

3. 3 岩塊転動試験の検証解析

3. 3. 1 解析方法

(1) 目的と解析ケース

本業務では、公益財団法人鉄道総合技術研究所で開発した、粒子法的一种である Material Point Method (MPM) による大変形解析プログラムを用いて、岩盤転動実験の検証解析を行うことを目的とする。

解析は以下の 6 ケースを実施した。斜面台の勾配、粒子サイズ、細粒分含有率、崩落量を表 3.3.1 に示す。斜面勾配は A=41 度、B=60 度とした。粒子サイズは A=2cm 級、B=8cm 級の碎石とした。碎石モデルの寸法については後述する。

表 3.3.1 解析ケース

ケース No.	試験種別	斜面勾配	粒子サイズ	細粒分含有率 (%)	崩落量(kg)
1	碎石単体試験	勾配 A	粒子 A	—	—
2		勾配 B	粒子 B	—	—
3	碎石粒子群試験	勾配 A	粒子 A	20	150
4		勾配 A	粒子 B	20	150
5		勾配 A	粒子 B	20% 水有	150
6		勾配 B	粒子 B	20	150

(2) 入力データと解析モデル

入力データとして「静的・動的解析用、時間間隔、観測点等設定データ」、「境界条件データ」、「モデル形状データ」、「背面格子データ」、「物性データ」等の解析に必要なデータを設定作成した。以降に設定条件の詳細を示す。

① 時間間隔と入力加速度

各ケースの時間間隔を表 3.3.2 に示す。特に碎石単体では跳ね返りシミュレーションの実施の際に安定した解析が行える時間間隔を採用した。入力加速度については、Z 方向に重力加速度 -9.8kN/m のみを与えた。

表 3.3.2 解析に用いた時間間隔

ケース No.	試験種別	時間間隔 (sec)	解析ステップ数	解析時間 (sec)
1	碎石単体試験	1.0E-006	3,000,000	3.0
2		4.0E-007	7,500,000	3.0
3	碎石粒子群試験	2.0e-005	200,000	4.0
4		2.0e-005	200,000	4.0
5		2.0e-005	200,000	4.0
6		2.0e-005	200,000	4.0

② 境界条件

境界条件では斜面台の摩擦角を設定した。各ケースの摩擦角を表 3.3.3 に示す。底部の拘束条件は全てフリーとした。

表 3.3.3 境界条件摩擦角

ケース No.	試験種別	摩擦角 (度)
1	碎石単体試験	32.8
2		34.9
3	碎石粒子群試験	23.6
4		33.0
5		33.0
6		33.0

③モデル形状データ

ケース 1、2 砕石単体のモデルを作成した。モデルは図 3.3.1 のように楕円球（ラグビーボール状）として形状を決定した。寸法 a～c および質量を表 3.3.4 に示す。

ケース 3～6 の砕石粒子群のモデルは図 3.3.2 に示す寸法でモデルを作成した。滑り出しの角度は 45 度とし、初期のモデル位置における境界条件の摩擦角は 0 度とした。

図 3.3.3～3.3.5 にモデル形状を示す。

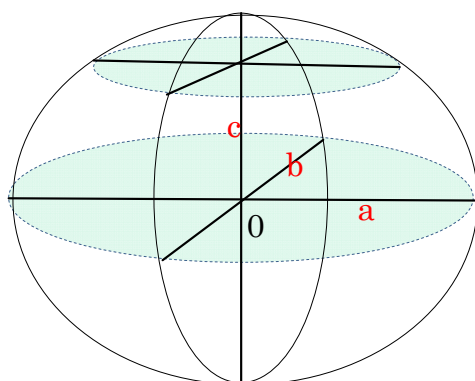


図 3.3.1 砕石単体モデル

表 3.3.4 砕石単体寸法および質量

		粒子 A	粒子 B
寸法(mm)	a	29.86	72.3
	b	25.15	59.73
	c	16.25	57.64
質量(g)		16.7	293

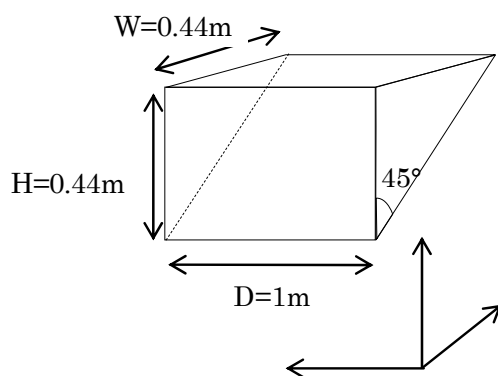


図 3.3.2 砕石粒子群モデル

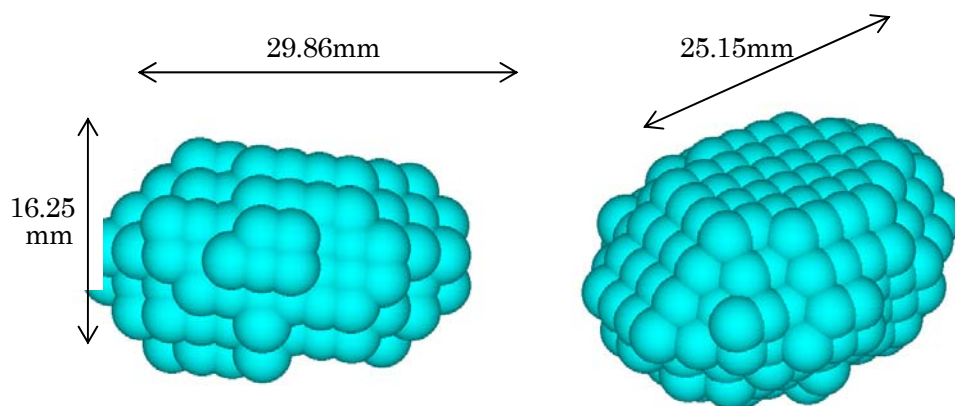


図 3.3.3 ケース 1 砕石単体 粒子 A (2cm 級)

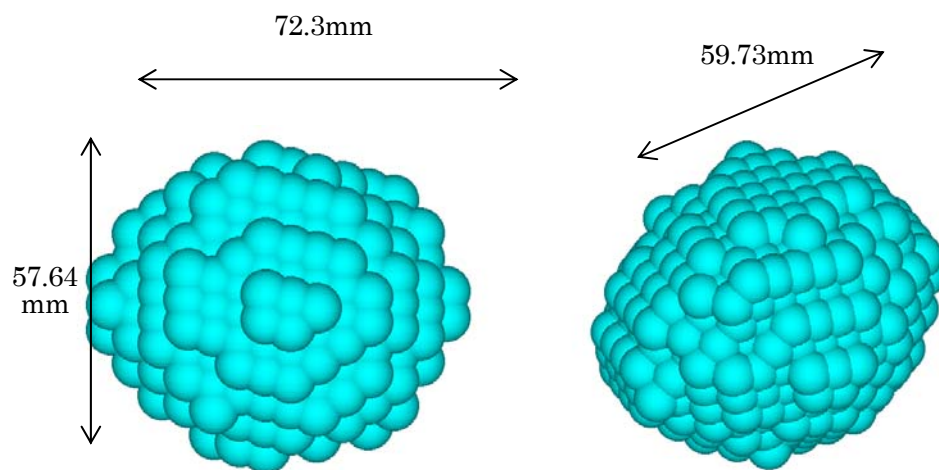


図 3.3.4 ケース 2 砕石単体 粒子 B (8cm 級)

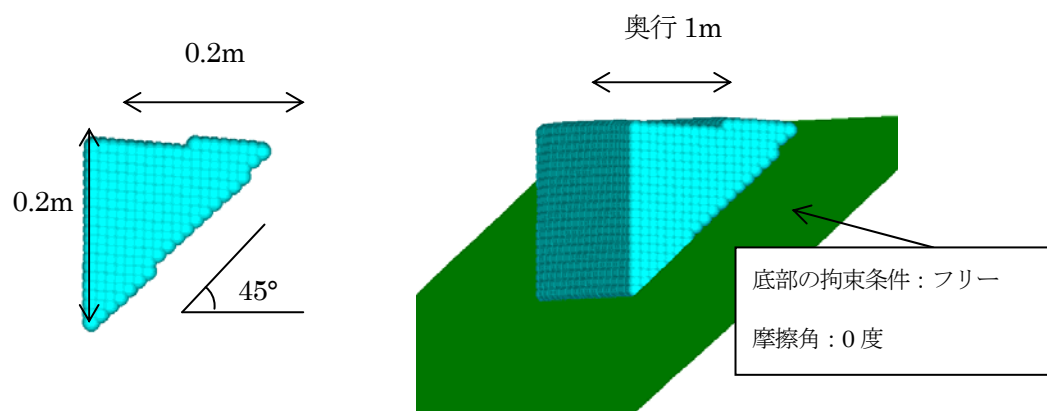


図 3.3.5 ケース 3~6 砕石粒子群

④背面格子

背面格子データについては斜面台形状及び格子幅を設定した。設定条件を表 3.3.5 に示す。碎石単体は粒子サイズに合わせて格子幅を決定した。時間間隔は解析中に発散しないことを確認し決定した。以下に各ケースの全体図を示す。座標系を図 3.3.10 に示す。

表 3.3.5 格子幅と粒子数

ケース No.	試験種別	時間間隔 (sec)	格子幅 (m)	粒子数	斜面勾配 (度)
1	碎石単体試験	1.0E-006	0.01	404	41
2		4.0E-007	0.02	877	60
3	碎石粒子群試験	2.0e-005	0.02	20,300	41
4		2.0e-005	0.02	20,300	41
5		2.0e-005	0.02	20,300	41
6		2.0e-005	0.02	20,300	60

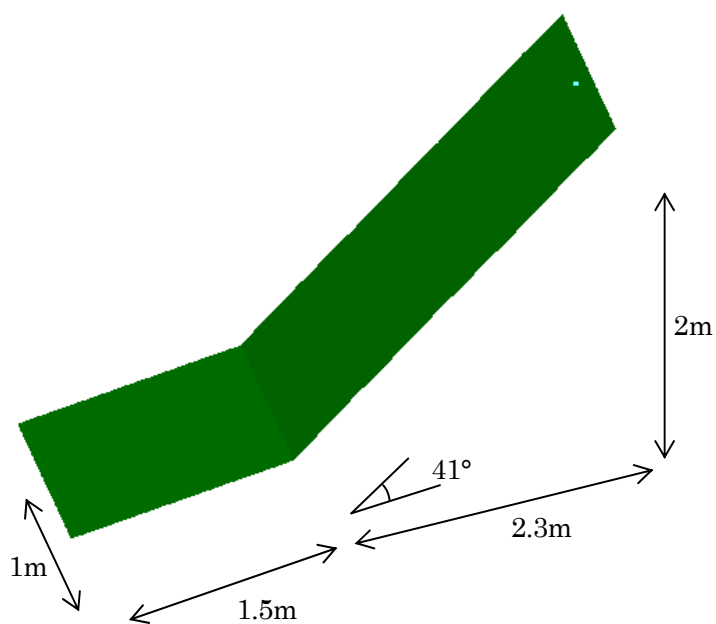


図 3.3.6 ケース 1 碎石単体 粒子 A 斜面勾配 41 度

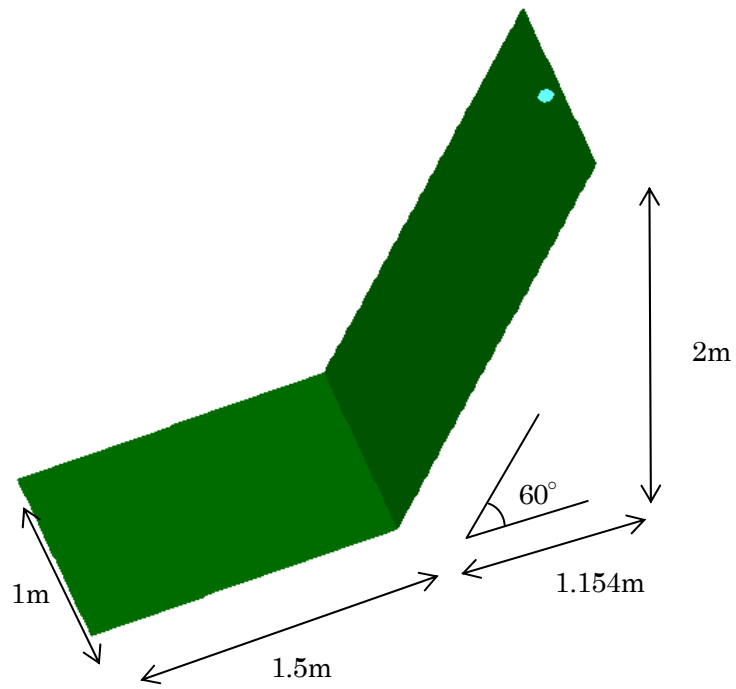


図 3.3.7 ケース 2 碎石単体 粒子 B 斜面勾配 60 度

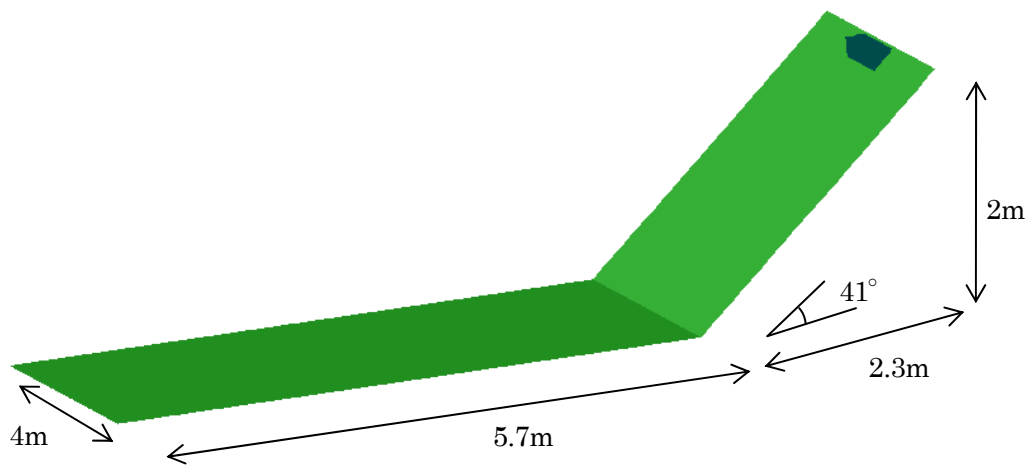


図 3.3.8 ケース 3~5 碎石粒子群 斜面勾配 41 度

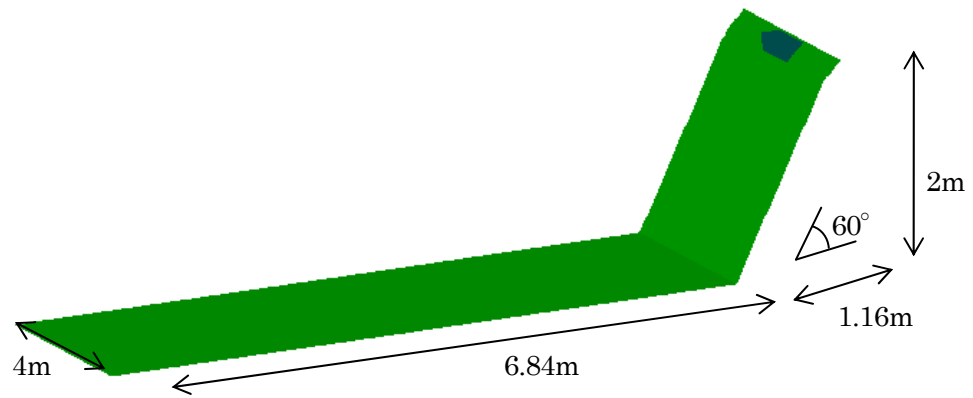


図 3.3.9 ケース 6 碎石粒子群 斜面勾配 60 度

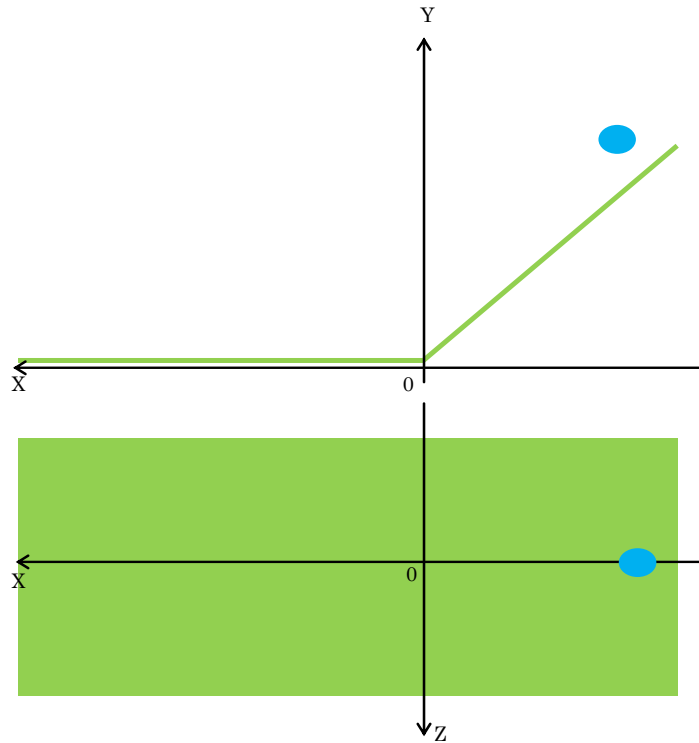


図 3.3.10 座標系

⑤物性データ

ケース 1、2 の碎石単体は弾性モデルで定義した。物性値を表 3.3.6 に示す。粒子の剛性に対するレイリー減衰係数 β_s は、後述する跳ね返りシミュレーションで決定した。ケース 3~6 の碎石粒子群はドラガープラガー弾塑性モデルで定義した。その物性データを表 3.3.7 に示す。なお、これらの値は後述する要素試験のシミュレーションにより決定した。また、ケース 3、4、6 は水なしドライとし、ケース 5 は水ありとして設定した。

表 3.3.6 碎石単体（粒子 A、B 共通）物性値データ

項目説明	項目名	入力値
弾性係数(kN/m ²)	E	9.8E+05
ポアソン比	ν	0.30
単位質量(t/m ³)	r_0	2.64
引張強度(kN/m ²)	cc	1.0E+10
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	α_s	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	β_s	跳ね返りシミュレーションで決定

表 3.3.7 砕石粒子群物性値データ

項目説明	項目名	粒子 A	粒子 B
$E=E_0 (\sigma'_m/\sigma'_{m0})^n$ の応力依存の弾性係数(kN/m ²)	E_0	5000	1000
E_0 となる値の平均主応力 (kN/m ²) $\sigma'_{m0}=(\sigma'_x+\sigma'_y+\sigma'_z)/3$	σ'_{m0}	98.0	98.0
応力依存の弾性係数の式の n	n	0.0	0.0
σ'_m の下限値(kN/m ²)	$\sigma'_m(\text{min})$	0.00185	0.00185
単位質量(t/m ³)	r_0	1.85	1.85
ポアソン比	ν	0.3	0.3
せん断摩擦角(°)	ph	44.9	43.4
塑性ポテンシャル(°)	psic	0.0	0.0
粘着力(kN/m ²)	CC	0.0	0.0
引張強度(kN/m ²)	σ'_t	0.0	0.0
最大せん断ひずみ上限値 ($\gamma\text{-lim}$ に達すると塑性ポテンシャルを psic-lim とする)	$\gamma\text{-lim}$	0.0	0.0
最大せん断ひずみが $\gamma\text{-lim}$ に達した状態以降の 塑性ポテンシャル(°)	psic-lim	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	0.0	0.0
減衰に使用する弾性係数(kN/m ²)	E_c	0.0	0.0
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	α_s	0.0	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	β_s	0.0	0.0
粘着力の下限値	C_{min}	0.0	0.0

(3) 跳ね返り試験のシミュレーションによる減衰定数 β の決定 (碎石単体)

検証解析に用いる減衰定数 β_s は、碎石単体の跳ね返り試験に基づき決定した。碎石単体は予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 β_s および計算が安定する時間間隔を決定した。モデル形状、背面格子条件における格子幅、境界条件における底部摩擦角は検証解析に用いるものと同等とした。

跳ね返り係数 e は式(1)から求められる。

$$e = \sqrt{\frac{H'}{H}} \quad (1)$$

ここで、

H : 初期高さ

H' : 跳ね返り高さ

である。初期高さは粒子 A、B ともに 0.4m とし、碎石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。

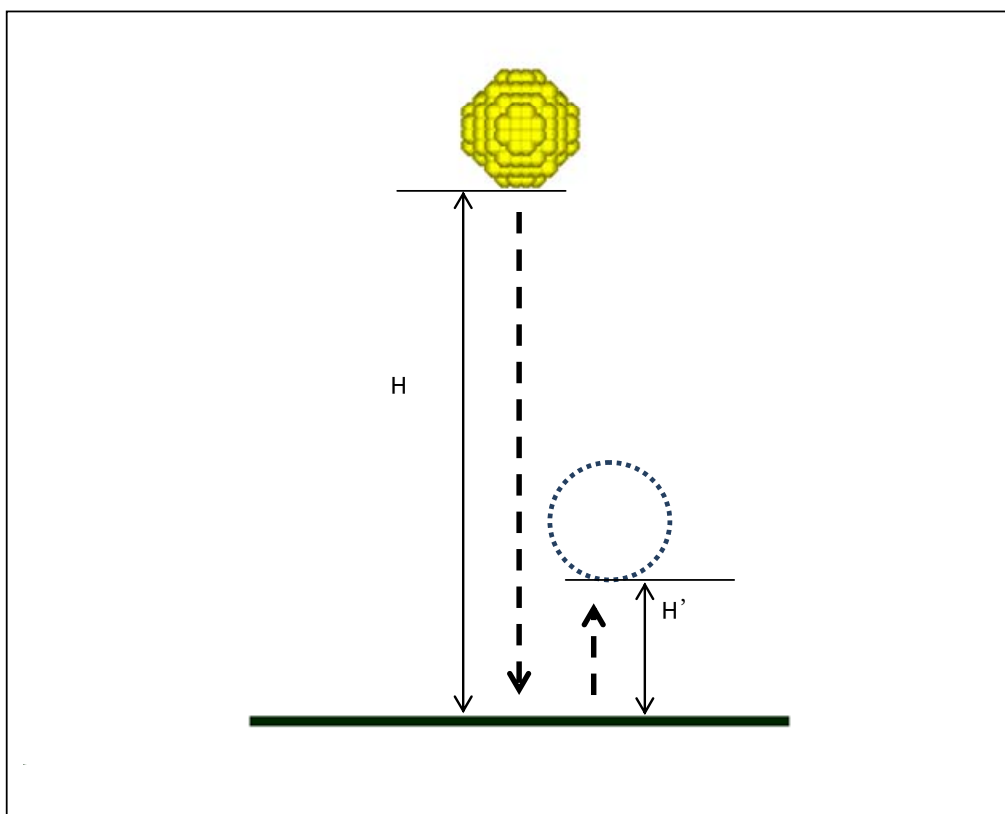


図 3.3.11 跳ね返りシミュレーションの概要

以下に粒子 A、B の実験値とシミュレーション結果を示す。跳ね返り高さの実測値と誤差の小さい結果となる β の値を採用し、粒子 A では $\beta=2.8E-05$ 、粒子 B では $\beta=1.6E-04$ と決定した。

① 砕石単体粒子 A

表 3.3.8 跳ね返りシミュレーション結果

	実測値	シミュレーション			
β	-	2.7E-05	2.8E-05	2.9E-05	3.0E-05
跳ね返り高さ	0.041	0.0431	0.0405	0.0383	0.0360
誤差 (%)	-	5.2	1.2	6.6	12.2

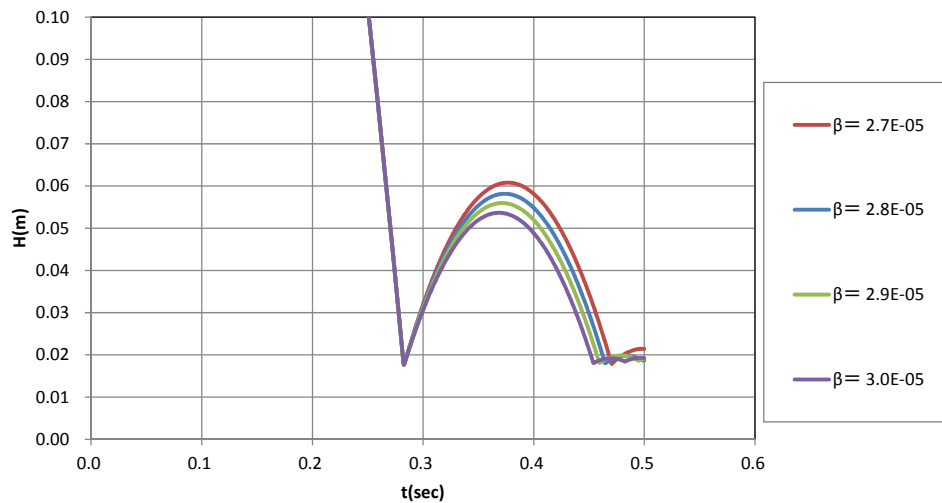


図 3.3.12 跳ね返りの結果 (粒子 A)

②砕石単体粒子 B

表 3.3.9 跳ね返りシミュレーション結果

	実測値	シミュレーション			
		β	1.5E-04	1.6E-04	1.7E-04
β	-	1.5E-04	1.6E-04	1.7E-04	1.8E-04
跳ね返り高さ	0.029	0.0323	0.0290	0.0261	0.0234
誤差 (%)	-	10.8	0.5	10.5	19.6

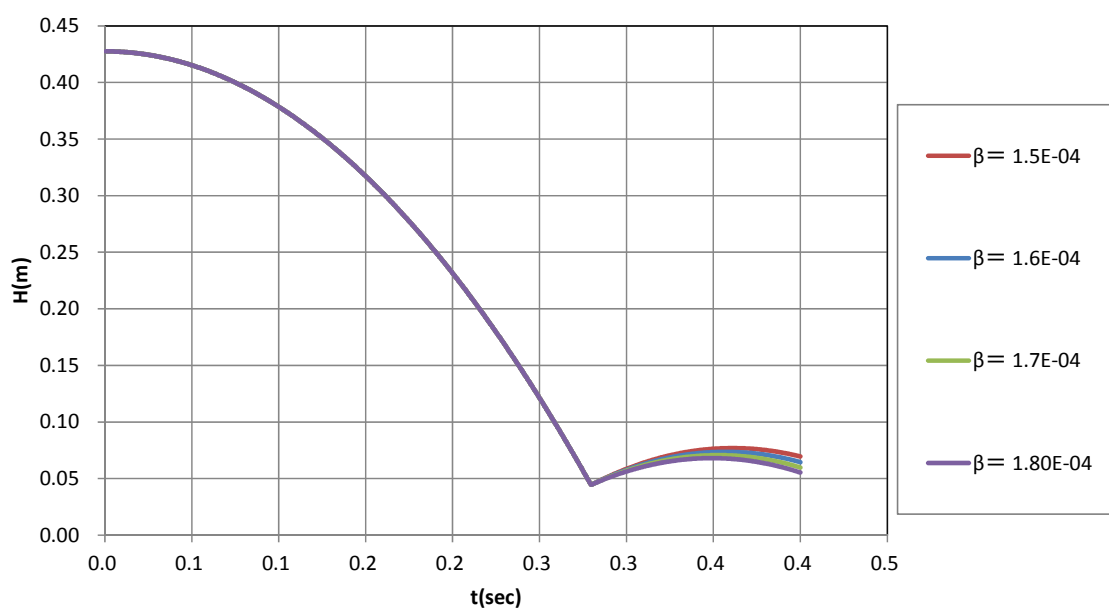


図 3.3.13 跳ね返りの結果 (粒子 B)

(4) 変形強度特性 (砕石粒子群)

砕石粒子の変形強度特性は、三軸圧縮試験結果をもとにドラガー・プラガーモデルを用いた要素シミュレーションにより決定した。粒子Aの結果を図3.3.14、粒子Bの結果を図3.3.15に示す。

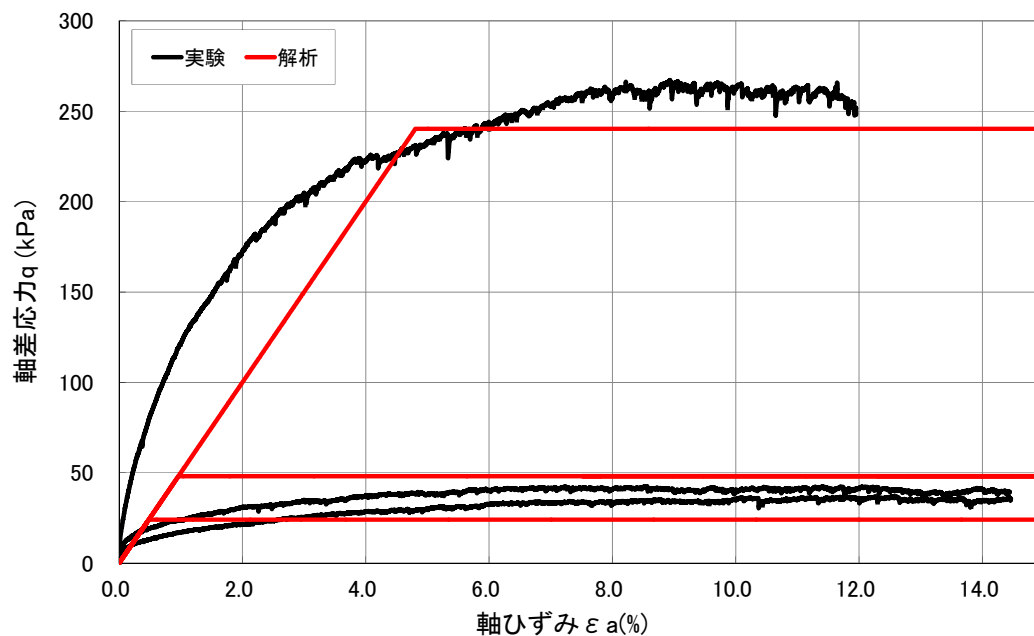


図 3.3.14 要素シミュレーション (粒子 A)

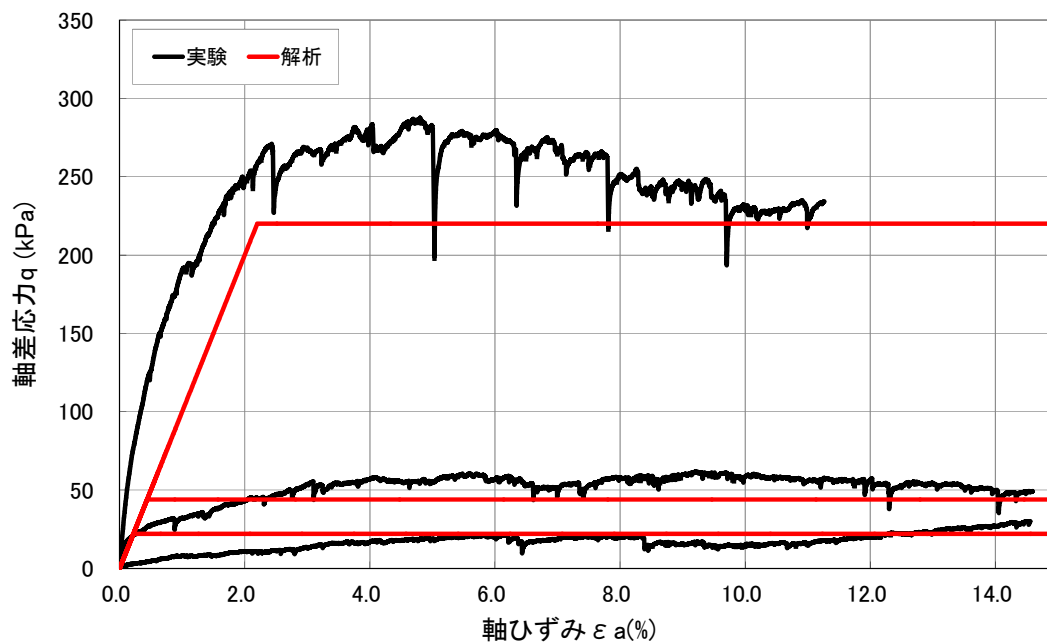


図 3.3.15 要素シミュレーション (粒子 B)

3. 3. 2 解析結果

(1) 結果の整理方法

以下に解析結果を示す。なお、碎石単体の角速度と転動係数については以下のように算出した。

碎石単体の角速度 ω_z (rad/s) は Z 軸周りの回転角より算出した。

進行方向の速度 V (m/s)、角速度 ω_z より転動係数 Cr を算出した (式 2)。

$$Cr = \frac{\omega_z \cdot r}{V} \quad (2)$$

ここで、 r : 碎石単体の半径とし、粒子 A では 0.02m、粒子 B では 0.08m として求めた。

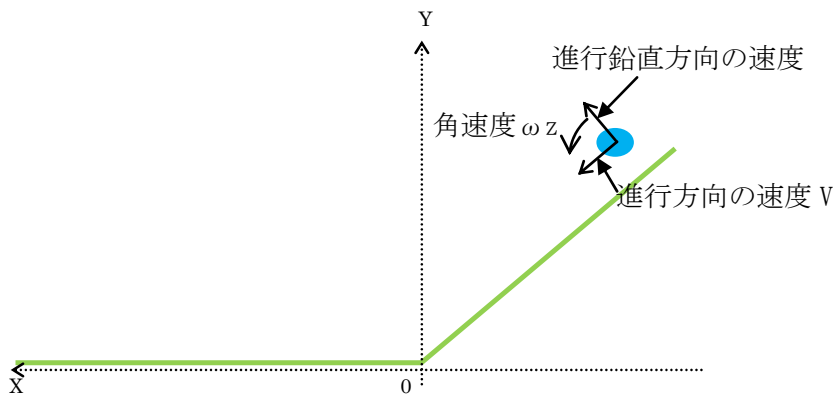


図 3.3.16 角速度を速度の定義

碎石粒子群の広がり幅は、各時刻において奥行方向 (Z 座標) の最大最小の値をもつ粒子を探し、2 粒子間の Z 座標値の差から求めた。

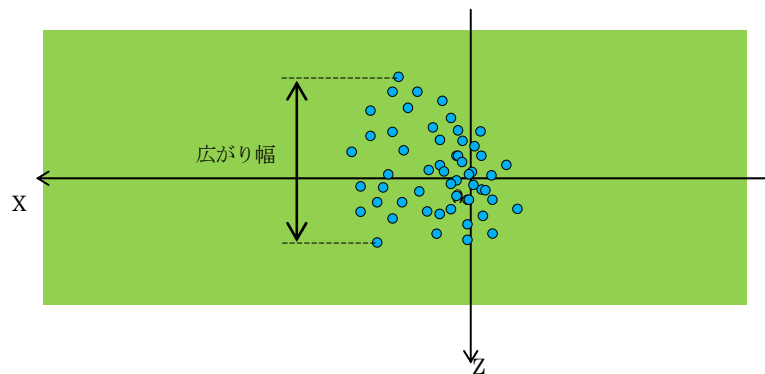


図 3.3.17 広がり幅の定義

碎石粒子群の到達位置についてはX方向へ最も遠くへ移動した粒子を探索し、その到達位置および速度の時刻歴とした。ただし、解析途中で他の粒子と挙動の異なる粒子が見られたため、以下の順序で到達位置および速度時刻歴をまとめた。

- (1)各時刻において、X方向の座標が小さい(つまり進行方向先頭)ほうから10個の粒子を抽出して到達位置を求める。
- (2)各時刻において、X方向の座標が小さい(つまり進行方向先頭)の粒子の速度を求める。ただし、(1)の結果から他の粒子と挙動が異なる粒子が先頭に存在する場合は、その粒子を除き、別な粒子の速度を求める。

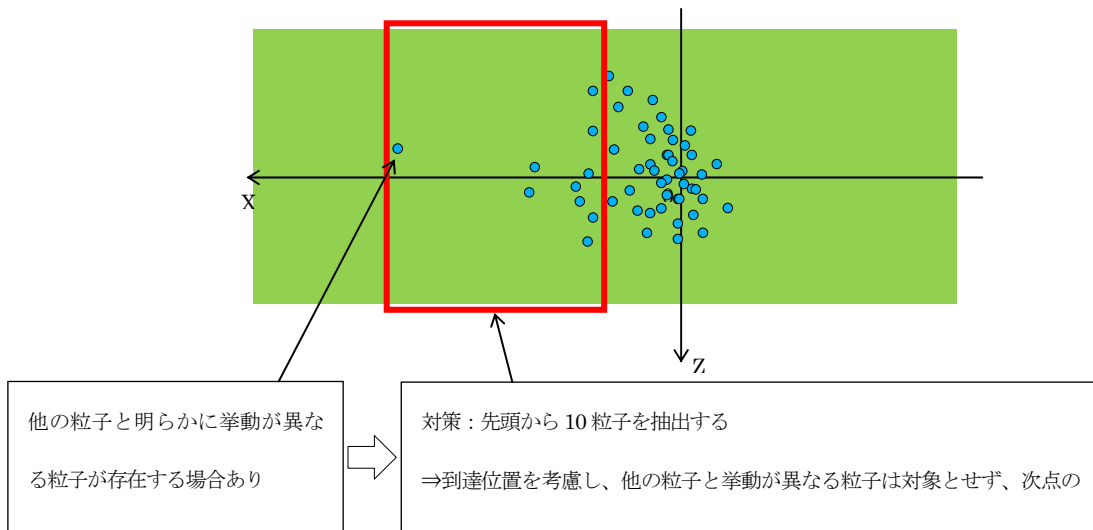


図 3.3.18 到達距離の定義

(2) 変形図

①ケース 1 碎石単体粒子 A

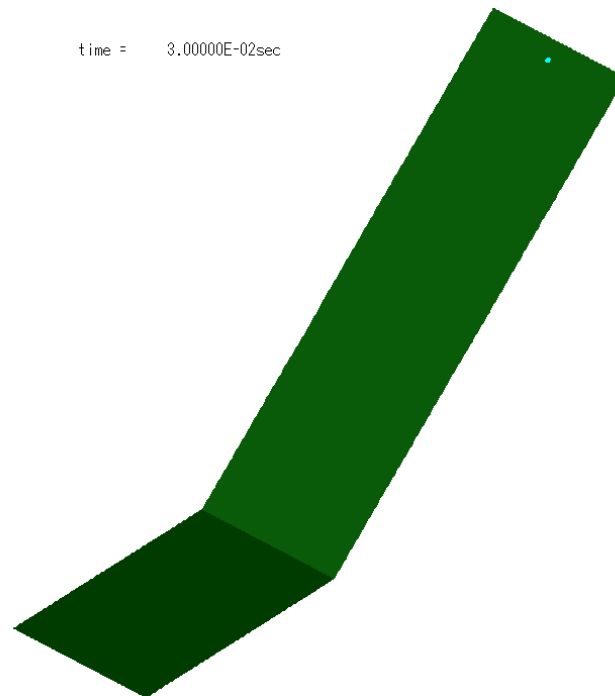


図 3.3.19 変形図 (0.0 秒)

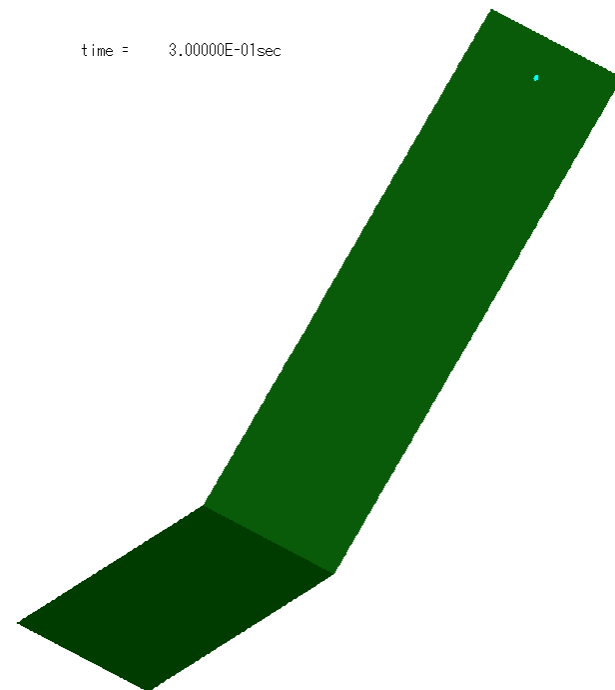


図 3.3.20 変形図 (0.3 秒)

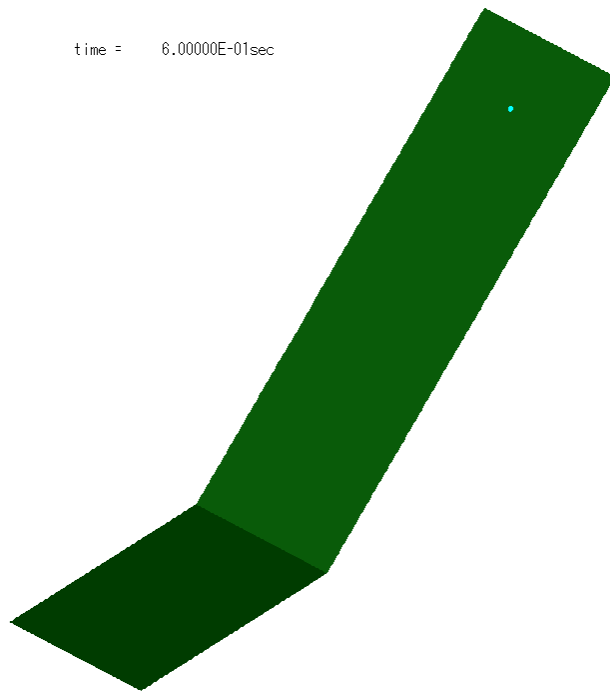


图 3.3.21 变形图 (0.6 秒)

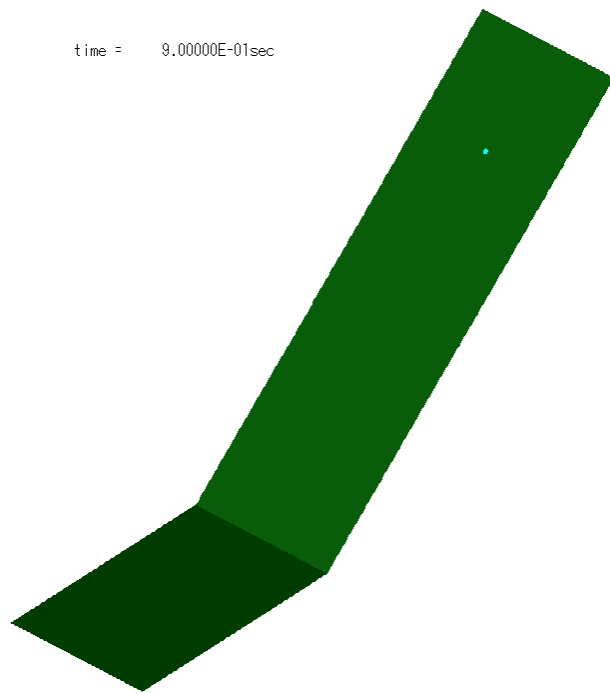


图 3.3.22 变形图 (0.9 秒)

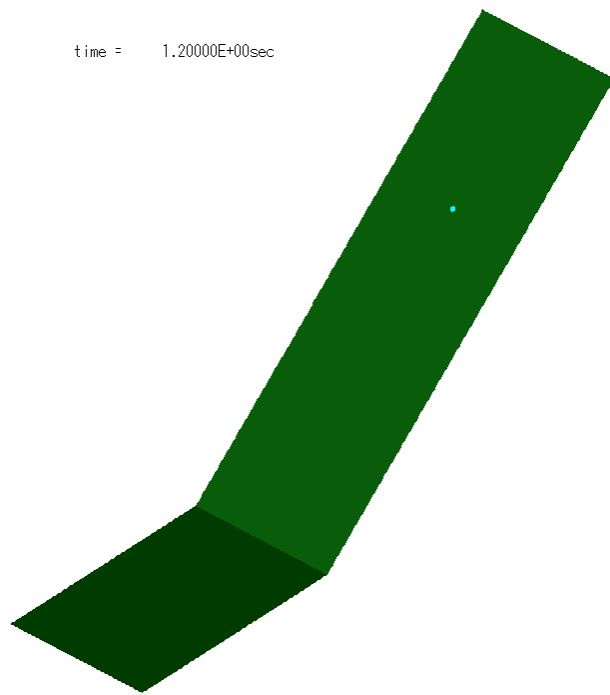


图 3.3.23 变形图 (1.2 秒)

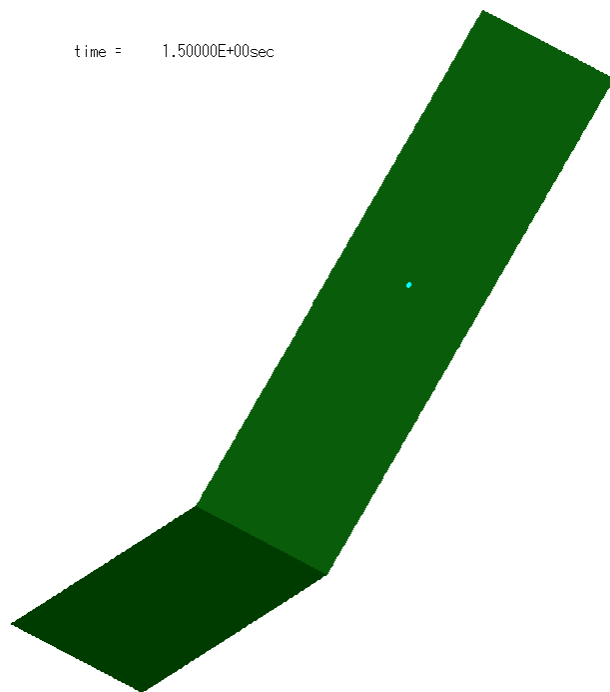


图 3.3.24 变形图 (1.5 秒)

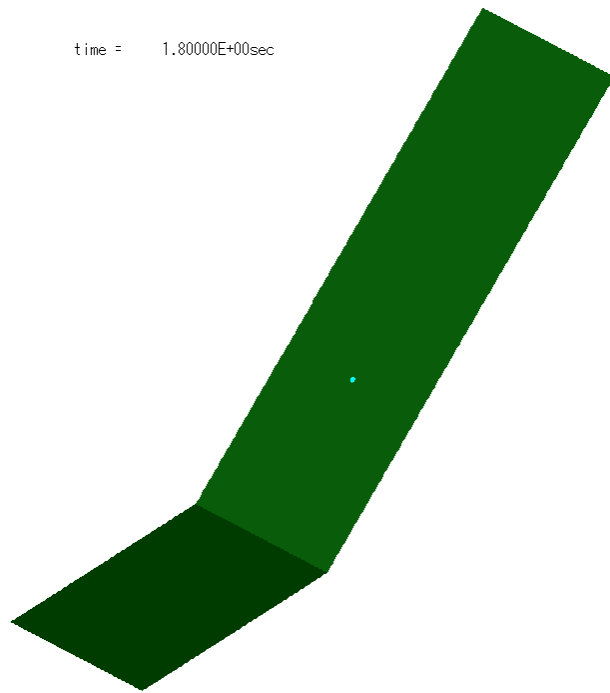


图 3.3.25 变形图 (1.8 秒)

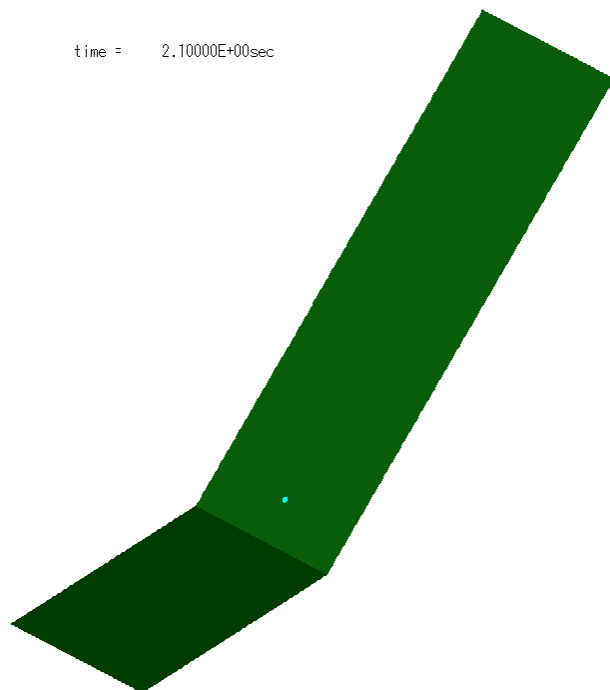


图 3.3.26 变形图 (2.1 秒)

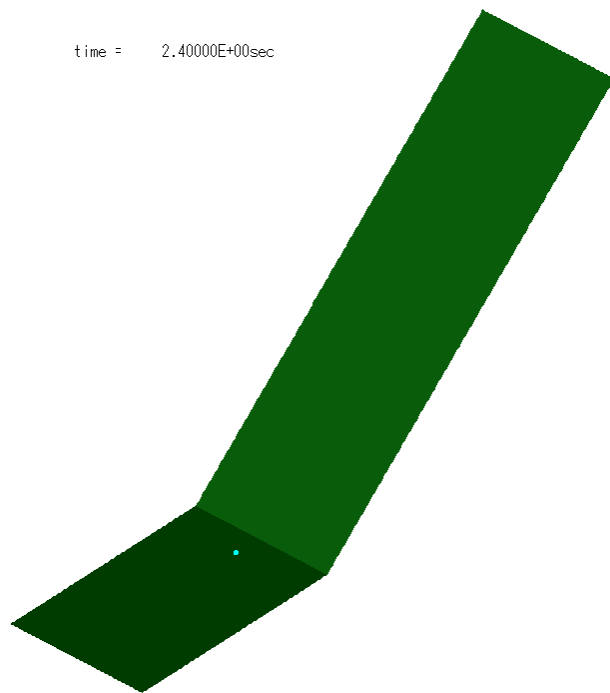


图 3.3.27 变形图 (2.4 秒)

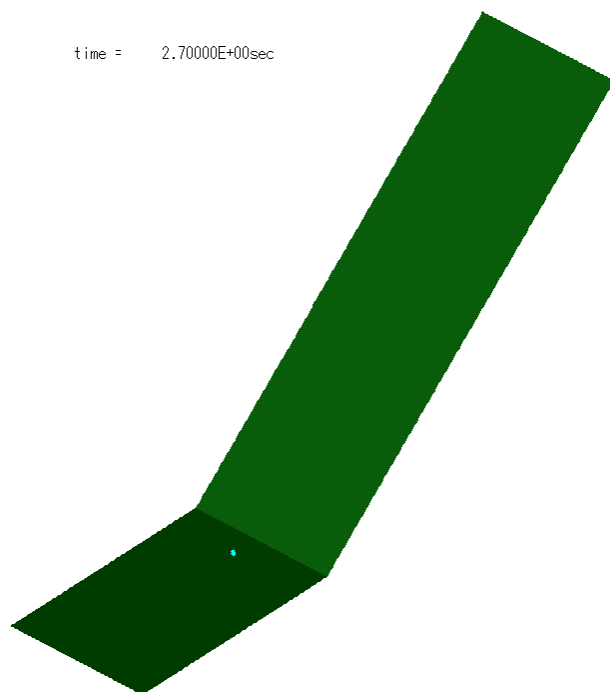


图 3.3.28 变形图 (2.7 秒)

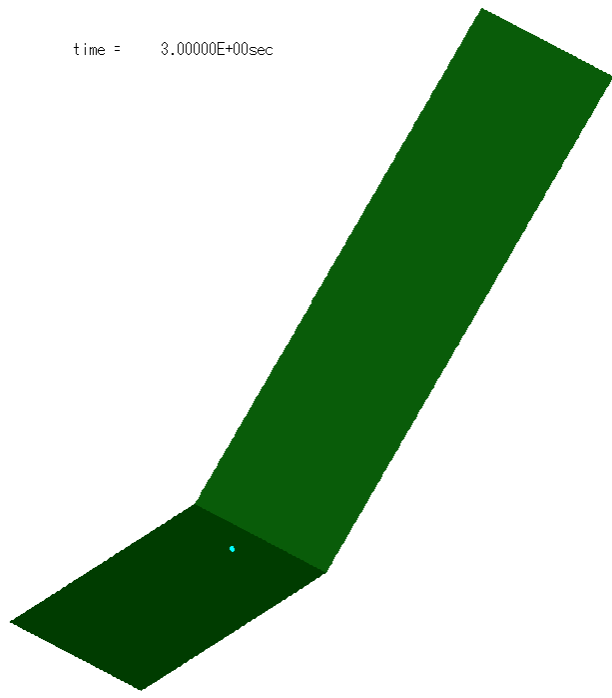


图 3.3.29 变形图 (3.0 秒)

②ケース 2 碎石単体粒子 B

time = 3.00000E-02sec

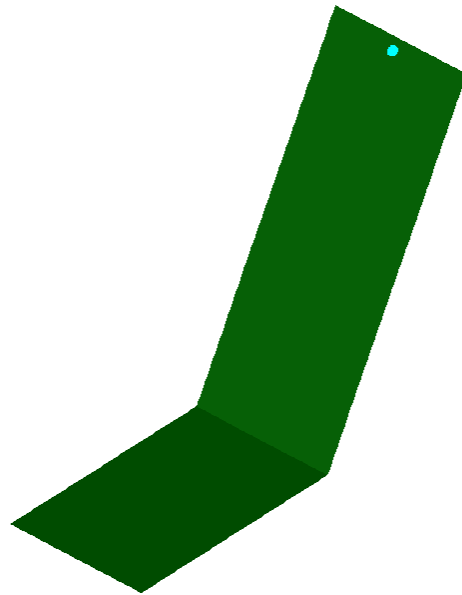


図 3.3.30 変形図 (0.0 秒)

time = 3.00000E-01sec

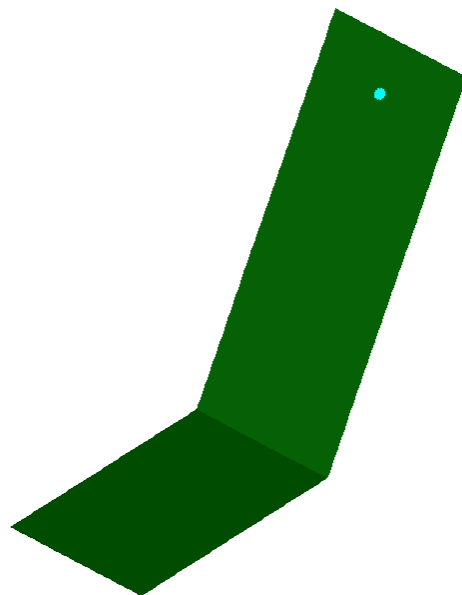


図 3.3.31 変形図 (0.3 秒)

time = 6.00000E-01sec

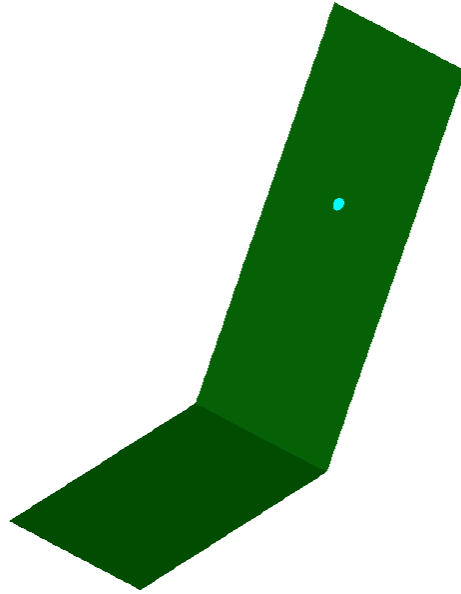


图 3.3.32 变形图 (0.6 秒)

time = 9.00000E-01sec

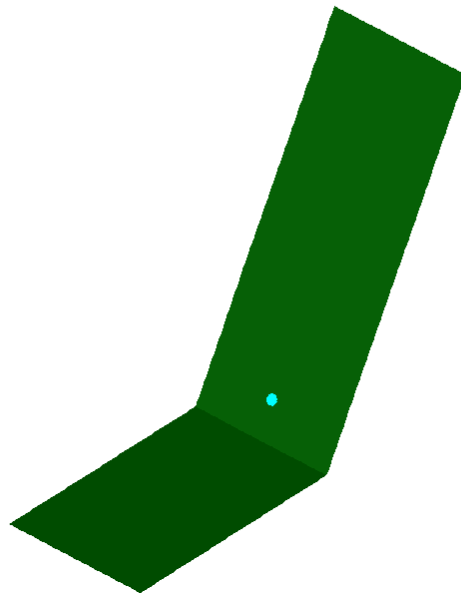


图 3.3.33 变形图 (0.9 秒)

time = 1.20000E+00sec

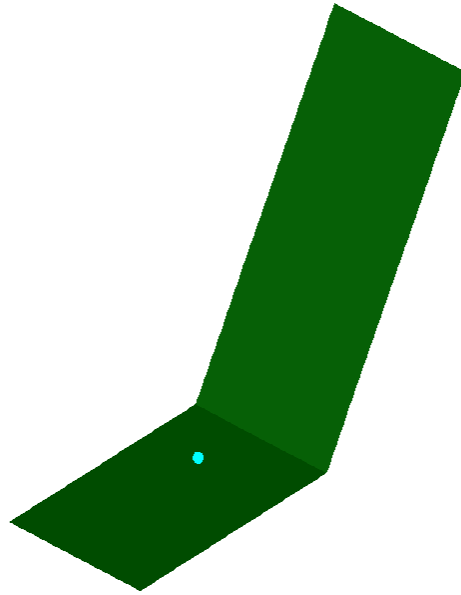


图 3.3.34 变形图 (1.2 秒)

time = 1.50000E+00sec

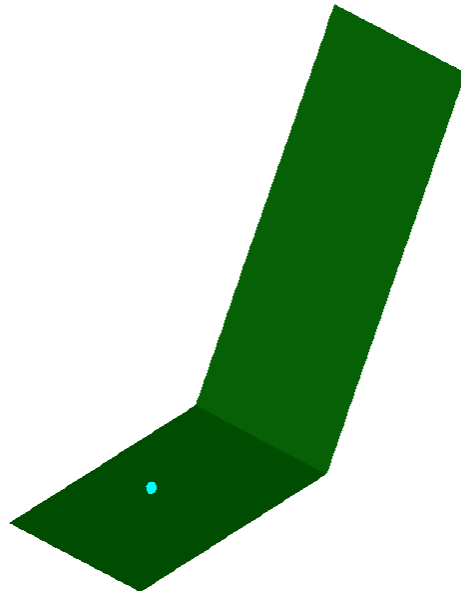


图 3.3.35 变形图 (1.5 秒)

time = 1.80000E+00sec

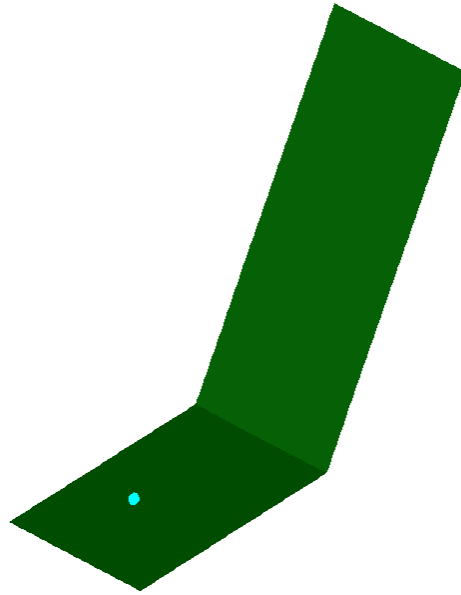


图 3.3.36 变形图 (1.8 秒)

time = 2.10000E+00sec

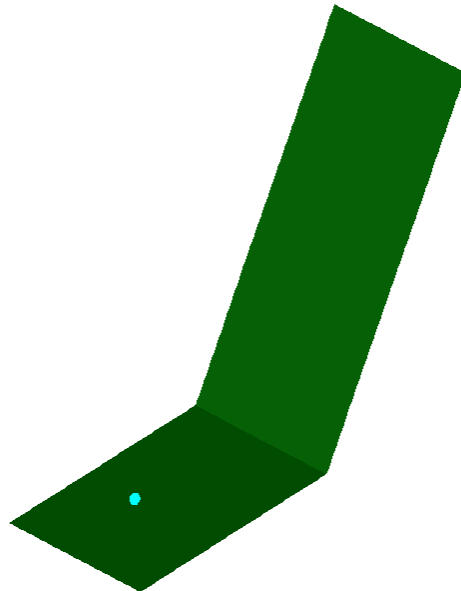


图 3.3.37 变形图 (2.1 秒)

time = 2.4000E+00sec

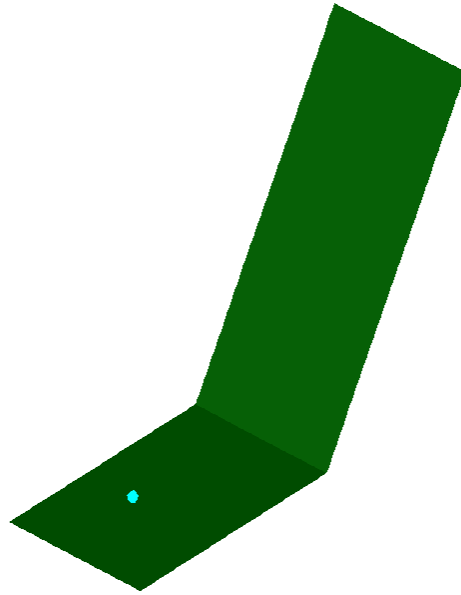


图 3.3.38 变形图 (2.4 秒)

time = 2.7000E+00sec

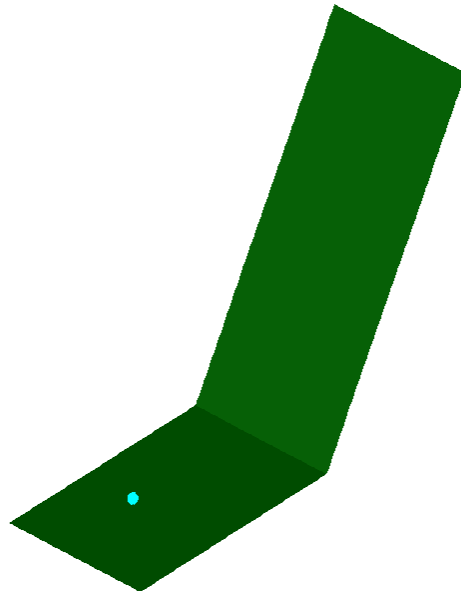


图 3.3.39 变形图 (2.7 秒)

time = 3.00000E+00sec

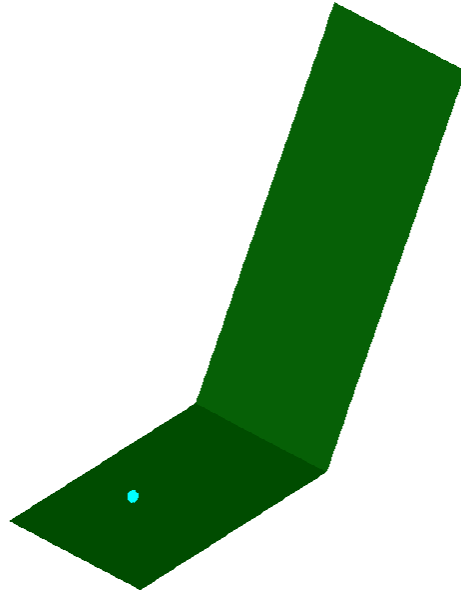


図 3.3.40 変形図 (3.0 秒)

③ケース3 碎石粒子群粒子A

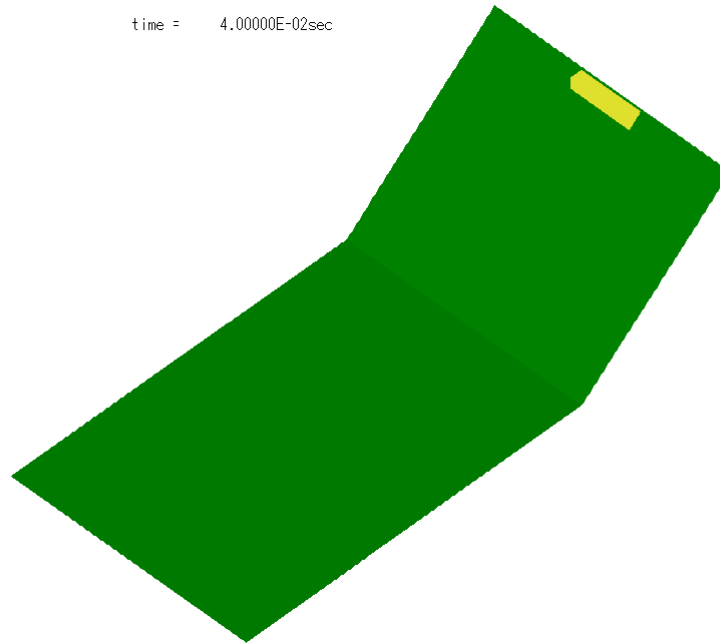


図 3. 3. 41 変形図 (0. 0 秒)

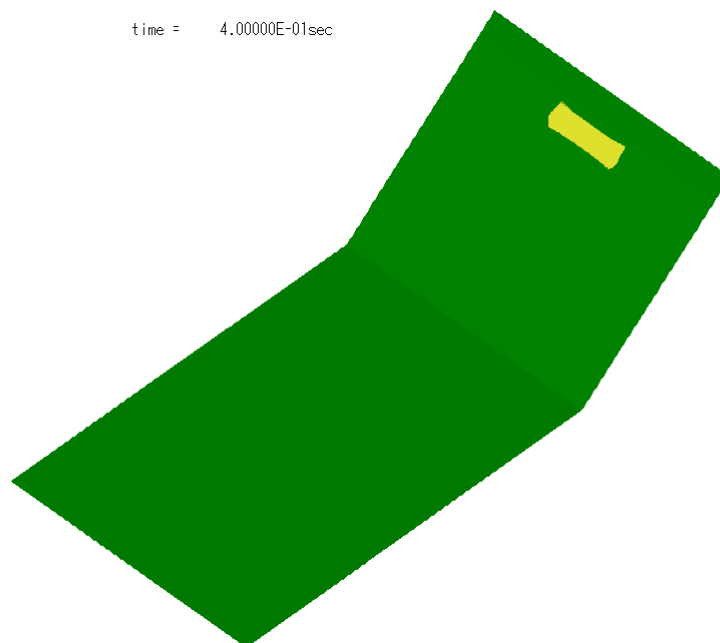


図 3. 3. 42 変形図 (0. 4 秒)

time = 8.00000E-01sec

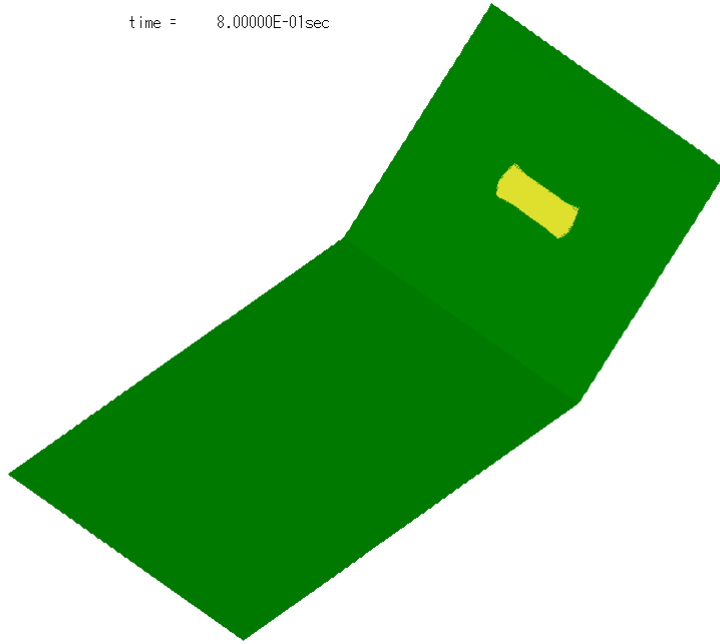


图 3.3.43 变形图 (0.8 秒)

time = 1.20000E+00sec

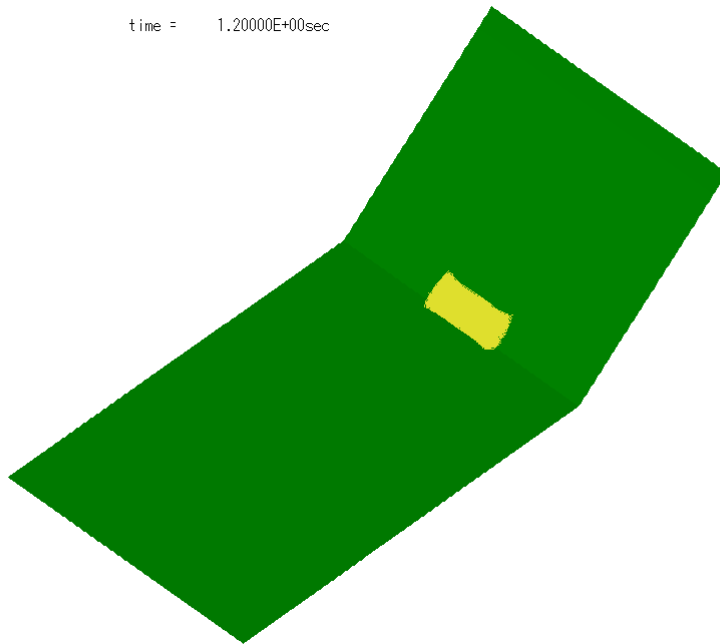


图 3.3.44 变形图 (1.2 秒)

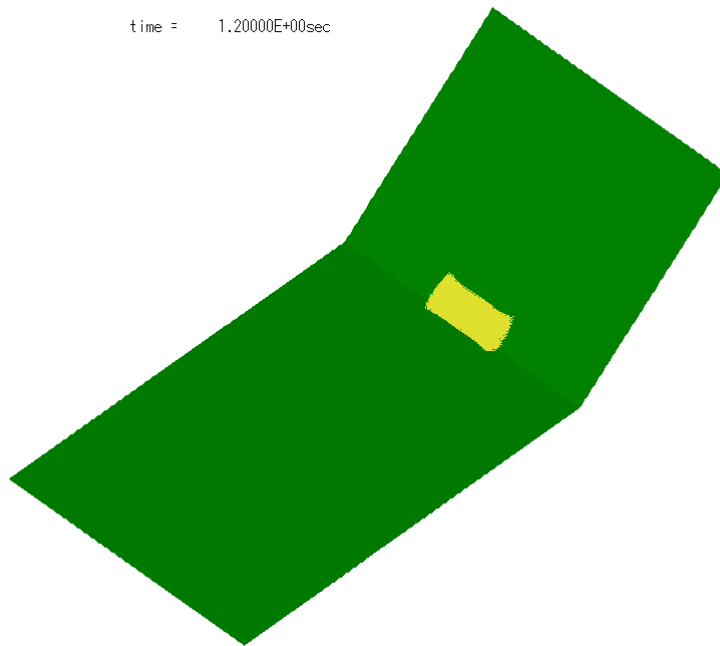


图 3.3.45 变形图 (1.6 秒)

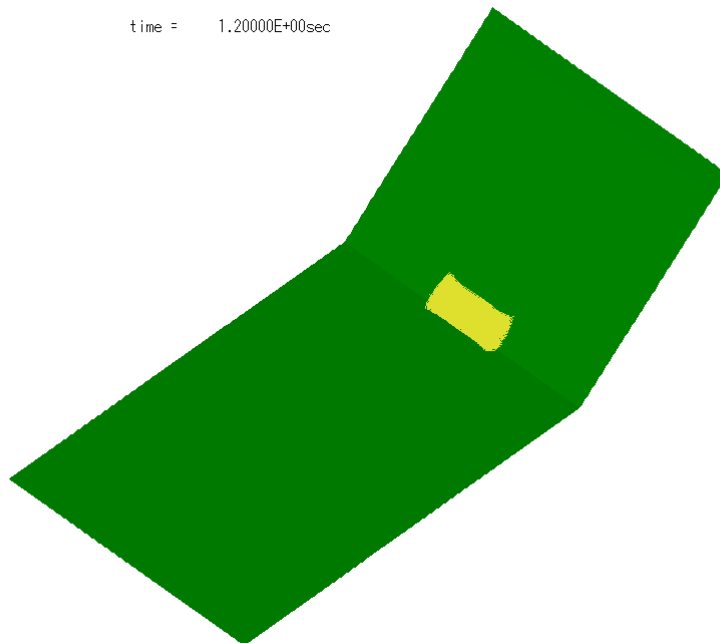


图 3.3.46 变形图 (2.0 秒)

time = 2.40000E+00sec

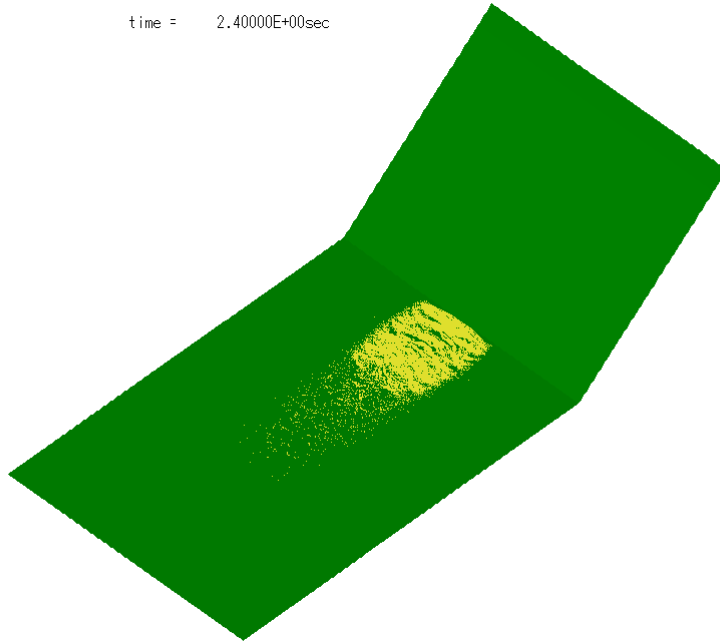


图 3.3.47 变形图 (2.4 秒)

time = 2.80000E+00sec

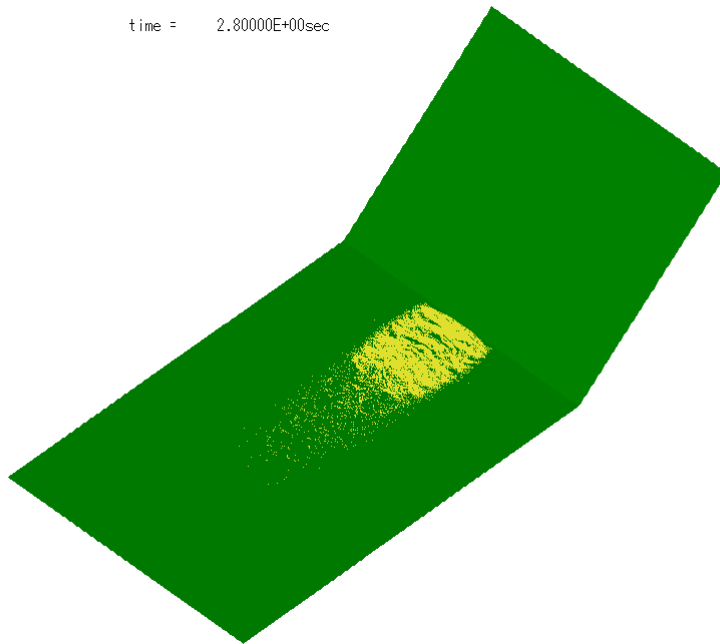


图 3.3.48 变形图 (2.8 秒)

④ケース4 碎石粒子群粒子B

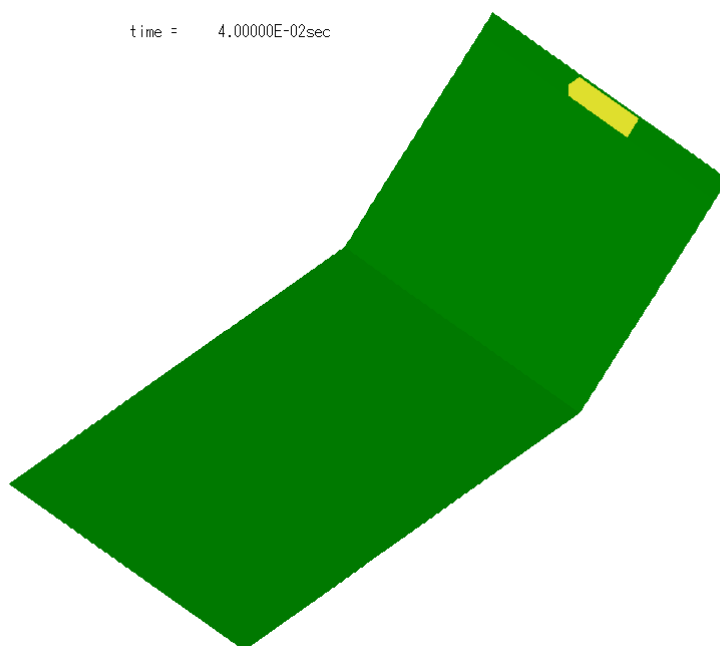


図 3.3.49 変形図 (0.0 秒)

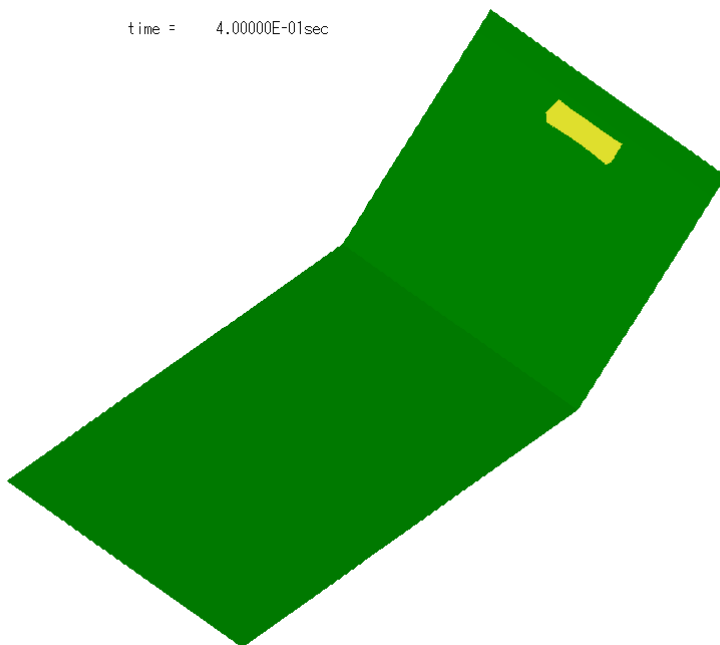


図 3.3.50 変形図 (0.4 秒)

time = 8.00000E-01sec

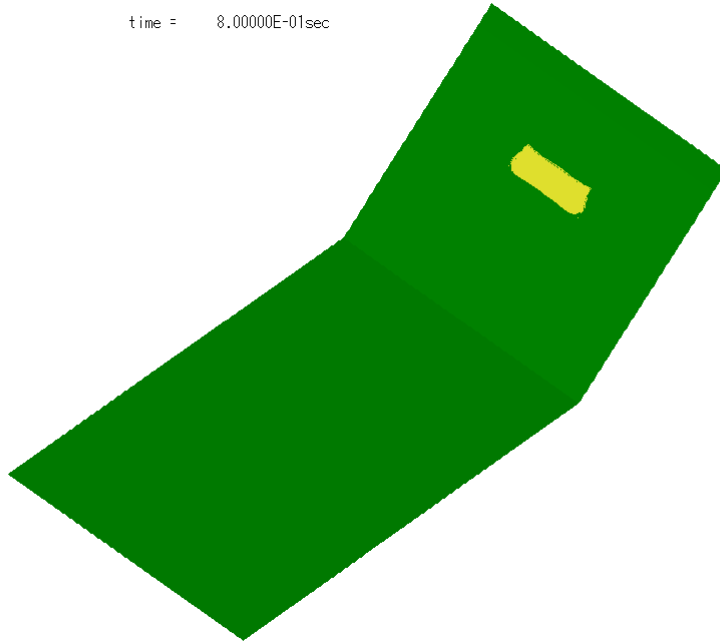


图 3.3.51 变形图 (0.8 秒)

time = 1.20000E+00sec

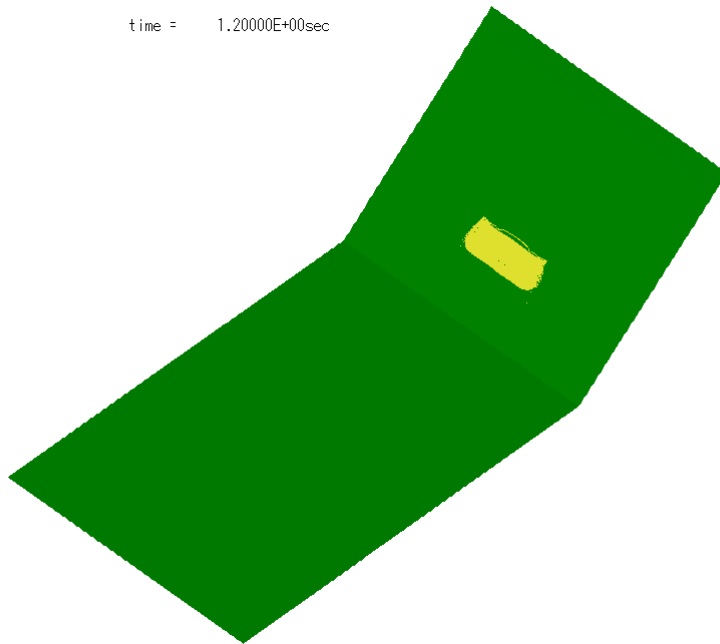


图 3.3.52 变形图 (1.2 秒)

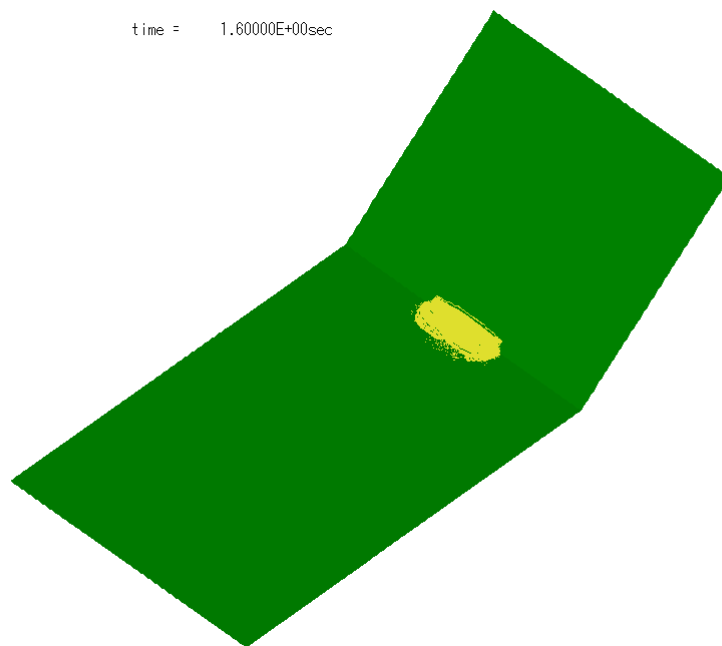


図 3. 3. 53 変形図 (1.6 秒)

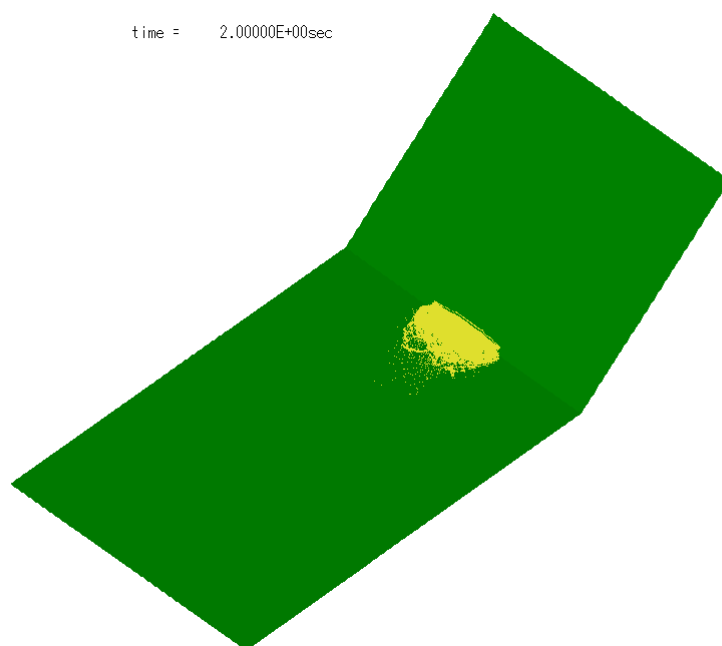


図 3. 3. 54 変形図 (2.0 秒)

time = 2.40000E+00sec

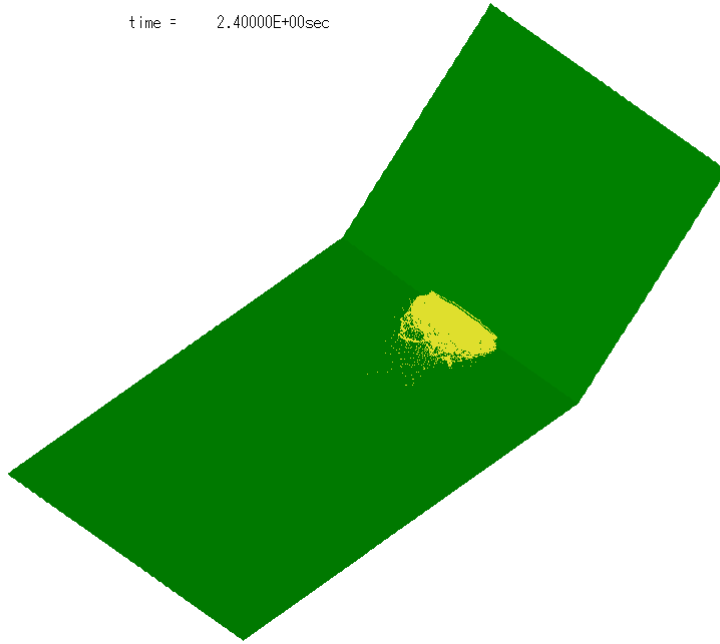


图 3.3.55 变形图 (2.4 秒)

time = 2.80000E+00sec

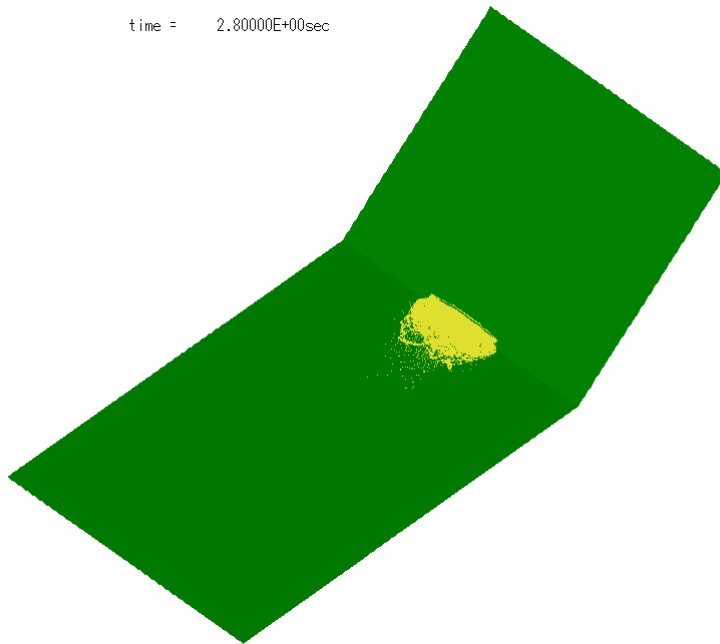


图 3.3.56 变形图 (2.8 秒)

⑤ケース5 碎石粒子群粒子B (水有)

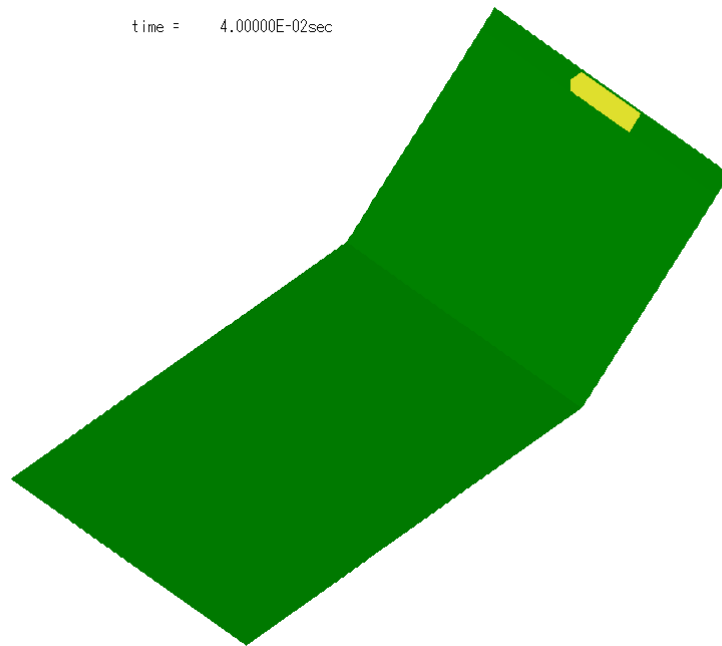


図 3. 3. 57 変形図 (0. 0 秒)

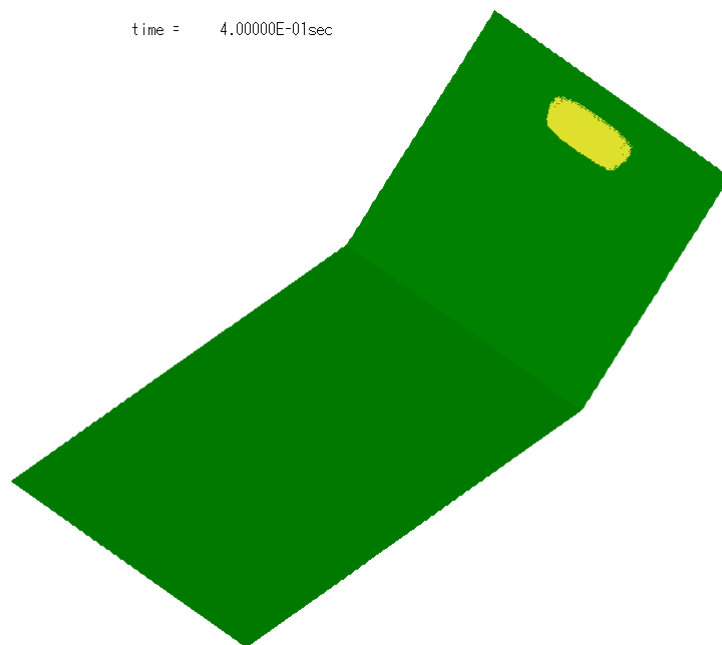


図 3. 3. 58 変形図 (0. 4 秒)

time = 8.00000E-01sec

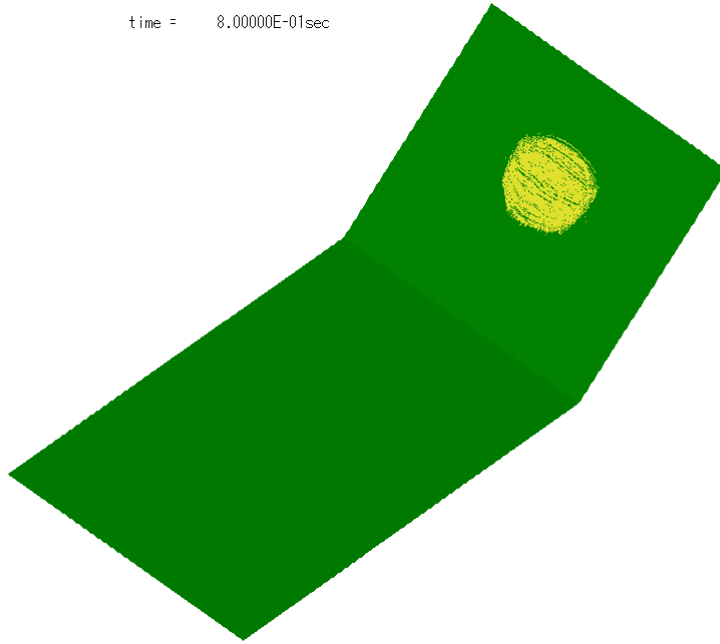


图 3.3.59 变形图 (0.8 秒)

time = 1.20000E+00sec

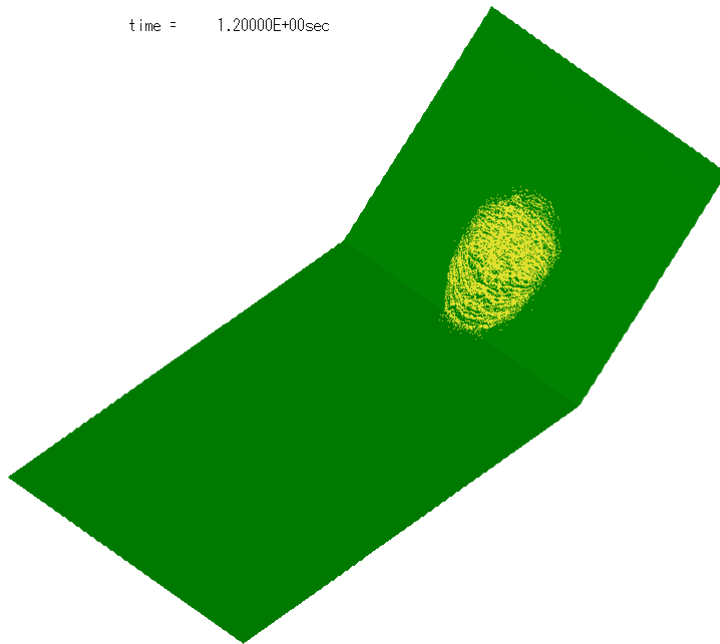


图 3.3.60 变形图 (1.2 秒)

time = 1.60000E+00sec

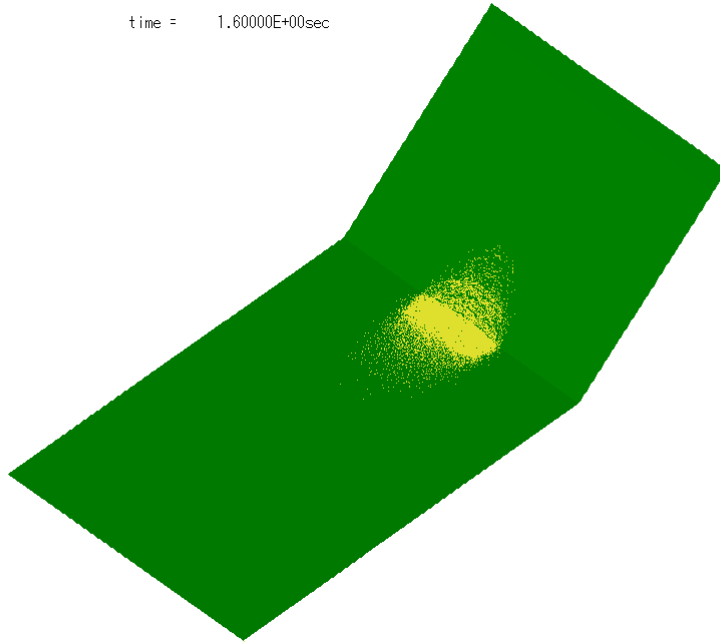


图 3.3.61 变形图 (1.6 秒)

time = 2.00000E+00sec

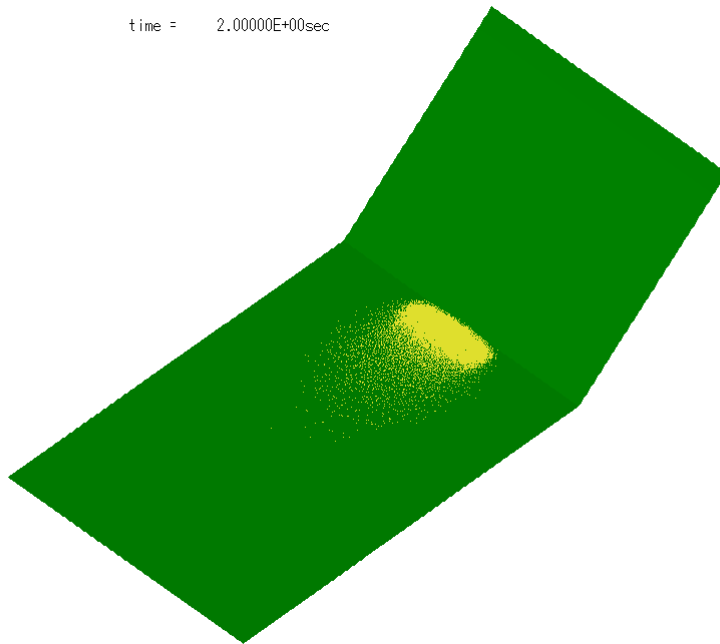


图 3.3.62 变形图 (2.0 秒)

time = 2.40000E+00sec

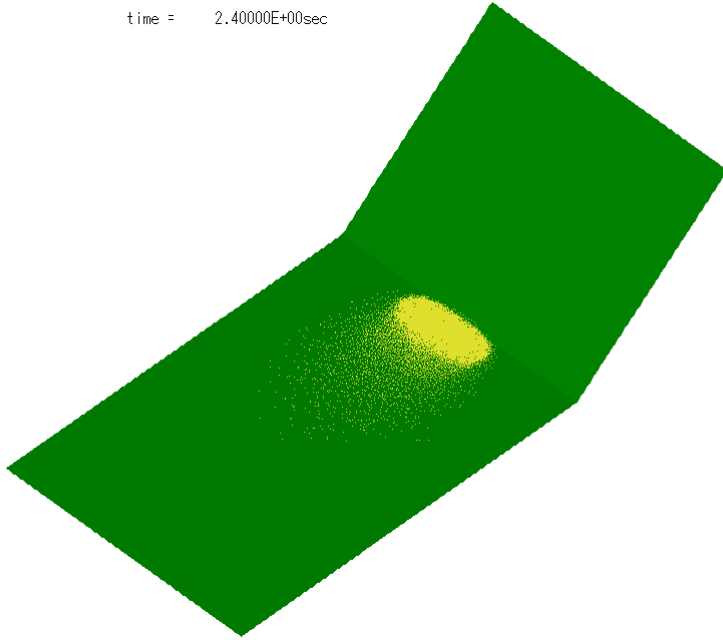


图 3.3.63 变形图 (2.4 秒)

time = 2.80000E+00sec

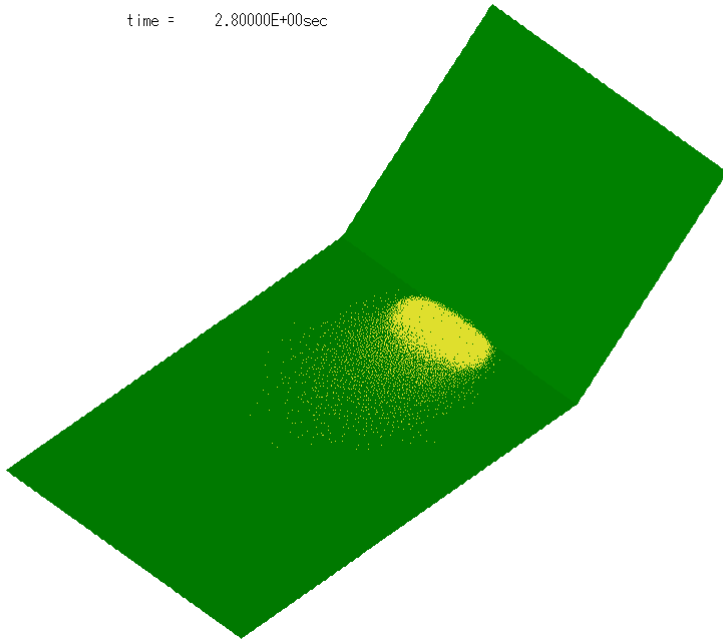


图 3.3.64 变形图 (2.8 秒)

⑥ケース6 碎石粒子群粒子B

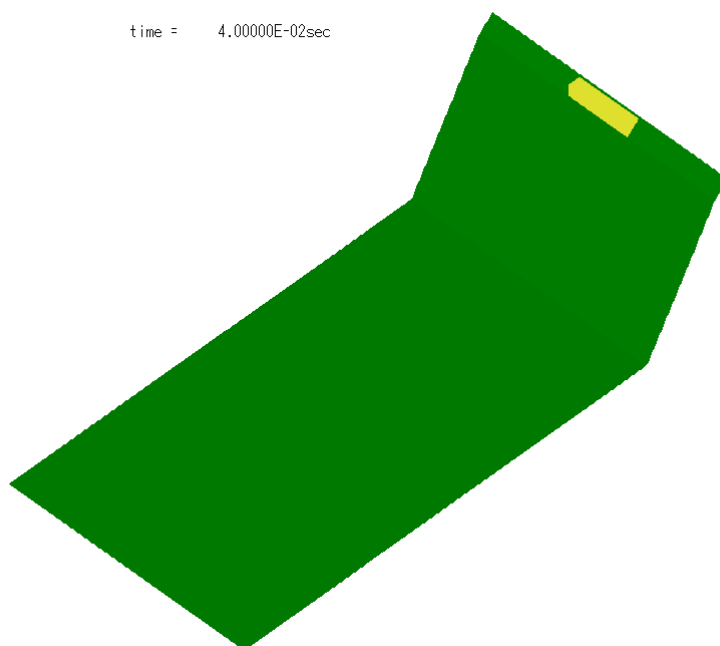


図 3. 3. 65 変形図 (0.0 秒)

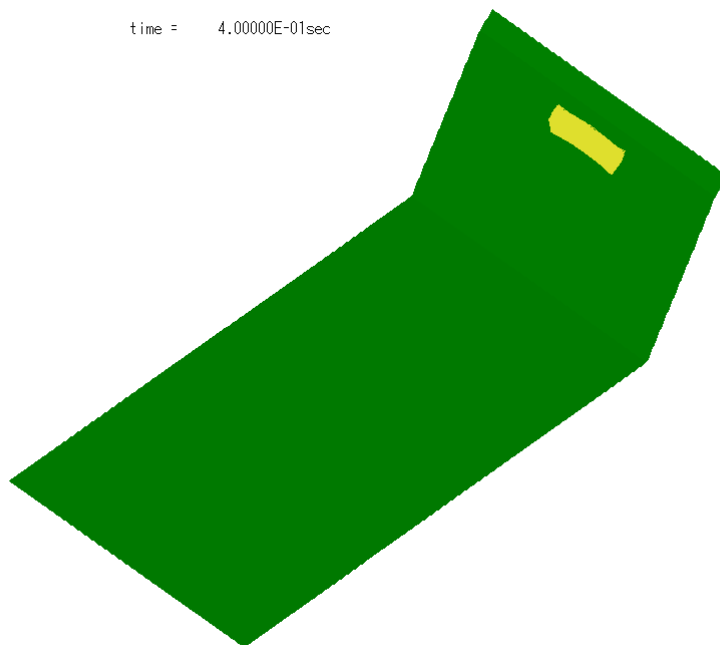


図 3. 3. 66 変形図 (0.4 秒)

time = 8.00000E-01sec

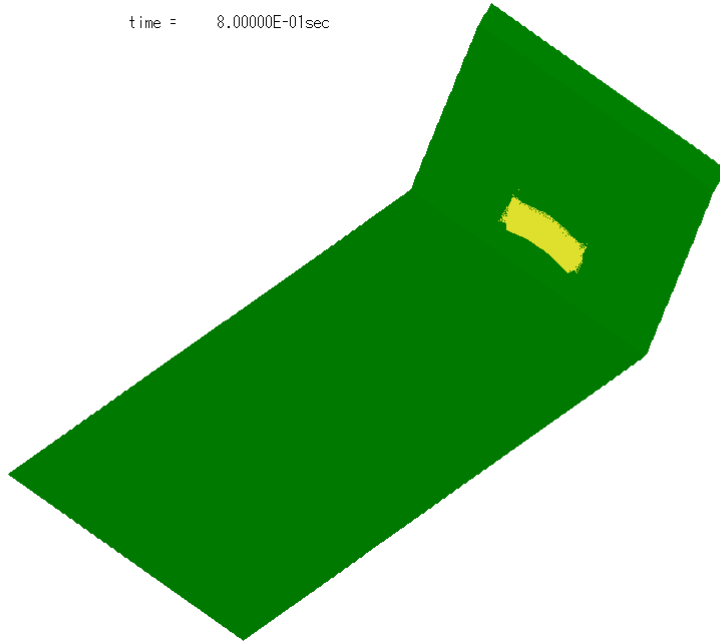


图 3.3.67 变形图 (0.8 秒)

time = 1.20000E+00sec

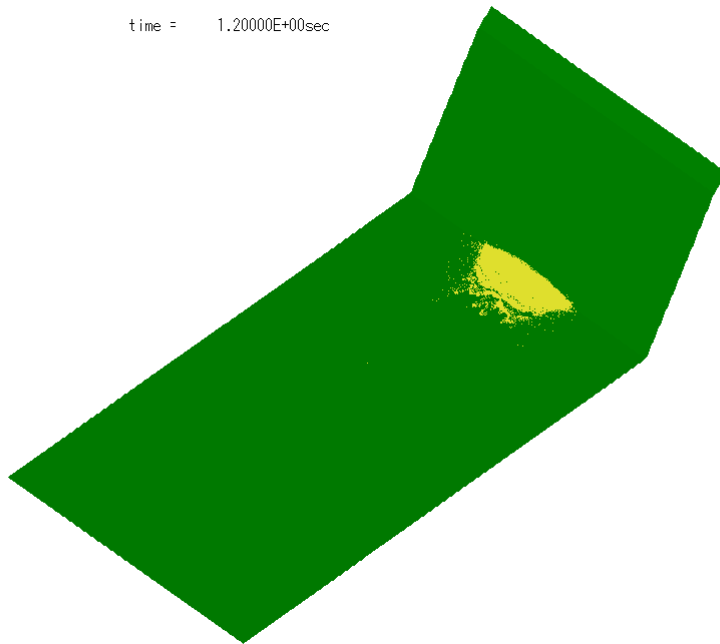


图 3.3.68 变形图 (1.2 秒)

time = 1.60000E+00sec

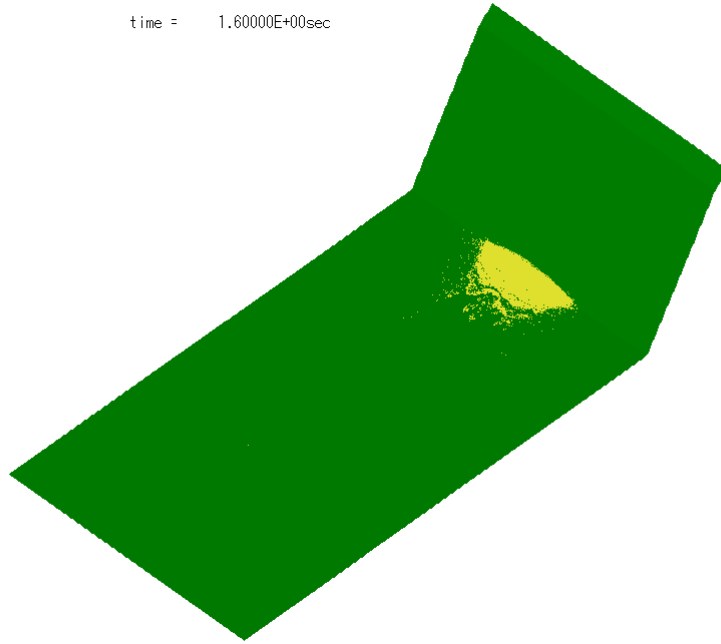


図 3. 3. 69 変形図 (1.6 秒)

time = 2.00000E+00sec

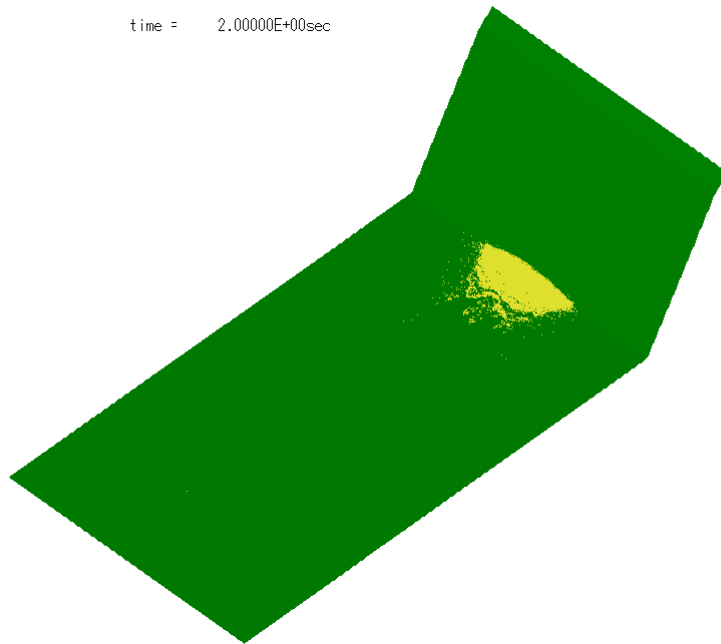


図 3. 3. 70 変形図 (2.0 秒)

time = 2.40000E+00sec

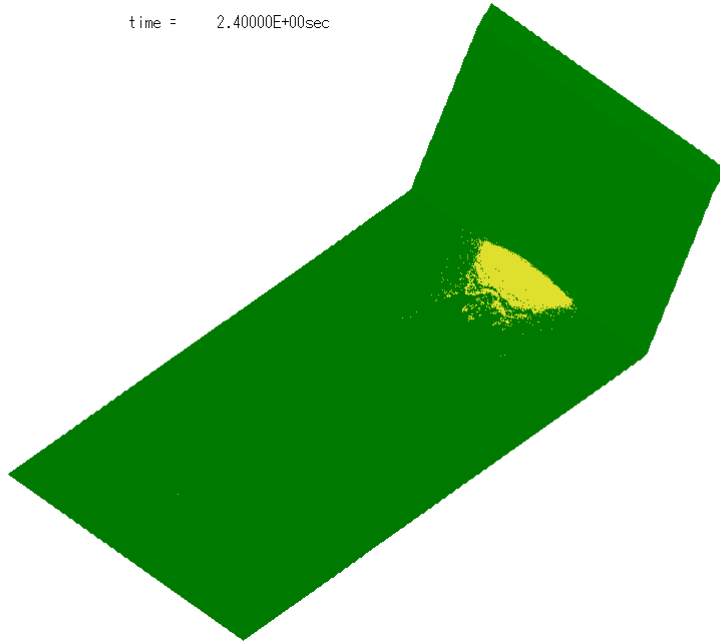


图 3.3.71 变形图 (2.4 秒)

time = 2.80000E+00sec

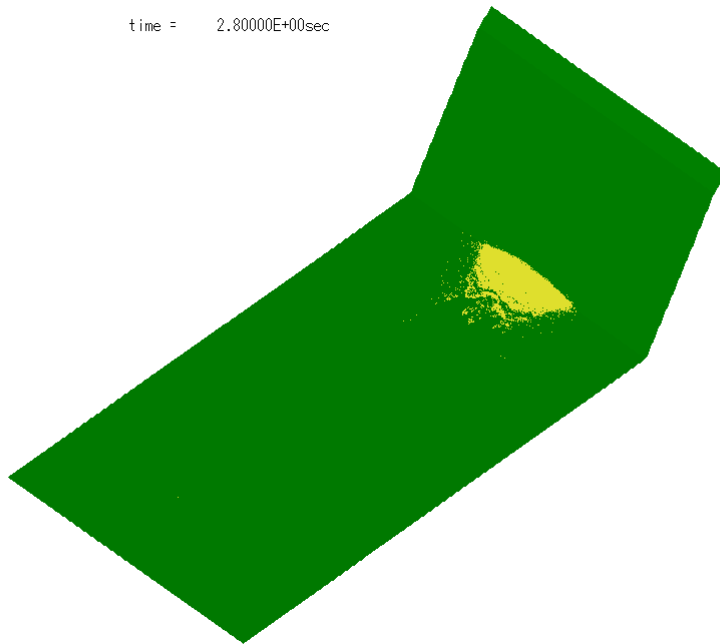


图 3.3.72 变形图 (2.8 秒)

(2) 角速度の時刻歴 (碎石単体試験)

① ケース 1 碎石単体粒子 A

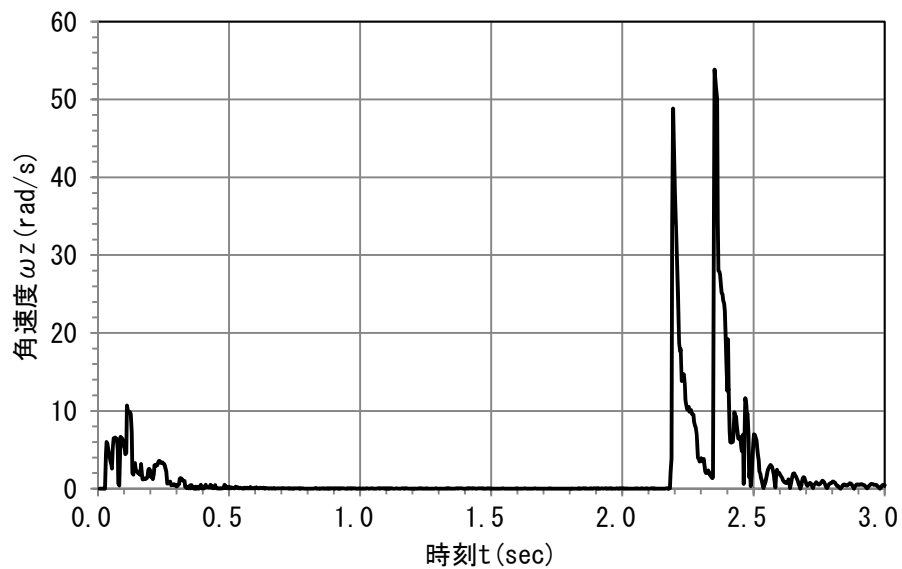


図 3.3.73 Z 軸周りの角速度

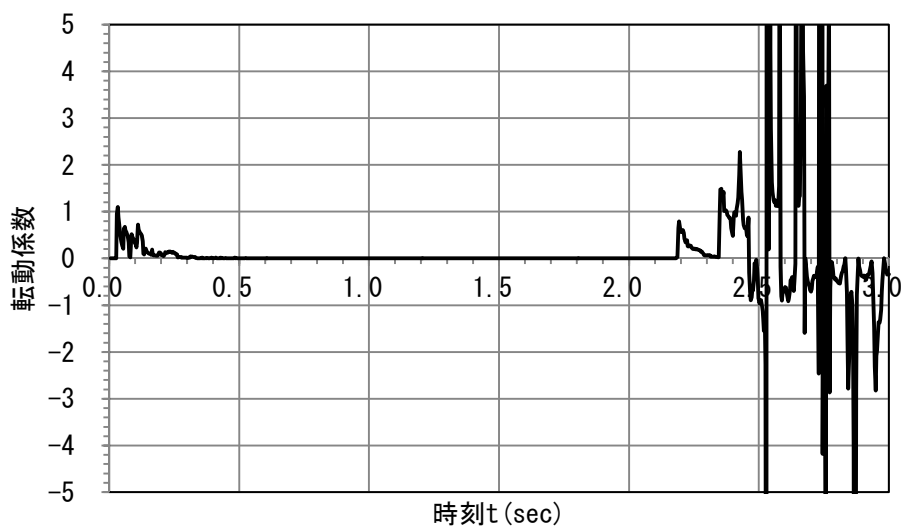


図 3.3.74 転動係数 (斜面方向)

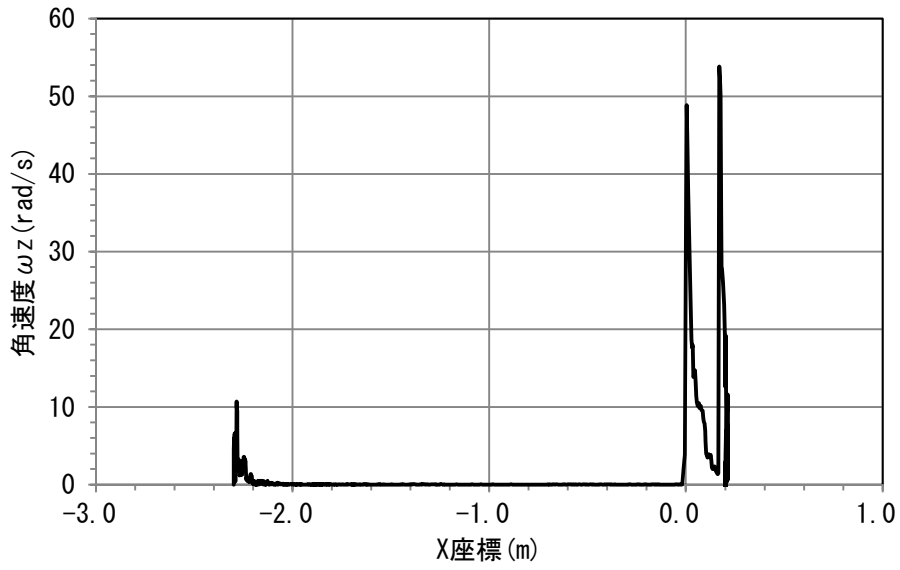


図 3.3.75 碎石の X 方向軌道と角速度との関係

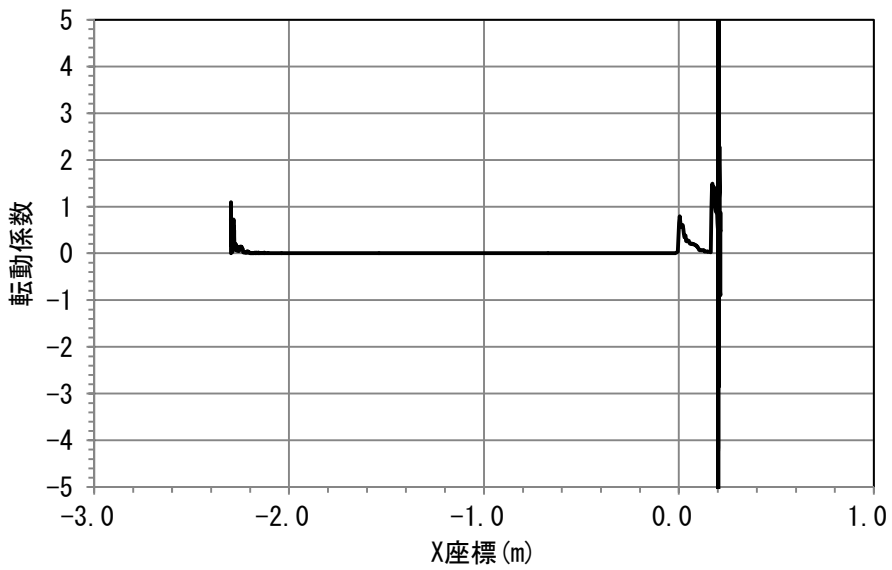


図 3.3.76 碎石の X 方向の起動と転動係数との関係

②ケース2 碎石単体粒子B

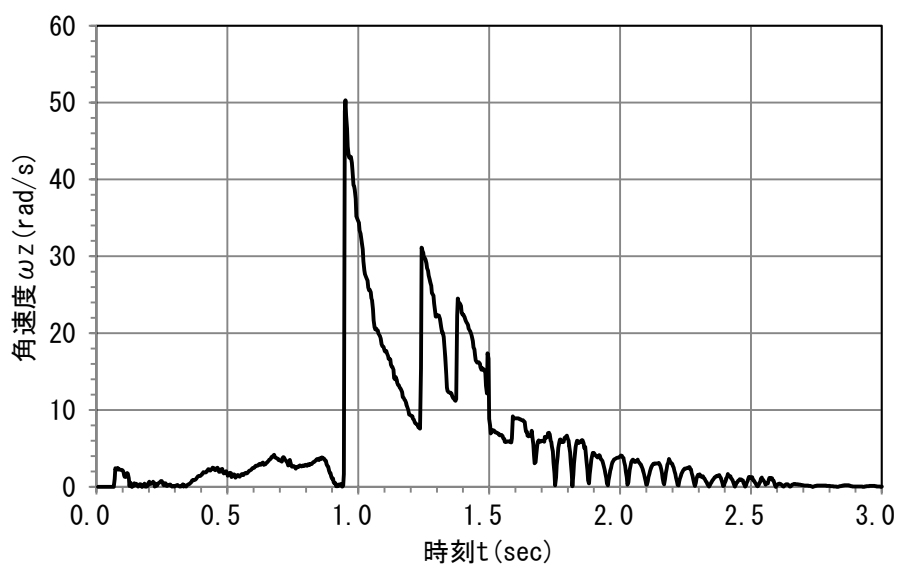


図 3.3.77 Z 軸周りの角速度

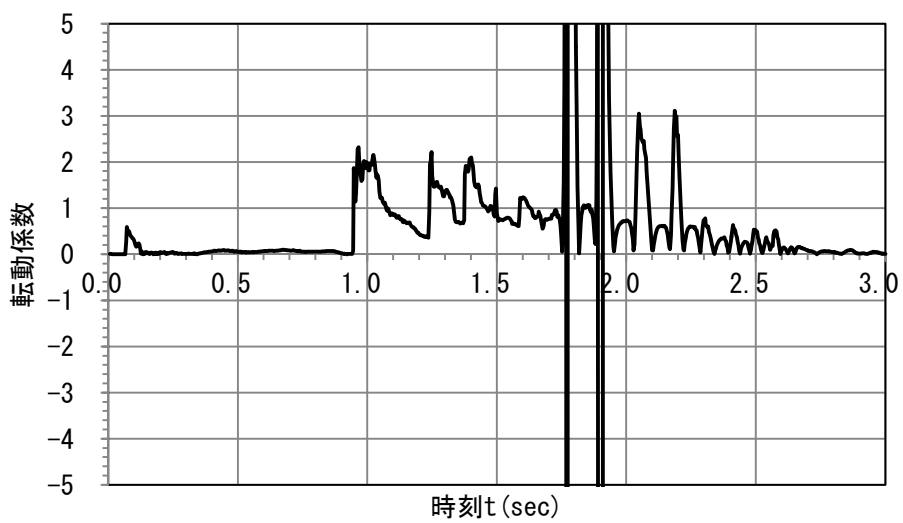


図 3.3.78 転動係数 (斜面方向)

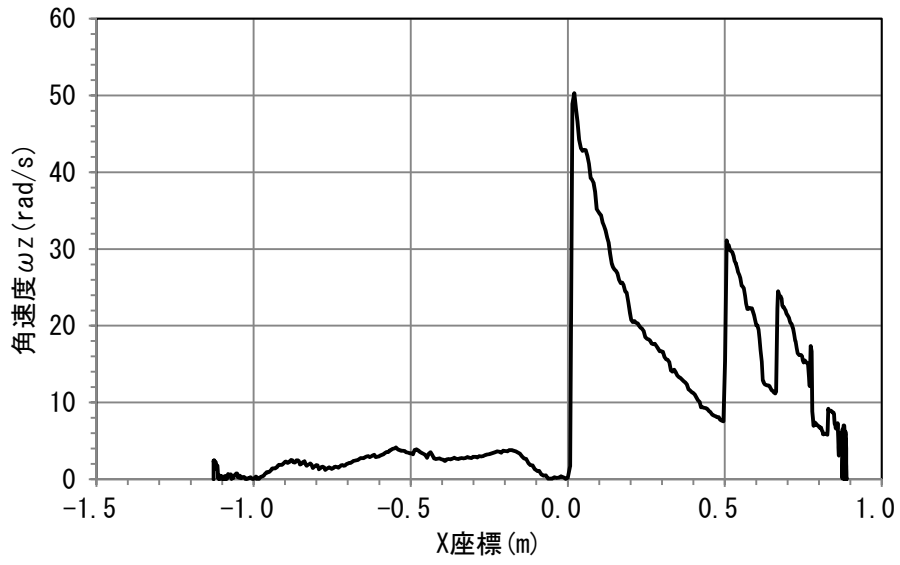


図 3.3.79 碎石の X 方向軌道と角速度との関係

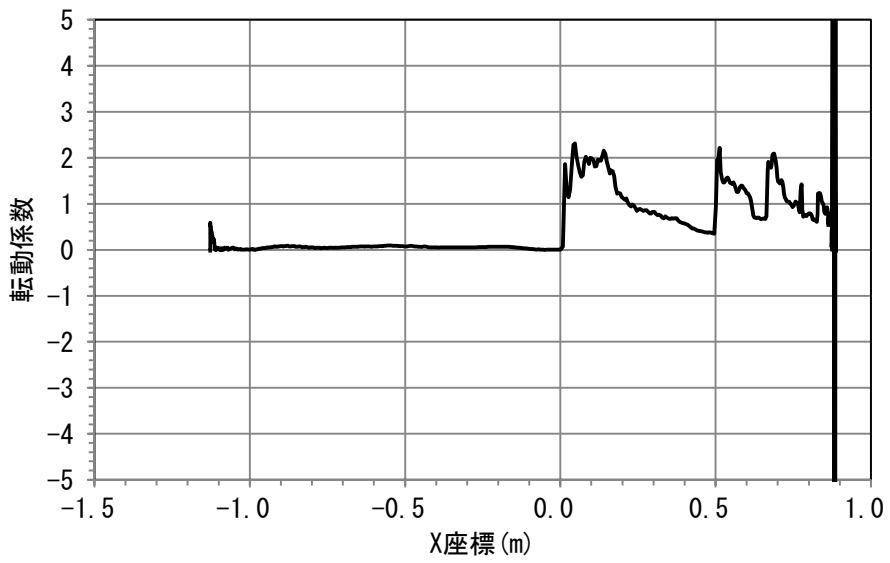


図 3.3.80 碎石の X 方向の起動と転動係数との関係

(3) 広がり幅の時刻歴 (碎石粒子群試験)

① ケース 3 碎石粒子群 A

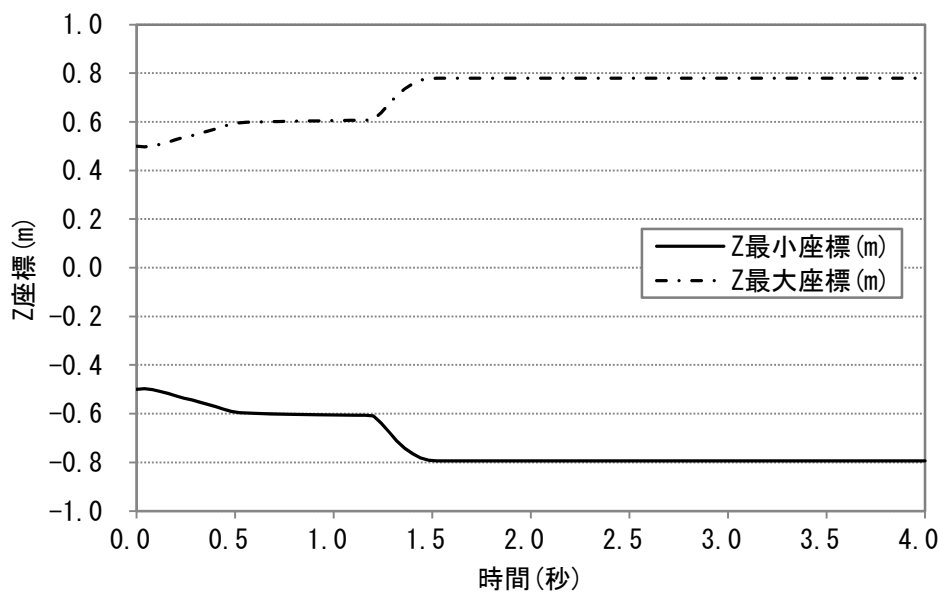


図 3.3.81 斜面台奥行方向 (Z 座標) の最大、最小座標の時刻歴

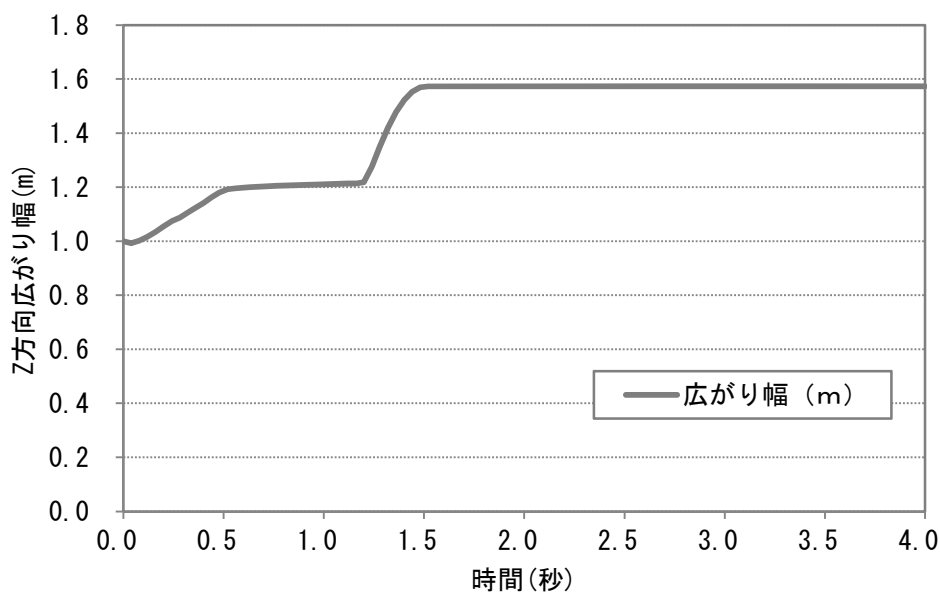


図 3.3.82 広がり幅 (Z 方向) の時刻歴

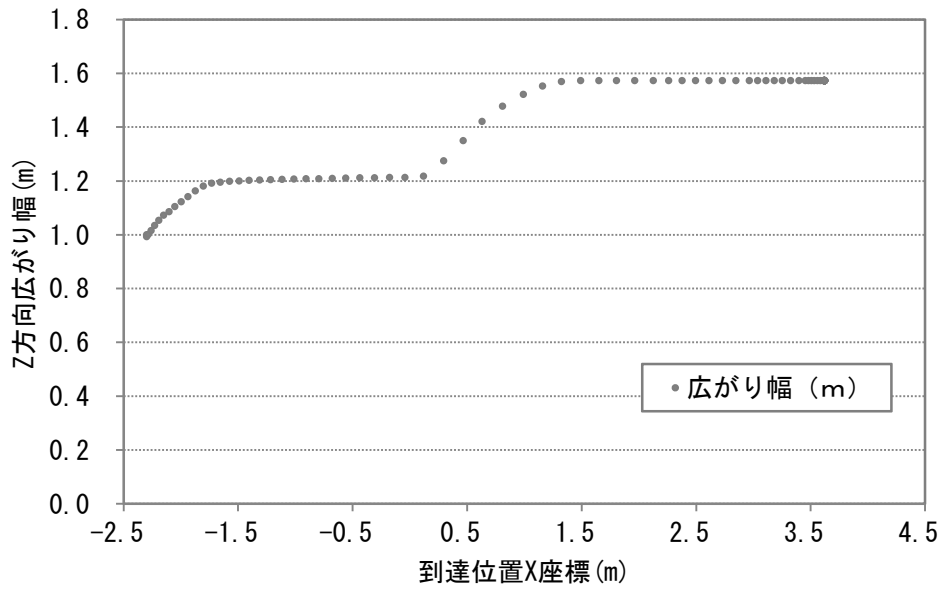


図 3.3.83 砕石群到達位置 (X 方向) と広がり幅 (Z 方向) との関係

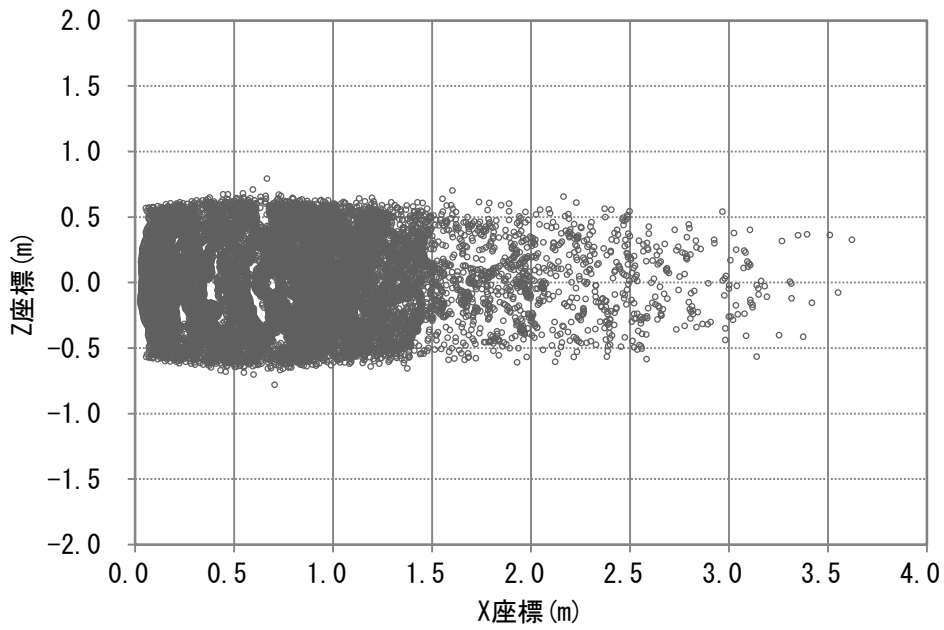


図 3.3.84 最終ステップにおける粒子の分布 (X-Z 面)

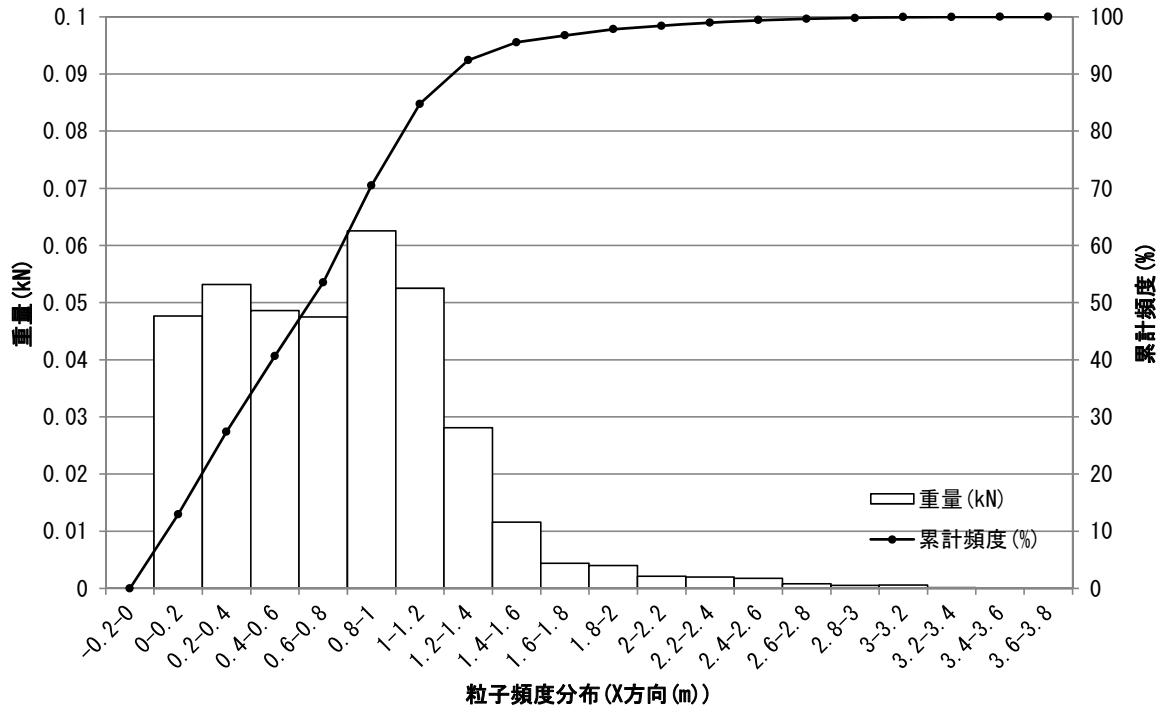


図 3.3.85 X 方向の粒子頻度分布

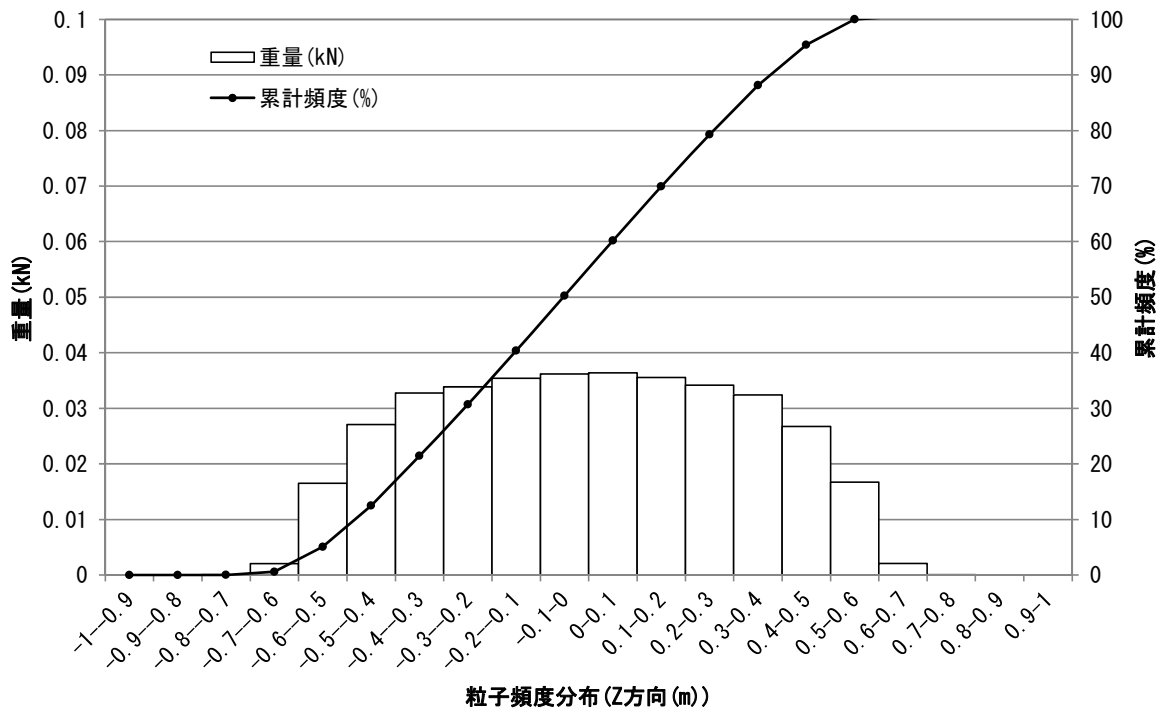


図 3.3.86 Z 方向の粒子頻度分布

②ケース4 碎石粒子群B

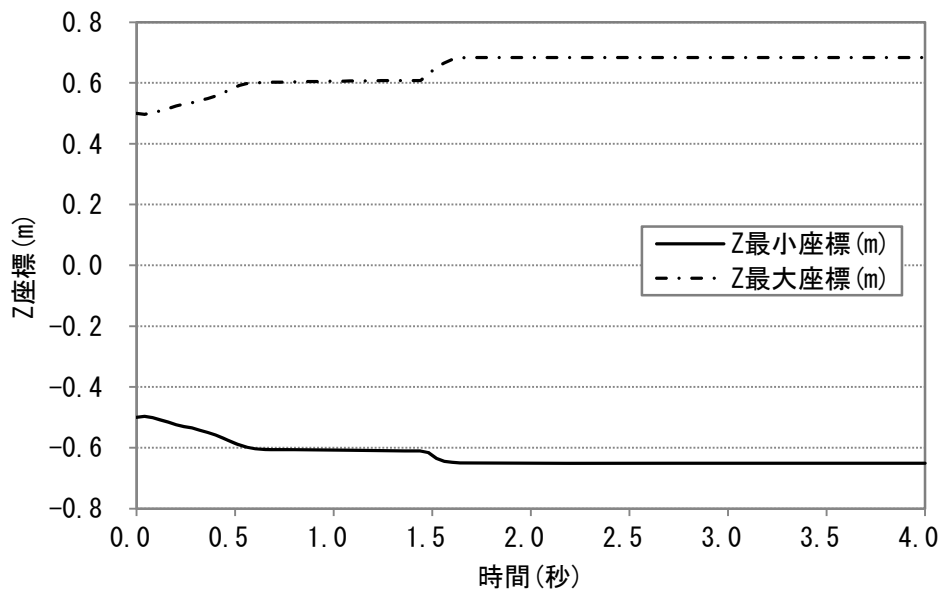


図 3.3.87 斜面台奥行方向 (Z 座標) の最大、最小座標の時刻歴

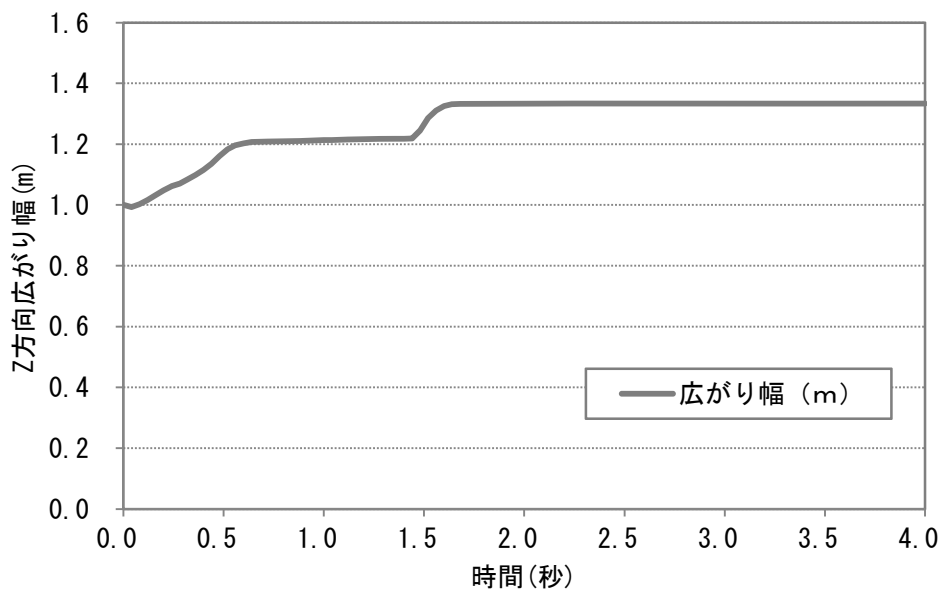


図 3.3.88 広がり幅 (Z 方向) の時刻歴

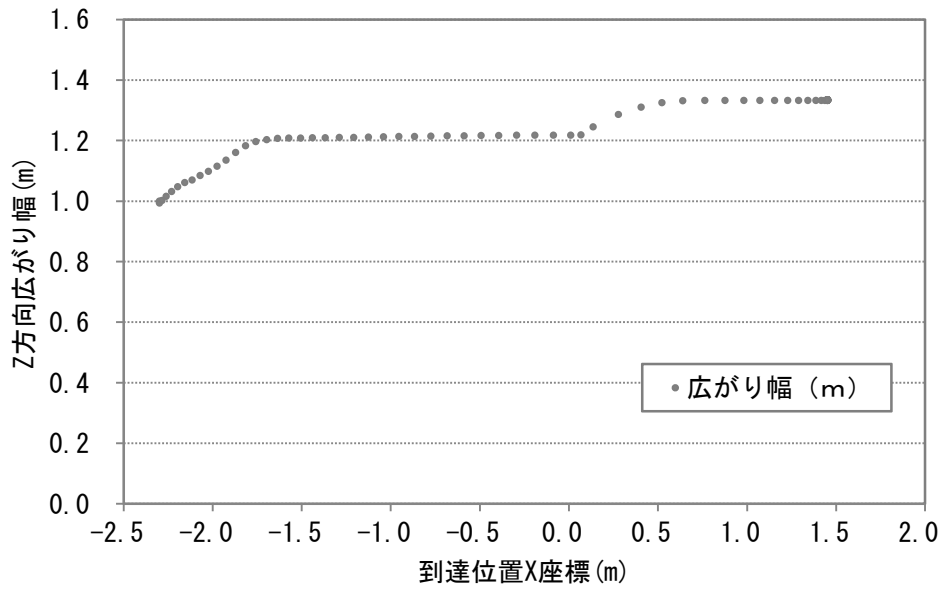


図 3.3.89 碎石群到達位置 (X 方向) と広がり幅 (Z 方向) との関係

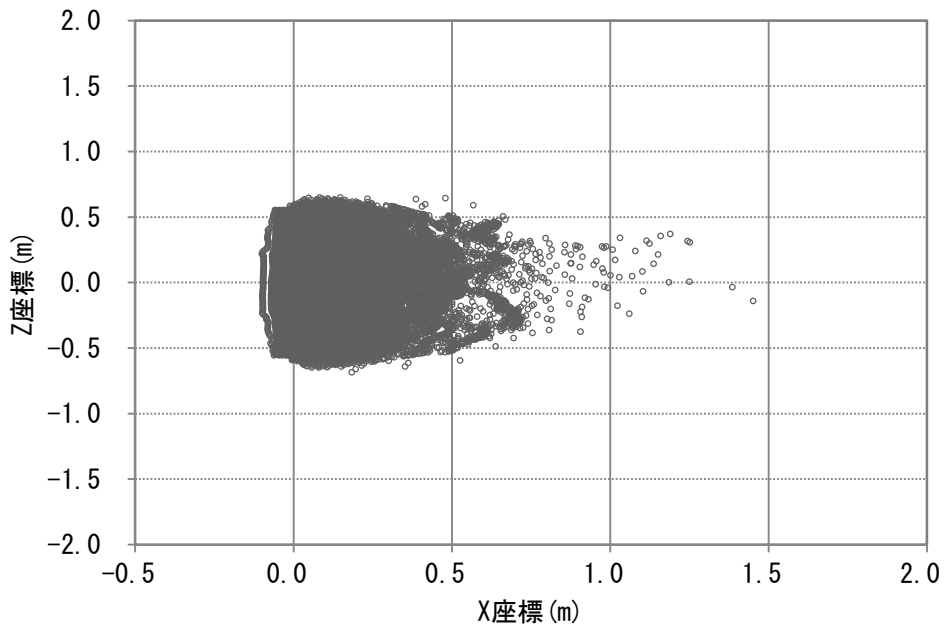


図 3.3.90 最終ステップにおける粒子の分布 (X-Z 面)

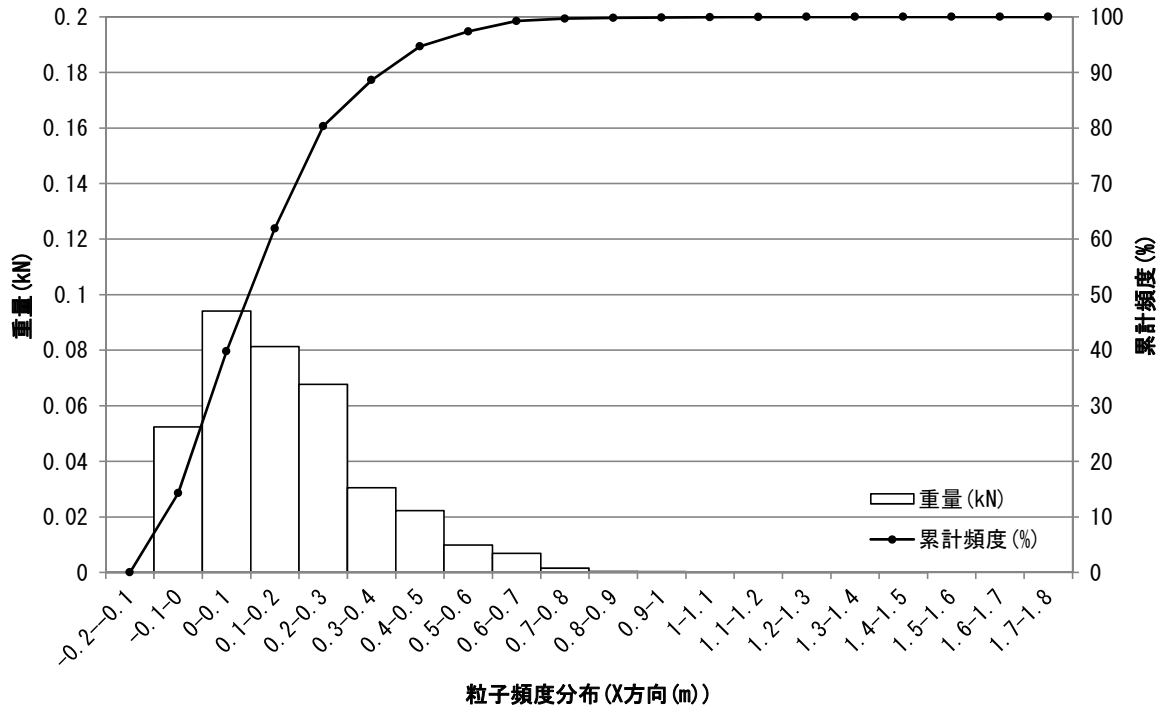


図 3.3.91 X 方向の粒子頻度分布

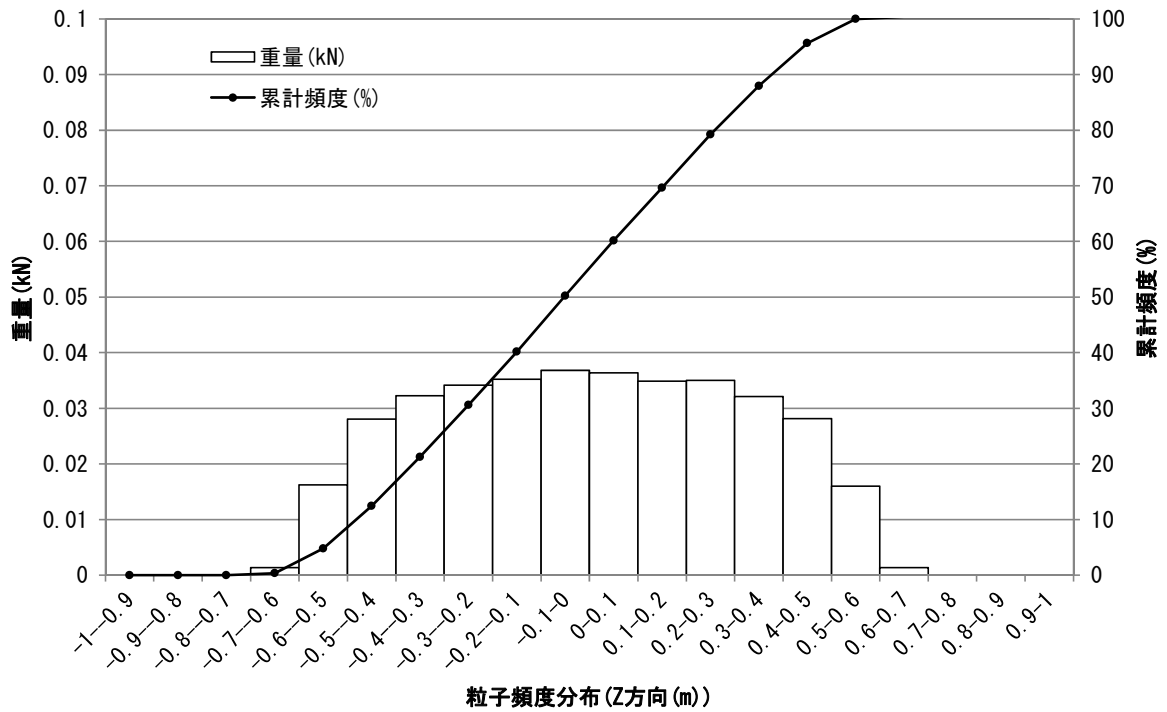


図 3.3.92 Z 方向の粒子頻度分布

③ケース5 砕石粒子群B

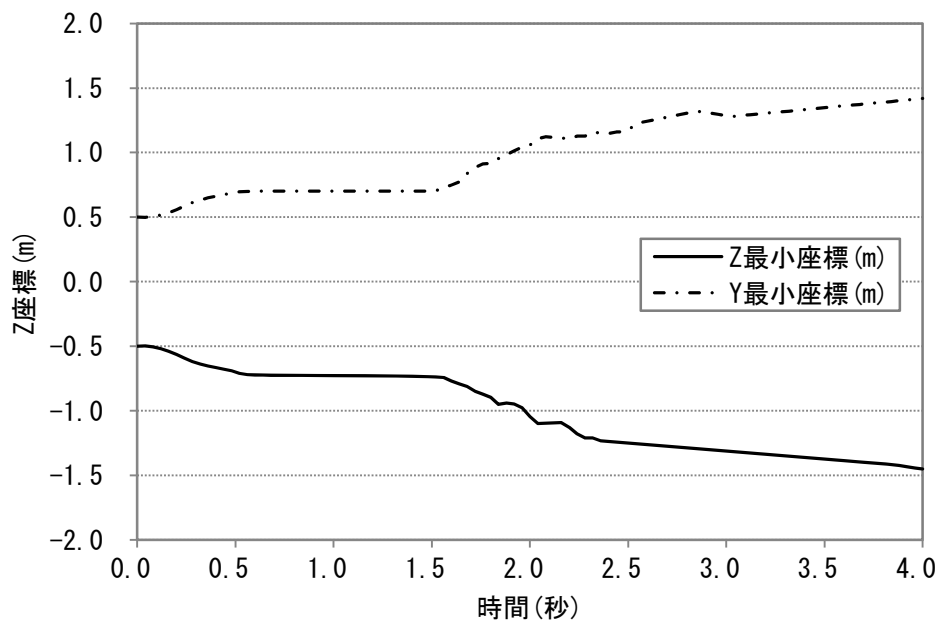


図 3.3.93 斜面台奥行方向 (Z 座標) の最大、最小座標の時刻歴

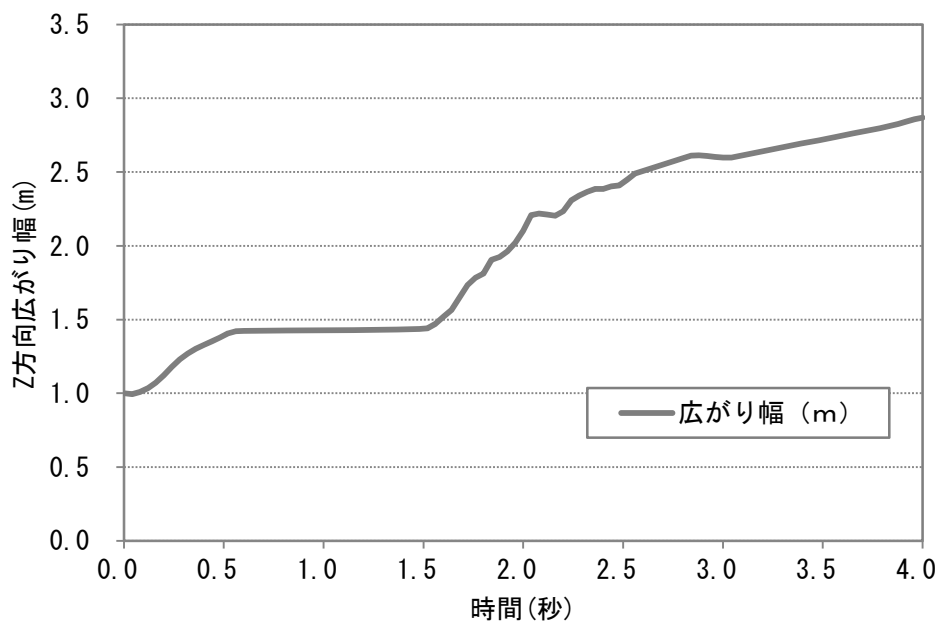


図 3.3.94 広がり幅 (Z 方向) の時刻歴

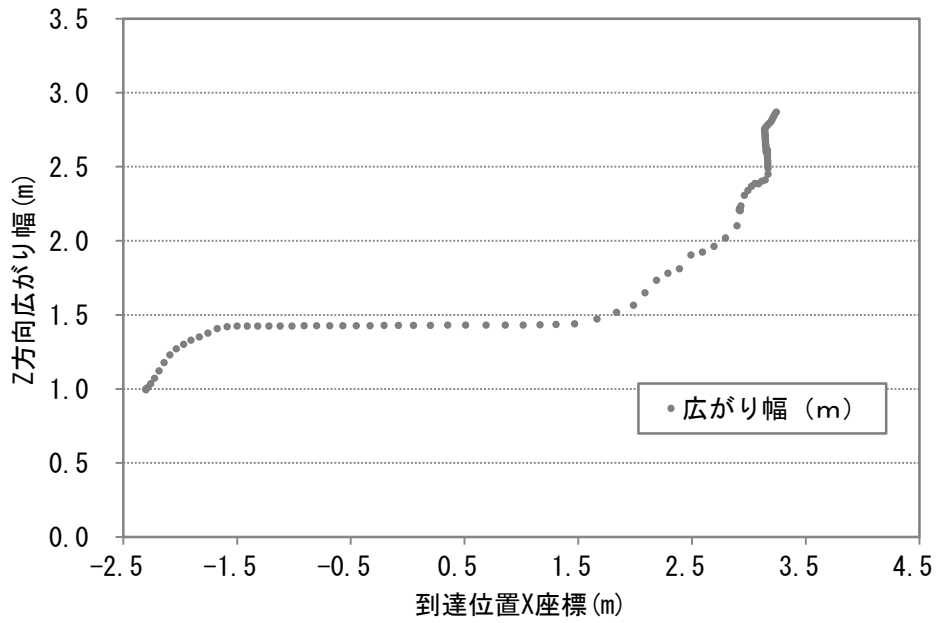


図 3.3.95 碎石群到達位置 (X 方向) と広がり幅 (Z 方向) との関係

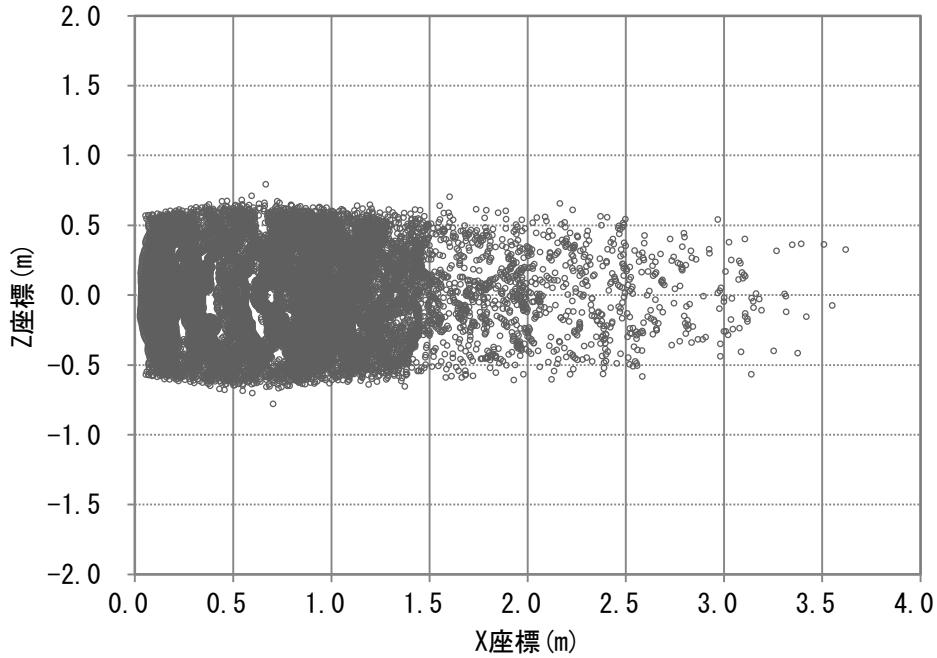


図 3.3.96 最終ステップにおける粒子の分布 (X-Z 面)

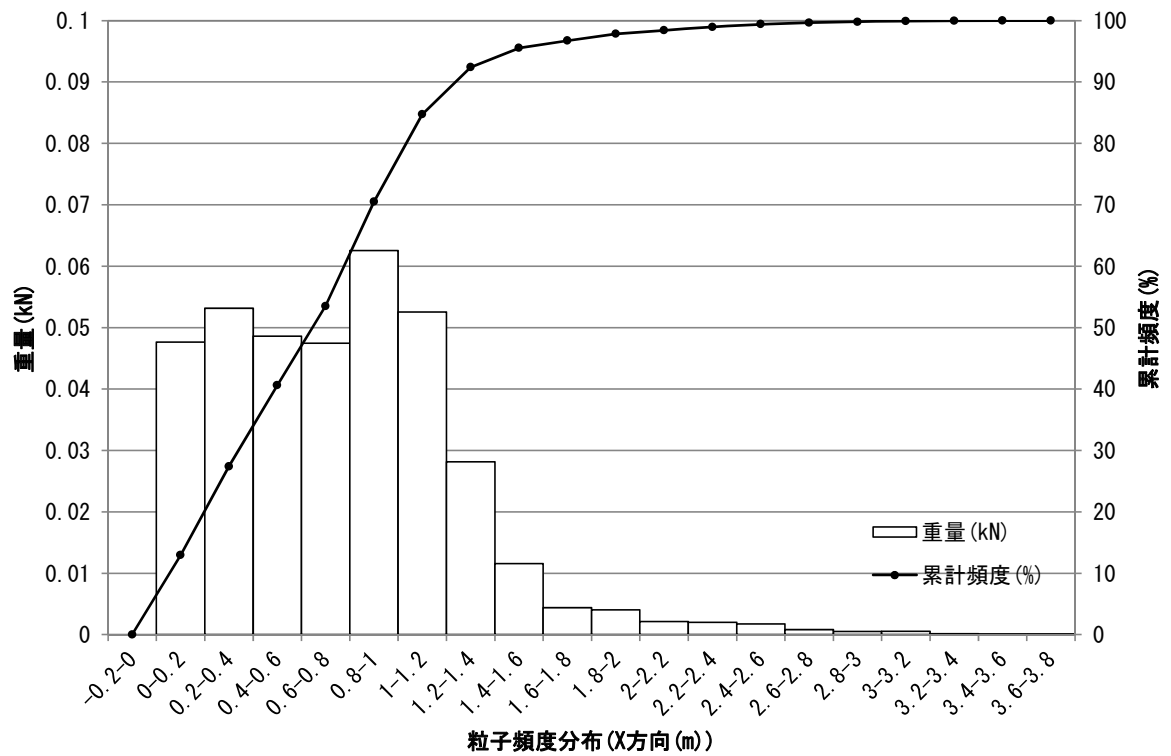


図 3.3.97 X 方向の粒子頻度分布

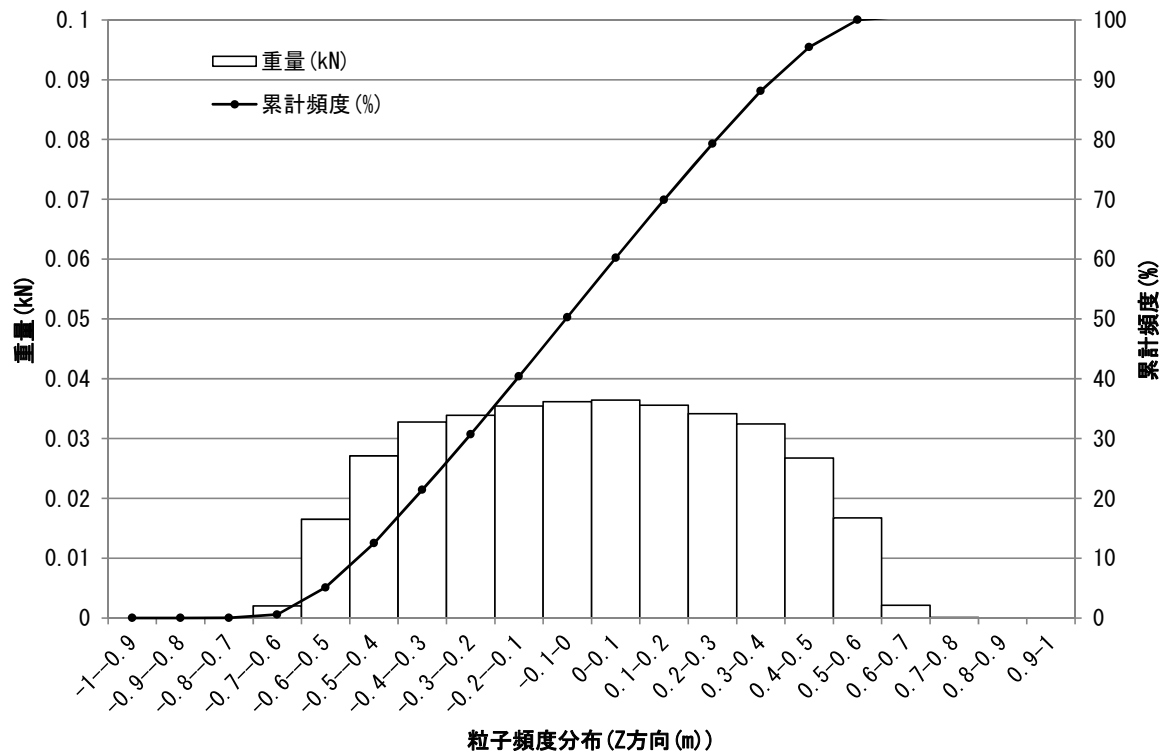


図 3.3.98 Z 方向の粒子頻度分布

④ケース6 砕石粒子群B

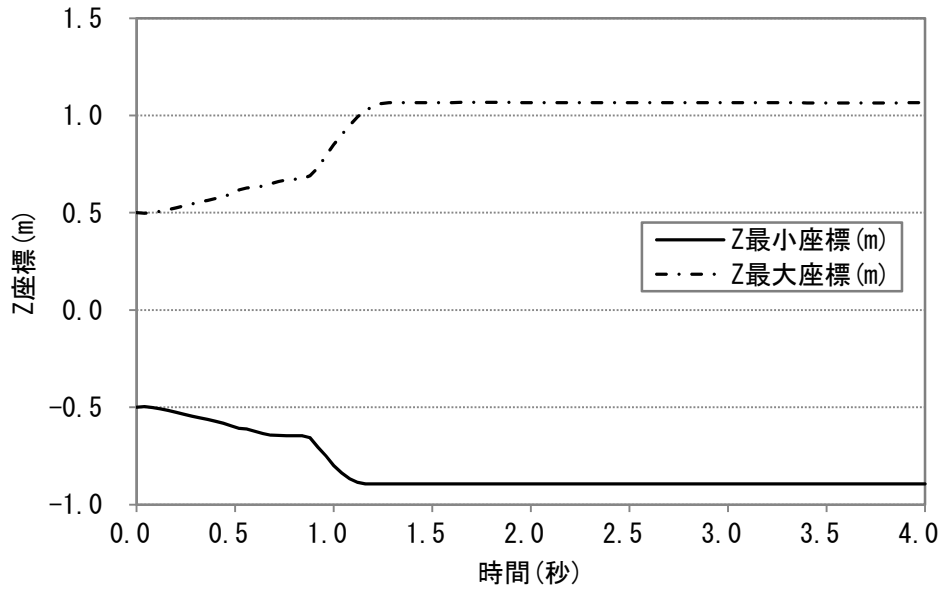


図 3. 3. 99 斜面台奥行方向 (Z 座標) の最大、最小座標の時刻歴

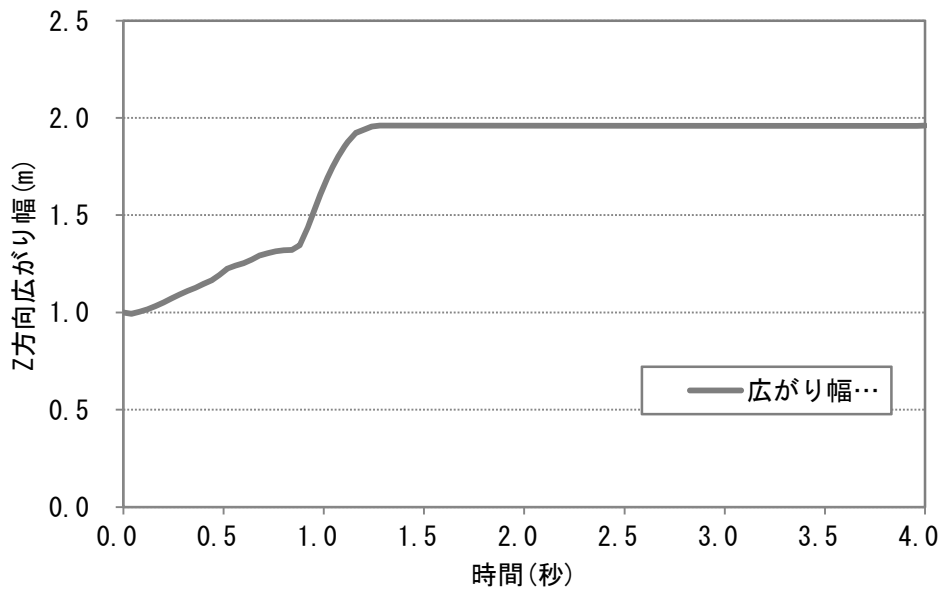


図 3. 3. 100 広がり幅 (Z 方向) の時刻歴

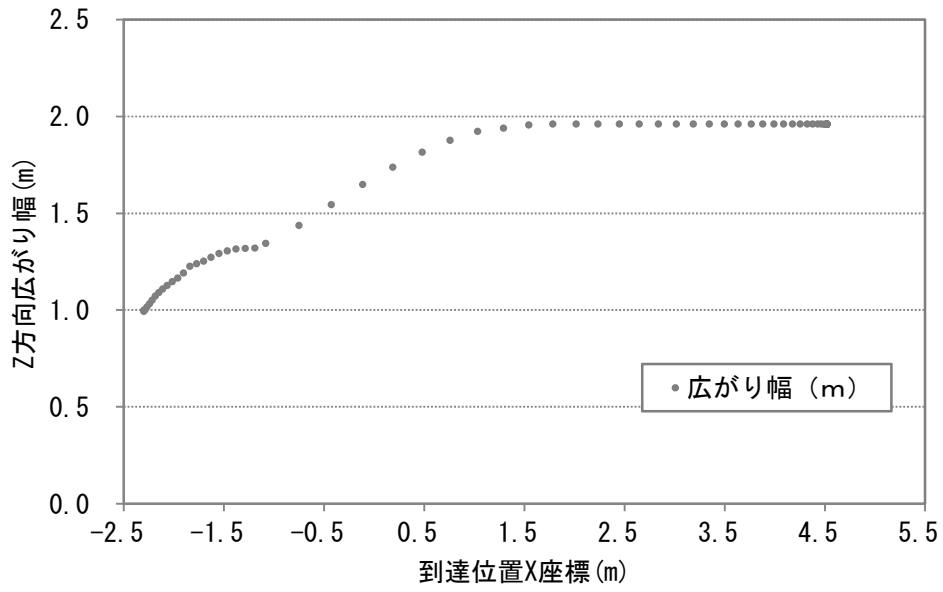


図 3. 3. 101 碎石群到達位置 (X 方向) と広がり幅 (Z 方向) との関係

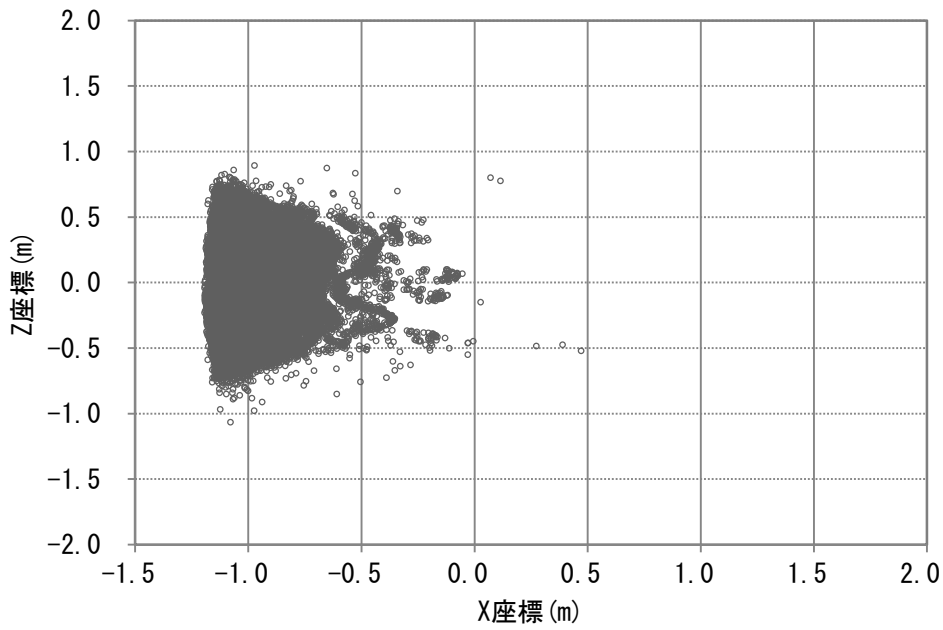


図 3. 3. 102 最終ステップにおける粒子の分布 (X-Z 面)

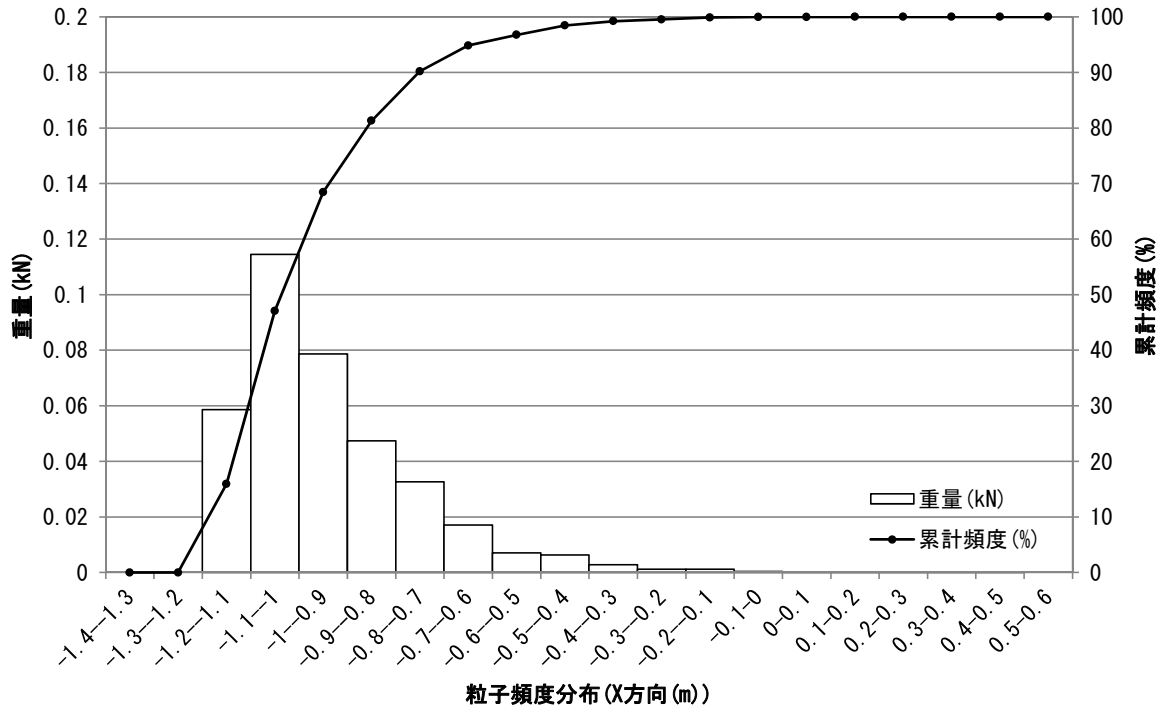


図 3.3.103 X 方向の粒子頻度分布

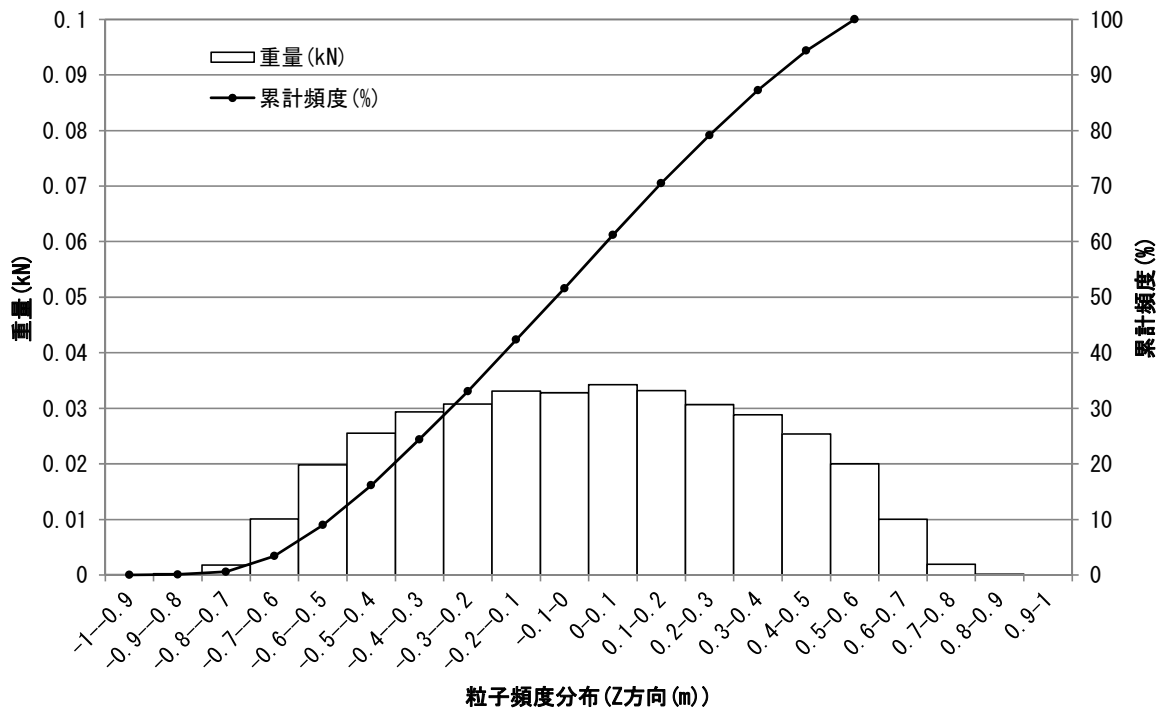


図 3.3.104 Z 方向の粒子頻度分布

(4) 到達距離の時刻歴 (碎石単体試験、碎石粒子群試験)

① ケース 1 碎石単体粒子 A

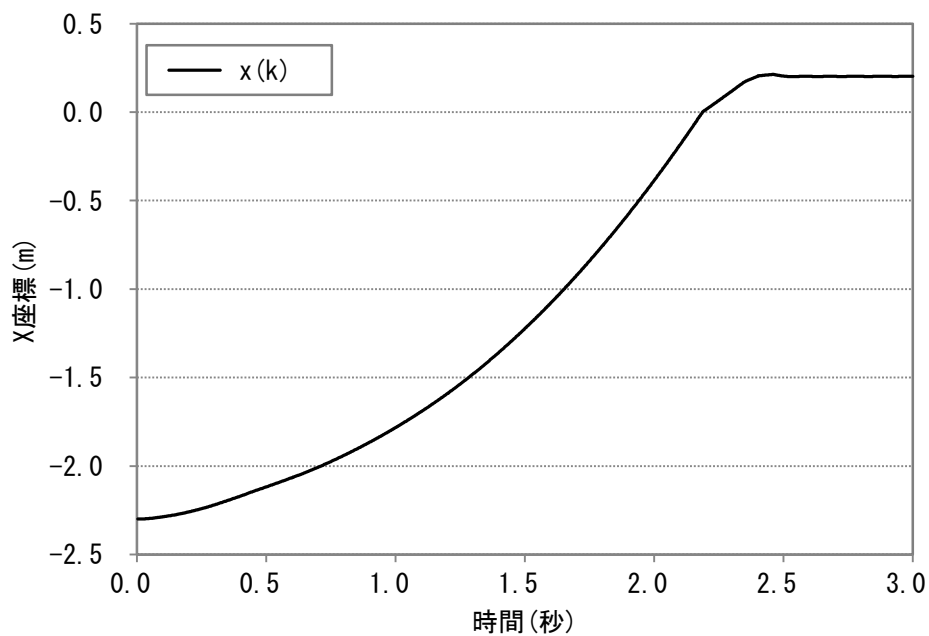


図 3. 3. 105 X 方向時刻歴

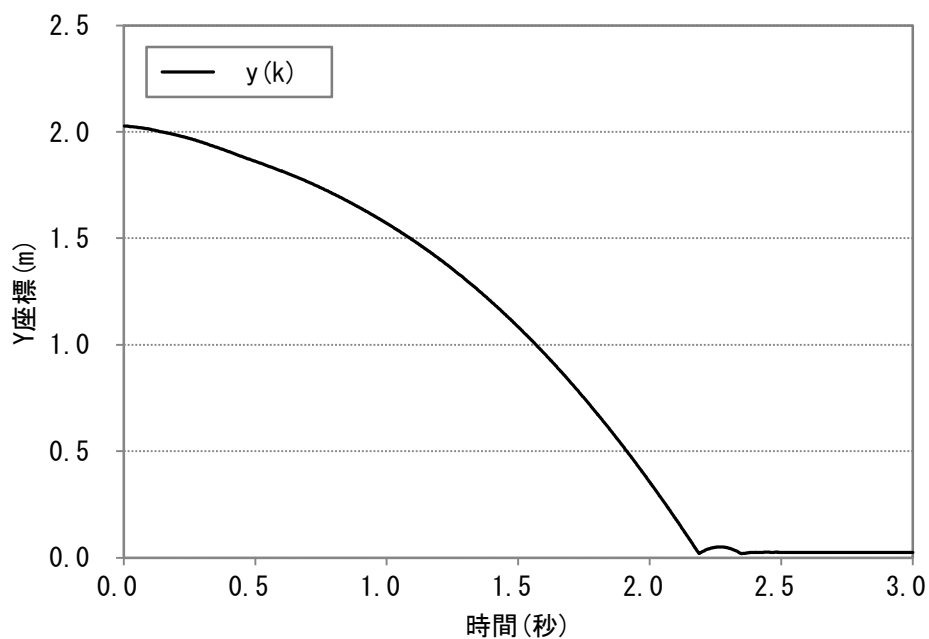


図 3. 3. 106 Y 方向時刻歴

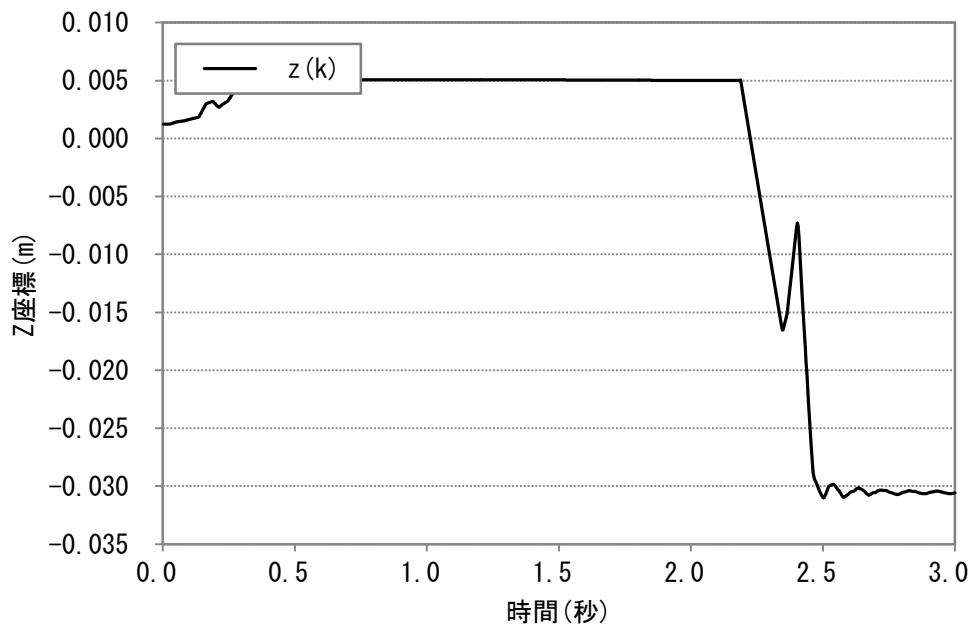


図 3. 3. 107 Z 方向時刻歴

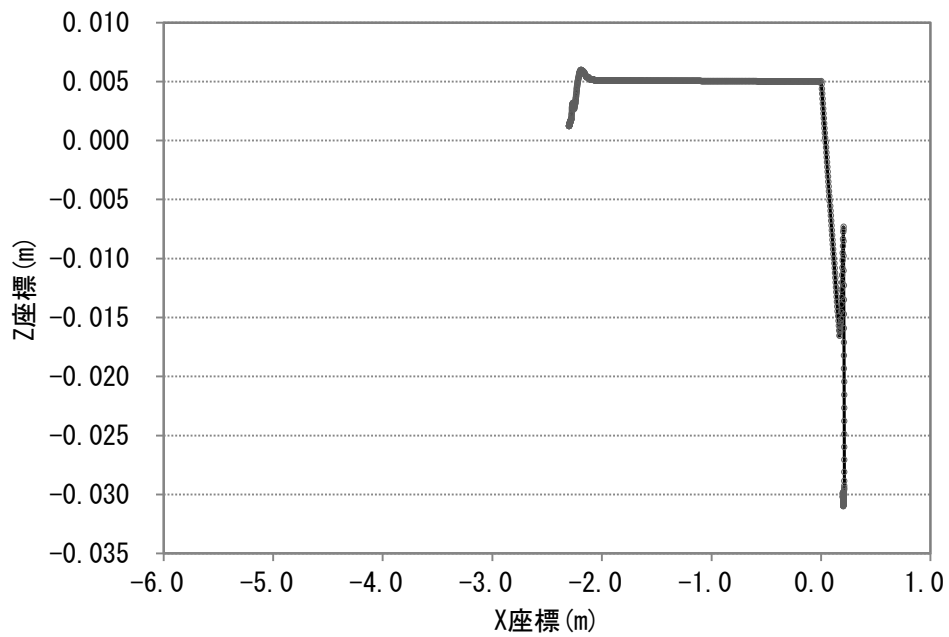


図 3. 3. 108 X-Z 面における碎石の軌道

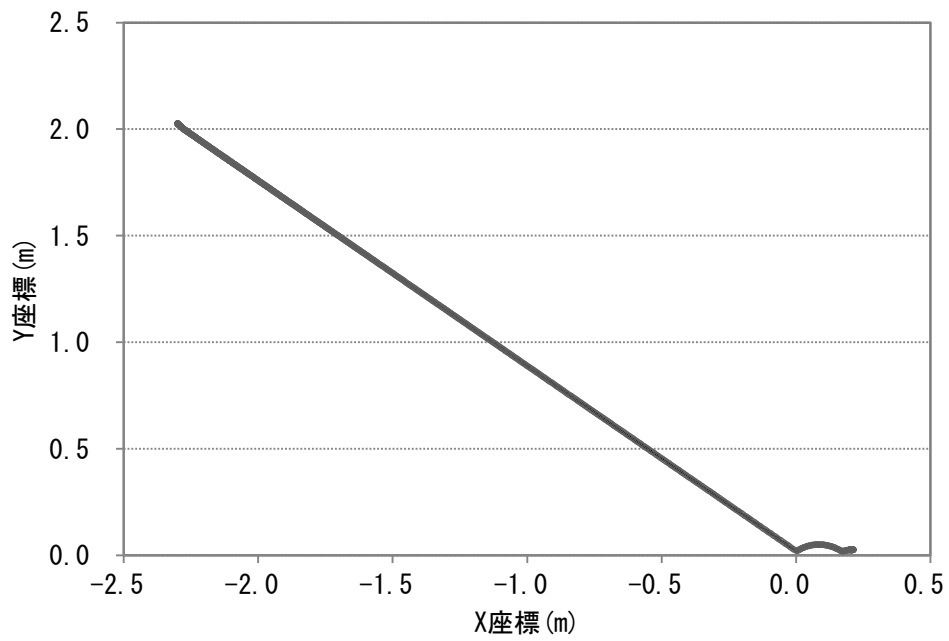


図 3. 3. 109 X-Y 面における碎石の軌道

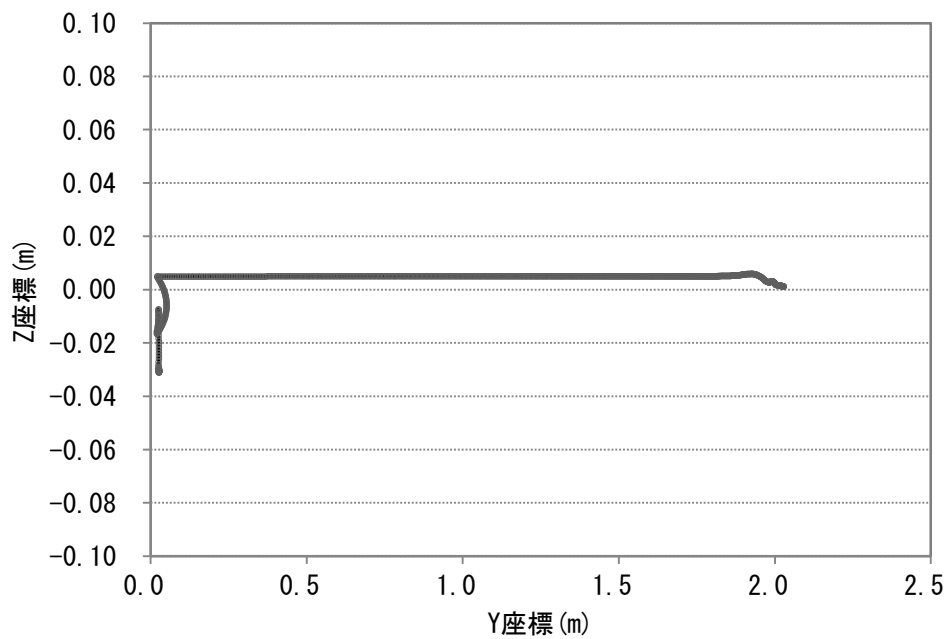


図 3. 3. 110 Y-Z 面における碎石の軌道

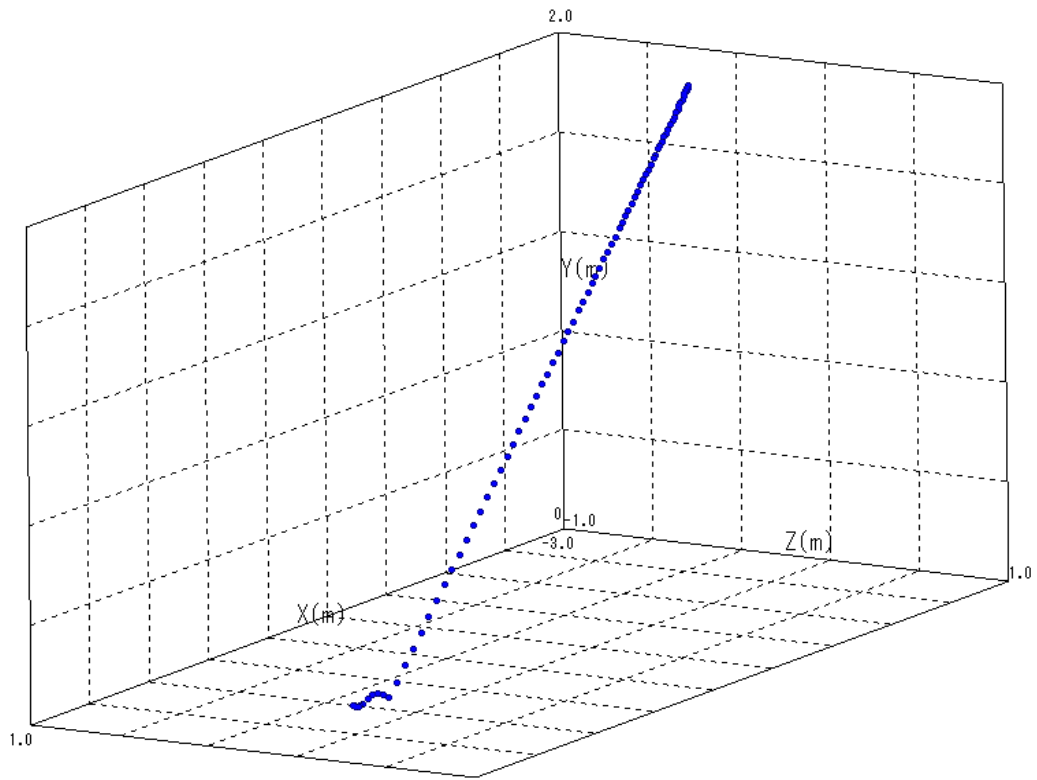


図 3. 3. 111 三次元空間における碎石の軌道

②ケース2 碎石単体粒子B

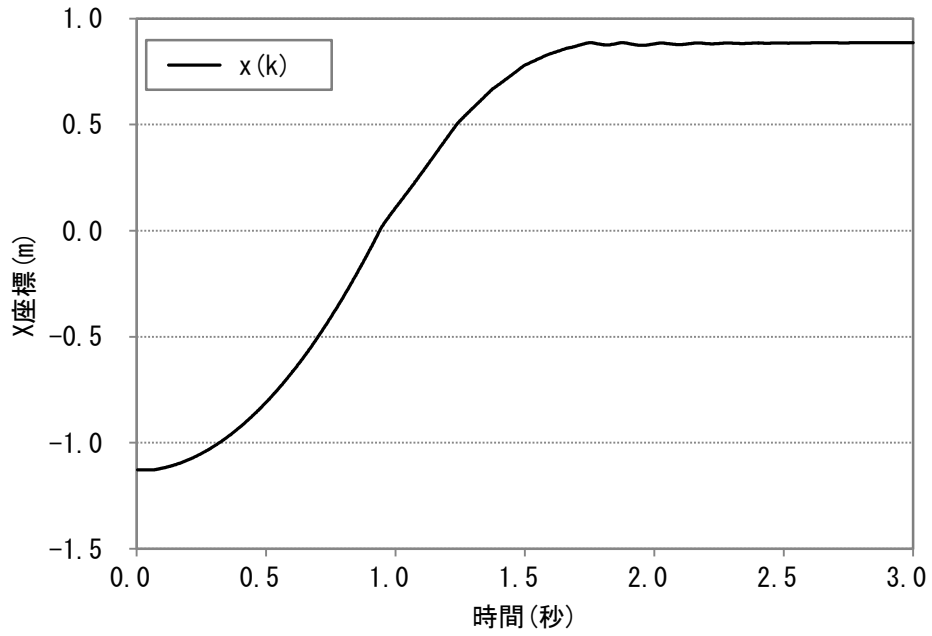


図 3. 3. 112 X 方向時刻歴

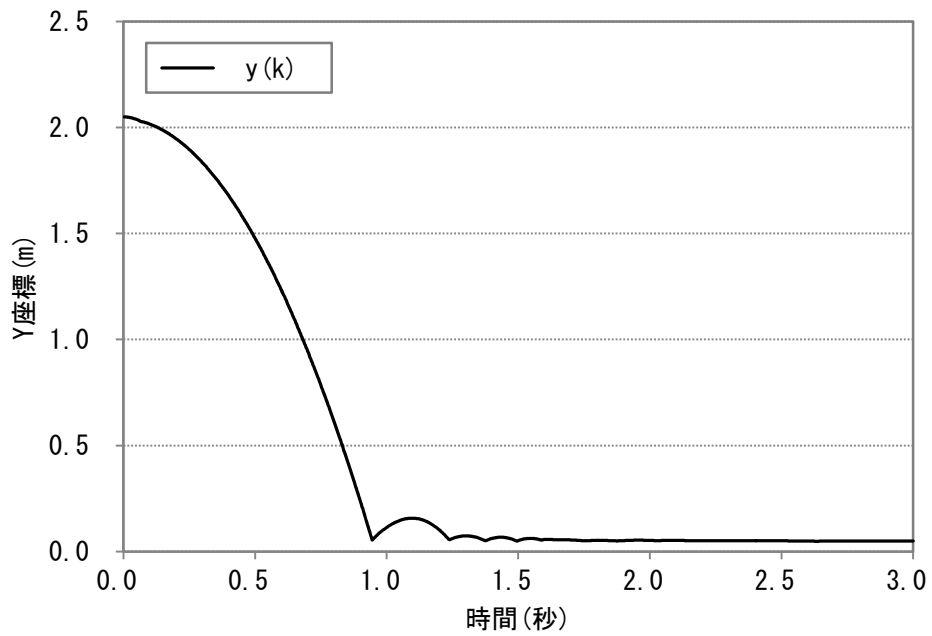


図 3. 3. 113 Y 方向時刻歴

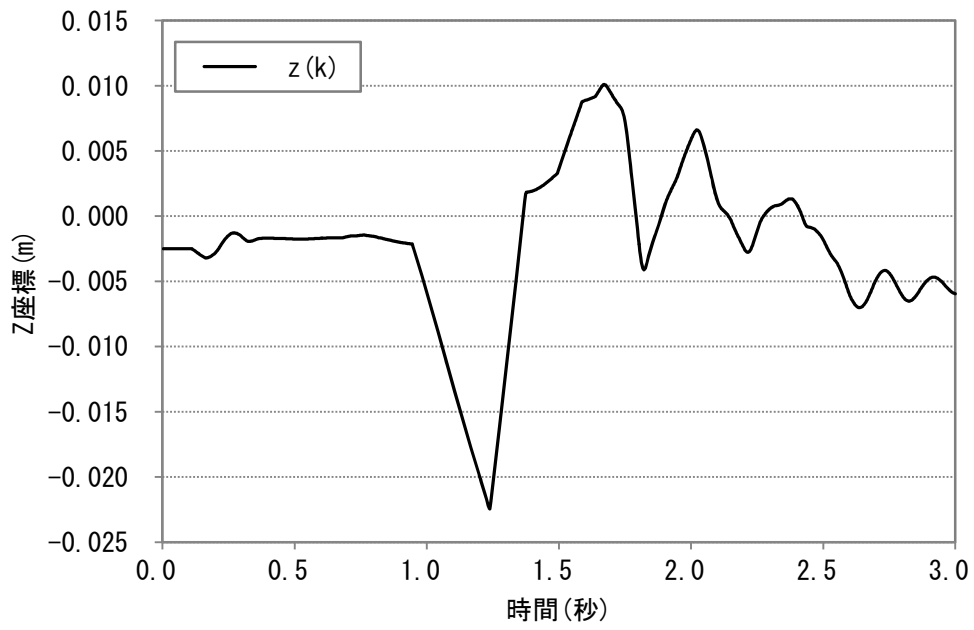


図 3. 3. 114 Z 方向時刻歴

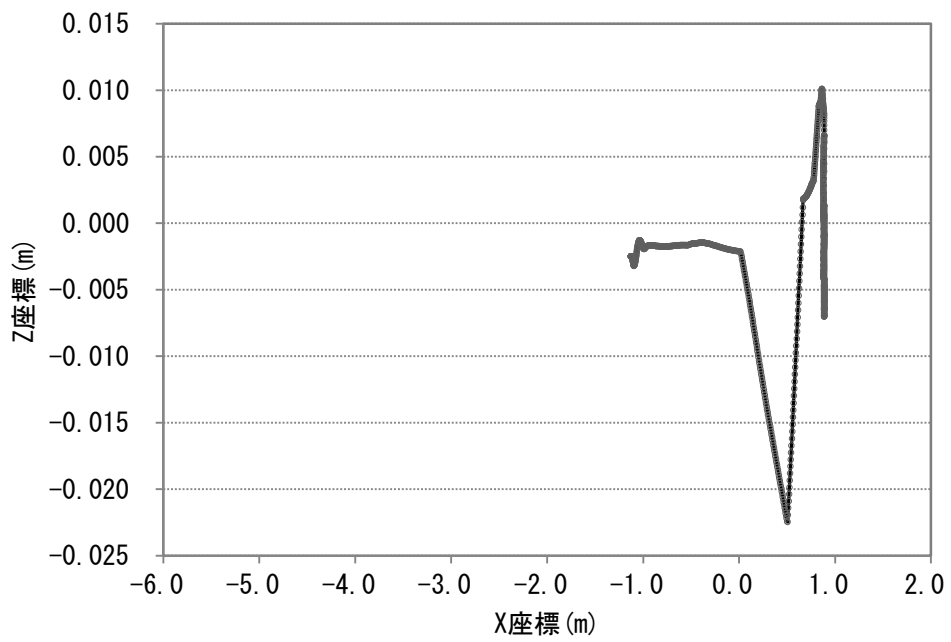


図 3. 3. 115 X-Z 面における碎石の軌道

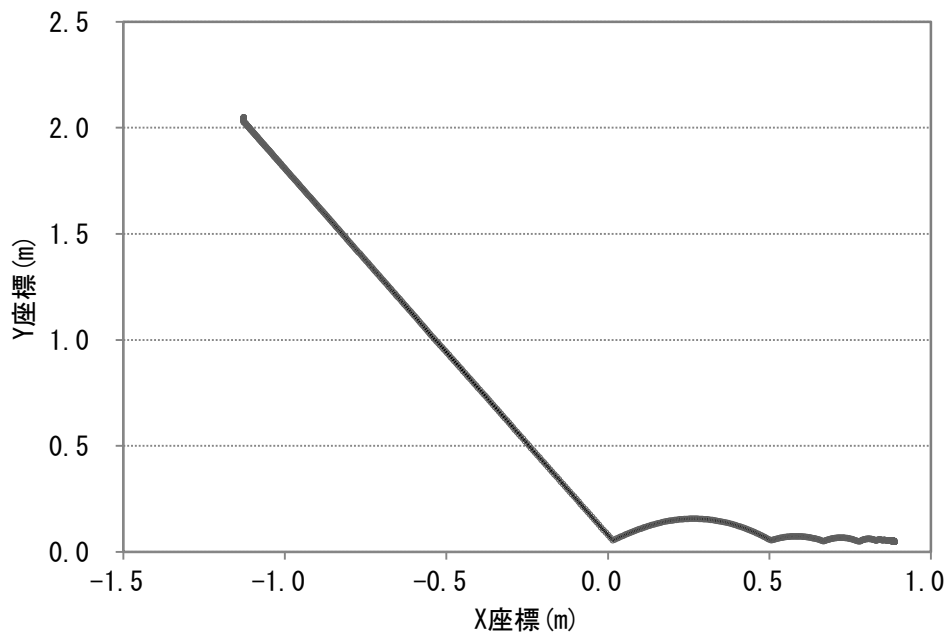


図 3. 3. 116 X-Y 面における碎石の軌道

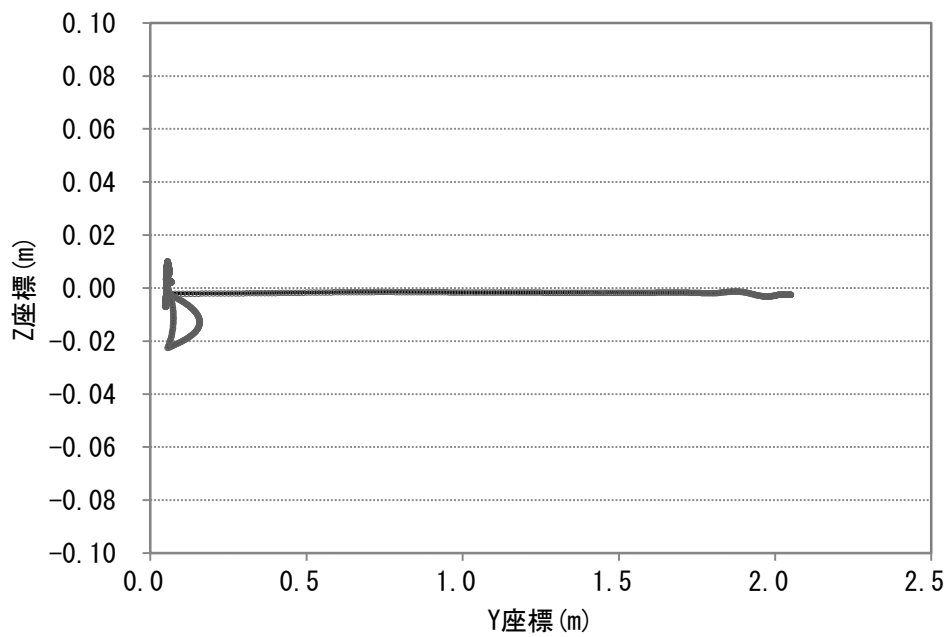


図 3. 3. 117 Y-Z 面における碎石の軌道

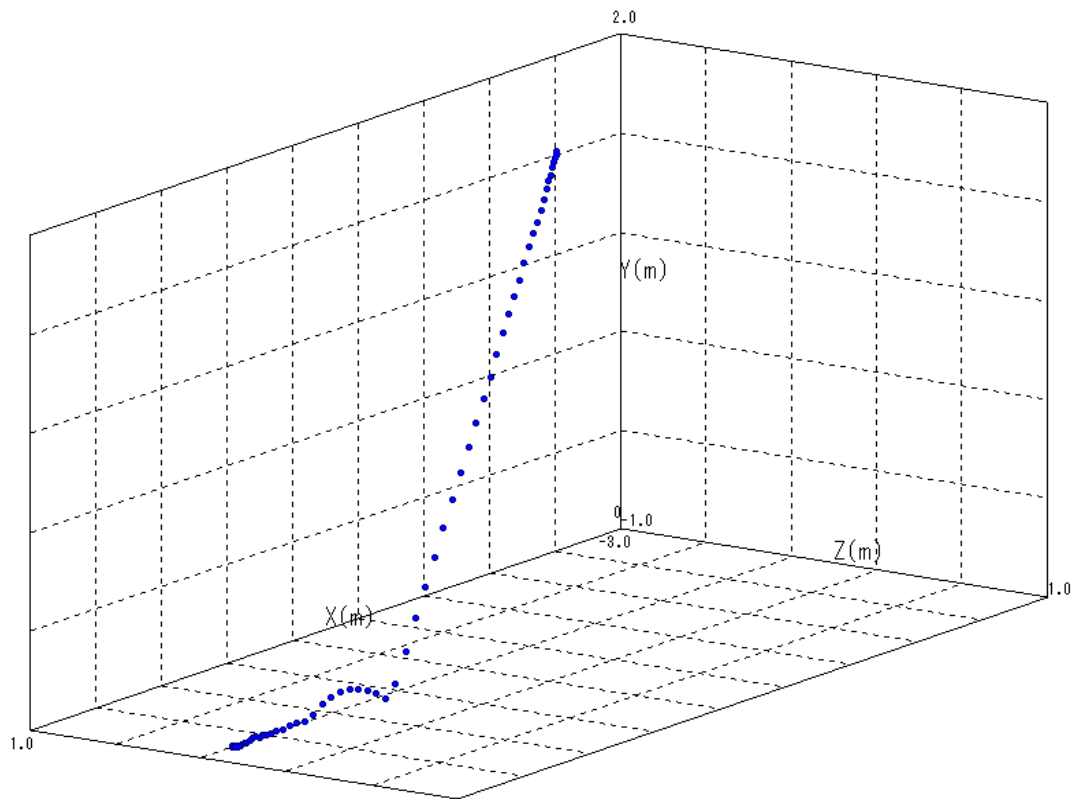


図 3. 3. 118 三次元空間における碎石の軌道

③ケース3 碎石粒子群A

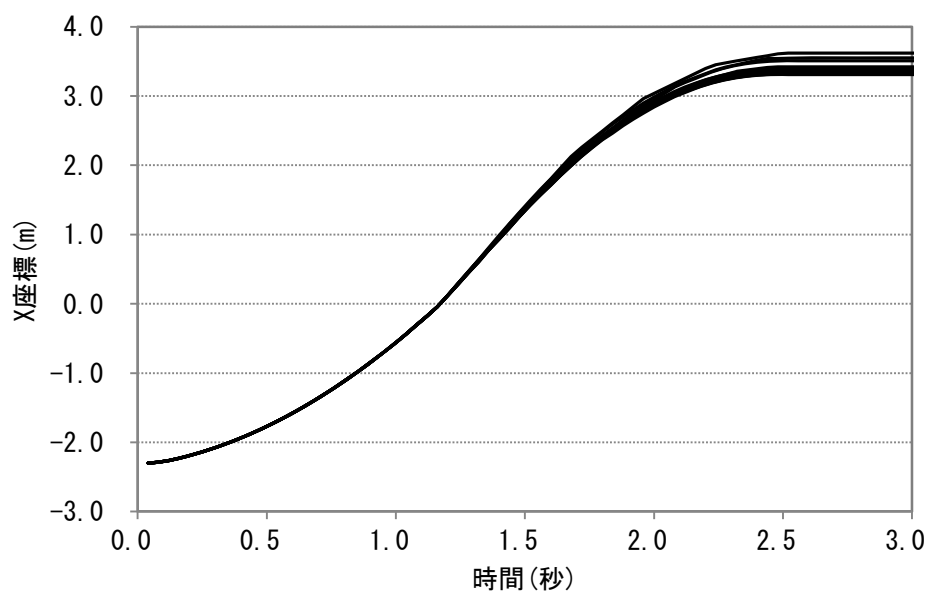


図 3. 3. 119 先頭 10 個の粒子の X 方向における到達位置時刻歴

④ケース4 碎石粒子群B

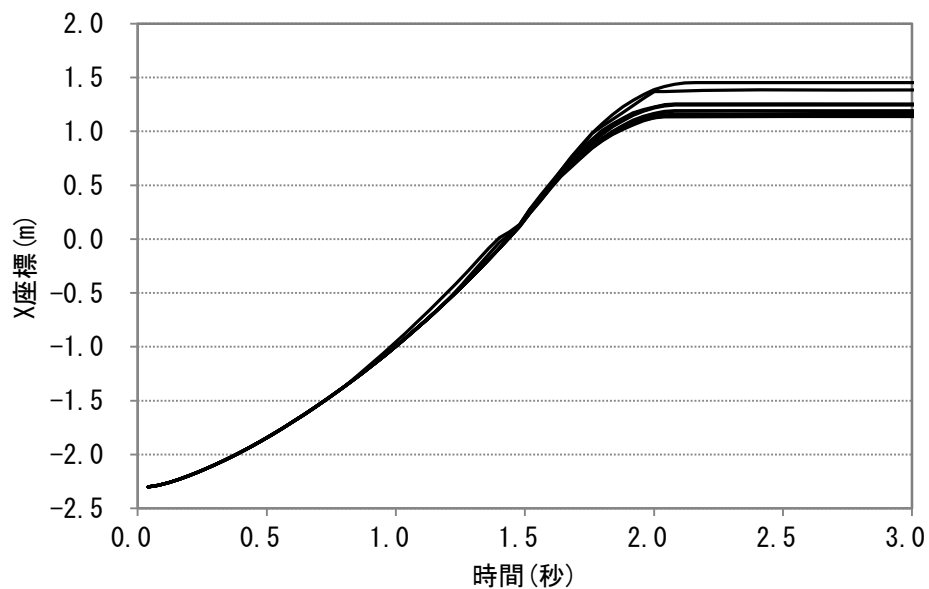


図 3. 3. 120 先頭 10 個の粒子の X 方向における到達位置時刻歴

⑤ ケース 5 碎石粒子群 B

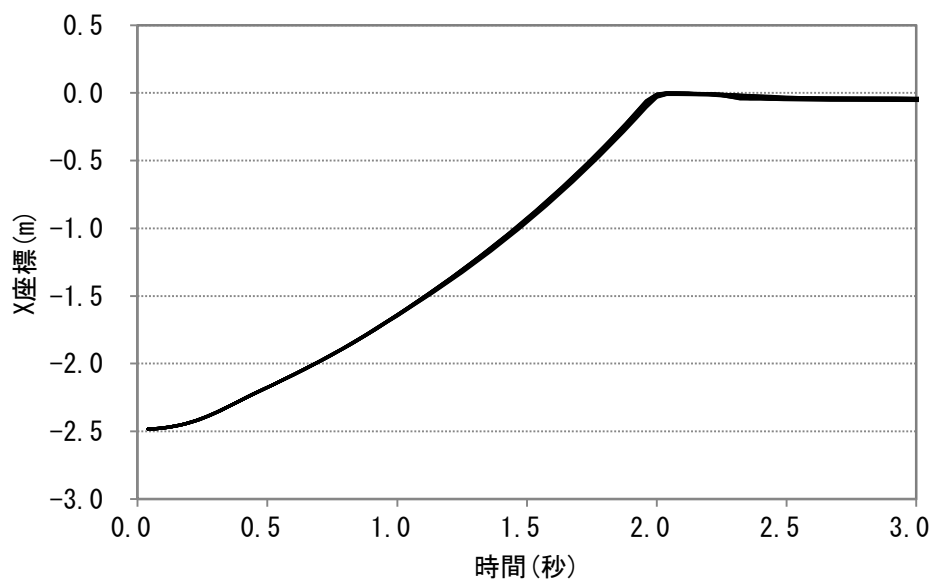


図 3. 3. 121 先頭 10 個の粒子の X 方向における到達位置時刻歴

⑥ ケース 6 碎石粒子群 B

最到達位置の粒子は他の粒子の挙動と異なるため、次点の粒子を最到達点として以降の速度時刻歴をまとめる。

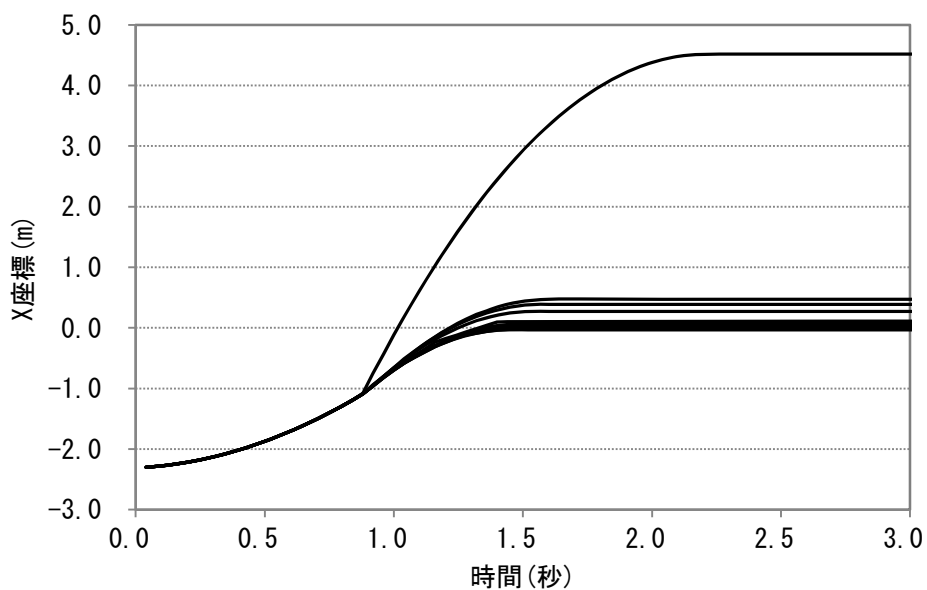


図 3. 3. 122 先頭 10 個の粒子の X 方向における到達位置時刻歴

(5) 速度の時刻歴 (碎石単体試験、碎石粒子群試験)

① ケース 1 碎石単体粒子 A

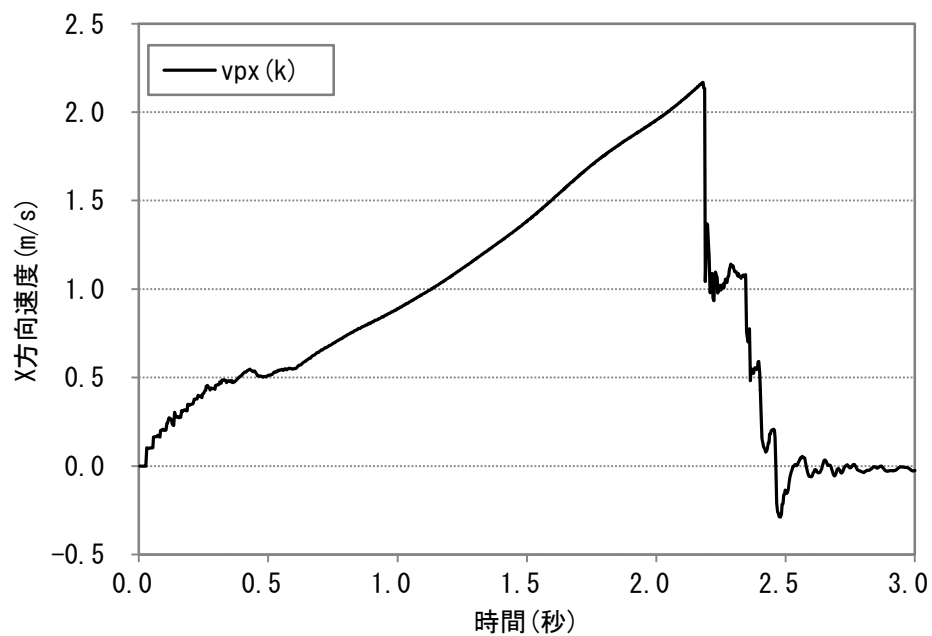


図 3. 3. 123 X 方向速度時刻歴

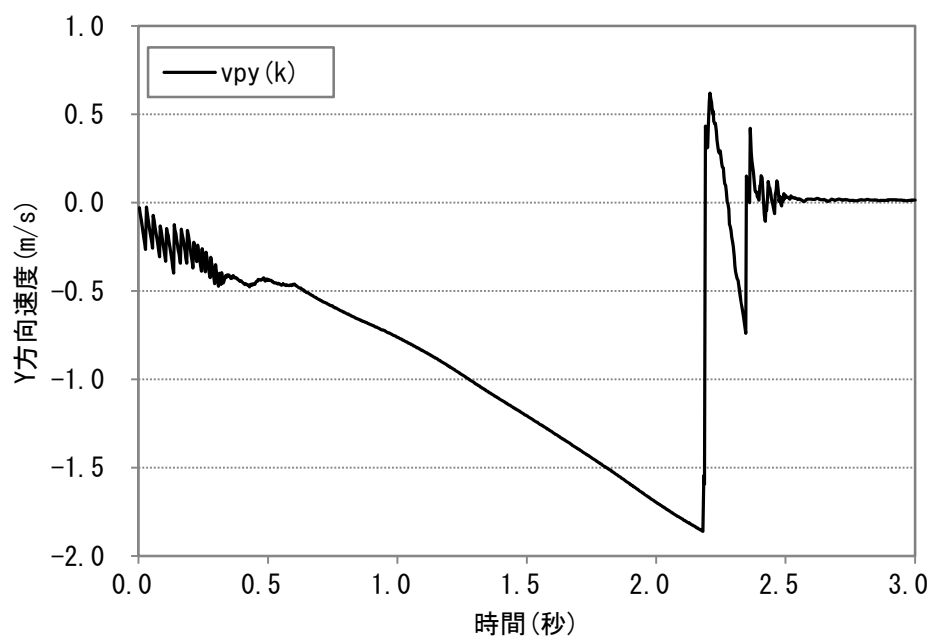


図 3. 3. 124 Y 方向速度時刻歴

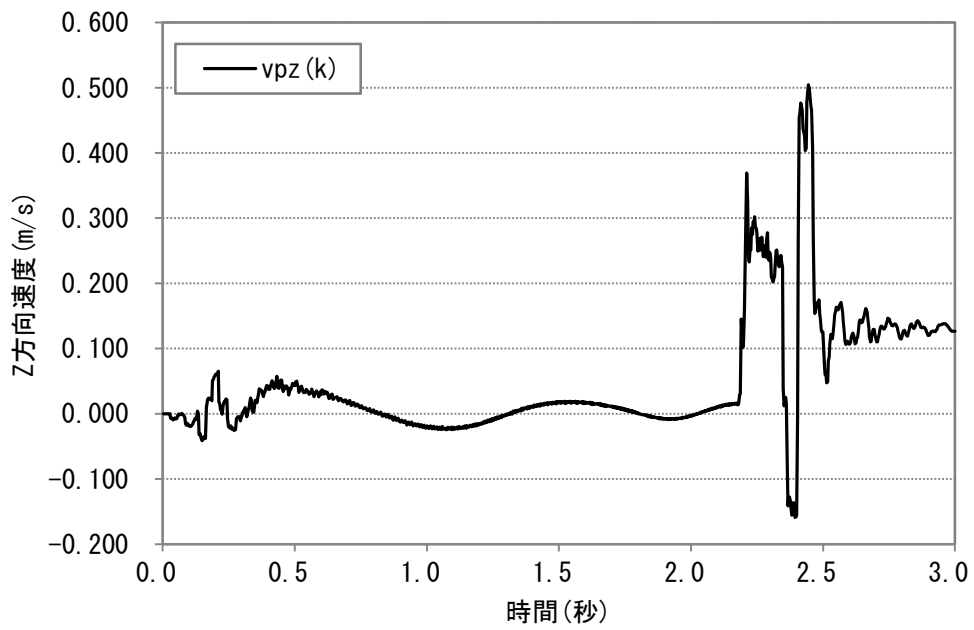


図 3. 3. 125 Z 方向速度時刻歴

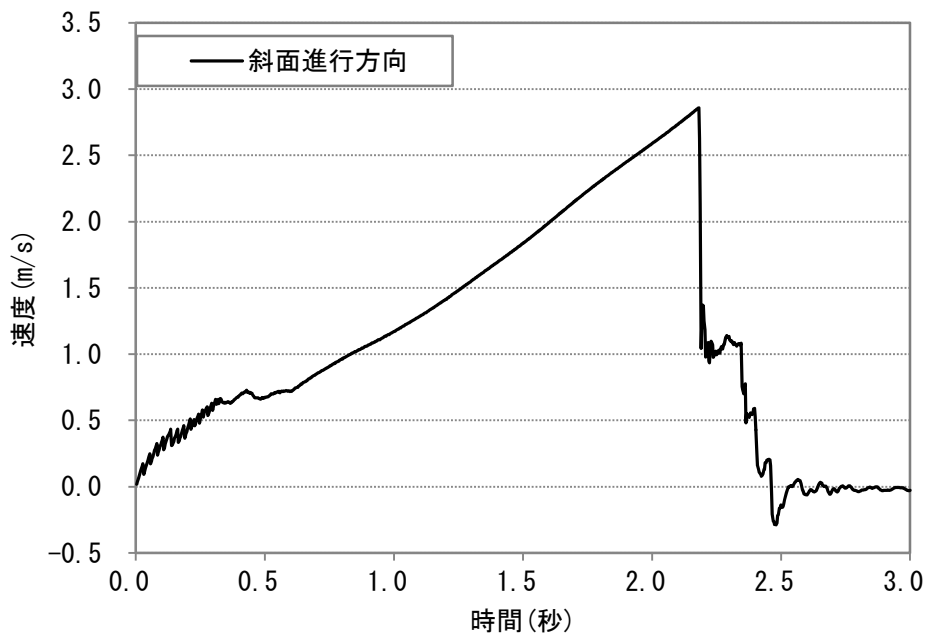


図 3. 3. 126 進行方向速度時刻歴

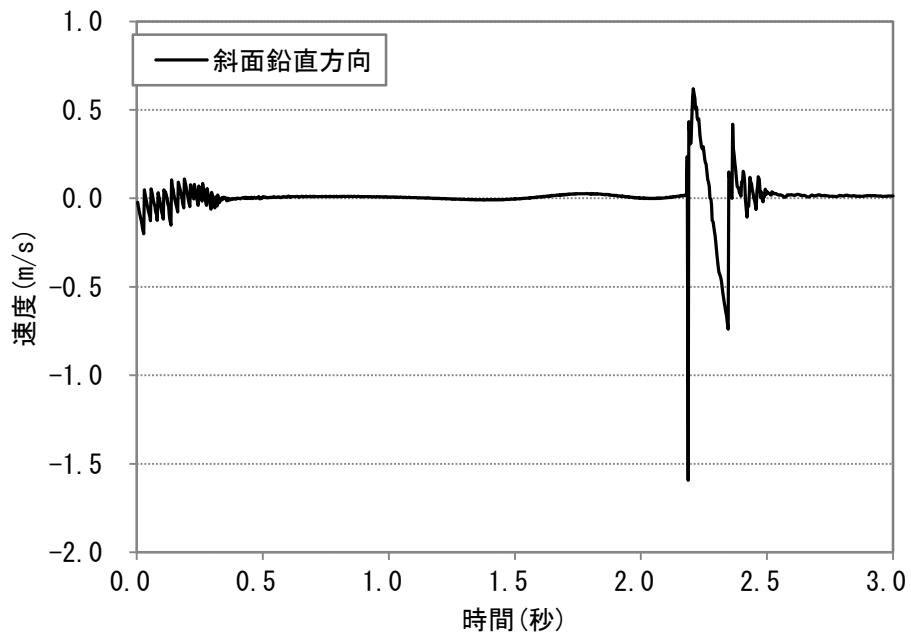


図 3. 3. 127 進行鉛直方向速度時刻歴

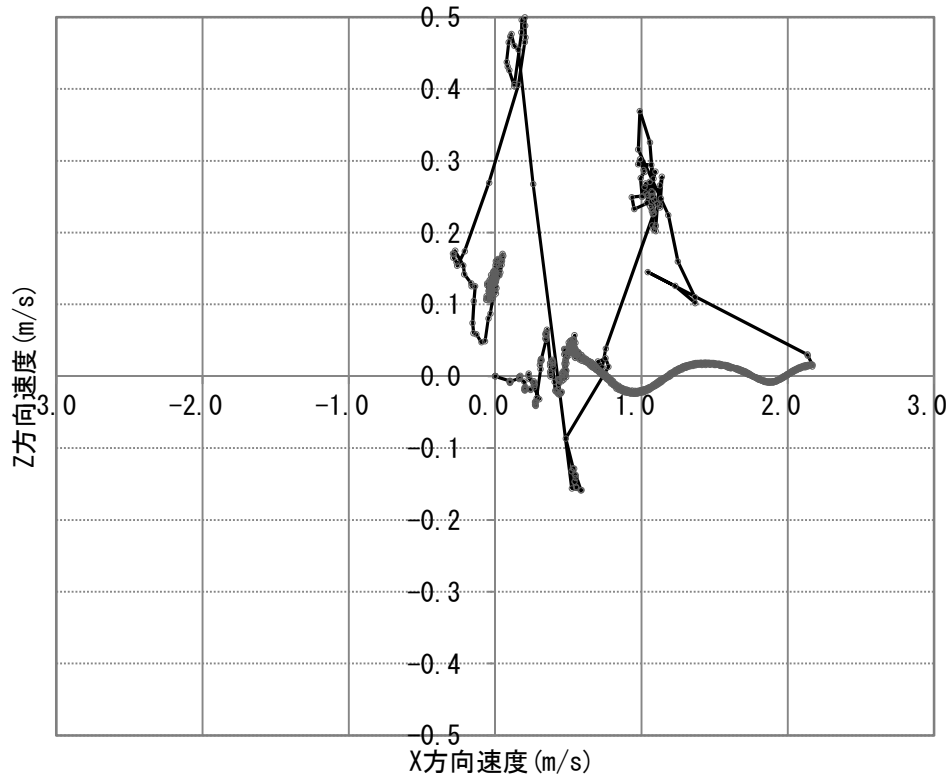


図 3. 3. 128 X-Z 面における速度履歴

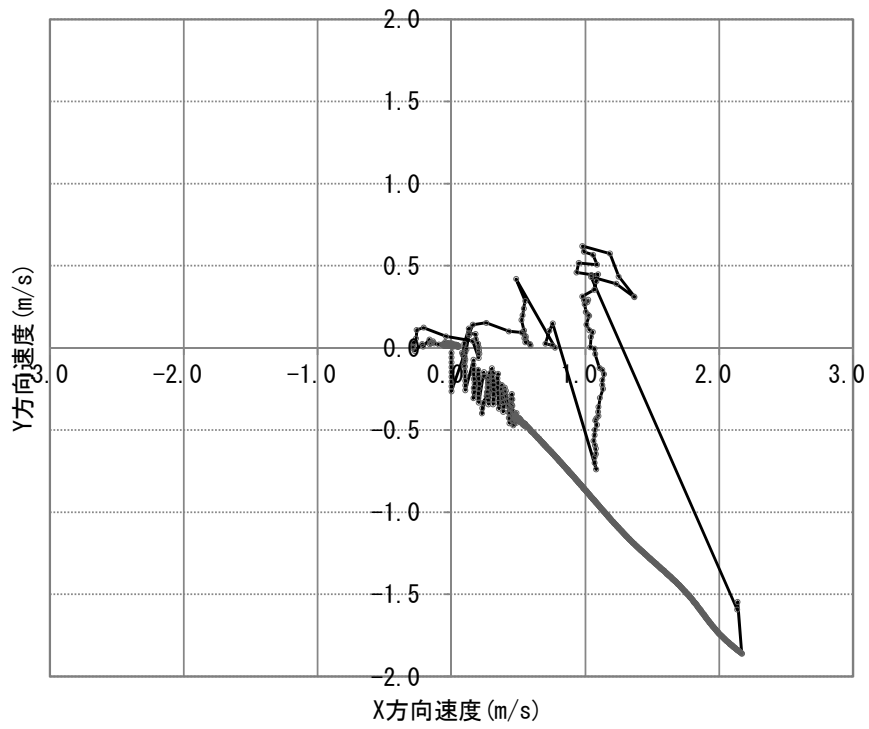


図 3.3.129 X-Y 面における速度履歴

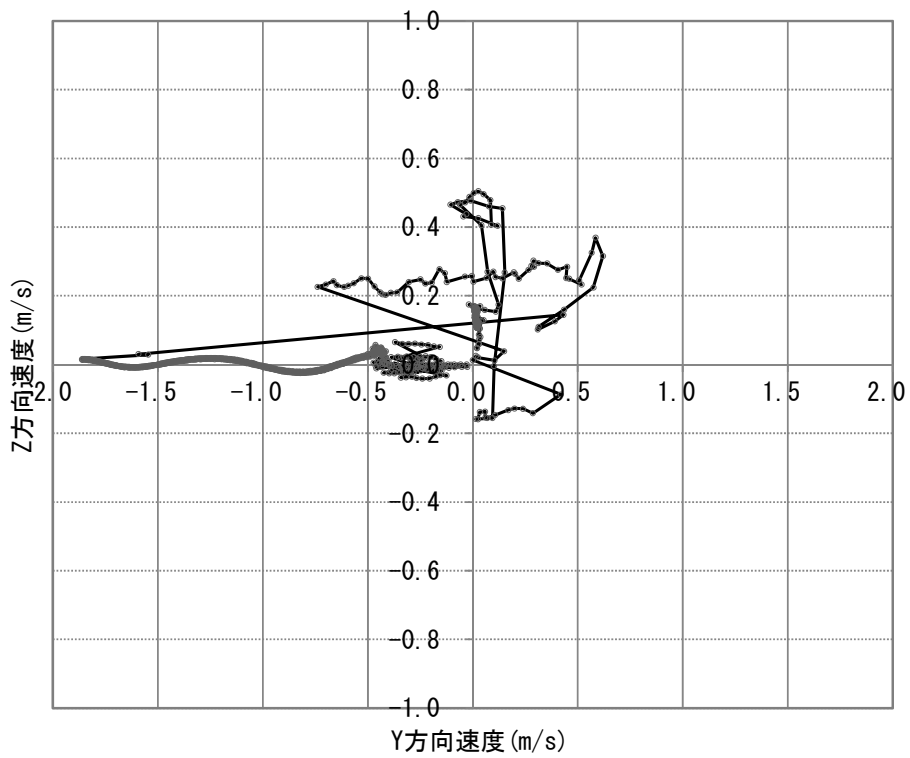


図 3.3.130 Y-Z 面における速度履歴

②ケース2 碎石単体粒子B

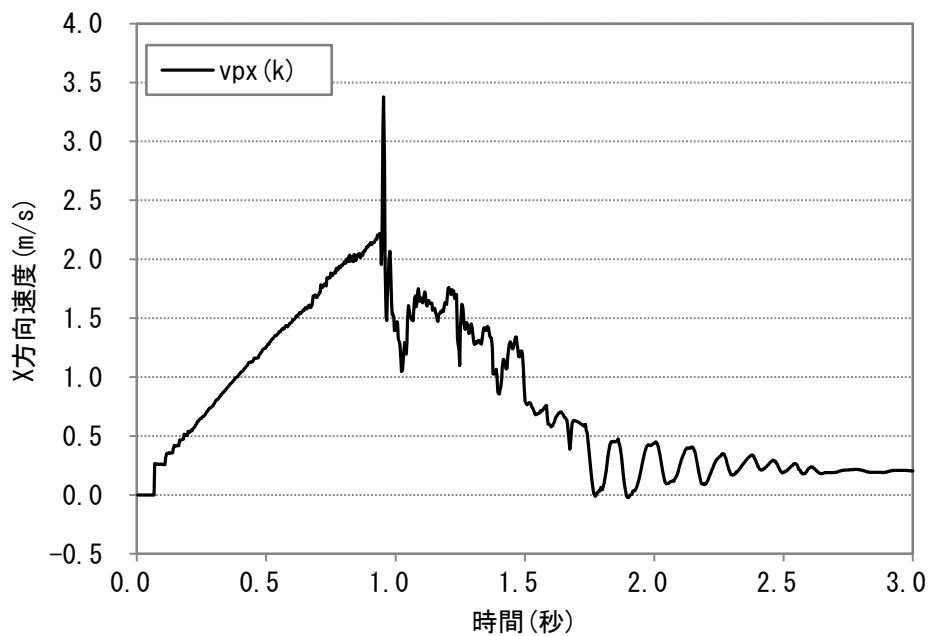


図 3. 3. 131 X 方向速度時刻歴

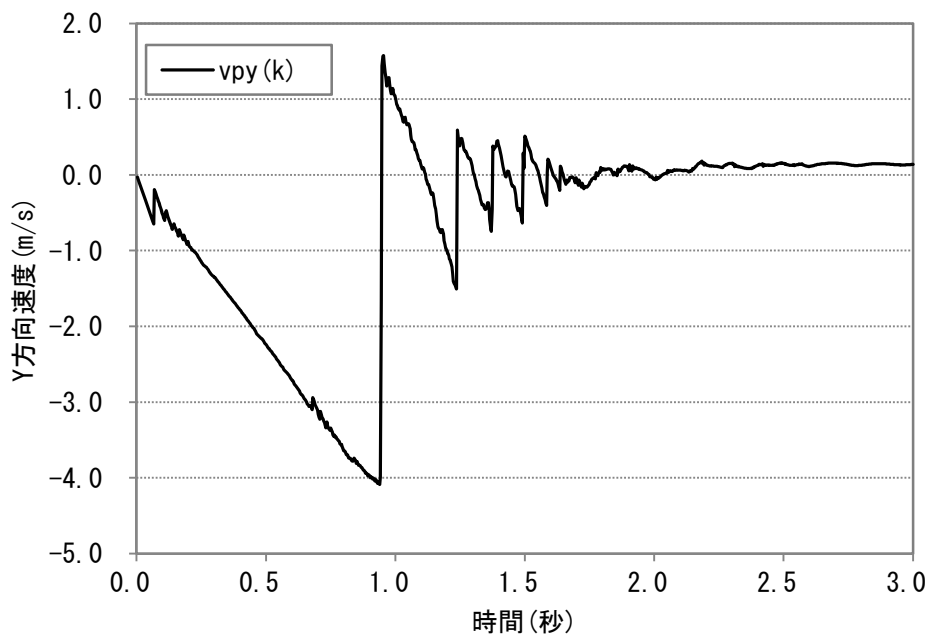


図 3. 3. 132 Y 方向速度時刻歴

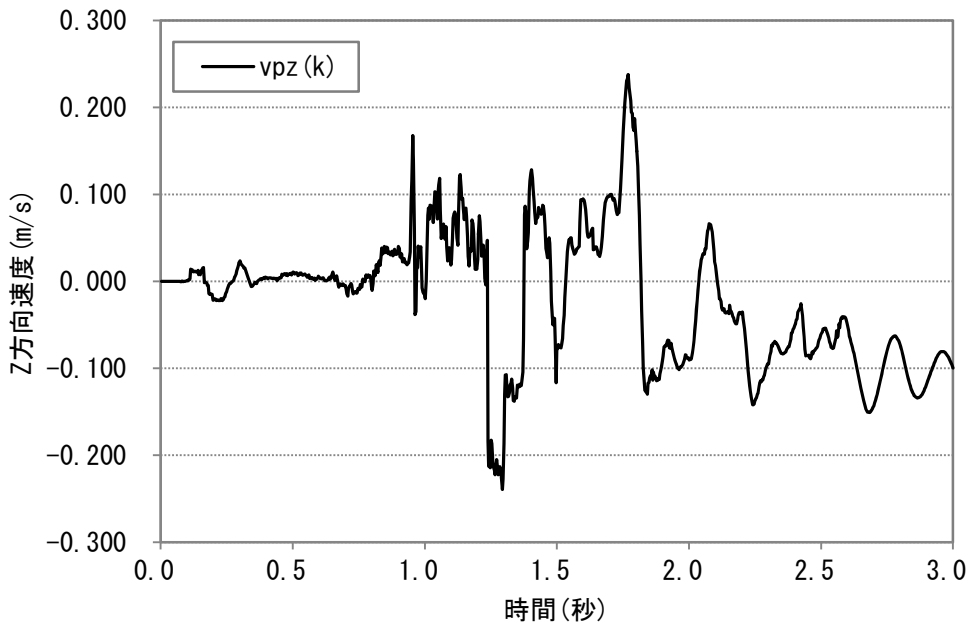


図 3.3.133 Z 方向速度時刻歴

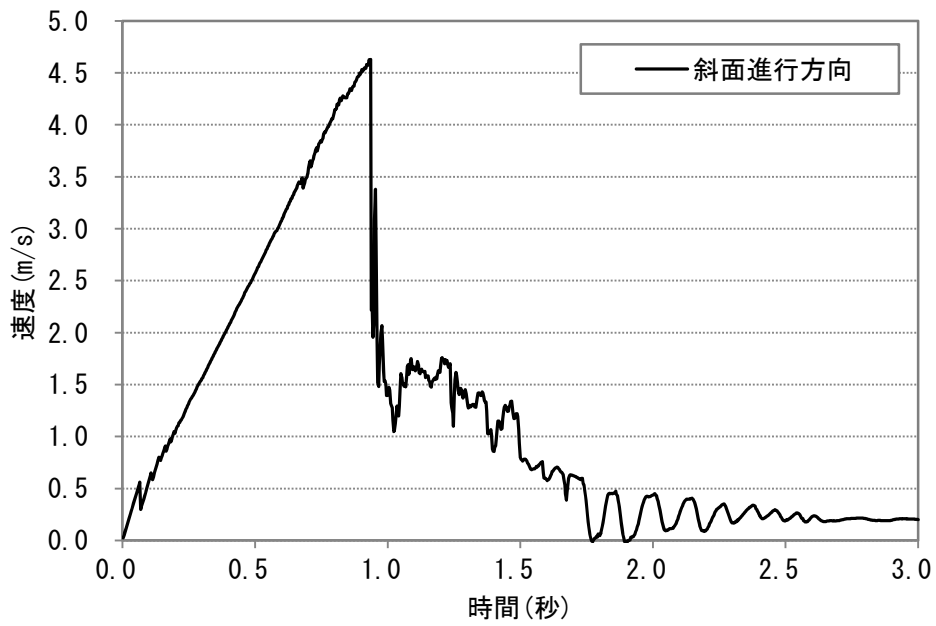


図 3.3.134 進行方向速度時刻歴

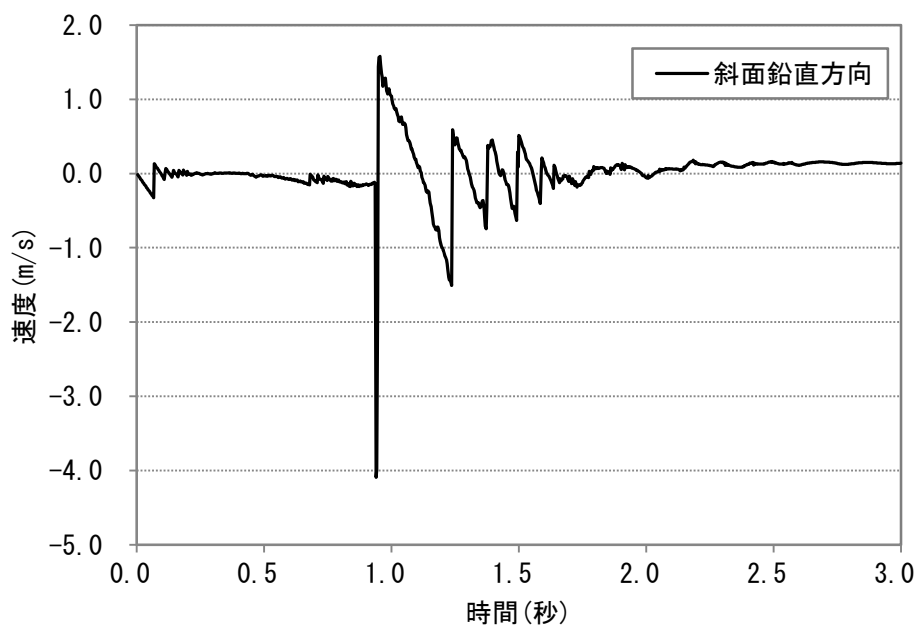


図 3. 3. 135 進行鉛直方向速度時刻歴

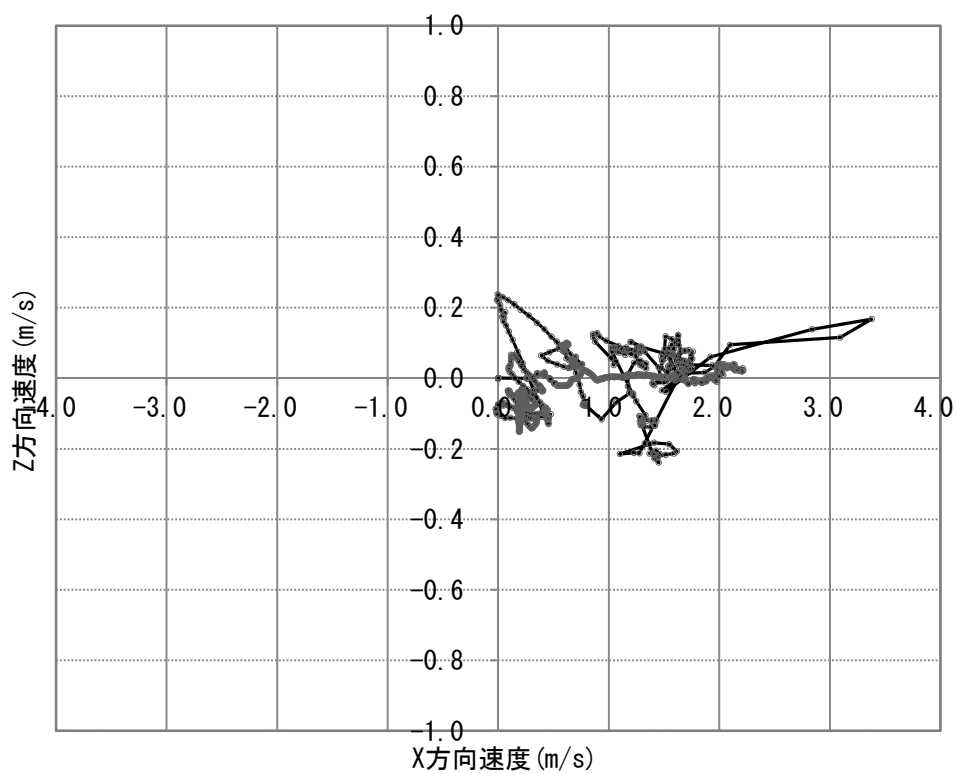


図 3. 3. 136 X-Z 面における速度履歴

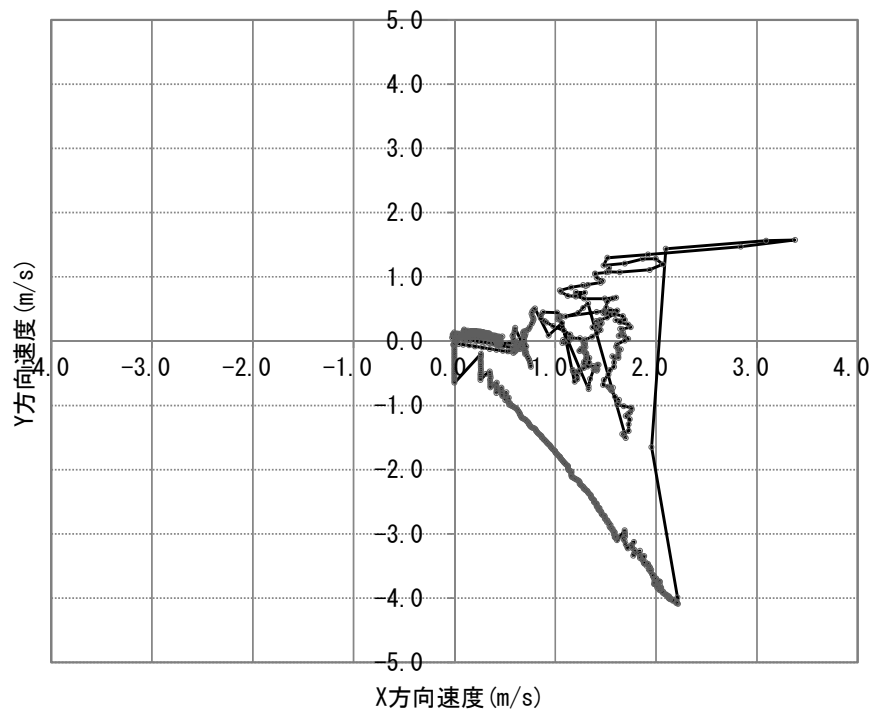


図 3. 3. 137 X-Y 面における速度履歴

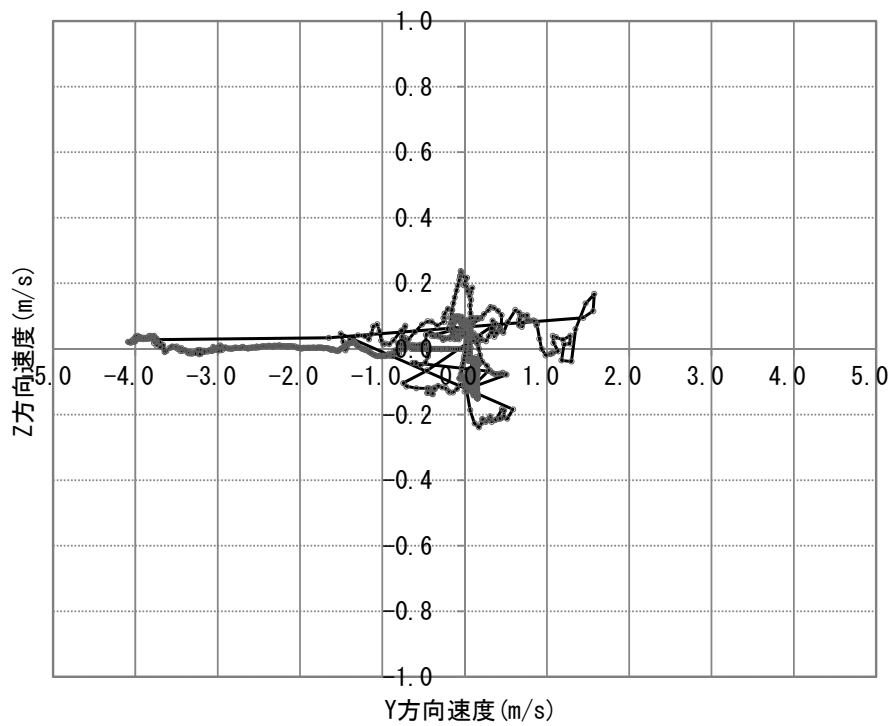


図 3. 3. 138 Y-Z 面における速度履歴

③ケース3 碎石粒子群A

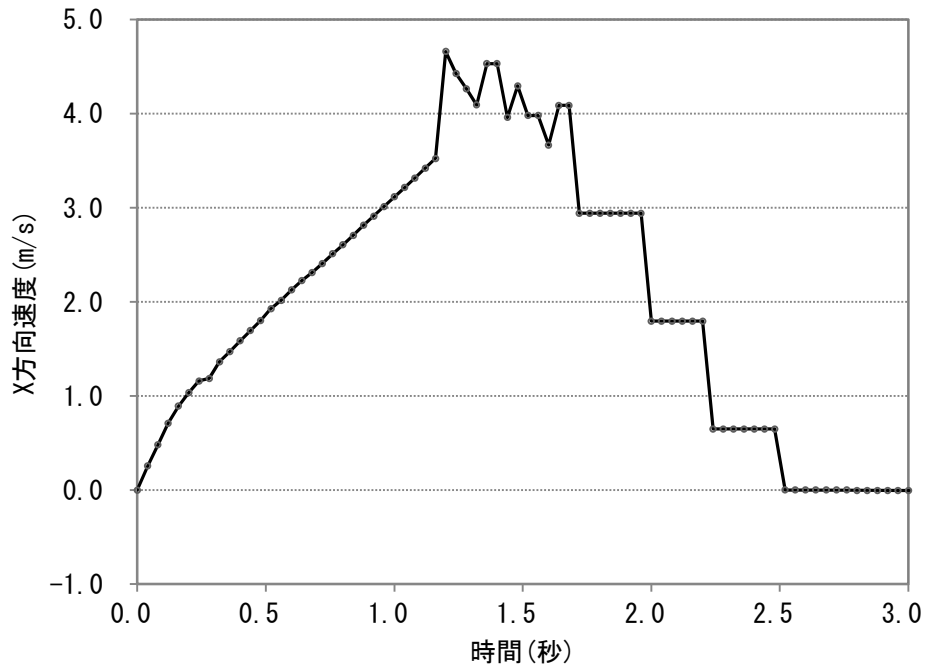


図 3. 3. 139 X 方向速度時刻歴

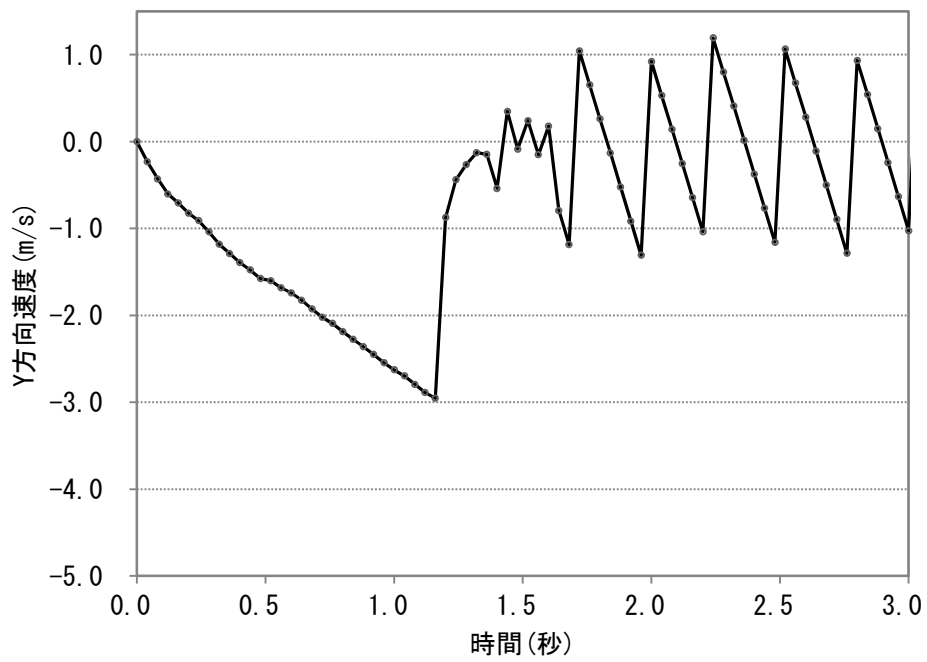


図 3. 3. 140 Y 方向速度時刻歴

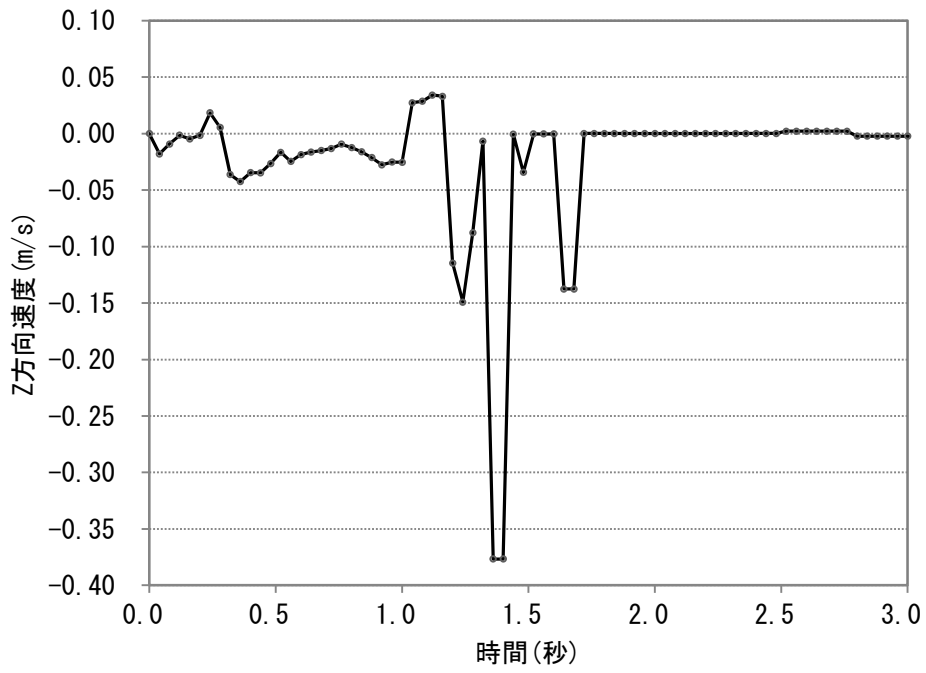


图 3. 3. 141 Z 方向速度時刻歴

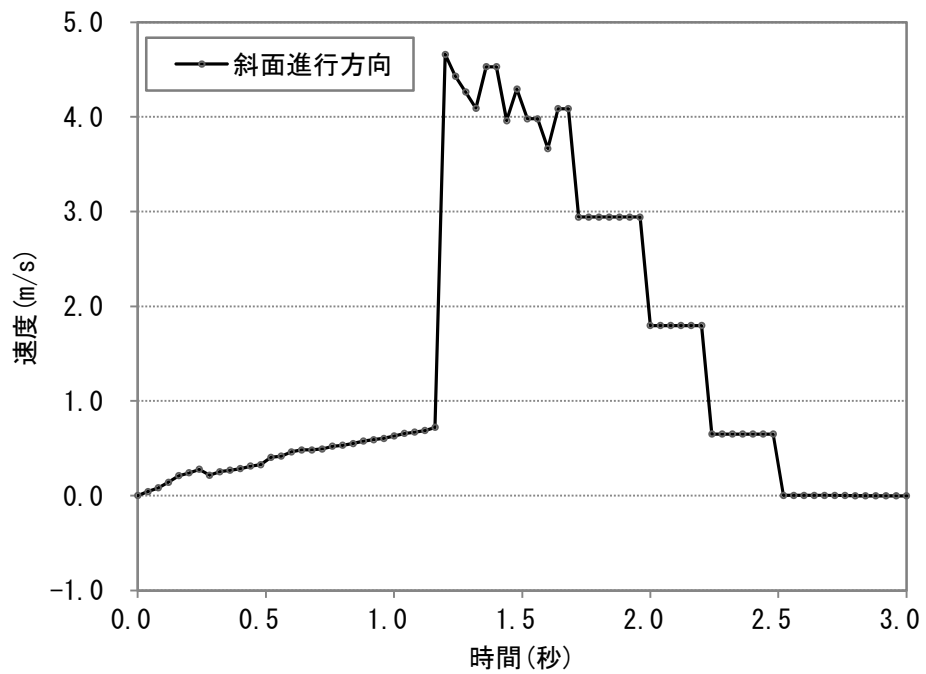


图 3. 3. 142 進行方向速度時刻歴

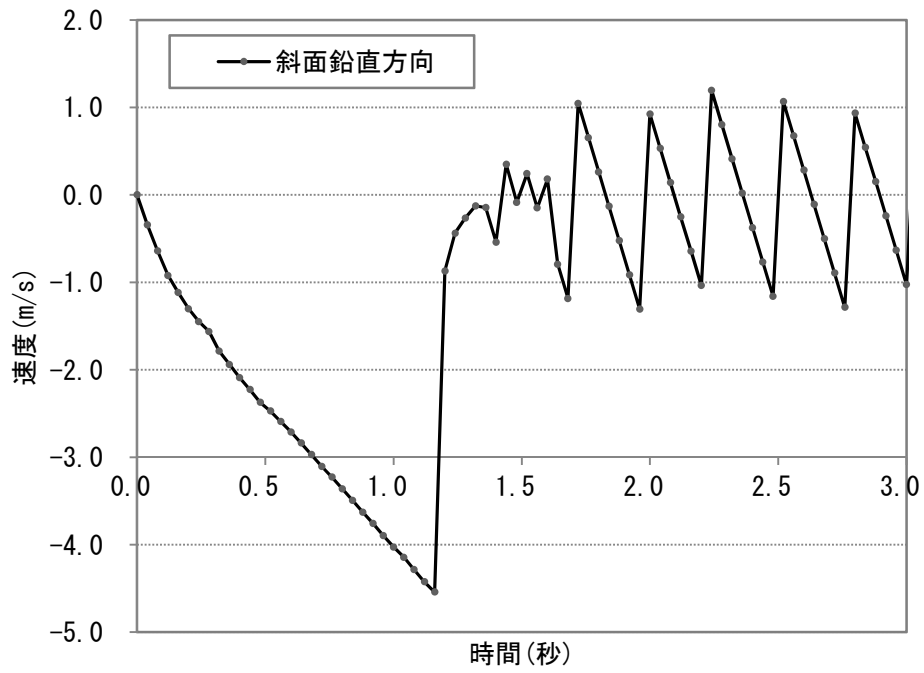


図 3. 3. 143 進行鉛直方向速度時刻歴

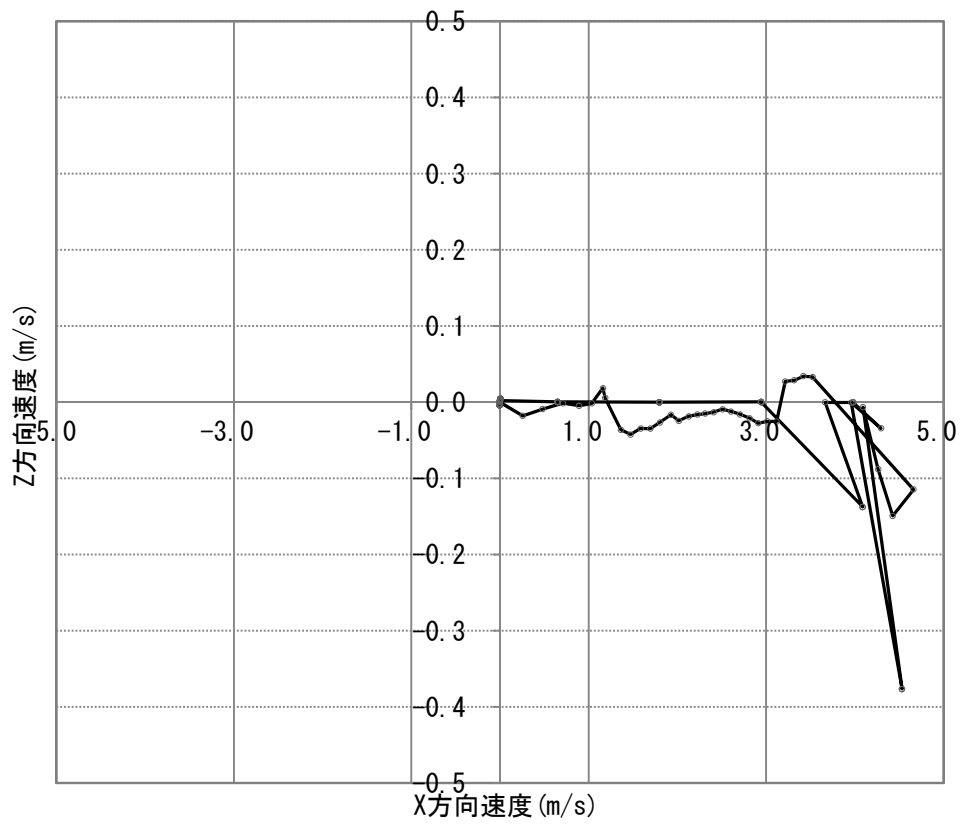


図 3. 3. 144 X-Z 面における速度履歴

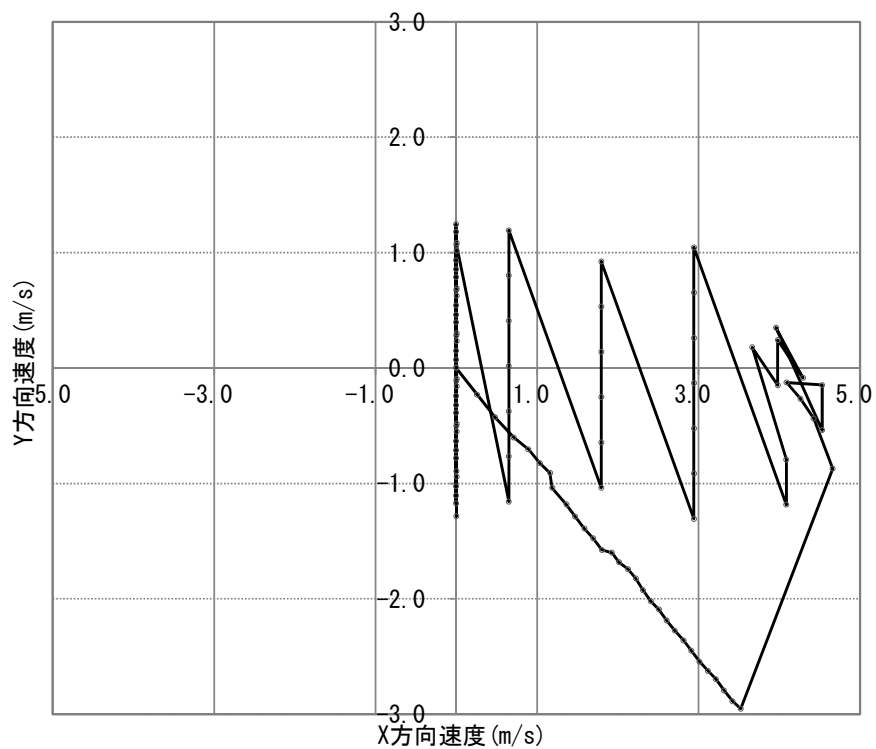


図 3. 3. 145 X-Y 面における速度履歴

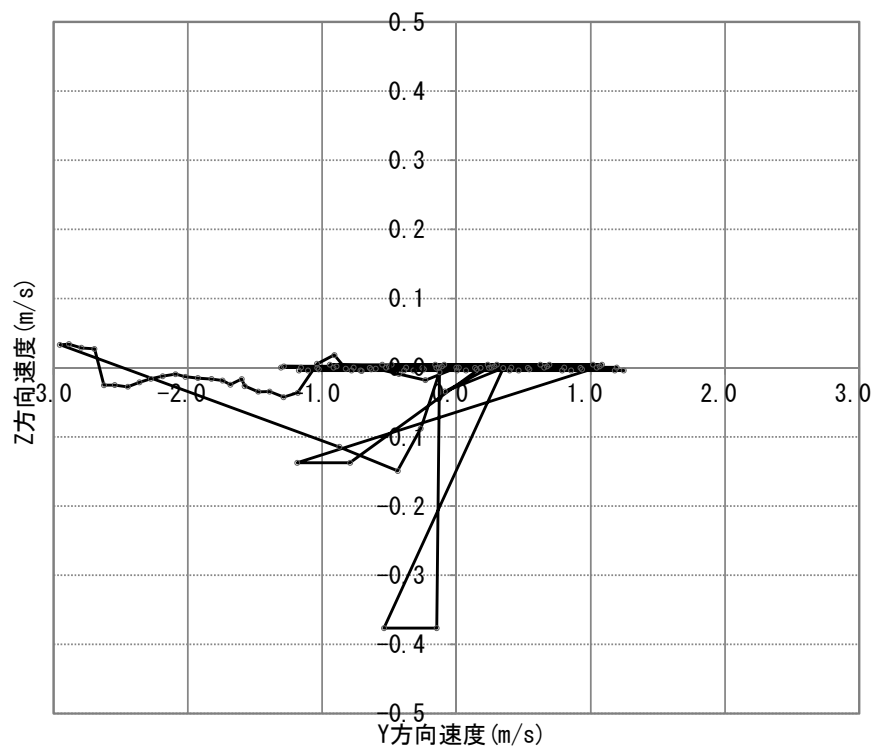


図 3. 3. 146 Y-Z 面における速度履歴

④ケース 4 碎石粒子群B

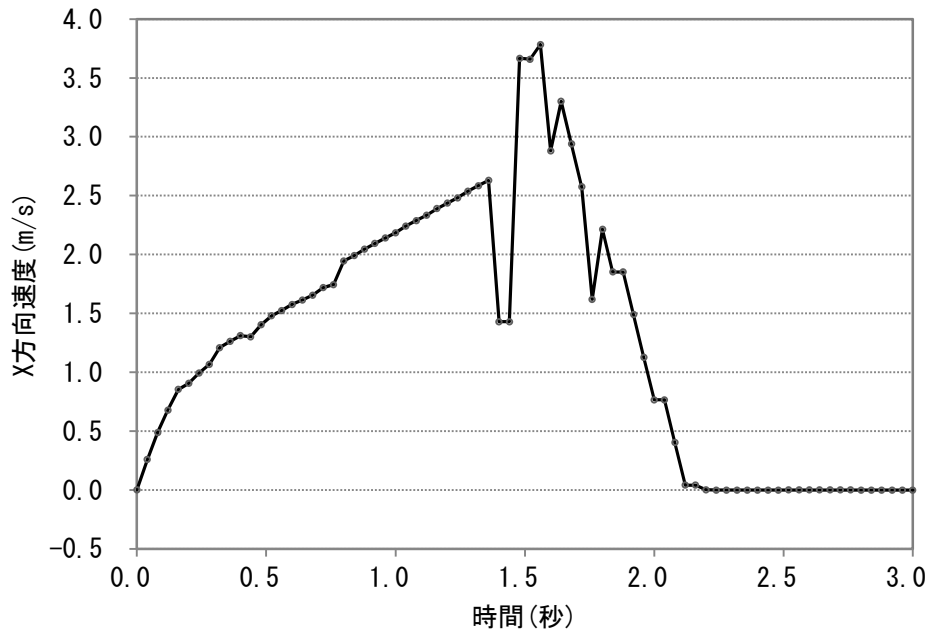


図 3. 3. 147 X 方向速度時刻歴

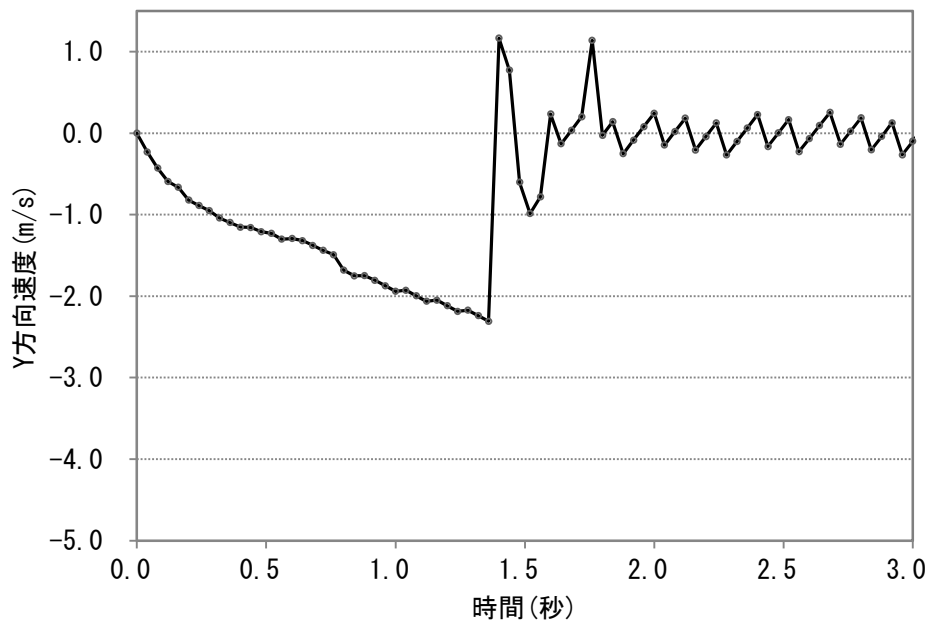


図 3. 3. 148 Y 方向速度時刻歴

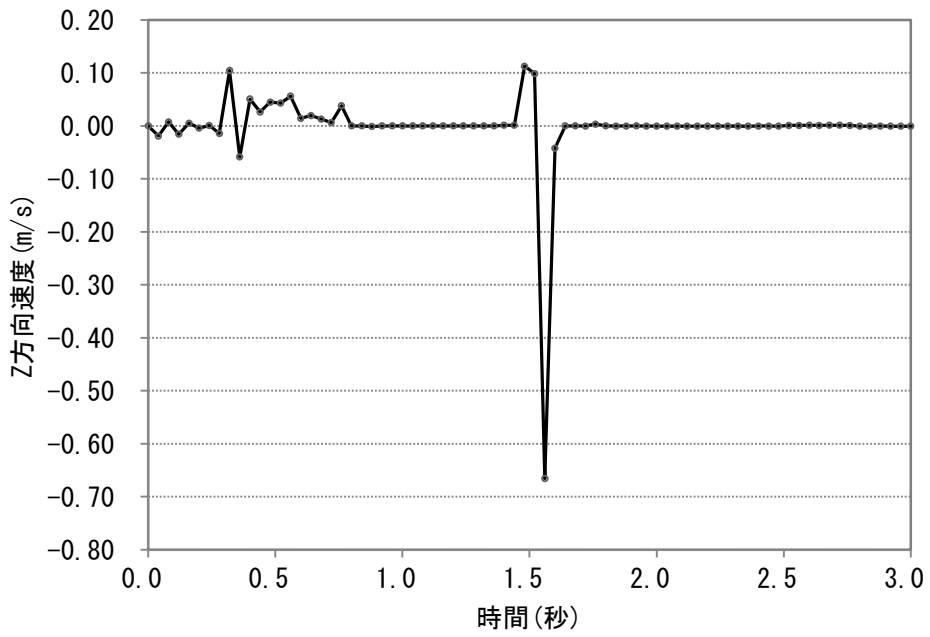


図 3. 3. 149 Z 方向速度時刻歴

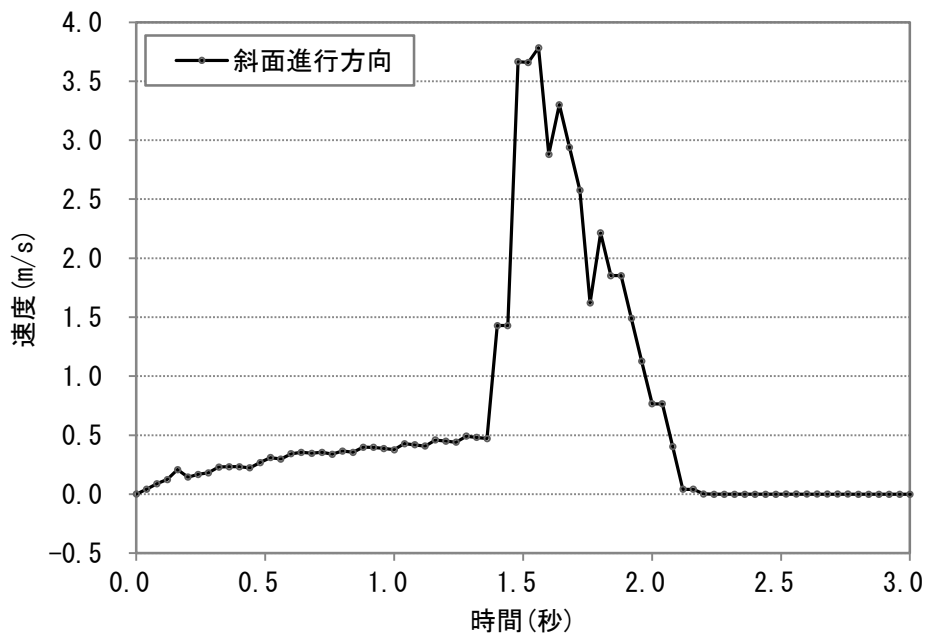


図 3. 3. 150 進行方向速度時刻歴

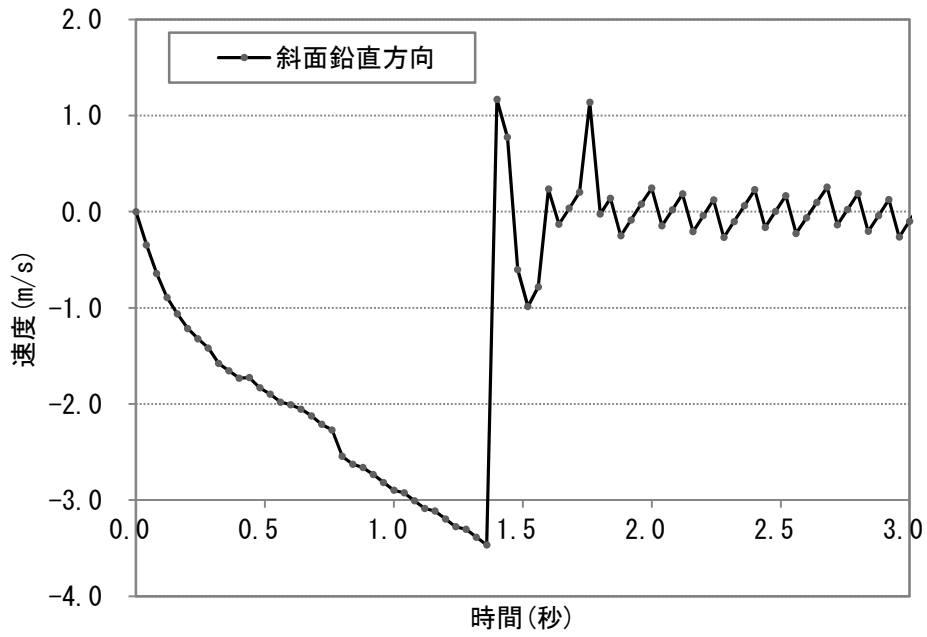


図 3. 3. 151 進行鉛直方向速度時刻歴

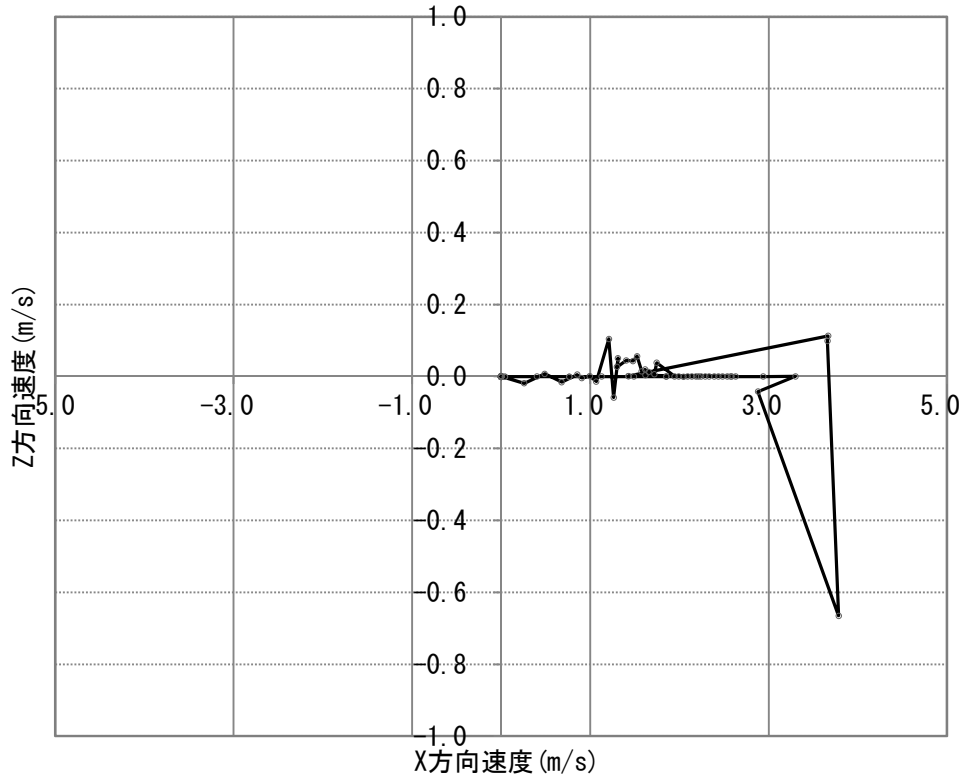


図 3. 3. 152 X-Z 面における速度履歴

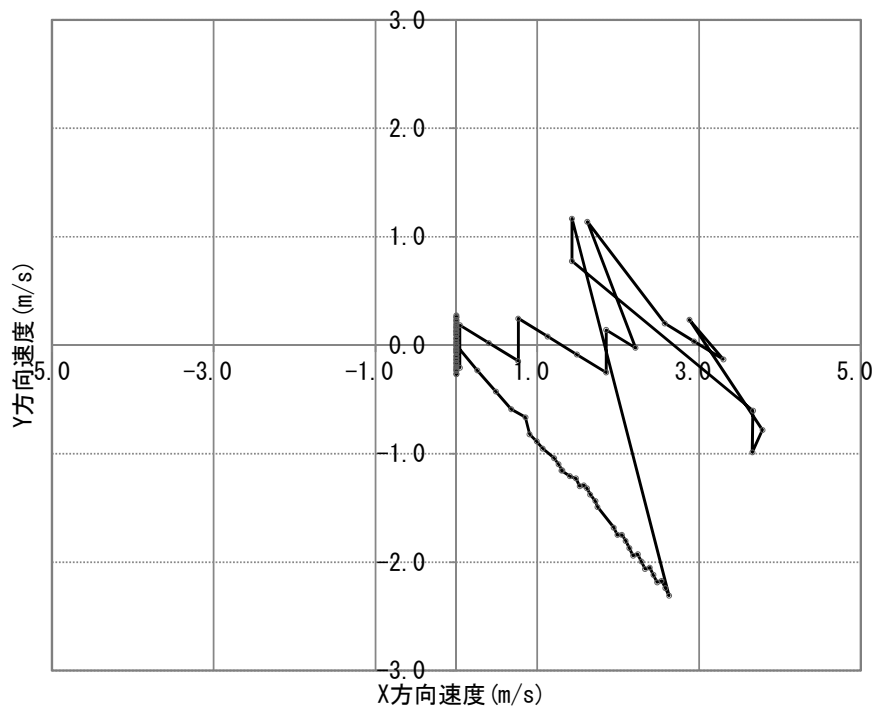


図 3.3.153 X-Y 面における速度履歴

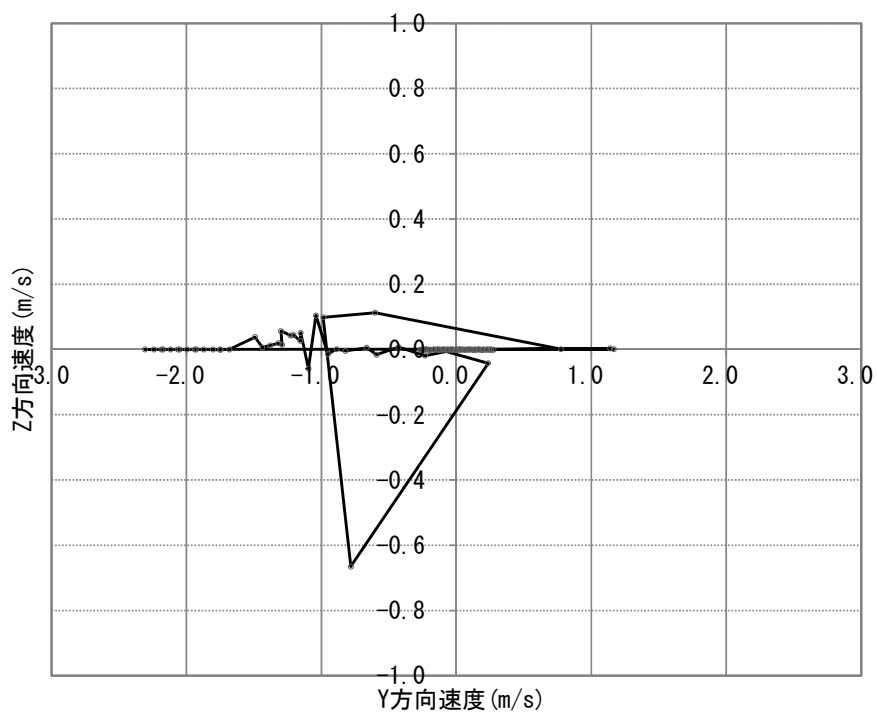


図 3.3.154 Y-Z 面における速度履歴

(5) ケース5 碎石粒子群B

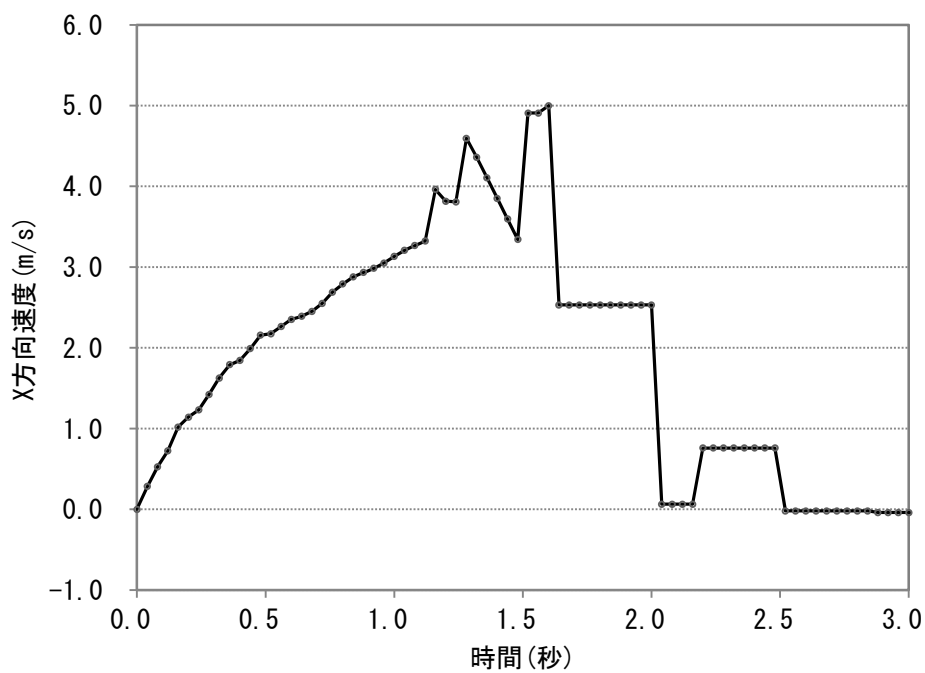


図 3. 3. 155 X 方向速度時刻歴

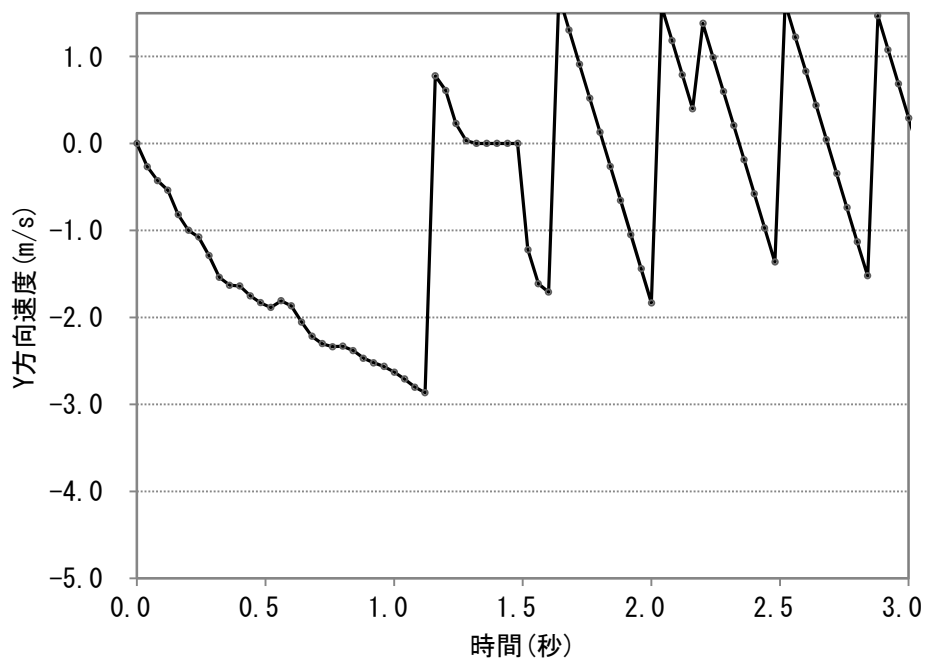


図 3. 3. 156 Y 方向速度時刻歴

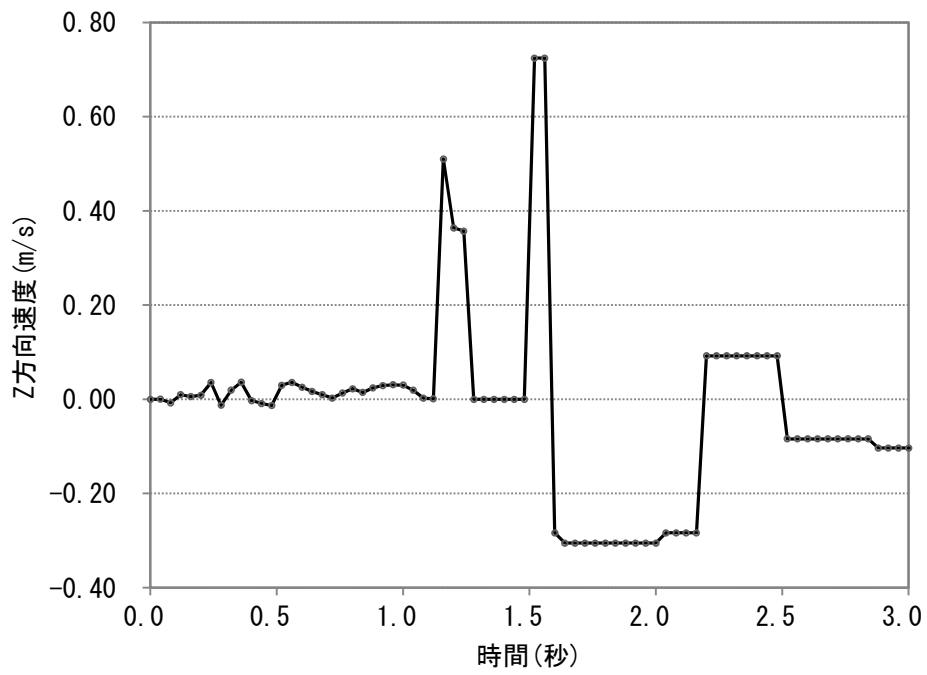


图 3. 3. 157 Z 方向速度時刻歷

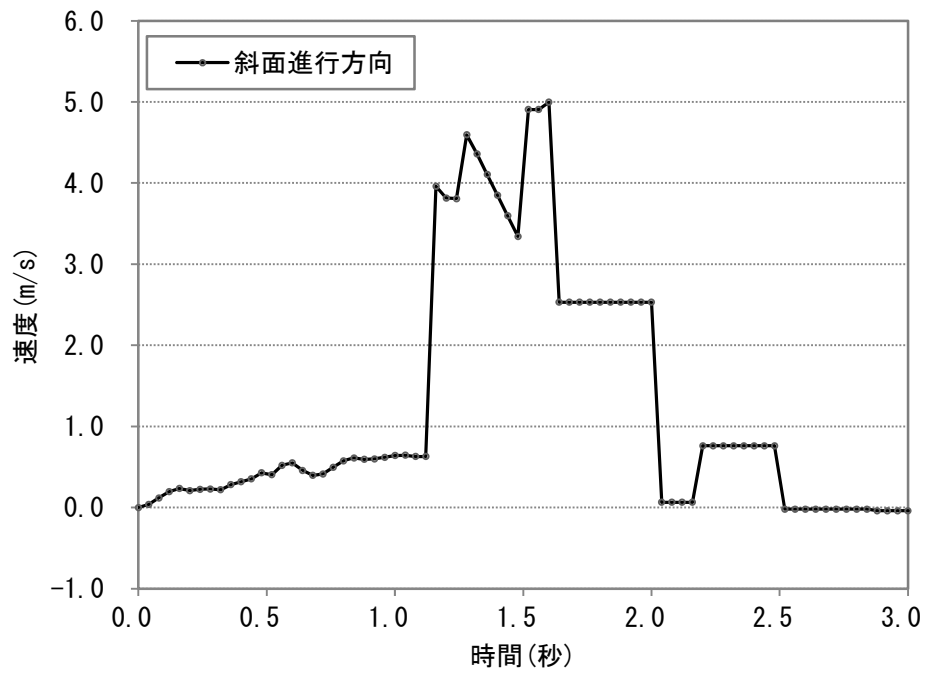


图 3. 3. 158 進行方向速度時刻歷

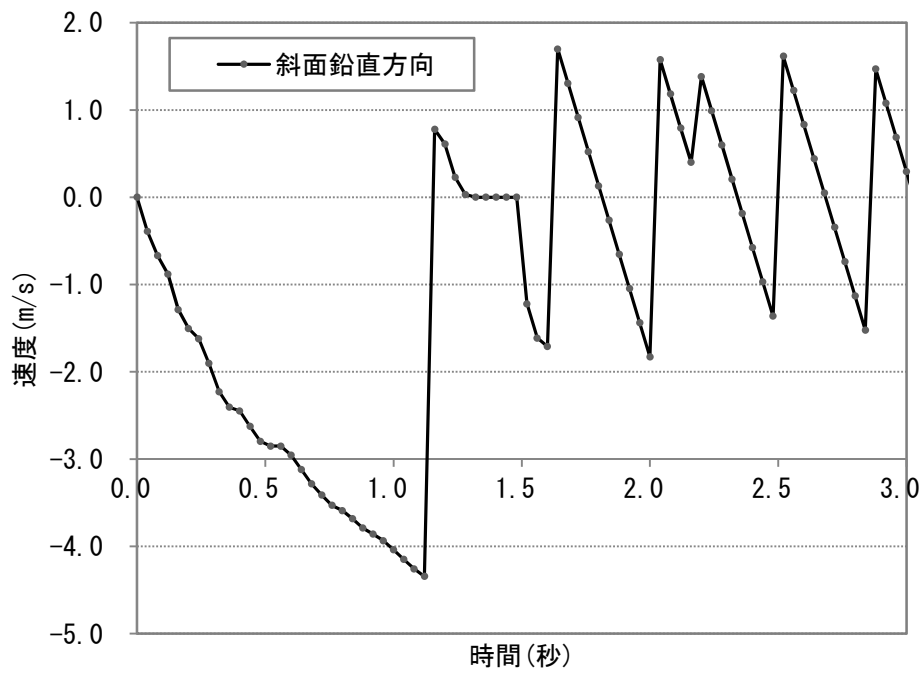


図 3.3.159 進行鉛直方向速度時刻歴

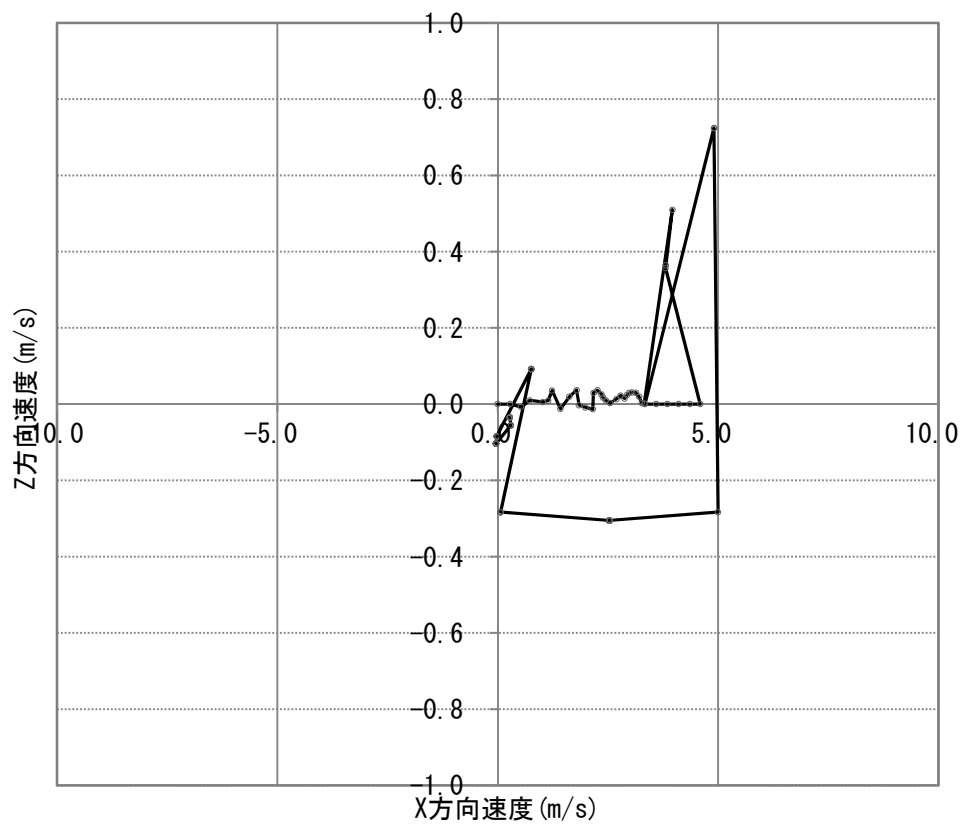


図 3.3.160 X-Z 面における速度履歴

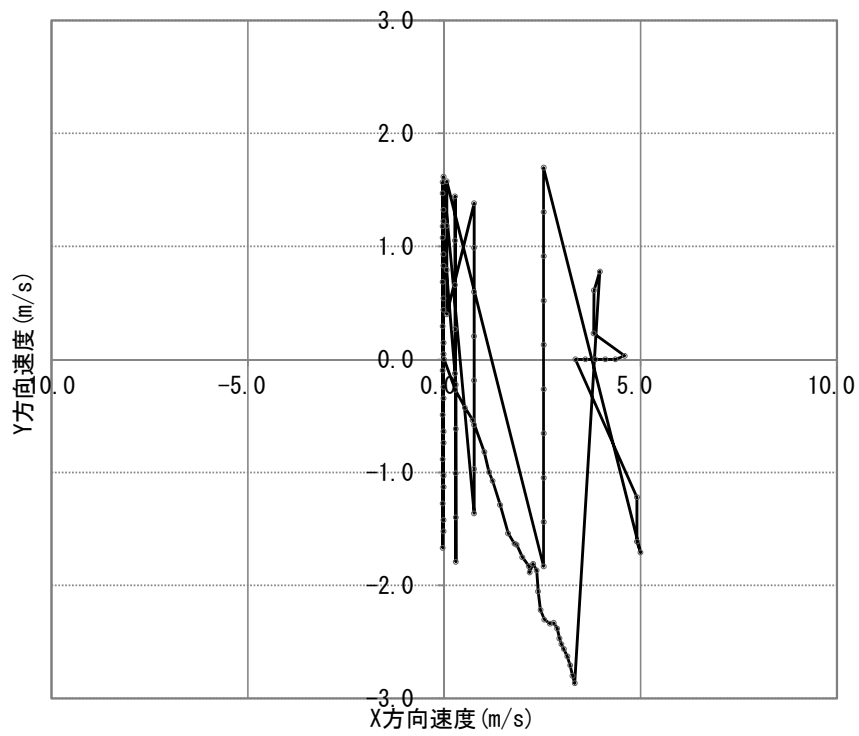


図 3. 3. 161 X-Y 面における速度履歴

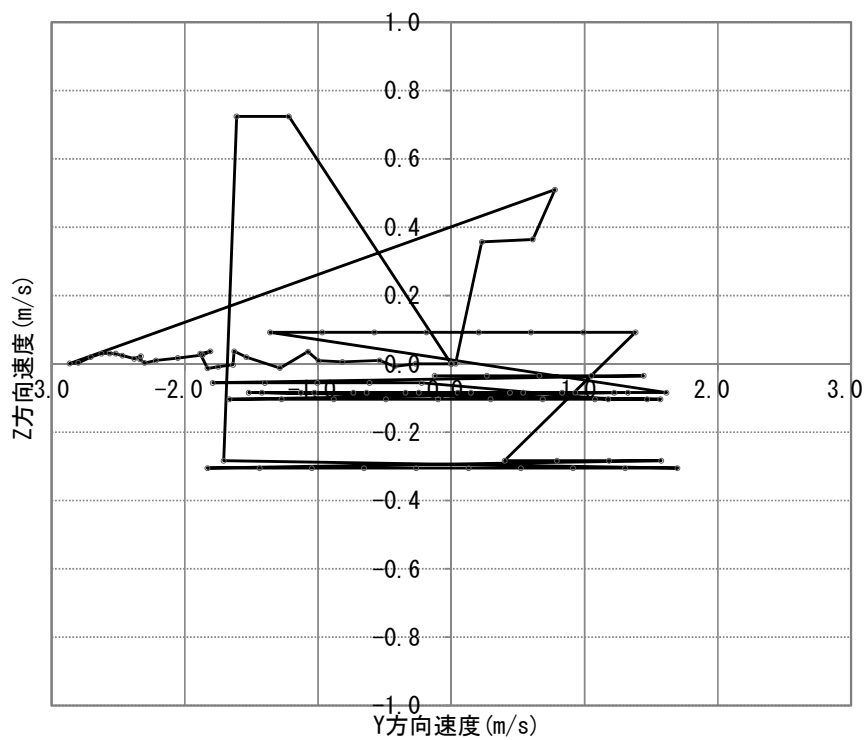


図 3. 3. 162 Y-Z 面における速度履歴

⑥ケース6 碎石粒子群B

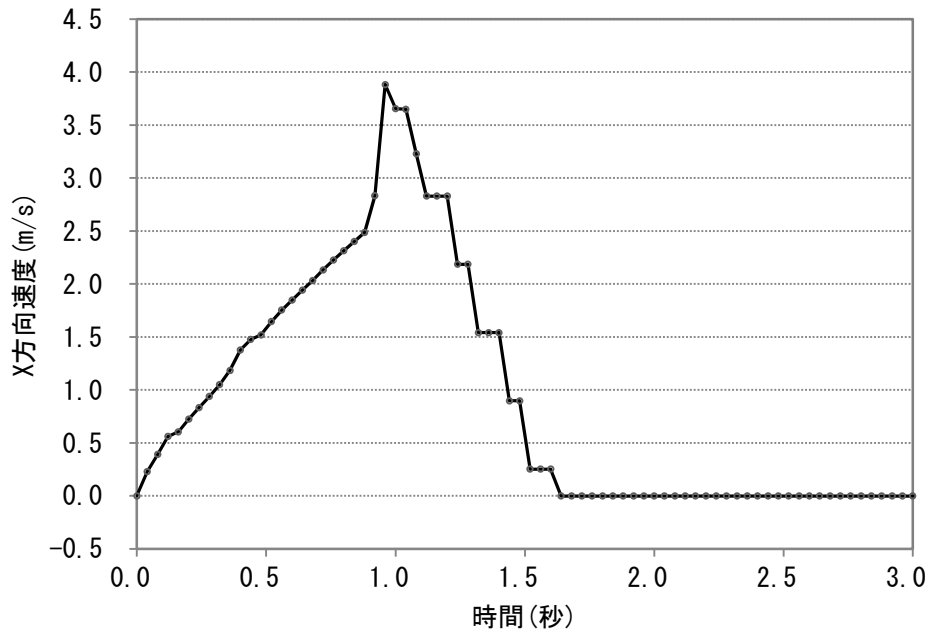


図 3. 3. 163 X 方向速度時刻歴

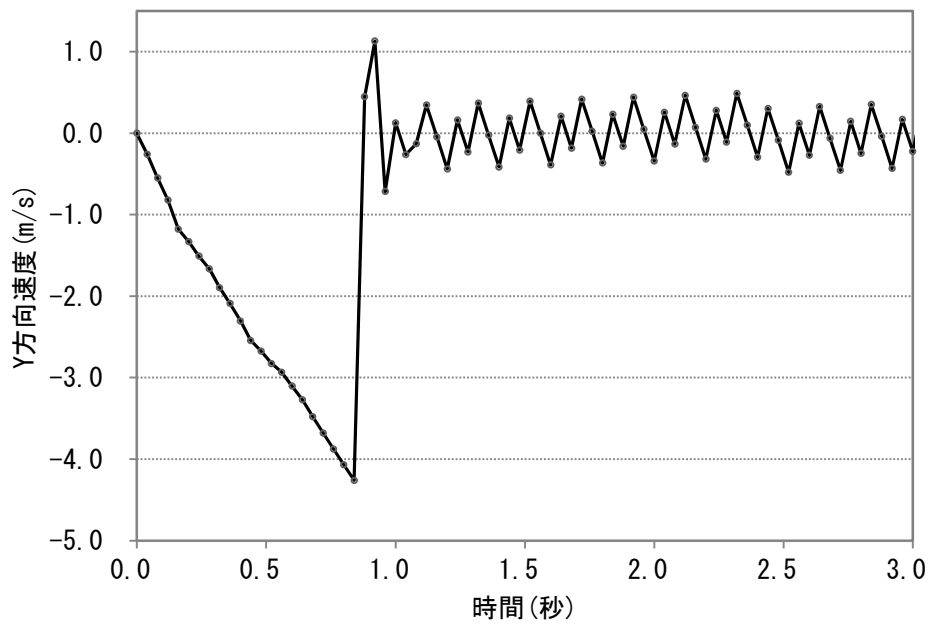


図 3. 3. 164 Y 方向速度時刻歴

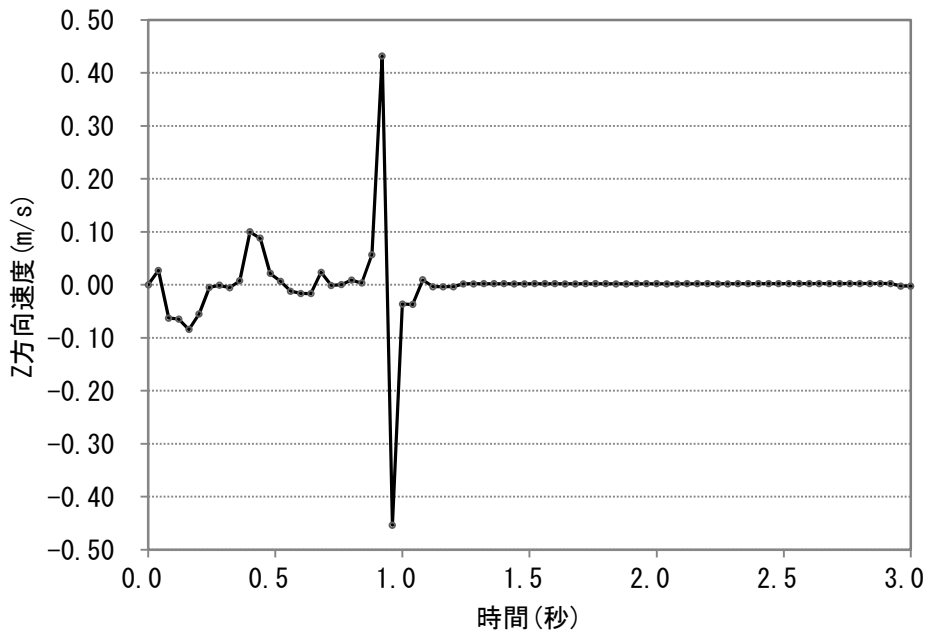


図 3.3.165 Z 方向速度時刻歴

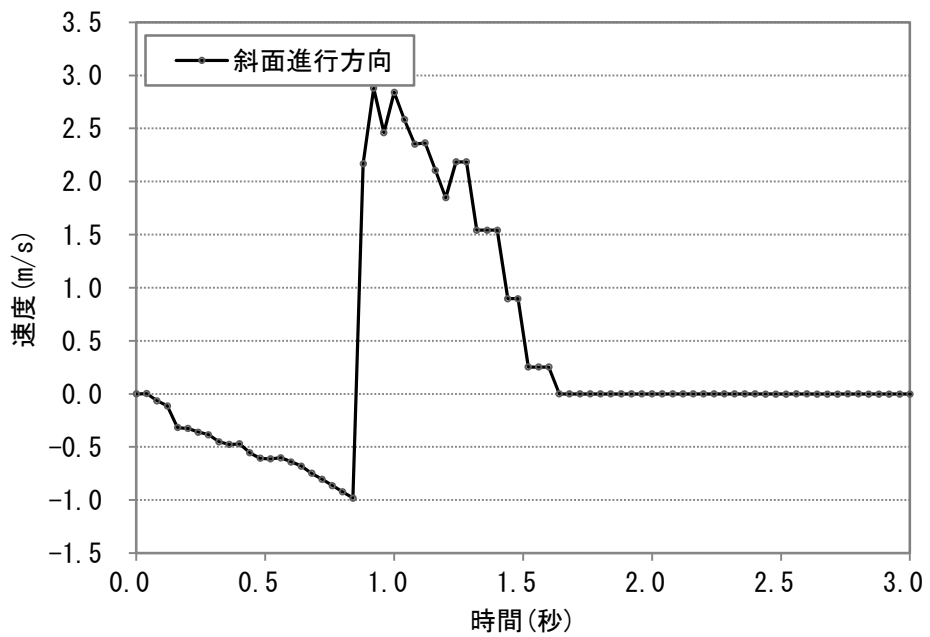


図 3.3.166 進行方向速度時刻歴

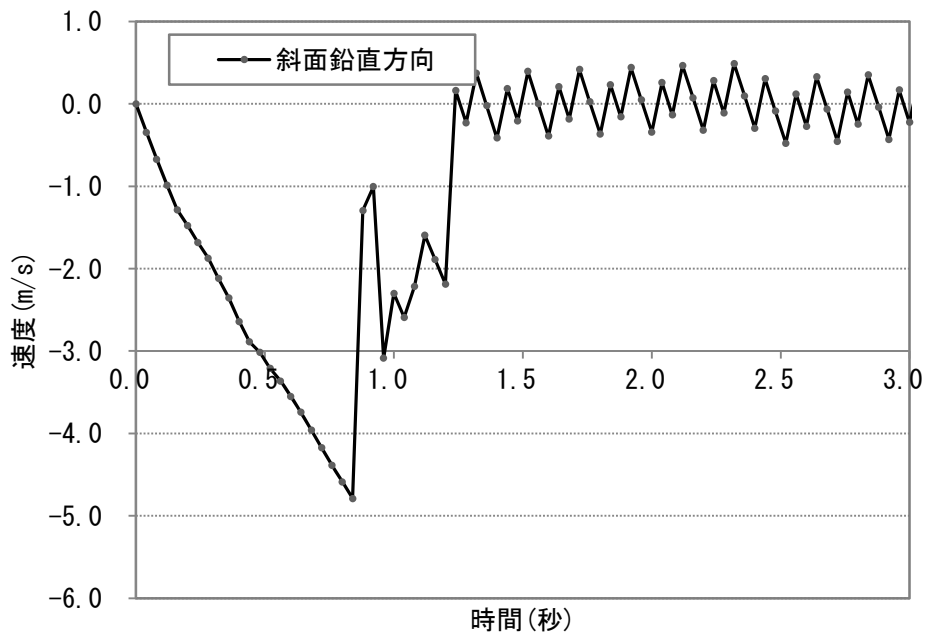


図 3. 3. 167 進行鉛直方向速度時刻歴

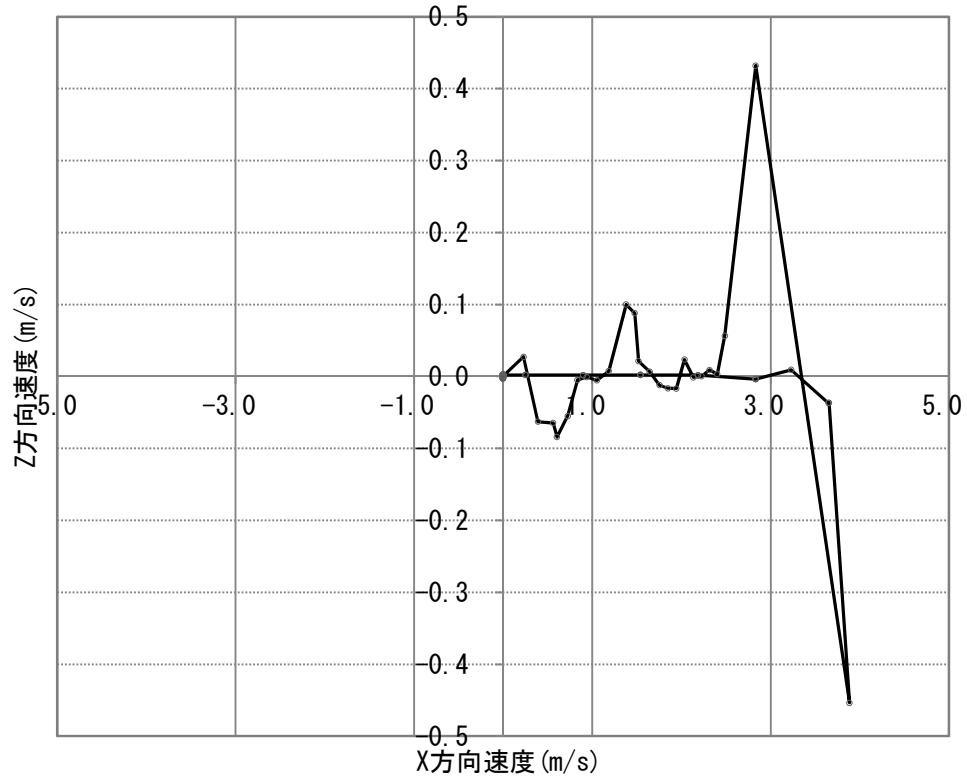


図 3. 3. 168 X-Z 面における速度履歴

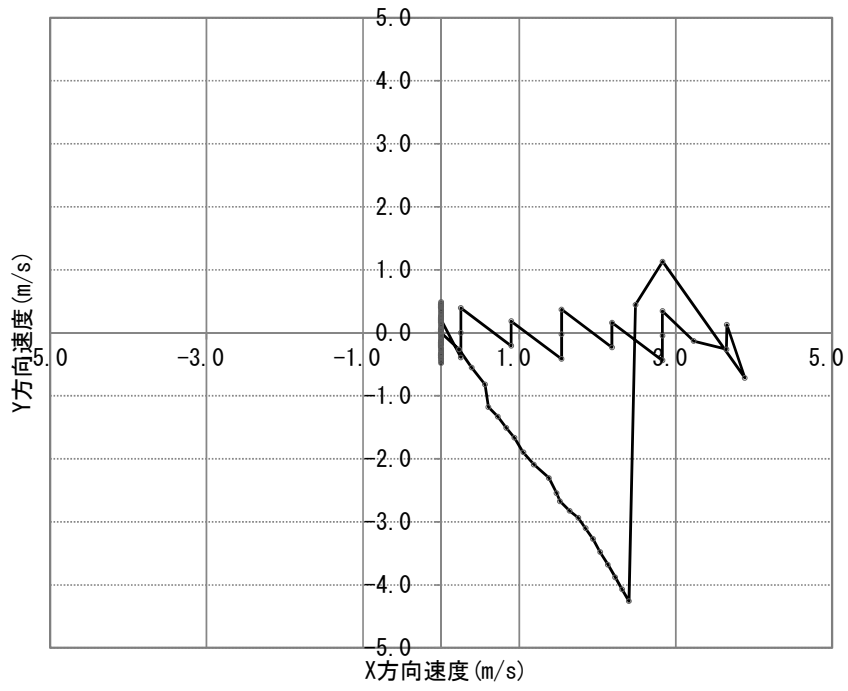


図 3.3.169 X-Y 面における速度履歴

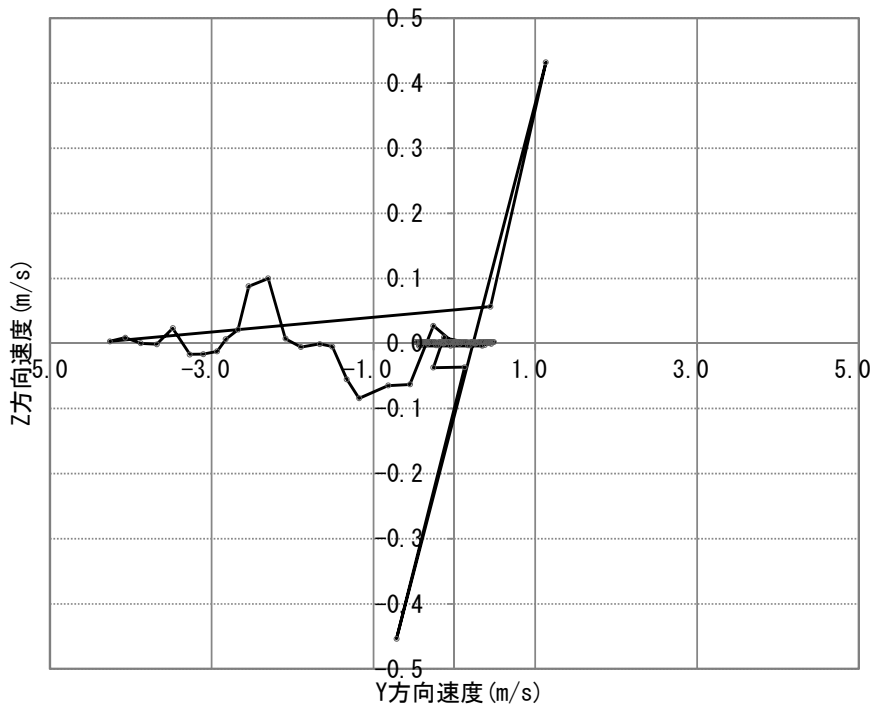


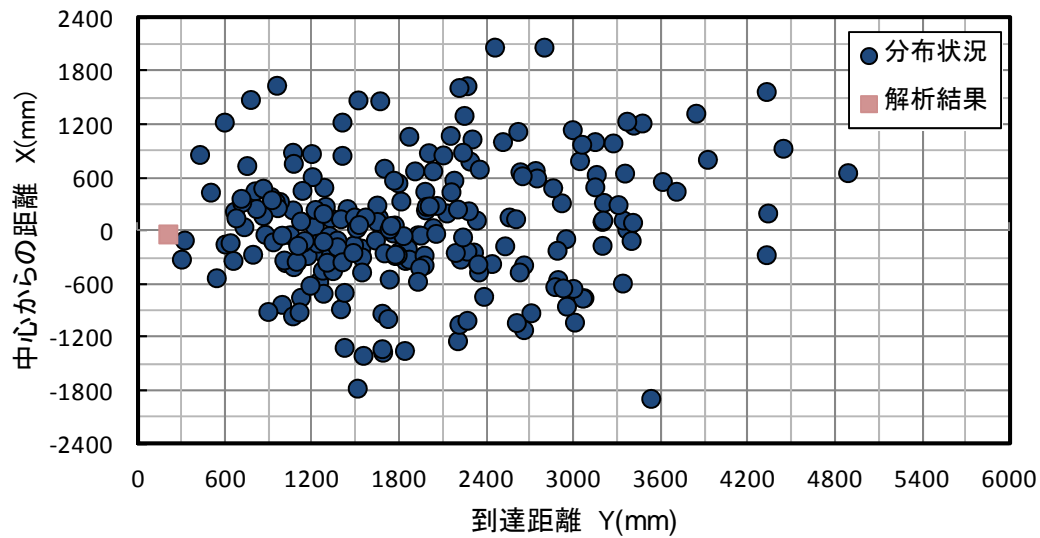
図 3.3.170 Y-Z 面における速度履歴

3. 3. 3 解析結果の分析

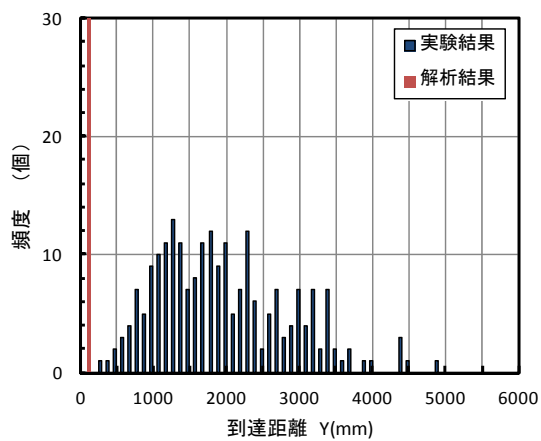
(1) ケース1 (勾配A、粒子A)

① 到達距離

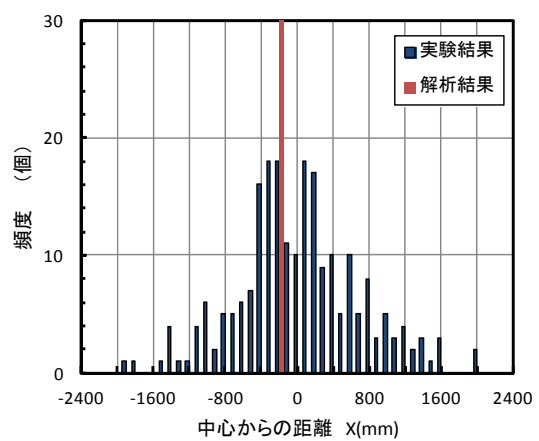
図 3. 3. 171 に実験から得られた到達距離の頻度分布と解析結果の関係を示す。解析結果は実験結果に比べ、過小になった。



(a) X-Y 分布図



(b) Y 方向頻度分布



(c) X 方向頻度分布

図 3. 3. 171 到達距離の比較

②軌跡と速度

図 3.3.172 と図 3.2.173 に実験(1-2,1-40)から得られた軌跡と速度の結果と解析結果を示す。解析結果は実験結果に比べ、斜面部では速度が大きいが、平坦部に到達すると、急激に減速する結果となった。また、拡がりも実験結果に比べ小さくなった。

以上より、粒子A単体、勾配Aのケース1では、特に平坦部での速度を過小評価し、到達距離も過小評価した。これは、粒子サイズが格子長 0.01m に対し小さく、底面に衝突する際に作用する力を過小評価したこと等が考えられる。

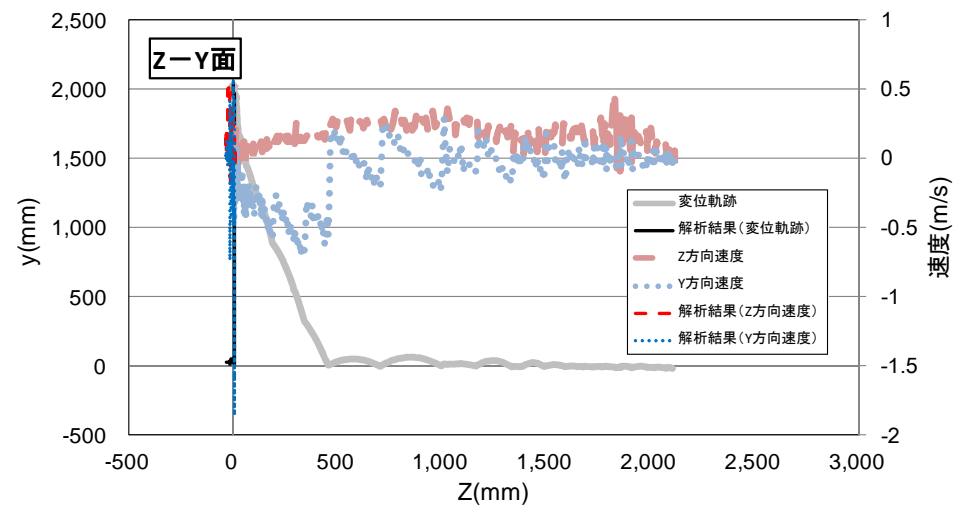
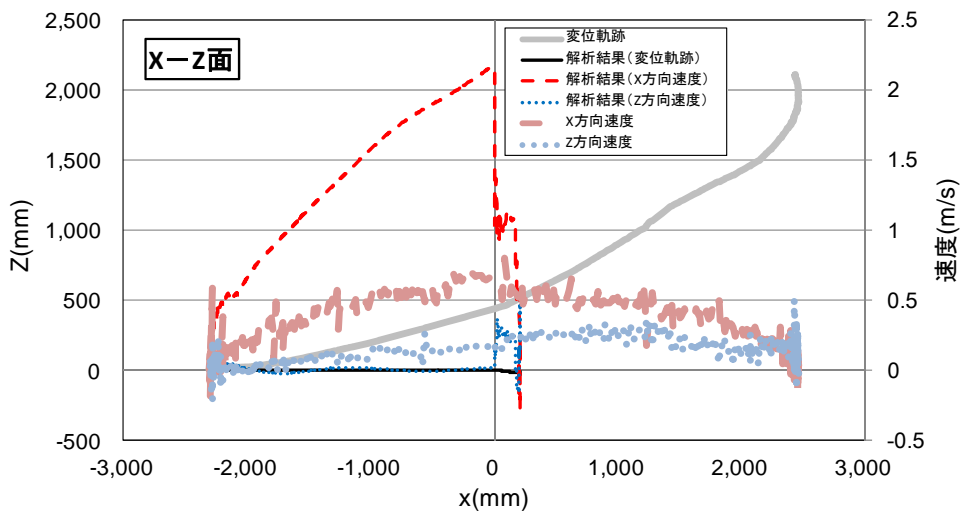
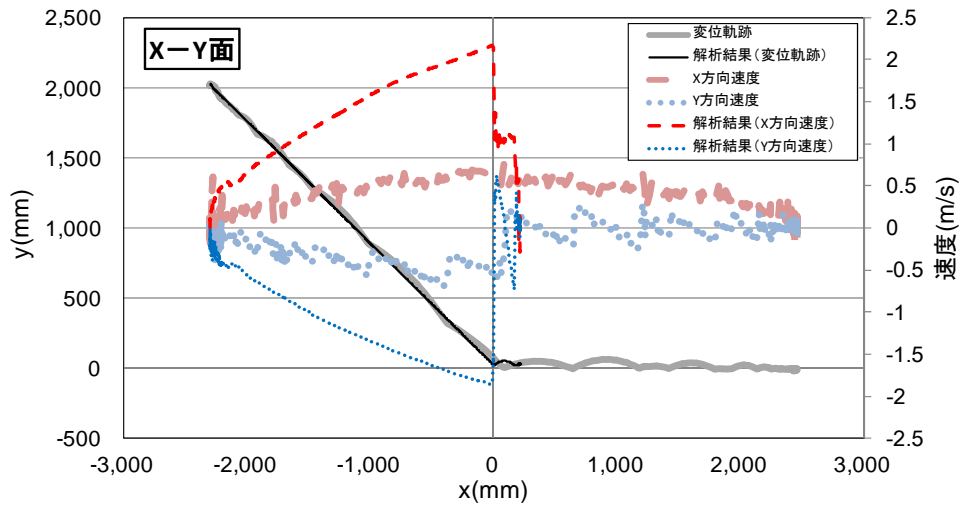


図 3. 3. 172 軌跡と速度の比較(1-2)

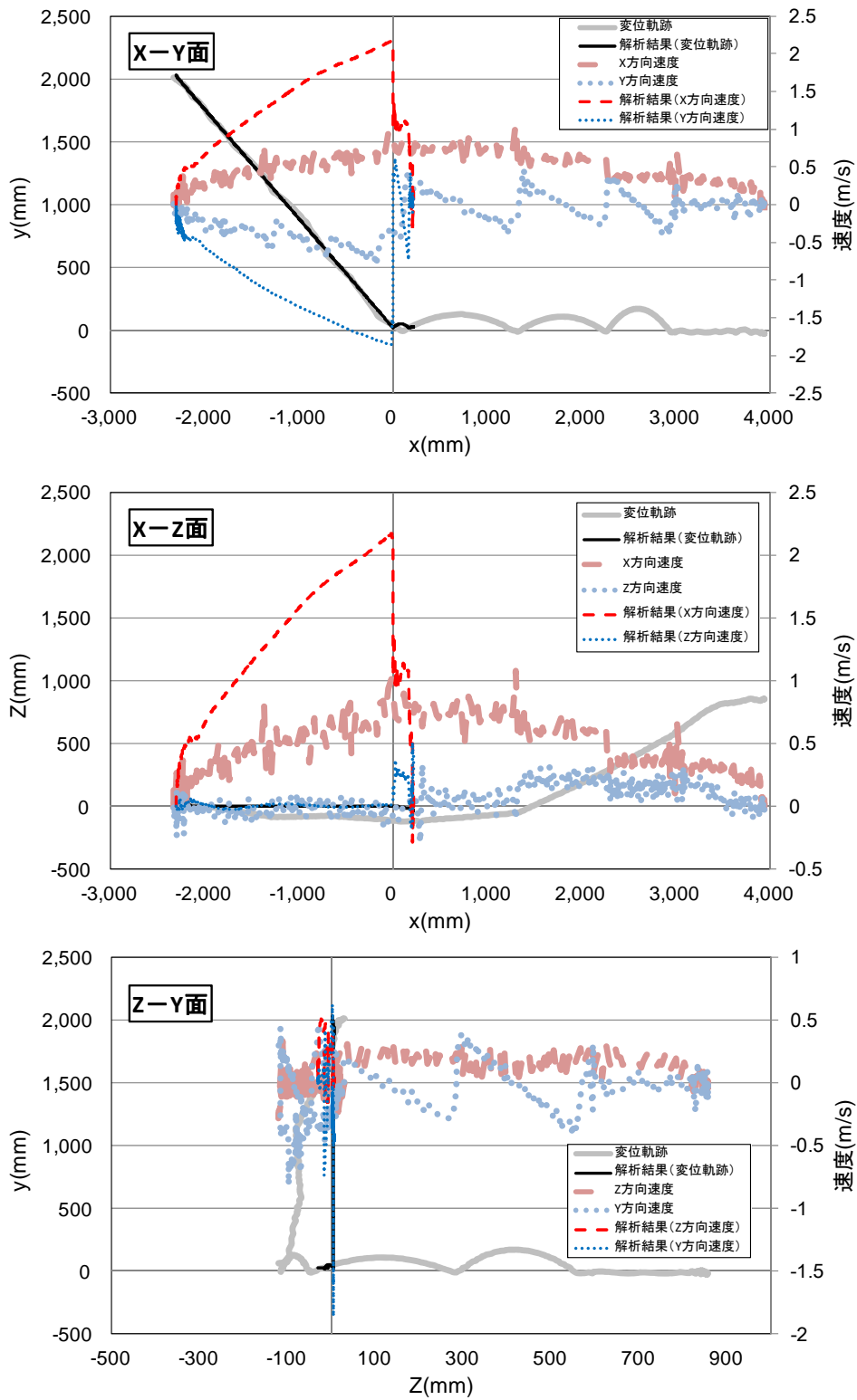
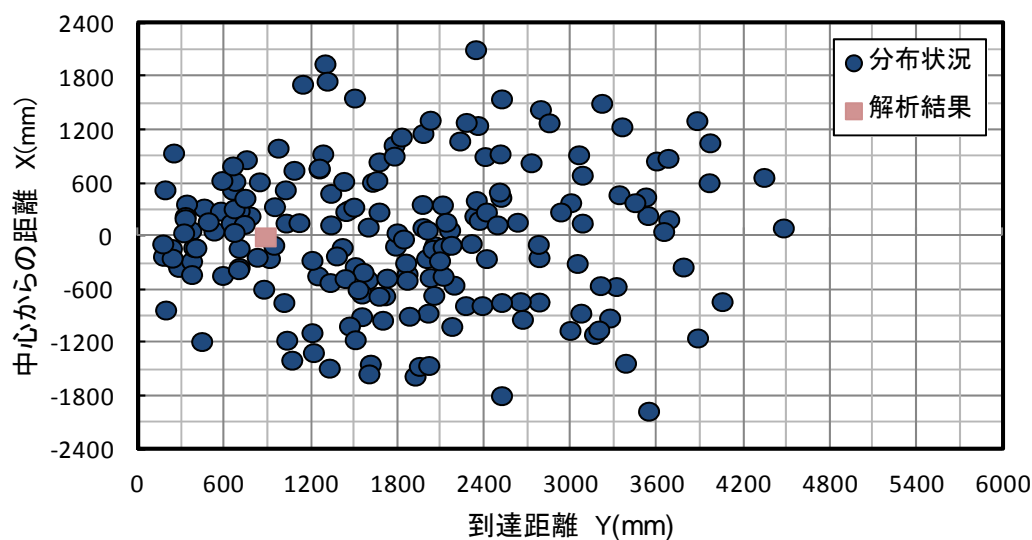


図 3. 3. 173 軌跡と速度の比較(1-40)

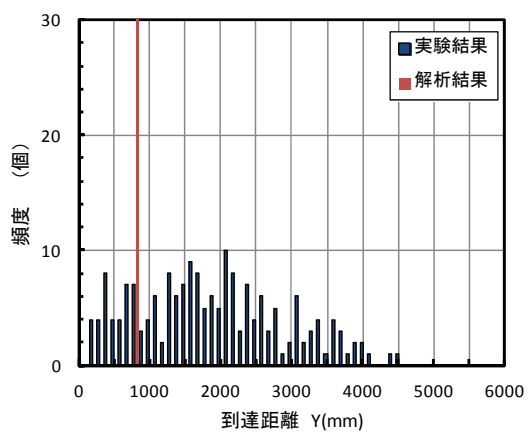
(2) ケース 2 (勾配B、粒子B)

①到達距離

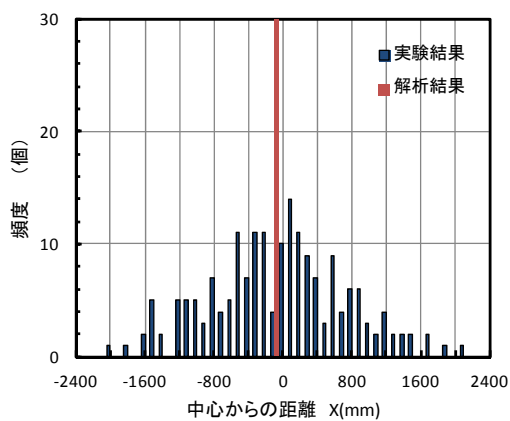
図 3. 3. 174 に実験から得られた到達距離の頻度分布と解析結果の関係を示す。解析結果は、量子Aの場合よりは到達距離が大きくなったが、実験結果に比べ過小になった。



(a) X-Y 分布図



(b) Y 方向頻度分布



(c) X 方向頻度分布

図 3. 3. 174 到達距離の比較

②軌跡と速度

図 3.3.175 と図 3.2.176 に実験 (5-10、5-37) から得られた軌跡と速度の結果と解析結果を示す。解析結果は実験結果に比べ、斜面部では速度が大きいが、平坦部に到達すると、減速する結果となった。また、拡がりも実験結果に比べ小さくなった。ただし、粒子Aの場合に比べると、平坦部での減速量が小さく、その結果、到達距離も大きくなった。

以上より、粒子B単体、勾配Bのケース2では、特に平坦部での速度を過小評価し、到達距離も過小評価した。ただし、粒子A単体、勾配Aのケース1よりは到達距離は大きくなった。これは、粒子サイズが格子長 0.02m に比べ大きく、底面に衝突する際に作用する力の評価が改善したこと等が考えられる。ただし、実験結果に比べると、依然過小評価する傾向にある。

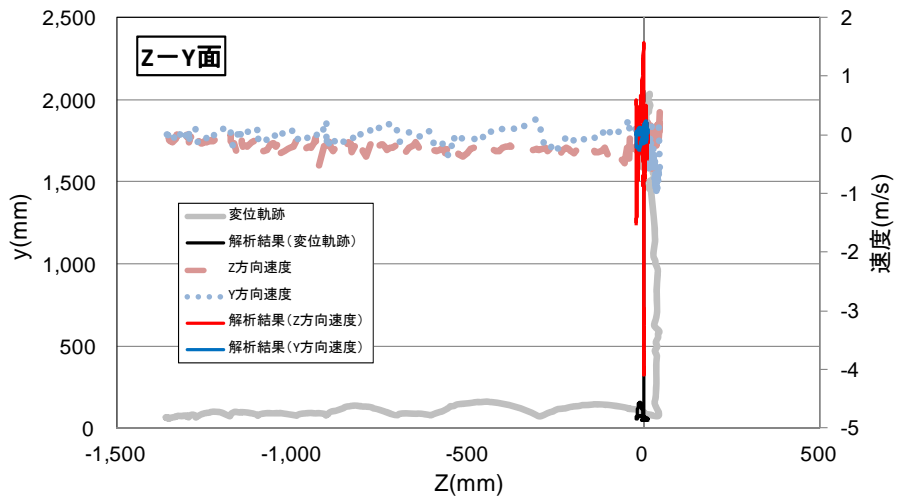
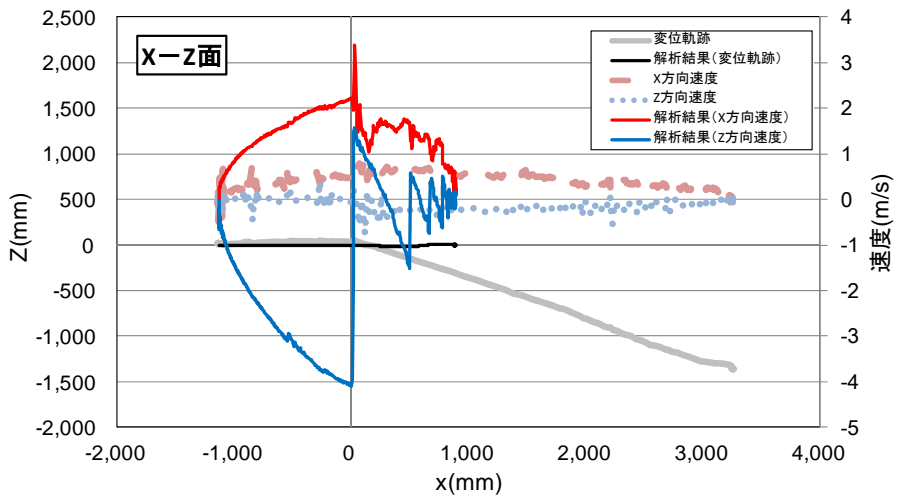
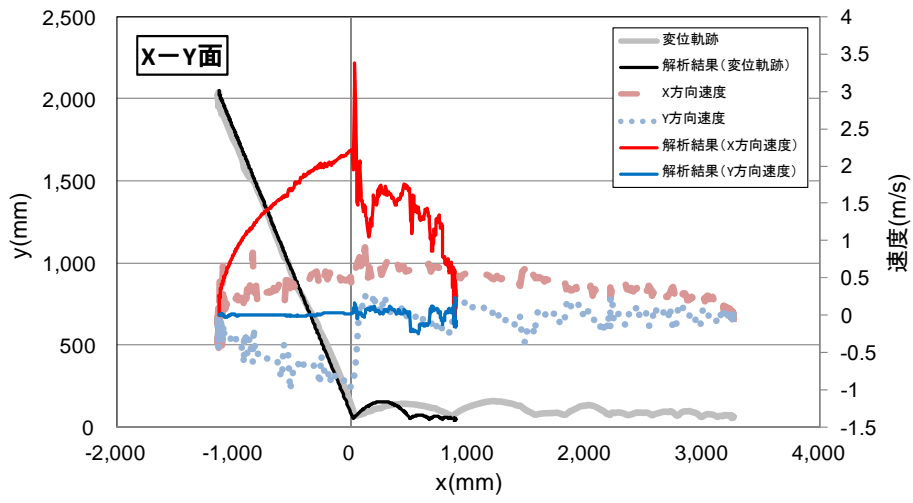


図 3. 3. 175 軌跡と速度の比較(5-10)

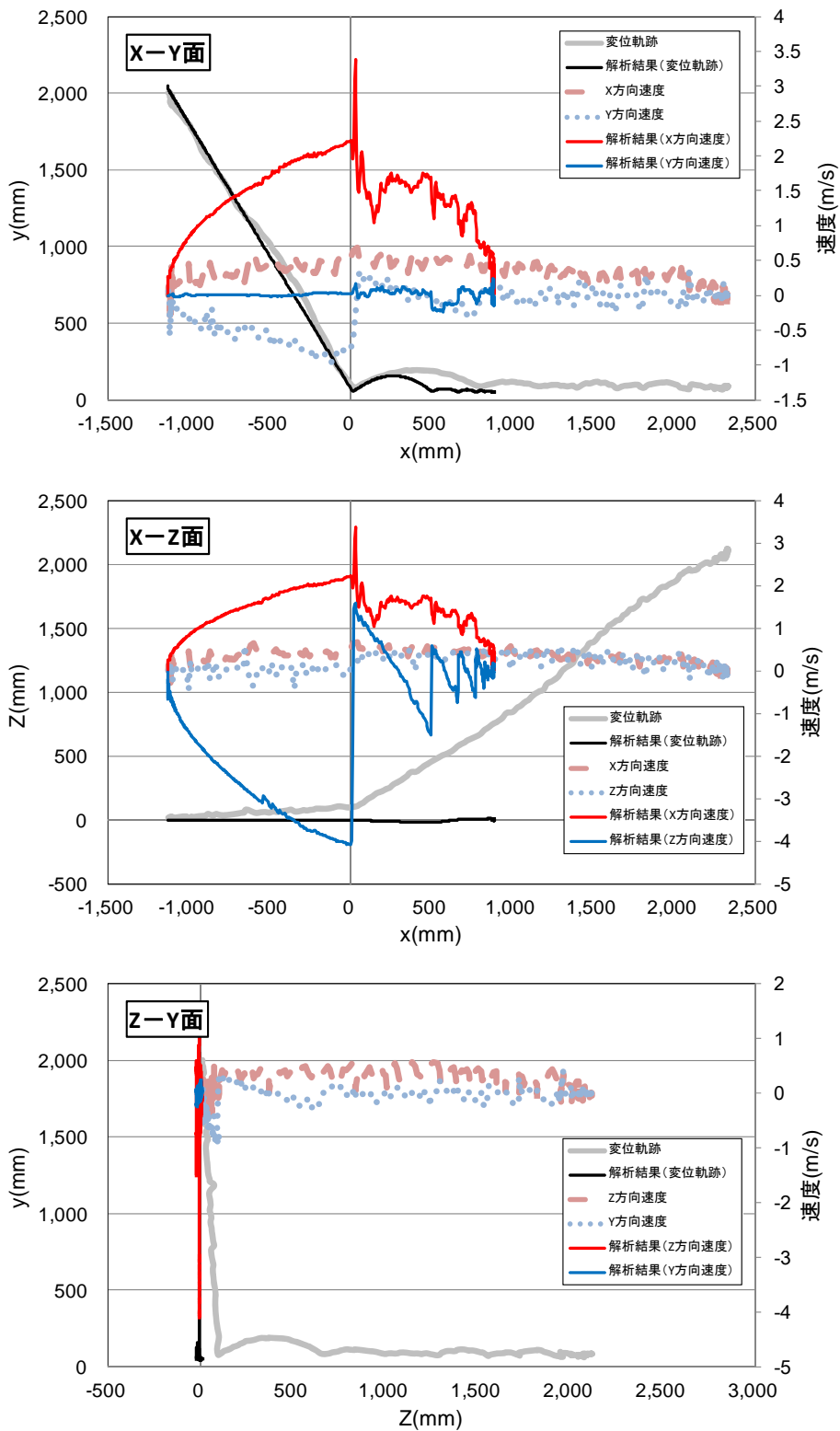


図 3. 3. 176 軌跡と速度の比較(5-37)

(3) ケース3 (勾配A、粒子A群、細粒分20%)

図3.3.177に群の分布について比較した図を示す。解析結果は、実験結果に比べ拡がり小さい。これは、実験で見られた個別の粒石が分離した影響を解析では表現できていないためである。一方、到達距離については、実験結果と概ね良い対応した結果が得られた。

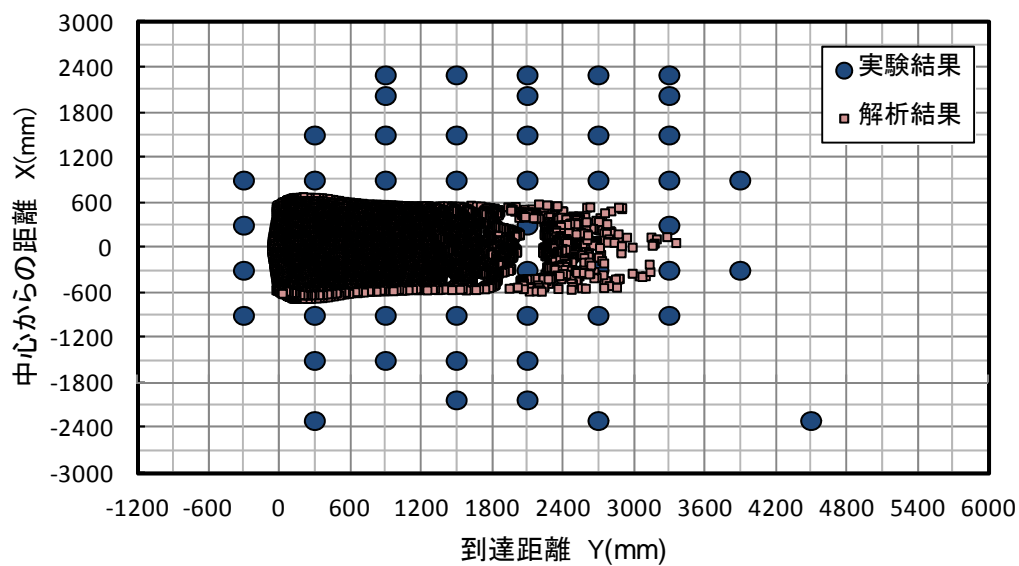


図3.3.177 群の分布の比較

図 3.3.178、図 3.3.179 に Y 方向と X 方向の重量の頻度分布の比較を示す。Y 方向について、解析結果は実験結果に比べ到達距離が大きくなった。よって、安全側に評価するという点では、解析結果の有効性があることを示す結果である。一方、X 方向については、拡がり同等になった。これは、粒石の分離を除けば、主に堆積している部分は解析結果で概ね推定できることを示している。

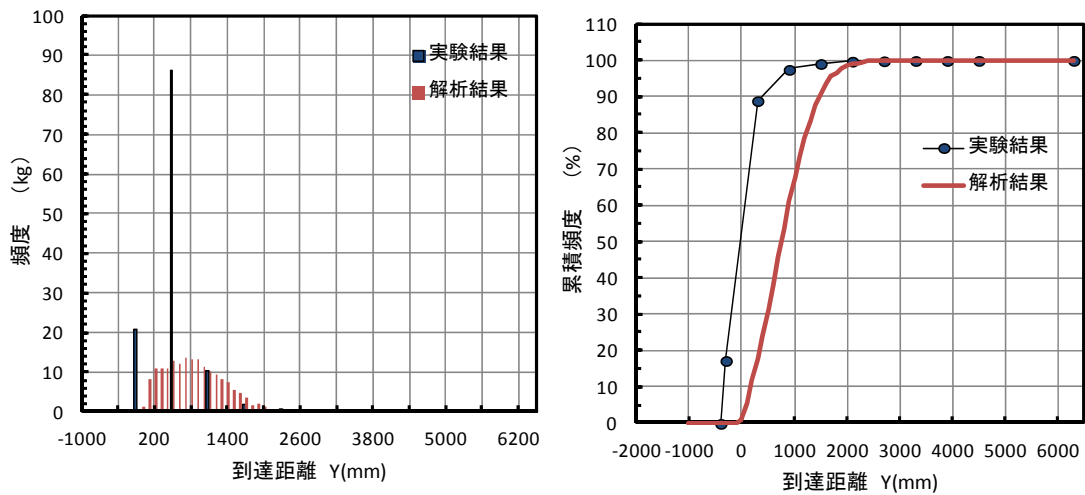


図 3.3.178 Y 方向の重量の頻度分布

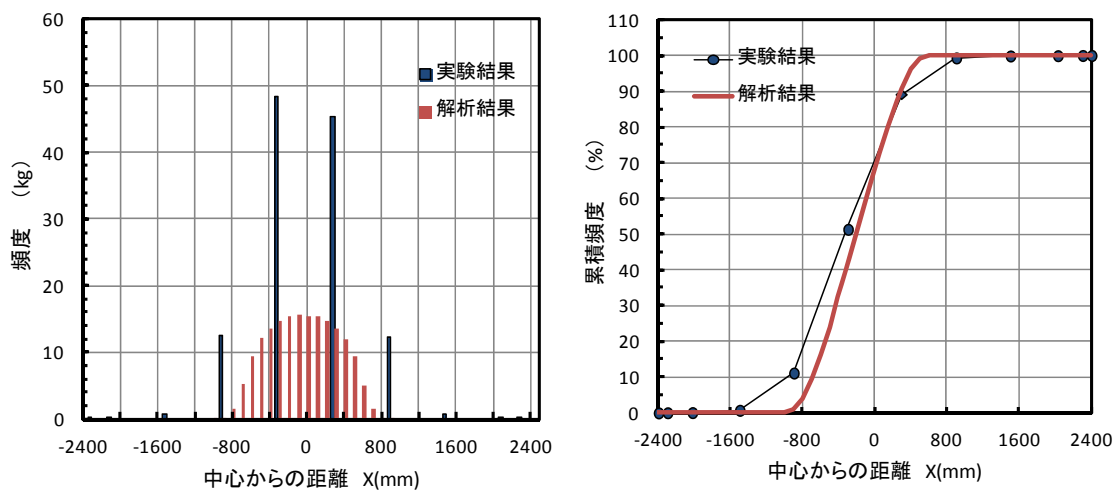


図 3.3.179 X 方向の重量の頻度分布

(4) ケース4 (勾配A、粒子B群、細粒分20%)

図 3.3.180 に群の分布について比較した図を示す。解析結果は、実験結果に比べ拡がり小さい。これは、実験で見られた個別の粒石が分離した影響を解析では表現できていないためである。到達距離については、ケース3に比べると過小評価する傾向となった。

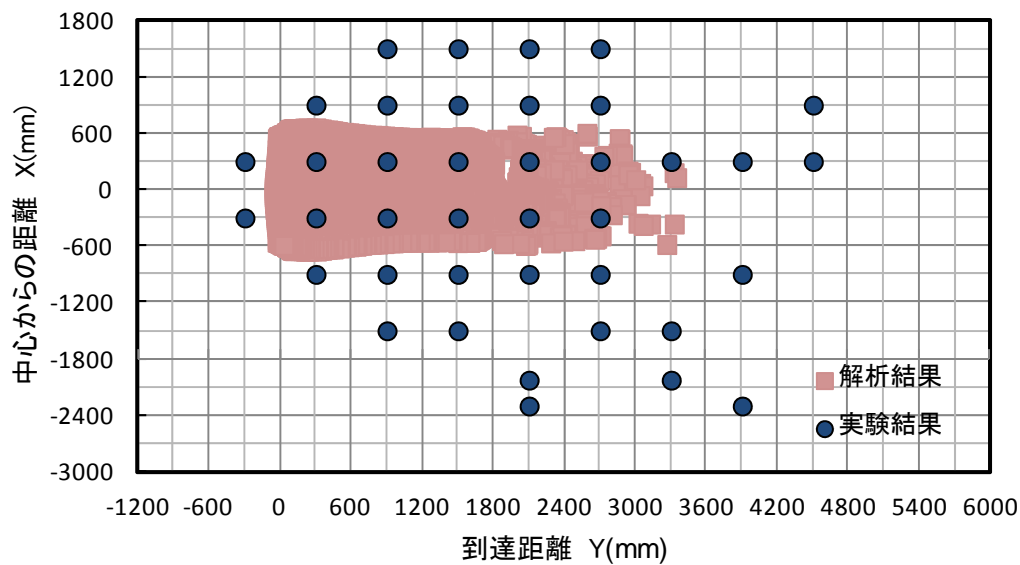


図 3.3.180 群の分布の比較

図 3.3.181、図 3.3.182 に Y 方向と X 方向の重量の頻度分布の比較を示す。Y 方向について、解析結果は実験結果に比べ到達距離が同等になった。一方、X 方向については、解析結果は拡がりをも過小評価した。これは、粒子 B の方が粒石単体による分散が大きく、解析ではこれらの挙動を再現できなかったことが原因と考えられる。

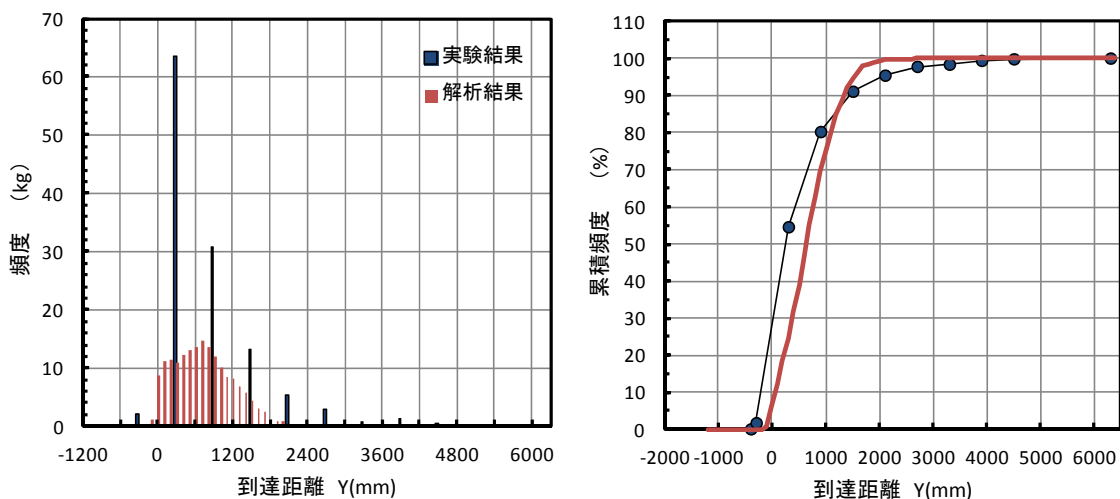


図 3.3.181 Y 方向の重量の頻度分布

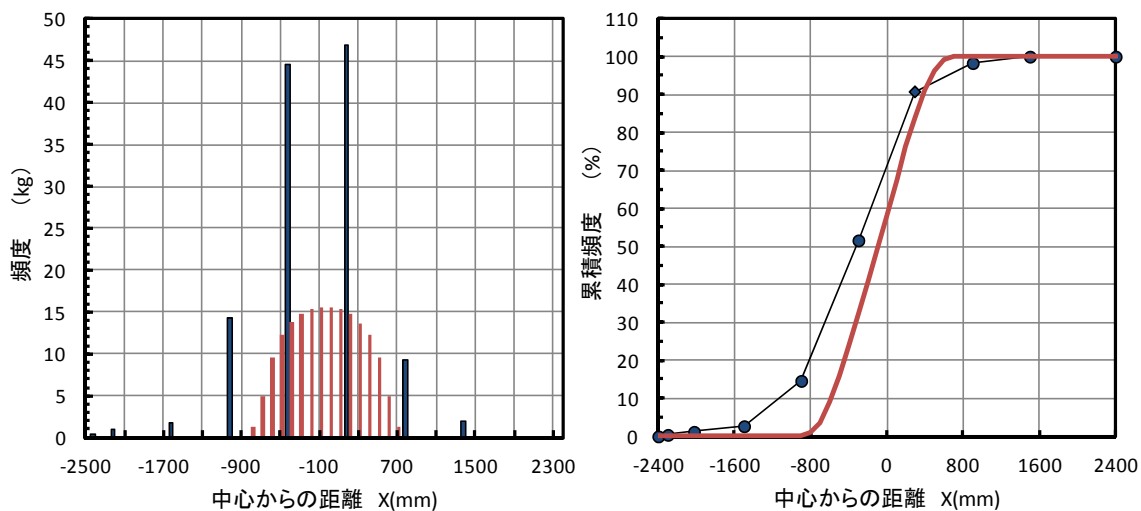


図 3.3.182 X 方向の重量の頻度分布

(5) ケース5 (勾配A、粒子B群、細粒分20% 水有)

図 3.3.183 に群の分布について比較した図を示す。解析結果は、実験結果に比べ拡がり小さい。これは、実験で見られた個別の粒石が分離した影響を解析では表現できていないためである。到達距離については、ケース3に比べると過小評価する傾向となった。

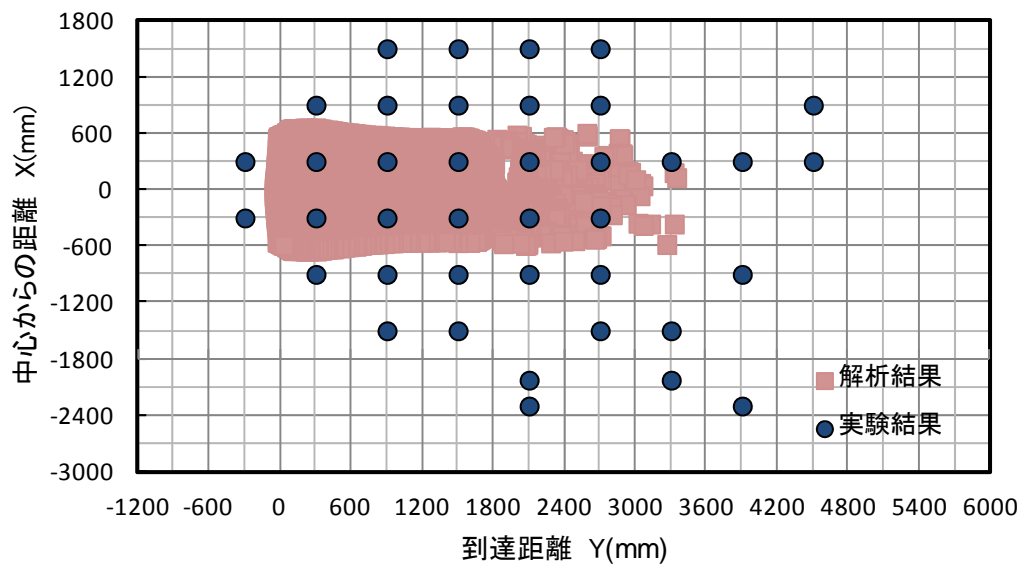


図 3.3.183 群の分布の比較

図 3.3.184、図 3.3.185 に Y 方向と X 方向の重量の頻度分布の比較を示す。Y 方向について、解析結果は実験結果に比べ到達距離が大きくなった。このことは、安全側の評価という点では良い結果である。一方、X 方向については、解析結果は拡がりをも過小評価した。これは、粒子 B の方が粒石単体による分散が大きく、解析ではこれらの挙動を再現できなかったことが原因と考えられる。

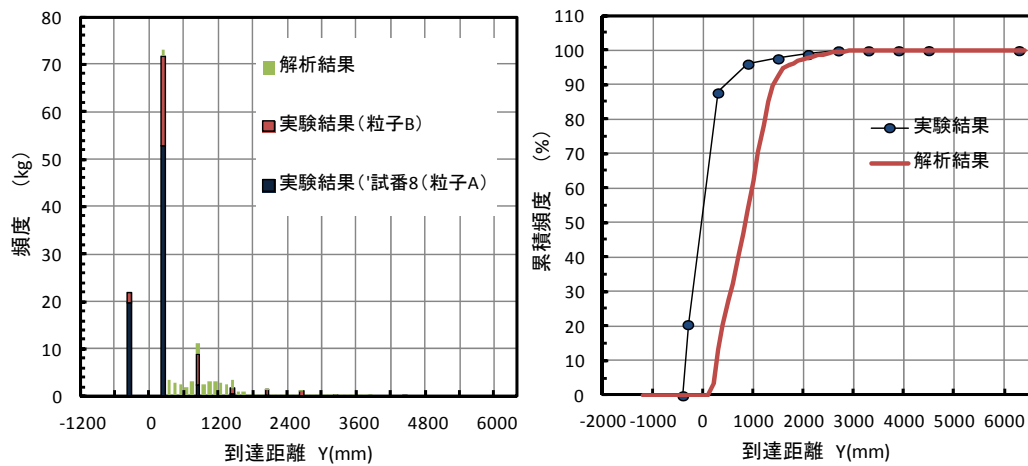


図 3.3.184 Y 方向の重量の頻度分布

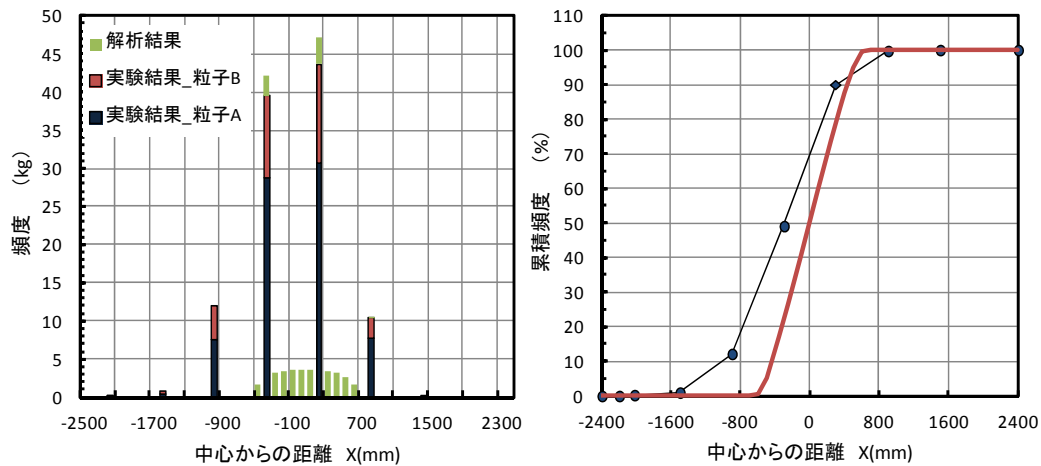


図 3.3.185 X 方向の重量の頻度分布

(6) ケース6 (勾配B、粒子B群、細粒分20%)

図 3. 3. 186 に群の分布について比較した図を示す。解析結果は、実験結果に比べ、到達距離、拡がりともに小さい。これは、実験で見られた個別の粒石が分離した影響を解析では表現できていないためである。

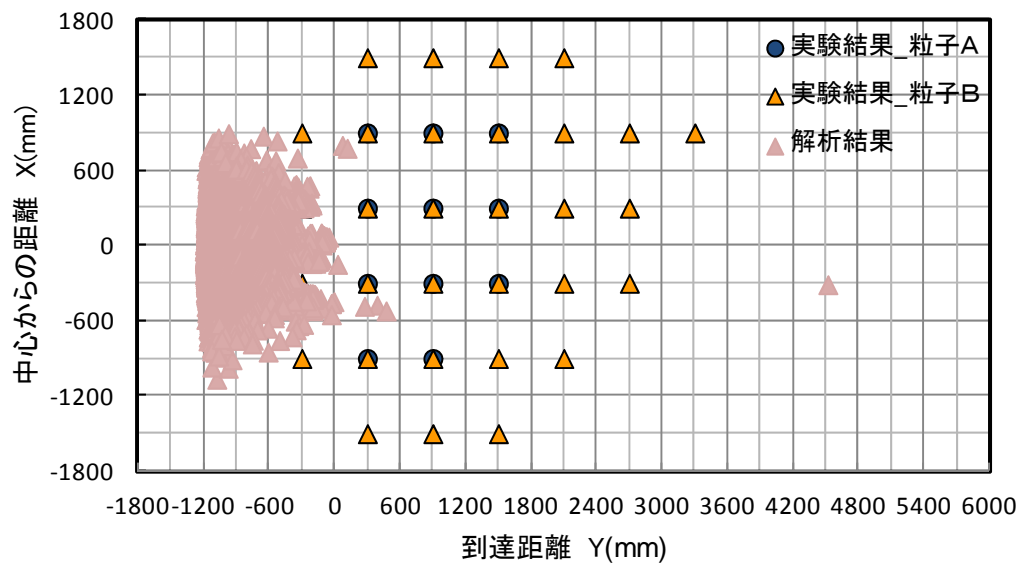


図 3. 3. 186 群の分布の比較

図 3.3.187、図 3.3.188 に Y 方向と X 方向の重量の頻度分布の比較を示す。Y 方向について、解析結果は実験結果に比べ到達距離が小さくなった。一方、X 方向については、解析結果は拡がりを実験結果より大きく評価した。よって、勾配が大きい場合については、到達距離過小評価する可能性がある。

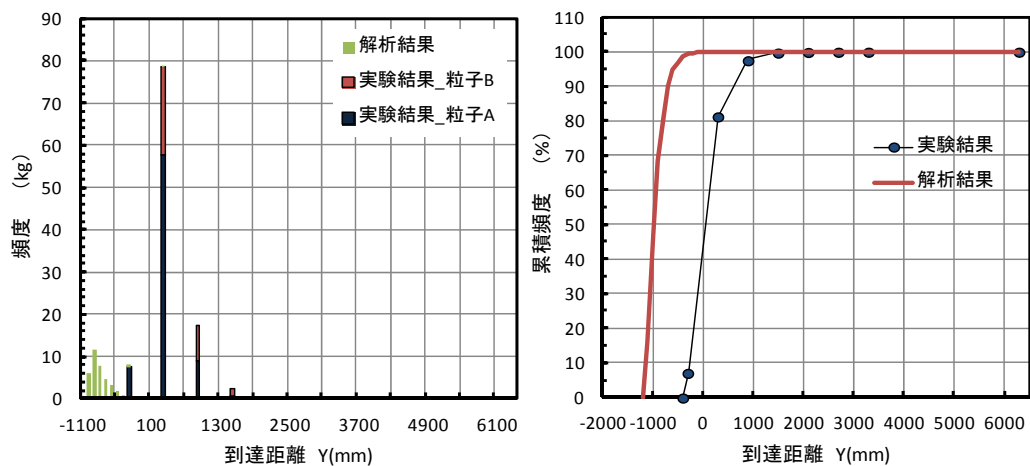


図 3.3.187 Y 方向の重量の頻度分布

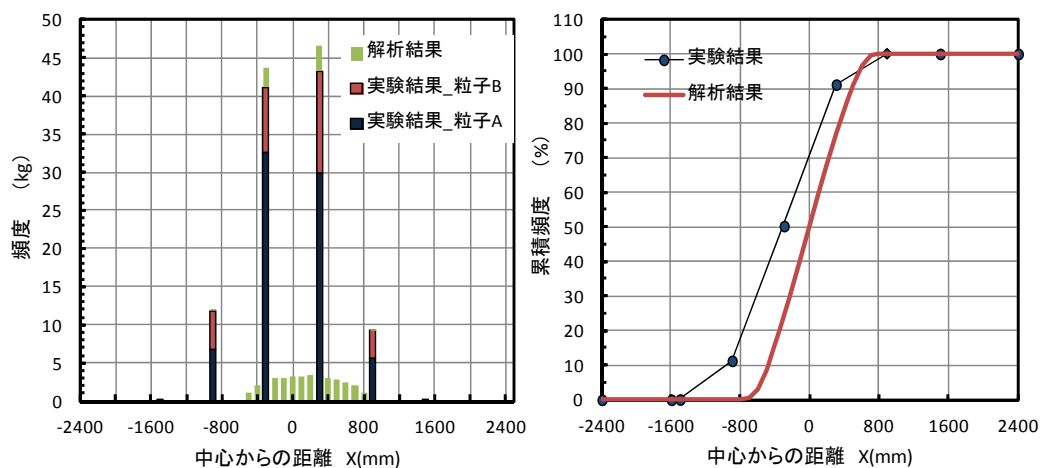


図 3.3.188 X 方向の重量の頻度分布

3. 4 試験データの情報整理

3. 4. 1 転動試験データの情報整理

(1) 概要

過年度に実施した転動実験において撮影された画像を用いて画像解析を行い、その結果の整理を行った。

過年度実施した転動実験は2ケース行っており、Case1は反力壁なし、Case2は反力壁ありの条件となっている。Case2については反力壁に衝撃荷重測定用のロードセルを取り付けることにより衝撃荷重が計測されている。

(2) 情報整理方法

①画像解析

以下に示す内容について、画像解析により得られた変位時刻歴を用いてデータ整理を行った。画像解析には、画像解析ソフト (ViewPoint) を用いた。

画像解析はPTV法を用い、岩塊の転動実験においては標点もしくは岩塊そのものを標点として、土砂の流動実験においては標点として土砂表面に複数設置した白色碎石の追跡を行い、変位時刻歴を求めた。

過年度に実施した転動実験では流路側面および俯瞰方向にそれぞれ2台ずつのカメラを設置して撮影を行った。ここでは、それら全てのカメラで撮影された画像を用いてに画像解析を行った。

②岩塊転動に関する実験結果のデータ整理

岩塊の転動実験結果については画像解析によって得られた変位時刻歴を元に以下の項目について整理を行った。

- ・岩塊の軌跡履歴

画像解析の結果得られた変位時刻歴データより作成した。

- ・岩塊の速度履歴

画像解析の結果得られた変位時刻歴データを撮影周波数で除することにより速度を求めた。

- ・岩塊の角速度の履歴

岩塊に複数マーキングした標点相互の変位時刻歴を元に回転角を求め、移動速度で除することにより速度を求めた。

- ・岩塊の転動係数の履歴

上記角速度を用いて下式により求めた。

$$Cr = \frac{\omega\gamma}{v} \quad (3.4.1)$$

ここで、Cr：転動係数

ω ：角速度

γ ：岩塊の半径

v ：衝突面に平行な速度

- ・岩塊の衝撃荷重と速度の関係（Case 2のみ）

画像解析結果の変位時刻歴より求めた衝撃荷重および、反力壁に取り付けたロードセルによって計測された衝撃荷重の、画像解析結果により求めた速度との関係を比較した。

③土砂流動に関する実験結果のデータ整理作業

土砂の流動実験結果については画像解析によって得られた変位時刻歴を元に以下の項目について整理を行った。

- ・土砂の軌跡履歴

画像解析の結果得られた変位時刻歴データにより作成した。

- ・土砂の速度履歴

画像解析の結果得られた変位時刻歴を撮影周波数で除することにより速度を求めた。

- ・土砂の衝撃荷重と速度の関係 (Case 2 のみ)

反力壁に取り付けたロードセルによって計測された衝撃荷重と、画像解析結果により求めた速度との関係を比較した。

表 3.4.1 に各ケース毎に解析を行った試番と試験内容、試番ごとにデータ整理を行った内容の一覧表を示す。

表 3.4.1 Case1 解析を行った試番と試験・データ整理内容一覧

試番	ケース	実施日	試験回数	岩塊模型	サイズ	落下方向	備考	画像データの有無				画像解析	検討内容		
								撮影位置							
								流路側面	ビット内	流路見下げ	ビット見下げ		変位履歴	地点速度	回転角/転動係数
1	岩塊単体 標点無	20131204	1	球形	20cm		転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
2				塊状	20cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
3				板状	20cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
4			球形	40cm		転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-	
5			塊状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-	
6			板状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-	
7			球形	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
8			塊状	20cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
9			板状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-	
10			塊状	40cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
11			球形	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
12			板状	40cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-	
13			球形	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
14			塊状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-	
15			板状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-	
16			球形	40cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
17			塊状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
18			板状	40cm	平面上	滑動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-	
19			球形	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
20			塊状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-	
21			板状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-	
22			球形	40cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
23			塊状	40cm	平面上	滑動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-	
24			板状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-	
25			塊状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-	
26			板状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-	
27			塊状	20cm	縦	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-	
28	塊状	40cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-			
29	板状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
30	塊状	40cm	縦	滑動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-			
31	球形	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
32	塊状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-			
33	板状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
34	球形	40cm		転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-			
35	塊状	40cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-			
36	板状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
37	球形	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
38	塊状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-			
39	板状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-			
40	球形	40cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
41	塊状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
42	板状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
43	球形	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
44	塊状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
45	板状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-			
46	球形	40cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
47	塊状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
48	板状	40cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-			
49	球形	20cm		転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-			
50	塊状	20cm	平面上	滑動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-			
51	板状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	-			
52	塊状	20cm	縦	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
53	塊状	40cm	縦	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
54	板状	40cm	平面上	滑動多	○	○	○	○	○	○	○	-			
55															
56	碎石	20131206	1												
57			2												
58			3												
59	土砂	20131209	1												
60			2												
61			3												
62			4												
63	複数岩塊 ±土砂	20131212	1												
64			2												
65				球形	20cm		転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
66				塊状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
67				板状	20cm	平面上	側面衝突	○	○	○	○	○	○	○	○
68				板状	20cm	平面上	30度部で停止	○	○	○	○	○	○	○	○
69				球形	40cm		転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
70				塊状	40cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
71				板状	40cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	-	-	-	○
72				球形	20cm		転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
73				塊状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
74				板状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
75				塊状	40cm		転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
76				板状	40cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
77	岩塊単体 (アングル付)	20131213		球形	40cm	平面上	転動多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
78				球形	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	○
79				塊状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	○	○	○	○
80				板状	20cm	平面上	30度部で停止	○	○	○	○	○	○	○	○
81				板状	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	○
82				球形	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	○	○	○	○
83				塊状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	過年度実施	-	-	-
84				球形	20cm		転動多	○	○	○	○	○	○	○	○
85				塊状	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	○	○	○	○
86				板状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	○
87				球形	20cm	平面上	転動多	○	○	○	○	○	○	○	○
88				塊状	20cm	平面上	転動やや多	○	○	○	○	○	○	○	○

(3) 整理したデータ例

以下に整理したデータ例を示す。全データのデジタルデータについては、別途提出した記憶媒体に保存している。

①岩塊転動実験の整理データ例（試番 31）



図 3.4.1 Case1 試番 31 流路側面

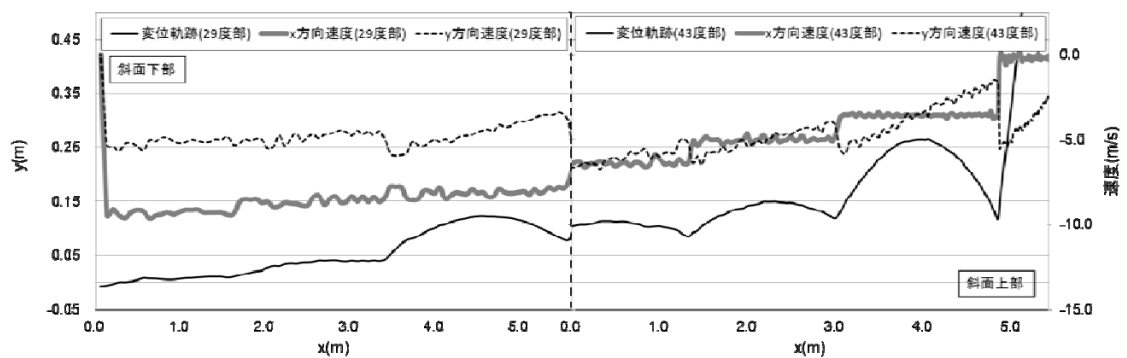


図 3.4.2 変位・速度履歴（流路側面）

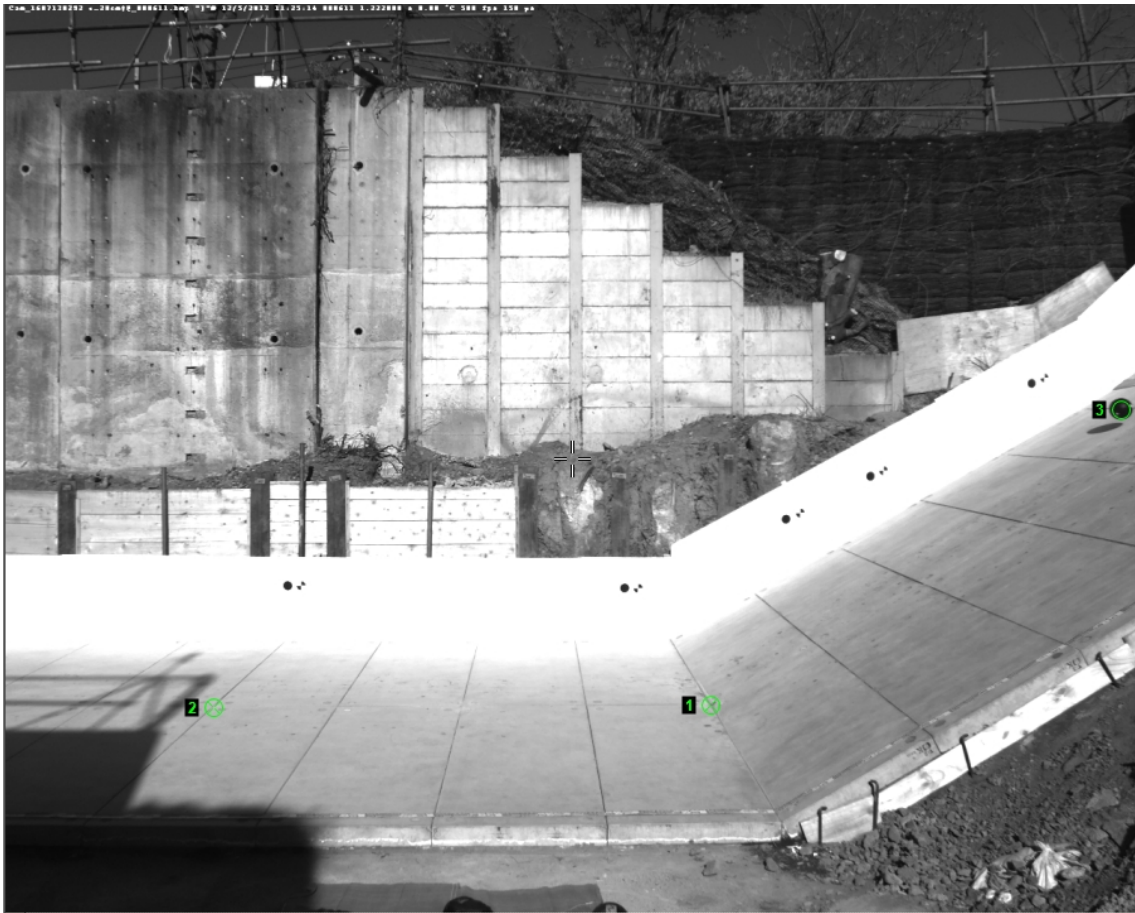


図 3.4.3 Case1 試番 31 ピット内側面

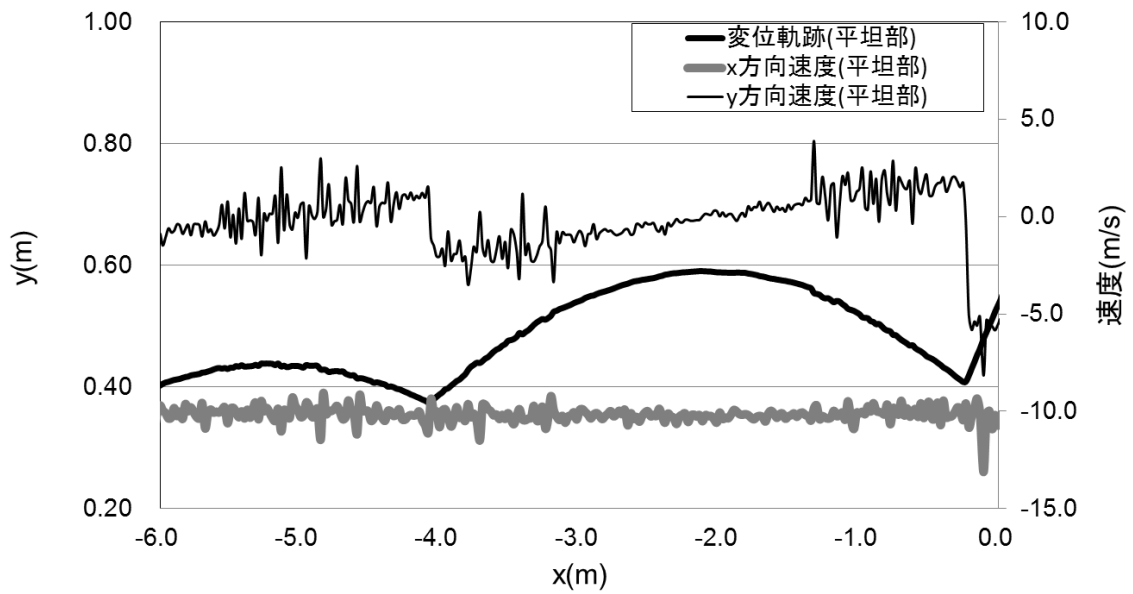


図 3.4.4 変位・速度履歴 (ピット内側面)

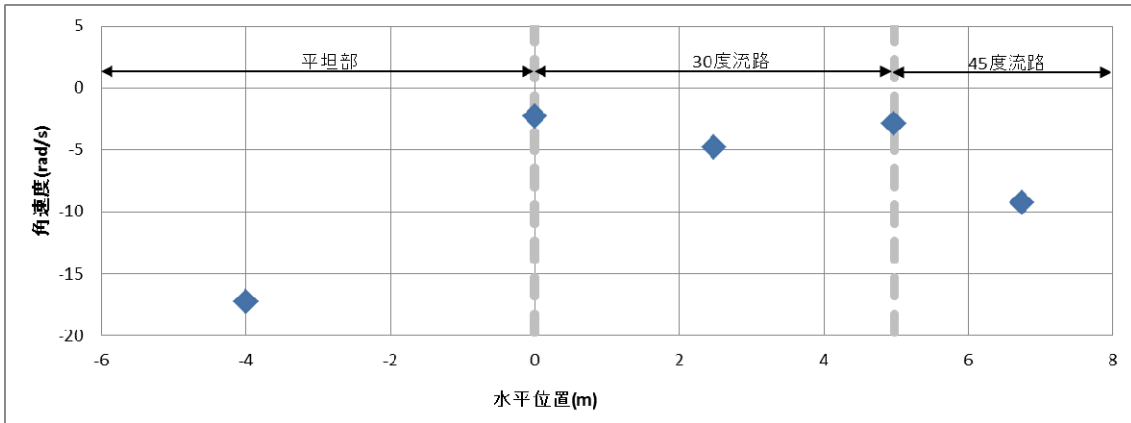


図 3.4.5 角速度 (側面)

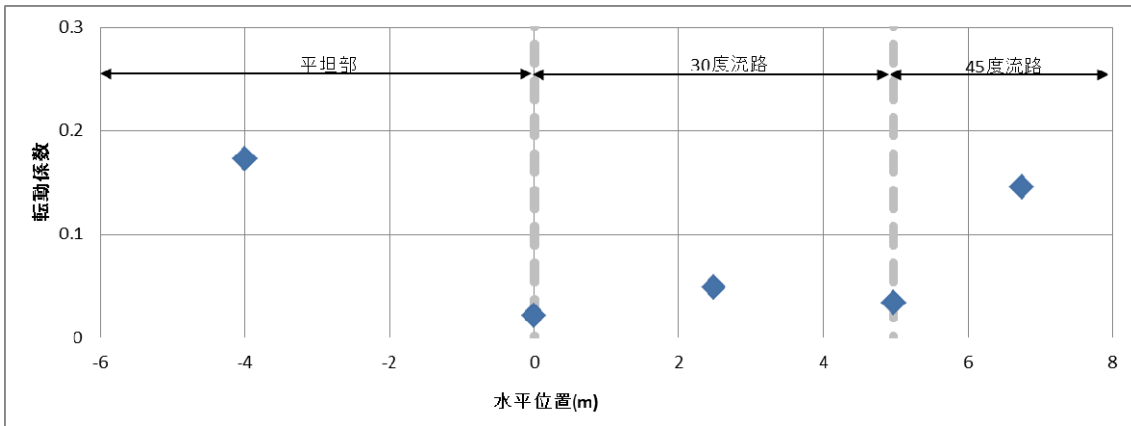


図 3.4.6 転動係数 (側面)

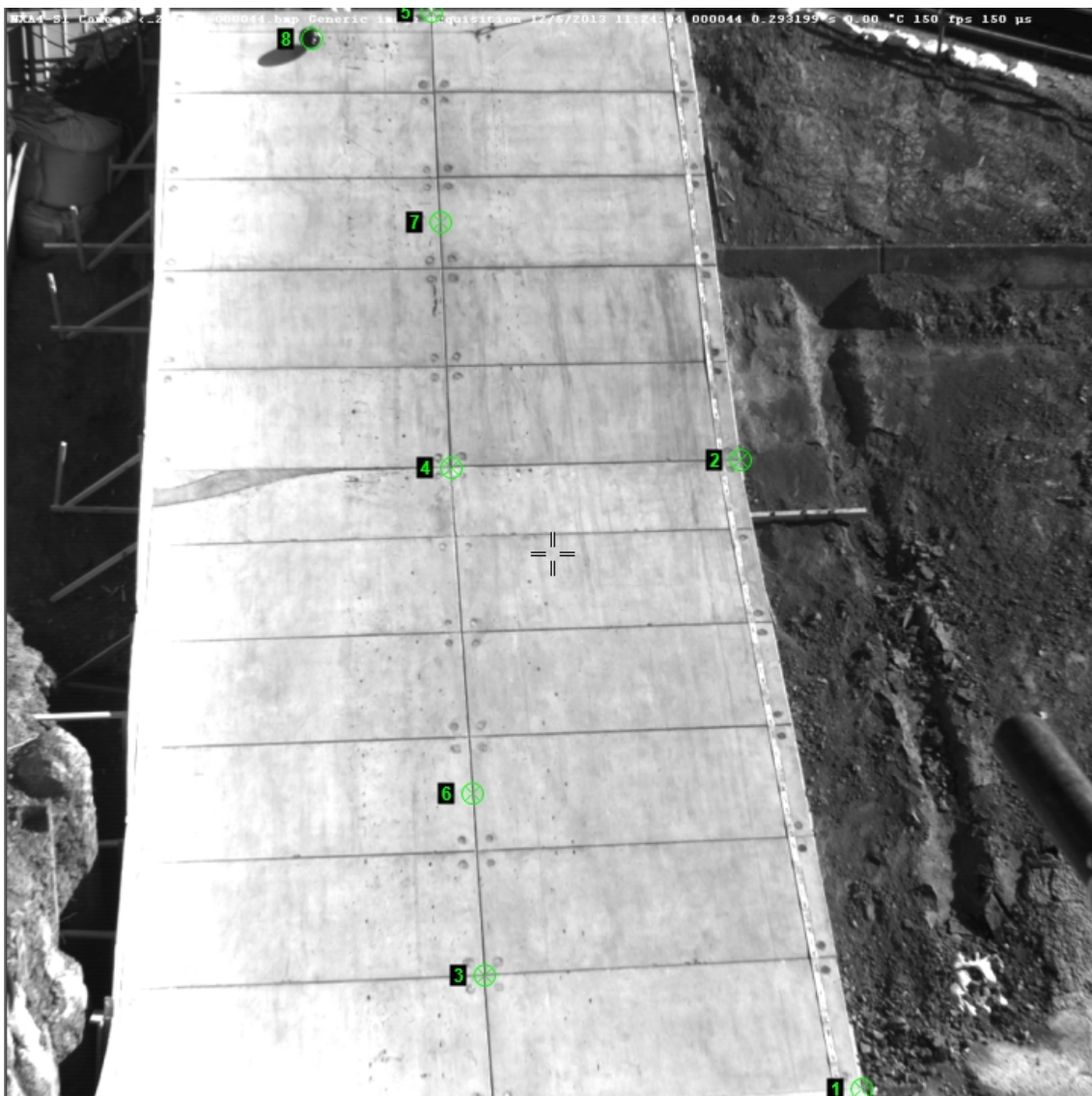


図 3.4.7 Case1 試番 31 流路見下げ

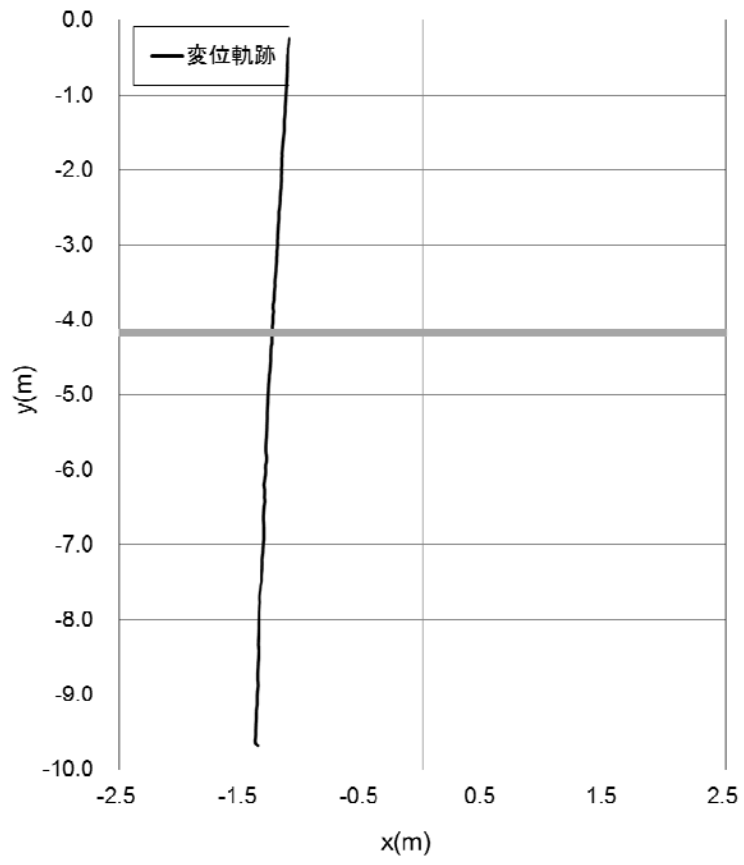


図 3. 4. 8 変位履歴 (流路見下げ)

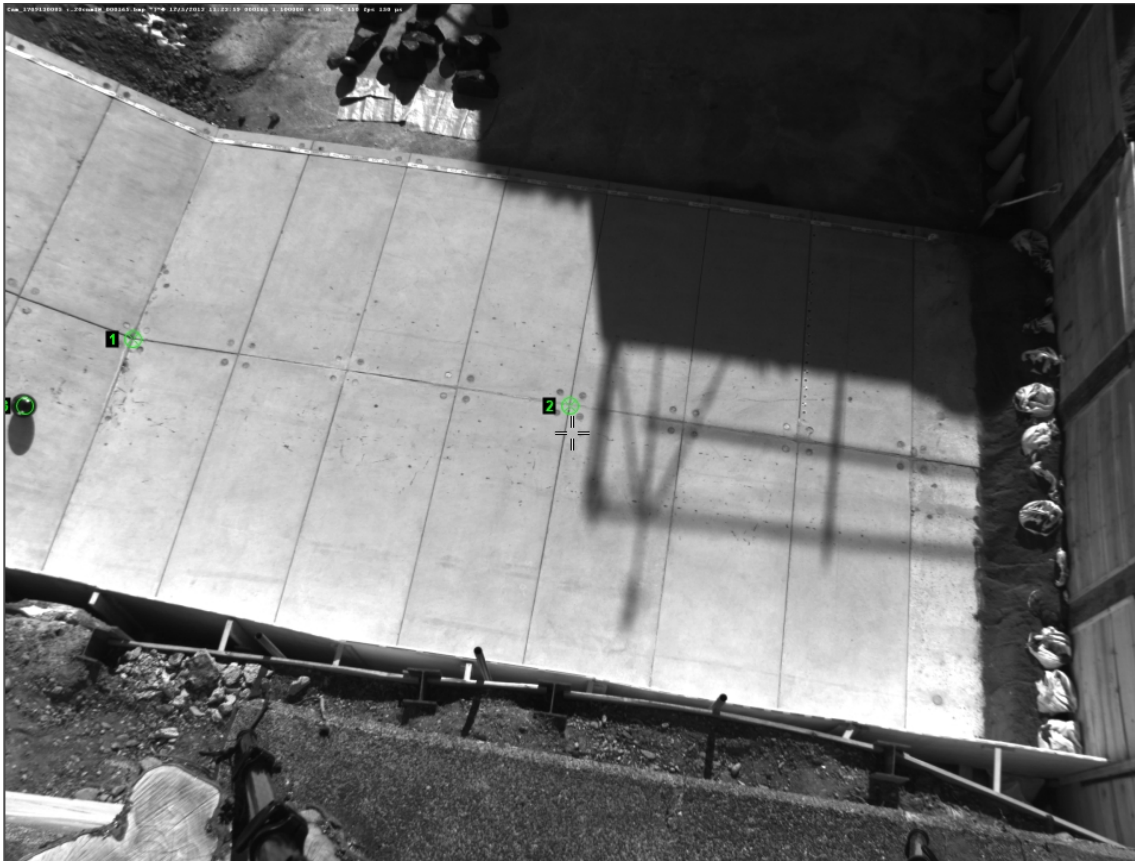


図 3. 4. 9 Case1 試番 31 ピット内見下げ

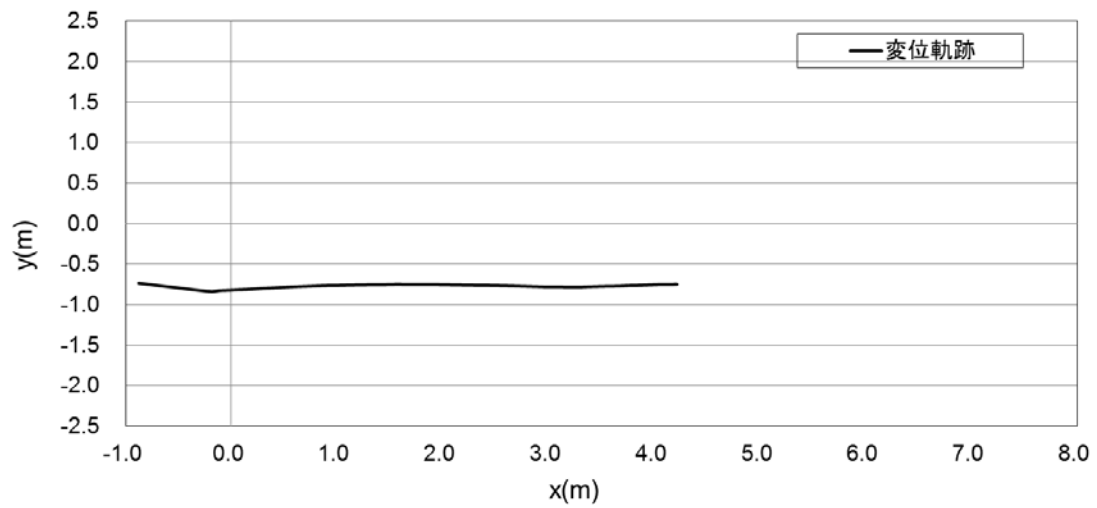


図 3. 4. 10 変位履歴 (ピット内見下げ)

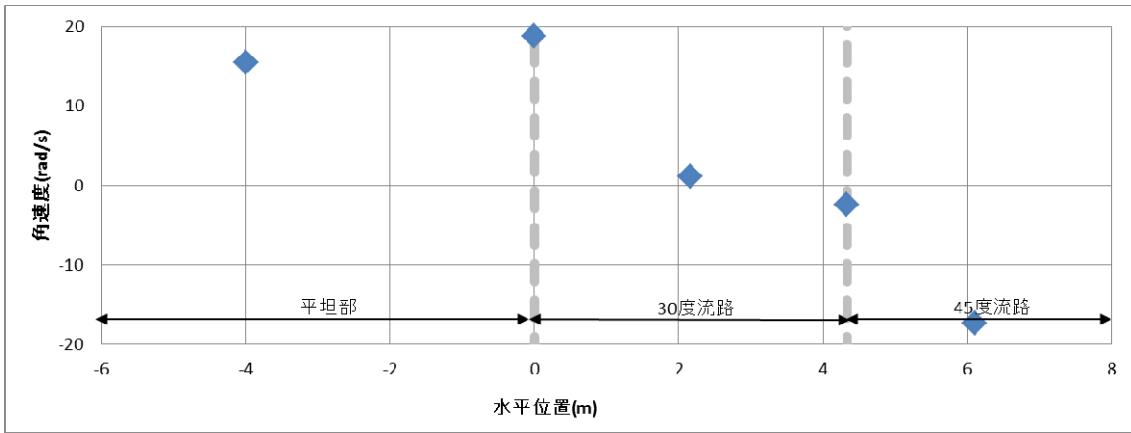


図 3.4.11 角速度 (見下げ)

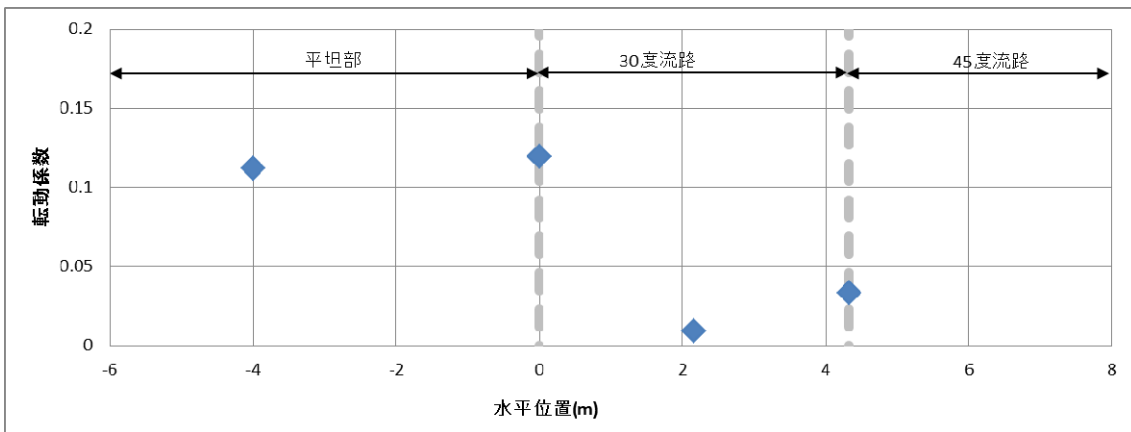


図 3.4.12 転動係数 (見下げ)

②土砂流動実験の整理データ例（試番 55）



図 3. 4. 13 Case1 試番 55 流路側面

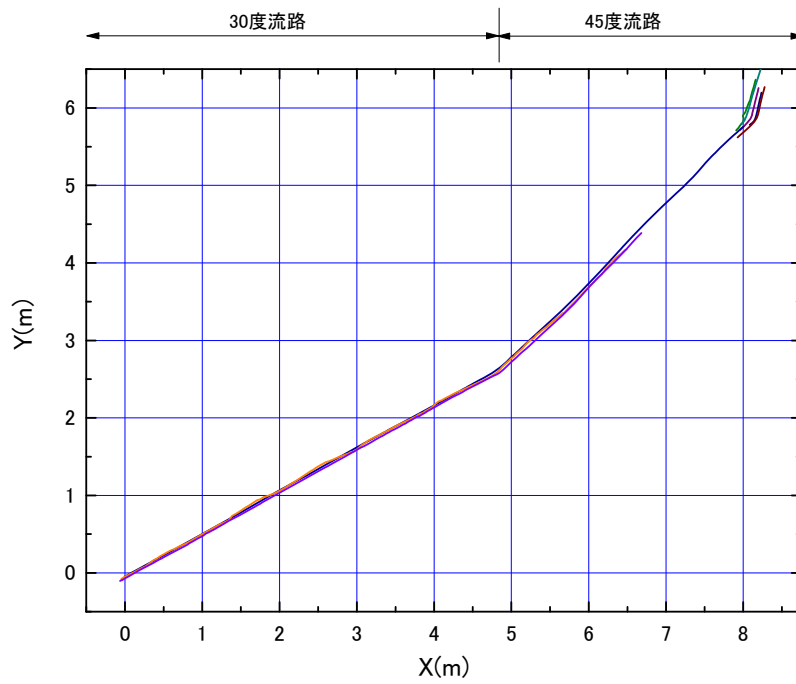


図 3. 4. 14 変位履歴（流路側面）

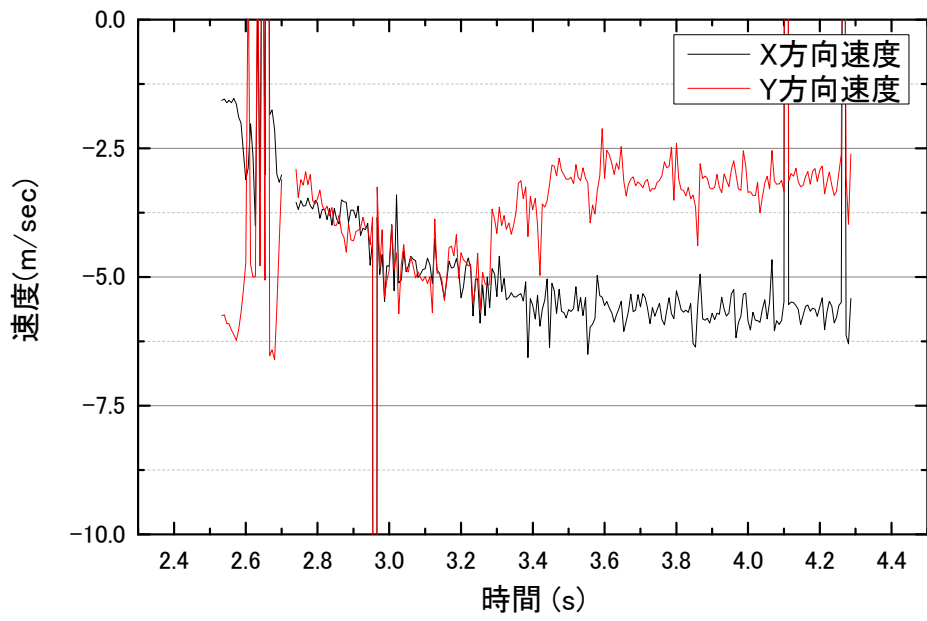


図 3.4.15 速度履歴 (流路側面)

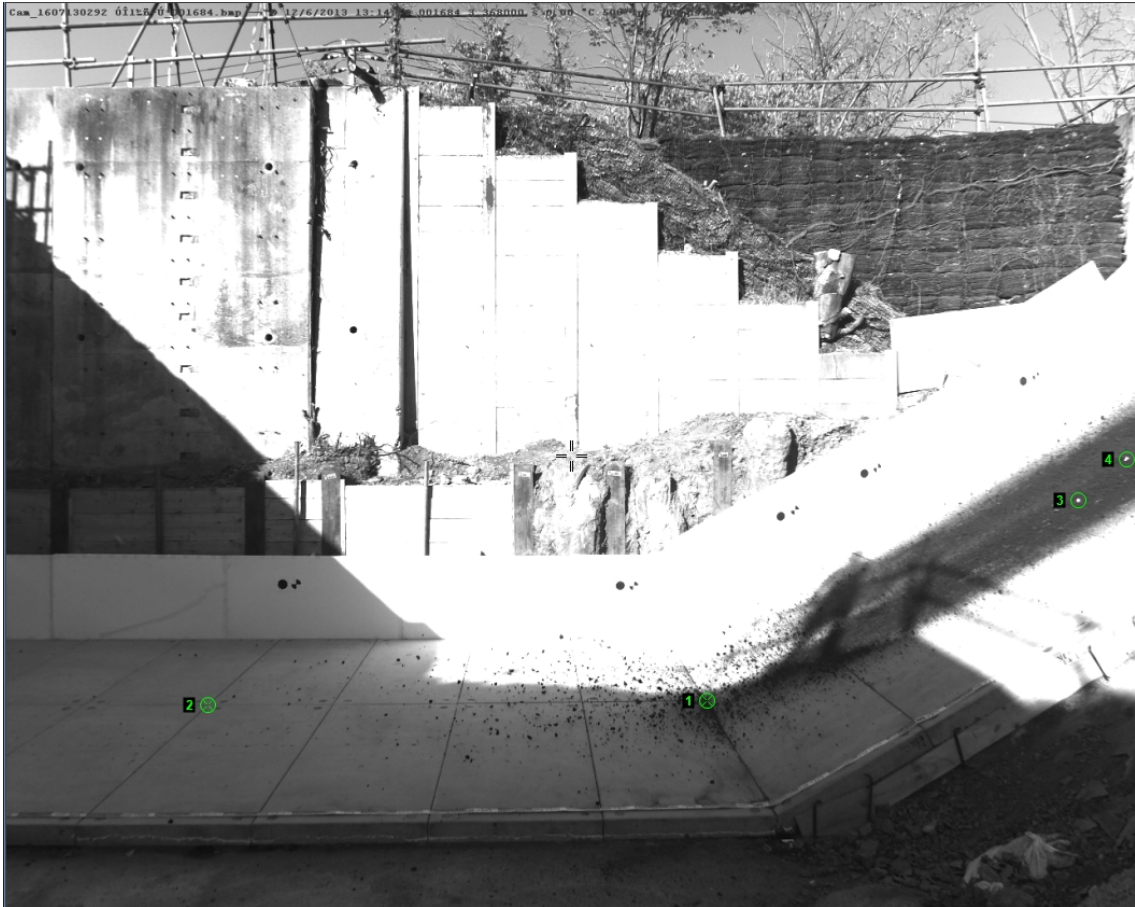


図 3.4.16 Case1 試番 55 ピット内側面

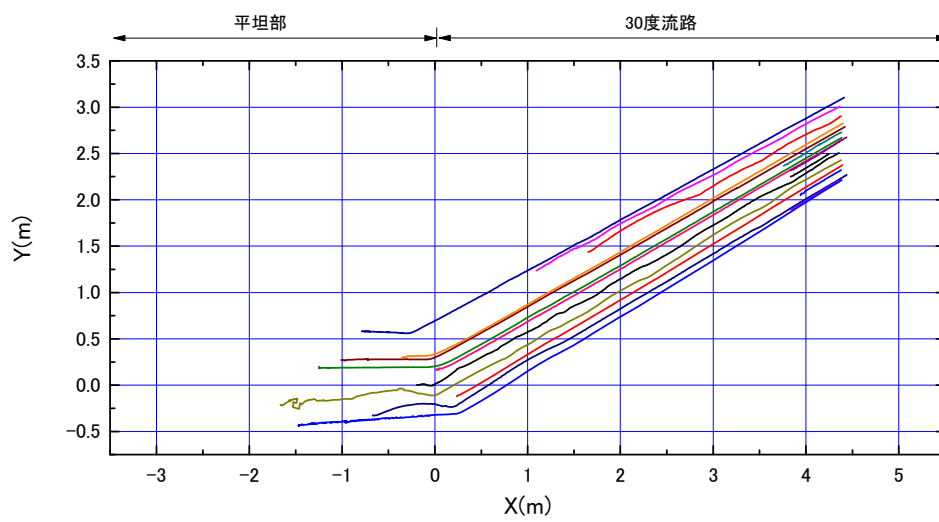


図 3.4.17 変位履歴 (ピット内側面)

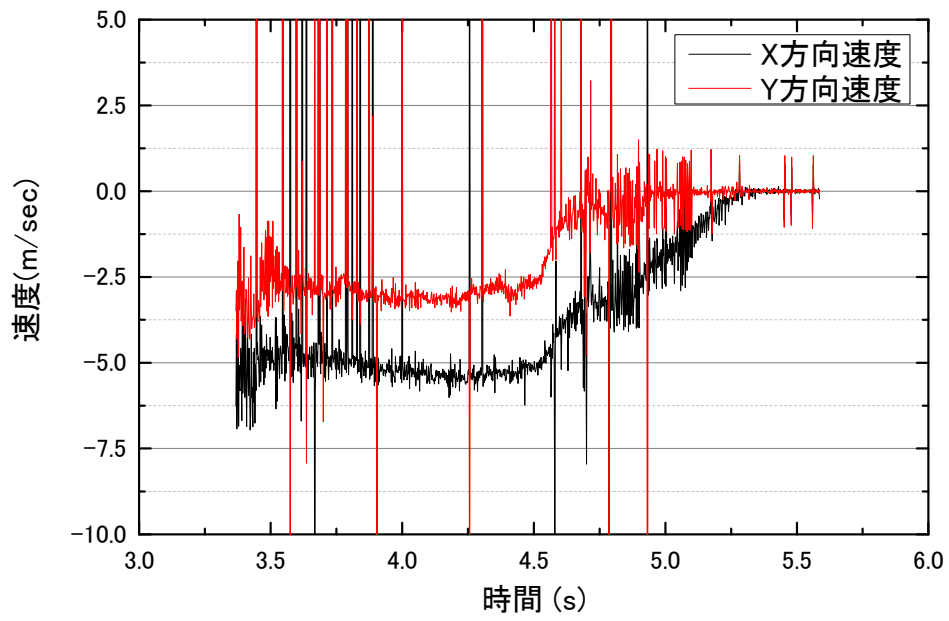


図 3.4.18 速度履歴 (ピット内側面)

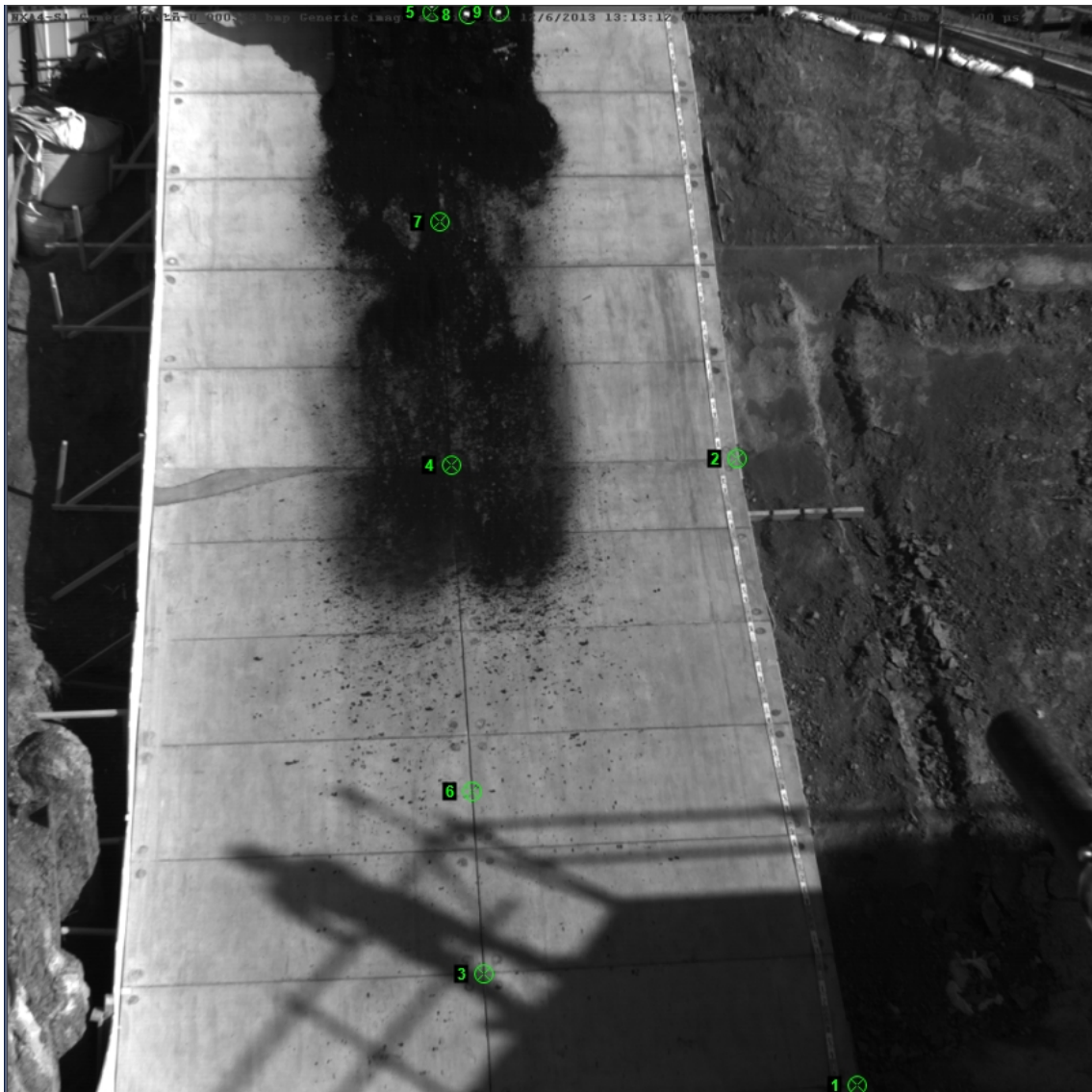


図 3. 4. 19 Case1 試番 55 流路見下げ

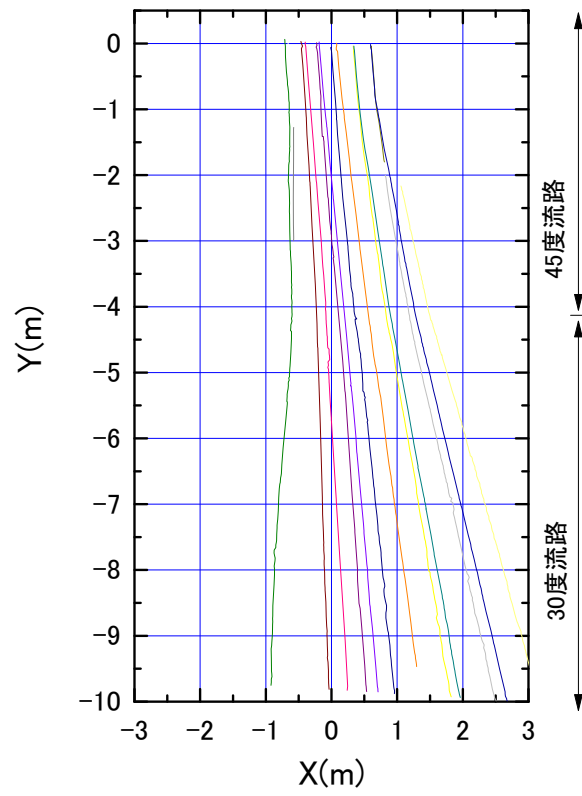


図 3. 4. 20 変位履歴 (流路見下げ)



図 3.4.21 Case1 試番 55 ピット内見下げ

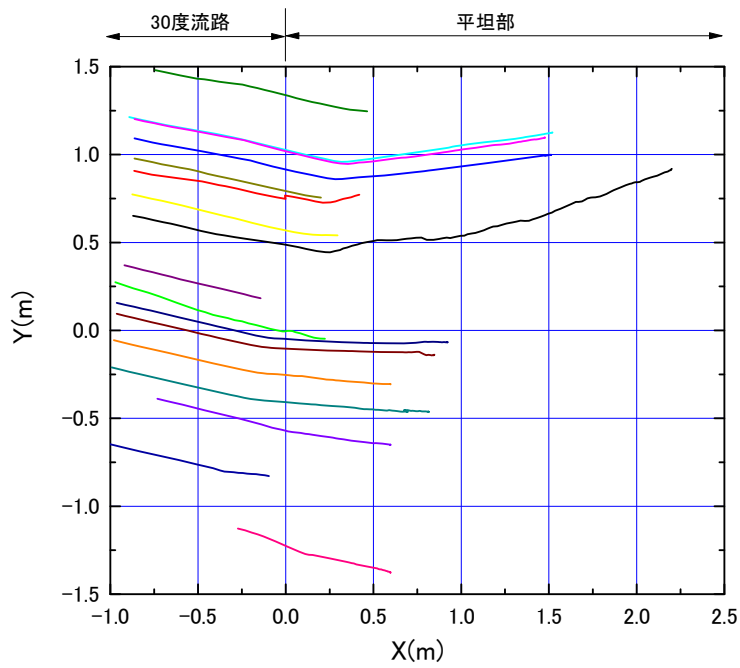


図 3.4.22 変位履歴 (ピット内見下げ)

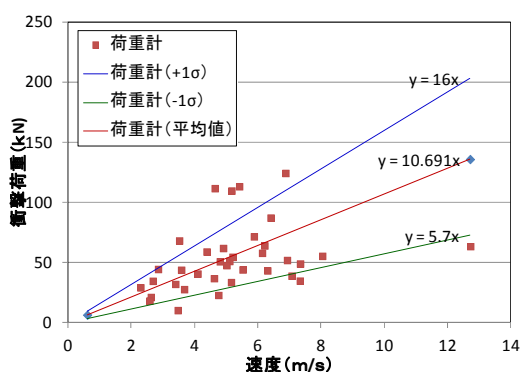
(4) データ分析

H25 年度実施の実物大斜面による転動実験結果を用いて岩塊の衝突荷重とその挙動に関する分析を行った。

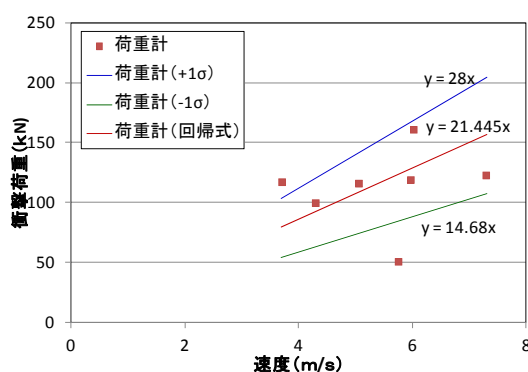
① 突荷重と岩塊速度との関係

荷重計から得られた衝突荷重と画像解析データから得られた岩塊速度により衝突荷重と岩塊速度との関係を示す。

・ 塊状



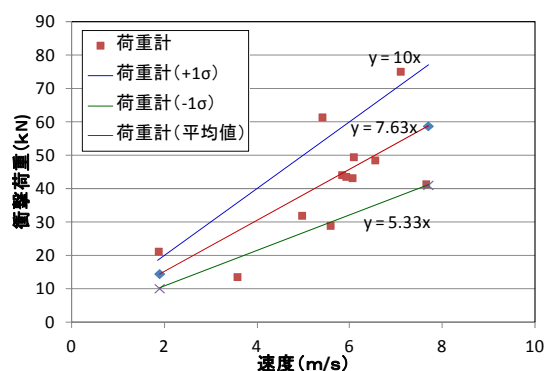
(a)塊状 20cm



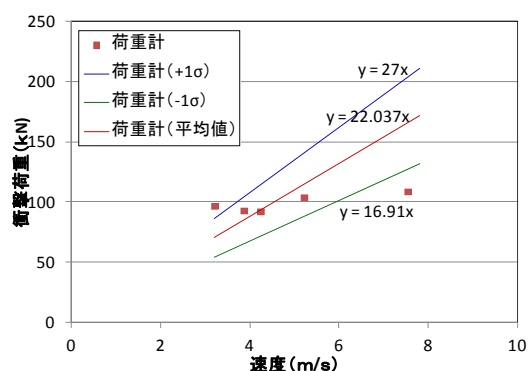
(b)塊状 40cm

図 3.4.23 塊状における衝突荷重と速度との関係

・ 板状



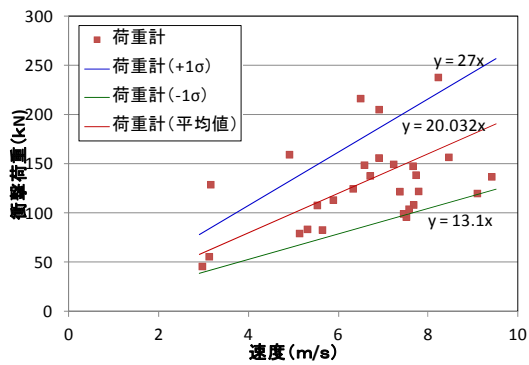
(a)板状 20cm



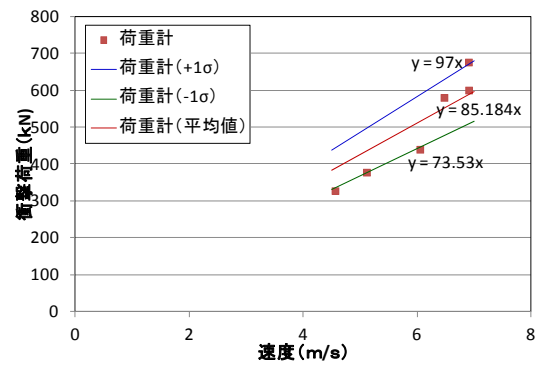
(b)板状 40cm

図 3.4.24 板状における衝突荷重と速度との関係

・球形



(a)球形 20cm



(b)球形 40cm

図 3.4.25 球形における衝突荷重と速度との関係

②現設計に用いられている設計式との比較

現在、岩塊の落下により構造物に作用する衝突荷重は、落石対策便覧に準拠し、式-1にて求められている。式-1は球状の2つの弾性体が衝突するときの衝突現象を、Hsrtz衝突理論式を適用した式である。

岩塊の形状は様々であり、岩塊の衝突荷重を適切に評価することは、原子力施設へのリスク評価において重要である。そこで本検討では、落石対策便覧による落石の衝撃力の算定式を基本とした岩塊の衝突荷重に関する算定式（以降、提案式と称する）の提案を目的に、大型転動試験より得られた衝突荷重の実測値と設計式より算出した衝撃荷重の同定を行い、提案式の構築について検討を行った。式-1は球状の弾性体の衝突現象に基づき構築された式であることから、まずは、球形岩塊の実測値から得られた回帰式（平均値）との検証を行った。検証では、その回帰式に対して、設計式が一致または近い値を取るようラメ定数 λ をパラメーターとしてフィッティングを行った。ラメ定数とは、弾性係数の一つで、応力変化を与えたとき、弾性体の軸方向、せん断方向への変化のしやすさを表す定数である。すなわち、衝突する対象の材質により変化する定数である。次に、フィッティング後のラメ定数を用いた設計式に衝突荷重のばらつきを考慮した係数 α を新たに設け、実測値のばらつきの影響を考慮した回帰式（平均値に対する $+1.0\sigma$ ）とのフィッティングを行った。その結果、ラメ定数を 500MN/m^2 、衝突荷重のばらつきを考慮した係数 $\alpha=1.3$ とすることにより概ね実測値と設計式が近似することを確認した。なお、ラメ定数の値は、落石対策便覧によれば、衝突対象の固さに応じて $1000\text{ kN/m}^2\sim 10000\text{ kN/m}^2$ の値が示されているが、既往の文献によれば、コンクリートに衝突させた場合の実験において、ラメ定数の値を 120MN/m^2 にすることで設計式による衝撃力の評価を行った報告がなされていることから、岩塊をコンクリート製の反力壁に衝突させた本検討においても、ラメ定数を 500MN/m^2 にすることで衝突荷重の評価が可能と判断した。この係数を考慮した設計式を球形岩塊の提案式①（式-2）とする。

$$P_{max}=2.108 (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (\text{式-1})$$

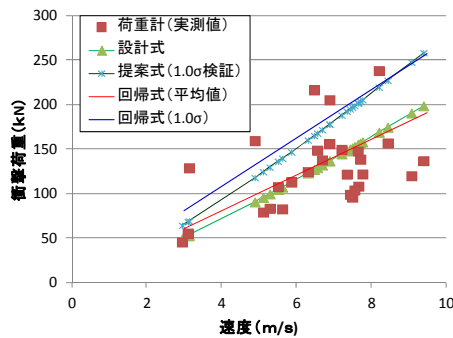
ここに、 m : 落石質量 (t)

H : 落下高さ ($=V^2/2g$) (m)

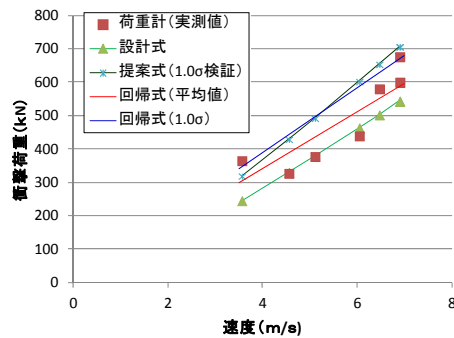
V : 速度 (m/s)

g : 重力加速度 (m/s^2)

λ : ラメ定数 (kN/m^2)



(a)球形 20cm



(b)球形 40cm

図 3.4.26 球形の提案式①に関する検証結果

$$P_{max} = \alpha \cdot 2.108 (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (\text{式-2 : 提案式①})$$

ここに、 m : 落石質量 (t)

H : 落下高さ ($= V^2/2g$) (m)

V : 速度 (m/s)

g : 重力加速度 (m/s^2)

λ : ラーメ定数 (500MN/m^2)

α : 衝突荷重のばらつきを考慮した係数 (1.3)

③他の形状への提案式の適用

②では、球形岩塊についての新たな設計式を提案した、しかしながら、岩塊形状は様々であり、実測値にも見られるように、球形岩塊と塊状・板状岩塊は同様な荷重分布を示していないことから、この提案式①を他の岩塊形状へ適用することは、妥当とは言い難い。この理由は明確ではないが、一つの理由としては、岩塊の挙動は球形のように直線的な挙動を示すだけではなく、転動実験結果からも分かるように、その形状により挙動が一様ではないことから、岩塊の形状による影響があるものと推察される。

そこで、ラーメ定数を 500MN/m^2 とした設計式に岩塊の形状のばらつきを考慮した係数 β を設定し、塊状による衝突荷重の実測値から得られた回帰式 (平均値) に対して同定を行った。さらに、球形の検討と同様に、衝突荷重のばらつきを考慮した係数 α を設定し、回帰式 (平均値に対する $+1.0\sigma$) に対する同定を行った。その結果、ラーメ定数を 500MN/m^2 、衝突荷重のばらつきを考慮した係数 $\alpha=1.6$ 、岩塊の形状を考慮した係数 $\beta=0.5$ とすることにより概ね実測値と提案式が

近似することを確認した。また、板状についても塊状と同様に同定を行い、 $\alpha=1.7$ 、 $\beta=0.4$ とすることで概ね実測値と提案式が近似することを確認した。これらの係数を考慮した設計式を塊状岩塊の提案式②（式-3）とする。

$$P_{max} = \alpha \cdot \beta \cdot 2.108 (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (\text{式-3 : 提案式②})$$

ここに、 m : 落石質量 (t)

H : 落下高さ ($= V^2/2g$) (m)

V : 速度 (m/s)

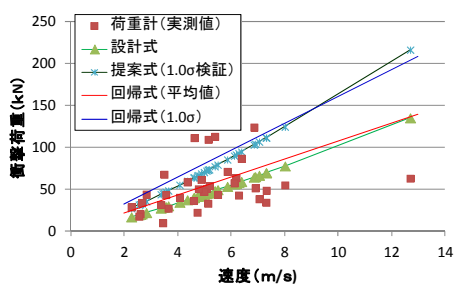
g : 重力加速度 (m/s²)

λ : ラーメ定数 (500MN/m²)

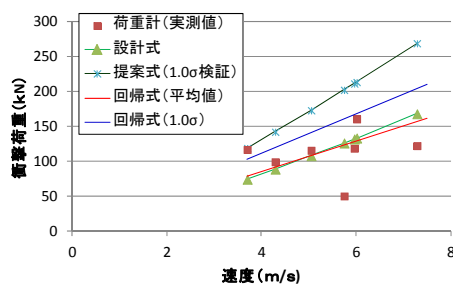
α : 衝突荷重のばらつきを考慮した係数

(塊状 1.6, 板状 1.7)

β : 岩塊の形状を考慮した係数 (塊状 0.5, 板状 0.4)

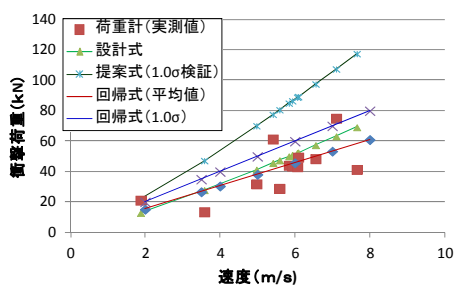


(a)塊状 20cm

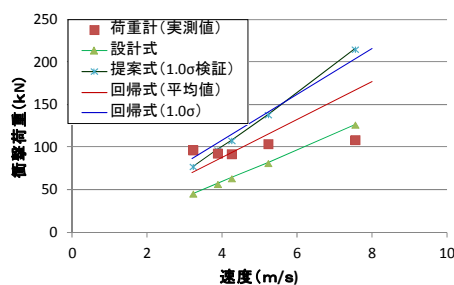


(b)塊状 40cm

図 3.4.27 塊状の提案式②に関する検証結果



(a)板状 20cm



(b)板状 40cm

図 3.4.28 板状の提案式③に関する検証結果

④岩塊挙動に関する分析

速度変化率と転動係数の関係を岩塊模型標点有のケースを用いて分析した。使用したデータは流路側面から撮影した画像解析データを用いた。速度変化率（式-4）と転動係数の関係を示す。速度変化率は以下のように設定した。赤丸は、滑動したケースを示す。この結果、転動係数が小さいほど、速度変化率が負の値に大きくなる傾向を示した。

$$\text{速度変化率} = (b - a) / a \times 100 \text{ (式-4)}$$

ここに、 a : 平坦部到達位置での速度 (m/s)

b : 平坦部到達位置から 4 m位置での速度 (m/s)

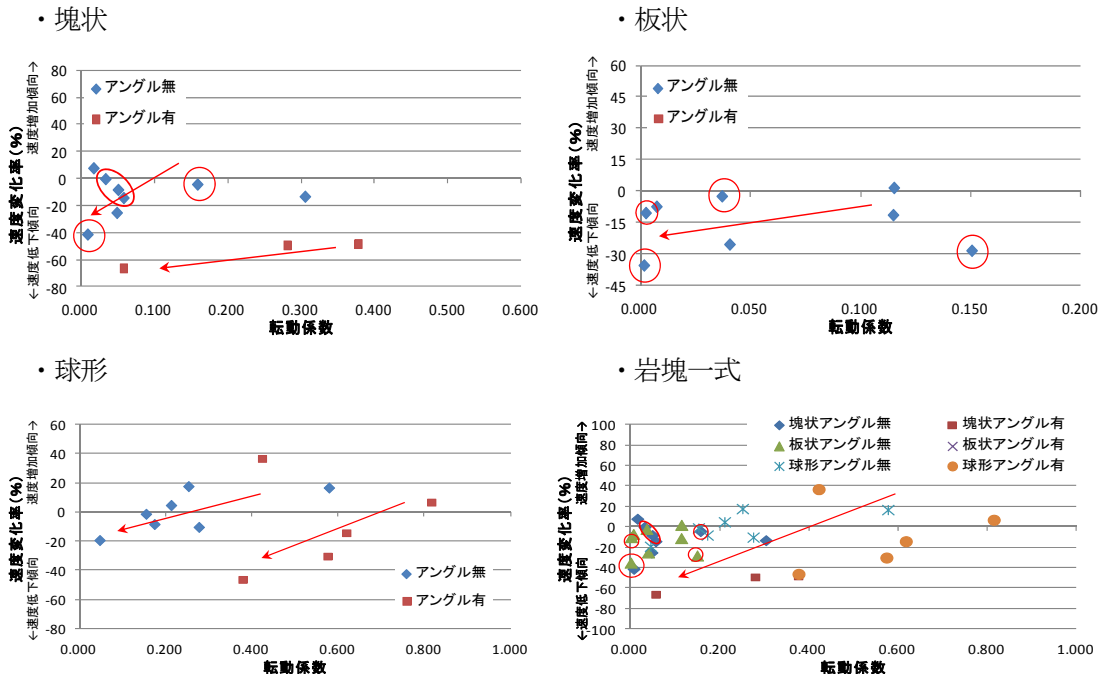


図 3.4.29 角速度と転動係数の関係

次に、角速度と岩塊速度の関係を岩塊模型標点ありのケースを用いて分析した。使用したデータは流路側面から撮影した画像解析データを用いた。角速度と岩塊速度の関係を示す。この結果、速度が大きいと角速度が大きくなる傾向を示し、アングル有は、アングル無より角速度/速度（傾き：転動係数）が大きい傾向を示した。

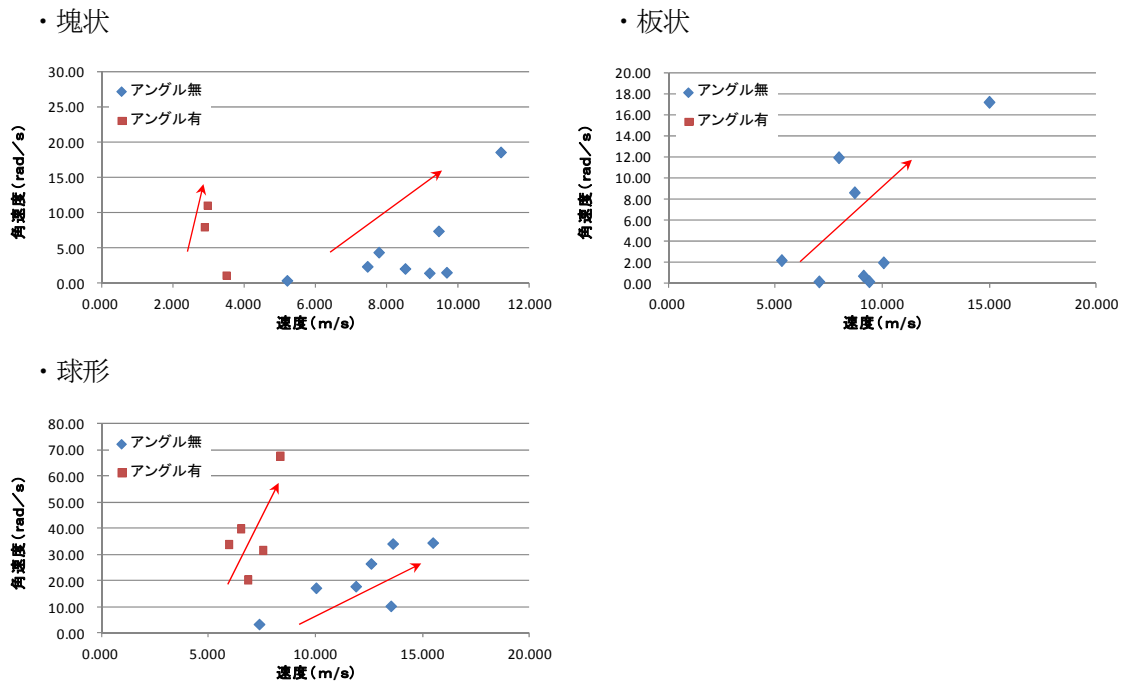


図 3.4.30 角速度と岩塊速度の関係

⑤計測荷重に関する荷重計と画像解析の差異についての分析

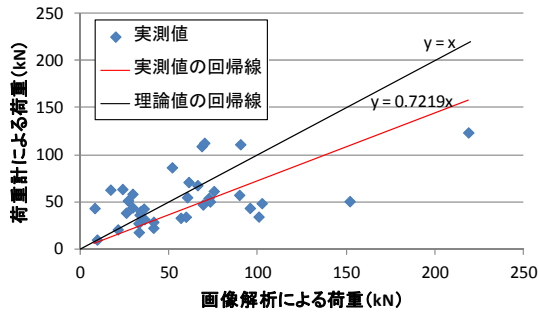
本転動試験では、岩塊の衝突荷重は、岩塊が反力壁に衝突した時の荷重を直接荷重計にて計測した場合と、画像解析から得られた反力壁に衝突する前後の岩塊速度と岩塊質量を用いて力積を求め、これを衝突荷重とした場合の両方の値にて整理している。同じ岩塊模型であることから、理論的には両方計測値は同等の値を示すはずである。しかしながら、計測値にばらつきがあることを確認した。そこで、計測荷重に関する荷重計と画像解析の差異にどのような傾向が見られるか、分析を行った (図 3.4.31)。

その結果、以下のことを確認した。

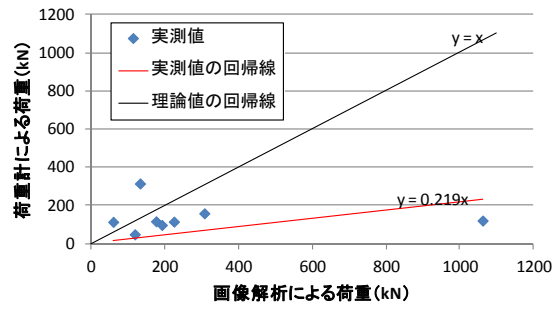
- ・塊状、板状の岩塊模型については、荷重計の計測値に比べて、画像解析より求めた値の方が大きくなる傾向を示した。
- ・球形の岩塊模型については、40cm サイズの場合で、荷重計の値が大きい値を傾向があるものの、20cm サイズについては、理論値と同等の結果を示した。

以上のことから、球形のように角がない模型は、落下途中の挙動は単純であり、荷重計と画像解析との関係が理論値と同等の値を示すが、塊状、板状のようにかどがある模型については、落下途中で複雑な動きをするため、荷重計と画像解析との関係に偏りが生じ、理論値から外れる傾向を示すものと推察される。

・塊状

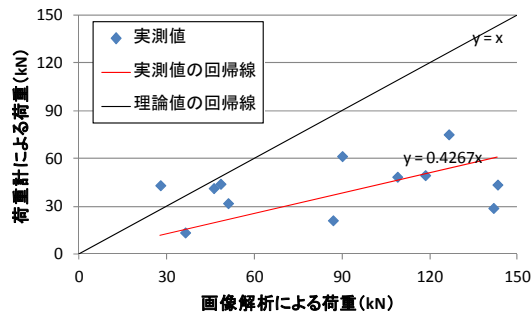


(a)塊状 20cm

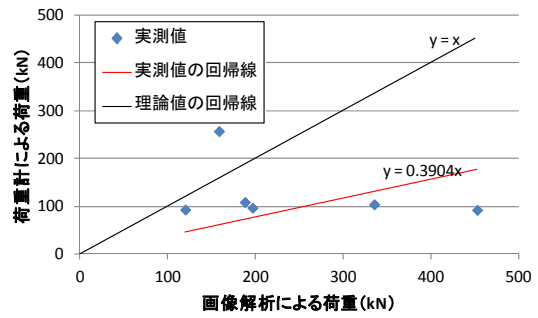


(b)塊状 40cm

・板状

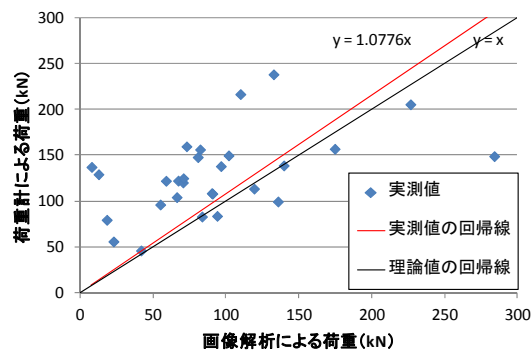


(a)板状 20cm

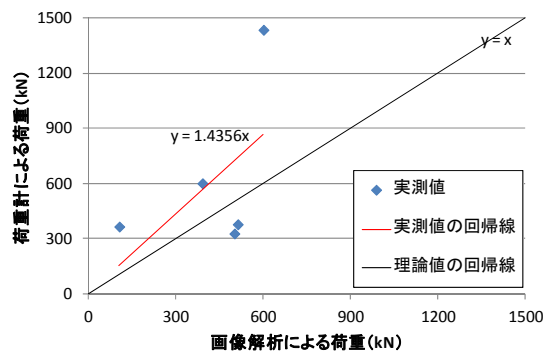


(b)板状 40cm

・球形



(a)板状 20cm



(b)板状 40cm

図 3.4.31 荷重計による計測荷重と画像解析による計測荷重の関係

3. 4. 2 振動台試験データの情報整理

(1) 概要

過去に実施した斜面の加振実験について各種計測器の電子データを用いて、試番（加振ステップ）ごとに以下に示すデータを発注者が指定するファイル形式に置き換え、各種データをフォルダに格納したものである。

データベース化する実験ケースは、通番ケース5からケース31までの合計27ケースで斜面が崩壊に至るまで、加振ステップ毎に整理を行ったものである。

データベース化した項目は以下の通りである。

- ・モデル形状
- ・材料物性（要素試験）
- ・各種計測器の計測結果（CSV ファイル）
- ・表層・弱層における代表標点の変位履歴
- ・代表点における加速度履歴
- ・代表点における変位履歴
- ・各実験における画像データ

ただし、各種項目が全ケースで網羅的に存在するわけではないため、表 3. 4. 3 に示す項目についてデータベースの作成を行ったものである。

表 3.4.3 データベース一覧

ケース	試験結果	整理結果	図面	写真	動画	画像解析	代表標点
ケース5	○	○	○	○	○	○	○
ケース6	○	○	○	○	○	○	○
ケース7	○	○	○	○	○	○	○
ケース8	○	○	○	○	○	○	○
ケース9	○	○	○	○	○	○	○
ケース10	○	○	○	○	○	○	○
ケース11	○	○	○	○	○	○	○
ケース12	○	○	○	○	○	○	○
ケース13	○	○	○	○	○	○	○
ケース14	○	○	○	○	○	○	○
ケース15	○	○	○	○	○	○	
ケース16	○	○	○	○	○	○	
ケース17	○	○	○	○	○	○	
ケース18	○	○	○	○	○	○	
ケース19	○	○	○	○	○	○	
ケース20	○	○	○	○	○	○	
ケース21	○	○	○	○	○	○	○
ケース22	○	○	○	○	○	○	○
ケース23	○	○	○	○	○	○	○
ケース24	○	○	○	○	○	○	
ケース25	○	○	○	○			
ケース26	○	○	○	○	○	○	○
ケース27	○	○	○	○	○	○	
ケース28	○	○	○	○	○	○	
ケース29	○	○	○	○	○	○	
ケース30	○	○	○	○	○	○	○
ケース31	○	○	○	○	○	○	○

(2) モデル形状

斜面加振実験のケース5からケース31のモデル形状と計測器配置図を図 3.4.32 から図 3.4.58 に示す。

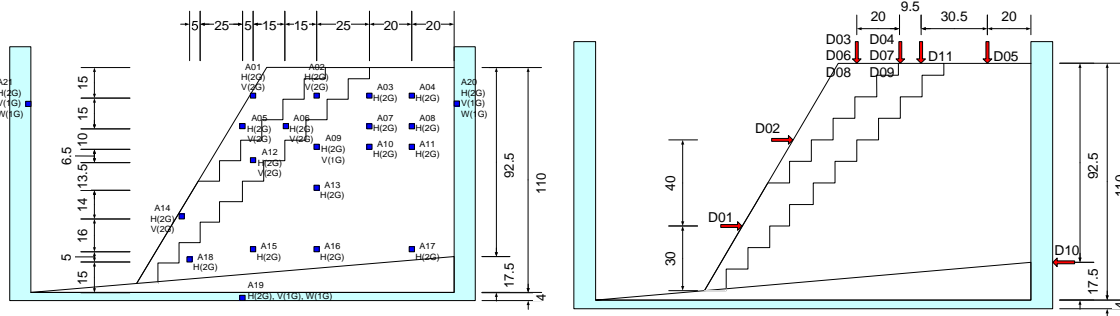


図 3.4.32 ケース5モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

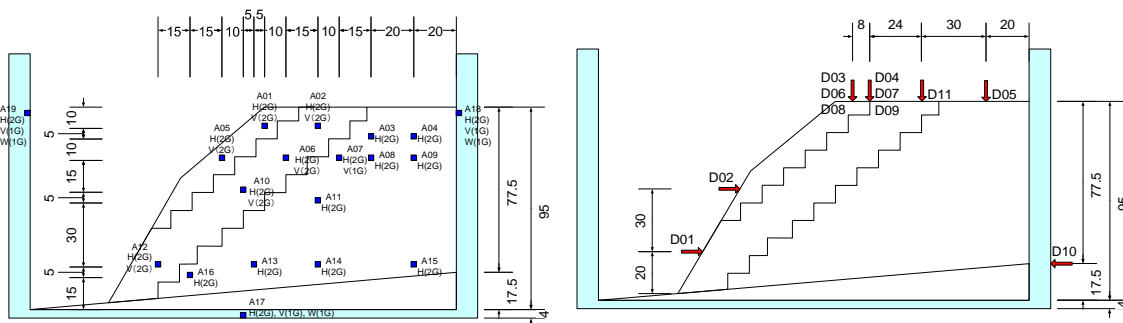


図 3.4.33 ケース6モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

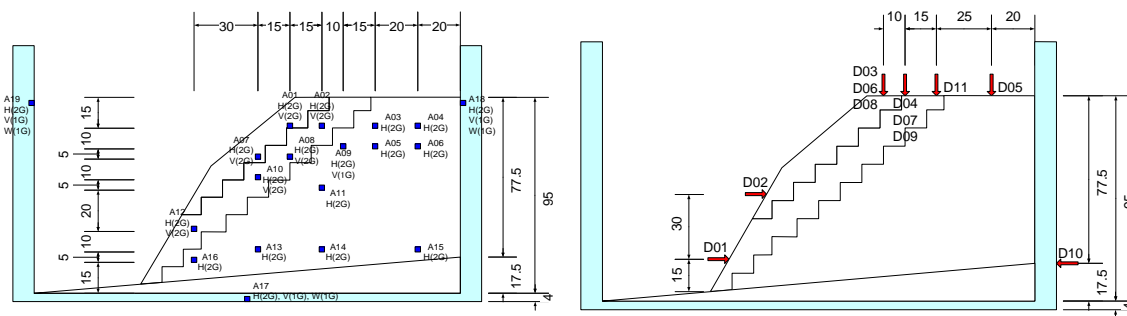


図 3.4.34 ケース7モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

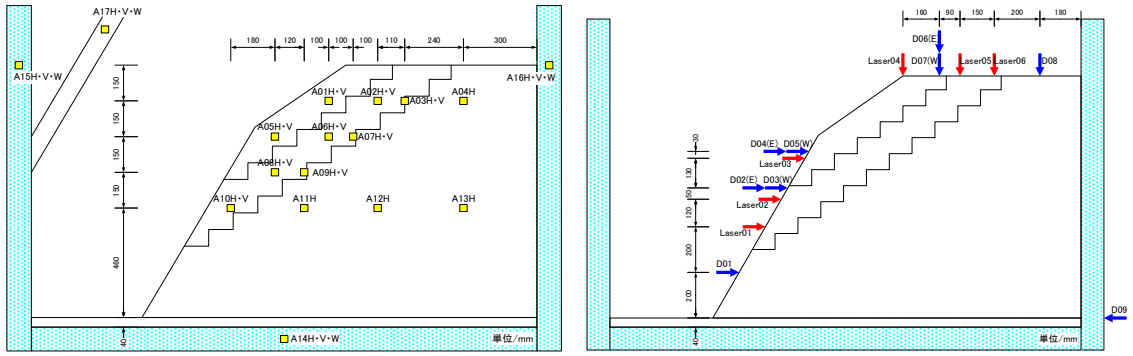


図 3.4.35 ケース 8 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

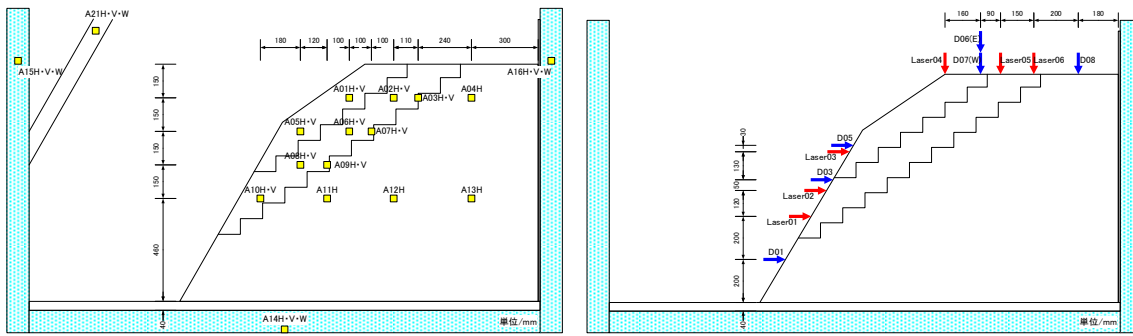


図 3.4.36 ケース 9 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

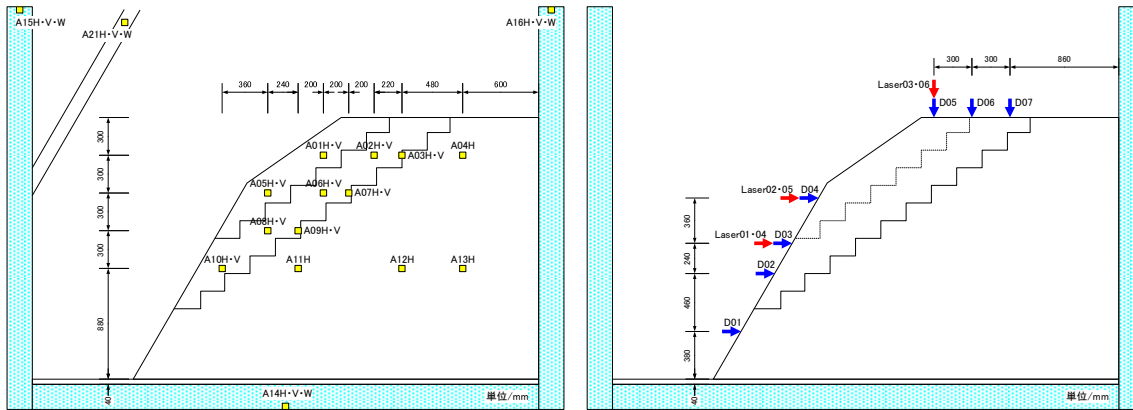


図 3.4.37 ケース 10 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

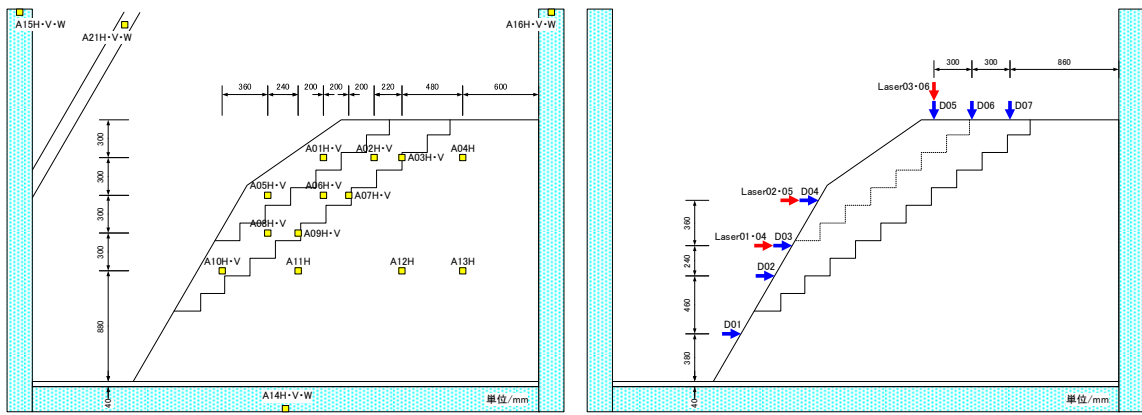


図 3.4.38 ケース 1 1 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

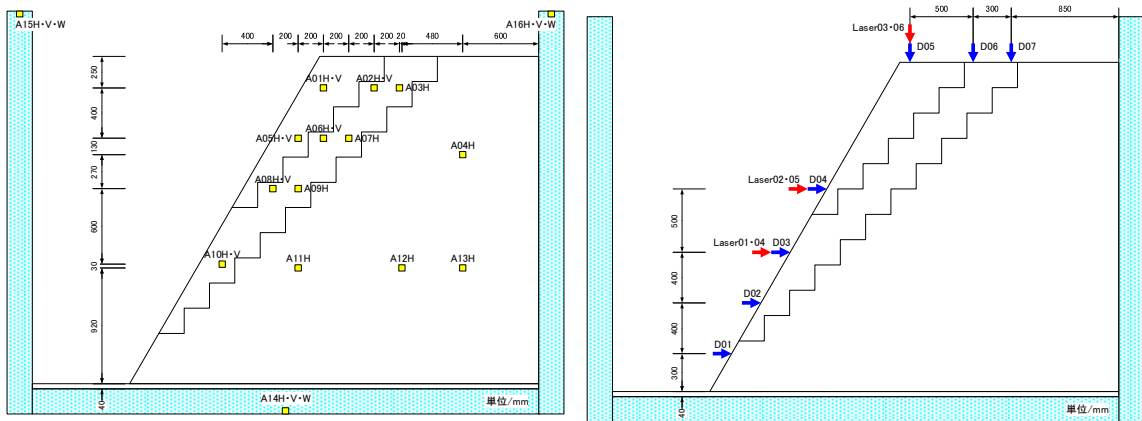


図 3.4.39 ケース 1 2 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

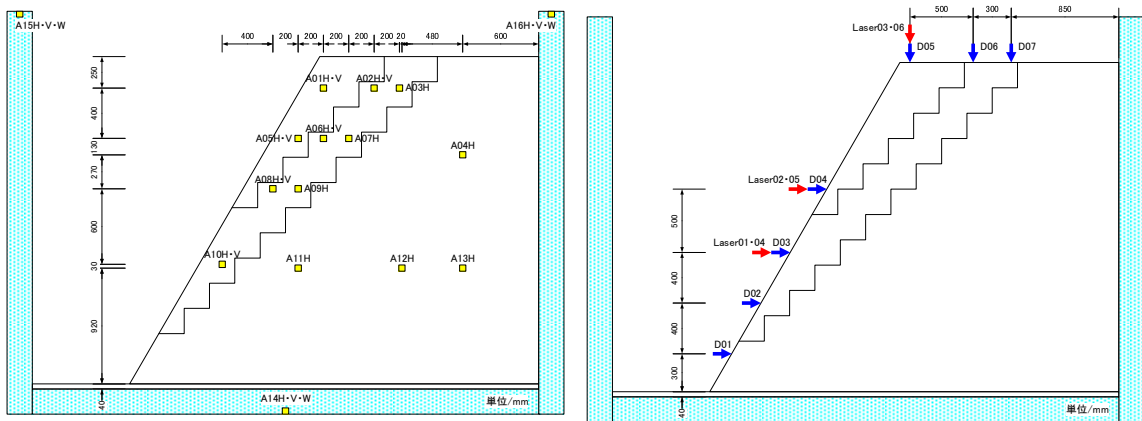


図 3.4.40 ケース 1 3 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

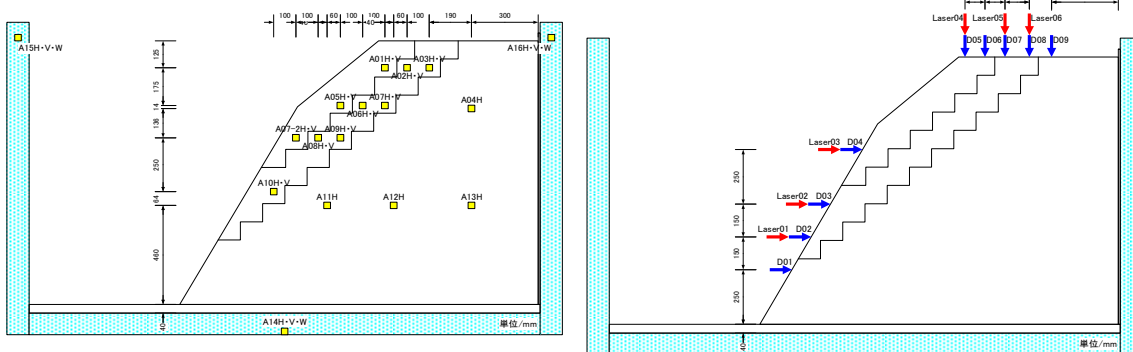


図 3.4.41 ケース 14 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

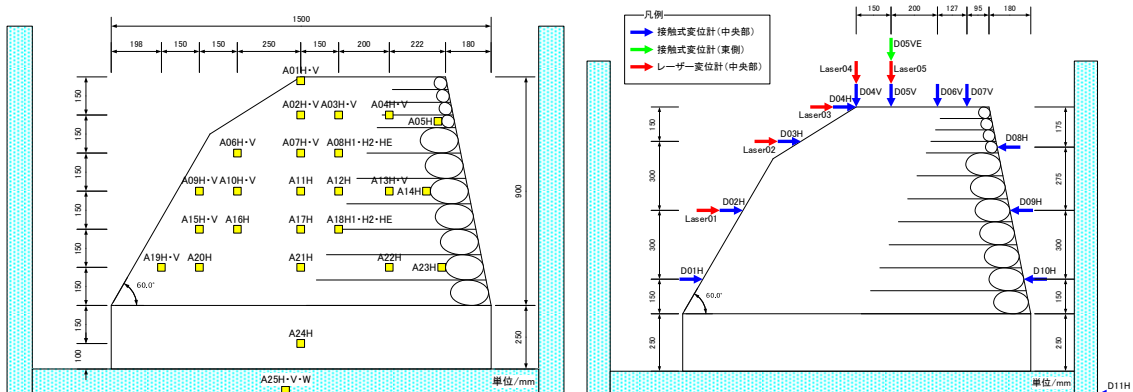


図 3.4.42 ケース 15 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

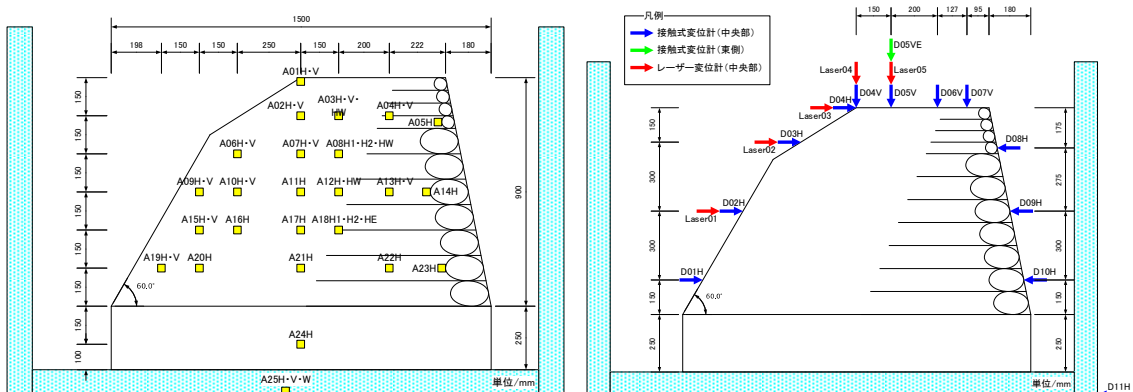


図 3.4.43 ケース 16 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

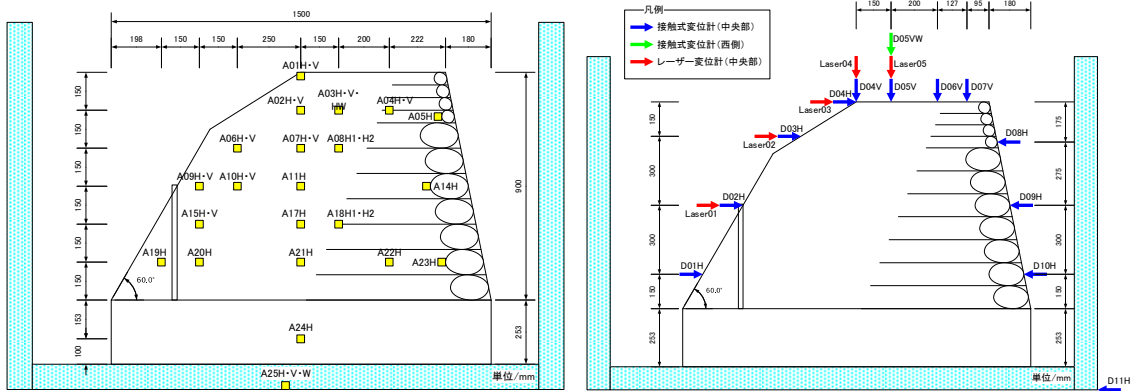


図 3.4.44 ケース 17 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

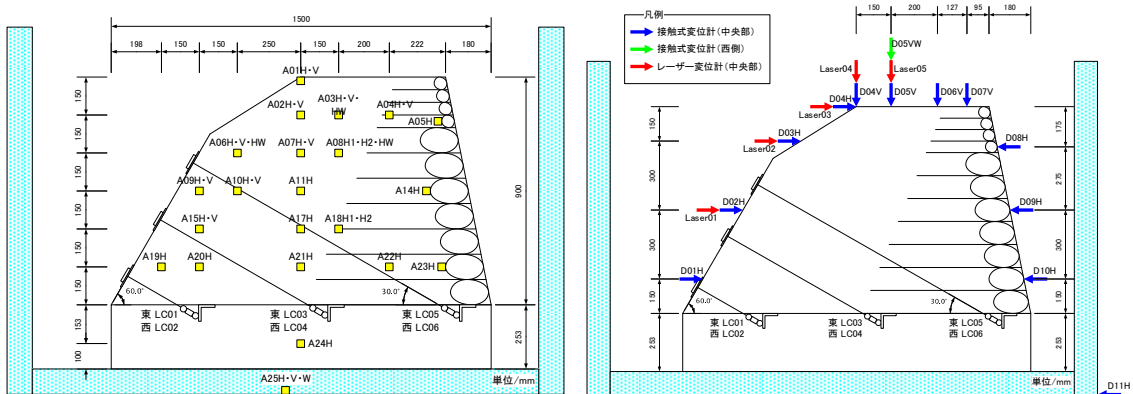


図 3.4.45 ケース 18 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

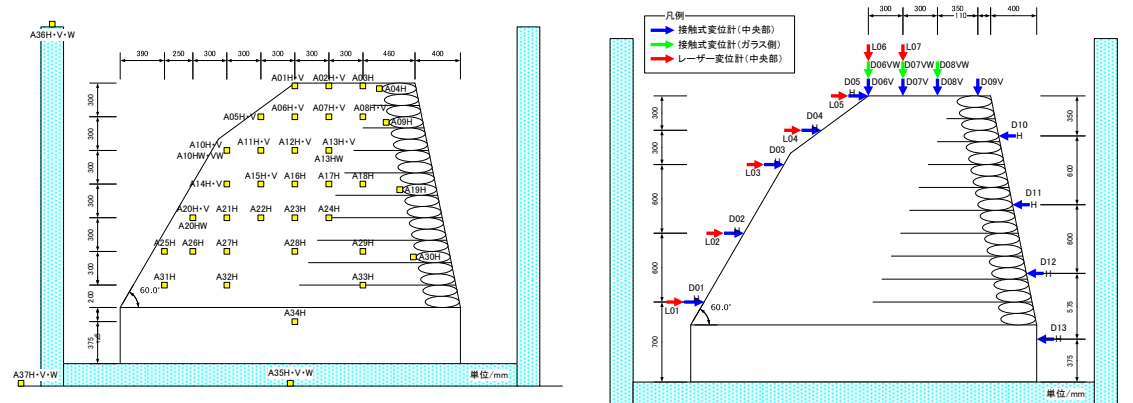


図 3.4.46 ケース 19 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

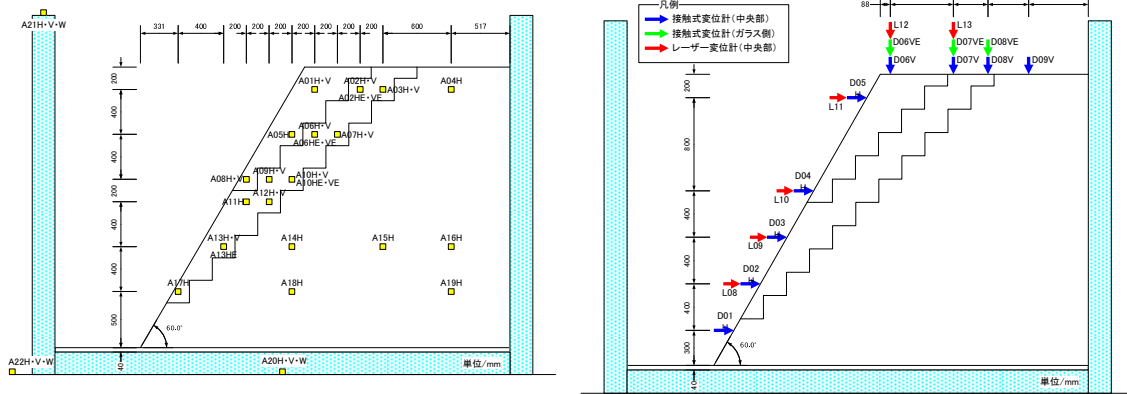


図 3.4.47 ケース 20 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

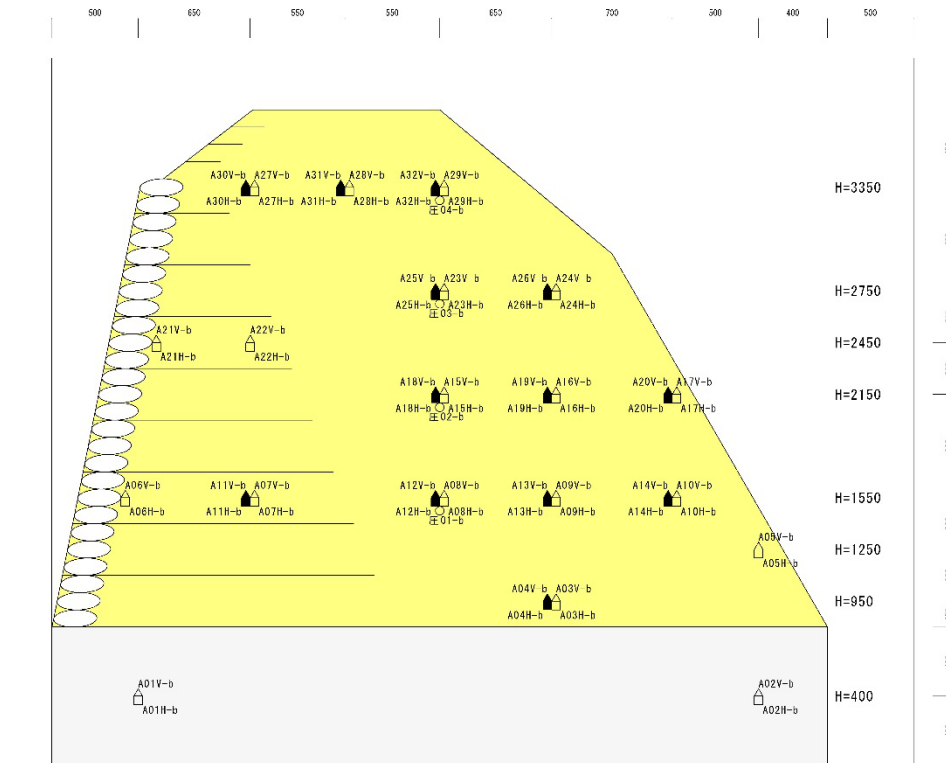


図 3.4.48a ケース 2 1 モデル形状図 (加速度配置図)

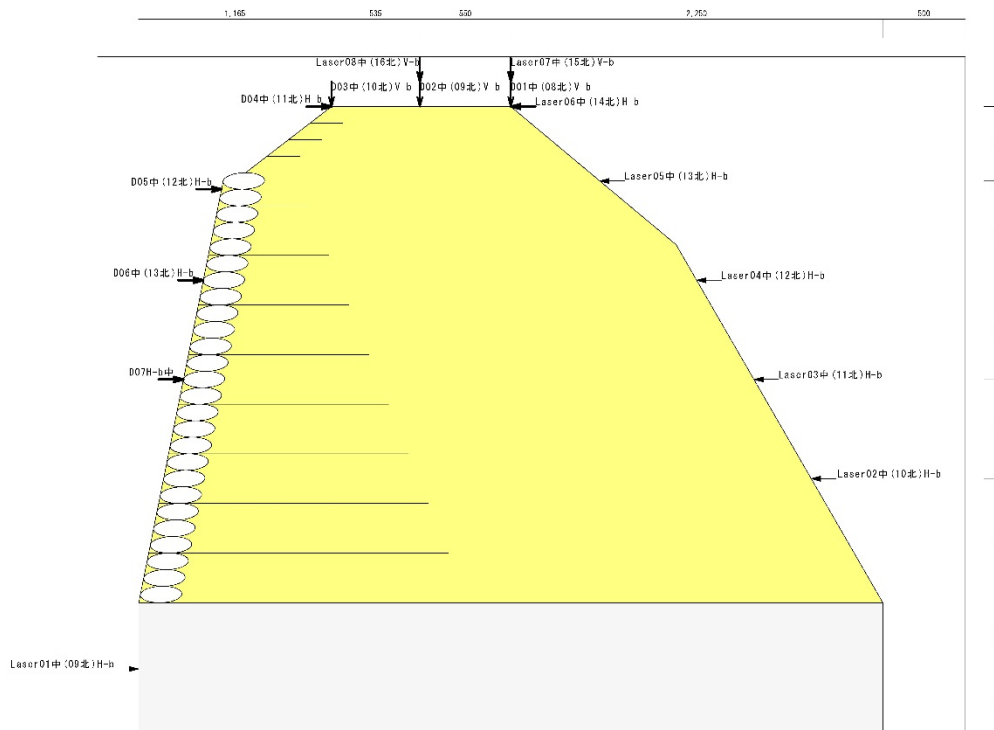


図 3.4.48b ケース 2 1 モデル形状図 (変位計配置図)

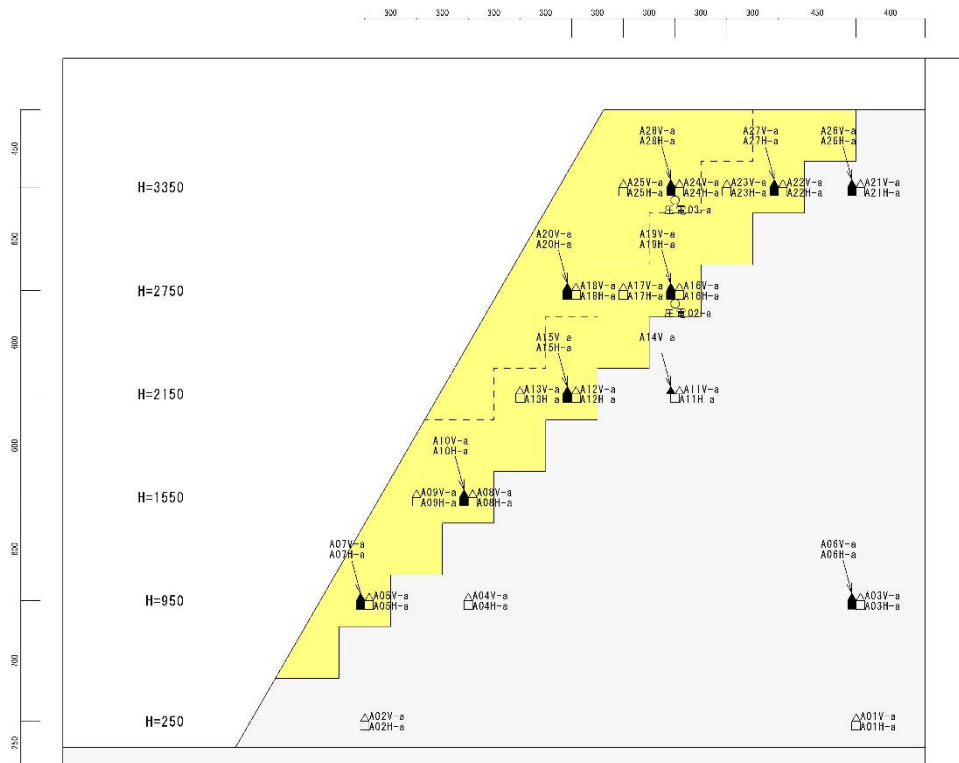


図 3.4.49a ケース 2 2 モデル形状図 (加速度配置図)

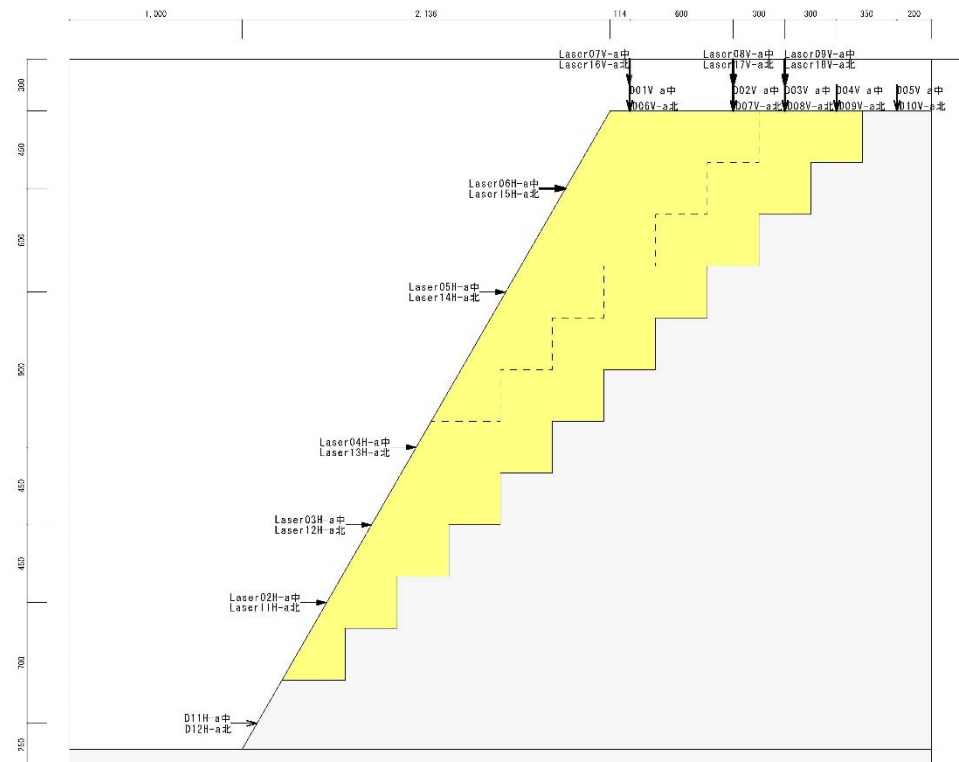


図 3.4.49b ケース 2 2 モデル形状図 (変位計配置図)

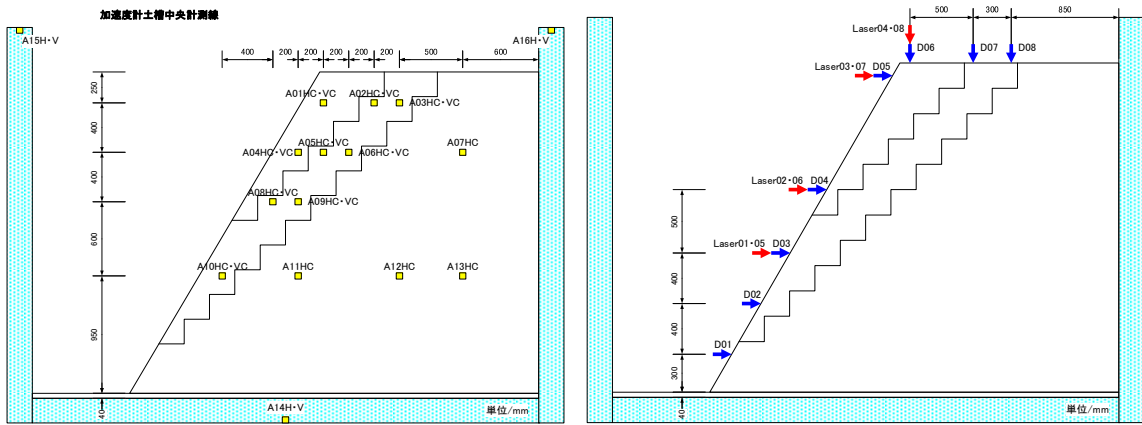


図 3.4.50 ケース 2 3 モデル形状図 (左: 加速度配置図、右: 変位計配置図)

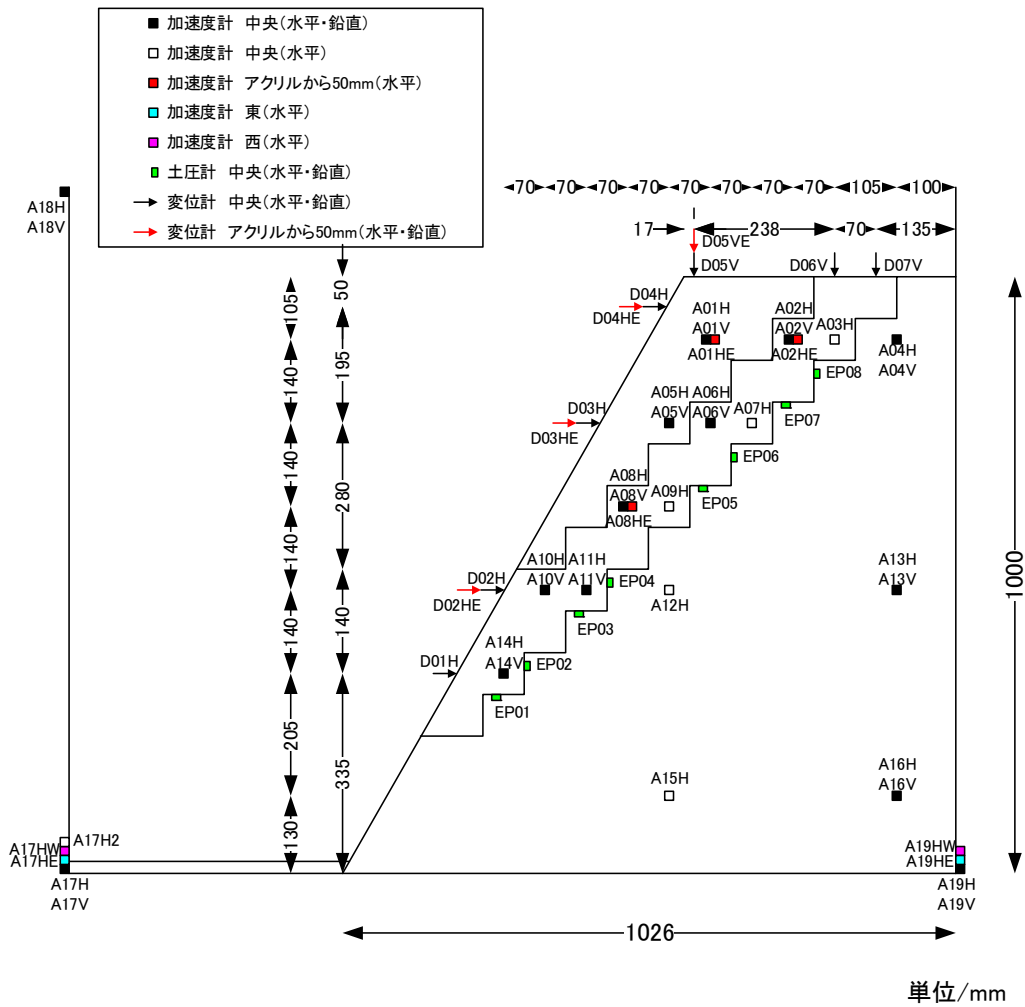


図 3.4.51 ケース 2 4 モデル形状図 (計測器配置図)

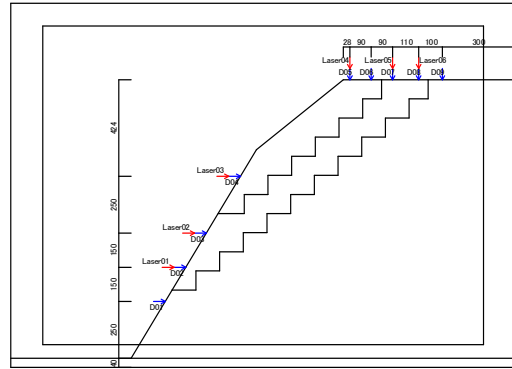
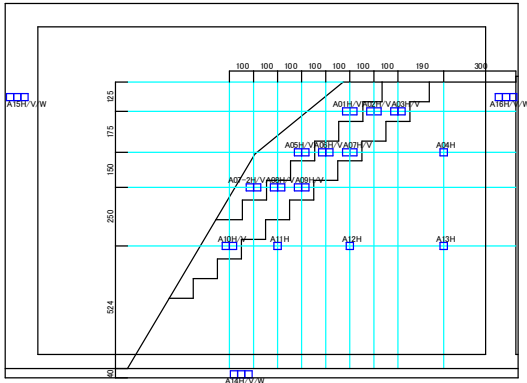


図 3.4.54 ケース 27 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

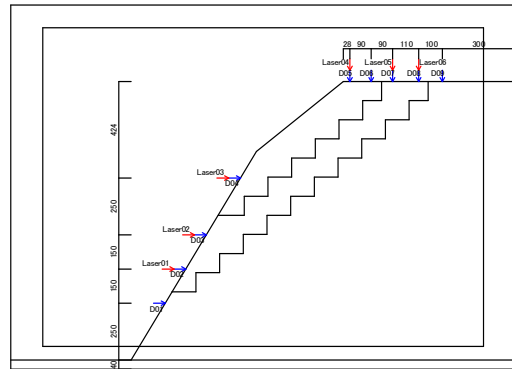
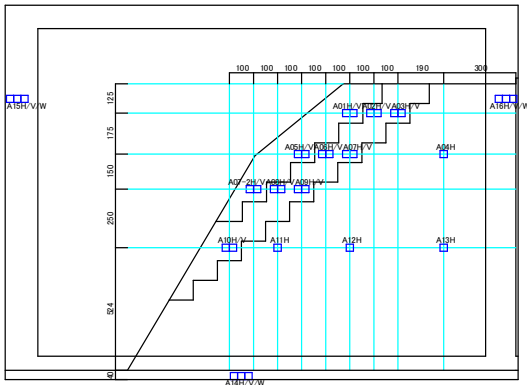


図 3.4.55 ケース 28 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

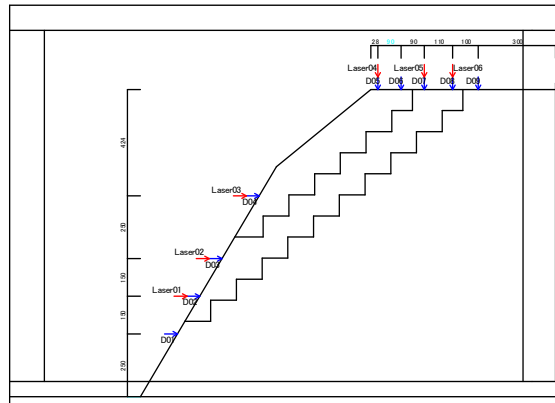
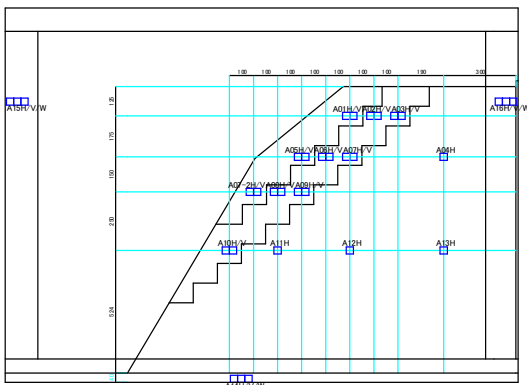


図 3.4.56 ケース 29 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

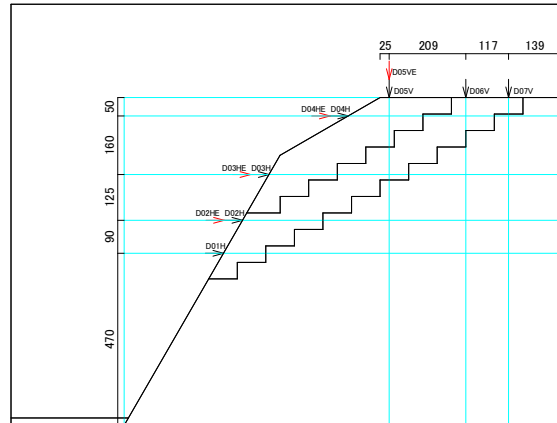
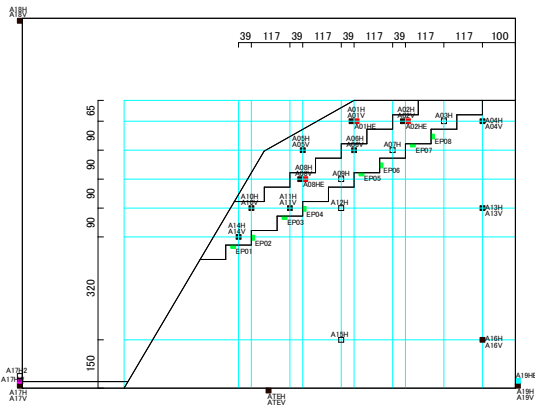


図 3.4.57 ケース 30 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

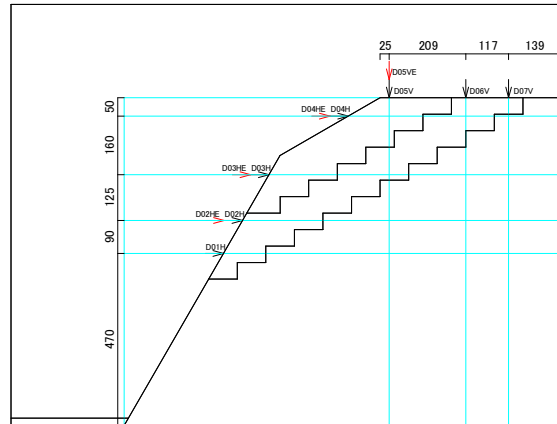
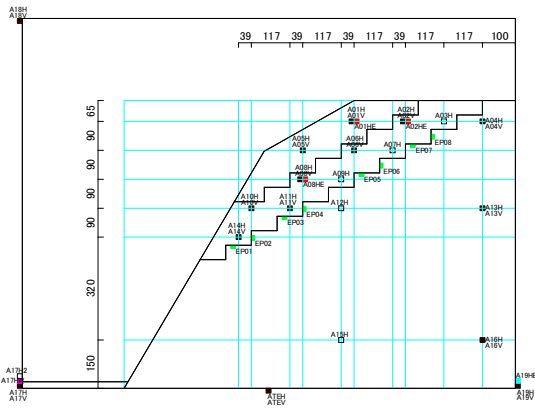


図 3.4.58 ケース 31 モデル形状図 (左：加速度配置図、右：変位計配置図)

(3) 材料物性 (要素試験結果)

斜面加振実験に用いた、各材料名と配合内容を表 3.4.4 示す。各ケースと使用した材料名を表 3.4.5 に示す。図 3.4.59 から図 3.4.69 に要素試験結果 (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$) を示す。

表 3.4.4 各材料配合表

材料名	配合内容
弱層A	ベントナイト:水:硅砂6号=1:10:100
弱層B	硅砂8号:水:スチールグリッド:消石灰=30:2:70:1
遠心A	硅砂6号:ベントナイト:消石灰:水=100:5:60:20
遠心B	硅砂6号:ベントナイト:セメント:水=100:5:6:15
遠心C	硅砂6号:ベントナイト:セメント:水=100:5:6:20
表層A	磁砂鉄:水:ベントナイト=100:15:10
表層B	磁砂鉄:水:ベントナイト:セメント=100:15:10:3
基盤層	粒度調整碎石M-40:水:セメント=100:7:4

A	磁砂鉄(100)	水(15)	ベントナイト(10)	
B	硅砂6号(100)	水(10)	ベントナイト(1)	
C	硅砂8号(30)	水(2)	ショットグリッド(70)	消石灰(1)
D	礫(100)	水(7)	セメント(4)	

表 3.4.5 各ケースにおける材料名

	斜面模型形状	模型寸法	弱層	表層	基盤層	一般部	補強土部
ケース5	三層斜面模型	小型	弱層A	表層A	基盤層		
ケース6	三層斜面模型	小型	弱層A	表層A	基盤層		
ケース7	三層斜面模型	小型	弱層A	表層A	基盤層		
ケース8	三層斜面模型	小型	弱層A	表層A	基盤層		
ケース9	三層斜面模型	小型	弱層A	表層A	基盤層		
ケース10	三層斜面模型	中型	弱層A	表層A	基盤層		
ケース11	二層斜面模型	中型	弱層A		基盤層		
ケース12	三層斜面模型	中型	弱層A	表層A	基盤層		
ケース13	三層斜面模型	中型	弱層B	表層A	基盤層		
ケース14	三層斜面模型	中型	弱層B	表層A	基盤層		
ケース15	一層斜面模型	小型			基盤層	弱層A	弱層A
ケース16	一層斜面模型	小型			基盤層	弱層A	弱層A
ケース17	一層斜面模型	小型			基盤層	弱層A	弱層A
ケース18	一層斜面模型	小型			基盤層	弱層A	弱層C
ケース19	一層斜面模型	中型			基盤層	弱層C	弱層D
ケース20	三層斜面模型	中型	弱層C	表層A	基盤層		
ケース21	一層斜面模型	大型			基盤層	弱層C	弱層D
ケース22	三層斜面模型	大型	弱層C	弱層C	基盤層		
ケース23	三層斜面模型	中型(アンカー)	弱層A	表層A	基盤層		
ケース24	三層斜面模型	実物大(遠心)	遠心A	表層A	基盤層		
ケース25	三層斜面模型	実物大(遠心)	遠心B	表層A	基盤層		
ケース26	三層斜面模型	実物大(遠心)	遠心A	表層A	基盤層		
ケース27	三層斜面模型	小型	上:材料A 下:材料B	表層A	基盤層		
ケース28	三層斜面模型	小型	上:材料B 下:材料A	表層A	基盤層		
ケース29	三層斜面模型	小型	上:材料A 下:材料B	表層A	基盤層		
ケース30	三層斜面模型	実物大(遠心)	遠心C	表層A	基盤層		
ケース31	三層斜面模型	実物大(遠心)	遠心A	表層B	基盤層		

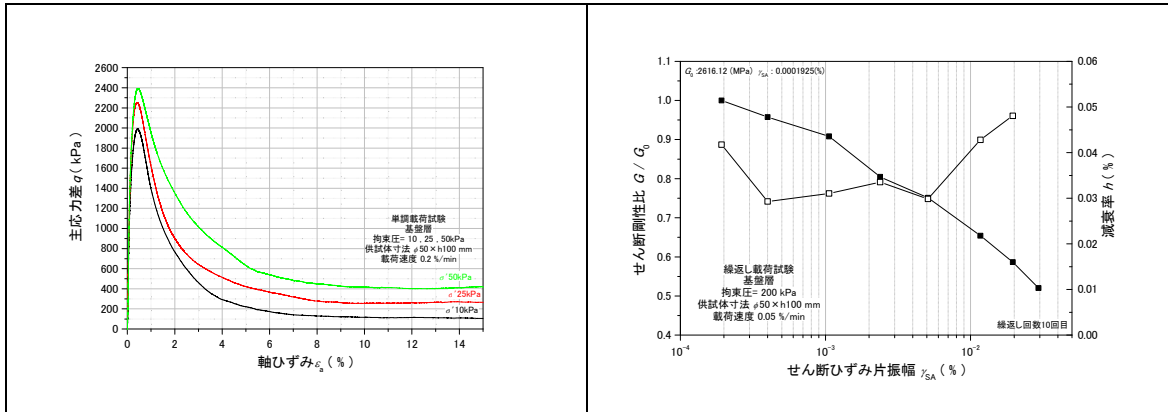


図 3.4.59 基盤層 (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

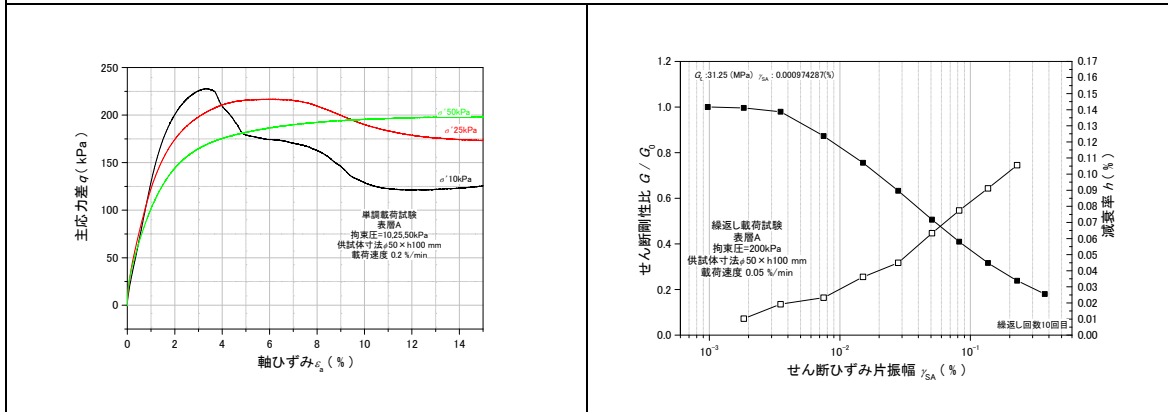


図 3.4.60 表層 A (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

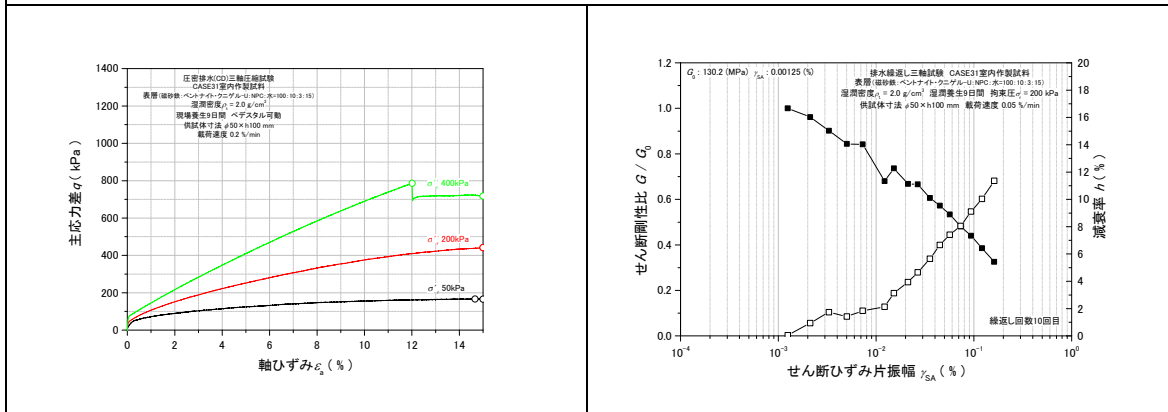


図 3.4.61 表層 B (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

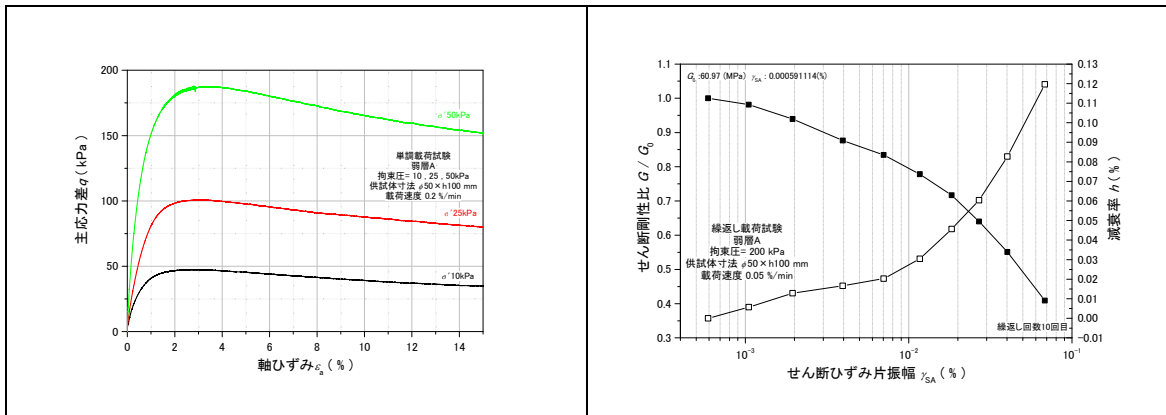


図 3.4.62 弱層 A (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

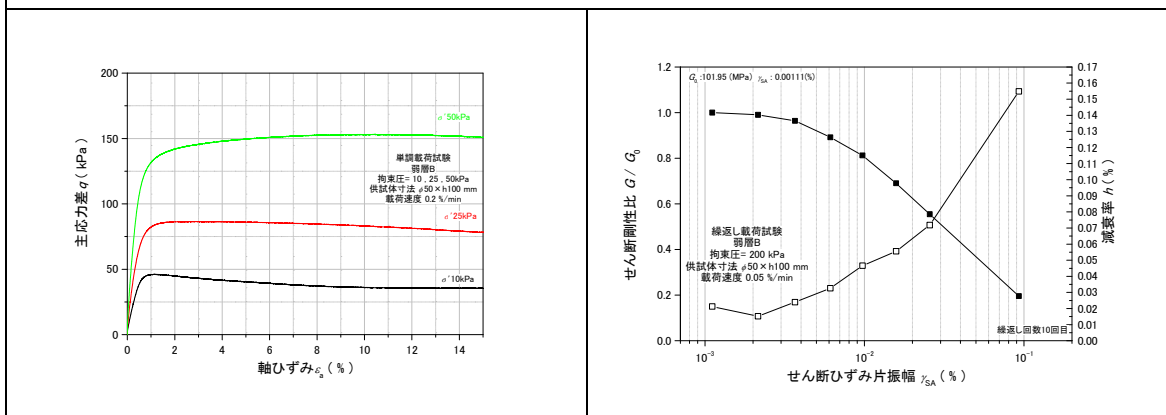


図 3.4.63 弱層 B (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

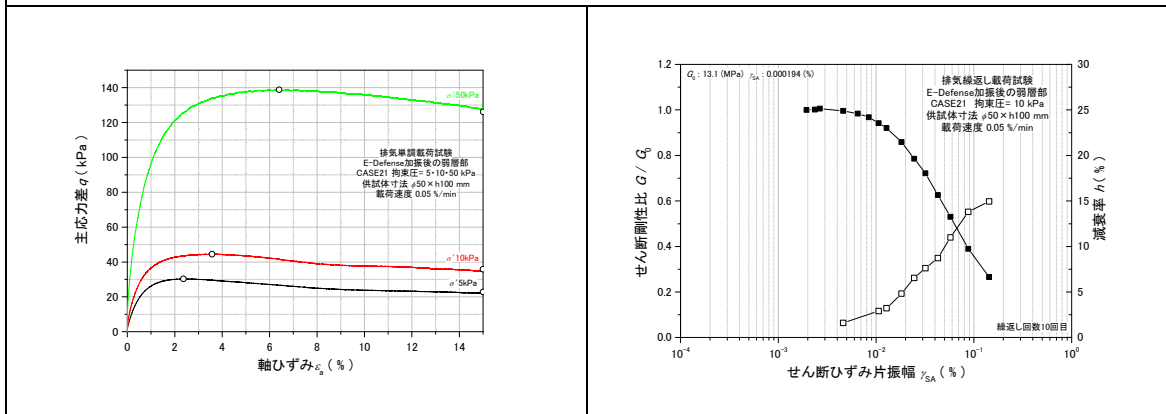


図 3.4.64 弱層 C ケース 21 (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

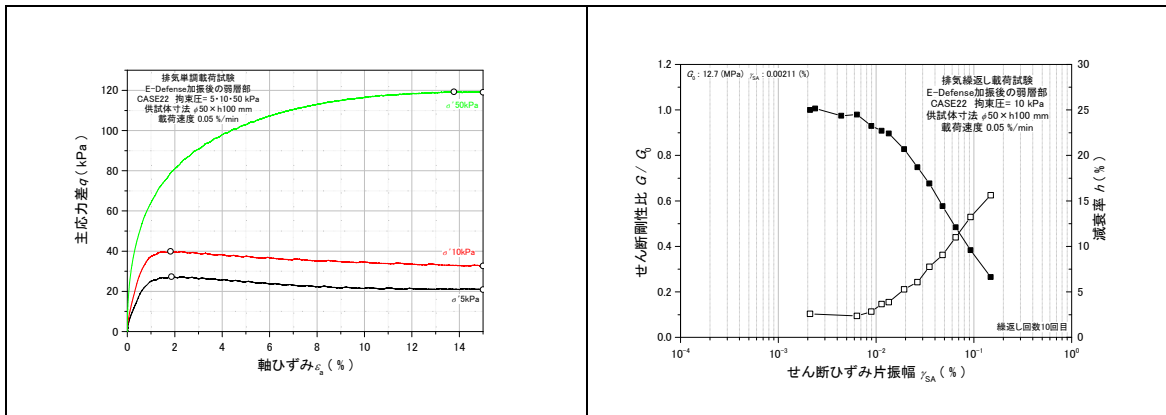


図 3.4.65 弱層 C ケース 22 (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

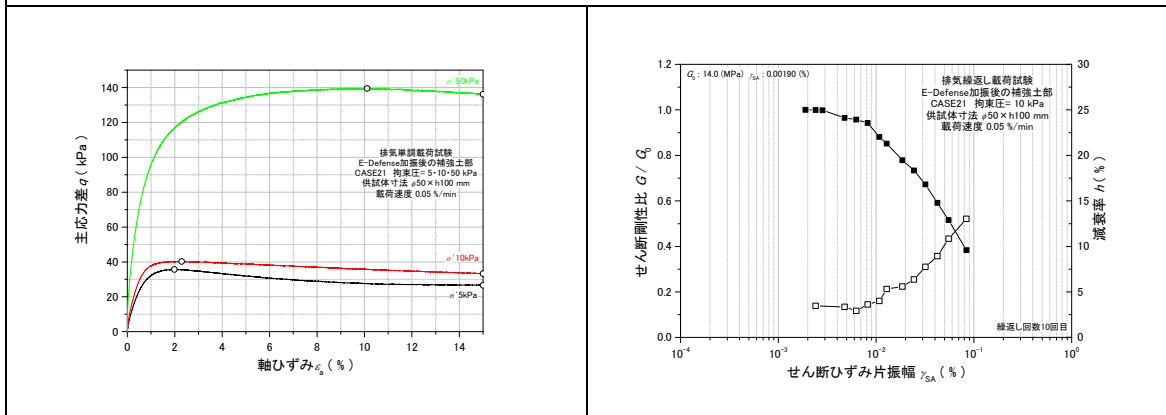


図 3.4.66 弱層 D (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

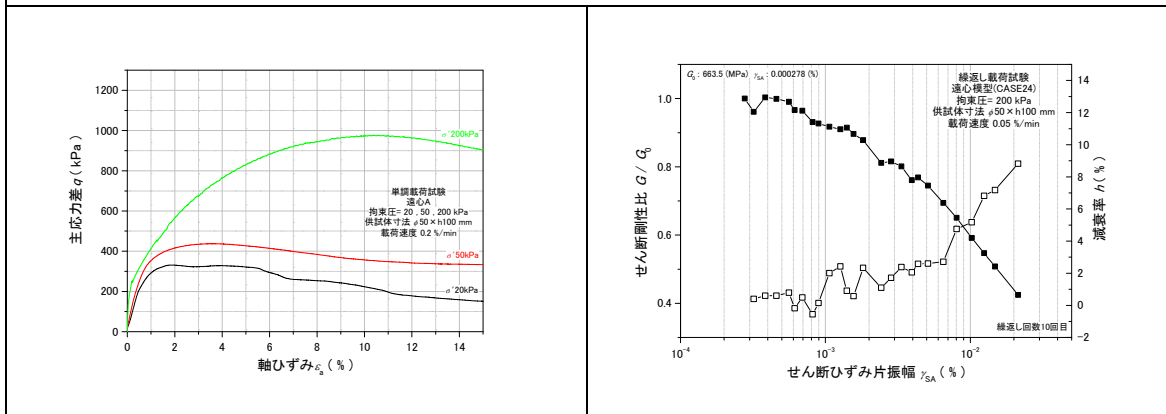


図 3.4.67 遠心 A (左: $\sigma \sim \varepsilon$ 、右: G/G_0 、 $h \sim \gamma_{sa}$)

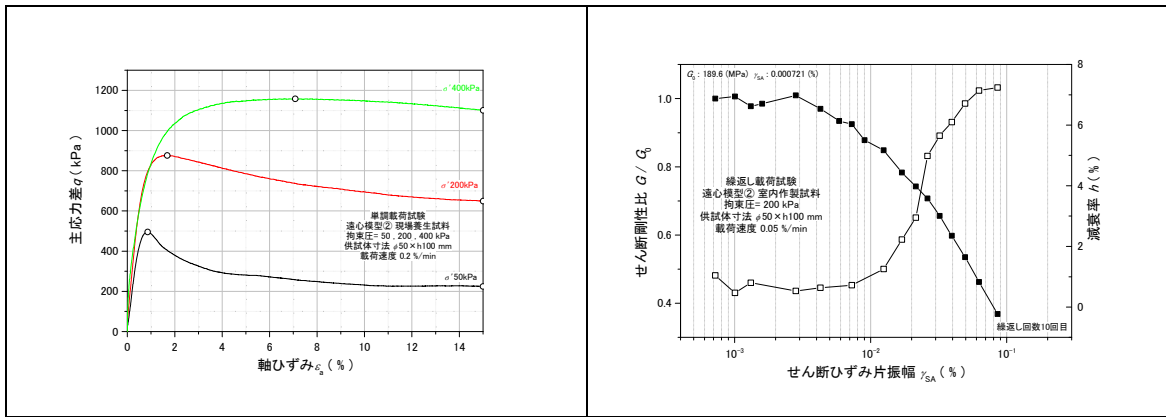


図 3.4.68 遠心 B (左: $\sigma \sim \varepsilon$, 右: G/G_0 , $h \sim \gamma_{sa}$)

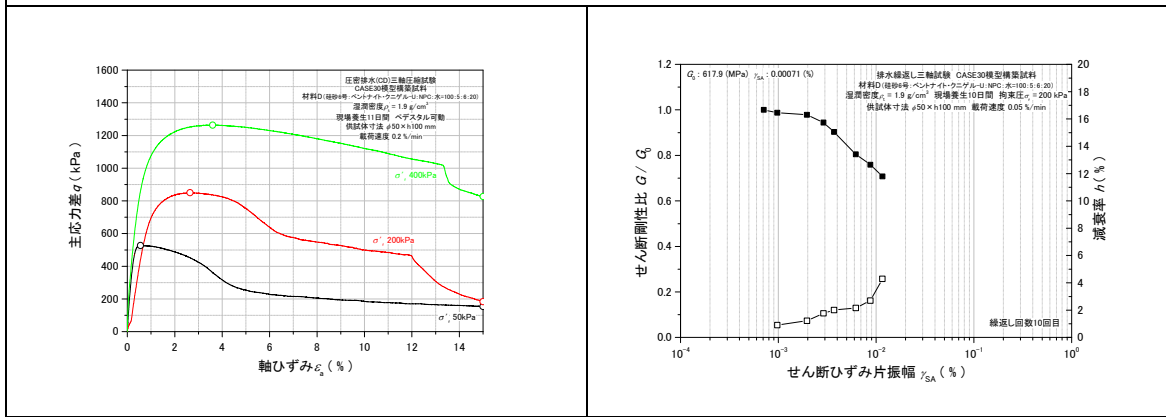


図 3.4.69 遠心 C (左: $\sigma \sim \varepsilon$, 右: G/G_0 , $h \sim \gamma_{sa}$)

(4) 各種計測器の計測結果

斜面加振実験のケース5からケース31の各種計測器の結果をCSVファイルに変換して指定のフォルダに収めた。表3.4.6から表2.3.16に各ケースの加振データ一覧を示す。

表 3.4.6 ケース5加振データ一覧表

試 番	波 形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10波
2	正弦波	5Hz	200gal	10波
3	正弦波	5Hz	300gal	10波
4	正弦波	5Hz	400gal	10波

表 3.4.7 ケース6加振データ一覧表

試 番	波 形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10波
2	正弦波	5Hz	200gal	10波
3	正弦波	5Hz	300gal	10波
4	正弦波	5Hz	400gal	10波
5	正弦波	5Hz	500gal	10波
6	正弦波	5Hz	100gal	50波
7	正弦波	5Hz	200gal	50波
8	正弦波	5Hz	300gal	50波

表 3.4.8 ケース7加振データ一覧表

試 番	波 形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波

表 3.4.9 ケース8加振データ一覧表

試 番	波 形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波
6	正弦波	5Hz	600gal	10 波
7	正弦波	5Hz	200gal	50 波

表 3.4.10 ケース 9 加振データ一覧表

試 番	波 形	入力加速度
1	不規則波	100gal
2	不規則波	200gal
3	不規則波	300gal
4	不規則波	400gal
5	不規則波	500gal
6	不規則波	600gal
7	不規則波	700gal
8	不規則波	800gal
9	不規則波	900gal
10	不規則波	900gal

表 3.4.11 ケース 10_11 加振データ一覧表

試 番	波 形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	150gal	10 波
3	正弦波	5Hz	200gal	10 波
4	正弦波	5Hz	250gal	10 波
5	正弦波	5Hz	300gal	10 波
6	正弦波	5Hz	350gal	10 波
7	正弦波	5Hz	100gal	10 波
8	正弦波	5Hz	200gal	10 波
9	正弦波	5Hz	300gal	10 波
10	正弦波	5Hz	400gal	10 波
11	正弦波	5Hz	450gal	10 波
12	正弦波	5Hz	500gal	10 波
13	正弦波	5Hz	200gal	10 波
14	正弦波	5Hz	300gal	10 波
15	正弦波	5Hz	400gal	10 波
16	正弦波	5Hz	450gal	10 波

表 3.4.12 ケース 1 2 加振データ一覧表

試 番	波 形	入力加速度
1	不規則波	50gal
2	不規則波	100gal
3	不規則波	200gal
4	不規則波	200gal

表 3.4.13 ケース 1 3 加振データ一覧表

試 番	波 形	入力加速度
1	不規則波	50gal
2	不規則波	100gal
3	不規則波	200gal
4	不規則波	200gal
5	不規則波	300gal

表 3.4.14 ケース 1 4 加振データ一覧表

試 番	波 形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波

表 3.4.15 ケース 1 5 加振データ一覧表

試番	波形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波
6	正弦波	5Hz	600gal	10 波
7	正弦波	5Hz	700gal	10 波
8	正弦波	5Hz	800gal	10 波

表 3.4.16 ケース 1 6 加振データ一覧表

試番	波形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波
6	正弦波	5Hz	600gal	10 波

表 3.4.17 ケース 1 7 加振データ一覧表

試番	波形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波
6	正弦波	5Hz	600gal	10 波
7	正弦波	5Hz	700gal	10 波
8	正弦波	5Hz	800gal	10 波

表 3.4.18 ケース 1 8 加振データ一覧表

試番	波形	加振周波数	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波
6	正弦波	5Hz	600gal	10 波
7	正弦波	5Hz	700gal	10 波
8	正弦波	5Hz	800gal	10 波
9	正弦波	5Hz	900gal	10 波

表 3.4.19 ケース 1 9_2 0 加振データ一覧表

試番	波形	入力加速度
1	不規則波	100gal
2	不規則波	200gal
3	不規則波	300gal
4	不規則波	400gal
5	不規則波	500gal
6	不規則波	600gal
7	不規則波	700gal
8	不規則波	800gal
9	不規則波	900gal
10	不規則波	900gal
11	不規則波	900gal

表 3.4.20 ケース 2 1 前半加振データ一覧表

試番	波形	加振周期	入力加速度 (水平)	入力加速度 (鉛直)	位相角	波数
1-1	正弦波	5Hz	100gal	—	—	10 波
1-2	正弦波	5Hz	100gal	—	—	10 波
2	正弦波	5Hz	—	100gal		10 波
3	正弦波	5Hz	100gal	100gal	同位相	10 波
4-1	正弦波	5Hz	100gal	100gal	90 度	10 波
4-2	正弦波	5Hz	100gal	100gal	90 度	10 波
4-3	正弦波	5Hz	100gal	100gal	90 度	10 波
5-1	正弦波	5Hz	100gal	100gal	180 度	10 波
5-2	正弦波	5Hz	100gal	100gal	180 度	10 波
6	正弦波	5Hz	200gal	—	—	10 波
7	正弦波	5Hz	—	200gal	—	10 波
8	正弦波	5Hz	200ga	200gal	同位相	10 波
9	正弦波	5Hz	200ga	200ga	90 度	10 波
10	正弦波	5Hz	200ga	200ga	180 度	10 波
11	特性把握 観測波	2Hz+5Hz +10Hz+20Hz	50gal	50gal	同位相	各 5 波
12	観測波	—	100gal	—	—	—

表 3.4.21 ケース 2 1 後半加振データ一覧表

試番	波形	加振周期	入力加速度 (水平)	入力加速度 (鉛直)	位相角	波数
13	観測波	—	200gal	—	—	—
14	観測波	—	300gal	—	—	—
15	観測波	—	—	200gal	—	—
16	観測波	—	300gal	200gal	—	—
17	観測波	—	400gal	270gal	—	—
18	観測波	—	500gal	330gal	—	—
19	観測波	—	600gal	400gal	—	—
20-1	観測波	—	700gal	470gal	—	—

表 3.4.22 ケース 2 2 加振データ一覧表

試番	波形	加振周期	入力加速度 (水平)	入力加速度 (鉛直)	位相角	波数
13	観測波	—	200gal	—	—	—
14	観測波	—	300gal	—	—	—
15	観測波	—	—	200gal	—	—
16	観測波	—	300gal	200gal	—	—
17	観測波	—	400gal	270gal	—	—
18	観測波	—	500gal	330gal	—	—
19	観測波	—	600gal	400gal	—	—
20-1	観測波	—	700gal	470gal	—	—
20-2	観測波	—	700gal	470gal	—	—
21	観測波	—	800gal	—	—	—
22	正弦波	5Hz	800gal	—	—	10 波

表 3.4.23 ケース 2 3 加振データ一覧表

試番	波形	加振周期	入力加速度	波数
1	不規則波		50gal	10 波
2	不規則波		100gal	10 波
3	不規則波		200gal	10 波
4	不規則波		300gal	10 波
5	不規則波		400gal	10 波
6	不規則波		500gal	10 波
7	不規則波		600gal	10 波
8	不規則波		700gal	10 波
9	不規則波		800gal	10 波
10	不規則波		900gal	10 波
11	不規則波		950gal	10 波
12	正弦波	5Hz	600gal	10 波
13	正弦波	5Hz	700gal	10 波

表 3.4.24 ケース 2 4 加振データ一覧表

名称	遠心G	加振条件	サンプリング	加振データ	NR2	NR3	NR4	NRサンプリング	データ抽出	NR同期
25_S5_1	25	125Hz 1.25G	500 μ sec/40秒	121123d05	○	○	○	500 μ sec/80000	31,700から10,000 データ	371/0.1855秒
25_S5_2	25	125Hz 2.5G	500 μ sec/40秒	121123d06	○	○	○	500 μ sec/80000	30,000から10,000 データ	370/0.185秒
25_S5_3	25	125Hz 3.75G	500 μ sec/40秒	121123d07	○	○	○	500 μ sec/80000	28,300から10,000 データ	369/0.1845秒
25_S5_4	25	125Hz 5G	500 μ sec/40秒	121123d08	○	○	○	500 μ sec/80000	31,500から10,000 データ	383/0.1915秒

表 3.4.25 ケース 2 5 加振データ一覧表

名称	遠心G	加振条件	サンプリング	加振データ	NR2	NR3	NR4	NRサンプリング	データ抽出(先頭)	NR同期
50_S2.5_1	50	125Hz 5G	500 μ sec/40秒	121226d01	○	○	○	500 μ sec/80000	28200から10,000 データ	367/0.1835秒
50_S2.5_2	50	125Hz 10G	500 μ sec/40秒	121226d02	○	○	○	500 μ sec/80000	30000から10,000 データ	370/0.185秒
50_S2.5_3	50	125Hz 12.5G	500 μ sec/40秒	121226d04	○	○	○	500 μ sec/80000	30600から10,000 データ	382/0.191秒
50_S2.5_4	50	125Hz 15G	500 μ sec/40秒	121226d05	○	○	○	500 μ sec/80000	29400から10,000 データ	369/0.1845秒
50_S2.5_5	50	125Hz 17.5G	500 μ sec/40秒	121226d06	○	○	○	500 μ sec/80000	30600から10,000 データ	380/0.190秒
50_S2.5_6	50	125Hz 20G	500 μ sec/40秒	121226d07	○	○	○	500 μ sec/80000	28800から10,000 データ	357/0.1785秒
50_S2.5_7	50	125Hz 22.5G	500 μ sec/40秒	121226d08	○	○	○	500 μ sec/80000	30400から10,000 データ	378/0.189秒
50_S2.5_8	50	125Hz 25G	500 μ sec/40秒	121226d09	○	○	○	500 μ sec/80000	30600から10,000 データ	370/0.185秒
50_S2.5_9	50	125Hz 22.5G 20波	500 μ sec/40秒	121226d10	○	○	○	500 μ sec/80000	28200から10,000 データ	364/0.182秒
50_S2.5_10	50	125Hz 22.5G 20波	500 μ sec/40秒	121226d11	○	○	○	500 μ sec/80000	28200から10,000 データ	371/0.1855秒
50_S3_1	50	150Hz 10G	500 μ sec/40秒	121226d12	○	○	○	500 μ sec/80000	28400から10,000 データ	357/0.1785秒
50_S3_2	50	150Hz 25G	500 μ sec/40秒	121226d13	○	○	○	500 μ sec/80000	29800から10,000 データ	375/0.1875秒

表 3.4.26 ケース 2 6 加振データ一覧表

名称	遠心G	加振条件	サンプリング	加振データ	NR2	NR3	NR4	NRサンプリング	データ抽出(先頭)	NR同期
25_S5_1	25	125Hz 2.5G	500 μ sec/40秒	130202d1	○	○	○	500 μ sec/80000	26500から10,000 データ	382/0.191秒
25_S5_2	25	125Hz 5G	500 μ sec/40秒	130202d2	○	○	○	500 μ sec/80000	29000から10,000 データ	386/0.193秒
25_S5_1	25	50Hz 1.25G	500 μ sec/40秒	130202d3	○	○	○	500 μ sec/80000	26600から10,000 データ	400/0.200秒
25_S5_2	25	50Hz 2.5G	500 μ sec/40秒	130202d4	○	○	○	500 μ sec/80000	26900から10,000 データ	368/0.184秒
25_S5_3	25	50Hz 3.75G	500 μ sec/40秒	130202d5	○	○	○	500 μ sec/80000	26600から10,000 データ	384/0.192秒
25_S5_4	25	50Hz 5G	500 μ sec/40秒	130202d6	○	○	○	500 μ sec/80000	29100から10,000 データ	369/0.1845秒
25_S5_3	25	125Hz 7.5G	500 μ sec/40秒	130204d2	○	○	○	500 μ sec/80000	29500から10,000 データ	378/0.189秒
25_S5_4	25	125Hz 10G	500 μ sec/40秒	130204d3	○	○	○	500 μ sec/80000	27400から10,000 データ	368/0.184秒
25_S5_5	25	125Hz 12.5G	500 μ sec/40秒	130204d4	○	○	○	500 μ sec/80000	29200から10,000 データ	366/0.183秒
50_S2.5_1	50	125Hz 5G	500 μ sec/40秒	130204d5	○	○	○	500 μ sec/80000	31200から10,000 データ	354/0.177秒
50_S2.5_2	50	125Hz 10G	500 μ sec/40秒	130204d6	○	○	○	500 μ sec/80000	26000から10,000 データ	363/0.1815秒
50_S2.5_3	50	125Hz 15G	500 μ sec/40秒	130204d7	○	○	○	500 μ sec/80000	27400から10,000 データ	375/0.1875秒
50_S2.5_4	50	125Hz 20G	500 μ sec/40秒	130204d8	○	○	○	500 μ sec/80000	27400から10,000 データ	381/0.1905秒
50_S2.5_5	50	125Hz 25G	500 μ sec/40秒	130204d9	○	○	○	500 μ sec/80000	29400から10,000 データ	366/0.183秒
50_S1_1	50	50Hz 15G	500 μ sec/40秒	130204d10	○	○	○	500 μ sec/80000	25000から10,000 データ	379/0.1895秒
50_S1_2	50	50Hz 20G	500 μ sec/40秒	130204d11	○	○	○	500 μ sec/80000	27000から10,000 データ	378/0.189秒

表 3.4.27 ケース 2 7 加振データ一覧表

試番	波形	加振周期	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波
6	正弦波	5Hz	600gal	10 波
7	正弦波	5Hz	700gal	10 波

表 3.4.28 ケース 2 8 加振データ一覧表

試番	波形	加振周期	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波
6	正弦波	5Hz	600gal	10 波

表 3.4.29 ケース 2 9 加振データ一覧表

試番	波形	加振周期	入力加速度	波数
1	正弦波	5Hz	100gal	10 波
2	正弦波	5Hz	200gal	10 波
3	正弦波	5Hz	300gal	10 波
4	正弦波	5Hz	400gal	10 波
5	正弦波	5Hz	500gal	10 波
6	正弦波	5Hz	600gal	10 波

表 3.4.30 ケース 3 0 加振データ一覧表

名称	遠心G	加振条件	サンプリング	ファイル名	NR2	NR3	NR4	NRサンプリング
CASE30_d1	50	50Hz 100gal	500 μ sec/40秒	131127d1	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE30_d2	50	50Hz 200gal	500 μ sec/40秒	131127d2	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE30_d3	50	50Hz 300gal	500 μ sec/40秒	131127d3	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE30_d4	50	50Hz 400gal	500 μ sec/40秒	131127d4	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE30_d5	50	50Hz 限界加振	500 μ sec/40秒	131127d5	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE30_d6	50	125Hz 300gal	500 μ sec/40秒	131127d6	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE30_d7	50	30Hz 400gal	500 μ sec/40秒	131127d7	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE30_d8	50	30Hz200gal	500 μ sec/40秒	131127d8	○	○	○	500 μ sec/80000

表 3.4.31 ケース 3 1 加振データ一覧表

名称	遠心G	加振条件	サンプリング	ファイル名	NR2	NR3	NR4	NRサンプリング
CASE31_d1	50	50Hz 100gal	500 μ sec/40秒	140124d01	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE31_d2	50	50Hz 200gal	500 μ sec/40秒	140124d02	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE31_d3	50	50Hz 300gal	500 μ sec/40秒	140124d03	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE31_d4	50	50Hz 400gal	500 μ sec/40秒	140124d04	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE31_d5	50	50Hz 限界加振	500 μ sec/40秒	140124d05	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE31_d6	50	50Hz 100gal	500 μ sec/40秒	140124d06	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE31_d7	50	50Hz 300gal	500 μ sec/40秒	140124d07	○	○	○	500 μ sec/80000
CASE31_d8	50	50Hz 限界加振	500 μ sec/40秒	140124d08	○	○	○	500 μ sec/80000

(5) 表層・弱層における代表標点の変位履歴

高速カメラを使って、表層内標点の移動距離を測定した。表層内標点の位置、変位履歴と入力加速度履歴を合わせて整理した。データ整理対象とする加振ステップは斜面模型が大変形に至った加速度レベルとした。標点変位の履歴を図2. 4. 1から2. 4. 16に示す。

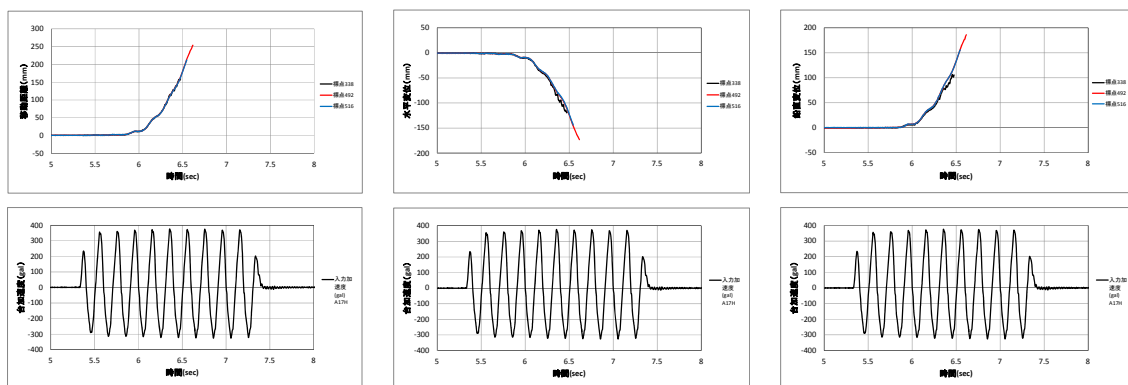


図 3.4.70 ケース 5 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

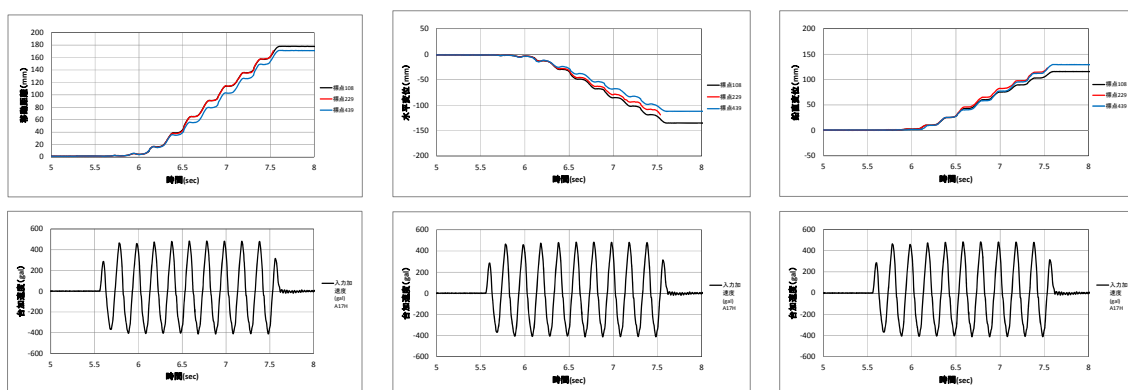


図 3.4.71 ケース 6 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

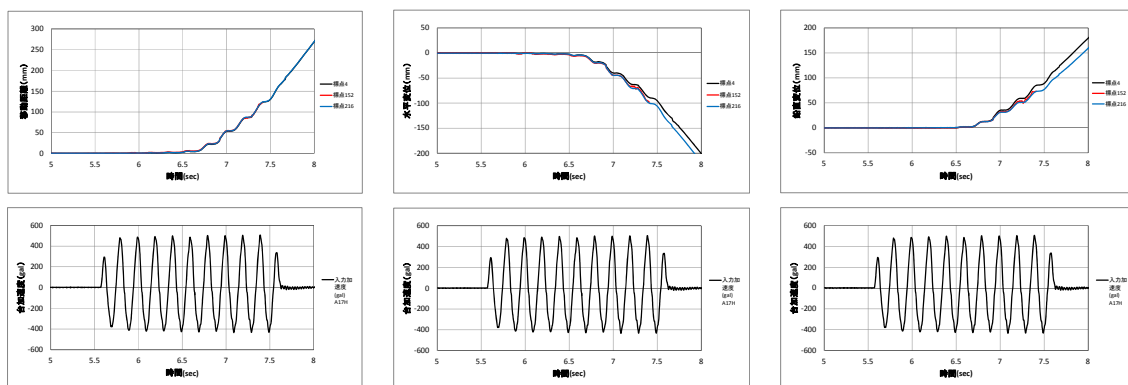


図 3.4.72 ケース 7 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

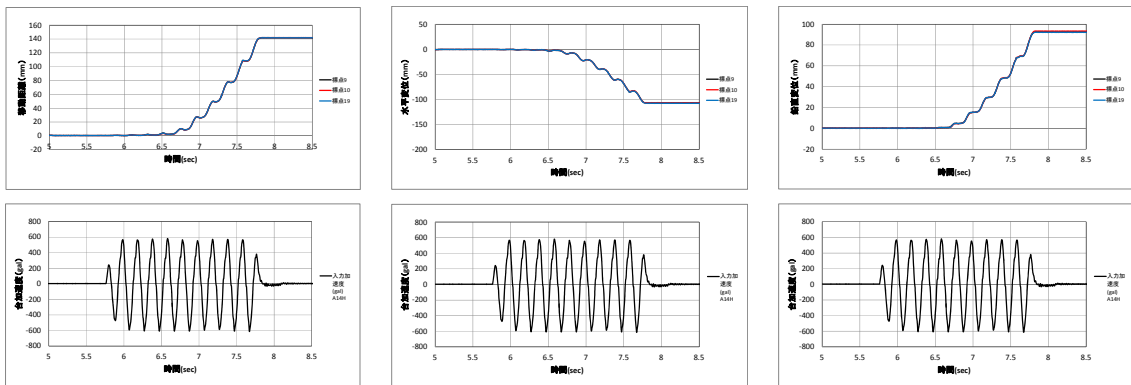


図 3.4.73 ケース 8 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

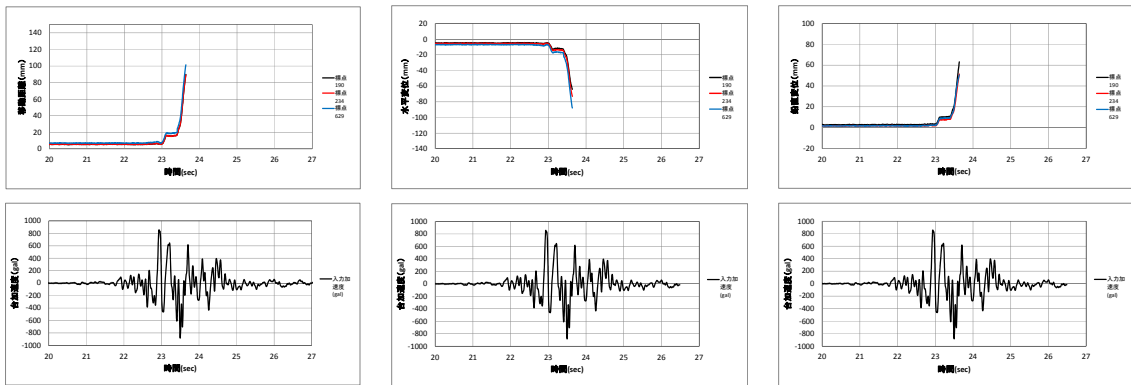


図 3.4.74 ケース 9 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

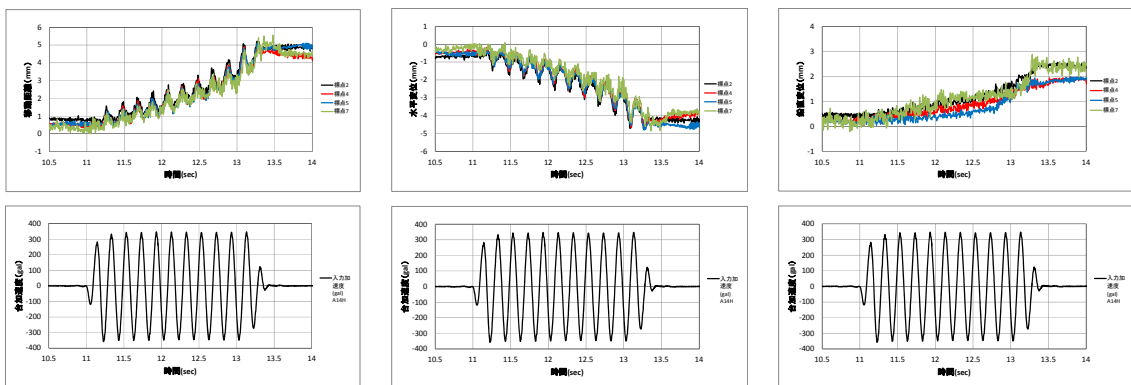


図 3.4.75 ケース 10 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

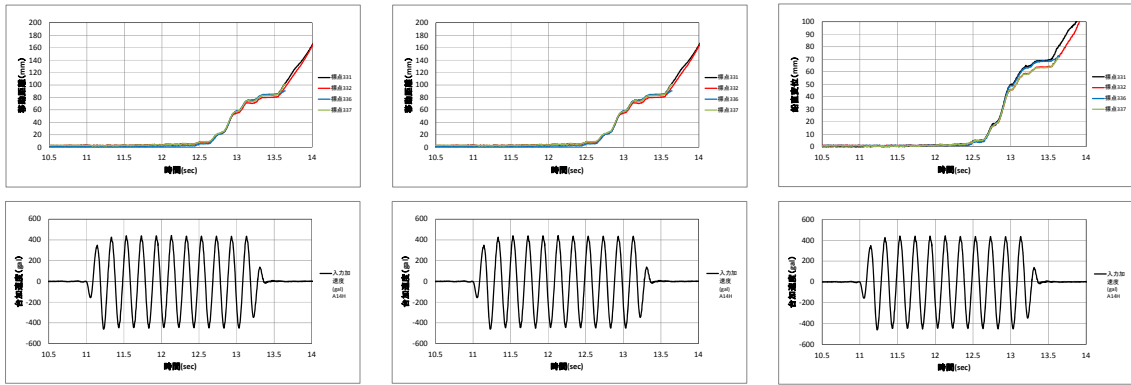


図 3.4.76 ケース 1 1 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

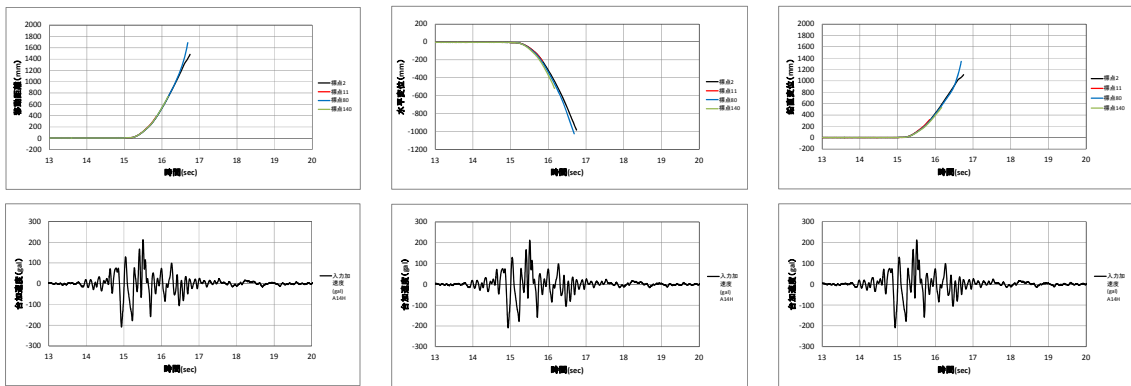


図 3.4.77 ケース 1 2 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

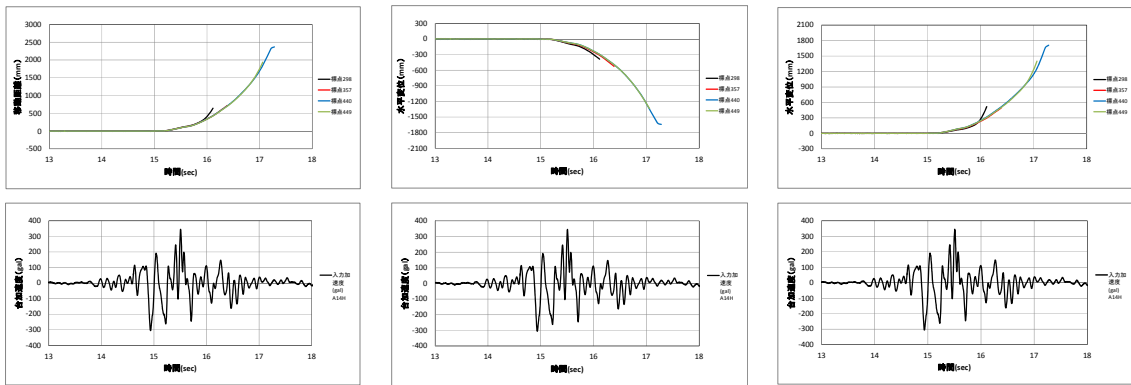


図 3.4.78 ケース 1 3 標点変位履歴 (左：移動量、中：水平、右：鉛直)

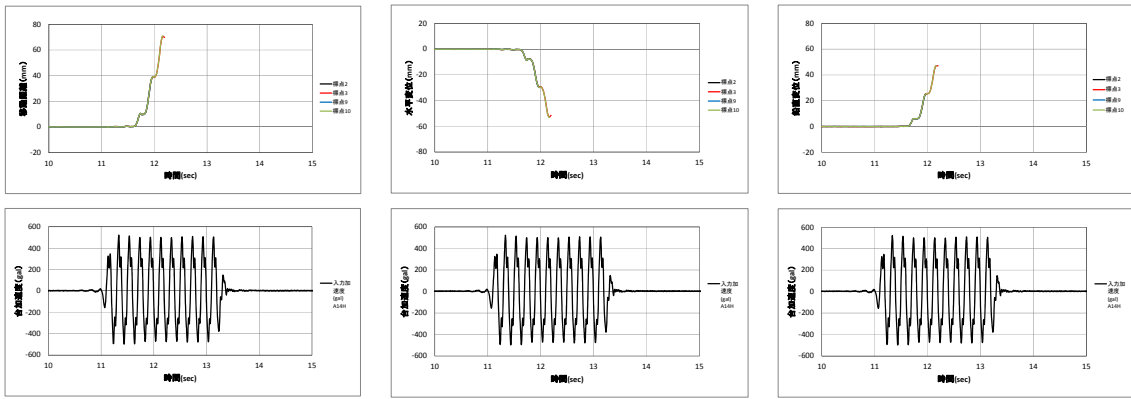


図 3.4.79 ケース 1 4 標点変位履歴 (左: 移動量、中: 水平、右: 鉛直)

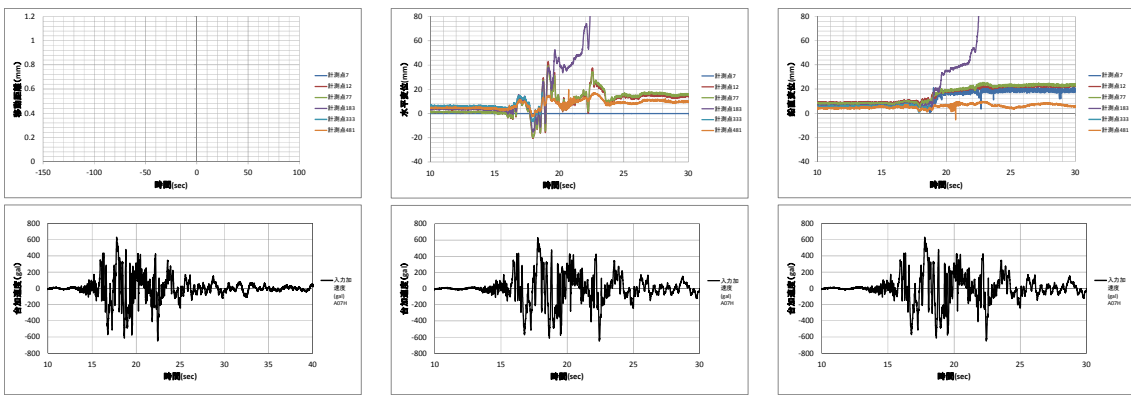


図 3.4.80 ケース 2 1 標点変位履歴 (左: 移動量、中: 水平、右: 鉛直)

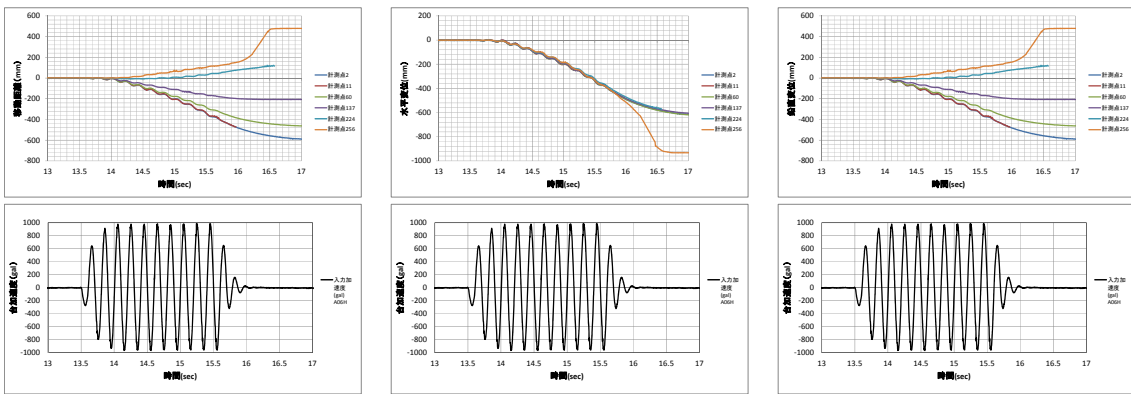


図 3.4.81 ケース 2 2 標点変位履歴 (左: 移動量、中: 水平、右: 鉛直)

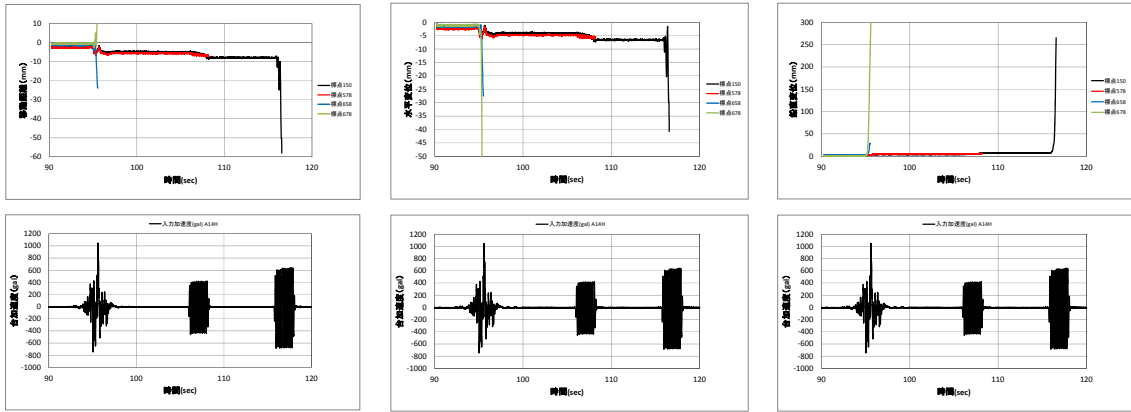


図 3.4.82 ケース 2 3 標点変位履歴 (左: 移動量、中: 水平、右: 鉛直)

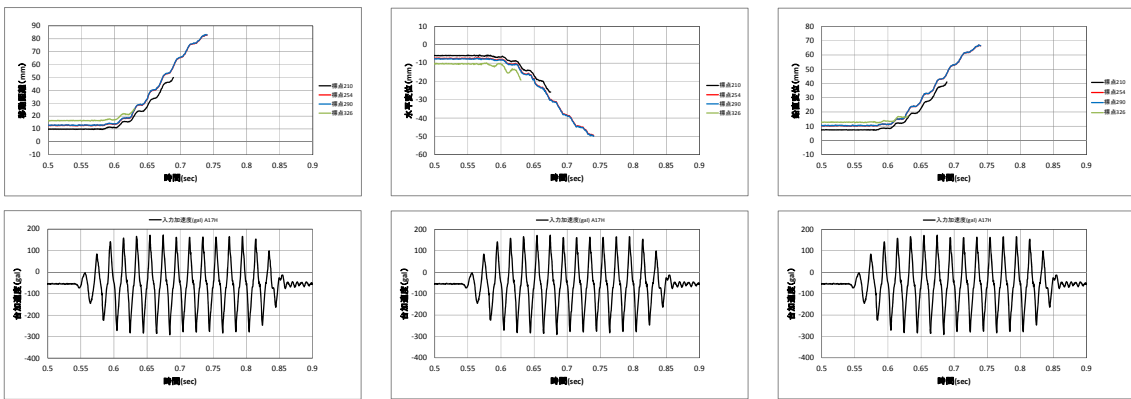


図 3.4.83 ケース 2 6 標点変位履歴 (左: 移動量、中: 水平、右: 鉛直)

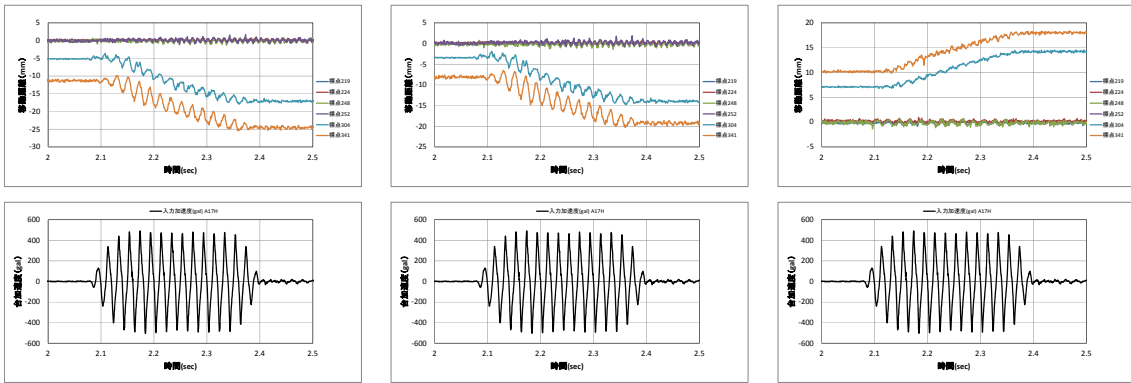


図 3.4.84 ケース 3 0 標点変位履歴 (左: 移動量、中: 水平、右: 鉛直)

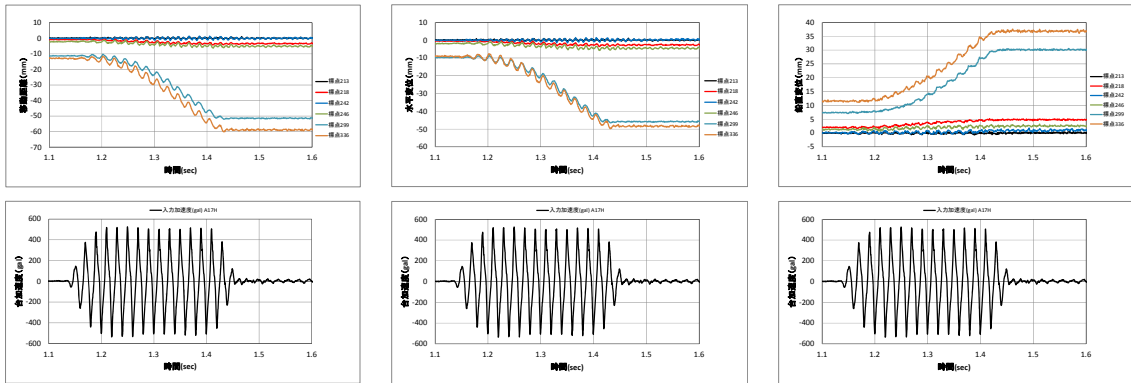


図 3.4.85 ケース 3 1 標点変位履歴 (左 : 移動量、中 : 水平、右 : 鉛直)

3. 5 会議の実施

地盤工学と耐震工学に関する研究者および専門家3名を含めて、事業実施期間内に計3回会議を実施した。表 3.5.1 に委員会メンバー、表 3.5.2 に実施日および開催場所を示す。

表 3.5.1 委員会メンバー

	氏名	所属
委員長	中村 晋	日本大学 工学部 土木工学科 教授
委員	吉田 郁政	東京都市大学 工学部 都市工学科 教授
委員	河井 正	東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻 准教授

表 3.5.2 実施日および開催場所

	実施日	場所
第1回	平成26年11月4日	公益財団法人鉄道総合技術研究所（東京都国分寺市）
第2回	平成26年12月19日	公益財団法人鉄道総合技術研究所東京オフィス（東京都千代田区）
第3回	平成27年1月30日	日本大学工学部（福島県郡山市）

4. まとめ

土塊・土砂の衝突に係るリスク評価に向け、斜面崩壊に伴う岩塊の転動挙動に関する試験を実施し、その検証に必要なデータ取得を行った。具体的には、材料特性を把握するための要素試験、岩塊転動試験、岩塊転動試験の検証解析を実施した。また、斜面の安定性に係る設計・リスク評価手法の整備に資する基礎資料として、斜面崩壊に関する試験データ情報整理を行った。

材料特性を把握するための要素試験では、岩塊転動試験に用いる試料の跳ね返り特性、摩擦特性および変形強度特性を調べた。

岩塊転動試験では、碎石単体または碎石群の場合で試験を実施した。そして、それらの挙動を到達距離の頻度分布で整理および分析した。さらに、三次元画像解析システムを用いて、碎石の速度および軌跡履歴を三次元で計測した。碎石単体試験では、落下高さ、粒子サイズおよび斜面が勾配碎石の挙動に与える影響を定量的に評価できた。碎石群試験では、群に含まれる細粒分の比率や含水比が碎石群の挙動に与える影響を定量的に評価できた。

岩塊転動試験の検証解析では、粒子法 (MPM) による転動試験のシミュレーションを実施した。その際、要素試験で求めた物性でモデル化した。碎石単体試験に対しては実験値を過小評価した。一方、碎石群試験に対しては、到達距離は同等、拡がりや過小評価する傾向を示し、群の挙動に対する粒子法の有用性を確認した。

データ情報整理では、過年度実施した転動試験と振動台試験の試験結果データを整理した。転動試験については、衝撃荷重と速度の関係をまとめ、衝撃荷重を求める式を提案した。また、転動係数と速度の関係から、岩塊の挙動が到達距離の大きさに与える影響を考察した。振動台試験については画像解析結果を整理し、試験結果を体系的にまとめた。