945
9	8.730	0.948
10	8.720	0.949

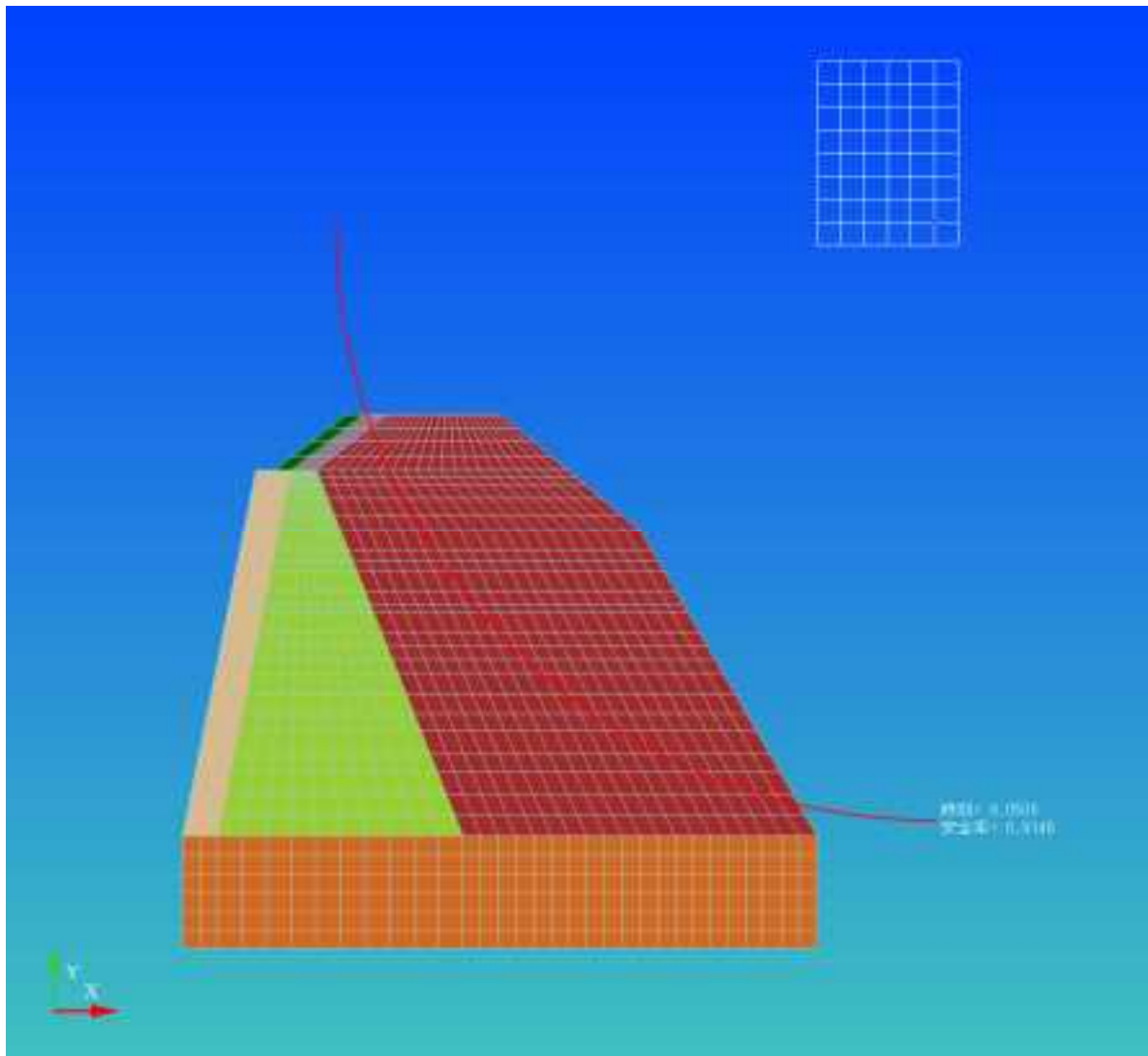


図 11.3.39 大型1層斜面 (Case21) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-加速度(地震時)

② 等価線形解析

設定した探索条件を図 11.3.40に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.41 に、安全率の代表時刻を表 11.3.14 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.42 に示す。

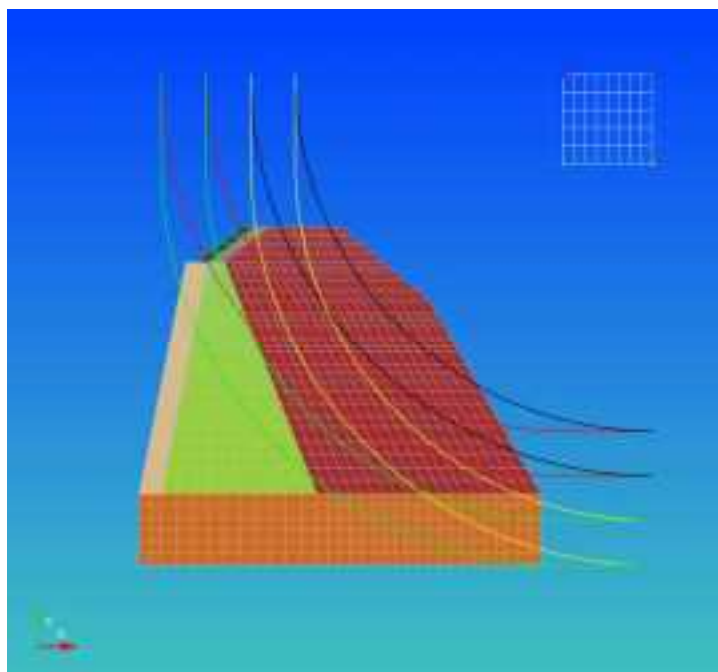


図 11.3.40 大型1層斜面 (Case21) 円弧 探索条件

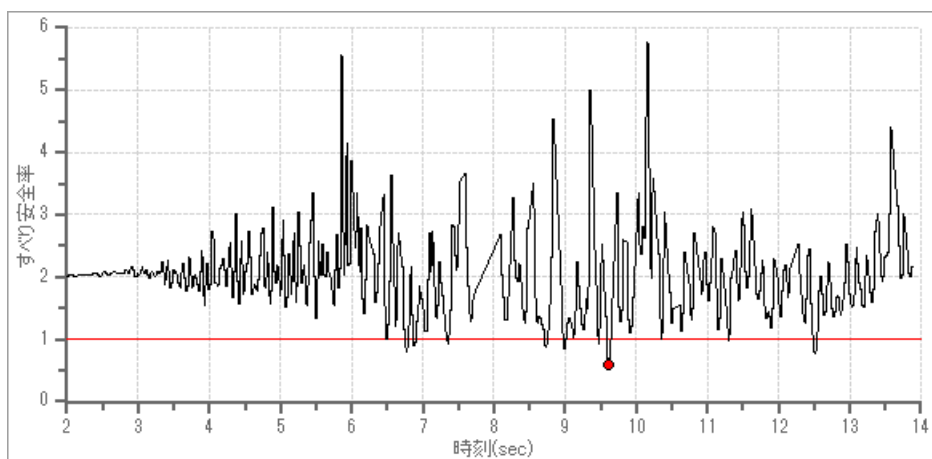


図 11.3.41 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率履歴 円弧-加速度(地震時)

表 11.3.14 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率 ワースト10 円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	9.610	0.594
2	9.620	0.594
3	9.590	0.690
4	9.600	0.690
5	12.510	0.763
6	12.520	0.763
7	9.630	0.772
8	9.640	0.772
9	12.490	0.810
10	12.500	0.810



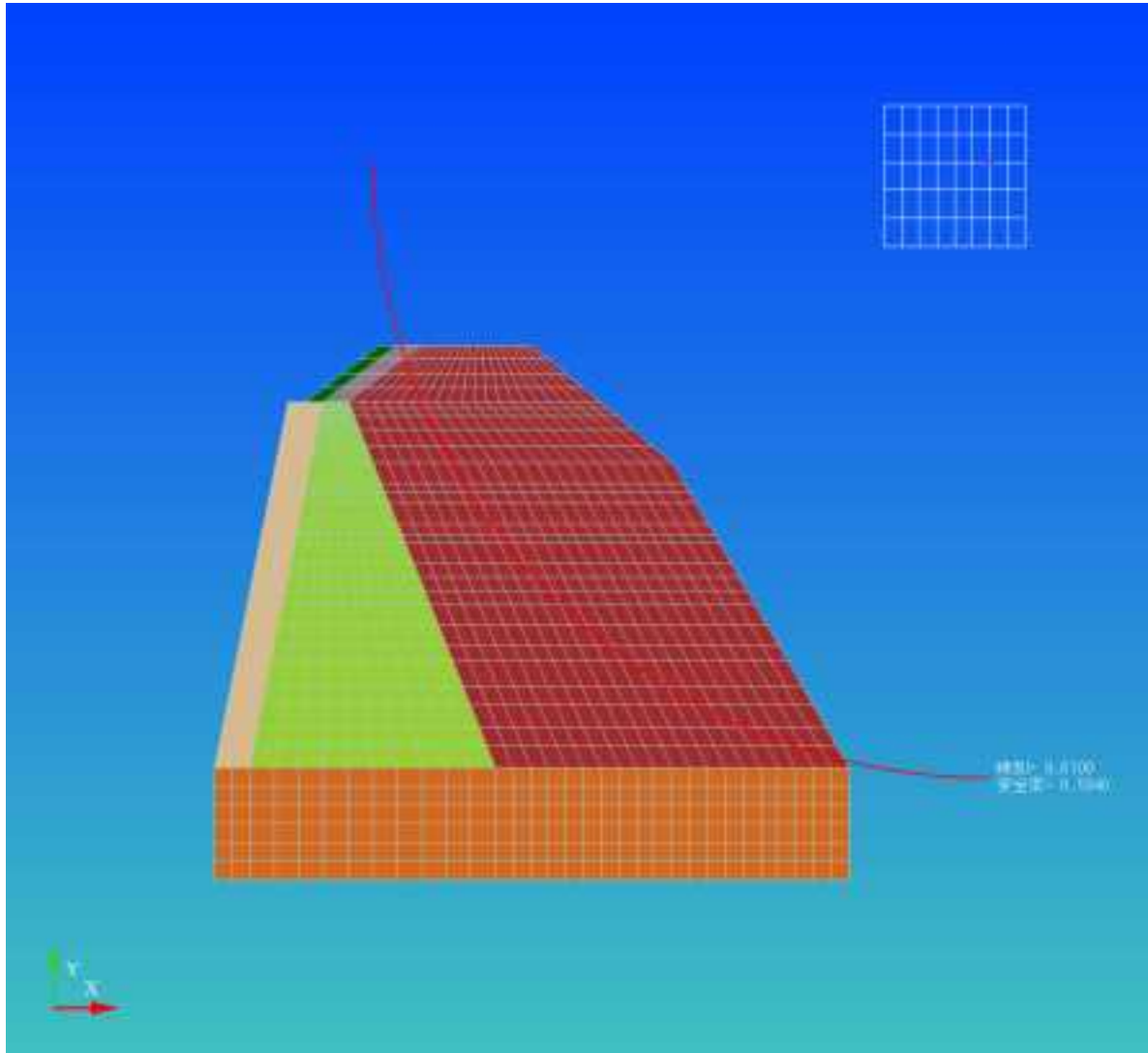


図 11.3.42 大型1層斜面 (Case21) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-加速度(地震時)

#### (4) Case22

##### ① 逐次非線形動的解析

設定した探索条件を図 11.3.43 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.44 に、安全率の代表時刻を表 11.3.15 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.45 に示す。

図 11.3.43 大型3層斜面 (Case22) 円弧 探索条件

	左下	右下	右上	左上
半径	4.000	1.000	1.000	4.000
傾度	4.000	4.000	1.000	4.000

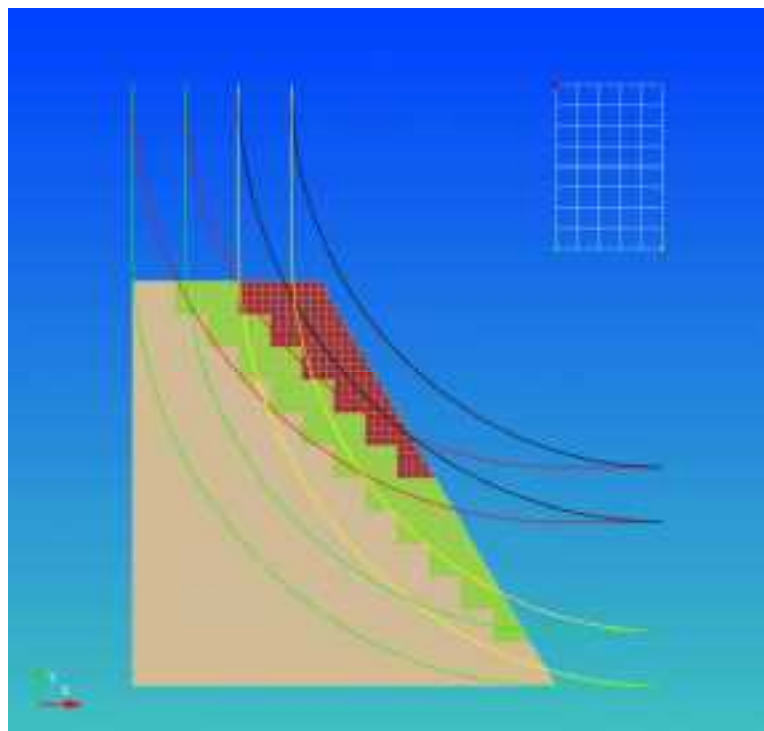


図 11.3.43 大型3層斜面 (Case22) 円弧 探索条件

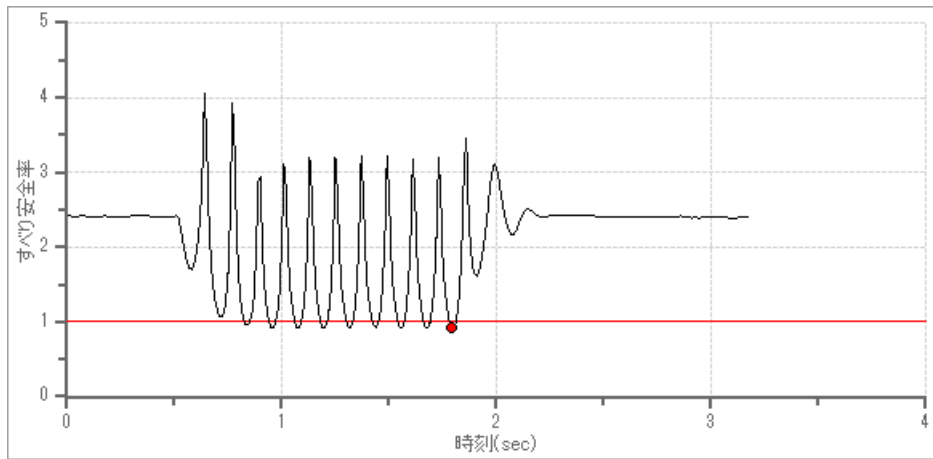


図 11.3.44 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率履歴 円弧-加速度(地震時)

表 11.3.15 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率 ワースト10 円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	2.570	0.915
2	2.370	0.916
3	1.570	0.917
4	2.170	0.917
5	1.770	0.918
6	1.970	0.919
7	1.370	0.923
8	1.360	0.925
9	1.560	0.926
10	1.160	0.926

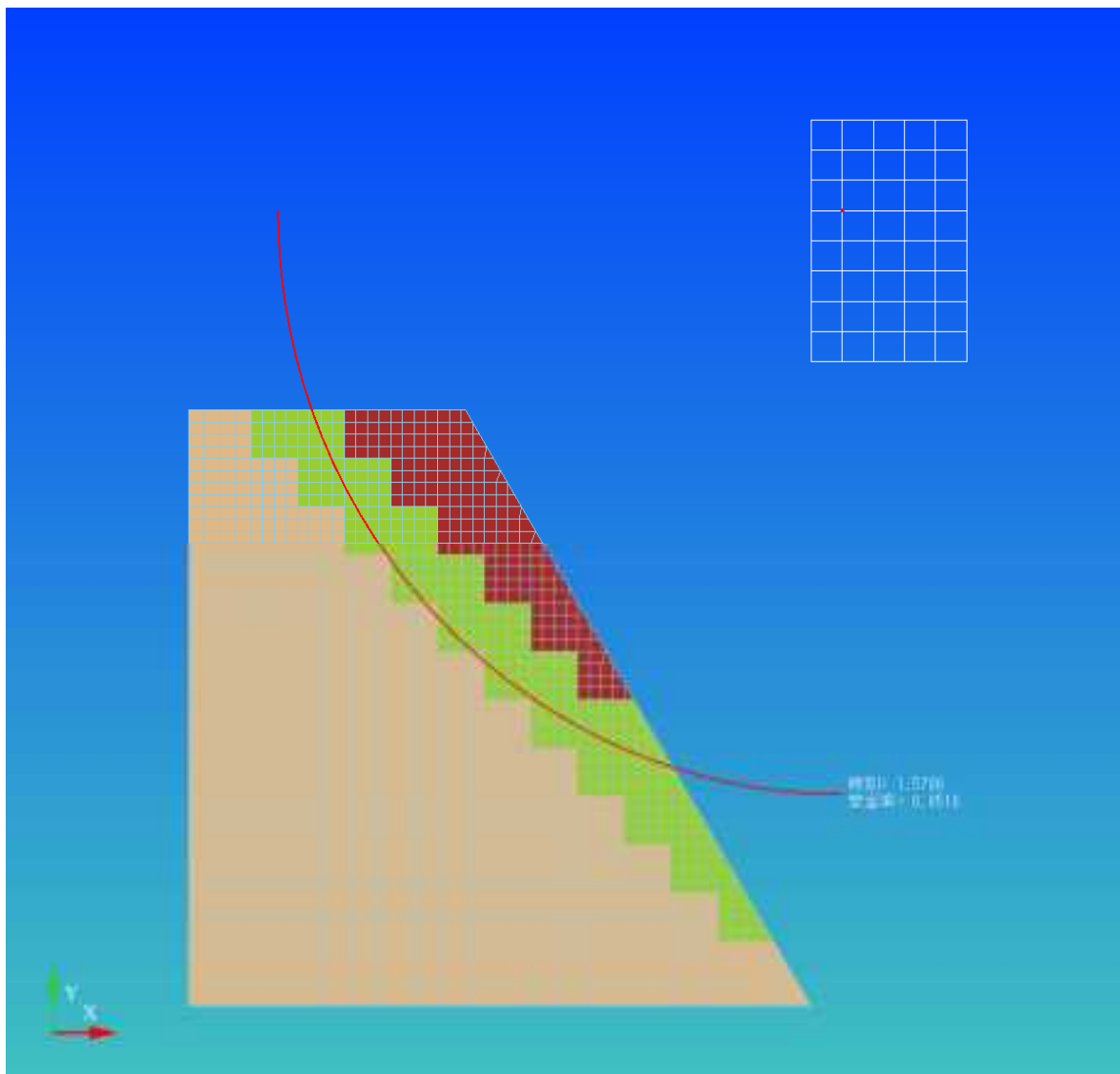


図 11.3.45 大型3層斜面 (Case22) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-加速度(地震時)

② 等価線形解析

設定した探索条件を図 11.3.46 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.47 に、安全率の代表時刻を表 11.3.16 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.48 に示す。

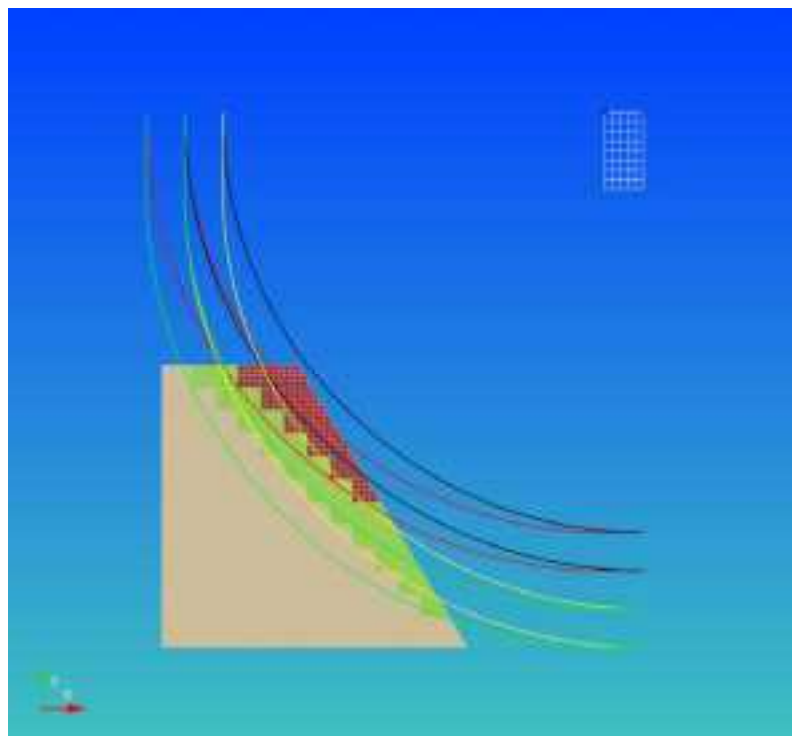


図 11.3.46 大型3層斜面 (Case22) 円弧 探索条件

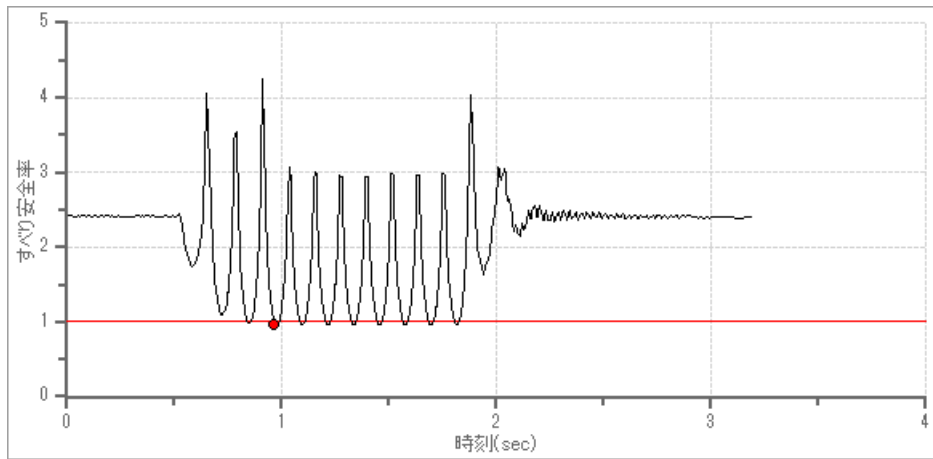


図 11.3.47 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率履歴 円弧-加速度(地震時)

表 11.3.16 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率 ワースト10 円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	1.170	0.959
2	1.580	0.962
3	1.370	0.962
4	1.780	0.964
5	2.380	0.965
6	2.570	0.965
7	1.770	0.965
8	1.180	0.966
9	2.370	0.967
10	1.970	0.967

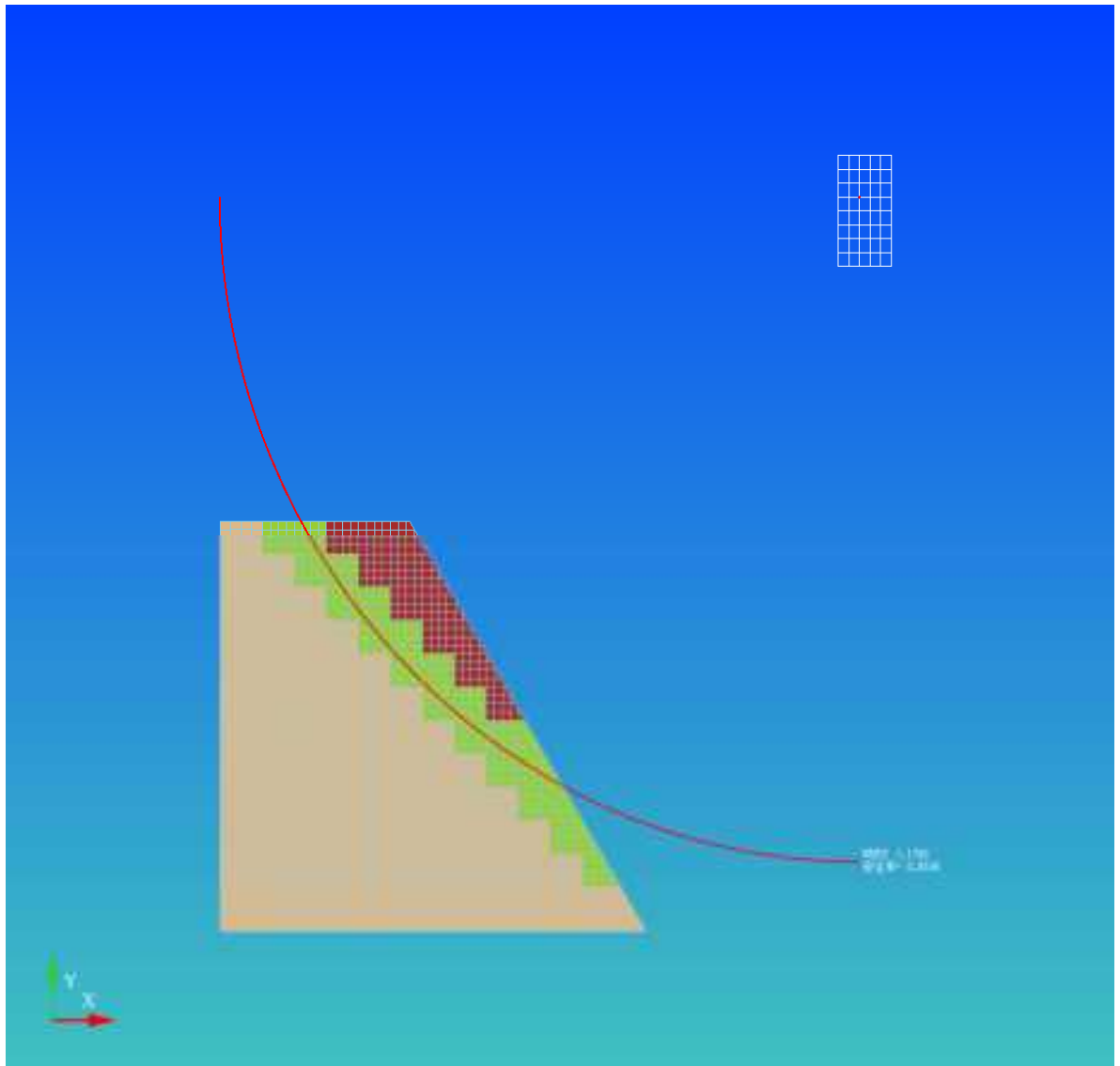


図 11.3.48 大型3層斜面 (Case22) すべり線形状(最小すべり安全率時) 円弧-加速度(地震時)

### 11.3.3 非円弧による探索-応力履歴

応力履歴結果を用いて、非円弧による安定計算を実施した。

#### (1) Case19

##### ① 逐次非線形動的解析

設定した探査条件を表 11.3.17 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.49 に、安全率の代表時刻を表 11.3.18 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.50 に示す。

表 11.3.17 中型1層斜面 (Case19) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	0.0	0.7	1.4	2.3

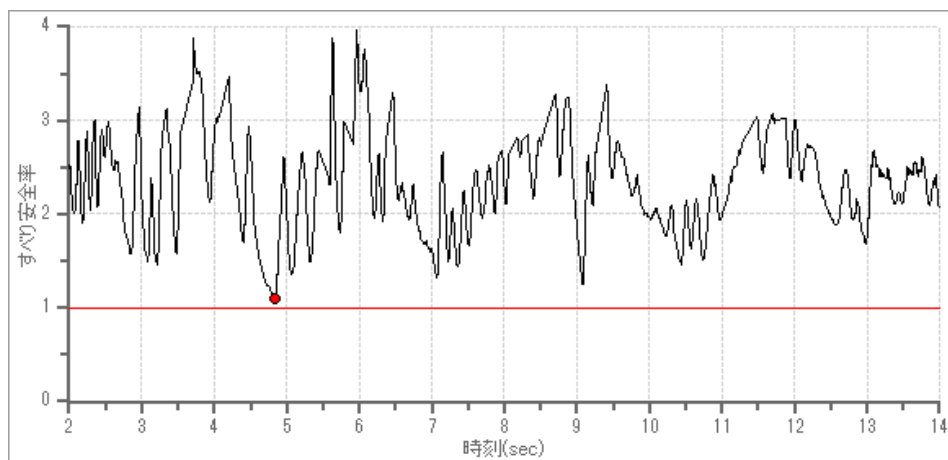


図 11.3.49 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率履歴



表 11.3.18 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率 ワースト10 非円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	4.830	1.093
2	4.820	1.108
3	4.840	1.117
4	4.810	1.120
5	4.800	1.134
6	4.850	1.135
7	4.790	1.173
8	4.780	1.191
9	4.770	1.206
10	4.760	1.216

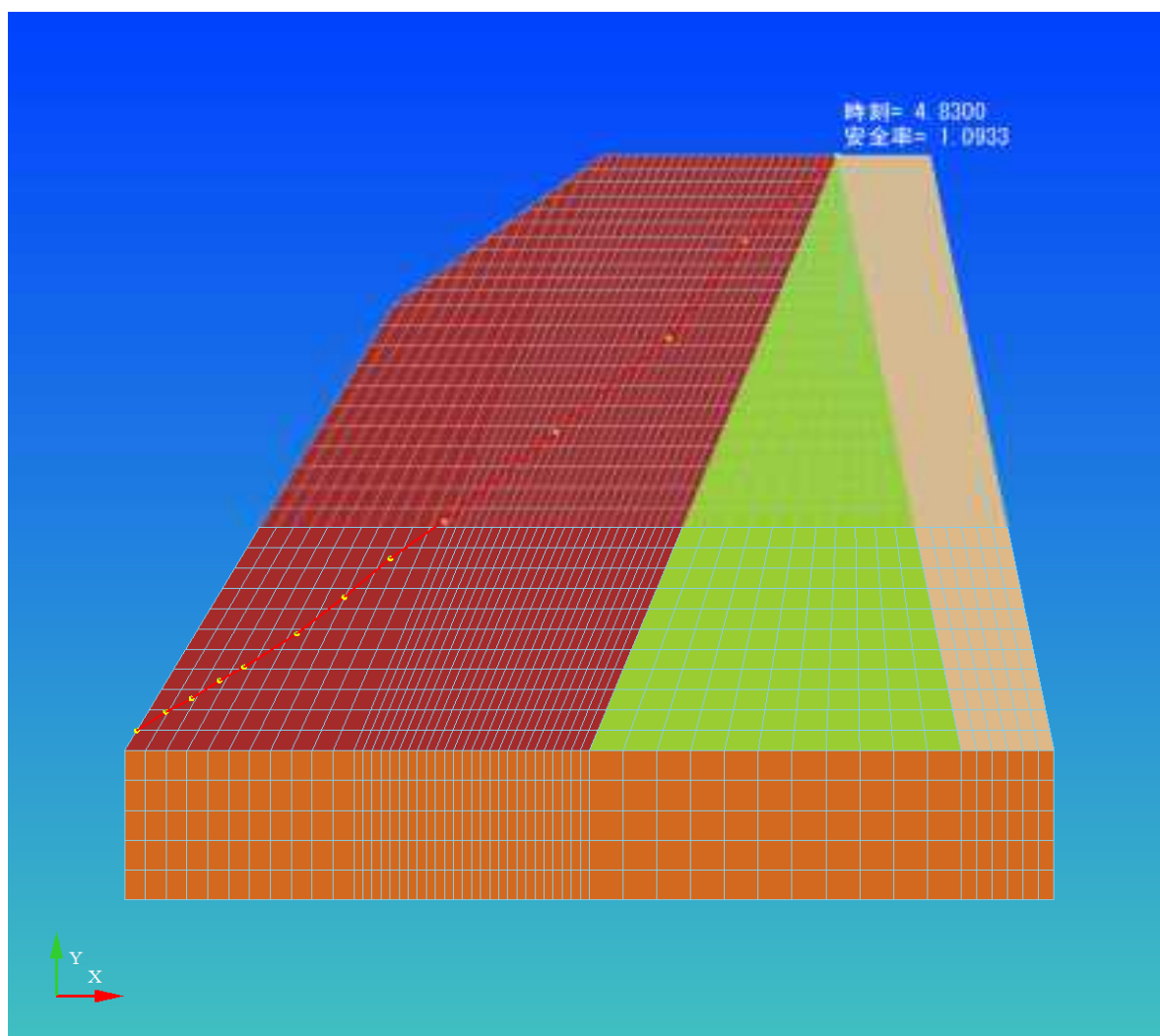


図 11.3.50 中型1層斜面 (Case19) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-応力(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を表 11.3.19 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.51 に、安全率の代表時刻を表 11.3.20 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.52 に示す。

表 11.3.19 中型1層斜面 (Case19) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	0	0.4	1.4	2.3

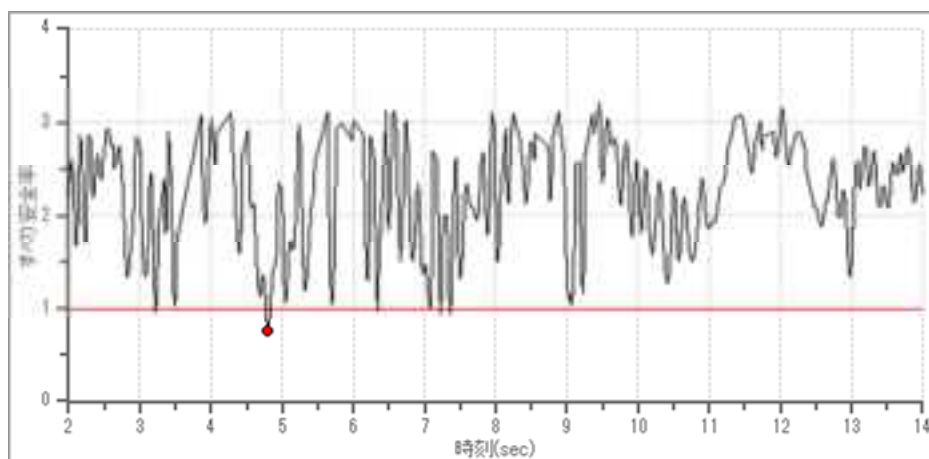


図 11.3.51 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率履歴

表 11.3.20 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率 ワースト10 非円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	4.800	0.759
2	4.820	0.845
3	4.780	0.858
4	7.220	0.937
5	7.360	0.939
6	3.220	0.967
7	6.340	0.977
8	7.080	1.018
9	3.480	1.028
10	5.700	1.039

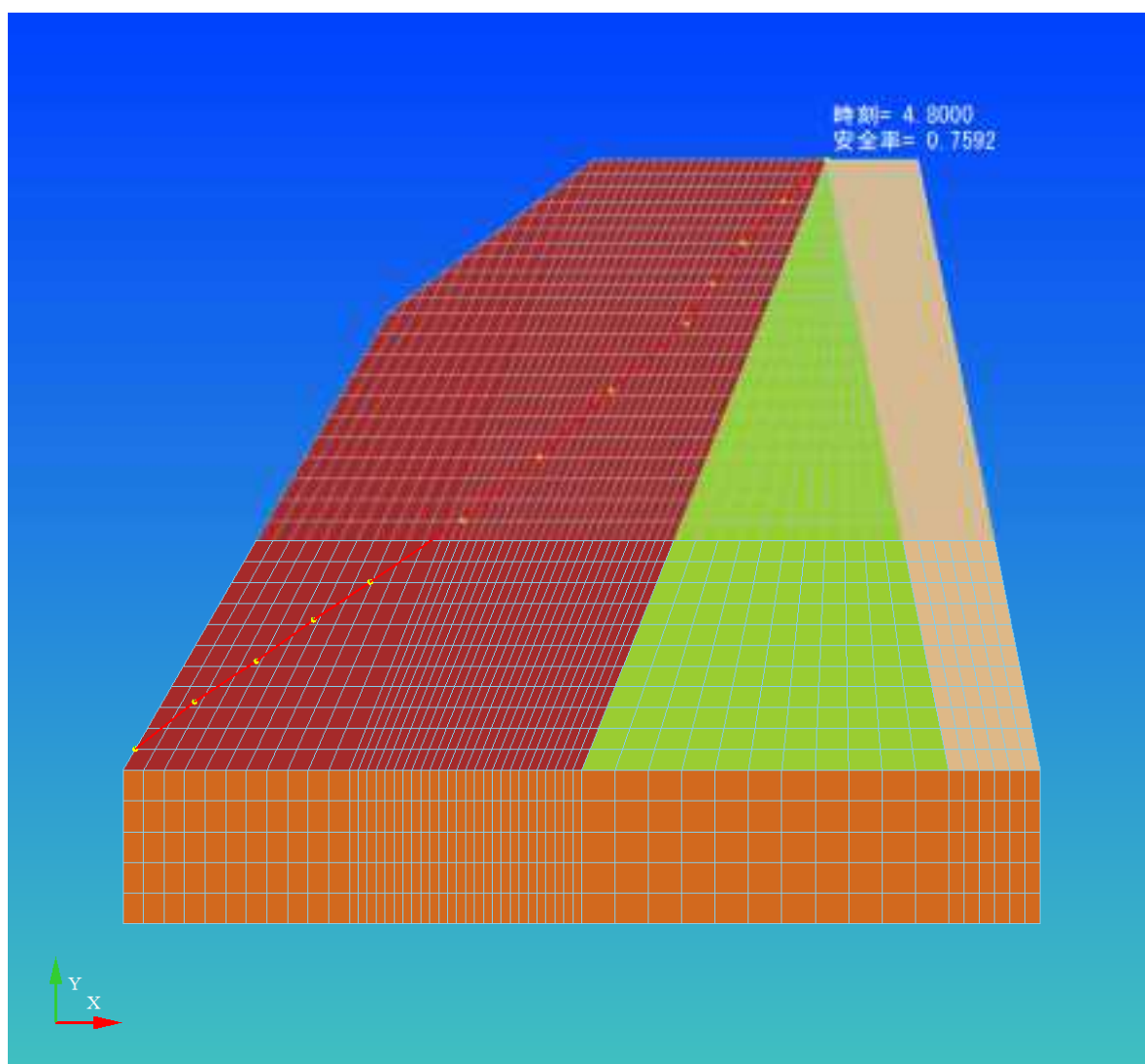


図 11.3.52 中型1層斜面 (Case19) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-応力(地震時)

(2) Case20

① 逐次非線形動的解析

設定した探査条件を表 11.3.21 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.53 に、安全率の代表時刻を表 11.3.22 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.54 に示す。

表 11.3.21 中型3層斜面 (Case20) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	0.15	0.6	2	2.55

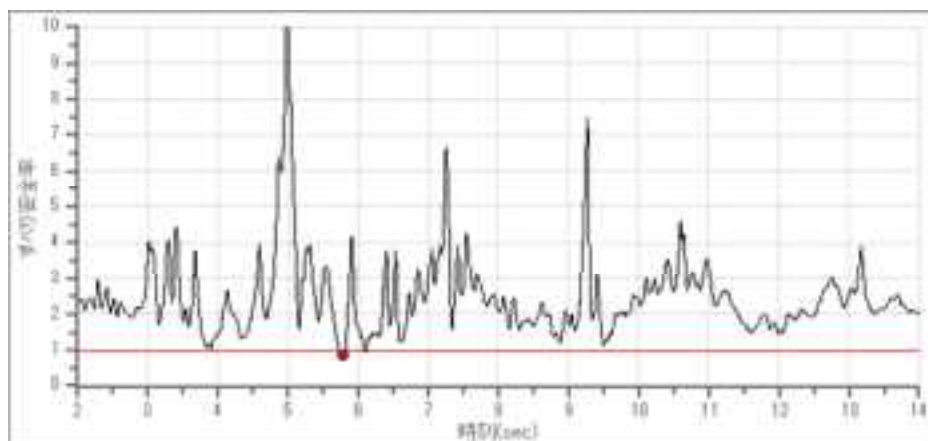


図 11.3.53 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率履歴

表 11.3.22 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率 ワースト10 非円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	5.790	0.875
2	5.800	0.887
3	5.780	0.913
4	5.750	0.913
5	5.760	0.915
6	5.770	0.921
7	6.100	0.943
8	5.740	0.947
9	5.810	0.961
10	6.110	0.973

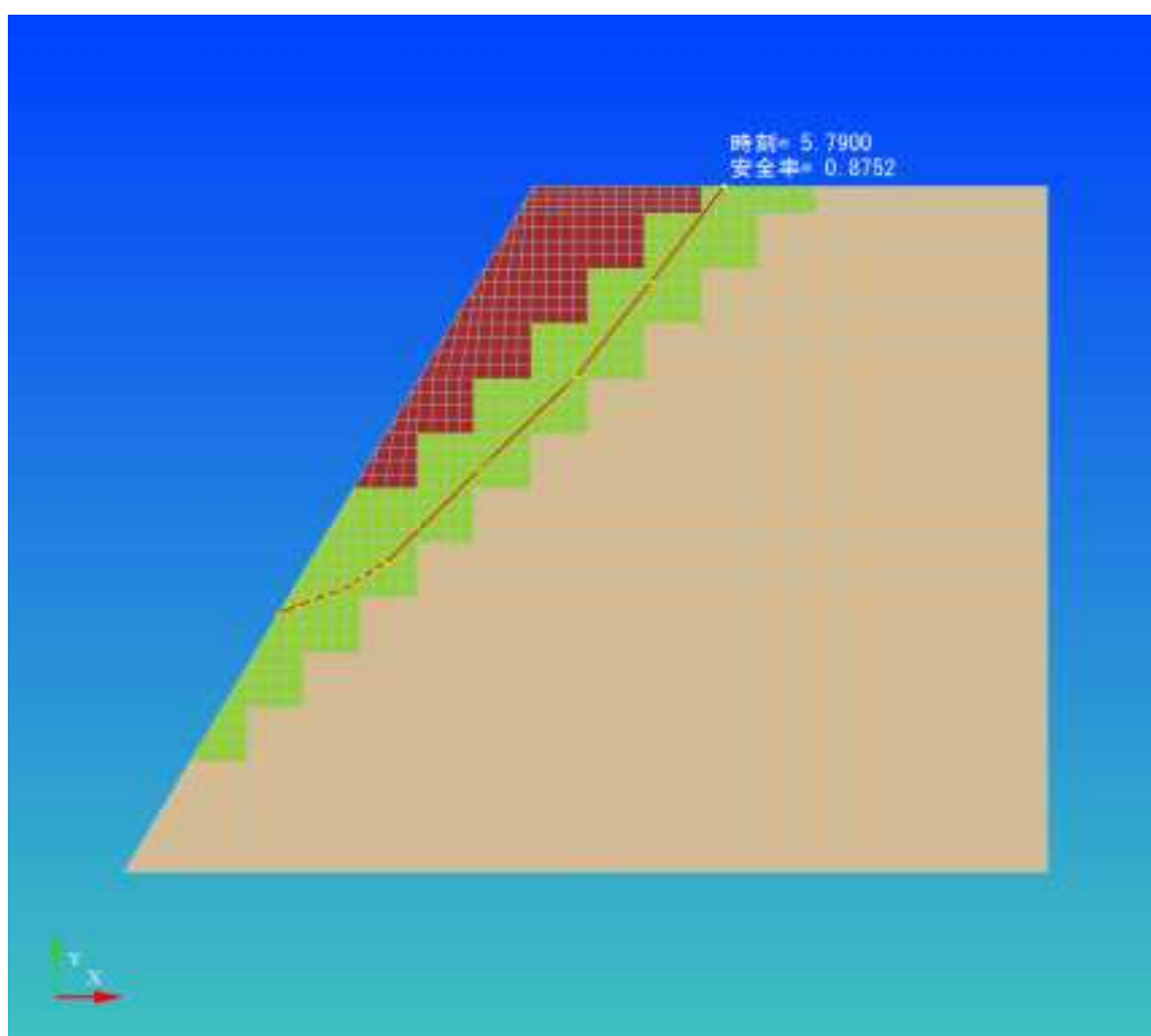


図 11.3.54 中型3層斜面 (Case20) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-応力(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を表 11.3.23 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.55 に、安全率の代表時刻を表 11.3.24 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.56 に示す。

表 11.3.23 中型3層斜面 (Case20) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	0.15	0.6	2	2.55

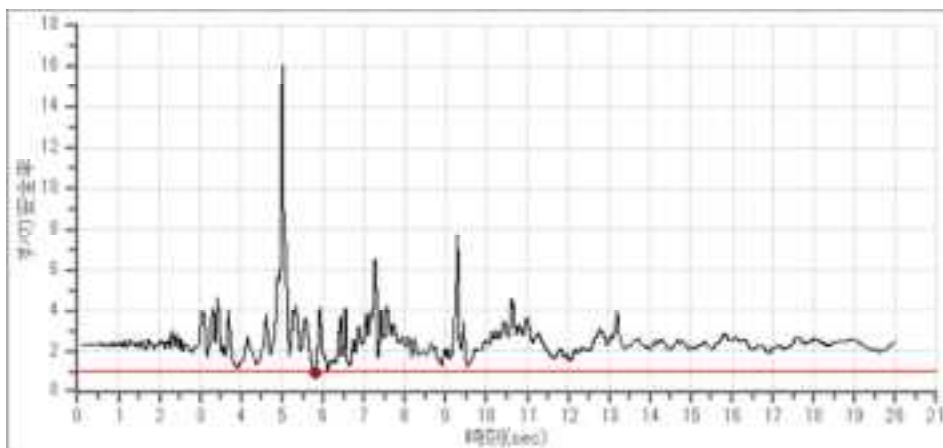


図 11.3.55 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率履歴

表 11.3.24 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率 ワースト10 非円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	5.810	0.918
2	5.820	0.918
3	5.770	0.998
4	5.780	0.998
5	5.830	1.010
6	5.840	1.010
7	5.790	1.011
8	5.800	1.011
9	6.110	1.044
10	6.120	1.044

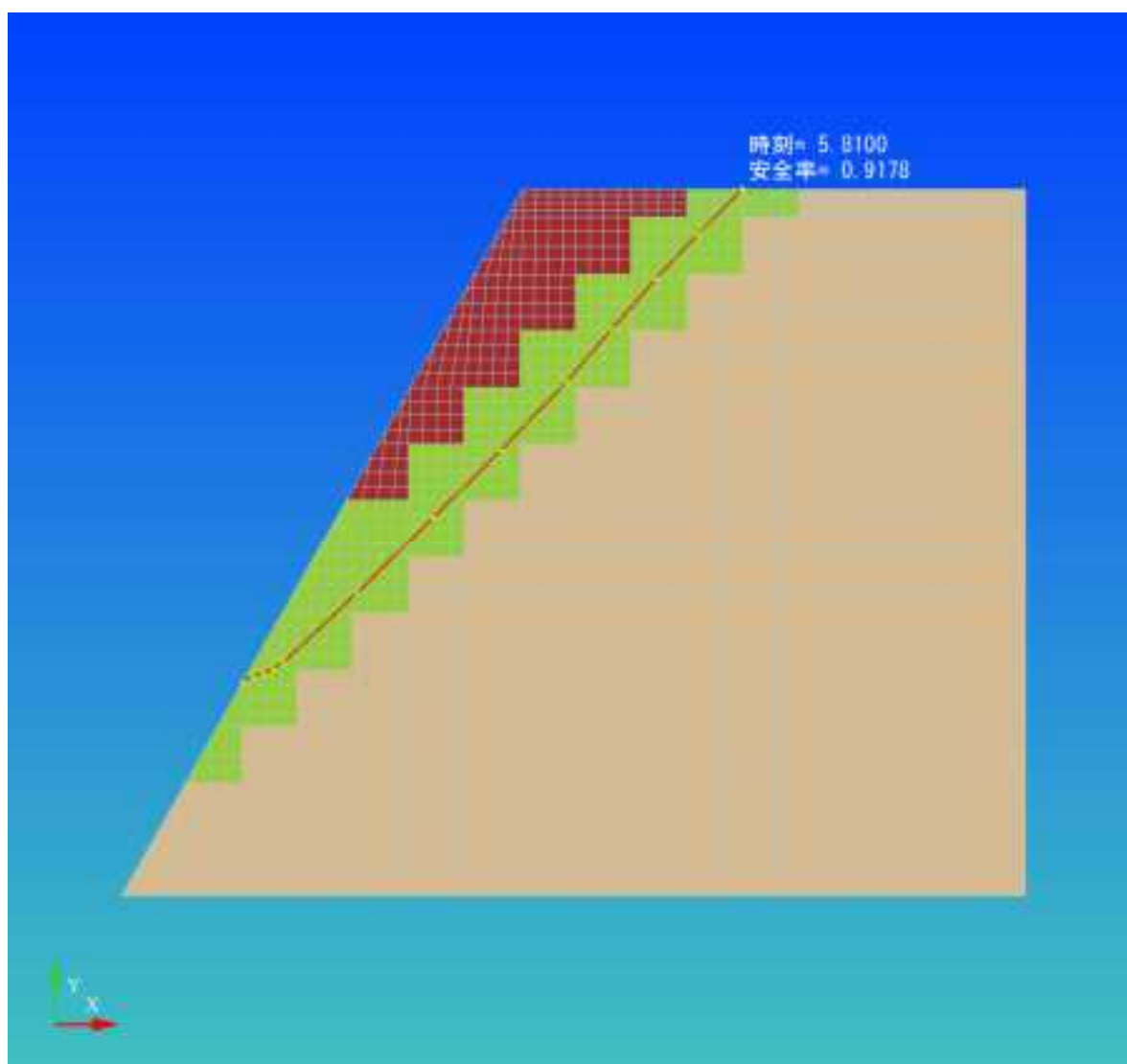


図 11.3.56 中型3層斜面 (Case20) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-応力(地震時)

### (3) Case21

#### ① 逐次非線形動的解析

設定した探査条件を表 11.3.25 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.57 に、安全率の代表時刻を表 11.3.26 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.58 に示す。

表 11.3.25 大型1層斜面 (Case21) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	4.5	4	1.5	0.75

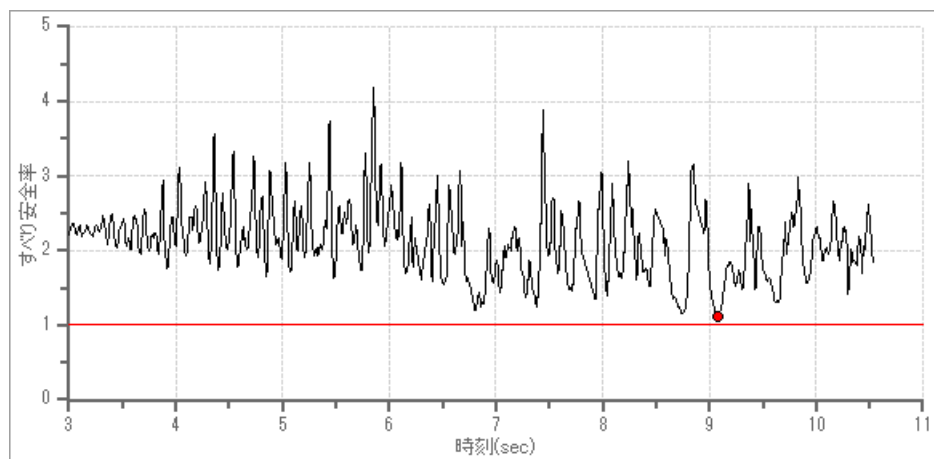


図 11.3.57 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率履歴



表 11.3.26 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率 ワースト10 非円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	9.080	1.117
2	9.070	1.126
3	9.090	1.132
4	8.740	1.150
5	9.060	1.155
6	8.750	1.169
7	9.100	1.170
8	9.050	1.181
9	8.760	1.182
10	8.730	1.193

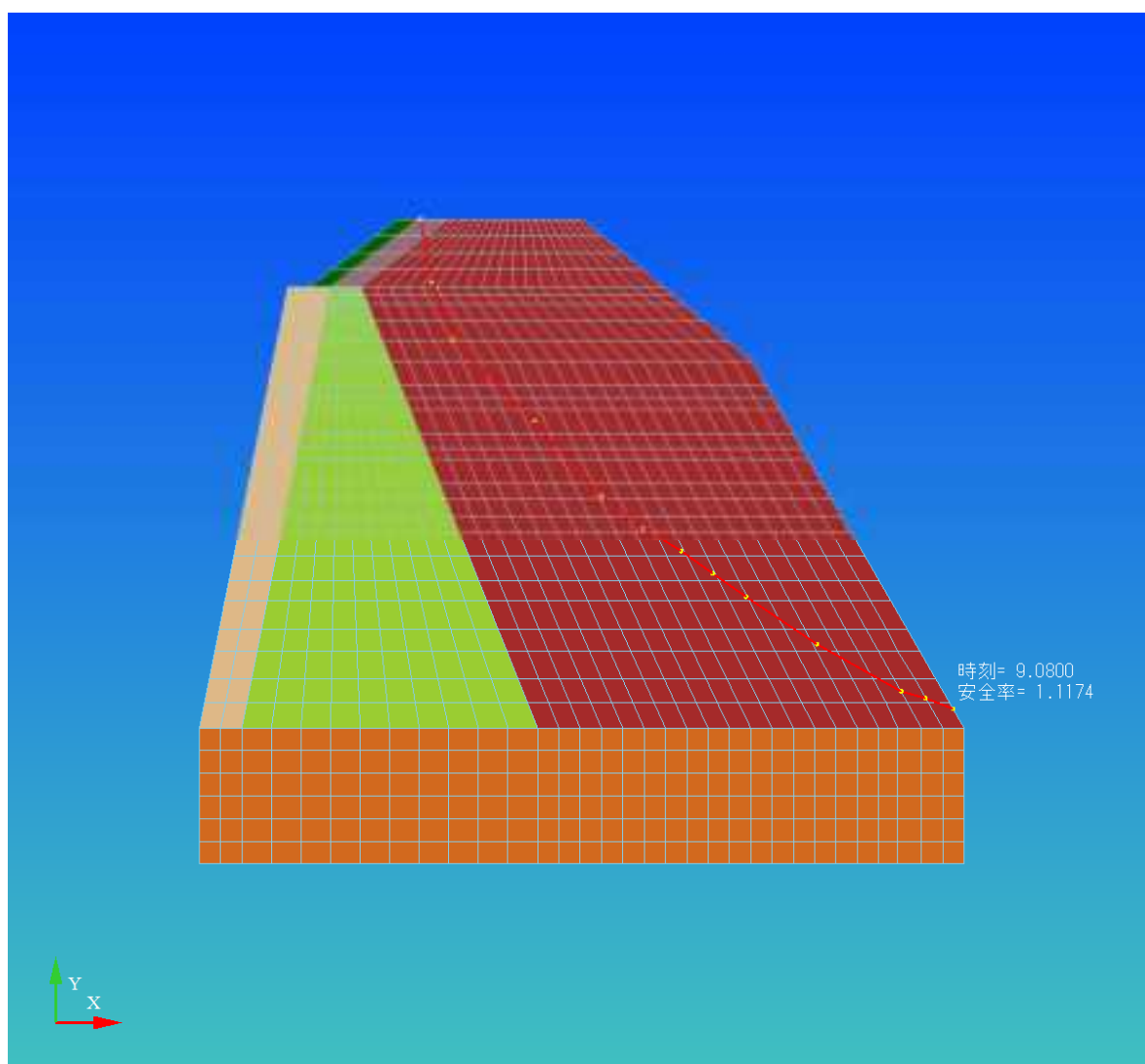


図 11.3.58 大型1層斜面 (Case21) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-応力(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を表 11.3.37 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.59 に、安全率の代表時刻を表 11.3.38 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.60 に示す。

表 11.3.27 大型1層斜面 (Case21) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	4.5	4	1.5	0.75

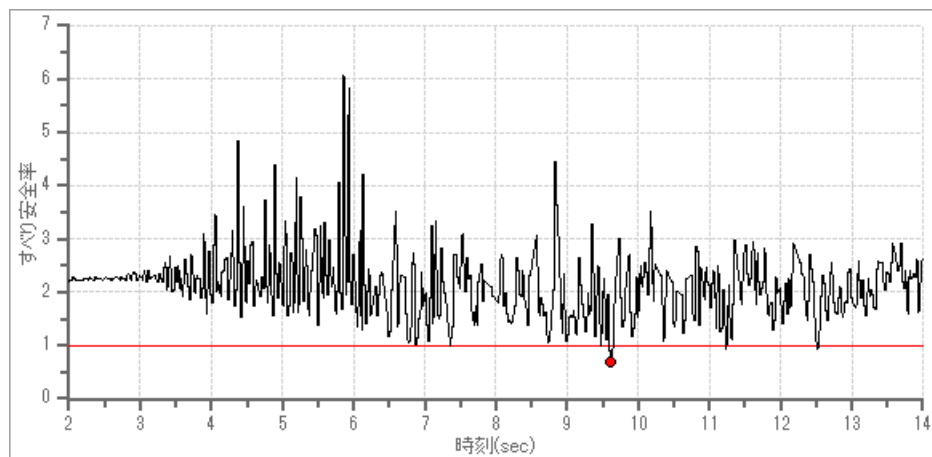


図 11.3.59 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率履歴

表 11.3.28 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率 ワースト10 非円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	9.610	0.692
2	9.620	0.692
3	9.630	0.773
4	9.640	0.773
5	9.590	0.900
6	9.600	0.900
7	12.510	0.925
8	12.520	0.925
9	11.230	0.939
10	11.240	0.939

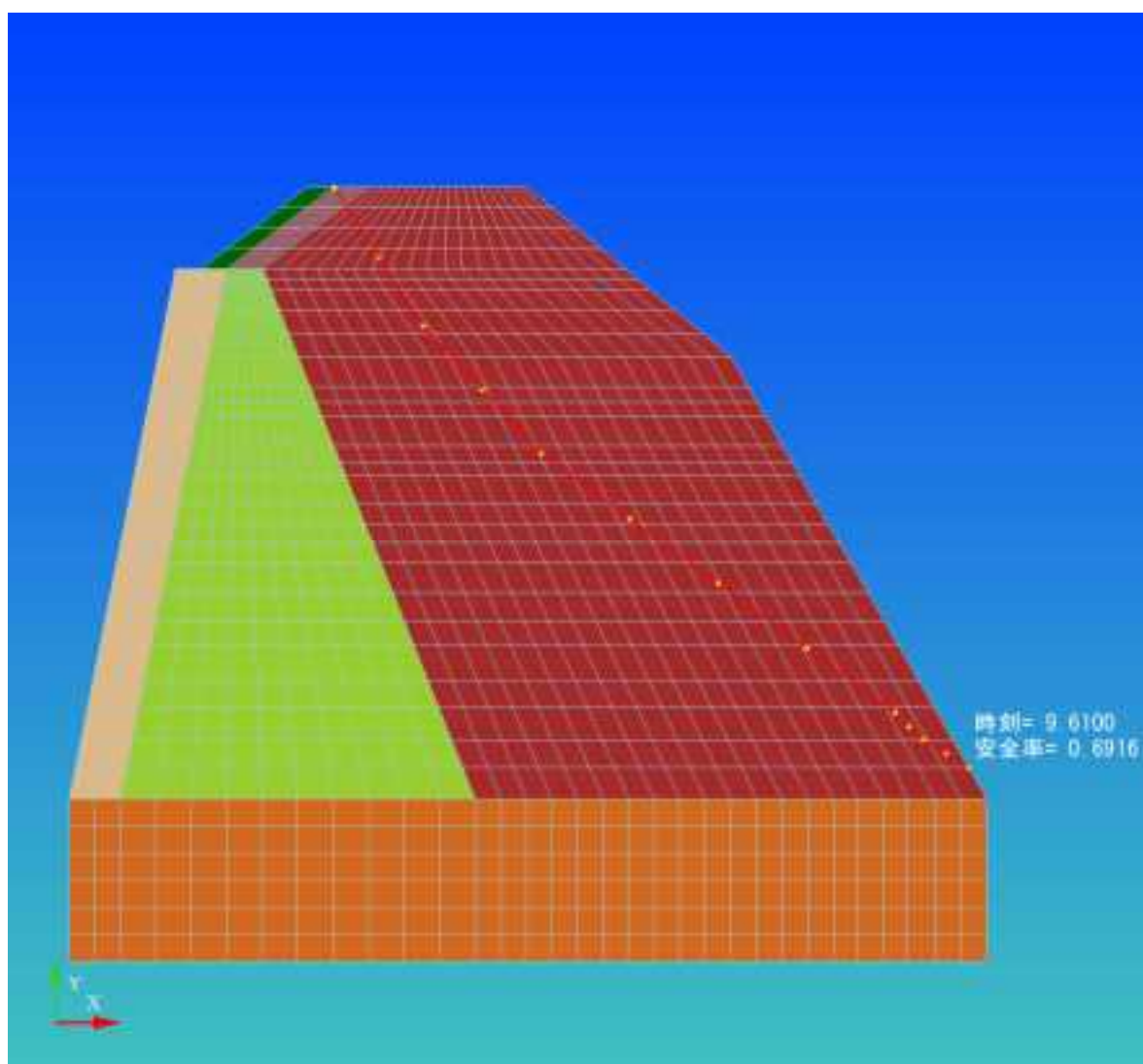


図 11.3.60 大型1層斜面 (Case21) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-応力(地震時)

(4) Case22

① 逐次非線形動的解析

設定した探査条件を表 11.3.29 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.61 に、安全率の代表時刻を表 11.3.30 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.62 に示す。

表 11.3.29 大型3層斜面 (Case22) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	-0.1	-0.5	-2.9	-3.5

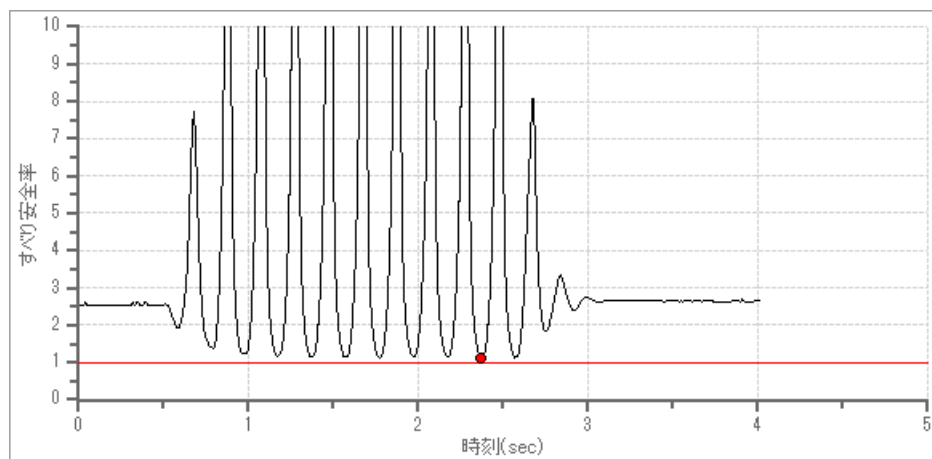


図 11.3.61 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率履歴

表 11.3.30 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率 ワースト10 非円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	2.370	1.136
2	1.770	1.136
3	2.570	1.136
4	2.170	1.139
5	1.570	1.140
6	2.180	1.144
7	2.580	1.144
8	1.970	1.146
9	2.380	1.149
10	1.980	1.155

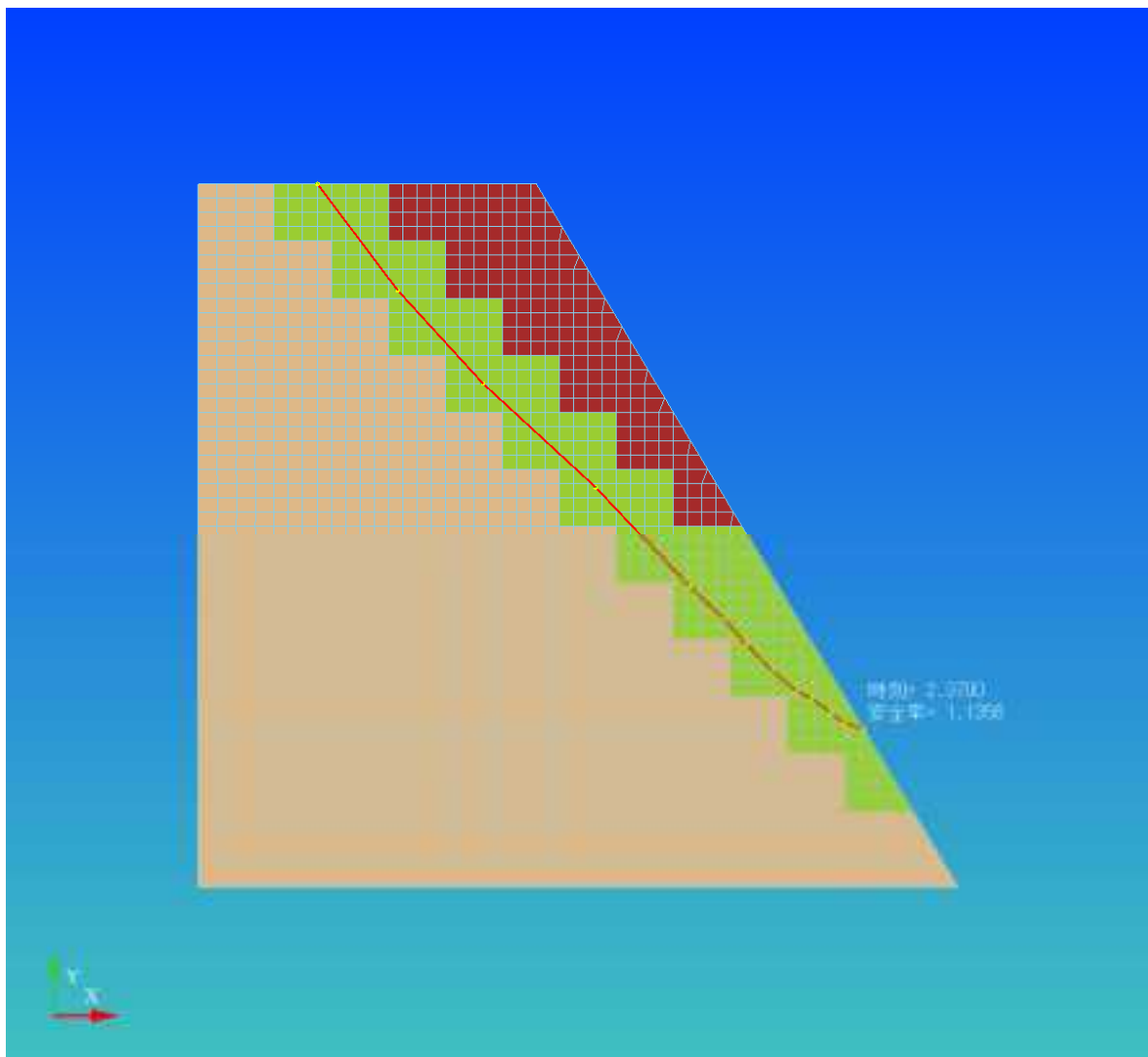


図 11.3.62 大型3層斜面 (Case22) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-応力(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を表 11.3.31 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.63 に、安全率の代表時刻を表 11.3.32 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.64 に示す。

表 11.3.31 大型3層斜面 (Case22) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	-0.15	-1	-2.9	-3.7

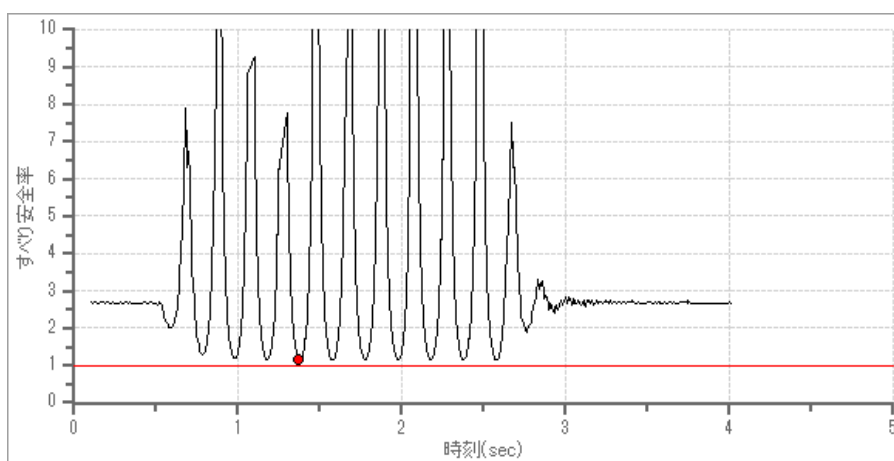


図 11.3.63 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率履歴

表 11.3.32 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率 ワースト10 非円弧-応力(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	1.370	1.152
2	1.170	1.157
3	1.580	1.158
4	1.780	1.159
5	1.180	1.160
6	1.770	1.161
7	2.380	1.162
8	2.570	1.164
9	1.380	1.166
10	1.970	1.166

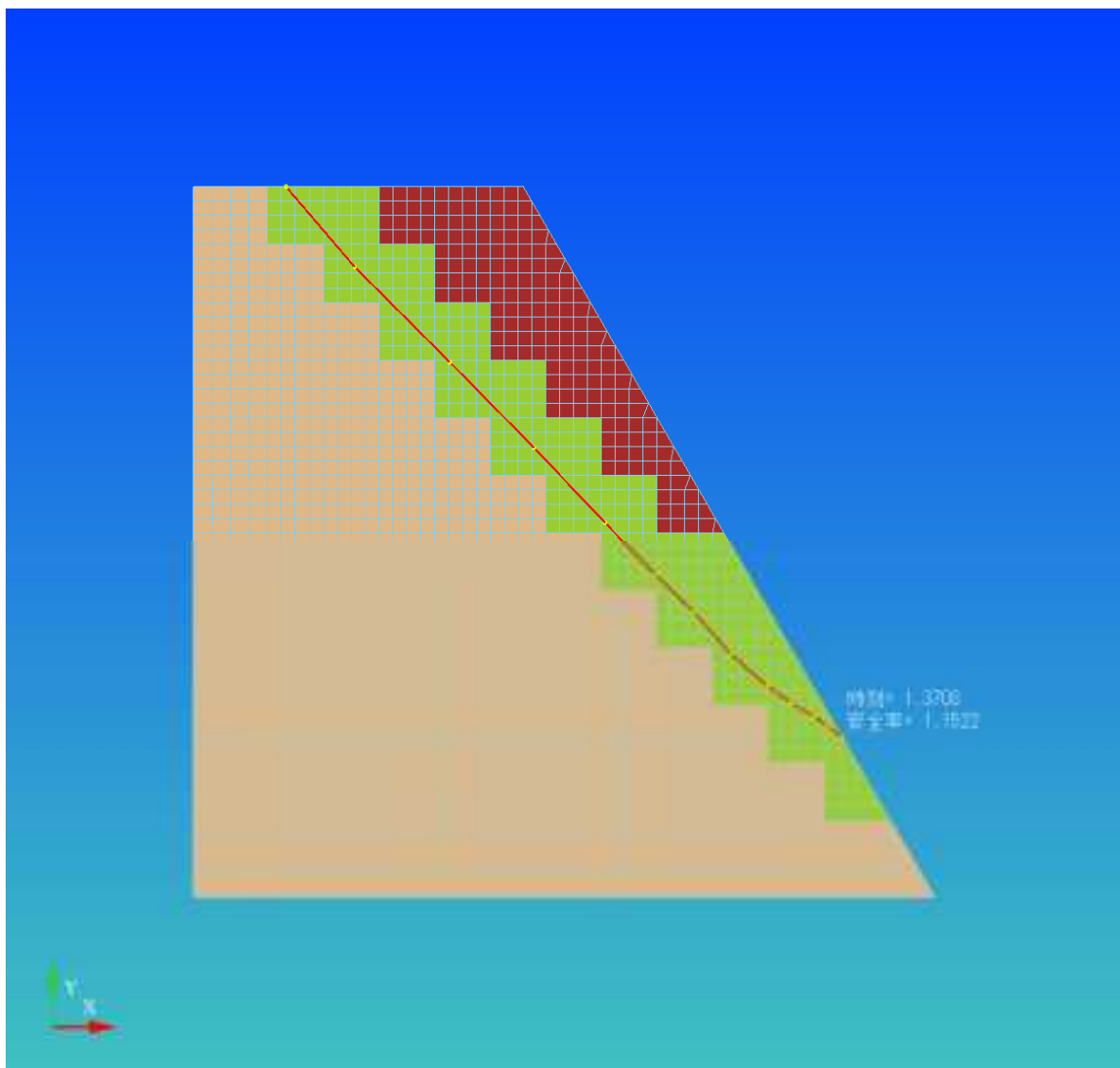


図 11.3.64 大型3層斜面 (Case22) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-応力(地震時)

### 11.3.4 非円弧による探索-加速度履歴

加速度履歴結果を用いて、非円弧による安定計算を実施した。

#### (1) Case19

##### ① 逐次非線形動的解析

設定した探査条件を表 11.3.33 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.65 に、安全率の代表時刻を表 11.3.34 示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.66 に示す。

表 11.3.33 中型1層斜面 (Case19) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	2	0	0.4	1.4	2.3

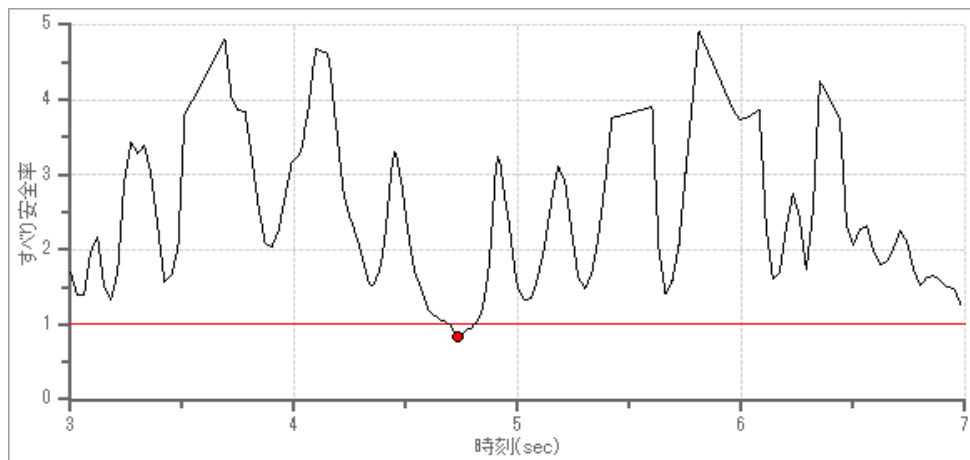


図 11.3.65 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率履歴



表 11.3.34 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率 ワースト10 非円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	4.730	0.834
2	4.740	0.837
3	4.720	0.872
4	4.750	0.872
5	4.760	0.899
6	4.770	0.920
7	4.710	0.933
8	4.780	0.934
9	4.790	0.945
10	4.800	0.982

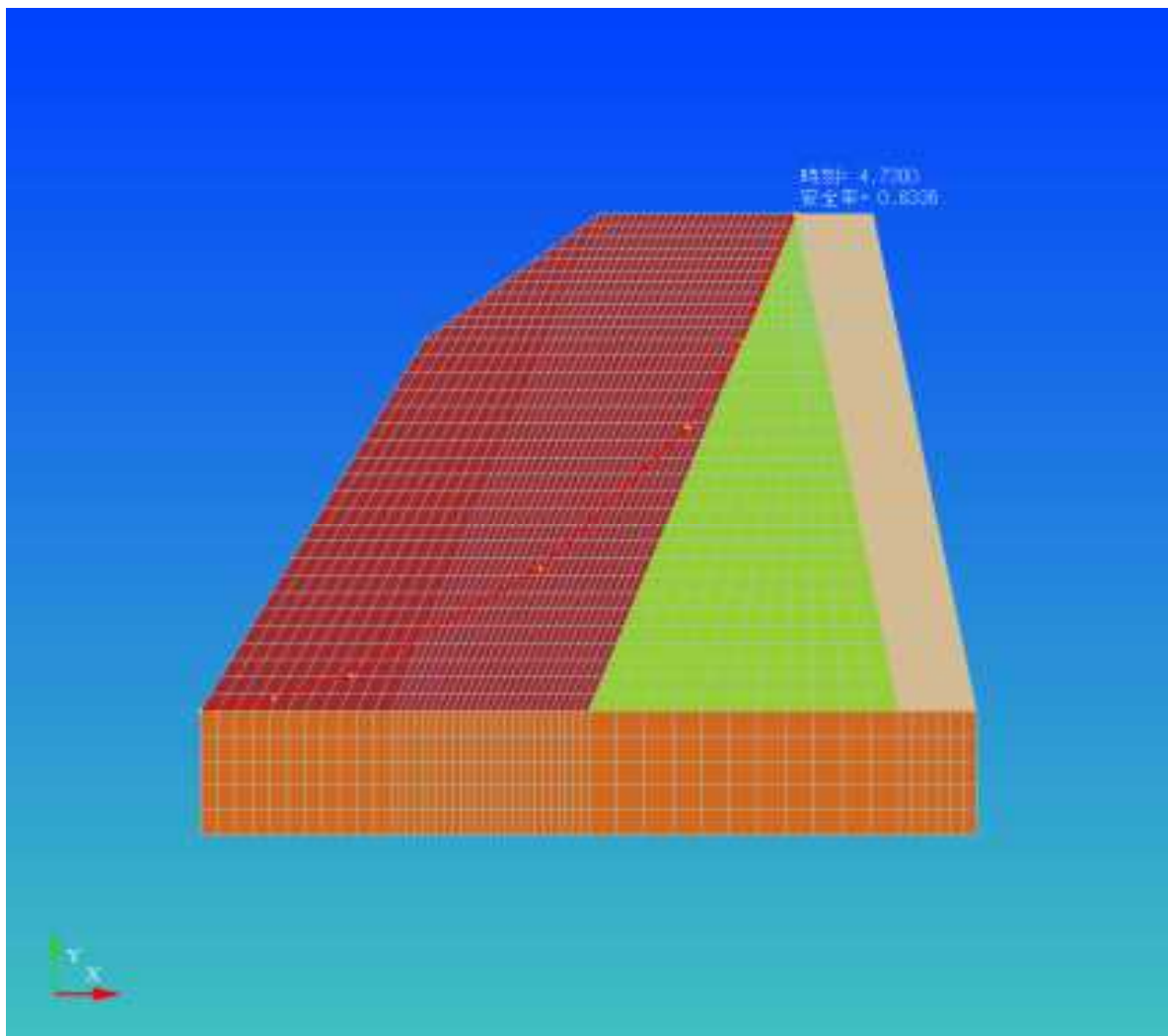


図 11.3.66 中型1層斜面 (Case19) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-加速度(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を表 11.3.35 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.67 に、安全率の代表時刻を表 11.3.36 示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.68 に示す。

表 11.3.35 中型1層斜面 (Case19) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	2	0	0.4	1.4	2.3

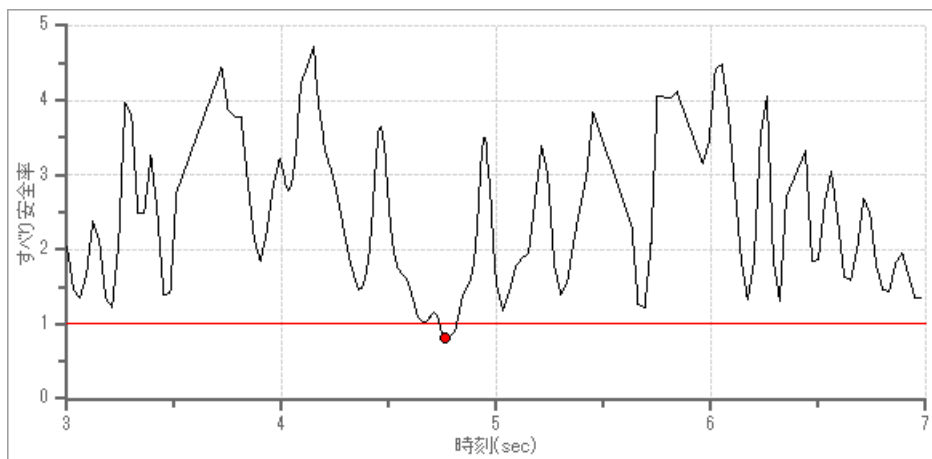


図 11.3.67 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率履歴

表 11.3.36 中型1層斜面 (Case19) すべり安全率 ワースト10 非円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	4.760	0.818
2	4.770	0.826
3	4.780	0.837
4	4.750	0.854
5	4.790	0.860
6	4.800	0.890
7	4.740	0.933
8	4.810	0.951
9	4.670	1.027
10	4.660	1.028

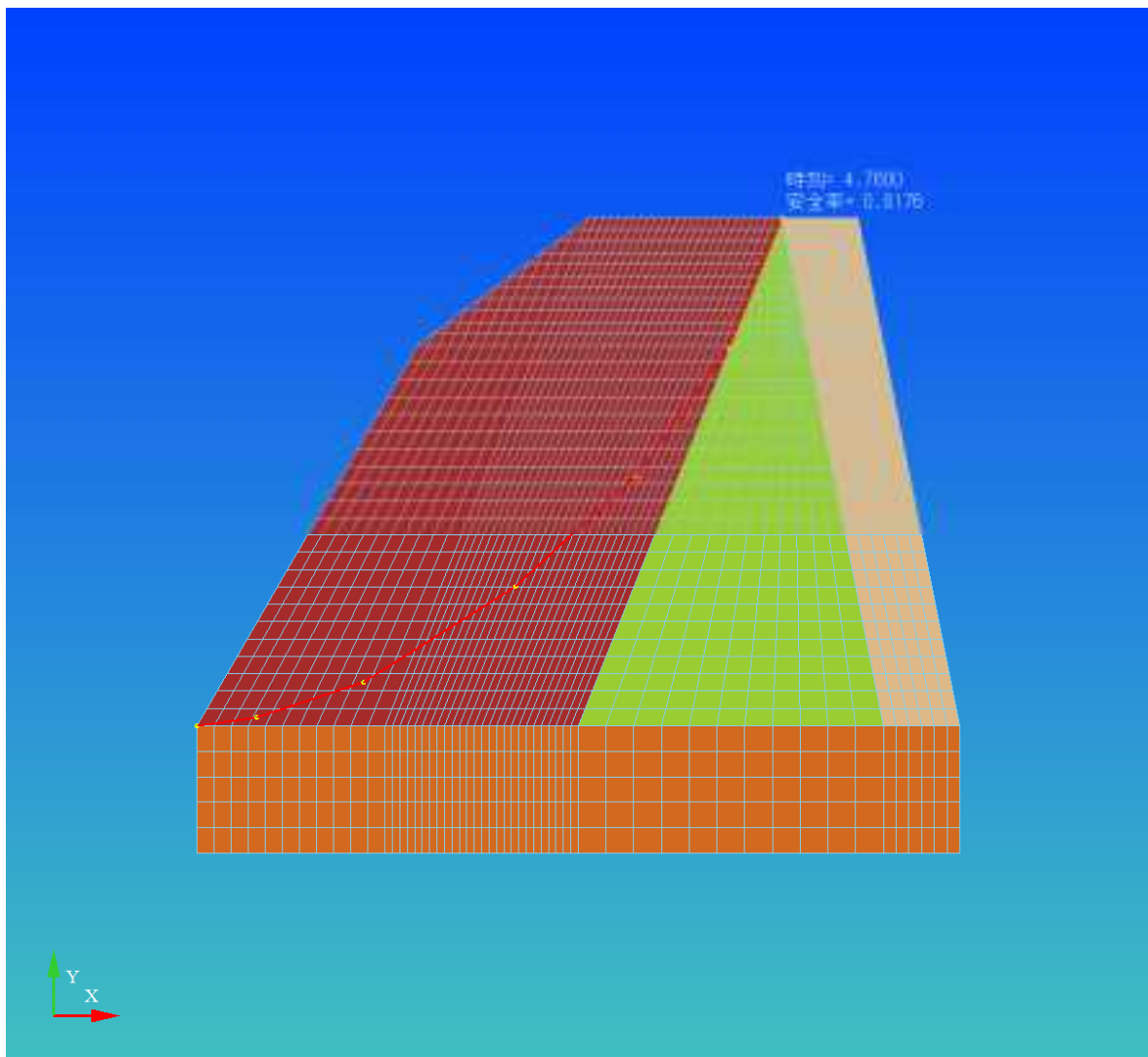


図 11.3.68 中型1層斜面 (Case19) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-加速度(地震時)

(2) Case20

① 逐次非線形動的解析

設定した探査条件を表 11.3.37 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.69 に、安全率の代表時刻を表 11.3.38 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.70 図 11.3.54 に示す。

表 11.3.37 中型3層斜面 (Case20) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	2	0.15	0.6	2	2.55

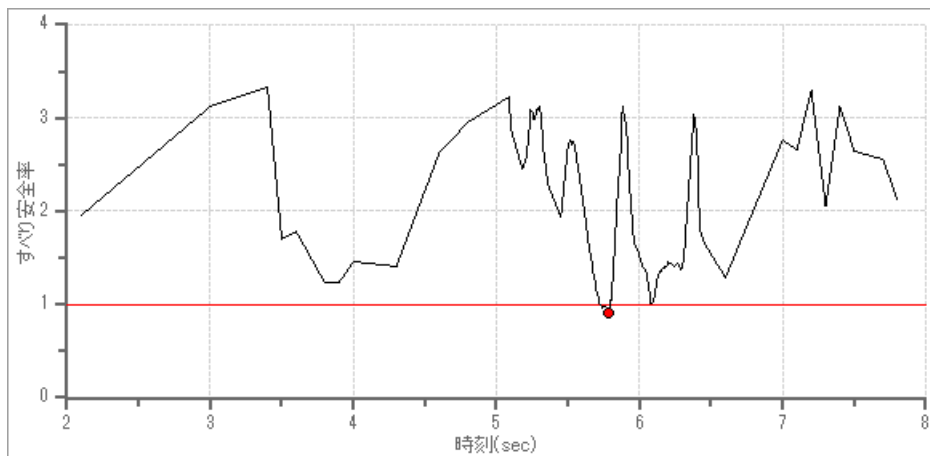


図 11.3.69 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率履歴

表 11.3.38 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率 ワースト10 非円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	5.780	0.904
2	5.770	0.964
3	5.790	0.967
4	5.740	0.967
5	5.750	0.973
6	5.760	0.982
7	5.720	1.011
8	6.080	1.015
9	6.090	1.021
10	6.100	1.048

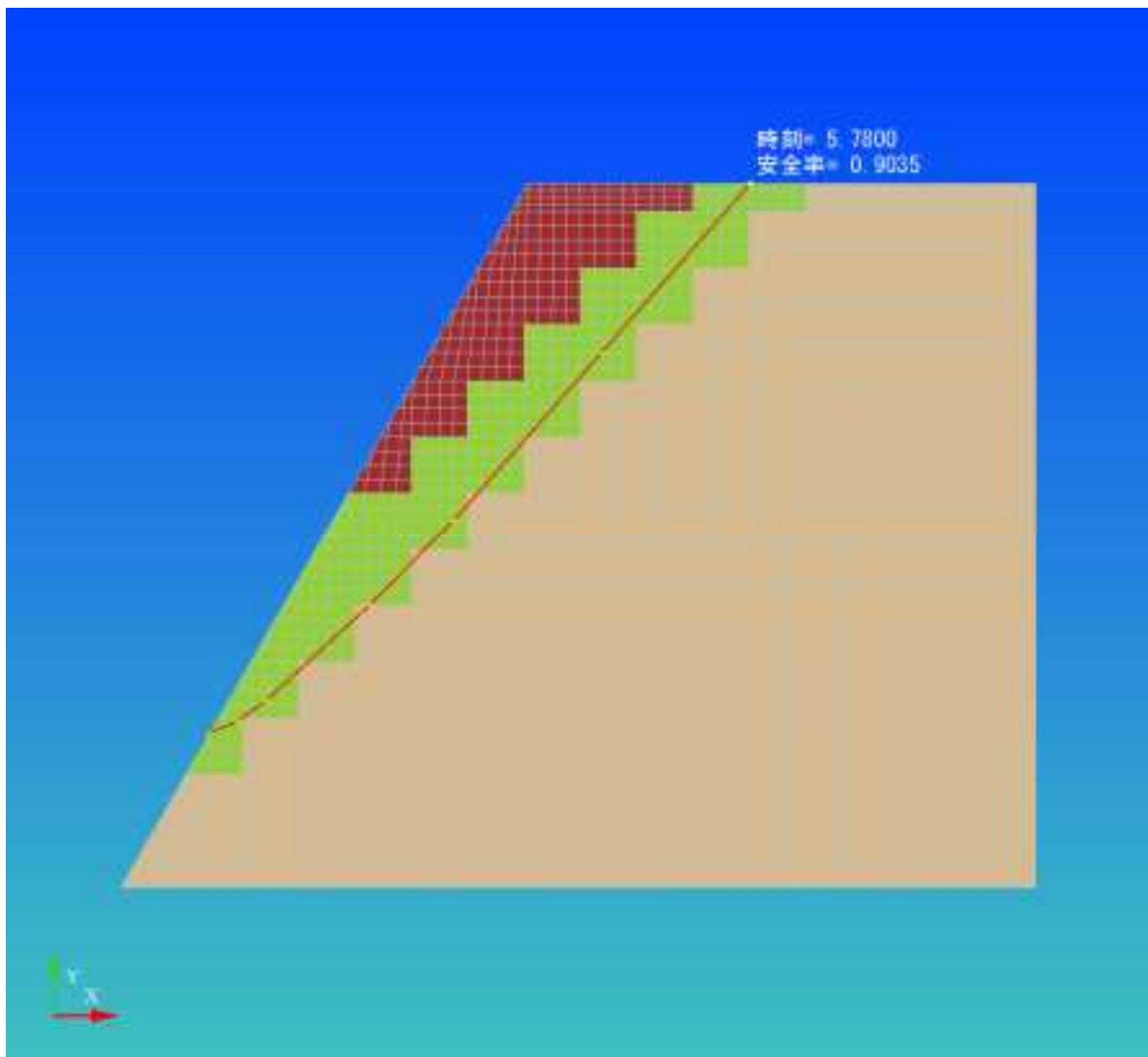


図 11.3.70 中型3層斜面 (Case20) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-加速度(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を表 11.3.39 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.71 に、安全率の代表時刻を表 11.3.40 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.72 に示す。

表 11.3.39 中型3層斜面 (Case20) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	2	0.15	0.6	2	2.55

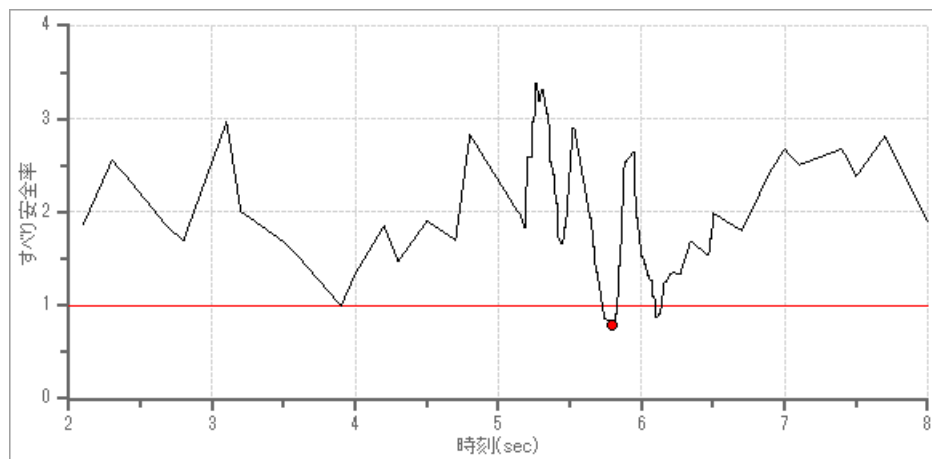


図 11.3.71 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率履歴

表 11.3.40 中型3層斜面 (Case20) すべり安全率 ワースト10 非円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	5.800	0.794
2	5.810	0.794
3	5.760	0.834
4	5.770	0.834
5	5.740	0.865
6	5.750	0.865
7	6.100	0.867
8	6.110	0.867
9	5.820	0.904
10	5.830	0.904

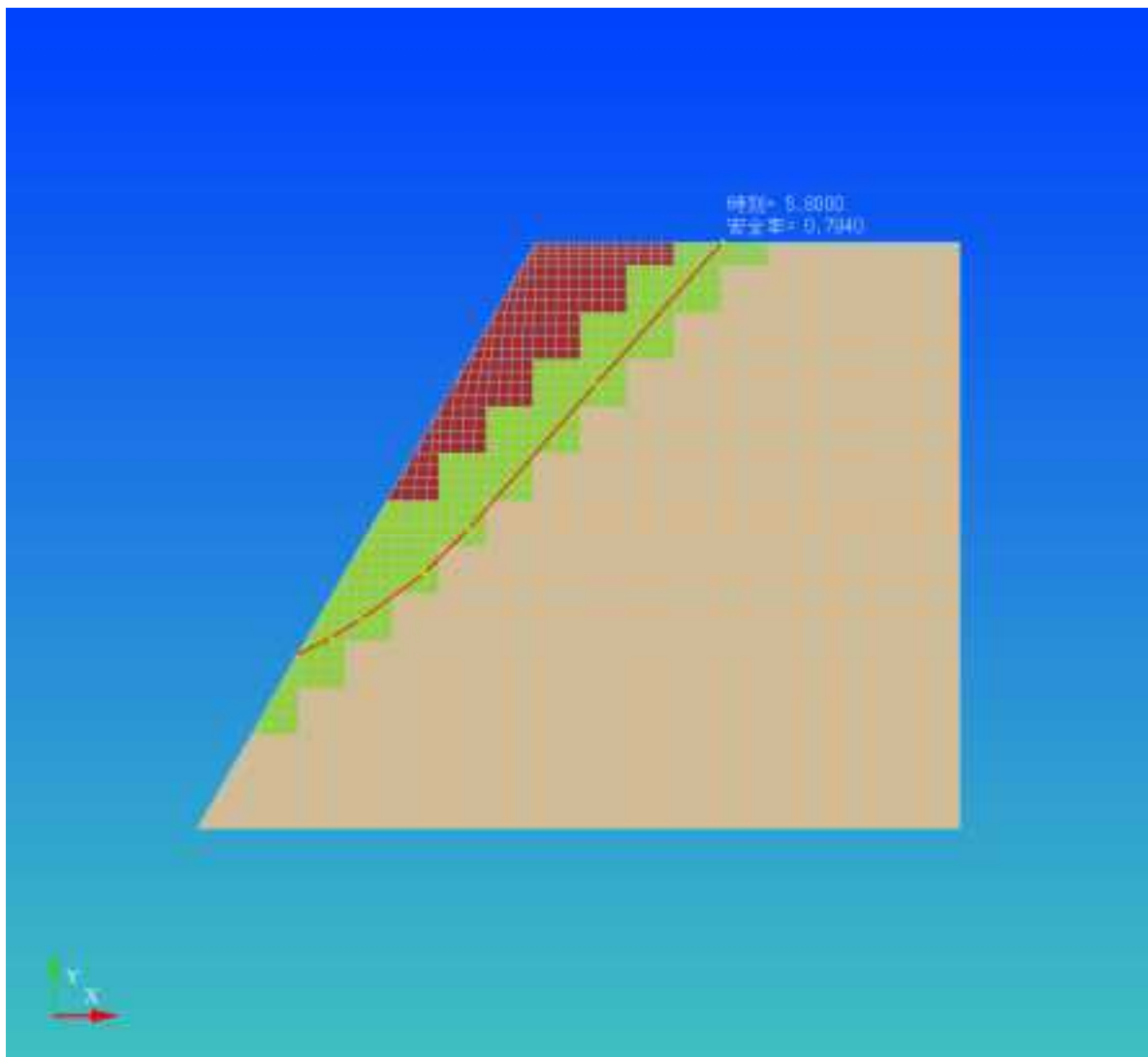


図 11.3.72 中型3層斜面 (Case20) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-加速度(地震時)

### (3) Case21

#### ① 逐次非線形動的解析

設定した探査条件を表 11.3.39 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.71 に、安全率の代表時刻を表 11.3.40 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.72 に示す。

表 11.3.41 大型1層斜面 (Case21) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	2	4.5	4	1.5	0.75

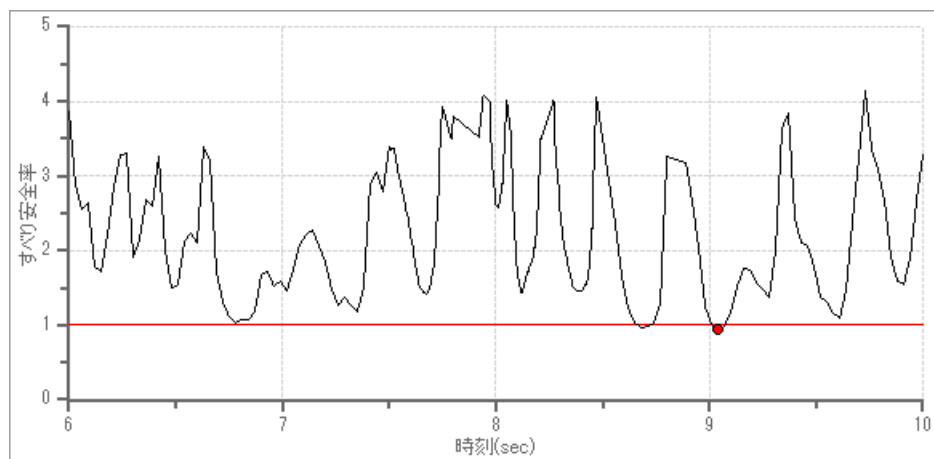


図 11.3.73 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率履歴



表 11.3.42 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率 ワースト10 非円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	9.040	0.939
2	8.680	0.976
3	9.070	0.982
4	8.710	0.987
5	9.010	1.002
6	6.780	1.023
7	8.740	1.034
8	8.650	1.038
9	6.810	1.075
10	6.840	1.081

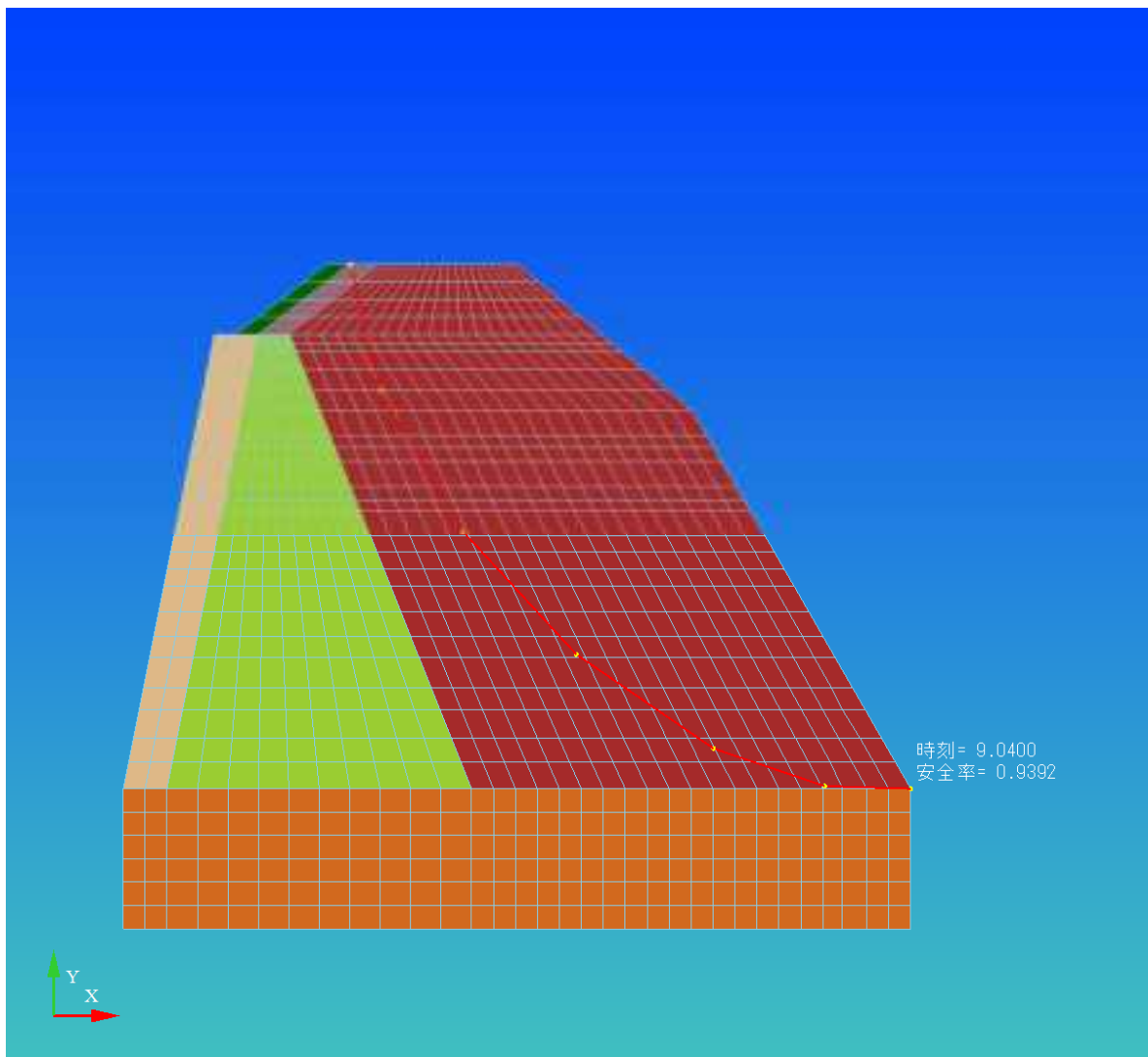


図 11.3.74 大型1層斜面 (Case21) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-加速度(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を表 11.3.43 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.75 に、安全率の代表時刻を表 11.3.44 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.76 に示す。

表 11.3.43 大型1層斜面 (Case21) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	4.5	4	1.5	0.75

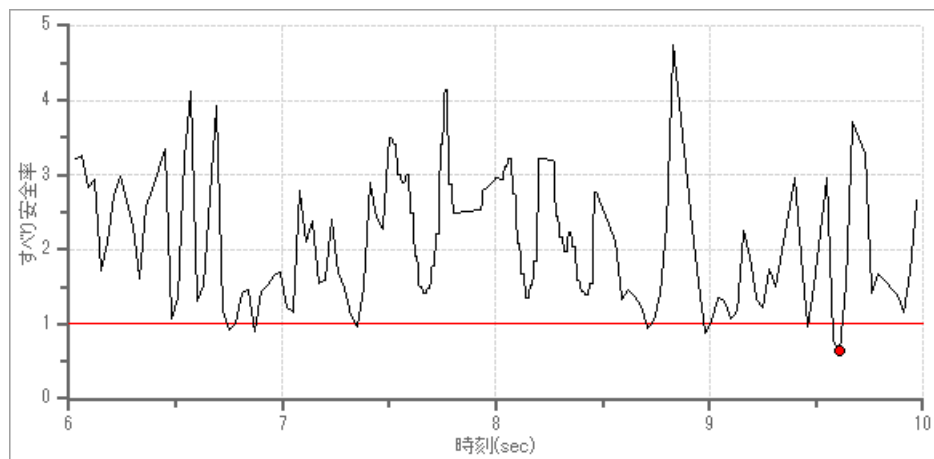


図 11.3.75 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率履歴

表 11.3.44 大型1層斜面 (Case21) すべり安全率 ワースト10 非円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	9.610	0.647
2	9.580	0.778
3	8.980	0.878
4	6.870	0.907
5	6.750	0.916
6	8.710	0.938
7	7.350	0.960
8	9.460	0.970
9	6.780	1.010
10	9.010	1.048

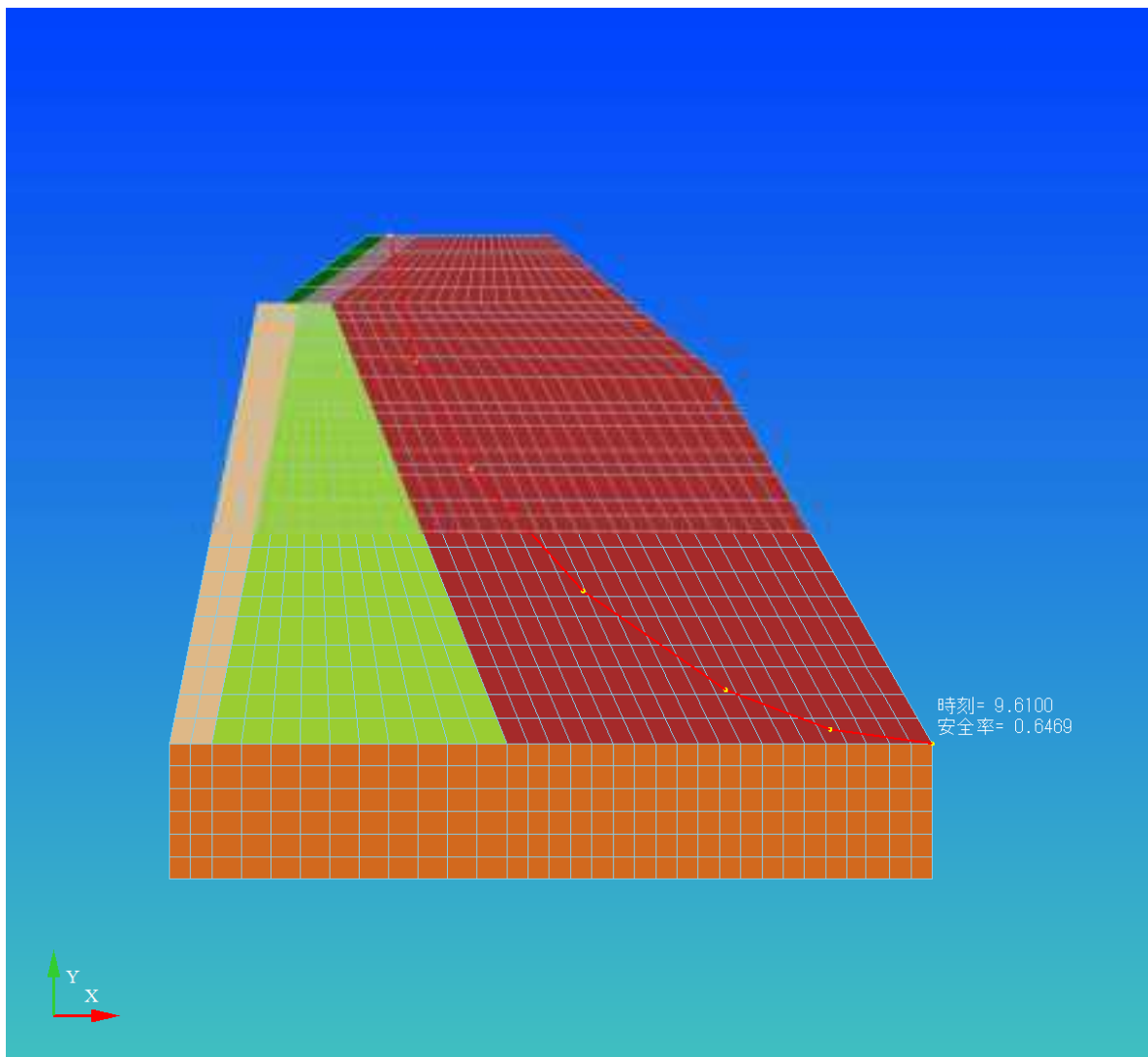


図 11.3.76 大型1層斜面 (Case21) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-加速度(地震時)

(4) Case22

① 逐次非線形動的解析

設定した探索条件を表 11.3.45 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.77 に、安全率の代表時刻を表 11.3.46 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.78 に示す。

表 11.3.45 大型3層斜面 (Case22) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	-0.2	-0.5	-2.9	-3.5

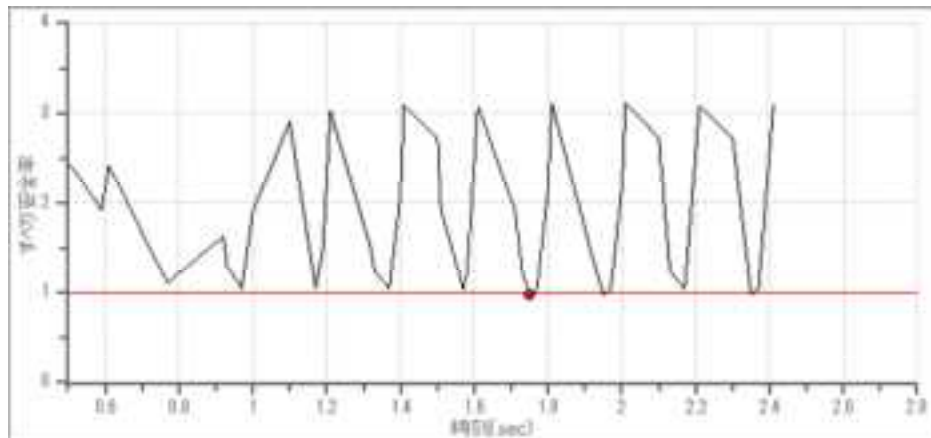


図 11.3.77 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率履歴

表 11.3.46 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率 ワースト10 非円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	1.750	0.978
2	2.350	0.980
3	1.950	0.985
4	1.570	1.039
5	1.370	1.040
6	2.370	1.040
7	1.770	1.041
8	1.170	1.042
9	2.170	1.043
10	1.970	1.044

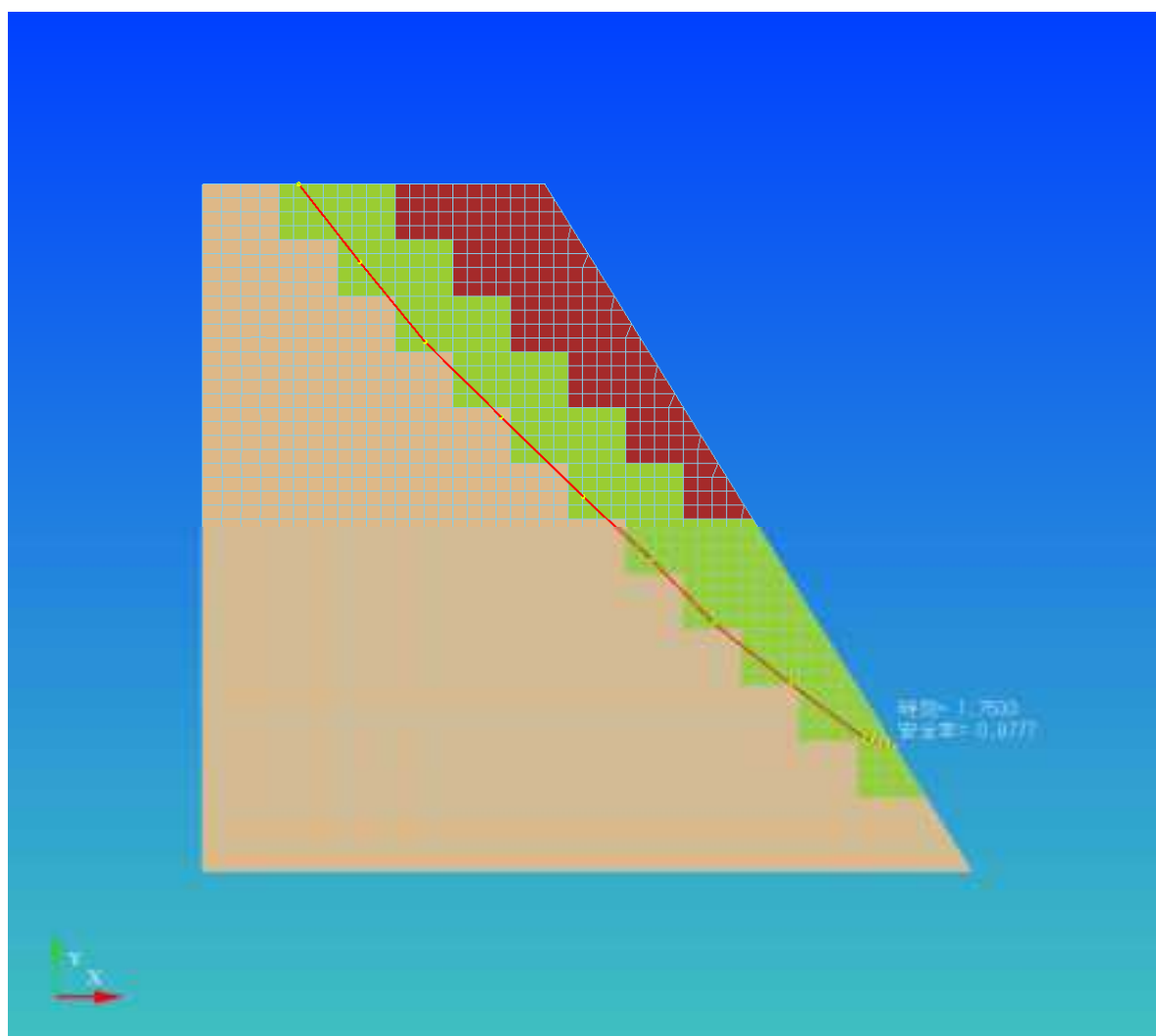


図 11.3.78 大型3層斜面 (Case22) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-加速度(地震時)

② 等価線形解析

設定した探査条件を表 11.3.47 に示す。

すべり安全率履歴図を図 11.3.79 に、安全率の代表時刻を表 11.3.48 に示す。

最小すべり安全率時のすべり線形状を図 11.3.80 に示す。

表 11.3.47 大型3層斜面 (Case22) 非円弧 探索条件

初期すべり線節点数	節点数増加ステップ	入り口x座標最小値	入り口x座標最大値	出口x座標最小値	出口x座標最大値
4	3	-0.2	-0.5	-2.9	-3.5

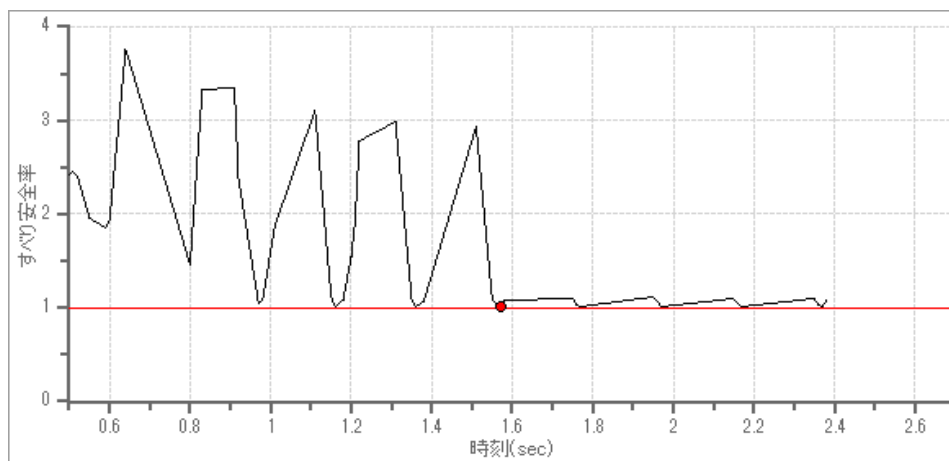


図 11.3.79 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率履歴

表 11.3.48 大型3層斜面 (Case22) すべり安全率 ワースト10 非円弧-加速度(地震時)

ランク	時刻(sec)	安全率
1	1.570	1.016
2	1.160	1.018
3	1.770	1.018
4	2.370	1.018
5	1.970	1.019
6	2.170	1.020
7	1.360	1.021
8	1.760	1.024
9	2.360	1.025
10	1.560	1.033

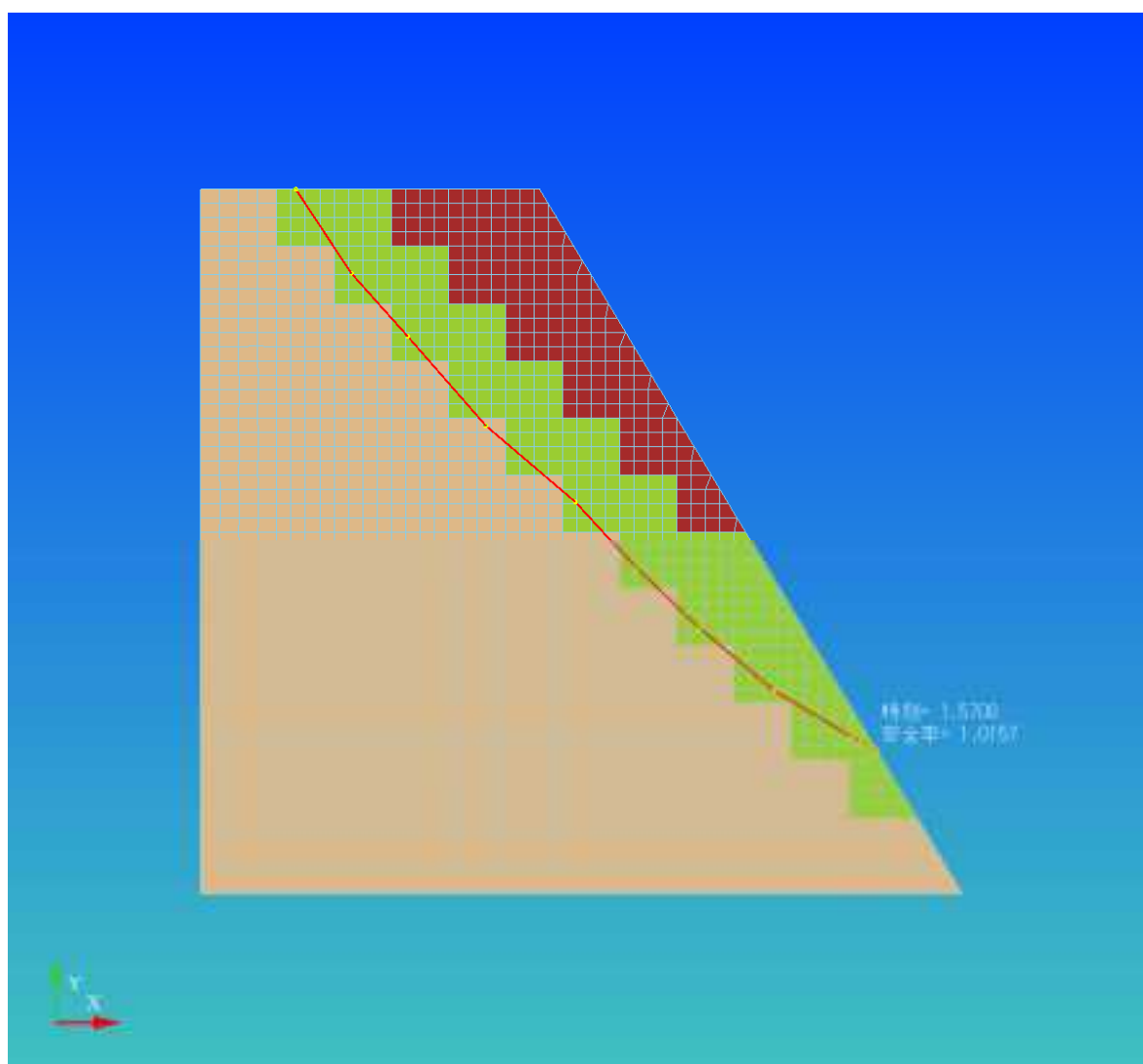


図 11.3.80 大型3層斜面 (Case22) すべり線形状(最小すべり安全率時) 非円弧-加速度(地震時)

## 11.4 ニューマーク法によるすべり土塊の変形解析

### 11.4.1 円弧による探索-応力履歴

#### (1) Case19

##### ① 逐次非線形動的解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

##### ② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.1 に示す。

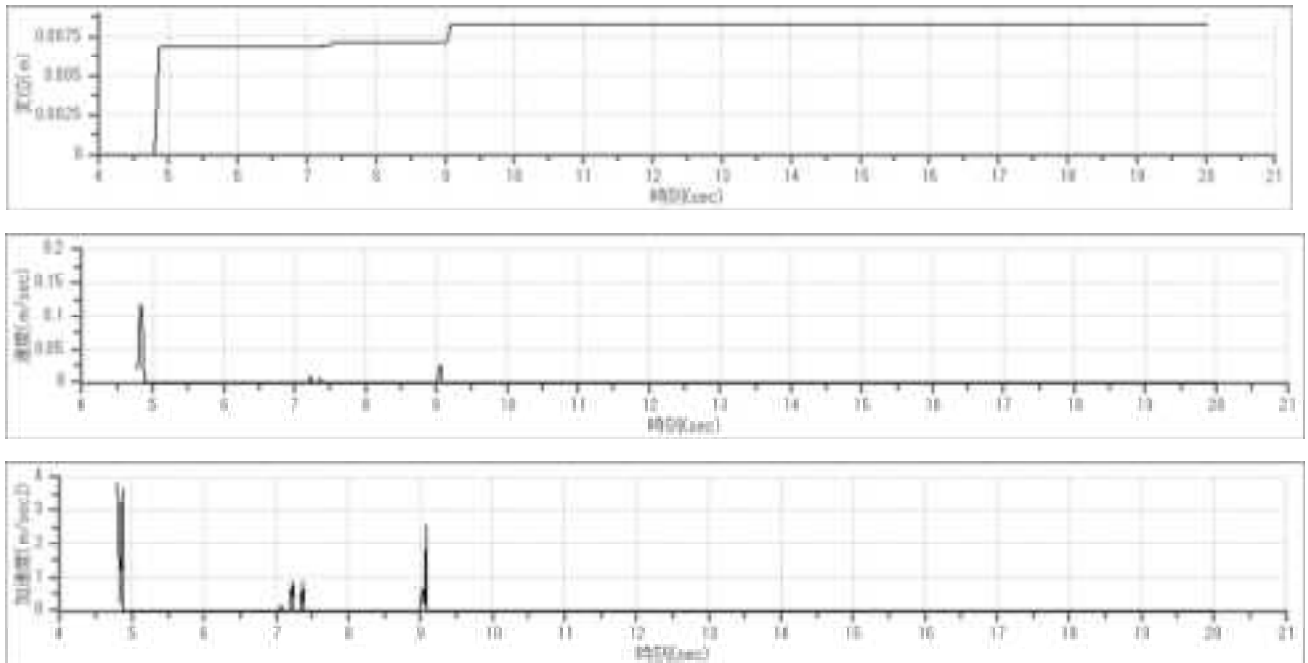


図 11.4.1 中型1層斜面 (Case19) 残留変形量



(2) Case20

① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.2 に示す。

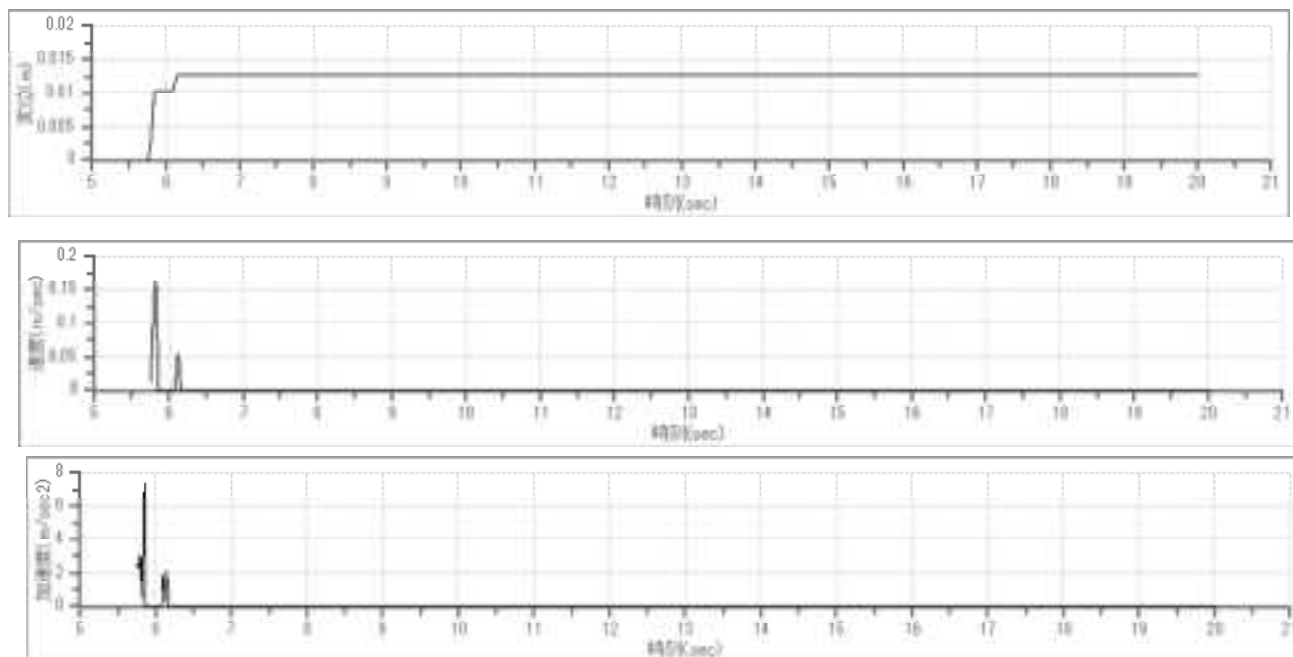


図 11.4.2 中型3層斜面 (Case20) 残留変形量

② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.3 に示す。

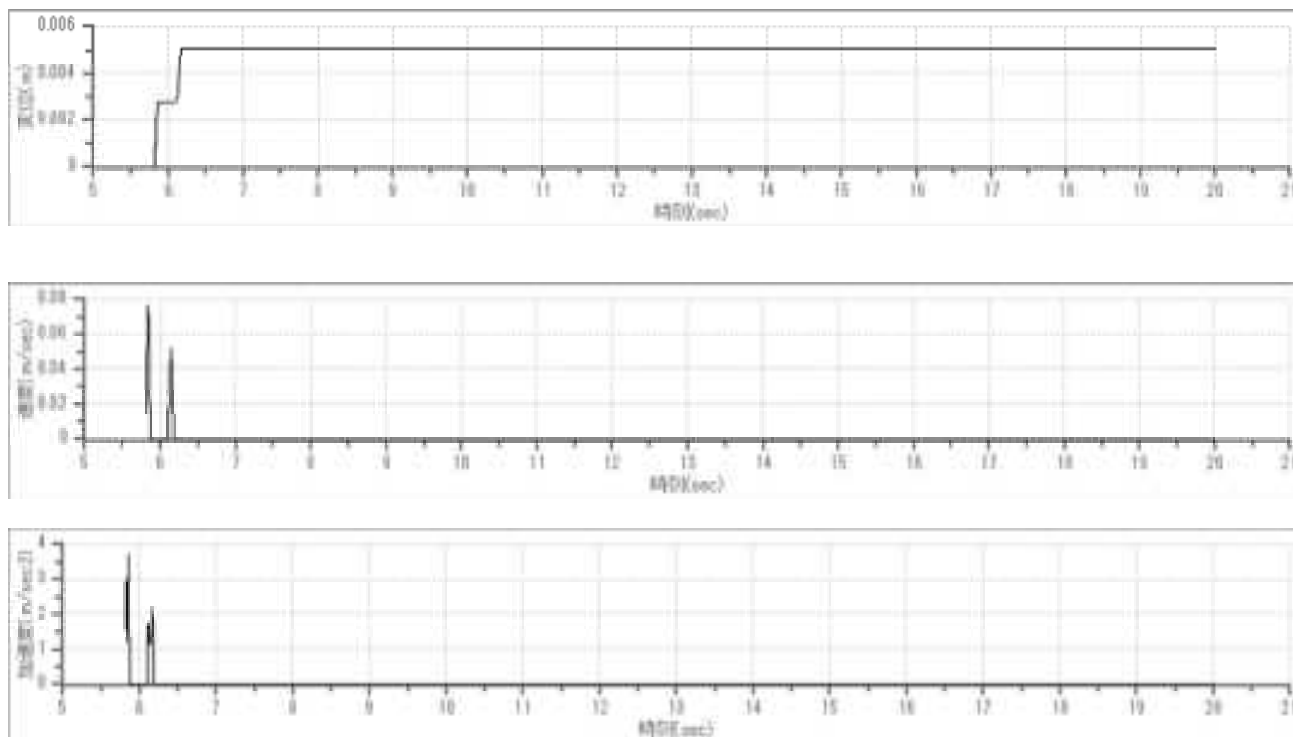


図 11.4.3 中型3層斜面 (Case20) 残留変形量

### (3) Case21

#### ① 逐次非線形動的解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

#### ② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.4 に示す。

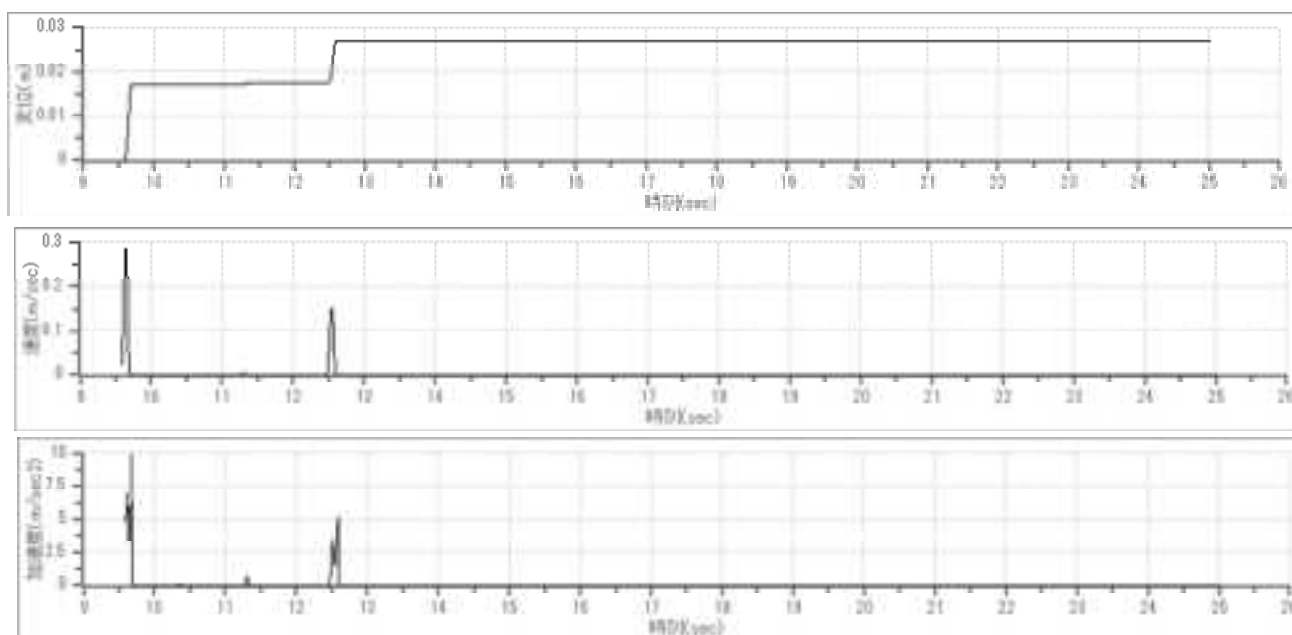


図 11.4.4 大型1層斜面 (Case21) 残留変形量

(4) Case22

① 逐次非線形動的解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

② 等価線形解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

## 11.4.2 円弧による探索-加速度履歴

### (1) Case19

#### ① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.5 に示す。

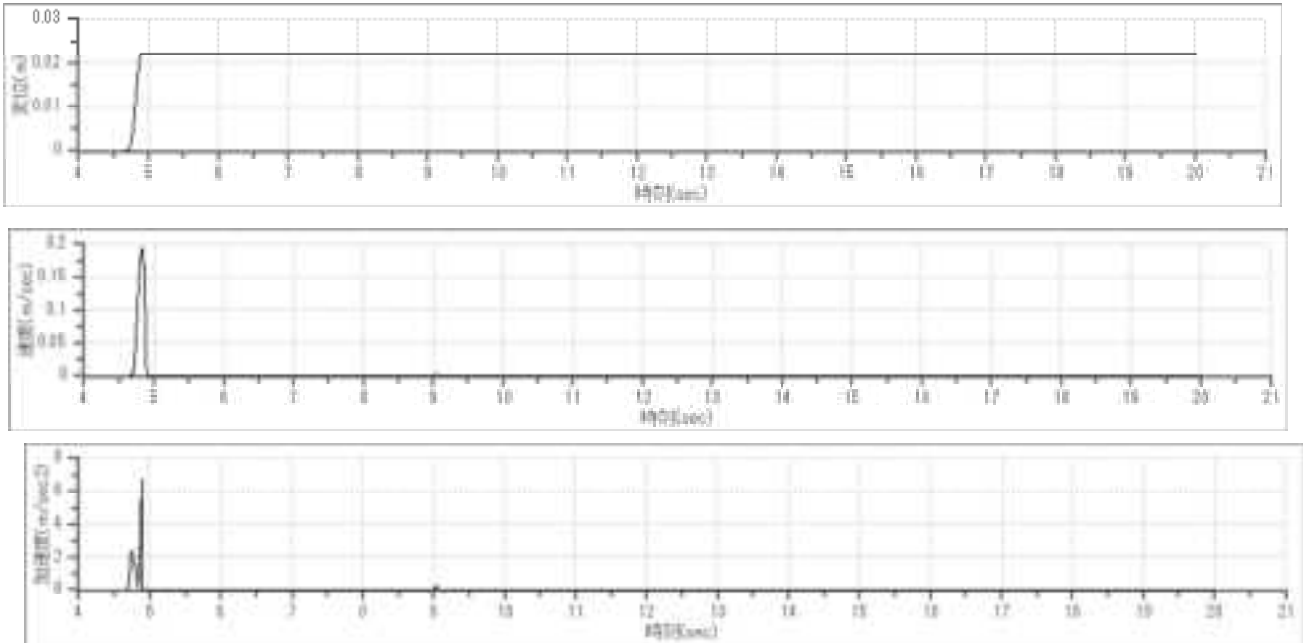


図 11.4.5 中型1層斜面 (Case19) 残留変形量

#### ② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.6 に示す。

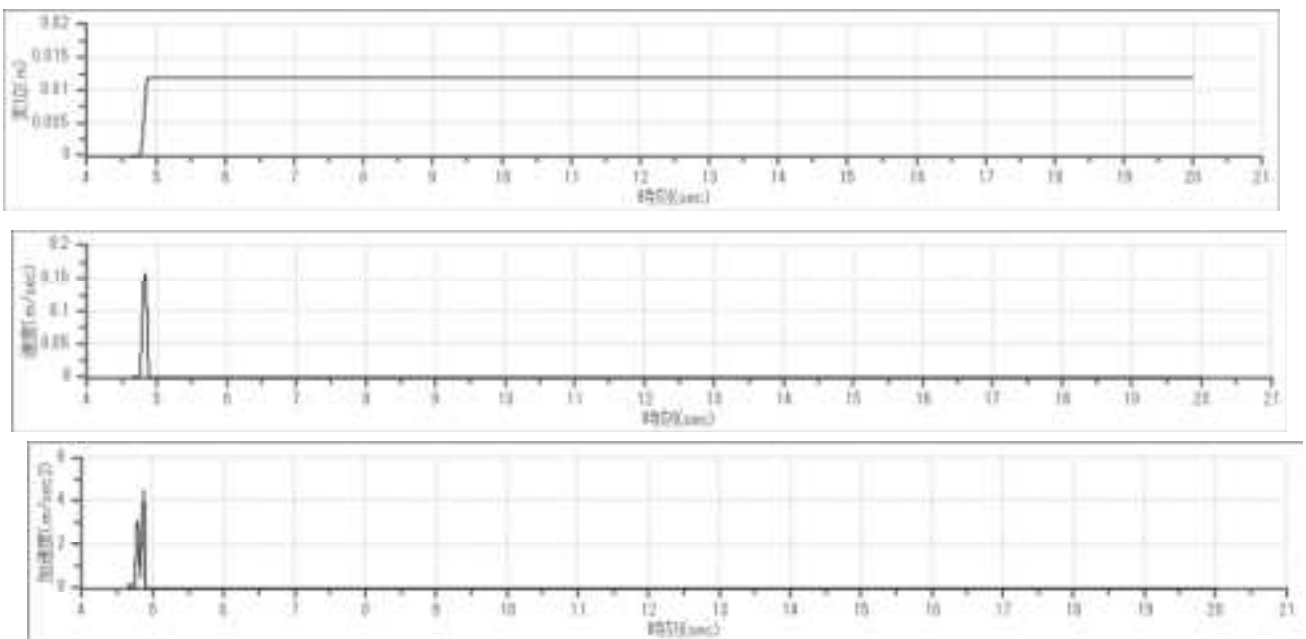


図 11.4.6 中型1層斜面 (Case19) 残留変形量

(2) Case20

① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.7 に示す。

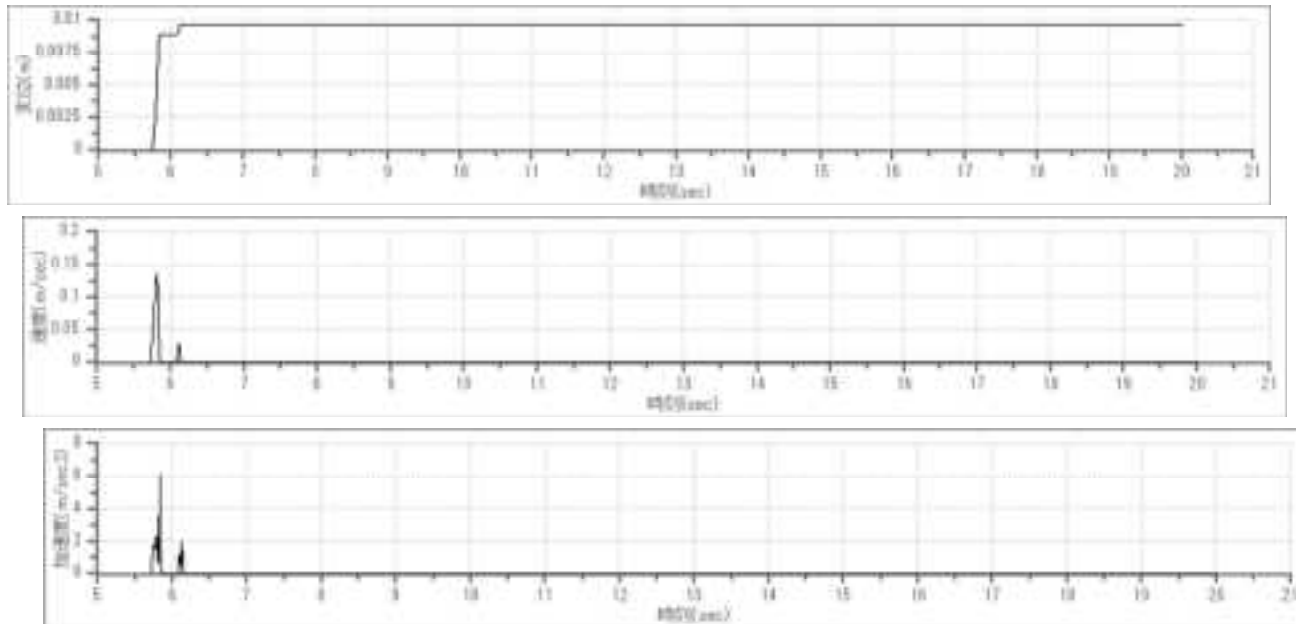


図 11.4.7 中型3層斜面 (Case20) 残留変形量

② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.8 に示す。

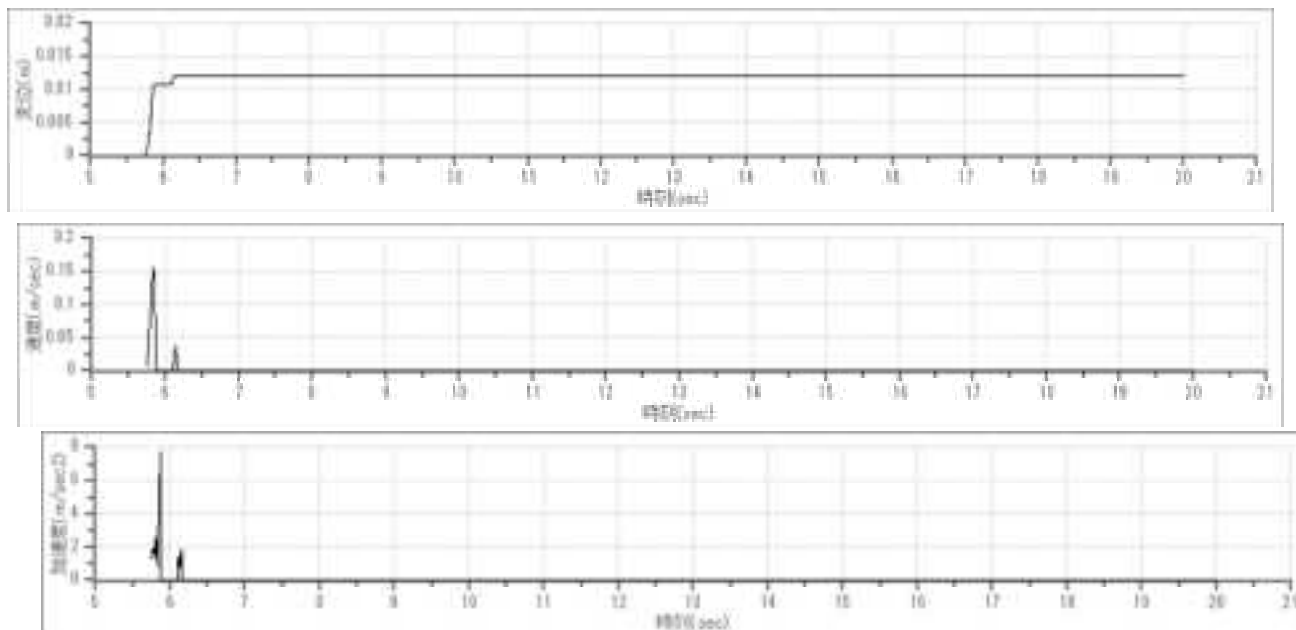


図 11.4.8 中型3層斜面 (Case20) 残留変形量

### (3) Case21

#### ① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.9 に示す。

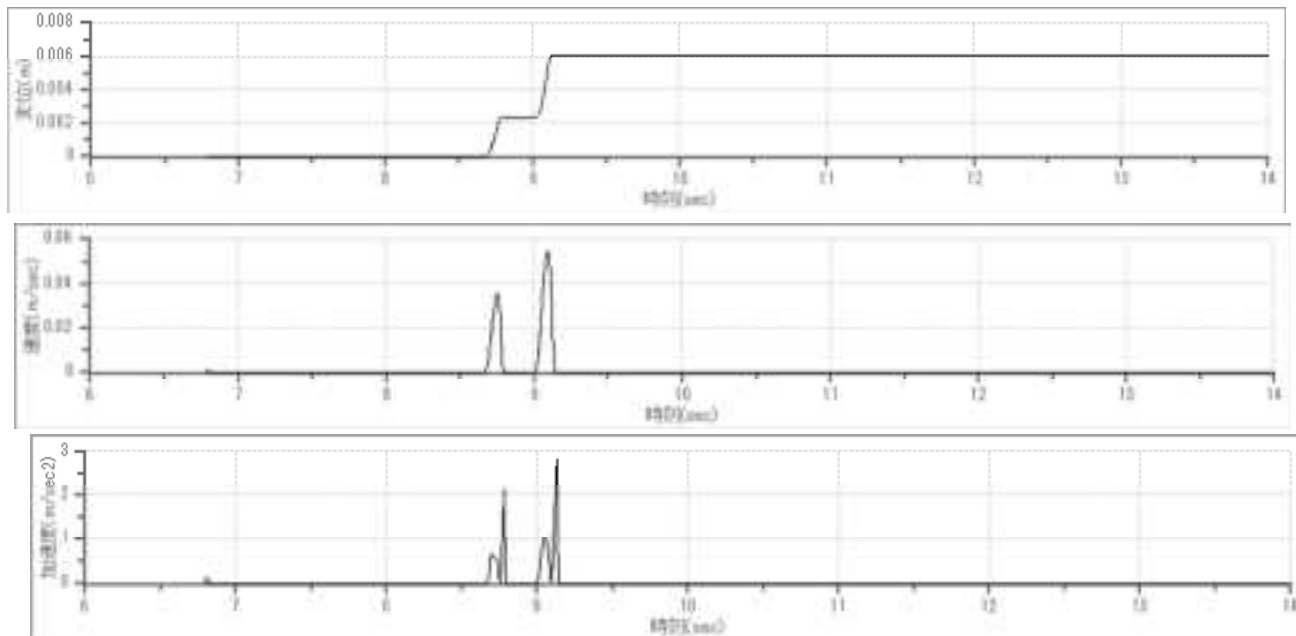


図 11.4.9 大型1層斜面 (Case21) 残留変形量

#### ② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.10 に示す。

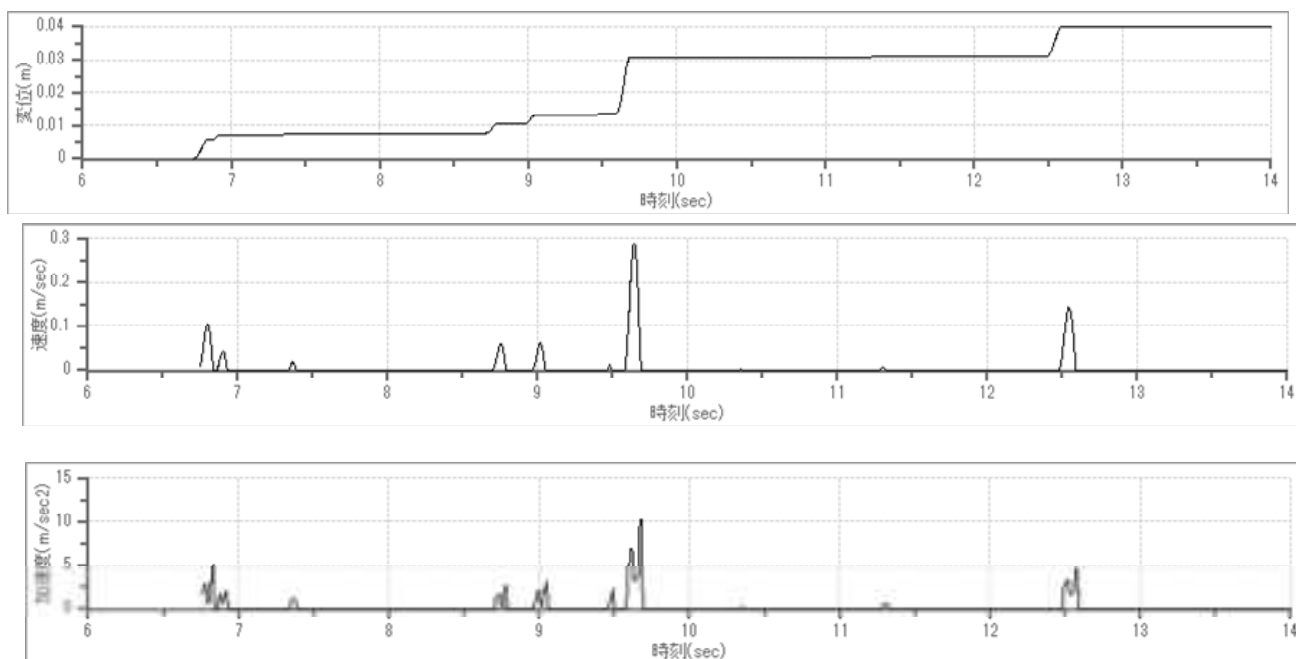


図 11.4.10 大型1層斜面 (Case21) 残留変形量

(4) Case22

① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.11 に示す。

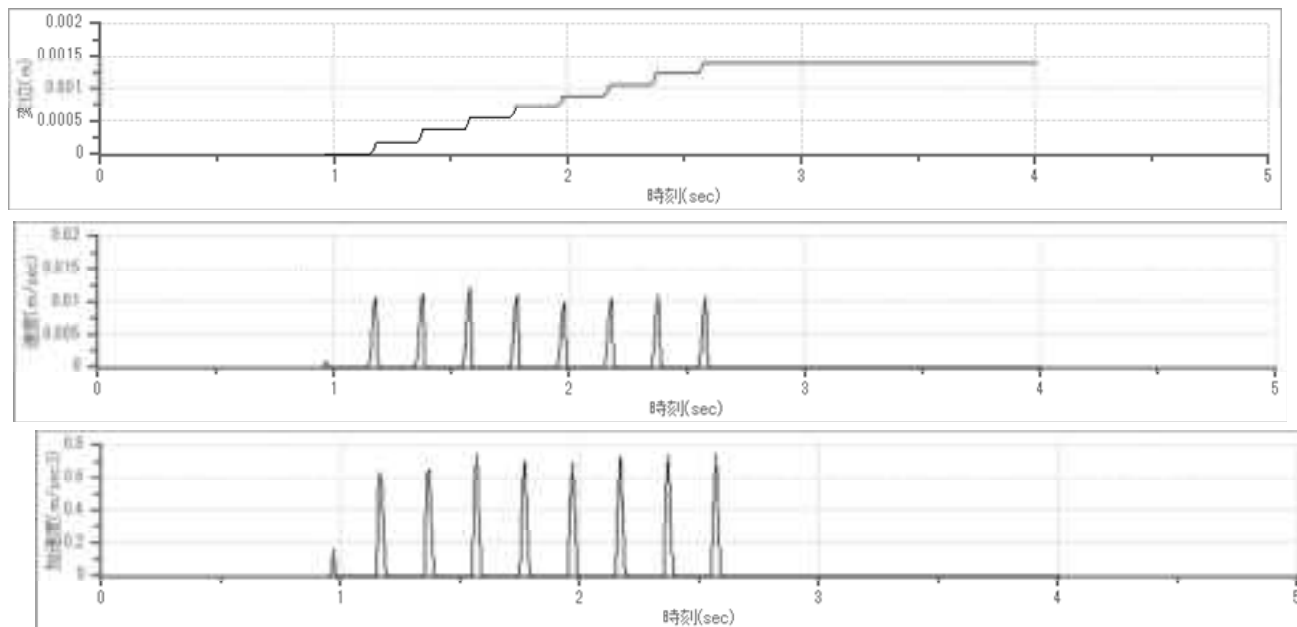


図 11.4.11 大型3層斜面 (Case22) 残留変形量

② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.12 に示す。

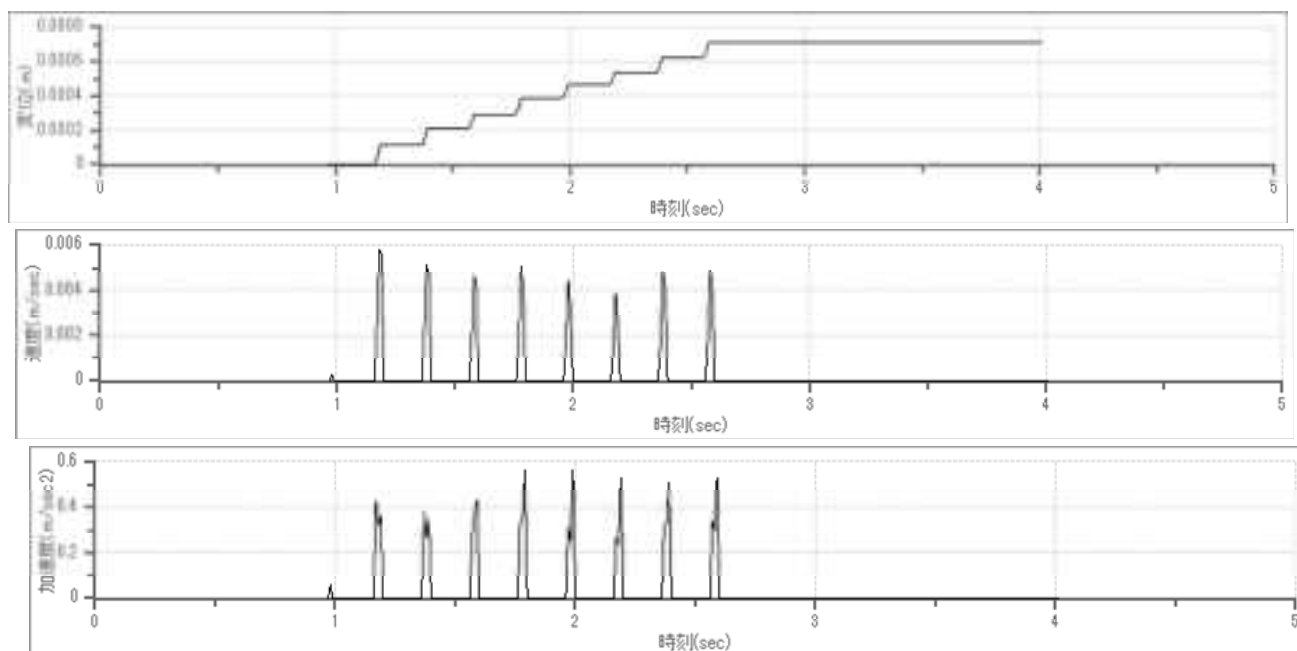


図 11.4.12 大型3層斜面 (Case22) 残留変形量

### 11.4.3 非円弧による探索-応力履歴

#### (1) Case19

##### ① 逐次非線形動的解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

##### ② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.13 に示す。

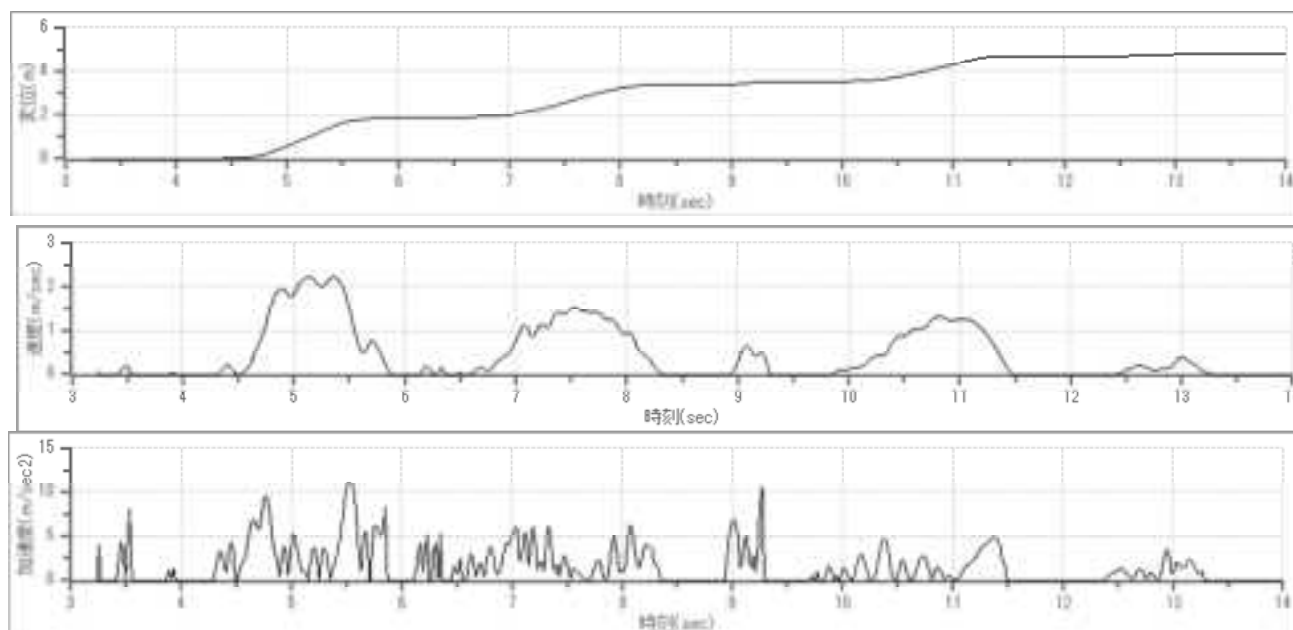


図 11.4.13 中型1層斜面 (Case19) 残留変形量



(2) Case20

① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.14 に示す。

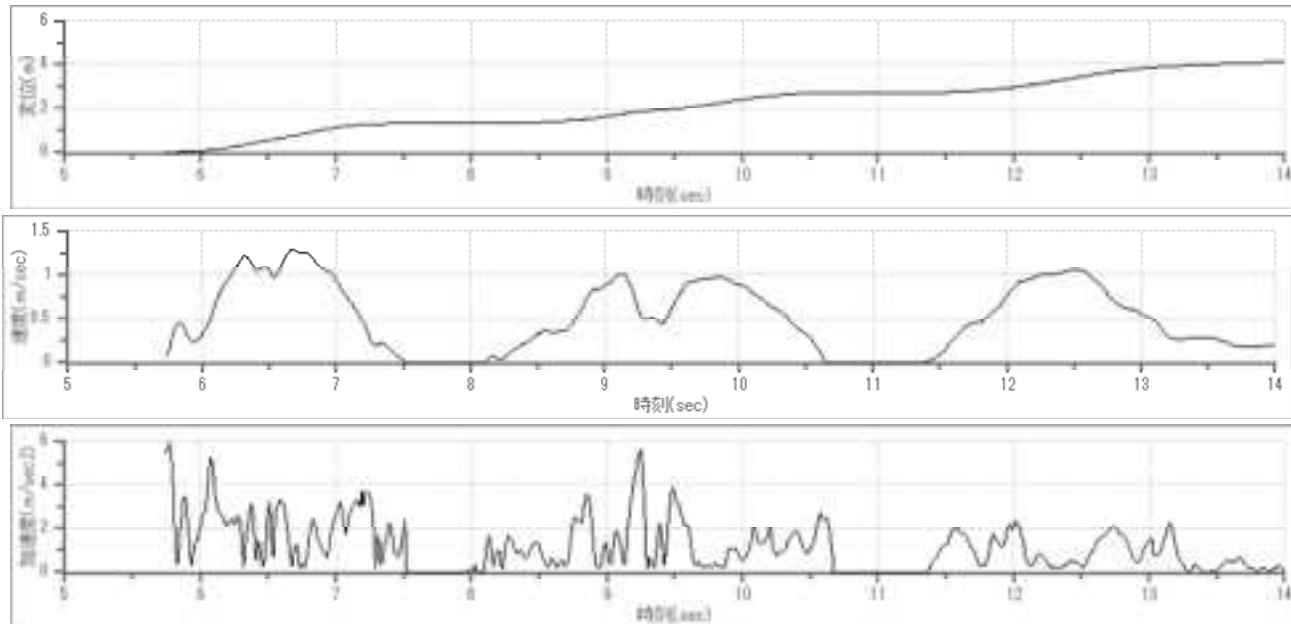


図 11.4.14 中型3層斜面 (Case20) 残留変形量

② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.15 に示す。

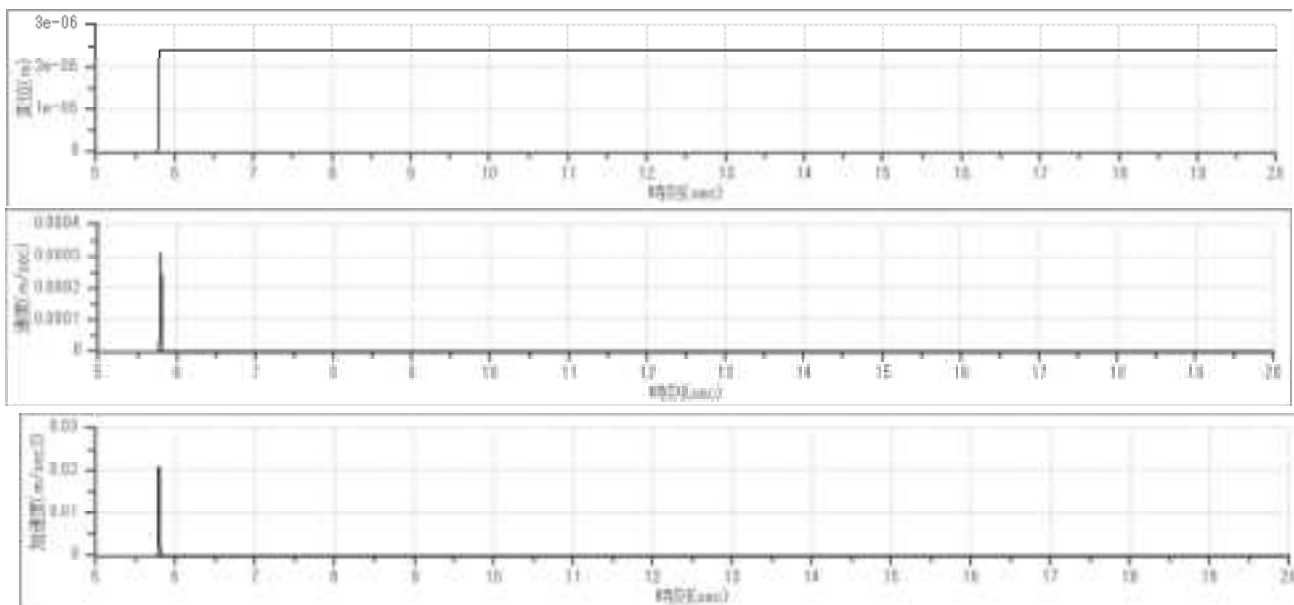


図 11.4.15 中型3層斜面 (Case20) 残留変形量

### (3) Case21

#### ① 逐次非線形動的解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

#### ② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.16 に示す。

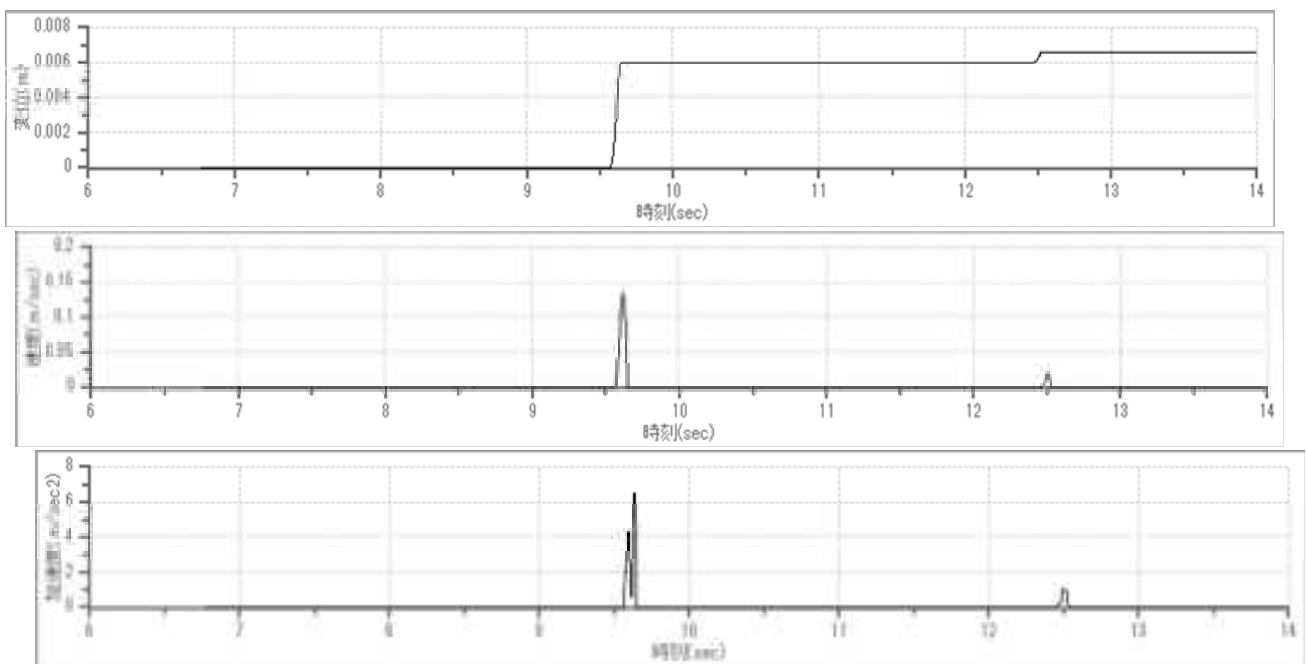


図 11.4.16 大型1層斜面 (Case21) 残留変形量

(4) Case22

① 逐次非線形動的解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

② 等価線形解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

#### 11.4.4 非円弧による探索-加速度履歴

##### (1) Case19

##### ① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.17 に示す。

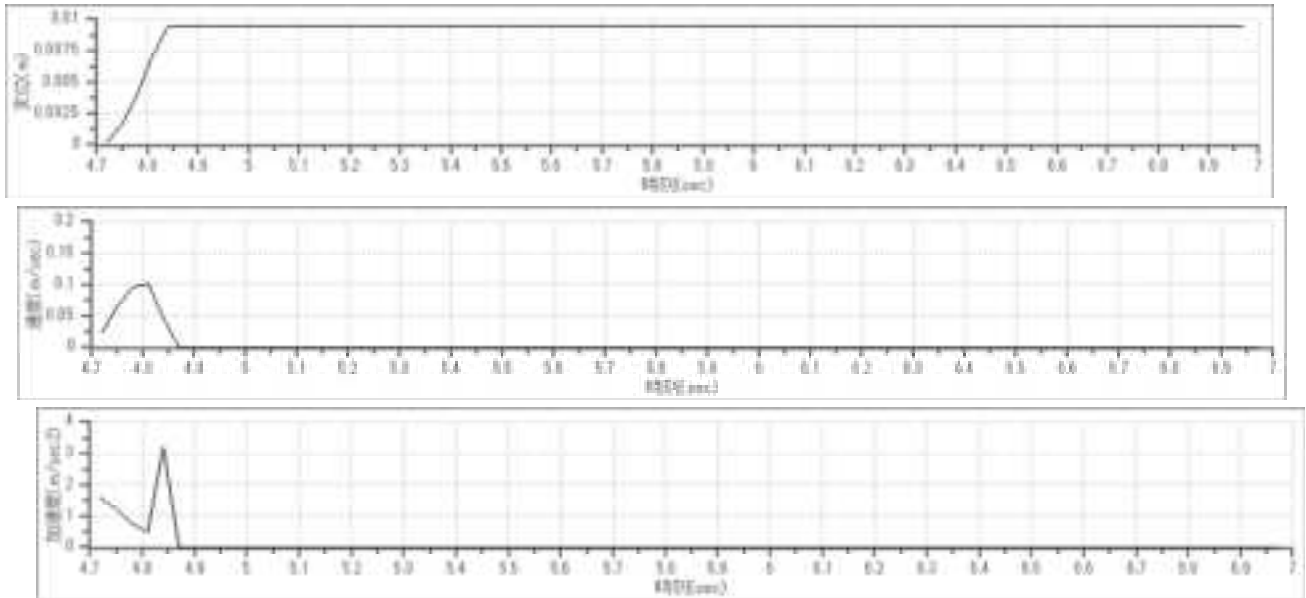


図 11.4.17 中型1層斜面 (Case19) 残留変形量

##### ② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.18 に示す。

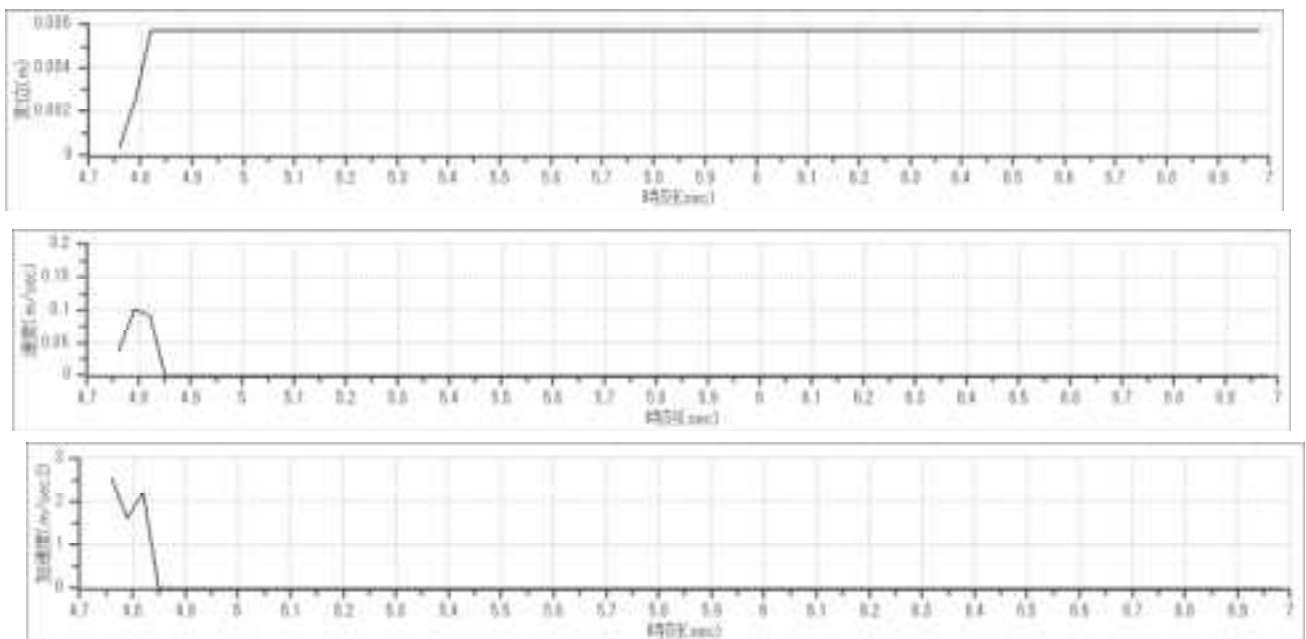


図 11.4.18 中型1層斜面 (Case19) 残留変形量

(2) Case20

① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.19 に示す。

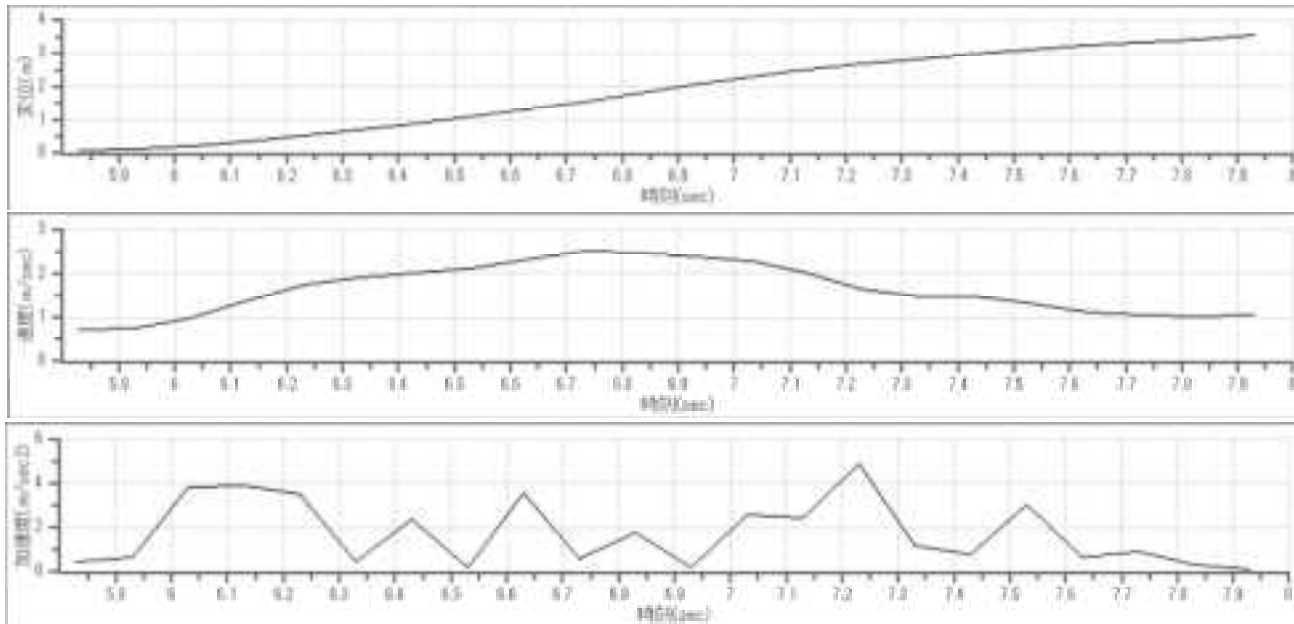


図 11.4.19 中型3層斜面 (Case20) 残留変形量

② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.20 に示す。

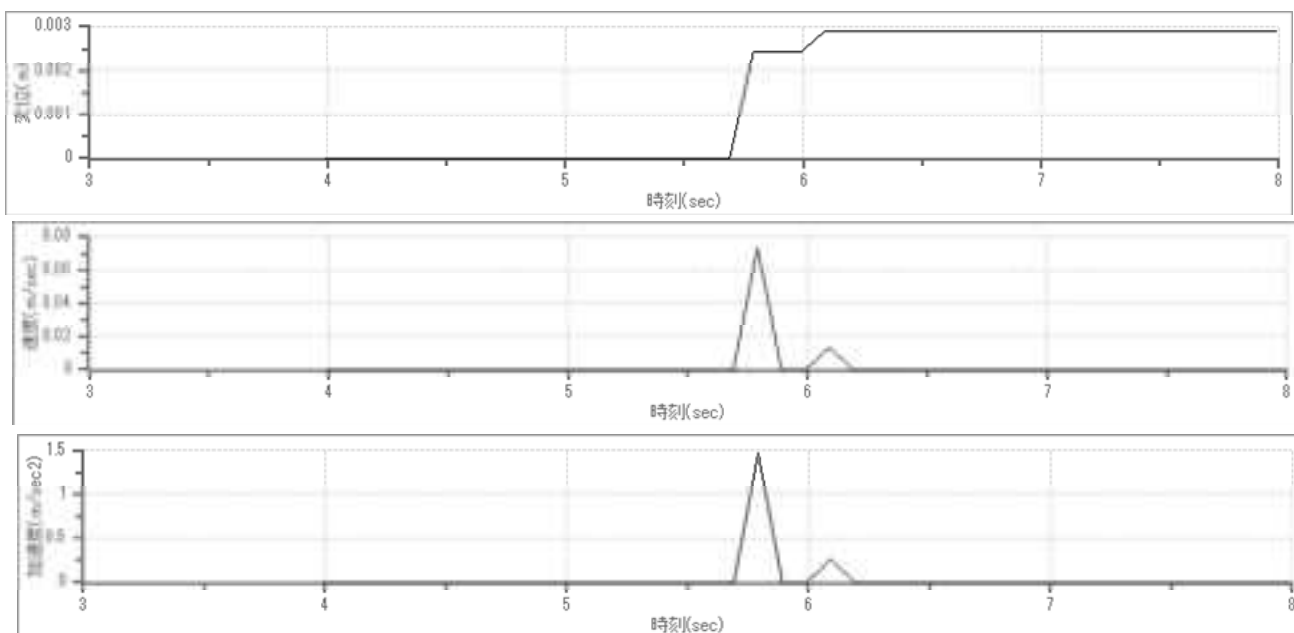


図 11.4.20 中型3層斜面 (Case20) 残留変形量

### (3) Case21

#### ① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.21 に示す。

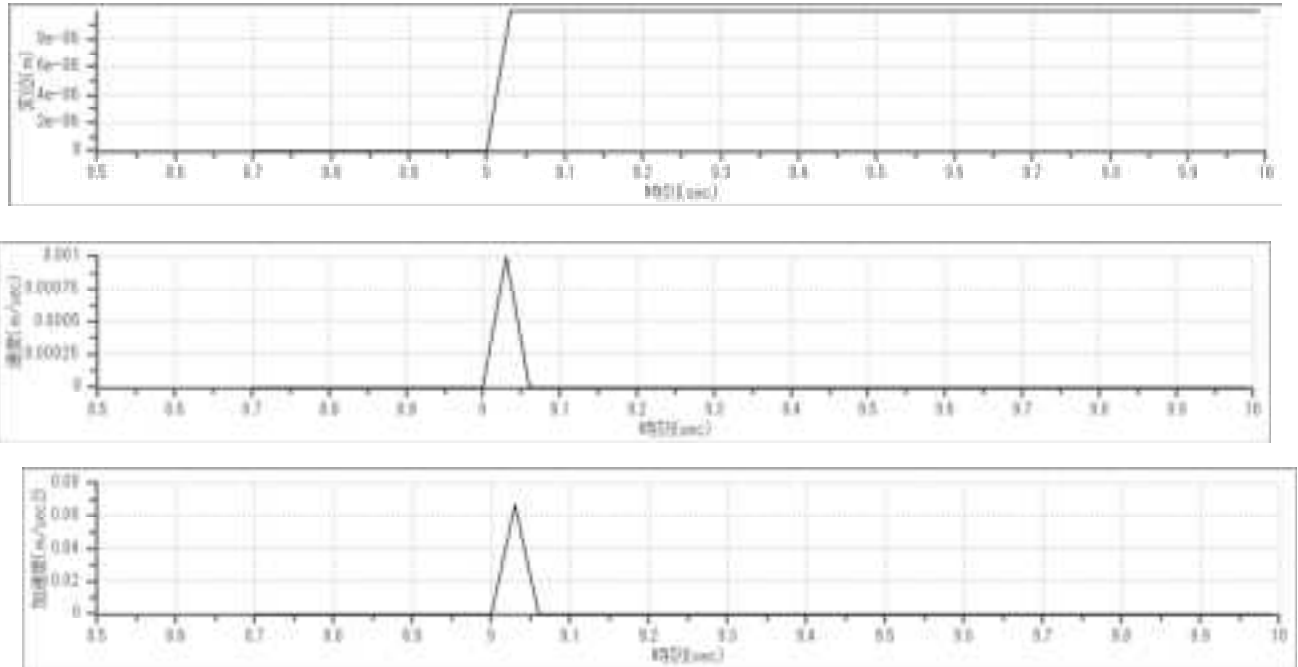


図 11.4.21 大型1層斜面 (Case21) 残留変形量

#### ② 等価線形解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.22 に示す。

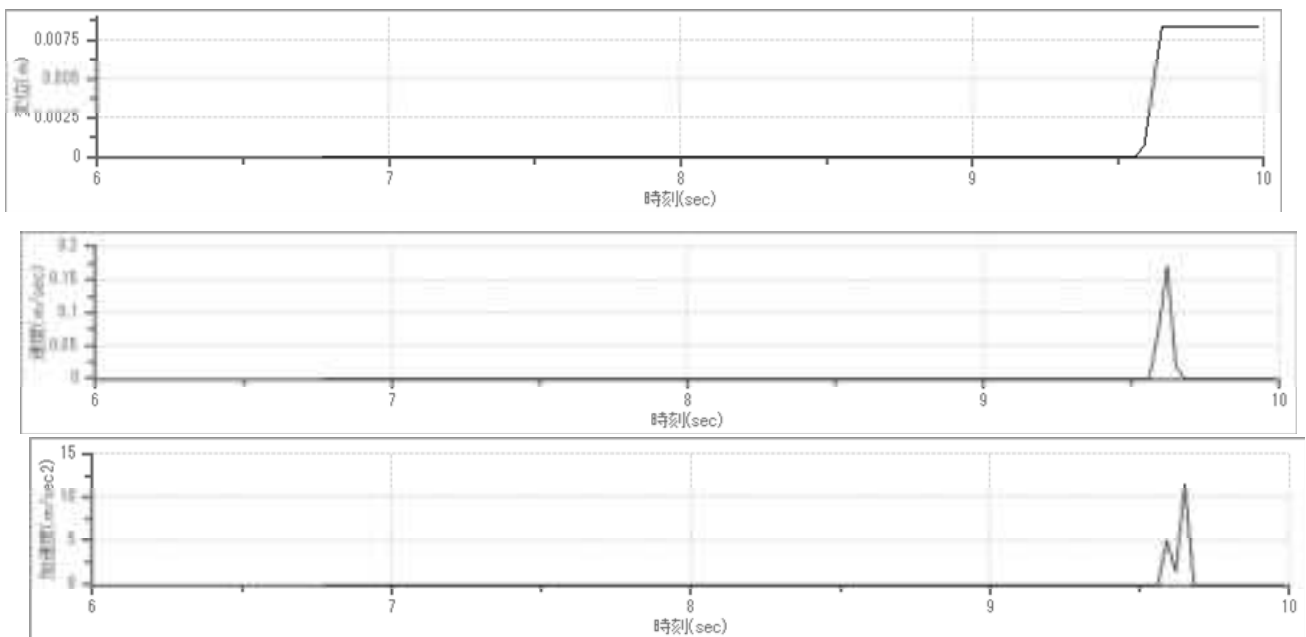


図 11.4.22 大型1層斜面 (Case21) 残留変形量

#### (4) Case22

##### ① 逐次非線形動的解析

ニューマーク法による残留変形量を図 11.4.23 に示す。

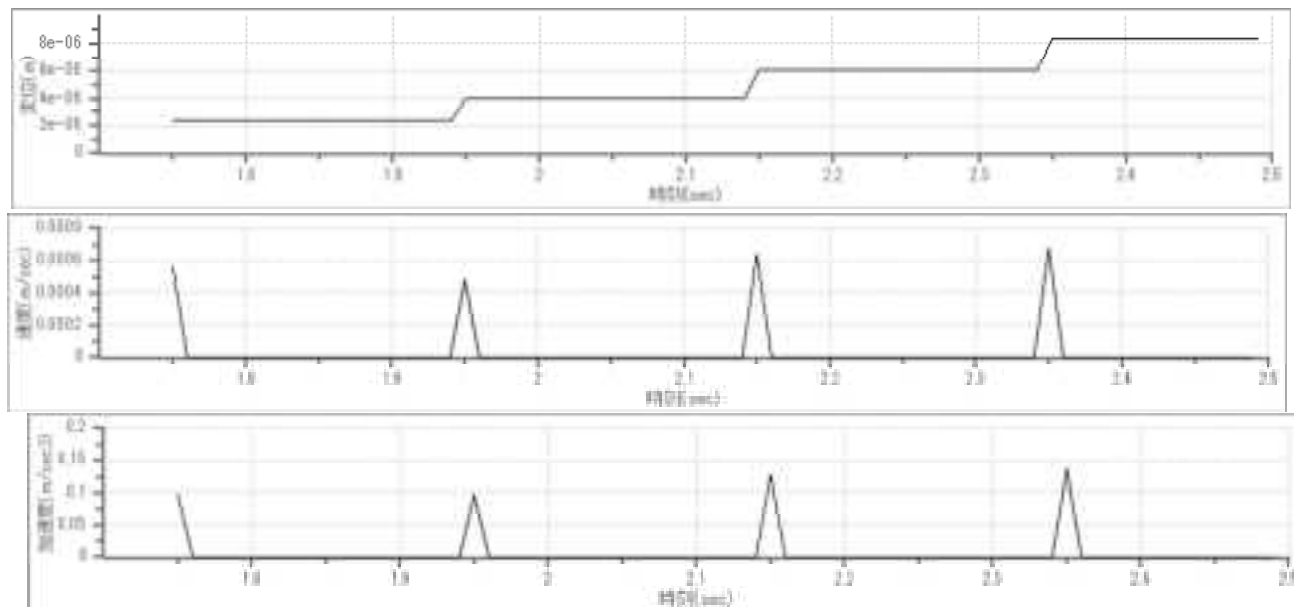


図 11.4.23 大型3層斜面 (Case22) 残留変形量

##### ② 等価線形解析

安全率 1.0 を切らなかったため残留変位量は発生しない結果となった。

## 11.5 まとめと考察

円弧、非円弧すべり線を用いた安定・変形解析ツールを構築し、検証解析を行った。以下に結論を示す。

### ・ケース 19

表 11.3.49 にまとめた結果を示す。解析結果のうち、すべり線形状については、実験結果に対して比較した程度を示したものである。全体的にすべり線形状は実験結果に比べ深いものとなった。また、ニューマーク法により求めた変位も小さいものとなった。なお、一部大きいものがあるが、これは、Spencer法において収束がうまくいかなかったものである。安全率の対応も考慮すると、すべり線種類は非円弧、応力探索で非線形または等価線形で実施したものが比較的良好である。ただし、等価線形の場合は、ニューマーク法における計算で収束できていない可能性が大きい。

表 11.3.49 ケース 19 の結果

ケース	すべり線種類	計算手法	探索手法	解析結果		
				すべり線形状	安全率	変位(m)
1	円弧	非線形	応力	かなり深い	1.267	0
		等価線形	応力	深い	0.965	0.009
		非線形	加速度	かなり深い	0.765	0.0225
		等価線形	加速度	かなり深い	0.73	0.0125
2	非円弧	非線形	応力	やや深い	1.093	0
		等価線形	応力	やや深い	0.759	5
		非線形	加速度	かなり深い	0.834	0.01
		等価線形	加速度	かなり深い	0.818	0.006



・ケース 20

表 11.3.50 にまとめた結果を示す。解析結果のうち、すべり線形状については、実験結果に対して比較した程度を示したものである。全体的にすべり線形状は実験結果と一致した。また、ニューマーク法により求めた変位も小さいものとなった。なお、一部大きいものがあるが、これは、Spencer 法において収束がうまくいかなかったものである。この点を考慮すると、いずれの手法を用いても精度に大きな差はない。

表 11.3.50 ケース 20 の結果

ケース	すべり線種類	計算手法	探索手法	解析結果		
				すべり線形状	安全率	変位(m)
1	円弧	非線形	応力	一致	0.953	0.0125
		等価線形	応力	一致	0.945	0.005
		非線形	加速度	一致	0.791	0.01
		等価線形	加速度	一致	0.804	0.0125
2	非円弧	非線形	応力	一致	0.875	4
		等価線形	応力	一致	0.918	0
		非線形	加速度	一致	0.904	3.5
		等価線形	加速度	一致	0.794	0.003

・ケース 21

表 11.3.51 にまとめた結果を示す。解析結果のうち、すべり線形状については、実験結果に対して比較した程度を示したものである。全体的にすべり線形状は実験結果に比べ深いものとなった。また、ニューマーク法により求めた変位も小さいものとなった。安全率の対応も考慮すると、すべり線種類は非円弧、応力探索で、等価線形で実施したものが比較的良好である。ただし、等価線形の場合は、ニューマーク法における計算で収束できていない可能性が大きい。

表 11.3.51 ケース 21 の結果

ケース	すべり線種類	計算手法	探索手法	解析結果		
				すべり線形状	安全率	変位(m)
1	円弧	非線形	応力	かなり深い	1.14	0
		等価線形	応力	深い	0.727	0.0275
		非線形	加速度	深い	0.915	0.006
		等価線形	加速度	かなり深い	0.594	0.04
2	非円弧	非線形	応力	やや深い	1.117	0
		等価線形	応力	やや深い	0.692	0.0065
		非線形	加速度	かなり深い	0.939	0
		等価線形	加速度	かなり深い	0.647	0.00875

・ケース 22

表 11.3.52 にまとめた結果を示す。解析結果のうち、すべり線形状については、実験結果に対して比較した程度を示したものである。全体的にすべり線形状は実験結果と一致した。また、ニューマーク法により求めた変位も小さいものとなった。この点を考慮すると、いずれの手法を用いても精度に大きな差はない。

表 11.3.52 ケース 20 の結果

ケース	すべり線種類	計算手法	探索手法	解析結果		
				すべり線形状	安全率	変位(m)
1	円弧	非線形	応力	一致	1.241	0
		等価線形	応力	一致	1.248	0
		非線形	加速度	一致	0.915	0.0015
		等価線形	加速度	一致	0.959	0.0007
2	非円弧	非線形	応力	一致	1.136	0
		等価線形	応力	一致	1.152	0
		非線形	加速度	一致	0.978	0
		等価線形	加速度	一致	1.016	0

以上から、以下のことが言える。

- 1) 過去実施した、中型、大型斜面模型に対し検証解析を実施したところ、三層斜面モデルについては、弱層にすべり線が発生することを再現できた。一方、一層斜面モデルについては、実験結果より深いすべり線となった。
- 2) 探索に円弧すべりを用いた場合では、三層、一層斜面ともに、応力履歴または加速度履歴を用いても、逐次非線形解析または等価線形解析に拘わらず、すべり線位置に大きな変化はない。
- 3) 探索に非円弧すべりを用いた場合では、応力探索を用いた場合において、等価線形解析結果のすべり線が比較的浅くなる傾向がある。
- 4) ニューマーク法の結果について、加速度履歴を用いた場合の方が、変位が大きくなる傾向がある。ただし、全般的に実験結果より小さい。

一方、今後の課題として以下の点が挙げられる。

- 1) 本ツールでは、加速度履歴、応力履歴を用いてすべり線の探索ができる。ただし、検索に時間を要するため、今後、時間短縮に向けた検討が必要である。
- 2) Spencer 法を用いた場合、特に非円弧のケースにおいて、計算が収束しないものが散見された。よって、収束性の向上に向けた検討が必要である。

## 12. まとめ

(1) 試験模型製作と試験装置の製作および設置、計測センサ、画像解析システムの選定と設置

### ・流路と反力壁の構築

岩塊・土砂の転動・流動実験を実施するために、流路模型と反力壁を構築し、さらに、岩塊模型と土砂模型を構築した。ここで、岩塊模型については、球形、塊状および板状の岩塊について、形状を統一するため、高強度グラウト材に繊維を混入させて作成した。また、流路模型については、底面にL型アングルを設置し、斜面の凹凸が岩塊の挙動に与える影響について検討した。

### ・荷重計の選定と設置

反力壁に設置する岩塊用の荷重計については、3分力計とし、衝突方向の荷重に加え、衝突直交方向と上下方向の荷重も計測できるようにした。土砂用の荷重計も含めて、精度を検定するため、荷重計受け面を9分割し、それぞれで静的載荷し、偏心荷重に対する精度を確認した。また、球形岩塊を大きさ、載荷方向および引き代の大きさを変えて、荷重計に衝突させ、衝撃荷重の変化に対する荷重計の精度について確認した。それらの結果、以下の結論が得られた。

- 1) 岩塊用荷重計の校正試験結果より、衝突方向において校正用荷重計の値と良好な一致を示した。ただし、載荷位置に拘らず、衝突方向以外の方向においても2.0~5.0 kN程度の荷重が生じる。特に、上下方向(y方向)においてその荷重は大きい。これは、衝突方向に作用した荷重の5%程度である。
- 2) 岩塊用荷重計においては、定期的なノイズが生じる。これは2.0 kN程度の大きさがある。この原因としては、荷重が小さい領域ではノイズが生じやすいことに加え、外部電源からのノイズが影響したものと考えられる。
- 3) 土砂用荷重計の校正試験結果より、衝突方向において、校正用荷重計の値と良好な一致を示すことを確認した。
- 4) 以上から、土砂用荷重計については、精度上問題はない。岩塊用荷重計については、荷重が小さい場合のノイズと、荷重計間の干渉の問題はあるが、干渉の度合いは約5.0kN以下の微小なものであり、岩塊用荷重計の精度としては問題が無いものと言える。
- 5) 引き代と最大合力荷重(x, y, z方向の荷重の合力の最大値)の関係から、端部載荷の際には、荷重が小さくなるケースもあるが、全般的に、載荷位置、載荷方向に拘わらず、引き代が大きくなるほど最大荷重が一樣に大きくなった。よって、衝撃載荷の観点からも荷重計は概ね良好な精度を有すると言える。

・画像解析システムの選定と設置

画像解析システムについては、岩塊と土砂の挙動を三次元的に把握するため、4台の高解像度カメラを用いて計測した。その際、岩塊、土砂模型に標点を取り付けP T V法に把握を試みた。

(2) 地盤材料の要素試験と各試験データの取得

・土砂模型材料の要素試験

土砂模型材料については、三軸圧縮試験と繰返し三軸試験、密度計測試験および粒度試験を実施した。その結果以下のことが分かった。

- 1) 土砂模型のうち、碎石の粘着力は  $3.0\text{kPa}$ 、内部摩擦角は  $34.6$  度、土砂の粘着力は  $2.1\text{kPa}$ 、内部摩擦角は  $34.6$  度であった。
- 2) 砂置換法による計測から求めた碎石の湿潤密度は、 $1.61\text{ g/cm}^3\sim 1.84\text{ g/cm}^3$  であった。これは、質量と体積から求めた密度  $1.85\text{ g/cm}^3$  より小さい傾向がある。また、含水比が大きいほど湿潤密度は小さい傾向がある。土砂の湿潤密度は、 $1.61\text{ g/cm}^3\sim 1.73\text{ g/cm}^3$  であった。これは、質量と体積から求めた密度  $1.64\text{ g/cm}^3$  より大きい傾向がある。なお、含水比の湿潤密度に対する影響は、碎石の場合ほど大きくない。
- 3) 粒度試験より、土砂の方が、細粒分が多く、その割合は、碎石に対し約  $15\%$  多い。

・岩塊の跳ね返り試験

岩塊模型の転動挙動に対する解析的検討に向けて、反発係数の導出を目的に、要素試験として球形・塊状・板状形状の岩塊模型の反発係数を求める試験を行った。その結果以下の結論が得られた。

- 1) 球形模型の鉛直方向入射速度と鉛直方向反発係数の関係から、それぞれ同じ試験条件の中では、反発係数は近い値を示し、入射速度が大きいほど反発係数が小さくなる傾向となった。反発係数が最も大きくなる岩塊サイズは  $20\text{cm}$  球であり、岩塊サイズが大きい  $40\text{cm}$  球、 $50\text{cm}$  球になると反発係数が小さくなる傾向がある。
- 2) 塊状岩塊の鉛直方向入射速度と鉛直方向反発係数の関係から、塊状岩塊は、 $20\text{cm}$ 、 $40\text{cm}$  とともに、入射速度の増加に伴い反発係数は減少し、岩塊サイズが小さい  $20\text{cm}$  の方が、反発係数が大きくなる傾向がある。
- 3) 板状岩塊の鉛直方向入射速度と鉛直方向反発係数の関係から、板状岩塊は、入射速度の違いや岩塊サイズの違い、落下方向(短辺または長辺)の違いによる明瞭な傾向はなく、反発係数に非常にばらつきがある岩塊形状であると言える。
- 4) 球形模型の水平方向入射速度と水平・鉛直方向反発係数の関係から、表面が濡れたケースの方が水平・鉛直ともに反発係数が大きい。また、水平方向入射速度の増加に伴い鉛直方向反発係数は減少する。一方で、水平方向反発係数においては、表面が濡れたケー

スでは入射速度の増加に伴い水平方向反発係数は減少傾向となるが、乾いたケースでは入射速度の増加に伴い水平方向反発係数は増加傾向になる。

- 5) 水平方向入射速度と水平方向反射速度の関係から、底面が乾いたケースでは、衝突時にほとんど滑らずに転がる運動になると言える。一方、濡れたケースでは、滑りを伴った衝突現象になる。
- 6) 球形模型の振り子試験における水平方向入射速度と水平方向反発係数の関係から、いずれの試験ケースにおいても、水平方向入射速度の増加に伴う水平方向反発係数の明瞭な変化はなく、水平方向反発係数はばらついていると言える。今回実施した振り子試験では、球形岩塊をバックホウで吊った状態で2つの球形岩塊を衝突させた。バックホウは油圧でアームの高さを調節するが、油圧は抜け続けるためアームの高さを維持することは容易ではなかった。そのため、2つの球形岩塊の重心高さを合わせきれていないために反発係数のばらつきが大きくなったものと考えられる。
- 7) 球形岩塊を用いた各実験ケースの平均反発係数と換算質量の関係から、換算質量の増加に伴い反発係数が減少する傾向があることから、岩塊サイズ等の影響で反発係数が異なる理由の一つに、反発係数は換算質量に依存することが考えられる。
- 8) 1日目と2日目のPC版の固有周期を確認してPC版に損傷がないか調べた。PC版の損傷には岩塊サイズが大きい40cm球の方が目に見える変位を与えると考えられるので、1日目と2日目の40cm球の1m落下の試験ケースで比較した。調査の結果、2日目の方がPC版の固有周期が1.3倍程度長いことがわかった。PC版の固有周期は長くなり、40cm球の反発係数は大きくなった。これは、PC板の損傷が反発係数に影響を与えたことを示していると考えられる。

#### ・底面摩擦係数計測試験

岩塊と土砂模型の底面摩擦係数を求めるため試験を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 摩擦係数の大きさとしては、無地>黒色塗装>碎石>土砂の順に大きい。碎石、土砂において、動摩擦係数が小さくなった原因としては、無地や黒色塗装の場合に対して、底面との接触面積が小さくなったことが考えられる。

### (3) 転動・流動実験の画像解析結果と荷重計測結果

#### ・画像解析結果

転動・流動実験を反力壁有、無の場合で実施した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 壁無ケースにおいては、底面にアングルを設置した場合と、しない場合で実験を実施した。そして、45度斜面部と30度斜面部境界での速度、30度斜面部と平坦部境界での速度、30度斜面部と平坦部境界から4.0m離れた位置における速度の大きさを調べた。

その結果、塊状岩塊が最も速度にばらつきが見られ、球形、板状のばらつきがそれほど大きくなかった。

- 2) 壁無ケースのうち、30度斜面底面にアングル材を取り付けたものについては、30度斜面部と平坦部境界での速度小さくなり、平坦部で停止するものが大半であった。これは、L型アングル材との衝突により失速したためである。その失速の影響は、板状において特に大きい傾向がある。
- 3) 壁有のケースにおいては、衝突直前、直後における速度を計測し、それらから力積を求め、衝撃荷重を求めた。その結果、求めた衝撃荷重は、荷重計で計測した値より小さくなる傾向となった。これは、岩塊形状が衝撃荷重に与える影響が卓越したためと考えられる。この点はヘルツの式から理解できるように、球形模型においても顕著なものである。これらの影響を力積では考慮できていないことが考えられる。

#### ・衝撃荷重計測結果

- 1) 砕石、土砂については、砕石の方が土砂よりも大きな荷重となった。これは、砕石の方が、反力壁前面に衝突した土塊の量が大きかったためである。荷重の時刻歴の傾向としては、衝突した土塊の体積が大きいほど、短周期の衝撃波形が現れ、最大荷重が大きくなる。よって、砕石、土砂による衝撃荷重を評価する際は、特に土塊の体積量が大きいときに衝撃的な荷重が生じる可能性が大きいことに注意する必要がある。
- 2) 球形岩塊模型の20cm径模型について、最大荷重の大きさをまとめた。衝突直交方向<上下方向<衝突方向の順で荷重が大きく、特に衝突方向の荷重が占める割合が大きい。これは、球形岩塊の場合、荷重の作用方向が衝突方向一方向になる傾向が高いことを示している。また、アングル材を設置した場合の荷重が大きい。これは、アングル材に衝突し、跳ね上がったまま衝突したためである。
- 3) 球形岩塊模型の40cm径模型について、最大荷重の大きさと落下位置と反力壁までのおおよその距離の関係をまとめた。40cm径模型においても、衝突方向成分の割合が大きい。距離の大きさに対し、双曲線的に荷重が増加する傾向がある。
- 4) 塊状岩塊模型の20cm径模型について、最大荷重の大きさをまとめた。球形模型の場合と異なり、上下方向<衝突直交方向<衝突方向の順で荷重が大きい傾向がある。これは、塊状岩塊の作用荷重の方向は、衝突方向一方向のみになりにくいことを示している。その理由としては、岩塊模型が角ばっており、衝突した際、衝突面が平らでないため、荷重が一方向に作用しないためと考えられる。また、全体的に、衝突時の挙動が、滑動、転動に拘わらず、最大荷重の大きさに大きな違いは生じない。
- 5) 塊状岩塊模型の40cm径模型について、最大荷重の大きさをまとめた。20cm径の場合と異なり、衝突直角方向<上下方向<衝突方向の順で荷重が大きい傾向がある。これは、40cm径の塊状岩塊では、衝突面が相対的に滑らかになり、作用方向が衝突方向一方向のみになりやすいことを示している。また、滑動挙動の場合の方が、比較的大きい荷重になる

傾向があるが、一データのみによる分析のため、今後詳細を確認する必要がある。

- 6) 板状岩塊模型の 20cm 径模型について、最大荷重の大きさをまとめた。塊状模型の場合と同様に、上下方向<衝突直交方向<衝突方向の順で荷重が大きい傾向があるが、塊状模型の場合より、衝突方向成分の割合が大きい。これは、板状岩塊の作用荷重の方向は、塊状岩塊ほど衝突方向が一方向のみになりにくいわけではないことを示している。その理由としては、塊状岩塊ほどが表面の凹凸が少なく、衝突した際、衝突面が平らな面で衝突する可能性が大きいことが考えられる。また、衝突時の挙動が滑動の場合、最大荷重の大きさが他の場合に比べ小さいが、このケースは荷重計端に衝突したせいで荷重が小さくなった可能性があり、今後詳細を検討する必要がある。
- 7) 板状岩塊の場合、全体的に、メインの衝突荷重の後、サブの荷重の波が続く傾向がある。これは、岩塊が衝突した後、再度荷重計に岩塊が衝突する場合が多いことを示している。
- 8) 板状岩塊模型の 40cm 径模型について、最大荷重の大きさをまとめた。20cm 径の場合と同様に、上下方向<衝突直交方向<衝突方向の順で荷重が大きい傾向があるが、衝突方向の割合が大きい。これは、40cm 径の板状岩塊では、40cm 径の塊状岩塊同様、衝突面が相対的に滑らかになり、作用方向が衝突方向一方向のみになりやすいことを示している。また、滑動の場合、荷重が大きくなる傾向はあるが、必ずしも大きくなるとは限らないことが考えられる。

#### (4) 検証解析

今回実施した転動・流動実験に対し、粒子法と個別要素法による検証解析を実施した。

##### ・個別要素法

- 1) 球形岩塊は、DEM の球要素 1 個で簡単にモデル化できる。転動係数の時系列をみれば、今回設定したパラメータでは、上部斜面のみすべりが生じるものの、法尻辺りではほとんど滑らずに転がる結果となっている。斜面法尻の流下方向速度は、20cm 岩塊が 8.1m/s、40cm 岩塊が 8.2m/s であり反発係数がかなり異なる割には両者にほとんど差がない結果となった。
- 2) 塊状および板状岩塊は、小さい球要素を複数連結し、岩塊の外形を忠実にモデル化した。20cm 岩塊のパラメトリックスタディでは、実験のように滑動するタイプの挙動をする事例も見られた。斜面法尻の流下方向速度の平均は、7.4m/s であった。
- 3) 碎石は、体積 0.5m<sup>3</sup> のものの流下実験の再現解析を行い、今回設定したパラメータでは、碎石のモデル要素の到達距離や広がり、実験に比べてかなり大きくなった。
- 4) 土砂は、体積 0.5m<sup>3</sup> のものの流下実験の再現解析を行い、今回設定したパラメータでは、土砂のモデル要素が反力壁に到達しなかった。しかしこのことは、実験と対応した結果となった。
- 5) 碎石、土砂を表す粒子サイズが、相対的に大きすぎるので、少なくとも現状の 0.5 倍の

要素半径で再現検討する必要がある。碎石のパラメータ設定では、応力ひずみ関係の対応がよくないので、今一度物性のキャリブレーションをする必要がある。

・粒子法

- 1) 岩塊の転動シミュレーションにおいては、岩塊模型形状をレーザースキャナで精緻にモデル化し、3次元上で解析を行った。その結果、岩塊の材料であるコンクリートの弾性係数を用いて解析を行うと、斜面の途中特に30度と45度斜面部境界で停止してしまうという、非現実的な結果となった。原因追求のため、岩塊のエネルギー履歴を確認したところ、勾配が変化する箇所に岩塊モデルが達した時、ひずみエネルギーが急増し、運動エネルギーがほぼゼロになるまで消費されていることを確認した。これは、MPMでは岩塊モデルを弾性体モデルでモデル化しているため、少しでも岩塊に変形が生じると運動エネルギーがひずみエネルギーに消費されてしまうためである。
- 2) 1)で示した現象を解決するために、ひずみエネルギーの発生抑制を目的として、岩塊モデルの弾性係数を従来のものから100分の1に低減して解析を行った。その結果、既述したように斜面途中で停止する現象を回避できた。しかしながら、平坦部では底面の摩擦角により力が作用して変形する影響が発生し、実験結果より最終到達距離を過小評価する結果となった。また、40cm径球形岩塊以外、滑動挙動となった。20cm径球形でも滑動挙動になったことを考えると、回転の自由度が過度に拘束されている傾向がある。これは、MPMでは、DEMのように回転運動の方程式を陽に解いていないことが一因と考えられる。
- 3) 2)のように岩塊モデルの剛性を小さくしたことにより、反力壁に岩塊モデルが衝突した際、衝突時間が長くなり、結果、最大荷重の値を過小評価する結果となった。この原因には、岩塊形状が実際のものとは異なることも影響していると考えられるが、DEMの結果よりも過小に評価していることを考えると、剛性低下の影響も大きく関与しているものと考えられる。
- 4) 以上のように、MPMで岩塊の転動シミュレーションを行うには、剛性の低減と、それに伴う衝撃荷重の過小評価への影響を考慮する必要がある。この課題が生じる最大の原因は、岩塊を弾性体でモデル化していることであり、DEMにおけるように剛体によるモデル化や、弾性体でモデル化しても剛性以外で改善を図る方法など今後検討が必要である。
- 5) 土砂の流動シミュレーションについては、要素試験から得られた物性を基にモデル化することで流動の様相については概ね再現することができた。しかしながら、衝撃荷重については、過大評価する傾向がある。これは、反力壁を弾性体でモデル化していることも影響している可能性があるが、この点も含めてさらなる検討が必要である。
- 6) MPMではメッシュ依存性について考慮する必要がある。今回は比較的大きめのメッシュサイズで解析を行ったが、より小さいメッシュ長で解析することで改善が図られる可



能性がある。

・個別要素法と粒子法共通

- 1) 岩塊の到達距離について、粒子法は過小評価した。これは、岩塊を弾性体としてモデル化しているため、ひずみエネルギーが蓄積したためと考えられる。一方、個別要素法は、回転挙動も含め、再現性が良い。
- 2) 土砂の到達距離について、分布形状も含めて粒子法が良い再現性を示した。応力ひずみ関係のモデル化の容易さも考慮すると、土砂については、粒子法が実務的である。
- 3) 岩塊の衝撃荷重について、両手法とも過小評価する傾向があった。しかし、個別要素法の方が近い値を示す。粒子法で過度に過小評価するのは、ひずみエネルギーを小さくするため、岩塊モデルの剛性を小さくしたためである。
- 4) 土砂の衝撃荷重について、粒子法の方が、再現性が良い。ただし、その値は過大評価である。今後、衝突側のモデル化も含めて検討が必要である。
- 5) 以上、現段階では、岩塊については、個別要素法、土砂については、粒子法が有効と考えられる。この点は後述する実験結果との比較からも考えられる。

(5) 実験結果と解析結果の比較

a) 岩塊の速度

・球形 20cm

図 12.1 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM ともに実験結果より小さい傾向があるが、DEM の方が実験結果に近い。

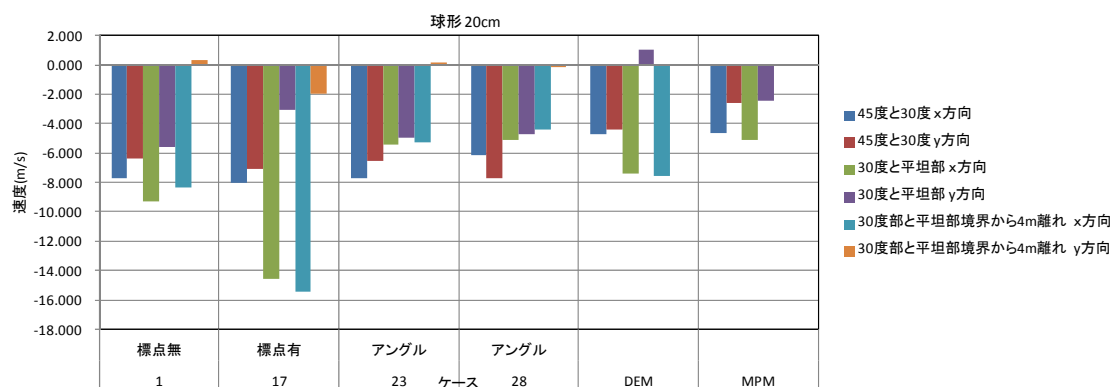


図 12.1 実験と解析結果の比較(球形 20cm)

・球形 40cm

図 12.2 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM ともに実験結果より小さい傾向があるが、DEM の方が実験結果に近い。

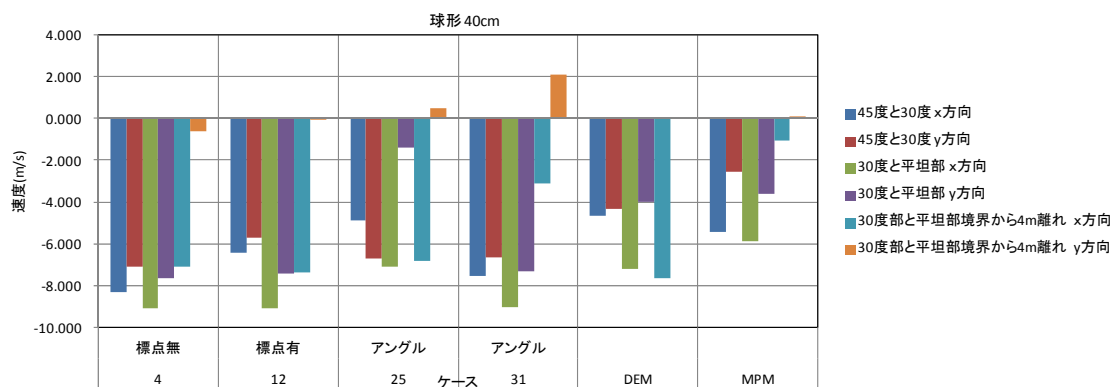


図 12.2 実験と解析結果の比較(球形 40cm)

・塊状 20cm

図 12.3 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに実験結果より小さい傾向があるが、DEMの方が実験結果に近い。

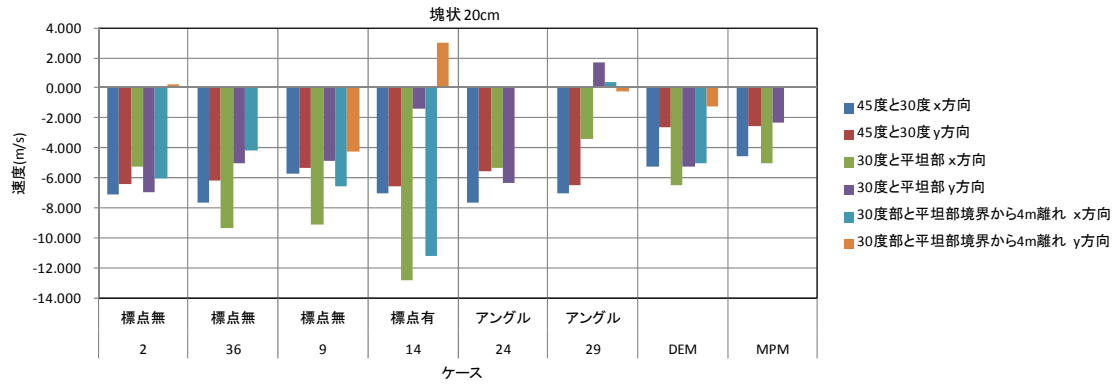


図 12.3 実験と解析結果の比較(塊状 20cm)

・塊状 40cm

図 12.4 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに実験結果より小さい傾向があるが、DEMの方が実験結果に近い。

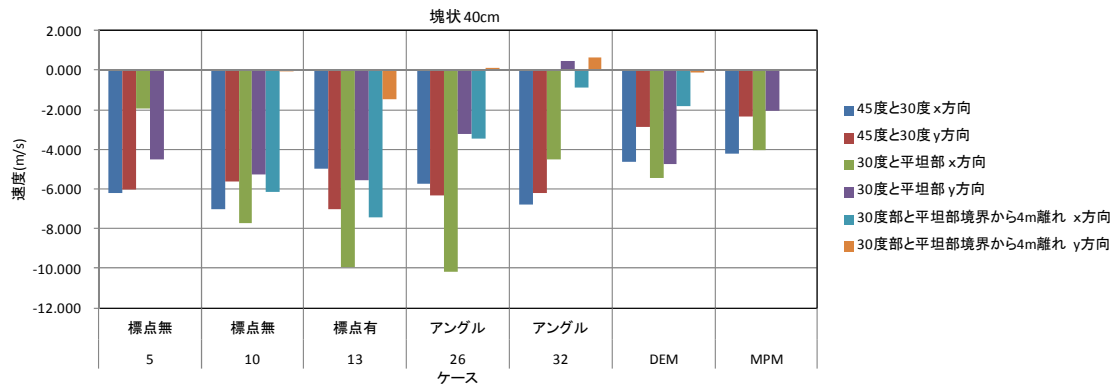


図 12.4 実験と解析結果の比較(塊状 40cm)

・板状 20cm

図 12.5 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに実験結果より小さい傾向があり、ともに同等の値である。

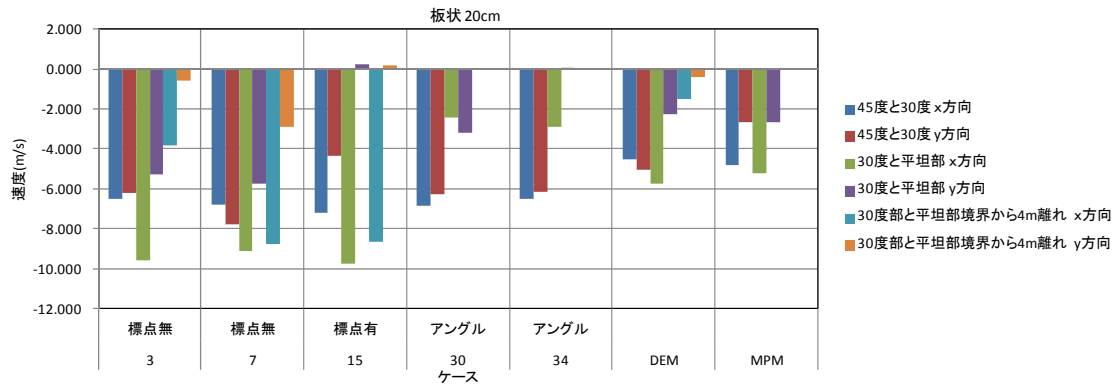


図 12.5 実験と解析結果の比較(板状 20cm)

・板状 40cm

図 12.6 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに実験結果より小さい傾向があり、ともに同等の値である。

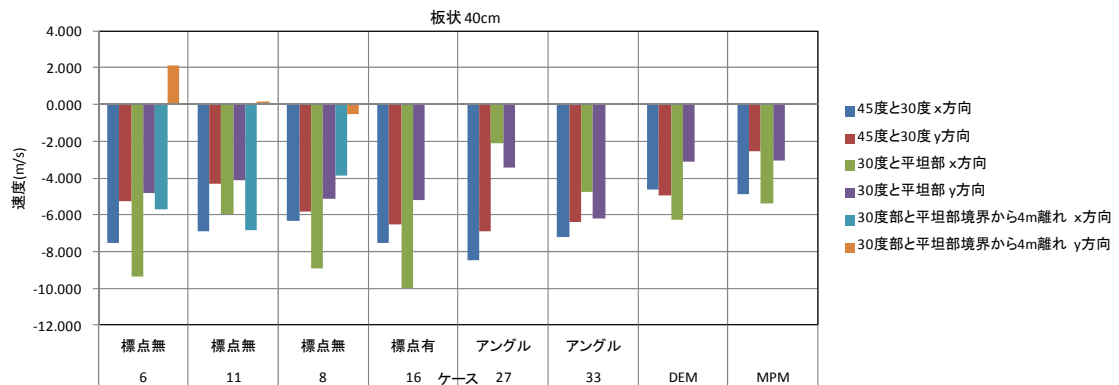


図 12.6 実験と解析結果の比較(板状 40cm)

b) 土砂の変位

・ 碎石 0.5m<sup>3</sup>

図 12.7 に実験と解析結果の比較を示す。DEM は過大評価している。MPM は幅を過小評価しているが、到達距離は同等である。

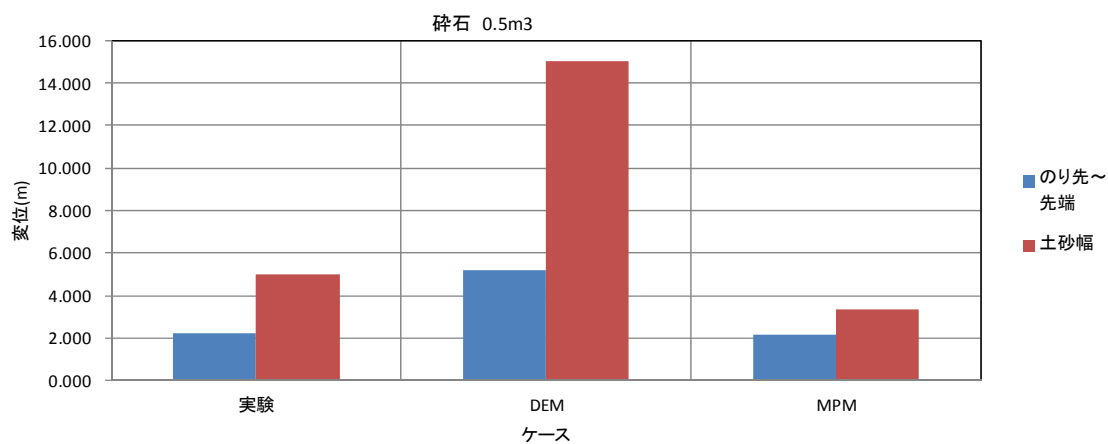


図 12.7 実験と解析結果の比較 (碎石 0.5m<sup>3</sup>)

・ 土砂 0.5m<sup>3</sup>

図 12.8 に実験と解析結果の比較を示す。DEM は過小評価している。MPM は幅を過小評価しているが、到達距離は同等である。

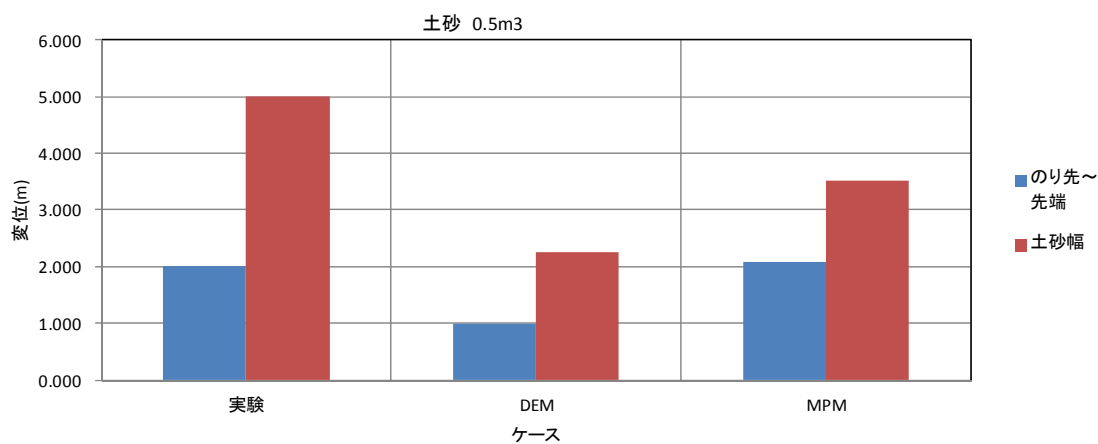


図 12.8 実験と解析結果の比較 (土砂 0.5m<sup>3</sup>)

c) 衝撃荷重

- ・ 砕石 0.5m<sup>3</sup>

図 12.9 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに過大評価している。

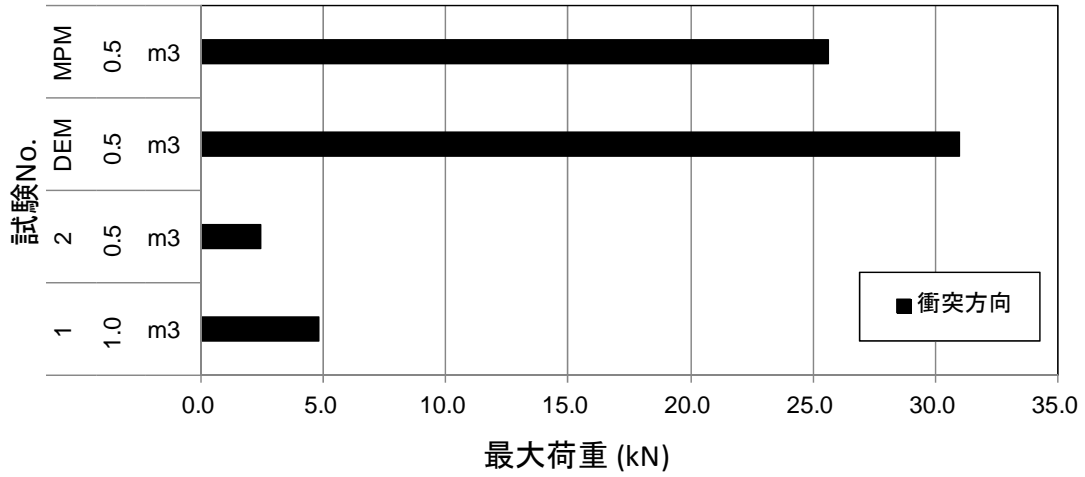


図 12.9 実験と解析結果の比較(砕石 0.5m<sup>3</sup>)

- ・ 土砂 0.5m<sup>3</sup>

図 12.10 に実験と解析結果の比較を示す。MPM は過大評価している。DEM は荷重面に到達しなかった。

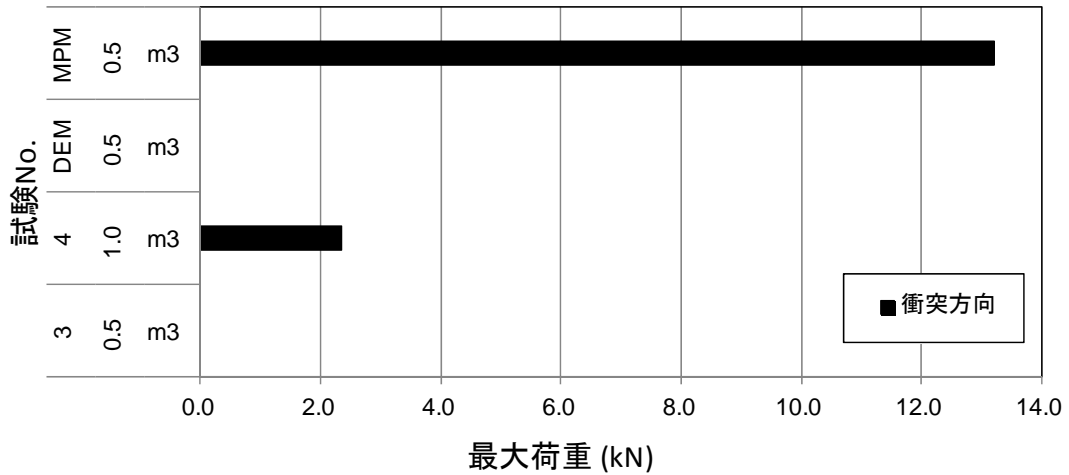


図 12.10 実験と解析結果の比較(土砂 0.5m<sup>3</sup>)

・球形 20m

図 12.11 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに過小評価している。

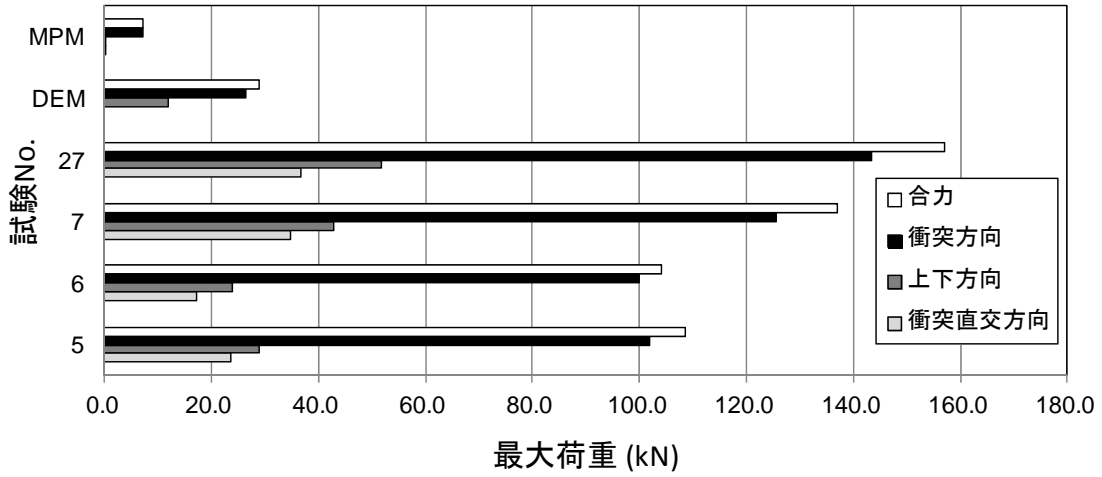


図 12.11 実験と解析結果の比較(球形 20cm)

・球形 40m

図 12.12 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに過小評価している。

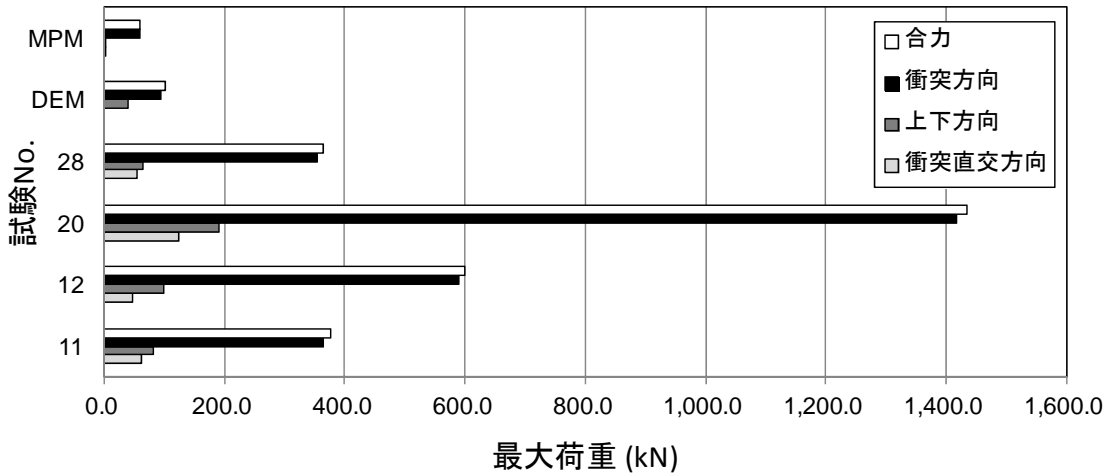


図 12.12 実験と解析結果の比較(球形 40cm)

・塊状 20m

図 12.13 に実験と解析結果の比較を示す。MPM は過小評価している。DEM は実験値に近い場合がある。

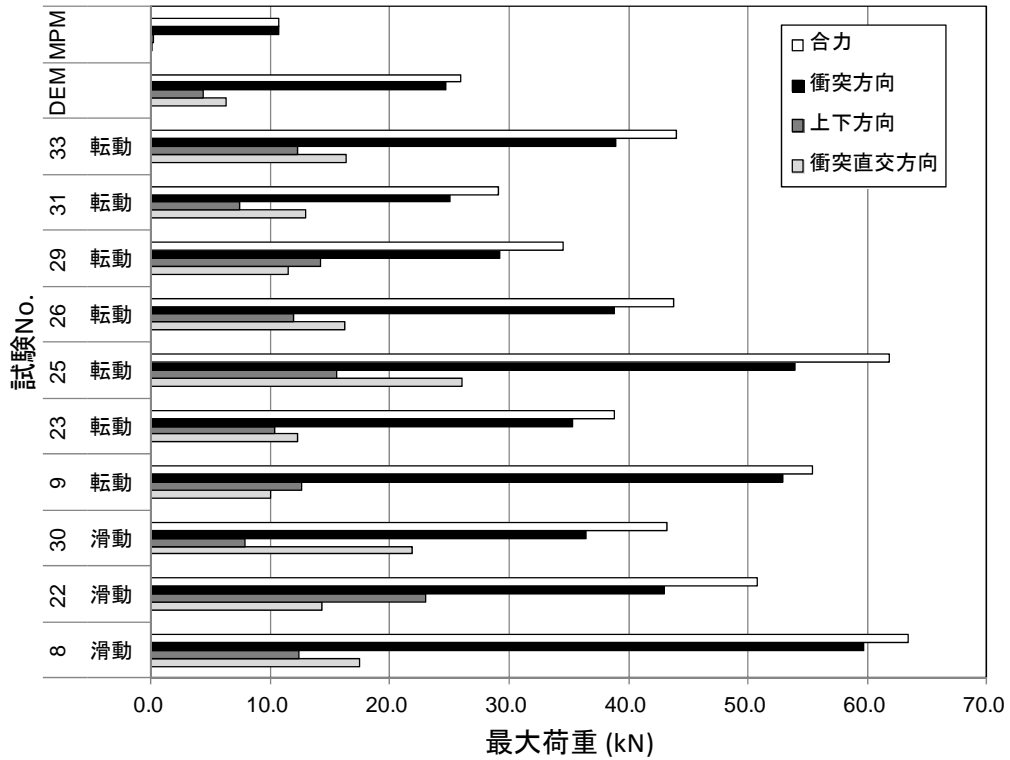


図 12.13 実験と解析結果の比較(塊状 20cm)

・塊状 40m

図 12.14 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに過小評価している。

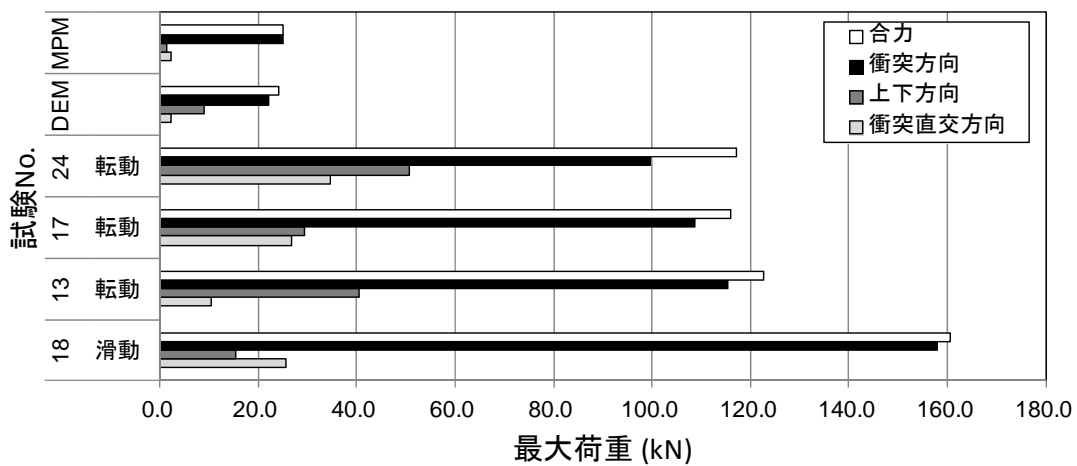


図 12.14 実験と解析結果の比較(塊状 40cm)



・板状 20m

図 12.15 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに過小評価している。

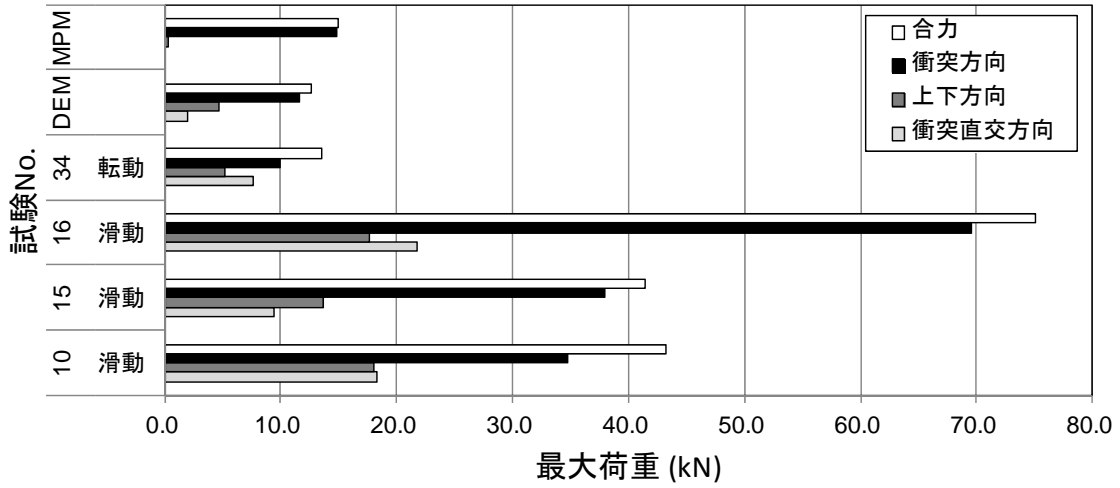


図 12.15 実験と解析結果の比較(板状 20cm)

・板状 40m

図 12.16 に実験と解析結果の比較を示す。DEM、MPM とともに過小評価している。

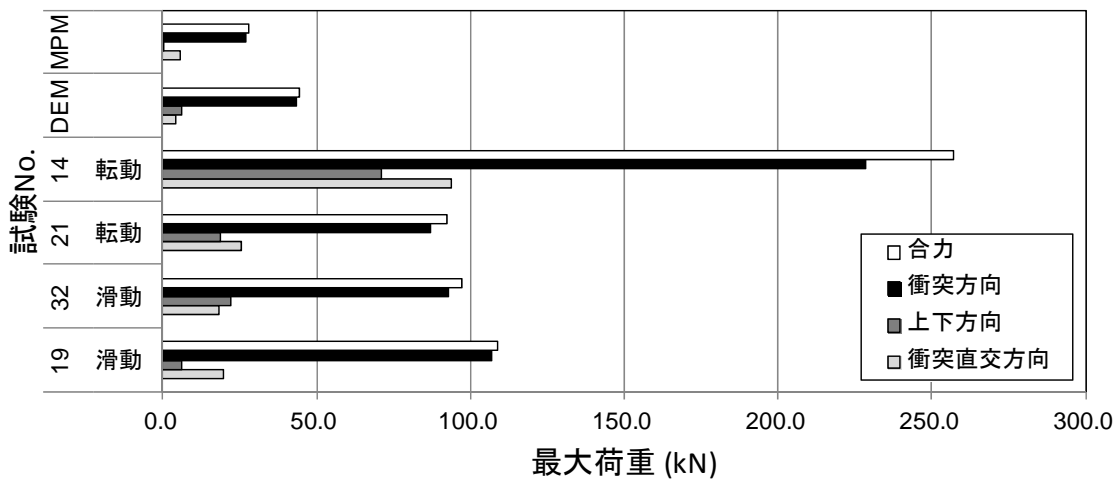


図 12.16 実験と解析結果の比較(板状 40cm)

(6)技術資料作成 (FEM解析ツールの構築)

円弧、非円弧すべり線を用いた安定・変形解析ツールを構築し、検証解析を行った。

- 1) 円弧、非円弧すべり線に対応できる安定・変形解析ツールを構築した。非円弧すべり線法には、PSO法を用いた。
- 2) 本ツールでは、加速度履歴、応力履歴を用いてすべり線の探索ができる。ただし、検索に時間を要するため、今後、時間短縮に向けた検討が必要である。
- 3) 過去実施した、中型、大型斜面模型に対し検証解析を実施したところ、三層斜面モデルについては、弱層にすべり線が発生することを再現できた。一方、一層斜面モデルについては、実験結果より深いすべり線となった。
- 4) 探索に円弧すべりを用いた場合では、三層、一層斜面ともに、応力探索または加速度探索を用いても、逐次非線形解析または等価線形解析に拘わらず、すべり線位置に大きな変化はない。
- 5) 探索に非円弧すべりを用いた場合では、応力探索を用いた場合において、等価線形解析結果のすべり線が浅くなる傾向がある。
- 6) ニューマーク法の結果について、加速度履歴を用いた場合の方が、変位が大きくなる。ただし、全般的に実験結果より小さい。
- 7) 以上を考慮すると、どの手法が最適か一概には言えないが、非円弧すべりを用いた方が実験に近い浅いすべり線になる可能性がある。

(7) 岩塊、土砂斜面の安定性評価フロー案

図 12.17 に現在提案している評価フローを示す。この中で、今回の検討は後半の箇所（赤枠部分）となる。

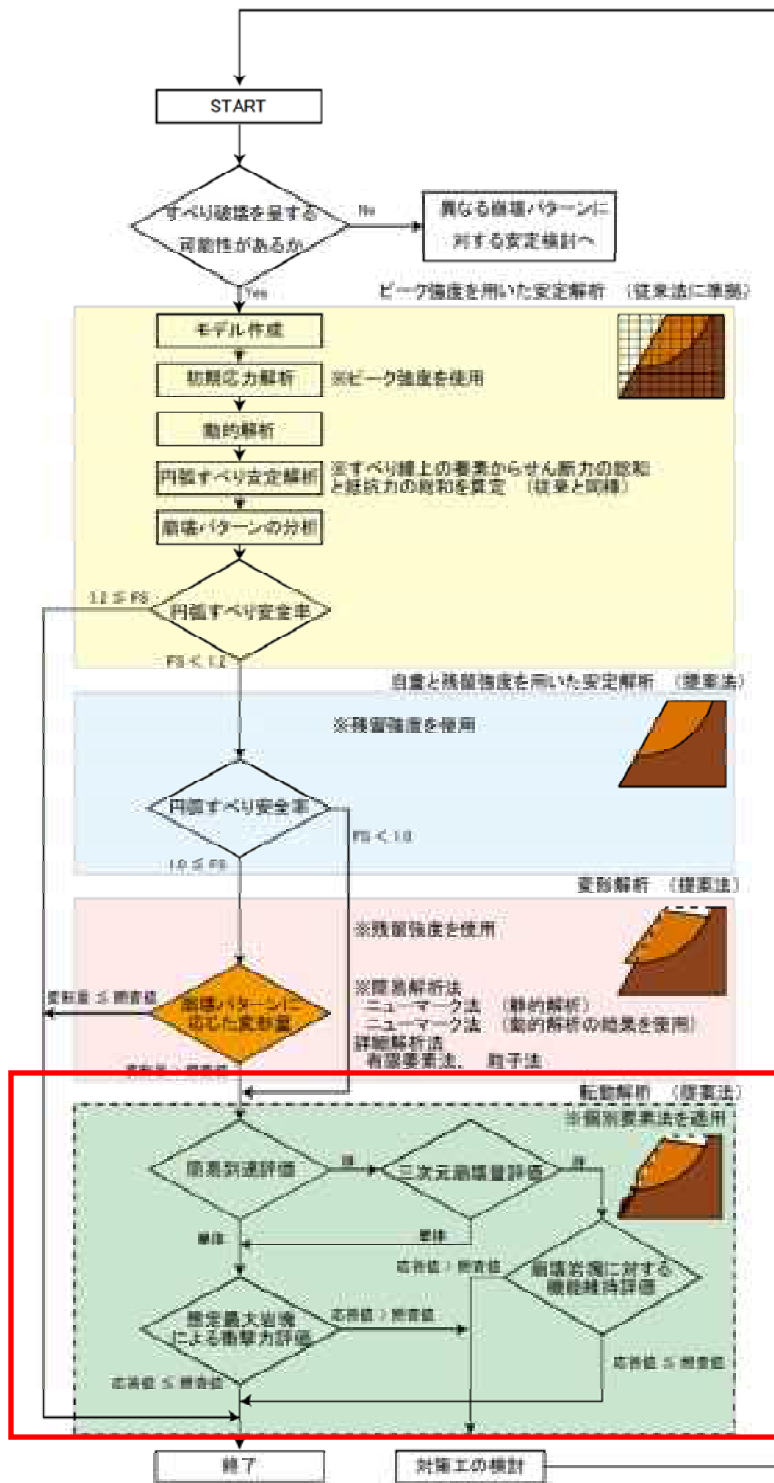


図 12.17 提案している斜面安定性評価フロー案

到達距離評価については、群と単体に分かれるが、単体の場合は、個別要素法による方法が、群については、粒子法による方法が適当と考えられる。これらの方法により、まず機器に岩塊または土砂が到達するかどうか検討する必要がある。

群または単体かについては、土砂斜面か岩盤斜面か区別することが重要である。その参考資料としては、図 12.18 に示す参考文献 1)にあるようなパターン分類が参考となる。

土砂斜面の場合、粒子法により到達距離を評価し、機器に到達するか検討する。岩盤斜面の場合、DEMにより到達距離を評価し、機器に到達するか検討する。その際、土砂については、埋設禁止箇所についても考慮する。

機器に到達する場合、衝撃荷重の評価に移る。岩盤斜面の場合はDEMにより、土砂斜面の場合は粒子法で衝撃荷重を評価する。その際、安全係数を乗じた方が良い。値としては5.0程度が考えられる。

衝撃荷重を用いて、構造物の照査を行い、安全性を検討する。図 12.19 に評価フロー案を示す。なお、岩塊を含む土砂や、複数岩塊についてはさらなる検討が必要である。

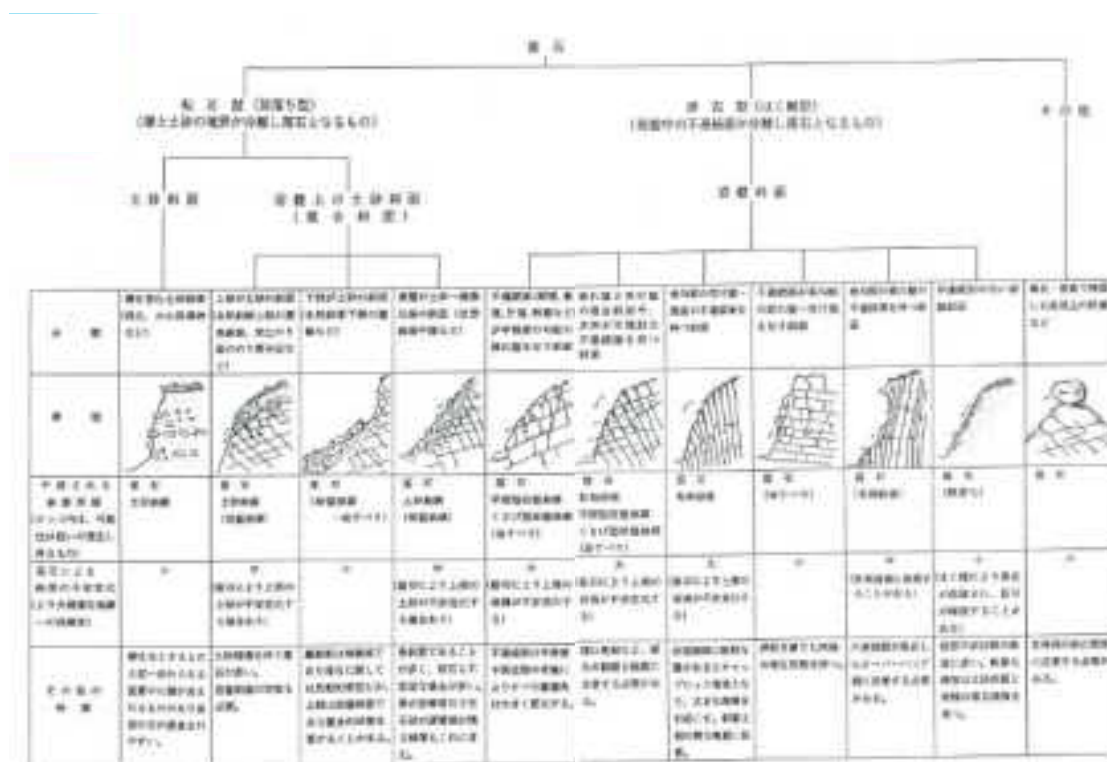


図 12.18 斜面分類パターン (参考文献 1) より引用)

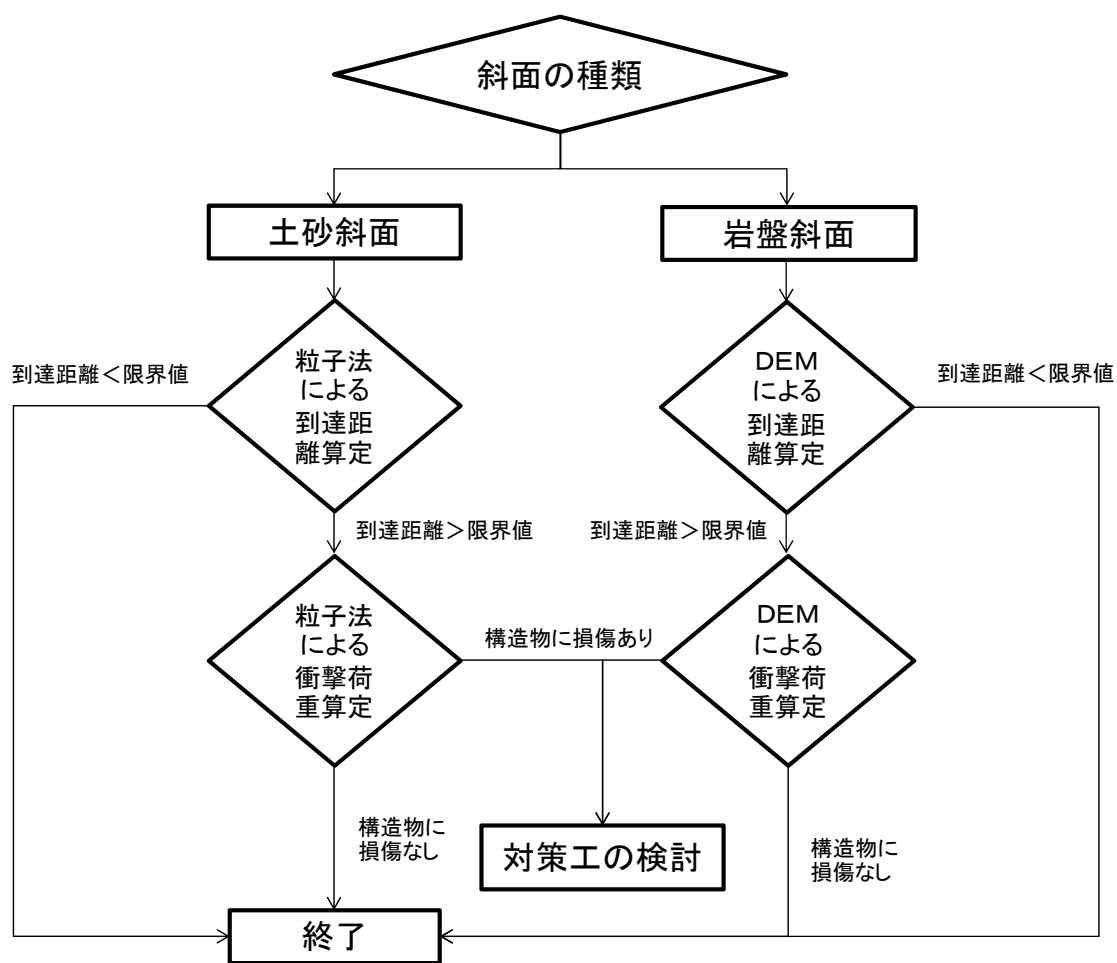


図 12.19 斜面安定性評価フロー案

参考文献

- 1) 落石対策便覧、日本道路協会