

8. 粒子法による大変形解析

8.1 解析ケース

本件では、粒子法による大変形解析プログラムを用いて、岩盤斜面の大変形解析を行うことを目的とした。

下の表に示す5ケースについて解析を実施した。本章では小規模模型（Case27～Case29）の結果、軟岩斜面（ケース4）の結果および硬岩斜面（ケース5）の結果を示す。

表 8.1.1 解析ケース一覧

ケース	スケール	概要
Case27	小規模模型	3層模型（弱層互層）
Case28	小規模模型	3層模型（弱層互層）
Case29	小規模模型	3層模型（弱層互層）
4	実規模斜面	軟岩斜面
5	実規模斜面	硬岩斜面

8.2 入力データと解析モデル作成

入力データとして「静的・動的解析用、時間間隔、加速度、観測点等設定データ」、「入力加速度履歴データ」、「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。

8.2.1 解析モデル概要（時間間隔、粒子数）

以下に小規模模型の3ケースの粒子数、解析ステップ数、時間間隔を示す。初期応力解析では2秒間、動的解析では斜面が崩壊の進行が収まる時刻までを解析範囲とし、それぞれのケースで決定した。

表 8.2.1 粒子数、解析ステップ数、ステップ間隔

ケース	スケール	粒子数	初期応力解析		動的解析	
			解析ステップ数	ステップ間隔 (sec)	解析ステップ数	ステップ間隔 (sec)
Case27	小規模模型	6,234	20,000	1.0×10^{-5}	1,400,000	1.0×10^{-5}
Case28	小規模模型	6,234	20,000	1.0×10^{-5}	1,200,000	1.0×10^{-5}
Case29	小規模模型	5,626	200,000	1.0×10^{-5}	1,400,000	1.0×10^{-5}

8.2.2 入力加速度

入力加速度は、振動台に設置された加速度計 A14 水平方向の実測値を用いた。崩壊直前の振動を3秒間、崩壊時の振動を3秒間与え、2つの振動の間及び崩壊時の振動後に1秒間の静止状態を設けた。

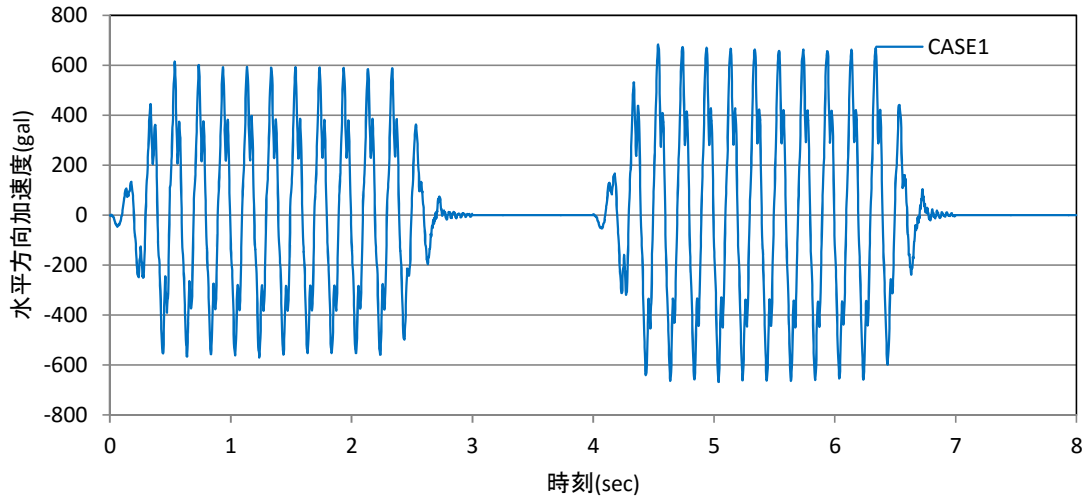


図 8.2.1 CASE27 の入力波

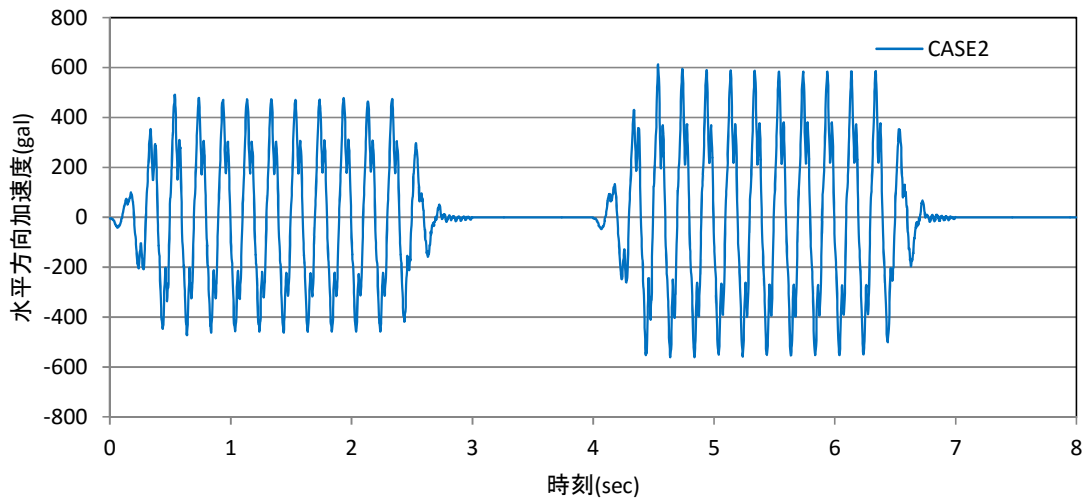


図 8.2.2 CASE28 の入力波

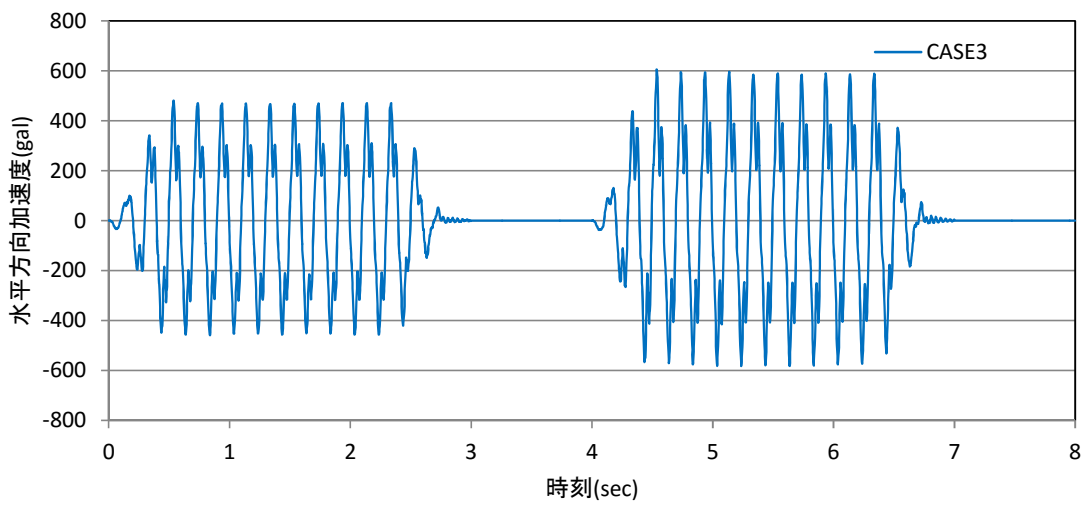


図 8.2.3 CASE29 の入力波

8.2.3 物性値

物性データは以下のとおりである。MPMの解析では、初期応力状態を自重解析で行いその応力状態を初期値として、地震応答解析を行った。

(1) 弱層

初期応力解析では、弱層部分の物性をドラガープラグーの弾塑性モデルとして扱い、ピーク強度内の応力状態を算定した。地震応答解析においては浅岡モデルを用いた。以下に物性値パラメータを示す。

表 8.2.2 ドラガープラグー弾塑性モデル (弱層・初期応力解析)

項目説明	項目名	A材料	B材料
$E=E_0 (\sigma'_m / \sigma'_{m0})^n$ の応力依存の弾性係数(kN/m ²)	E_0	5691.91	4.198.93
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}	50.0	50.0
応力依存の弾性係数の式のn	n	0.5	0.5
σ'_m の下限値(kN/m ²)	$\sigma'_m(\text{min})$	0.01767	0.2180
単位質量(t/m ³)	r_0	1.767	2.180
ポアソン比	ν	0.214	0.214
せん断摩擦角(°)	ph	39.5	34.0
塑性ポテンシャル(°)	psic	0.0	0.0
粘着力(kN/m ²)	CC	2.9	5.8
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 $H=h \cdot E_0 (\sigma'_m / \sigma'_{m0})^n$ として評価	h	0.0	0.0
減衰に使用する弾性係数(kN/m 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	0.002	0.002
粘着力の下限値	Cmin	0.0	0.0

表 8.2.3 浅岡モデル (弱層・地震応答解析)

項目説明	項目名	A 材料	B 材料
圧縮指数	λ	0.01	0.005
膨潤指数	κ	0.001	0.0005
初期間隙比	e_0	0.85	0.856
単位質量(t/m ³)	ν	1.767	2.180
ポアソン比	ν	0.214	0.214
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	0.002	0.002
κ 最大値	κ_{max}	0.14	0.009
κ が $(\kappa_{min} + \kappa_{max})/2$ となる偏差塑性ひずみ	γ_R	0.01	0.01
下負荷面の発展側の係数 m が $(m_1 + m_2)/2$ となる偏差塑性ひずみ	γ_m	0.001	0.001
側圧係数(初期応力状態での K_0)	K_0	0.5	0.5
初期応力算定用側圧係数	K_i	0	0
正規降伏面の大きさ/上負荷面の大きさ	R^*	0.3	0.4
破壊応力比	M	1.37	1.37
EC モデルのパラメータ	ne	1.001	1.001
粘着力(kN/m ²)	C	1.5	3.0
上負荷面の展側のパラメータ	mb	0.0	0.0
上負荷面の発展側のパラメータ	mc	0.0	0.0
C の効果が開始する平均主応力(kN/m ²)	σ_b	1.0	1.0
$C=0$ となる平均主応力(kN/m ²)	σ_a	0.01	0.01
γ_λ を指定した時の λ の最小値	λ_{min}	0.15	0.01
下負荷面の発展側の係数	m	10.0	0.5
上負荷面の発展側の係数	ma	0.01	0.1
回転硬化の発展側の係数	br	400	10.0
回転硬化の回転の限界値	mr	1.35	1.35
せん断硬化関数のパラメータ	Md	1.37	1.37
せん断硬化関数のパラメータ	μ	0.0	0.0
移動硬化のパラメータ	CC	0.0	0.0
CC の下限値	CC_{min}	0.0	0.0
移動硬化パラメータが $(CC + CC_{min})/2$ となるひずみ	γ_c	0.0	0.0
γ_c に使用する乗数	nc	0.0	0.0
$1/\lambda$ の値が $1/\lambda_{min}$ と $1/\lambda_{max}$ の半分になる偏差塑性ひずみ	γ_λ	0.0002	0.0001
上負荷面の限界値を示す係数	ASTRALIMT	9999999.9	9999999.9
$ma=ma_1$ となる正規降伏面の Po' の値	Po_1	0.0	0.0
Po_2 における ma の値	ma_2	0.0	0.0
$ma=ma_2$ となる正規降伏面の Po の値	Po_2	0.0	0.0
下負荷面の発展側の係数	m_2	0.001	0.001
γ_m に使用する乗数	am	1.0	1.0
γ_λ に使用する乗数	a_λ	1.0	1.0
γ_R に使用する乗数	a_R	1.0	1.0

※ $Po_1 \sim ma_2 = Po_2 = 0$ の場合は、 $ma = ma_1$ (一定値)となる。

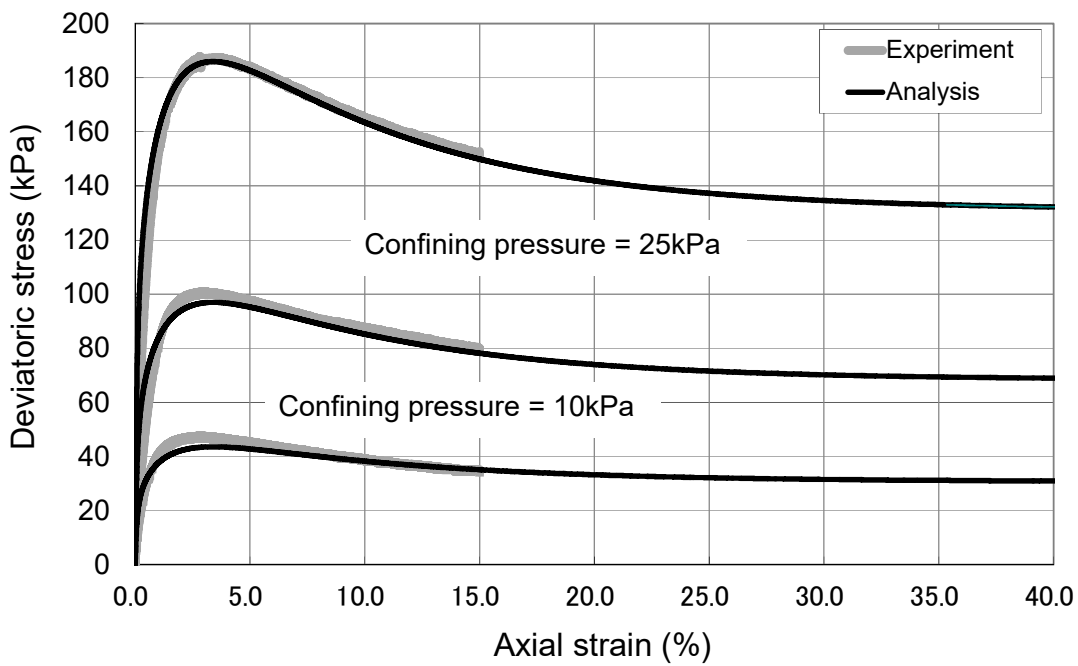


図 8.2.4 弱層 A 材料試験 (浅岡モデル)

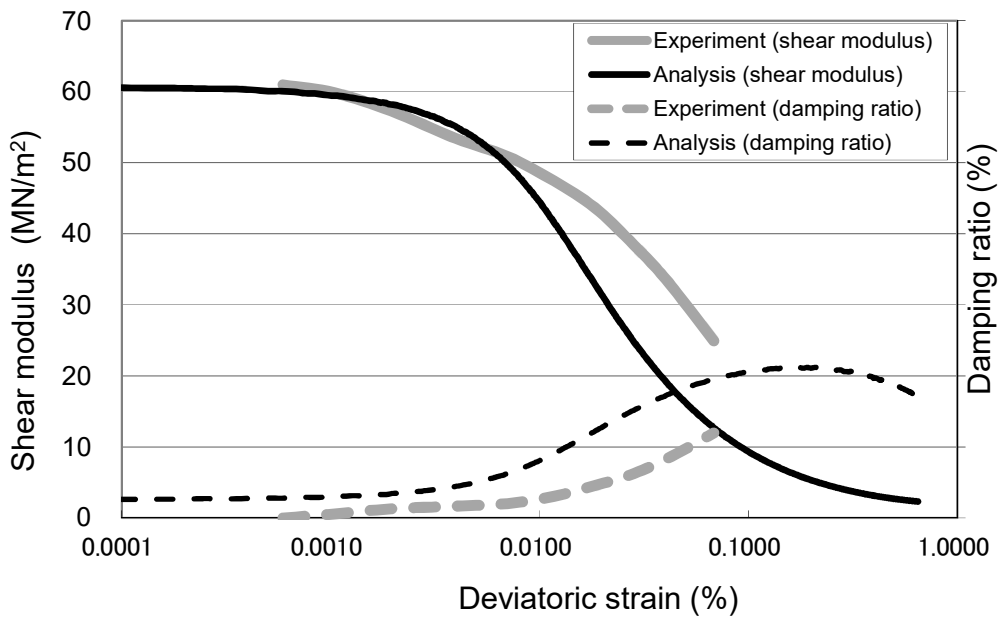


図 8.2.5 弱層 A 材料 G- γ 曲線, h- γ 曲線 (浅岡モデル)

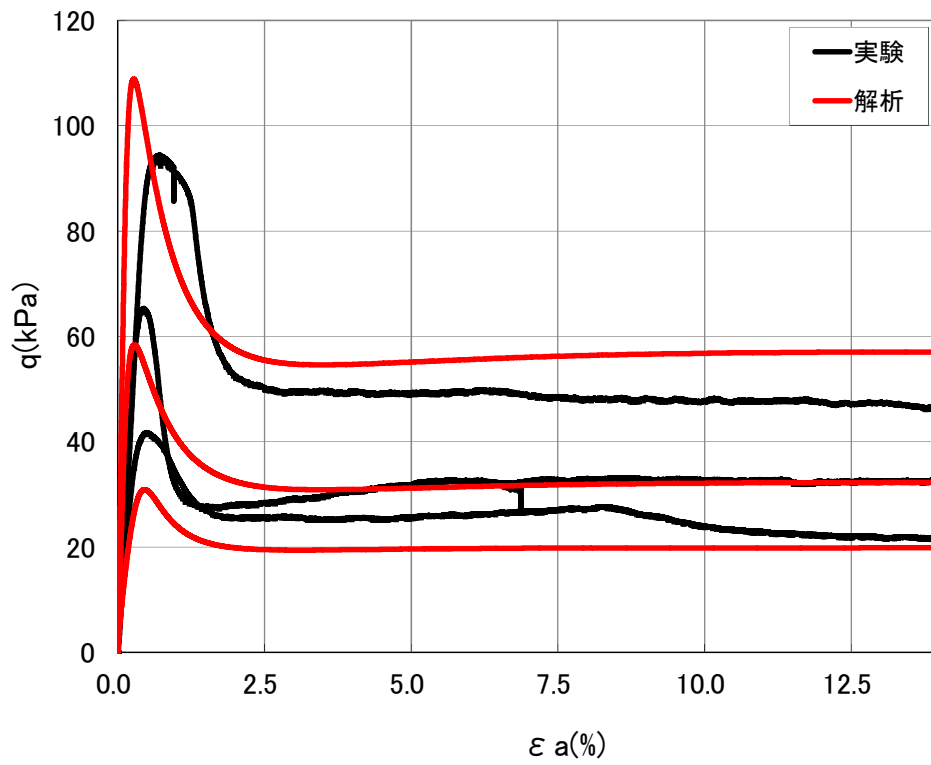


図 8.2.6 弱層B材料試験 (浅岡モデル)

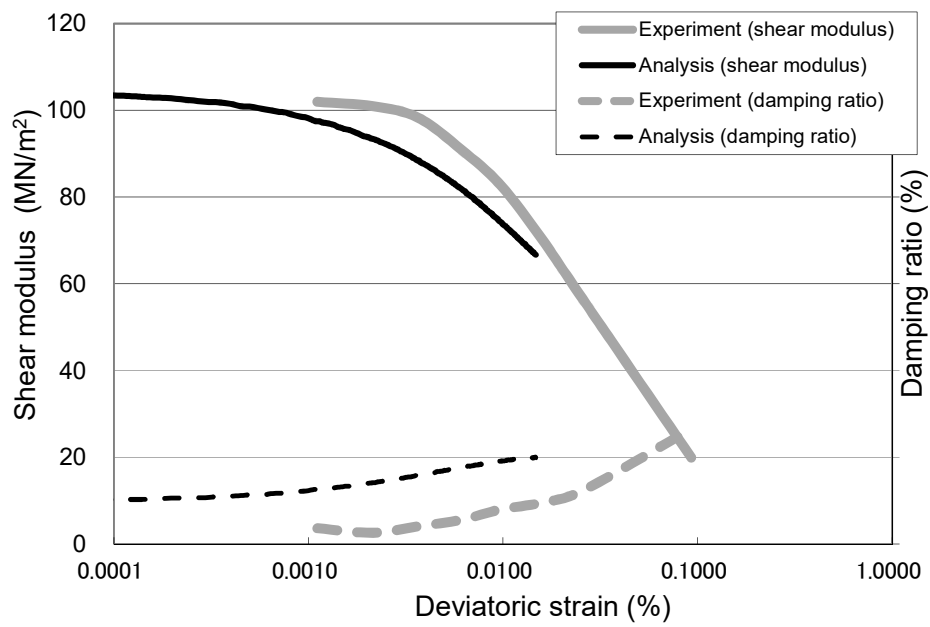


図 8.2.7 弱層B材料G- γ 曲線, h- γ 曲線 (浅岡モデル)

(2) 表層

表層部分の物性はドラグープラガーの弾塑性モデルを用いた。以下に物性値パラメータを示す。

表 8.2.4 CASE27 ドラグープラガー弾塑性モデル (表層)

項目説明	項目名	入力値
$E=E_0 (\sigma'_m / \sigma'_{m0})^n$ の応力依存の弾性係数 (kN/m ²)	E_0	81591.4
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}	50.0
応力依存の弾性係数の式の n	n	0.5
σ'_m の下限値 (kN/m ²)	$\sigma'_m(\text{min})$	0.03
単位質量 (t/m ³)	r_0	3.0
ポアソン比	ν	0.214
せん断摩擦角 (°)	ph	0.0
塑性ポテンシャル (°)	psic	0.0
粘着力 (kN/m ²)	CC	107.0
引張強度 (kN/m ²)	σ'_t	10.7
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
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
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
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
減衰に使用する弾性係数 (kN/m ²)	E_c	0.0
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	αs	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	βs	0.002
粘着力の下限値	Cmin	0.0

(3) 基盤層

基盤層の物性は弾性モデルを用いた。以下に物性値パラメータを示す。

表 8.2.5 CASE27 弾性モデル (アンカー・初期応力解析)

項目説明	項目名	入力値
弾性係数 (kN/m ²)	E	1.0E04
ポアソン比	ν	0.267
単位質量 (t/m ³)	r_0	1.89
引張強度 (kN/m ²)	cc	0.0
粒子の質量に対するレイリー減衰係数	αs	0.0
粒子の剛性に対するレイリー減衰係数	βs	0.002
側圧係数 (初期応力状態)	K_i	0.0

8.2.4 形状、境界条件、背面格子、出力位置

入力データとして「静的・動的解析用、時間間隔、加速度、観測点等設定データ」、「入力加速度履歴データ」、「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。

静的解析、動的解析を実施したモデル形状を以下に示す。

<Case27>

背面格子条件として格子幅 $0.025\text{m} \times 0.025\text{m} \times 0.025\text{m}$ 、粒子数 $2 \times 2 \times 2$ とした。

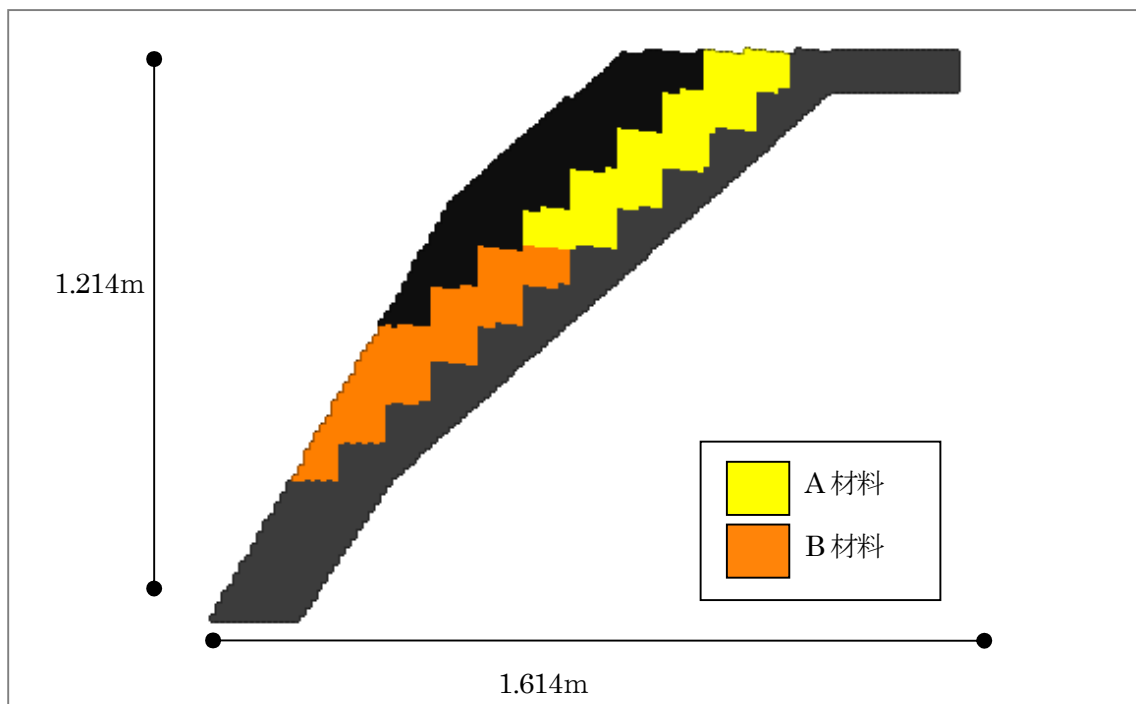


図 8.2.8 CASE27 モデル形状

<Case28>

背面格子条件として格子幅 $0.025\text{m} \times 0.025\text{m} \times 0.025\text{m}$ 、粒子数 $2 \times 2 \times 2$ とした。

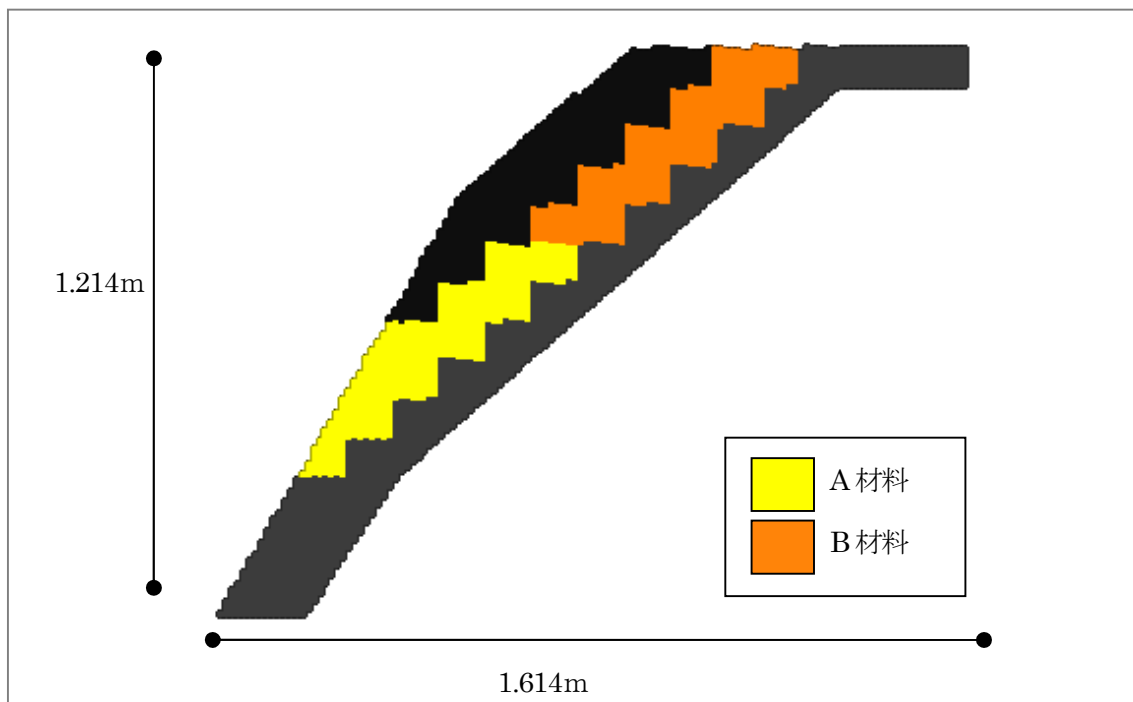


図 8.2.9 CASE28 モデル形状

<Case29>

背面格子条件として格子幅 $0.025\text{m} \times 0.025\text{m} \times 0.025\text{m}$ 、粒子数 $2 \times 2 \times 2$ とした。

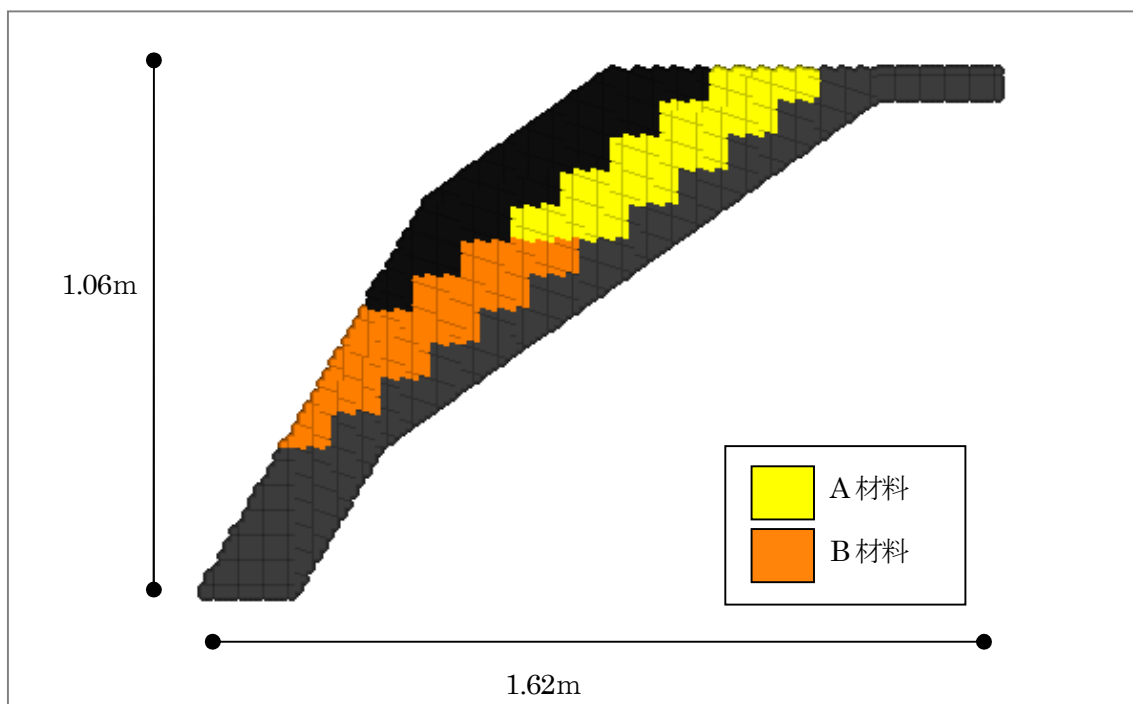


図 8.2.10 CASE29 モデル形状

以下に、加速度計、変位計の設置位置を示す。加速度計、変位計の位置にもっとも近い粒子を選択し、変位、速度、加速度、応力-ひずみ関係出力用のデータを作成した。

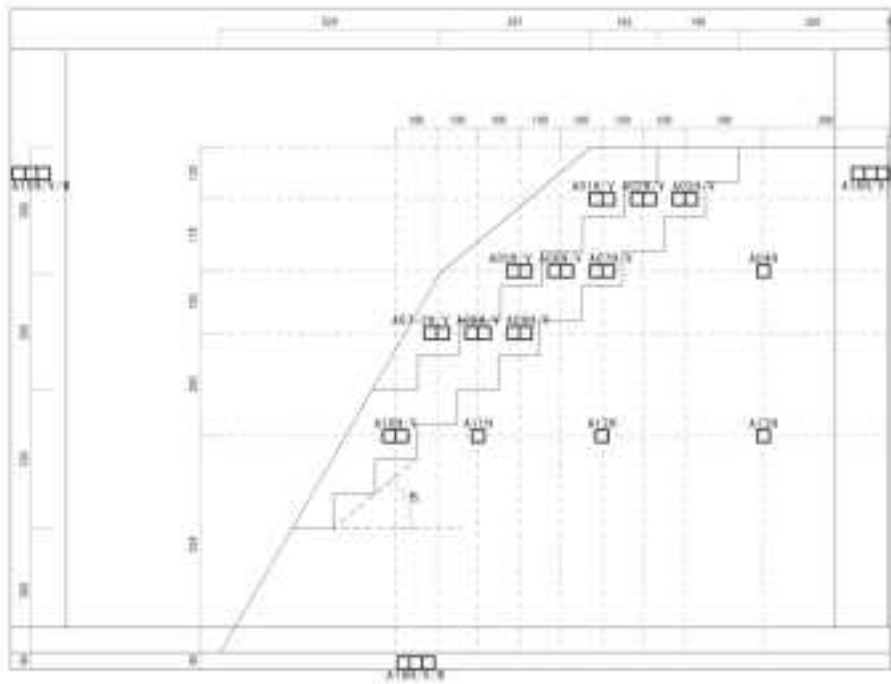


图 8.2.11 CASE27、28 加速度計設置位置

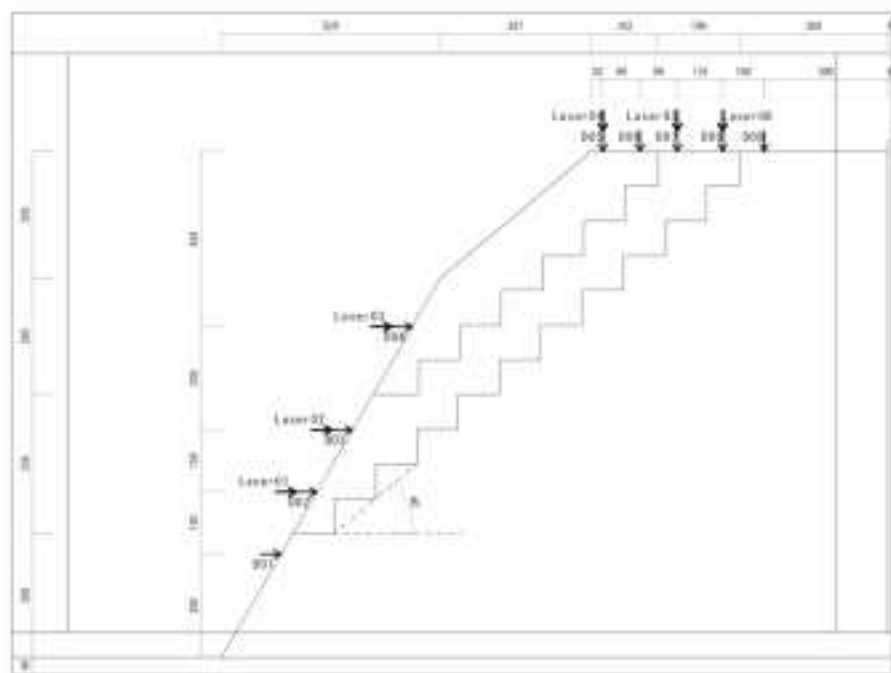


图 8.2.12 CASE27、28 変位計設置位置

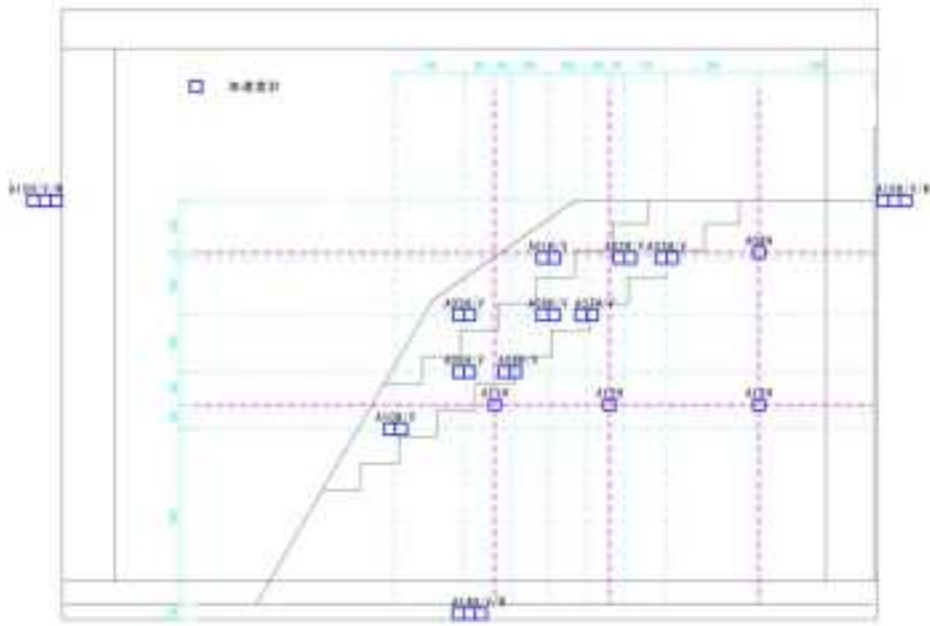


图 8.2.13 CASE29 加速度計設置位置

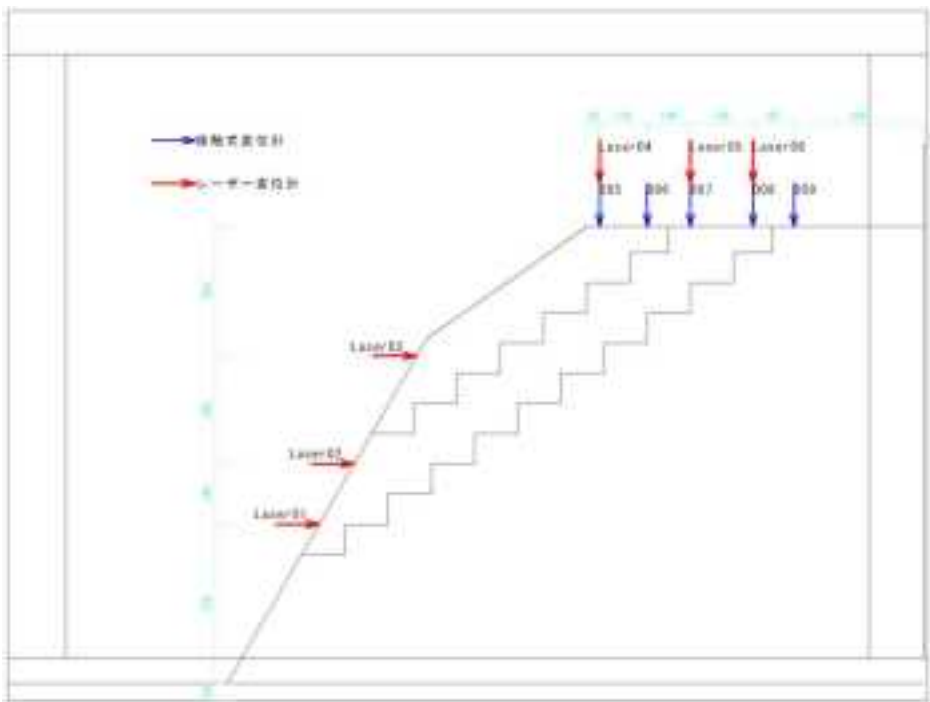


图 8.2.14 CASE29 変位計設置位置

8.3 解析結果

解析モデルの変形図を以下に示す。

8.3.1 変形図(CASE27)

time = 1.40000E-01sec



図 8.3.1 CASE27(0.0sec)

time = 1.40000E-01sec

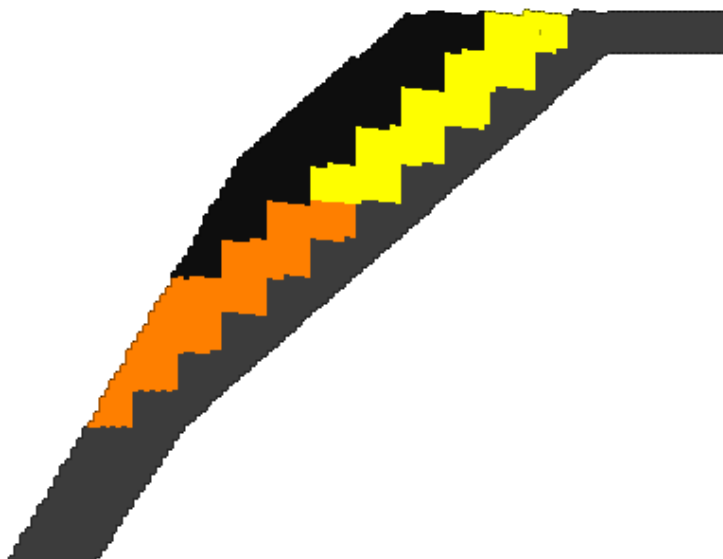


図 8.3.2 CASE27(1.4sec)

time = 2.80000E+00sec

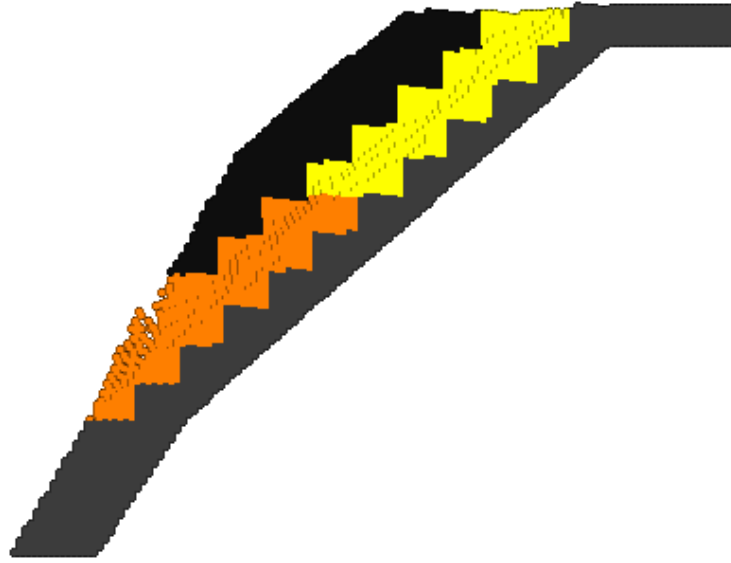


图 8.3.3 CASE27(2.8sec)

time = 4.20000E+00sec

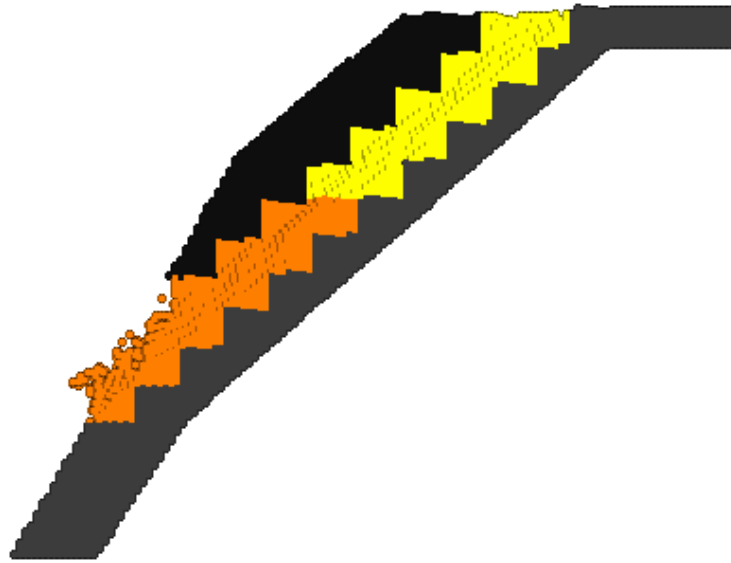


图 8.3.4 CASE27(4.2sec)

time = 5.60000E+00sec

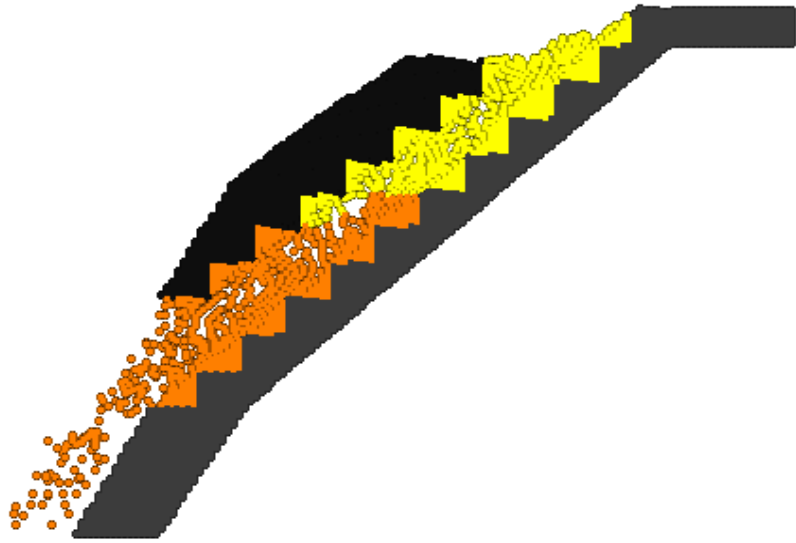


图 8.3.5 CASE27 (5.6sec)

time = 7.00000E+00sec

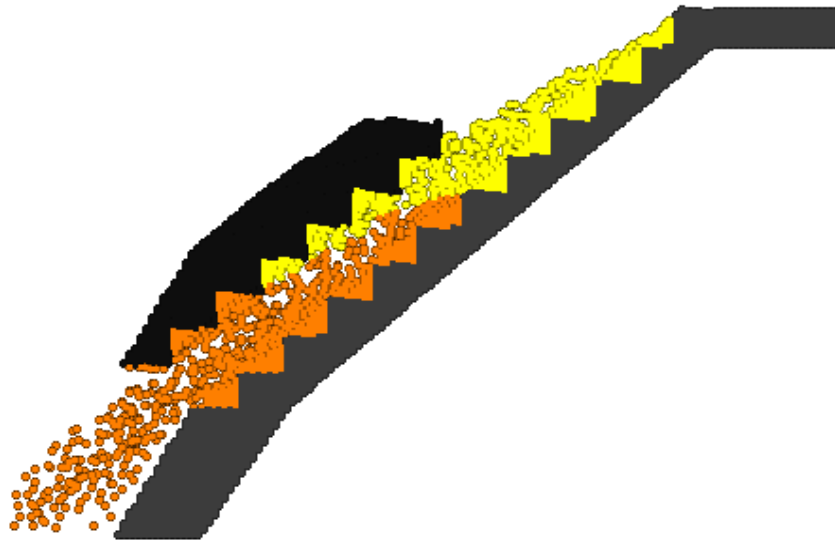


图 8.3.6 CASE27 (7.0sec)

time = 8.40000E+00sec

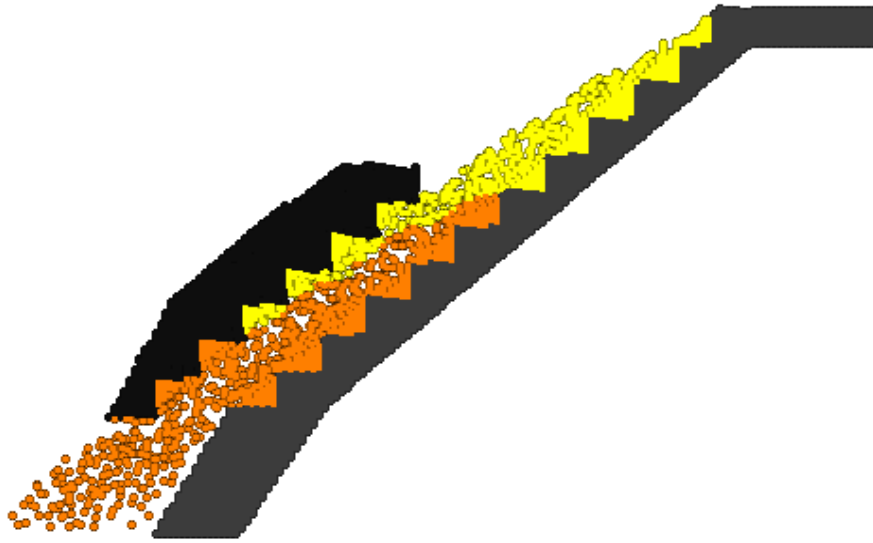


图 8.3.7 CASE27 (8.4sec)

time = 9.80000E+00sec

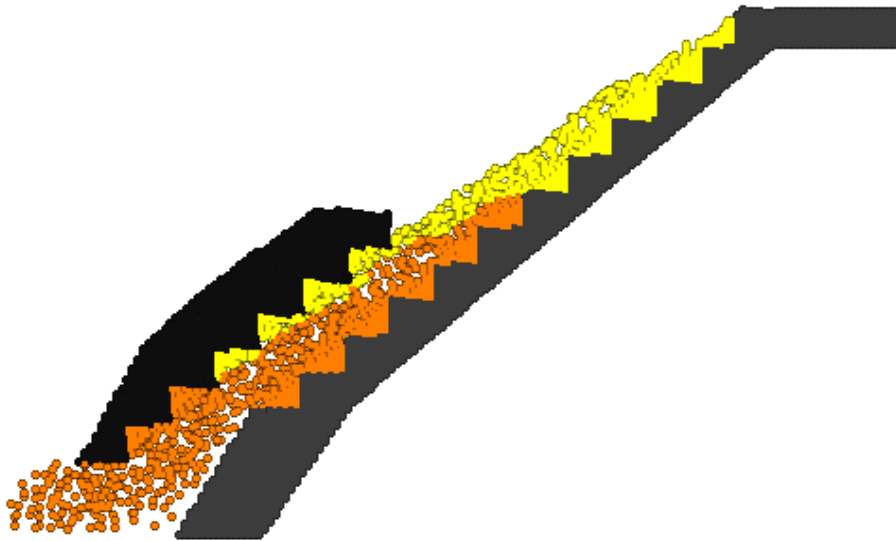


图 8.3.8 CASE27 (9.8sec)

time = 1.12000E+01sec

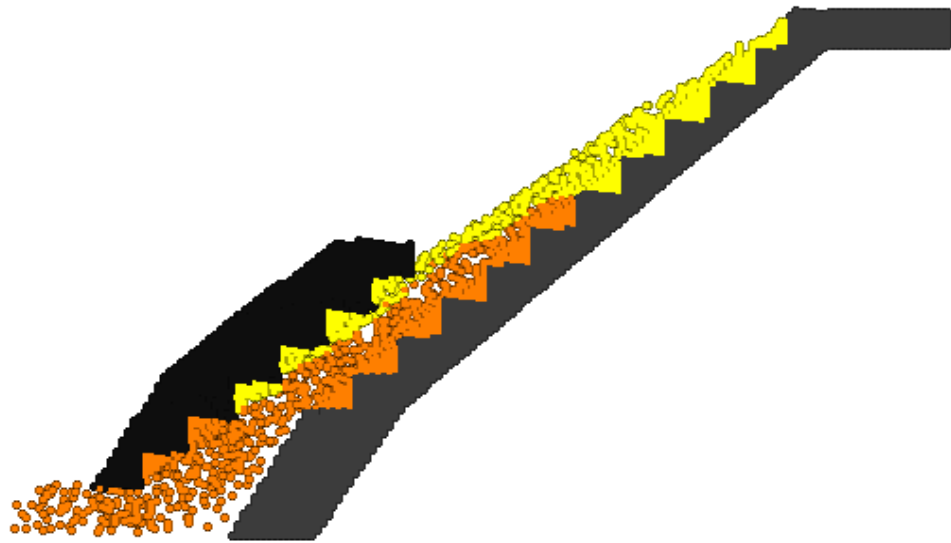


图 8.3.9 CASE27 (11.2sec)

time = 1.26000E+01sec

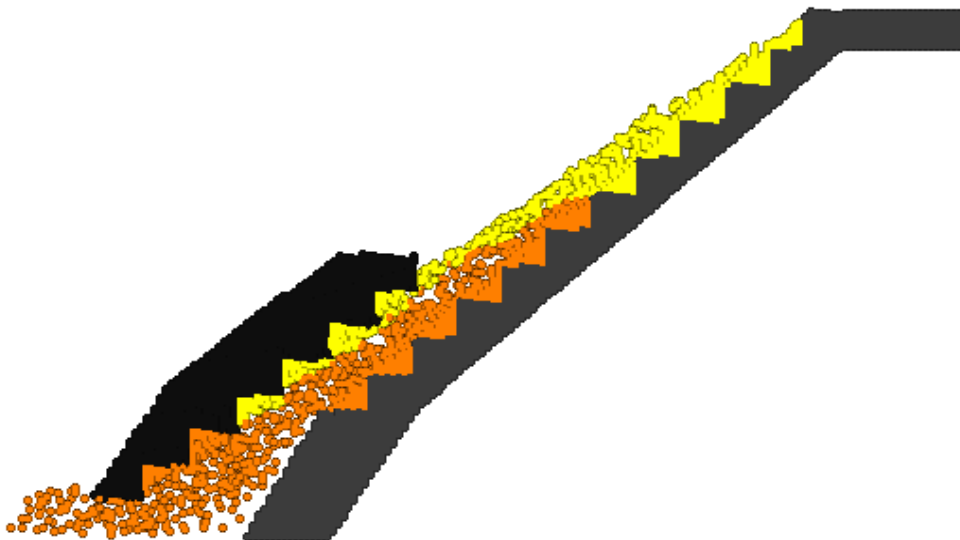


图 8.3.10 CASE27 (12.6sec)

time = 1.40000E+01sec

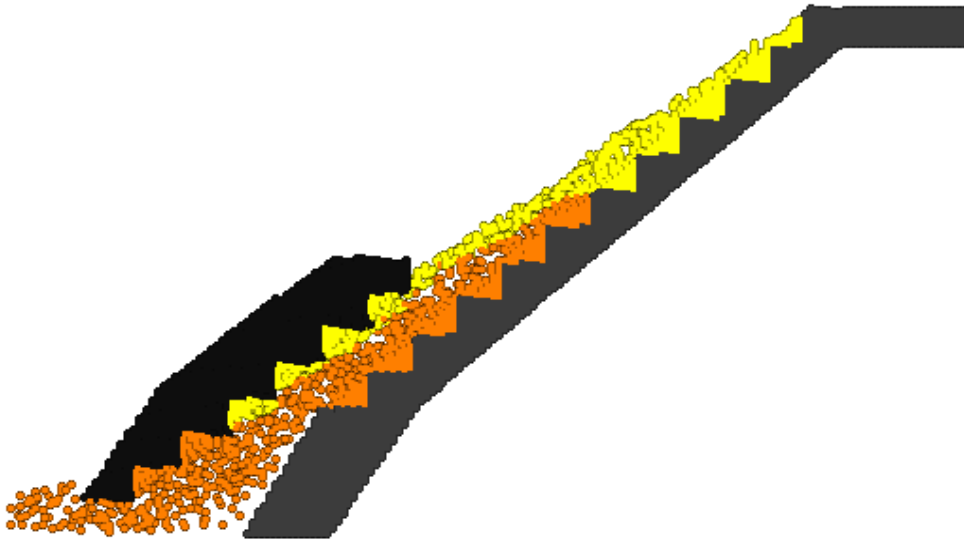


图 8.3.11 CASE27 (14.0sec)

8.3.2 变形图(CASE28)

time = 1.20000E-01sec

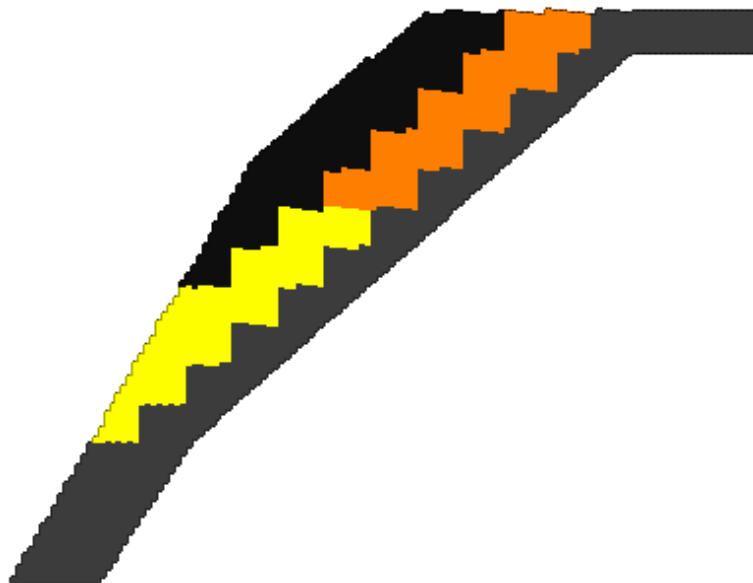


图 8.3.12 CASE28 (0.0sec)

time = 1.20000E-01sec

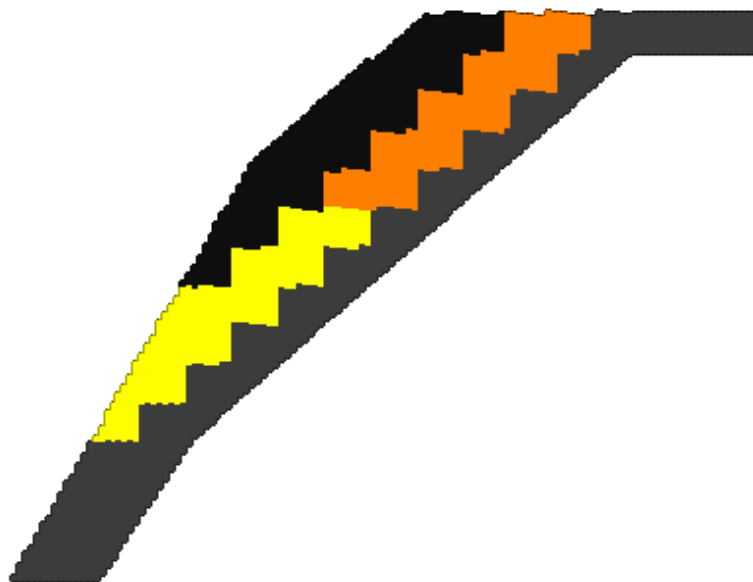


图 8.3.13 CASE28 (1.2sec)

time = 2.40000E+00sec

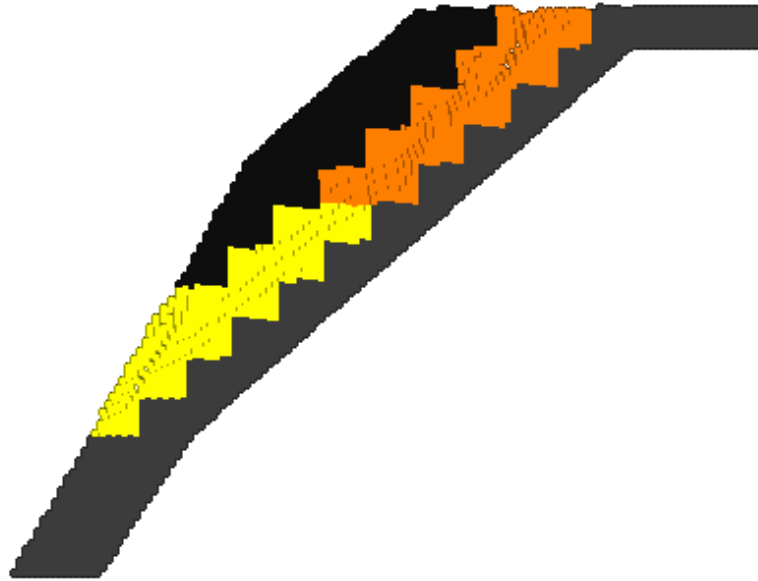


图 8.3.14 CASE28 (2.4sec)

time = 3.60000E+00sec

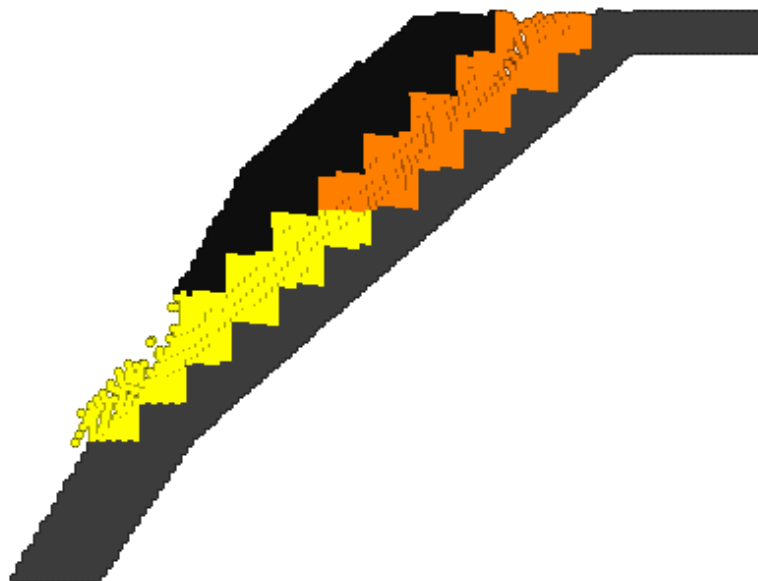


图 8.3.15 CASE28 (3.6sec)

time = 4.80000E+00sec

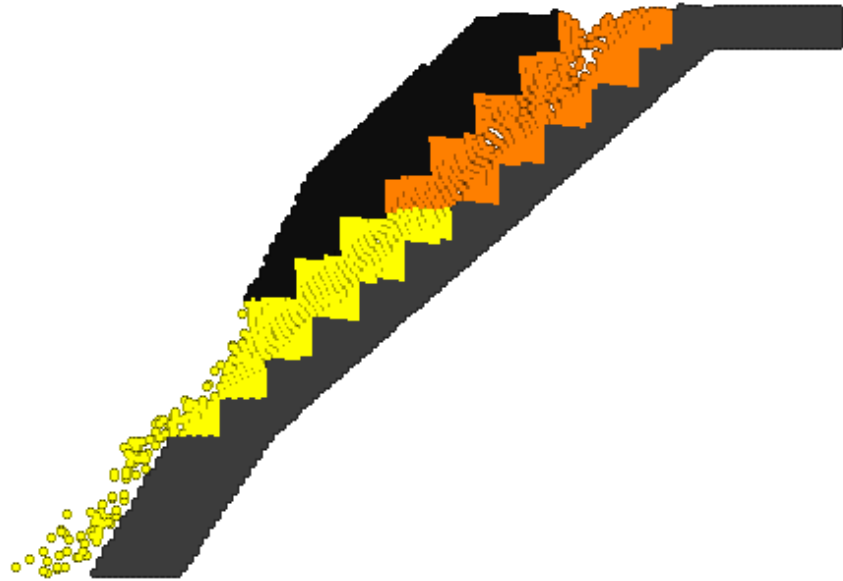


图 8.3.16 CASE28 (4.8sec)

time = 6.00000E+00sec

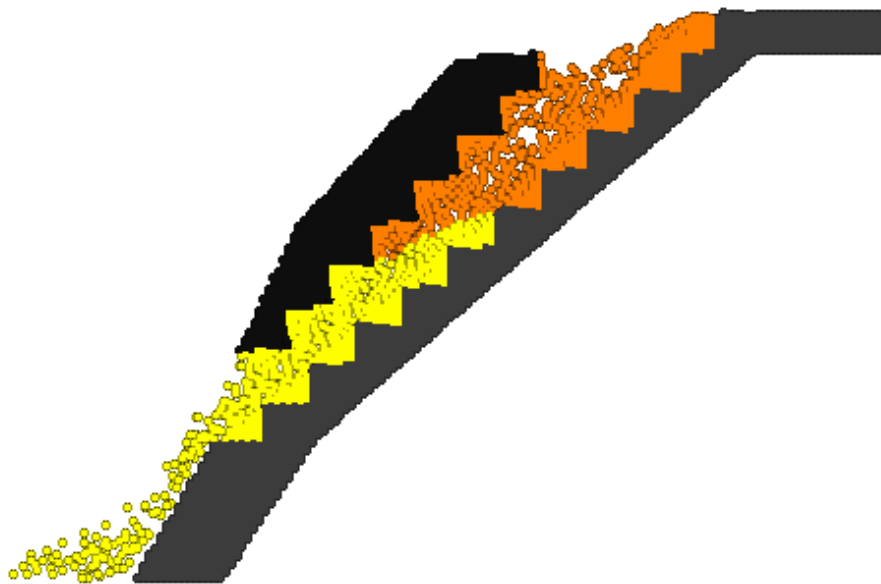


图 8.3.17 CASE28 (6.0sec)

time = 7.20000E+00sec

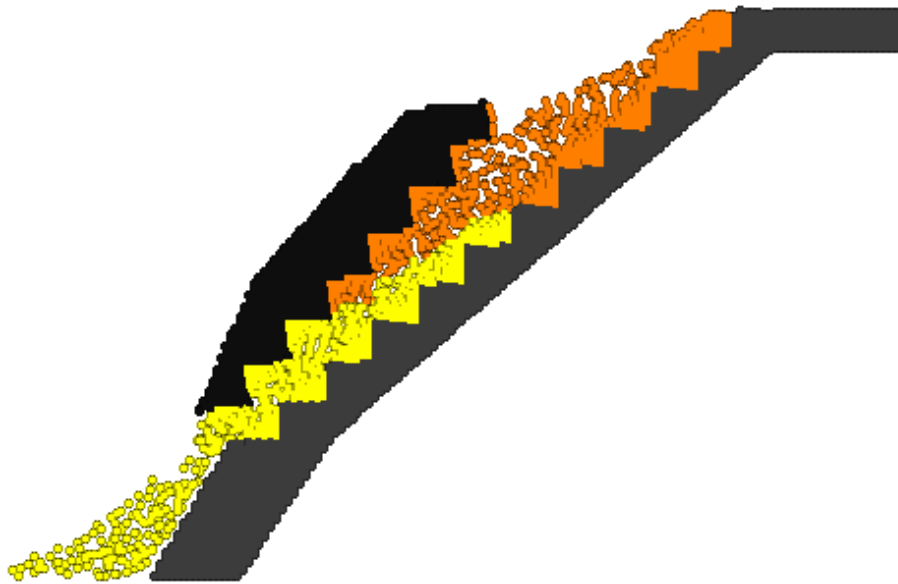


图 8.3.18 CASE28 (7.2sec)

time = 8.40000E+00sec

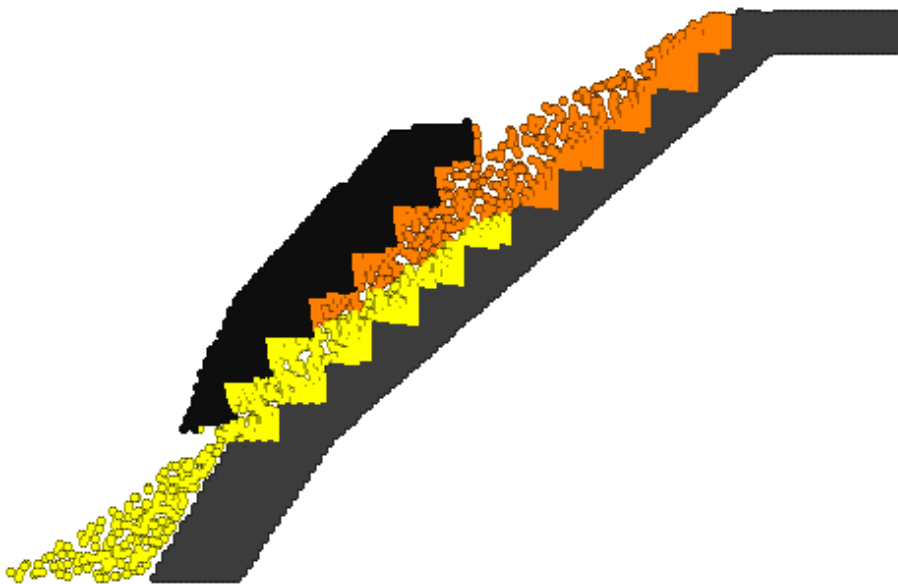


图 8.3.19 CASE28 (8.4sec)

time = 9.60000E+00sec

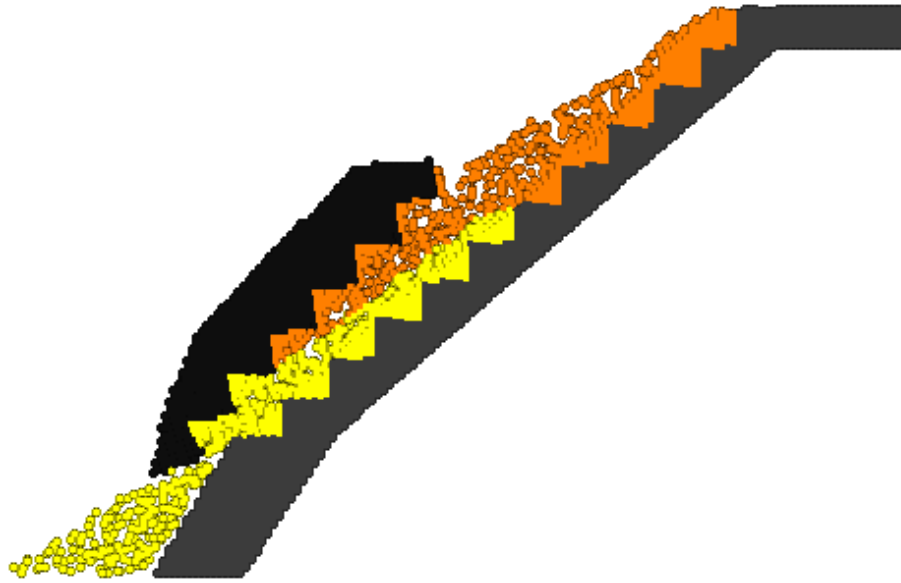


图 8.3.20 CASE28 (9.6 sec)

time = 1.08000E+01sec

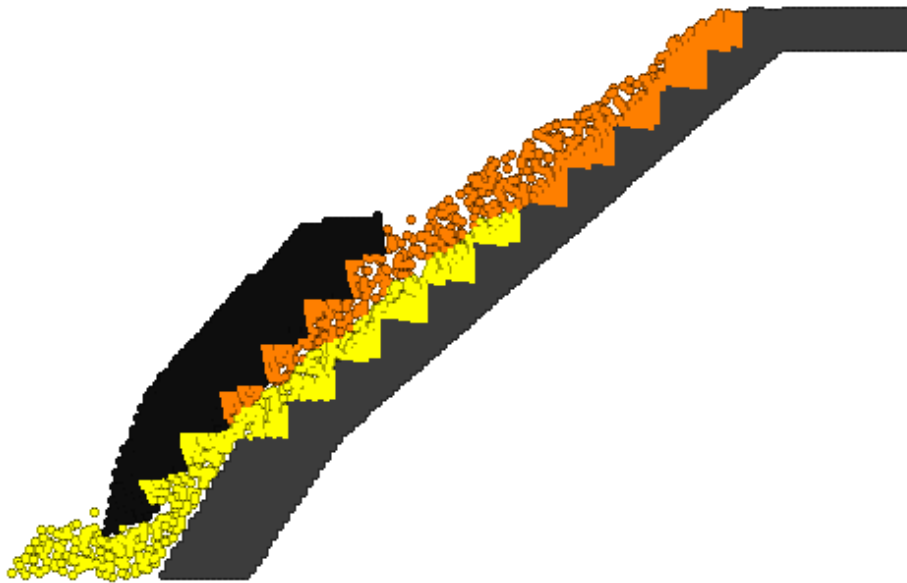


图 8.3.21 CASE28 (10.8sec)

time = 1.20000E+01sec

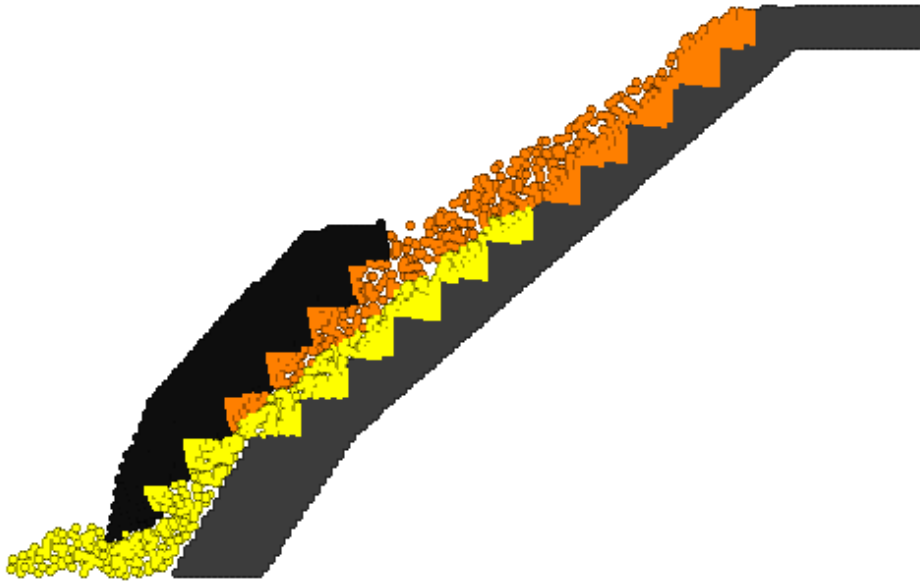


图 8.3.22 CASE28 (12.0sec)

8.3.3 变形图(CASE29)

time = 1.40000E-01sec

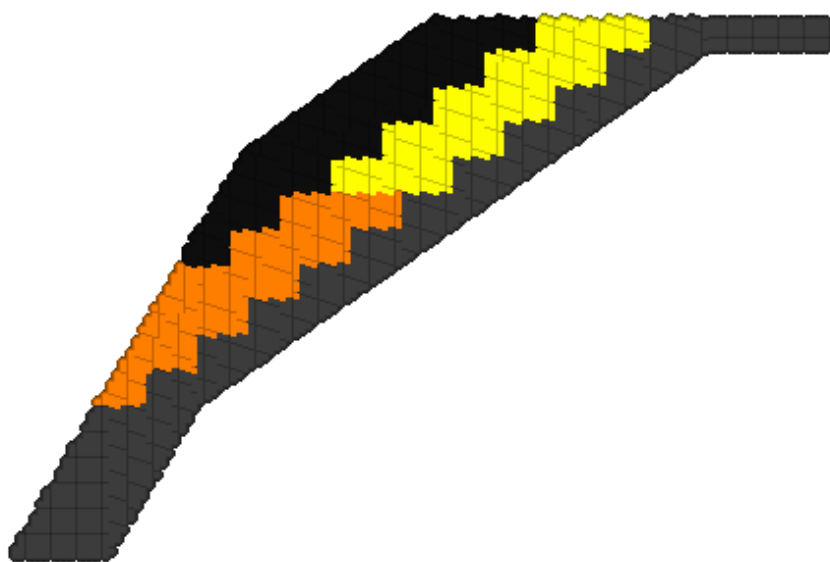


图 8.3.23 CASE29 (0.0sec)

time = 1.40000E+00sec

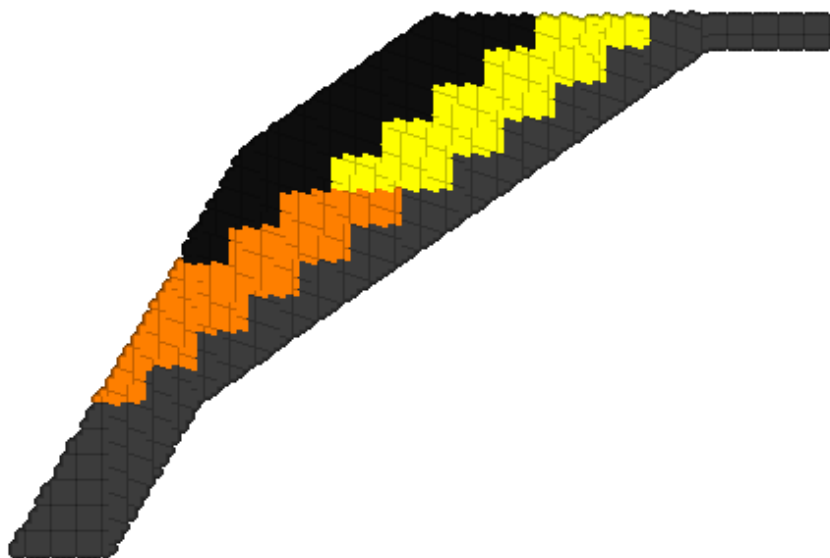


图 8.3.24 CASE29 (1.4sec)

time = 2.80000E+00sec

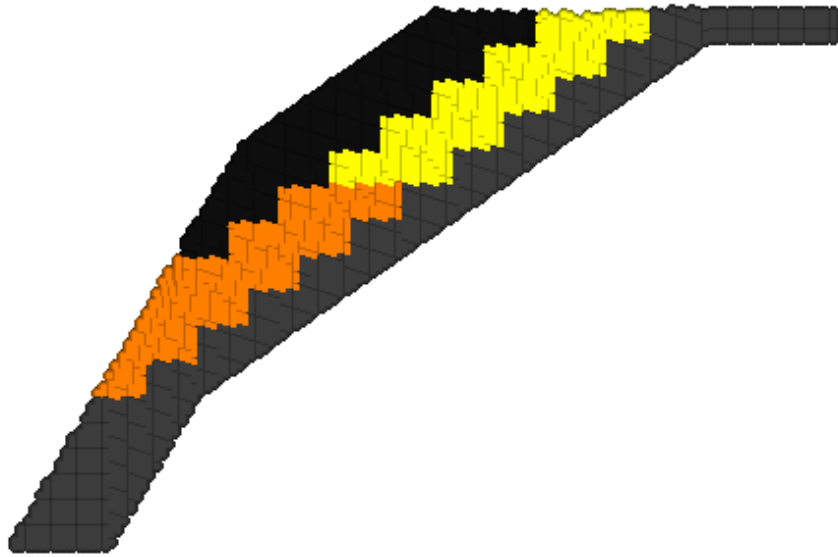


图 8.3.25 CASE29 (2.8sec)

time = 4.20000E+00sec

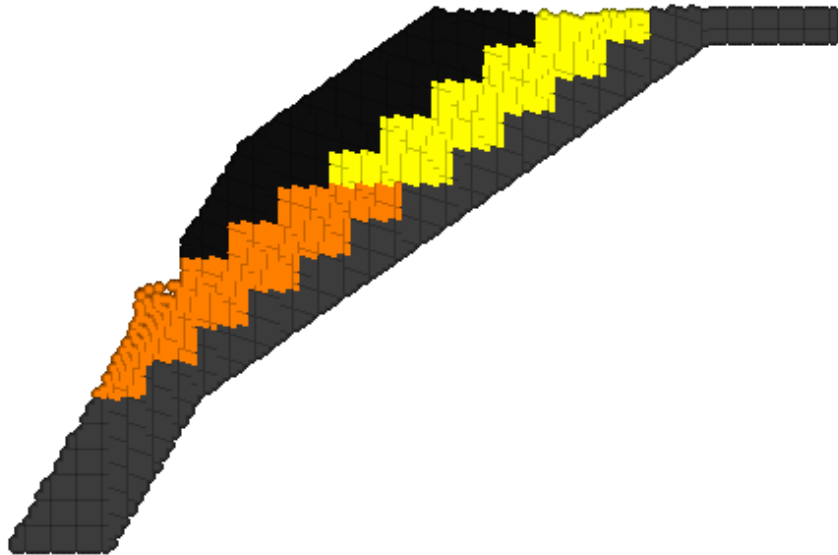


图 8.3.26 CASE29 (4.2sec)

time = 5.60000E+00sec

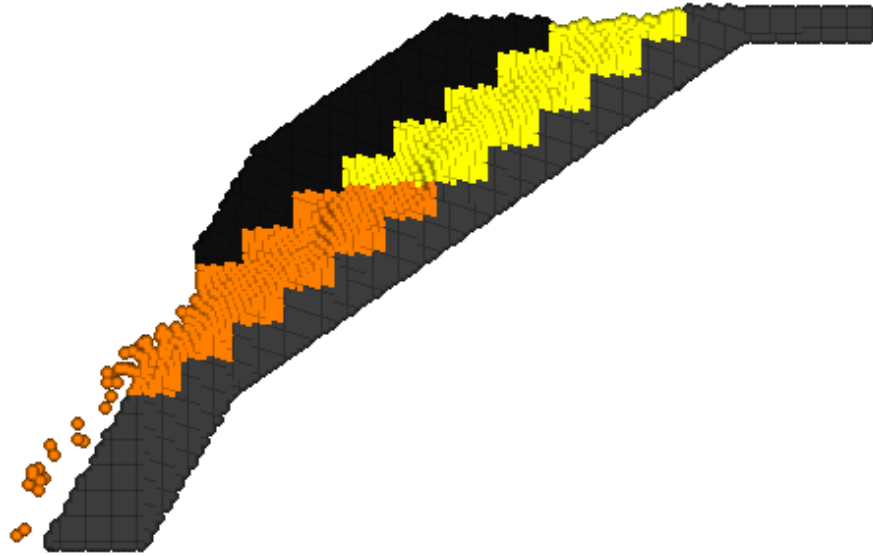


图 8.3.27 CASE29 (5.6sec)

time = 7.00000E+00sec

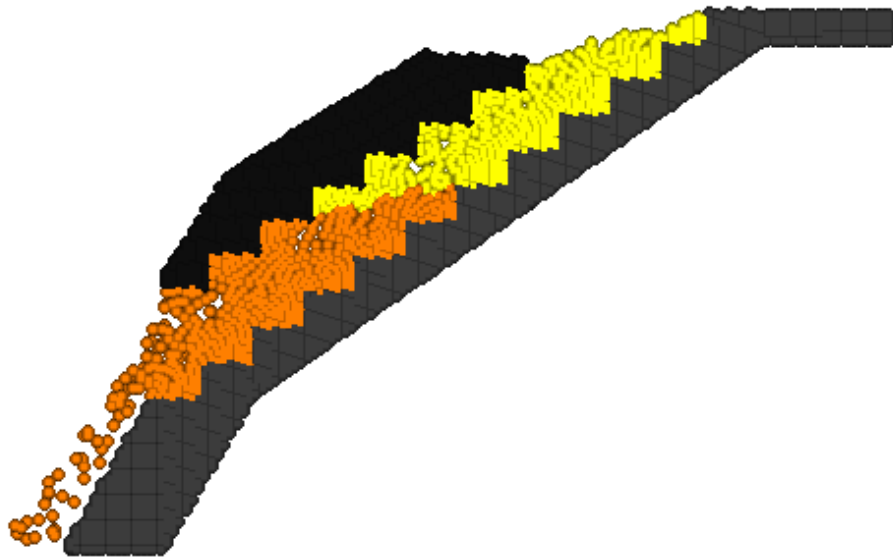


图 8.3.28 CASE29 (7.0sec)

time = 8.40000E+00sec

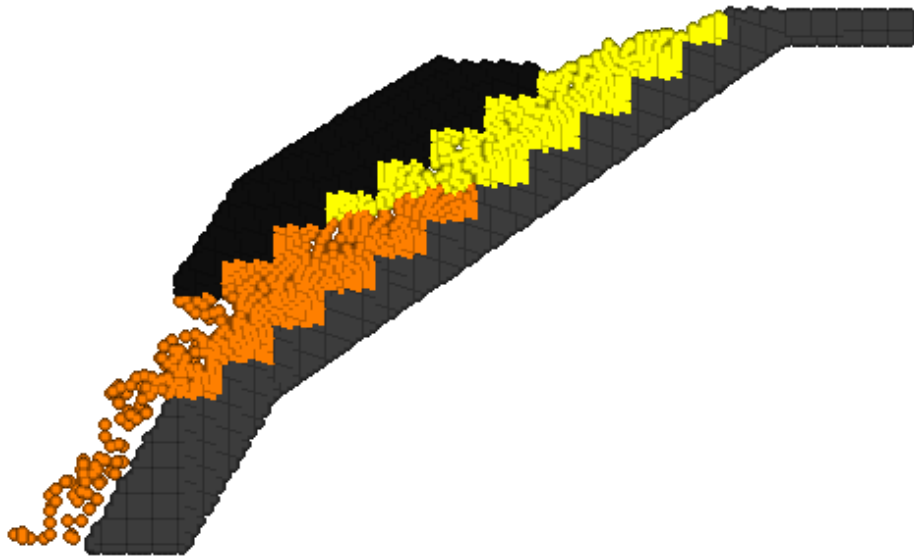


图 8.3.29 CASE29 (8.4sec)

time = 9.80000E+00sec

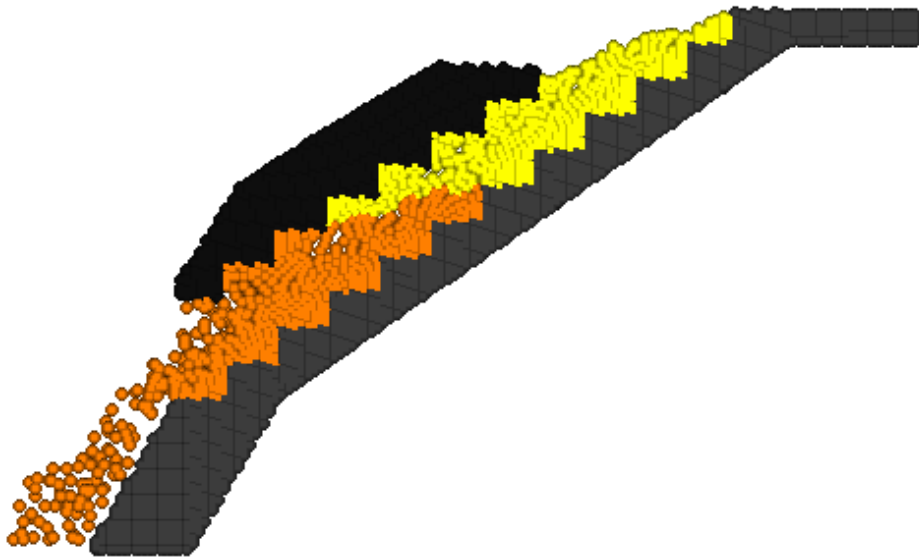


图 8.3.30 CASE29 (9.8sec)

time = 1.12000E+01sec

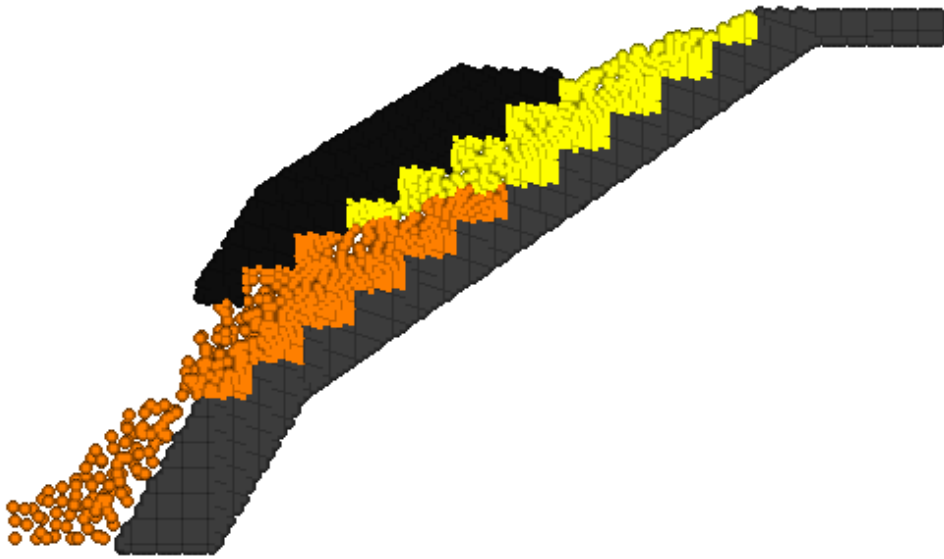


图 8.3.31 CASE29 (10.2sec)

time = 1.26000E+01sec

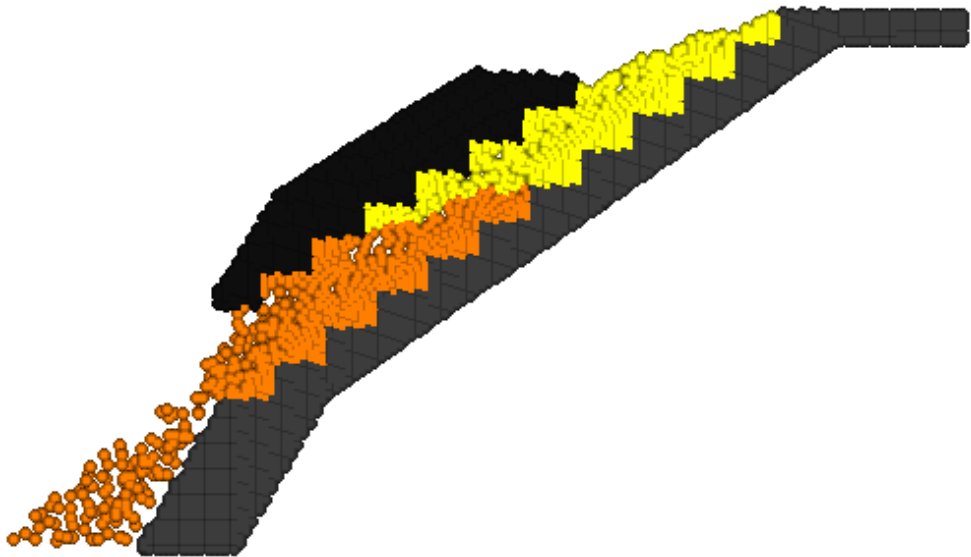
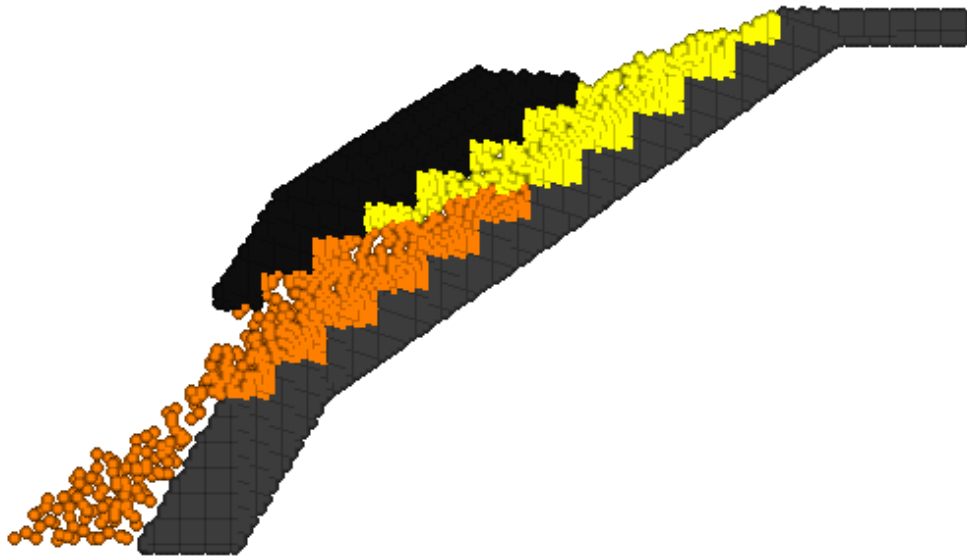


图 8.3.32 CASE29 (12.6sec)

time = 1.40000E+01sec



☒ 8. 3. 33 CASE29 (14. 0sec)

8.3.4 ひずみ図(CASE27)

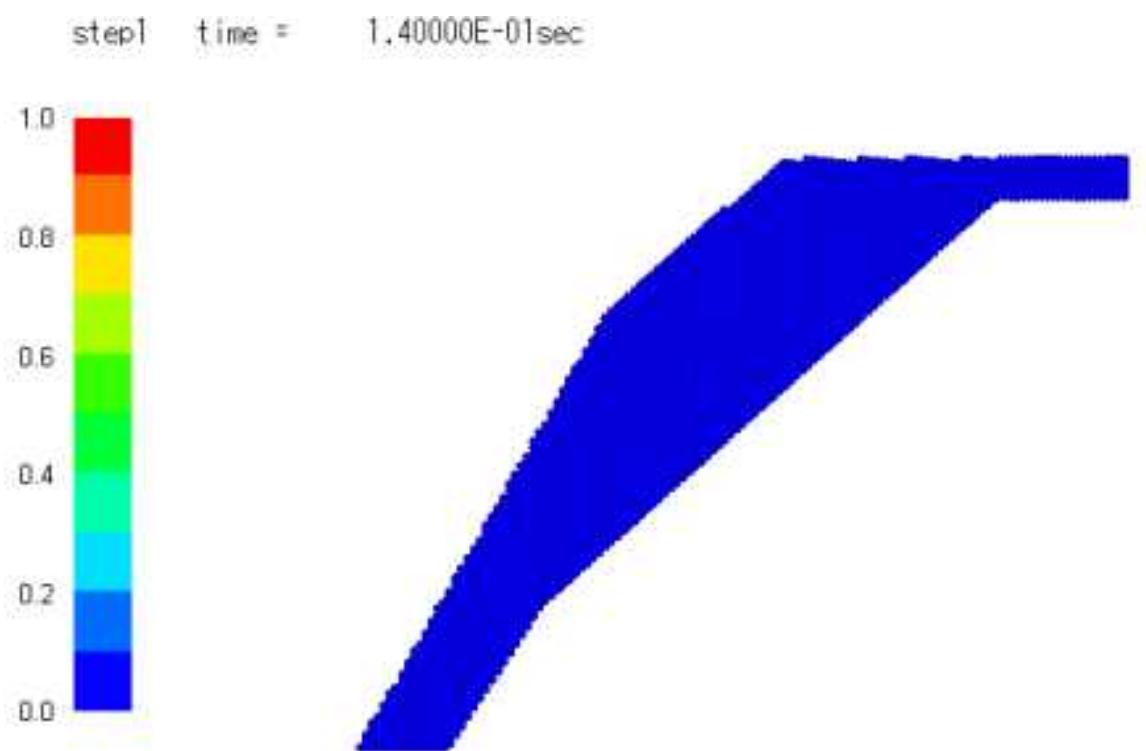


図 8.3.34 CASE27 (0.0sec)

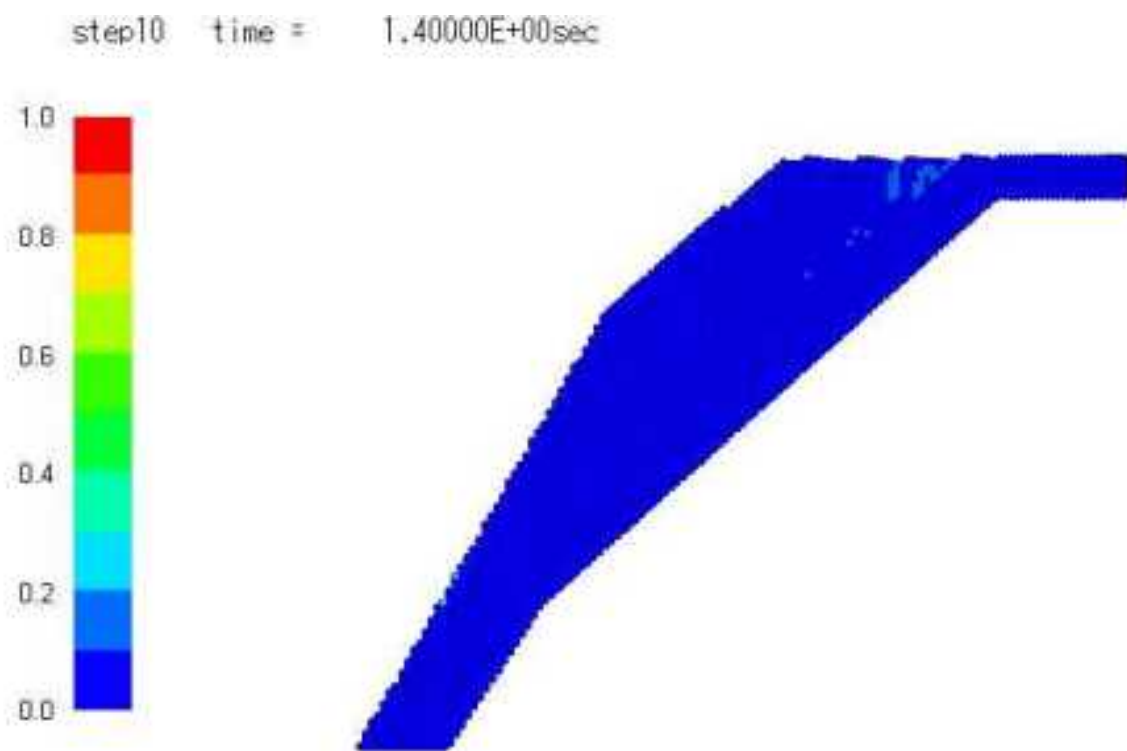


図 8.3.35 CASE27 (1.4sec)

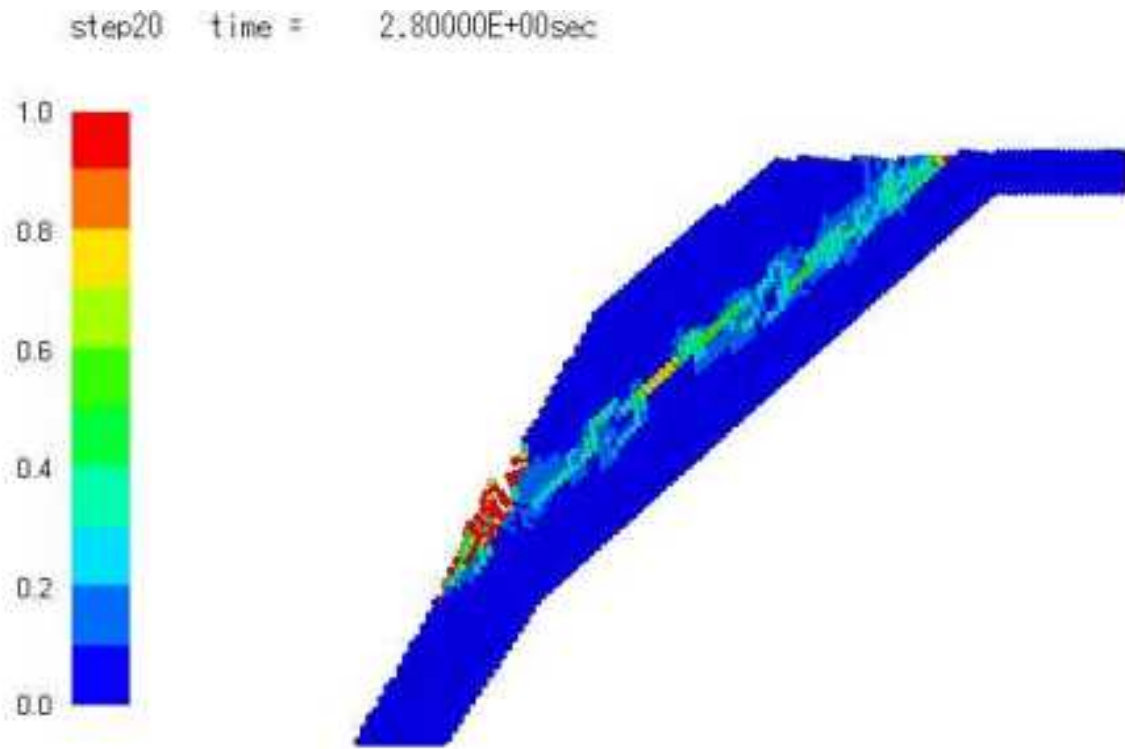


图 8.3.36 CASE27 (2.8sec)

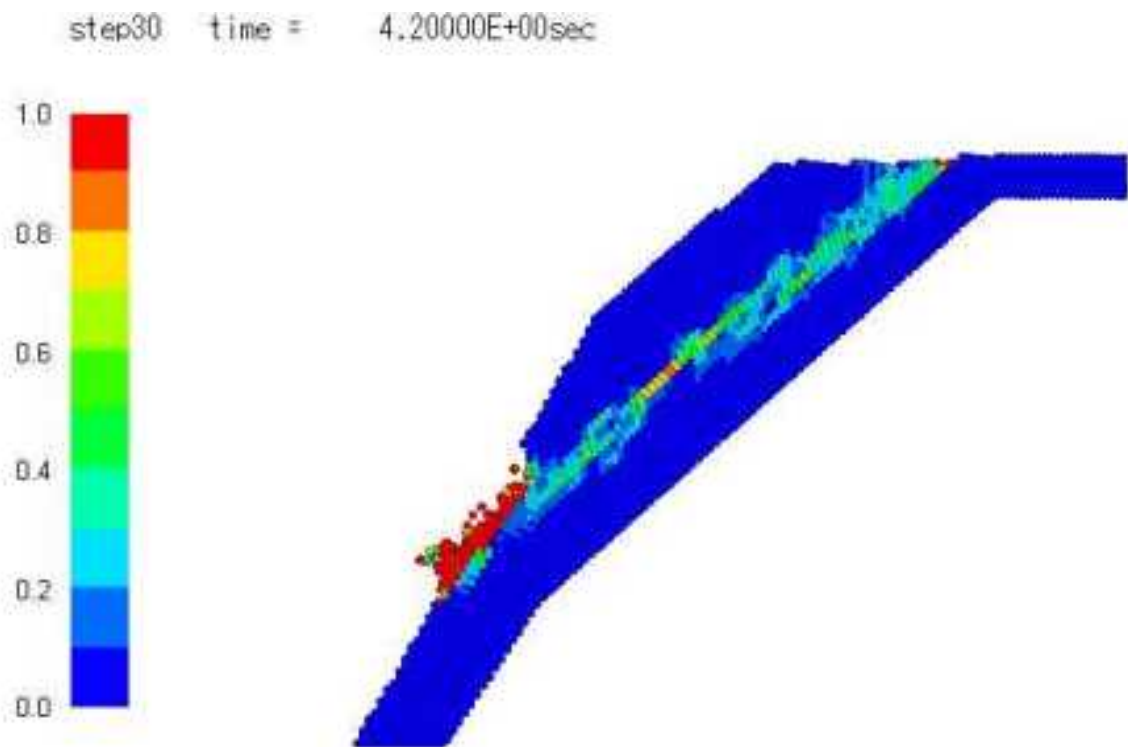


图 8.3.37 CASE27 (4.2sec)

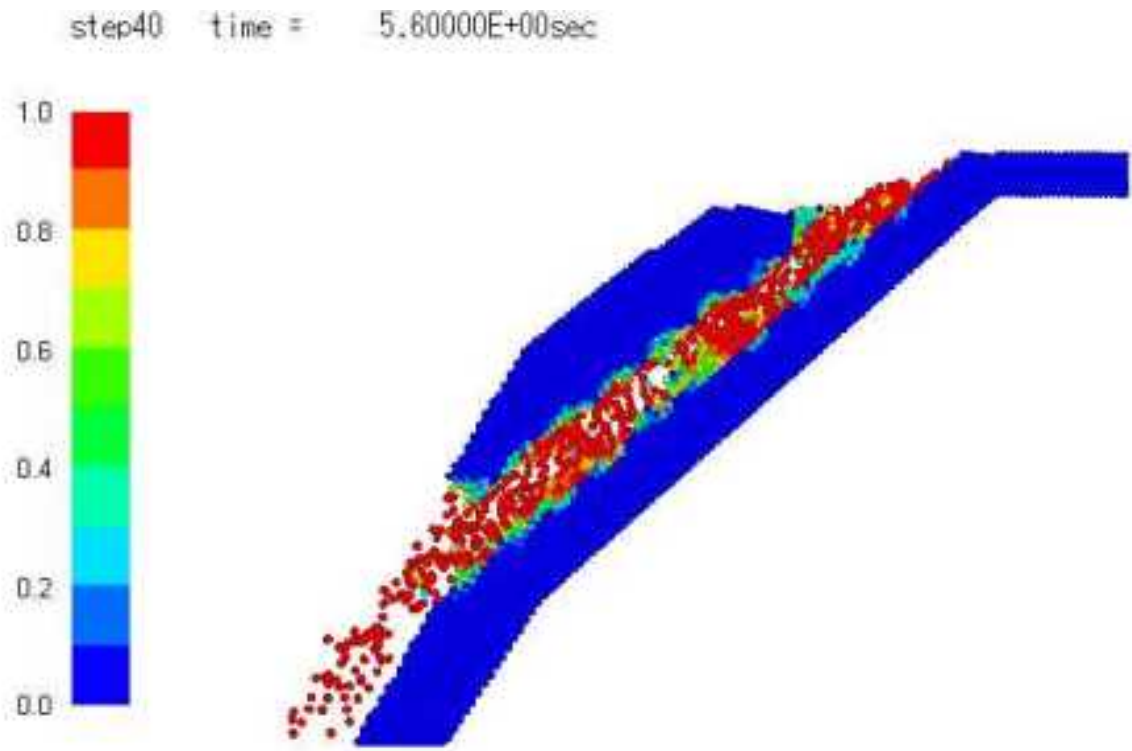


图 8.3.38 CASE27 (5.6sec)

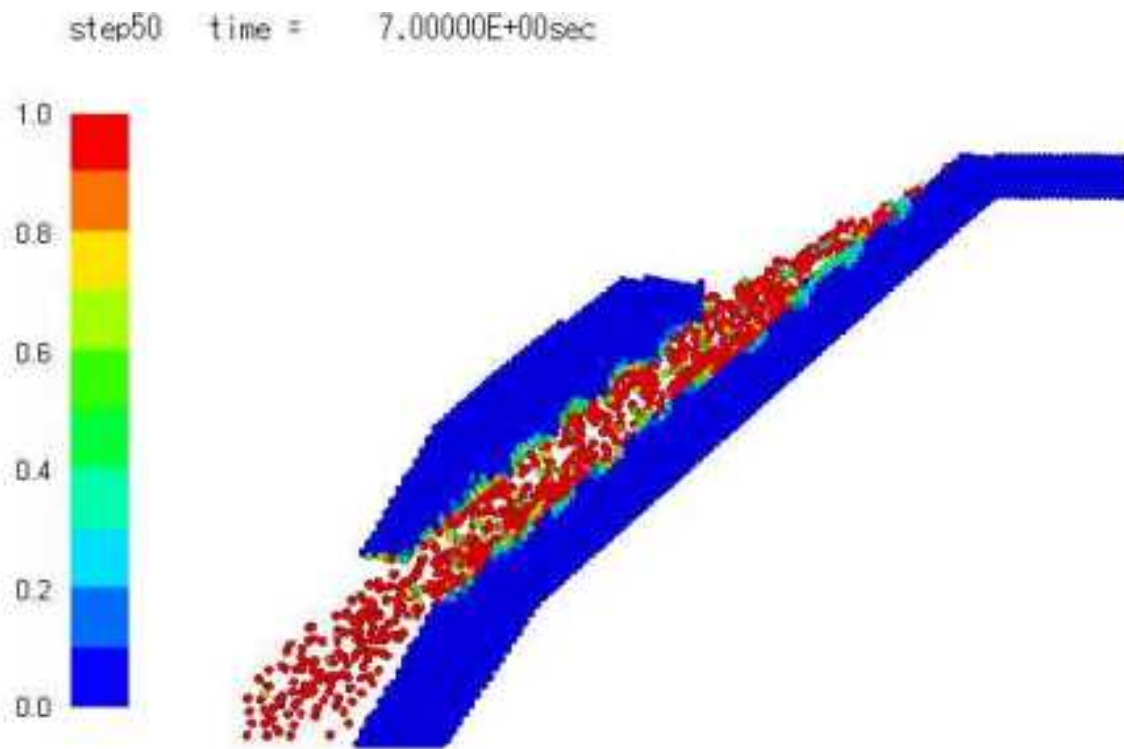


图 8.3.39 CASE27 (7.0sec)

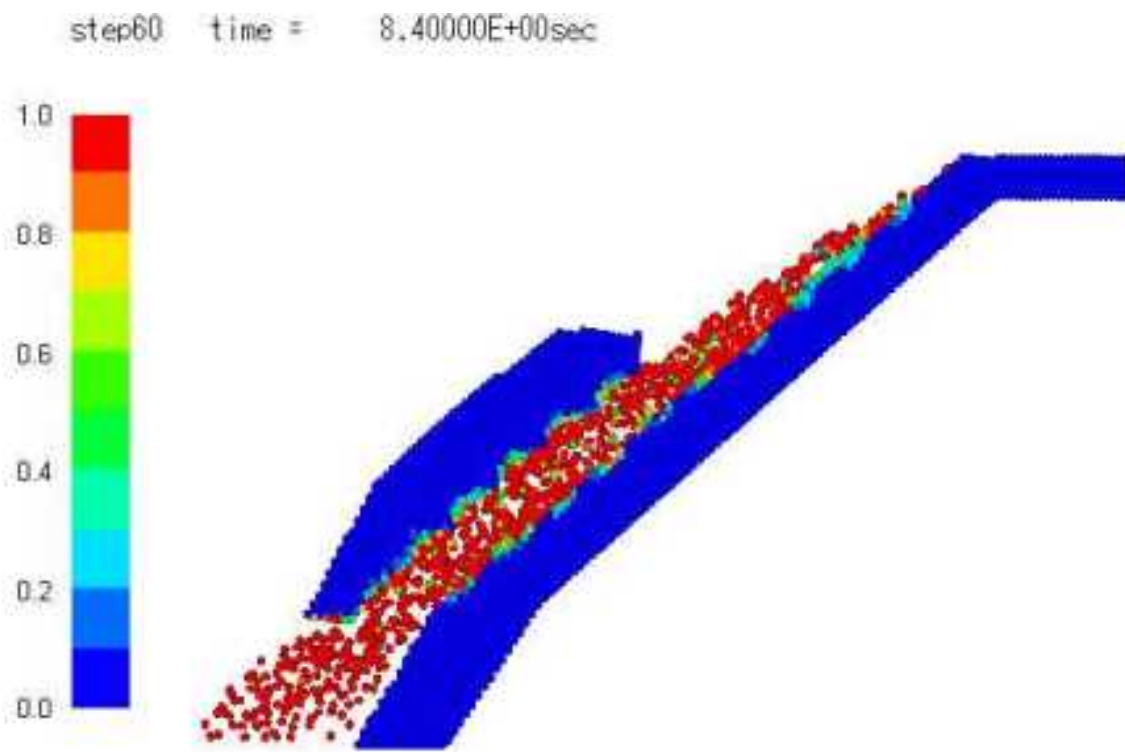


图 8.3.40 CASE27 (8.4sec)

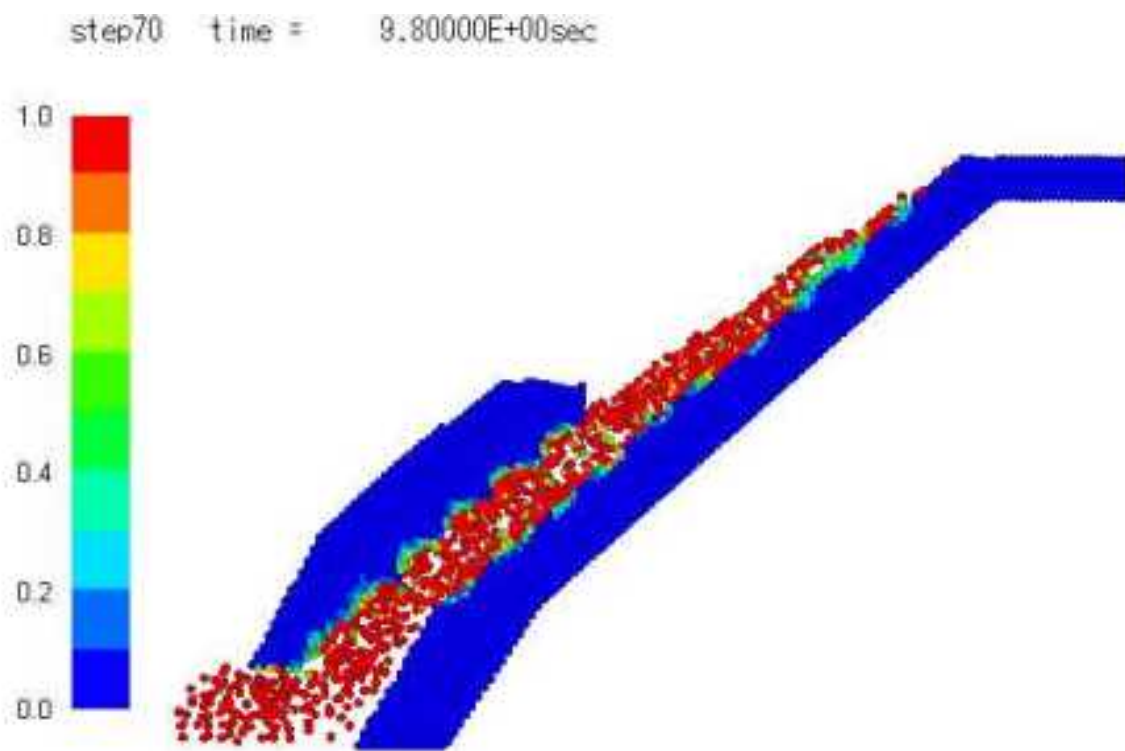


图 8.3.41 CASE27 (9.8sec)

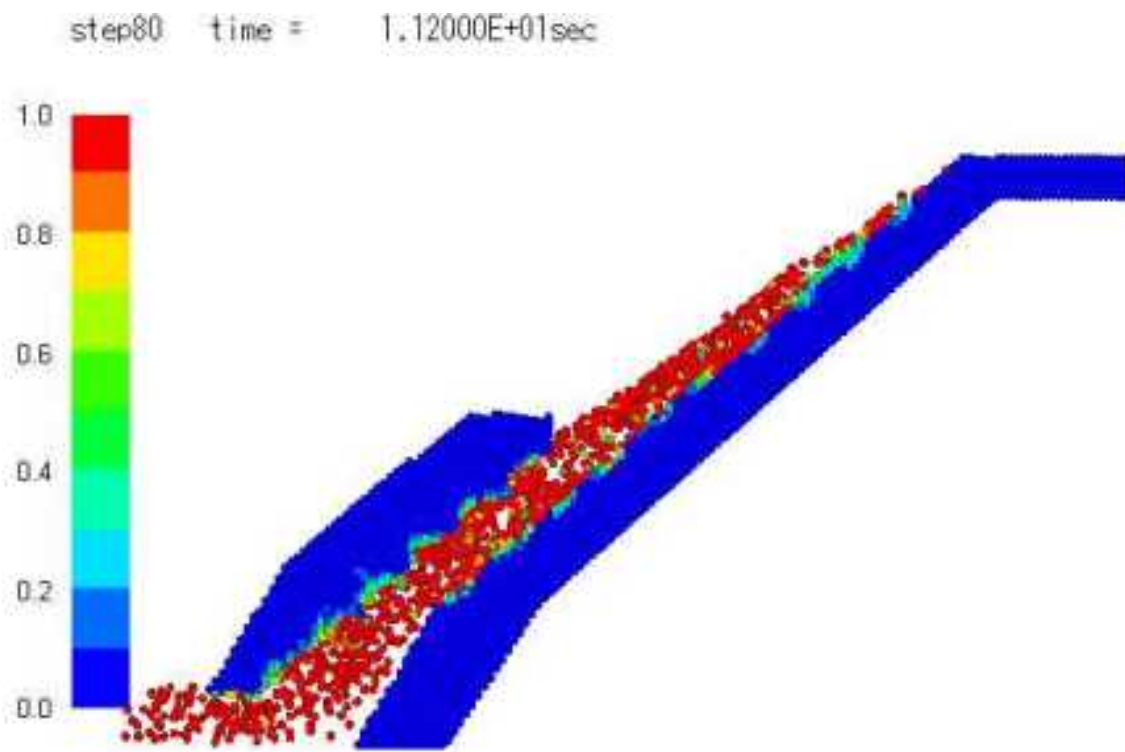


图 8.3.42 CASE27(11.2sec)

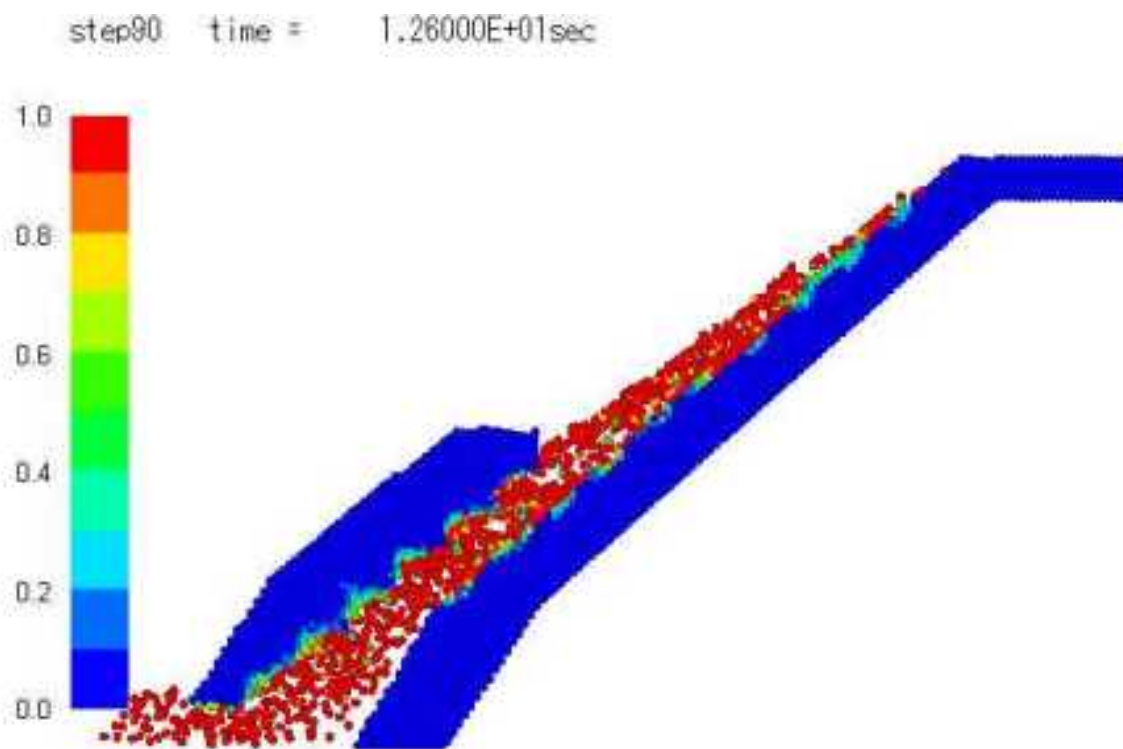


图 8.3.43 CASE27(12.6sec)

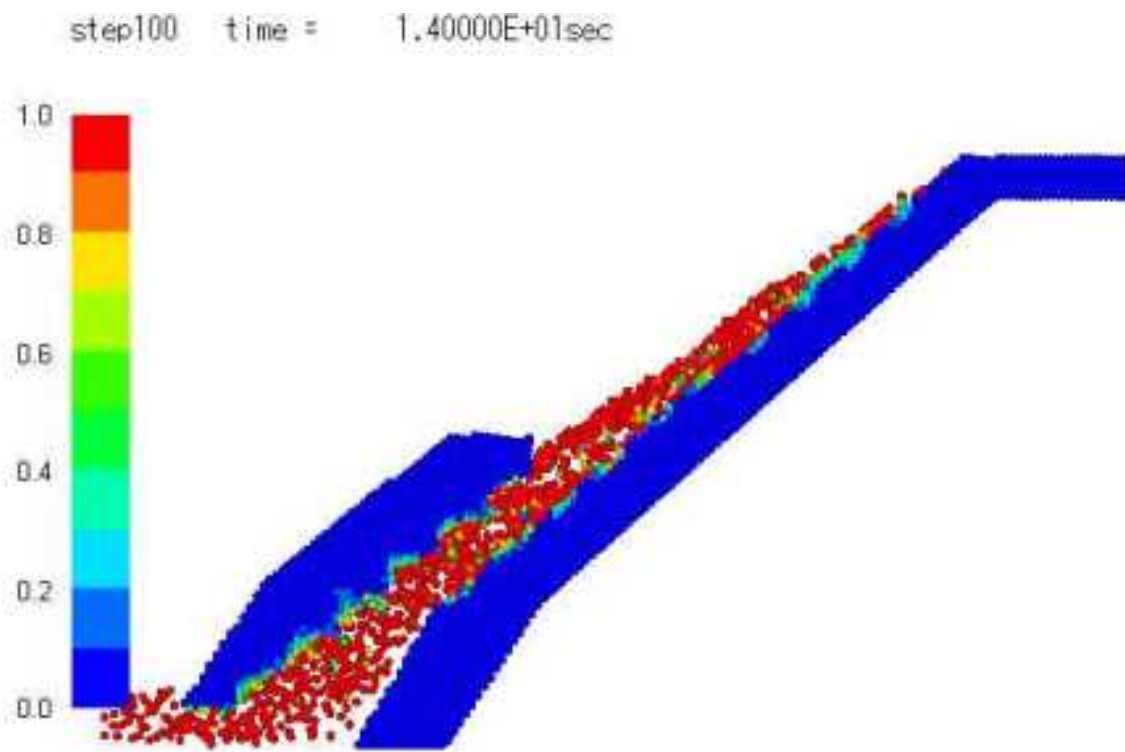


图 8.3.44 CASE27(14.0sec)

8.3.5 ひずみ図(CASE28)

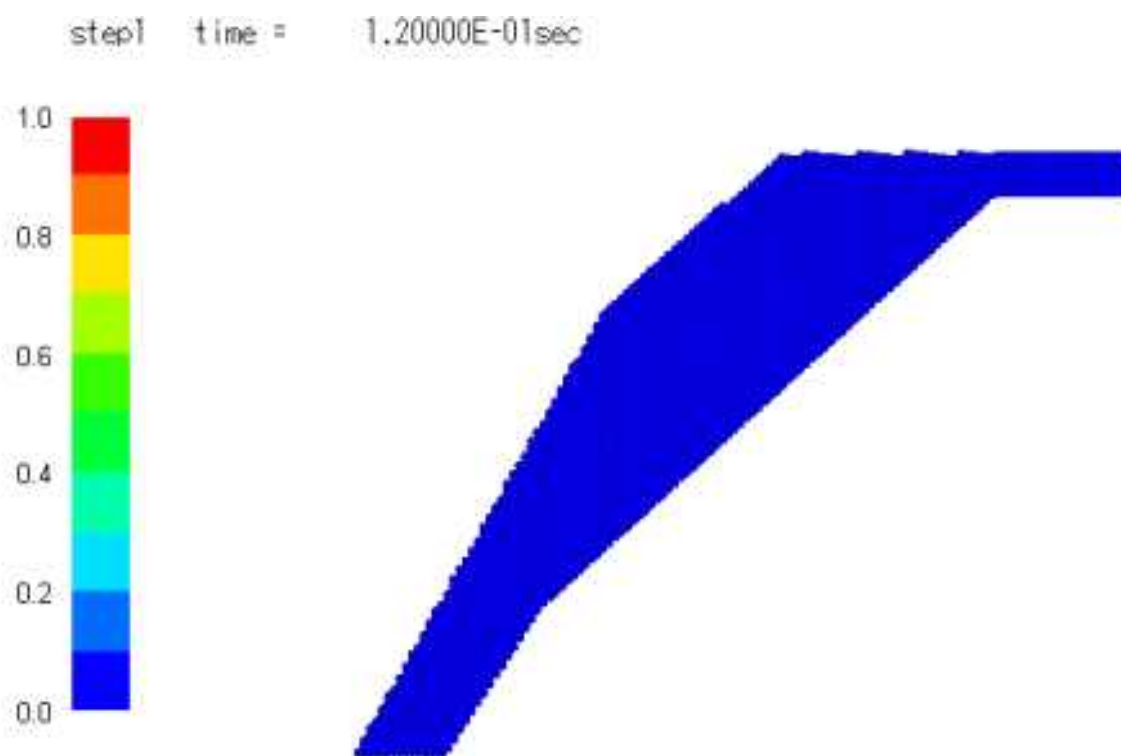


図 8.3.45 CASE28(0.0sec)

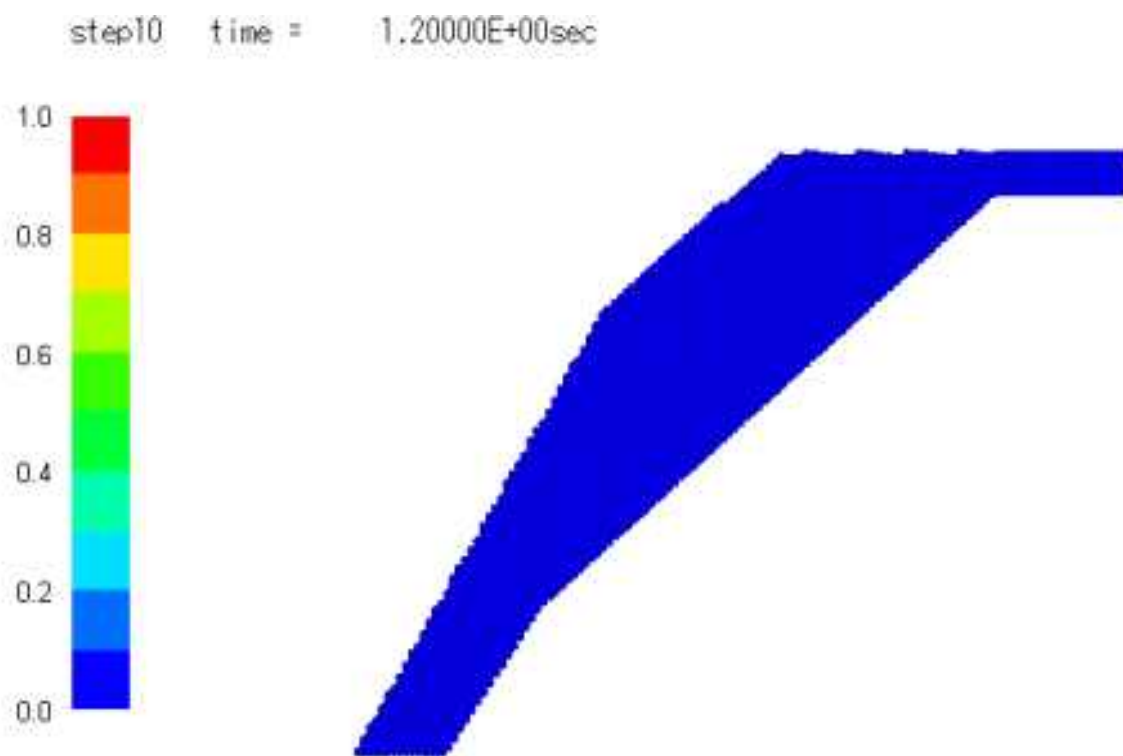


図 8.3.46 CASE28(1.2sec)

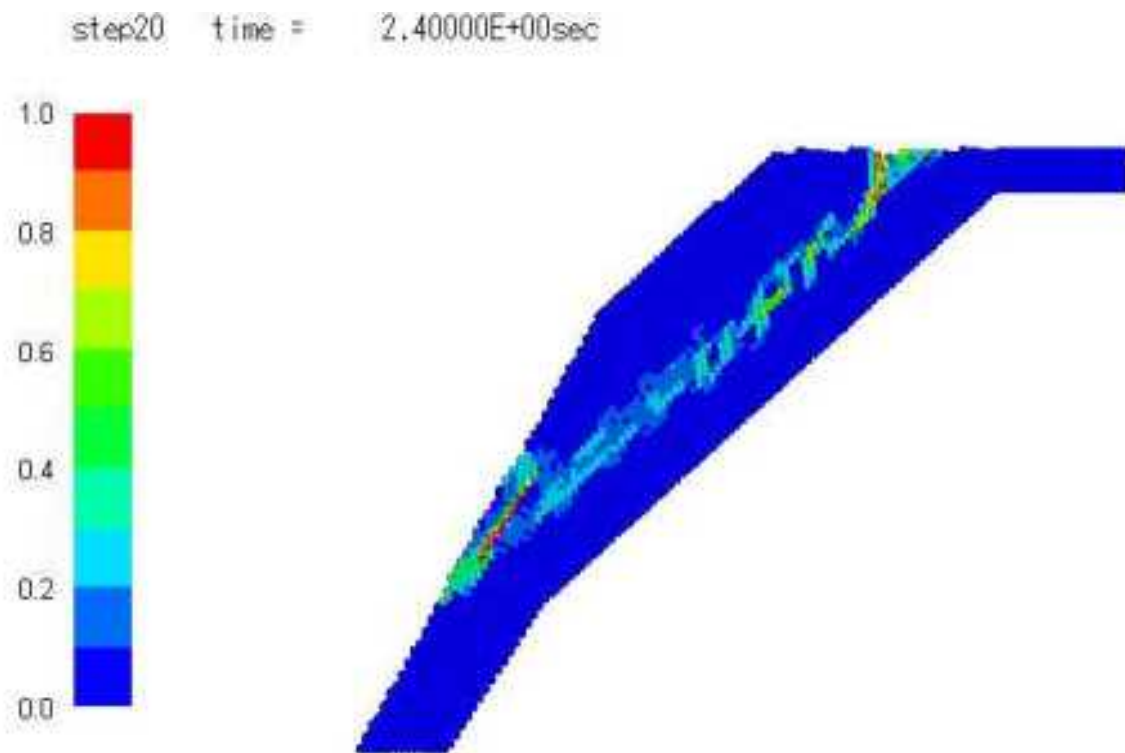


图 8.3.47 CASE28(2.4sec)

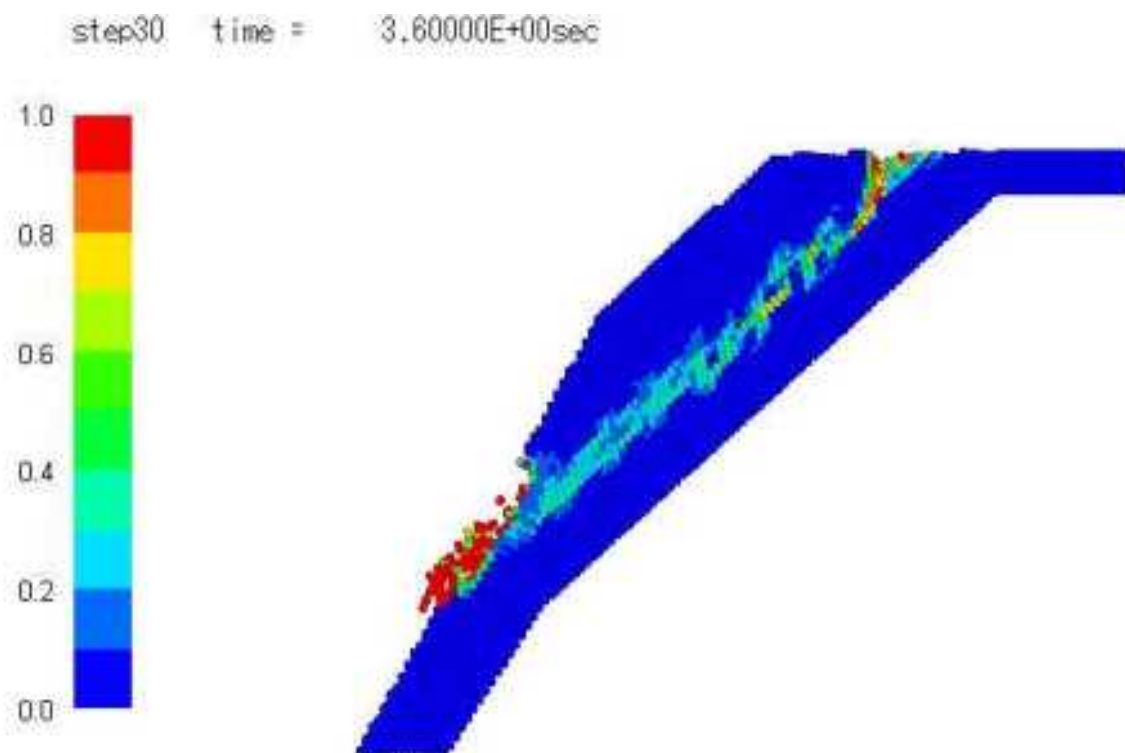


图 8.3.48 CASE28(3.6sec)

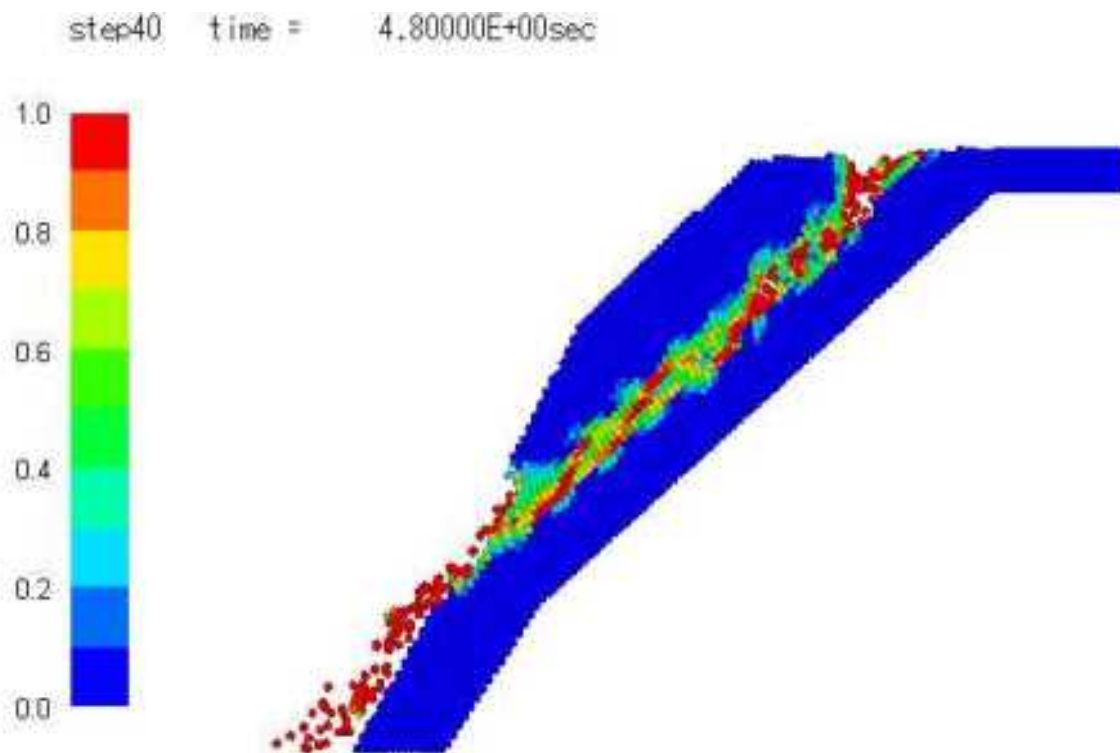


图 8.3.49 CASE28(4.8sec)

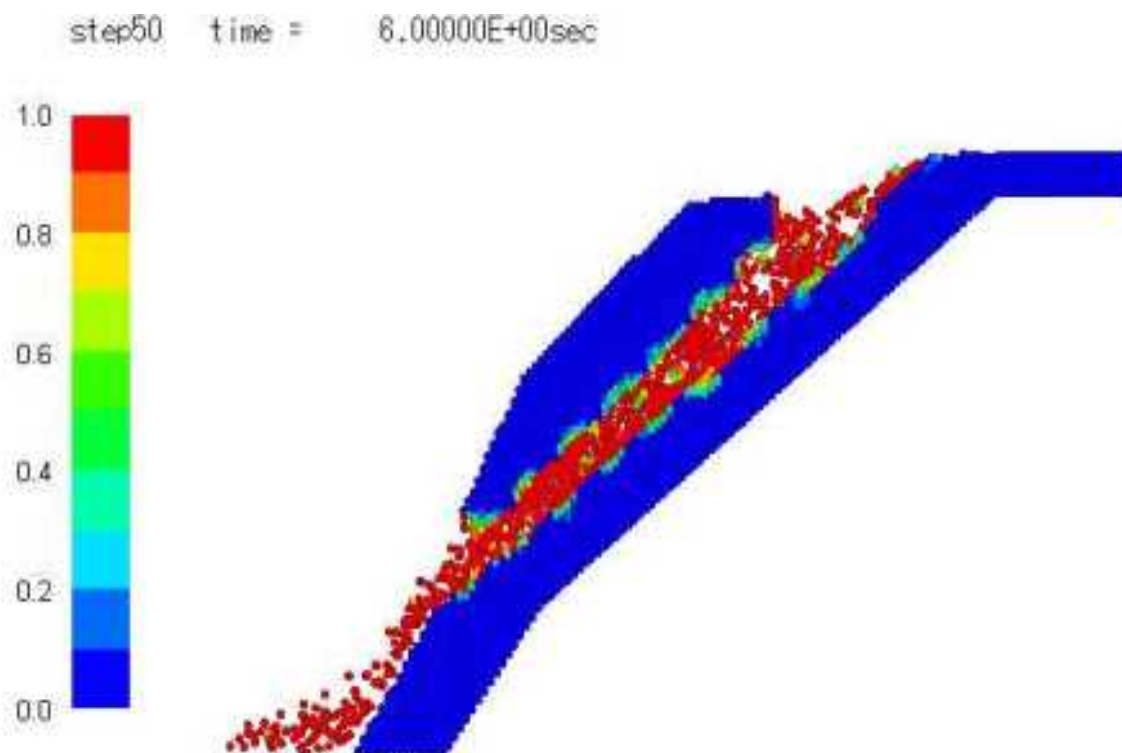


图 8.3.50 CASE28(6.0sec)

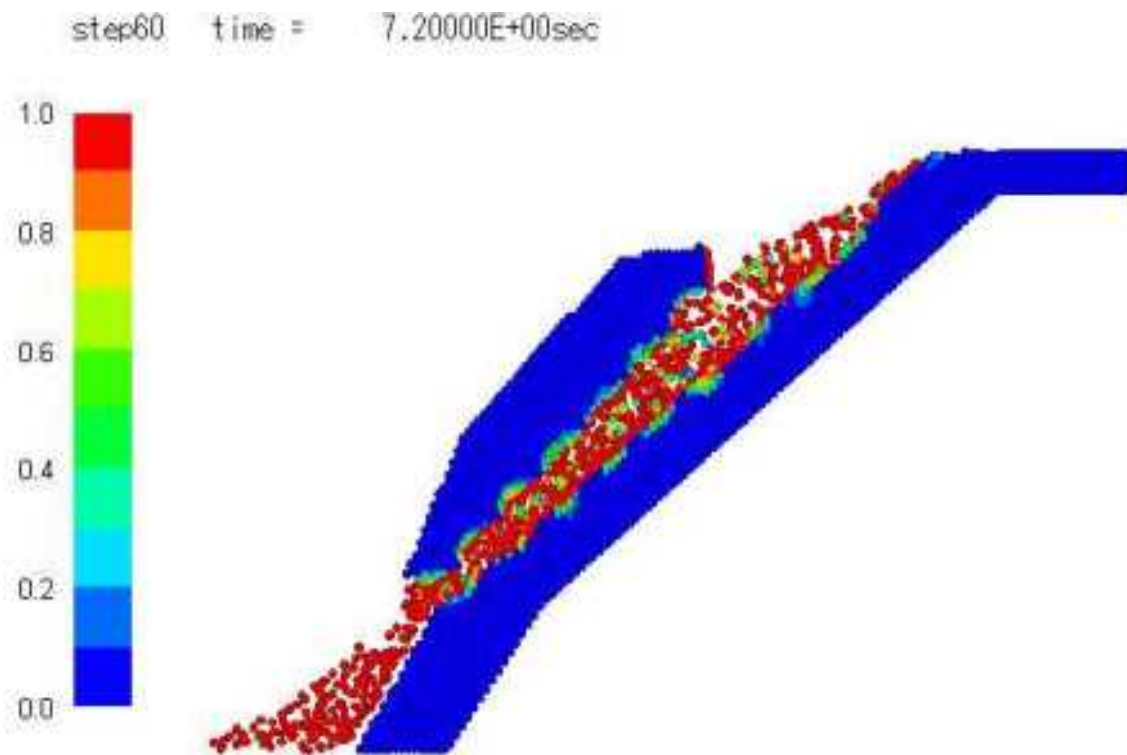


图 8.3.51 CASE28(7.2sec)

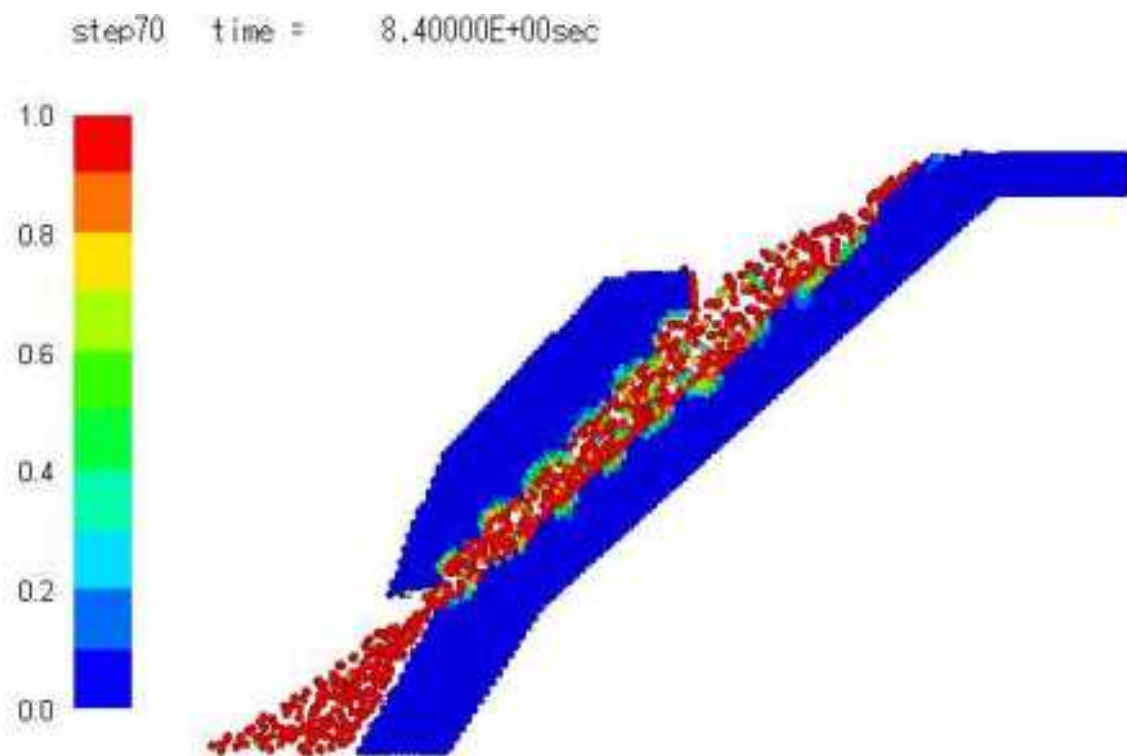


图 8.3.52 CASE28(8.4sec)

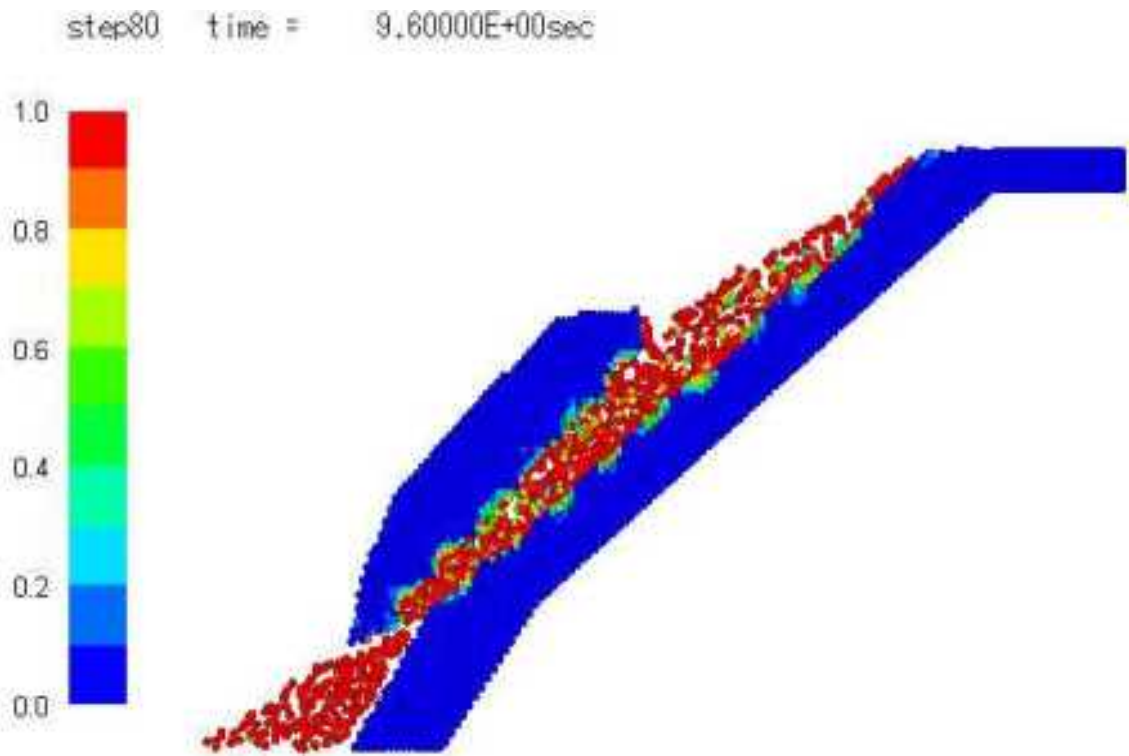


图 8.3.53 CASE28(9.6 sec)

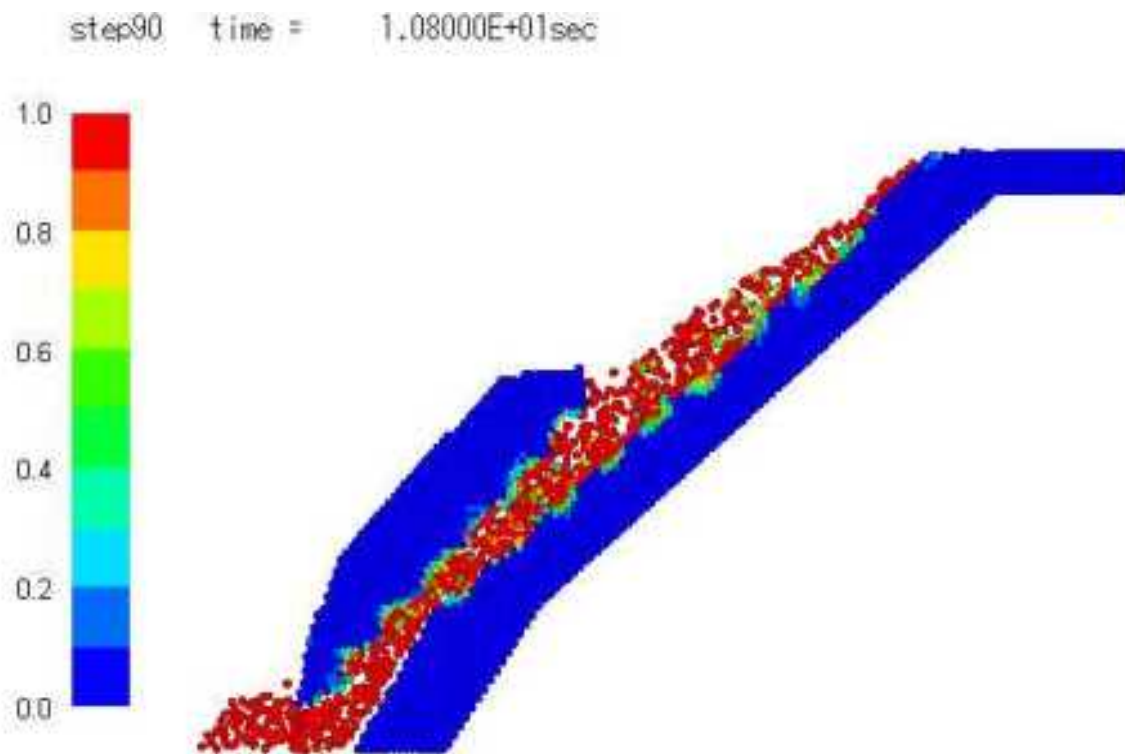


图 8.3.54 CASE28(10.8sec)

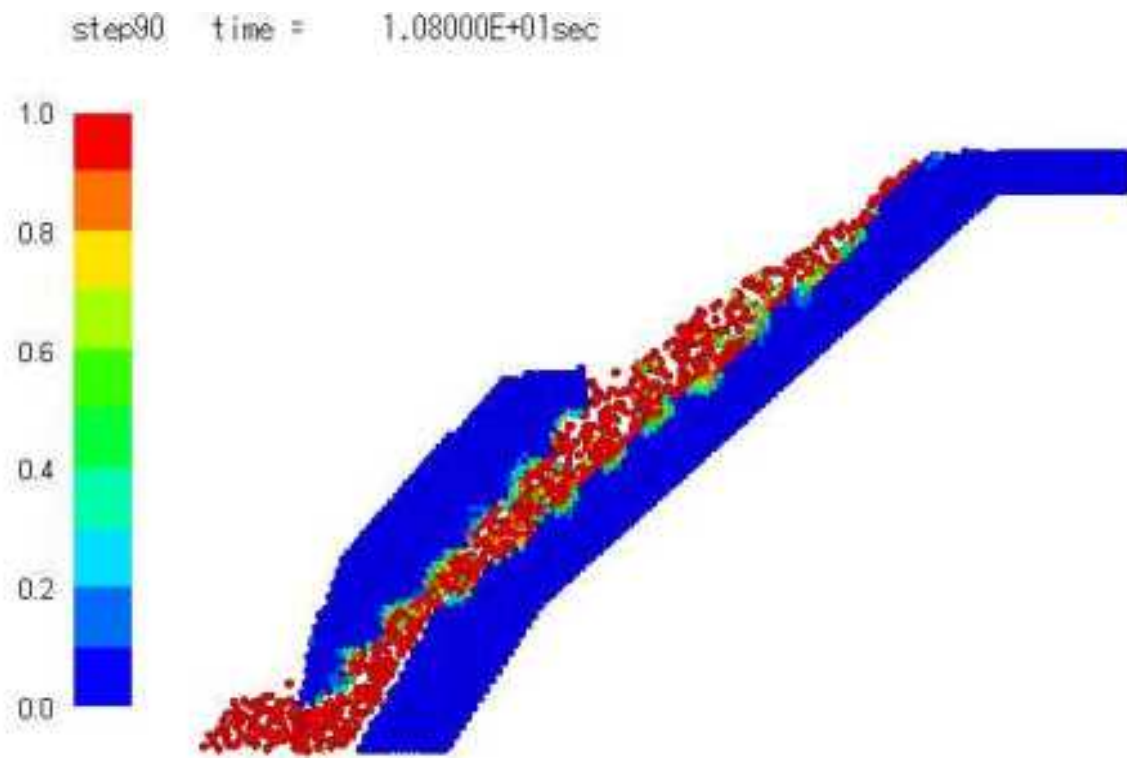


图 8.3.55 CASE28(12.0sec)

8.3.6 ひずみ図(CASE29)

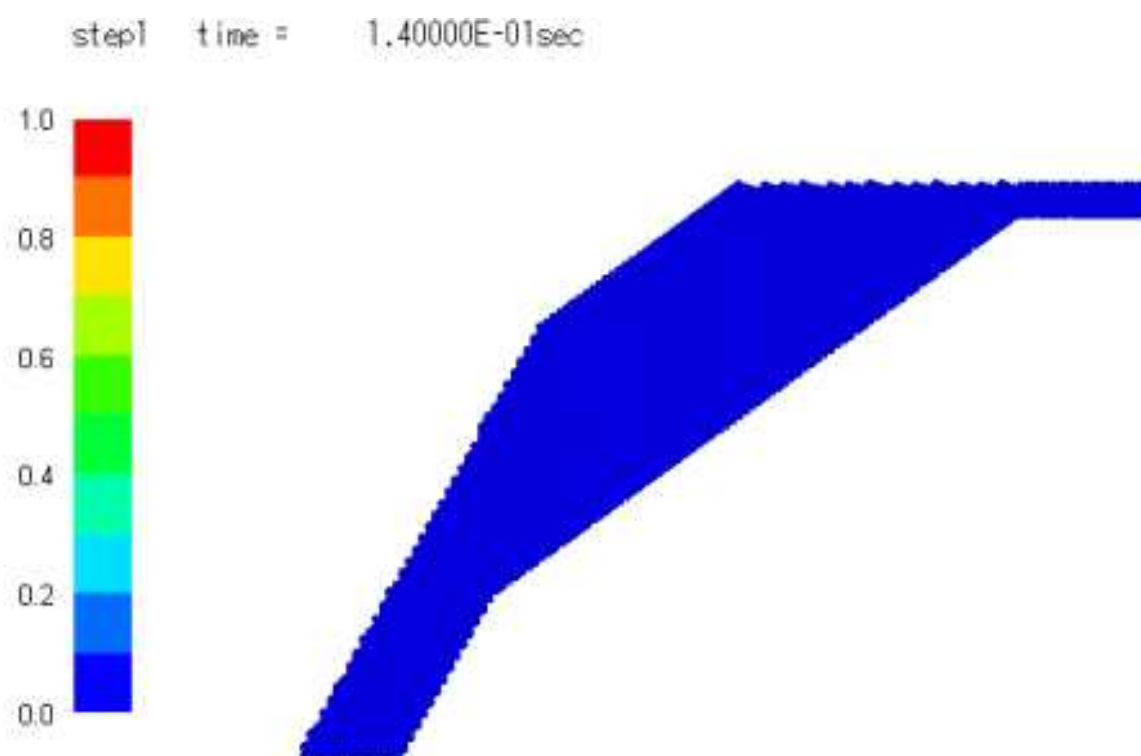


図 8.3.56 CASE29(0.0sec)

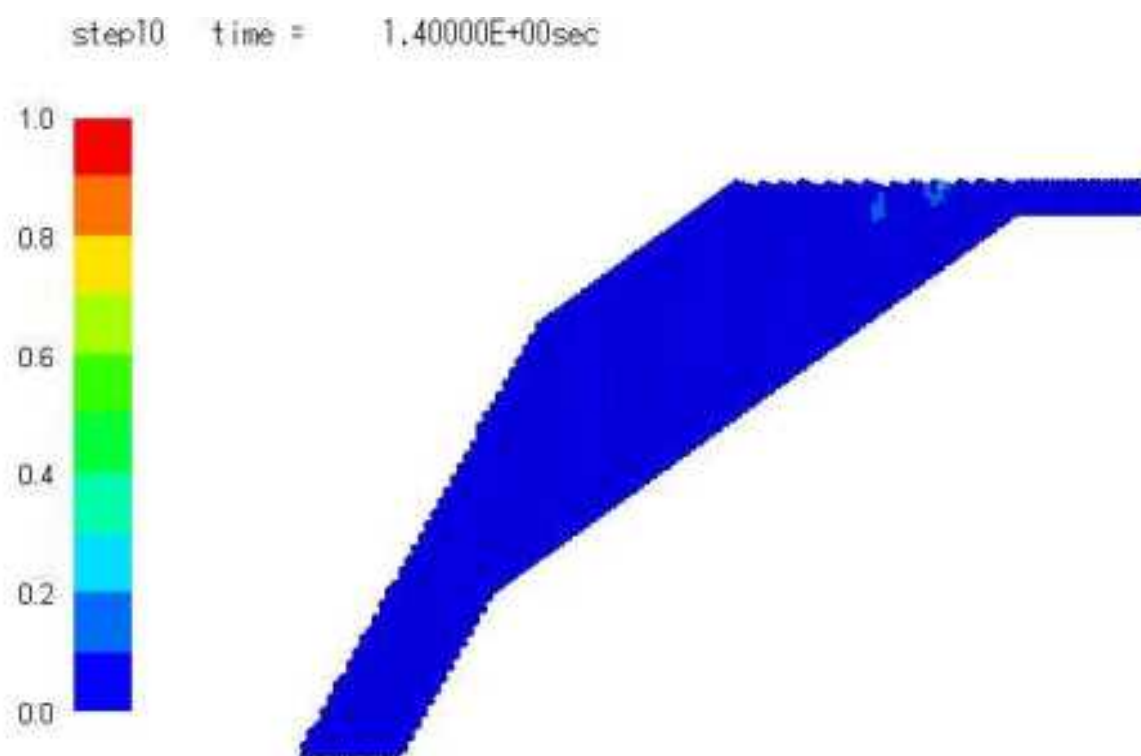


図 8.3.57 CASE29(1.4sec)

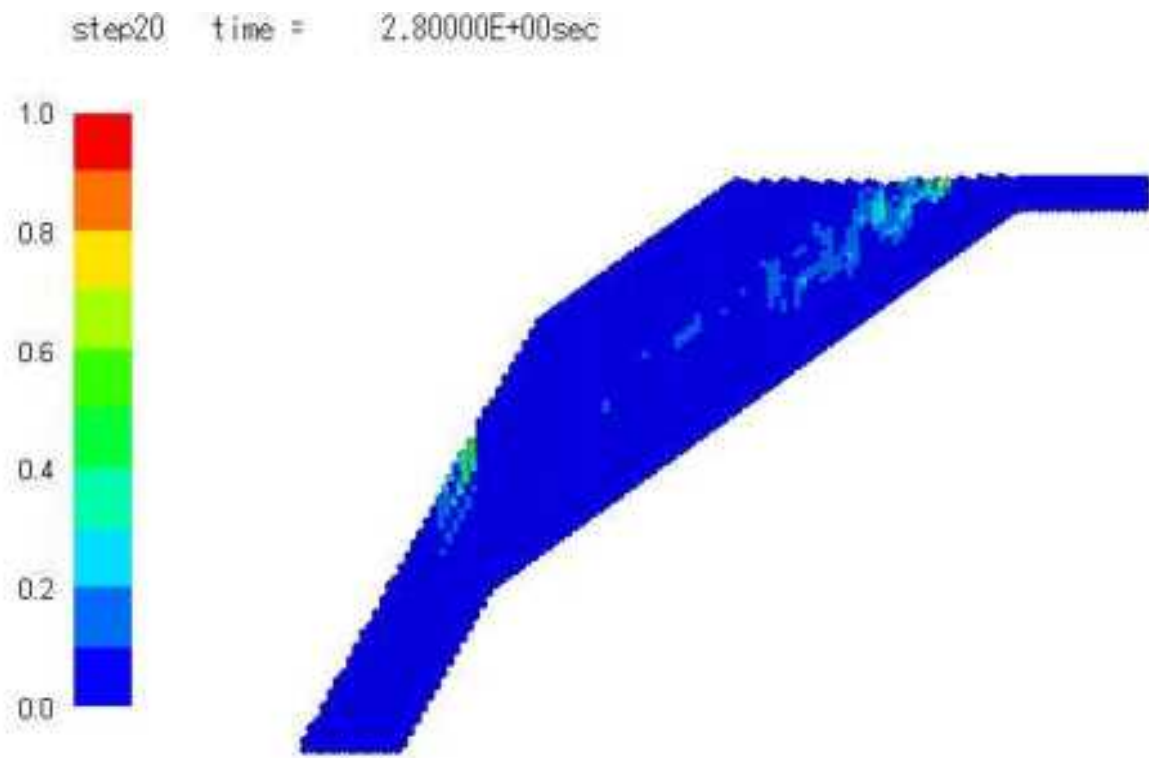


图 8.3.58 CASE29(2.8sec)

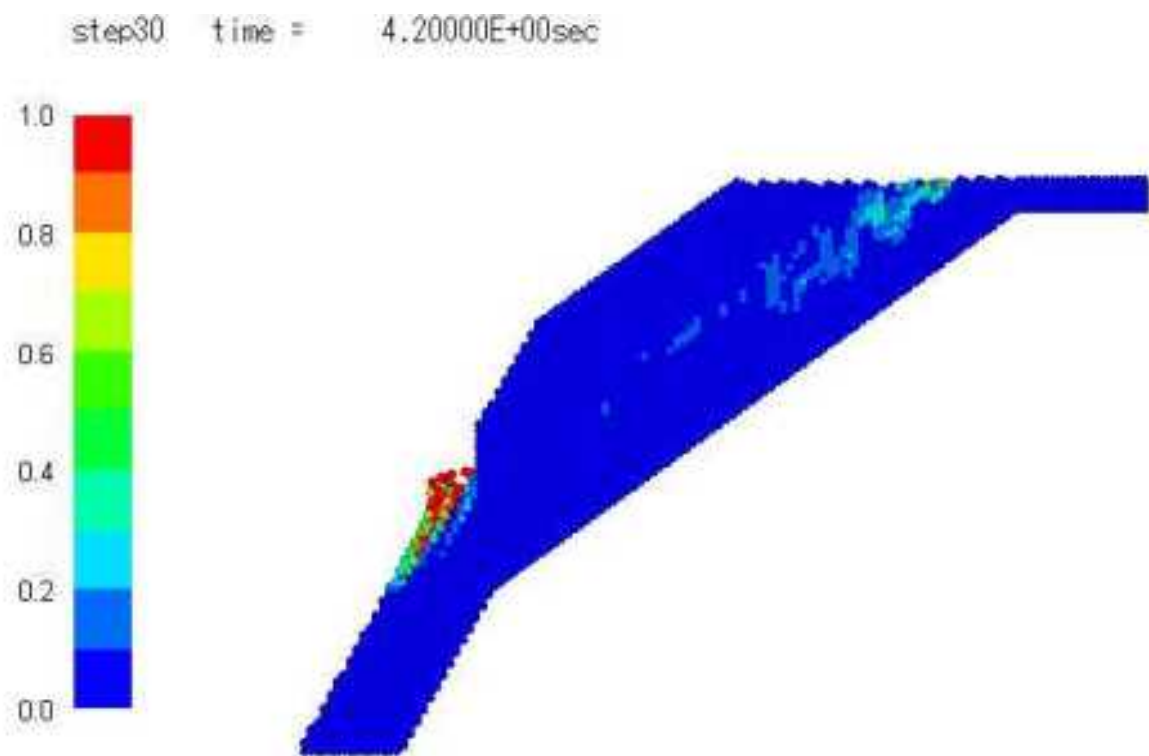


图 8.3.59 CASE29(4.2sec)

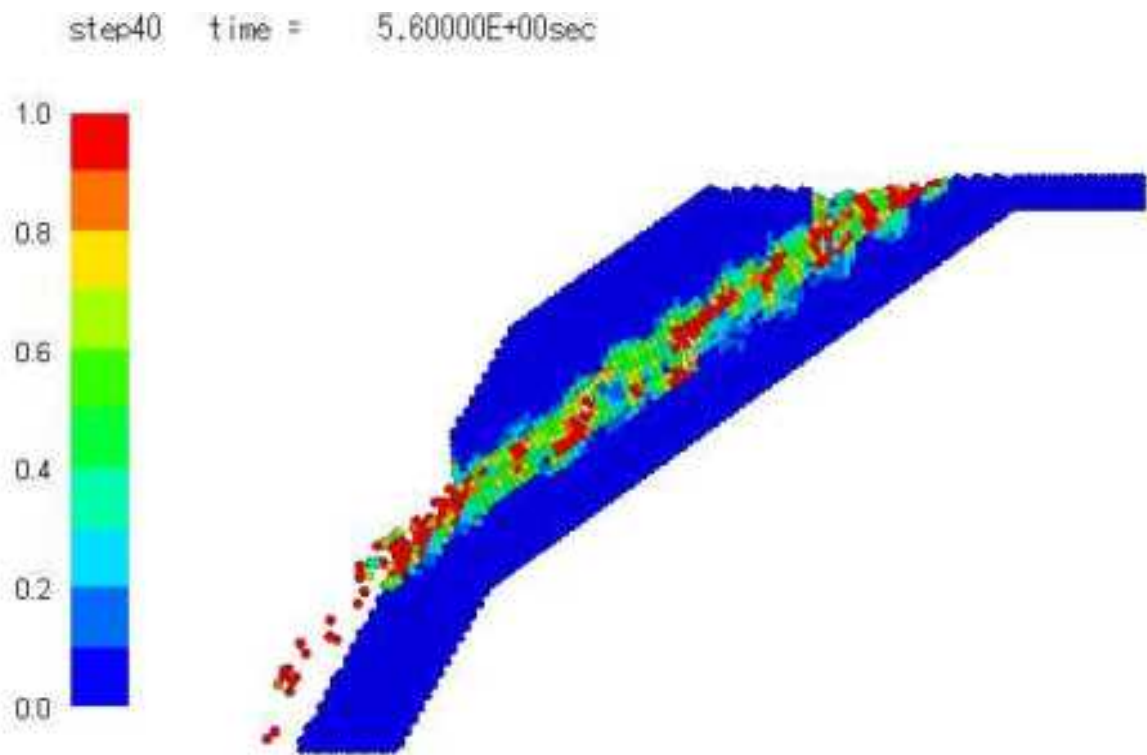


图 8.3.60 CASE29(5.6sec)

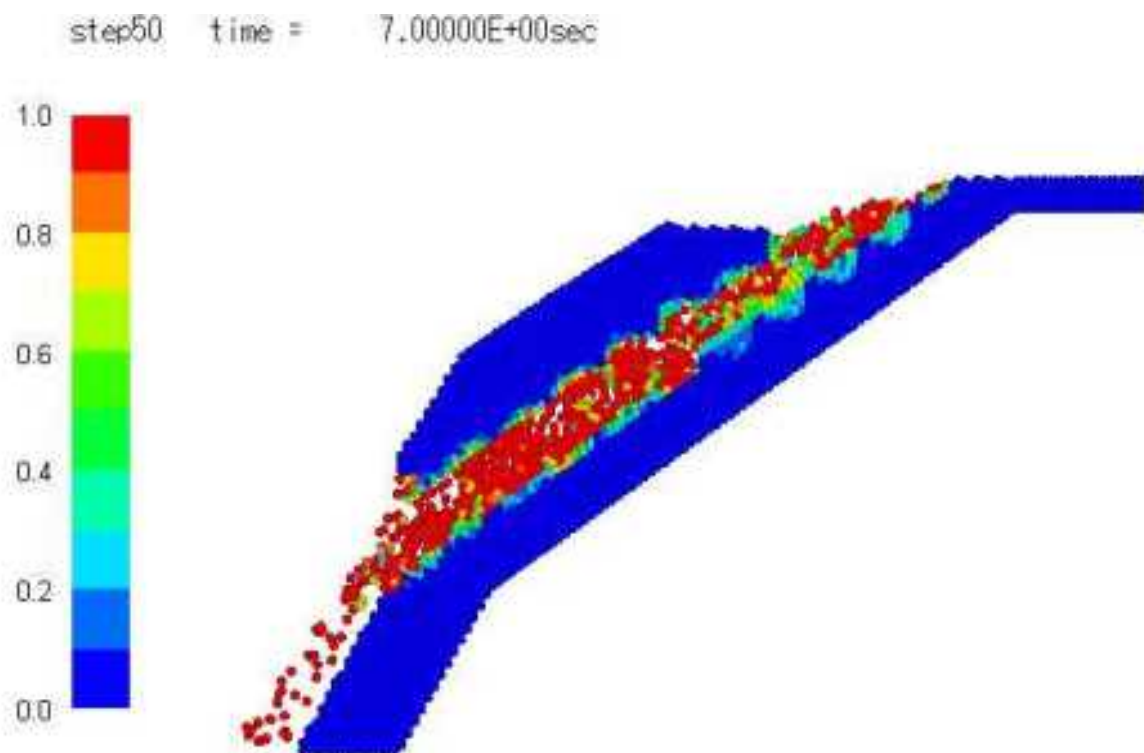


图 8.3.61 CASE29(7.0sec)

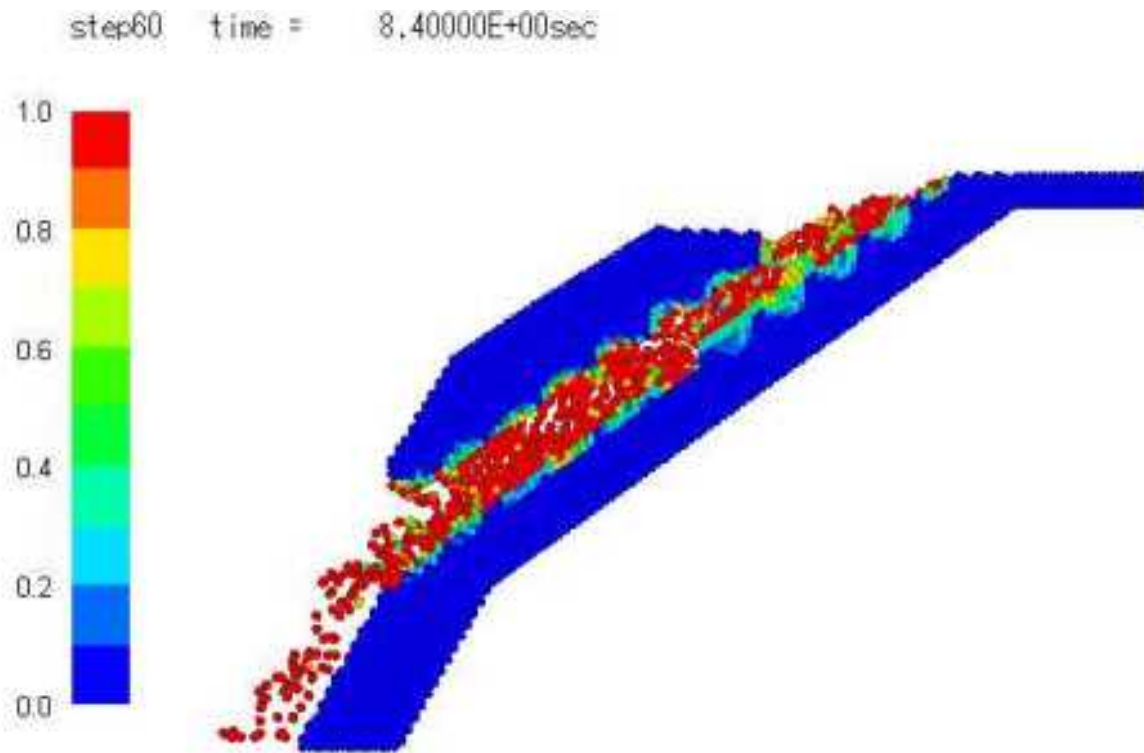


图 8.3.62 CASE29(8.4sec)

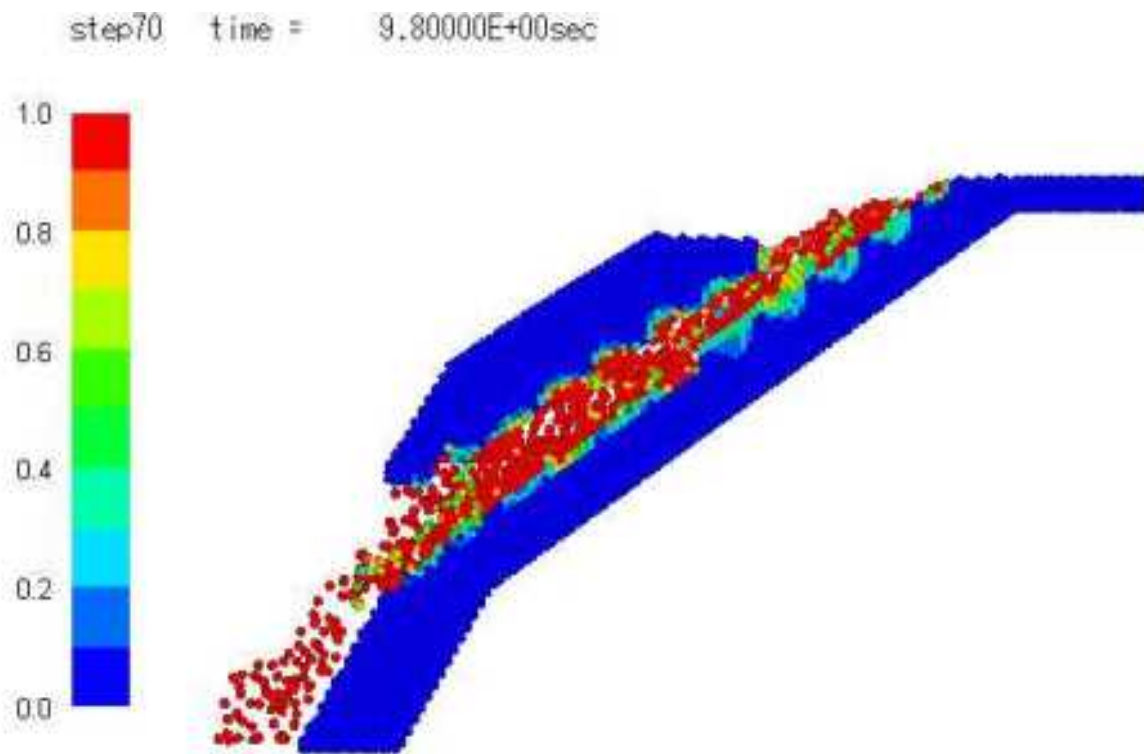


图 8.3.63 CASE29(9.8sec)

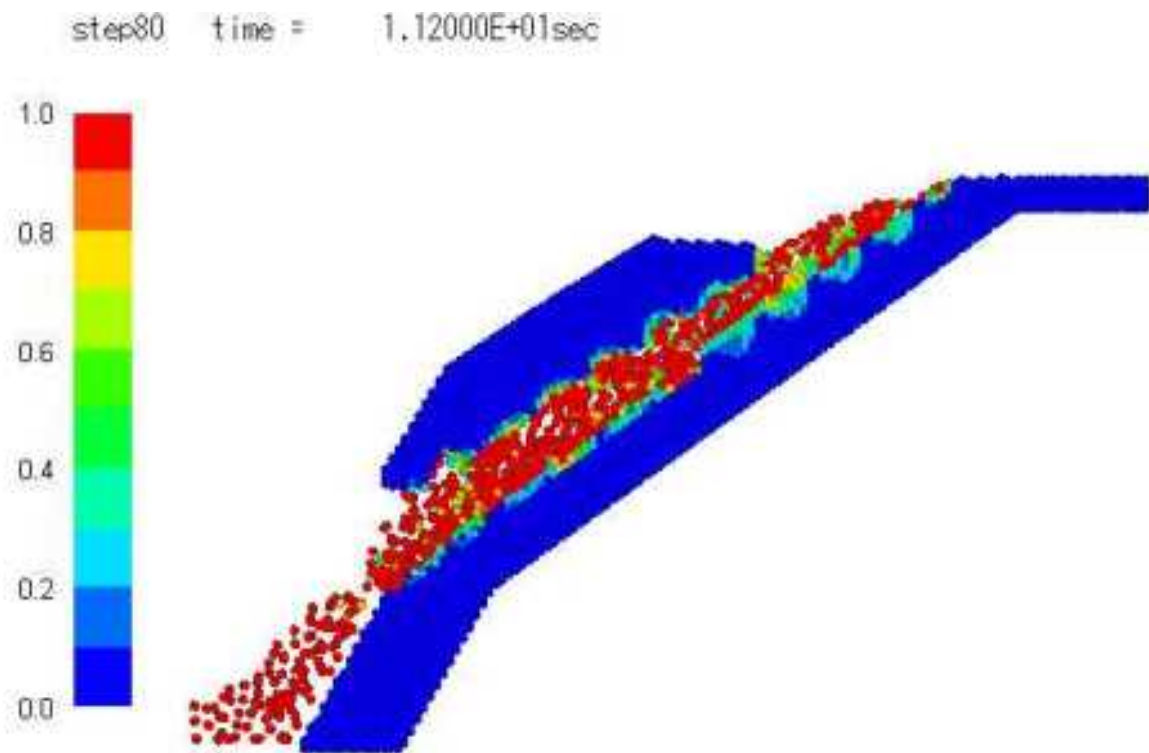


图 8.3.64 CASE29(10.2sec)

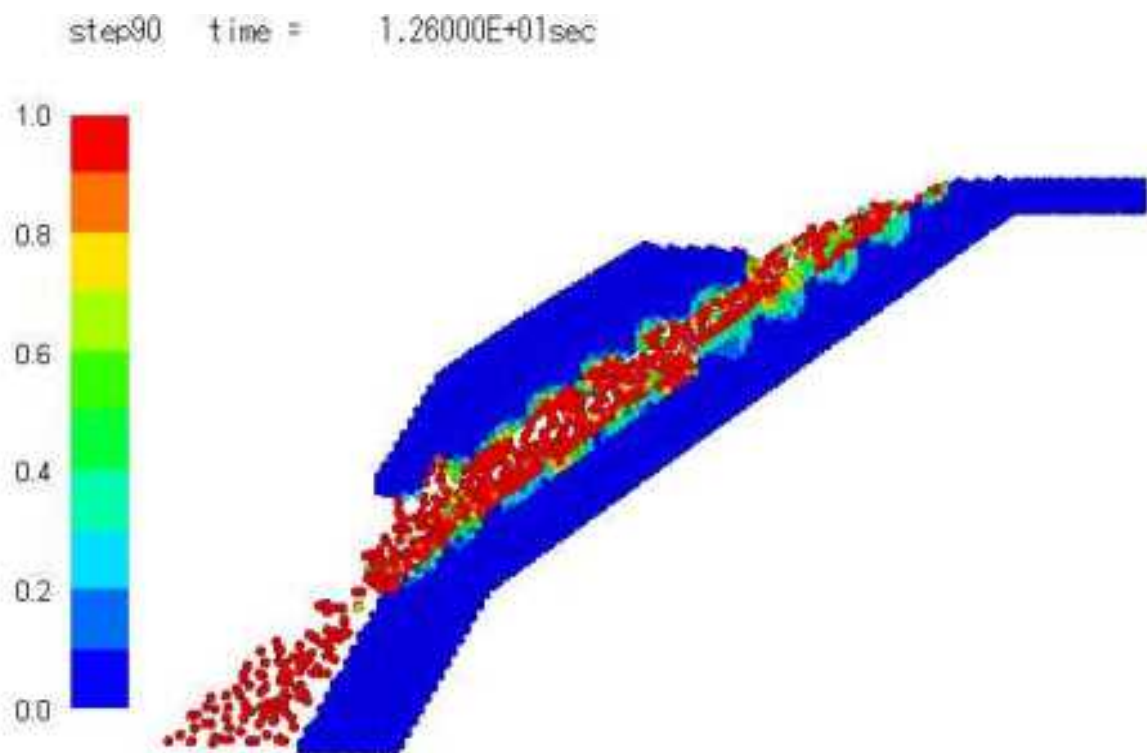


图 8.3.65 CASE29(12.6sec)

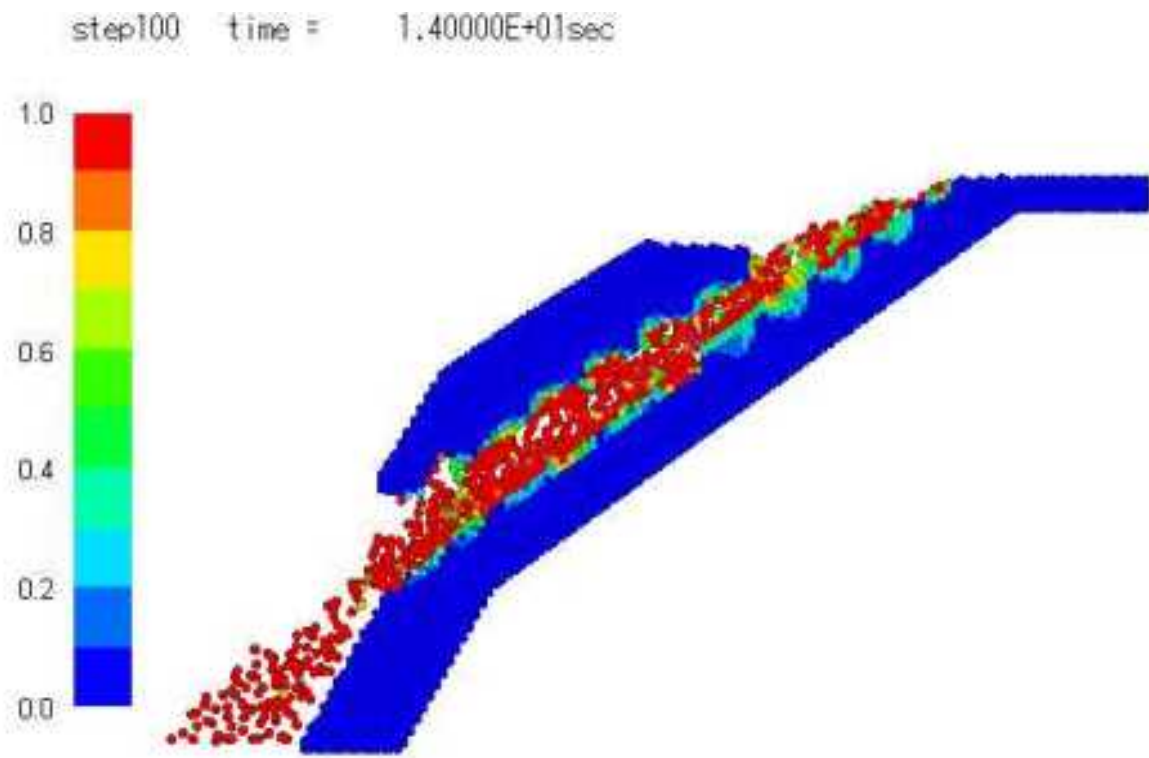


图 8.3.66 CASE29(14.0sec)

8.3.7 粒子時刻歴結果 (CASE27)

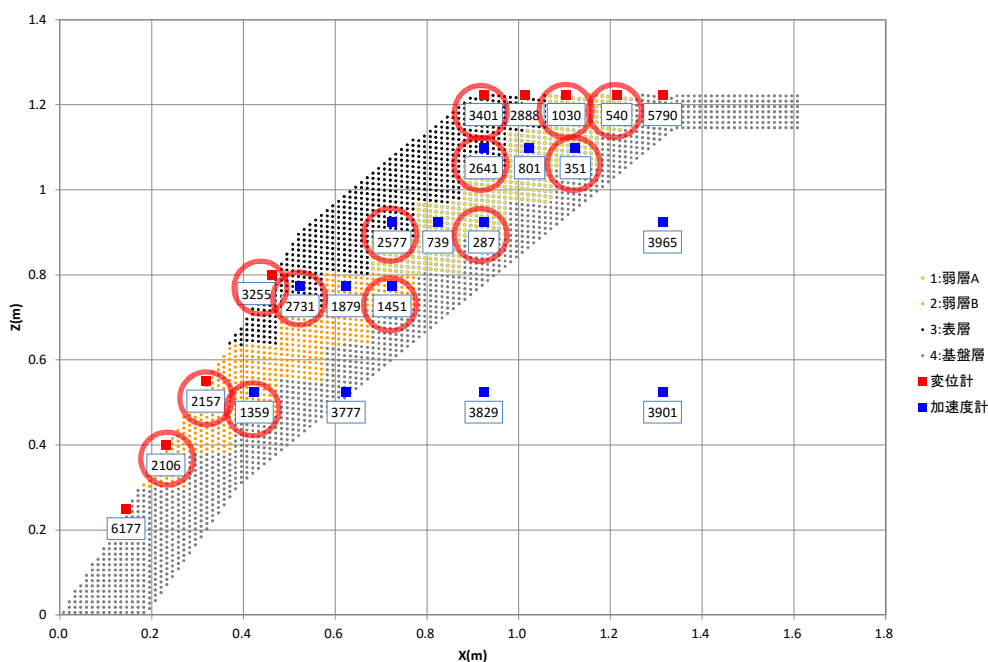


図 8.3.67 CASE27 結果出力位置 ○で囲んだ点の時刻歴結果を示す

表 8.3.1 CASE27 出力粒子一覧

項目	名称	粒子番号	X 座標(m)	Z 座標(m)
変位計	D01	-	0.144	0.250
変位計	D02	Laser01	0.231	0.400
変位計	D03	Laser02	0.318	0.550
変位計	D04	Laser03	0.462	0.800
変位計	D05	Laser04	0.924	1.224
変位計	D06	-	1.014	1.224
変位計	D07	Laser05	1.104	1.224
変位計	D08	Laser06	1.214	1.224
変位計	D09	-	1.314	1.224
加速度計	A01	HV	0.924	1.099
加速度計	A02	HV	1.024	1.099
加速度計	A03	HV	1.124	1.099
加速度計	A04	HV	1.314	0.924
加速度計	A05	HV	0.724	0.924
加速度計	A06	HV	0.824	0.924
加速度計	A07	HV	0.924	0.924
加速度計	A07-2	HV	0.524	0.774
加速度計	A08	HV	0.624	0.774
加速度計	A09	HV	0.724	0.774
加速度計	A10	HV	0.424	0.524
加速度計	A11	HV	0.624	0.524
加速度計	A12	HV	0.924	0.524
加速度計	A13	HV	1.314	0.524

(1) 加速度計位置における水平方向変位時刻歴

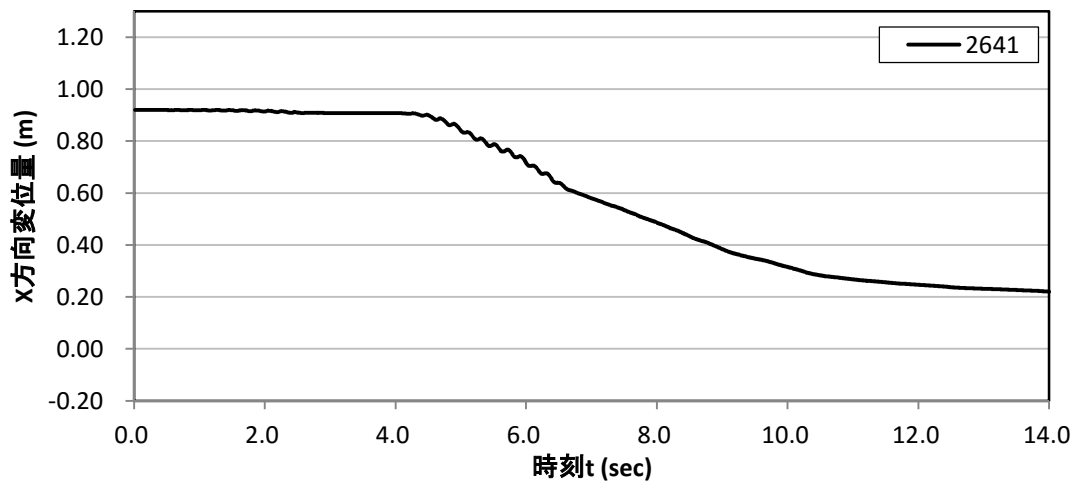


図 8. 3. 68 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2641、加速度計 A01 設置位置)

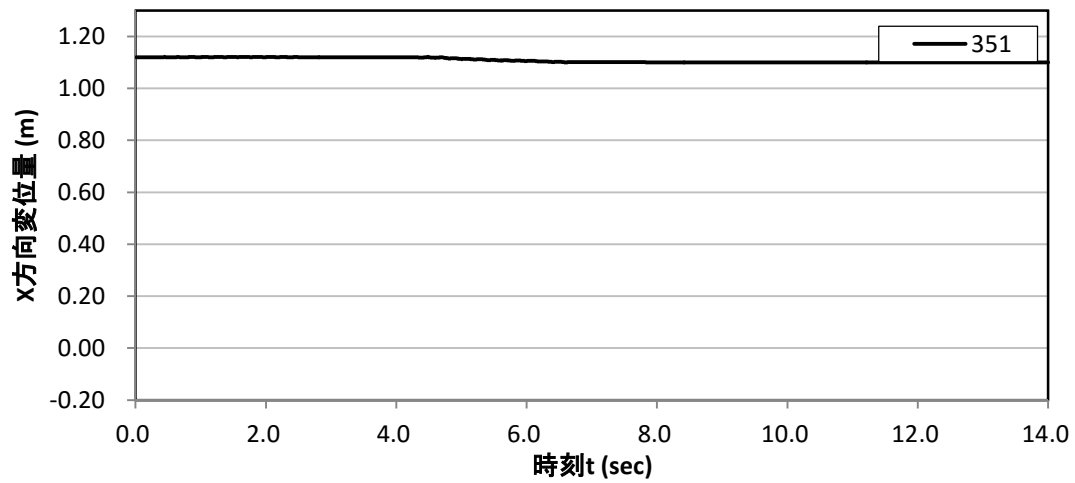


図 8. 3. 3. 69 水平方向変位時刻歴(粒子番号 351、加速度計 A03 設置位置)

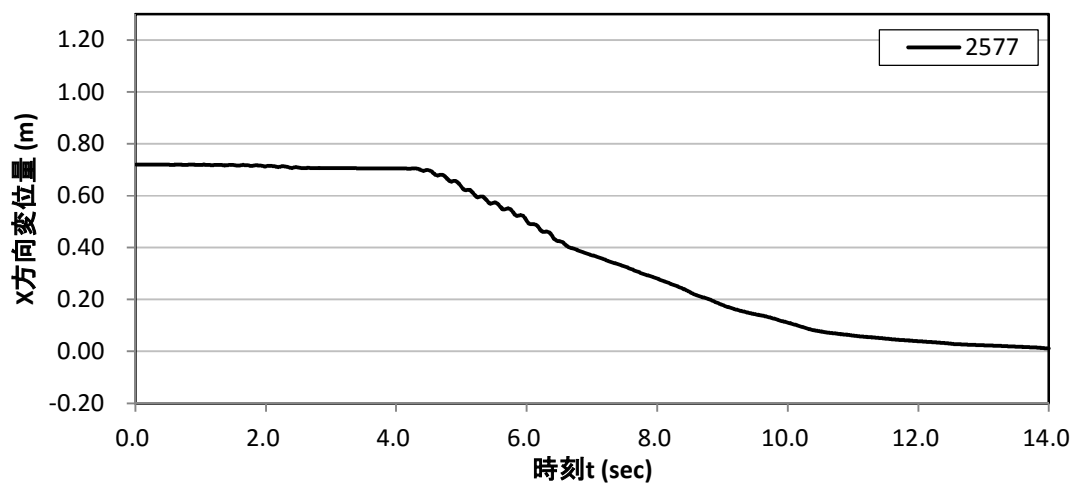


図 8. 3. 70 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2577、加速度計 A05 設置位置)

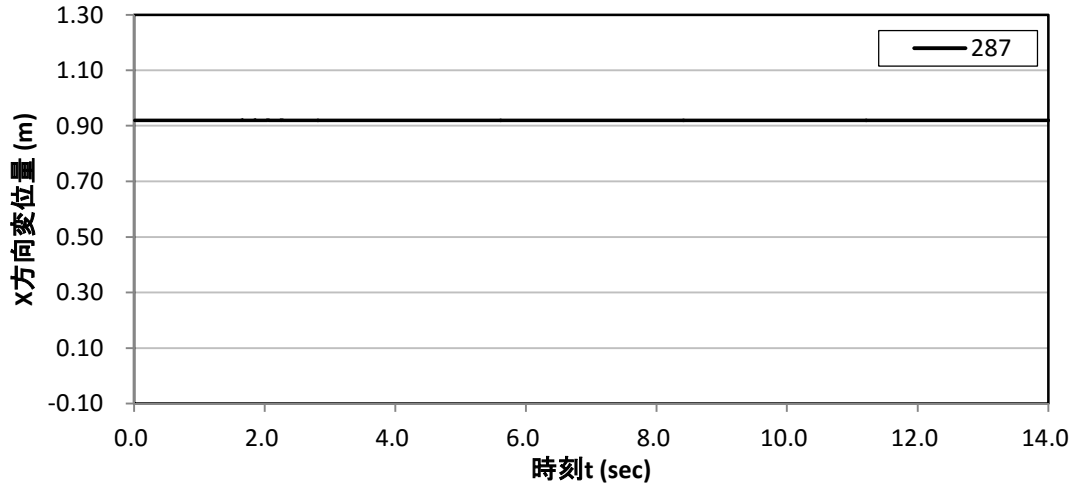


图 8.3.71 水平方向変位時刻歴(粒子番号 287、加速度計 A07 設置位置)

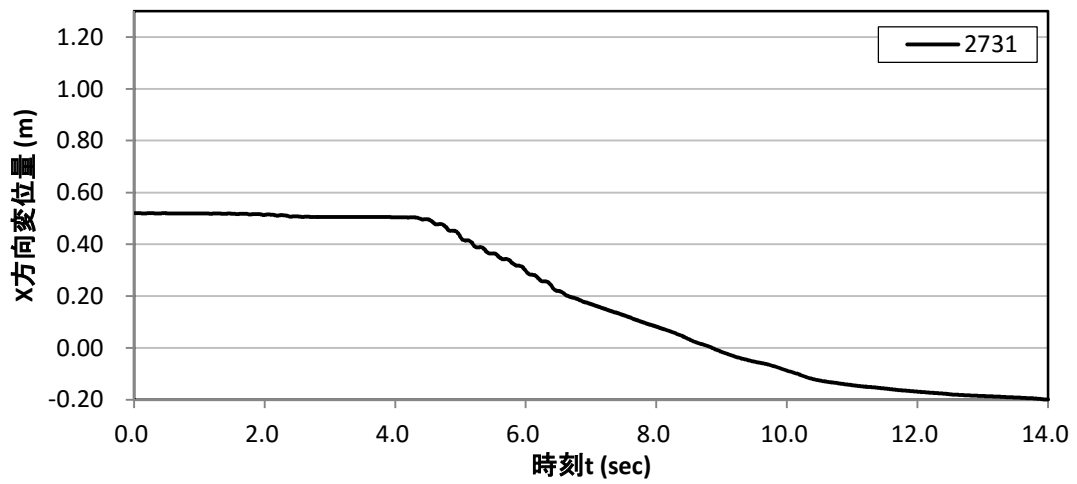


图 8.3.72 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2731、加速度計 A07-2 設置位置)

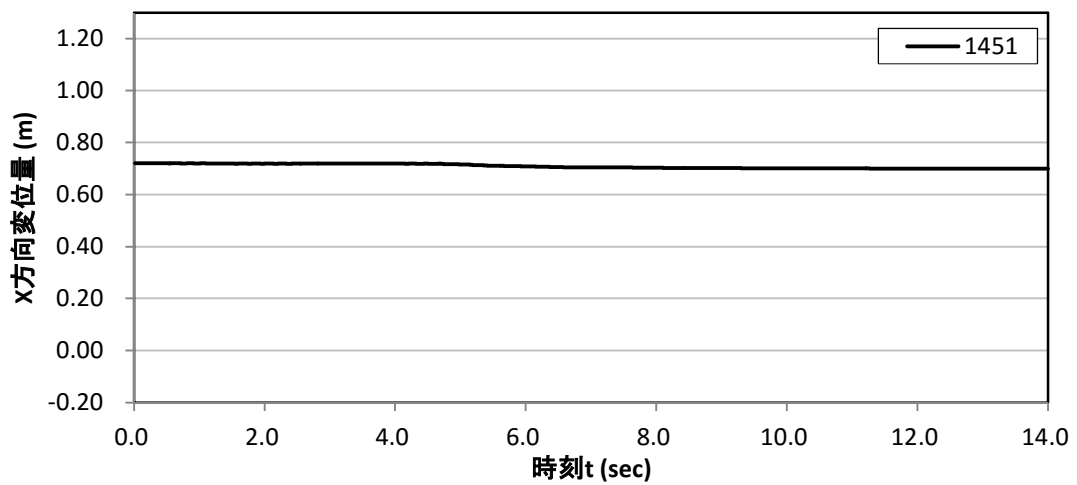


图 8.3.73 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1451、加速度計 A09 設置位置)

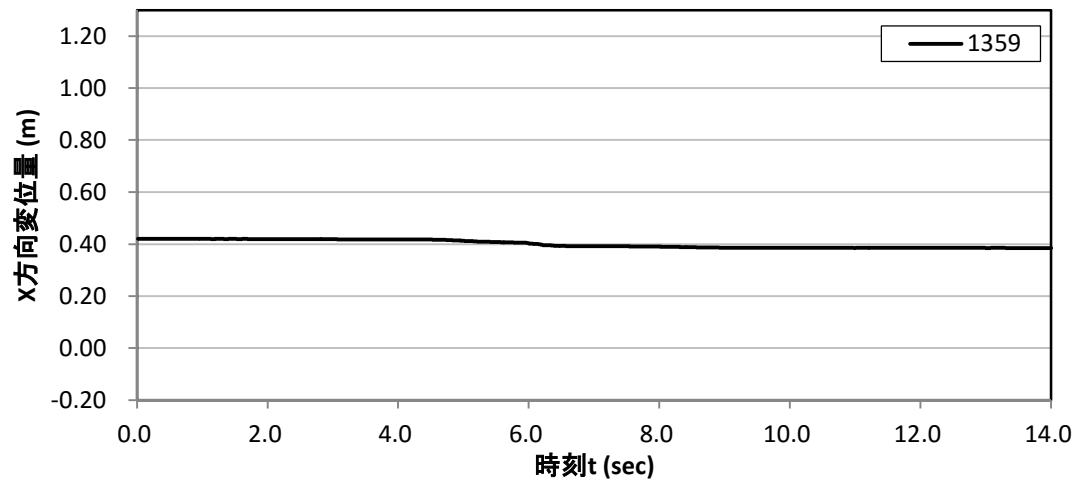


図 8.3.74 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1359、加速度計 A10 設置位置)

(2) 加速度計位置における鉛直方向変位時刻歴

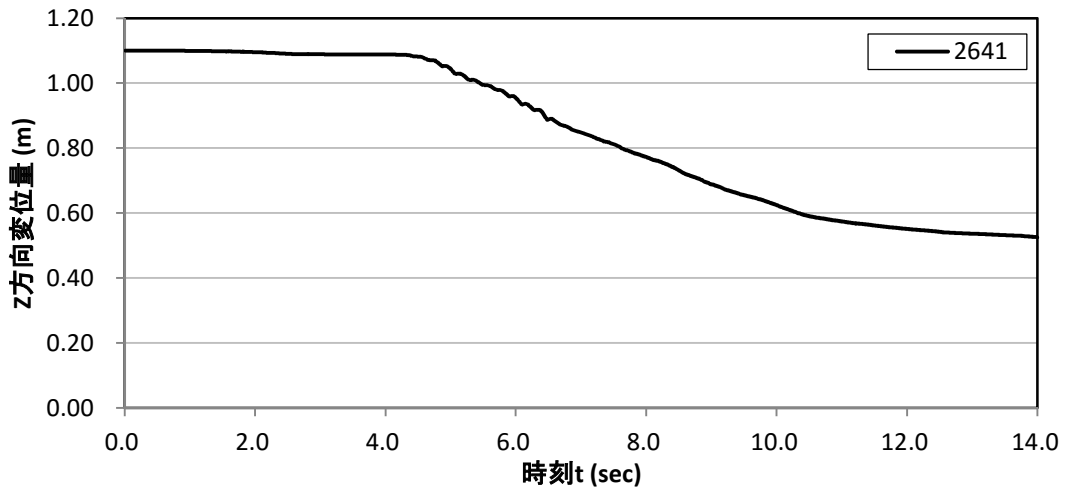


図 8.3.75 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2641、加速度計 A01 設置位置)

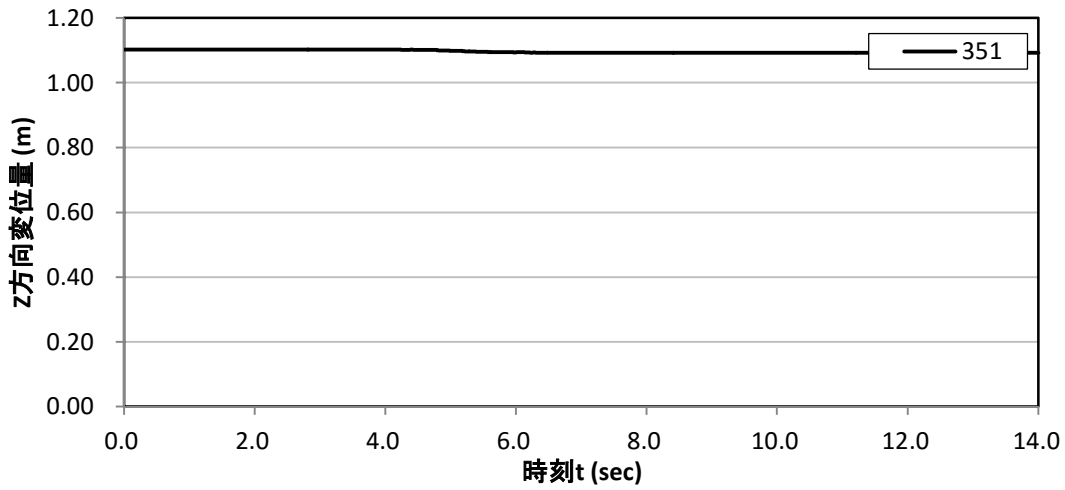


図 8.3.76 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 351、加速度計 A03 設置位置)

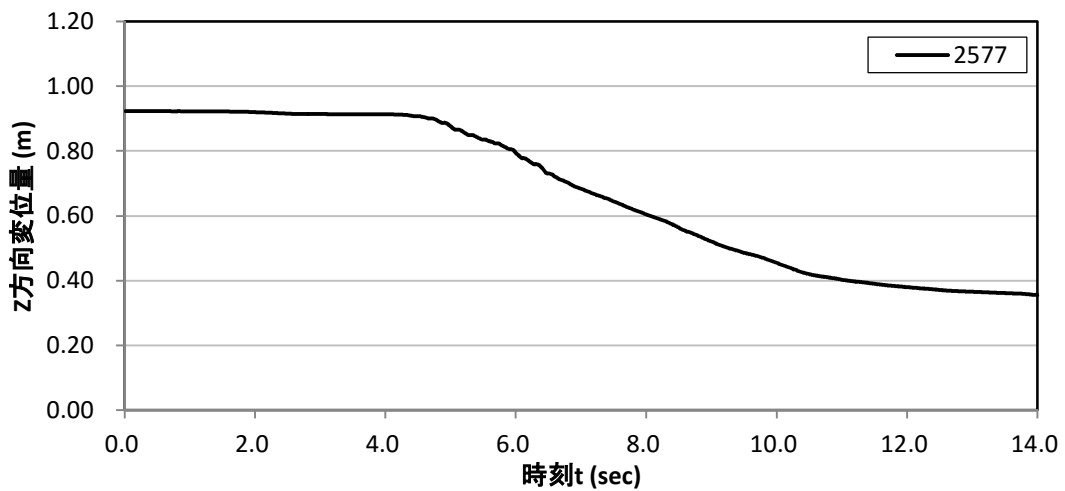


図 8.3.77 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2577、加速度計 A05 設置位置)

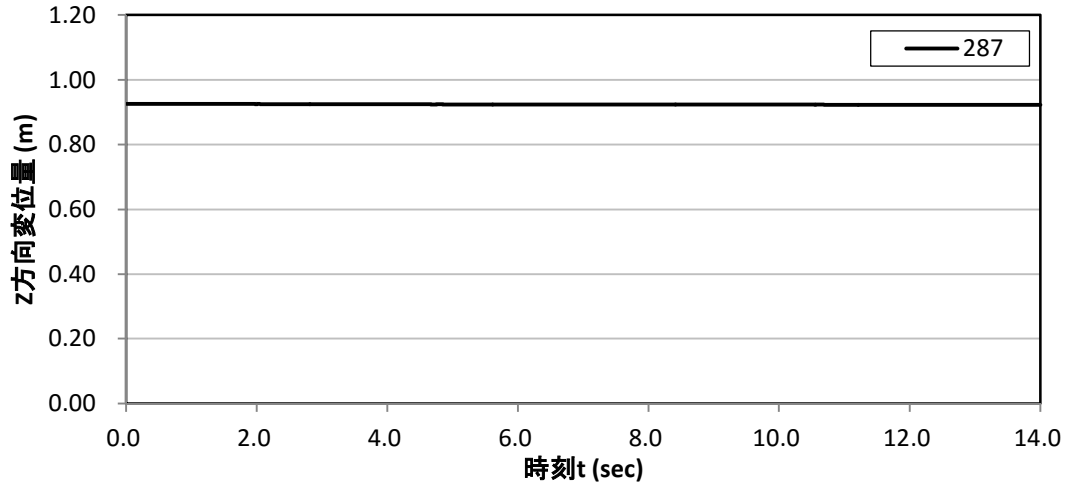


図 8.3.78 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 287、加速度計 A07 設置位置)

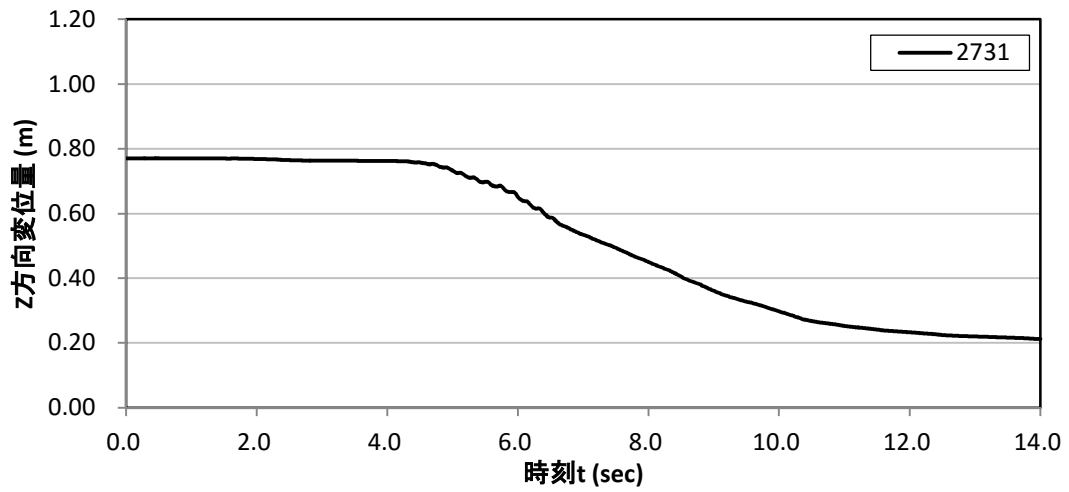


図 8.3.79 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2731、加速度計 A07-2 設置位置)

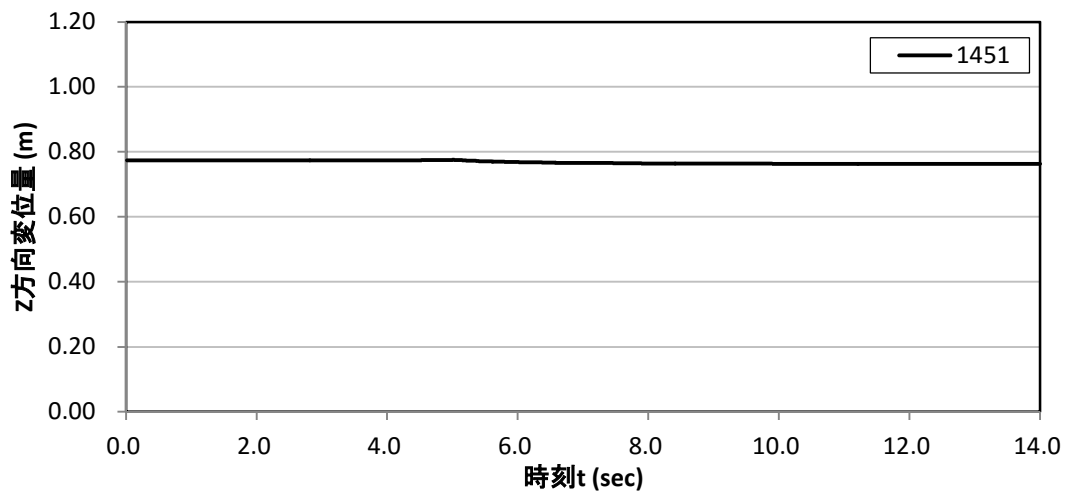


図 8.3.80 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1451、加速度計 A09 設置位置)

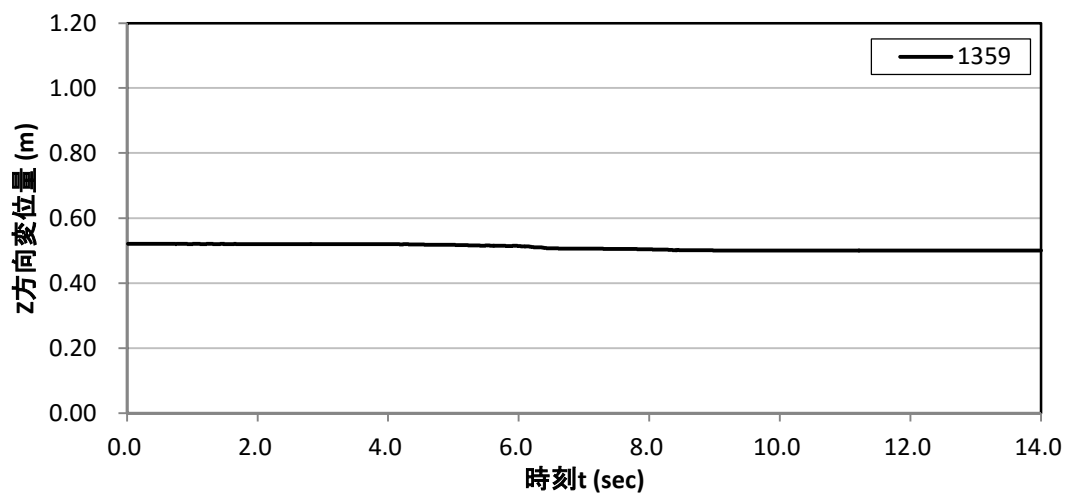


図 8.3.81 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1359、加速度計 A10 設置位置)

(3) 加速度計位置における水平方向加速度時刻歴

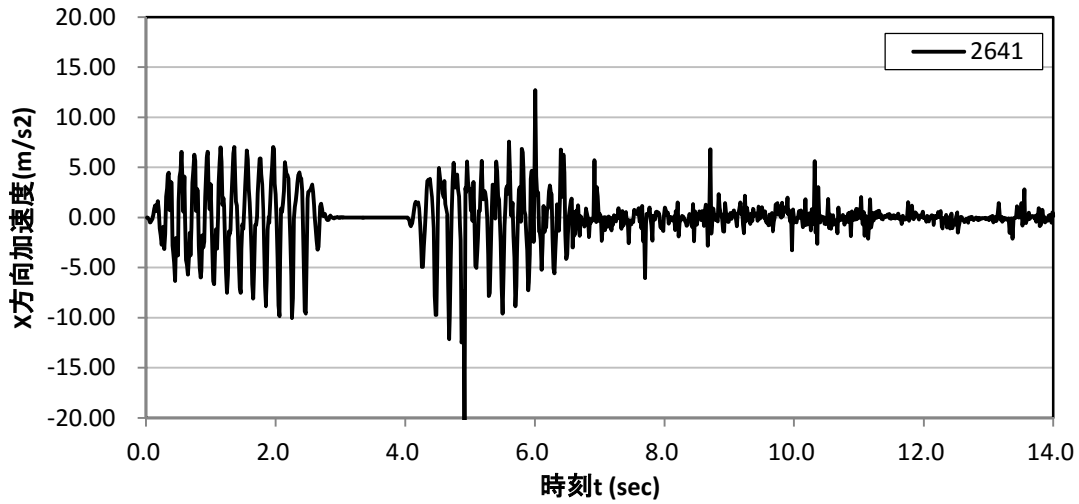


図 8.3.82 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2641、加速度計 A01 設置位置)

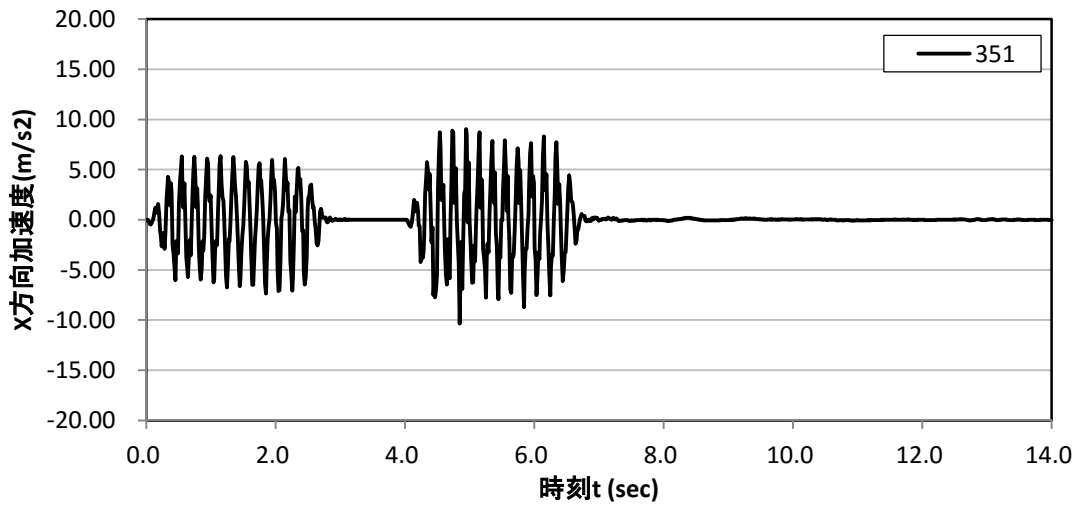


図 8.3.83 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 351、加速度計 A03 設置位置)

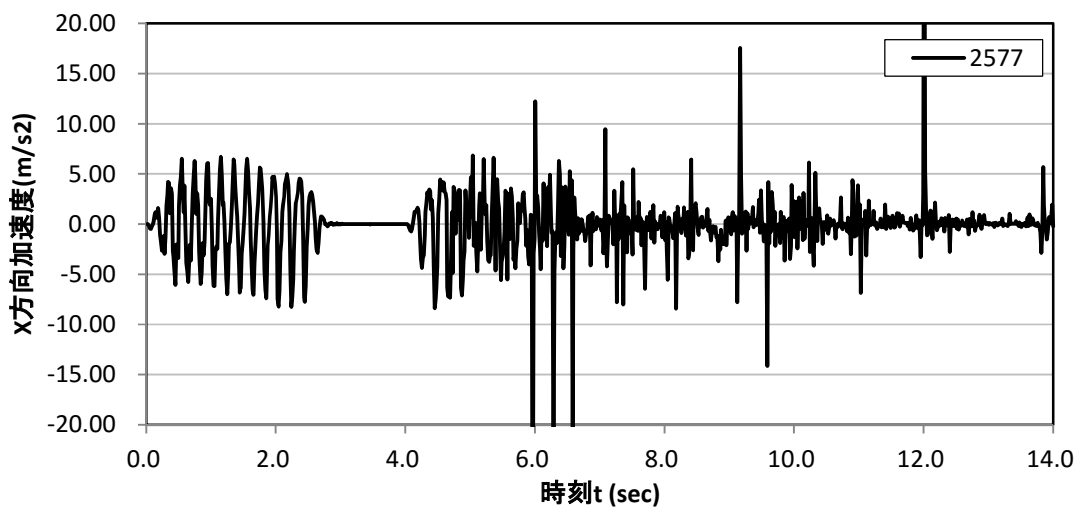


図 8.3.84 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2577、加速度計 A05 設置位置)

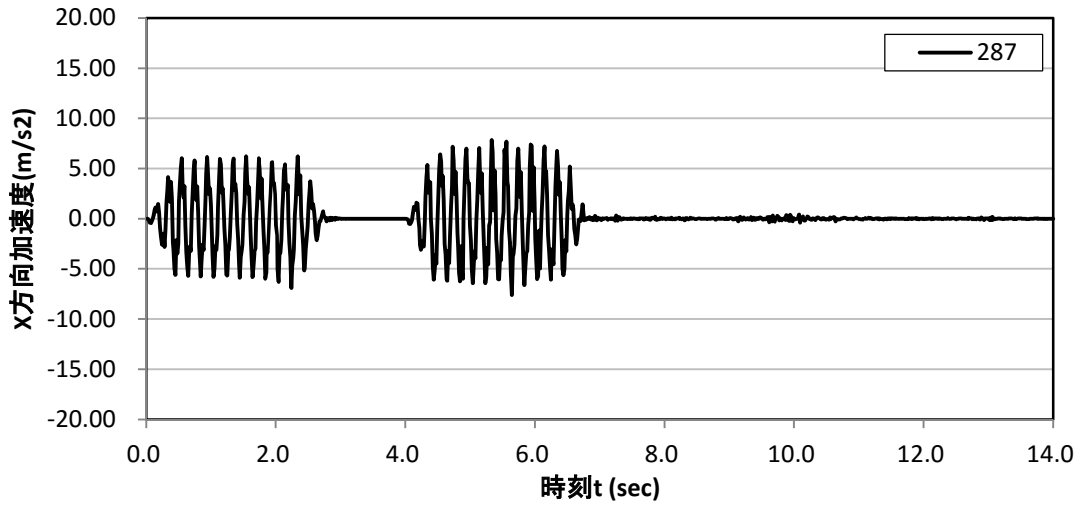


图 8.3.85 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 287、加速度計 A07 設置位置)

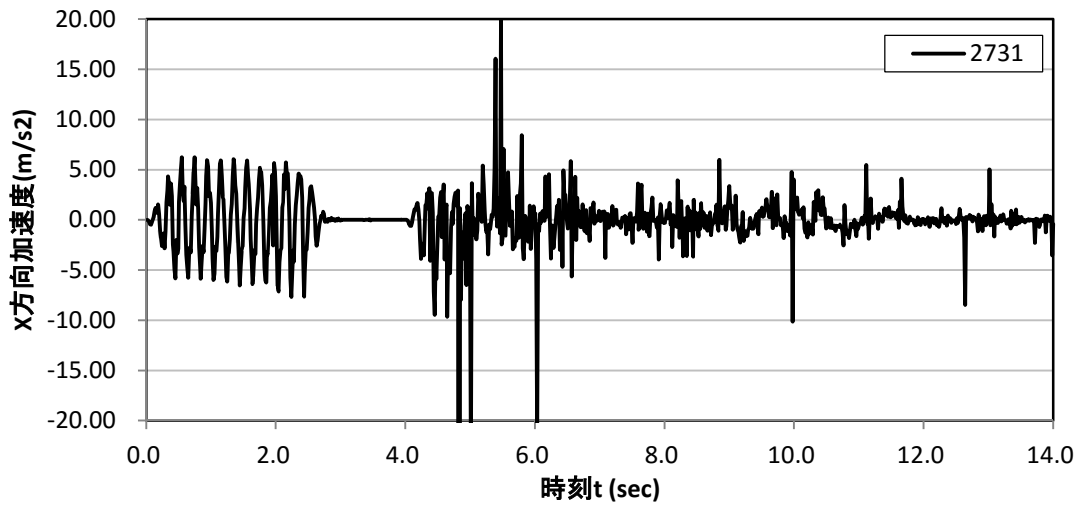


图 8.3.86 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2731、加速度計 A07-2 設置位置)

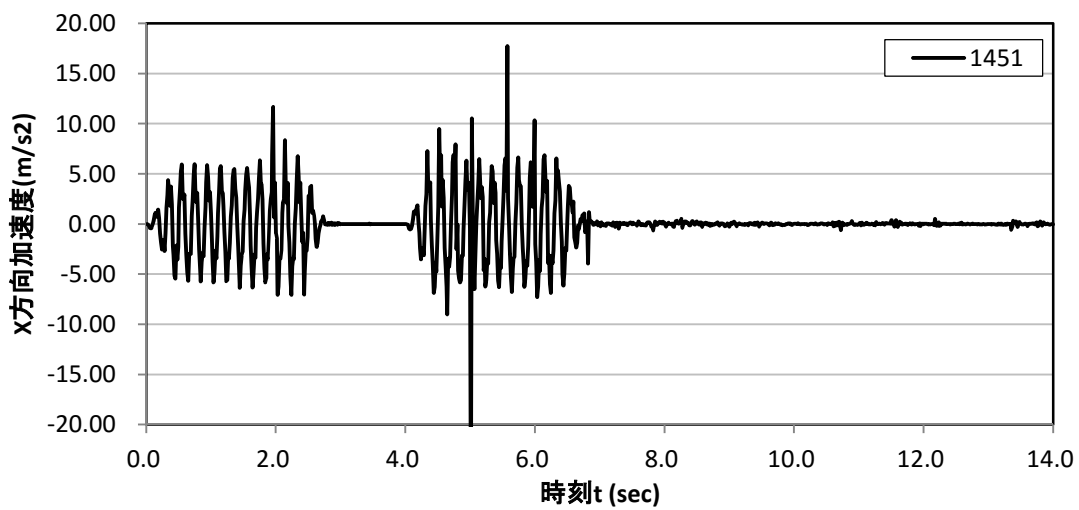


图 8.3.87 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1451、加速度計 A09 設置位置)

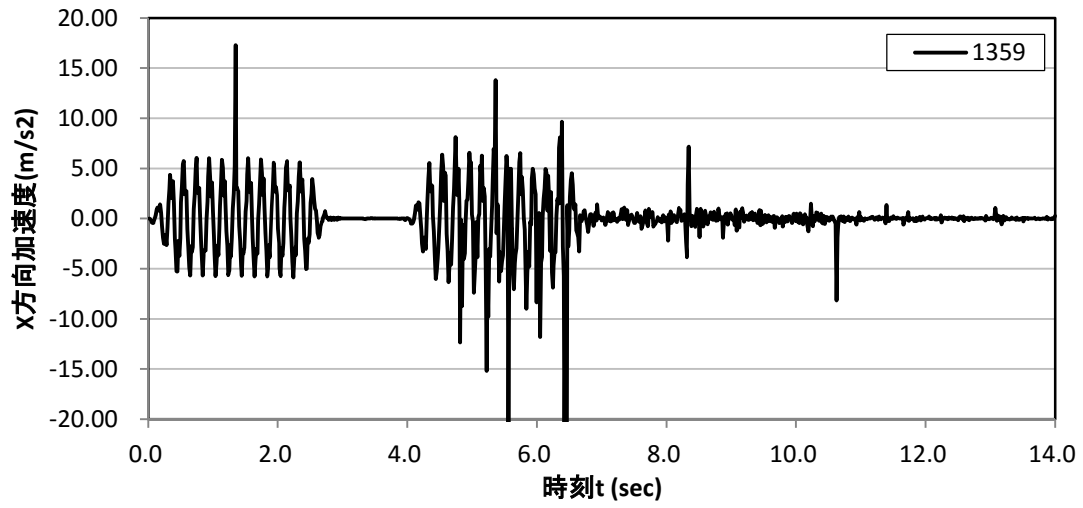


図 8.3.88 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1359、加速度計 A10 設置位置)

(4) 加速度計位置における鉛直方向加速度時刻歴

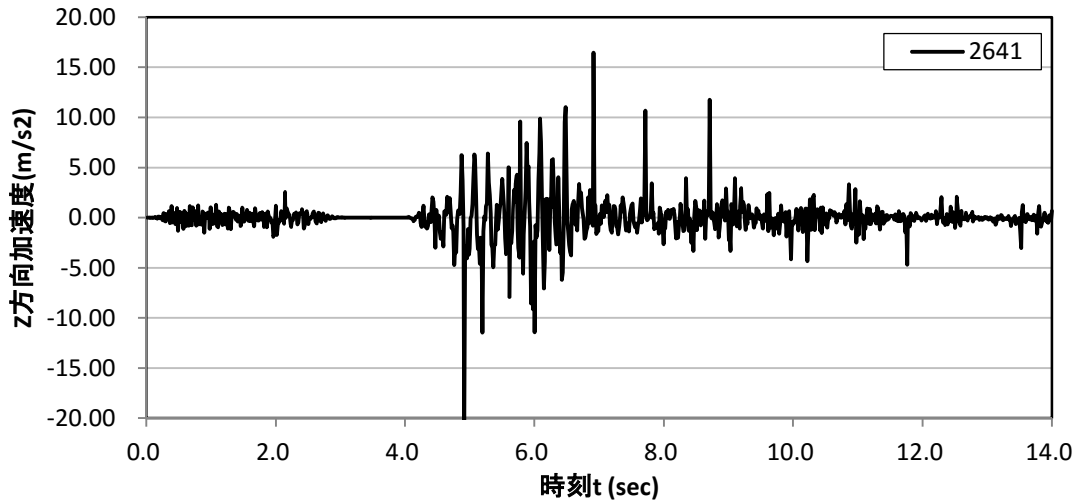


図 8.3.89 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2641、加速度計 A01 設置位置)

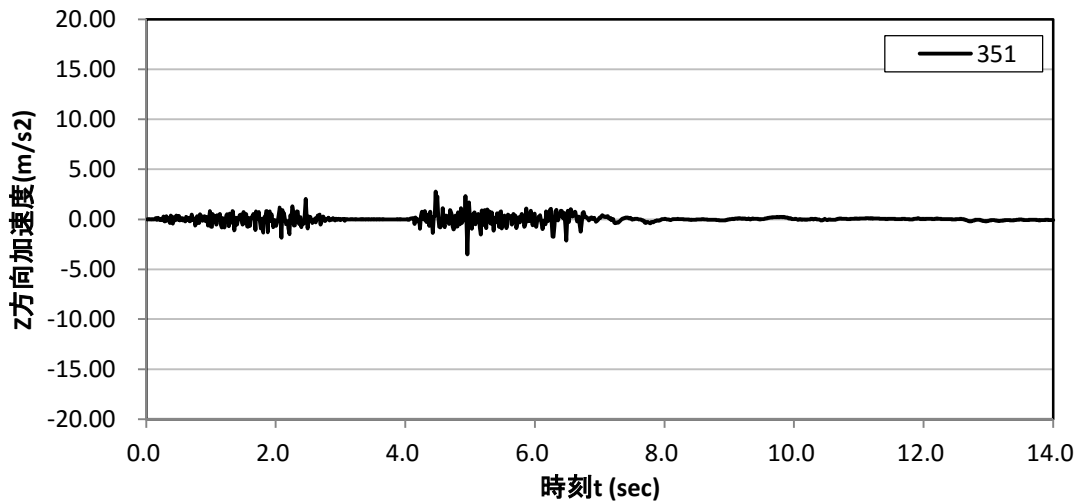


図 8.3.90 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 351、加速度計 A03 設置位置)

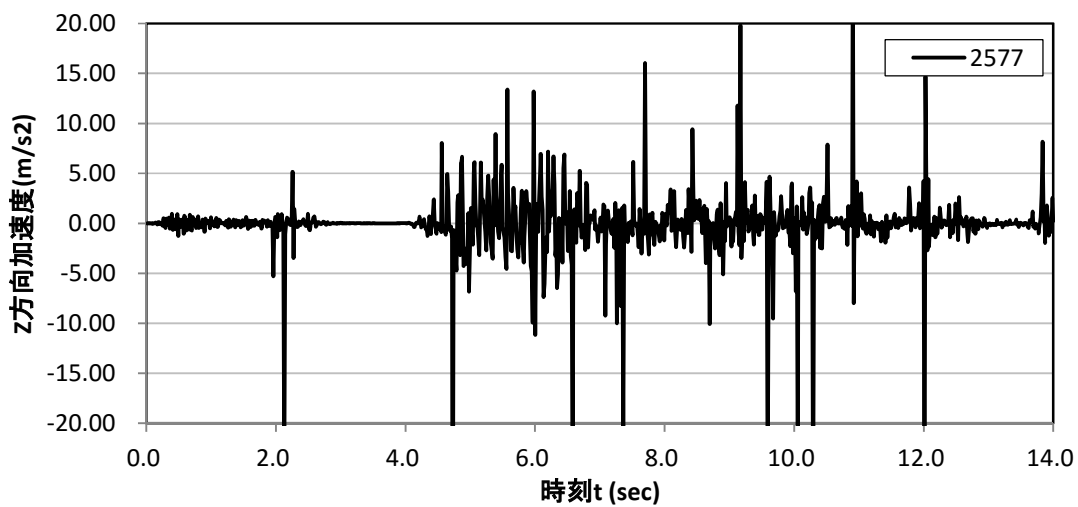


図 8.3.91 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2577、加速度計 A05 設置位置)

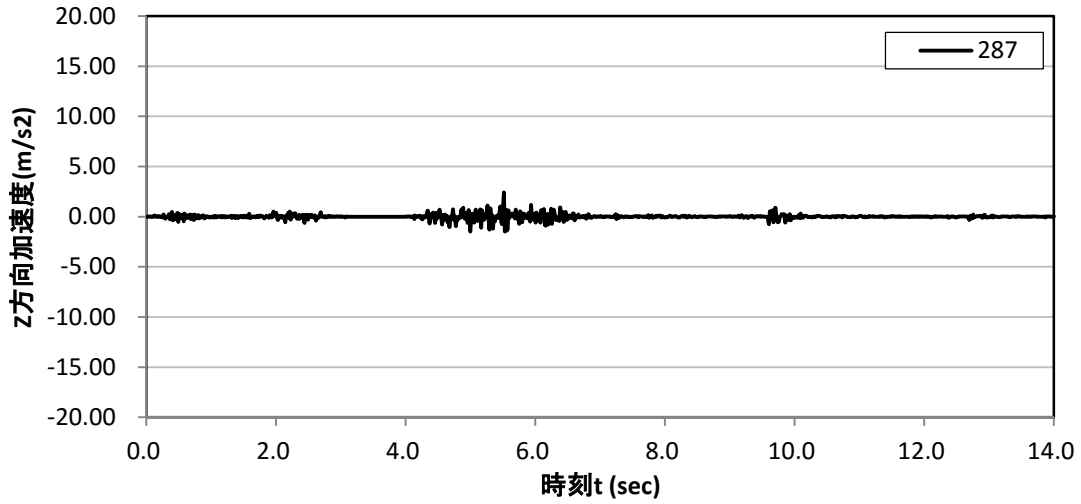


図 8.3.92 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 287、加速度計 A07 設置位置)

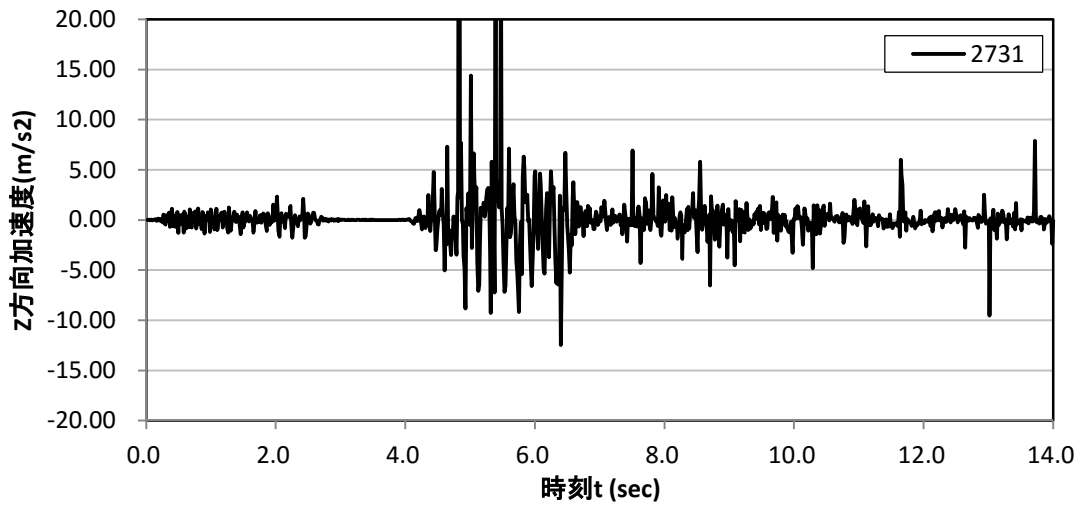


図 8.3.93 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2731、加速度計 A07-2 設置位置)

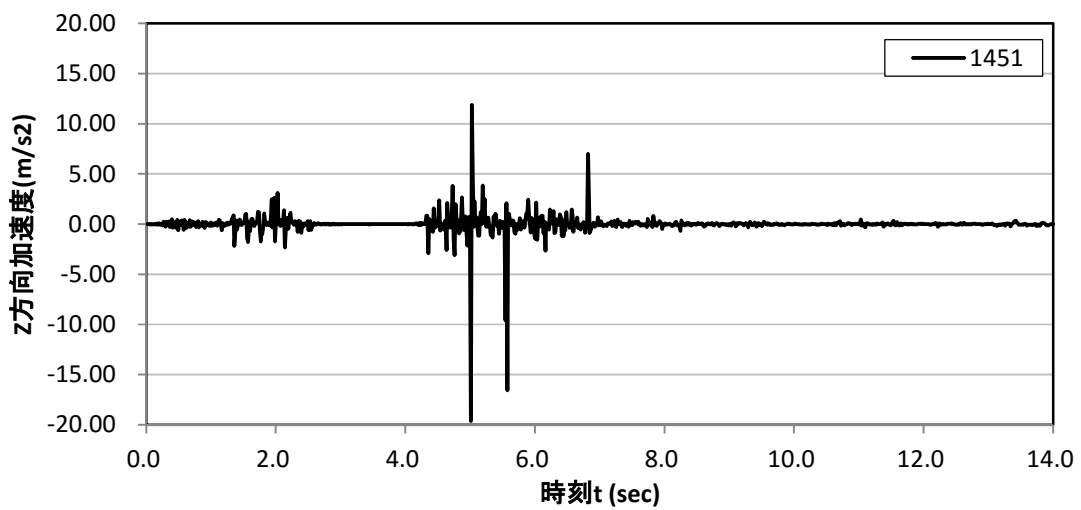


図 8.3.94 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1451、加速度計 A09 設置位置)

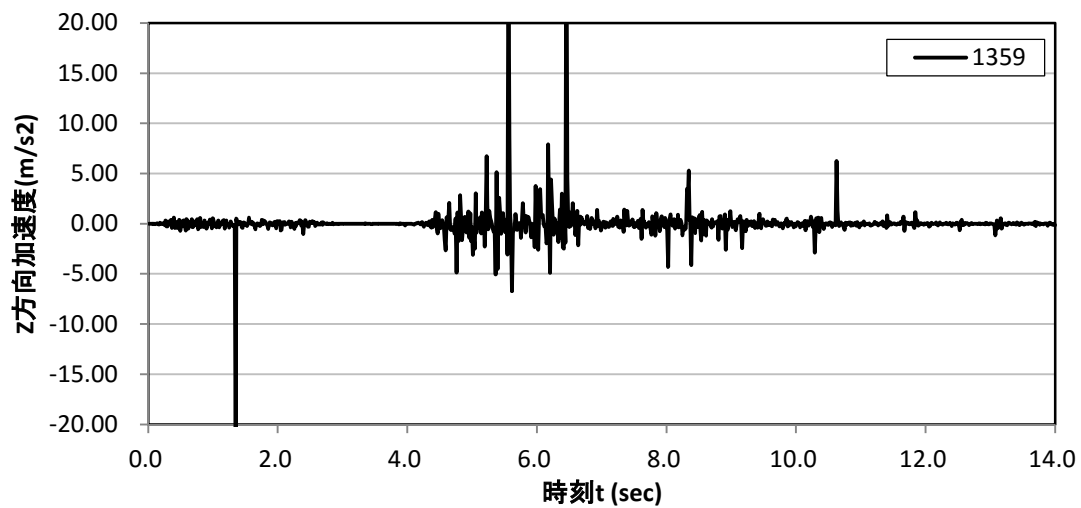


图 8.3.95 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1359、加速度計 A10 設置位置)

(5) 変位計位置における水平方向変位時刻歴

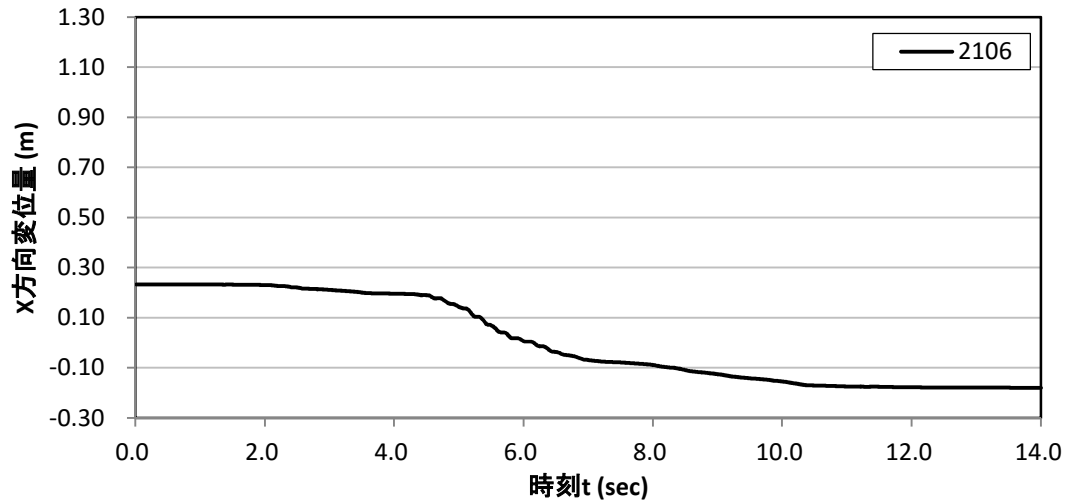


図 8.3.96 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2106、変位計 Laser01 設置位置)

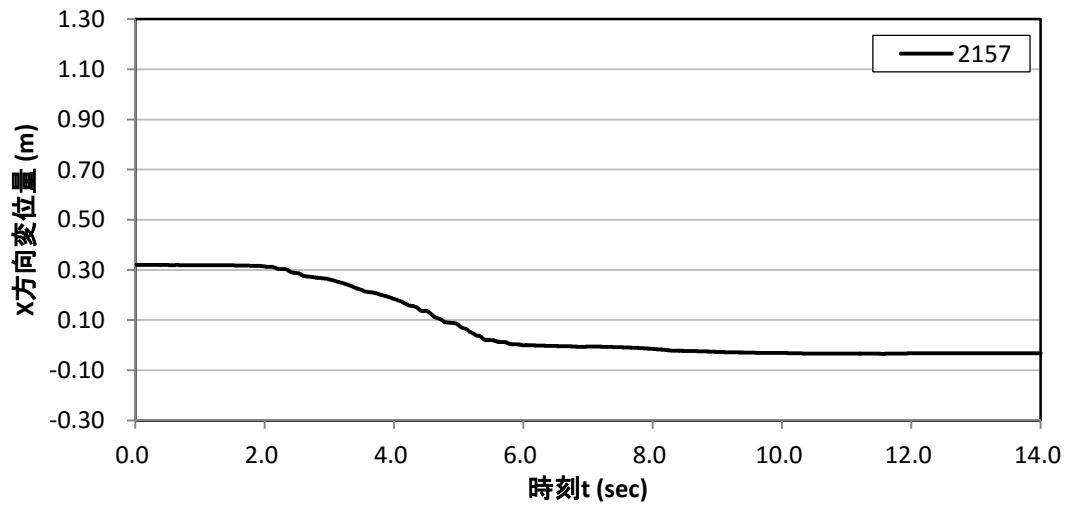


図 8.3.97 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2157、変位計 Laser02 設置位置)

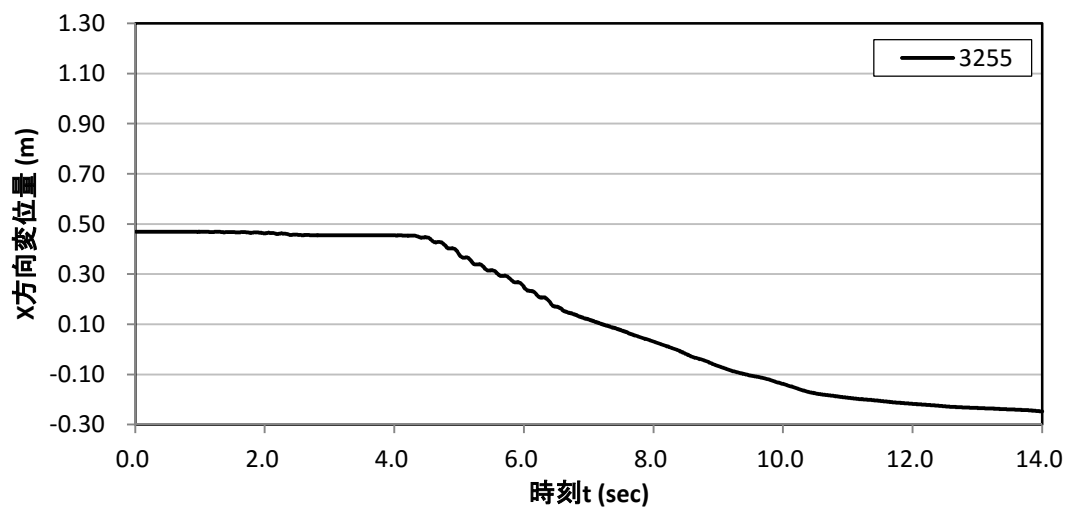


図 8.3.98 水平方向変位時刻歴(粒子番号 3255、変位計 Laser03 設置位置)

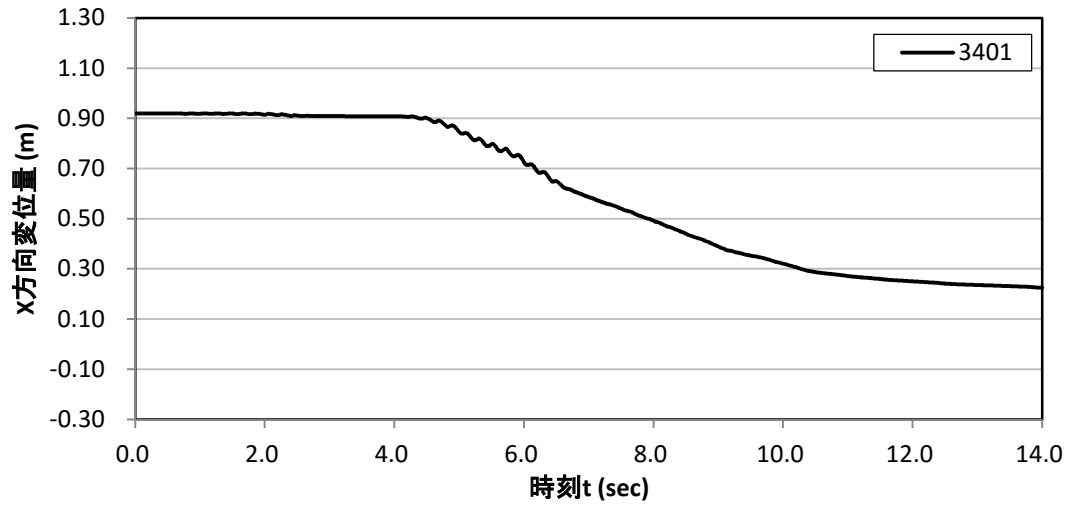


図 8.3.99 水平方向変位時刻歴(粒子番号 3401、変位計 Laser04 設置位置)

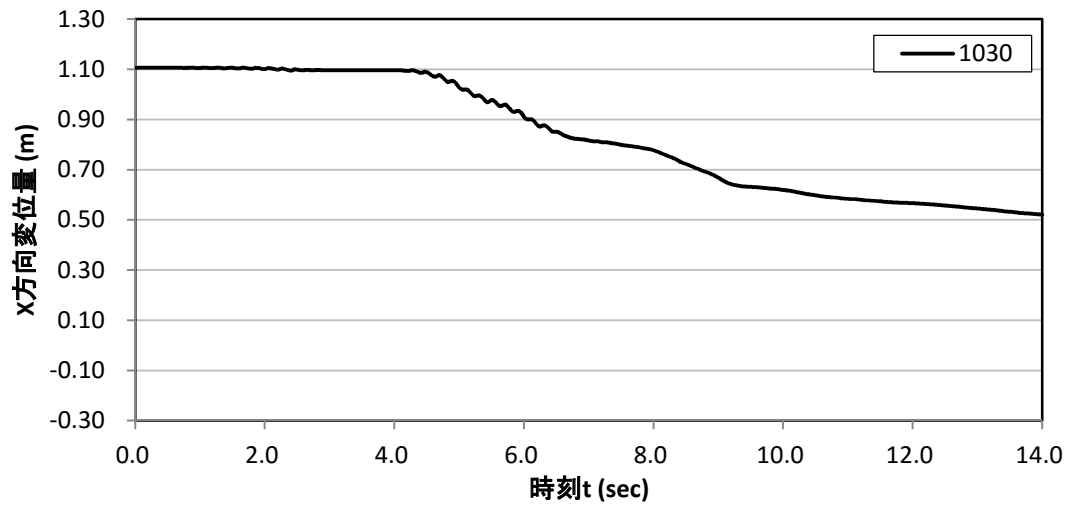


図 8.3.100 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1030、変位計 Laser05 設置位置)

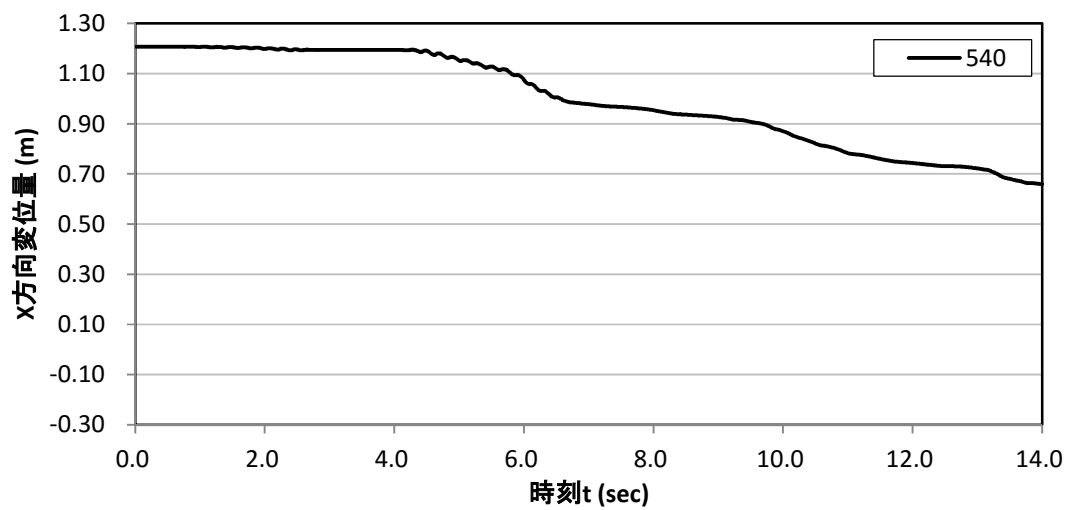


図 8.3.101 水平方向変位時刻歴(粒子番号 540、変位計 Laser06 設置位置)

(6) 変位計位置における鉛直方向変位時刻歴

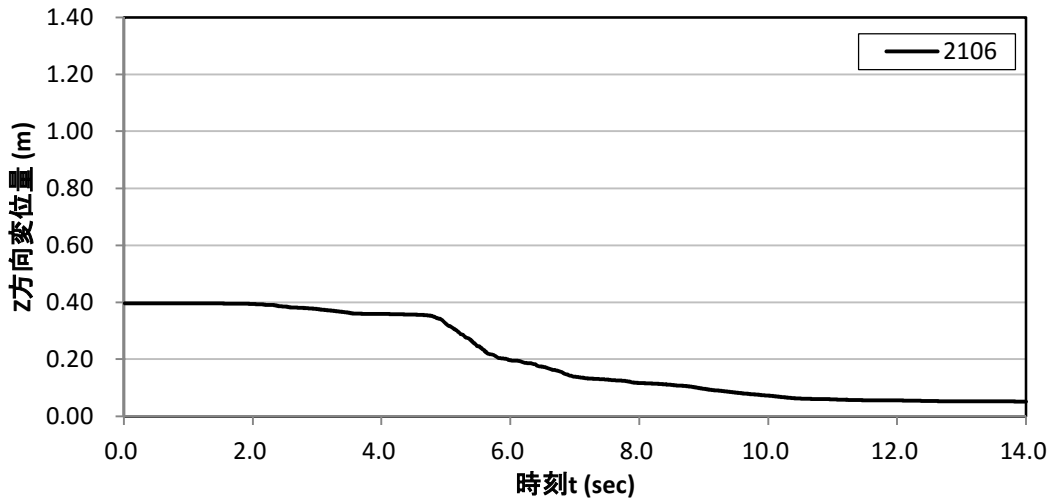


図 8. 3. 102 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2106、変位計 Laser01 設置位置)

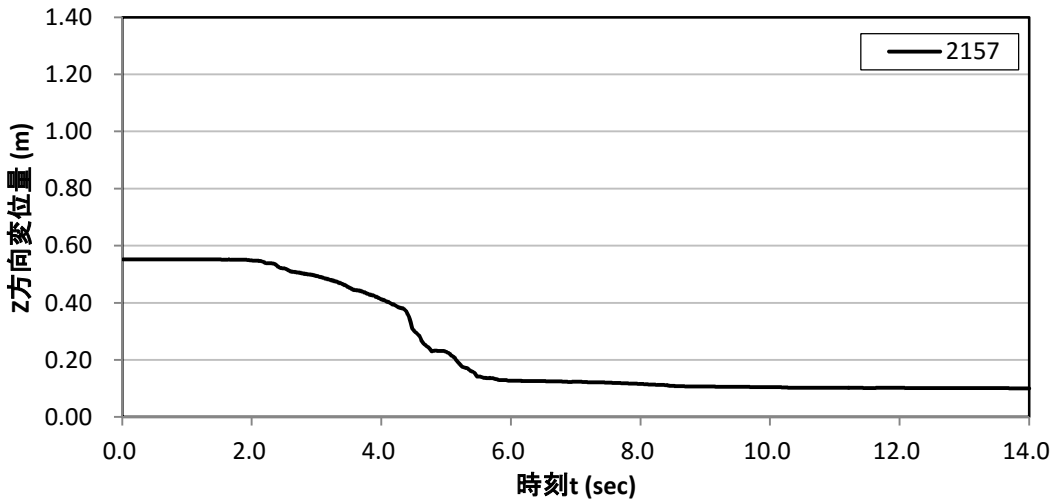


図 8. 3. 103 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2157、変位計 Laser02 設置位置)

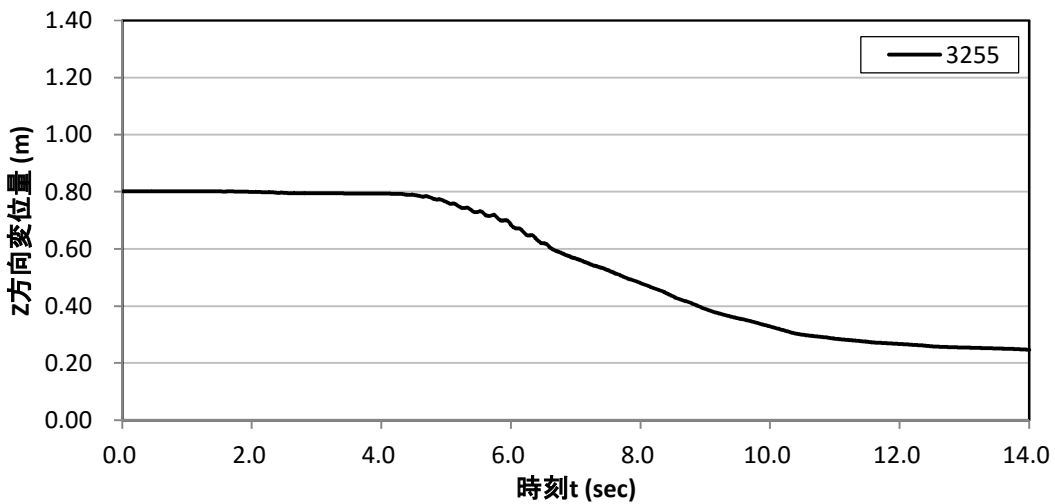


図 8. 3. 104 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 3255、変位計 Laser03 設置位置)

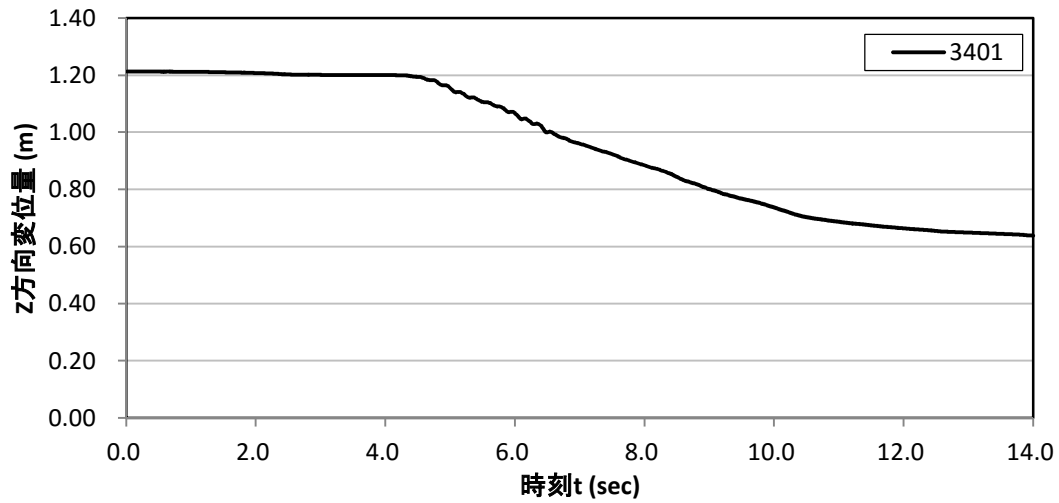


図 8.3.105 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 3401、変位計 Laser04 設置位置)

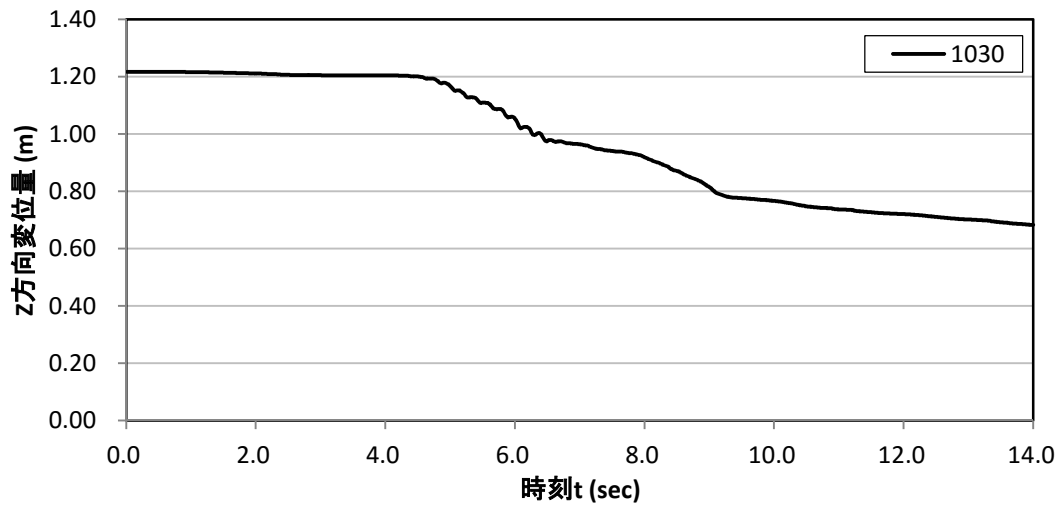


図 8.3.106 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 1030、変位計 Laser05 設置位置)

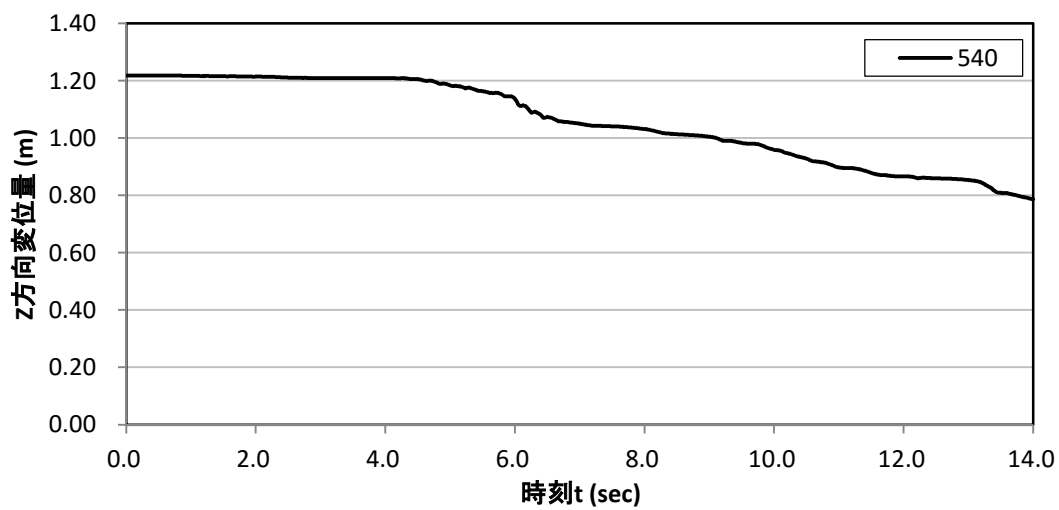


図 8.3.107 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 540、変位計 Laser06 設置位置)

(7) 変位計位置における水平方向加速度時刻歴

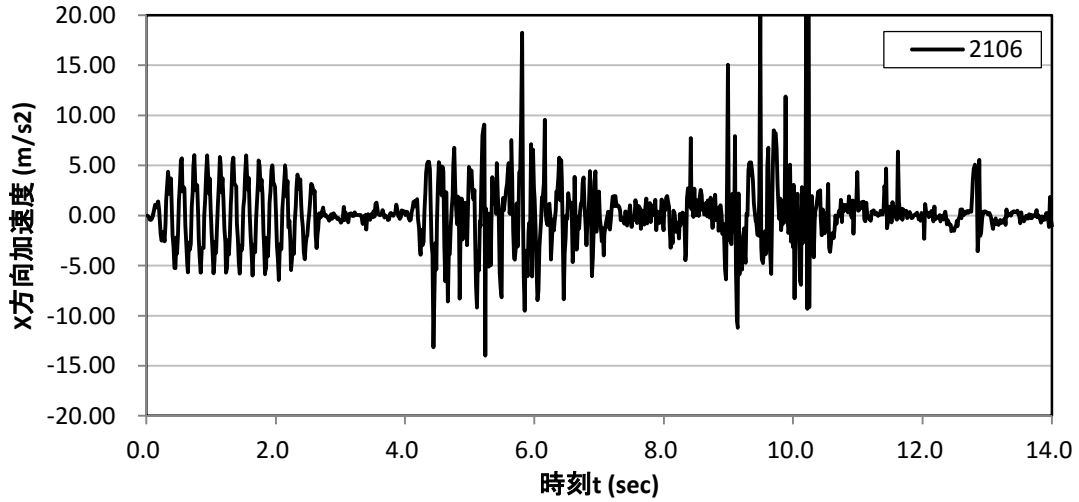


図 8.3.108 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2106、変位計 Laser01 設置位置)

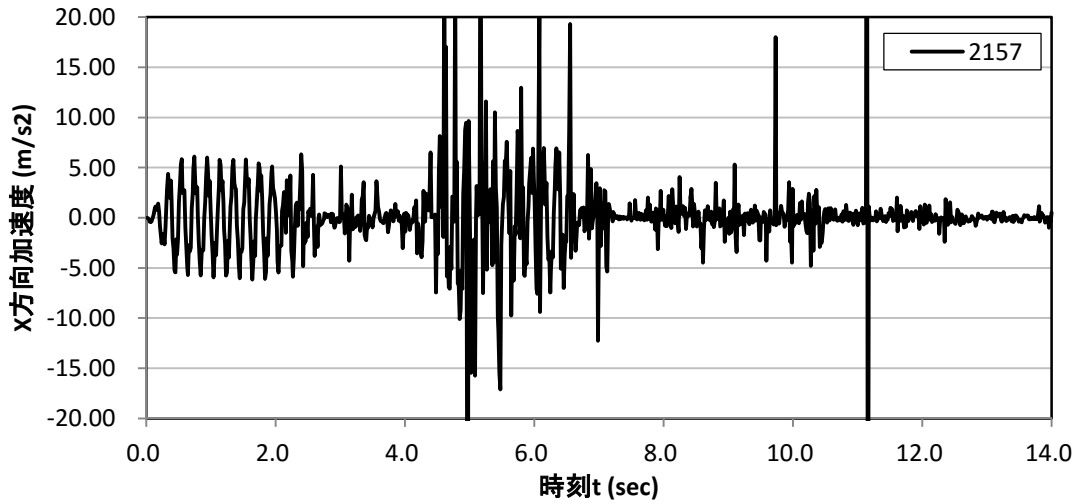


図 8.3.109 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2157、変位計 Laser02 設置位置)

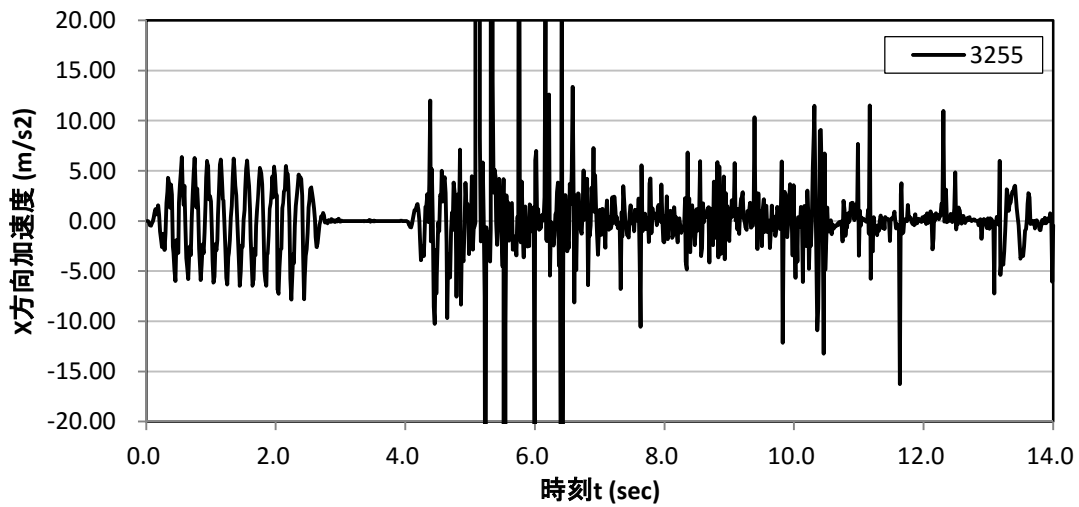


図 8.3.110 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 3255、変位計 Laser03 設置位置)

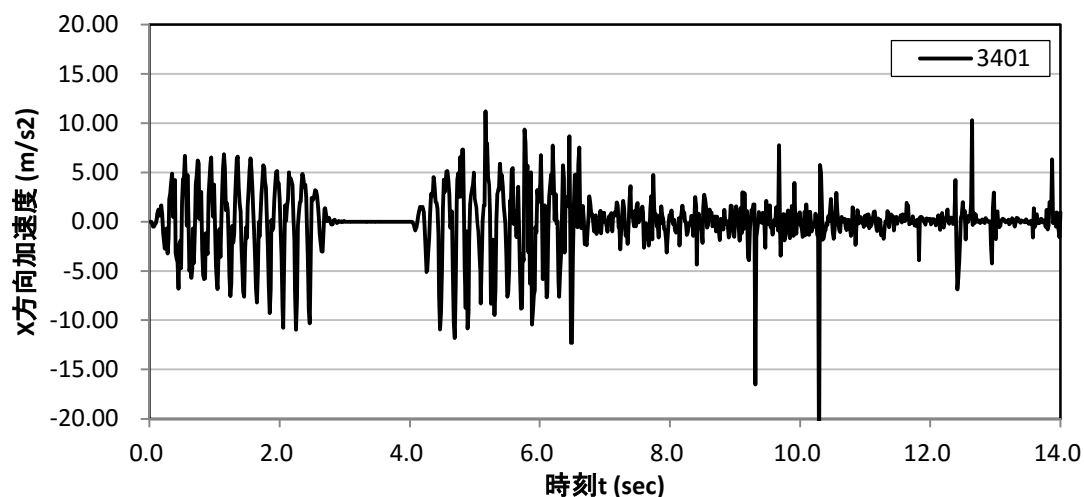


図 8. 3. 111 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 3401、変位計 Laser04 設置位置)

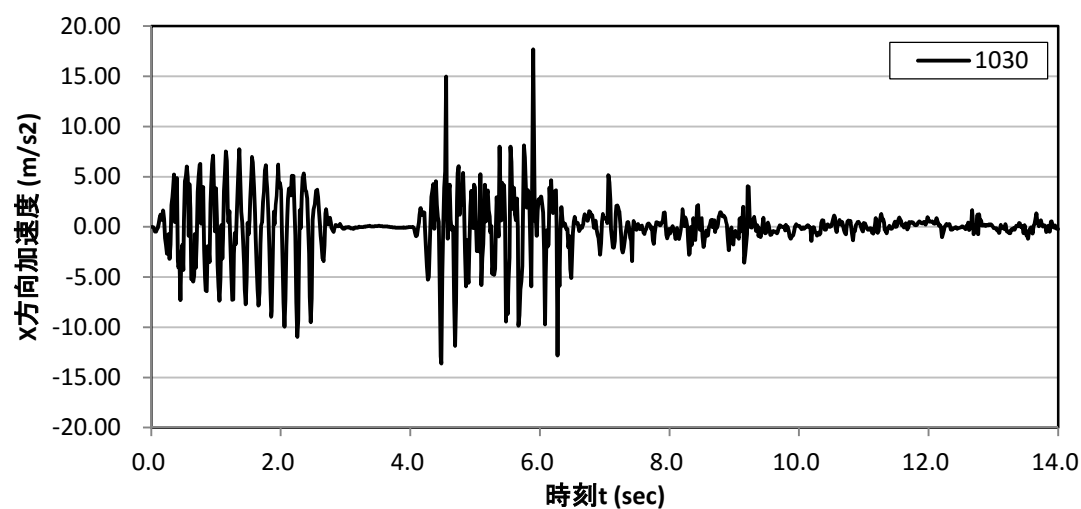


図 8. 3. 112 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1030、変位計 Laser05 設置位置)

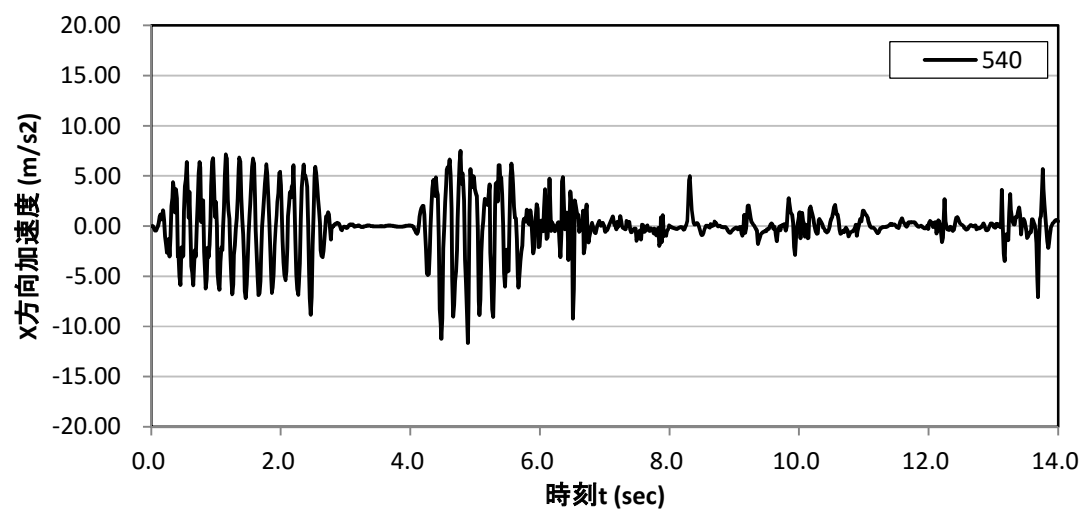


図 8. 3. 113 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 540、変位計 Laser06 設置位置)

(8) 変位計位置における鉛直方向加速度時刻歴

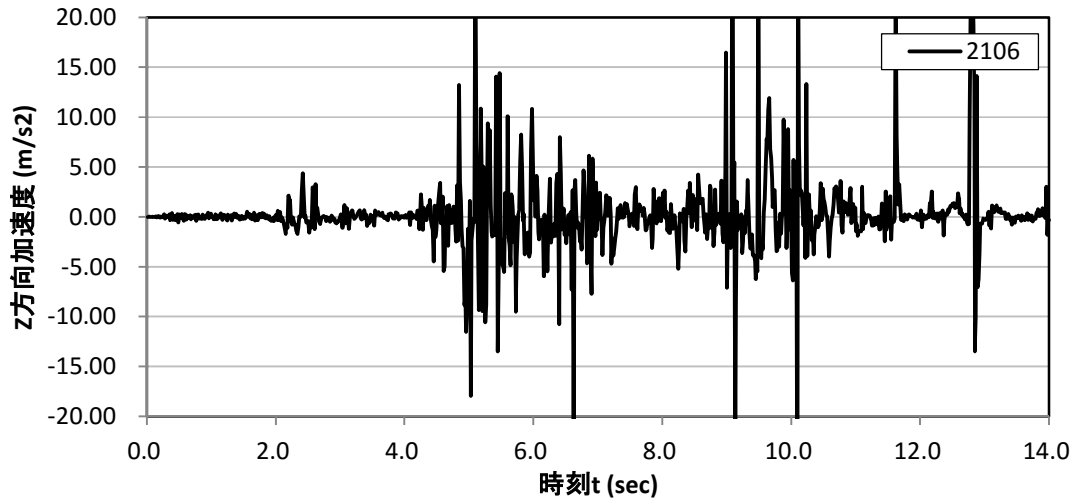


図 8. 3. 8. 3. 114 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2106、変位計 Laser01 設置位置)

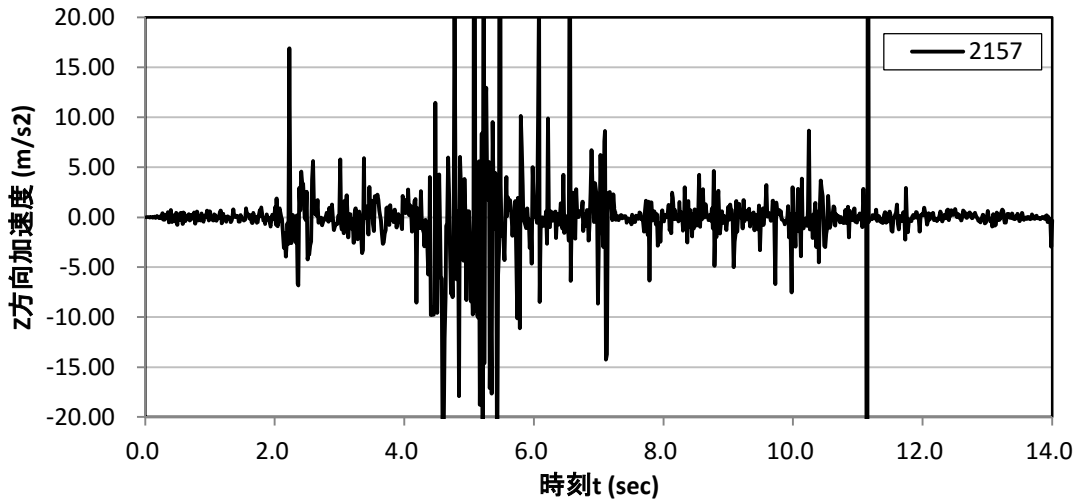


図 8. 3. 115 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2157、変位計 Laser02 設置位置)

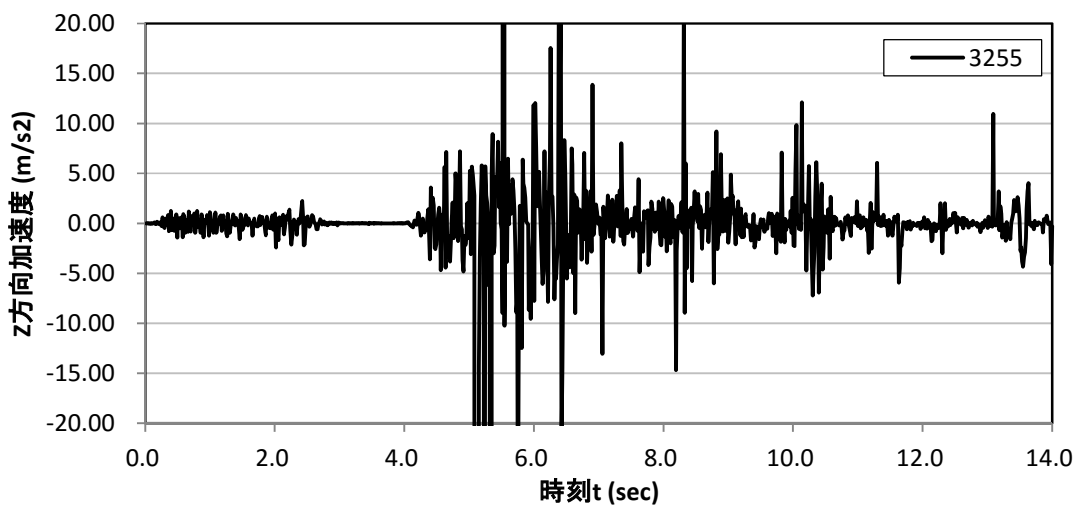


図 8. 3. 116 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 3255、変位計 Laser03 設置位置)

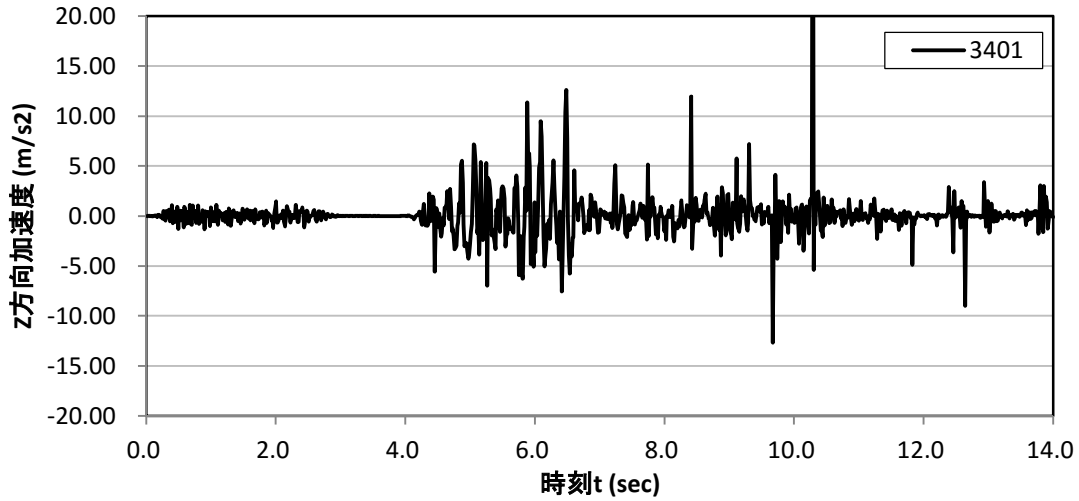


図 8.3.117 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 3401、変位計 Laser04 設置位置)

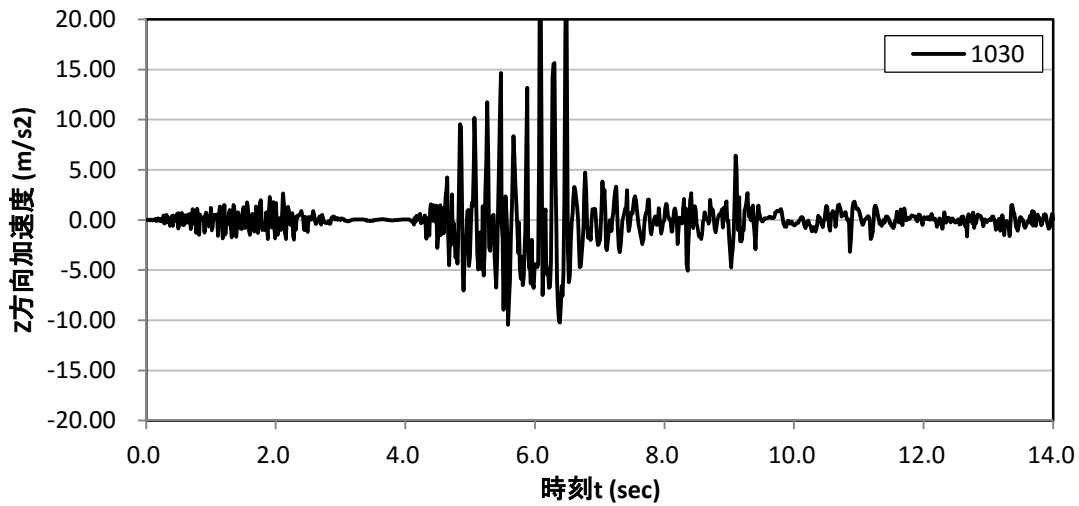


図 8.3.118 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1030、変位計 Laser05 設置位置)

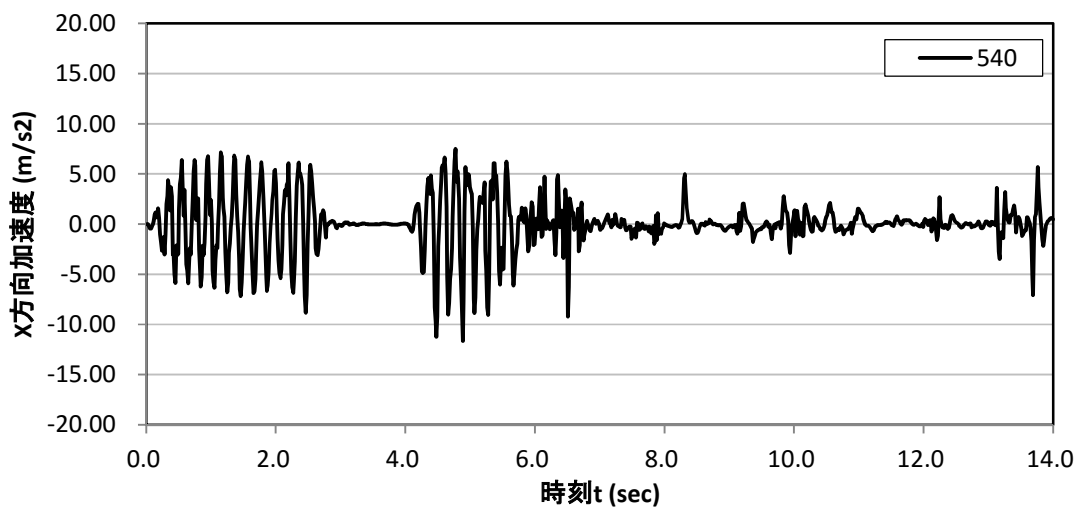


図 8.3.119 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 540、変位計 Laser06 設置位置)

8.3.8 粒子時刻歴結果 (CASE28)

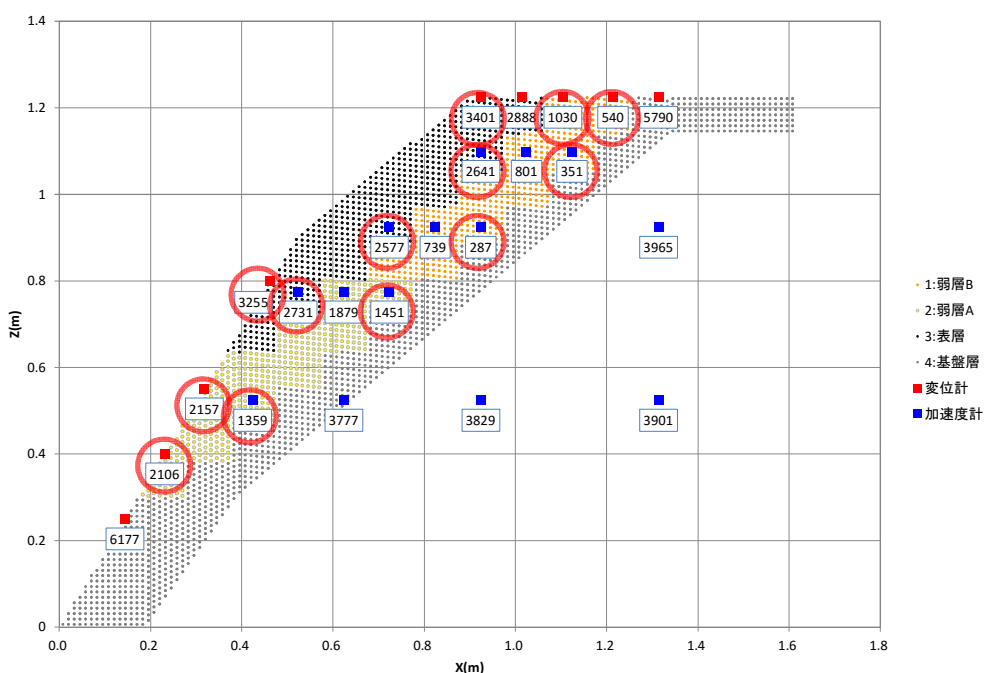


図 8.3.120 CASE28 結果出力位置 ○で囲んだ点の時刻歴結果を示す

表 8.3.2 CASE2 出力粒子一覧

項目	名称	粒子番号	X座標(m)	Z座標(m)
変位計	D01	-	0.144	0.250
変位計	D02	Laser01	0.231	0.400
変位計	D03	Laser02	0.318	0.550
変位計	D04	Laser03	0.462	0.800
変位計	D05	Laser04	0.924	1.224
変位計	D06	-	1.014	1.224
変位計	D07	Laser05	1.104	1.224
変位計	D08	Laser06	1.214	1.224
変位計	D09	-	1.314	1.224
加速度計	A01	HV	0.924	1.099
加速度計	A02	HV	1.024	1.099
加速度計	A03	HV	1.124	1.099
加速度計	A04	HV	1.314	0.924
加速度計	A05	HV	0.724	0.924
加速度計	A06	HV	0.824	0.924
加速度計	A07	HV	0.924	0.924
加速度計	A07-2	HV	0.524	0.774
加速度計	A08	HV	0.624	0.774
加速度計	A09	HV	0.724	0.774
加速度計	A10	HV	0.424	0.524
加速度計	A11	HV	0.624	0.524
加速度計	A12	HV	0.924	0.524
加速度計	A13	HV	1.314	0.524

(1) 加速度計位置における水平方向変位時刻歴

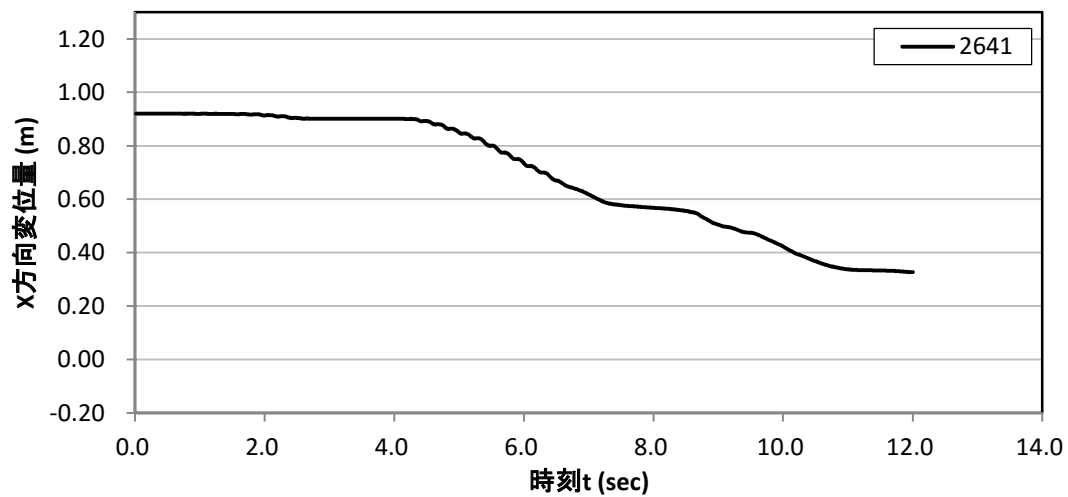


図 8. 3. 121 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2641、加速度計 A01 設置位置)

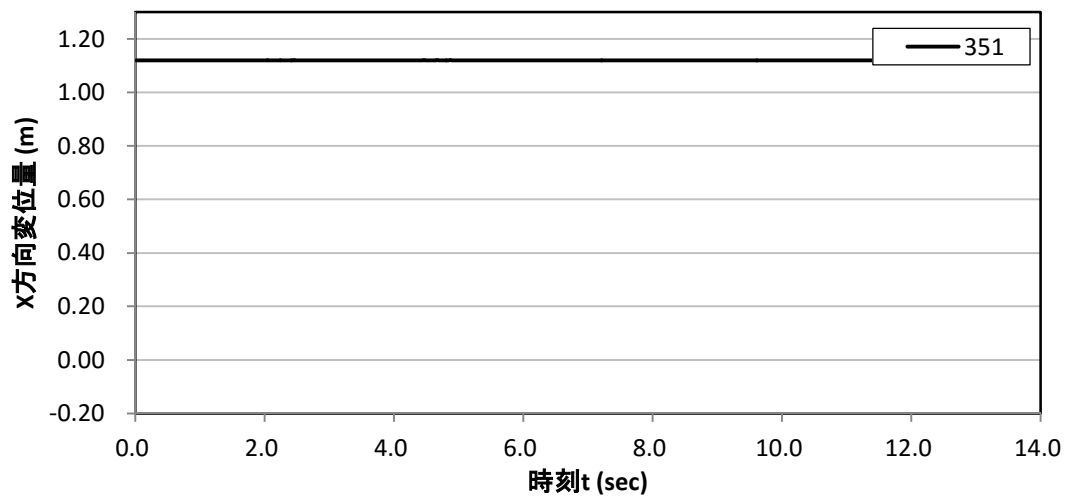


図 8. 3. 122 水平方向変位時刻歴(粒子番号 351、加速度計 A03 設置位置)

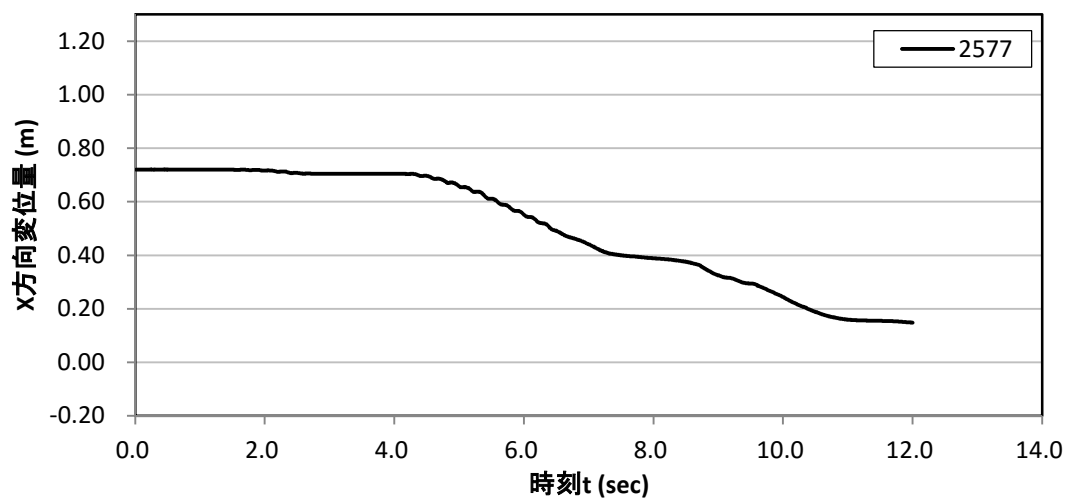


図 8. 3. 123 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2577、加速度計 A05 設置位置)

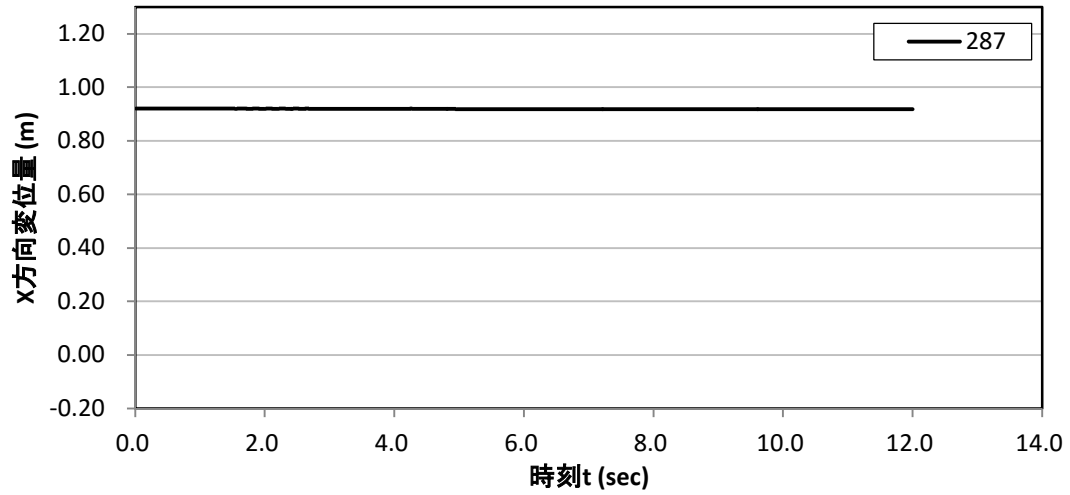


図 8. 3. 124 水平方向変位時刻歴(粒子番号 287、加速度計 A07 設置位置)

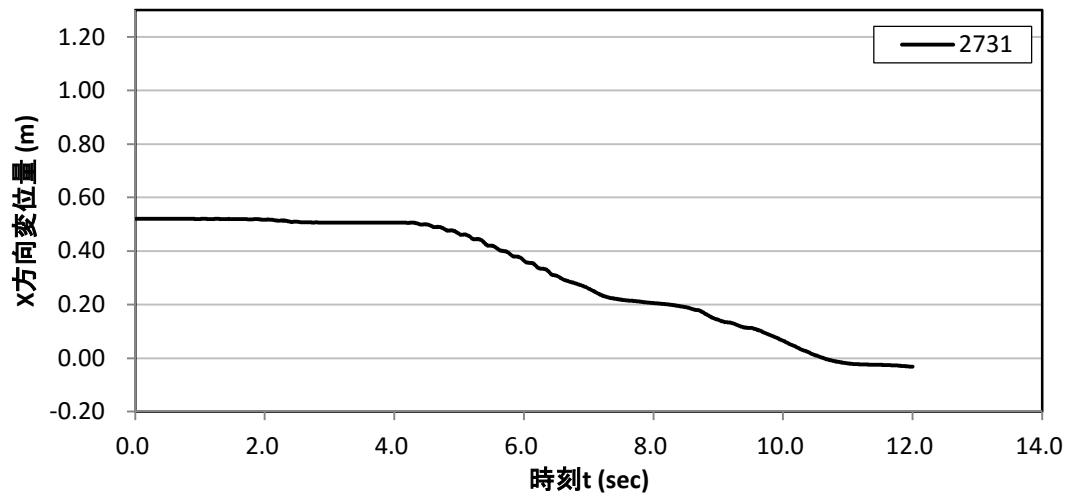


図 8. 3. 125 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2731、加速度計 A07-2 設置位置)

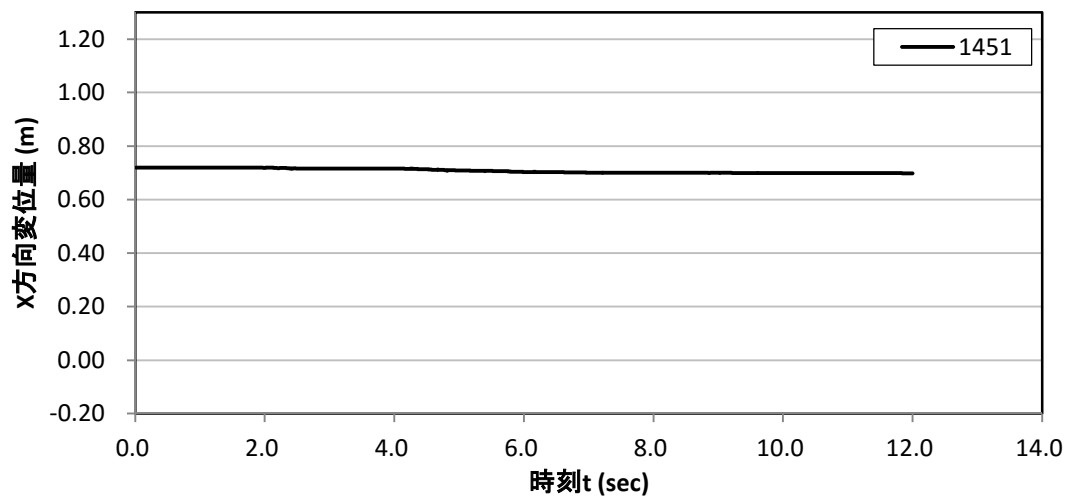


図 8. 3. 126 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1451、加速度計 A09 設置位置)

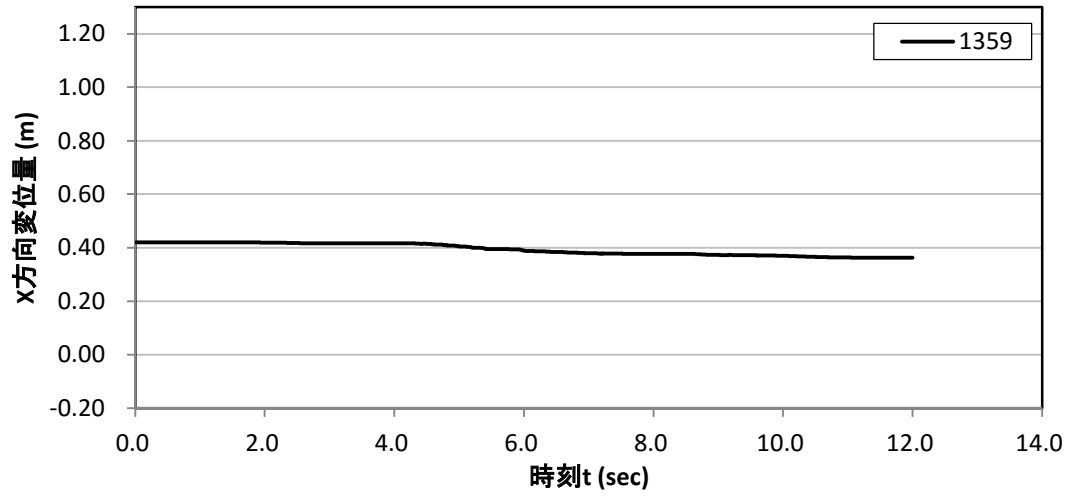


図 8. 3. 127 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1359、加速度計 A10 設置位置)

(2) 加速度計位置における鉛直方向変位時刻歴

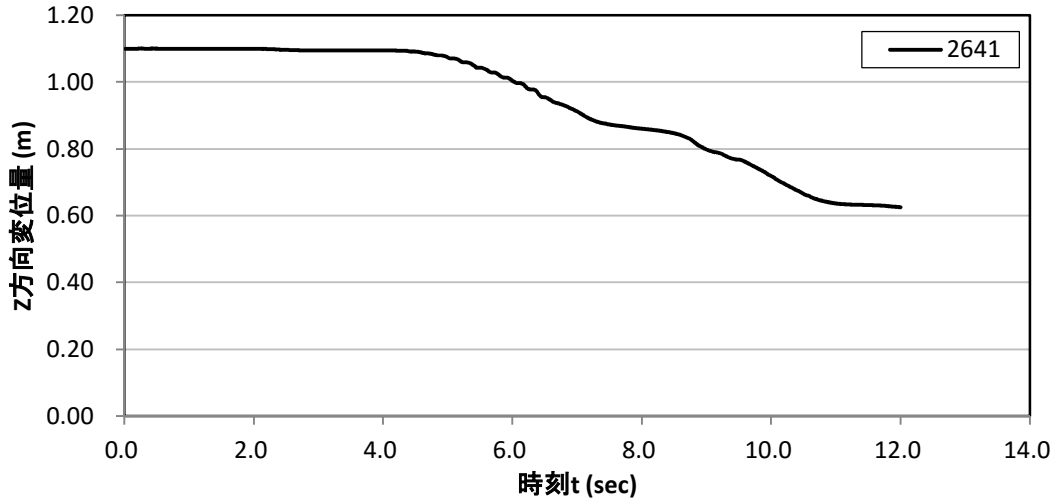


図 8.3.128 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2641、加速度計 A01 設置位置)

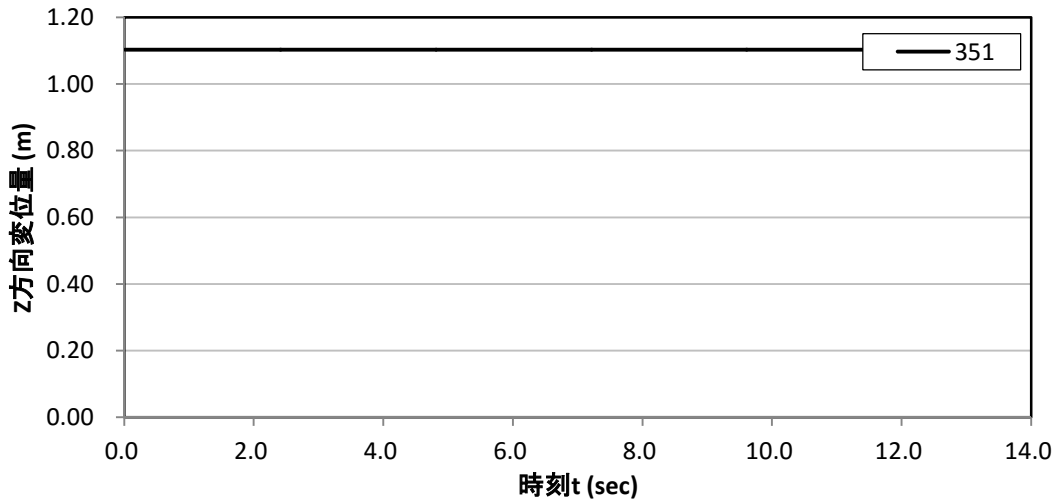


図 8.3.129 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 351、加速度計 A03 設置位置)

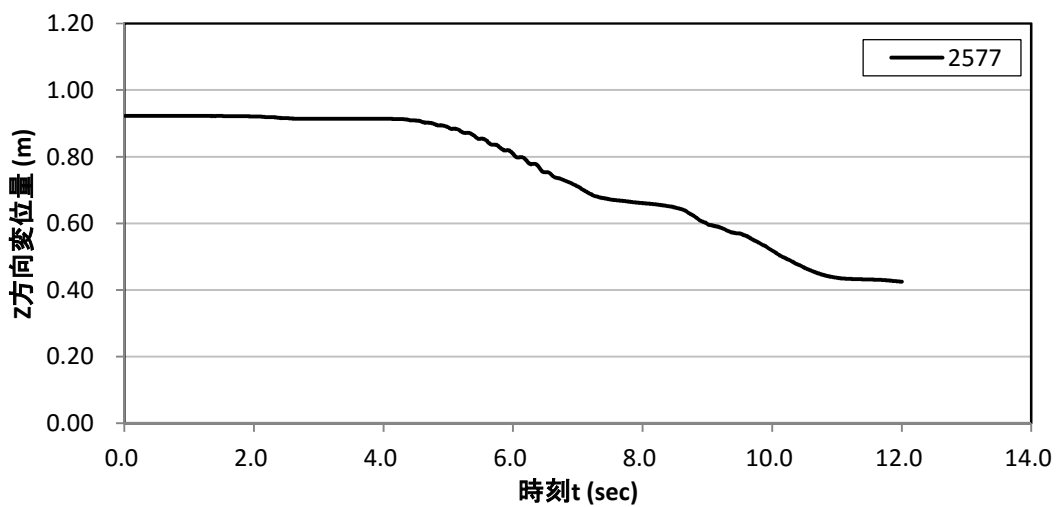


図 8.3.130 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2577、加速度計 A05 設置位置)

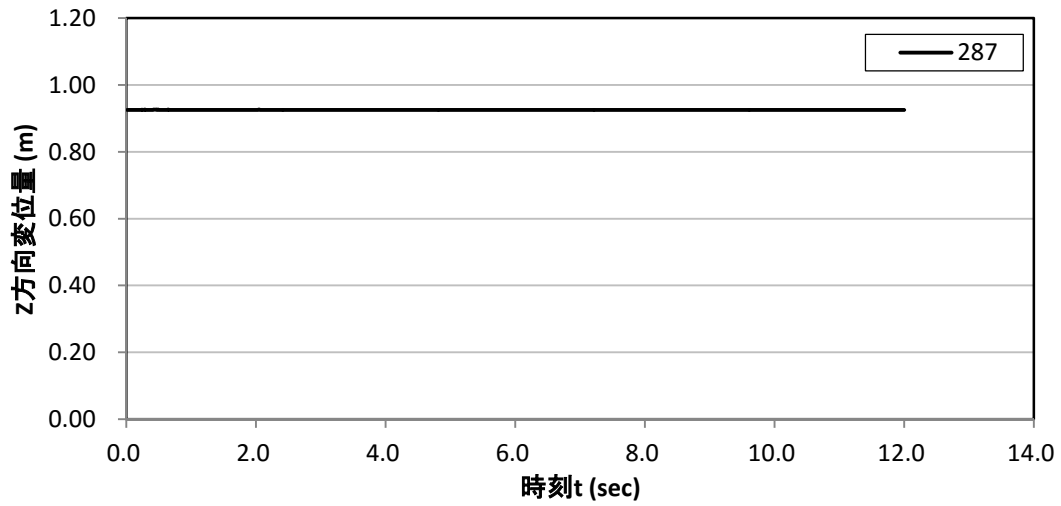


図 8. 3. 131 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 287、加速度計 A07 設置位置)

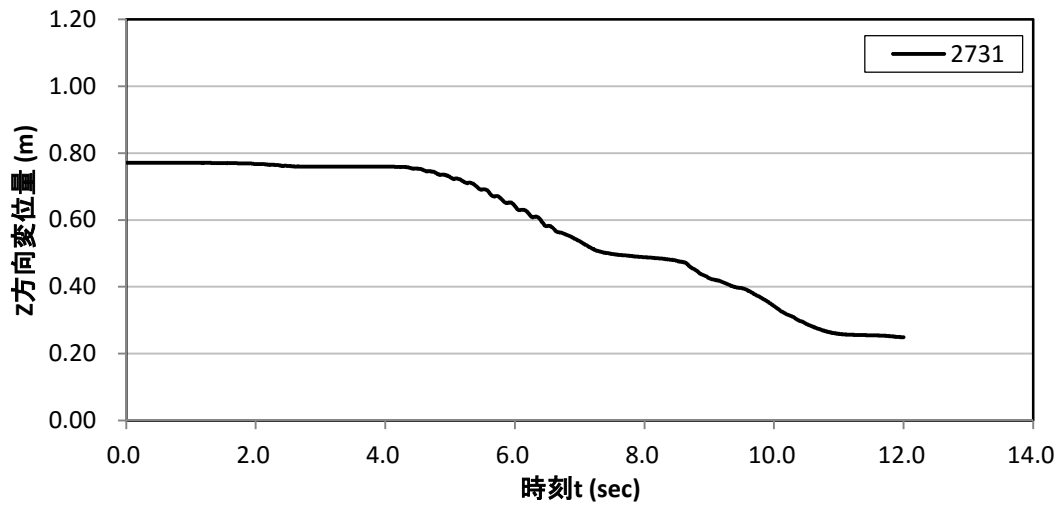


図 8. 3. 132 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2731、加速度計 A07-02 設置位置)

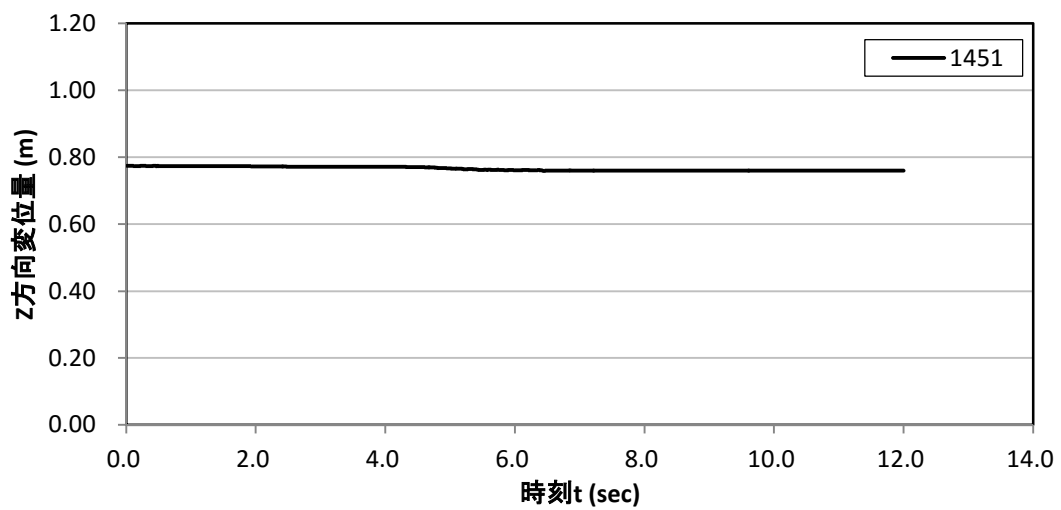


図 8. 3. 133 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 1451、加速度計 A09 設置位置)

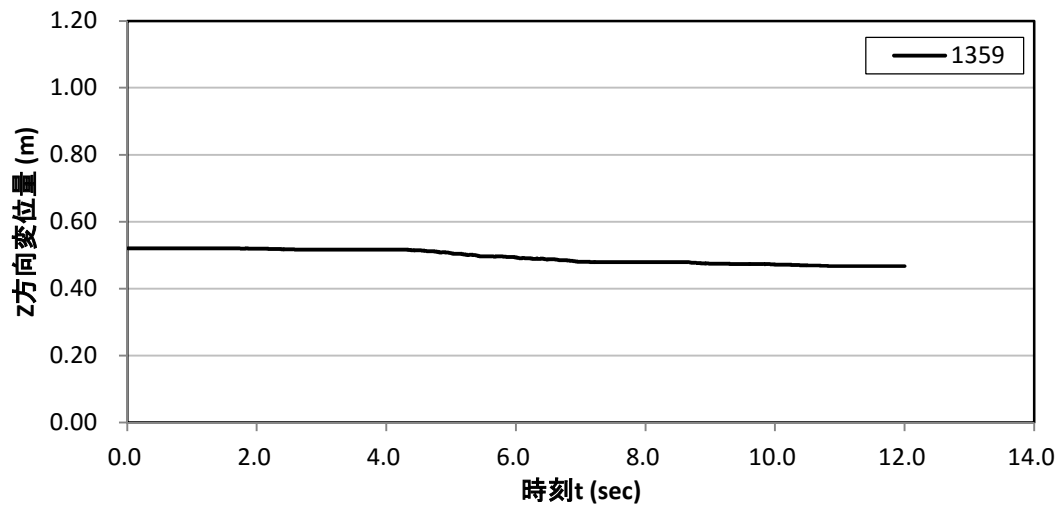


図 8. 3. 134 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 1359、加速度計 A10 設置位置)

(3) 加速度計位置における水平方向加速度時刻歴

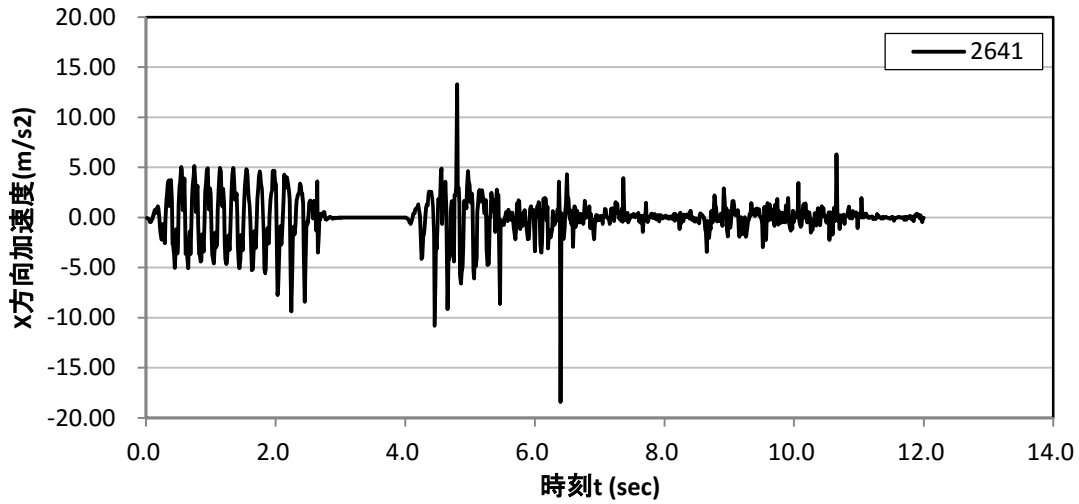


図 8. 3. 135 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2641、加速度計 A01 設置位置)

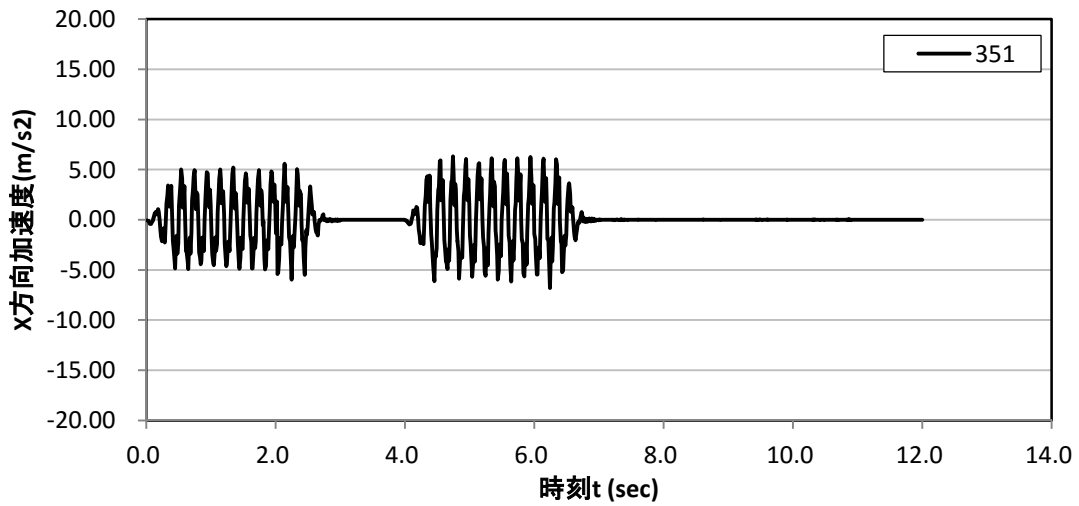


図 8. 3. 136 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 351、加速度計 A03 設置位置)

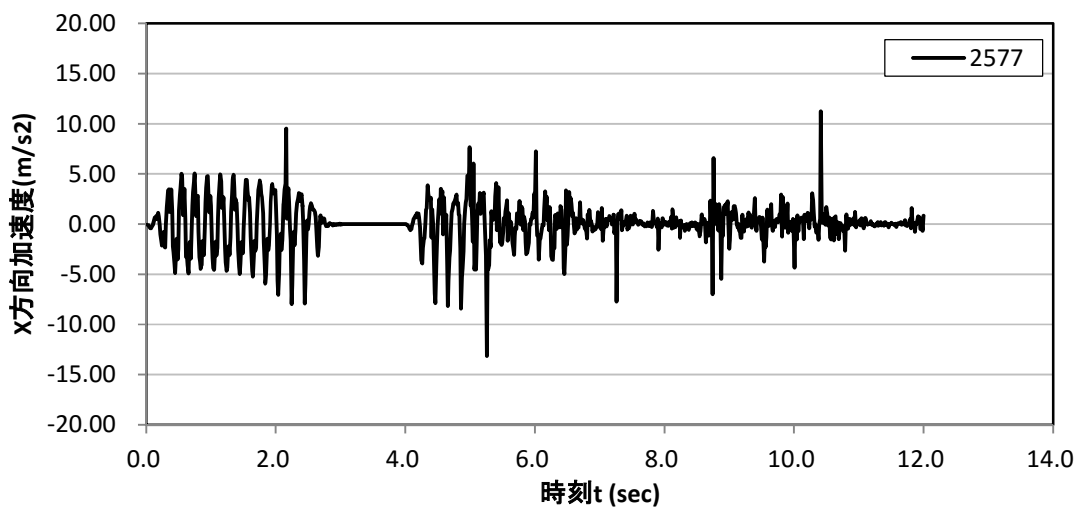


図 8. 3. 137 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2577、加速度計 A05 設置位置)

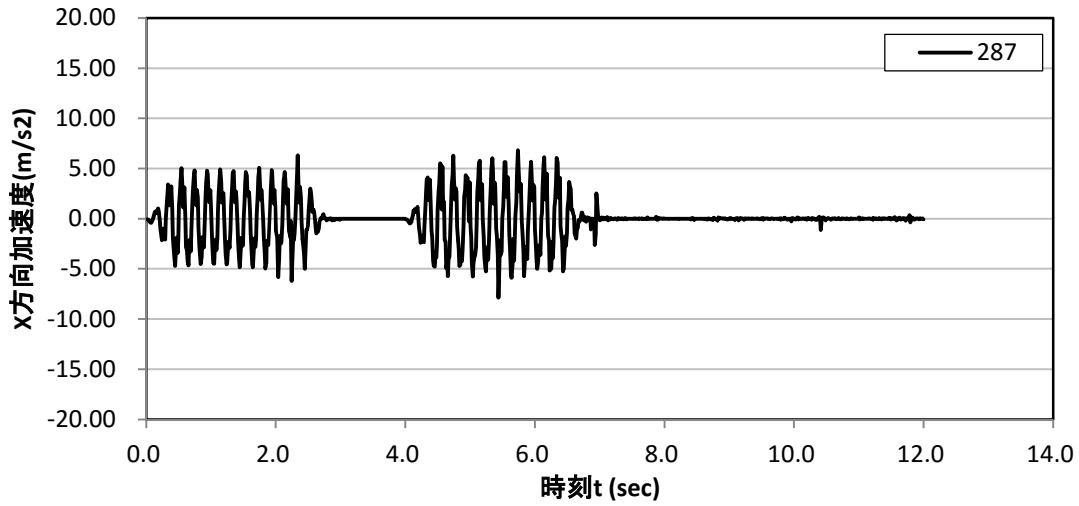


図 8.3.138 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 287、加速度計 A07 設置位置)

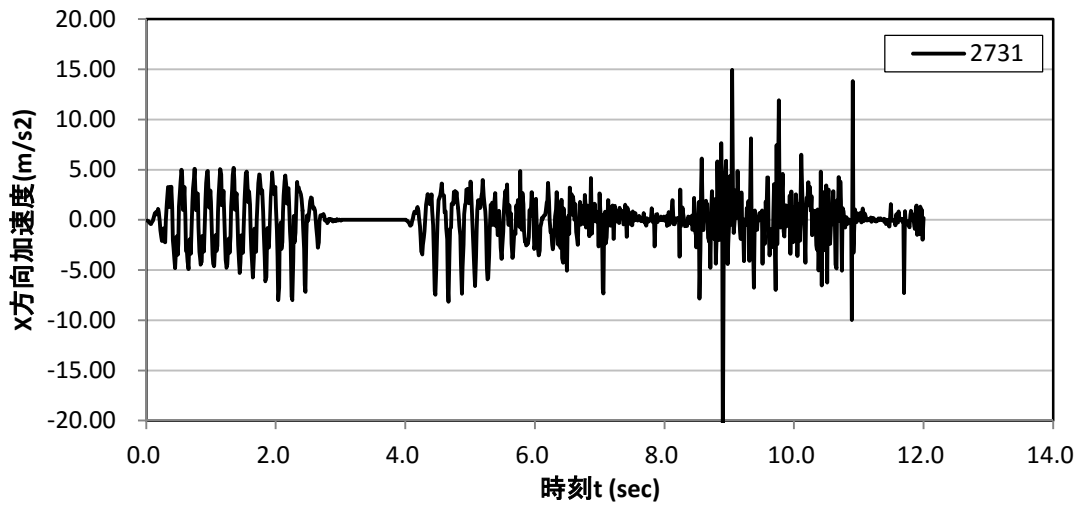


図 8.3.139 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2731、加速度計 A07-2 設置位置)

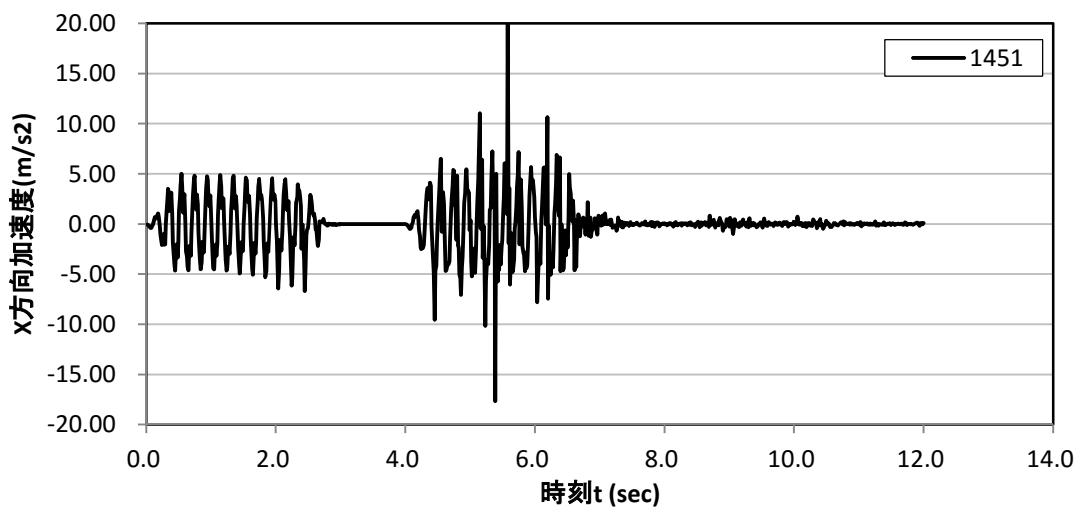


図 8.3.140 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1451、加速度計 A09 設置位置)

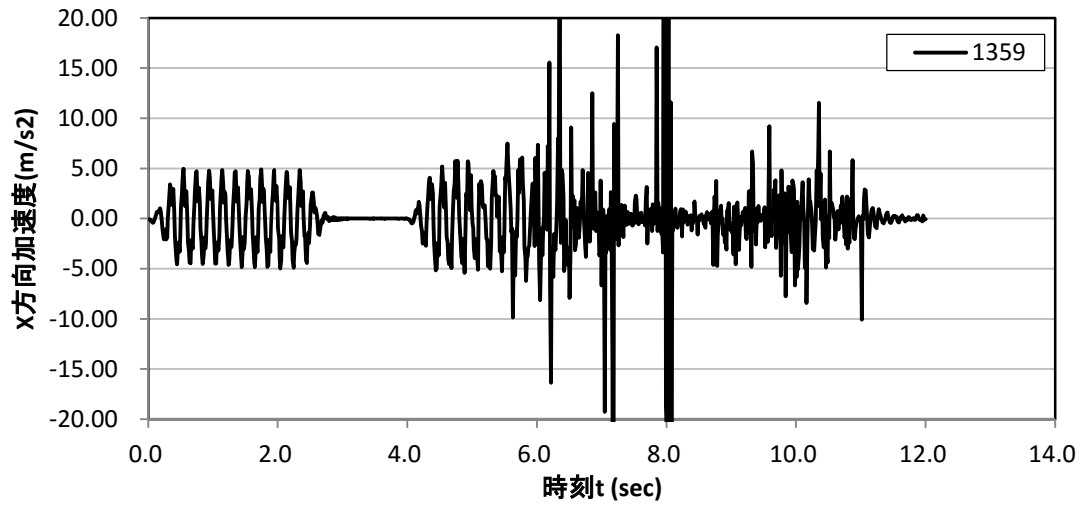


図 8.3.141 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1359、加速度計 A10 設置位置)

(4) 加速度計位置における鉛直方向加速度時刻歴

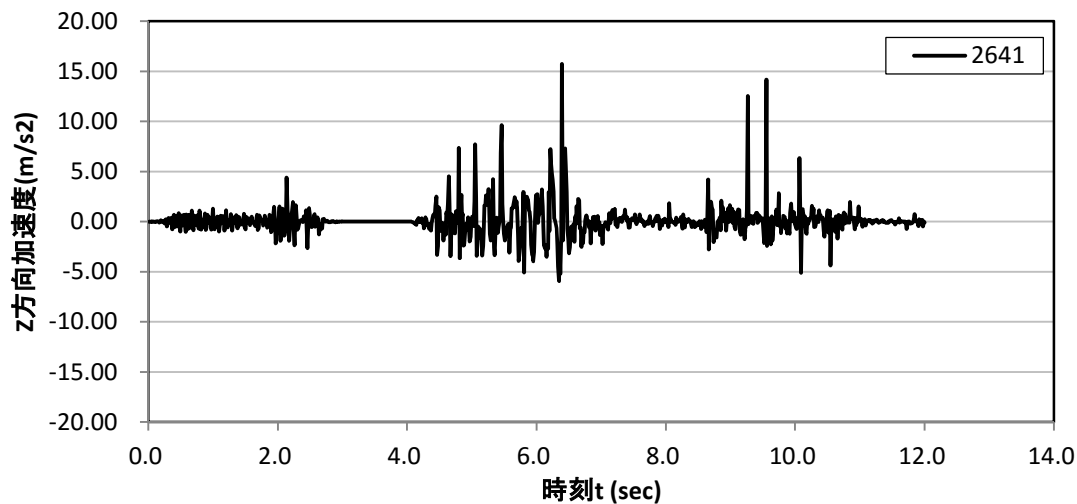


図 8.3.142 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2641、加速度計 A01 設置位置)

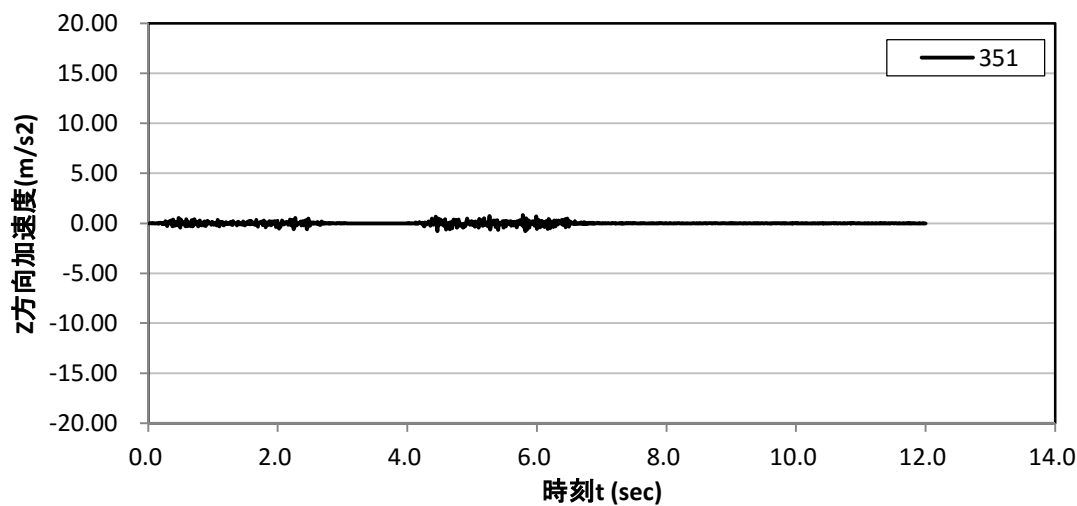


図 8.3.143 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 351、加速度計 A03 設置位置)

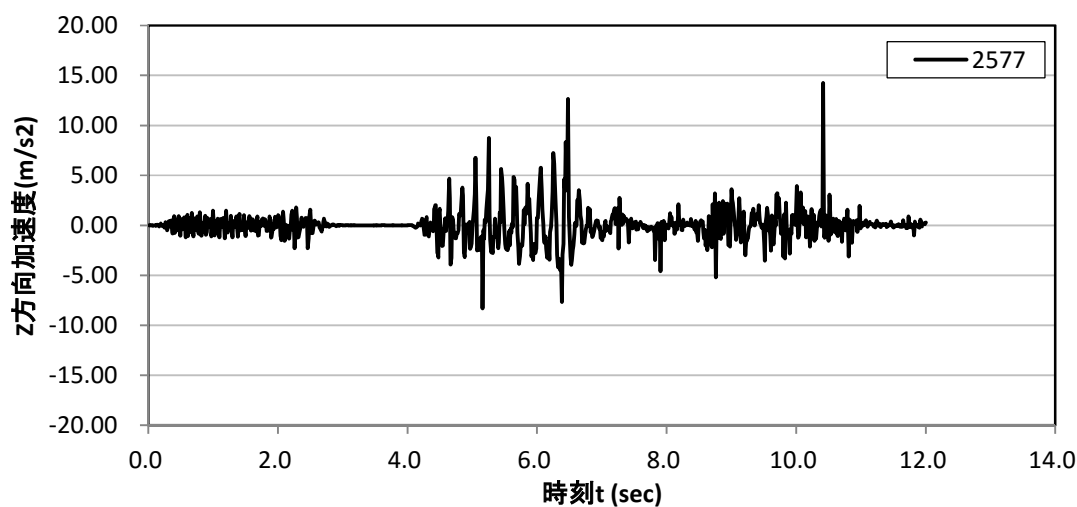


図 8.3.144 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2577、加速度計 A05 設置位置)

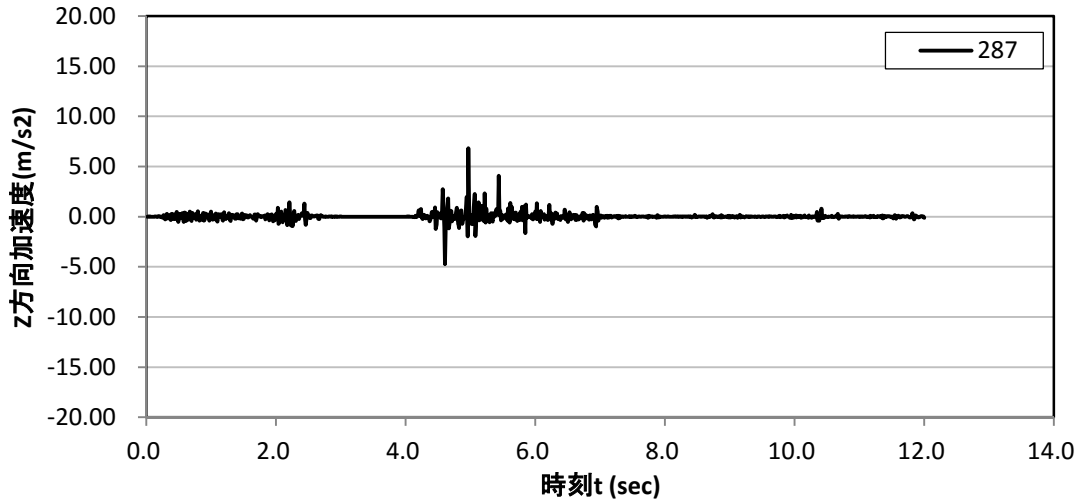


図 8.3.145 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 287、加速度計 A07 設置位置)

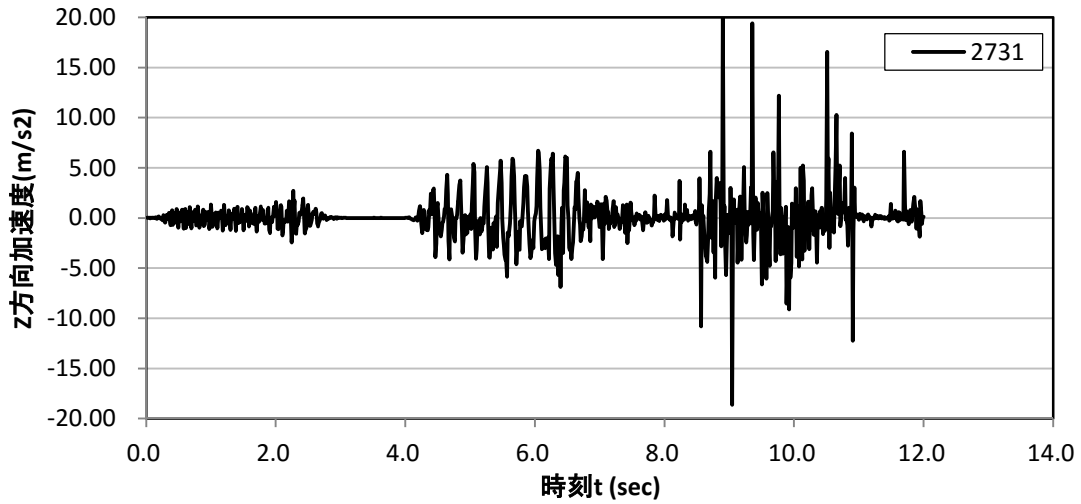


図 8.3.146 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2731、加速度計 A07-2 設置位置)

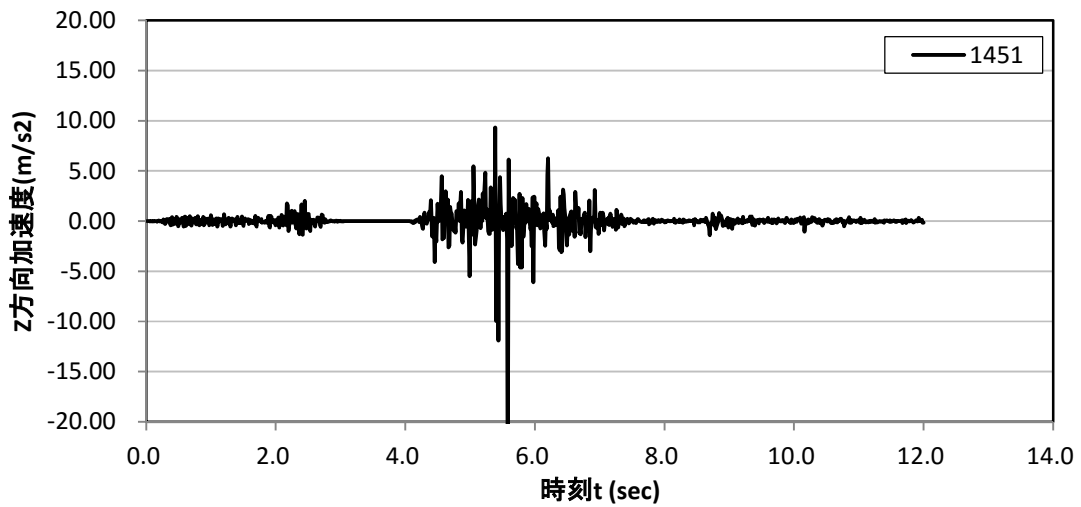


図 8.3.147 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1451、加速度計 A09 設置位置)

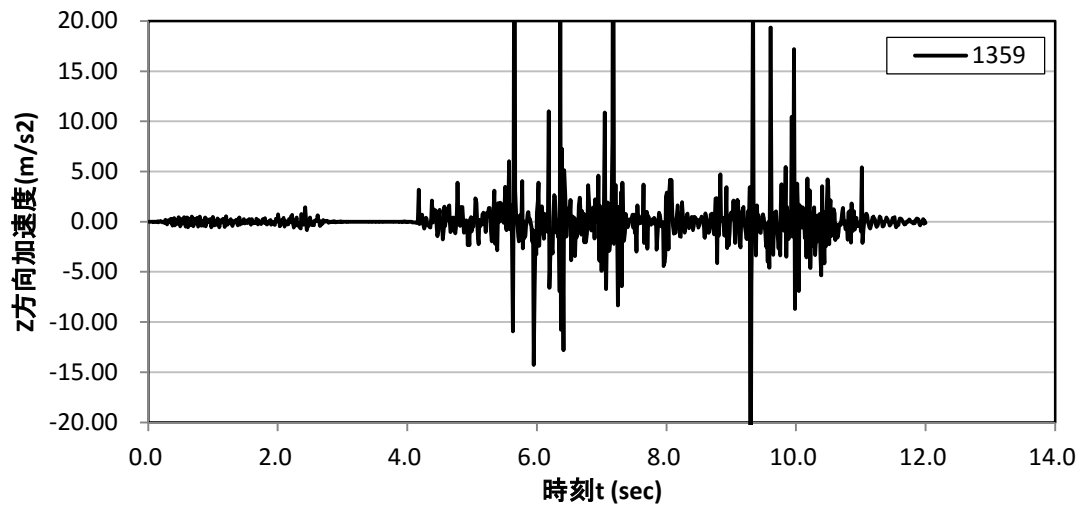


図 8. 3. 148 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1359、加速度計 A10 設置位置)

(5) 変位計位置における水平方向変位時刻歴

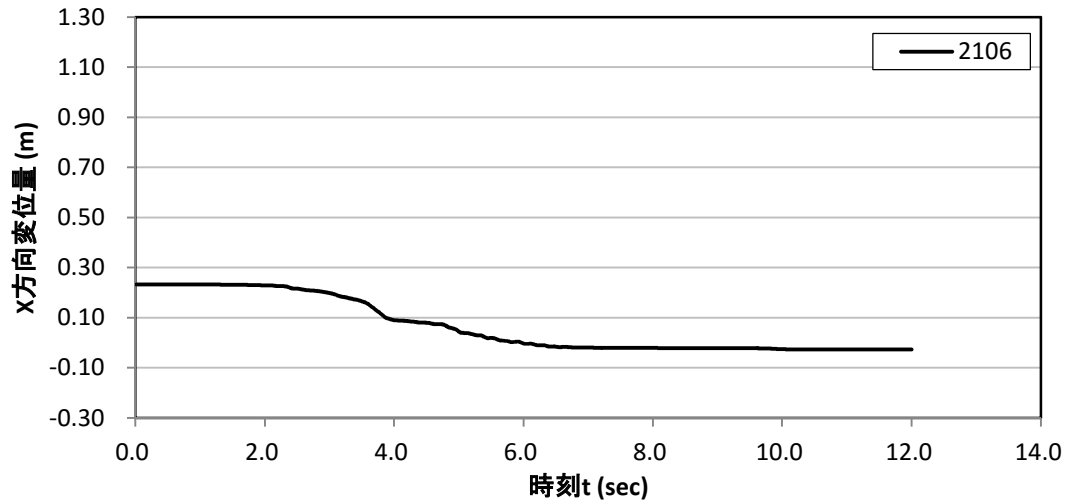


図 8. 3. 149 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2106、変位計 Laser01 設置位置)

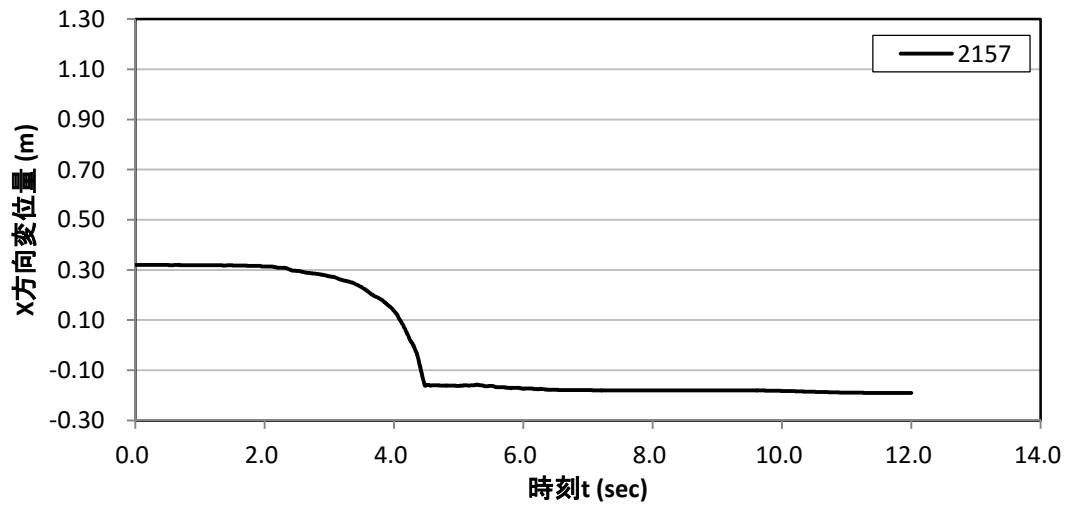


図 8. 3. 150 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2157、変位計 Laser02 設置位置)

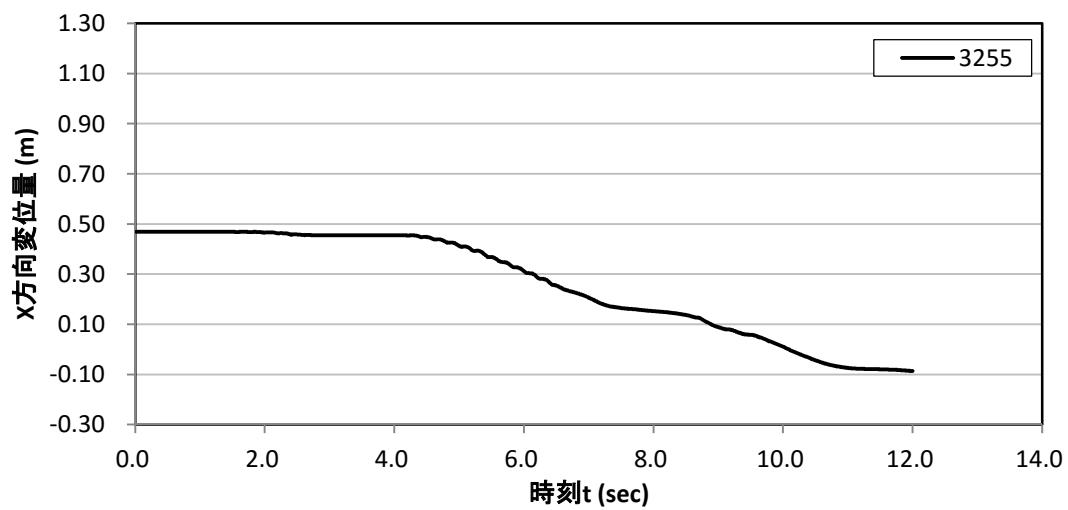


図 8. 3. 151 水平方向変位時刻歴(粒子番号 3255、変位計 Laser03 設置位置)

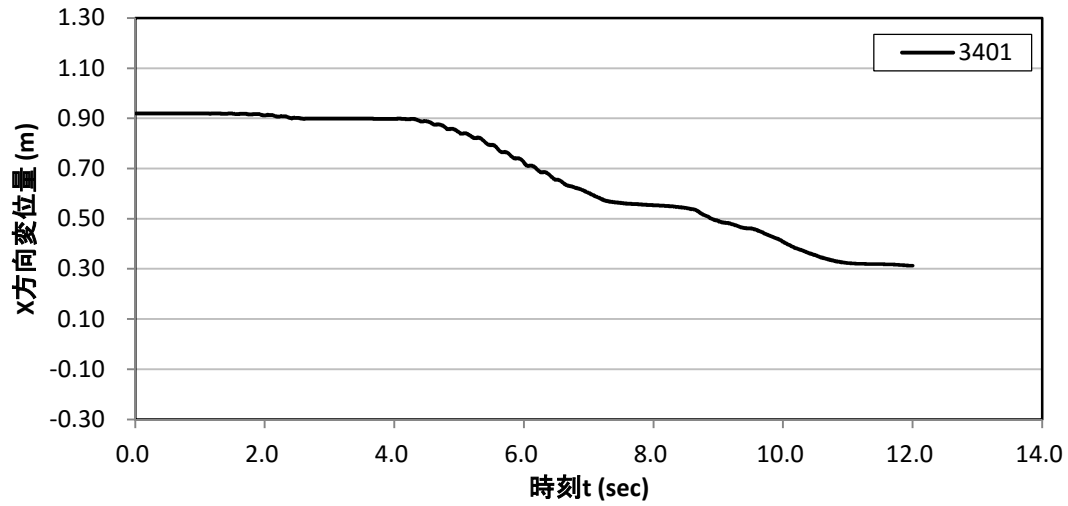


図 8. 3. 152 水平方向変位時刻歴(粒子番号 3401、変位計 Laser04 設置位置)

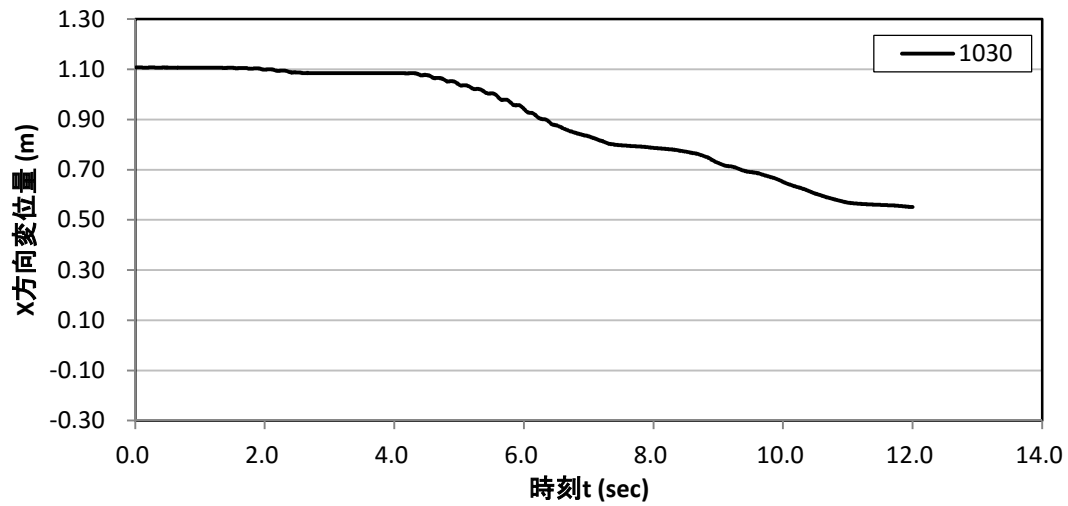


図 8. 3. 153 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1030、変位計 Laser05 設置位置)

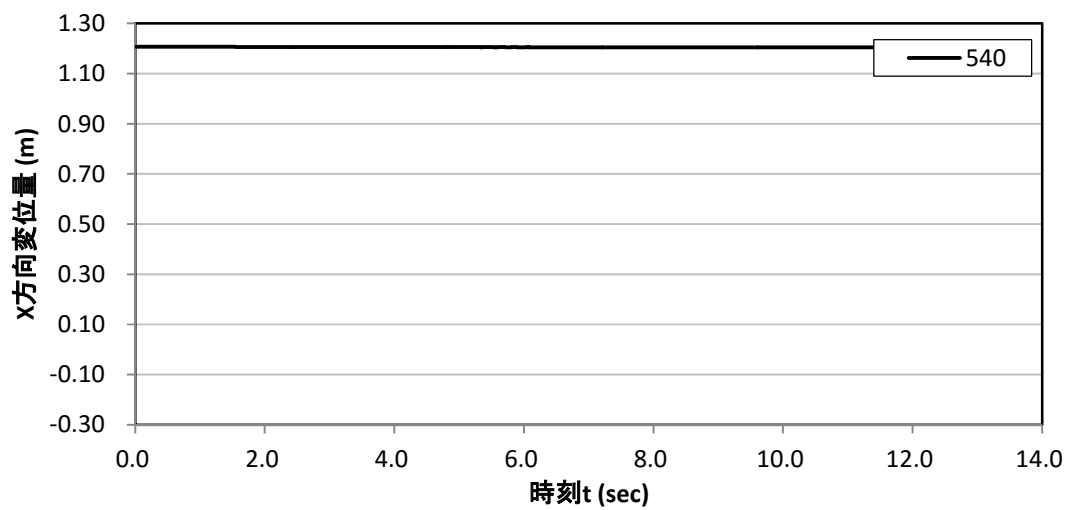


図 8. 3. 154 水平方向変位時刻歴(粒子番号 540、変位計 Laser06 設置位置)

(6) 変位計位置における鉛直方向変位時刻歴

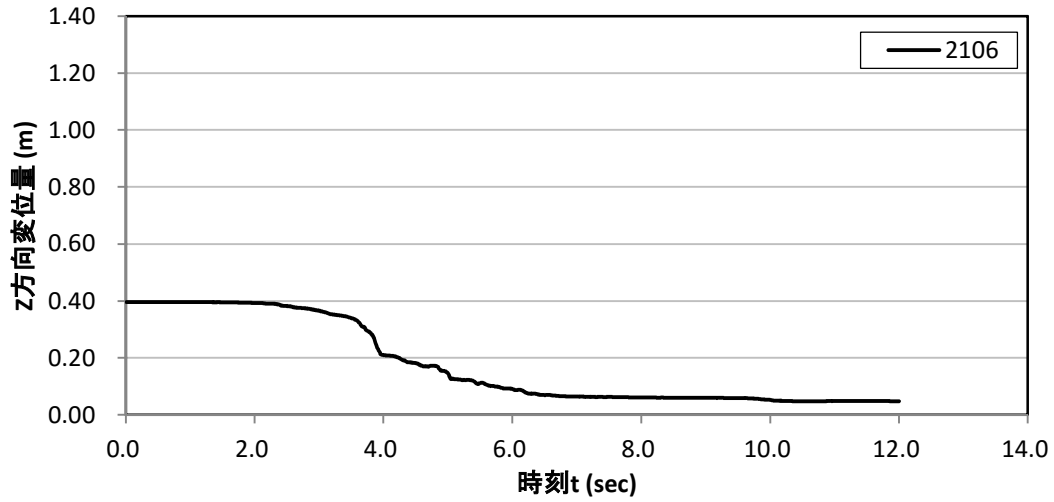


図 8. 3. 155 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2106、変位計 Laser01 設置位置)

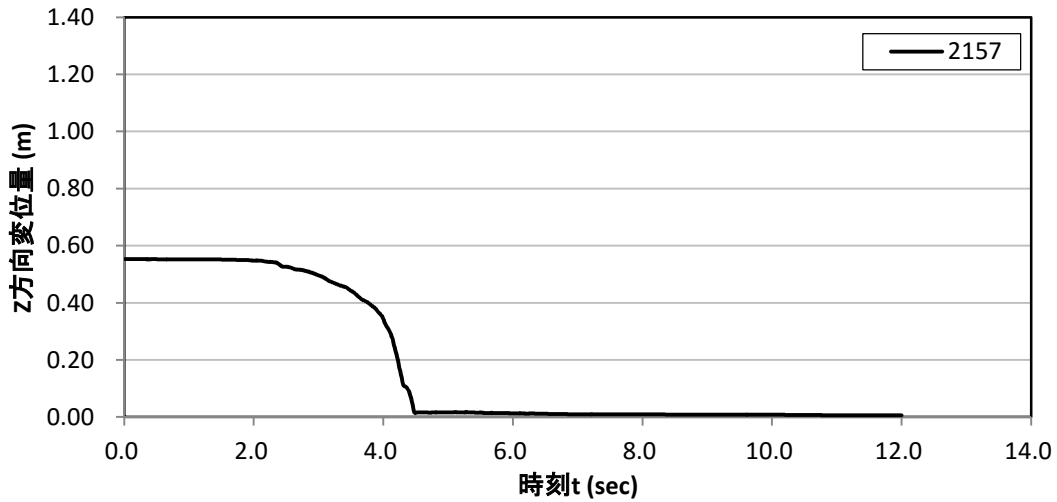


図 8. 3. 156 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2157、変位計 Laser02 設置位置)

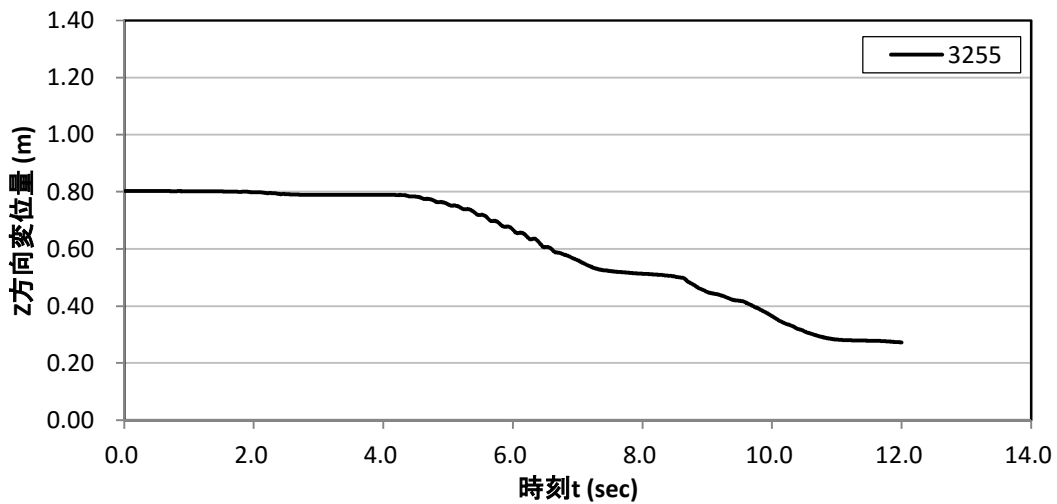


図 8. 3. 157 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 3255、変位計 Laser03 設置位置)

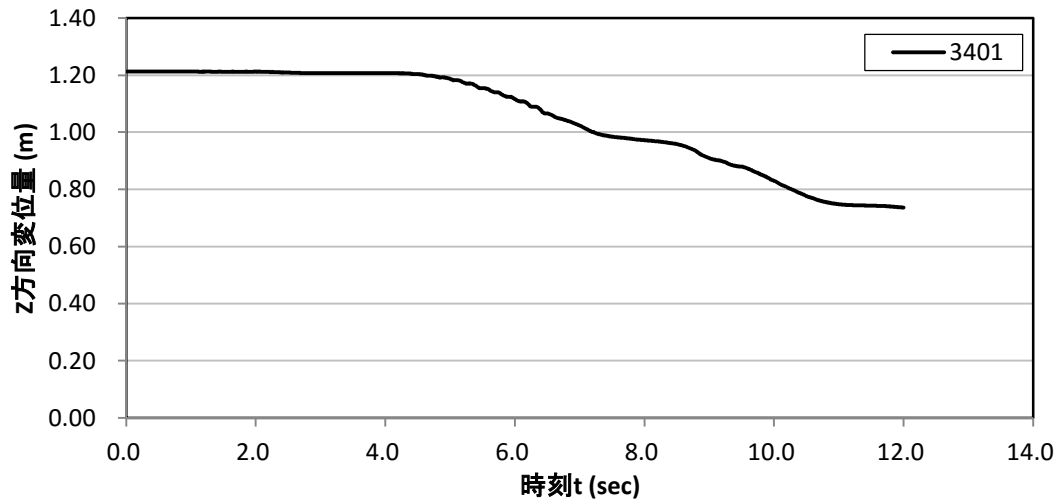


図 8. 3. 158 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 3401、変位計 Laser04 設置位置)

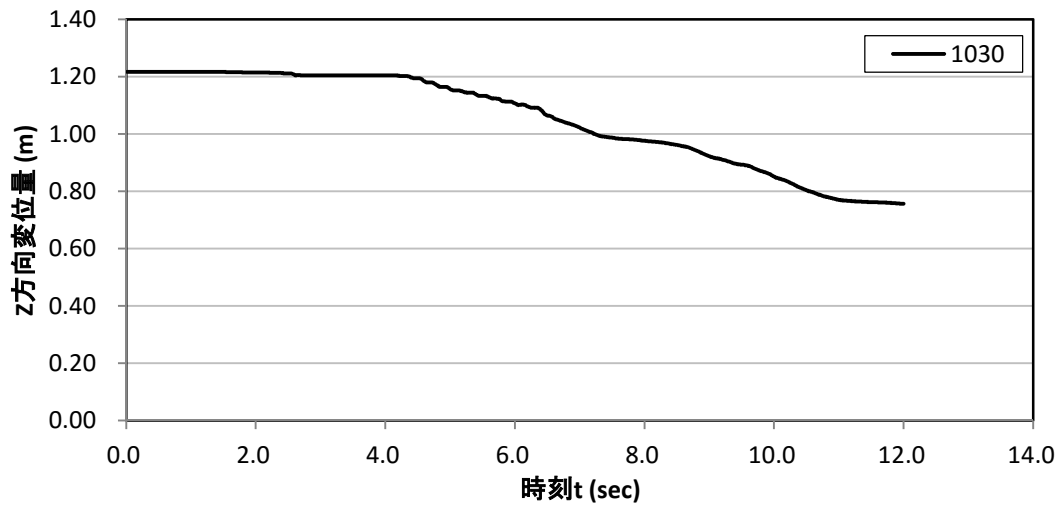


図 8. 3. 159 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 1030、変位計 Laser05 設置位置)

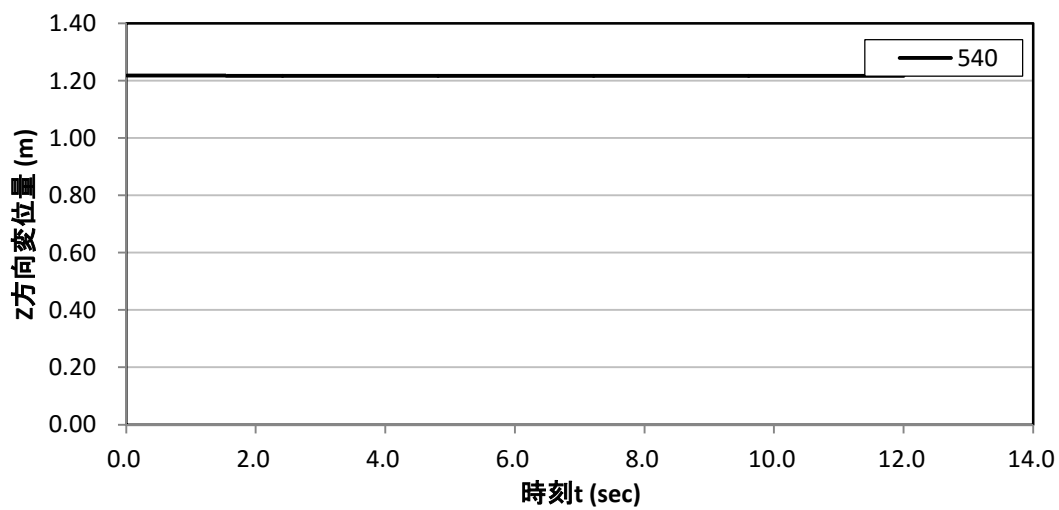


図 8. 3. 160 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 540、変位計 Laser06 設置位置)

(7) 変位計位置における水平方向加速度時刻歴

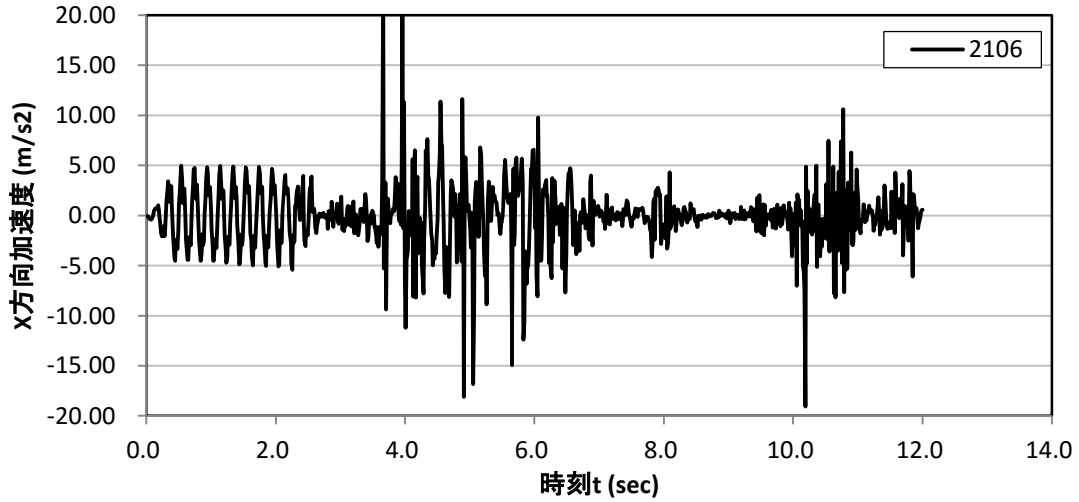


図 8.3.161 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2106、変位計 Laser01 設置位置)

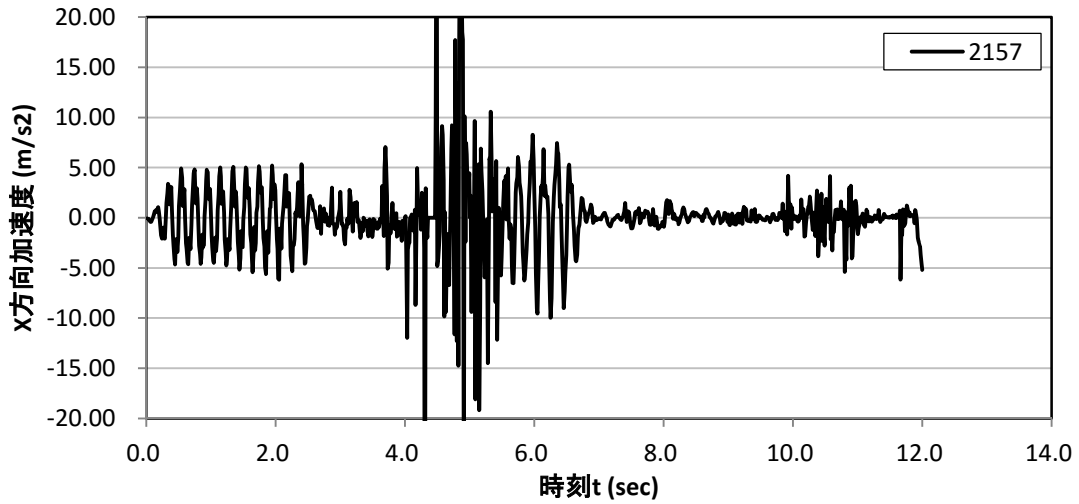


図 8.3.162 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2157、変位計 Laser02 設置位置)

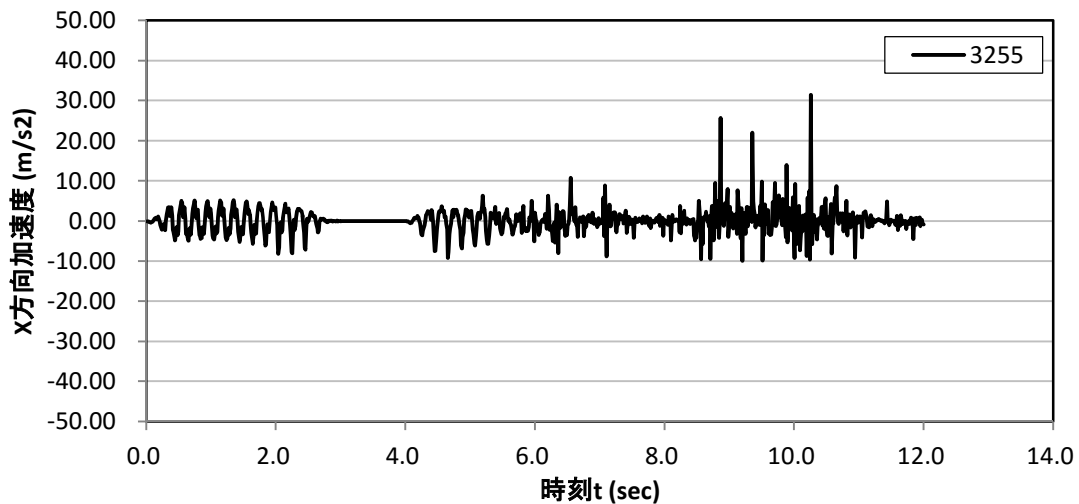


図 8.3.163 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 3255、変位計 Laser03 設置位置)

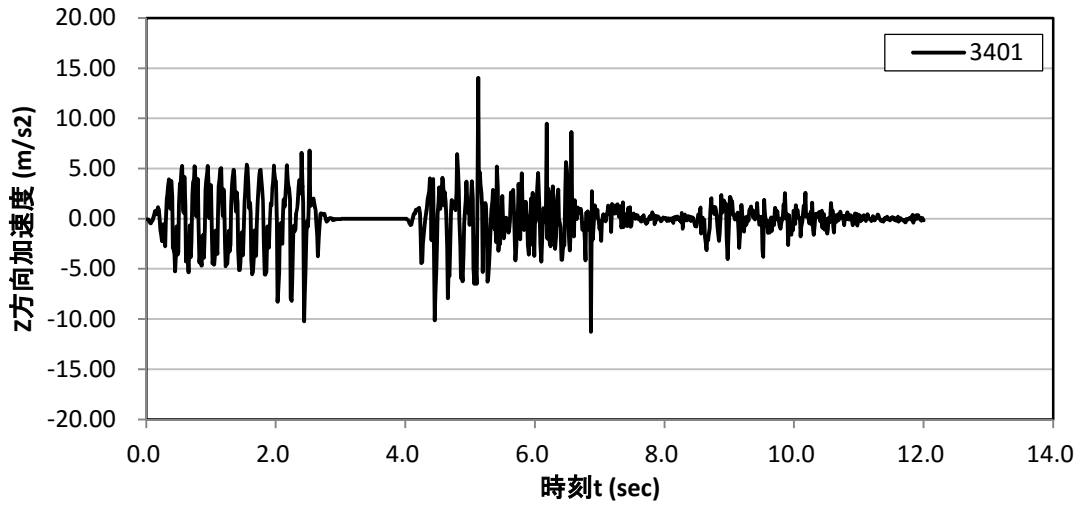


図 8.3.164 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 3401、変位計 Laser04 設置位置)

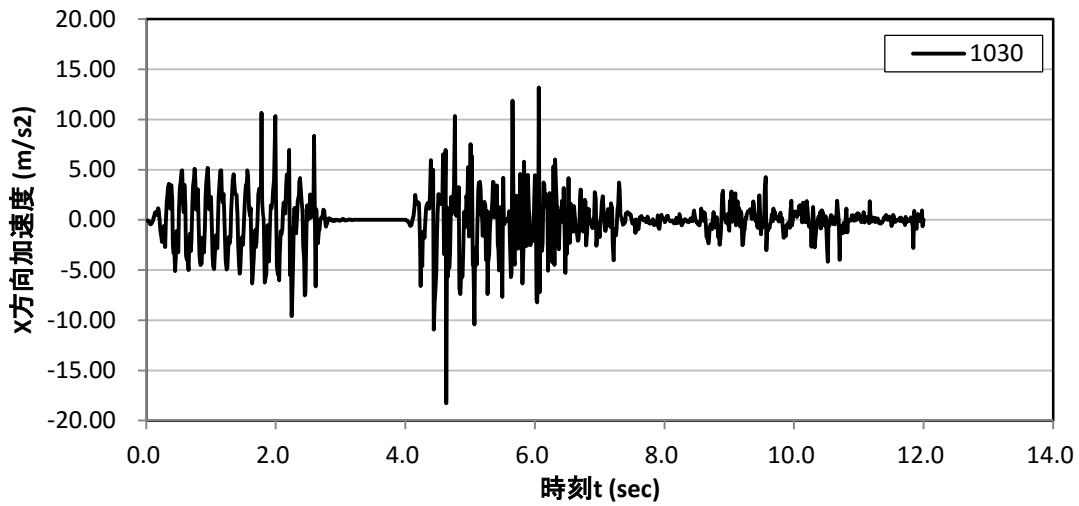


図 8.3.165 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1030、変位計 Laser05 設置位置)

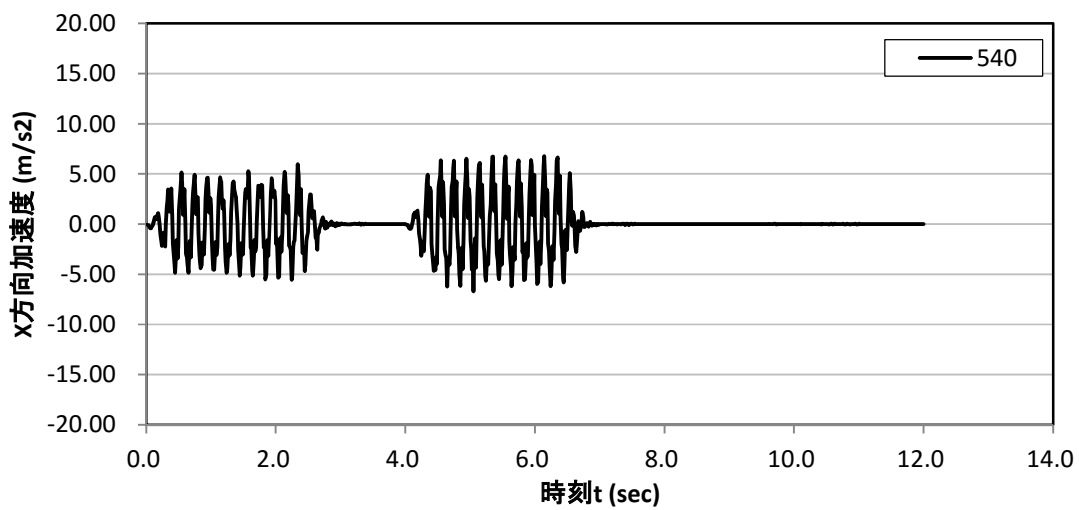


図 8.3.166 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 540、変位計 Laser06 設置位置)

(8) 変位計位置における鉛直方向加速度時刻歴

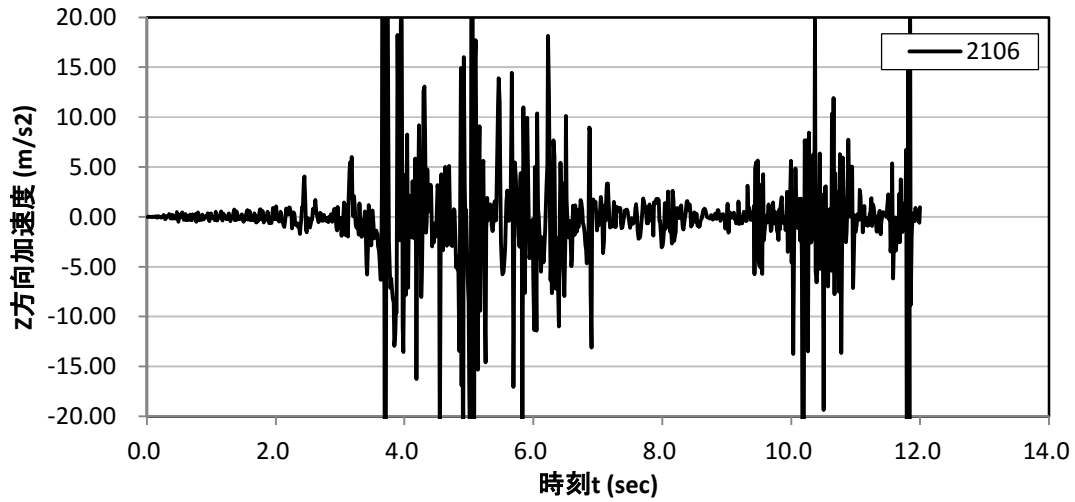


図 8.3.167 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2106、変位計 Laser01 設置位置)

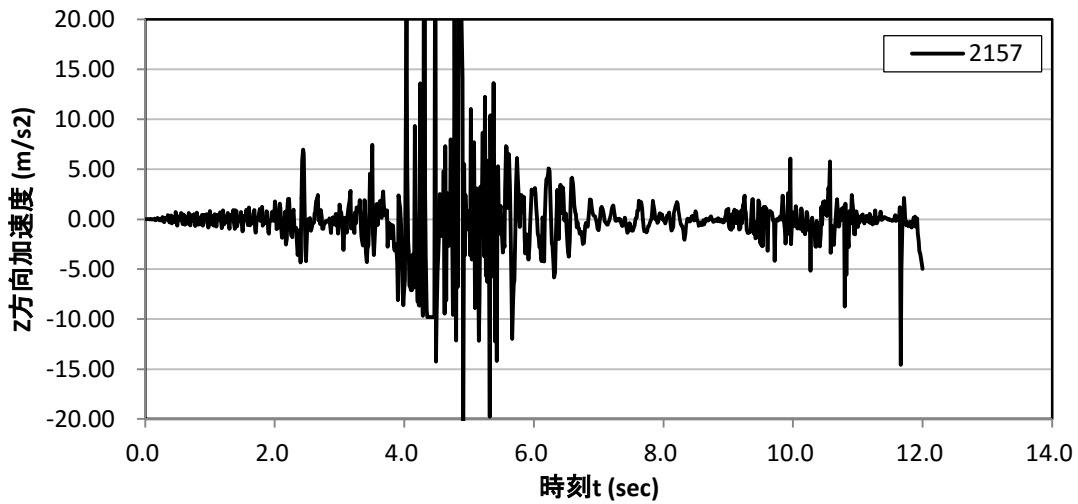


図 8.3.168 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2157、変位計 Laser02 設置位置)

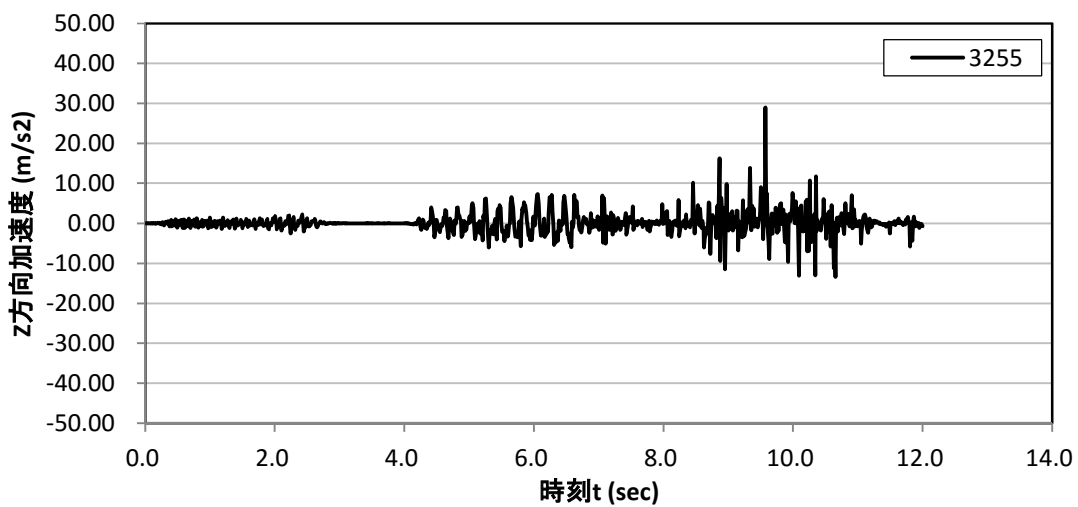


図 8.3.169 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 3255、変位計 Laser03 設置位置)

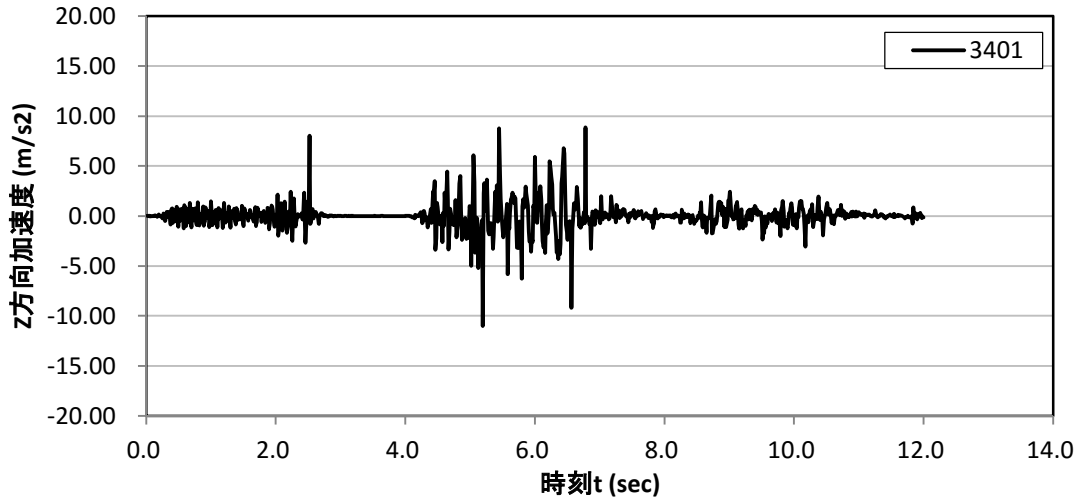


図 8.3.170 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 3401、変位計 Laser04 設置位置)

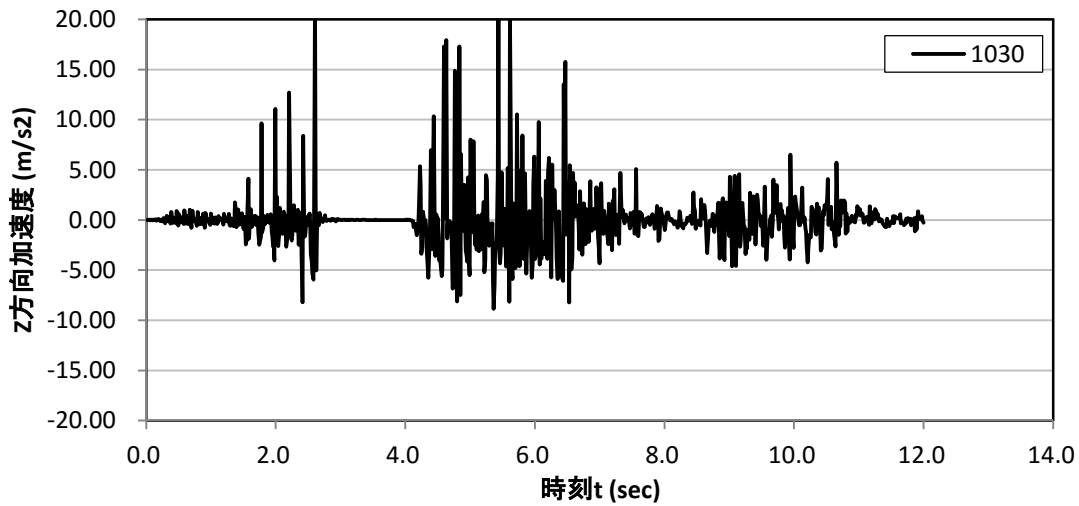


図 8.3.171 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1030、変位計 Laser05 設置位置)

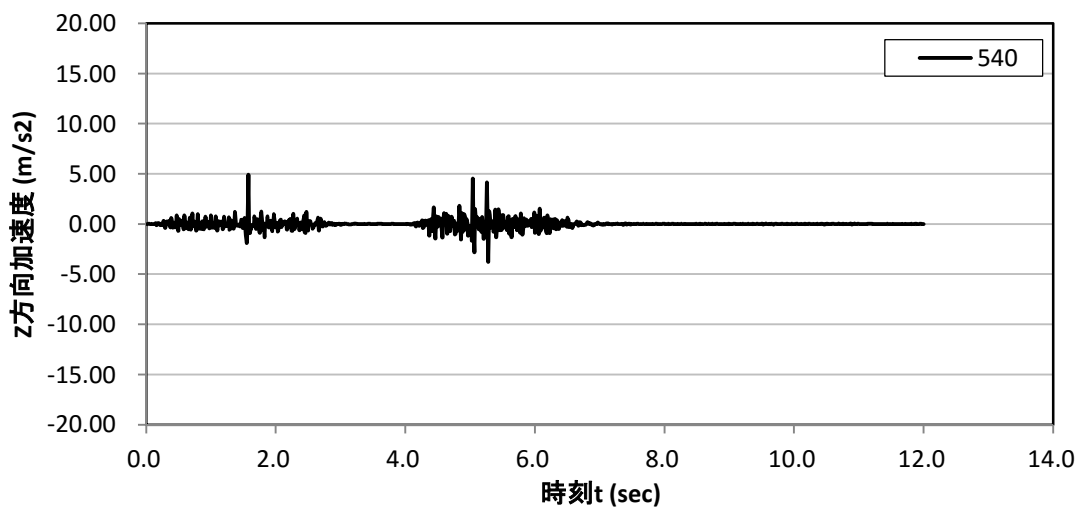


図 8.3.172 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 540、変位計 Laser06 設置位置)

8.3.9 粒子時刻歴結果 (CASE29)

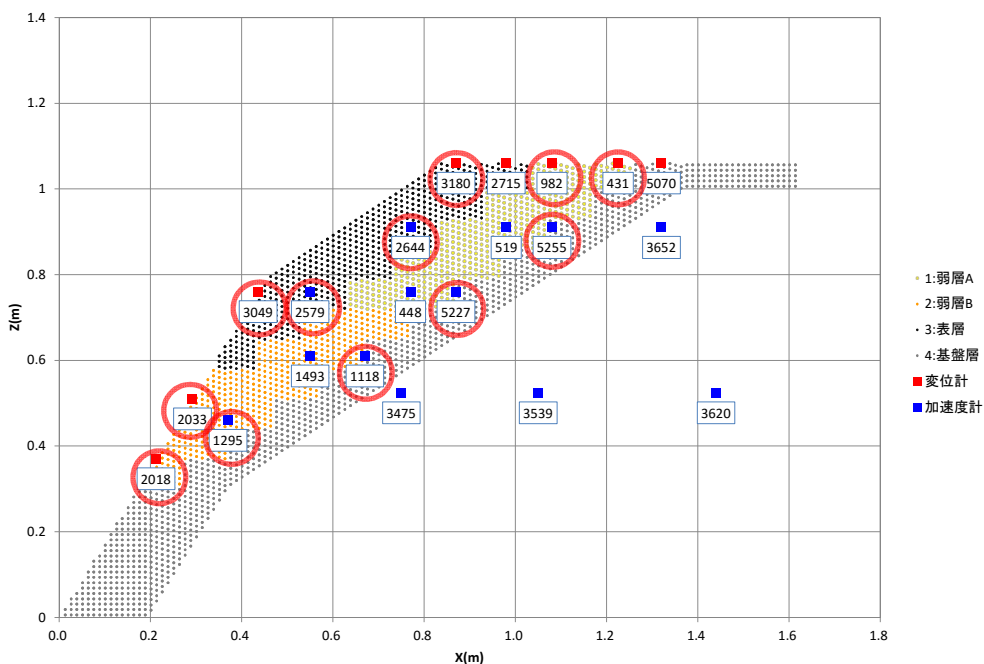


図 8.3.173 CASE29 結果出力位置 ○で囲んだ点の時刻歴結果を示す

表 8.3.3 CASE29 出力粒子一覧

項目	名称	粒子番号	X	Z	
変位計	-	Laser01	2018	0.212	0.370
変位計	-	Laser02	2033	0.292	0.510
変位計	-	Laser03	3049	0.436	0.760
変位計	D05	Laser04	3180	0.870	1.060
変位計	D06	-	2715	0.98	1.06
変位計	D07	Laser05	982	1.08	1.06
変位計	D08	Laser06	431	1.225	1.06
変位計	D09	-	5070	1.32	1.06
加速度計	A01	加速度計	2644	0.77	0.91
加速度計	A02	加速度計	519	0.98	0.91
加速度計	A03	加速度計	5255	1.08	0.91
加速度計	A04	加速度計	3652	1.32	0.91
加速度計	A05	加速度計	2579	0.55	0.76
加速度計	A06	加速度計	448	0.77	0.76
加速度計	A07	加速度計	5227	0.87	0.76
加速度計	A08	加速度計	1493	0.55	0.61
加速度計	A09	加速度計	1118	0.67	0.61
加速度計	A10	加速度計	1295	0.37	0.46
加速度計	A11	加速度計	3475	0.75	0.524
加速度計	A12	加速度計	3539	1.05	0.524
加速度計	A13	加速度計	3620	1.44	0.524

(1) 加速度計位置における水平方向変位時刻歴

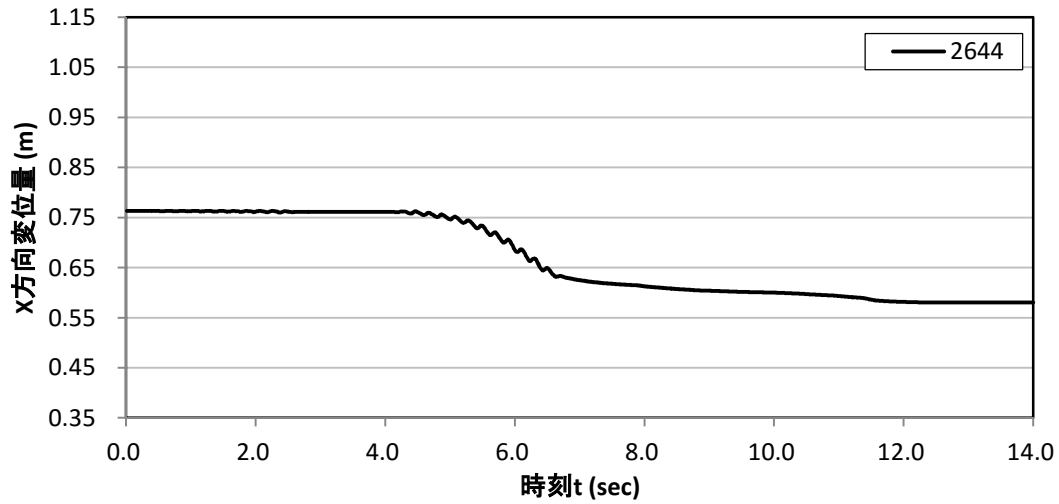


図 8. 3. 174 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2644、加速度計 A01 設置位置)

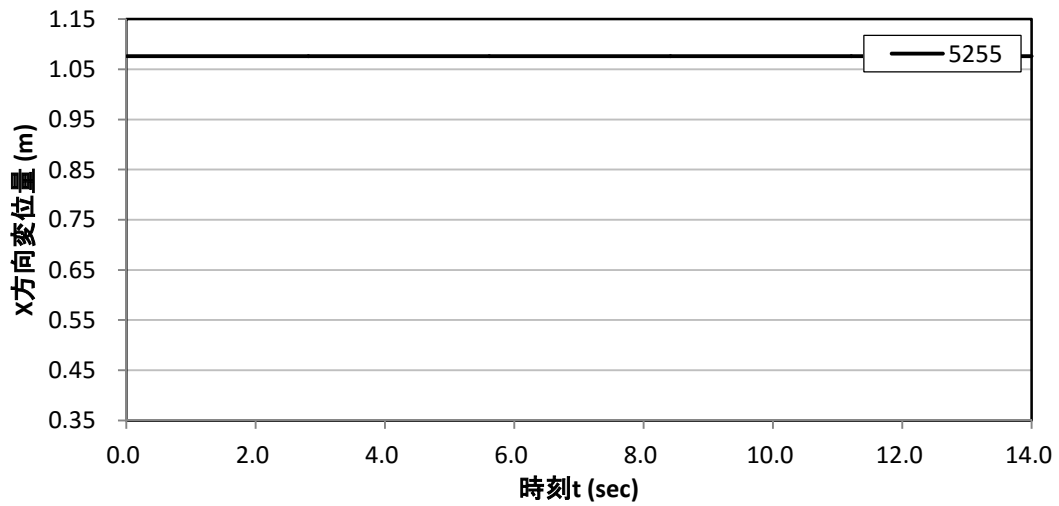


図 8. 3. 175 水平方向変位時刻歴(粒子番号 5255、加速度計 A03 設置位置)

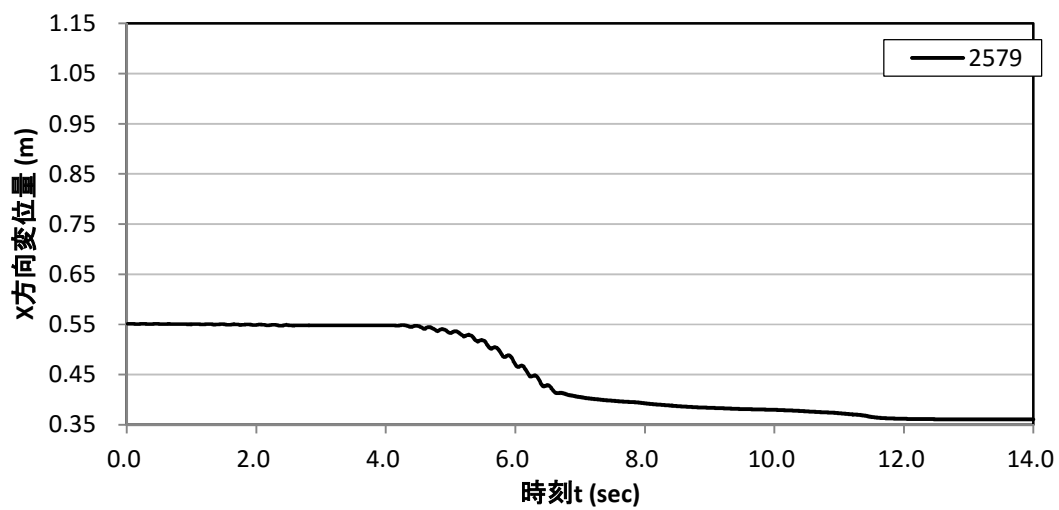


図 8. 3. 176 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2579、加速度計 A05 設置位置)

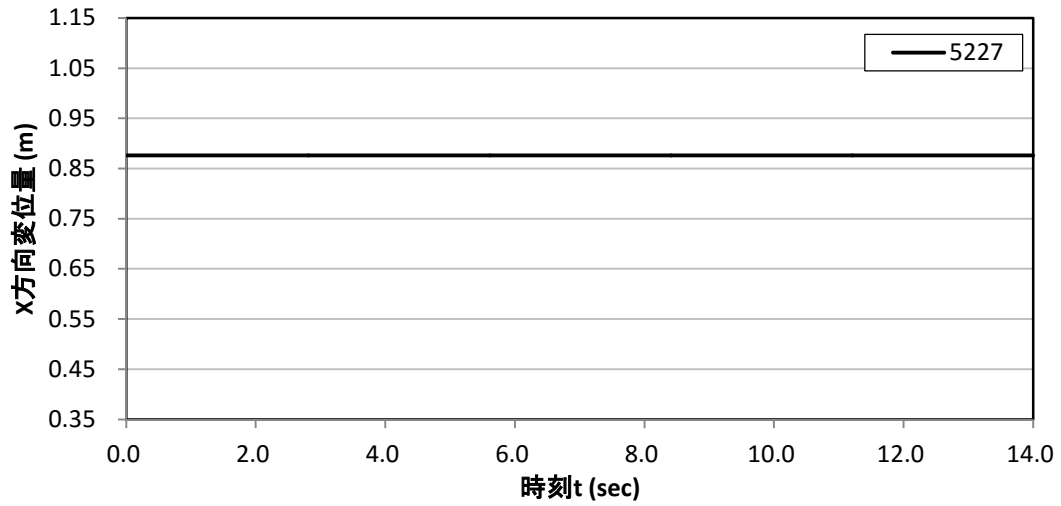


図 8.3.177 水平方向変位時刻歴(粒子番号 5227、加速度計 A07 設置位置)

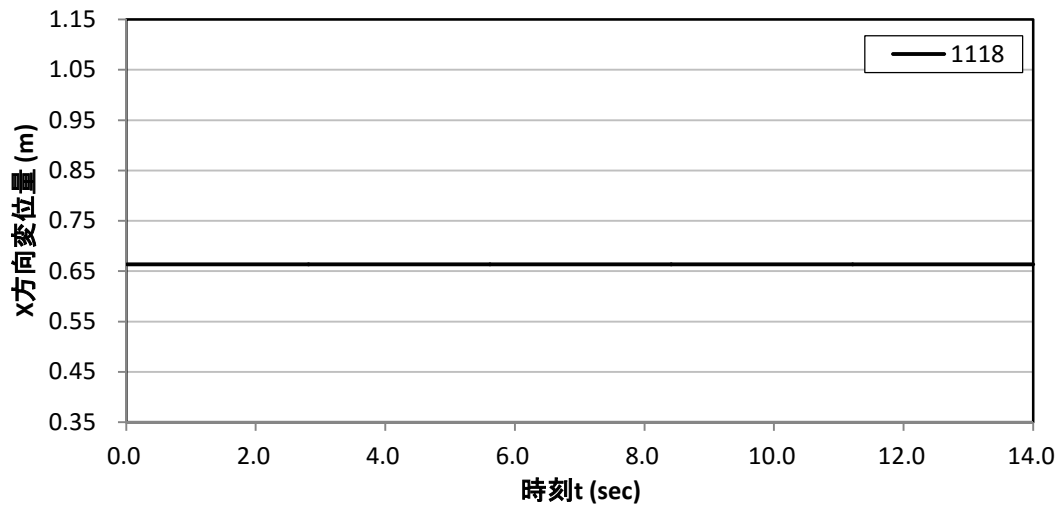


図 8.3.178 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1118、加速度計 A09 設置位置)

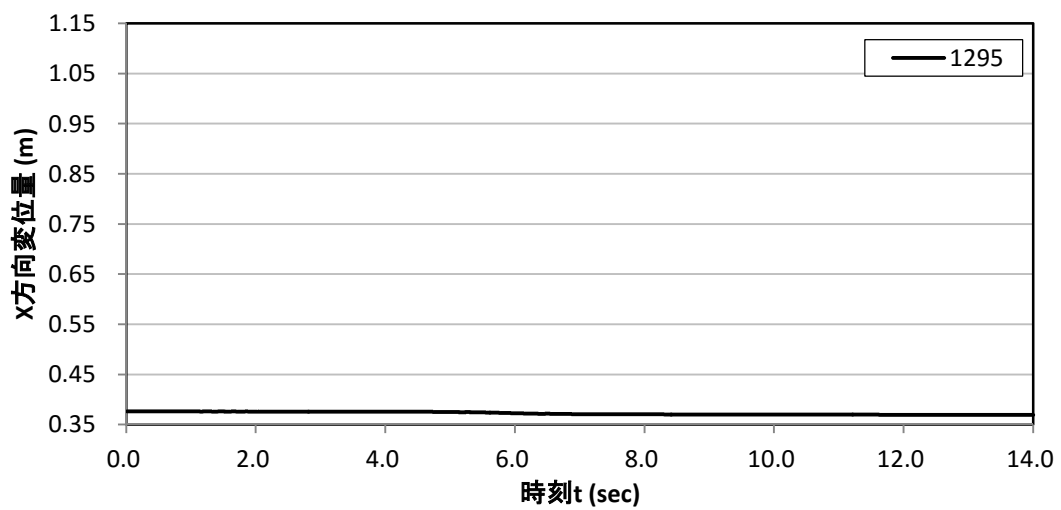


図 8.3.179 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1295、加速度計 A10 設置位置)

(2) 加速度計位置における鉛直方向変位時刻歴

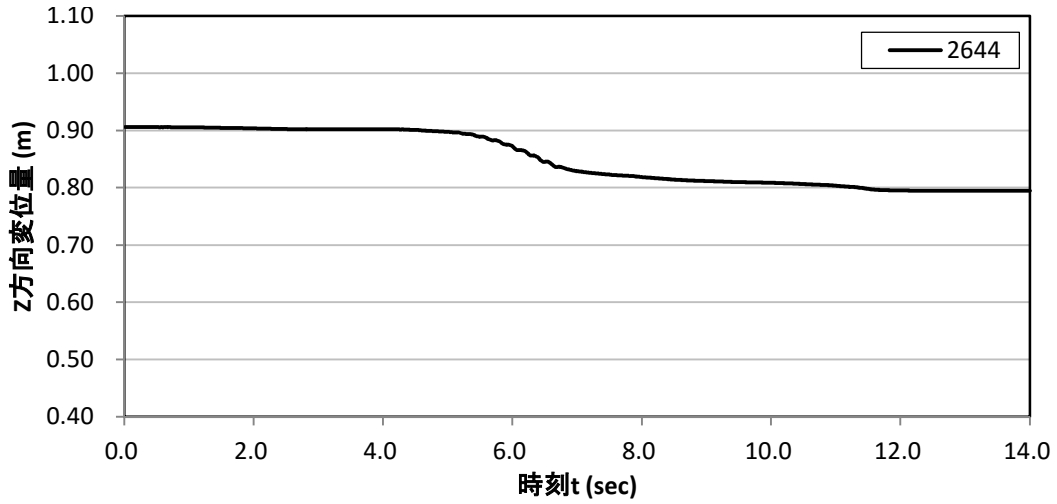


図 8. 3. 180 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2644、加速度計 A01 設置位置)

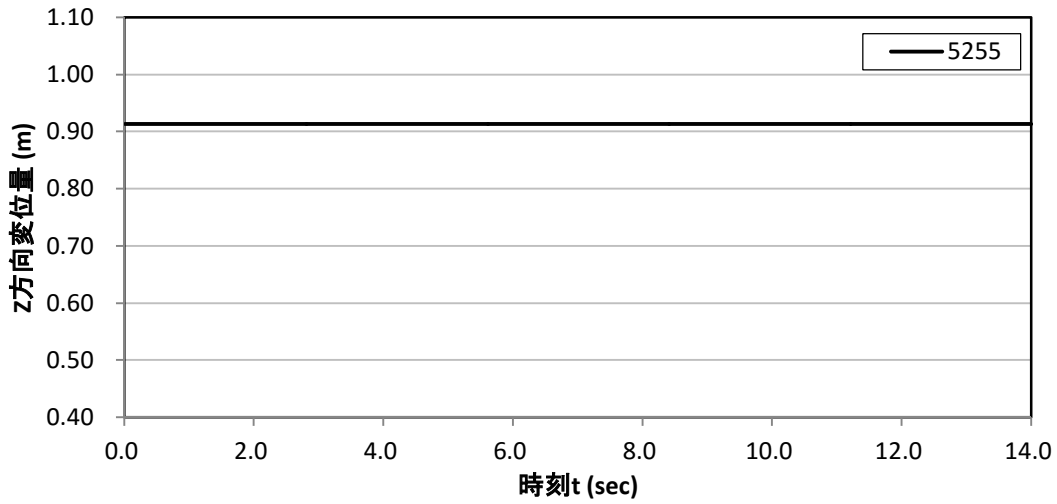


図 8. 3. 181 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 5255、加速度計 A03 設置位置)

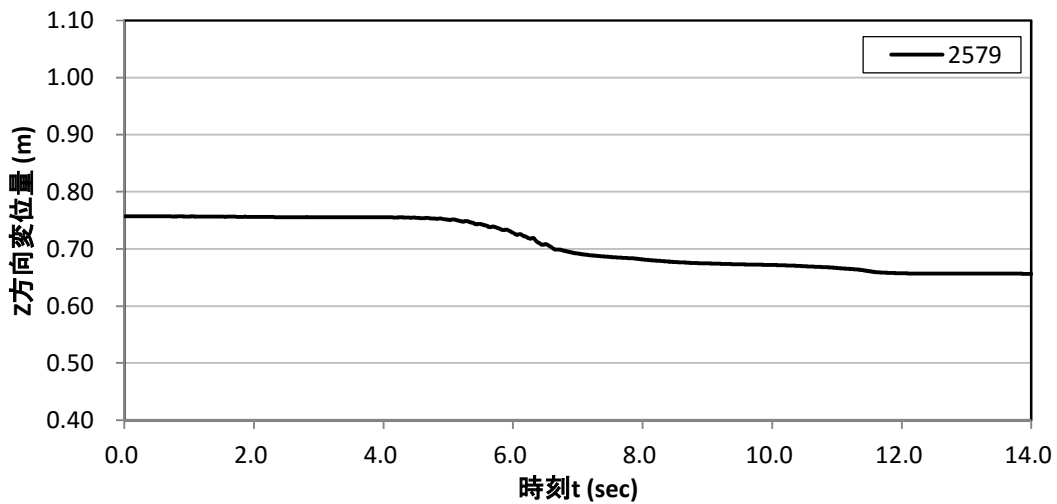


図 8. 3. 182 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2579、加速度計 A05 設置位置)

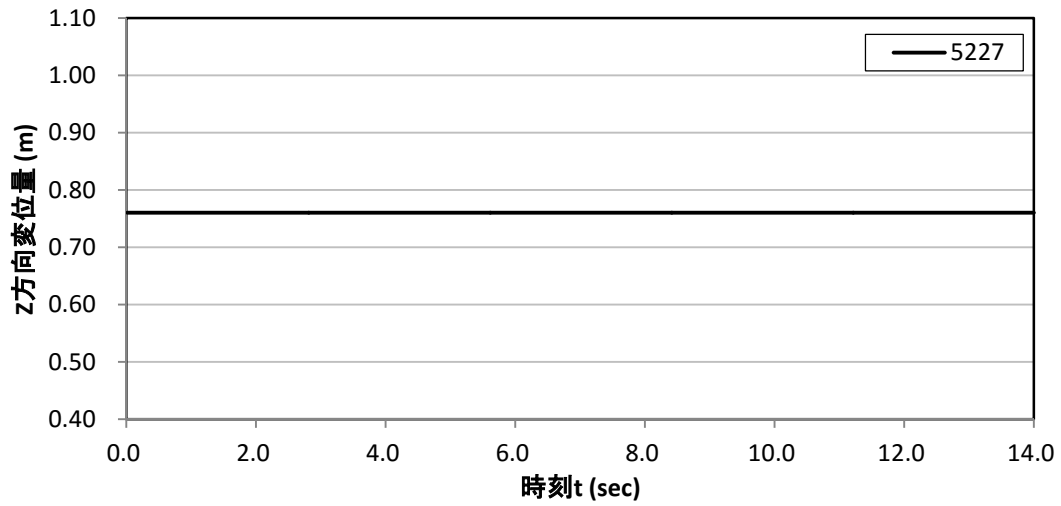


図 8.3.183 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 5227、加速度計 A07 設置位置)

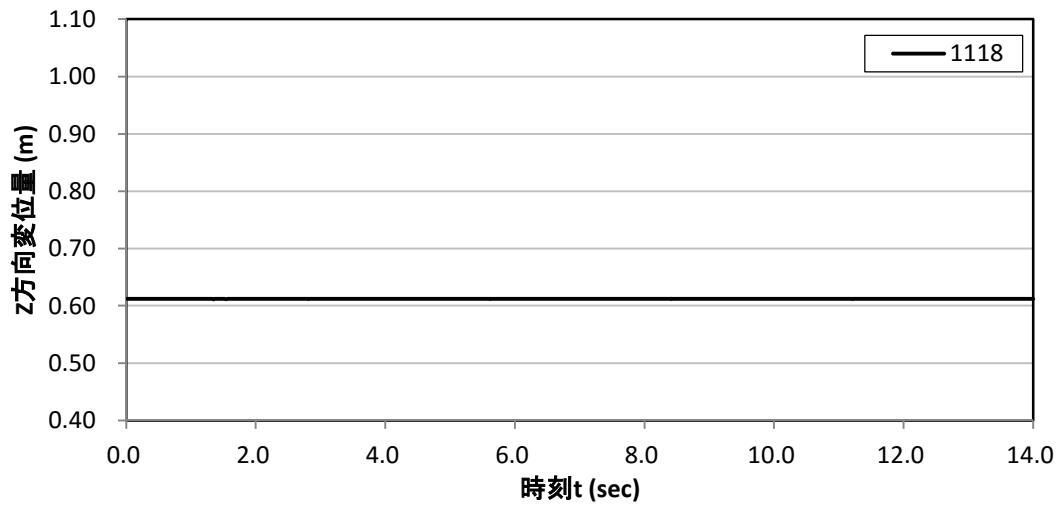


図 8.3.184 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 1118、加速度計 A09 設置位置)

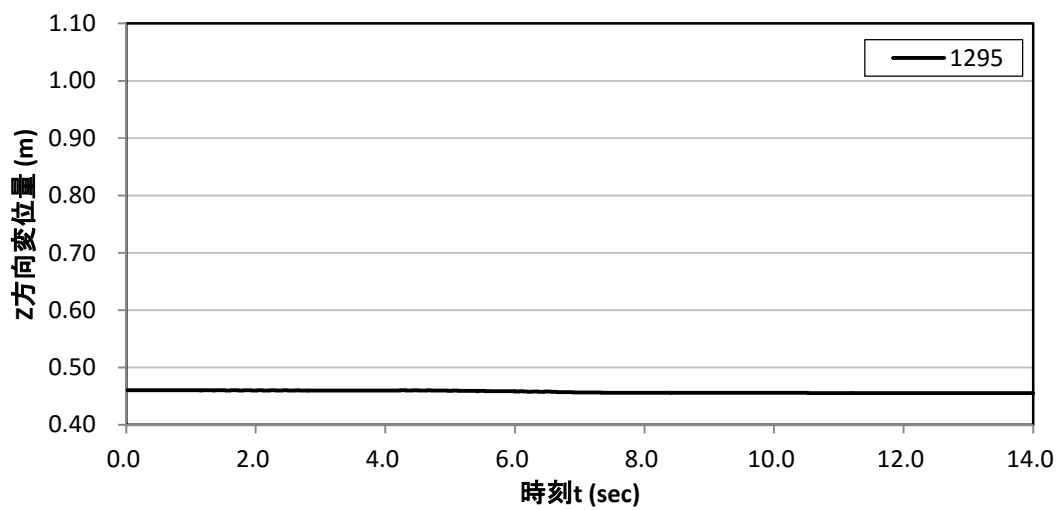


図 8.3.185 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 1295、加速度計 A10 設置位置)

(3) 加速度計位置における水平方向加速度時刻歴

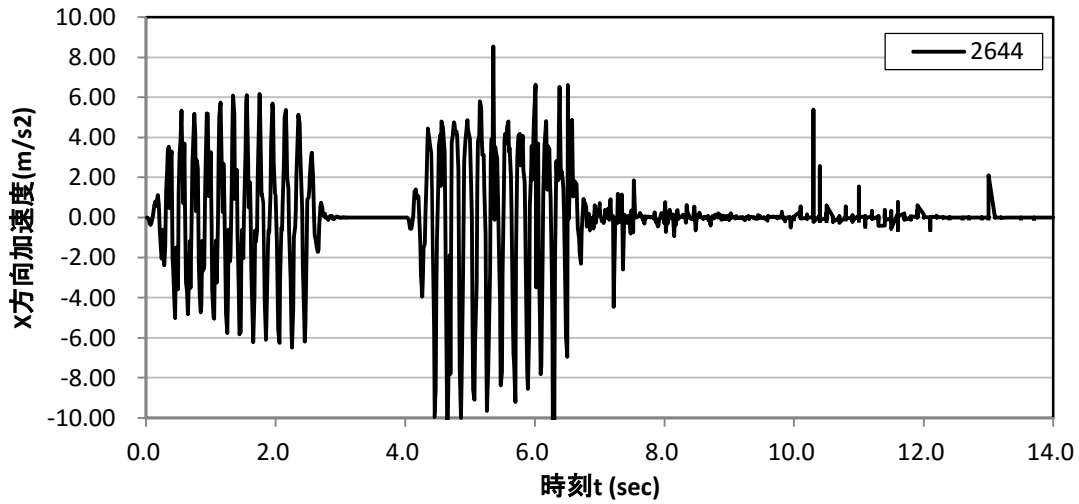


図 8. 3. 186 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2644、加速度計 A01 設置位置)

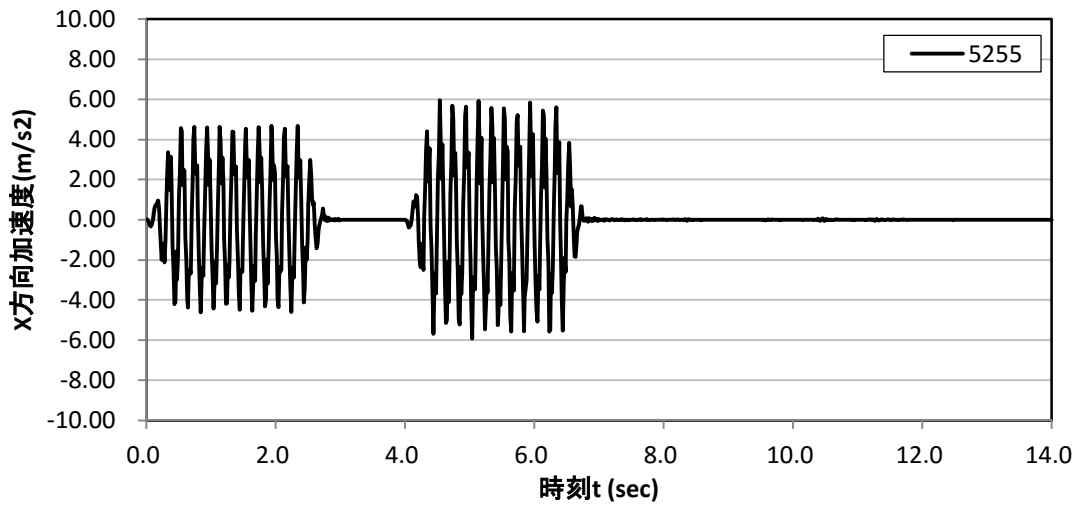


図 8. 3. 187 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 5255、加速度計 A03 設置位置)

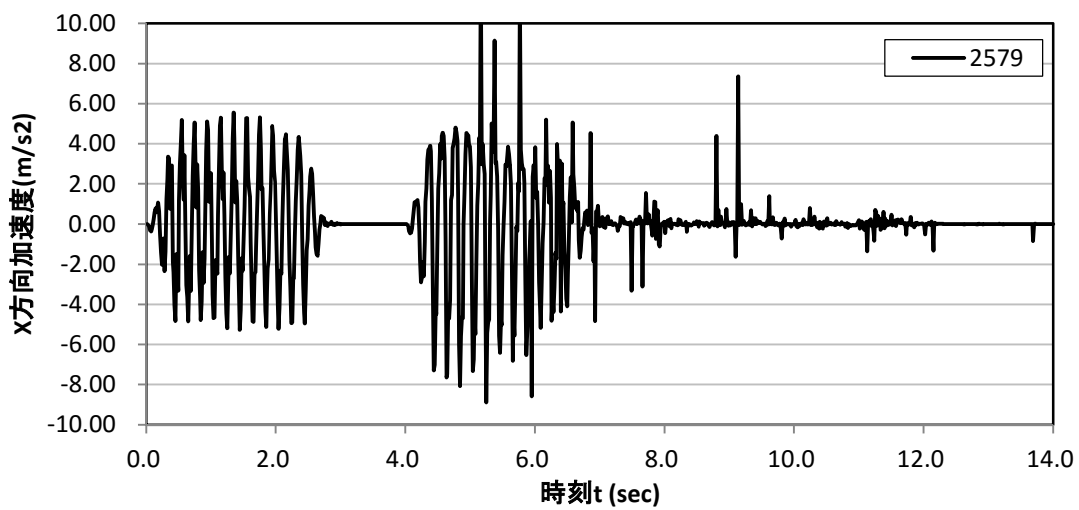


図 8. 3. 188 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2579、加速度計 A05 設置位置)

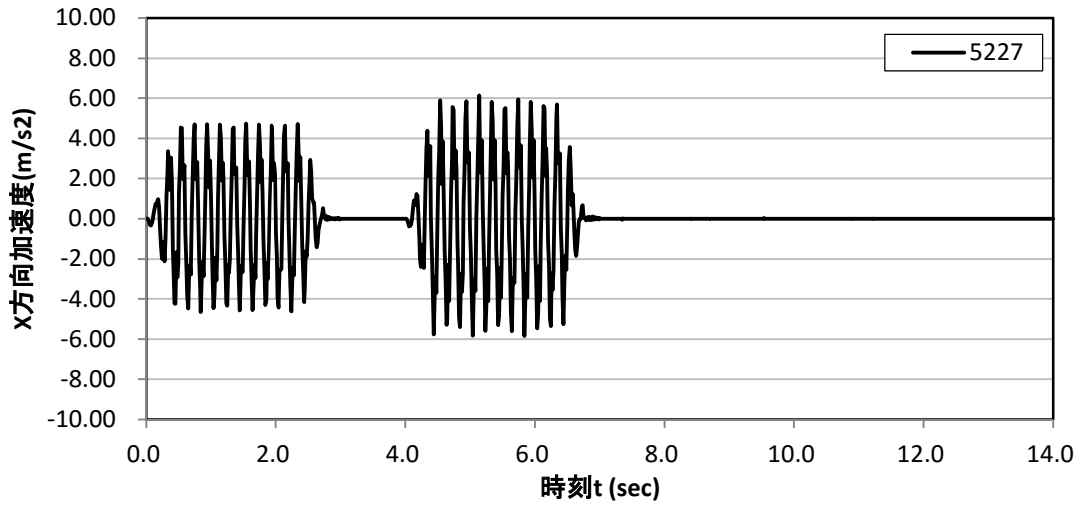


图 8.3.189 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 5227、加速度計 A07 設置位置)

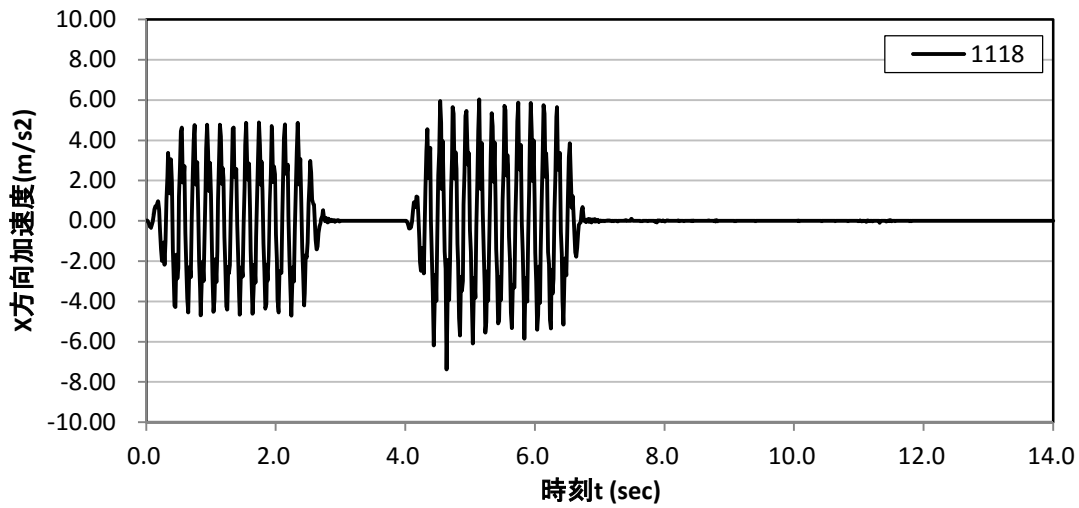


图 8.3.190 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1118、加速度計 A09 設置位置)

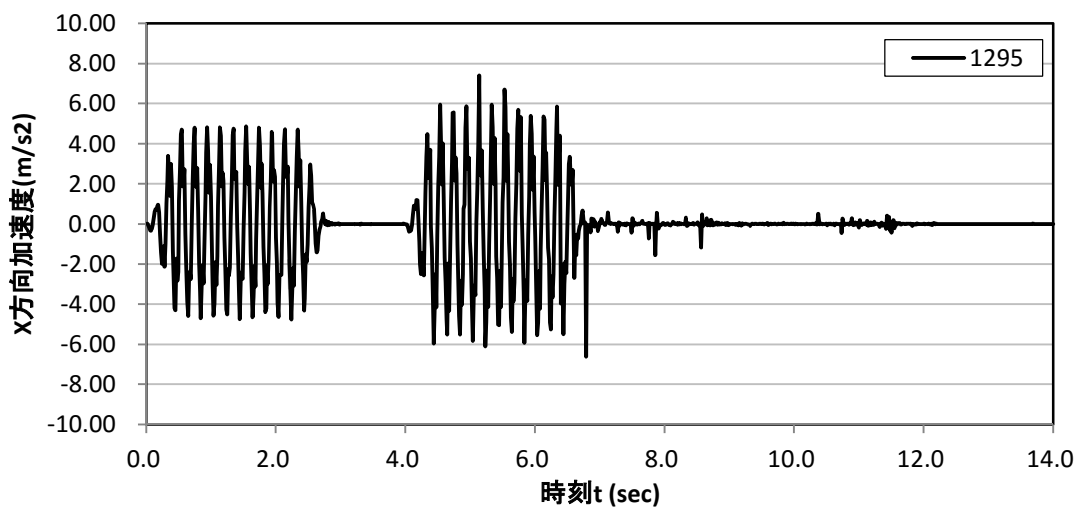


图 8.3.191 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1295、加速度計 A10 設置位置)

(4) 加速度計位置における鉛直方向加速度時刻歴

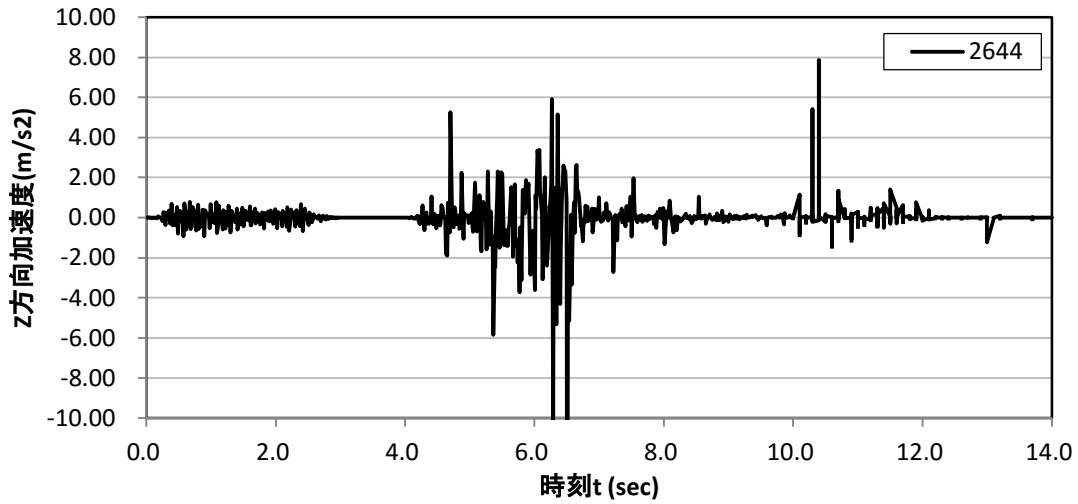


図 8. 3. 192 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2644、加速度計 A01 設置位置)

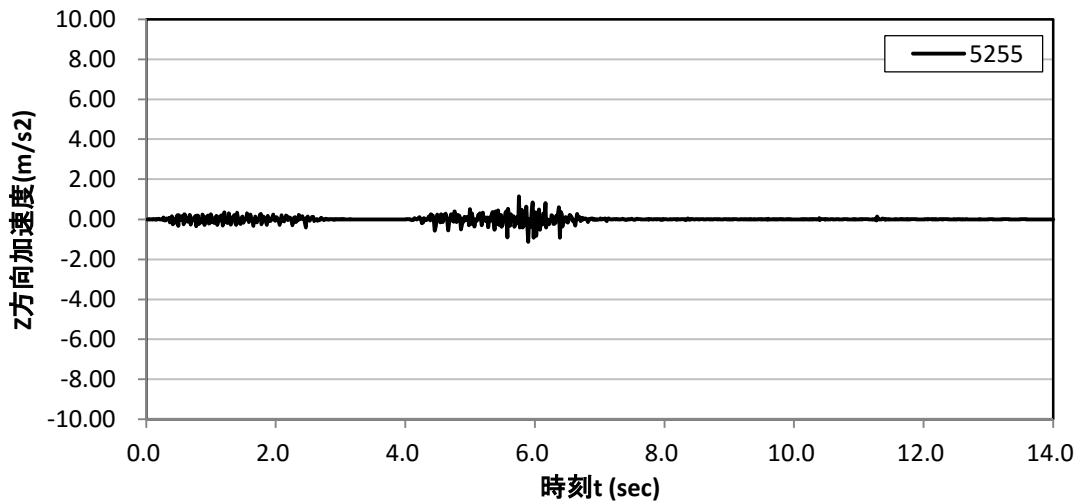


図 8. 3. 193 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 5255、加速度計 A03 設置位置)

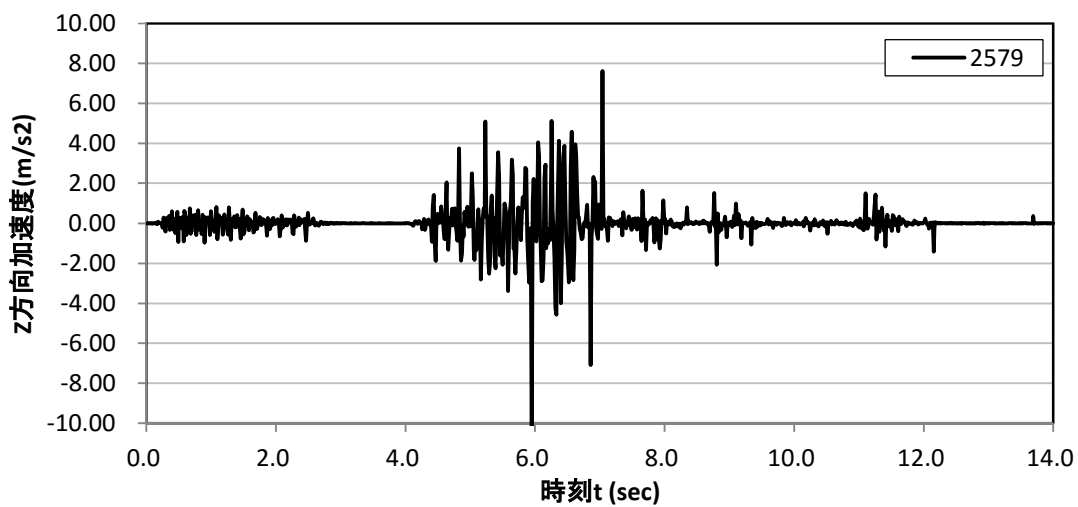


図 8. 3. 194 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2579、加速度計 A05 設置位置)

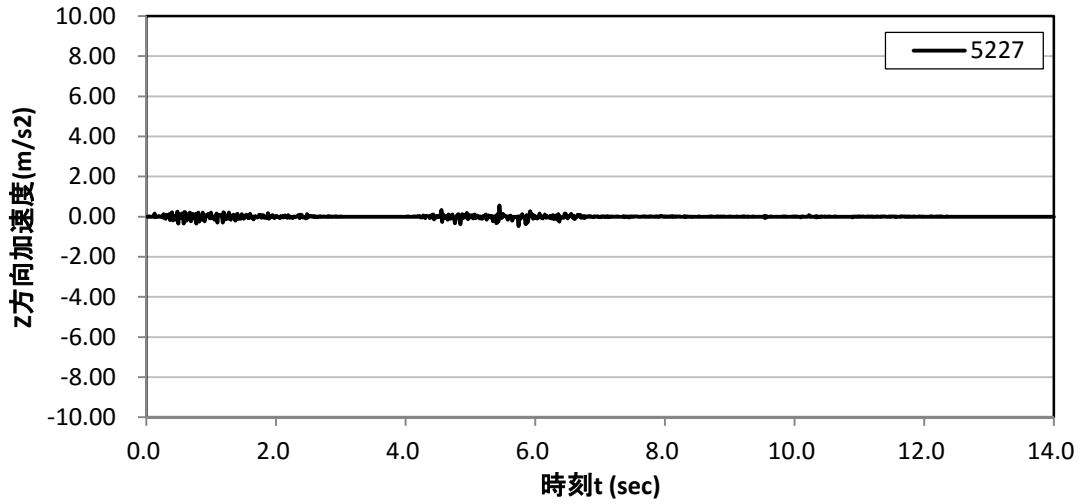


図 8. 3. 195 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 5227、加速度計 A07 設置位置)

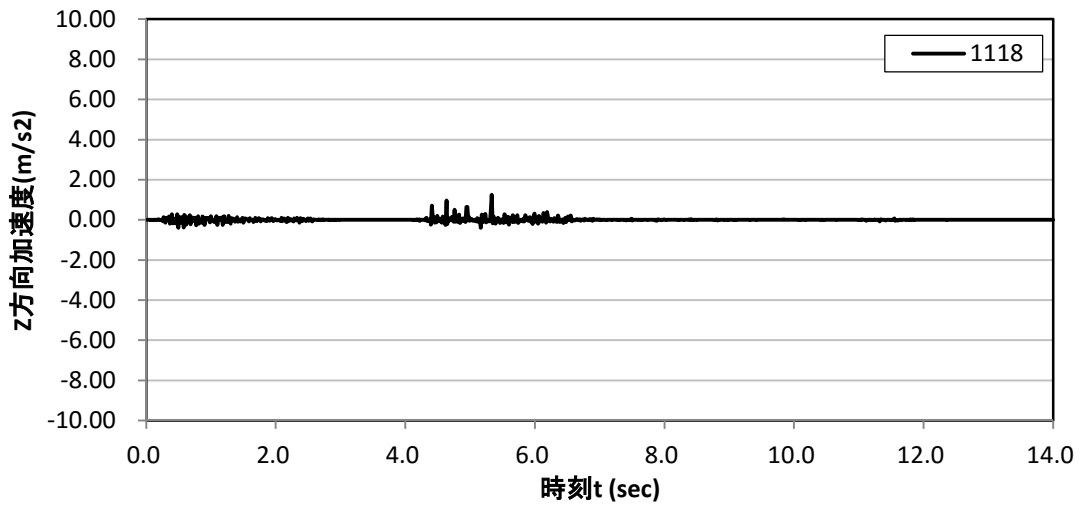


図 8. 3. 196 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1118、加速度計 A09 設置位置)

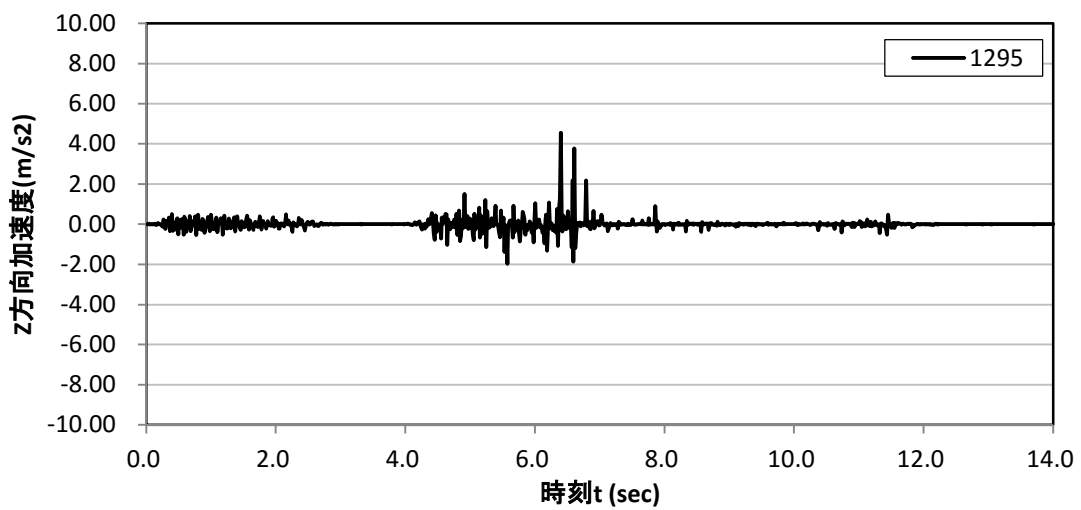


図 8. 3. 197 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1295、加速度計 A10 設置位置)

(5) 変位計位置における水平方向変位時刻歴

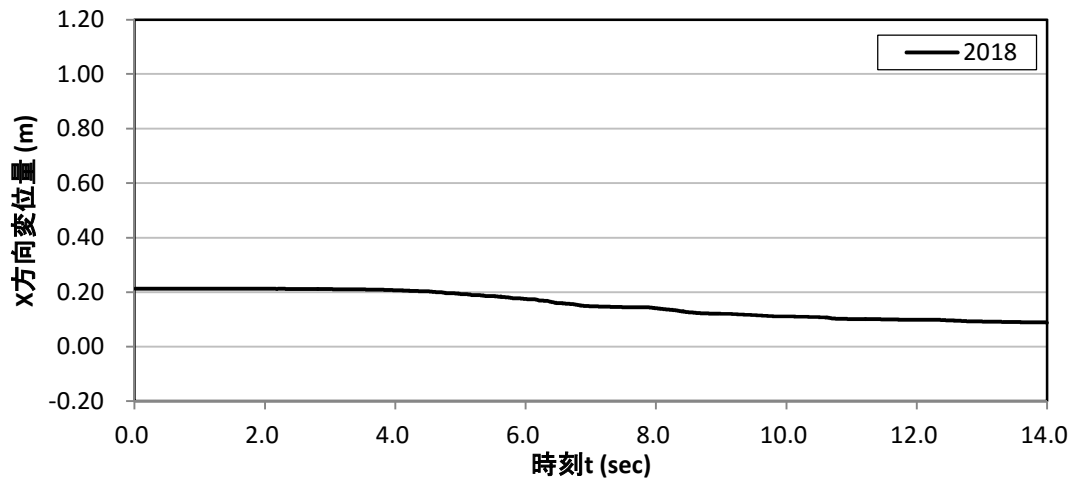


図 8. 3. 198 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2018、変位計 Laser01 設置位置)

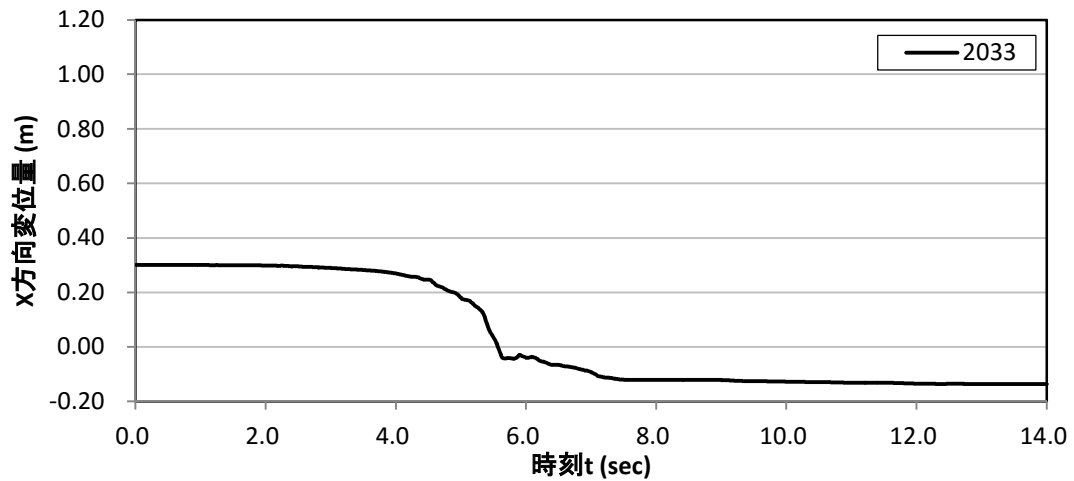


図 8. 3. 199 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2033、変位計 Laser02 設置位置)

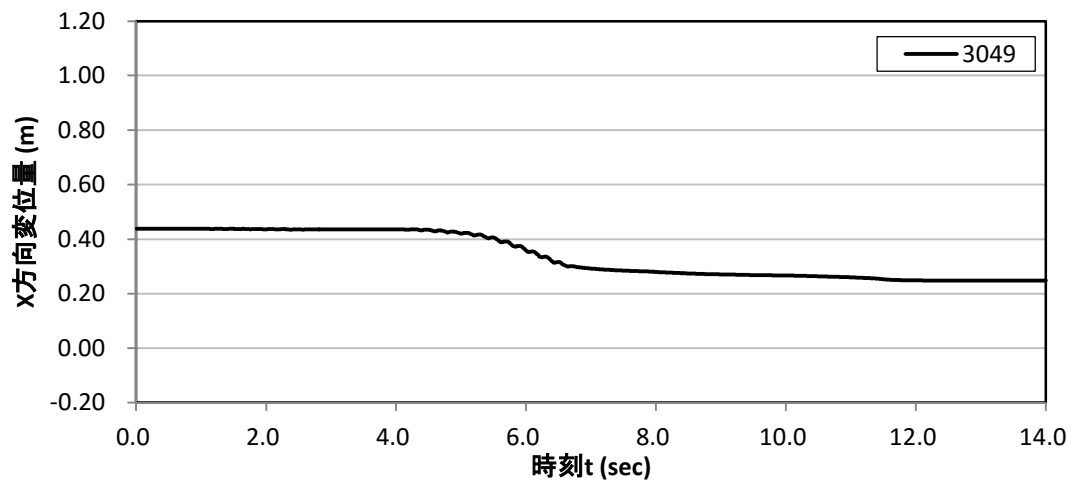


図 8. 3. 200 水平方向変位時刻歴(粒子番号 3049、変位計 Laser03 設置位置)

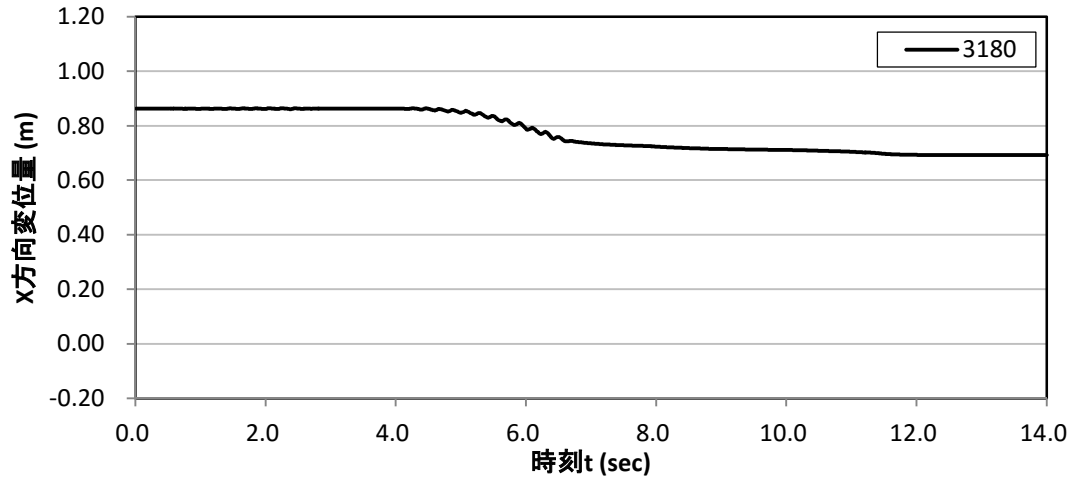


図 8.3.201 水平方向変位時刻歴(粒子番号 3180、変位計 Laser04 設置位置)

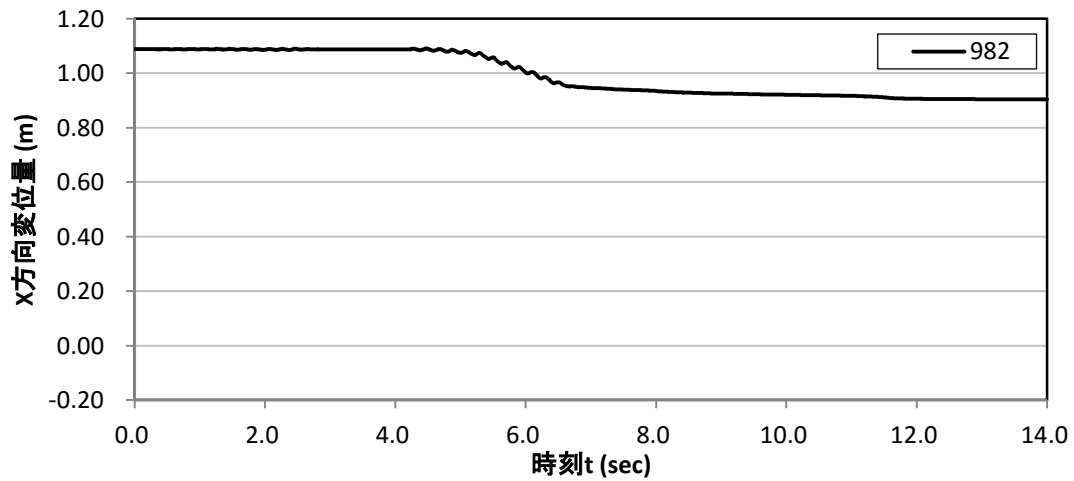


図 8.3.202 水平方向変位時刻歴(粒子番号 982、変位計 Laser05 設置位置)

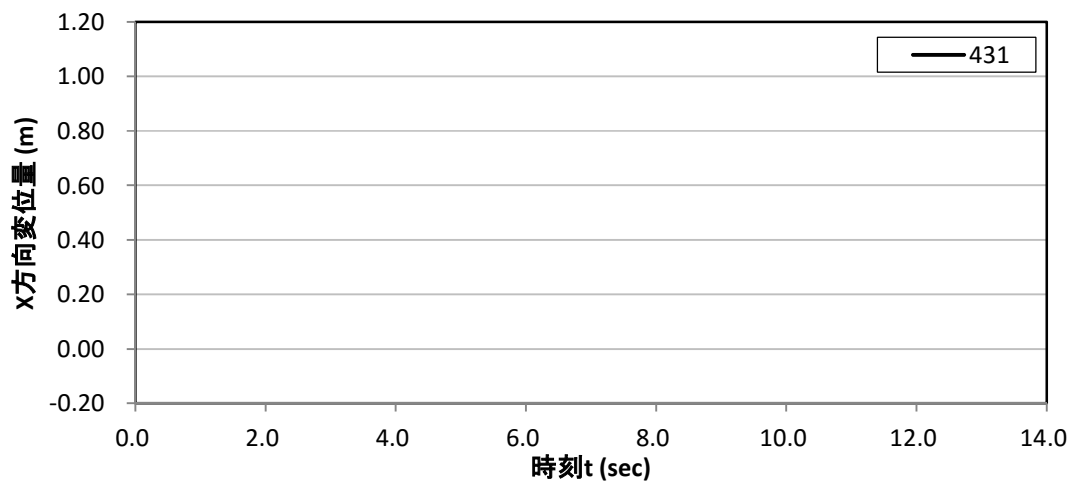


図 8.3.203 水平方向変位時刻歴(粒子番号 431、変位計 Laser06 設置位置)

(6) 変位計位置における鉛直方向変位時刻歴

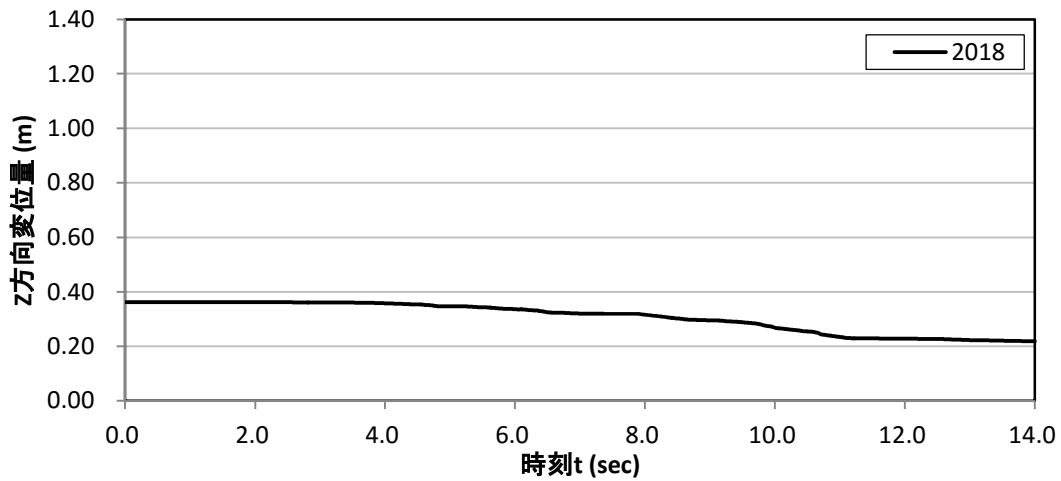


図 8. 3. 204 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2018、変位計 Laser01 設置位置)

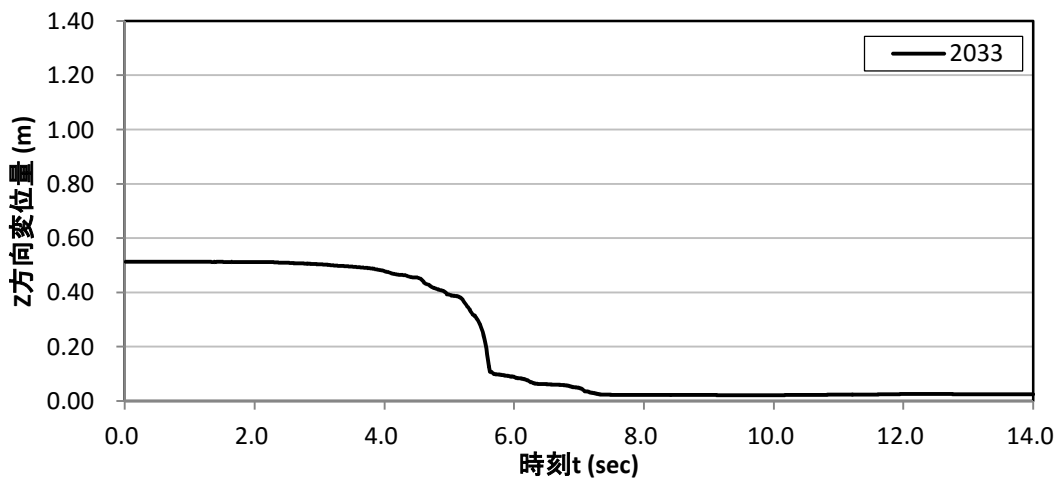


図 8. 3. 205 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2033、変位計 Laser02 設置位置)

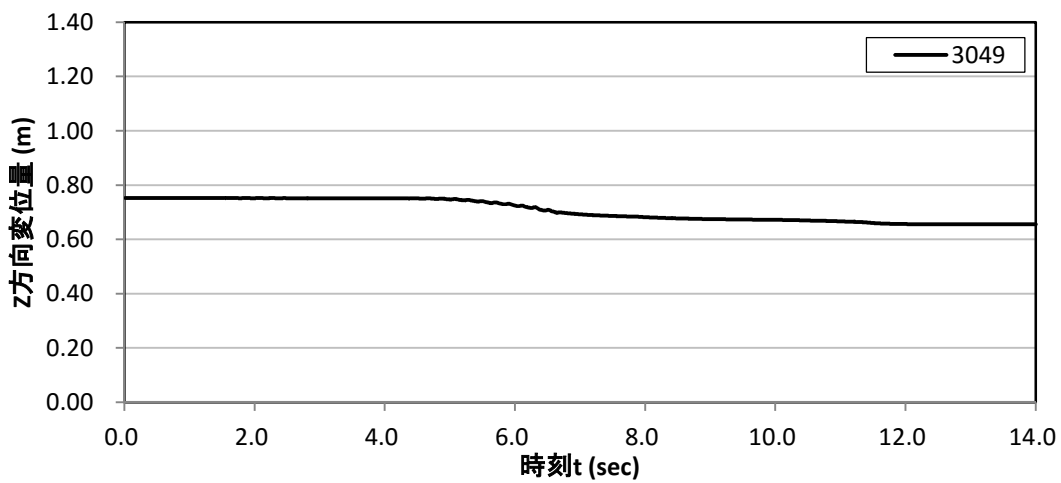


図 8. 3. 206 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 3049、変位計 Laser03 設置位置)

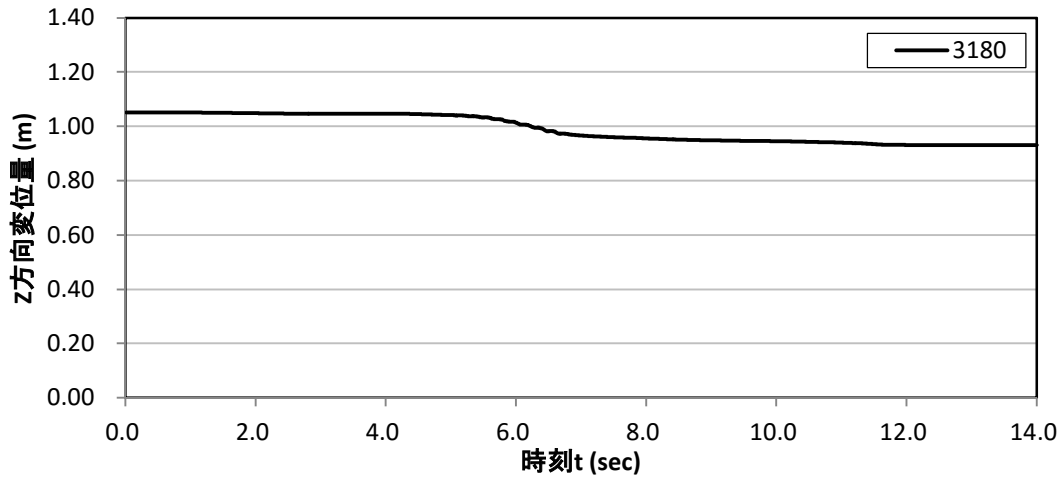


図 8.3.207 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 3180、変位計 Laser04 設置位置)

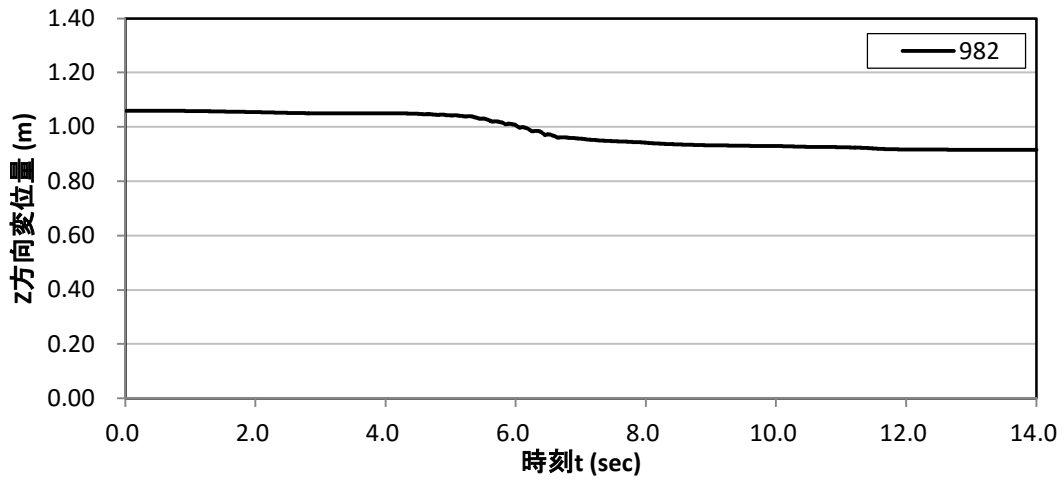


図 8.3.208 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 982、変位計 Laser05 設置位置)

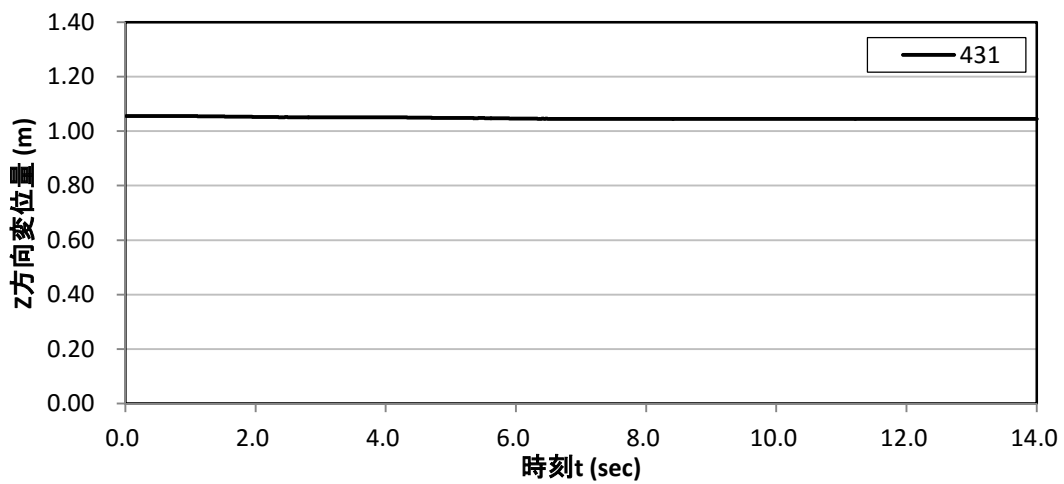


図 8.3.209 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 431、変位計 Laser06 設置位置)

(7) 変位計位置における水平方向加速度時刻歴

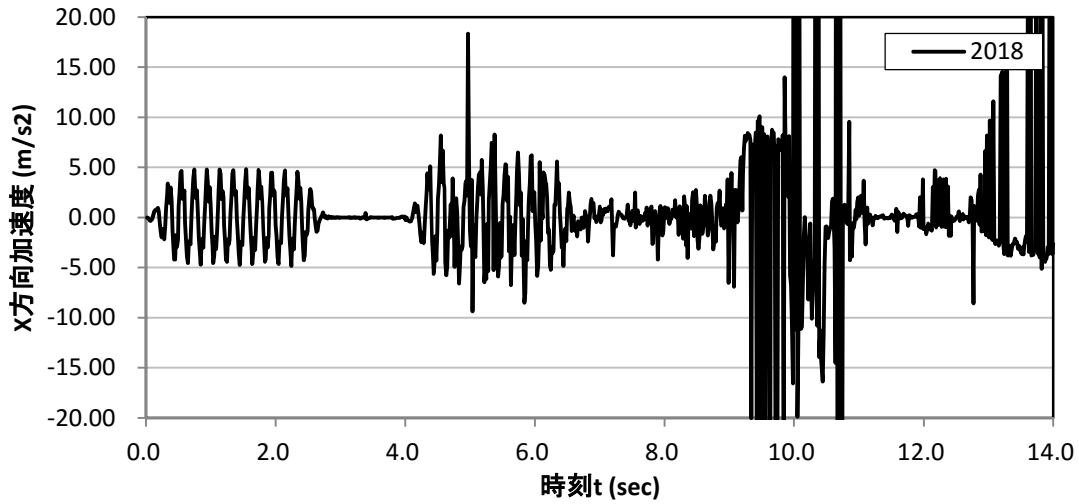


図 8.3.210 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2018、変位計 Laser01 設置位置)

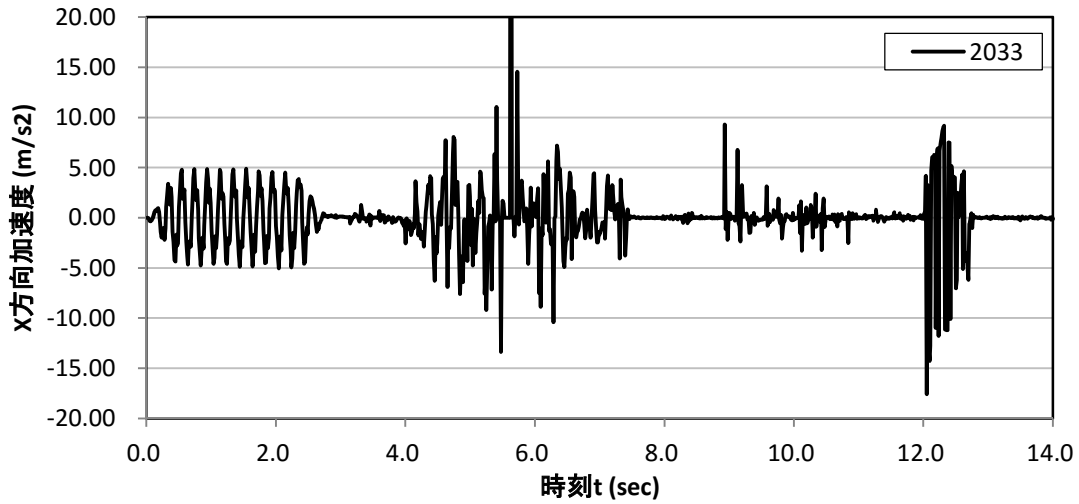


図 8.3.211 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2033、変位計 Laser02 設置位置)

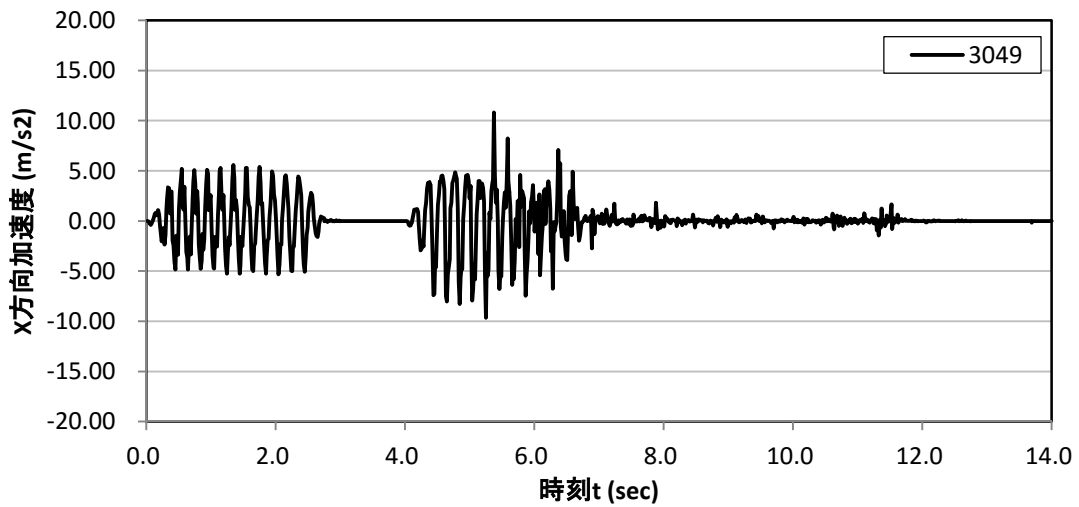


図 8.3.212 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 3049、変位計 Laser03 設置位置)

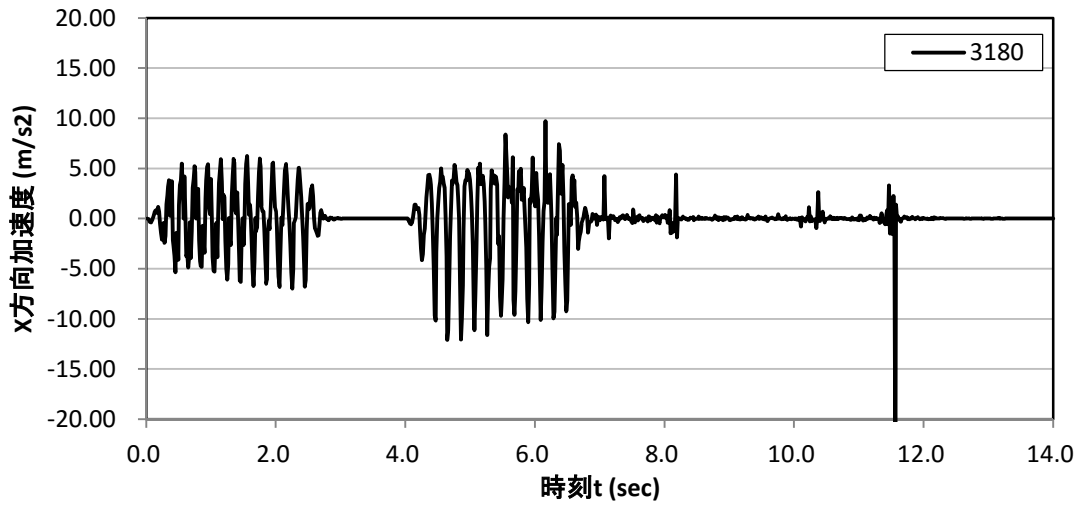


図 8. 3. 213 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 3180、変位計 Laser04 設置位置)

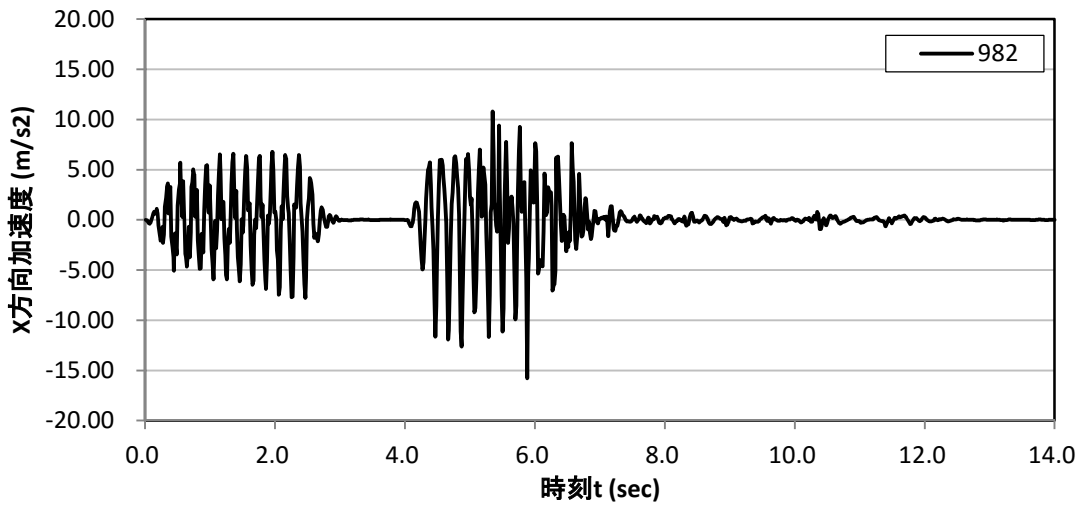


図 8. 3. 214 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 982、変位計 Laser05 設置位置)

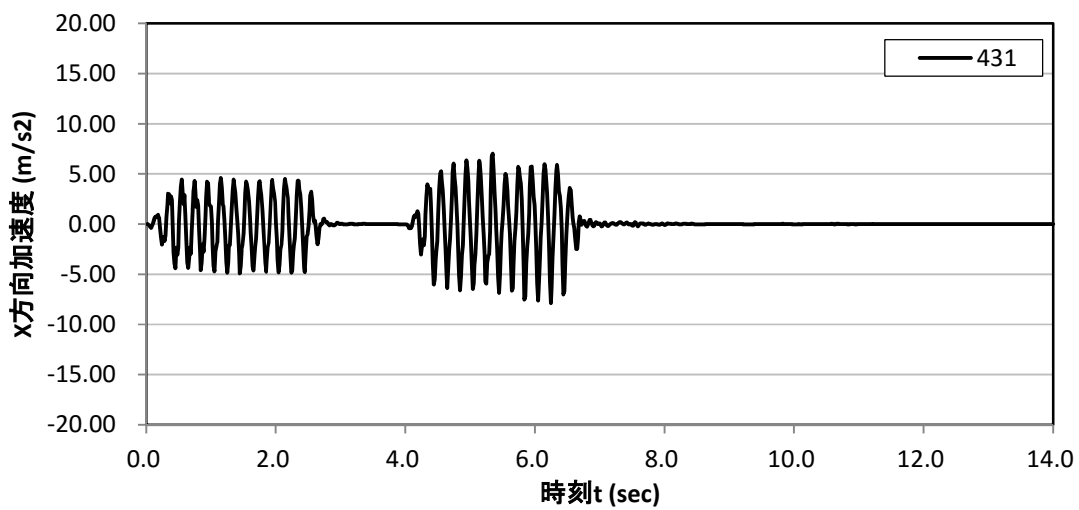


図 8. 3. 215 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 431、変位計 Laser6 設置位置)

(8) 変位計位置における鉛直方向加速度時刻歴

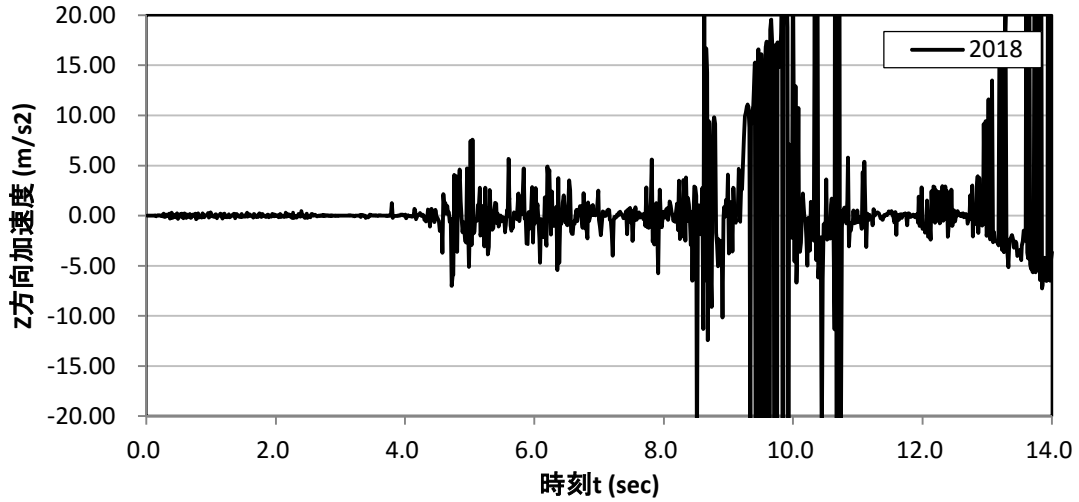


図 8.3.216 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2018、変位計 Laser01 設置位置)

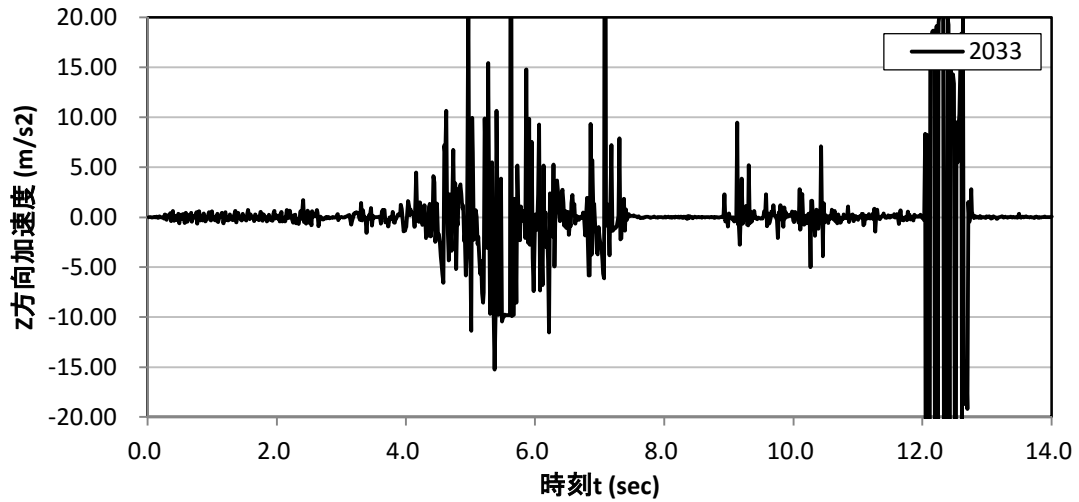


図 8.3.217 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2033、変位計 Laser02 設置位置)

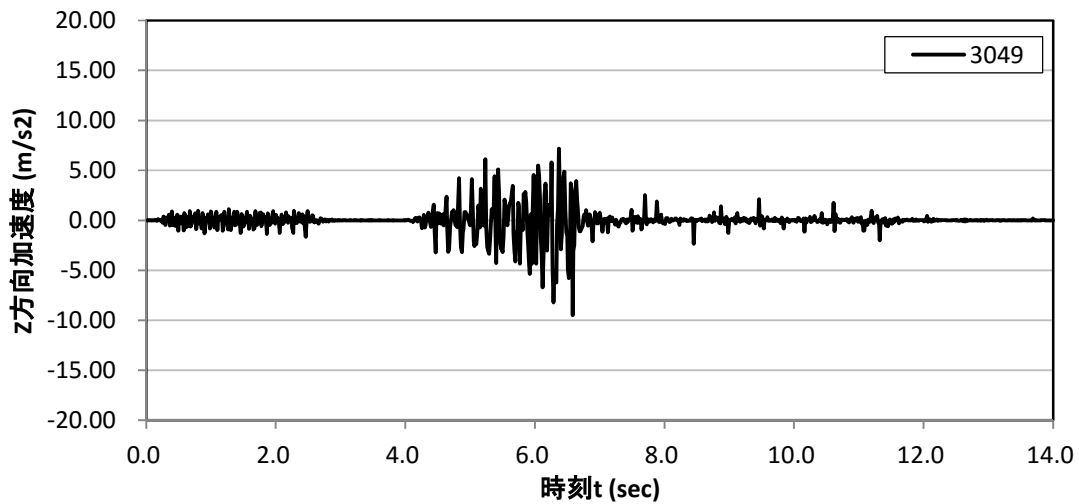


図 8.3.218 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 3049、変位計 Laser03 設置位置)

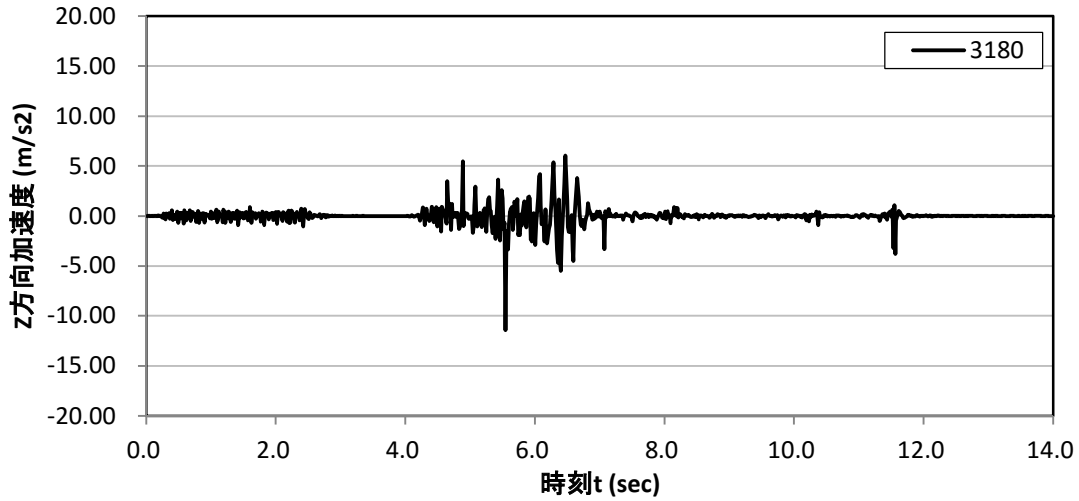


図 8.3.219 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 3180、変位計 Laser04 設置位置)

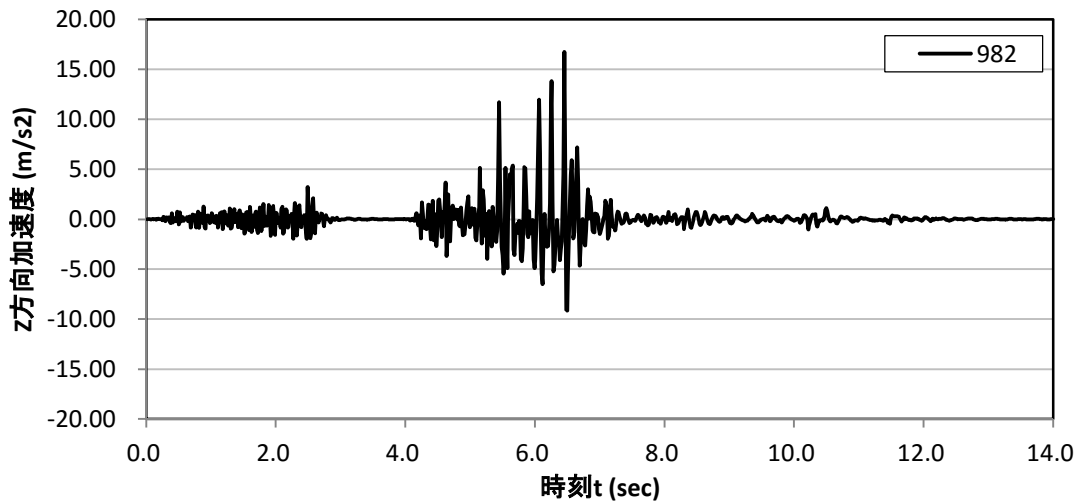


図 8.3.220 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 982、変位計 Laser05 設置位置)

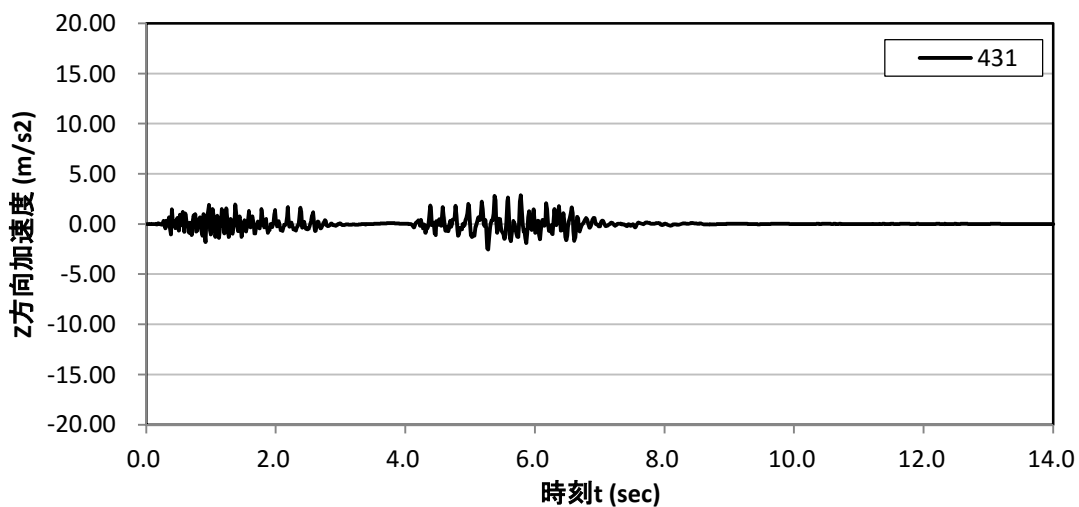


図 8.3.221 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 431、変位計 Laser06 設置位置)

8.4 実規模斜面 (軟岩斜面)

8.4.1 入力データと解析モデル作成

入力データとして「静的・動的解析用、時間間隔、加速度、観測点等設定データ」、「入力加速度履歴データ」、「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。

8.4.2 解析モデル概要(時間間隔、粒子数)

以下に軟岩斜面の粒子数、解析ステップ数、時間間隔を示す。初期応力解析では10秒間、動的解析では斜面が崩壊の進行が収まる30秒までを解析範囲とした。

表 8.4.1 粒子数、解析ステップ数、ステップ間隔

ケース	スケール	粒子数	初期応力解析		動的解析	
			解析ステップ数	ステップ間隔(sec)	解析ステップ数	ステップ間隔(sec)
4	実規模斜面	13,764	50,000	2.0×10^{-4}	300,000	1.0×10^{-4}

8.4.3 入力地震動の算定について

軟岩の解析対象は、下図に示す形状である。地震動を算定するため右端の330mの地層に1mの解放基盤を設けた1次元モデルによる地震応答解析を行った。MPMの解析は、左側の地表面から5mより上をモデル化するので、1次元モデルの対応する深度135mでの地震動がMPMの入力加速度となる。

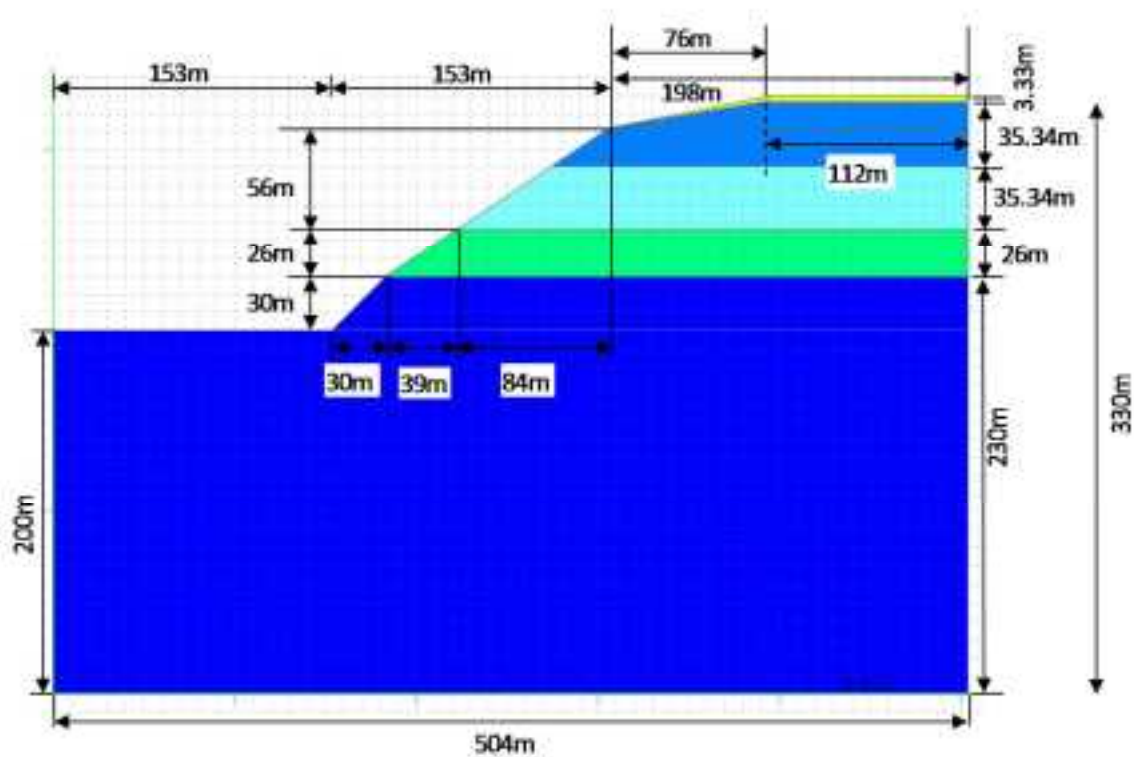


図 8.4.1 軟岩モデル全体図

解析に使用する物性は、「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価基準 2009年2月」P.130表4.2.3に示されている単位体積重量、G/G₀- γ 曲線、h- γ 曲線とV_sからモデル右端を1次元でモデル化し、等価線形化法により地震応答解析を行った。入力加速度(2E)と最大応答値の深度分布を示す。

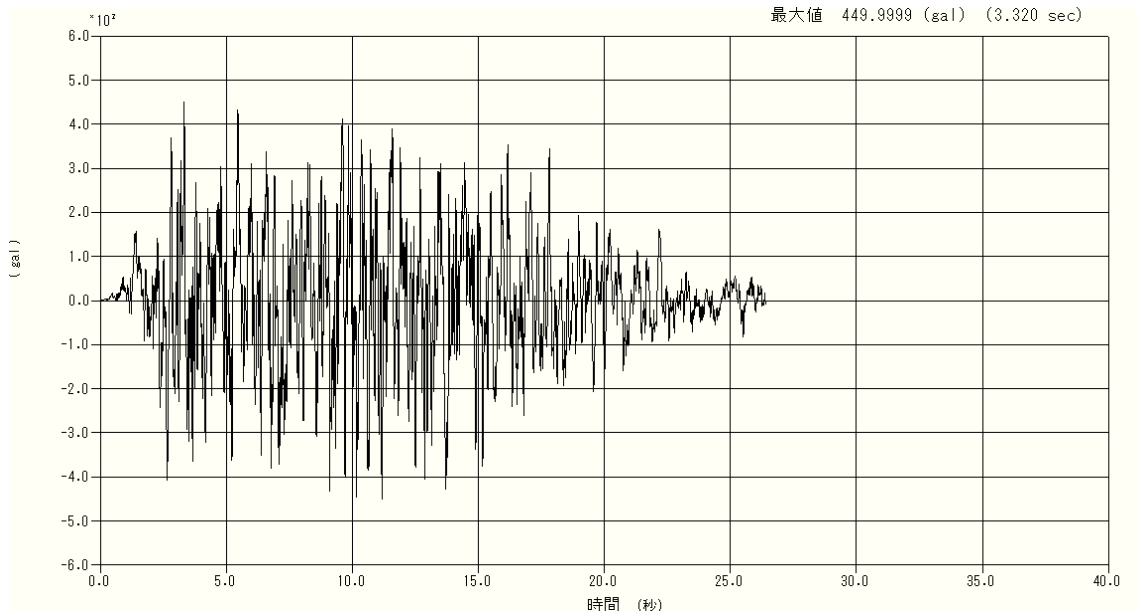


図 8.4.2 入力加速度波形(軟岩斜面)

V_s=700m/sの解放基盤を設定しており、最下層はV_s=600m/s程度あり、入力加速度2E=450galと比較して、基盤付近のE+Fの地震動は小さい。

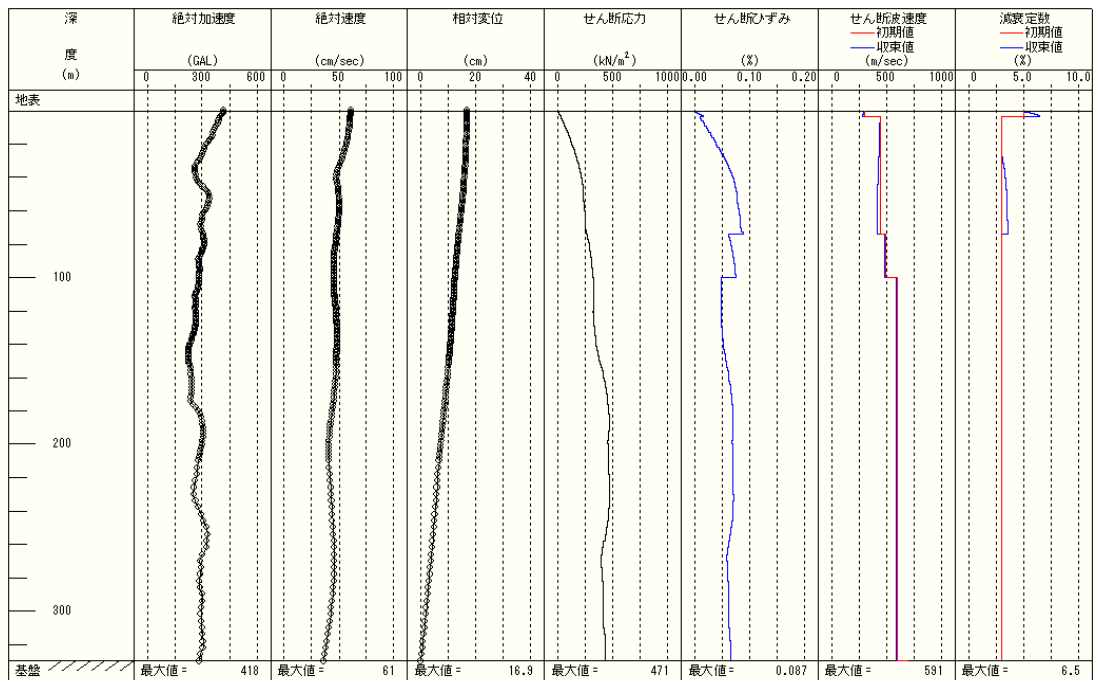


図 8.4.3 最大応答震度分布(軟岩斜面)

8.4.4 入力加速度

水平加速度の入力加速度の最大値は 450gal (2E)で、195m 位置 (深度 135m)の最大加速度は 249.01gal であった。入力地震動と 195m 位置の最大加速度から応答倍率=249/450=0.553 となり、鉛直加速度は 300gal×0.553= 166.0gal とした。

しかし、等価線形化法による加速度分布をみると、深度 135m 位置までの加速度の減衰過大と思われる。そこで、解析の基本ケースは

水平加速度 450gal (深度 135m 加速度の最大値を変更)

鉛直加速度 300gal

と決定した。上記の加速度最大値ですべり破壊が発生しない場合、さらに加速度を増幅(基本ケースの 1.5 倍)させて、すべり破壊が発生する加速度を最終的な検討ケースとして計算を行った。詳細は後述する。

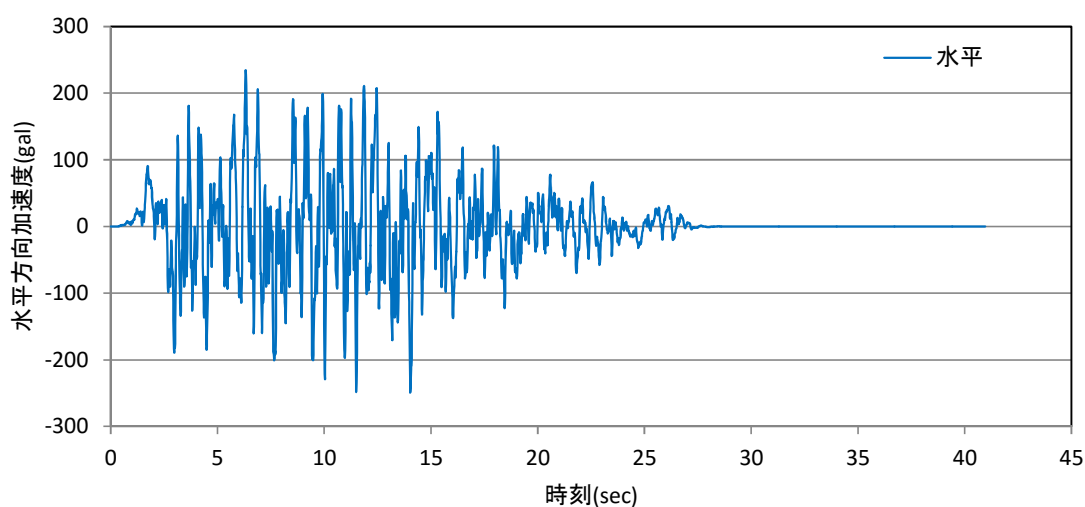


図 8.4.4 軟岩モデルの水平方向入力波

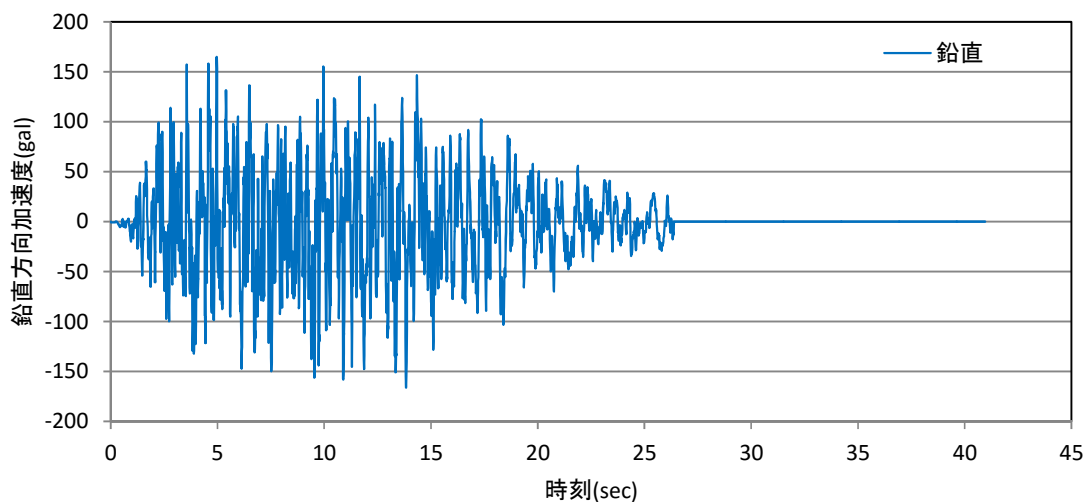


図 8.4.5 軟岩モデルの鉛直方向入力波

8.4.5 物性値

等価線形化法では基盤を解放基盤としてモデル化するが、本解析では等価線形化法の1次元モデルの深度135mより上をモデル化した。岩盤上層部は、図8.4.3の最大値応答震度分布において、深度方向の速度分布に違いが確認できるため上と下の2層に分けた。

「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価基準 2009年2月 P.32 初期応力解析時の入力物性値」には、均一の弾性係数でポアソン比0.45の記述があるので、初期応力解析時に0.45相当である動的ポアソン比を使用した。

表 8.4.2 地層の有効上載圧

No.	地層名	地層厚 (m)	上面 深度 (m)	下面 深度 (m)	単位体積 重量 (kN/m ³)	上載圧 (上) (kN/m ³)	上載圧 (下) (kN/m ²)	上載圧 (中央) (kN/m ²)
1	盛土	3.33	0.0	3.33	18.0	0.0	59.94	29.97
2	岩盤 (上層部)	70.67	3.33	74	17.0	59.94	1261.33	660.64
3	岩盤 (中層部)	26	74	100	8.0	1261.33	1469.33	1365.33
4	岩盤 (下層部)	230	100	330	9.0	1469.33	3539.33	2504.33
5	基盤	1	330	331	9.0	3539.33	3548.33	3543.83

弾性係数Eは等価線形化法で求めたせん断剛性を各地層で平均した値を用いて求めた。表層はモール・クーロンの破壊条件で粘着力の残留時の値Cminを0.1(kN/m²)とした。岩盤上層部(上)、岩盤上層部(下)、岩盤中層部は、放物線型の破壊条件を折れ線で近似するモデルとし(参考資料2)、Cuの下限は硬岩モデルの破砕帯の値を参考に $\tau_f \times 0.1$ (kN/m²)とし、軟化係数を-0.1とした。岩盤下層部は、軟化係数を0としており、軟化させない。(軟化係数-0.1は、弾性の剛性の-0.1の勾配でせん断強度が低下する設定である。)

表 8.4.3 物性値(軟岩斜面)

	地層名	せん断剛性の 平均値G0 (kN/m ²)	ポアソン比 ν (動的/静的)	応力依存 の弾性係 数E ₀ (動的/静 的) (kN/m ²)	上載圧 (中央) σ_v (kN/m ²)	K ₀	E ₀ となる 値の平均 主応力 σ'_{m0} (kN/m ²)	応力依 存の弾 性係数 の式のn
1	表層	153818	0.45	446072.7	29.97	0.5	19.98	0.5
2	岩盤 上層部(上)	323370	0.43	924836.9			1.0	0
3	岩盤 上層部(下)	306382	0.43	876252.3			1.0	0
4	岩盤 中層部	594939	0.43	1701525.0			1.0	0
5	岩盤 下層部	670759	0.42	1904954.9			1.0	0

表 8.4.4 物性値続き(軟岩斜面)

	σ'_m の下限 値 $\sigma'_{m(\min)}$ (kN/m ²)	単位質量 ρ (t/m ³)	せん断摩擦 角 ϕ (°)	粘着力 CC (kN/m ²)	せん断 強度 τ_f (kN/m ²)	引張強度 σ'_t (kN/m ²)	ハード ニング 係数h	レイリー 減衰係数 β
1	1.0	1.837	35.45(※)	60.15(※)			-0.1	0.002
2	1.0	1.735	37.3	1200.0	510	200	-0.1	0.002
3	1.0	1.735	37.3	1200.0	510	200	-0.1	0.002
4	1.0	1.837	40.3	1400.0	580	200	-0.1	0.002
5	1.0	1.939	38.3	1600.0	730	290	0.0	0.002

※ $\tau_f = 49 + 0.58 \sigma_m$ をモール・クーロン破壊と想定してC、 ϕ を換算した。

表 3.1 より、 $\sigma_v = 29.97$ (kN/m²)

表 3.2 より、 $\sigma_m = 19.98$ (kN/m²)

よって、 $C = 60.15$ (kN/m²)、 $\phi = 0.58$ (rad) = 35.45 (度)

ここで、MPM 解析は全応力による解析であるが、各地層のおおよその物理的な性質を把握するために、各地層の有効上載に対応する拘束圧で、三軸の排水試験のシミュレーションを行った。以下結果を示す。なお、初期状態の側圧係数 $K_0 = 0.5$ としている。岩盤(下層部)は、 $K_0 = 0.5$ では、弾性の応力ひずみ関係の状態はわずかで、塑性状態に非常に近い。

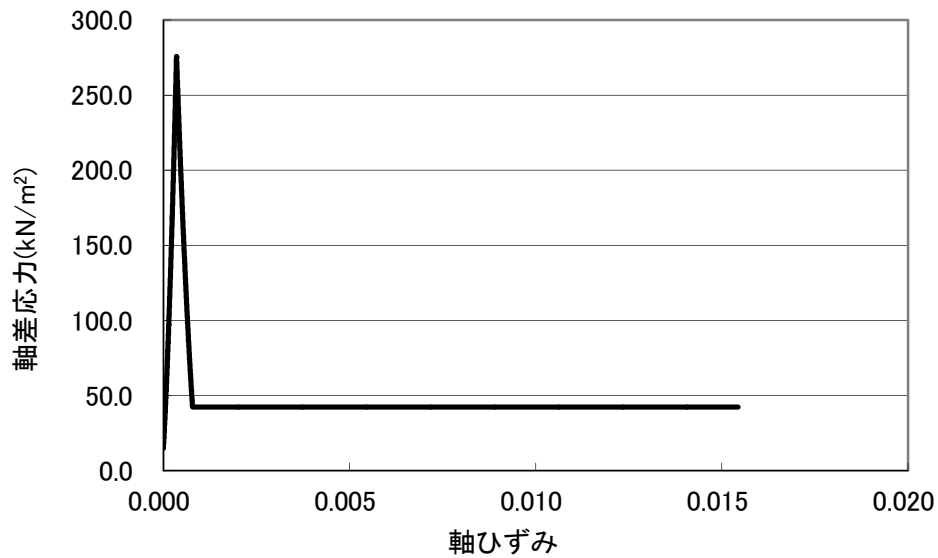


図 8.4.6 岩盤（上層部）の応力ひずみ関係

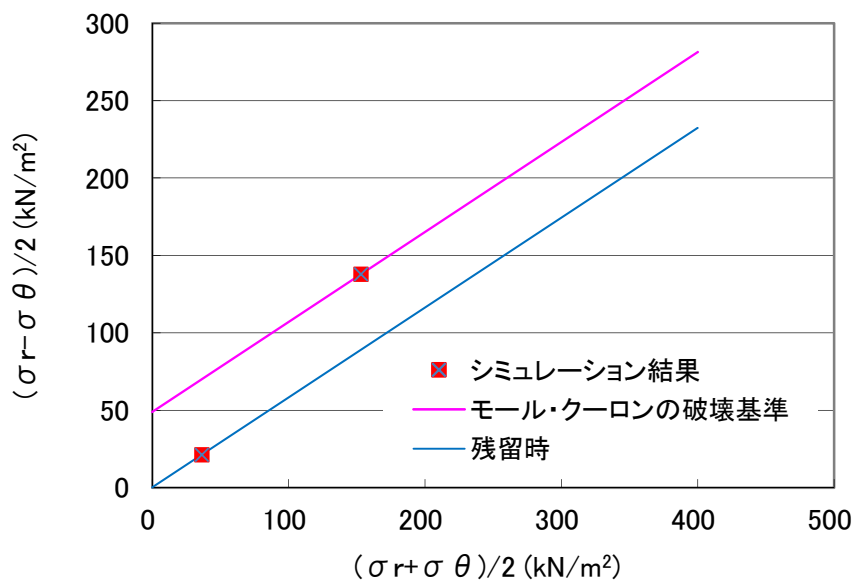


図 8.4.7 盛土（表層）の破壊時応力と破壊線

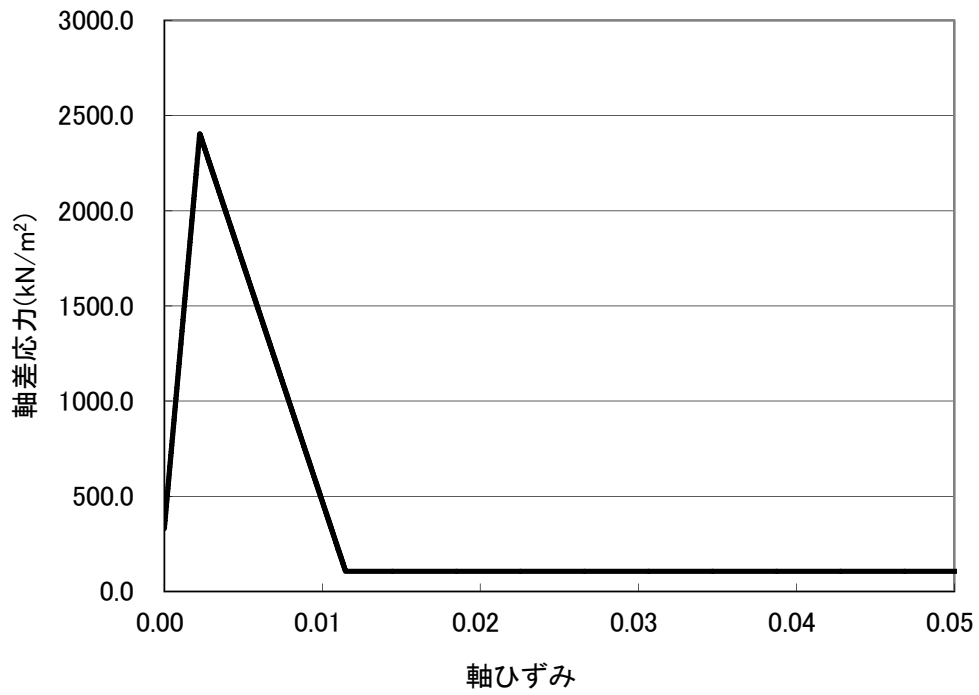


図 8.4.8 岩盤（上層部）の応力ひずみ関係

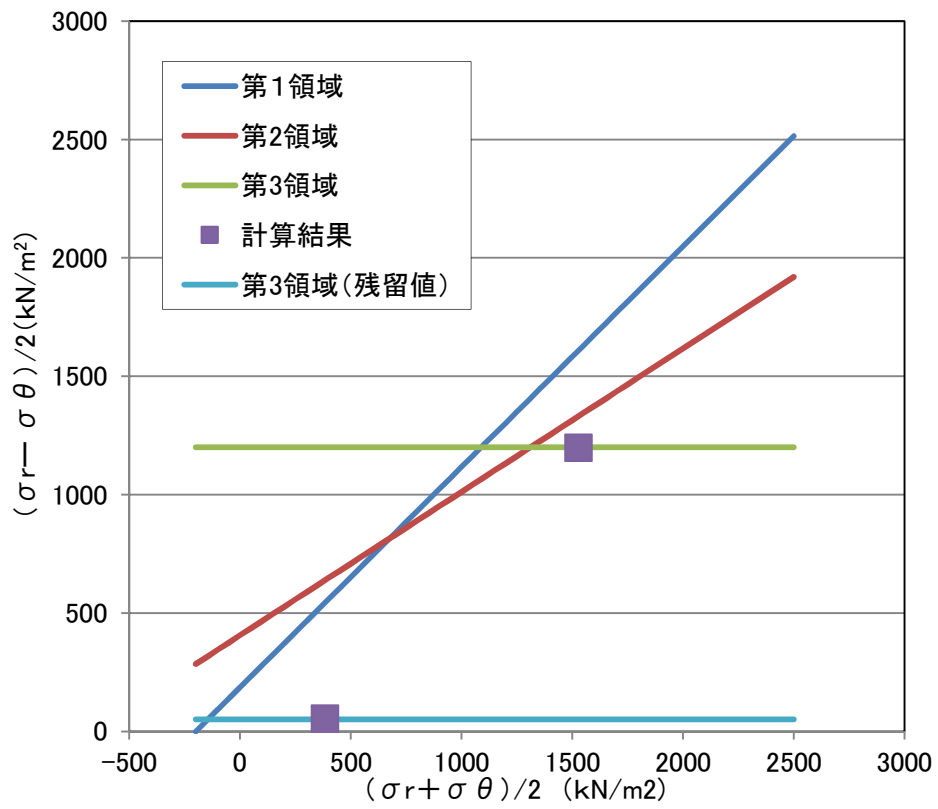


図 8.4.9 岩盤（上層部）の破壊時応力と破壊線

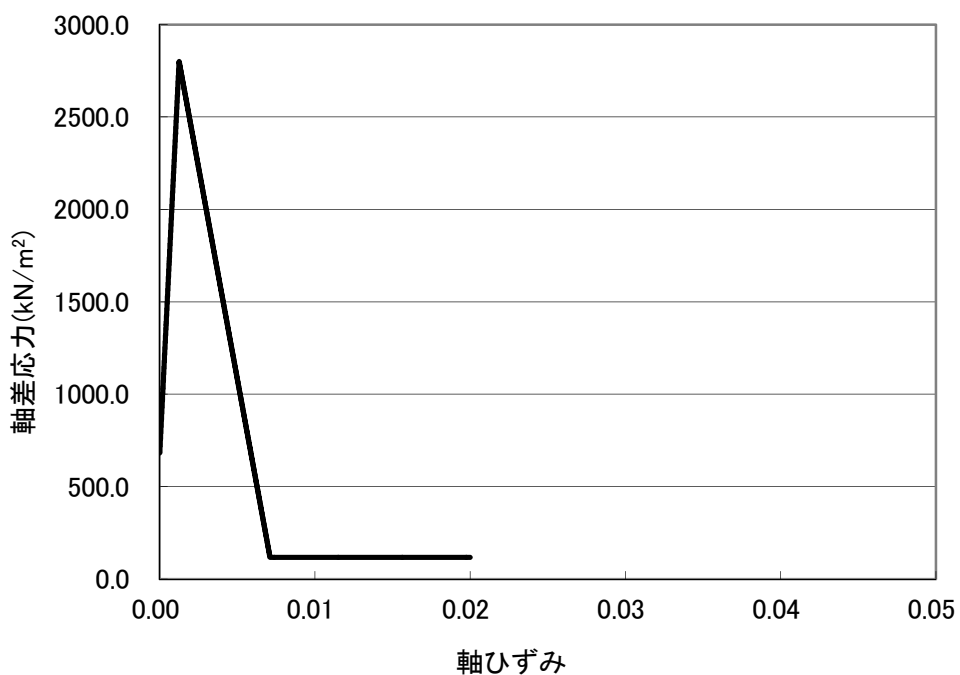


図 8. 4. 10 岩盤（中層部）の応力ひずみ関係

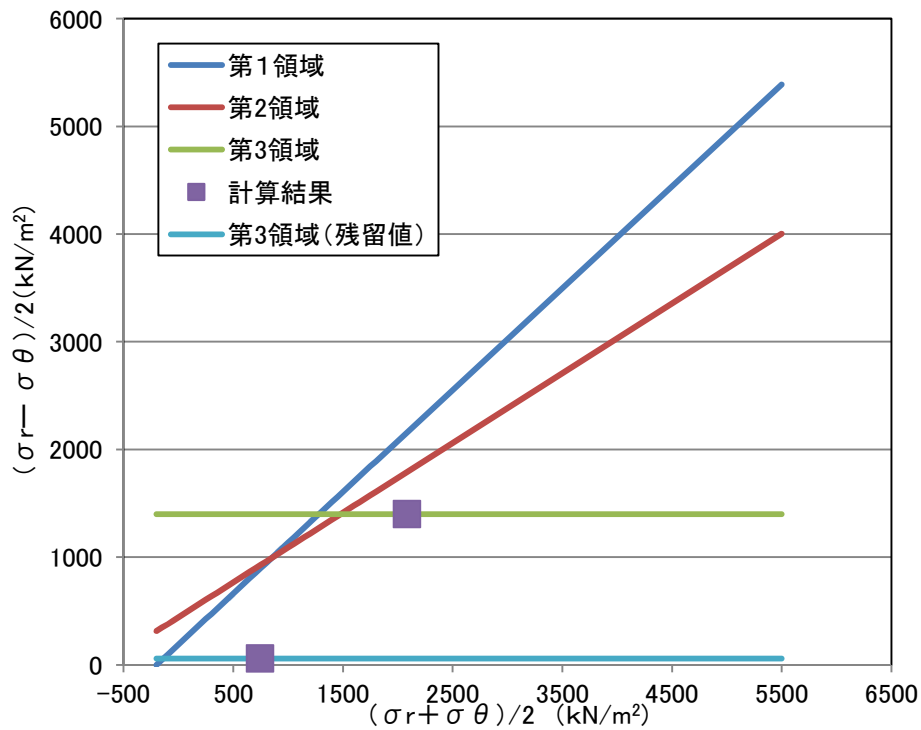


図 8. 4. 11 岩盤（中層部）の破壊時応力と破壊線

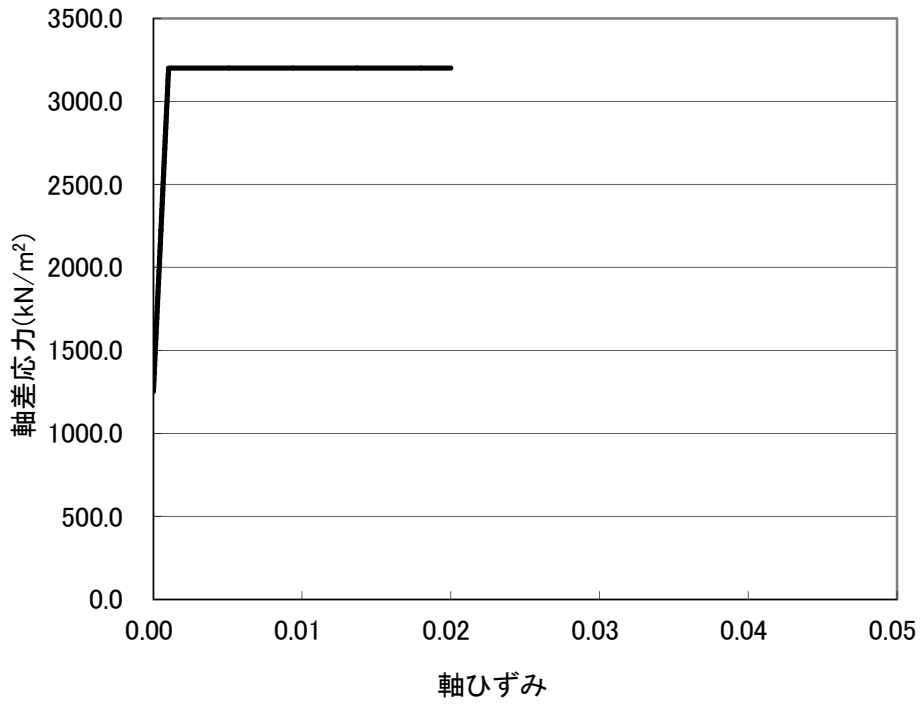


図 8. 4. 12 岩盤（下層部）の応力ひずみ関係

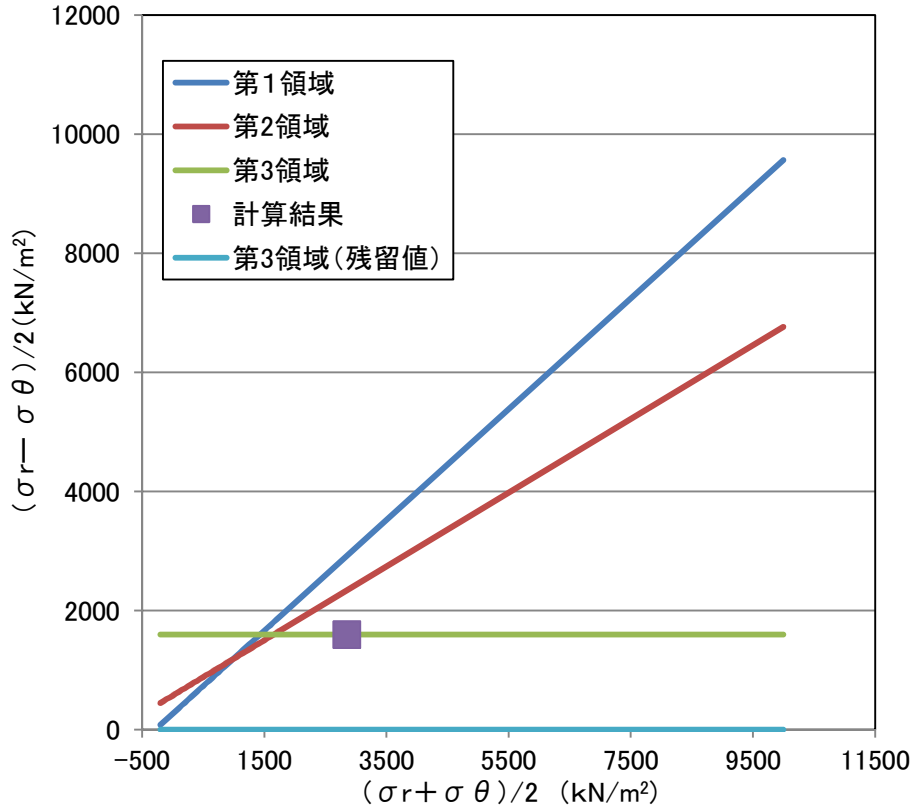


図 8. 4. 13 岩盤（下層部）の破壊時応力と破壊線

8.4.6 モデル形状、境界条件、背面格子、出力位置について

背面格子条件として、格子幅 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 5\text{m}$ 、粒子数 $2 \times 2 \times 2$ とし、表土のみ粒子数を $4 \times 4 \times 4$ とした。岩盤(下層部)の表層から 5m の位置を境界とし、上の形状をモデル化した。

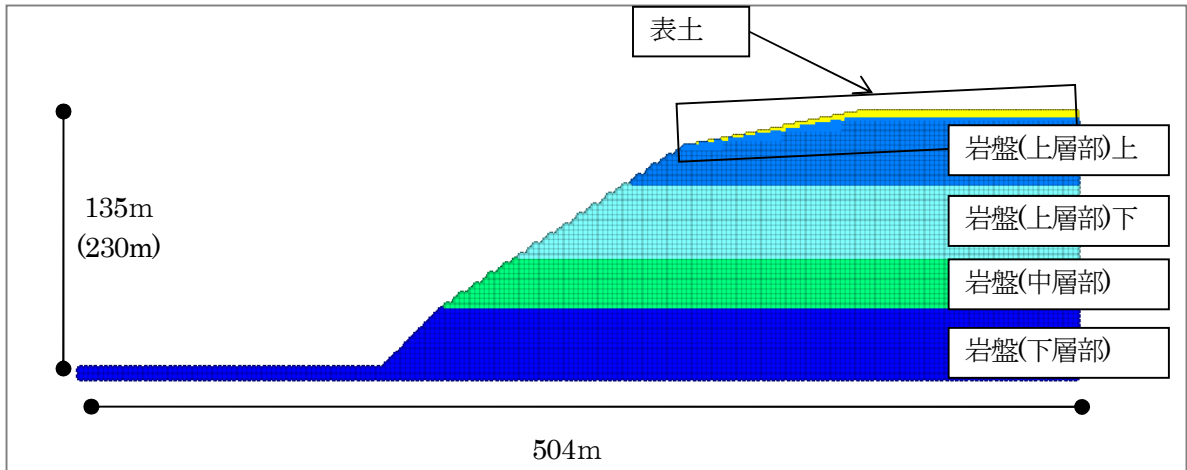


図 8.4.14 軟岩 モデル形状

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。出力位置は斜面表層の各層上下端とその中間の全 13 点とした。

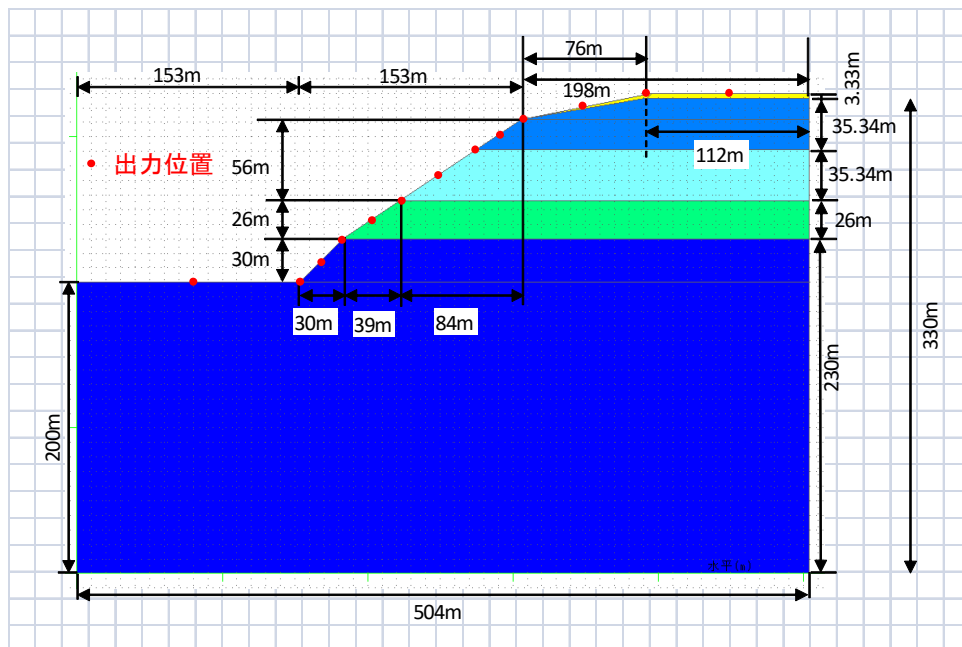


図 8.4.15 軟岩モデル出力位置

8.5 解析結果 (軟岩斜面)

8.5.1 基本ケースでの結果について (加速度の最大値の変更)

水平加速度 450gal (深度 135m 加速度の最大値を変更) 鉛直加速度 300gal とした計算を行った。「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価基準 2009 年 2 月」の図 4.2.25 に示されているすべり安全率がほぼ 1 となっており、MPM による解析においても、すべり破壊は発生しなかった。そこで、基本ケースの加速度を 1.5 倍した水平加速度 675gal (深度 135m 加速度の最大値を変更) 鉛直加速度 450gal とした計算を行った。

time = 3.00000E+01sec

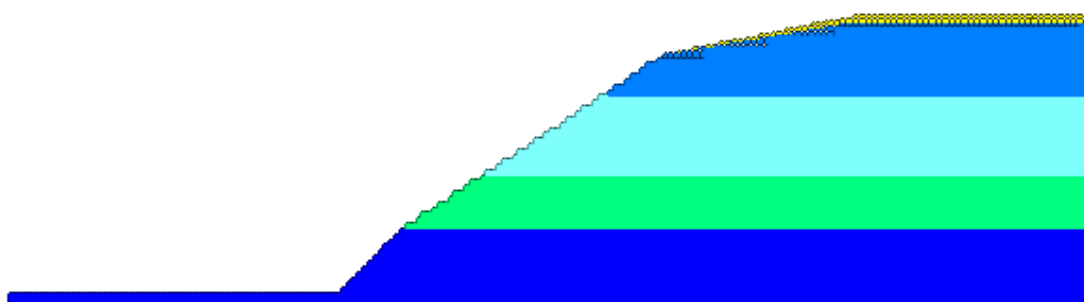


図 8.5.1 基本ケース(水平加速度 450gal、鉛直加速度 300gal)の最終状態

8.5.2 変位図

基本ケースの加速度を1.5倍した水平加速度675gal(深度135m加速度の最大値を変更)鉛直加速度450galとした計算を行った。変形の様子を10秒間隔でのスナップショットで以下に示す。

time = 1.00000E+00sec

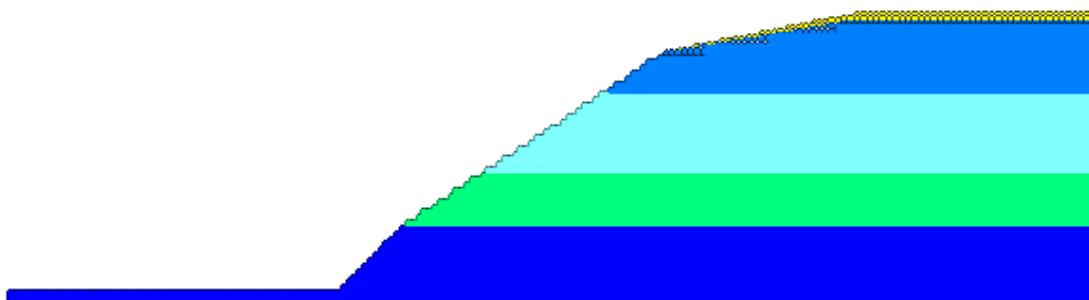


図 8.5.2 軟岩(1.0sec)

time = 1.00000E+01sec

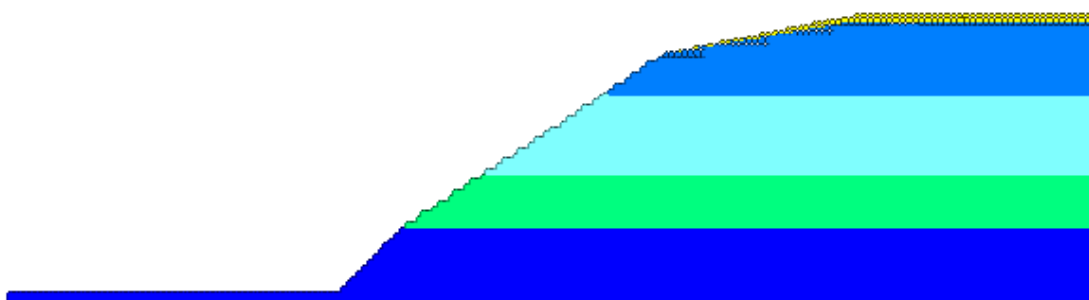


図 8.5.3 軟岩(10.0sec)

time = 2.00000E+01sec

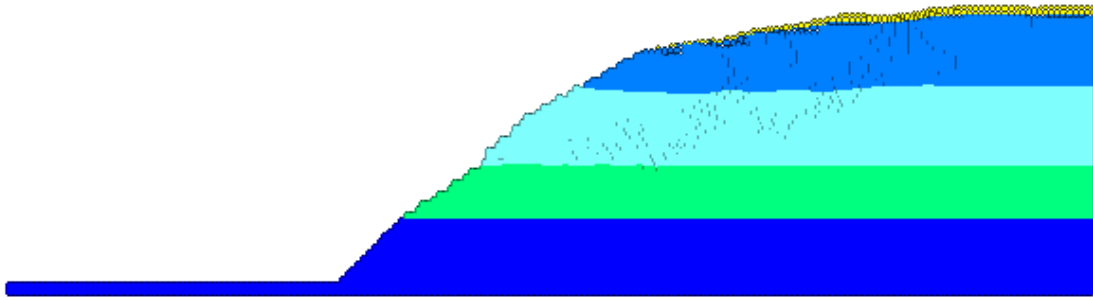


图 8.5.4 軟岩(20.0sec)

time = 3.00000E+01sec

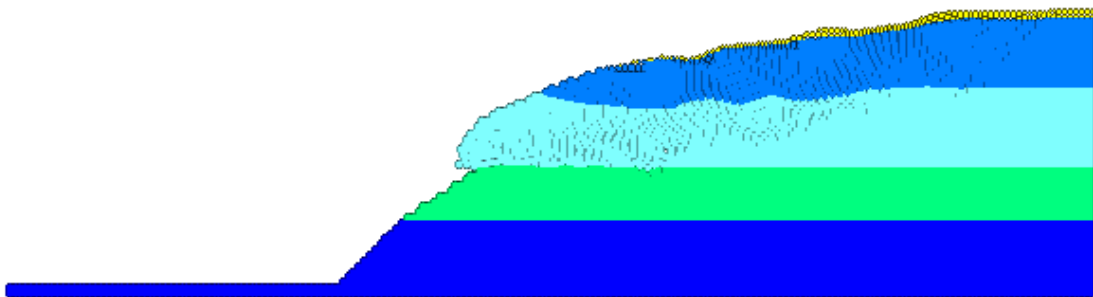


图 8.5.5 軟岩(30.0sec)

time = 4.00000E+01sec

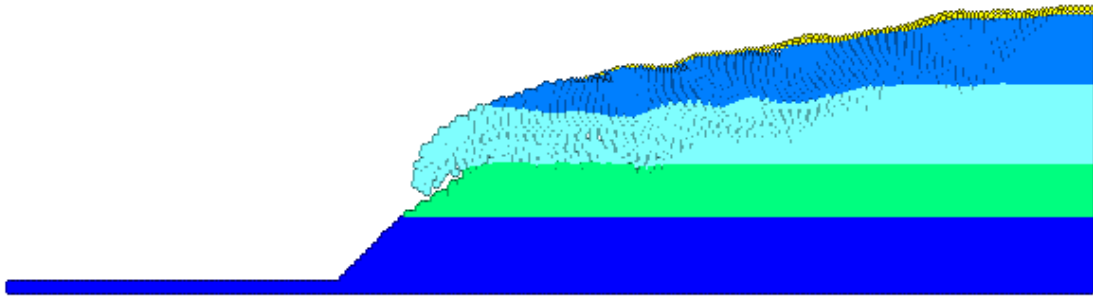


図 8.5.6 軟岩(40.0sec)

time = 5.00000E+01sec

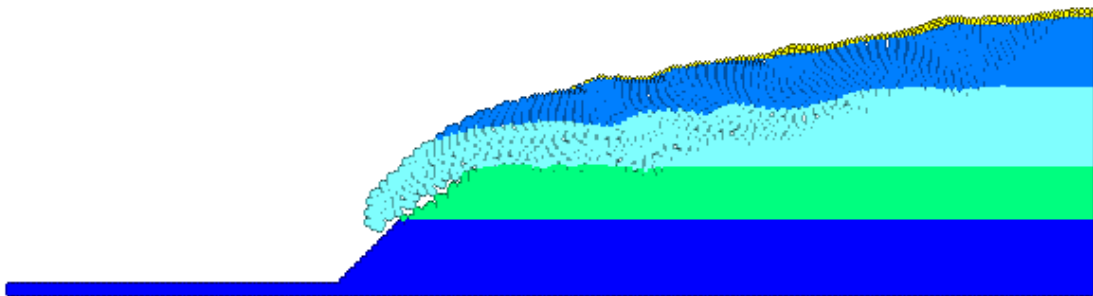


図 8.5.7 軟岩(50.0sec)

time = 6.00000E+01sec

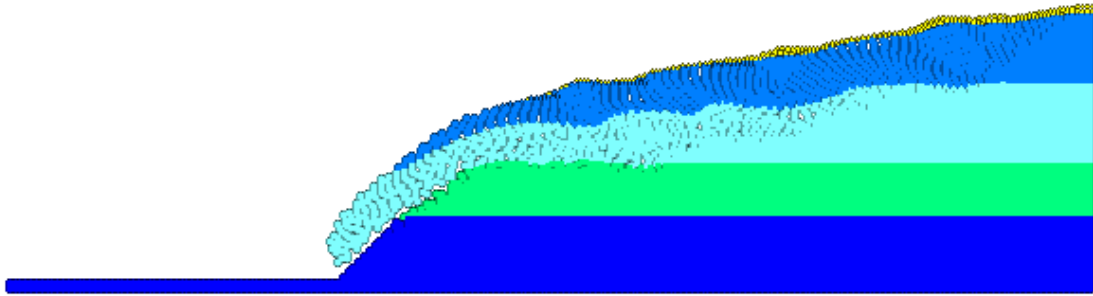


図 8.5.8 軟岩(60.0sec)

time = 7.00000E+01sec

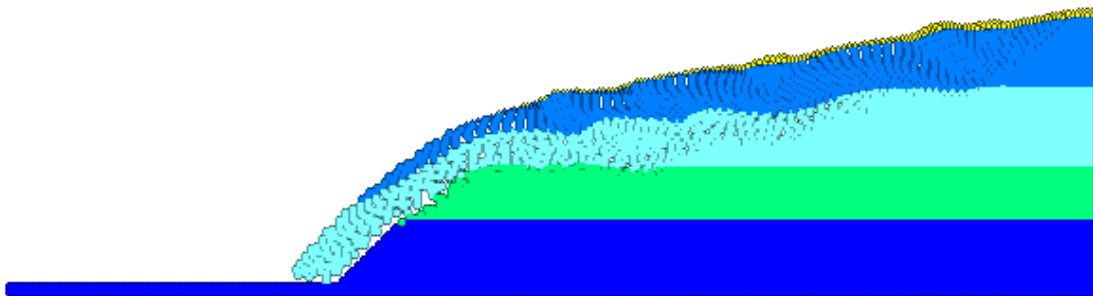


図 8.5.9 軟岩(70.0sec)

time = 8.00000E+01sec

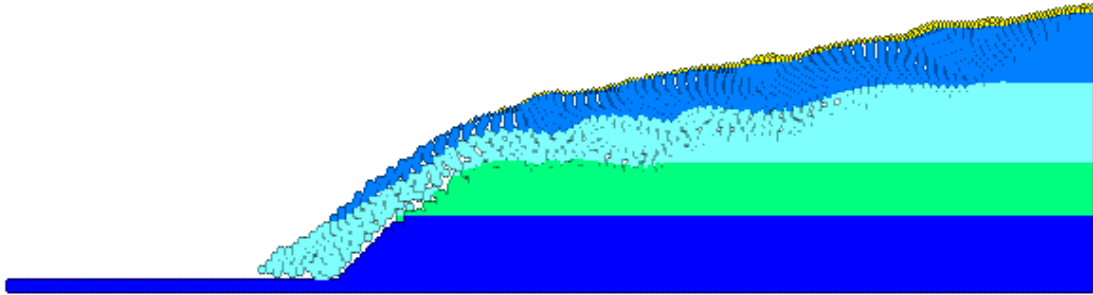


图 8.5.10 軟岩(80.0sec)

time = 9.00000E+01sec

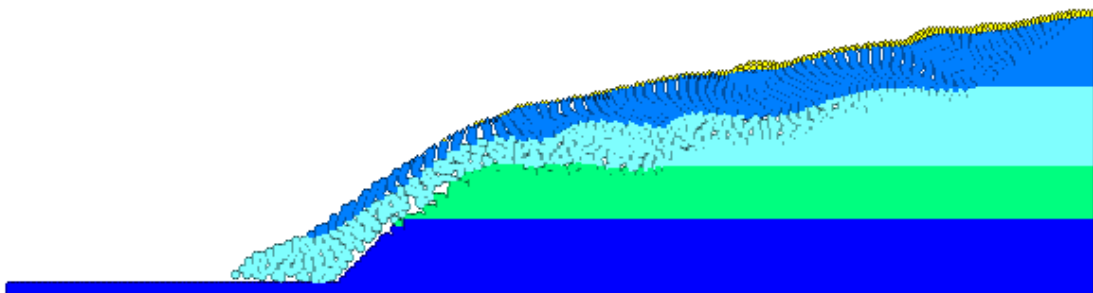


图 8.5.11 軟岩(90.0sec)

time = 1.00000E+02sec

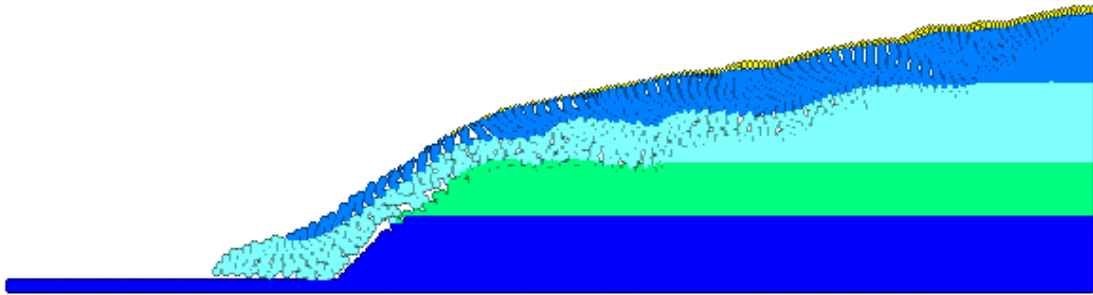


图 8.5.12 軟岩(100.0sec)

8.5.3 ひずみ図

基本ケースの加速度を1.5倍した水平加速度675gal（深度135m 加速度の最大値を変更）鉛直加速度450galとした計算を行った。ひずみの様子を加振中は5秒間隔、残留時は10秒間隔でのスナップショットを以下に示す。

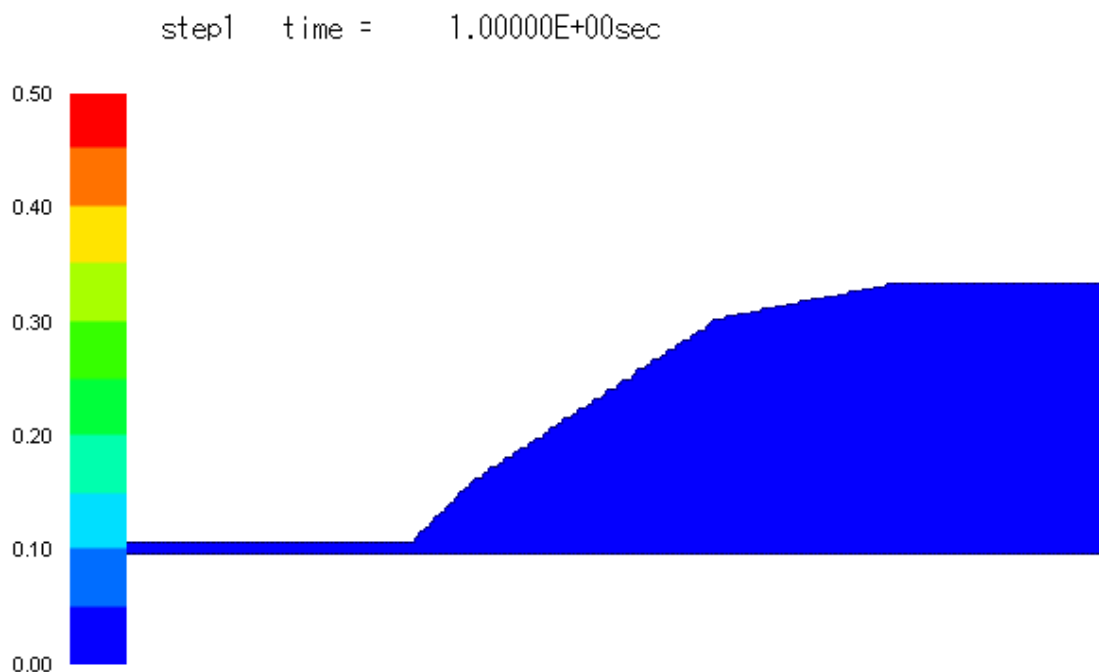


図 8.5.13 軟岩(0sec)

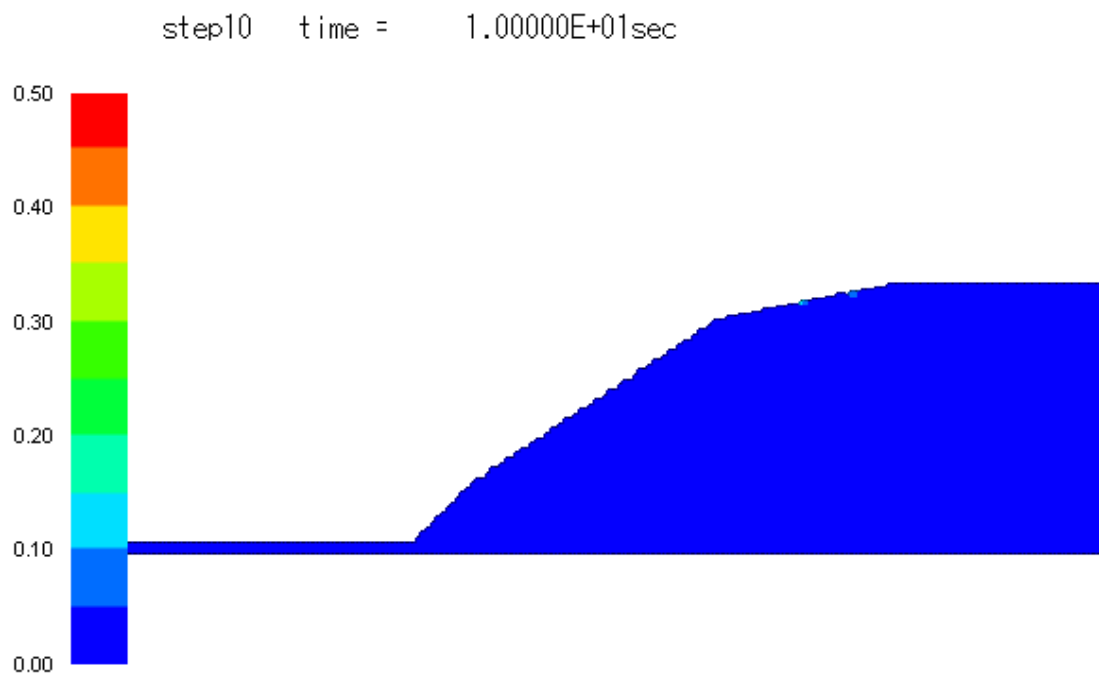


図 8.5.14 軟岩(10.0sec)

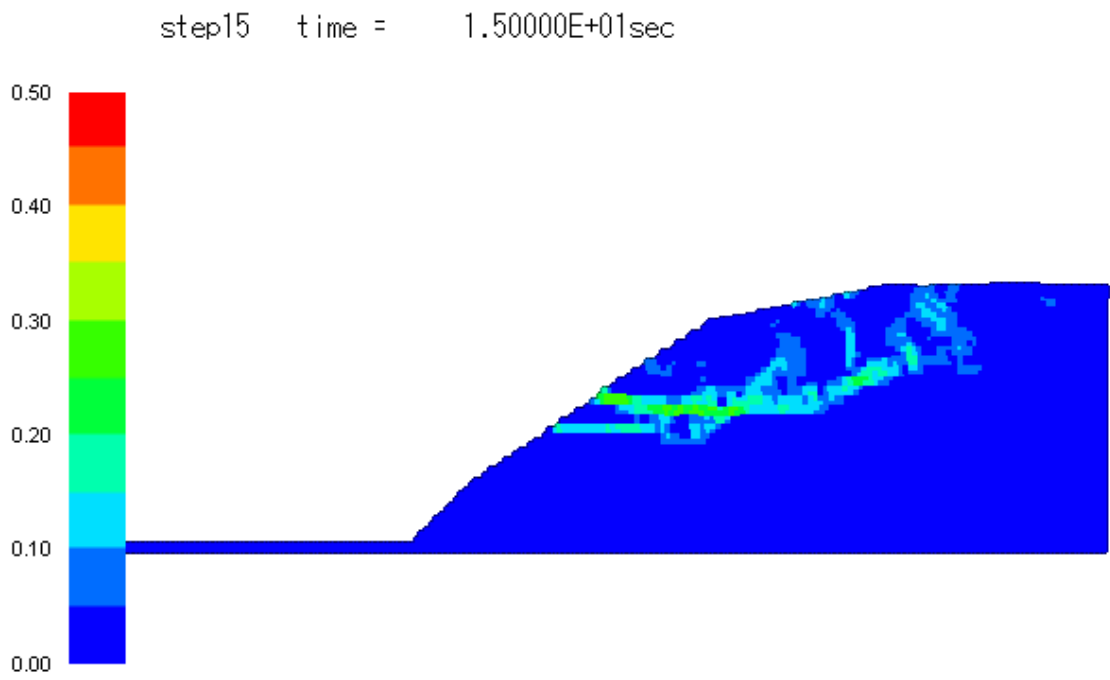


図 8.5.15 軟岩(15.0sec)

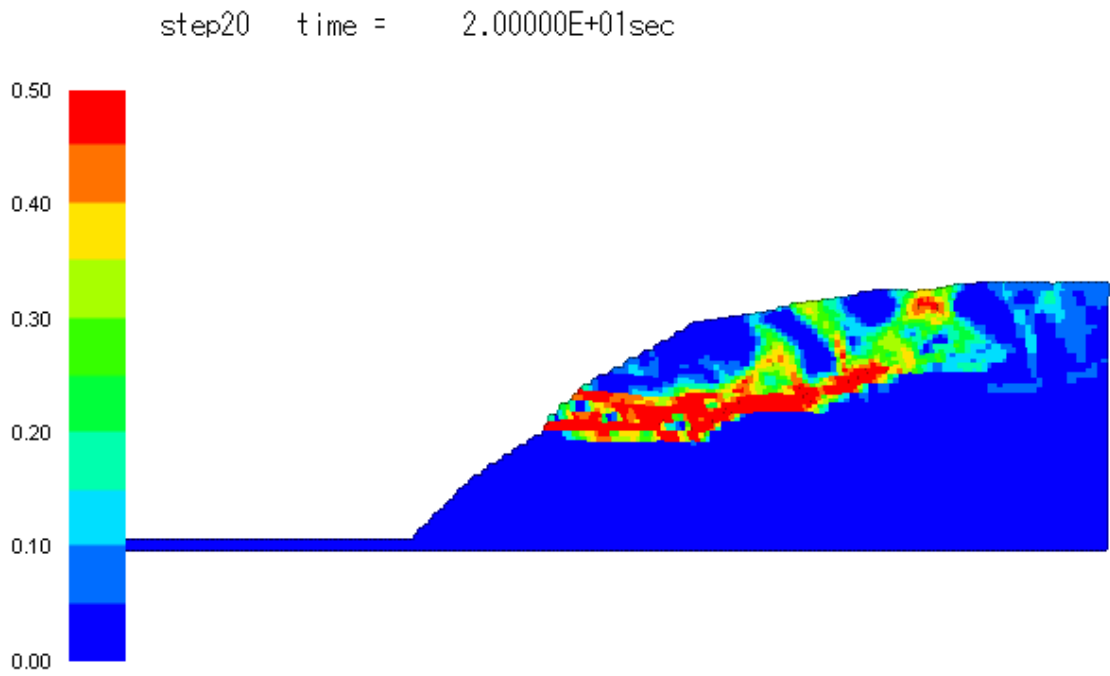


図 8.5.16 軟岩(20.0sec)

step25 time = 2.50000E+01sec

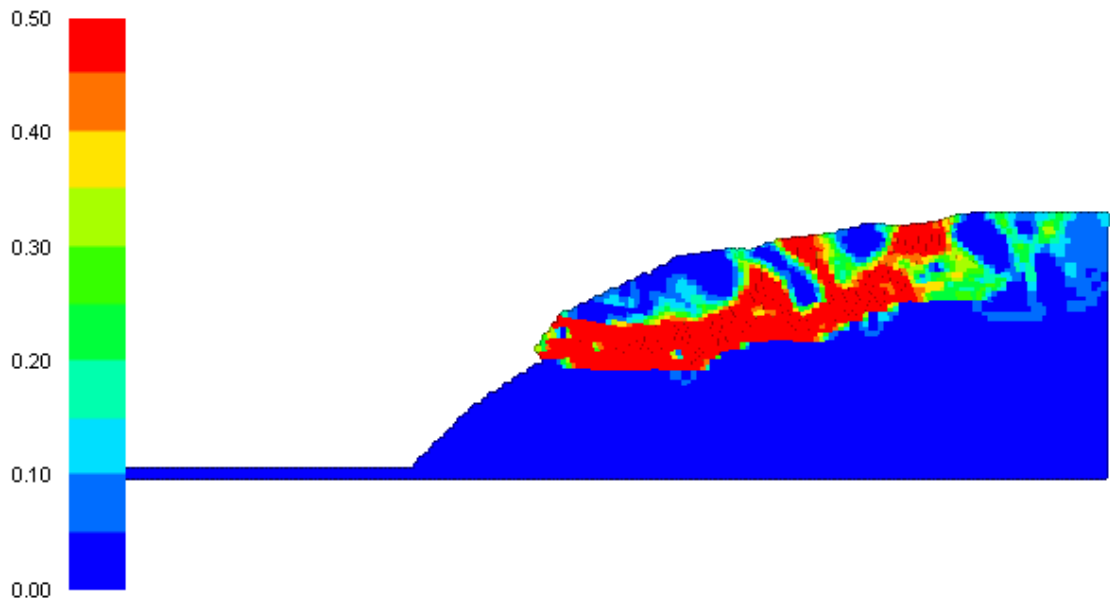


图 8.5.17 軟岩(25.0sec)

step30 time = 3.00000E+01sec

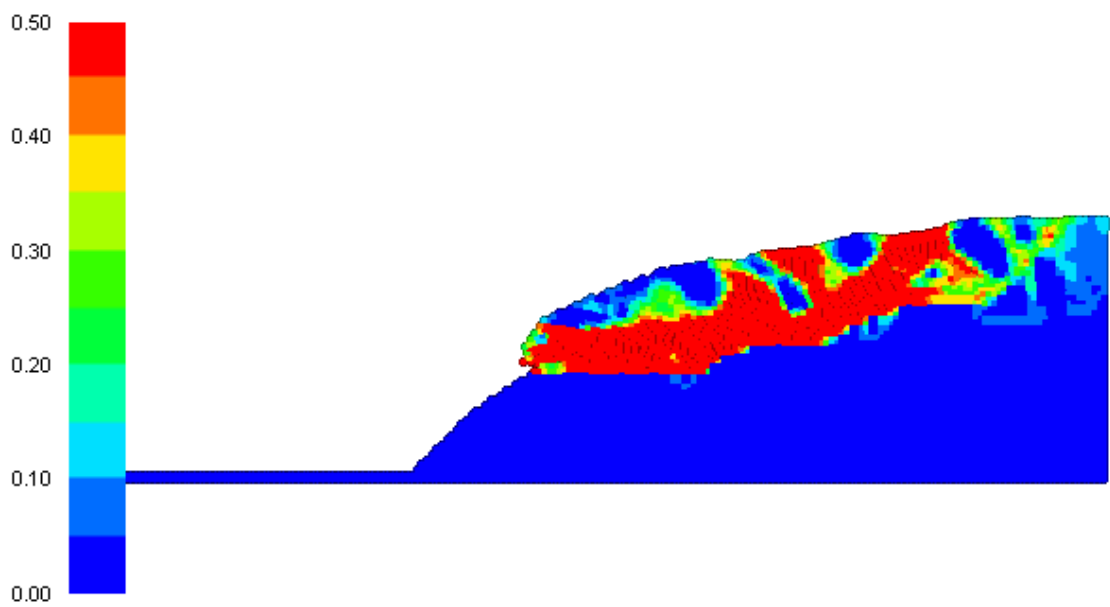


图 8.5.18 軟岩(30.0sec)

step35 time = 3.50000E+01sec

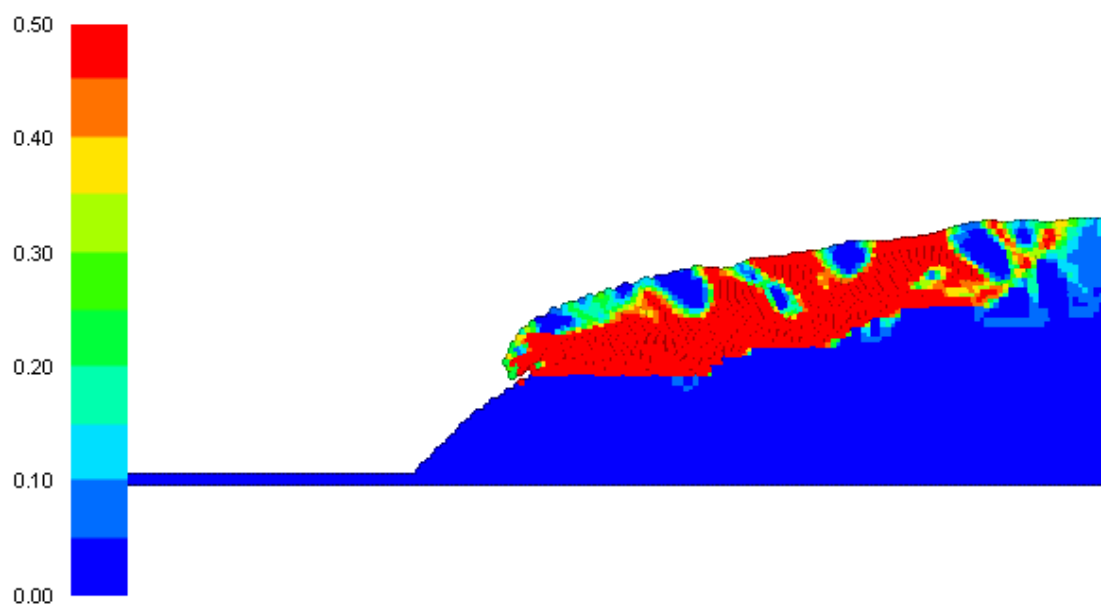


图 8.5.19 軟岩(35.0sec)

step40 time = 4.00000E+01sec

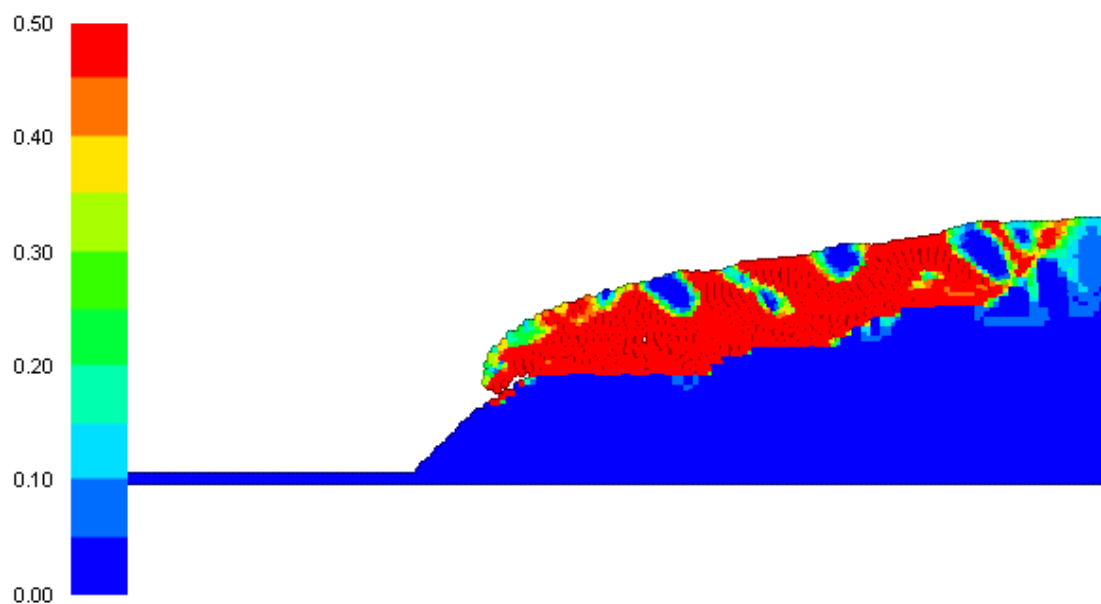


图 8.5.20 軟岩(40.0sec)

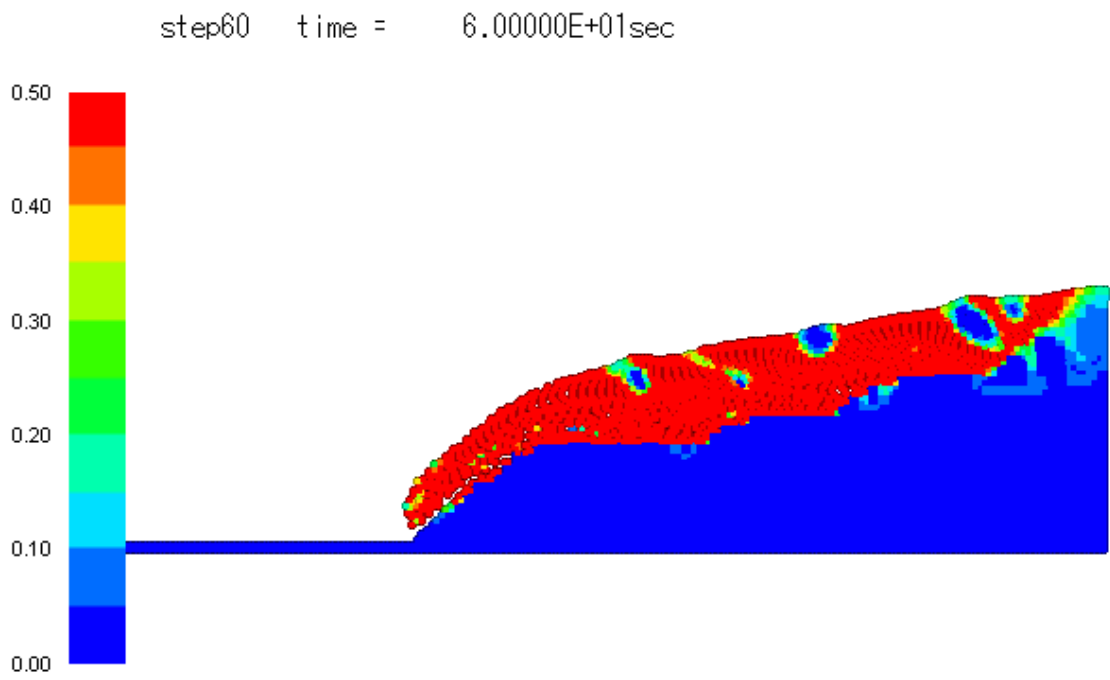


图 8.5.21 軟岩(60.0sec)

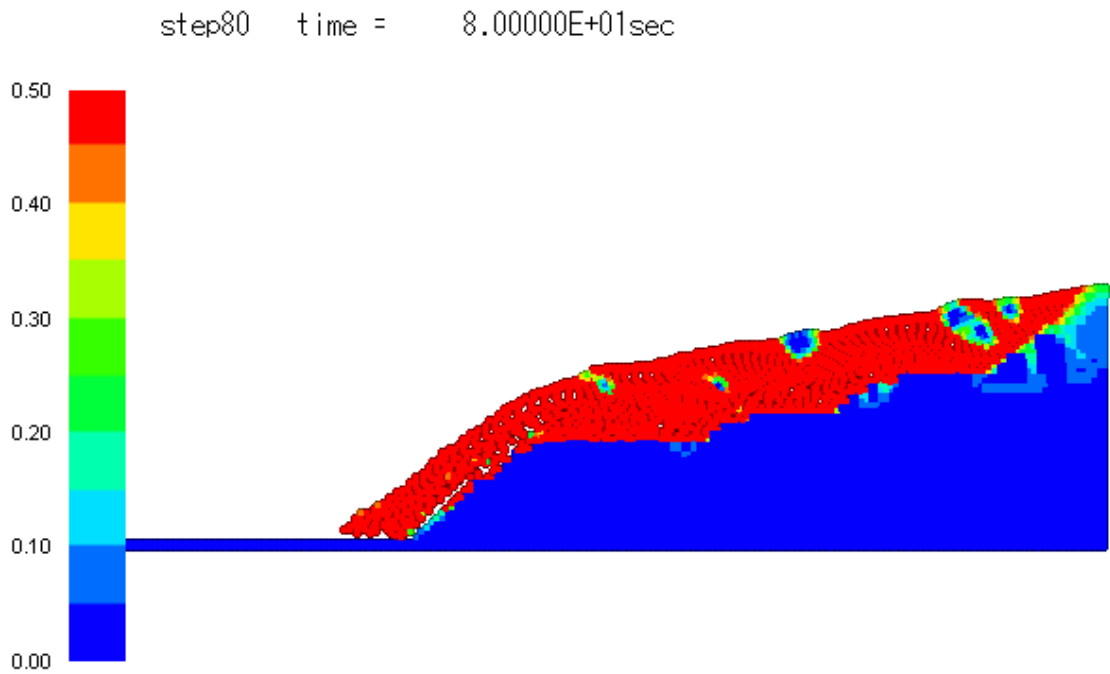


图 8.5.22 軟岩(80.0sec)

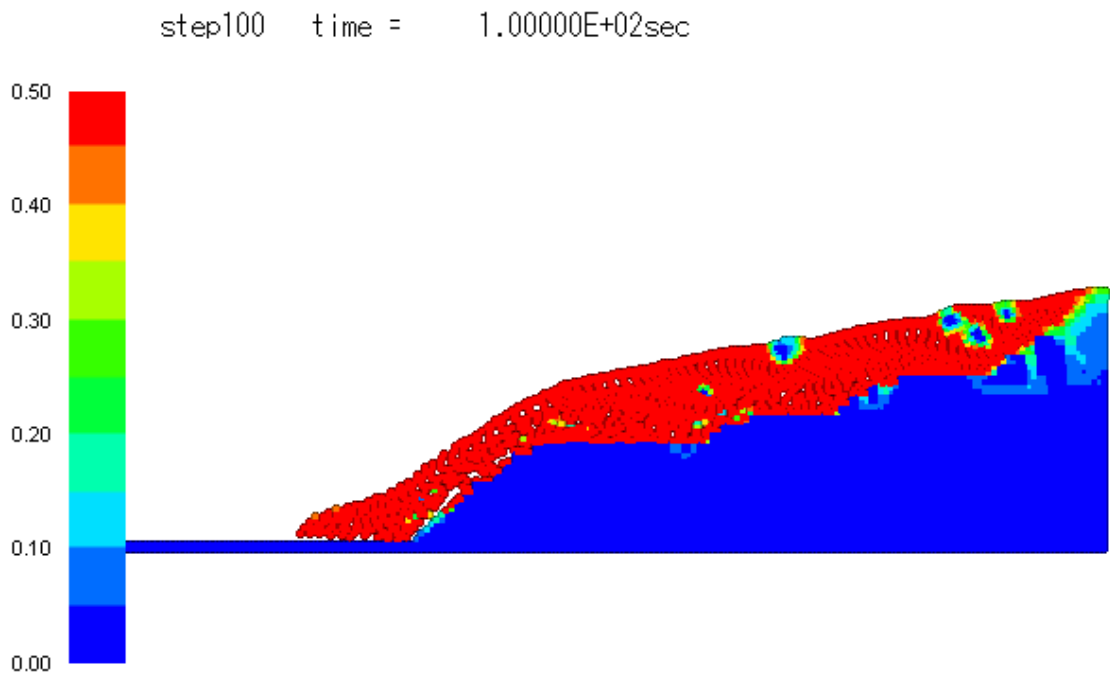


图 8.5.23 軟岩(100.0sec)

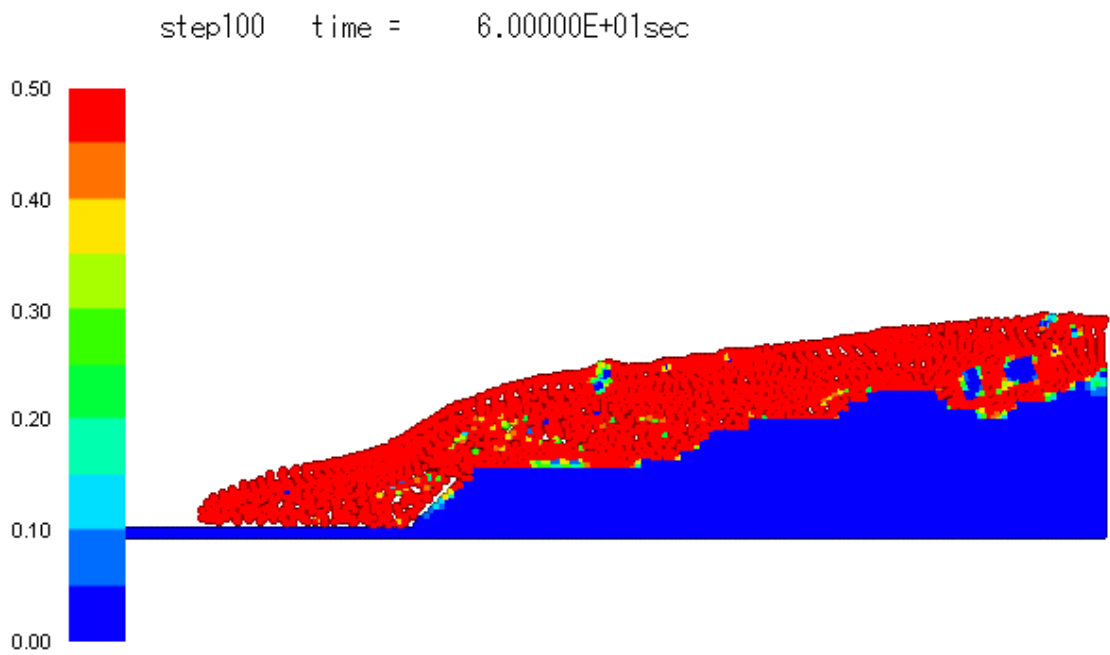


图 8.5.24 軟岩(60.0sec)

8.5.4 粒子時刻歴結果

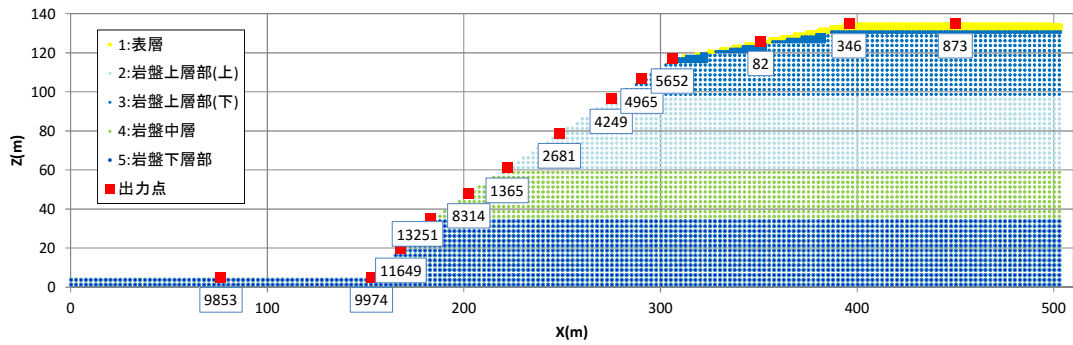


図 8.5.25 軟岩結果出力位置

表 8.5.1 軟岩出力粒子一覧

粒子番号	X 座標 (m)	Z 座標 (m)
9853	76.50	5.00
9974	153.00	5.00
11649	168.00	20.00
13251	183.00	35.00
8314	202.50	48.00
1365	222.00	61.00
2681	248.50	78.67
4249	275.00	96.34
4965	290.50	106.70
5652	306.00	117.00
82	351.00	126.00
346	396.00	135.00
873	450.00	135.00

(1) 水平方向変位時刻歴

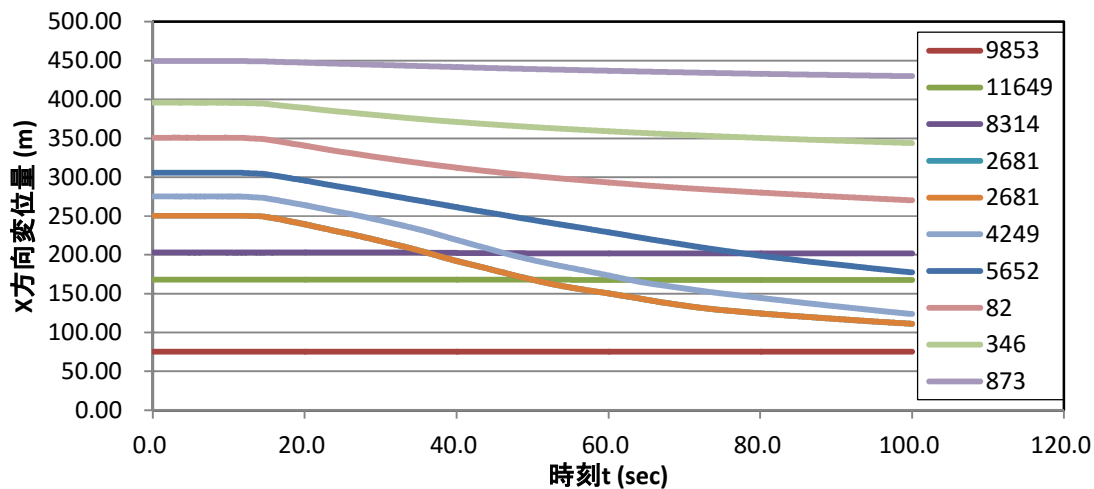


图 8.5.26 水平方向変位時刻歴

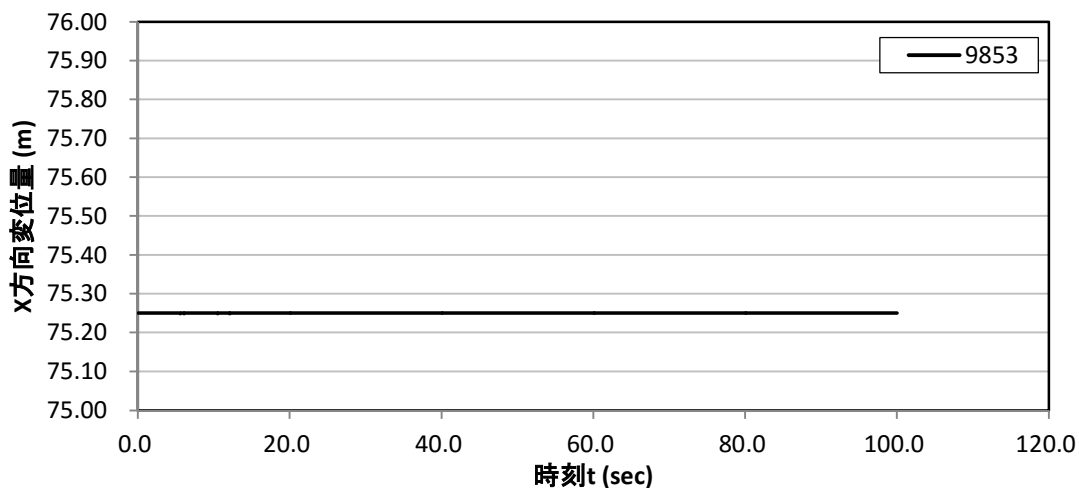


图 8.5.27 水平方向変位時刻歴(粒子番号 9853)

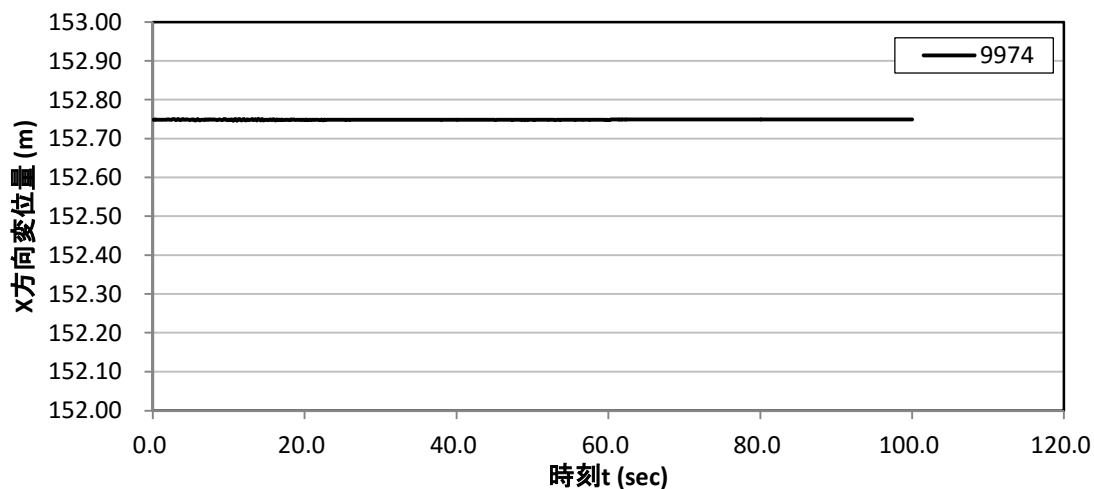


图 8.5.28 水平方向変位時刻歴(粒子番号 9974)

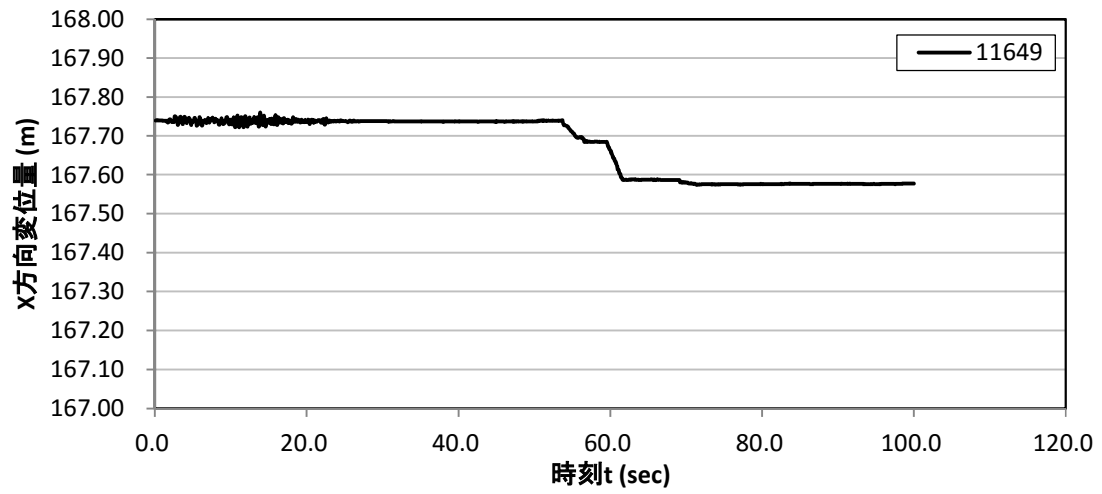


図 8. 5. 29 水平方向変位時刻歴(粒子番号 11649)

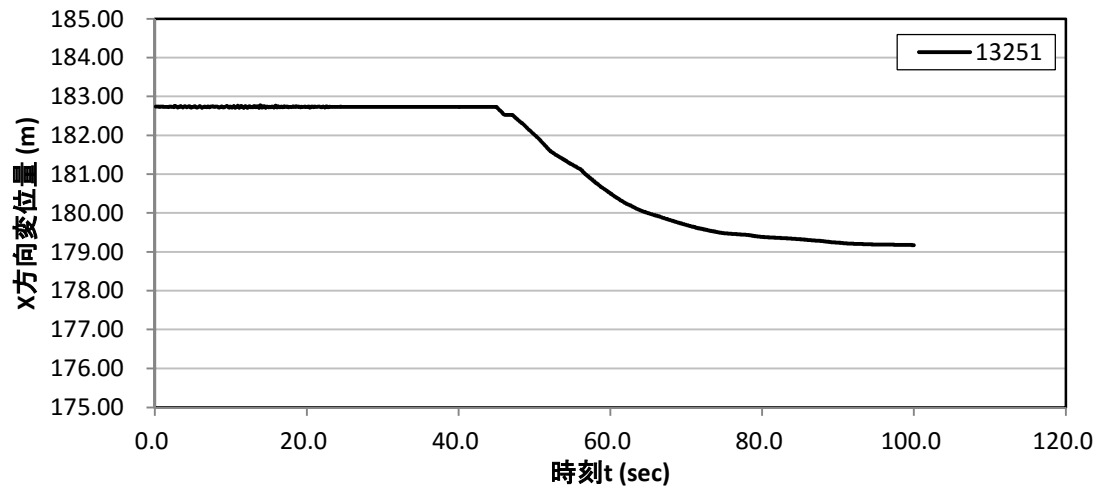


図 8. 5. 30 水平方向変位時刻歴(粒子番号 13251)

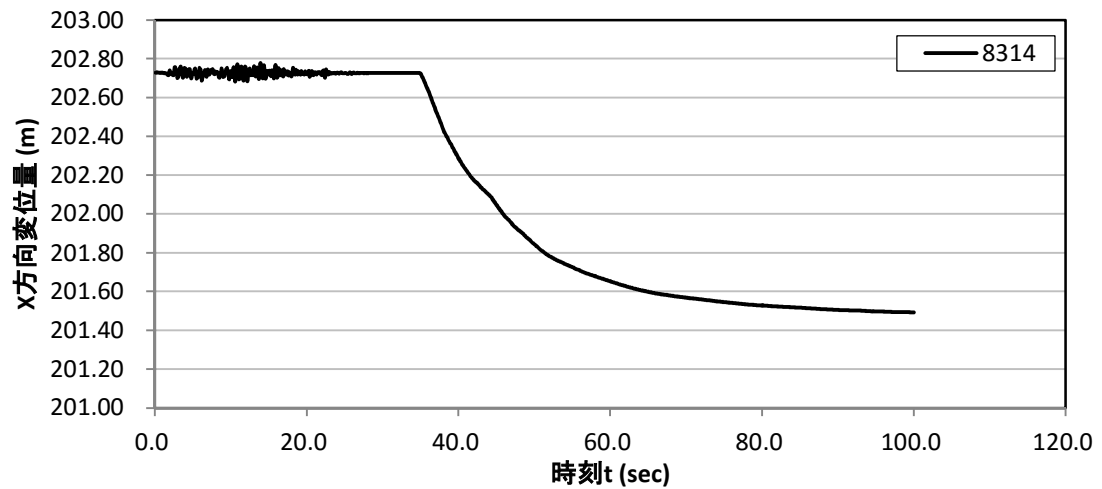


図 8. 5. 31 水平方向変位時刻歴(粒子番号 8314)

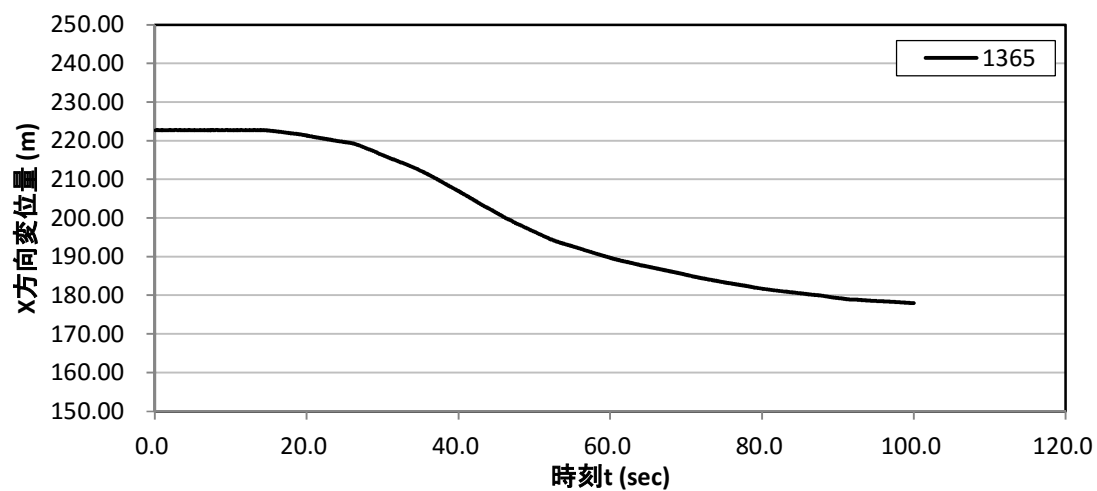


图 8.5.32 水平方向変位時刻歴(粒子番号 1365)

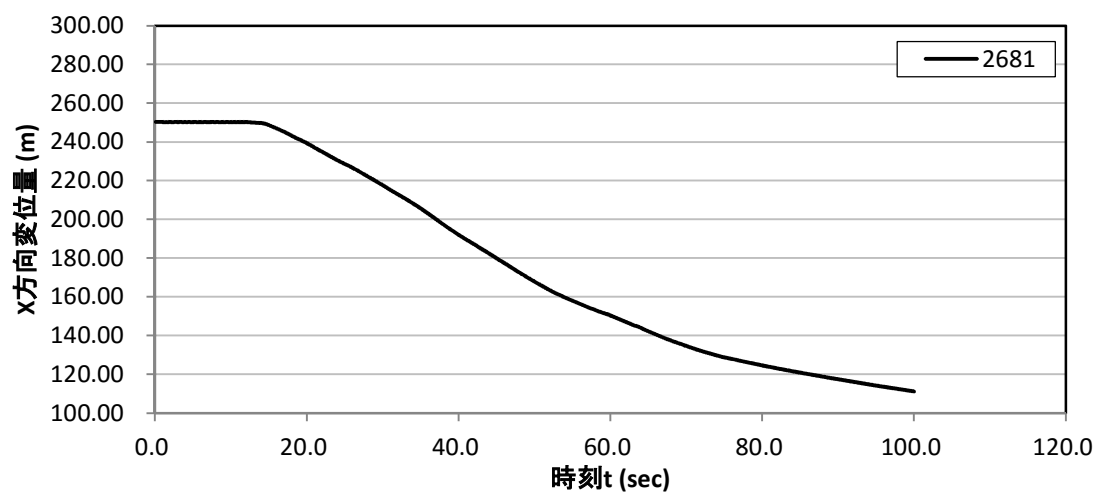


图 8.5.33 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2681)

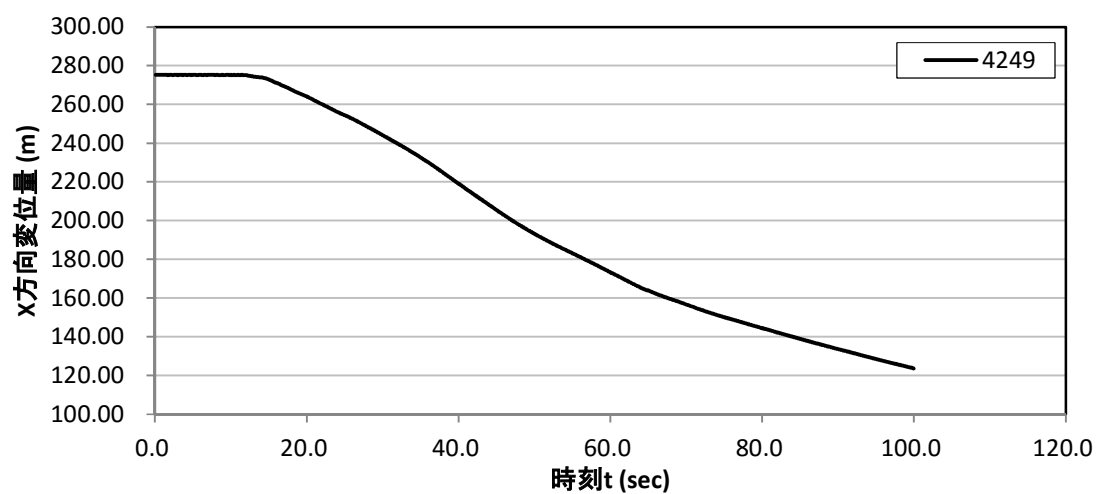


图 8.5.34 水平方向変位時刻歴(粒子番号 4249)

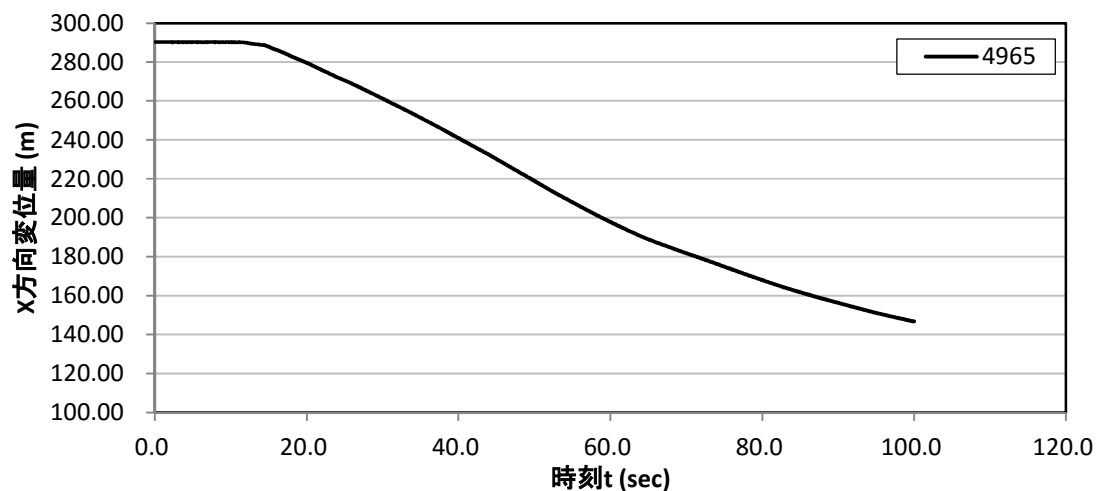


图 8.5.35 水平方向変位時刻歴(粒子番号 4965)

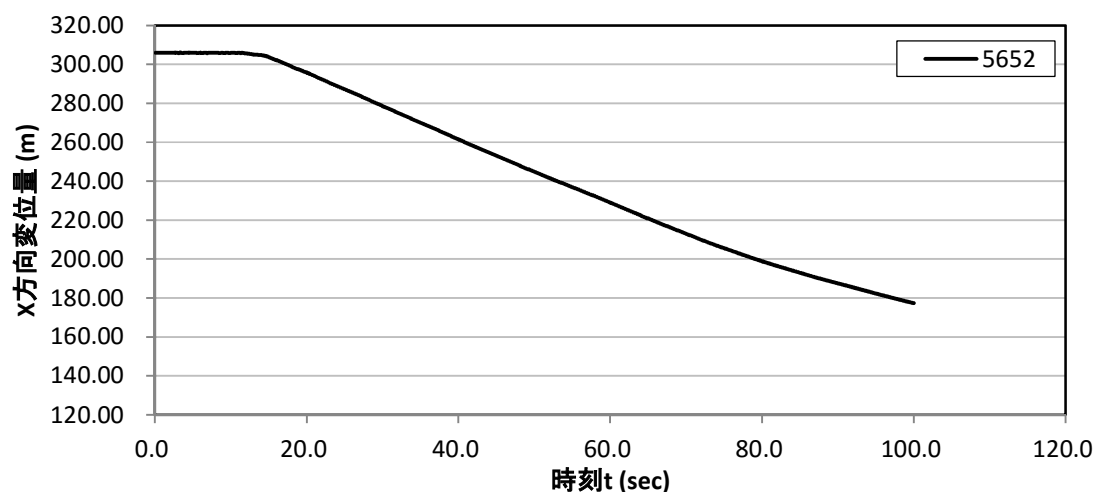


图 8.5.36 水平方向変位時刻歴(粒子番号 5652)

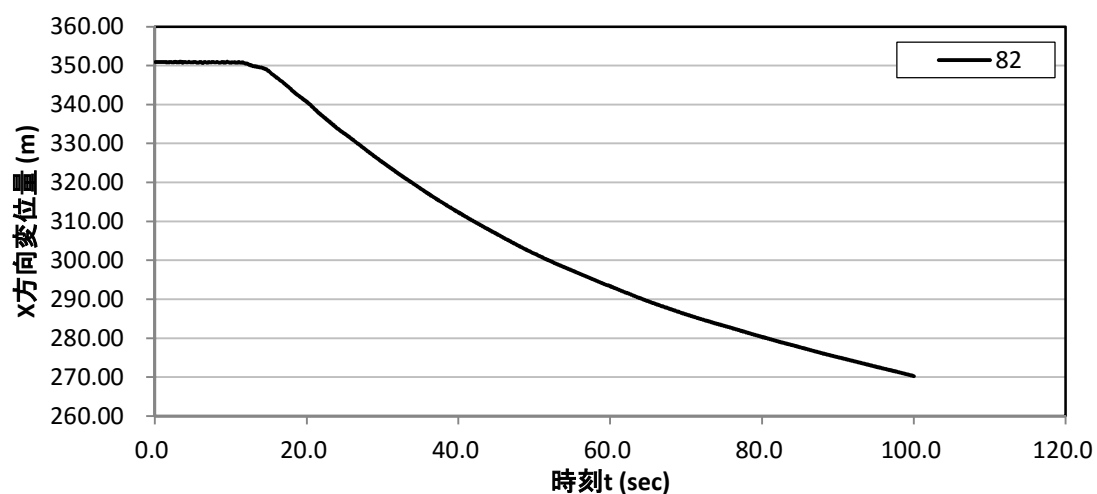


图 8.5.37 水平方向変位時刻歴(粒子番号 82)

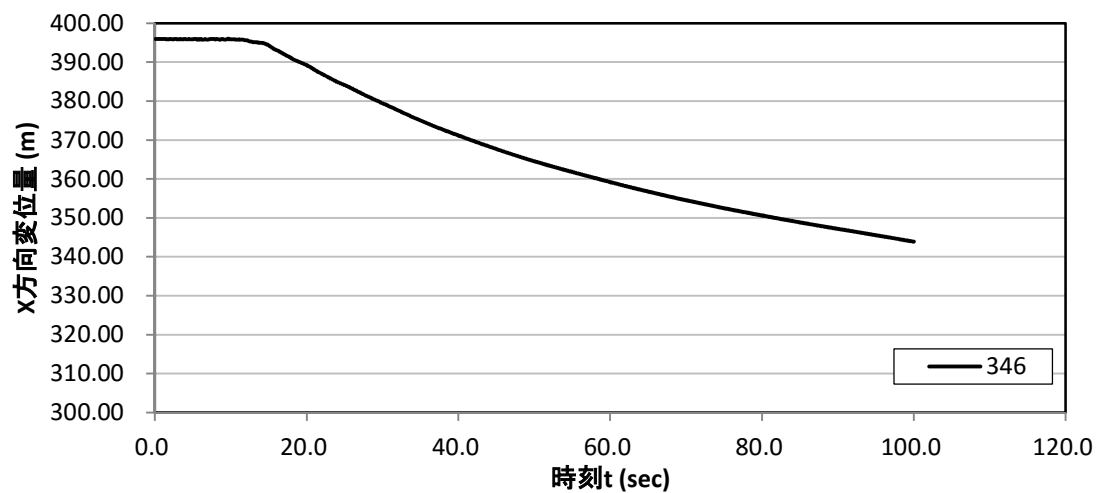


図 8.5.38 水平方向変位時刻歴(粒子番号 346)

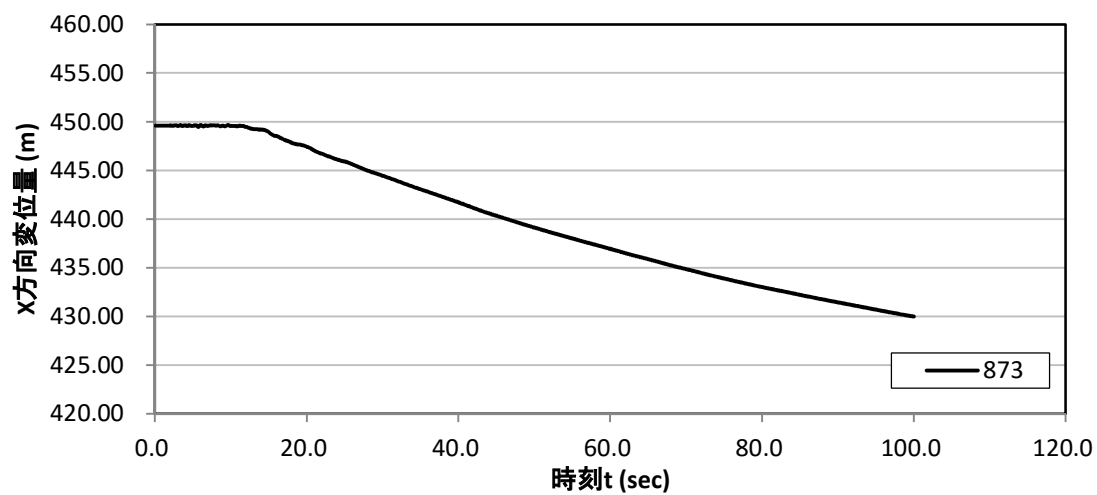


図 8.5.39 水平方向変位時刻歴(粒子番号 873)

(2) 鉛直方向変位時刻歴

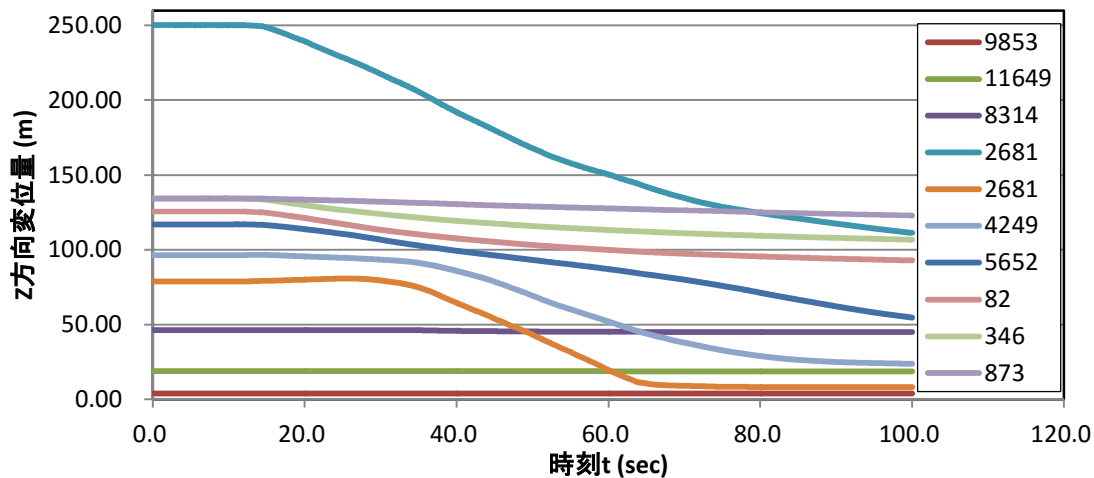


図 8.5.40 鉛直方向変位時刻歴

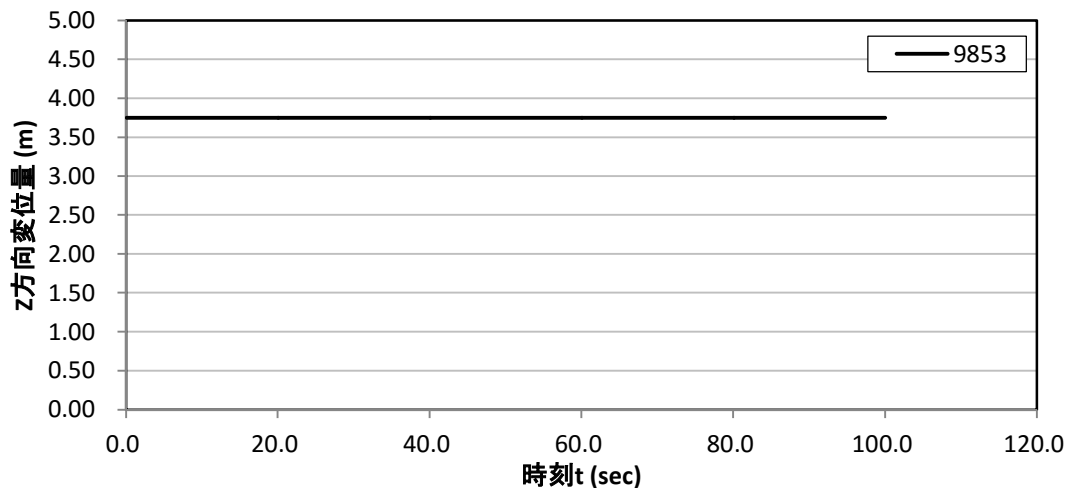


図 8.5.41 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 9853)

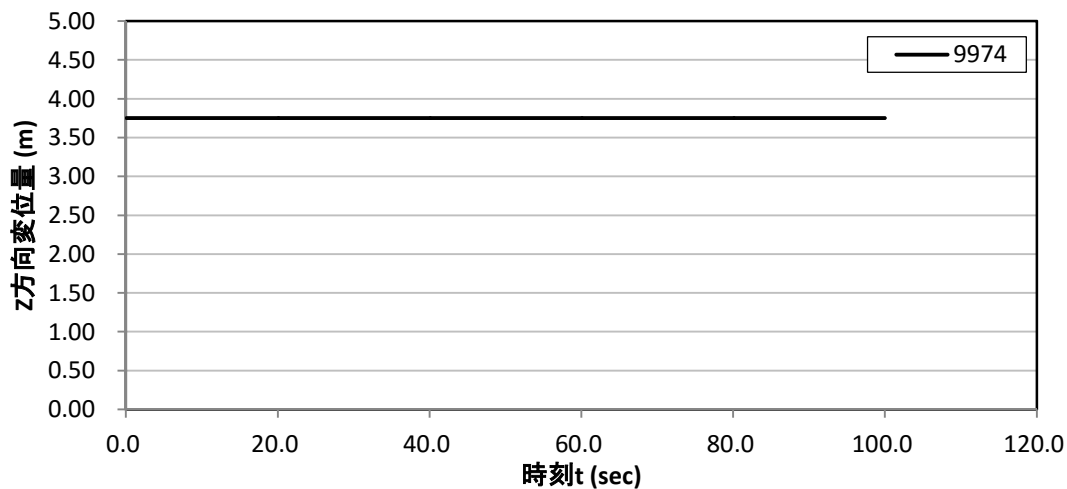


図 8.5.42 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 9974)

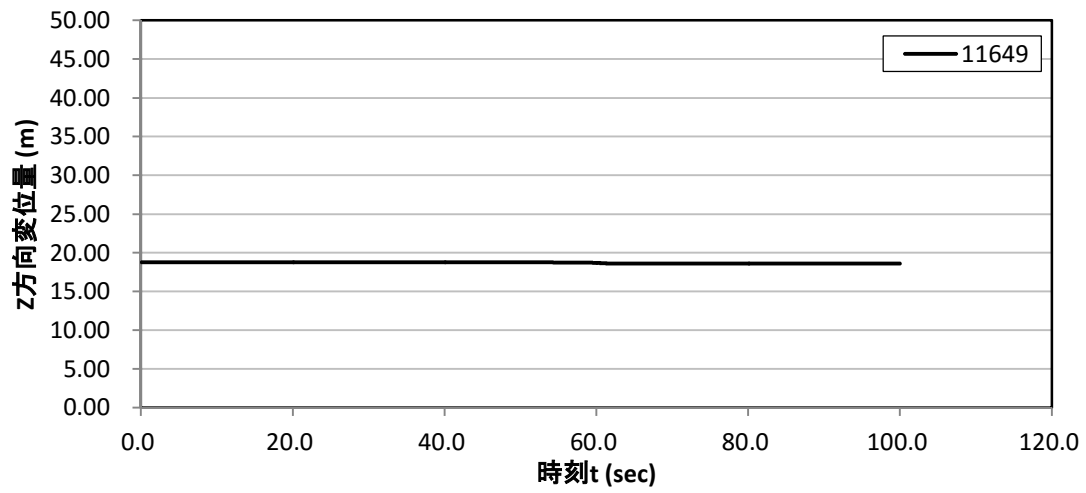


図 8. 5. 43 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 11649)

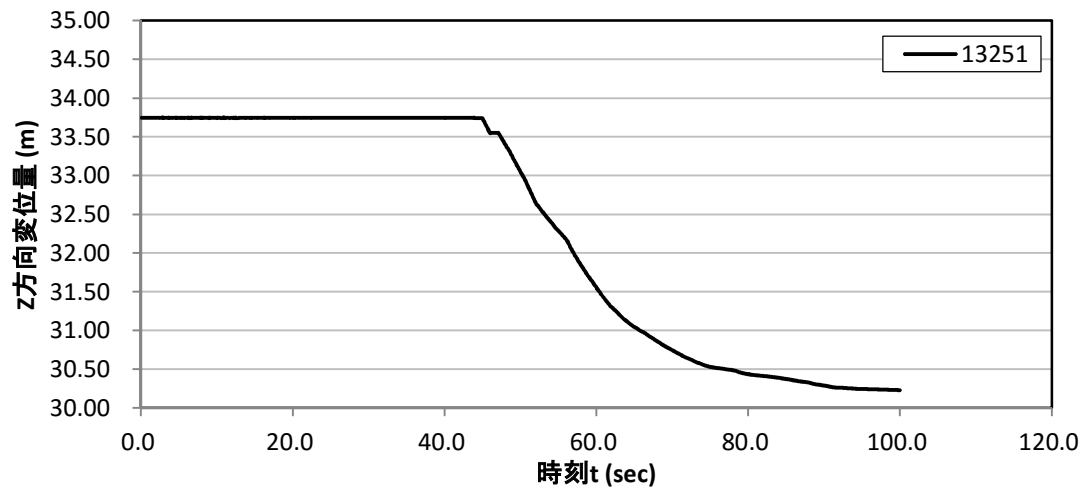


図 8. 5. 44 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 13251)

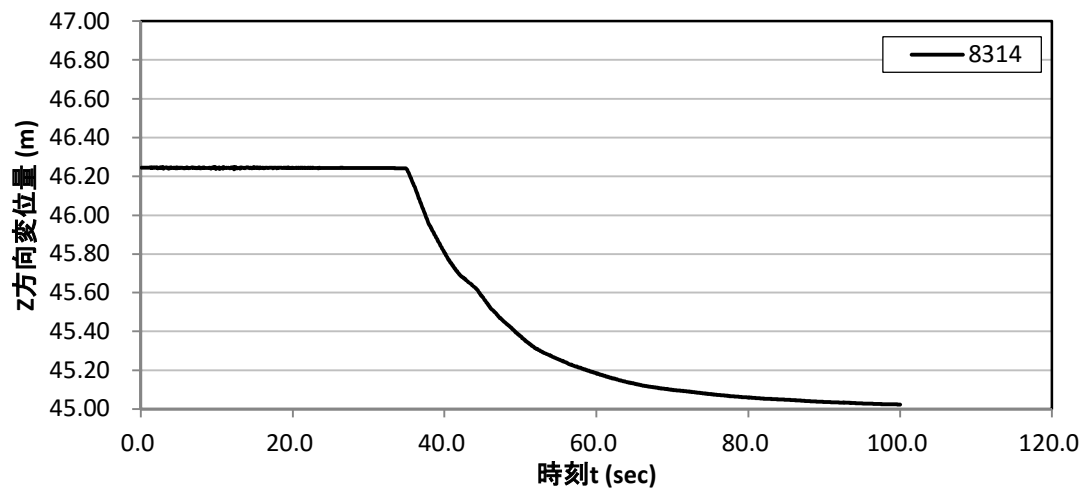


図 8. 5. 45 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 8314)

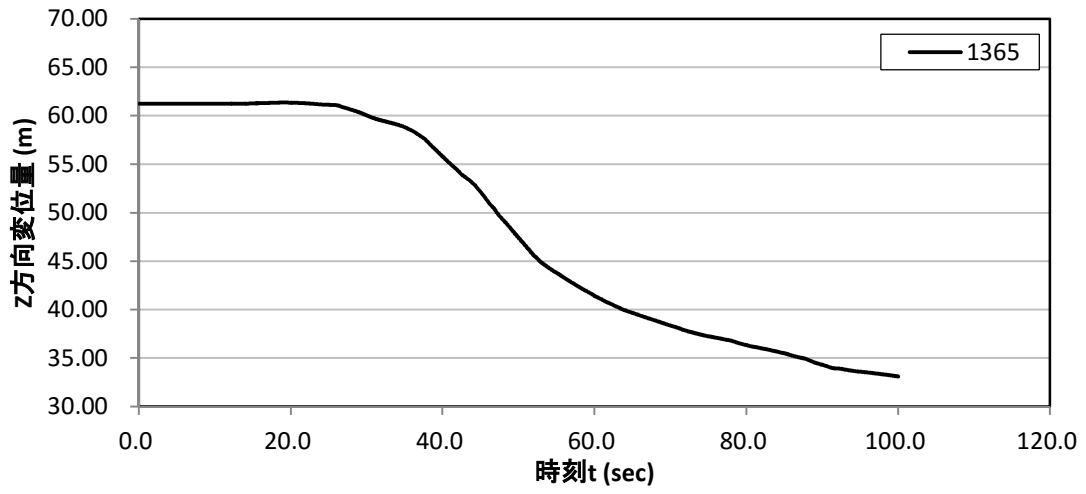


図 8.5.46 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 1365)

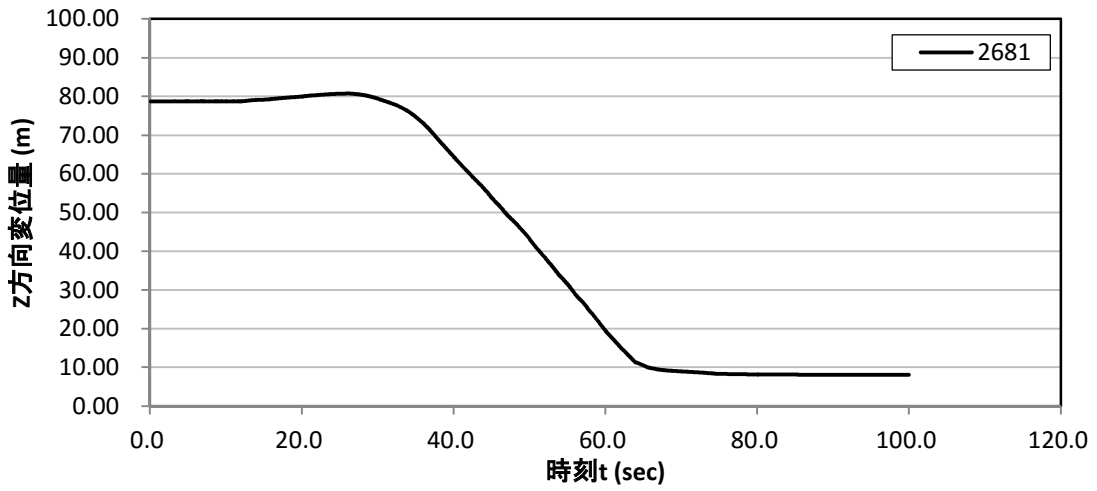


図 8.5.47 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2681)

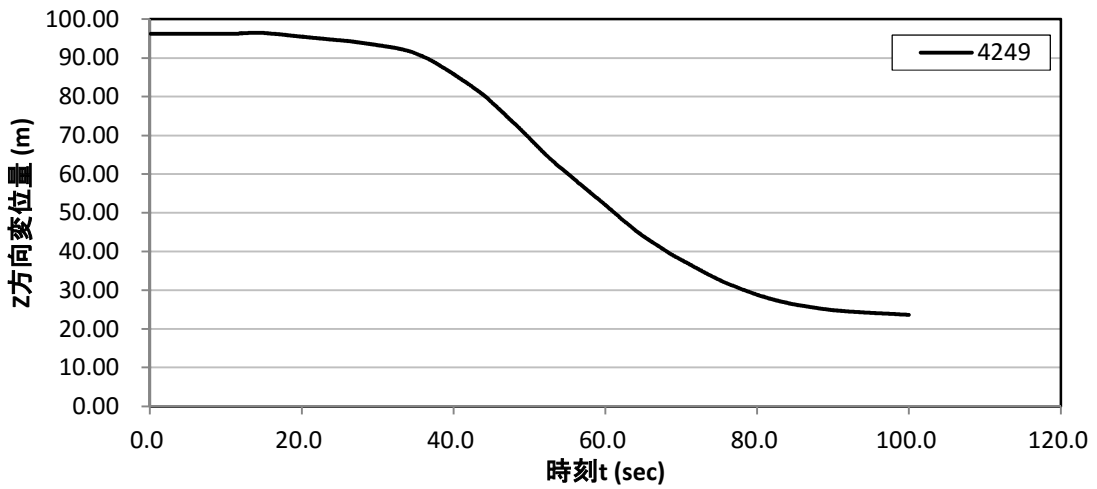


図 8.5.48 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 4249)

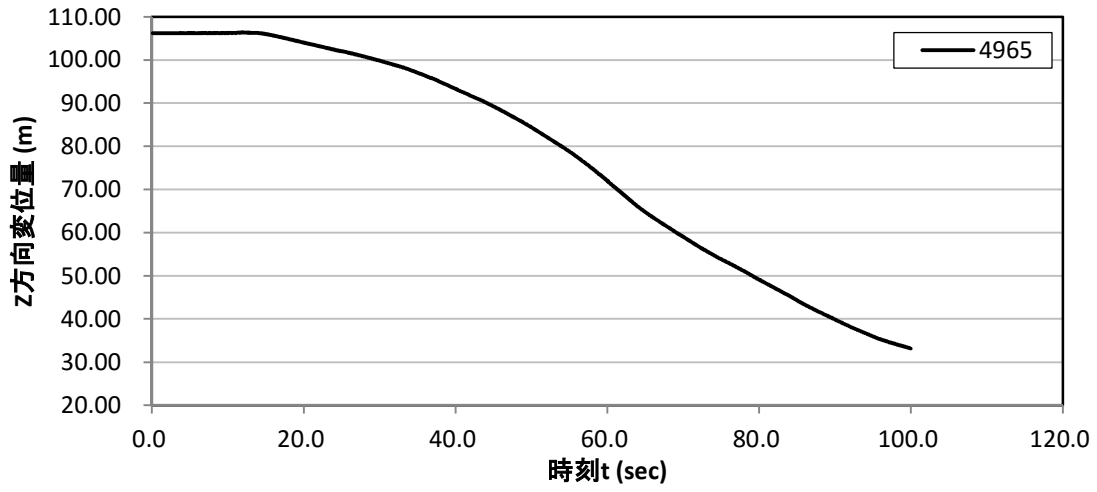


図 8.5.49 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 4965)

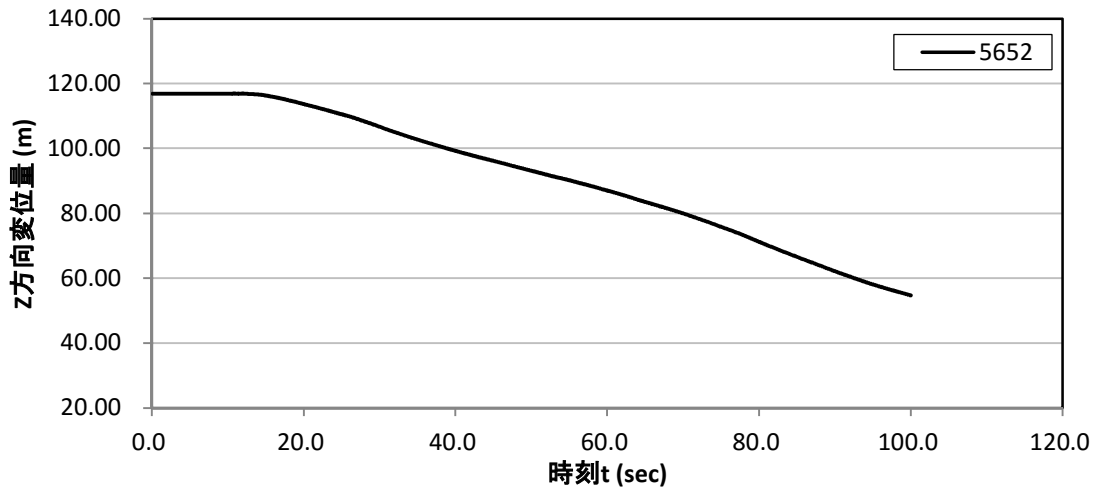


図 8.5.50 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 5652)

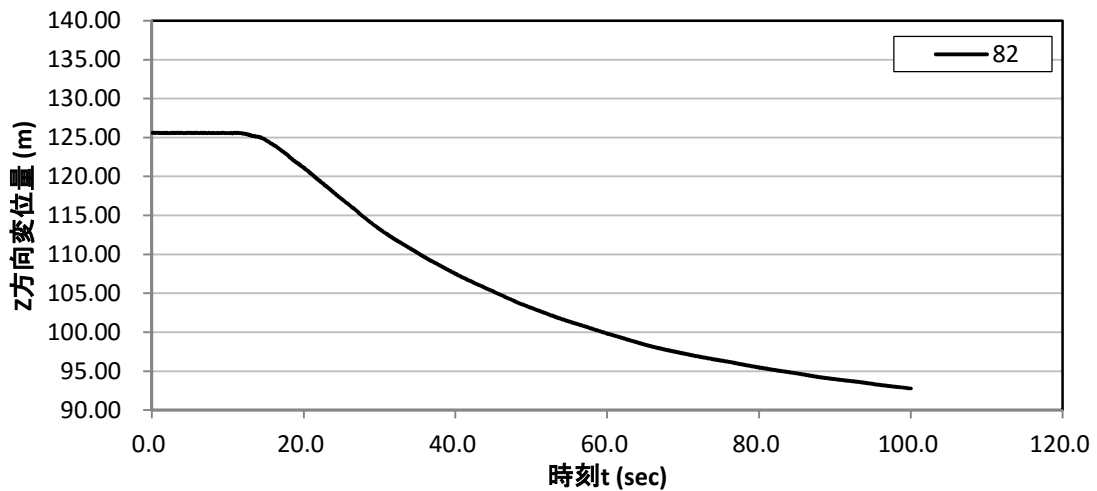


図 8.5.51 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 82)

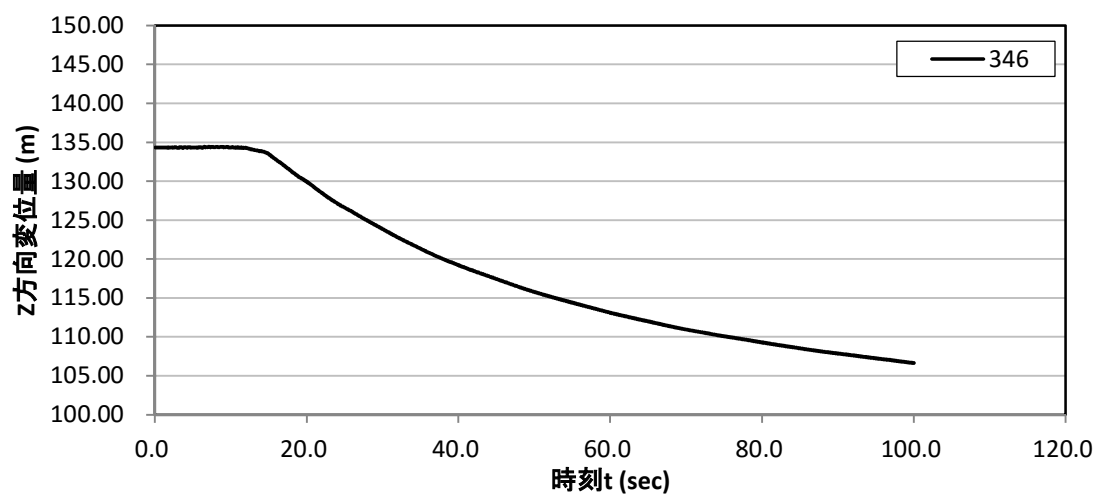


図 8. 5. 52 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 346)

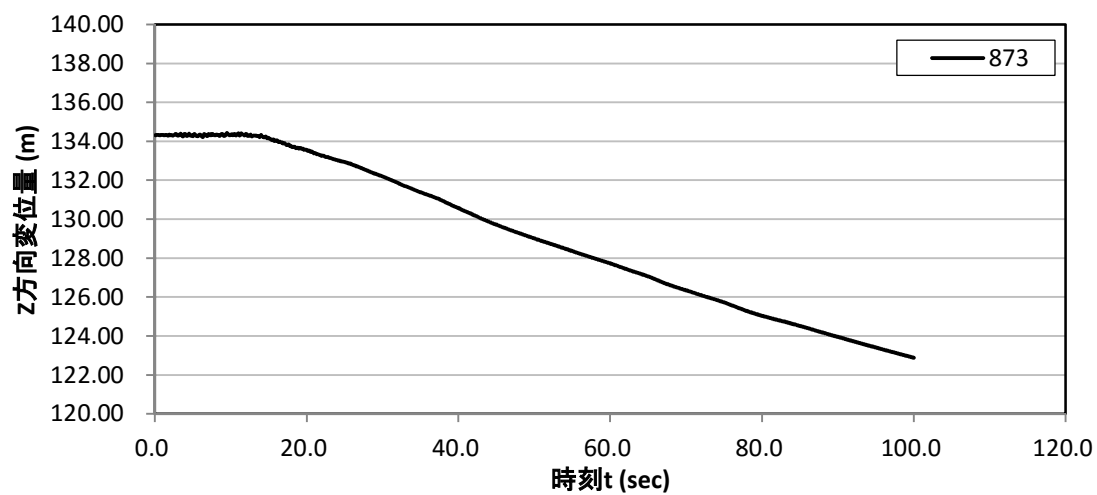


図 8. 5. 53 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 873)

(3) 水平方向加速度時刻歴

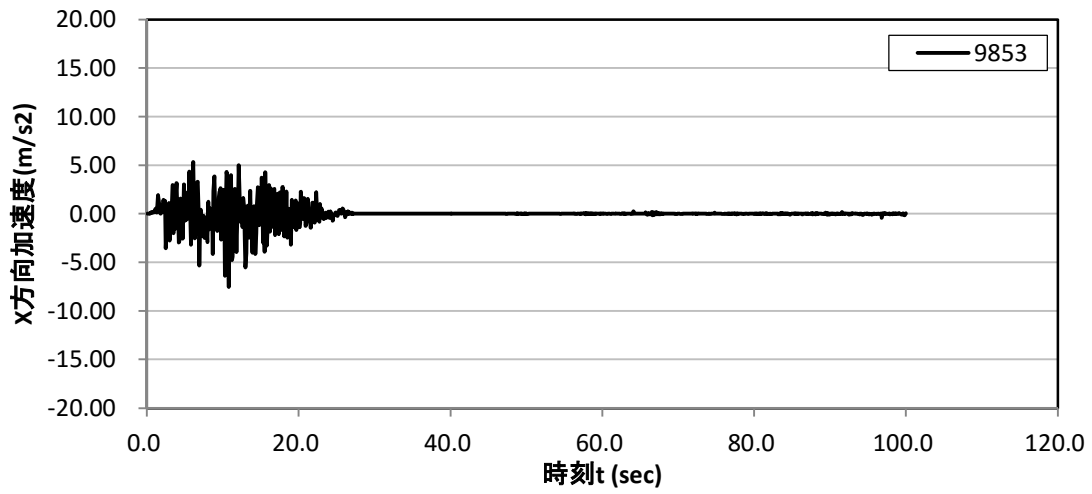


图 8.5.54 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 9853)

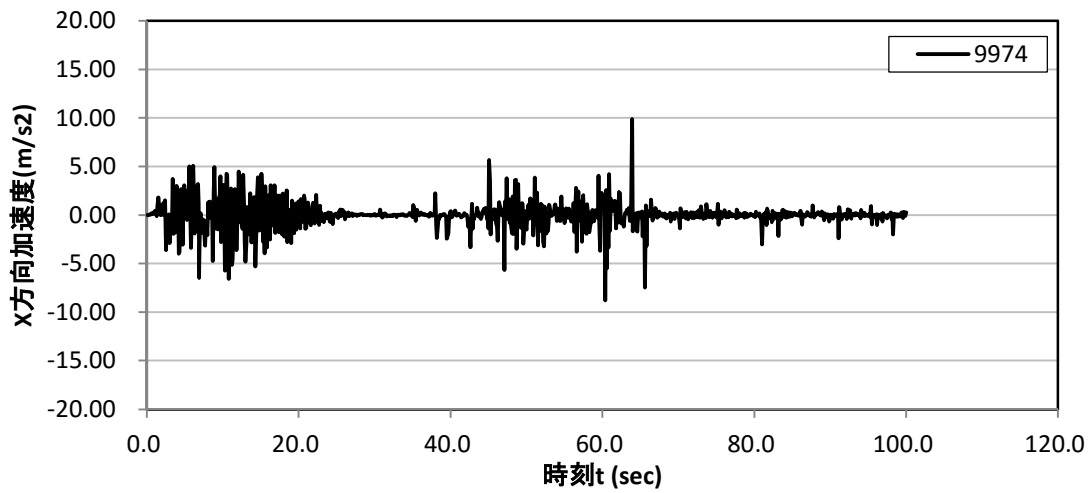


图 8.5.55 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 9974)

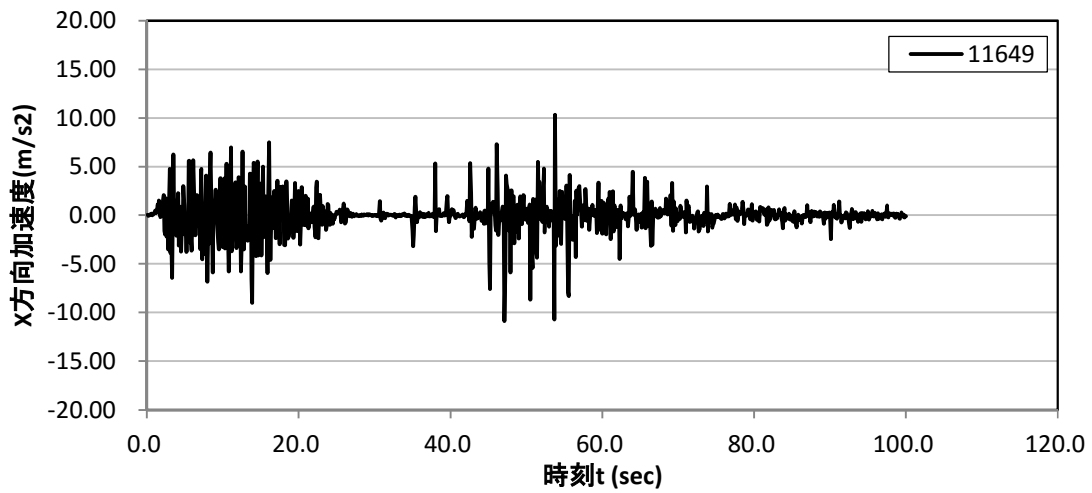


图 8.5.56 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 11649)

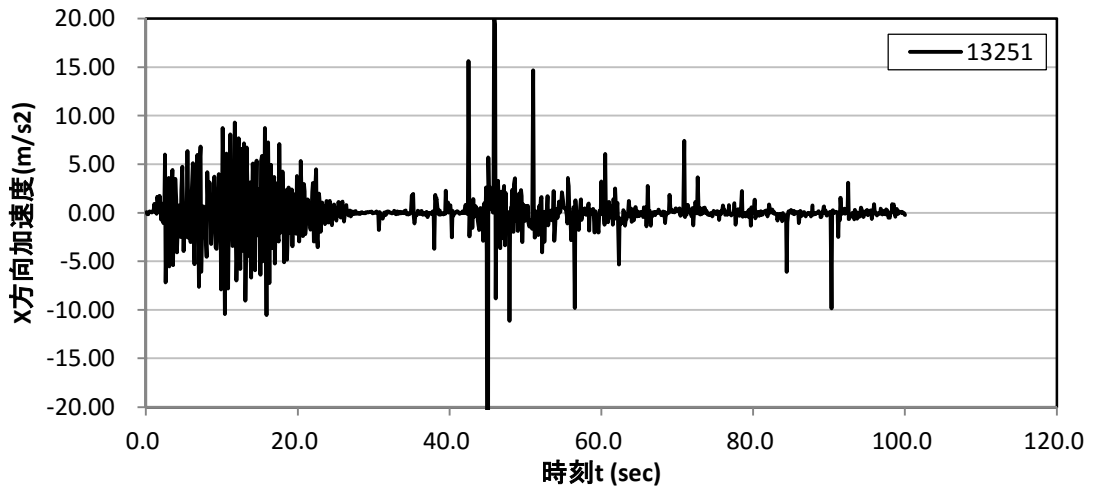


图 8.5.57 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 13251)

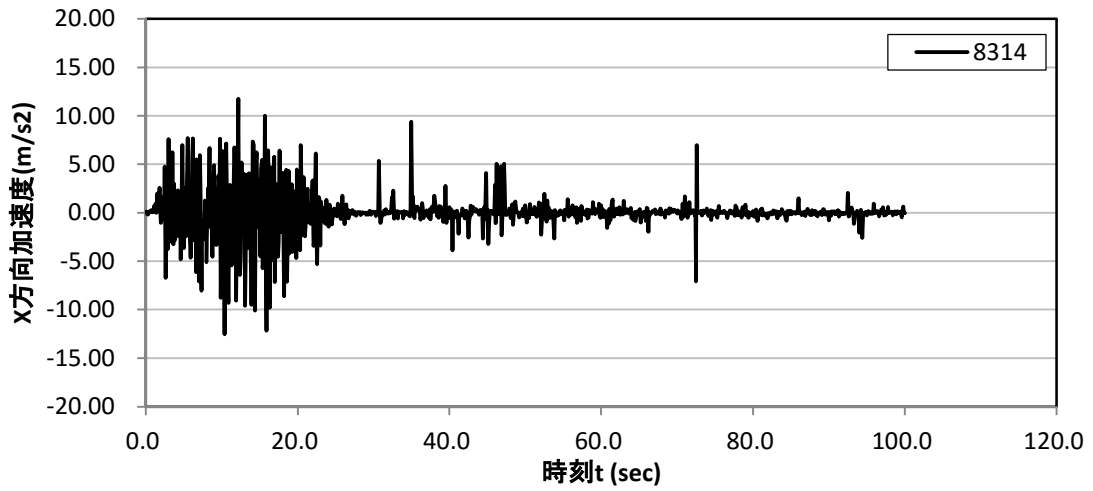


图 8.5.58 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 8314)

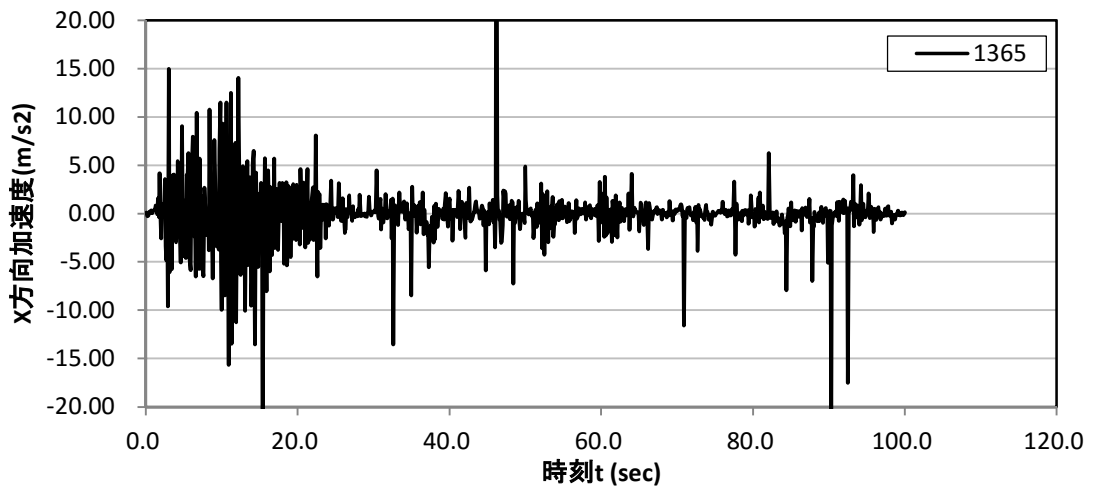


图 8.5.59 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1365)

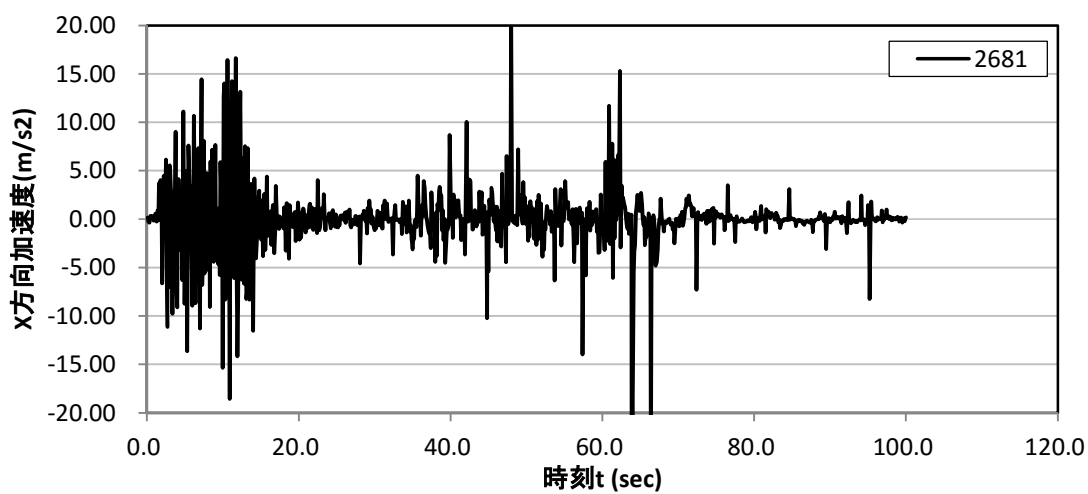


图 8.5.60 水平方向加速度時刻歴 (粒子番号 2681)

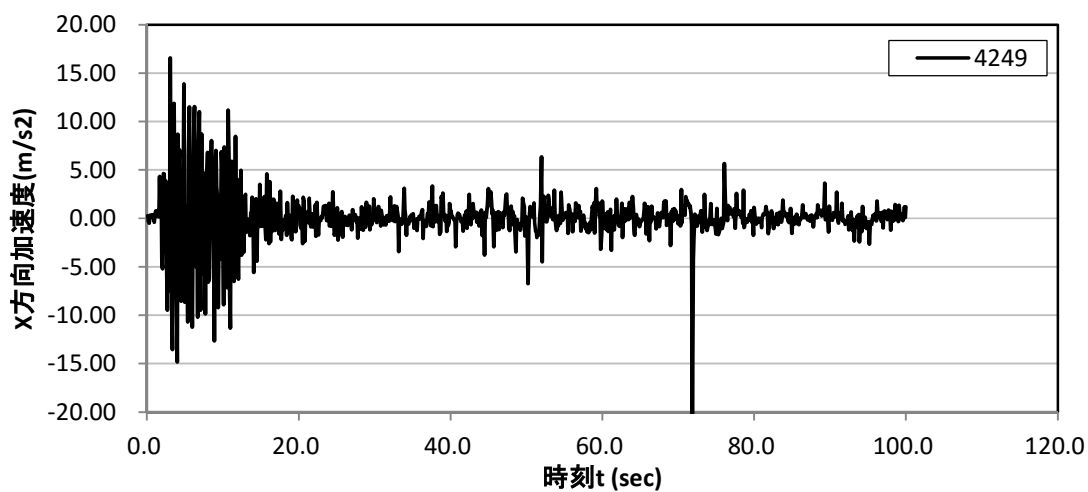


图 8.5.61 水平方向加速度時刻歴 (粒子番号 4249)

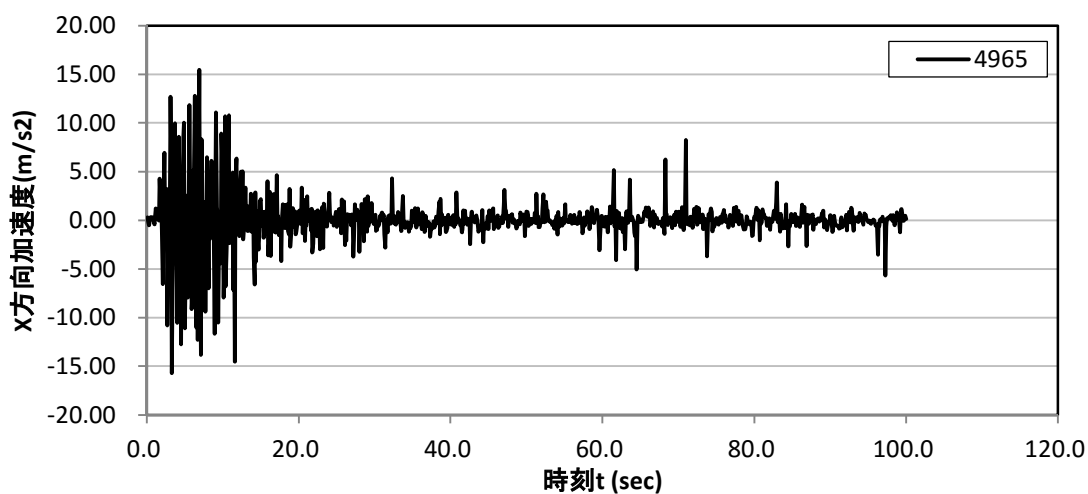


图 8.5.62 水平方向加速度時刻歴 (粒子番号 4965)

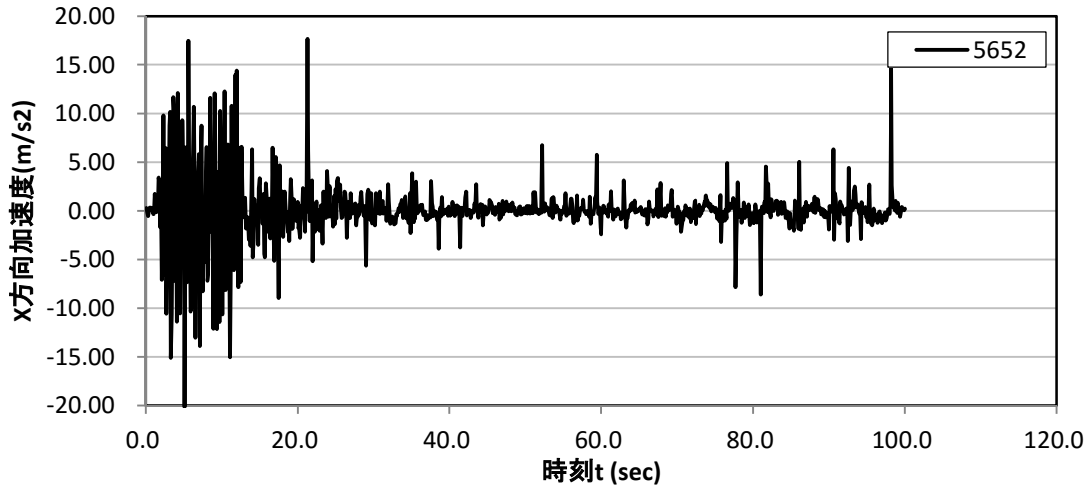


图 8.5.63 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 5652)

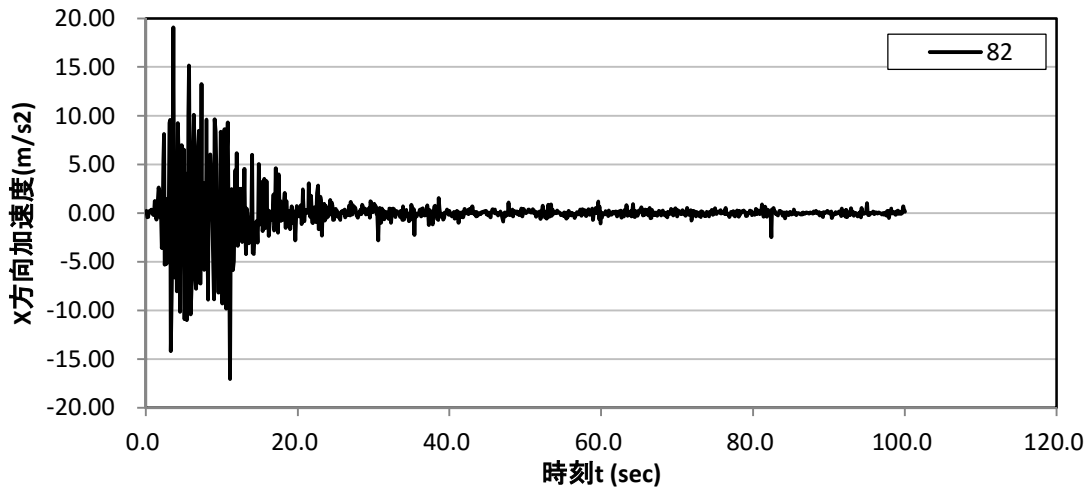


图 8.5.64 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 82)

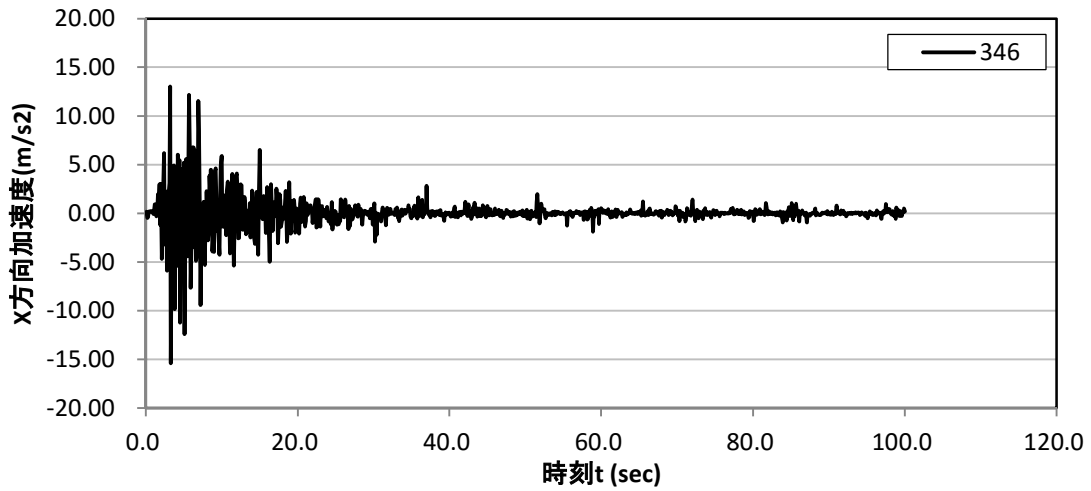


图 8.5.65 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 346)

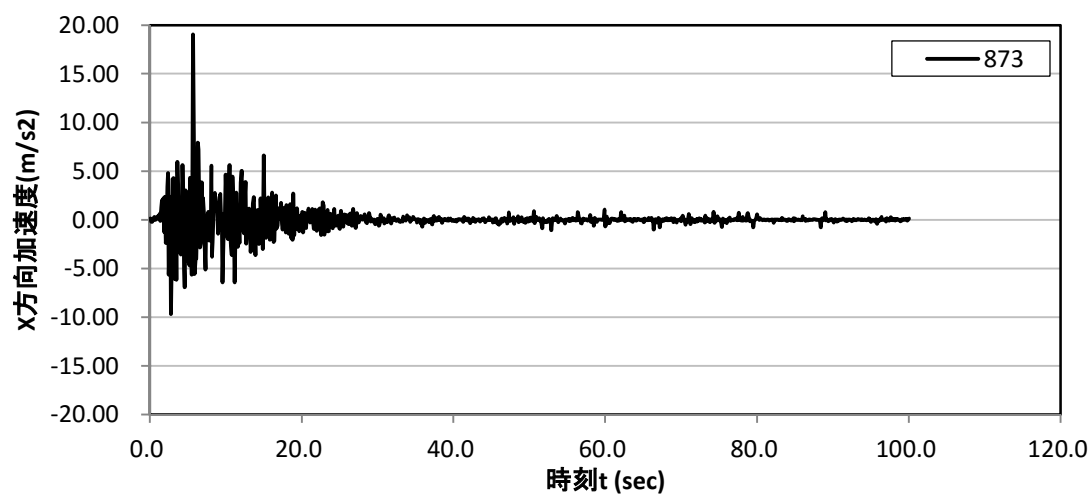


图 8. 5. 66 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 873)

(3) 鉛直方向加速度時刻歴

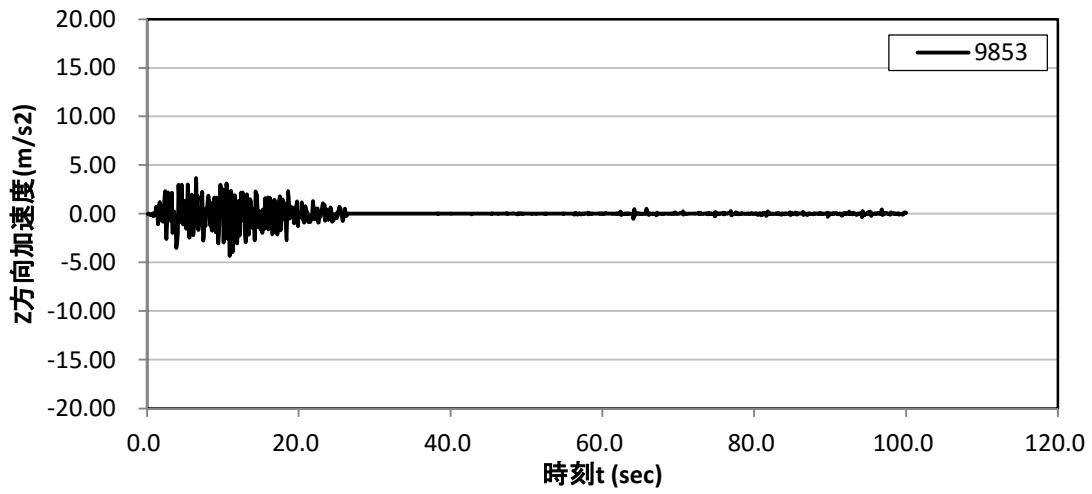


図 8.5.67 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 9853)

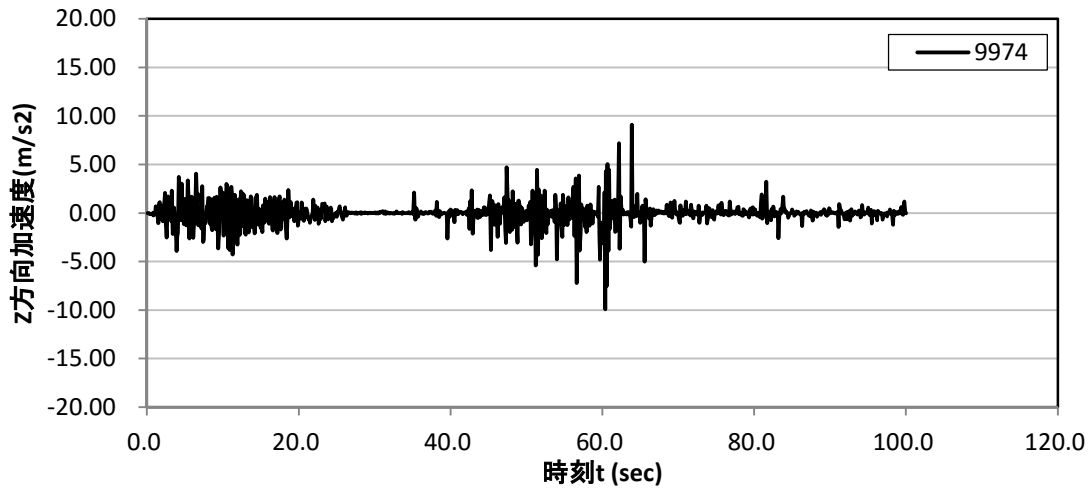


図 8.5.68 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 9974)

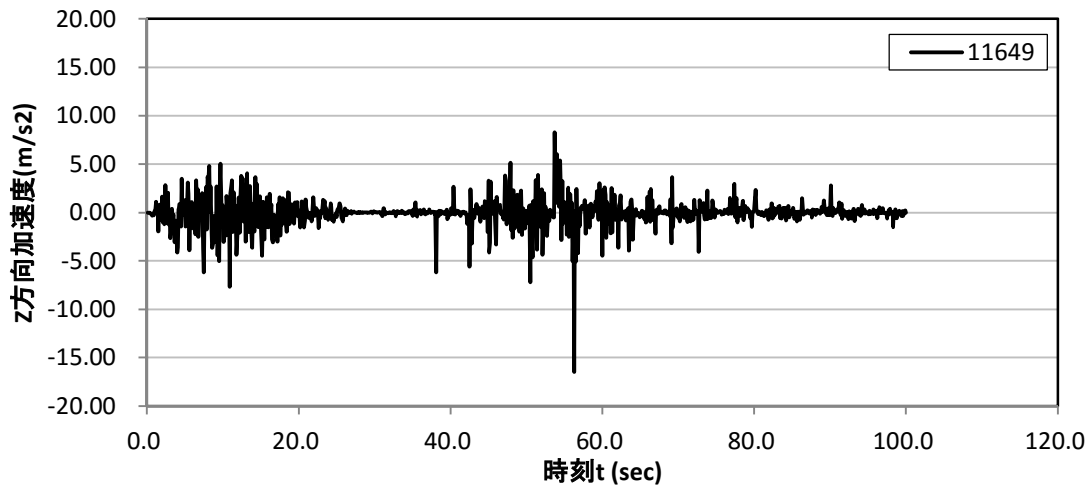


図 8.5.69 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 11649)

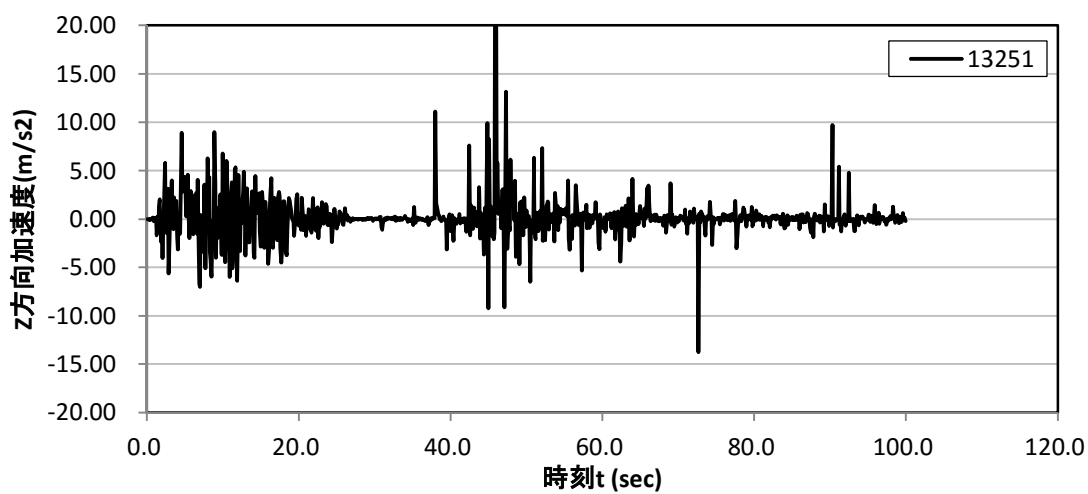


图 8.5.70 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 13251)

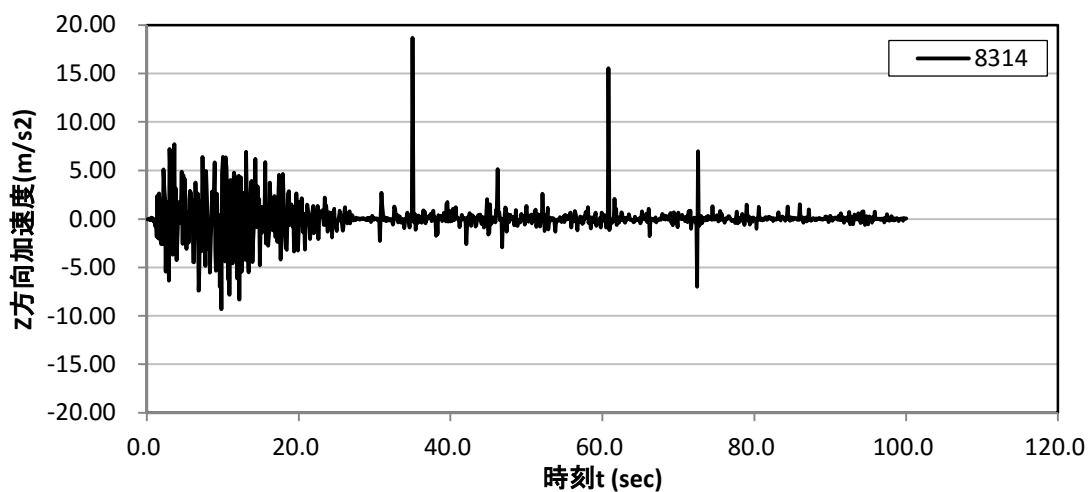


图 8.5.71 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 8314)

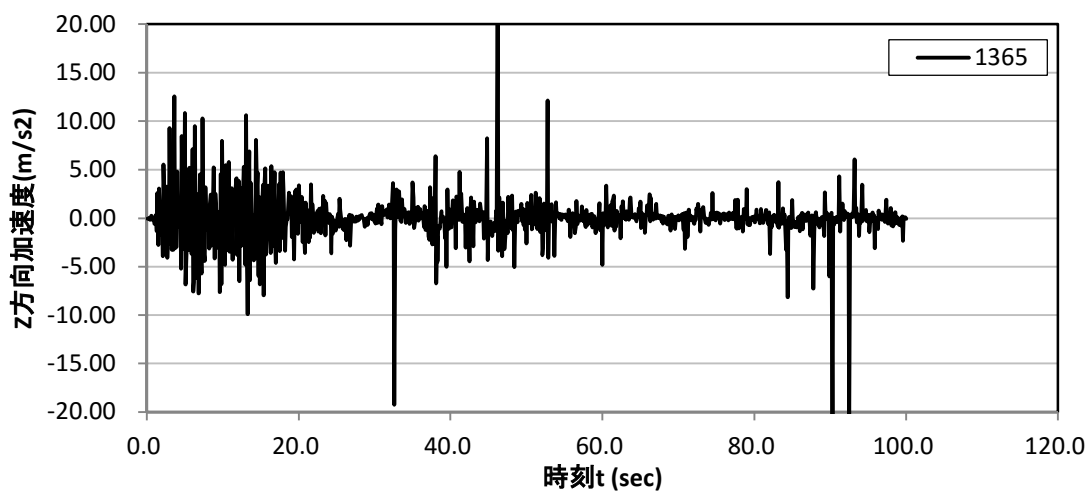


图 8.5.72 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1365)

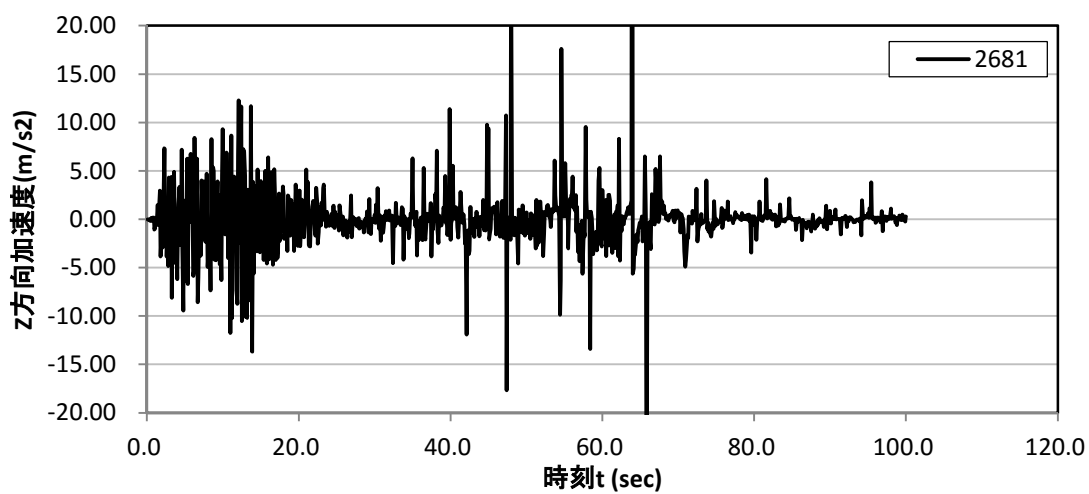


图 8.5.73 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2681)

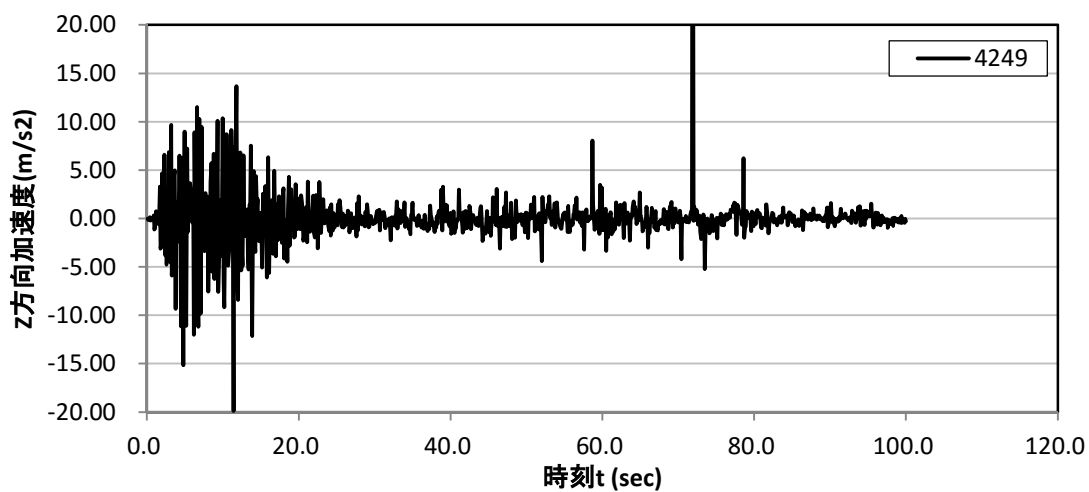


图 8.5.74 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 4249)

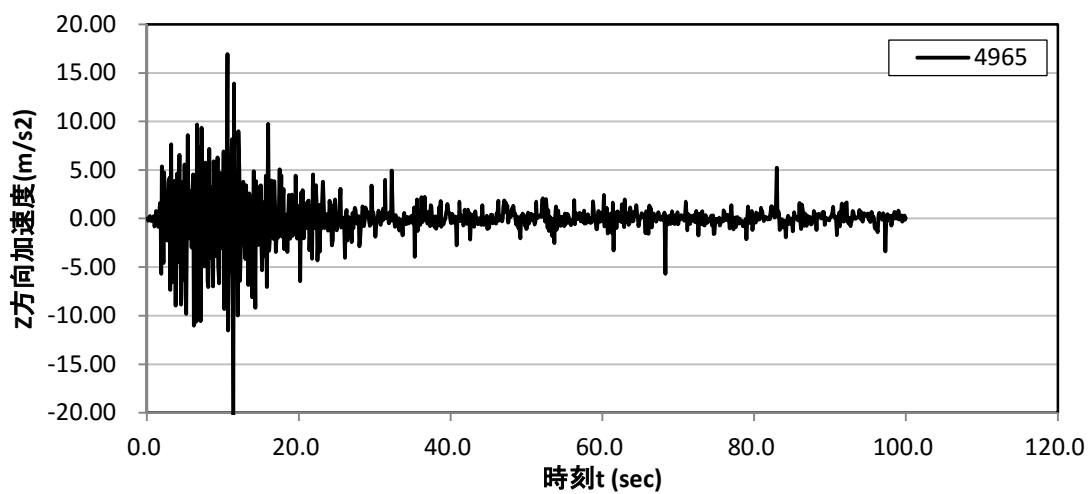


图 8.5.75 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 4965)

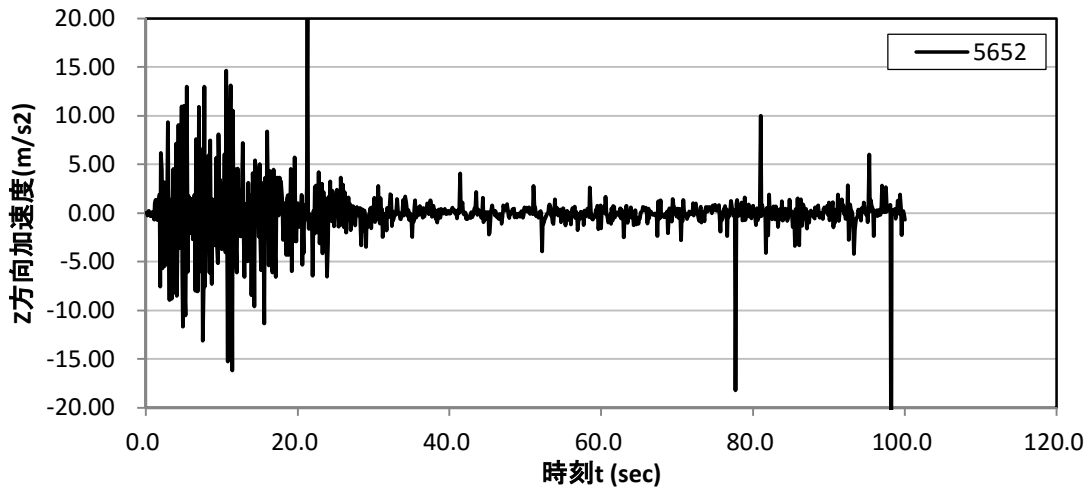


图 8.5.76 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 5652)

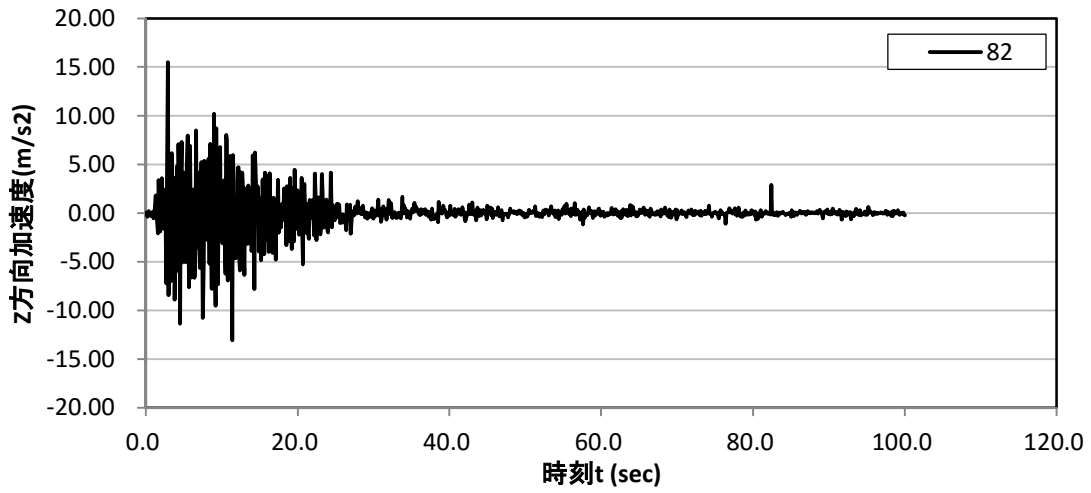


图 8.5.77 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 82)

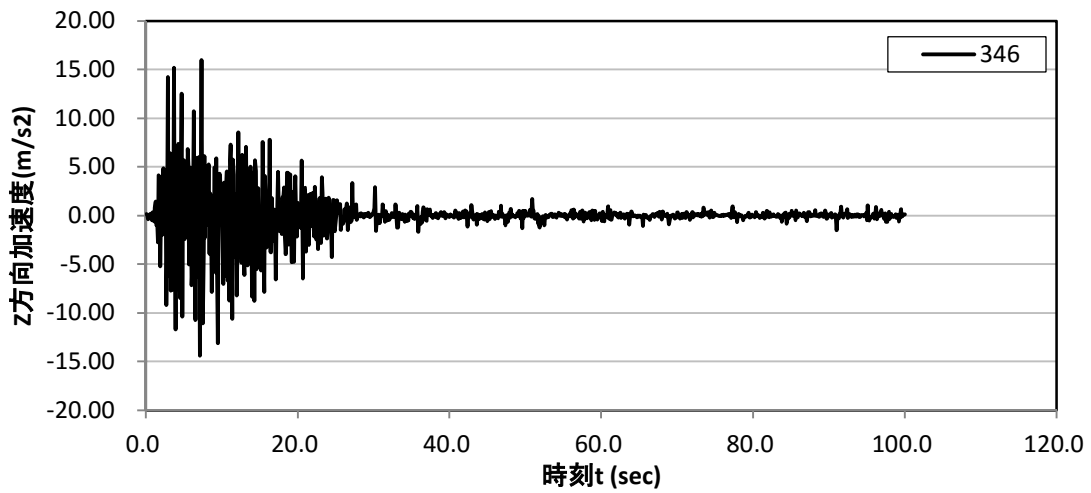


图 8.5.78 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 346)

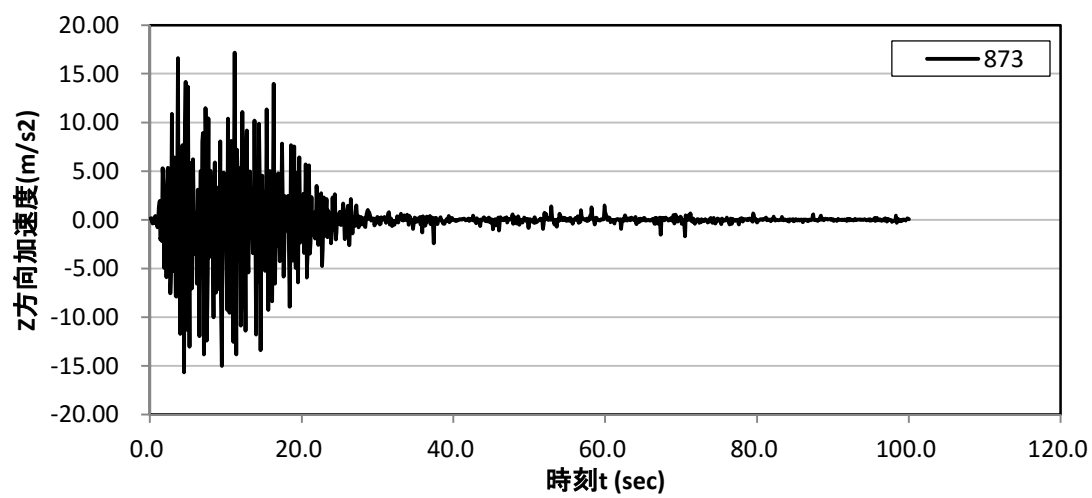


图 8. 5. 79 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 873)

8.6 実規模斜面 (硬岩斜面)

8.6.1 入力データと解析モデル作成

入力データとして「静的・動的解析用、時間間隔、加速度、観測点等設定データ」、「入力加速度履歴データ」、「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。

8.6.2 解析モデル概要 (時間間隔、粒子数)

以下に硬岩斜面の粒子数、解析ステップ数、時間間隔を示す。初期応力解析では10秒間、動的解析では斜面が崩壊の進行が収まる80秒までを解析範囲とした。

表 8.6.1 粒子数、解析ステップ数、ステップ間隔

ケース	スケール	粒子数	初期応力解析		動的解析	
			解析 ステップ 数	ステップ 間隔 (sec)	解析 ステップ 数	ステップ 間隔 (sec)
5	実規模斜面	22,190	50,000	100,000	1.0×10^{-4}	800,000

8.6.3 入力地震動の算定について

硬岩の解析対象は、下図に示す形状である。地震動を算定するため右端の361mと最下層に1mの解放基盤を設けた1次元モデルによる地震応答解析を行う。MPMの解析は、左側の地表面から117mより上をモデル化するので、1次元モデルの対応する深度278mでの地震動がMPMの入力加速度となる。

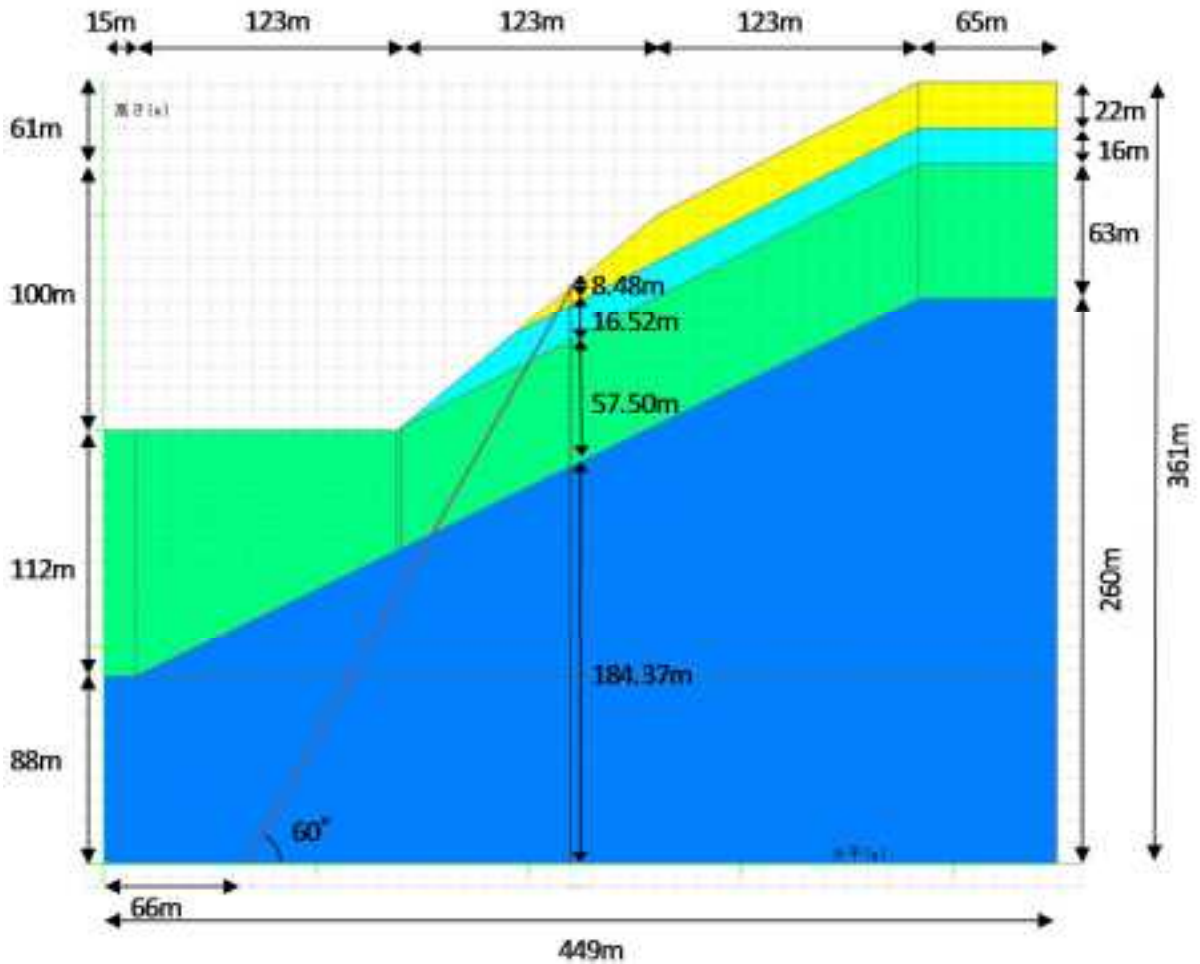


図 8.6.1 硬岩モデル全体図

解析に使用する物性は、「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価基準 2009年2月」P.130表4.2.3に示されている単位体積重量、G/Go- γ 曲線、h- γ 曲線とVsからモデル右端を1次元でモデル化し、等価線形化法により地震応答解析を行った。解析に用いた深度は図8.6.1の破砕体先端を含む中心位置を採用した。入力加速度(2E)と最大応答値の深度分布を以下に示す。

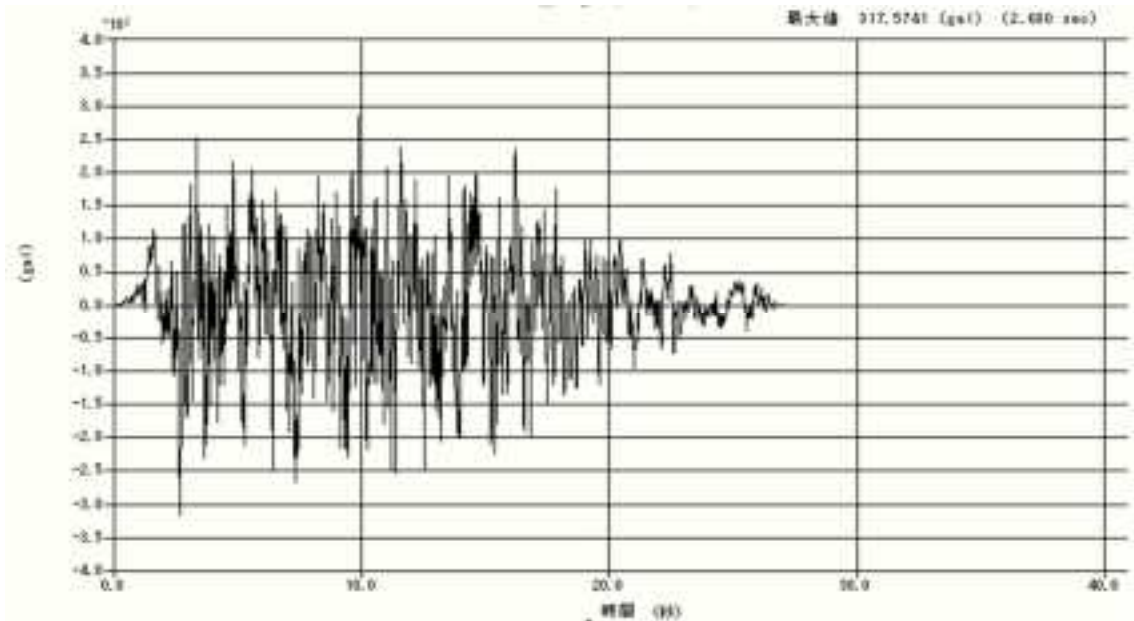


図 8.6.2 入力加速度波形(硬岩斜面)

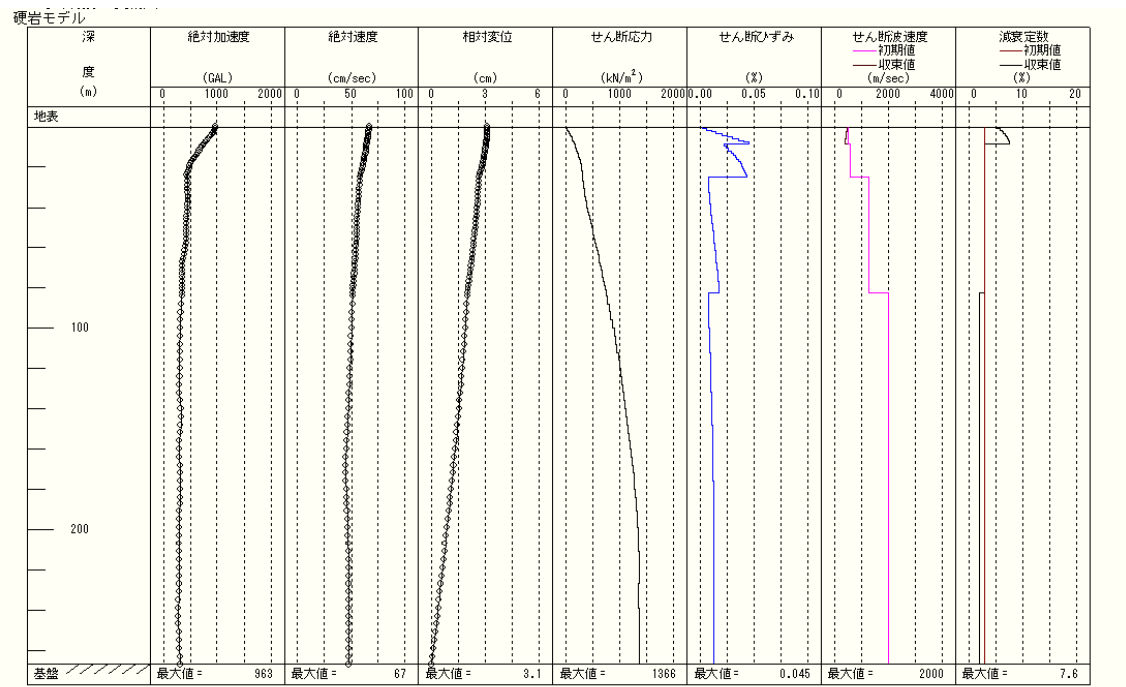


図 8.6.3 最大応答震度分布(硬岩斜面、右側)

8.6.4 入力加速度

水平加速度の入力加速度の最大値は 450gal (2E) で 83m 位置 (深度 278m) の最大加速度は 317.6gal であった(図 8.6.2、図 8.6.3)。

解析の基本ケースは軟岩モデルと同様に

水平加速度 450gal (深度 278m 加速度の最大値を変更)

鉛直加速度 300gal と決定した。

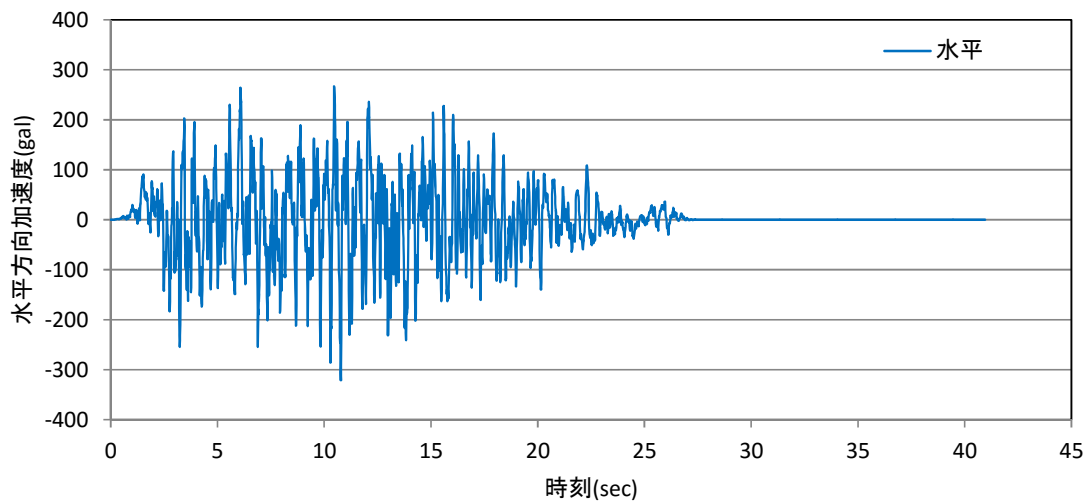


図 8.6.4 硬岩モデルの水平方向入力波

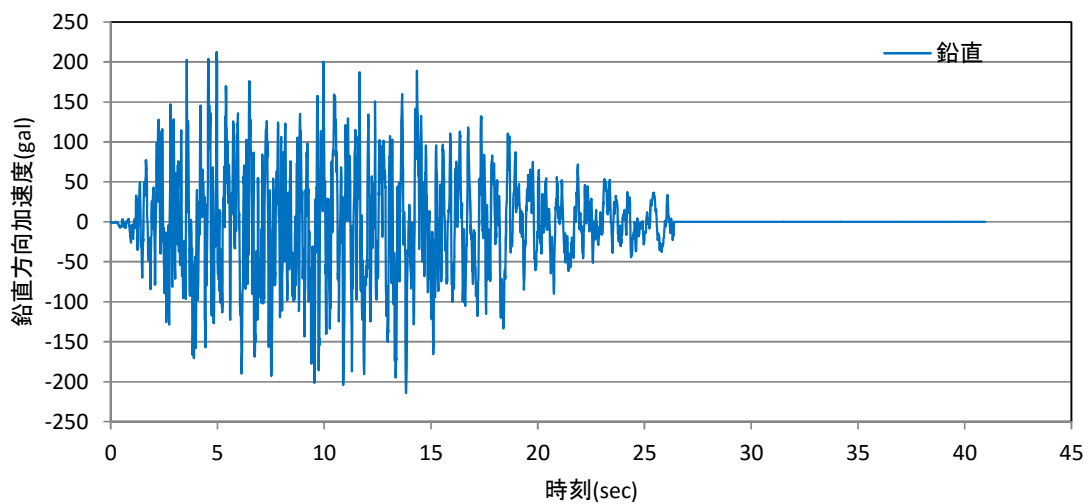


図 8.6.5 硬岩モデルの鉛直方向入力波

8.6.5 物性値

等価線形化法では基盤を解放基盤としてモデル化するが、本解析では等価線形化法の1次元モデルの深度74mより上をモデル化した。

「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価基準 2009年2月 P.32 初期応力解析時の入力物性値」には、均一の弾性係数でポアソン比0.45の記述があるので、初期応力解析時に0.45相当である動的ポアソン比を使用した。

表 8.6.2 地層の有効上載圧

	地層名	地層厚 (m)	上面 深度 (m)	下面 深度 (m)	単位体 積重量 (kN/m ³)	上載圧 (上) (kN/m ³)	上載圧 (下) (kN/m ²)	上載圧 (中央) (kN/m ²)
1	破碎帯(D)	8.5	0.0	8.5	18.0	0.00	152.64	76.32
2	破碎帯(CL)	16.5	8.5	25.0	8.0	152.64	284.80	218.72
3	破碎帯(CM)	57.5	25.0	82.5	8.0	284.80	744.80	514.80
4	破碎帯(CH)	184.4	82.5	266.9	8.0	744.80	2219.76	1482.28
5	D級	8.5	0.0	8.5	20.0	0.00	169.60	84.80
6	CL級	16.5	8.5	25.0	10.0	169.60	334.80	252.20
7	CM級	57.5	25.0	82.5	15.0	334.80	1197.30	766.05
8	CH級	184.4	82.5	266.9	16.0	1197.30	4147.22	2672.26

弾性係数Eは等価線形化法で求めたせん断剛性を各地層で平均した値を用いて求めた。

各層はモール・クーロンの破壊条件で粘着力の残留時の値Cminを破碎帯の粘着力50(kN/m²)としたところ破壊は見られなかったため、0.01(kN/m²)として計算を行った。結果の詳細は後述する。

表 8.6.3 物性値(硬岩斜面)

		せん断剛性の 平均値G0 (kN/m ²)	ポアソン比 ν (動的/静的)	応力依存の 弾性係数E ₀ (動的/静的) (kN/m ²)	上載圧 (中央) σ_v (kN/m ²)	K ₀	E ₀ となる値 の平均主応 力 σ'_{m0} (kN/m ²)
1	破碎帯(D)	22008	0.450	63822	76.32	0.5	50.9
2	破碎帯(CL)	49327	0.450	173366	218.72	0.5	200.9
3	破碎帯(CM)	85934	0.450	331155	514.80	0.5	551.2
4	破碎帯(CH)	162085	0.450	443288	1482.28	0.5	896.2
5	D級	379596	0.430	1085644	84.80	0.5	56.5
6	CL級	720000	0.400	2016000	252.20	0.5	223.2
7	CM級	4200000	0.370	11508000	766.05	0.5	682.3
8	CH級	11000000	0.350	29700000	2672.26	0.5	2170.8

表 8.6.4 物性値続き(硬岩斜面)

	応力依存 の弾性係 数の式の n	σ'_{m} の 下限値 $\sigma'_{m(\min)}$ (kN/m ²)	単位質量 ρ (t/m ³)	せん断摩 擦角 ϕ (°)	粘着力 CC (kN/m ²)	ハードニ ング係数 h	粒子の剛 性に対す るレイリ ー減衰係 数 β	粘着力の 下限値 Cmin (kN/m ²)
1	0.6	1	1.837	20.0	50.0	-0.100	0.002	0.01
2	0.6	1	1.837	20.0	50.0	-0.100	0.002	0.01
3	0.6	1	1.837	20.0	50.0	-0.100	0.002	0.01
4	0.6	1	1.837	20.0	50.0	-0.100	0.002	0.01
5	0	1	2.041	20.0	200.0	-0.100	0.002	0.01
6	0	1	2.041	33.0	300.0	-0.100	0.002	0.01
7	0	1	2.551	45.0	1000.0	-0.100	0.002	0.01
8	0	1	2.653	50.0	1500.0	-0.100	0.002	0.01

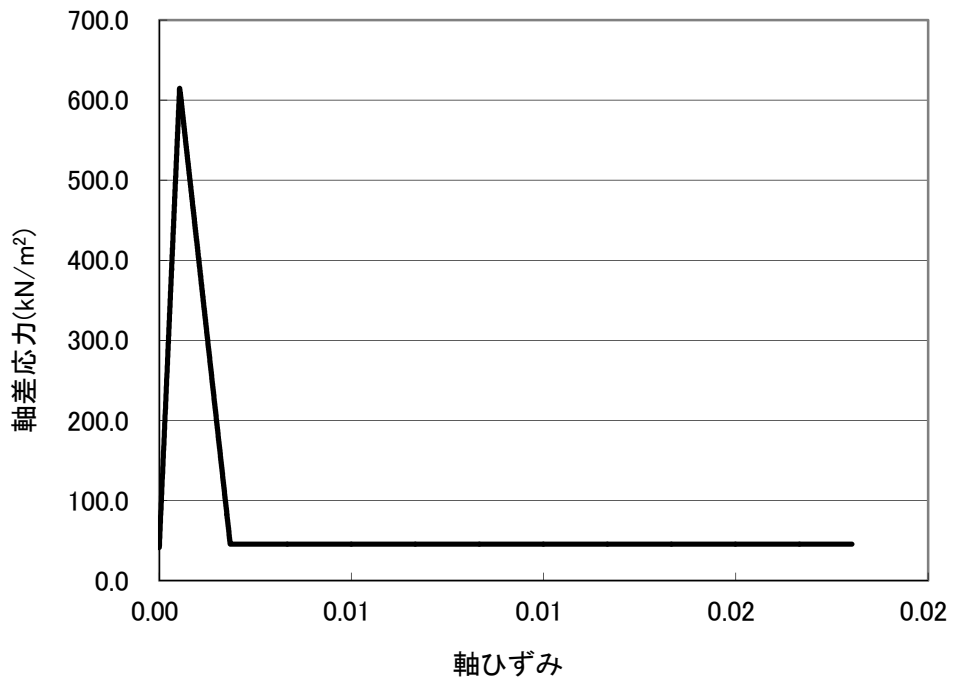


図 8.6.6 D級の応力ひずみ関係

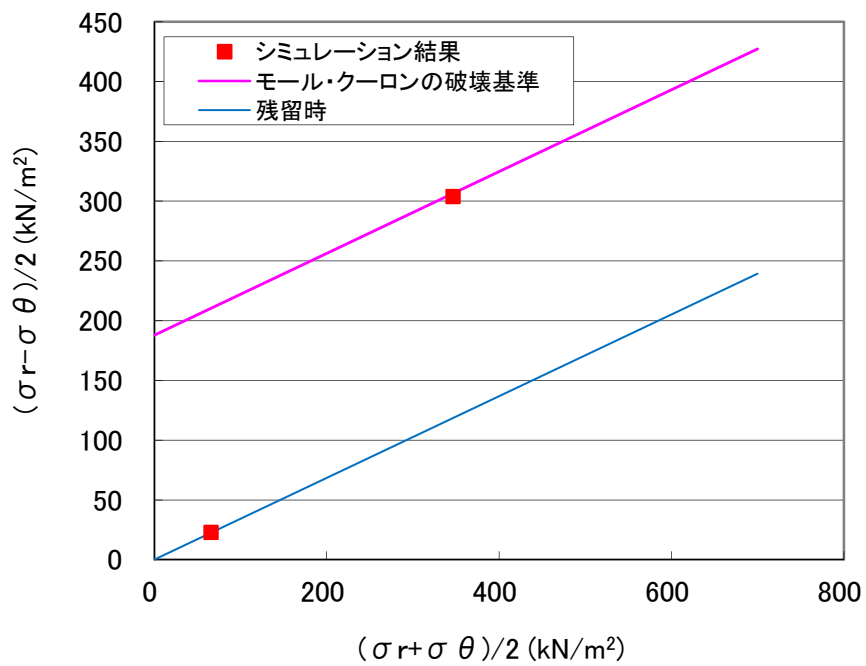


図 8.6.7 D級の破壊時応力と破壊線

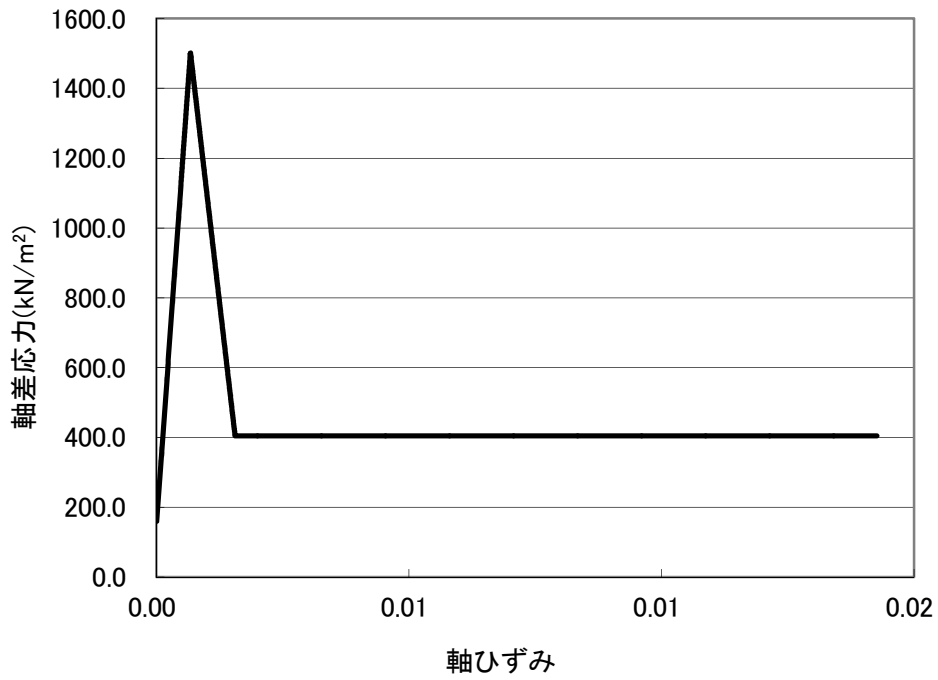


図 8.6.8 CL 級の応力ひずみ関係

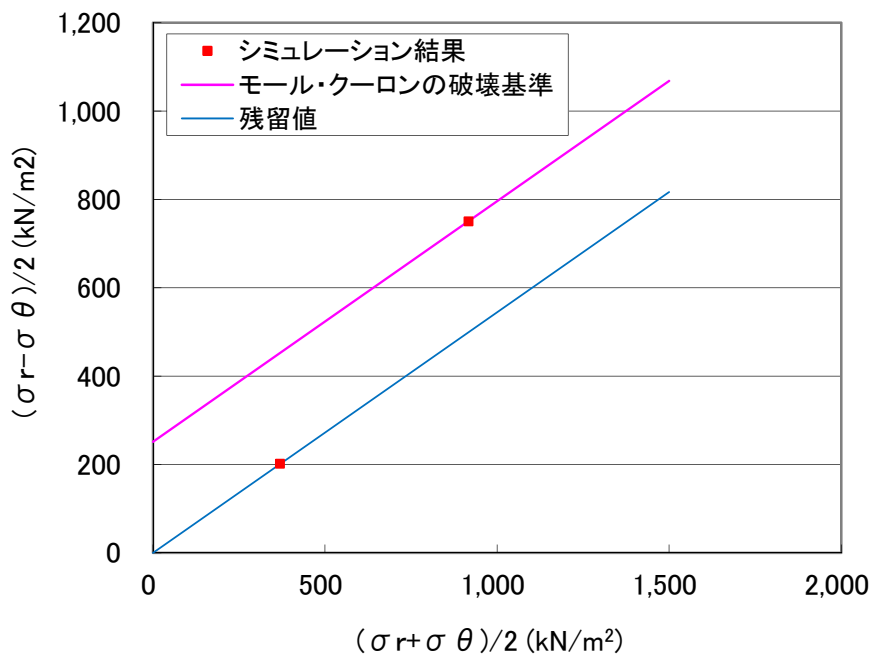


図 8.6.9 CL 級の破壊時応力と破壊線

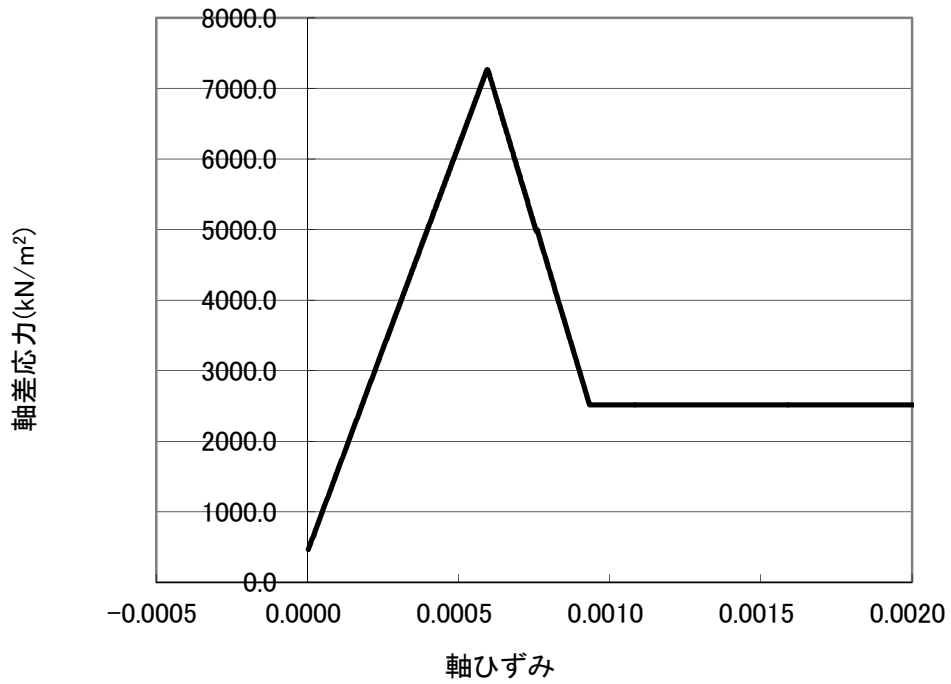


図 8.6.10 CM の応力ひずみ関係

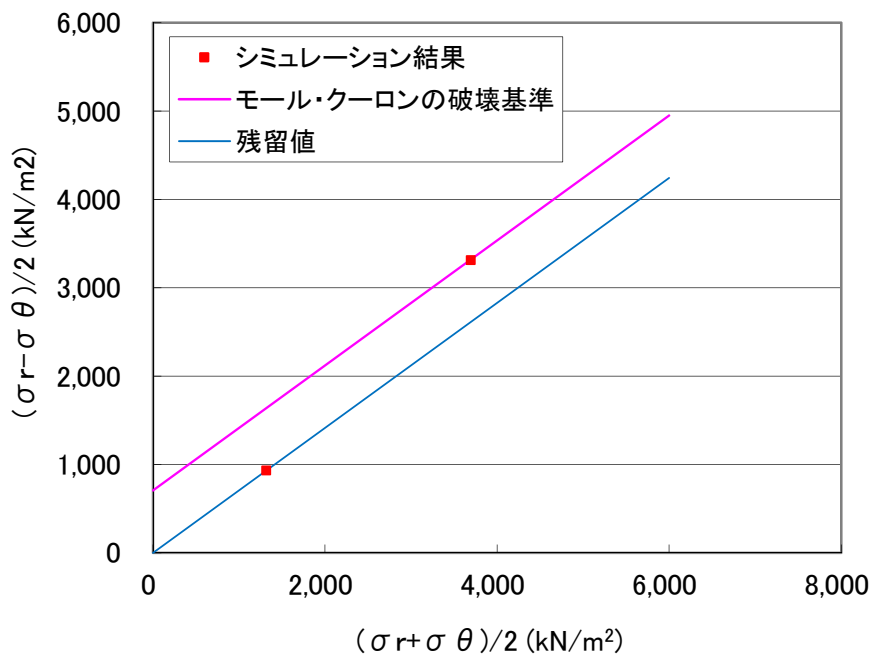


図 8.6.11 CM 級の破壊時応力と破壊線

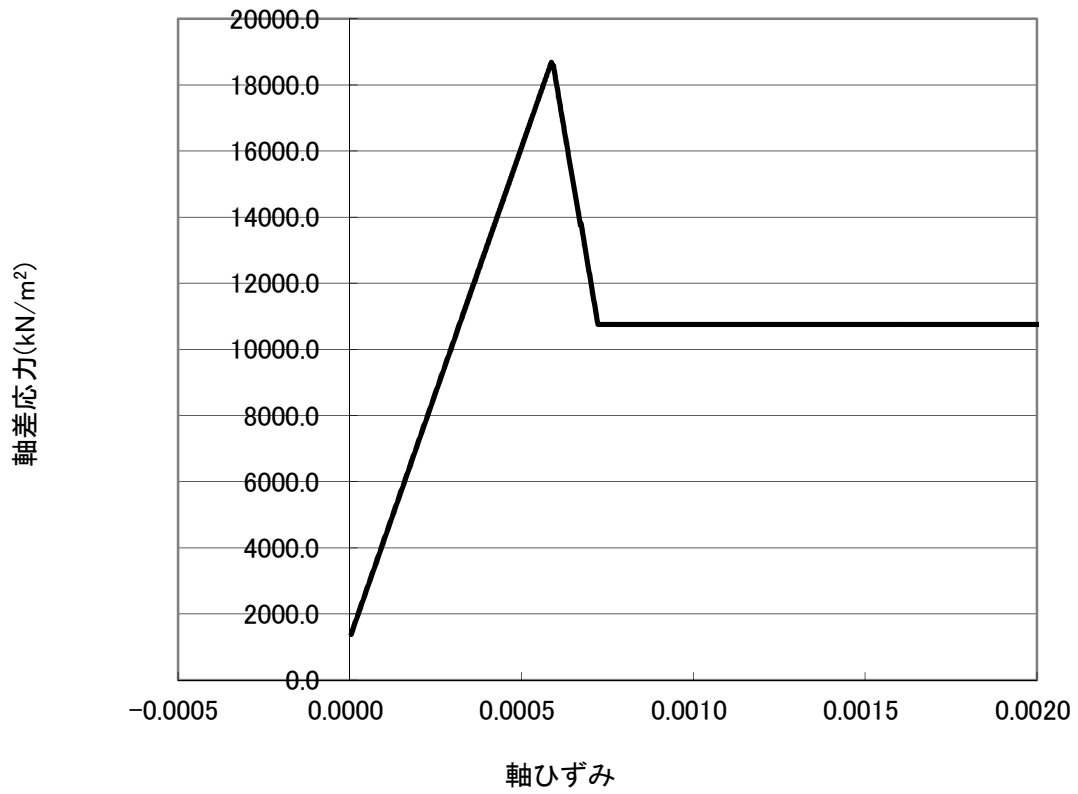


図 8.6.12 CH の応力ひずみ関係

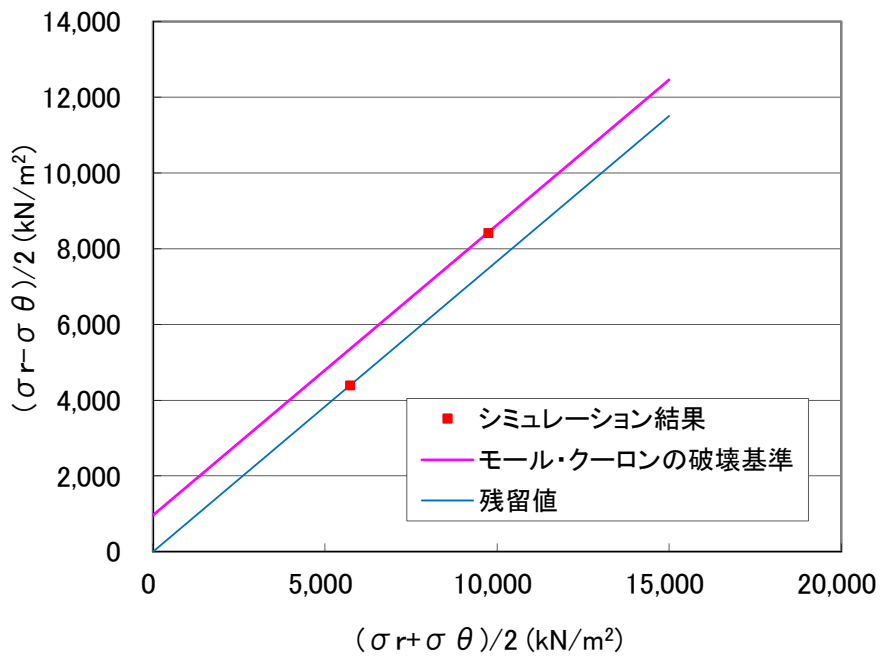


図 8.6.13 CH 級の破壊時応力と破壊線

8.6.6 モデル形状、境界条件、背面格子、出力位置について

背面格子条件として、格子幅 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 5\text{m}$ 、粒子数 $2 \times 2 \times 2$ とし、破碎体位置のみ粒子数を $4 \times 4 \times 4$ とした。モデルの基盤から 74m の位置を境界とし、上の形状をモデル化した。

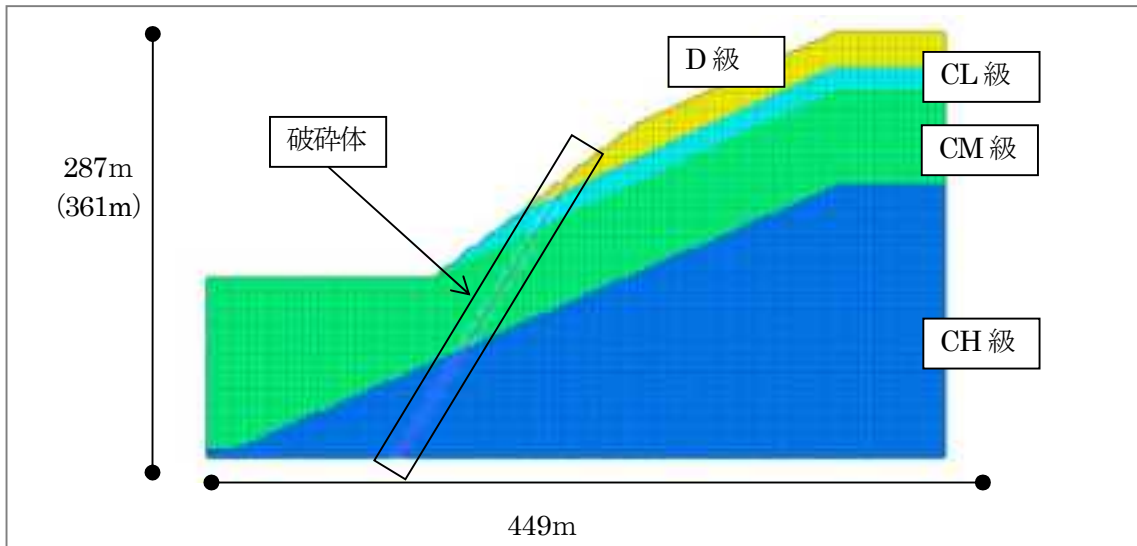


図 8.6.14 硬岩 モデル形状

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。出力位置は斜面表層の各層上下端とその中間の全9点とした。

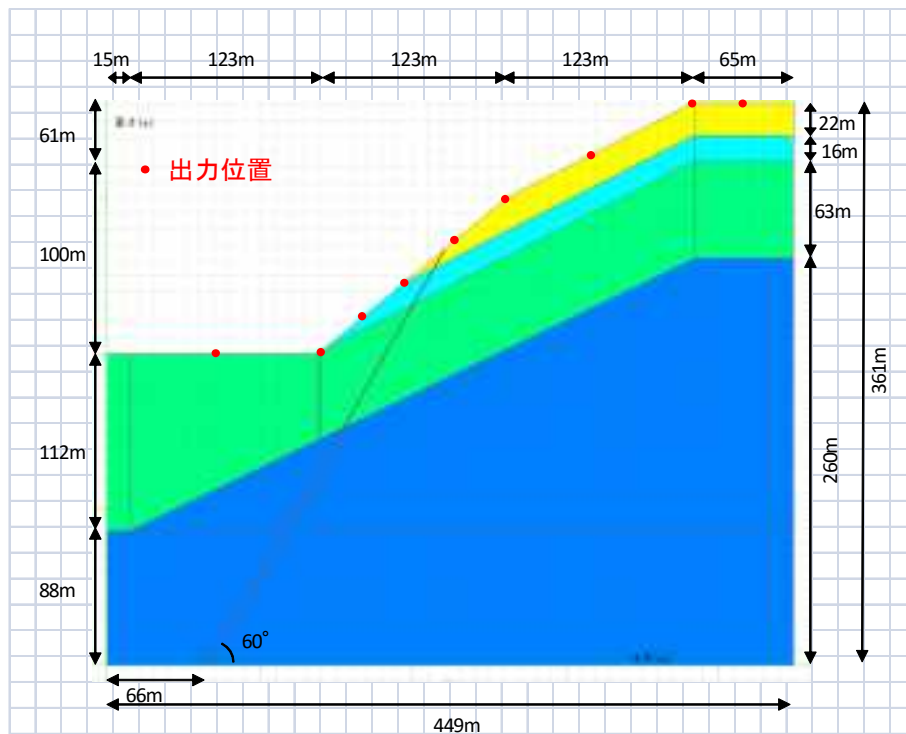


図 8.6.15 硬岩モデル出力位置

8.7 解析結果 (硬岩斜面)

8.7.1 結果について

はじめに、各層の粘着力の下限値(C_{min})を破碎帯の粘着力 $C=50.0\text{kN/m}^2$ とした計算を行った。結果として下図のようにひずみが発生せず、顕著な崩壊がみられなかった。そこで、 $C_{min}=0.01\text{kN/m}^2$ として再計算を行った。

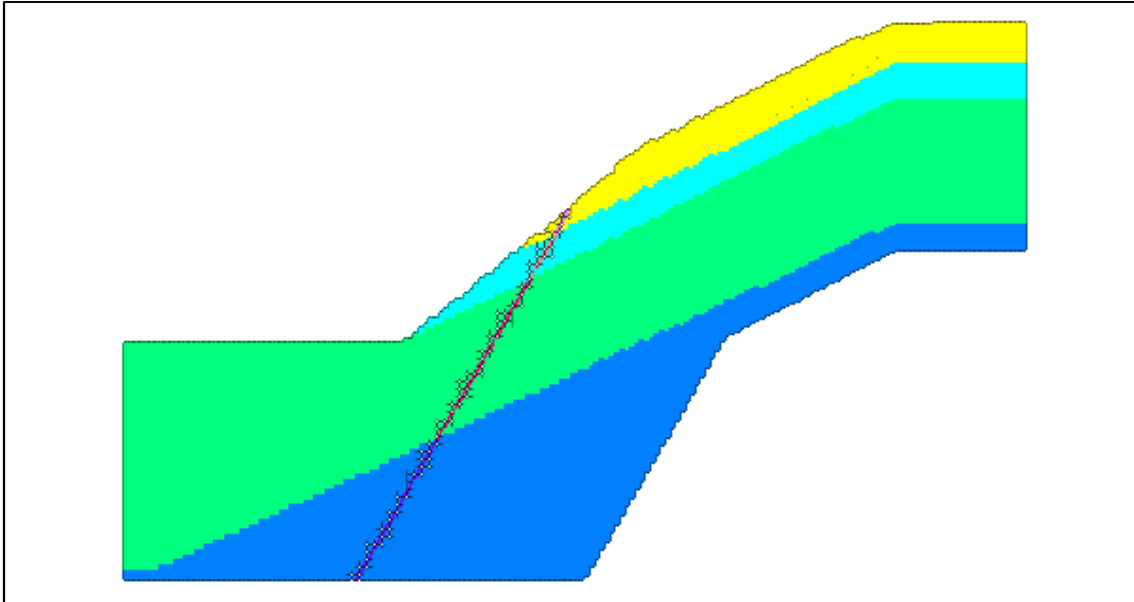


図 8.7.1 粘着力の下限値 $C_{min}=50(\text{kN/m}^2)$ とした場合の変形図 基本ケース(水平加速度 450gal)

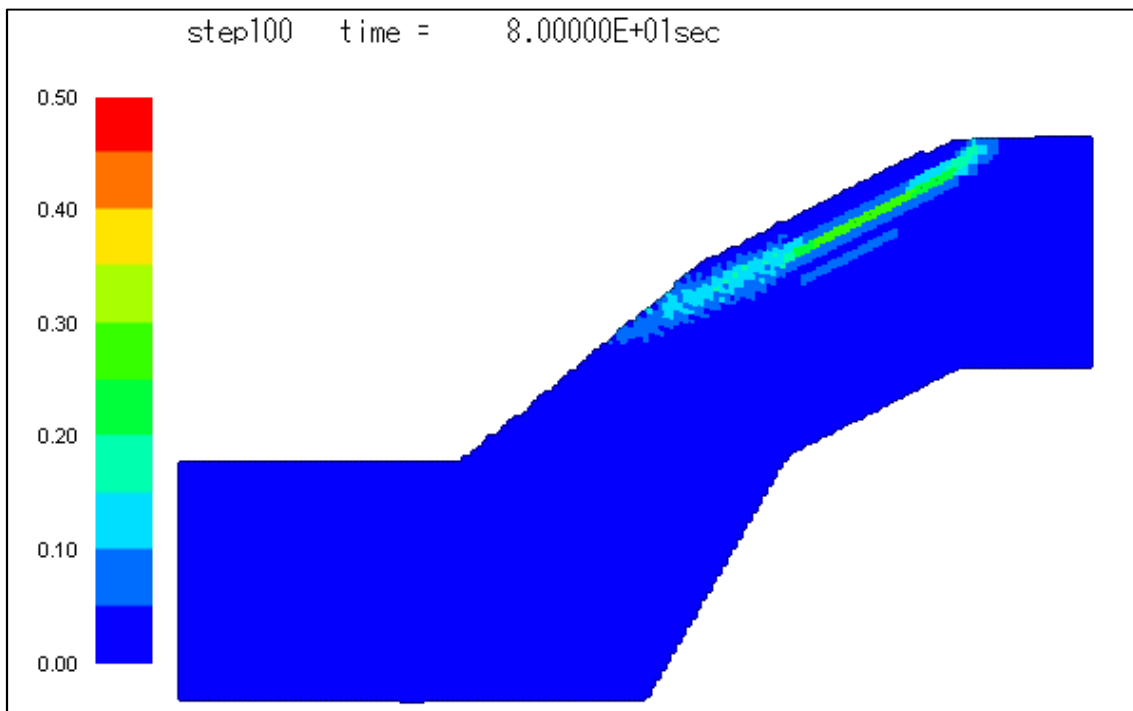


図 8.7.2 粘着力の下限値 $C_{min}=50(\text{kN/m}^2)$ とした場合のひずみ図 基本ケース(水平加速度 450gal)

軟岩斜面と同様、基本ケース(水平加速度 450gal (深度 135m 加速度の最大値を変更) 鉛直加速度 300gal)と、基本ケースの加速度を 1.5 倍した水平加速度 675gal (深度 135m 加速度の最大値を変更) 鉛直加速度 450gal として計算を行った。最終状態の変形図を下に示す。結果として、加速度を 1.5 倍とした場合でも崩壊の度合いに変化は見られないため、以降は基本ケースの計算結果をまとめることとする。

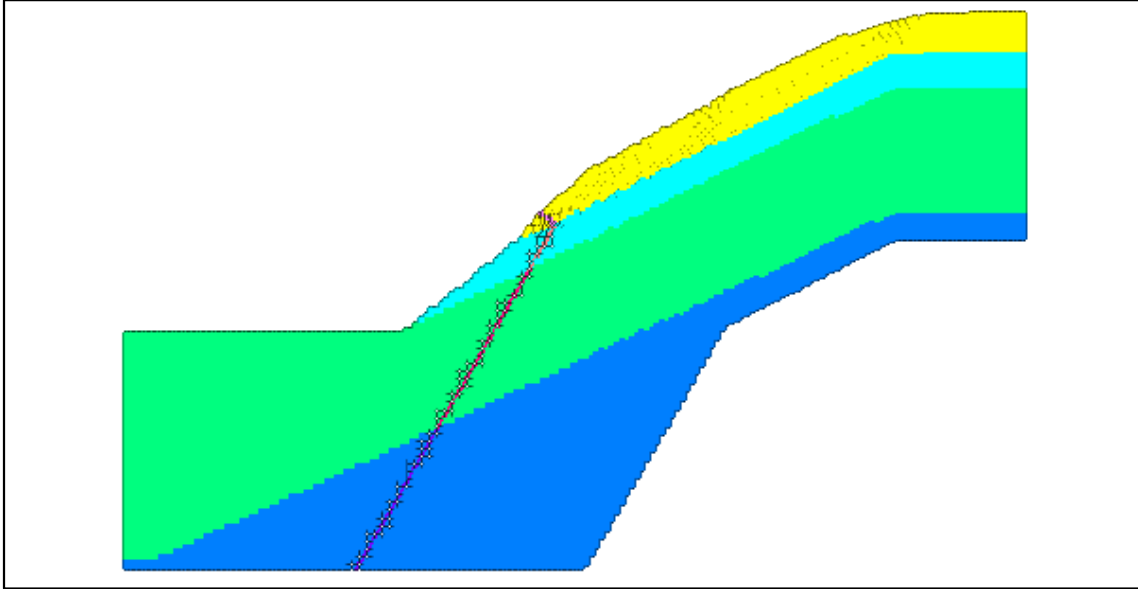


図 8.7.3 基本ケース(水平加速度 450gal)の最終状態

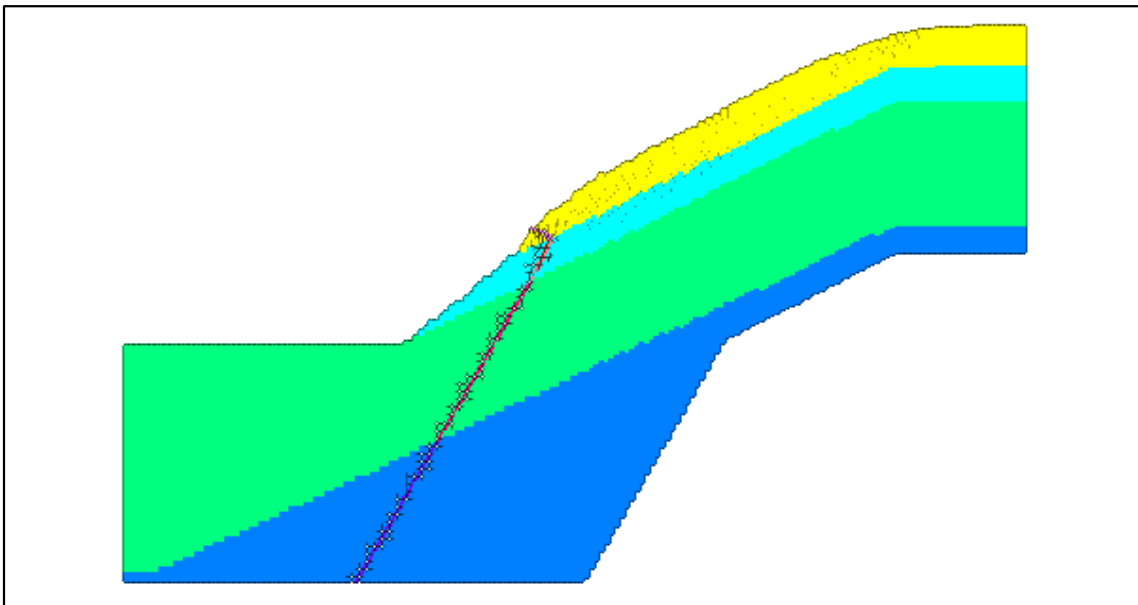


図 8.7.4 基本ケースの加速度を 1.5 倍(水平加速度 675gal)としたケースの最終状態

8.7.2 变位图

time = 8.00000E-01sec

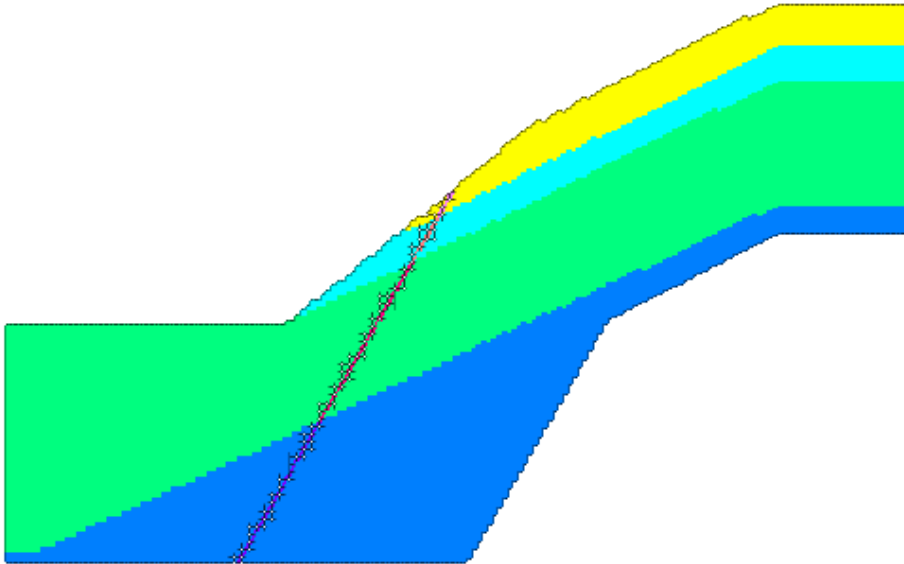


图 8.7.5 硬岩(0.8sec)

time = 8.00000E+00sec

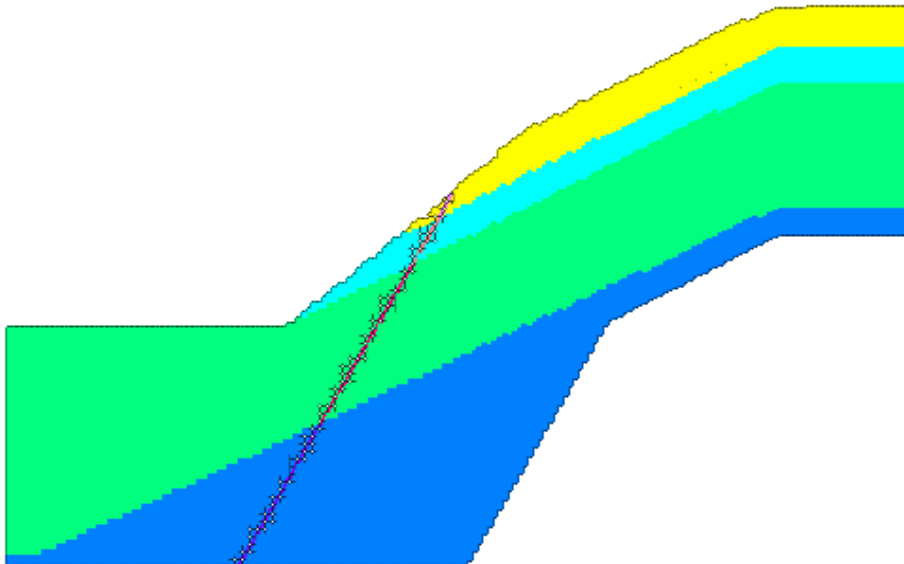


图 8.7.6 硬岩(8.0sec)

time = 1.60000E+01sec

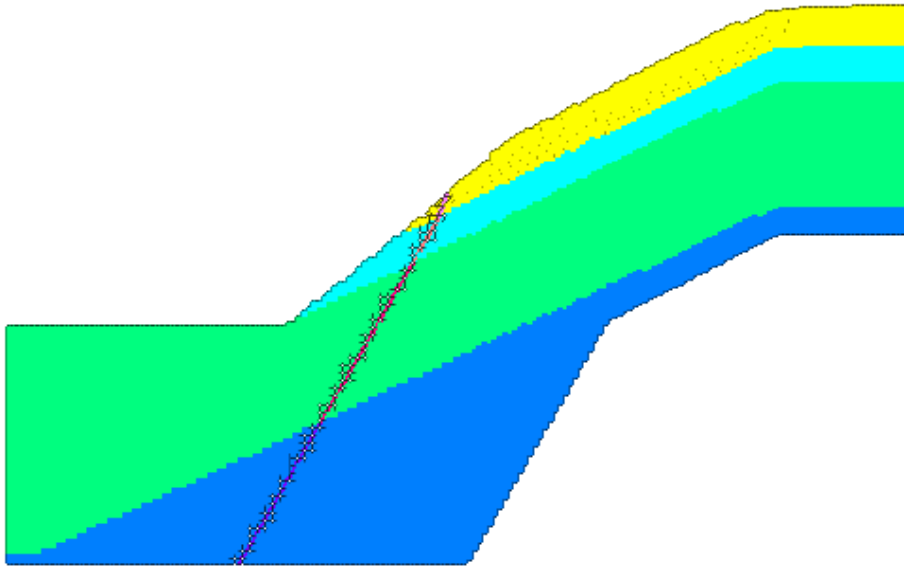


图 8.7.7 硬岩(16.0sec)

time = 2.40000E+01sec

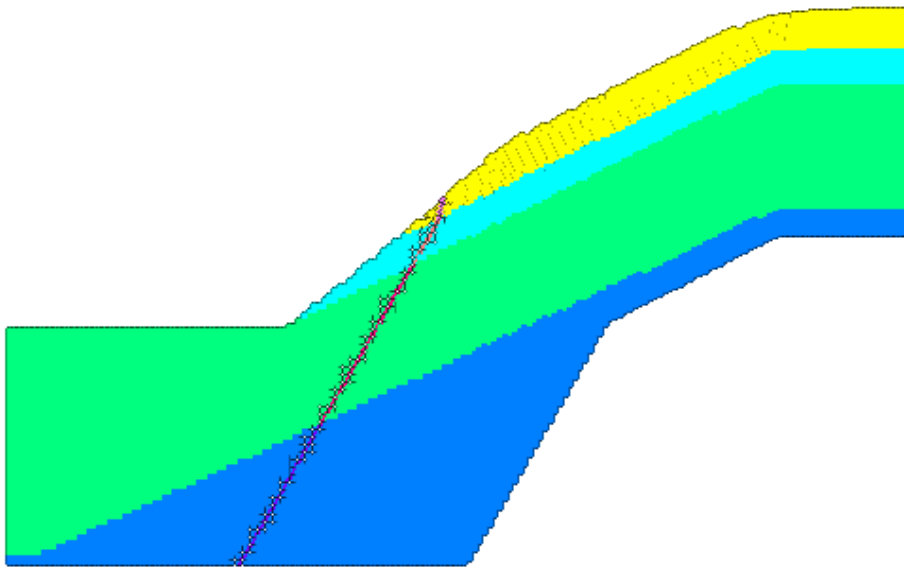


图 8.7.8 硬岩(24.0sec)

time = 3.20000E+01sec

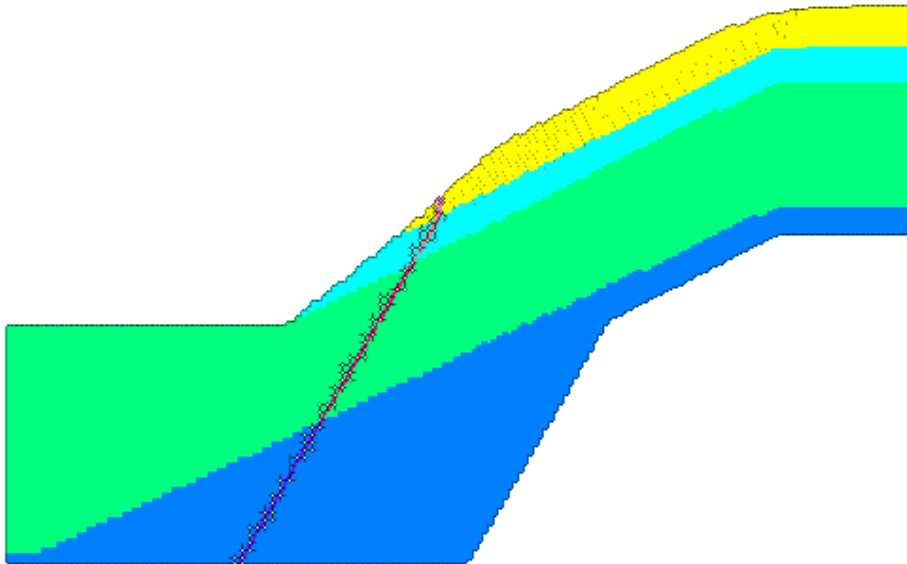


图 8.7.9 硬岩(32.0sec)

time = 4.00000E+01sec

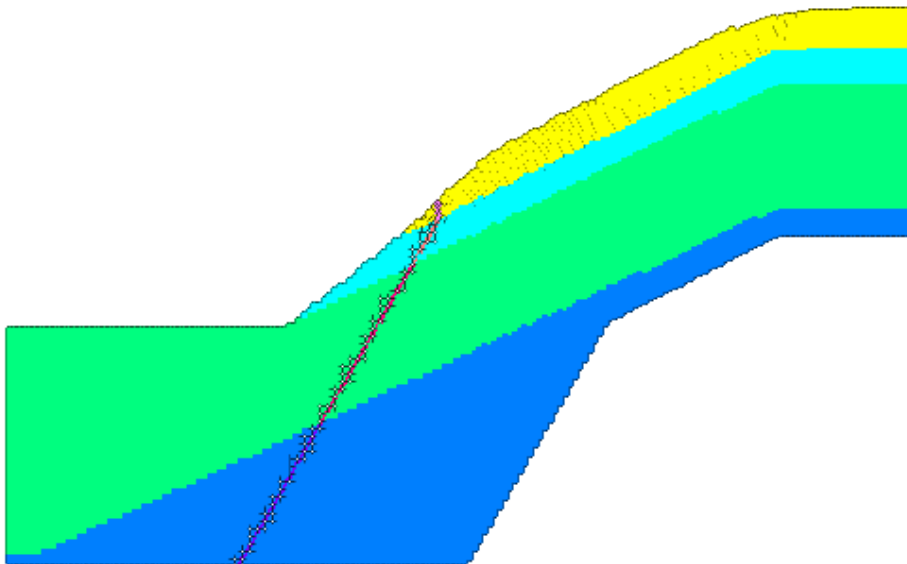


图 8.7.10 硬岩(40.0sec)

time = 4.80000E+01sec

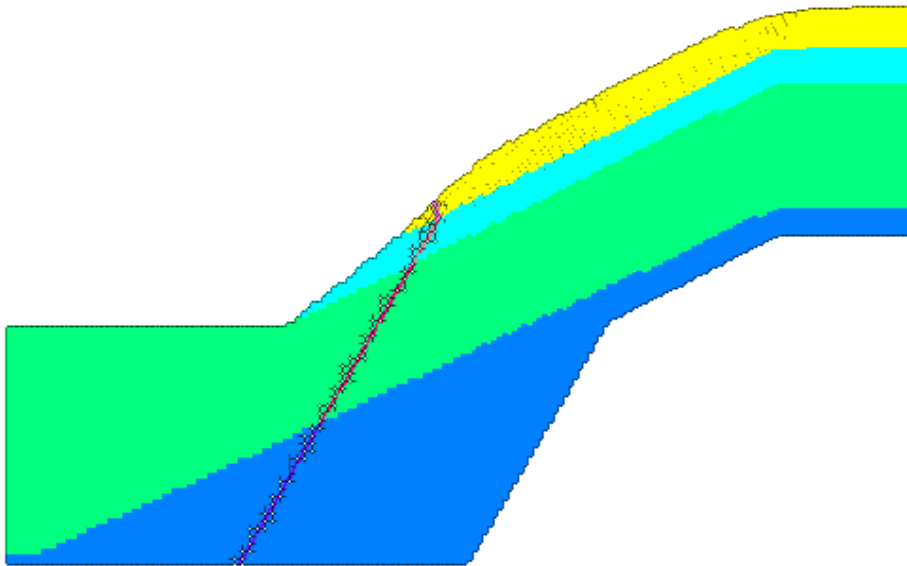


图 8.7.11 硬岩(48.0sec)

time = 5.60000E+01sec

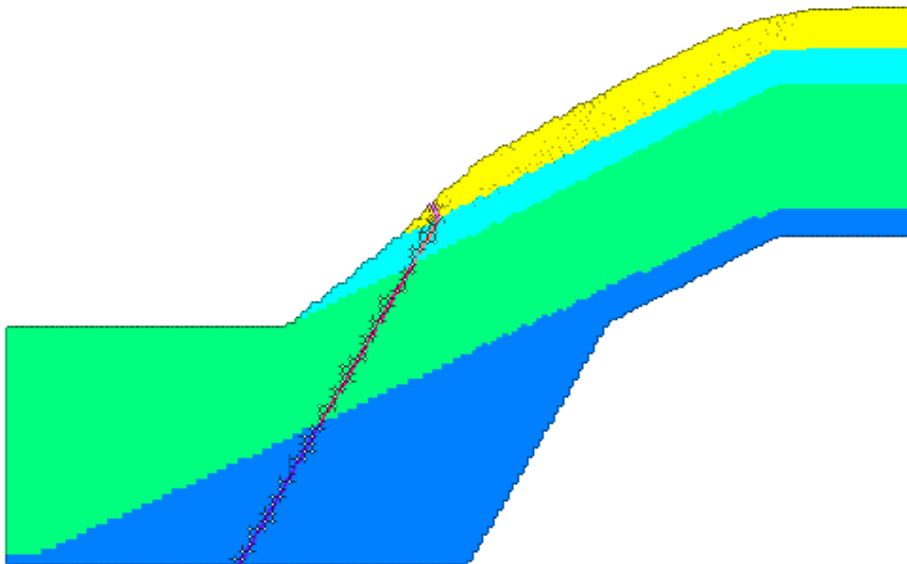


图 8.7.12 硬岩(56.0sec)

time = 6.40000E+01sec

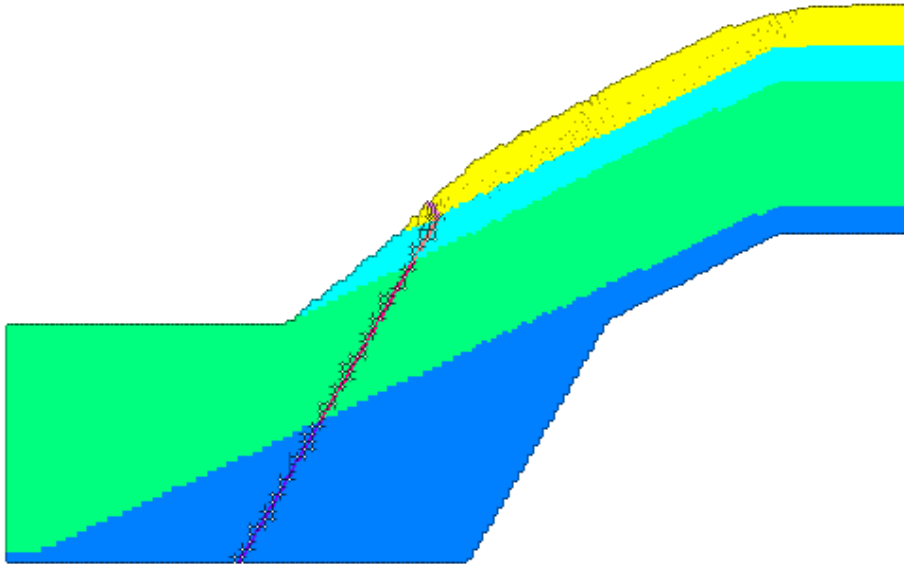


图 8.7.13 硬岩(64.0sec)

time = 7.20000E+01sec

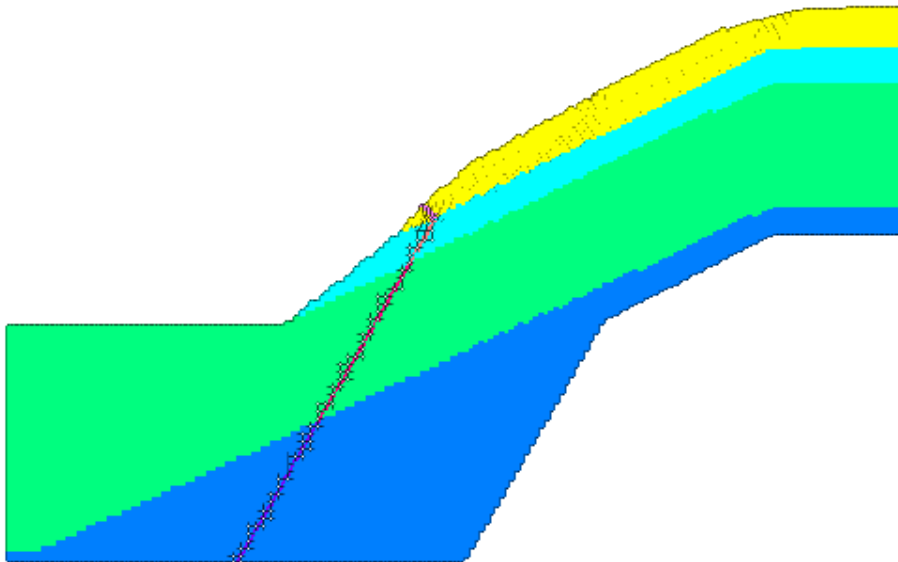


图 8.7.14 硬岩(72.0sec)

time = 8.00000E+01sec

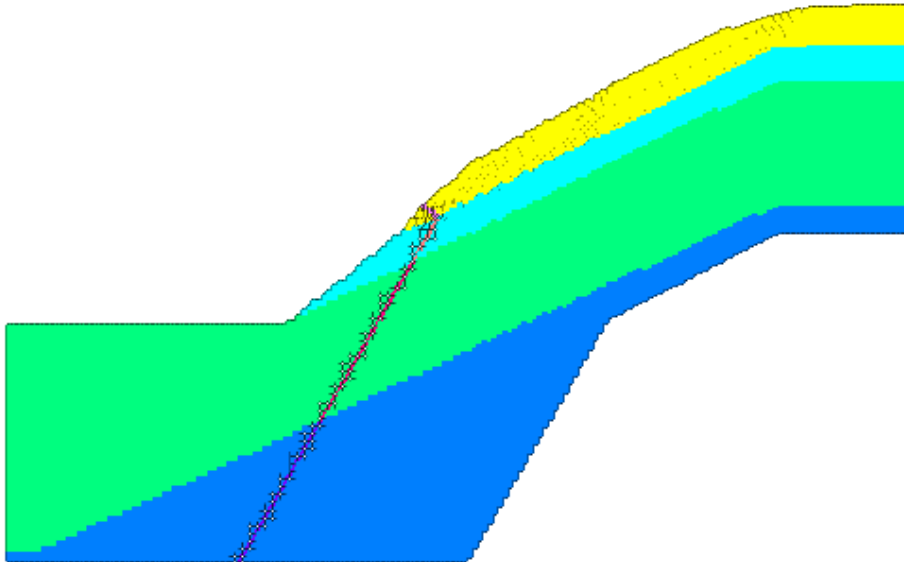


图 8.7.15 硬岩(80.0sec)

8.7.3 ひずみ図

ひずみの様子を加振中は4秒間隔、残留時は12秒間隔でのスナップショットを以下に示す。

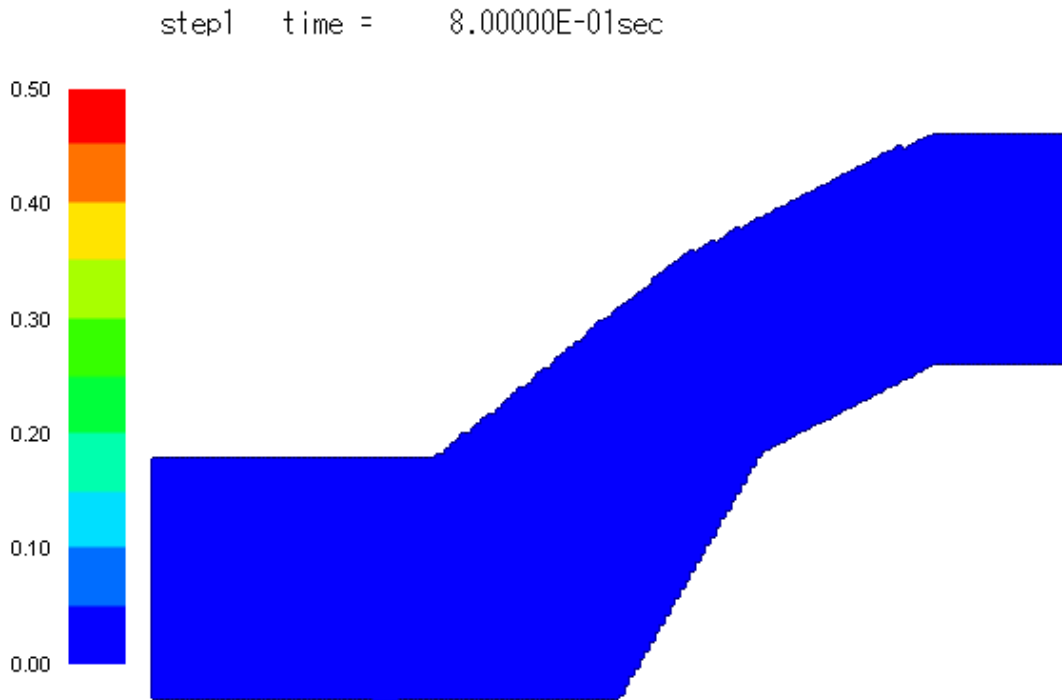


図 8.7.16 硬岩(0.8sec)

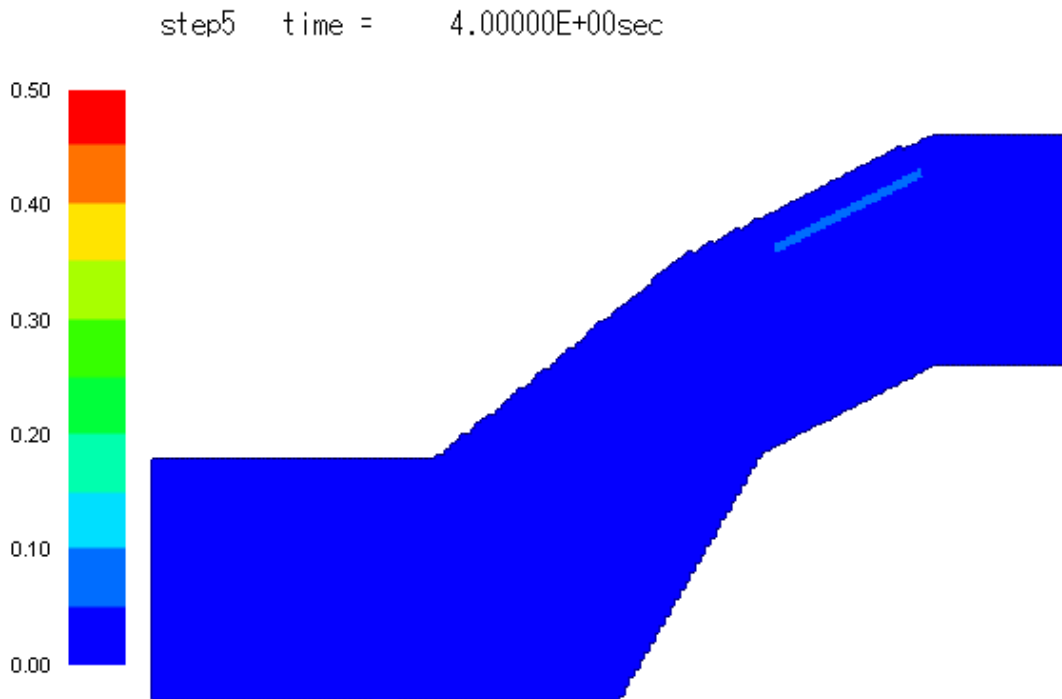


図 8.7.17 硬岩(4.0sec)

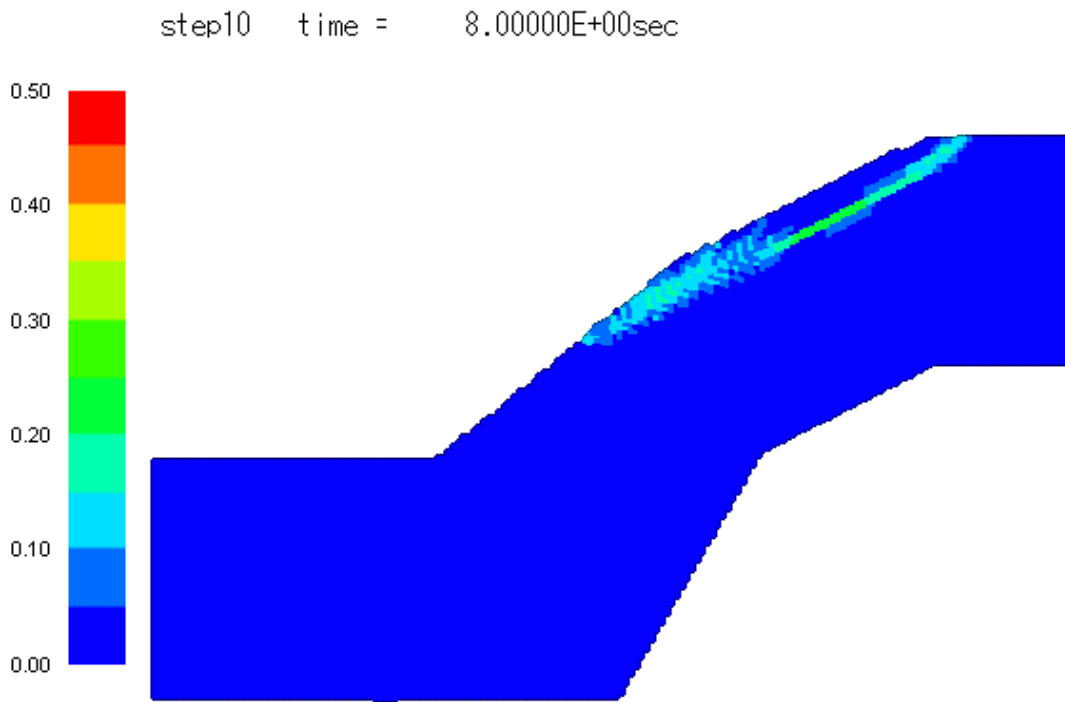


图 8.7.18 硬岩(8.0sec)

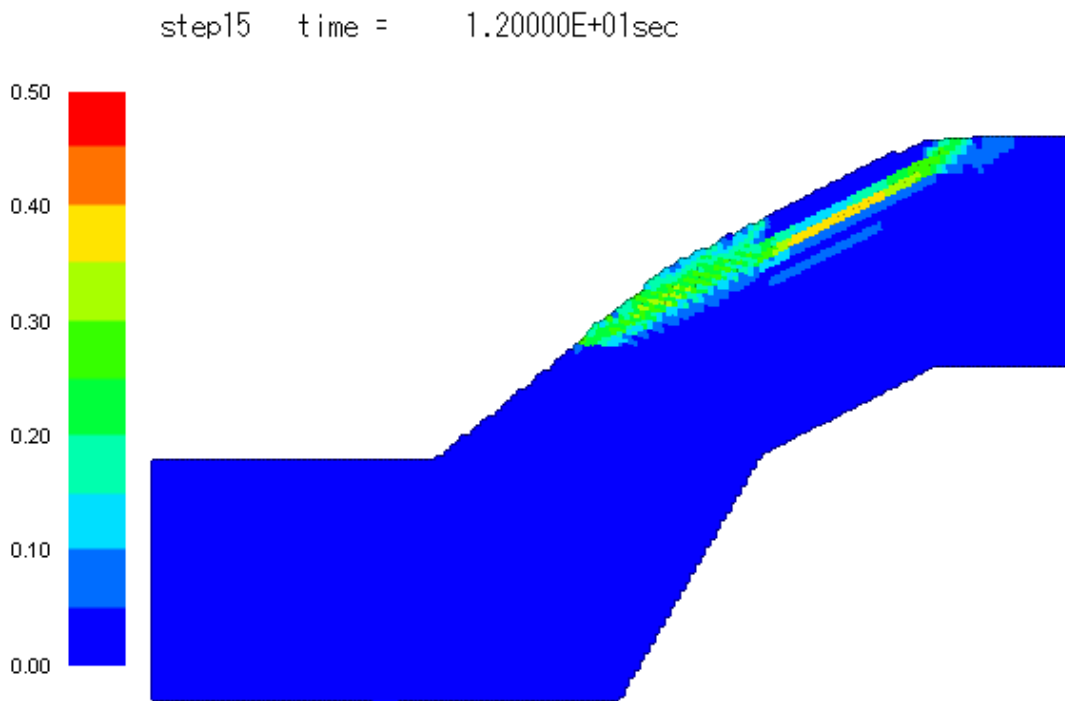


图 8.7.19 硬岩(12.0sec)

step20 time = 1.60000E+01sec

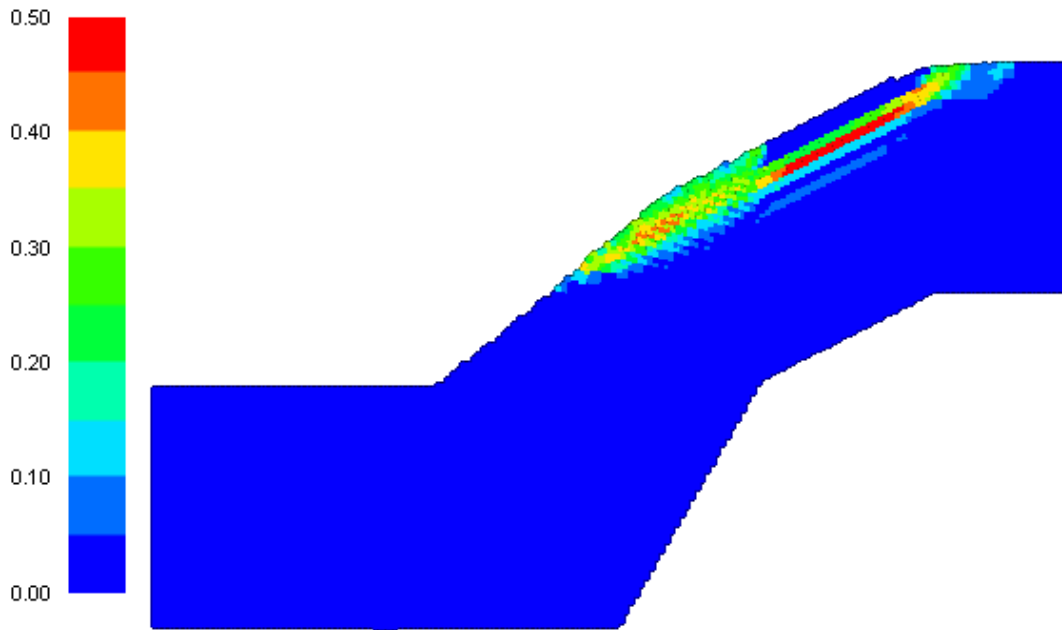


图 8.7.20 硬岩(16.0sec)

step25 time = 2.00000E+01sec

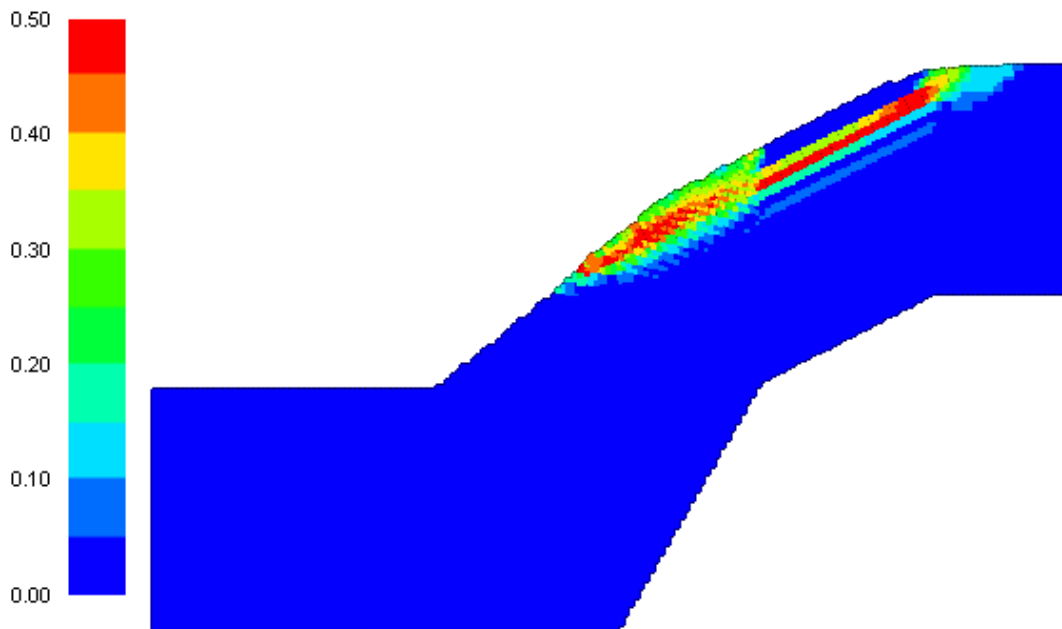


图 8.7.21 硬岩(20.0sec)

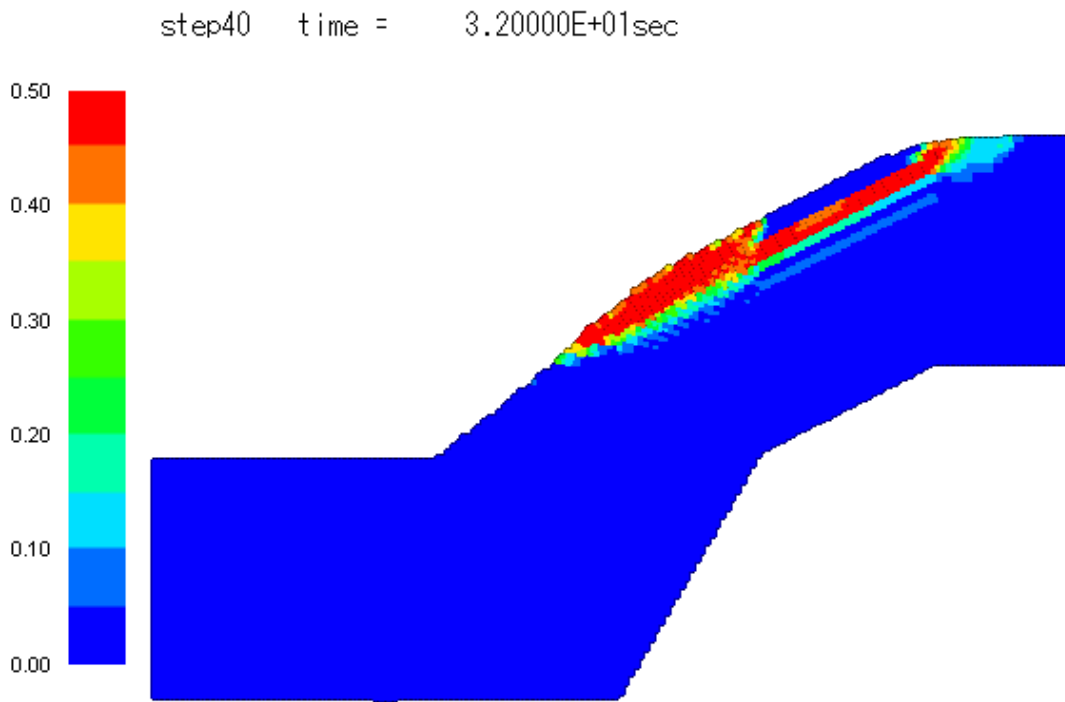


图 8.7.22 硬岩(32.0sec)

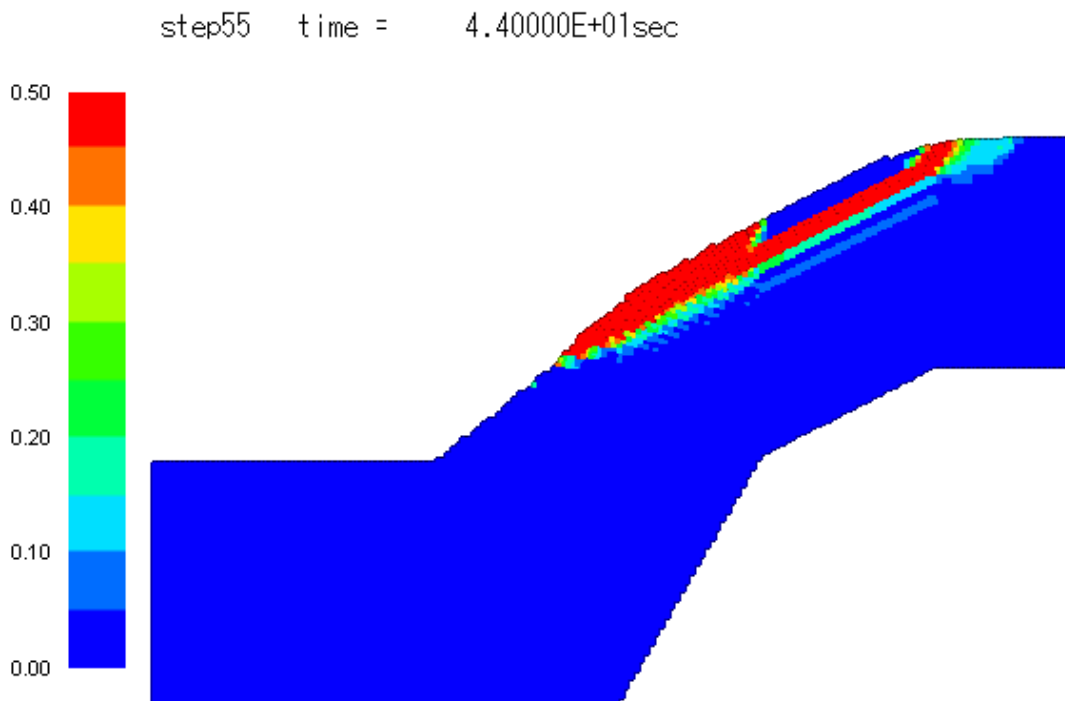


图 8.7.23 硬岩(44.0sec)

step70 time = 5.60000E+01sec

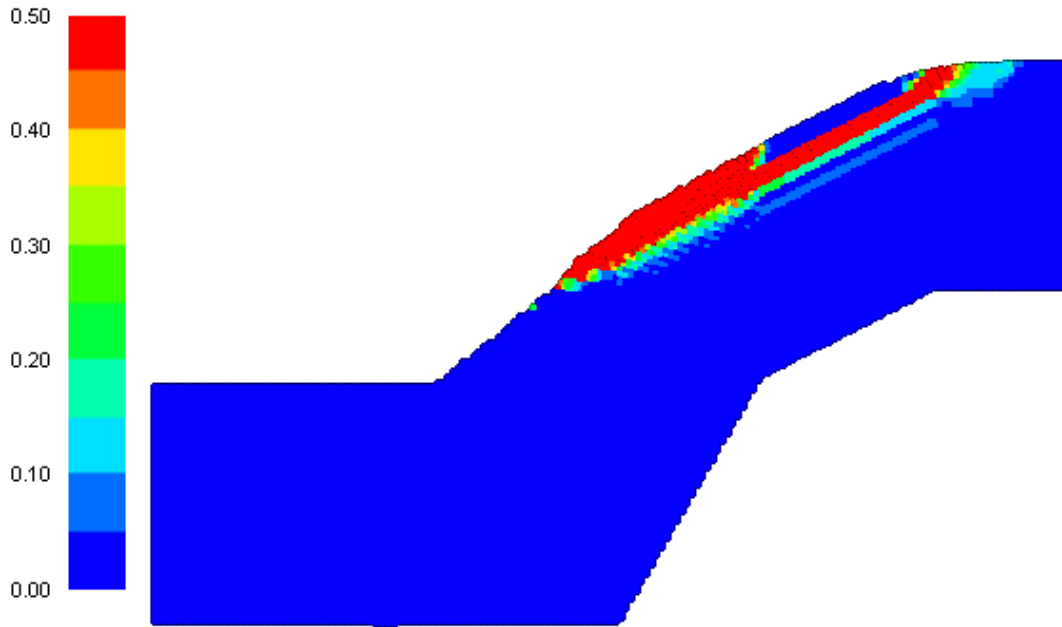


图 8.7.24 硬岩(56.0sec)

step85 time = 6.80000E+01sec

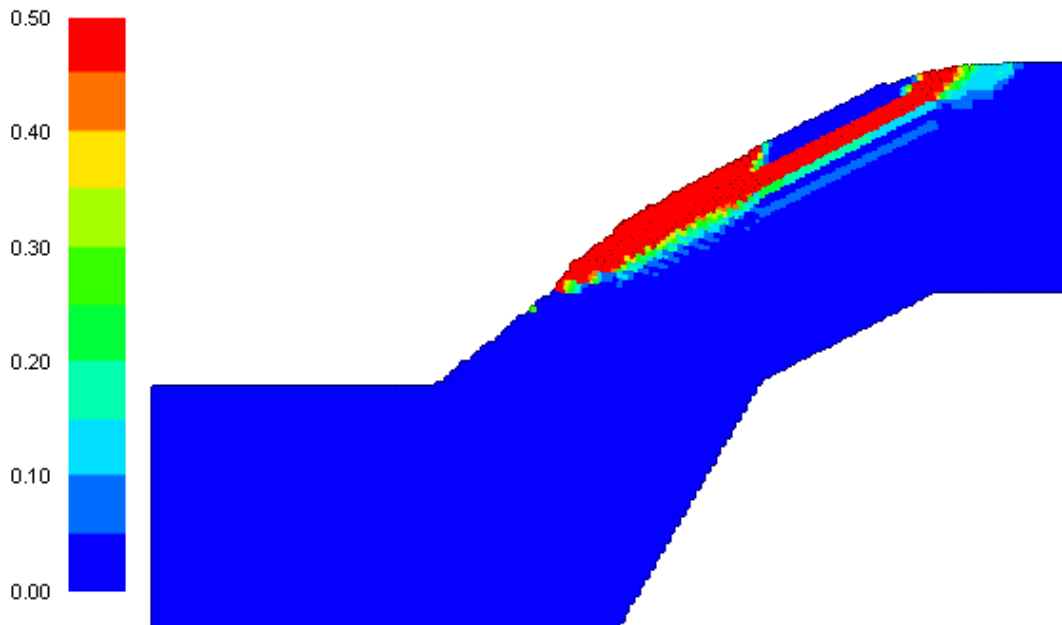


图 8.7.25 硬岩(68.0sec)

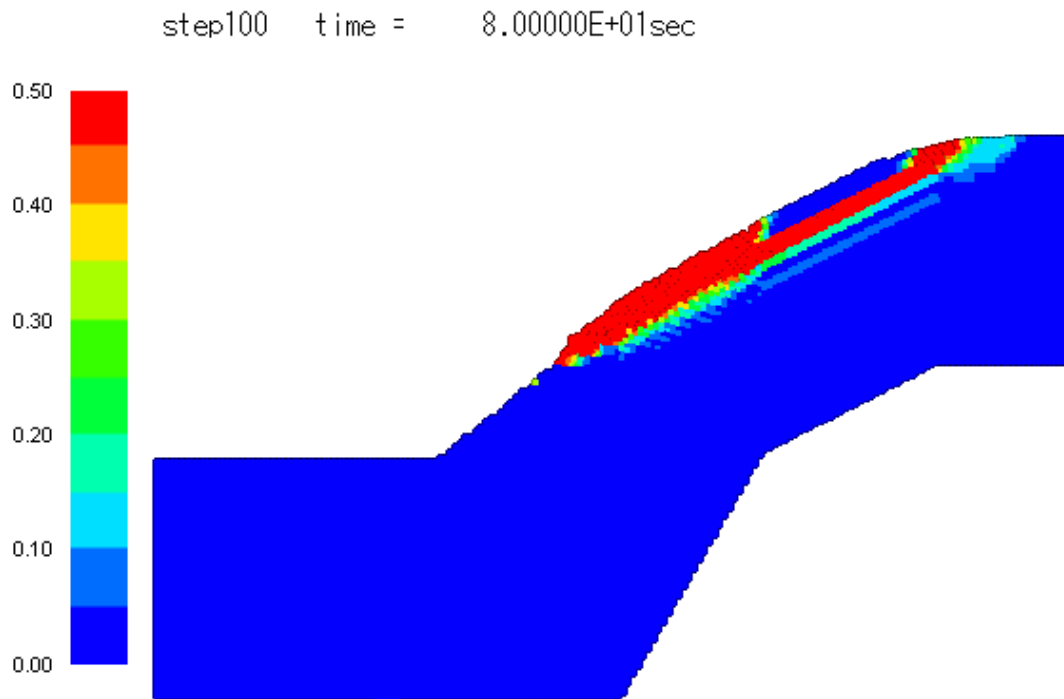


图 8.7.26 硬岩(80.0sec)

8.7.4 粒子時刻歴結果

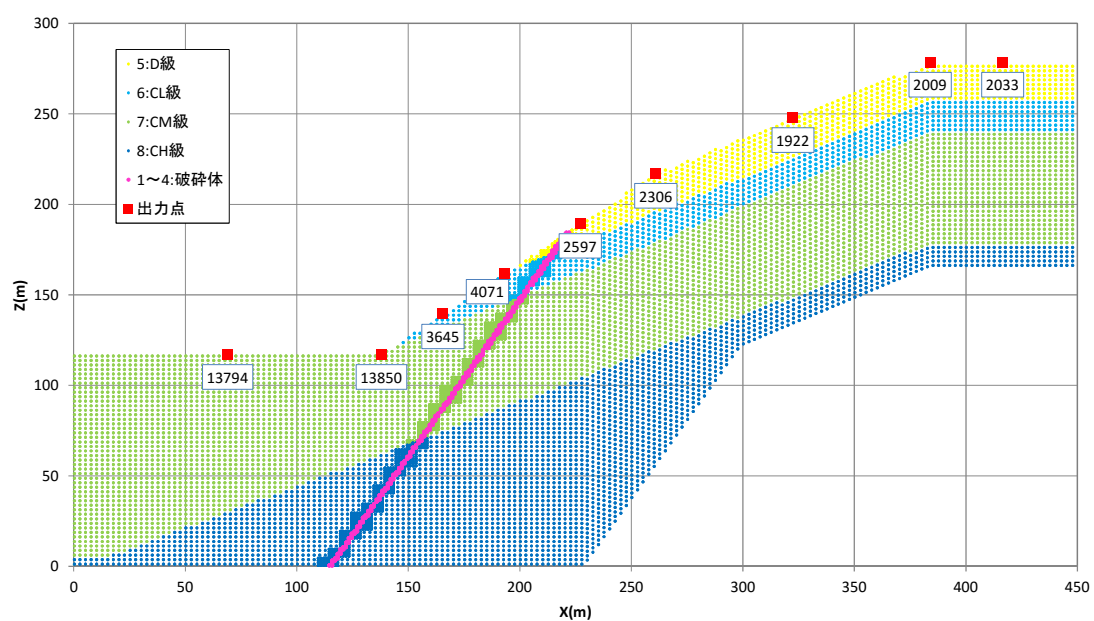


図 8.7.27 硬岩結果出力位置

表 8.7.1 硬岩出力粒子一覧

粒子番号	X座標(m)	Z座標(m)
13794	69.00	117.00
13850	138.00	117.00
3645	165.60	139.40
4071	193.10	161.80
2597	227.10	189.40
2306	261.00	217.00
1922	322.50	247.80
2009	384.00	278.50
2033	416.50	278.50

(1) 水平方向変位時刻歴

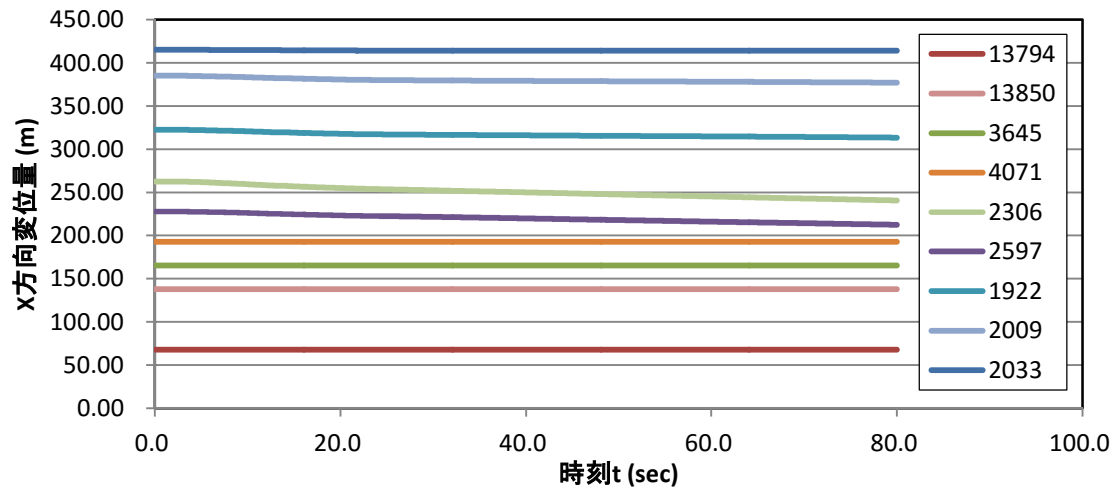


図 8.7.28 水平方向変位時刻歴

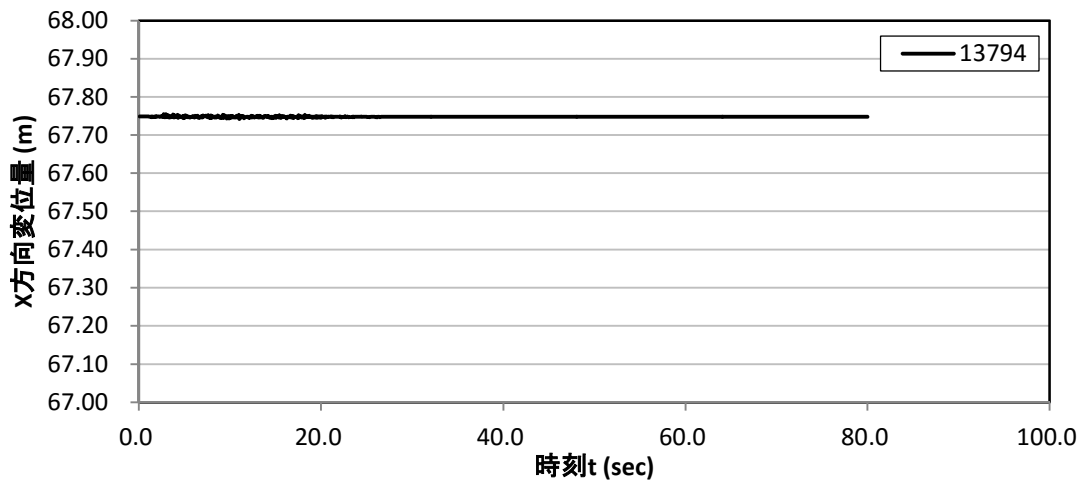


図 8.7.29 水平方向変位時刻歴(粒子番号 13794)

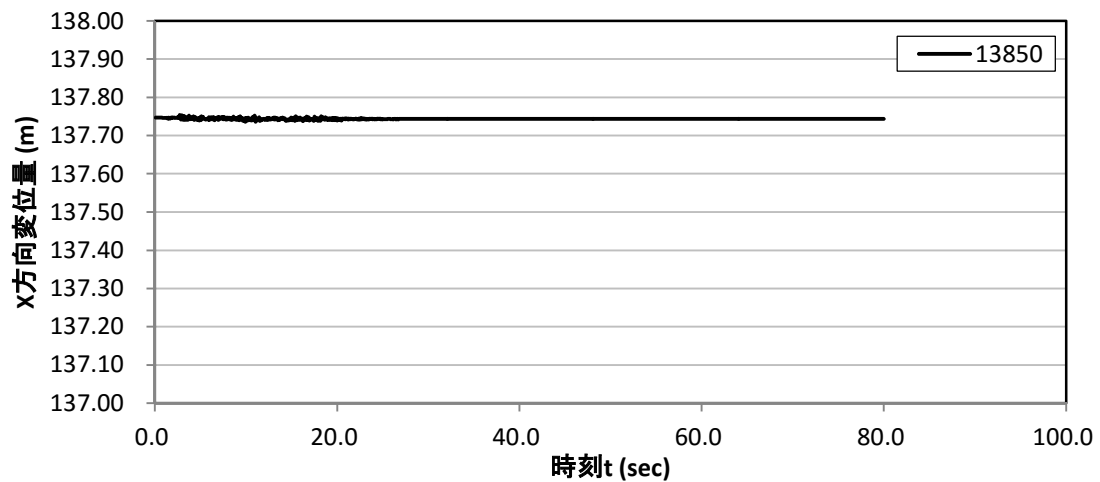


図 8.7.30 水平方向変位時刻歴(粒子番号 13850)

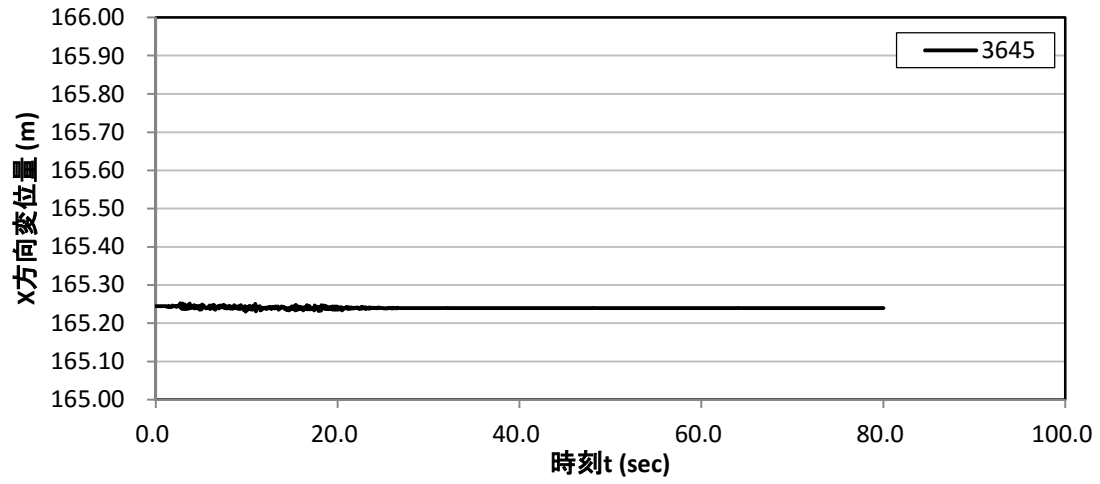


図 8.7.31 水平方向変位時刻歴(粒子番号 3645)

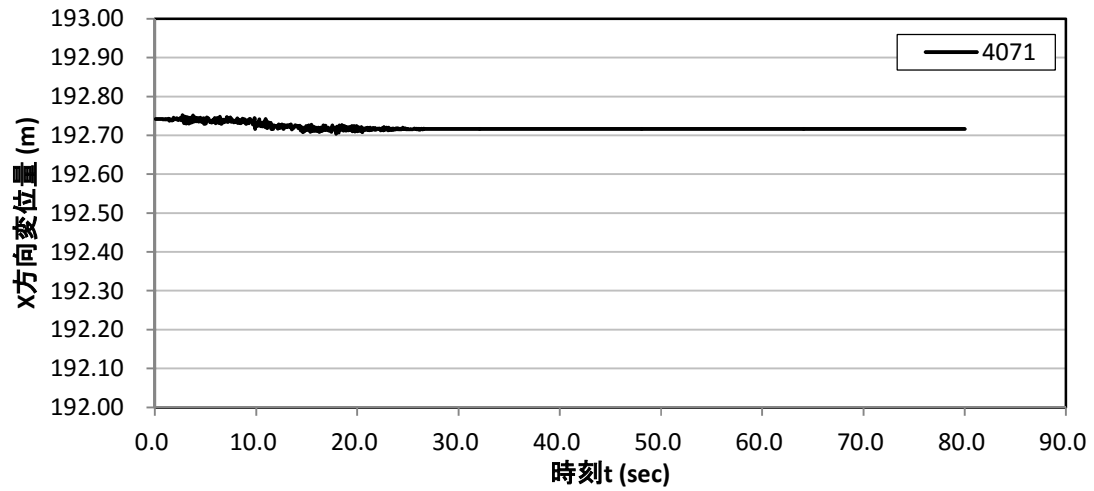


図 8.7.32 水平方向変位時刻歴(粒子番号 4071)

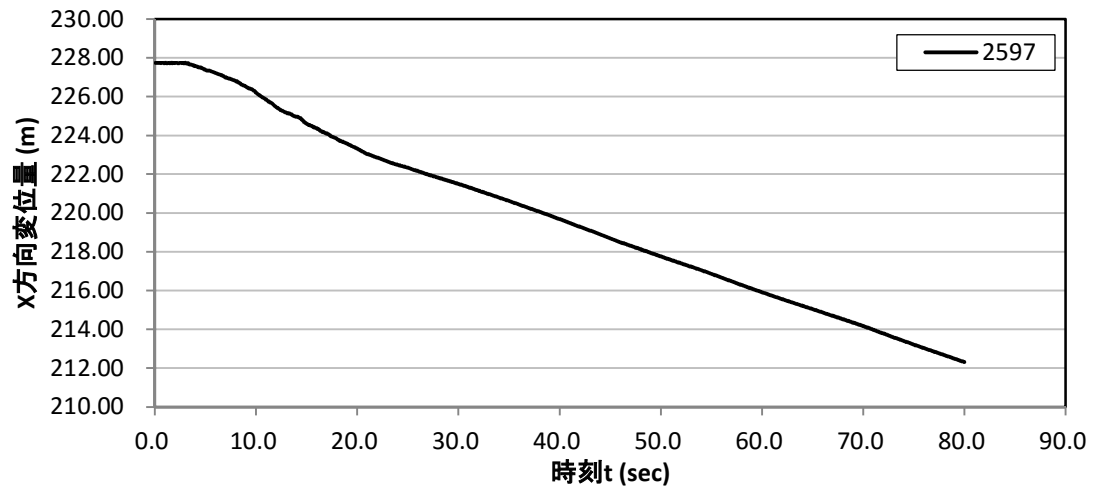


図 8.7.33 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2597)

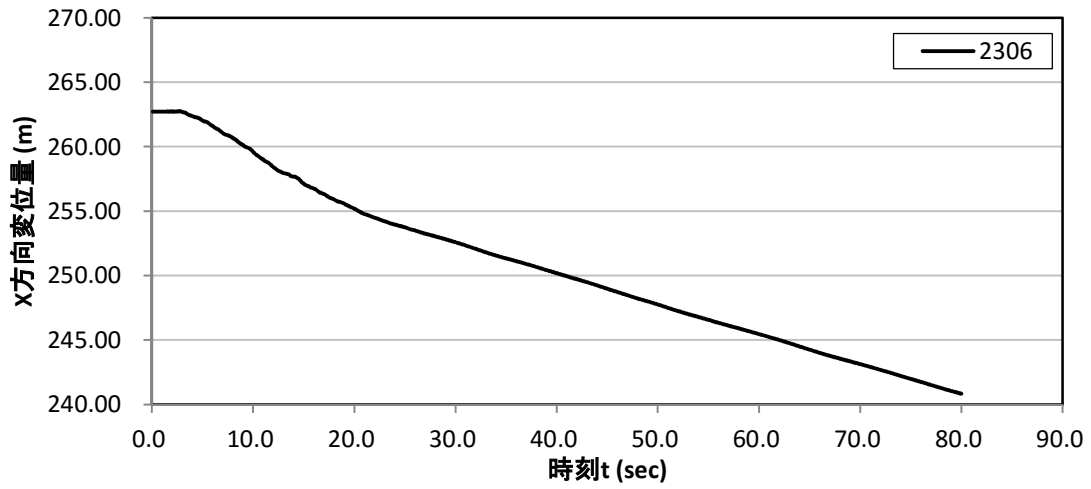


图 8.7.34 水平方向变位時刻歴(粒子番号 2306)

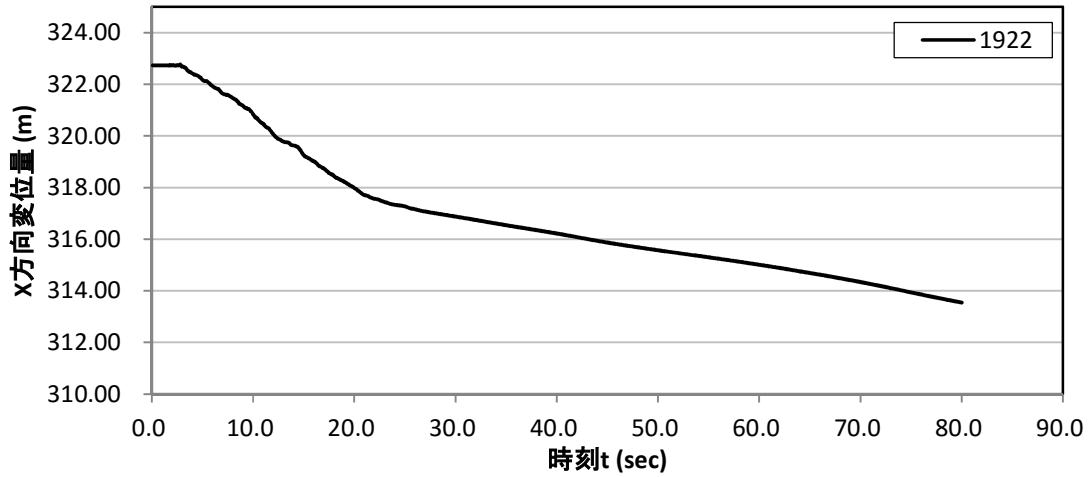


图 8.7.35 水平方向变位時刻歴(粒子番号 1922)

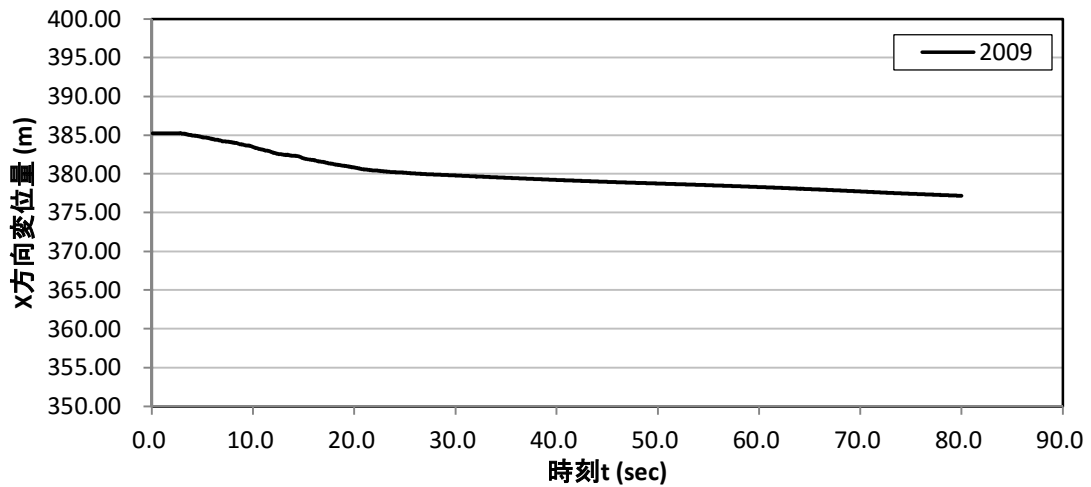


图 8.7.36 水平方向变位時刻歴(粒子番号 2009)

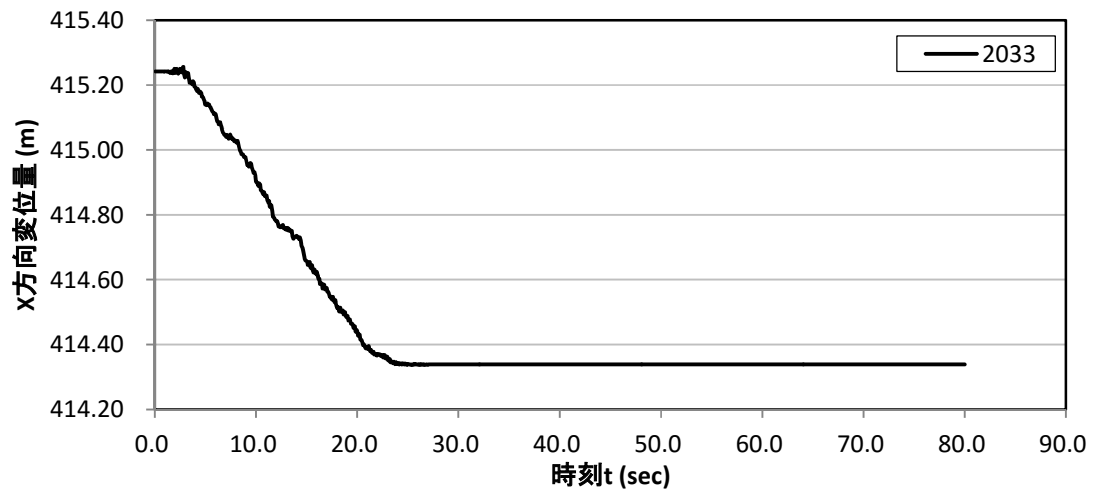


图 8. 7. 37 水平方向変位時刻歴(粒子番号 2033)

(2) 鉛直方向変位時刻歴

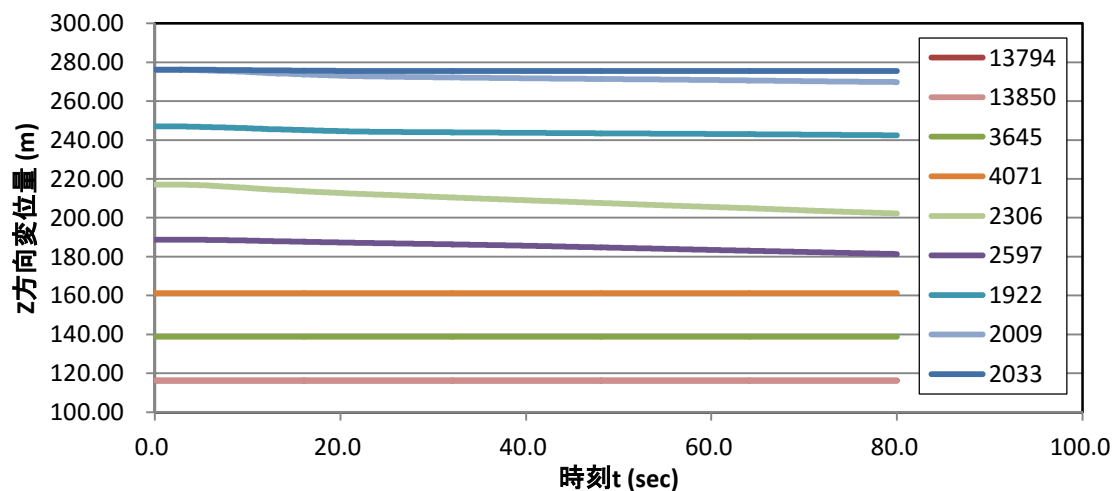


図 8.7.38 鉛直方向変位時刻歴

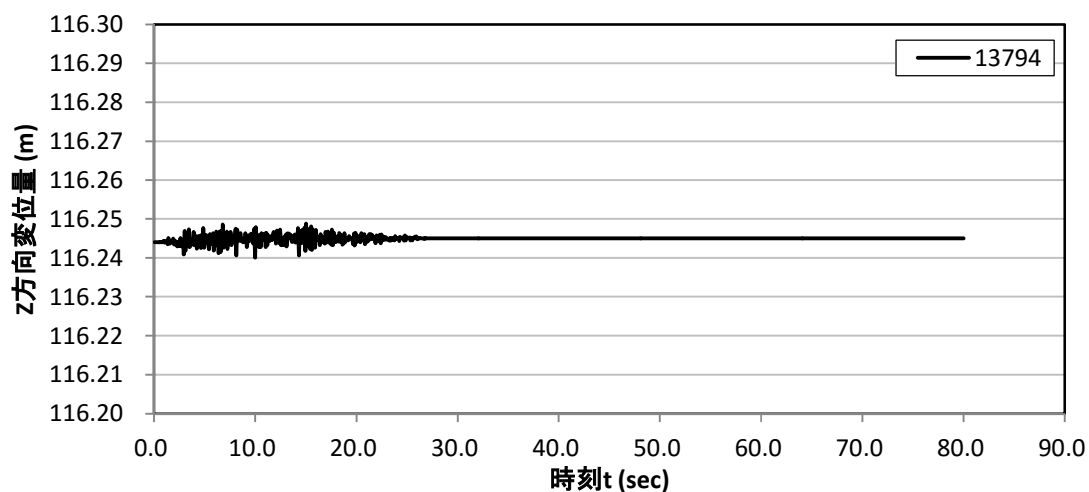


図 8.7.39 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 13794)

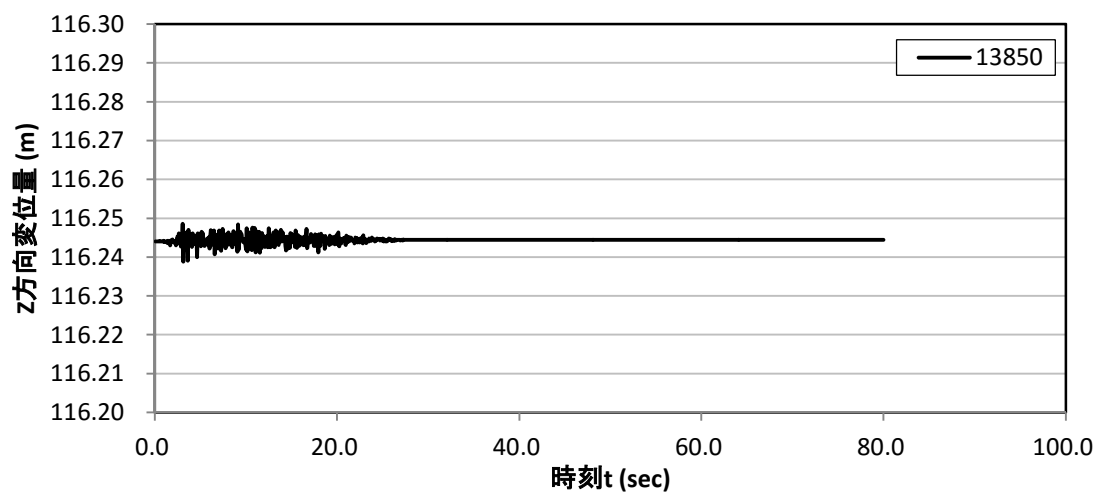


図 8.7.40 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 13850)

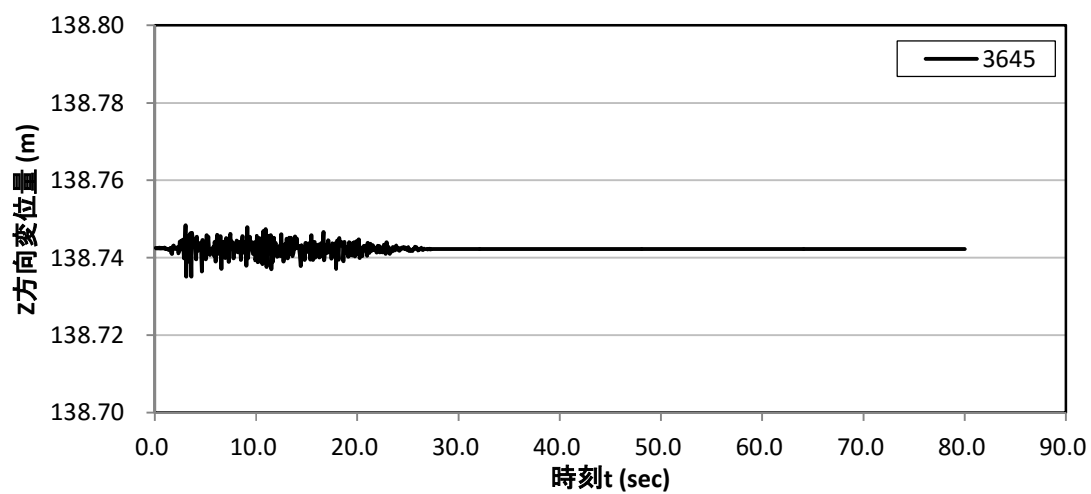


図 8.7.41 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 3645)

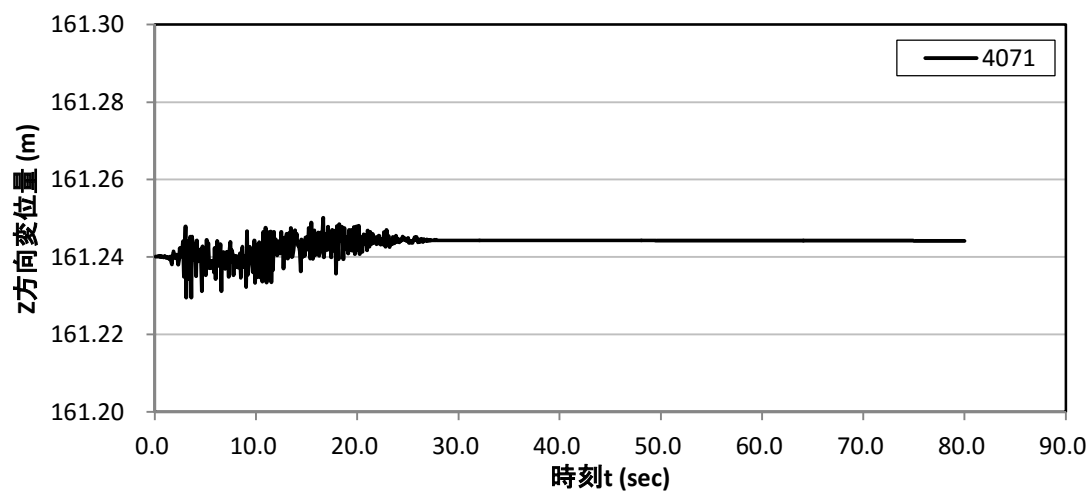


図 8.7.42 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 4071)

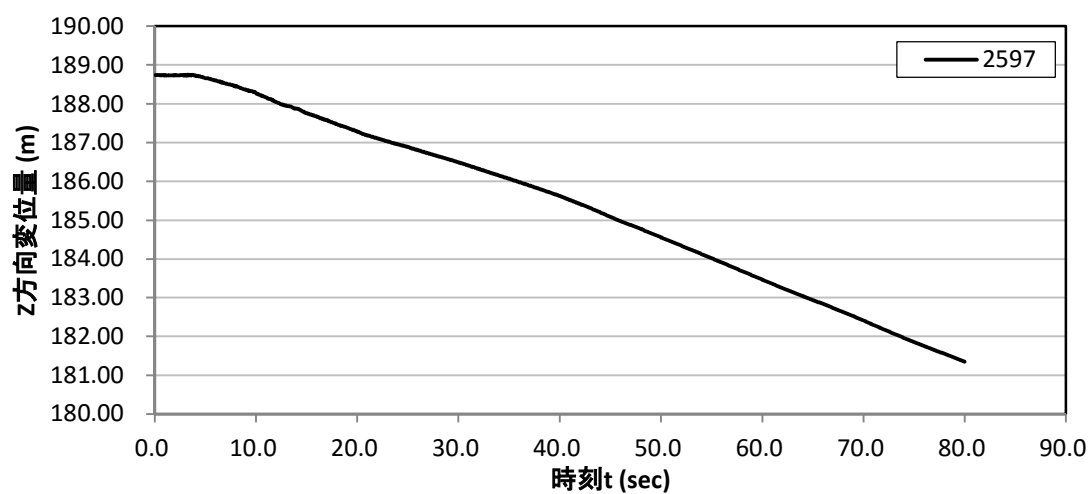


図 8.7.43 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2597)

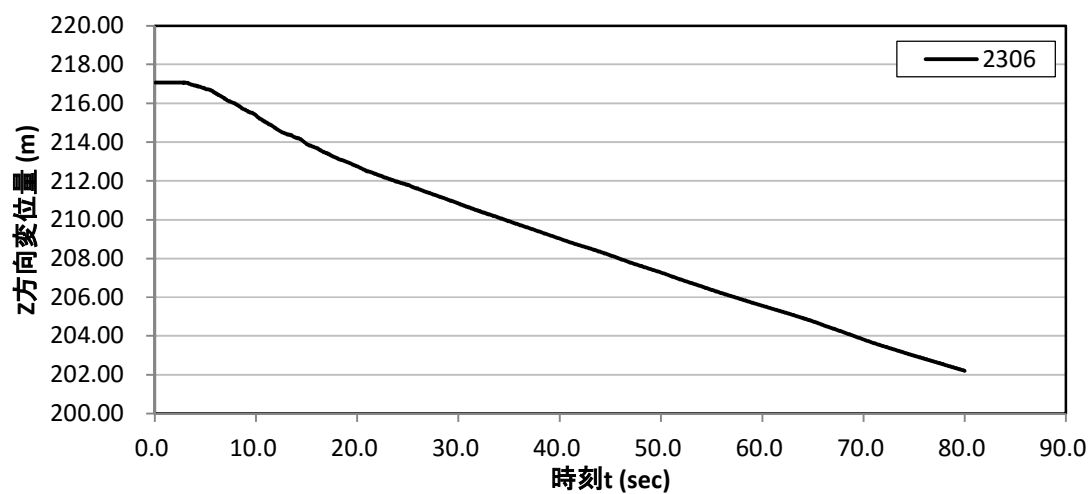


図 8.7.44 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2306)

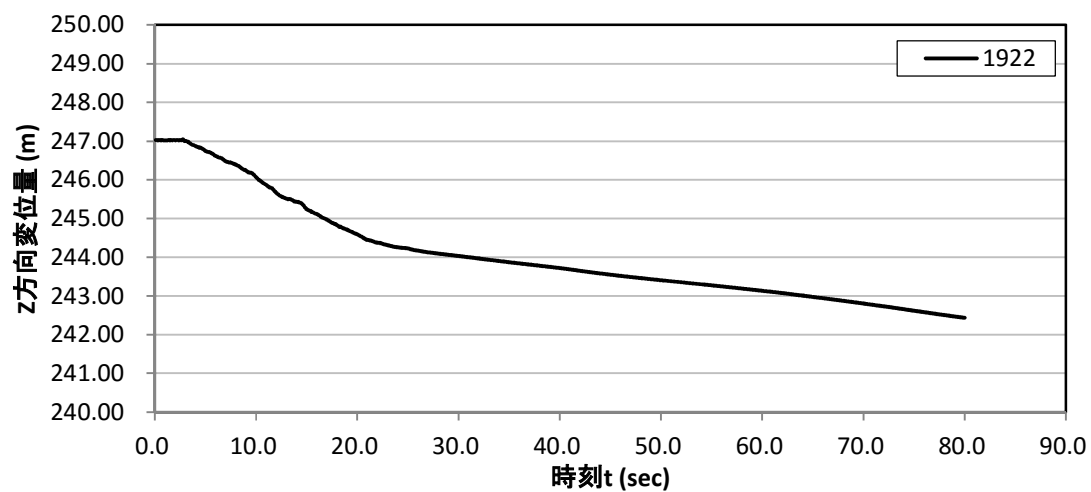


図 8.7.45 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 1922)

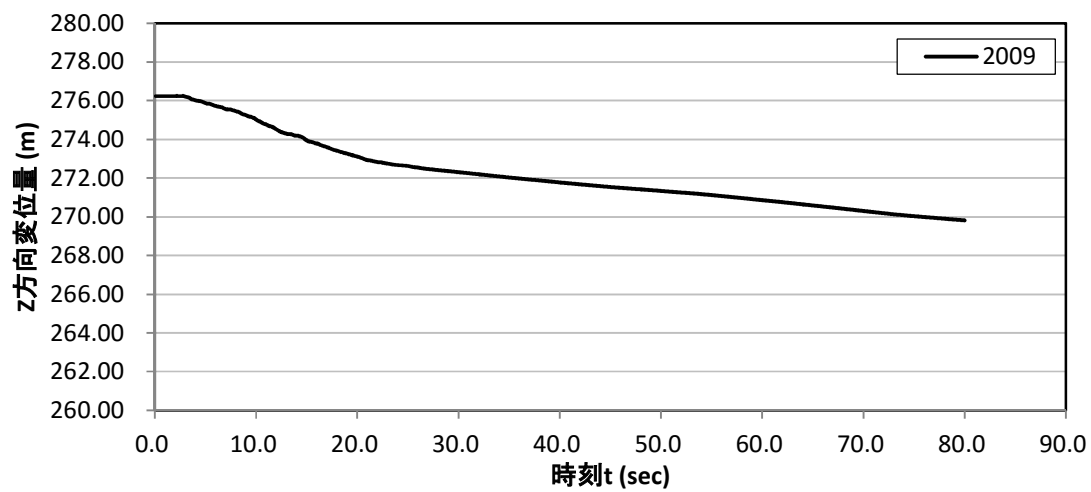


図 8.7.46 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2009)

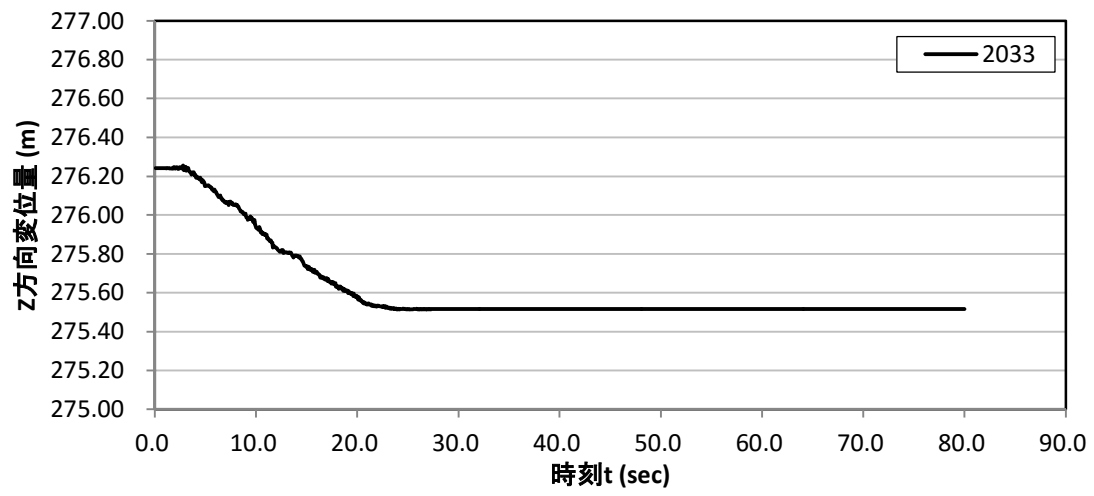


図 8. 7. 47 鉛直方向変位時刻歴(粒子番号 2033)

(3) 水平方向加速度時刻歴

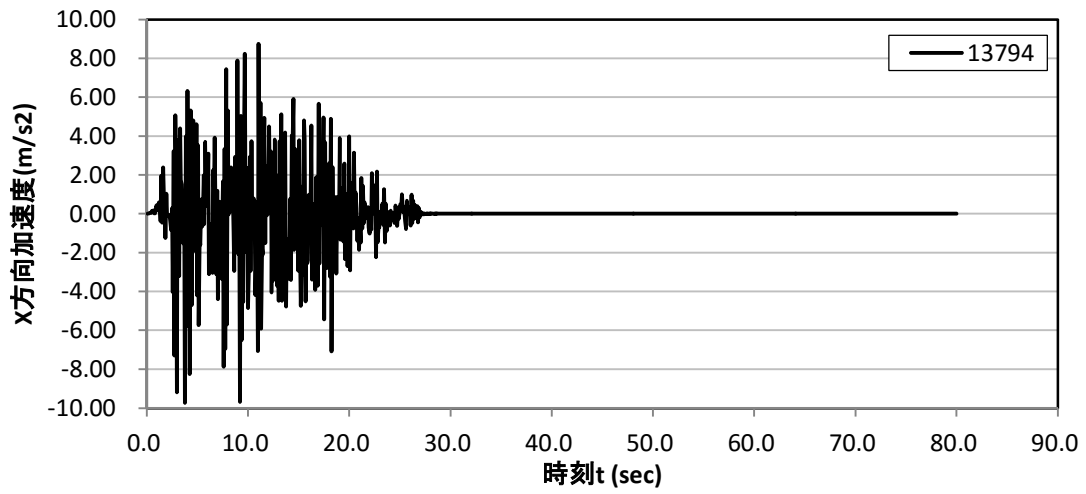


图 8.7.48 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 13794)

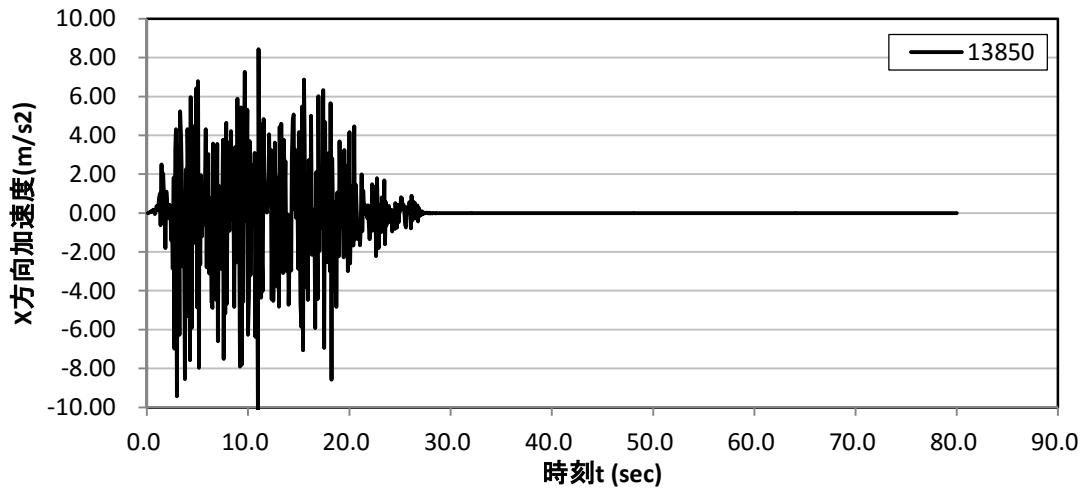


图 8.7.49 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 13850)

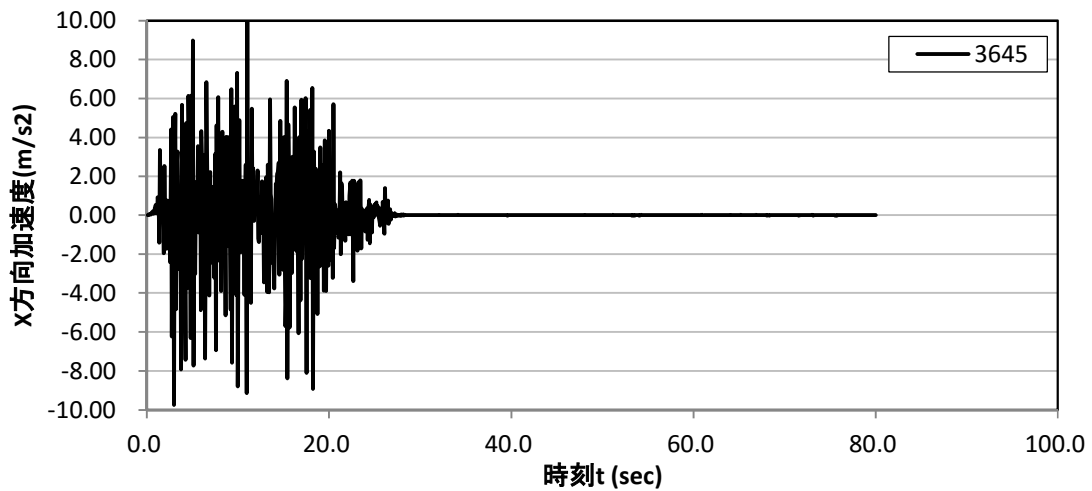


图 8.7.50 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 3645)

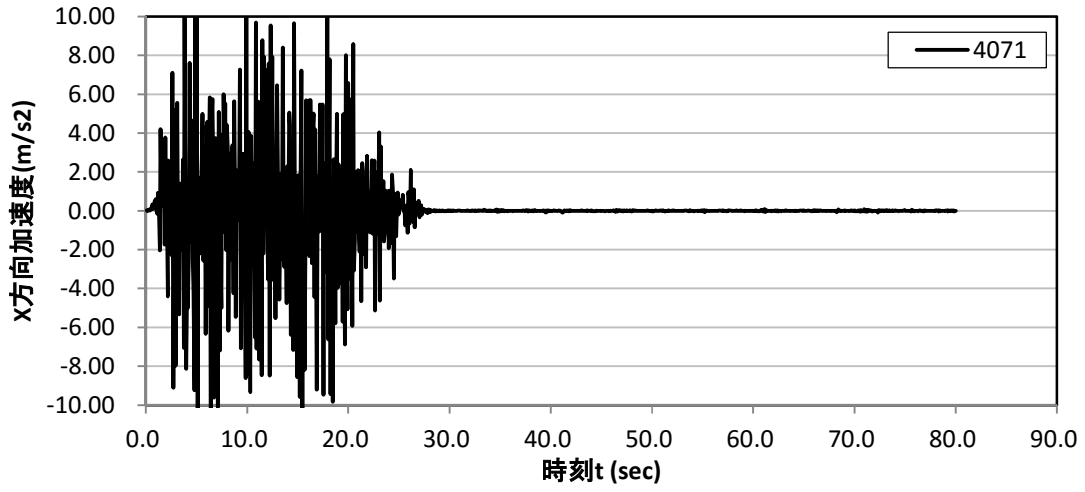


图 8.7.51 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 4071)

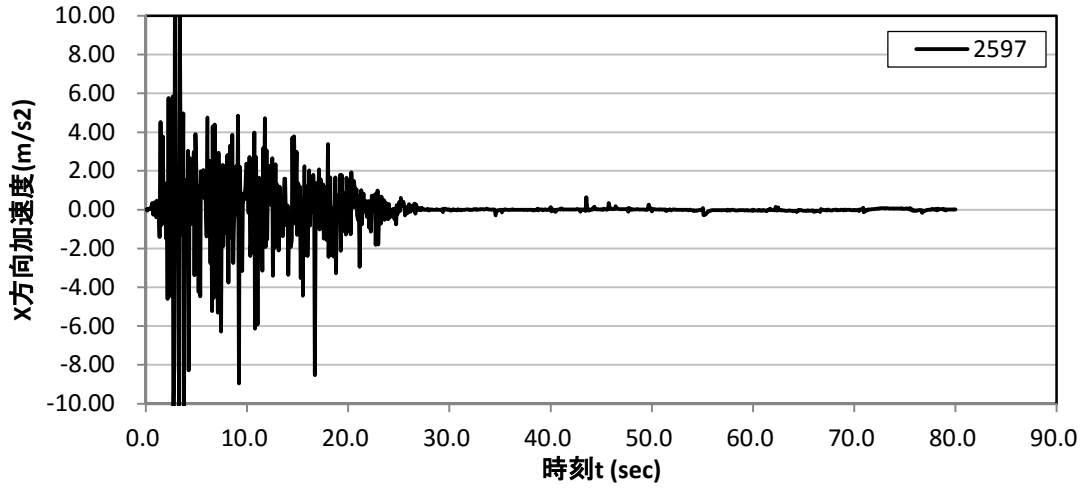


图 8.7.52 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2597)

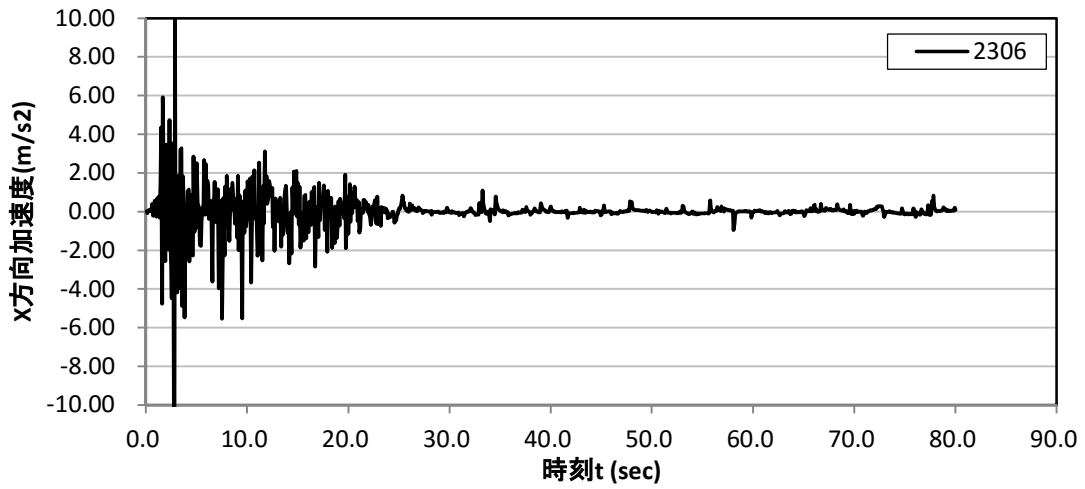


图 8.7.53 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2306)

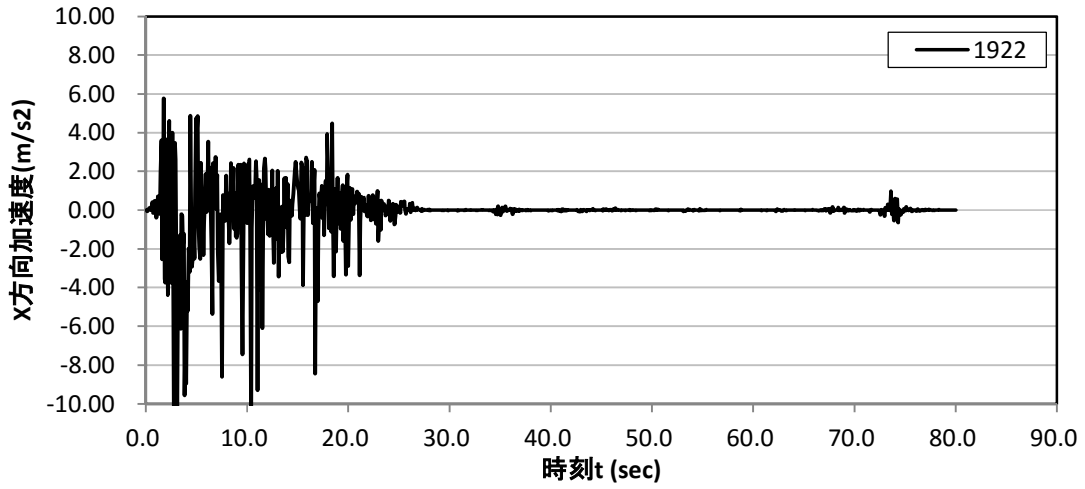


图 8.7.54 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 1922)

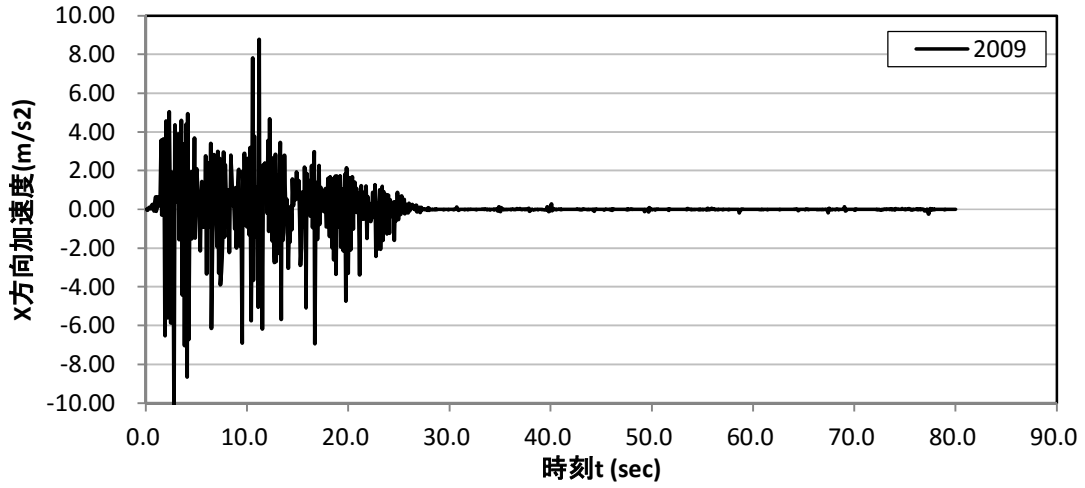


图 8.7.55 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2009)

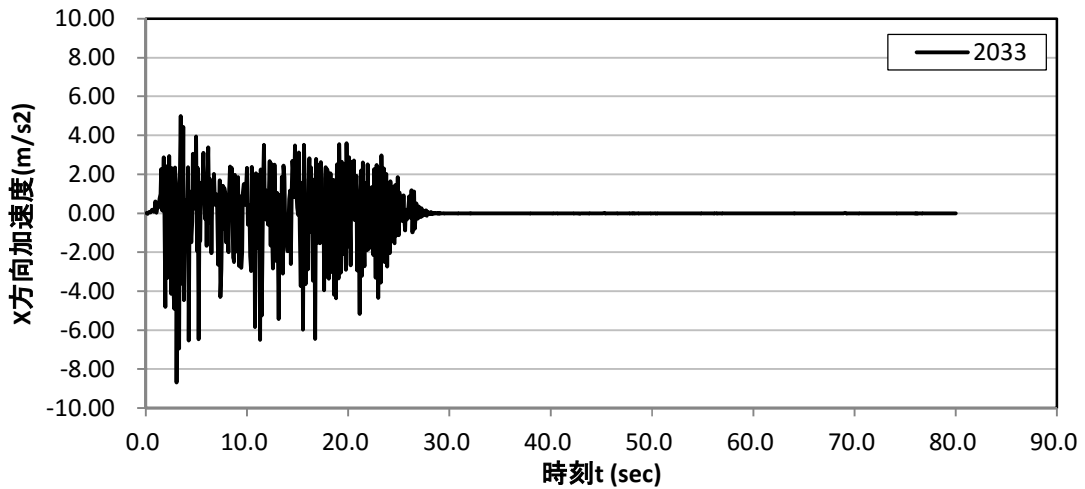


图 8.7.56 水平方向加速度時刻歴(粒子番号 2033)

(4) 鉛直方向加速度時刻歴

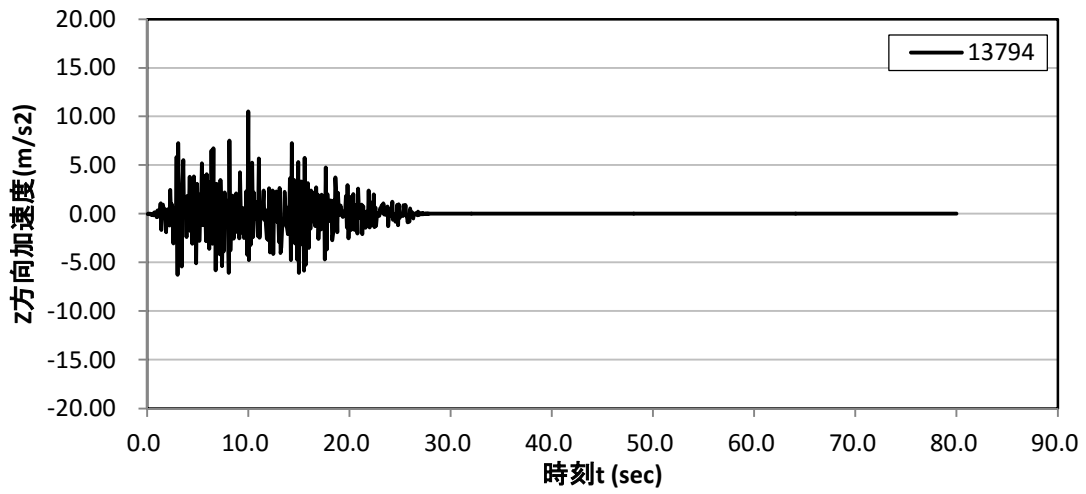


图 8.7.57 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 13794)

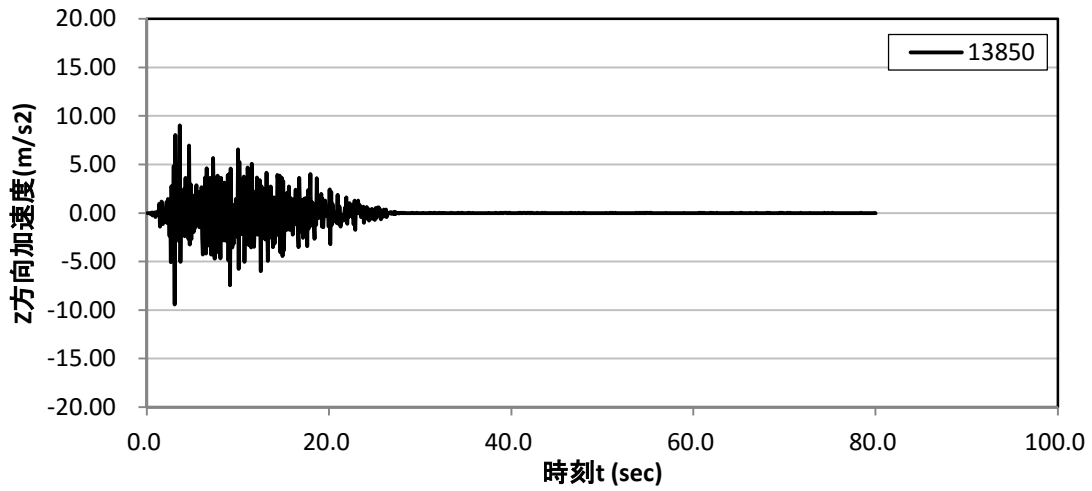


图 8.7.58 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 13850)

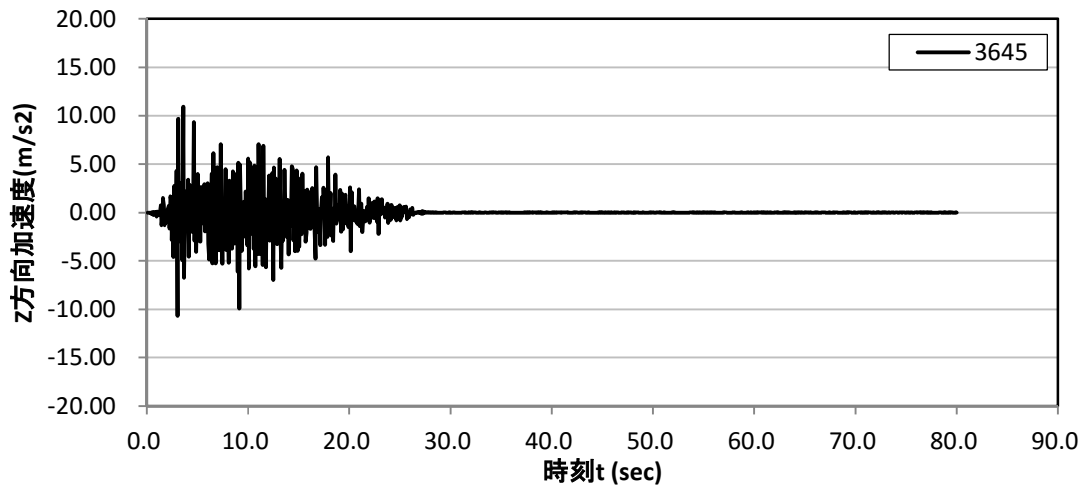


图 8.7.59 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 3645)

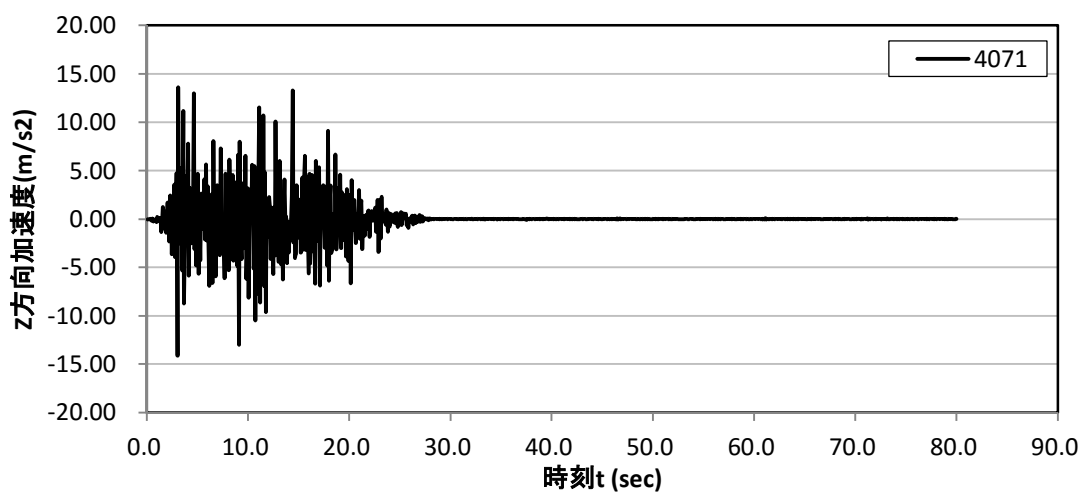


图 8.7.60 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 4071)

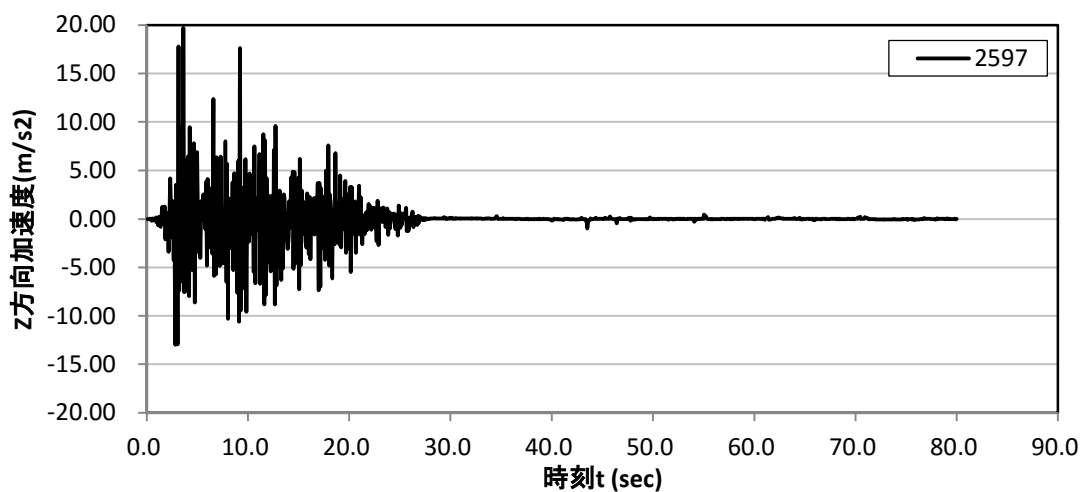


图 8.7.61 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2597)

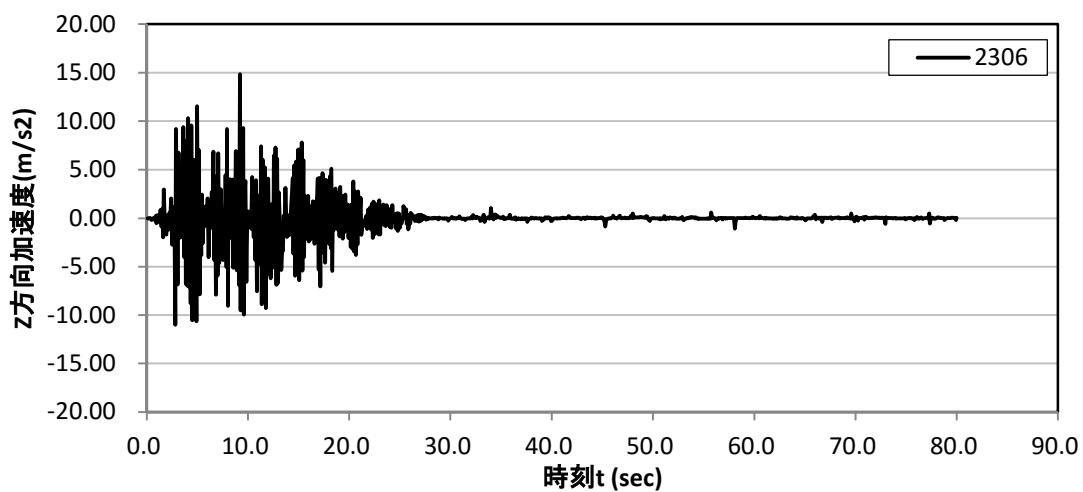


图 8.7.62 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2306)

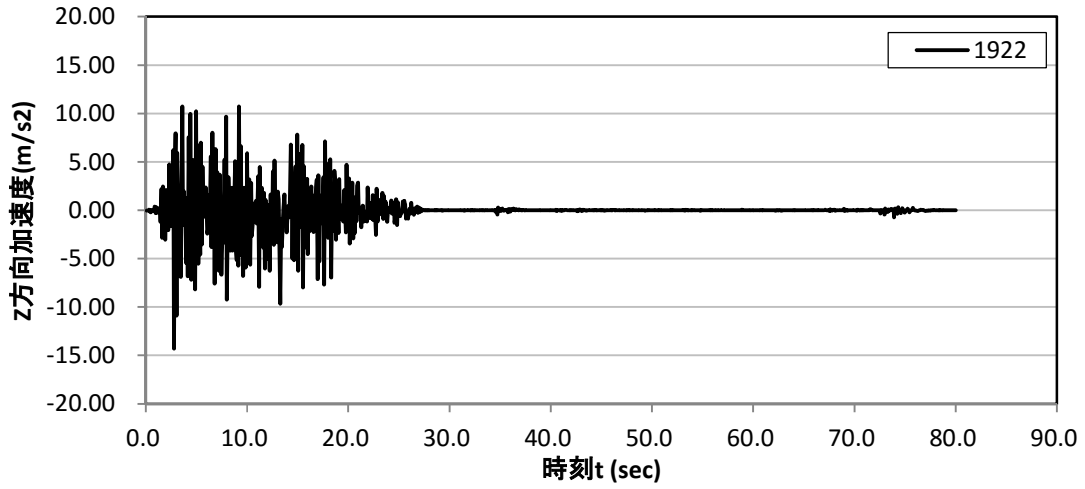


图 8.7.63 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 1922)

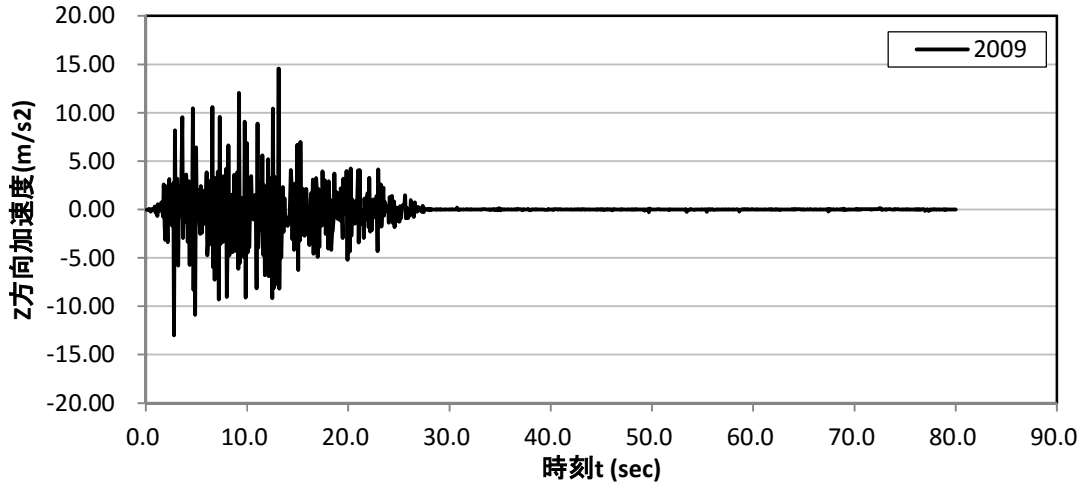


图 8.7.64 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2009)

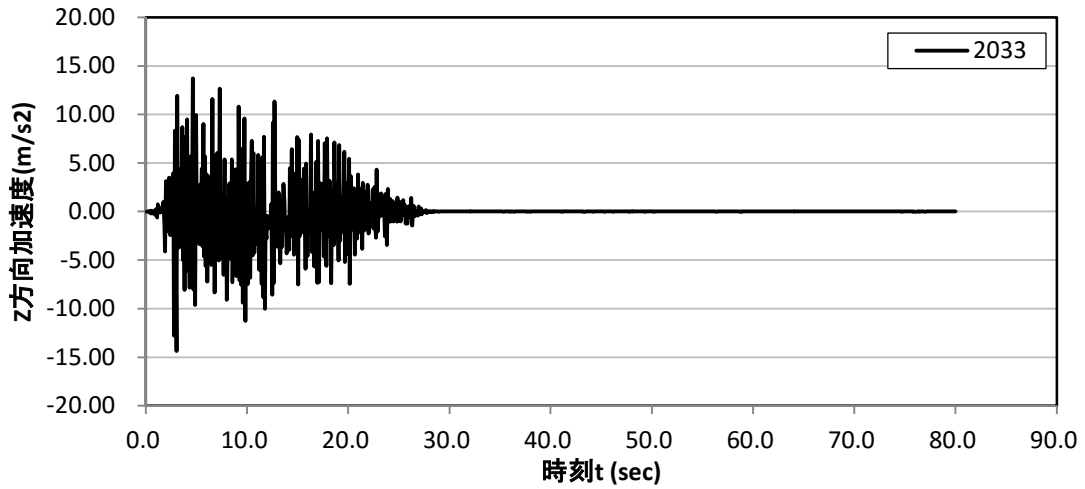


图 8.7.65 鉛直方向加速度時刻歴(粒子番号 2033)

8.8 粒子法による大変形解析のまとめ

ここでは、以上実施した粒子法による大変形解析の結果に関するまとめを示す。

8.8.1 小型模型実験に関するまとめ

- 1) 小型斜面模型に関する検証解析に関しては、構成則に下負荷面と上負荷面を Cam-clay 型の降伏関数モデルに付加した弾塑性モデルを用い、材料 A と材料 B それぞれの応力ひずみ関係を詳細にモデル化し解析を行った。その結果、ケース 27 とケース 28 の弱層 40 度勾配のモデルにおいて滑落挙動となり、ケース 29 の弱層 35 度勾配モデルにおいては進行的変形を示すという挙動を再現できた。ただし、滑落挙動については、変形後の滑落速度を過小評価した。この原因としては、残留時の強度について検討が必要なが考えられることに加え、解析モデルのメッシュの大きさが影響を与えたことが考えられる。例えば、メッシュの大きさを小さくすることで改善が図られる可能性がある。また、崩壊時直前のステップにおいて、特にのり先に変形が過度に生じた。この点については、ピーク強度の表現にさらなる工夫が必要と考えられる。
- 2) 最大せん断ひずみ分布を確認すると、ケース 27 とケース 29 においては、のり肩に先行的にひずみが発生し、ケース 28 においては、のり肩とのり先にほぼ同時にひずみが発生した。これは、材料 A のピーク強度が材料 B のものより小さいため、材料 A が上部に位置するケース 27 とケース 29 ではのり肩にひずみが先行的に発生し、材料 A が下部に位置するケース 28 では、のり肩において表層と弱層の境界にテンションクラックによるひずみが集中することも影響して、のり肩、のり先同時にひずみが発生したものと考えられる。ただし、実際の実験においては、実験結果のビデオから考察する限り、この挙動は明確ではない。
- 3) 本解析結果では、崩壊形態は概ね再現したが、崩壊時直前のステップでのり先が崩壊してしまう点は実験結果と異なる。のり先の有無は、変形後の挙動に大きな影響を及ぼすと考えられるので、この点の再現の不備は、崩壊時の斜面モデルのすべり線抵抗を過小評価していると考えられる。しかしながら、のり先が消失しても、その後の崩壊形態が実験結果と合致したことを考えると、崩壊形態の違いは、弱層勾配の大きさが大きな影響を与えていると解析的には考えられる。
- 4) 以上をまとめると実験の再現性という観点からは、以下の点で粒子法による解析は有効である。
 - ① 崩壊時の崩壊形態は、変形の色度が小さいものの、その様相は概ね再現できる。
 - ② 崩壊時より小さい加速度レベルでは、変形はするものの崩壊には至らない。この点は斜面安定性を消失した後の変形レベルによるリスク評価を行う点では優良な結果である。
 - ③ ピーク強度の大きさに基づいたひずみの発現性を表現する。ただし、この発現性の影響は、解析的には崩壊形態の違いに大きな影響を与えないと考えられる。

8.8.2 実物大斜面の大変形解析に関するまとめ

- 1) 軟岩斜面モデルについては、ピーク強度については、原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>（以後、技術資料）に示される物性値、残留強度については、硬岩斜面モデルに示される破砕帯の粘着力を用いることで、崩壊する挙動を表現した。ただし、入力波の最大加速度を 1.5 倍した場合において崩壊する挙動に至った。元の入力波を用いた場合では、技術資料において安全率が約 1.0 であり、安定性を失っているものの、大幅に安定性が低下しているわけではない。本解析ではこの点を概ね表現したものと考えられる。なお、基盤からの地震動の増幅の影響を考慮すると、入力加速度は元の入力波の加速度よりさらに小さくなるのが考えられる。よって、最大加速度 1.5 倍の入力波を用いることは、安全側サイドの評価と考えられる。
- 2) 硬岩斜面モデルにおいては、入力波を 1.5 倍し、粘着力をほぼゼロにしたにも拘わらず崩壊には至らなかった。ただし、すべり線は弱層で発達していたので、安定性は消失していたものと言える。崩壊に至らなかった原因としては、弾塑性構成則の違いが影響を与えたと考えられる。技術資料によれば、軟岩に対しては、放物線モデルを用い、硬岩に対しては、通常のもール・クーロン（またはドラガー・プラガー）モデルを用いる。放物線モデルにおいては、主応力が大きくなると、内部摩擦角をゼロ近傍まで小さくする。一方、通常のもール・クーロンモデルではそのような操作は行わない。よって、放物線モデルを用いる軟岩斜面モデルでは、粘着力の影響が大きいのが、硬岩斜面モデルでは粘着力の影響は小さい。したがって、残留後の粘着力の低下の影響が軟岩斜面モデルに大きく表現されたものと考えられる。
- 3) 以上から、実物大斜面の大変形解析を行う上では、以下の点に留意する必要がある。
 - ① 斜面安定性の低下に伴うすべり線の発生については、従前のすべり線解析と同等の安定性評価となった。
 - ② 崩壊挙動については、残留後の粘着力の大きさの他に、構成則に放物線モデルを用いるか否かが大きな影響を与える可能性がある。

9. 斜面の損傷判断基準（案）

9.1 地震時における斜面の安定性に係る設計・リスク評価の手引き

平成 24 年度業務にて、斜面の損傷判断基準改定案として、「地震時における斜面安定性に係る設計・リスク評価の手引き(案)」を作成した。手引きの目次構成は以下の通りである。

1. 目的と適用範囲

- 1. 1 目的
- 1. 2 適用範囲
- 1. 3 関係基準類

2. 用語の定義

3. 斜面安定の設計とリスク評価に関する現状と課題

- 3. 1 2011 年東北地方太平洋沖地震・津波における知見の考慮
斜面崩壊に伴う複数プラントへの影響
- 3. 2 現行指針類における設計手法の現状と課題
 - 1) 上下動に対する考慮
 - 2) 周波数特性の考慮
 - 3) 非線形性の考慮
 - 4) 三次元的な効果の考慮
- 3. 3 変形照査の評価手法とその課題
これまで実施した実験をふまえ、現行の考え方の課題を示す。

4. 斜面安定性の評価および対策工の基本方針

- 4. 1 周辺斜面の安定性の評価対象の考え方
- 4. 2 本手引きの包括的前提条件
- 4. 3 設計照査の方針
- 4. 4 リスク評価の方針

5. 斜面の安定および対策工の設計法

- 5. 1 設計の基本
- 5. 2 設計用地震動
- 5. 3 斜面
- 5. 4 変形を考慮した安定性の照査
- 5. 5 対策工の設計手法
 - 1) 基本的な考え方
 - 2) 対策工の設計手法

6. リスク評価のための斜面の影響評価の手法

- 6. 1 斜面の影響評価の基本的な考え方
 - 1) 原子力発電施設に及ぼす影響シナリオ
 - 2) 影響評価の考え方
 - 3) ハザード評価の考え方
 - 4) 斜面上の AM 機器や施設への影響評価)
- 6. 2 斜面の変状とその生起確率の評価
- 7. 適用性と今後の課題
 - 7. 1 適用性
 - 7. 2 今後の課題

付属資料：

- 付属資料-1 地震時における斜面の安定性評価のための実験
- 付属資料-2 実験に基づく斜面の崩壊挙動に破壊モード（進行的変形・滑落等）
- 付属資料-3 斜面の変形を考慮した安定限界
- 付属資料-4 斜面の変形評価法（Newmark 法、粒子法、個別要素法等）
- 付属資料-5 対策工を有する斜面の挙動

9.2 斜面の安全性評価における限界値評価法の提案

従来、原子炉建屋周辺斜面の地震時における安全性評価は、地震時における斜面の応答を評価した上で、すべり面上のせん断力とせん断抵抗力の比として安全率を求め、許容値以上であることを照査する。一方で、斜面の地震時崩壊は、地震時に安全率が1を下回った瞬間に生じるのではなく、その後の挙動は斜面を構成する地盤材料の強度特性、斜面の幾何学的特性などに大きく依存する。これらを踏まえて、9.1に示した評価手法では、変形照査の考え方を導入した。一方で、斜面が崩壊に至る直前の限界状態の定義についてはあいまいさが残っており、斜面崩壊の限界状態を適切に評価する手法とともに、その状態に対して、どのように安全余裕度を設定するかを検討することが重要であった。

そこで、本業務では実験的、解析的検討により、すべり土塊の変位量を指標として斜面の地震時崩壊挙動に及ぼす上記要因の影響について評価を進めた。

過去に実施した斜面の振動台実験にて確認された斜面崩壊時におけるすべり土塊の挙動の概念図を図9.2.1に示す。斜面の崩壊形態としては、①地震力の作用時に変形が進行し、地震終了時に停止するパターン（進行的変形）、②当初は進行的に変形するが、すべり土塊の変位が大きくなり、地震終了後も変形が止まらなくなるパターン（進形的変形→滑落型）、③地震初期に不安定化した後に一挙に斜面が崩壊に至るパターン（滑落型）、の三通りが確認された。ここで、斜面の安全性評価においては、③は危険な破壊形態であり、危険度を適切に評価する必要がある。一方で、①、②については地震により斜面が不安定化したとしても、変形量が比較的小さい範囲であれば斜面のすべり破壊を抑制しうるため、タイプ②のような斜面が進行的変形から滑落型に至る限界の状態を把握することが、斜面の安全性評価の上で重要である。

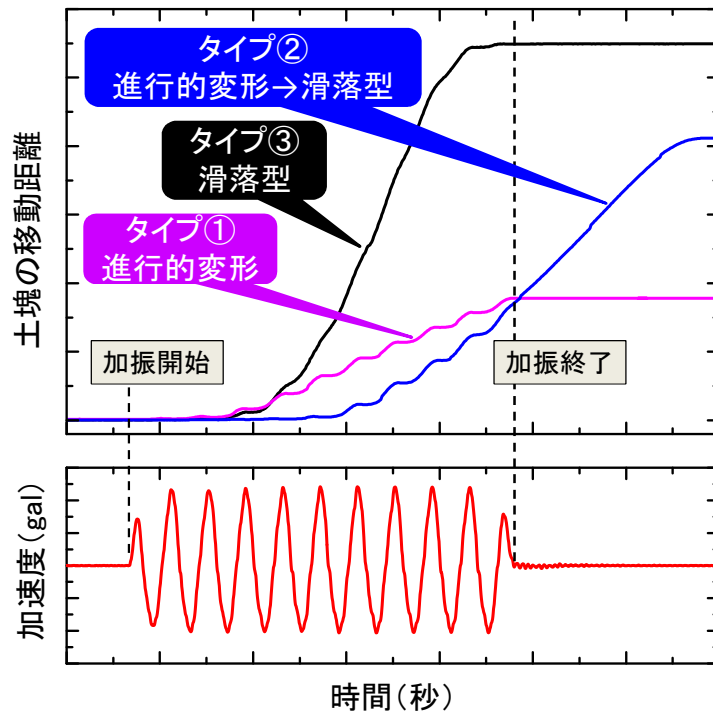


図 9.2.1 斜面模型の崩壊形態

ここで、前述した斜面の不安定化の程度を測る指標として、すべり土塊の変位量に着目した。ここで、本検討では斜面の高さを小型模型（約 1m）から大型模型（約 3m）まで変化させた実験を実施したため、図 9.2.2 に模式的に示すように、すべり土塊の変位量 δ をすべり円弧の長さ L で正規化した δ/L （以下、正規化変位量と称する）を指標として検討を行った。

ここで、本検討ではすべり破壊に至る過程として、①すべり円弧上の抵抗力が最大値に達した後に、やや減少しすべり変位 δ が発生しつつある段階、②地震力の作用ごとにすべり変位 δ が発生する段階、③斜面が安定を保持できる限界となり、不安定化から崩壊へと遷移する段階の 3 段階に着目し、正規化変位 δ/L を指標とした分析を行った。

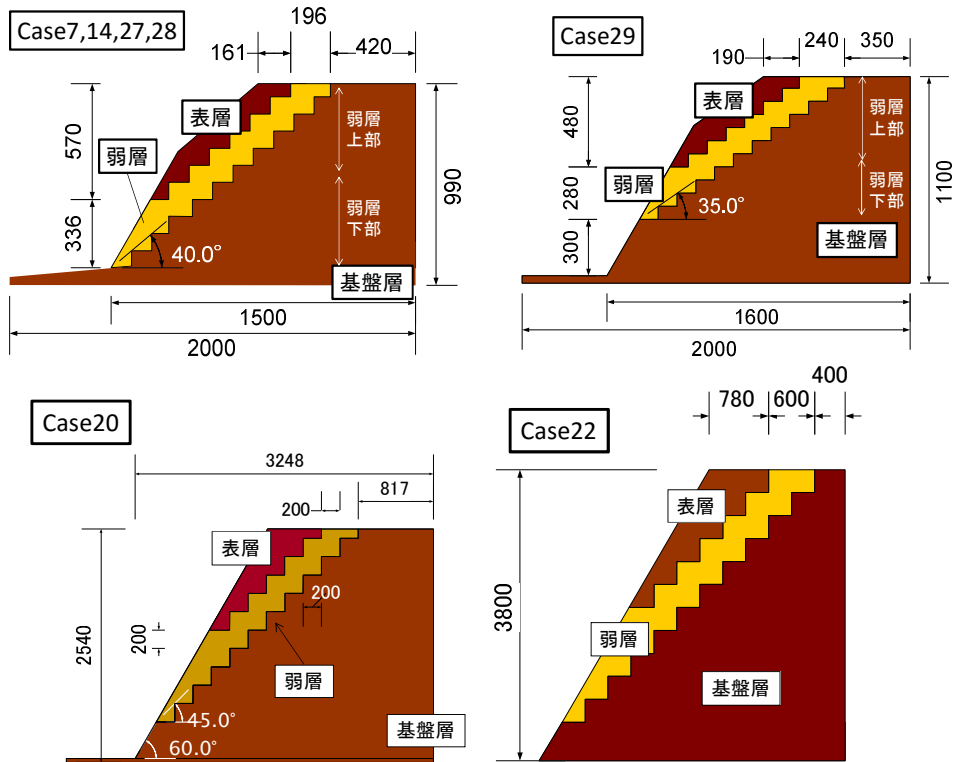
なお、すべり変位 δ は鉄道総研の画像解析システムを用いて、すべり土塊の標点変位量を追跡して求め（図 9.2.5 参照）、すべり円弧長さ L は実験結果から求めた。



図 9.2.2 斜面模型の崩壊形態

検討対象とした振動台実験の概要を図 9.2.3 に、実験結果の概要および確認された崩壊形態を表 9.2.1 にまとめる。検討対象とした実験ケースは岩盤斜面内に局所的な弱層を有するケースであり、基盤層、弱層、表層からなる。図 9.2.3 には各実験で使用した地盤材料の物性値も併せて示した。また、Case27、Case28、Case29 では、弱層材料内での強度分布の影響が斜面の崩壊挙動に及ぼす影響について分析するため、弱層の上部、下部にピークひずみ、ひずみ軟化特性の異なる材料 A、材料 B を配置した。表層は、斜面崩壊時の駆動力を付与するために Case22 を除き磁砂鉄を用いて単位体積重量を 30kN/m^3 に調整した。加振は最大加速度 100gal から漸増させる形式で、Case20、Case22 では新潟県中越地震における観測波を振幅調整して用いた。それ以外の実験では、 5Hz 10 波の正弦波を用いた。

前述のように、本検討では斜面の不安定化の過程を正規化変位 δ/L を評価指標として分析した。以下では前述の①～③のタイミングの抽出法について述べた後に、検討結果について考察する。まず、①抵抗力が最大値に達した後、やや減少しすべり変位 δ が生じ始めた時点は、図 9.2.4 に示すように、すべり土塊の変位と応答加速度の関係から、応答加速度がピーク値の 20% 低減したタイミングとした。次に、②については弱層内における平均的なすべり変位 δ の時刻歴からすべり変位速度 $\dot{\delta}$ を求め、この値の第一ピーク時とした。次に③の崩壊直前の定義は、すべり変位速度 $\dot{\delta}$ の正負が反転せず、常に正を示す段階となったタイミングとした。Case29 を例として、方法②、③の抽出法を図 9.2.5 に示す。なお、方法③については、例として示した Case29 のように進行的変形を示した後に崩壊に至らない場合には、速度が一旦ゼロに戻らなくなった後でも加振が終わると速度が減少し、ゼロに収束する場合もある。このような場合であっても、一次的な不安定化に至ってはいるため、初めてゼロに戻らなくなった時点のすべり変位量を抽出することとした。



材料	配合	粘着力	内部摩擦角
		kPa	deg
A	珪砂:ベントナイト:水 =100:1:10	4.0	44.7
B	珪砂:スチールグリッド:消石灰:水 =30:70:1:2	5.5	34.9
C	珪砂:ベントナイト:水 =100:7:10	8.2	31.3

図 9.2.3 検討対象とした斜面模型の概要 (単位: mm)

表 9.2.1 実験条件および確認された崩壊形態

着目点及び Case名	弱層 勾配	弱層材料	斜面高さ	加振波形	確認された 崩壊形態
Case7	40度	材料A	1000mm	正弦波	滑落
Case14		材料B			滑落
Case27		上:材料A 下:材料B			滑落
Case28		上:材料B 下:材料A			滑落
Case29	35度	上:材料A 下:材料B			進行的変形
Case20	45度	材料C	2540mm	不規則波	進行的変形→滑落
Case22			3800mm		進行的変形

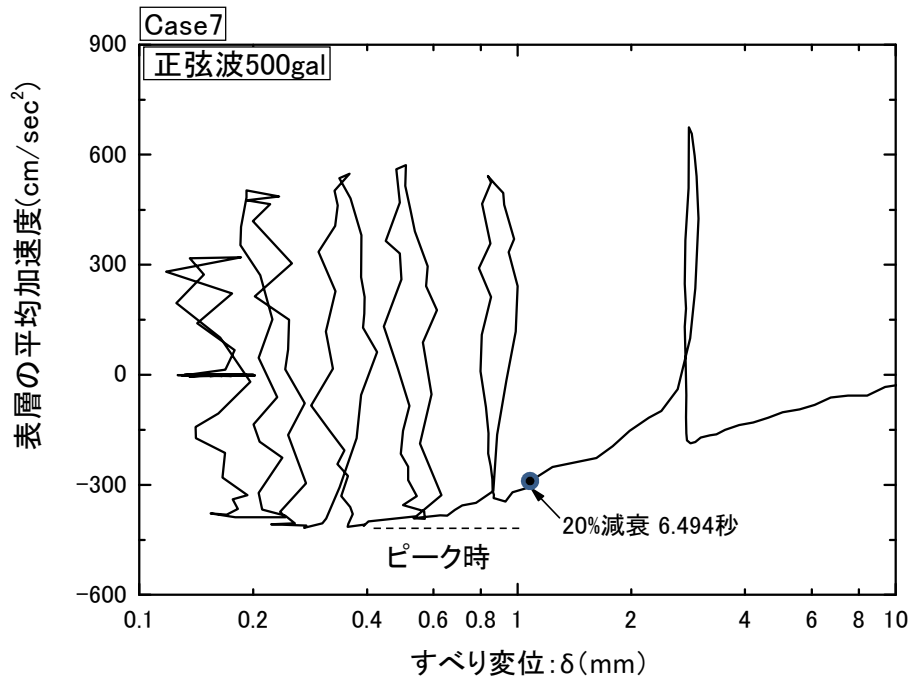


図 9.2.4 加速度応答による抽出法

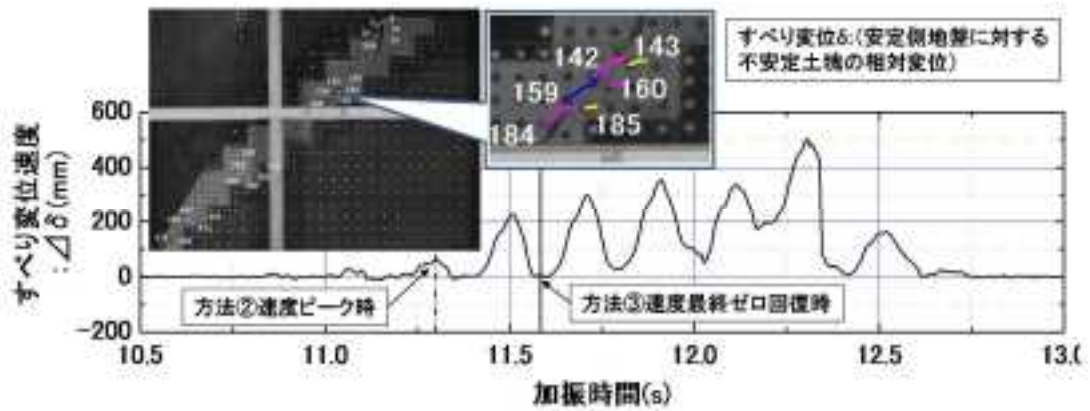


図 9.2.5 すべり変位速度を用いた抽出法

以上の方法で抽出した各ケースの正規化変位 δ/L の推移を図 9.2.6 にまとめる。全体的な傾向として、 δ/L の値は【方法③（速度正值）>方法②（速度ピーク時）>方法①加速度低減時】である。応答の低下時を不安定化の開始と位置付けた場合、速度がマイナスに戻らず変位が止まらない状態に至るまでの間には、すべり変位が進展する必要があることが確認された。特に、進行的変形を示した Case20（ただし、途中で滑落的破壊に推移）、Case22、Case29 は滑落的破壊に至った他の実験よりも方法③で評価した正規化変位の値は大きい。Case20 で③の方法で評価した正規化変位の値が Case29、Case22 と比較して顕著に小さいのは、崩壊形態が進行的変形から滑落破壊に推移したためだと考えられる。

同材料で実施した実験で高さの影響について見ると、Case20（高さ 2.6m）よりも Case22（高さ 3.8m）の方が方法③で評価した正規化変位の値は大きい。Case22 では、斜面が不安定化してから③の状態に至るまでの弱層内部での変形量が Case20 と比較して顕著なことに起因すると考えられる。材料特性の影響については、同一の斜面形状で材料のみを変化させた Case7、Case14 で評価できる。Case14 で用いた材料 B はピークひずみが小さいが、これが反映されて Case14 では、①から③全ての方法で正規化変位の値が Case7 よりも小さかった。

また、いずれのケースでも①、②の値は③の値に対して十分な余裕度をもっている。今回は振動台実験の結果を分析して斜面崩壊の限界状態を把握することを試みたが、今後は実斜面の評価に向けて大変形解析手法などを実施し、①から③の状態における正規化変位を評価することで、限界値を設定することが可能と考えられる。以下では、その手法について記述する。

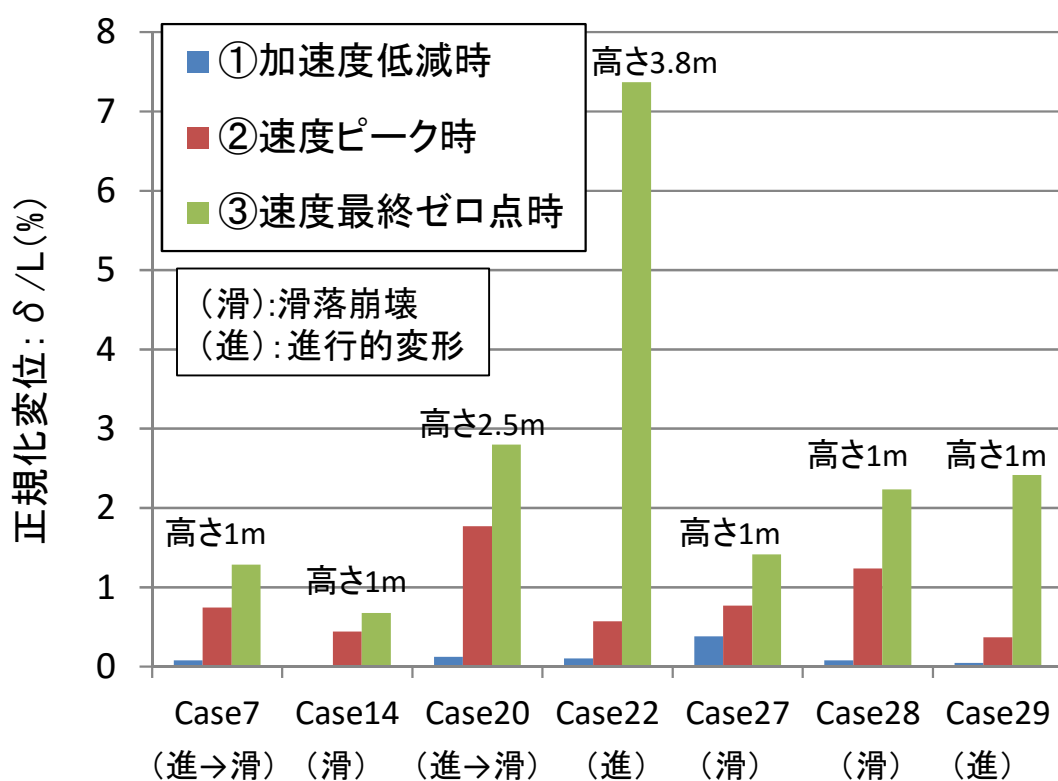


図 9.2.6 正規化変位量と崩壊形態

9.3 実斜面における基準値評価法の提案

9.2の検討によって、すべり変位が斜面の不安定化の程度を示す指標となりうることが確認された。また、斜面が不安定化する直前（すべり土塊の応答速度が最後にゼロとなる状態）と比較して、すべり土塊の応答加速度がピーク時より20%低減した時点、すべり土塊速度のピーク時点が十分な余裕を持っていることも確認された。

以上より、実斜面において、FEM解析やMPM解析により斜面のすべり土塊内部の応答加速度がピーク時から数十パーセント（例えば本検討の20%減衰）減衰時などを一定の精度で表現できれば、その状態を限界状態として定義することも可能となる。

また、地震動の増幅がさほど顕著とならない斜面については、静的非線形解析などにより、慣性力を徐々に増大させることですべり面上の平均的な応力-変位関係がピークから20%低減するタイミングとして評価しうる可能性もある。

今後、実規模斜面に対して前述の検討を行うことで、基準値評価法の妥当性について検証する必要がある。

10. まとめ

本受託業務の成果を以下にまとめる。

①斜面模型の製作（報告書 第3章）

遠心力載荷試験では、実規模斜面の応力場を再現した上で、斜面の地震時崩壊挙動を評価することを目的として、高さ1mの三層斜面模型を構築し、50Gの遠心載荷を行った上で、加振実験を実施した。試験は予備試験1ケース、本試験1ケースの計2ケース実施した。

- ・ 斜面安定検討WGにて、本業務の遠心試験では、進行的変形を呈する斜面模型の崩壊挙動について分析することを目的として、50Gの遠心加速度を載荷して自重安定を満足する斜面に対して、水平方向加振により地震時挙動を分析することとした。
- ・ Case30の試験では、弱層勾配を30度とし、配合試験により強度設定した弱層材料（ $c=100\text{kPa}$ 、 $\phi=35$ 度）を用いて、表層の単位体積重量を 25kN/m^3 に調整した斜面模型を製作した。
- ・ Case31の試験では、弱層勾配を30度とし、昨年度実施したCase24、Case26と同様の弱層材料（ $c=70\text{kPa}$ 、 $\phi=30$ 度）を用いて、表層の単位体積重量を 20kN/m^3 に調整した斜面模型を製作した。

小型振動台試験では弱層内に異なる強度特性を有する地盤試が混在する場合を想定した斜面模型を構築した。試験は弱層材料と配置を変えて全3ケース実施した。

- ・ Case27～Case29の小型振動台実験では、弱層内における変形強度特性の異なる地盤試料の分布が斜面模型の崩壊挙動に及ぼす影響について検討することを目的とした。そこで、弱層の上下で変形強度特性の異なる地盤試料を用いて斜面模型を製作し、振動台実験を実施した。
- ・ Case27の試験では、弱層勾配を40度とし、下部にピーク時ひずみが小さい材料Bを、上部にピーク時ひずみが比較的大きな材料Aを配置した構成とし、過去に実施した材料A単独（Case7）、材料B単独（Case14）の振動台実験結果と比較することとした。
- ・ Case28の試験では、弱層勾配を40度とし、下部にピーク時ひずみが大きい材料Aを、上部にピーク時ひずみが比較的小さい材料Bを配置した構成とし、過去に実施した材料A単独（Case7）、材料B単独（Case14）およびCase27の振動台実験結果と比較することとした。
- ・ Case29の試験では、弱層勾配を35度とし、下部にピーク時ひずみが小さい材料Bを、上部にピーク時ひずみが大きい材料Aを配置して斜面模型を構築した。Case27に対して斜面勾配を緩勾配とすることで、斜面の崩壊形態が進行的変形に近づくかどうかを確認することを目的として振動台実験を実施した。

②計測センサの選定と設置（報告書 第4章）

遠心載荷試験、小型振動台試験ともに、過去の実験的検討における実績を踏まえて計測センサを選定した。計測センサは土槽中央部だけではなく、土槽側壁付近にも併せて設置し、側壁摩擦の影響についても評価した。また、すべり土塊の内外にも加速度計を設置し、崩壊過程における加速度応答の変化についても分析した。

- ・ 計測センサについては、小型振動台実験、遠心載荷試験ともに事前の動作確認を行い、加振中の斜面模型の応答変位、応答加速度が適切に計測できる計測器を選定した。
- ・ 小型振動台実験に用いる画像解析システムとしては、斜面模型全体撮影用およびのり肩の局所撮影用の二通りの高速度カメラを完全に同期させて加振時の斜面の崩壊挙動を撮影した。
- ・ 遠心載荷試験に用いる画像解析システムとしては、遠心場における耐 G 性能を有すること、加振に伴い治具が振動しないこと、加振時には遠心ピット内の照明が消されることなどを考慮してカメラを選定するとともに、治具の反力をバケットに対してとり、固定を強固にした。また、画像の明るさを確保するために LED ライトを治具に固定して実験を実施した。
- ・ 遠心載荷試験に用いる高速度カメラについては、焦点距離 1 m 付近の比較的至近距離から、幅 2m、高さ 1m の広範囲を撮影する必要があったため、広角のカメラレンズを使用した。このため、ゆがみの影響により、画像中央付近と端部では 1 ピクセル当たりの距離情報が異なるため、ゆがみの影響を補正する必要がある。そこで、土槽アクリル面に設置した標点の位置情報からゆがみ補正を行い、画像解析を実施することとした。

③地盤試料の要素試験とデータ取得（報告書 第5章）

遠心模型実験では、おおよそ 50G の遠心力が載荷されるため、斜面地盤内の拘束圧が増加する。そのため、遠心場での拘束圧を再現して強度定数を設定する必要があった。また、小型模型実験では、強度特性の異なる弱層を構築するため、配合試験を実施する必要があった。要素実験では、一軸試験、配合試験、引張試験、一面せん断試験、高拘束圧三軸試験、高拘束圧繰返し三軸試験を実施した。

- ・ 遠心載荷試験においては、50G の遠心力場において安定を満足し、試験装置の加振容量内（5Hz10 波加振の場合には、概ね 30G）で斜面模型が崩壊に至るような模型を製作する必要があった。このため、事前の配合検討、事前解析を実施した。
- ・ 過去の遠心載荷試験において岩盤層内に埋め込んだ圧力計により計測した水平方向の拘束圧が殆ど増加していないことから、拘束圧依存による強度増加は考慮せず安定解析を実施した結果、配合⑫（設計値 $c=100\text{kPa}$ 、 $\phi=35$ 度）を Case30 において使用することとした。
- ・ また、Case27～Case31 の全てのケースにおいて、試験後の斜面模型から地盤試料を

サンプリングし、一軸圧縮試験を実施することで、設計値と実測値との差異について検討した。

- ・ その結果、遠心力実験の Case30、Case31 においては弱層材料の強度が想定以上に発揮される傾向が確認されたものの、三軸圧縮試験においては設計値と概ね整合する強度定数が確認された。今後は、地盤試料の変形強度特性に及ぼすひずみ速度の影響等についての検討を進める必要がある。
- ・ 斜面模型に用いた地盤試料について一軸引張試験を実施し、せん断強度特性、引張強度特性を把握した。その結果、引張強度は材料 D において平均-6kPa 程度、材料⑧において-8kPa 程度であった。

④遠心力載荷試験と振動台試験および各試験データ取得（報告書 第 6 章）

実規模に近い応力状態を再現するために、遠心模型実験装置を用いた振動台実験を実施した。本検討では、斜面安全性評価基準の適用性拡大を図ることを目的に、弱層内で土層構成が変化し、強度特性が変化している場合を想定した振動台試験を行った。遠心載荷試験、振動台試験ともに斜面崩壊時におけるひずみの進展を画像解析により評価することで、提案手法の妥当性を検証することを第一の目的とした。

- ・ 弱層勾配が同一である Case27 と Case28（弱層角度 40 度）と比較すると、Case27 では下層（のり先）から、Case28 は上層においてひずみが局所化し始め、加振とともにひずみが弱層全域に広がったことが分かる。すなわち、いずれものケースもピークひずみの小さい材料 B が配置している箇所からひずみが発生している。これは、材料 B は材料 A に比べて小さいひずみレベルでピーク状態からポストピーク状態に至っており、そのひずみ軟化挙動に伴い、ひずみが進行したためだと考えられる。
- ・ 次に、弱層材料の配置が同一である Case27 と Case29（下層：材料 B、上層：材料 A）を比較すると、いずれの実験においても弱層の先端部（のり先部）からひずみが発生している点が共通している。ただし、すべり面が明確に発生した後の挙動は異なり、弱層勾配が急勾配（40 度）である Case27 は「滑落モード」を示し、緩勾配（35 度）である Case29 は加振中のみ変形が進行する「進行的破壊モード」を示した。
- ・ 以上より、本検討では変形強度特性の異なる地盤試料が斜面内に存在する場合の崩壊挙動と安定解析との関係を示した。また、斜面崩壊時はすべり面が一様に発現するのではなく、斜面内に点在するひずみが徐々に繋がっていくことですべり面が形成され、そのひずみ分布は弱層を構成する材料によって異なる挙動となることを示した。
- ・ Case30 では弱層材料に変形が生じる前に表層が崩壊し、Case31 では弱層に一定の変形が確認されるものの、ジオテキスタイル間での表層の破壊が先行することで、弱層にせん断力が伝達されなくなり、最終的な弱層の崩壊には至らずに実験を終了

した。画像解析システムを活用したせん断ひずみ分布によると、Case31でも表層破壊が先行した、弱層内での変形が生じていることも確認されたため、今後はCase31におけるすべり変位を求め、斜面の限界状態評価に活用する。

⑤遠心载荷および振動台载荷試験の検証解析とデータ整理（報告書 第7章、第8章）

これまでの実験的、解析的検討の成果として、非線形有限要素解析とすべり安定解析を組み合わせた岩盤斜面の安全性評価手法および損傷評価基準値を提案した。しかし、これまで実施してきた振動台実験は、いずれも弱層が比較的均一な材料で構成された条件下での実験であり、強度特性の異なる複数の地盤材料で構成されている場合についての検証は不十分であった。そこで、④にて実施した遠心実験、振動台実験の検証解析を実施し、解析法・評価基準値の互層斜面に対する適用性を検証した。

（FEM解析結果について）

- ・ 本年度実施したCase27～31の小型および遠心模型振動台実験について、GHE-Sモデルを用いた逐次非線形動的解析と等価線形解析による再現解析を実施すると共に、それらから得られる応答値を用いて、① 応力履歴を用いた円弧すべり、② 加速度履歴を用いた円弧すべり、③ 応力履歴を用いた非円弧すべり、④ 加速度履歴を用いた非円弧すべりの4ケースの安定解析を実施した。
- ・ 実験では、すべてのケースですべり破壊が生じたものの、安定解析では安全率が1を切らないケースが見られた。
- ・ この原因の一つとして、振動台実験では数波の地震動を入力しており、破壊が発生した振動ケースにおいても地震動入力前にすでに残留変形が蓄積しているのに対して、解析ではそれを考慮せず、破壊が生じたケースの地震動のみを入力していることが考えられる。初期状態を詳細に設定した上で、応答解析をおよび安定解析を実施する必要があると言える。また、今回は3軸試験結果にフィッティングすることでパラメータ設定を行ったが、ある一つの拘束圧での結果であり、拘束圧に大きく既存する地盤の破壊、変形特性を適切に設定出来ていない可能性がある。今回実施したような詳細な安定解析を実施する場合には、より詳細にパラメータ設定が出来るように地盤材料試験を実施する必要があると考えられる。
- ・ すべての安定解析ケースで安全率が1を切ったケースにCase31に付いては、ニューマーク法によって滑動変位量も算出した。表に示すように、大きい場合でも1mm程度の変位で有り、実験で見られた変形と比較して非常に小さい。今後、すべり線位置の算定精度およびすべり線発生後の土塊に作用する地震力の算定に検討が必要であると考えられる。
- ・ 一方、上記と同手法を用いて、実規模斜面（軟岩・硬岩斜面）の解析も実施した。すべての安定解析ケースで安全率1を下回らない結果となった。また、最小安全率を与える滑り線位置について、応答解析を等価線形解析で行った場合でも、逐次非線形動的解析とほぼ同等の滑り線位置を算定できていることが分かった。ただ

し、すべり線の探索条件等で大きく異なることが考えられ、今後の検討課題である。

(粒子法解析結果について)

- ・ 小型斜面模型に関する粒子法を用いた検証解析に関しては、構成則に下負荷面と上負荷面を Cam-clay 型の降伏関数モデルに付加した弾塑性モデルを用い、材料 A と材料 B それぞれの応力ひずみ関係を詳細にモデル化し解析を行った。その結果、ケース 27 とケース 28 の弱層 40 度勾配のモデルにおいて滑落挙動となり、ケース 29 の弱層 35 度勾配モデルにおいては進行的変形を示すという挙動を再現できた。ただし、滑落挙動については、変形後の滑落速度を過小評価した。この原因としては、残留時の強度について検討が必要なことが考えられることに加え、解析モデルのメッシュの大きさが影響を与えたことが考えられる。例えば、メッシュの大きさを小さくすることで改善が図られる可能性がある。また、崩壊時直前のステップにおいて、特にのり先に変形が過度に生じた。この点については、ピーク強度の表現にさらなる工夫が必要と考えられる。
- ・ 最大せん断ひずみ分布を確認すると、ケース 27 とケース 29 においては、のり肩に先行的にひずみが発生し、ケース 28 においては、のり肩とのり先にほぼ同時にひずみが発生した。これは、材料 A のピーク強度が材料 B のものより小さいため、材料 A が上部に位置するケース 27 とケース 29 ではのり肩にひずみが発生し、材料 A が下部に位置するケース 28 では、のり肩において表層と弱層の境界にテンションクラックによるひずみが集中することも影響して、のり肩、のり先同時にひずみが発生したものと考えられる。ただし、実際の実験においては、実験結果のビデオから考察する限り、この挙動は明確ではない。
- ・ 本解析結果では、崩壊形態は概ね再現したが、崩壊時直前のステップでのり先が崩壊してしまう点は実験結果と異なる。のり先の有無は、変形後の挙動に大きな影響を及ぼすと考えられるので、この点の再現の不備は、崩壊時の斜面モデルのすべり線抵抗を過小評価していると考えられる。しかしながら、のり先が消失しても、その後の崩壊形態が実験結果と合致したことを考えると、崩壊形態の違いは、弱層勾配の大きさが大きな影響を与えていると解析的には考えられる。
- ・ 以上をまとめると実験の再現性という観点からは、以下の点で粒子法による解析は有効である。
- ・ 崩壊時の崩壊形態は、変形の手がかりが小さいものの、その様相は概ね再現できる。
- ・ 崩壊時より小さい加速度レベルでは、変形はするものの崩壊には至らない。この点は斜面安定性を消失した後の変形レベルによるリスク評価を行う点では優良な結果である。
- ・ ピーク強度の大きさに基づいたひずみの発現性を表現する。ただし、この発現性

の影響は、解析的には崩壊形態の違いに大きな影響を与えないと考えられる。

- ・ 実物大斜面に対する粒子法の解析として、軟岩斜面モデルについては、ピーク強度については、原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>（以後、技術資料）に示される物性値、残留強度については、硬岩斜面モデルに示される破砕帯の粘着力を用いることで、崩壊する挙動を表現した。ただし、入力波の最大加速度を 1.5 倍した場合において崩壊する挙動に至った。元の入力波を用いた場合では、技術資料において安全率が約 1.0 であり、安定性を失っているものの、大幅に安定性が低下しているわけではない。本解析ではこの点を概ね表現したものと考えられる。なお、基盤からの地震動の増幅の影響を考慮すると、入力加速度は元の入力波の加速度よりさらに小さくなることが考えられる。よって、最大加速度 1.5 倍の入力波を用いることは、安全側サイドの評価と考えられる。
- ・ 硬岩斜面モデルにおいては、入力波を 1.5 倍し、粘着力をほぼゼロにしたにも拘わらず崩壊には至らなかった。ただし、すべり線は弱層で発達していたので、安定性は消失していたものと言える。崩壊に至らなかった原因としては、弾塑性構成則の違いが影響を与えたと考えられる。技術資料によれば、軟岩に対しては、放物線モデルを用い、硬岩に対しては、通常モール・クーロン（またはドラガー・プラガー）モデルを用いる。放物線モデルにおいては、主応力が大きくなると、内部摩擦角をゼロ近傍まで小さくする。一方、通常モール・クーロンモデルではそのような操作は行わない。よって、放物線モデルを用いる軟岩斜面モデルでは、粘着力の影響が大きい、硬岩斜面モデルでは粘着力の影響は小さい。したがって、残留後の粘着力の低下の影響が軟岩斜面モデルに大きく表現されたものと考えられる。
- ・ 以上から、実物大斜面の大変形解析を行う上では、以下の点に留意する必要がある。
 - 斜面安定性の低下に伴うすべり線の発生については、従前のすべり線解析と同等の安定性評価となった。
 - 崩壊挙動については、残留後の粘着力の大きさの他に、構成則に放物線モデルを用いるか否かが大きな影響を与える可能性がある。

⑥技術資料作成（報告書 第9章）

③～⑤の内容を整理し、技術資料を作成する。技術資料においては、提案する斜面の損傷評価基準に基づく安定性評価の結果と、従来手法による評価結果とを対比する。比較対象は過去の振動台実験とした。上記の名目については、第7章にて報告した。本章では、斜面の変形を許容した斜面安全性の提案に当たって、限界値を実斜面において設定する方法について検討を行った。

- ・ 斜面が崩壊に至る直前の限界状態の定義についてはあいまいさが残っており、斜面崩壊の限界状態を適切に評価する手法とともに、その状態に対して、どのように安全余裕度を設定するかを検討することが重要であった。そこで、本業務では実験的、解析的検討により、すべり土塊の変位量を指標として斜面の地震時崩壊挙動に及ぼす上記要因の影響について評価を進めた。
- ・ 斜面の不安定化の程度を測る指標として、すべり土塊の変位量に着目した。その際、すべり土塊の変位量 δ をすべり円弧の長さ L で正規化した δ/L （以下、正規化変位量と称する）を指標として検討を行った。
- ・ ここで、崩壊の程度に応じて、①抵抗力が最大値に達した後、やや減少しすべり変位 δ が生じ始めた時点、②弱層内における平均的なすべり変位 δ の時刻歴からすべり変位速度 $\Delta\delta$ を求め、この値の第一ピーク時、③崩壊直前の定義として、すべり変位速度 δ の正負が反転せず、常に正を示す段階となったタイミング、以上3つのタイミングを抽出して分析を行った。
- ・ δ/L の値は【方法③（速度正值） > 方法②（速度ピーク時） > 方法①加速度低減時】であった。これより、応答の低下時を不安定化の開始と位置付けた場合、速度がマイナスに戻らず変位が止まらない状態に至るまでの間には、すべり変位が進展する必要があることが確認された。
- ・ また、進行的変形を示した Case20（ただし、途中で滑落的破壊に推移）、Case22、Case29 は滑落的破壊に至った他の実験よりも方法③で評価した正規化変位の値は大きかった。
- ・ いずれのケースでも①、②の値は③の値に対して十分な余裕度をもっている。今回は振動台実験の結果を分析して斜面崩壊の限界状態を把握することを試みたが、今後は実斜面の評価に向けて大変形解析手法などを実施し、①から③の状態における正規化変位を評価することで、限界値を設定することが可能と考えられる。
- ・ 以上を踏まえて、実斜面における変形を考慮した安全性評価を行う際の指標として、すべり変位 δ/L を提案し、実規模斜面での評価法も提案した。