

4 模型地盤の斜面崩壊の再現解析

4.1 動的な遠心力模型実験に対する再現解析

4.1.1 修正フェレニウス法による斜面安定解析

斜面安定解析の安全率を計算するために修正フェレニウス法を用いた。解析コードは COSTANA.Ver19.1A(富士通 FIP)を使用した。修正フェレニウス法では図 4-1 に示す斜面に対して、以下の式で安全率を求める。

$$\text{安全率 (Fs)} \quad F_s = \frac{R \sum [cl + \{(W - Ub) \cos \alpha - k_h W \sin \alpha\} \tan \phi]}{\sum (RW \sin \alpha + k_h Wh)} \quad (4.1)$$

Fs : 安全率

R : すべり面半径 (m)

c : 粘着力 (kn/m²)

L : 分割片で切られたすべり面の弧長 (m)

W : 分割片の全重量 (kN/m)

U : 間隙水圧 (kN/m²)

b : 分割片の幅 (m)

α : 各分割片で切られたすべり面の中点とすべり円の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角 (°)

k_h : 設計水平震度

ϕ : せん断抵抗角 (°)

h : スライスの重心とすべり面の中心との鉛直距離 (m)

すべり面は、実験結果でせん断ひずみが大きく発生した箇所を参考に、法尻を通り法肩に達する円弧の中で、最小の安全率となる円弧とした。

(事前解析)

解析に用いた強度定数を表 4-1 に示す。ベーンせん断試験結果は幅を持っているため、

粘着力にも幅を持たせた。なお、27kPa は 90G 場で設定した値であり、比較のために示した。

Case1 の解析断面を図 4-2 に示す。設定したすべり面と PIV 解析結果の比較を図 4-3 に示す。安全率と水平震度の関係を図 4-4 に示す。粘着力が 8~12kPa では、水平震度 0.2 付近で安全率が 1 に達しており、実験で 200Gal を超えたあたりから変位が見られ始めた事実と対応している。

Case2 の解析断面を図 4-5 に示す。設定したすべり面と PIV 解析結果の比較を図 4-6 に示す。安全率と水平震度の関係を図 4-7 に示す。粘着力が 12kPa では、水平震度 0.2 付近で安全率が 1 に達しており、実験で 200Gal を超えたあたりから変位が見られ始めた事実と対応している。

Case3 の解析断面を図 4-8 に示す。設定したすべり面と PIV 解析結果の比較を図 4-9 に示す。安全率と水平震度の関係を図 4-10 に示す。粘着力が 4kPa では、水平震度 0.2 付近で安全率が 1 に達しており、実験で 200Gal を超えたあたりから変位が見られ始めた事実と対応している。

(事後解析)

解析条件とすべり安全率が 1 となる強度定数を表 4-2 に示す。ここでは斜面全体を加圧密領域であると仮定した。すべり面位置は前述の PIV 解析より得られたせん断変形領域の下限位置とし図 4-11 に示す。さらに、ケース 1~3 においてすべり面の形成が生じる震度を 0.25 と仮定した。後述する静的遠心載荷実験のケース 4 の粘着力 11.7kPa に対して、斜面勾配 30°のケース 1 は粘着力 10.3kPa と同程度、斜面勾配 35°のケース 2 は粘着力 14kPa と少し大きめの値となっている。斜面勾配 15°のケース 3 は、仮定したすべり面がケース 4 より浅いこともあり、5.9kPa とケース 1 より小さな値となっている。各ケースの粘着力の大きさは、過圧密地盤において想定される強度特性として妥当な結果となっている。

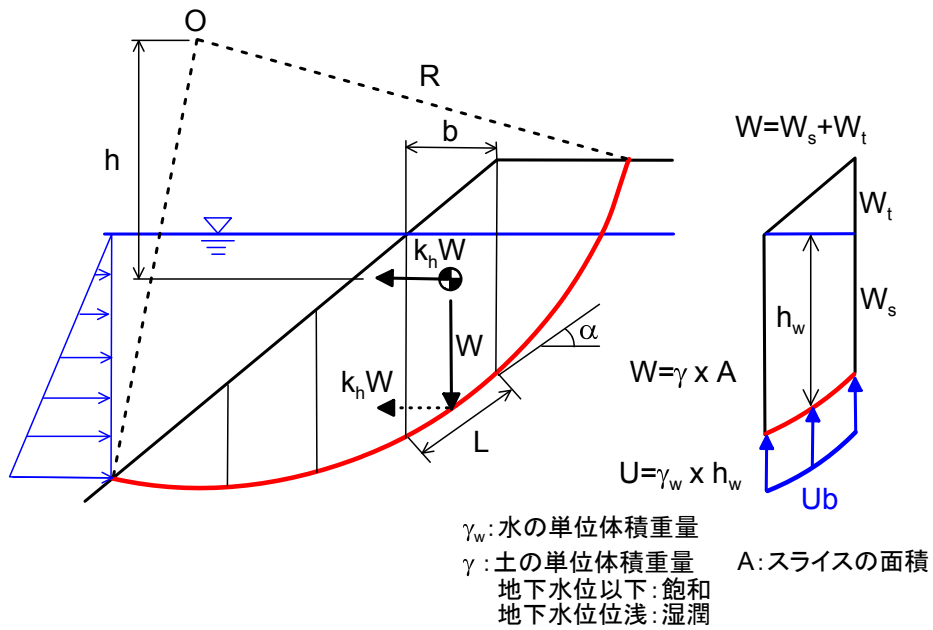


図 4-1 修正フェレニウス法の概要図

表 4-1 強度定数

遠心場	① 正規圧密		② 過圧密	
	c_{cu} (kPa)	ϕ_{cu} (°)	c_{cu} (kPa)	ϕ_{cu} (°)
30G	2.7	14.4	8,10,12,18,27	7.2

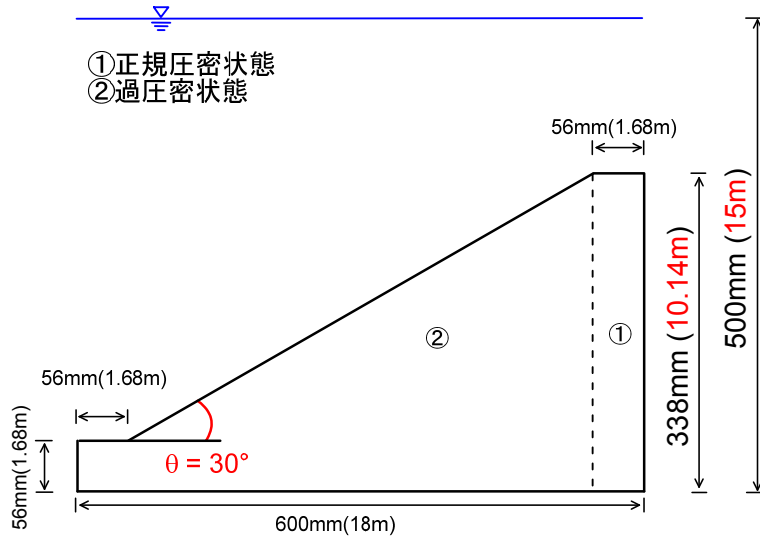
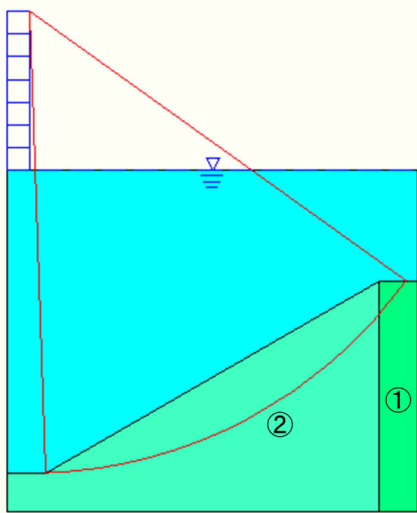
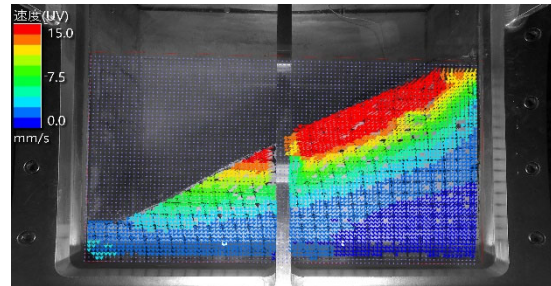


図 4-2 解析対象断面 (Case1)



(a) 設定したすべり面



(b) PIV 解析結果 (325GgI 加振後)

図 4-3 設定したすべり面と実験結果の比較

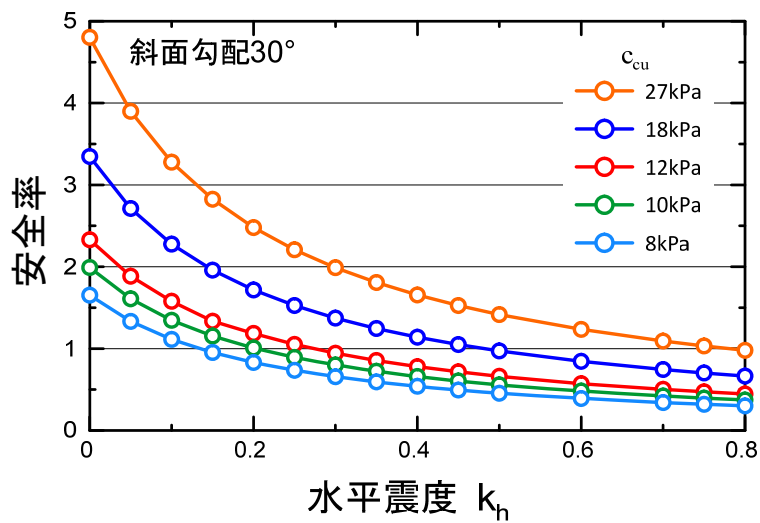


図 4-4 安全率と水平震度の関係 (Case1)

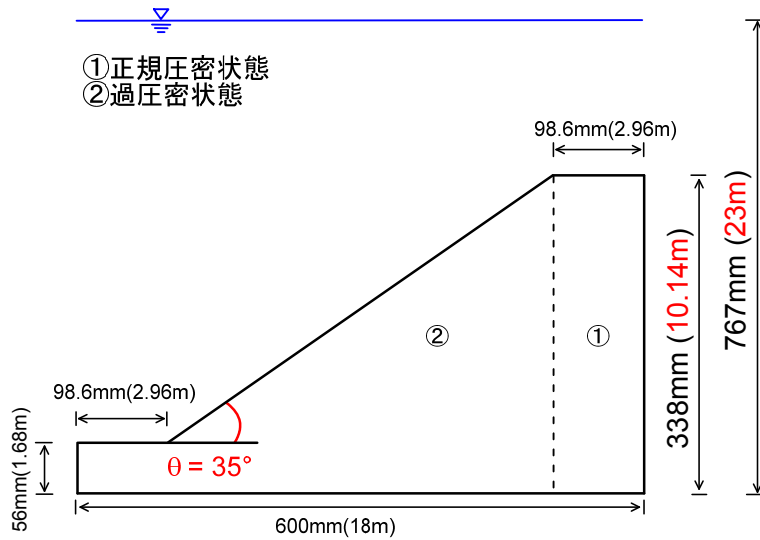
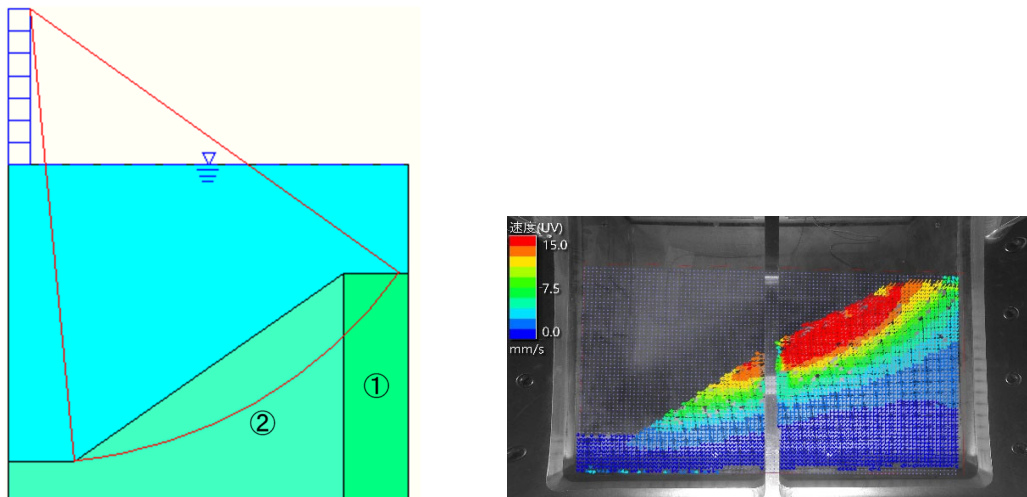


図 4-5 解析対象断面 (Case2)



(a) 設定したすべり面

(b) PIV 解析結果 (325GgI 加振後)

図 4-6 設定したすべり面と実験結果の比較

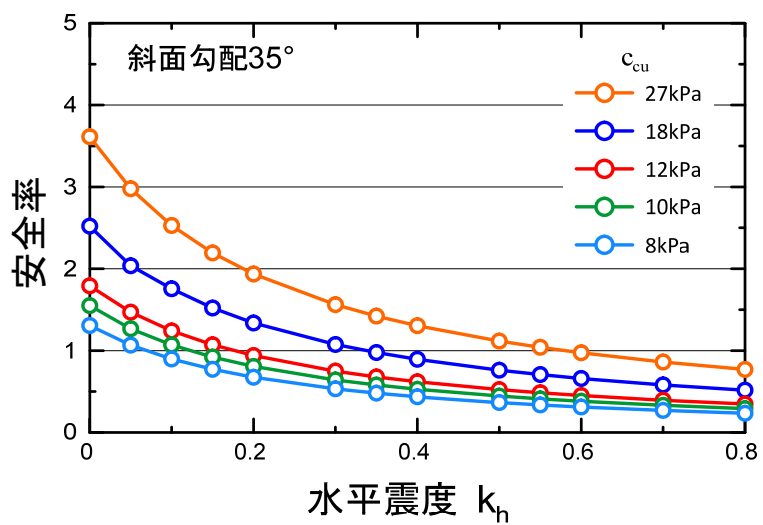


図 4-7 安全率と水平震度の関係 (Case2)

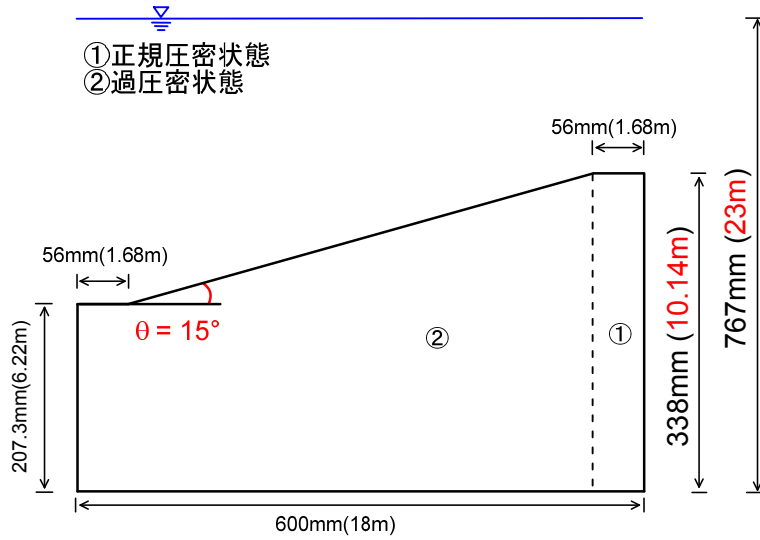
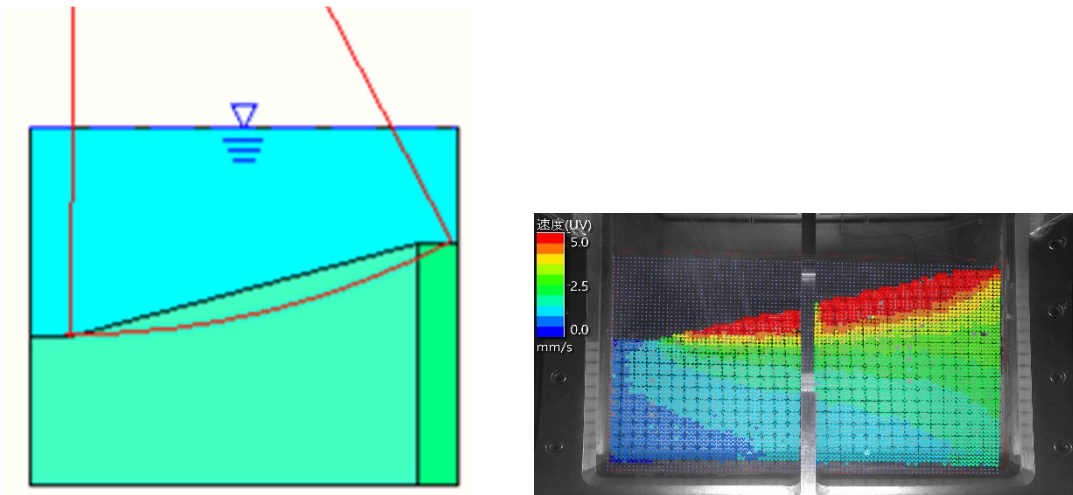


図 4-8 解析対象断面 (Case3)



(a) 設定したすべり面

(b) PIV 解析結果 (325GgI 加振後)

図 4-9 設定したすべり面と実験結果の比較

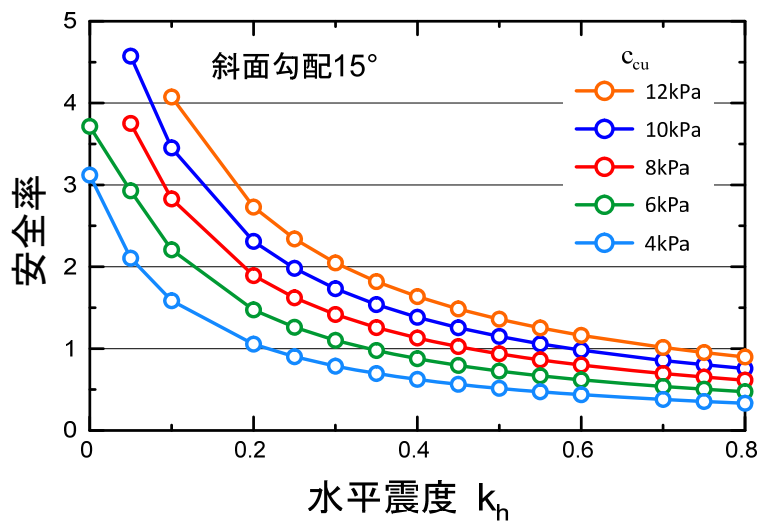


図 4-10 安全率と水平震度の関係 (Case3)

表 4-2 解析条件とすべり安全率が 1 となる強度定数

	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	k
Case1	16.8		10.3	
Case2	16.4	7.2	14.3	0.255
Case3	16.6		5.9	

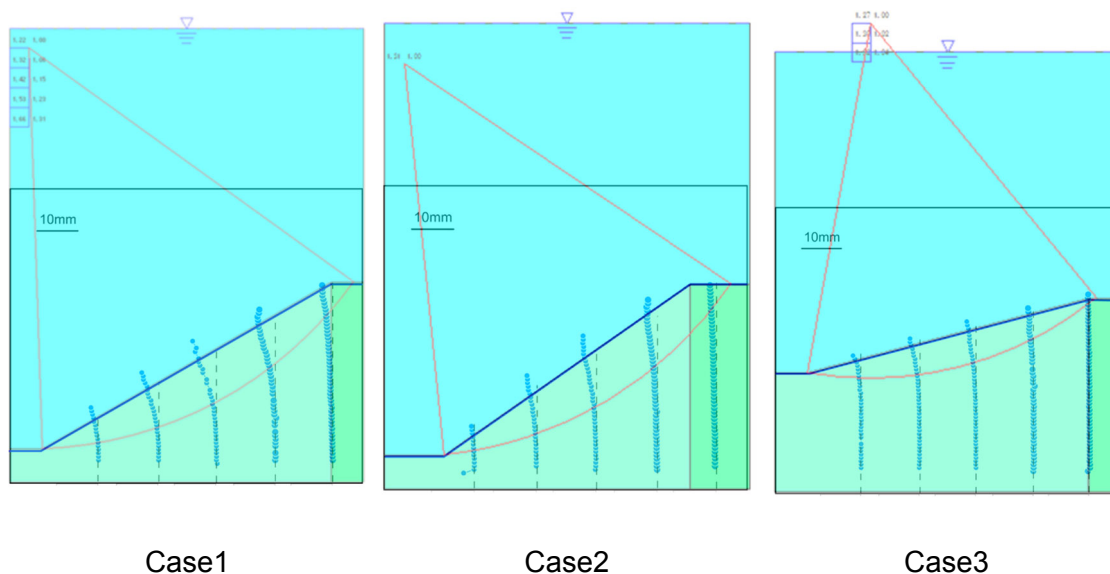


図 4-11 解析で設定したすべり面

4.1.2 動的解析による再現解析

動的解析はモールクーロンモデルと双曲線モデル（HD モデル）について実施した。まずモールクーロンモデルの結果を示す。地盤のモデルパラメータを表 4-3 に示す。

Case1 の解析モデルを図 4-12 に示す。基盤入力加速度を図 4-13 に示す。50 Gal、250Gal、300Gal（1 回目）、300Gal（2 回目）加振時における法肩の応答加速度（解析）を基盤入力波形とともに図 4-14 に示す。

50Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-15 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-16 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-17 に示す。

100Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-18 に示す。比較のため

に PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-19 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-20 に示す。

150Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-21 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-22 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-23 に示す。

200Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-24 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-25 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-26 に示す。

250Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-27 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-28 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-29 に示す。

300Gal (1 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-30 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-31 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-32 に示す。

300Gal (2 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-33 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-34 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-35 に示す。

300Gal (3 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-36 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-37 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-38 に示す。

300Gal (4 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-39 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-40 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-41 に示す。

300Gal (5 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-42 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-43 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-44 に示す。

300Gal (6 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-45 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-46 に示す。せん断ひずみ

増分およびひずみの第2不変量のコンターを図 4-47 に示す。

300Gal (7 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-48 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-49 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第2不変量のコンターを図 4-50 に示す。

325Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-51 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-52 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第2不変量のコンターを図 4-53 に示す。

表 4-3 地盤の解析パラメータ (モールクーロンモデル)

地盤	物性値
密度 ρ (kg/m ³)	1744
弾性係数 E (kN/m ²)	$E = 16100 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{0.66}$
ポアソン比(-)	0.499
内部摩擦角 ϕ (°)	37.8
粘着力 C (kN/m ²)	8.2

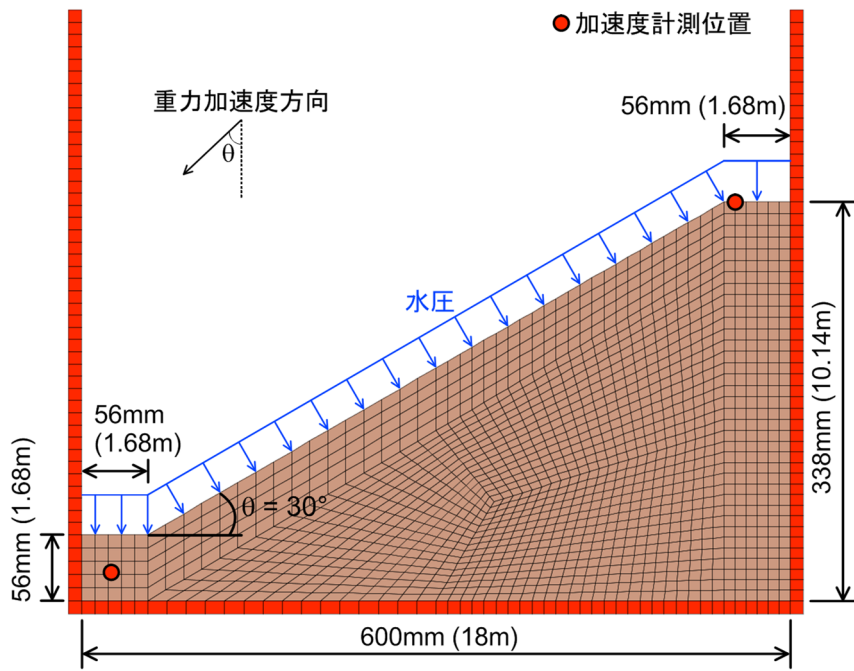


図 4-12 解析モデル図 (Case1)

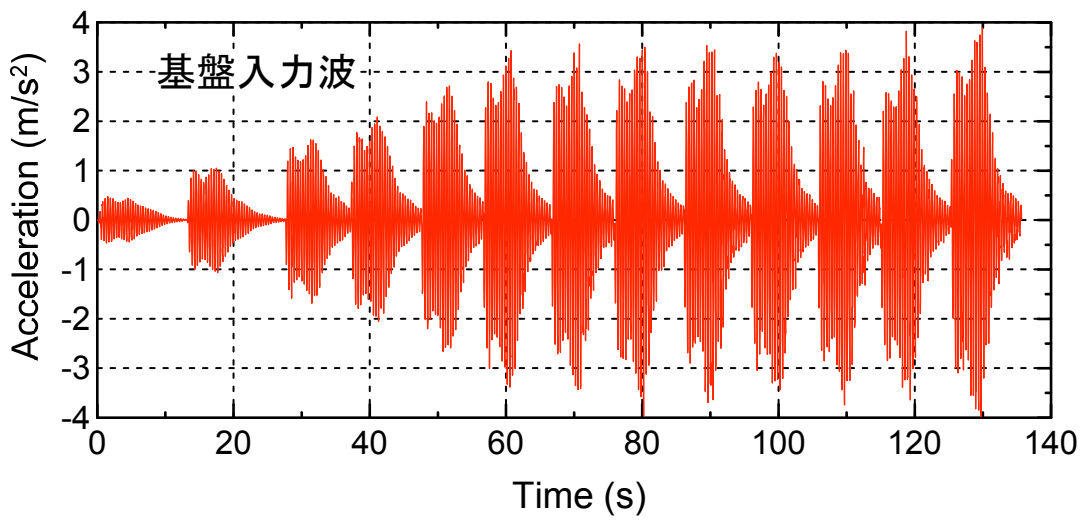


図 4-13 基盤入力加速度 (Case1)

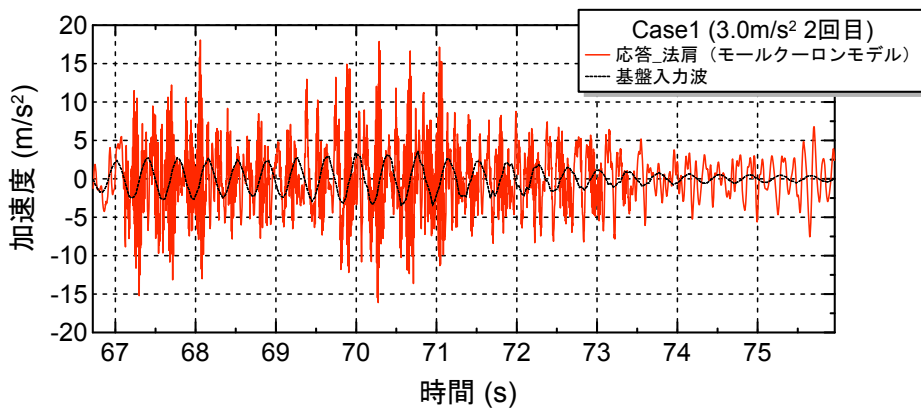
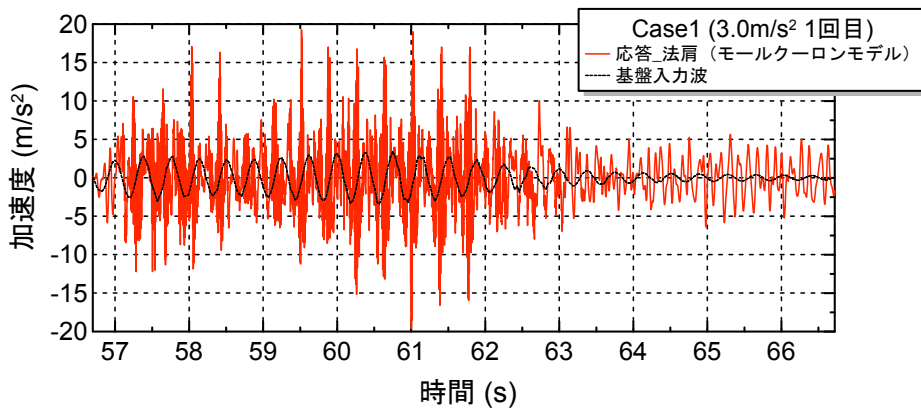
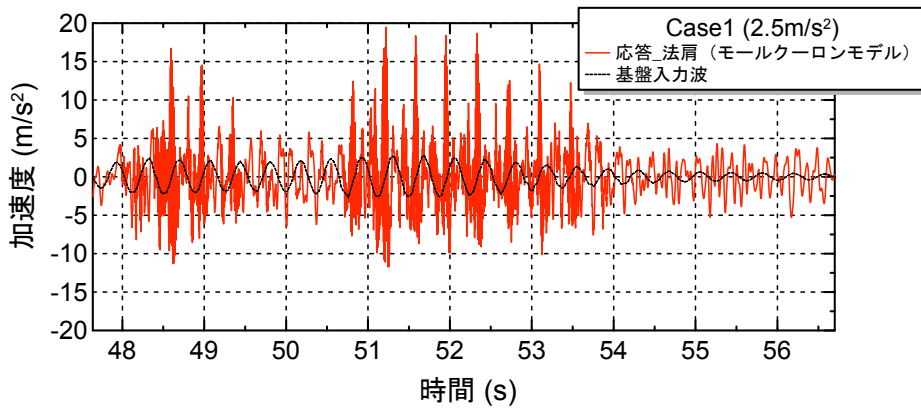
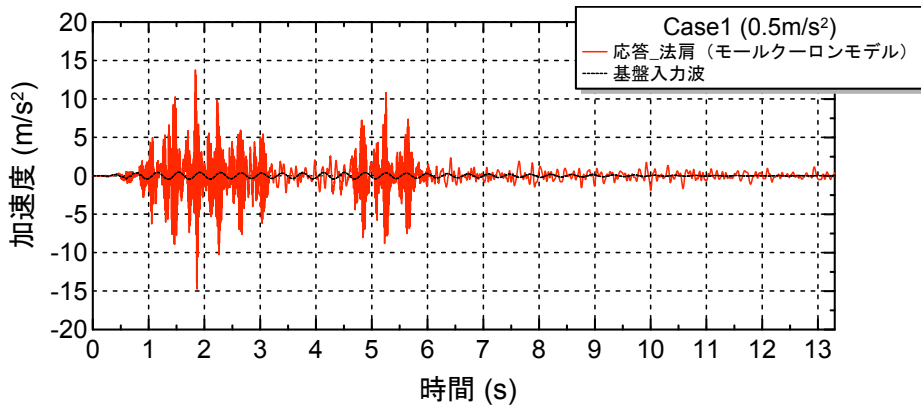
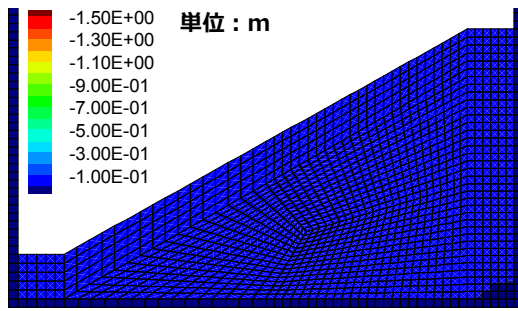
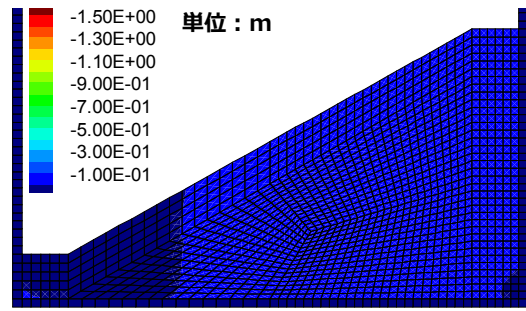


図 4-14 法肩の応答加速度の解析結果 (Case1)

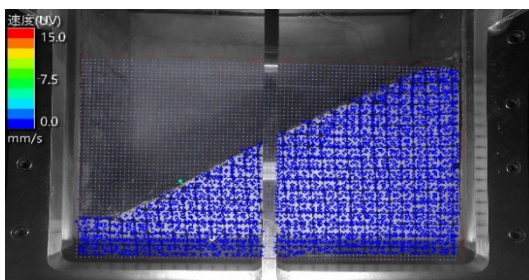


(a) 相对水平変位

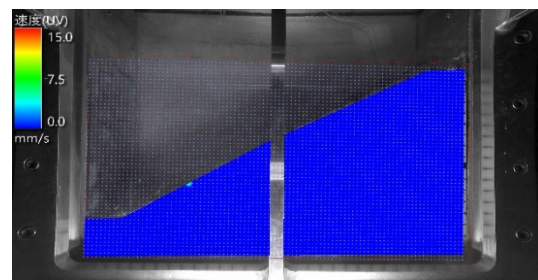


(b) 相对鉛直変位

図 4-15 変位分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)

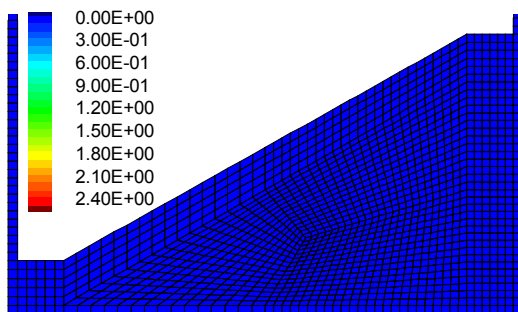


(a) 変位ベクトル図

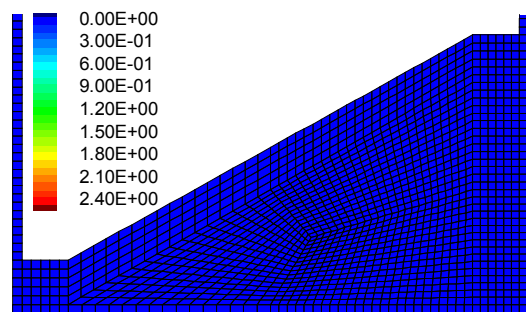


(b) 変位コンター図

図 4-16 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)

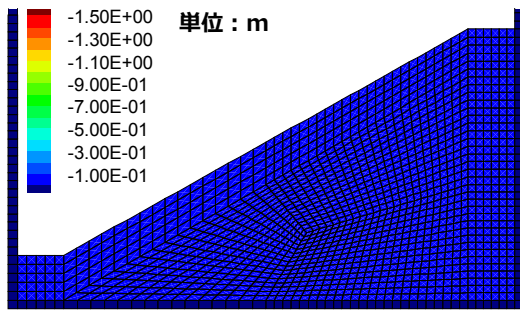


(a) せん断ひずみ増分

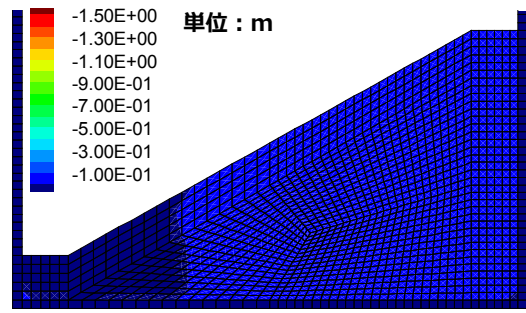


(b) ひずみの第2不変量

図 4-17 ひずみ分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)

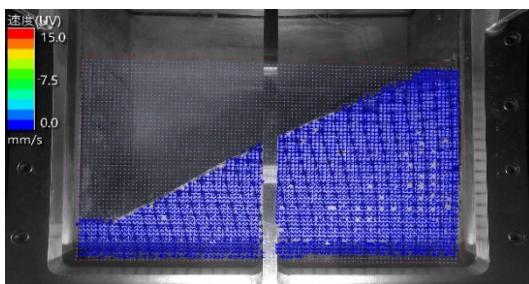


(a) 相对水平変位

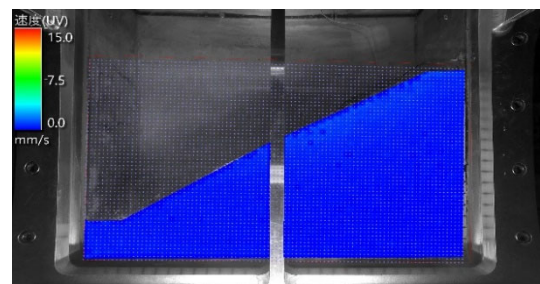


(b) 相对鉛直変位

図 4-18 変位分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)

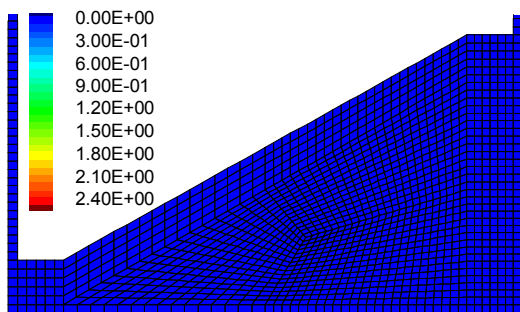


(a) 変位ベクトル図

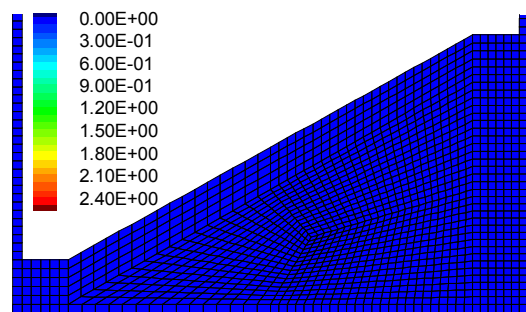


(b) 変位コンター図

図 4-19 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)

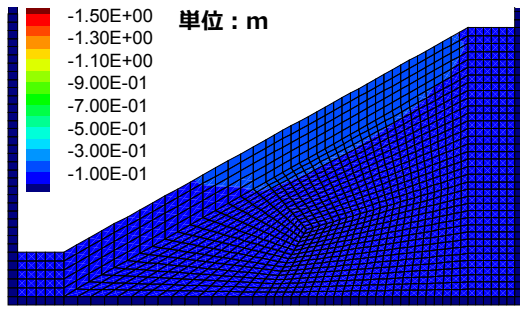


(a) せん断ひずみ増分

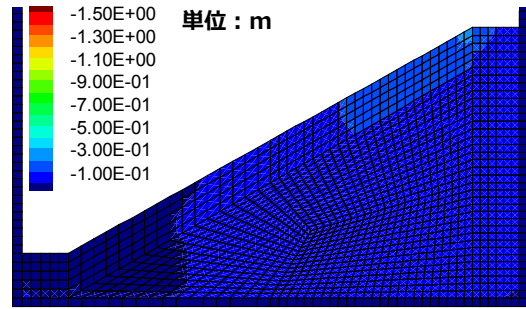


(b) ひずみの第2不変量

図 4-20 ひずみ分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)

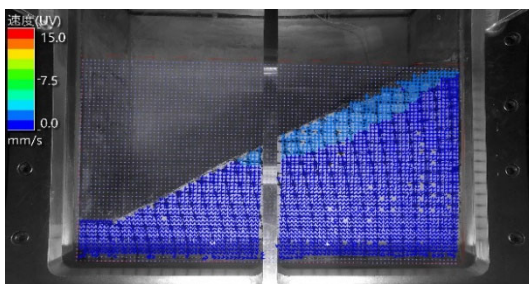


(a) 相对水平変位

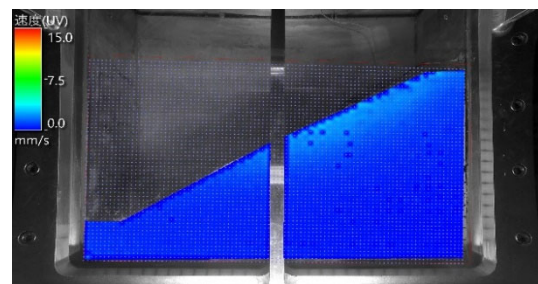


(b) 相对鉛直変位

図 4-21 変位分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)

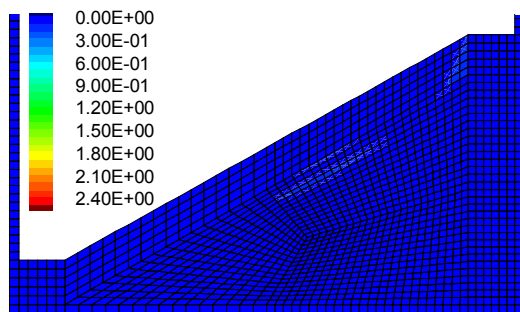


(a) 変位ベクトル図

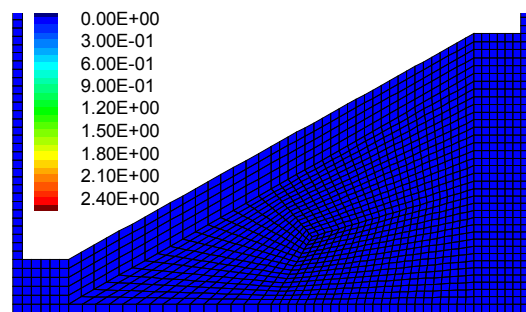


(b) 変位コンター図

図 4-22 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)

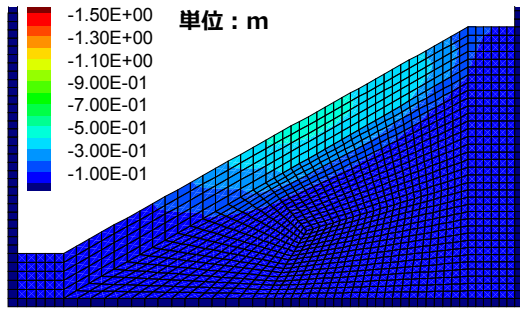


(a) せん断ひずみ増分

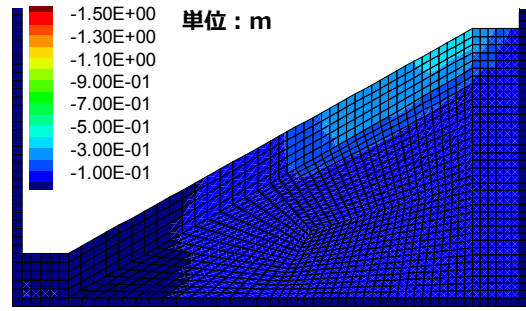


(b) ひずみの第2不変量

図 4-23 ひずみ分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)

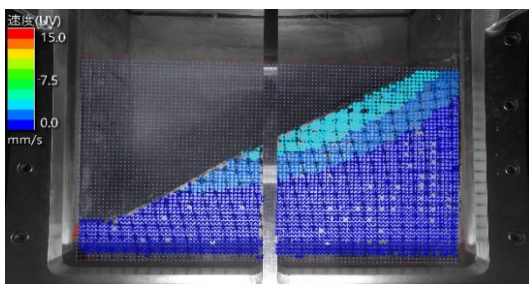


(a) 相対水平変位

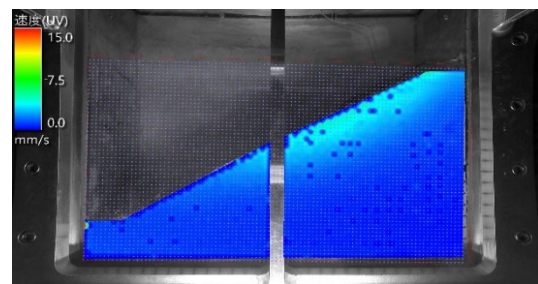


(b) 相対鉛直変位

図 4-24 変位分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)

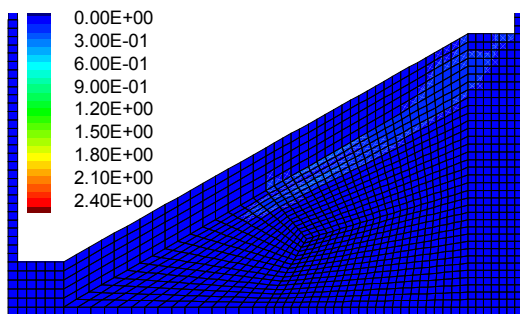


(a) 変位ベクトル図

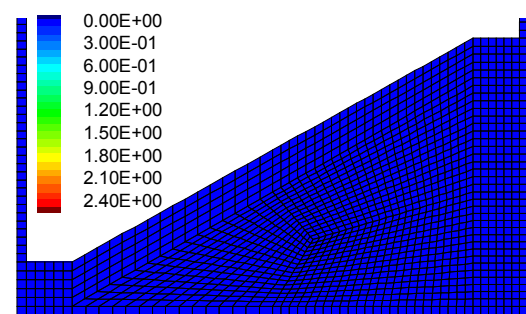


(b) 変位コンター図

図 4-25 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)

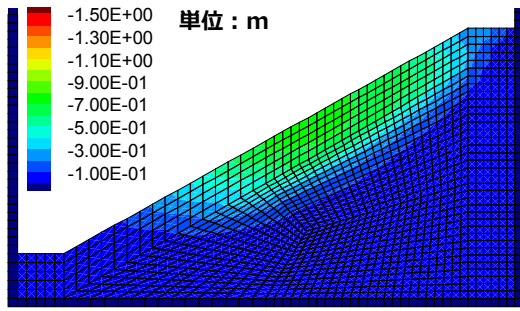


(a) せん断ひずみ増分

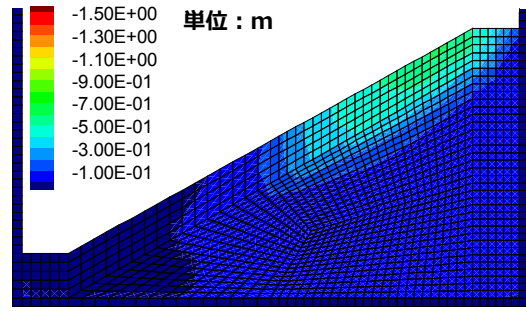


(b) ひずみの第2不変量

図 4-26 ひずみ分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)

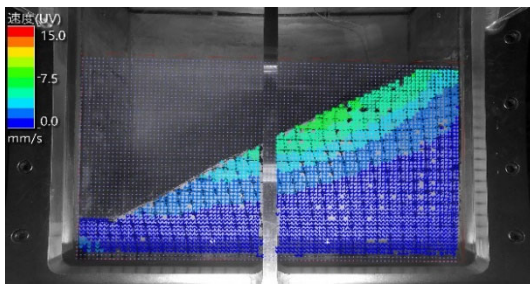


(a) 相对水平変位

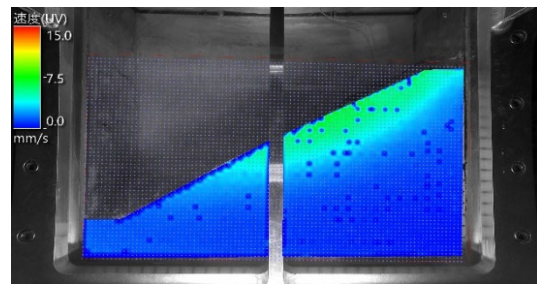


(b) 相对鉛直変位

図 4-27 変位分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)

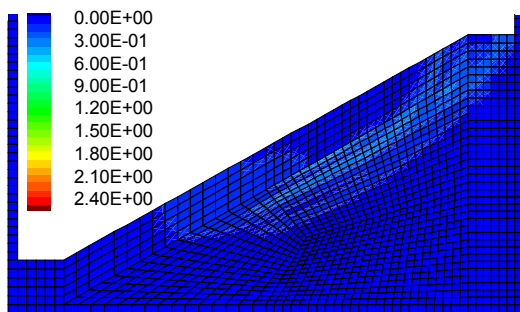


(a) 変位ベクトル図

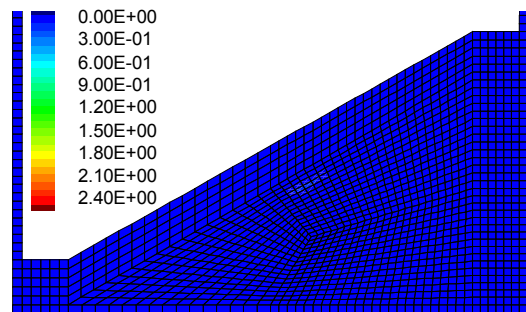


(b) 変位コンター図

図 4-28 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)

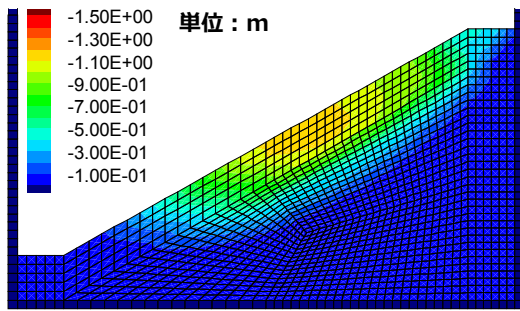


(a) せん断ひずみ増分

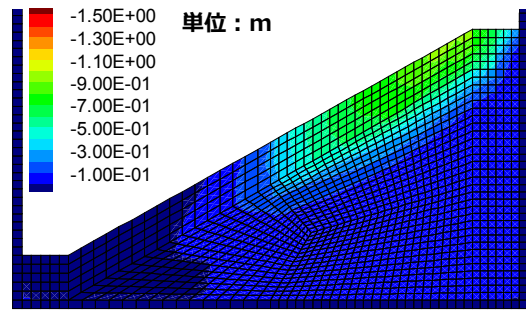


(b) ひずみの第2不変量

図 4-29 ひずみ分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)

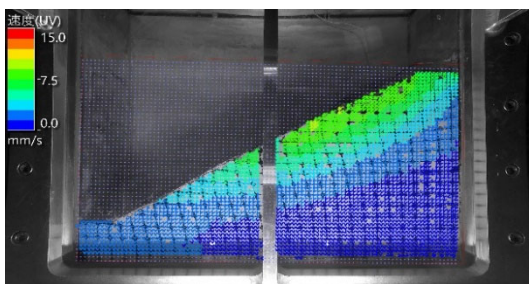


(a) 相対水平変位

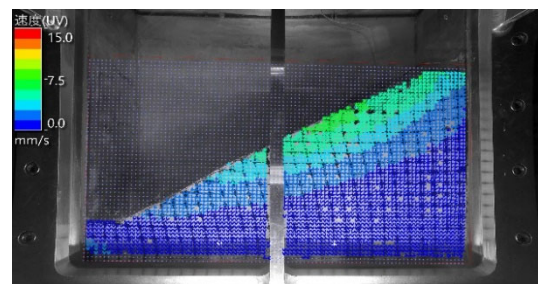


(b) 相対鉛直変位

図 4-30 変位分布 (Case1 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)

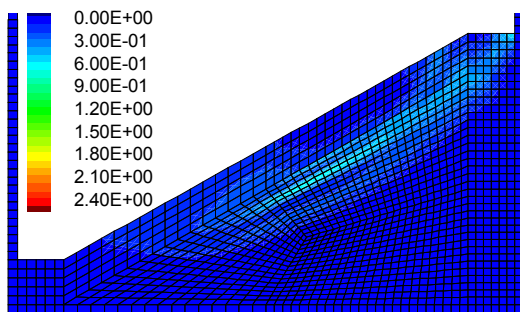


(a) 変位ベクトル図

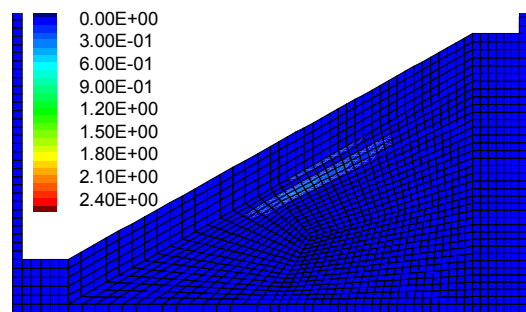


(b) 変位コンター図

図 4-31 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)

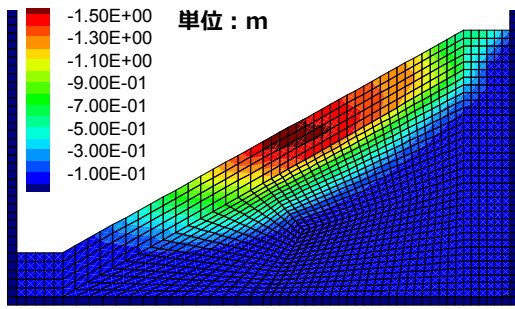


(a) せん断ひずみ増分

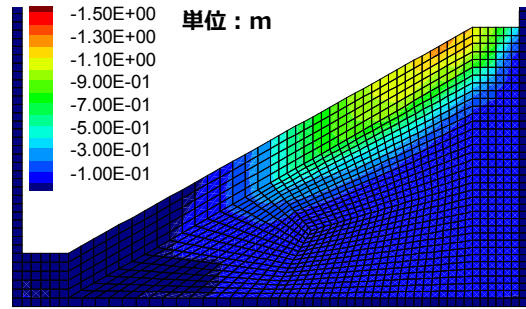


(b) ひずみの第2不変量

図 4-32 ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)

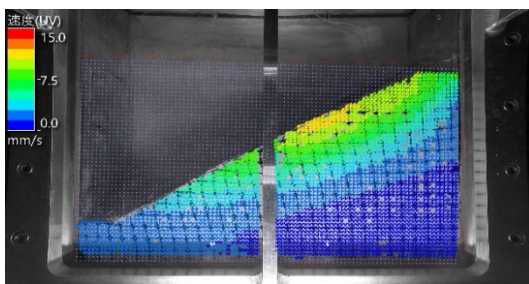


(a) 相对水平変位

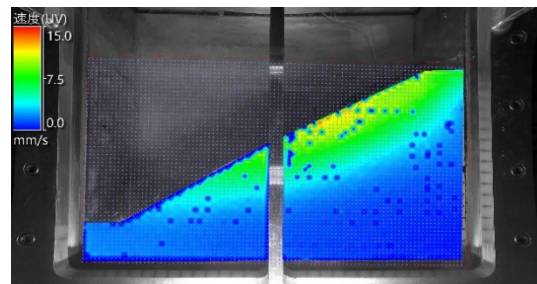


(b) 相对鉛直変位

図 4-33 変位分布 (Case1 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)

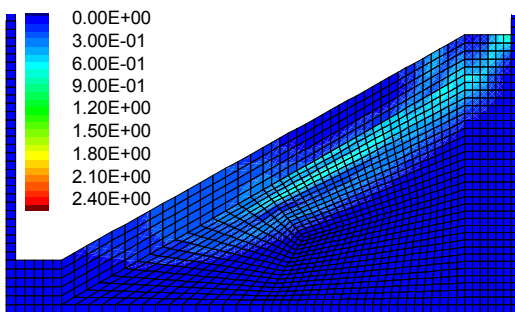


(a) 変位ベクトル図

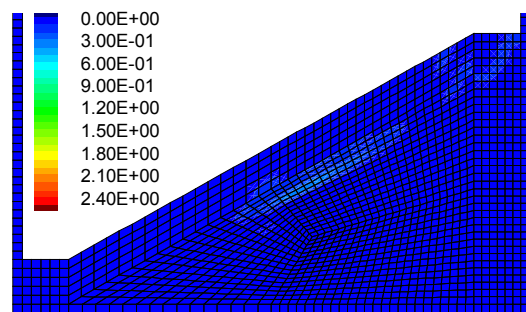


(b) 変位コンター図

図 4-34 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (2 回目)加振終了時)

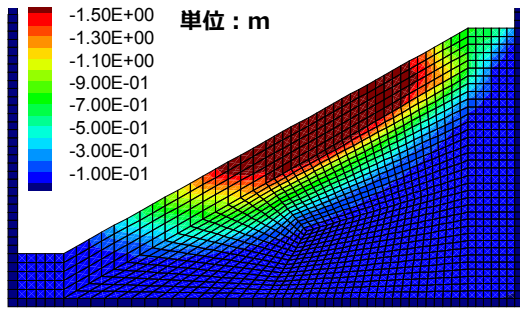


(a) せん断ひずみ増分

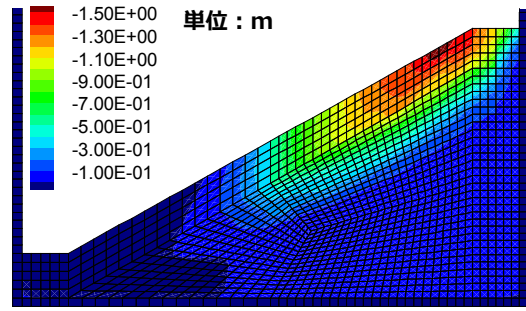


(b) ひずみの第2不変量

図 4-35 ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (2 回目)加振終了時)

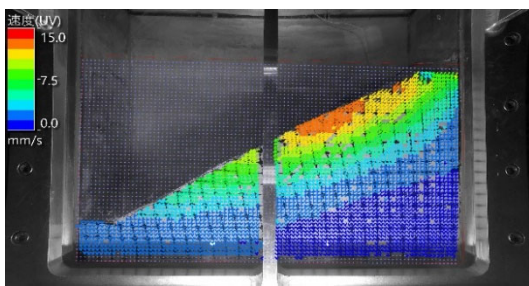


(a) 相对水平変位

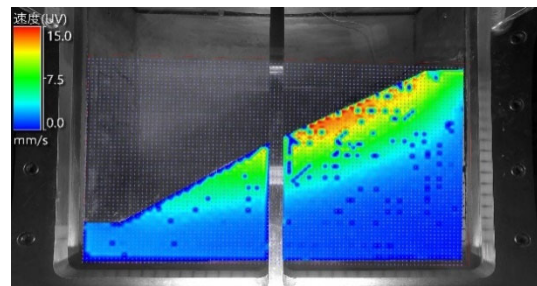


(b) 相对鉛直変位

図 4-36 変位分布 (Case1 : 300Gal (3 回目) 加振終了時)

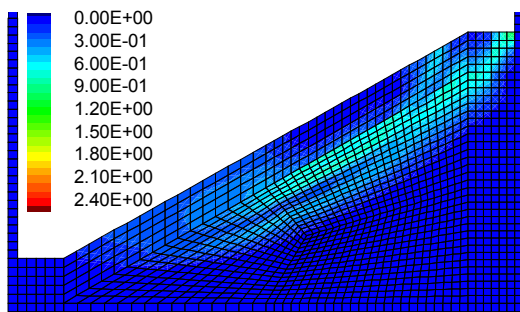


(a) 変位ベクトル図

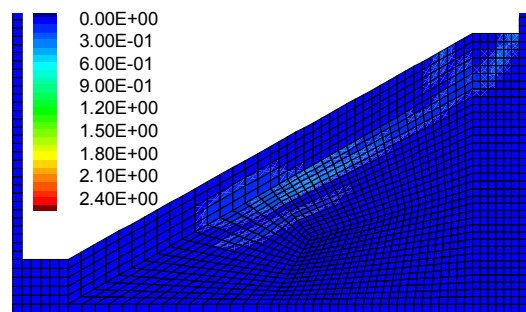


(b) 変位コンター図

図 4-37 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (3 回目)加振終了時)

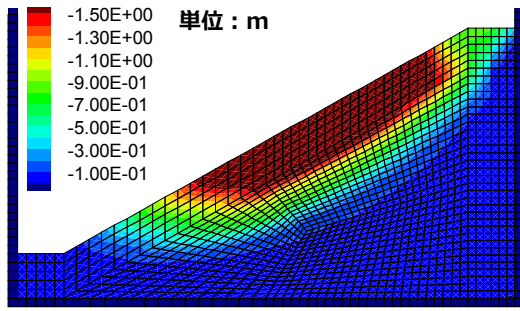


(a) せん断ひずみ増分

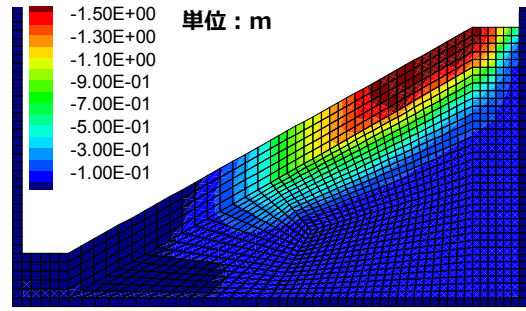


(b) ひずみの第2不変量

図 4-38 ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (3 回目)加振終了時)

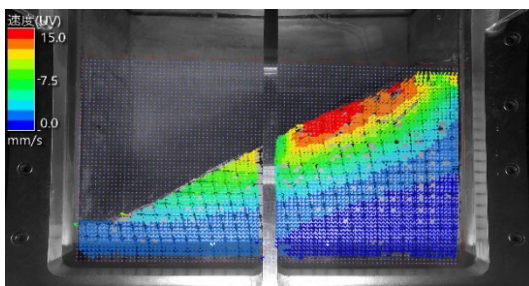


(a) 相对水平変位

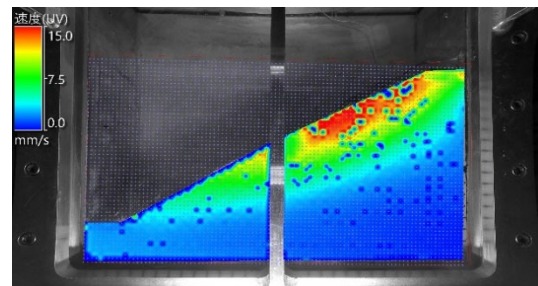


(b) 相对鉛直変位

図 4-39 変位分布 (Case1 : 300Gal (4 回目) 加振終了時)

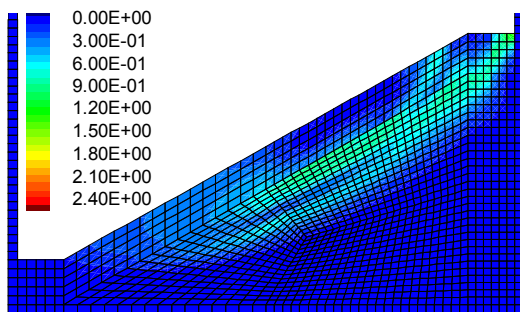


(a) 変位ベクトル図

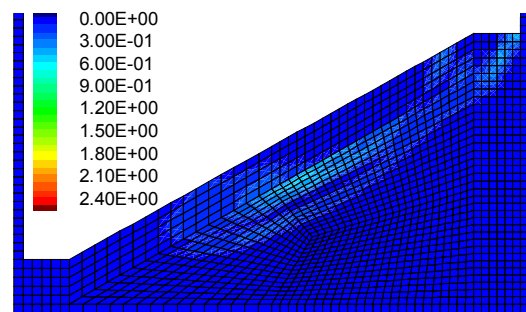


(b) 変位コンター図

図 4-40 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (4 回目)加振終了時)

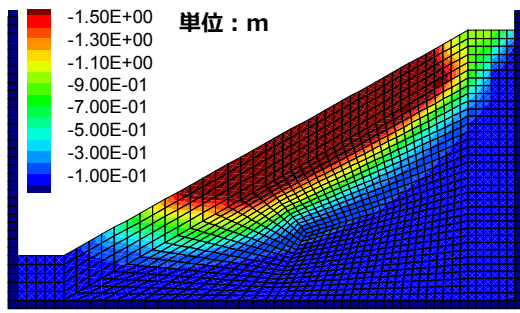


(a) せん断ひずみ増分

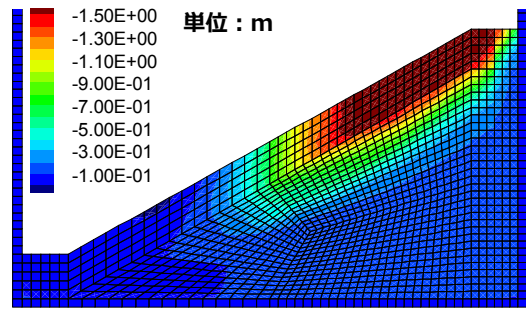


(b) ひずみの第2不変量

図 4-41 ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (4 回目)加振終了時)

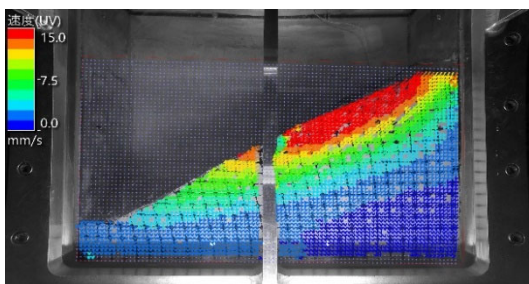


(a) 相对水平変位

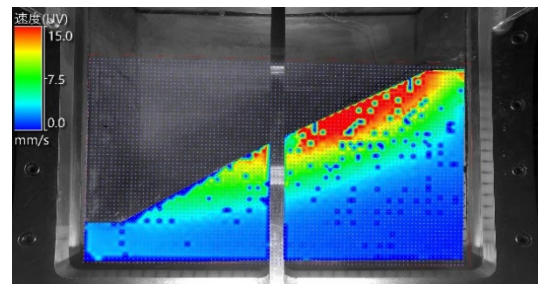


(b) 相对鉛直変位

図 4-42 変位分布 (Case1 : 300Gal (5 回目) 加振終了時)

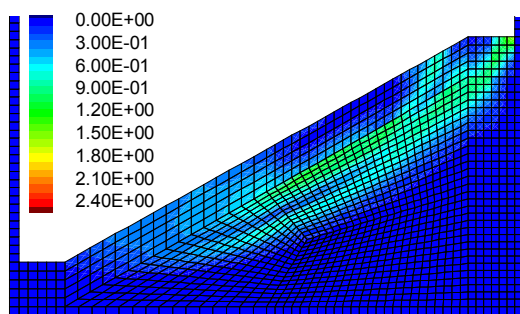


(a) 変位ベクトル図

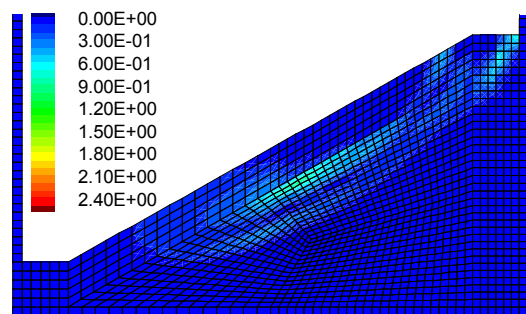


(b) 変位コンター図

図 4-43 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (5 回目)加振終了時)

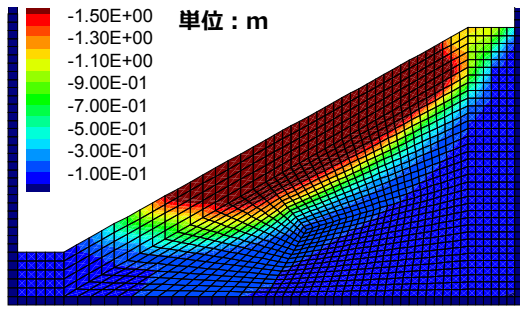


(a) せん断ひずみ増分

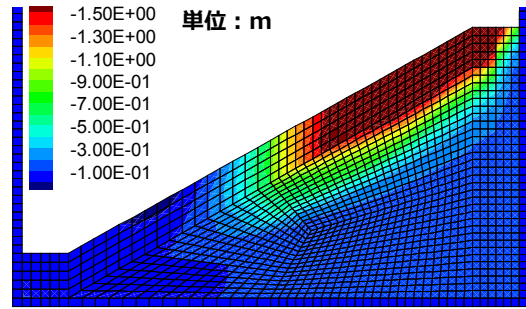


(b) ひずみの第2不変量

図 4-44 ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (5 回目)加振終了時)

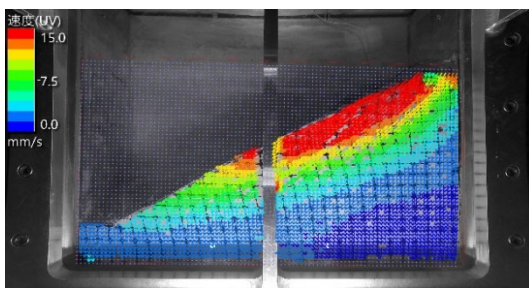


(a) 相对水平変位

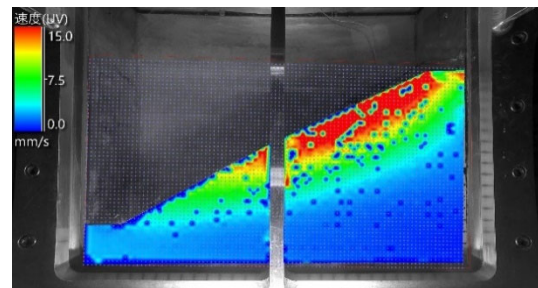


(b) 相对鉛直変位

図 4-45 変位分布 (Case1 : 300Gal (6 回目) 加振終了時)

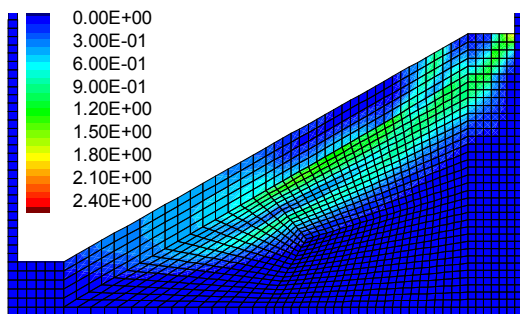


(a) 変位ベクトル図

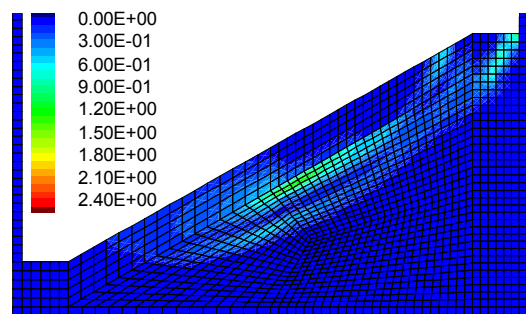


(b) 変位コンター図

図 4-46 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (6 回目)加振終了時)

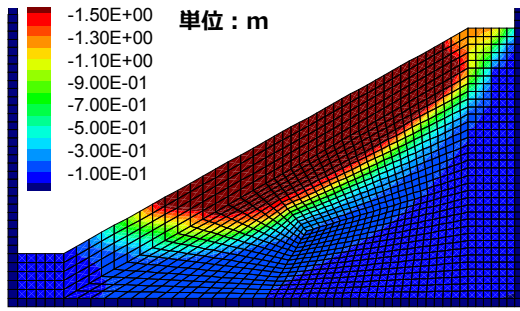


(a) せん断ひずみ増分

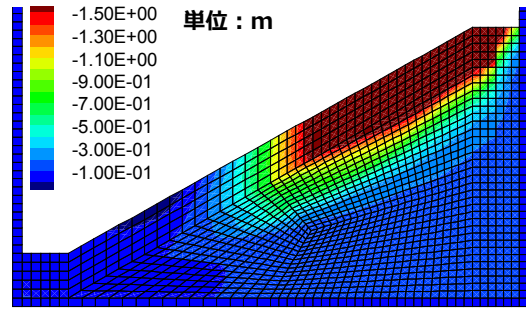


(b) ひずみの第2不変量

図 4-47 ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (6 回目)加振終了時)

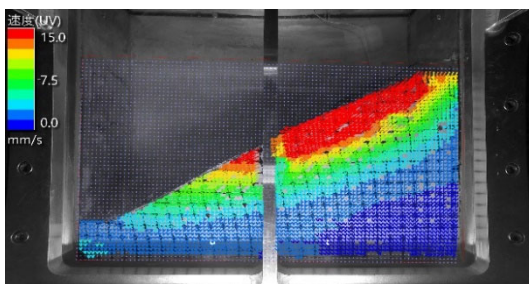


(a) 相对水平変位

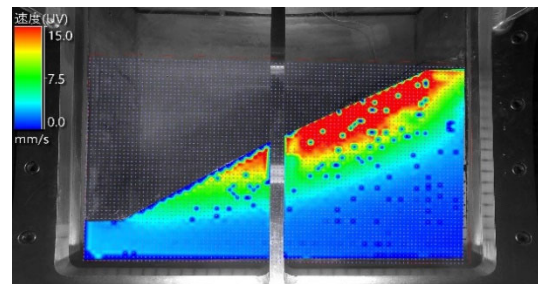


(b) 相对鉛直変位

図 4-48 変位分布 (Case1 : 300Gal (7 回目) 加振終了時)

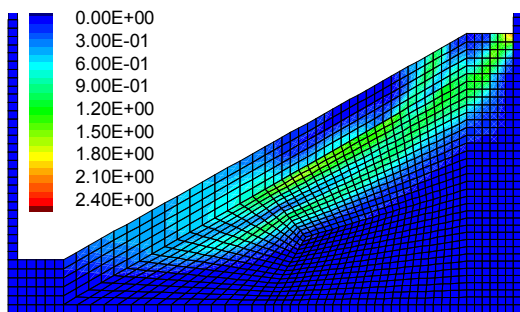


(a) 変位ベクトル図

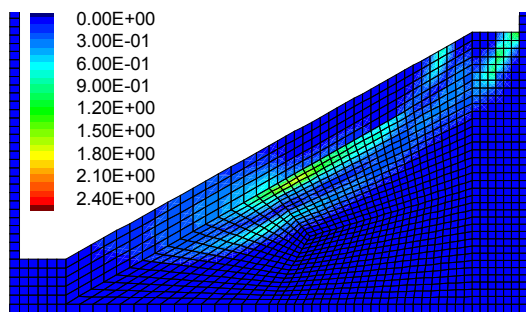


(b) 変位コンター図

図 4-49 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (7 回目)加振終了時)

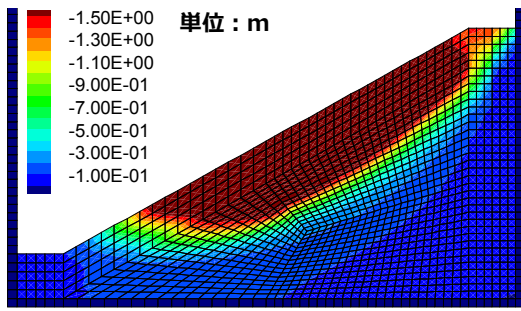


(a) せん断ひずみ増分

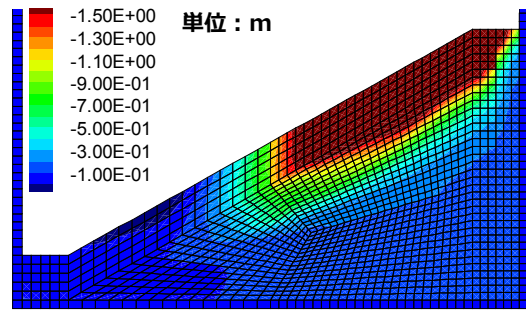


(b) ひずみの第2不変量

図 4-50 ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (7 回目)加振終了時)

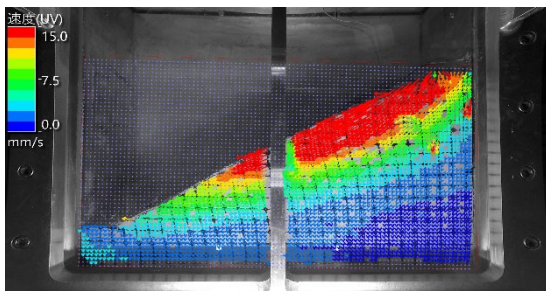


(a) 相对水平変位

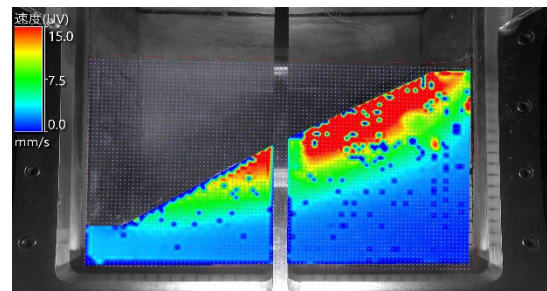


(b) 相对鉛直変位

図 4-51 変位分布 (Case1 : 325Gal 加振終了時)

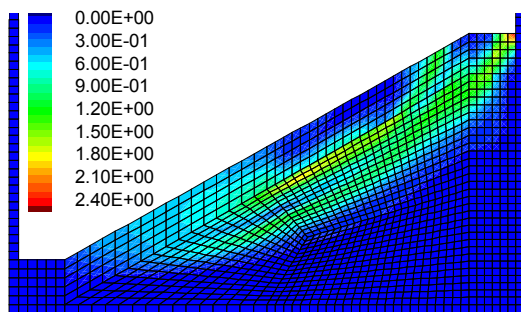


(a) 変位ベクトル図

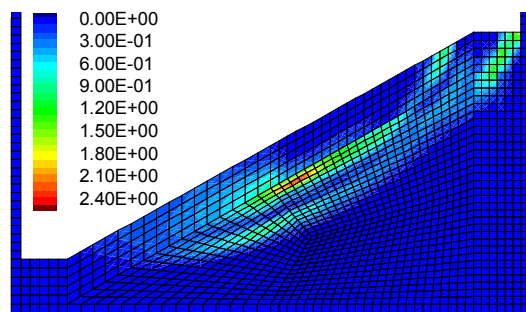


(b) 変位コンター図

図 4-52 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 325Gal 加振終了時)



(a) せん断ひずみ増分



(b) ひずみの第2不変量

図 4-53 ひずみ分布 (Case1 : 325Gal 加振終了時)

Case2の解析モデルを図 4-54 に示す。基盤入力加速度を図 4-55 に示す。50 Gal、250Gal、300Gal（1 回目）、300Gal（2 回目）加振時における法肩の応答加速度（解析）を法肩の応答加速度（実験）および基盤入力波形とともに図 4-56 に示す。

50Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-57 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-58 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-59 に示す。

100Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-60 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-61 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-62 に示す。

150Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-63 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-64 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-65 に示す。

200Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-66 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-67 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-68 に示す。

250Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-69 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-70 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-71 に示す。

300Gal（1 回目）加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-72 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-73 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-74 に示す。

300Gal（2 回目）加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-75 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-76 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-77 に示す。

300Gal（50 波 1 回目）加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-78 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-79 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-80 に示す。

300Gal（50 波 2 回目）加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-81 に示す。

す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-82 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-83 に示す。

300Gal (50 波 3 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-84 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-85 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-86 に示す。

300Gal (50 波 4 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-87 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-88 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-89 に示す。

300Gal (50 波 5 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-90 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-91 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-92 に示す。

325Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-93 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-94 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-95 に示す。

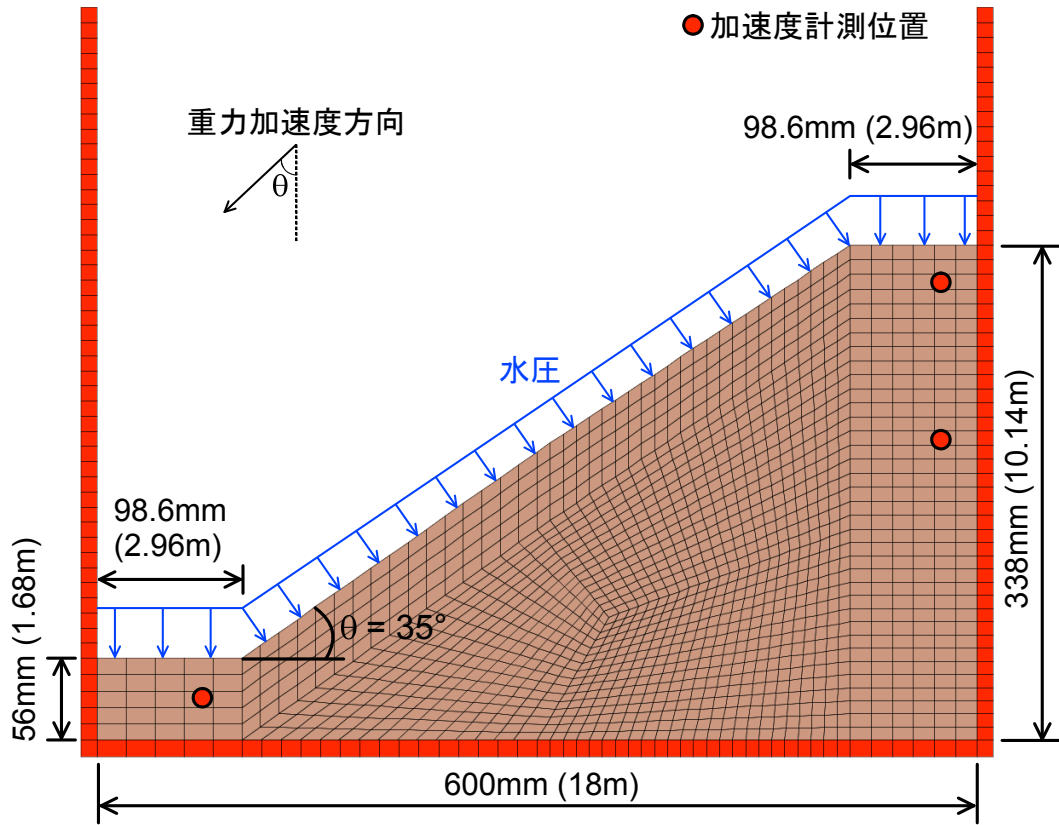


図 4-54 解析モデル図 (Case2)

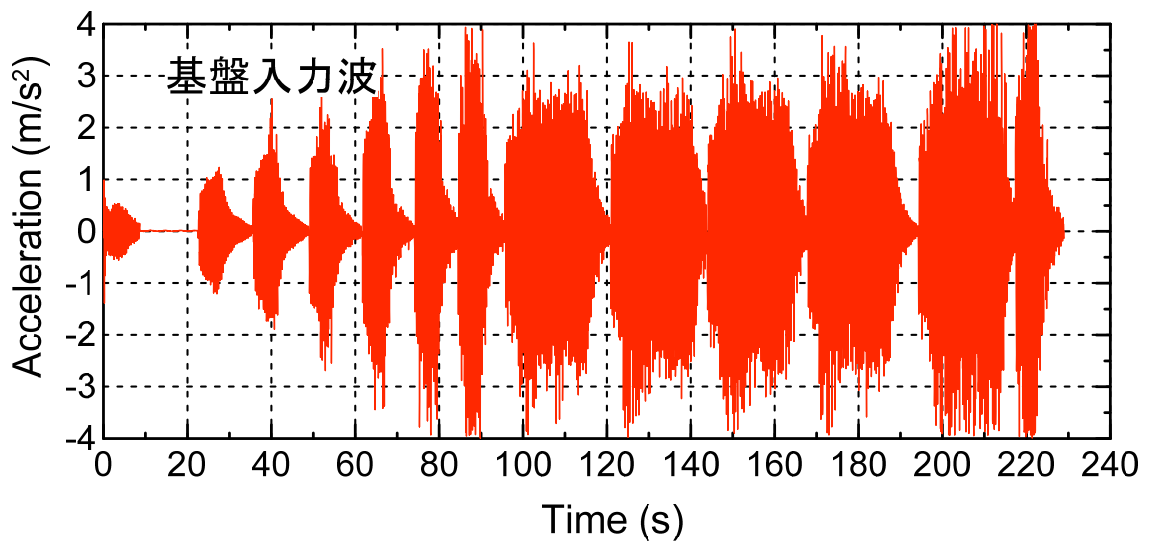


図 4-55 基盤入力加速度 (Case2)

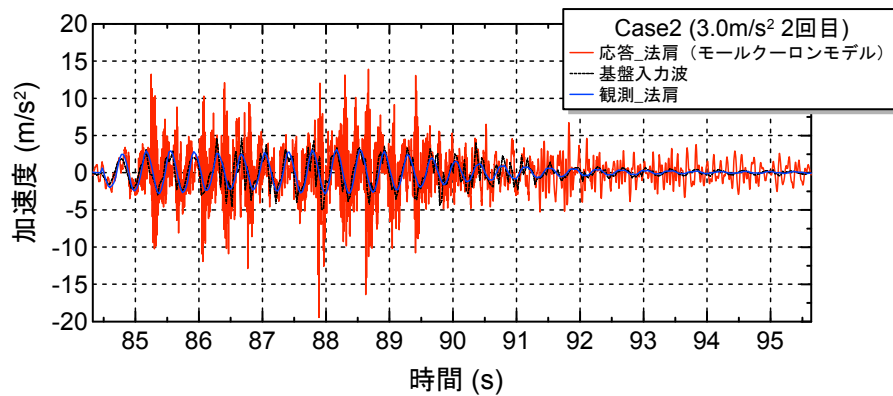
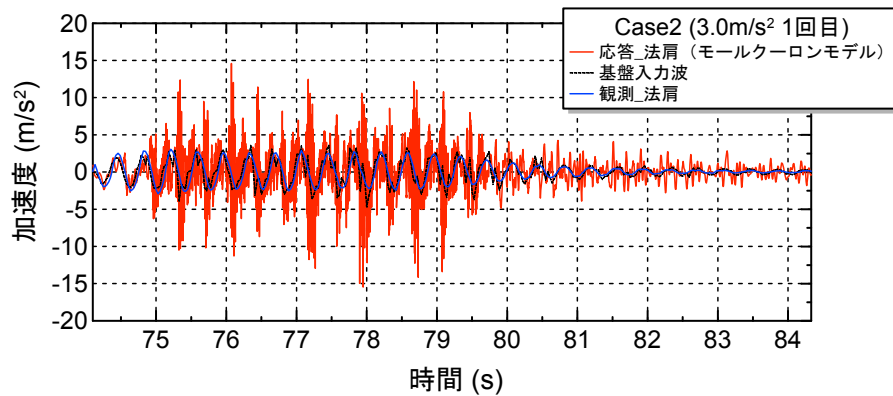
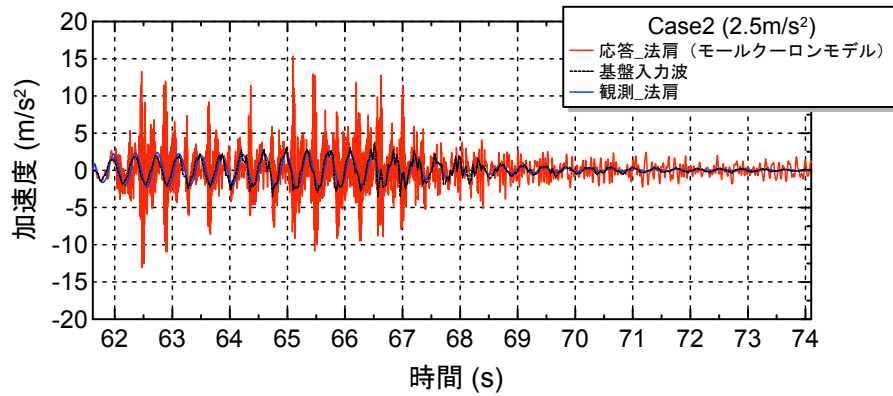
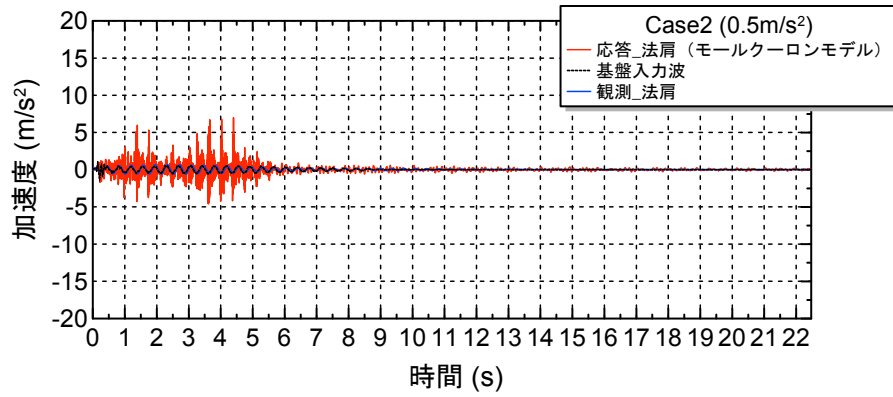
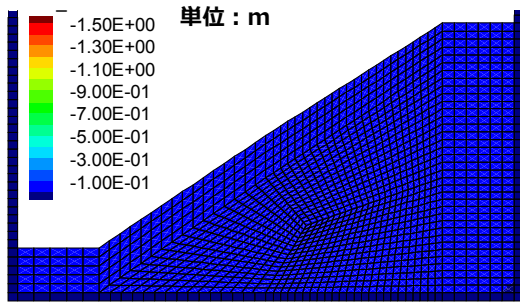
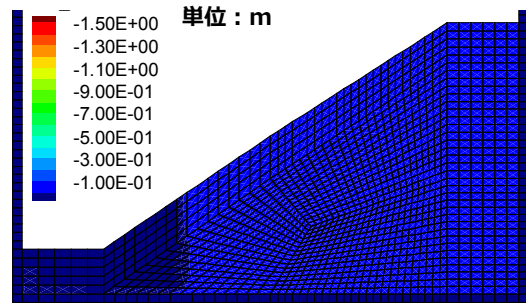


図 4-56 法肩の応答加速度の解析結果 (Case2)

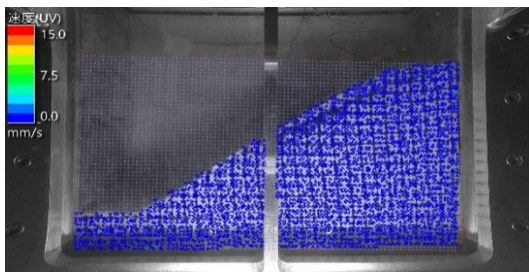


(a) 相对水平変位

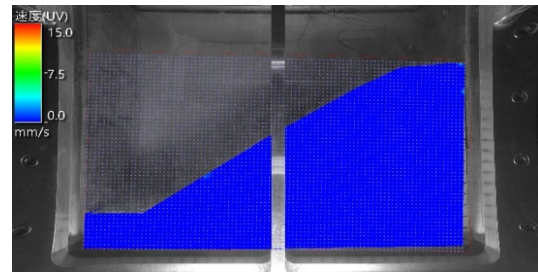


(b) 相对鉛直変位

図 4-57 変位分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)

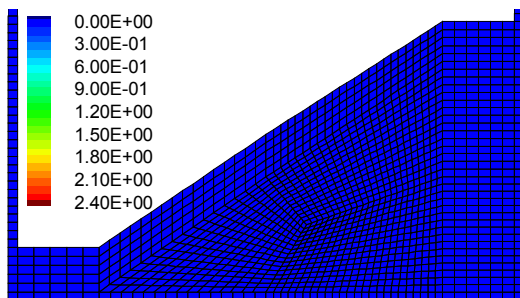


(a) 変位ベクトル図

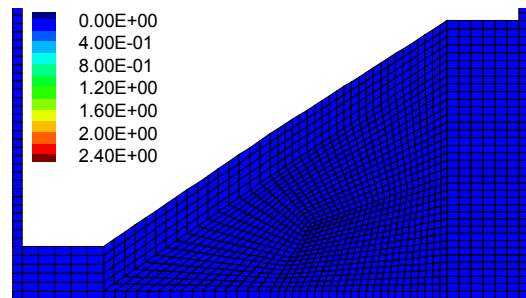


(b) 変位コンター図

図 4-58 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)

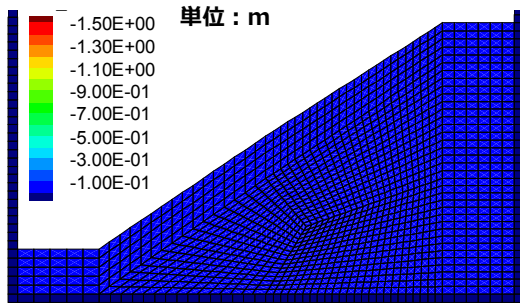


(a) せん断ひずみ増分

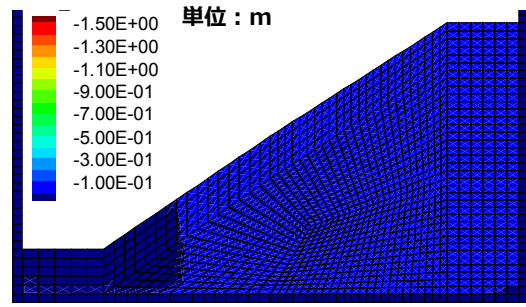


(b) ひずみの第2不変量

図 4-59 ひずみ分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)

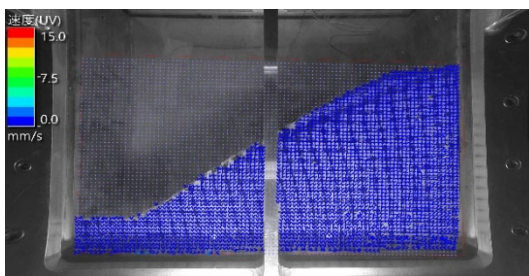


(a) 相対水平変位

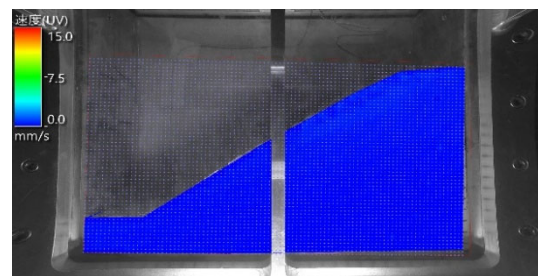


(b) 相対鉛直変位

図 4-60 変位分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)

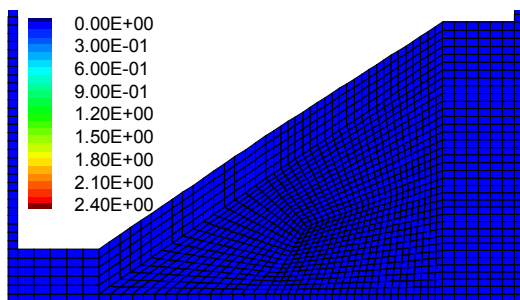


(a) 変位ベクトル図

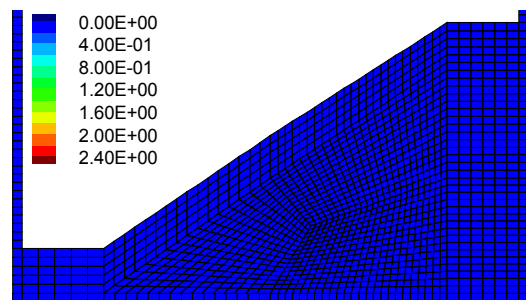


(b) 変位コンター図

図 4-61 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)

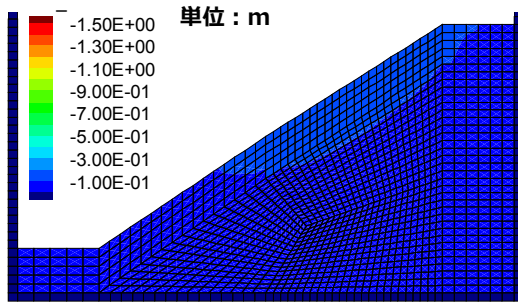


(a) せん断ひずみ増分

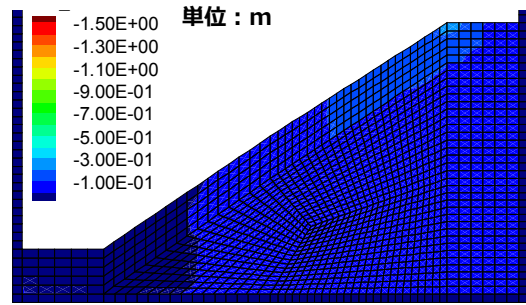


(b) ひずみの第2不変量

図 4-62 ひずみ分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)

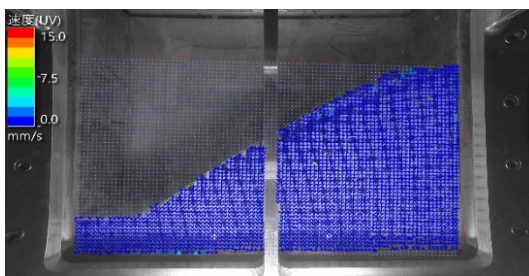


(a) 相对水平変位

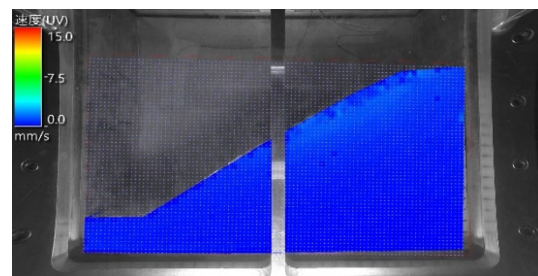


(b) 相对鉛直変位

図 4-63 変位分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)

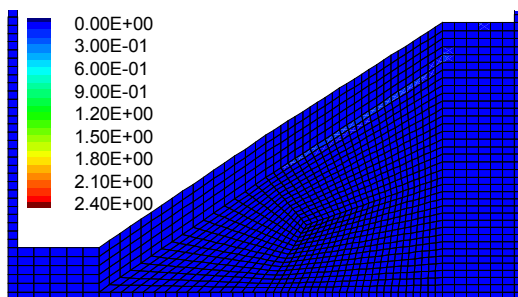


(a) 変位ベクトル図

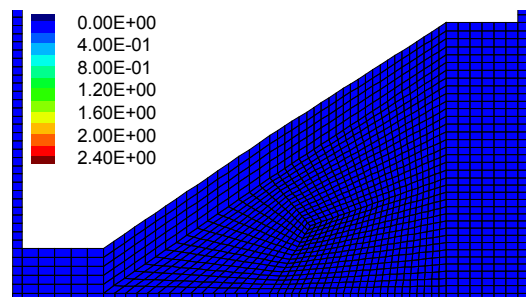


(b) 変位コンター図

図 4-64 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)

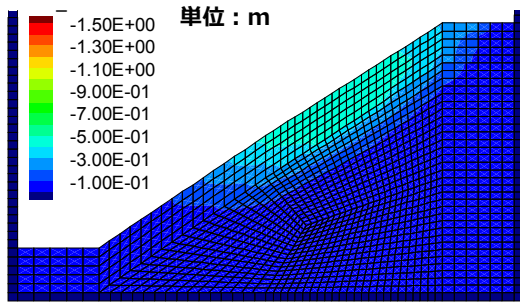


(a) せん断ひずみ増分

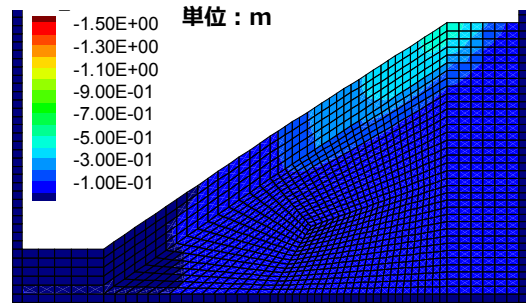


(b) ひずみの第2不変量

図 4-65 ひずみ分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)

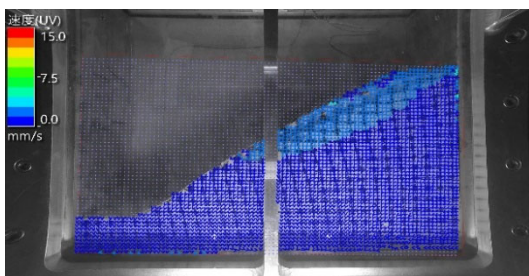


(a) 相对水平変位

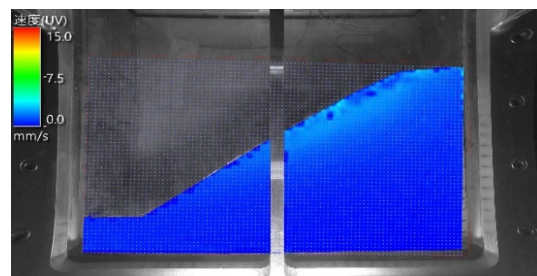


(b) 相对鉛直変位

図 4-66 変位分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)

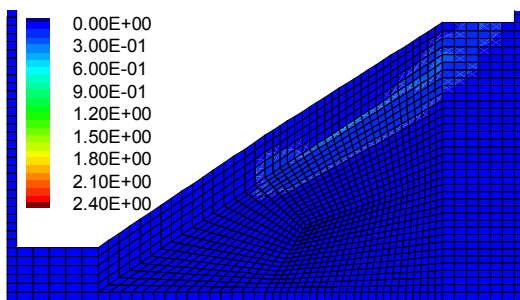


(a) 変位ベクトル図

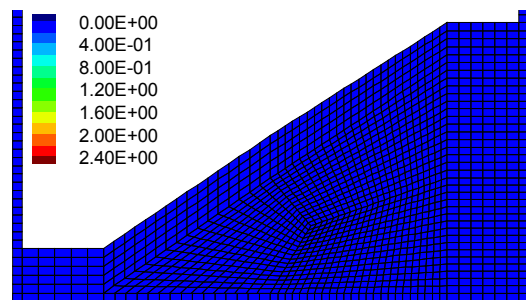


(b) 変位コンター図

図 4-67 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)

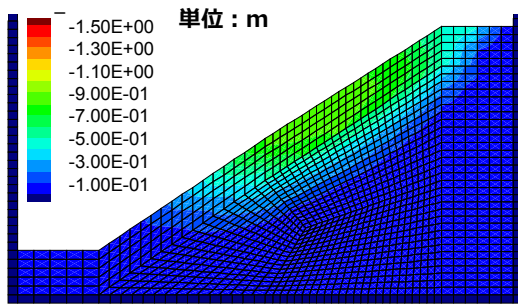


(a) せん断ひずみ増分

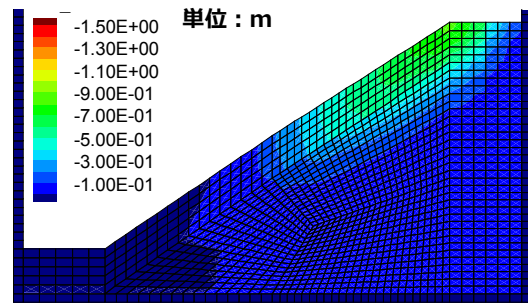


(b) ひずみの第2不変量

図 4-68 ひずみ分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)

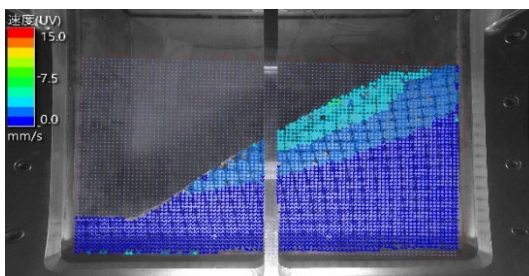


(a) 相対水平変位

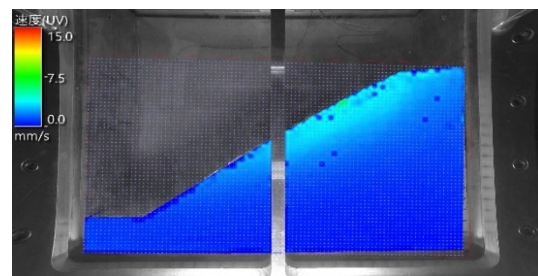


(b) 相対鉛直変位

図 4-69 変位分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)

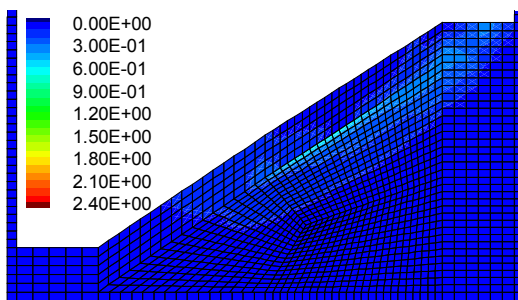


(a) 変位ベクトル図

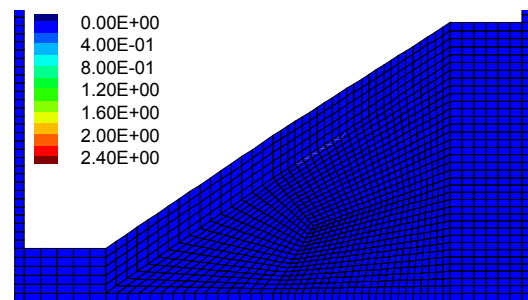


(b) 変位コンター図

図 4-70 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)

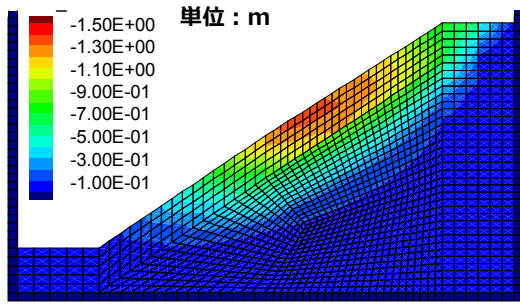


(a) せん断ひずみ増分

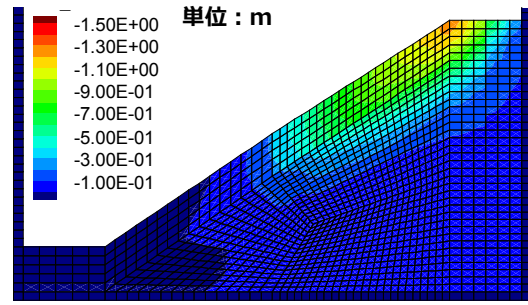


(b) ひずみの第2不変量

図 4-71 ひずみ分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)

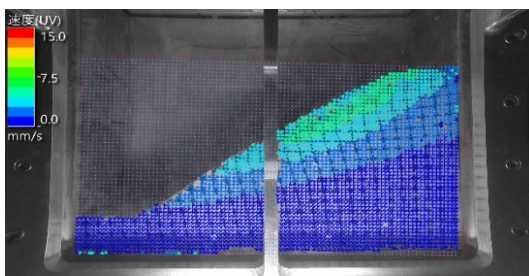


(a) 相对水平変位

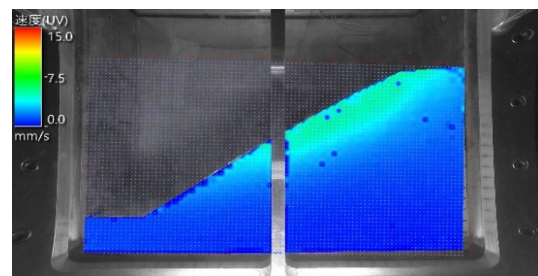


(b) 相对鉛直変位

図 4-72 変位分布 (Case2 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)

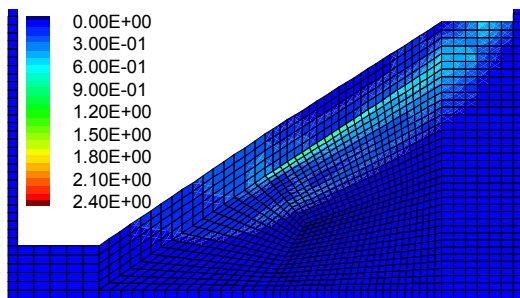


(a) 変位ベクトル図

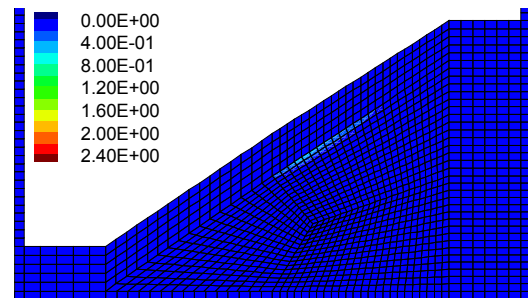


(b) 変位コンター図

図 4-73 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (1 回目)加振終了時)

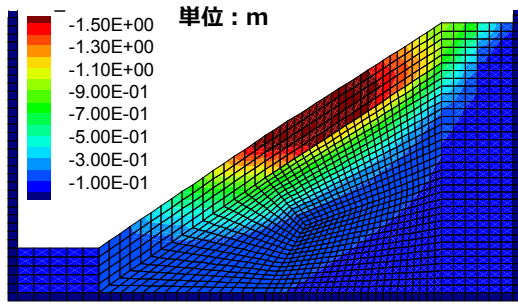


(a) せん断ひずみ増分

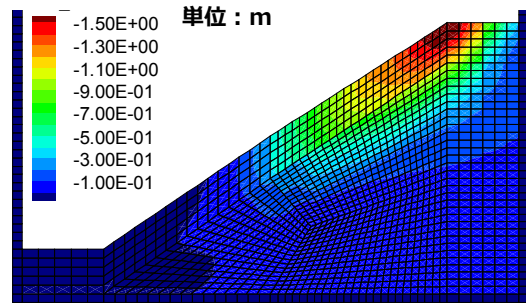


(b) ひずみの第2不変量

図 4-74 ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (1 回目)加振終了時)

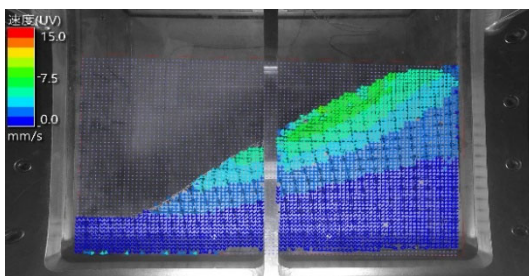


(a) 相对水平変位

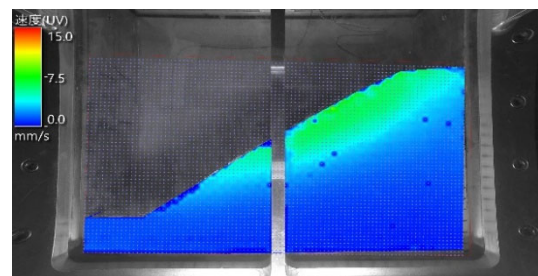


(b) 相对鉛直変位

図 4-75 変位分布 (Case2 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)

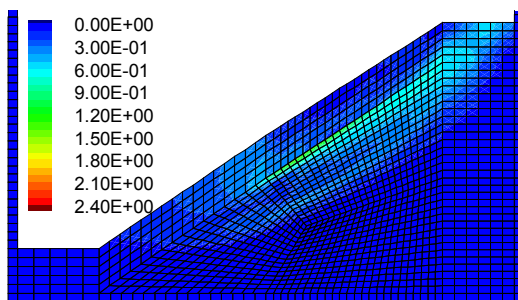


(a) 変位ベクトル図

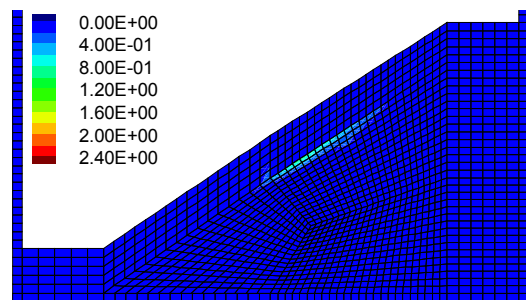


(b) 変位コンター図

図 4-76 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (2 回目)加振終了時)

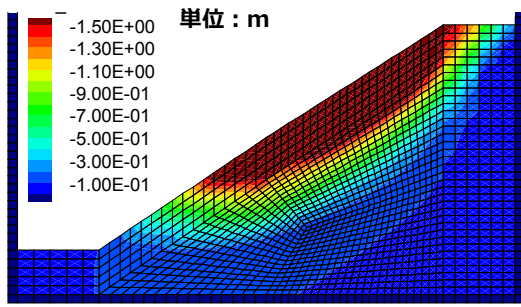


(a) せん断ひずみ増分

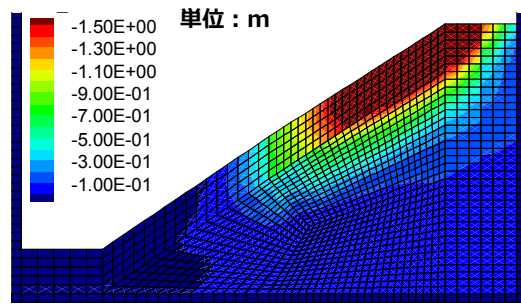


(b) ひずみの第2不変量

図 4-77 ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (2 回目)加振終了時)

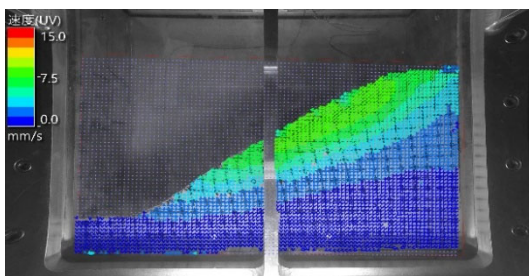


(a) 相对水平変位

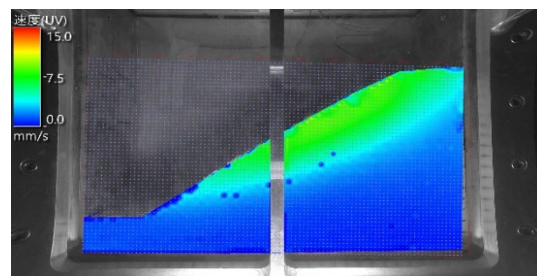


(b) 相对鉛直変位

図 4-78 変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 1 回目) 加振終了時)

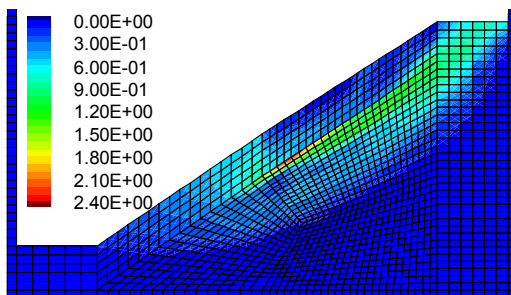


(a) 変位ベクトル図

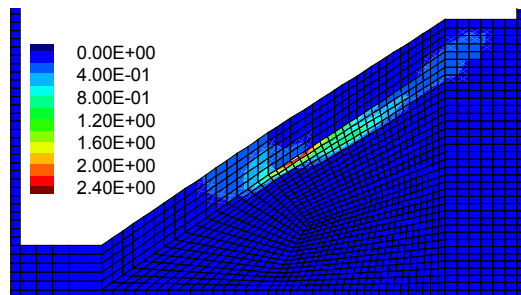


(b) 変位コンター図

図 4-79 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 1 回目) 加振終了時)

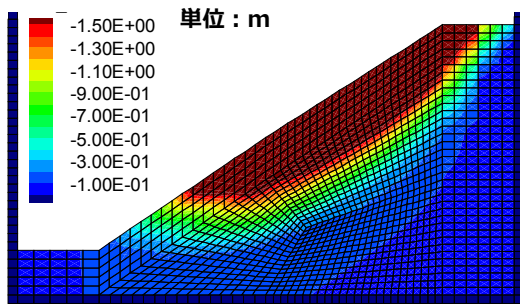


(a) せん断ひずみ増分

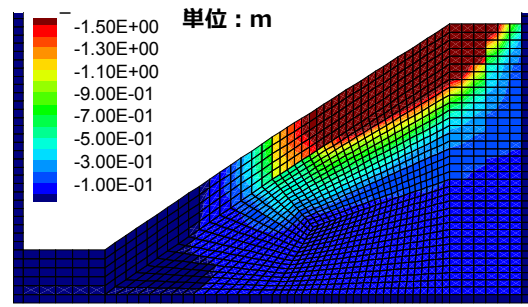


(b) ひずみの第2不変量

図 4-80 ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 1 回目) 加振終了時)

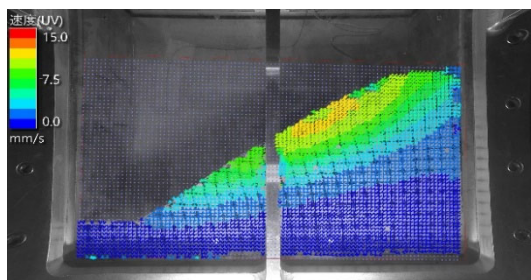


(a) 相对水平変位

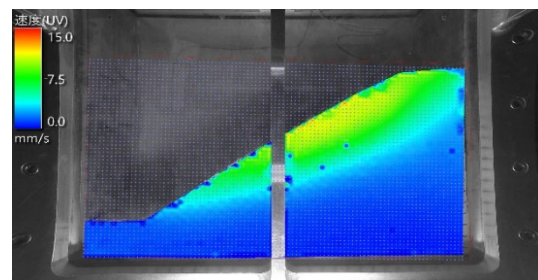


(b) 相对鉛直変位

図 4-81 変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 2 回目) 加振終了時)

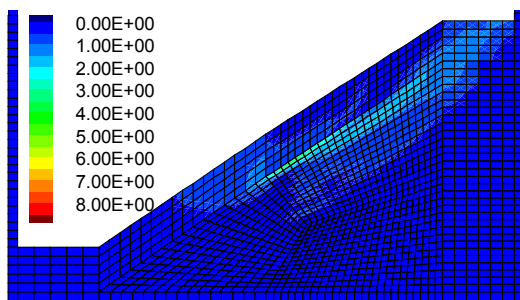


(a) 変位ベクトル図

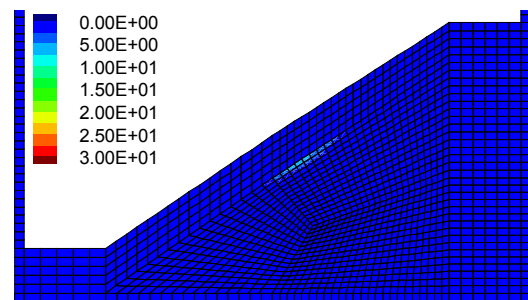


(b) 変位コンター図

図 4-82 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 2 回目) 加振終了時)

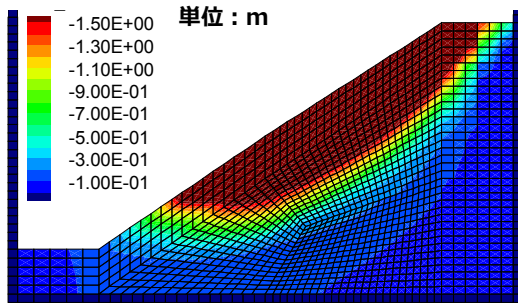


(a) せん断ひずみ増分

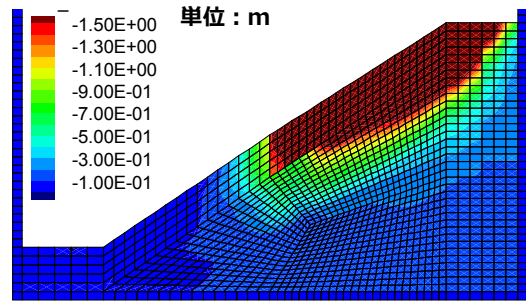


(b) ひずみの第2不変量

図 4-83 ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 2 回目) 加振終了時)

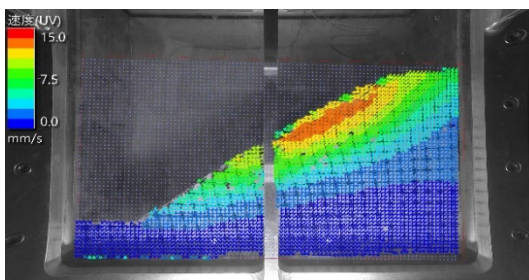


(a) 相对水平変位

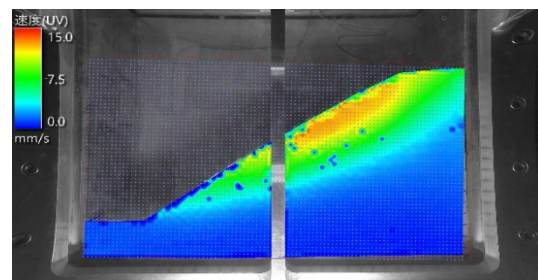


(b) 相对鉛直変位

図 4-84 変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 3 回目) 加振終了時)

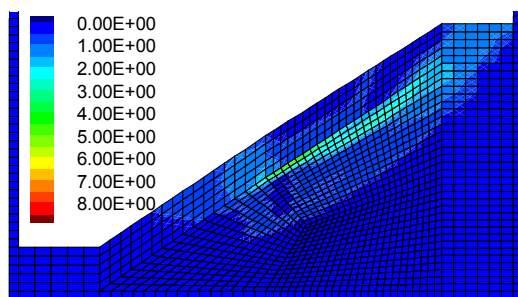


(a) 変位ベクトル図

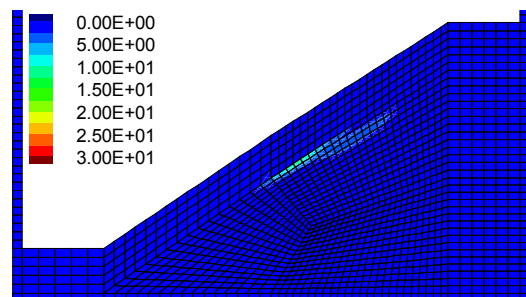


(b) 変位コンター図

図 4-85 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 3 回目) 加振終了時)

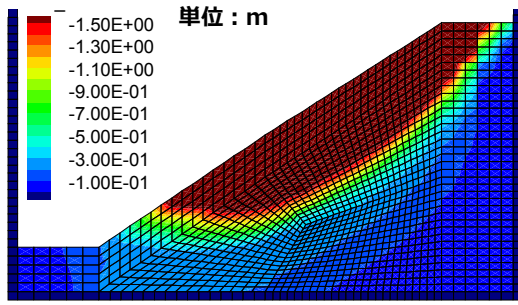


(a) せん断ひずみ増分

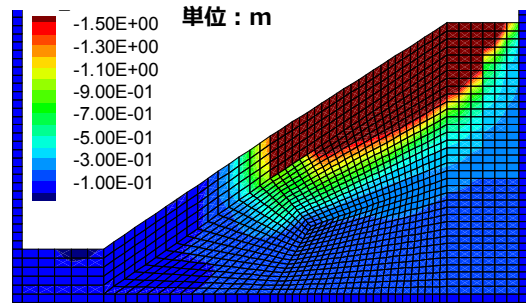


(b) ひずみの第2不変量

図 4-86 ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 3 回目) 加振終了時)

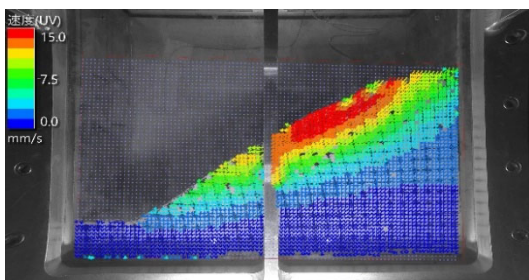


(a) 相对水平変位

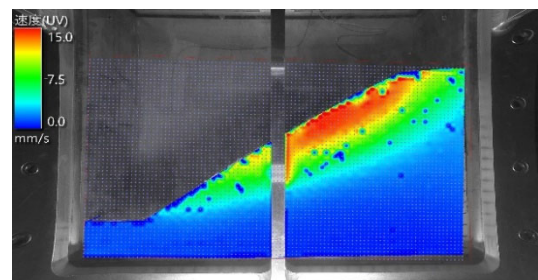


(b) 相对鉛直変位

図 4-87 変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 4 回目) 加振終了時)

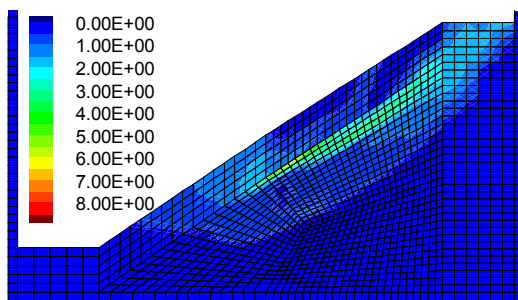


(a) 変位ベクトル図

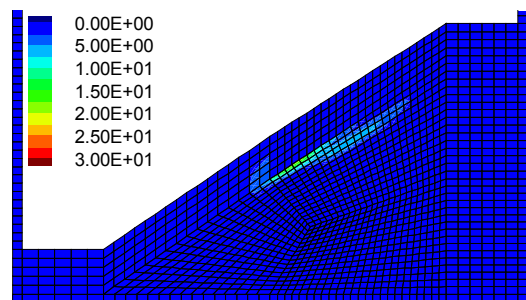


(b) 変位コンター図

図 4-88 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Ga (50 波 4 回目) 加振終了時)

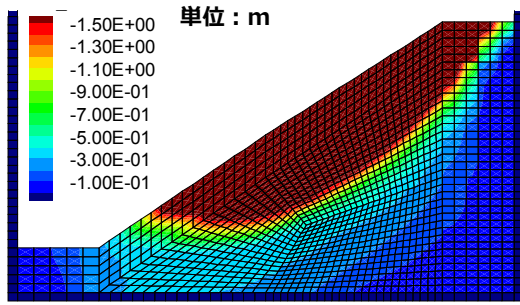


(a) せん断ひずみ増分

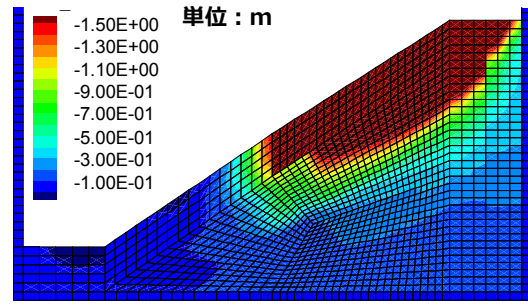


(b) ひずみの第2不変量

図 4-89 ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 4 回目) 加振終了時)

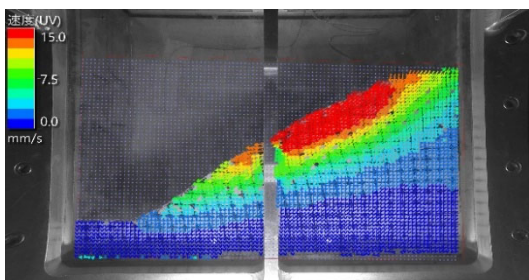


(a) 相对水平変位

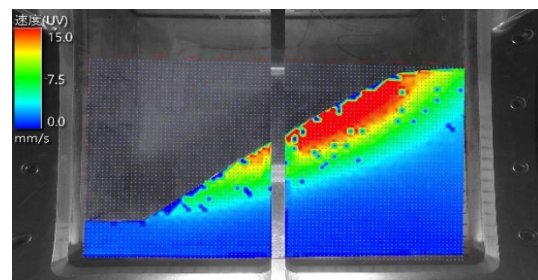


(b) 相对鉛直変位

図 4-90 変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 5 回目) 加振終了時)

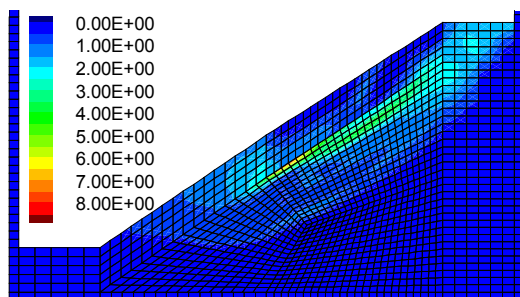


(a) 変位ベクトル図

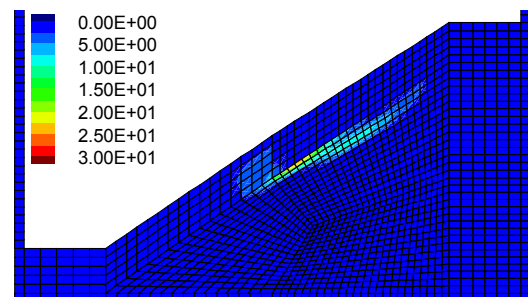


(b) 変位コンター図

図 4-91 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 5 回目) 加振終了時)

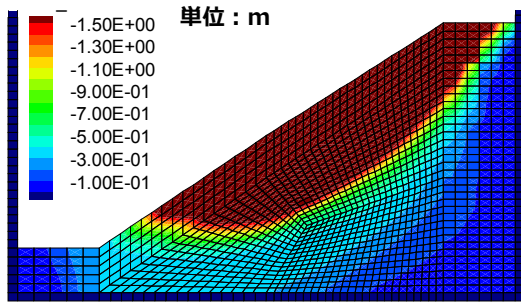


(a) せん断ひずみ増分

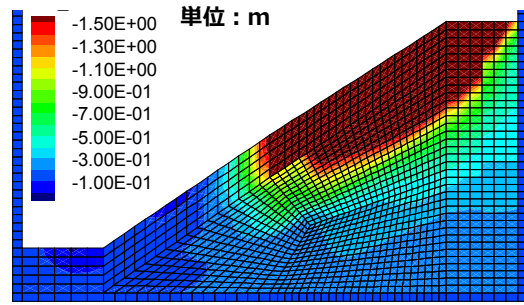


(b) ひずみの第2不変量

図 4-92 ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 5 回目) 加振終了時)

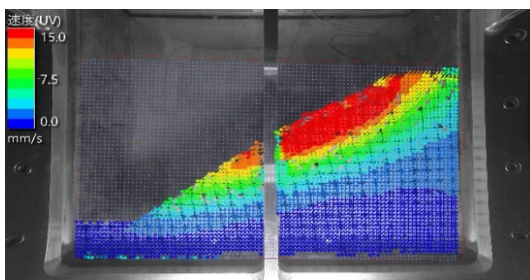


(a) 相对水平変位

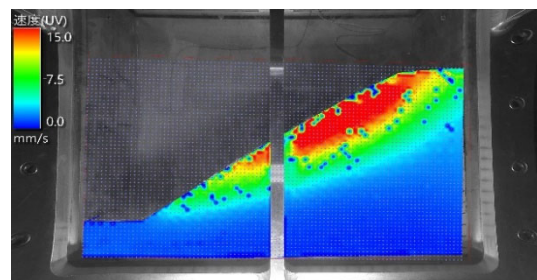


(b) 相对鉛直変位

図 4-93 変位分布 (Case2 : 325Gal 加振終了時)

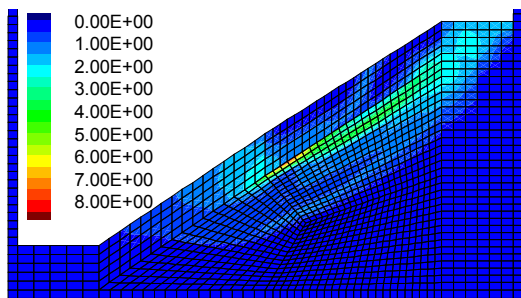


(a) 変位ベクトル図

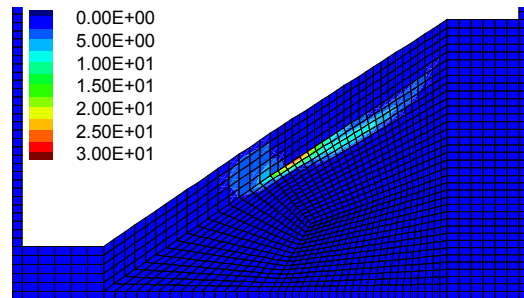


(b) 変位コンター図

図 4-94 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 325Gal 加振終了時)



(a) せん断ひずみ増分



(b) ひずみの第2不変量

図 4-95 ひずみ分布 (Case2 : 325Gal 加振終了時)

Case3の解析モデルを図 4-96 に示す。基盤入力加速度を図 4-97 に示す。50 Gal、250Gal、300Gal（1 回目）、300Gal（2 回目）加振時における法肩の応答加速度（解析）を法肩の応答加速度（実験）および基盤入力波形とともに図 4-98 に示す。

50Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-99 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-100 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-101 に示す。

100Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-102 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-103 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-104 に示す。

150Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-105 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-106 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-107 に示す。

200Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-108 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-109 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-110 に示す。

250Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-111 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-112 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-113 に示す。

300Gal（1 回目）加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-114 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-115 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-116 に示す。

300Gal（2 回目）加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-117 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-118 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-119 に示す。

300Gal（3 回目）加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-120 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-121 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-122 に示す。

300Gal（4 回目）加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-123 に示す。

比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-124 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-125 に示す。

300Gal (5 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-126 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-127 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-128 に示す。

300Gal (6 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-129 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-130 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-131 に示す。

300Gal (7 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-132 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-133 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-134 に示す。

325Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-135 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-136 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-137 に示す。

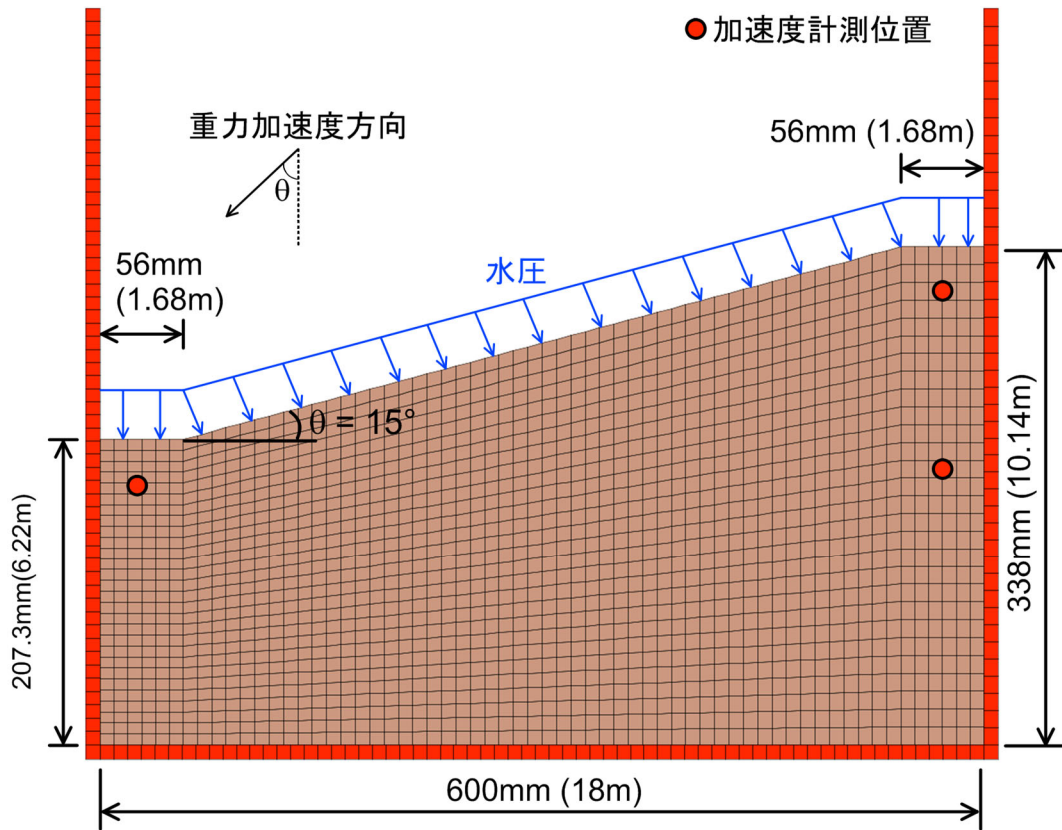


図 4-96 解析モデル図 (Case3)

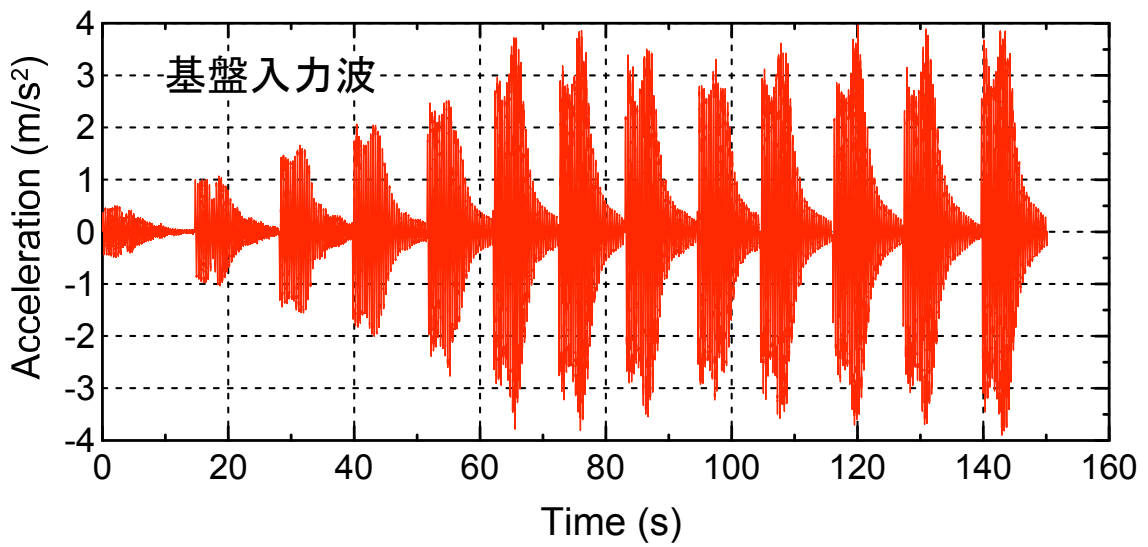


図 4-97 基盤入力加速度 (Case3)

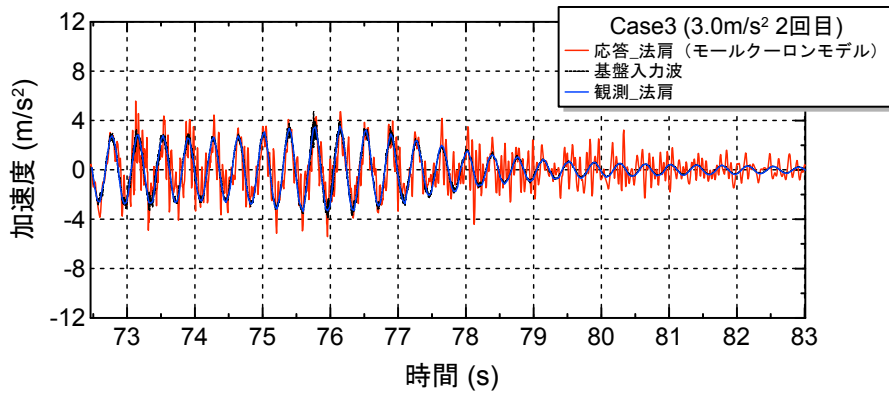
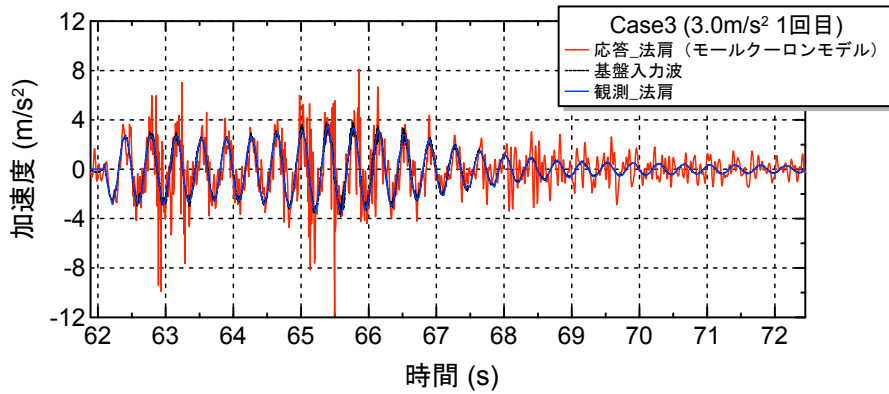
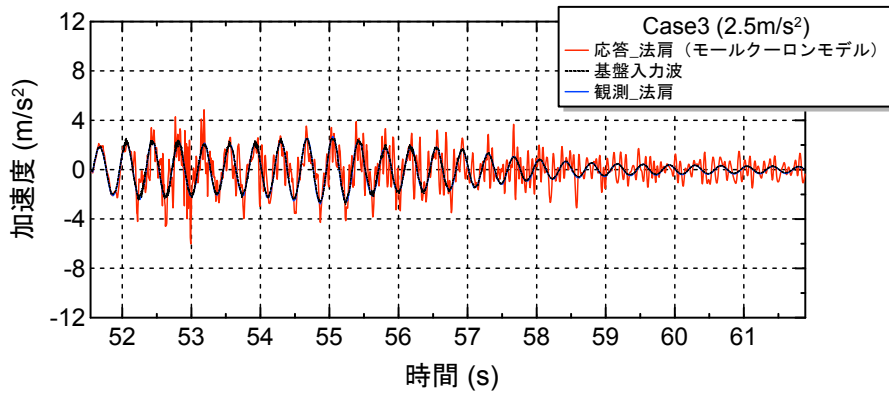
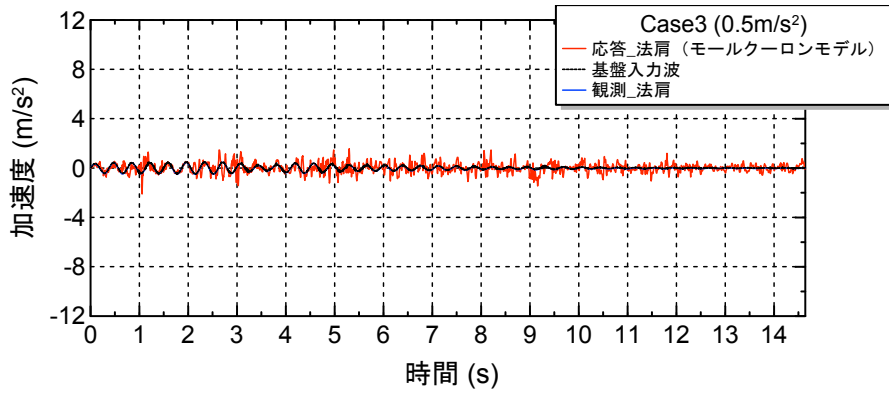
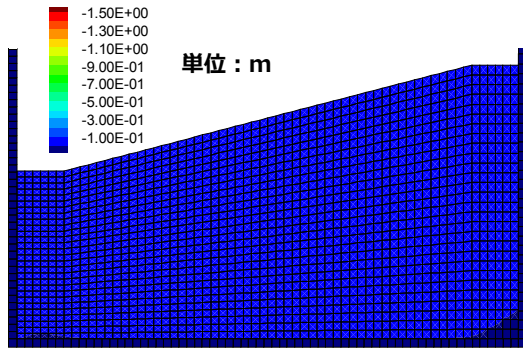
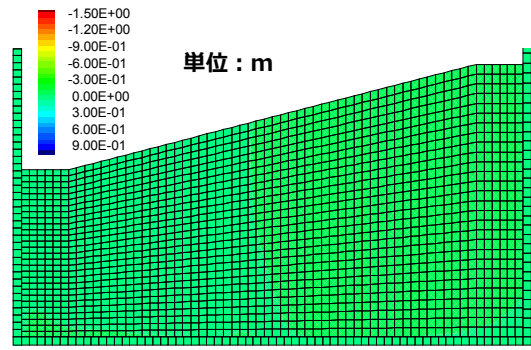


図 4-98 法肩の応答加速度の解析結果 (Case3)

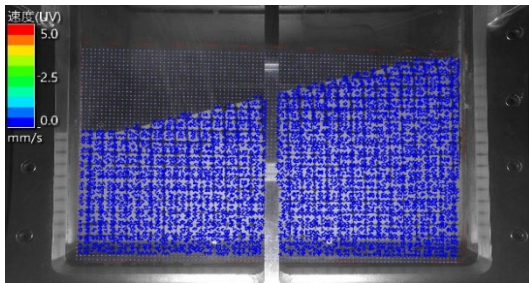


(a) 相対水平変位

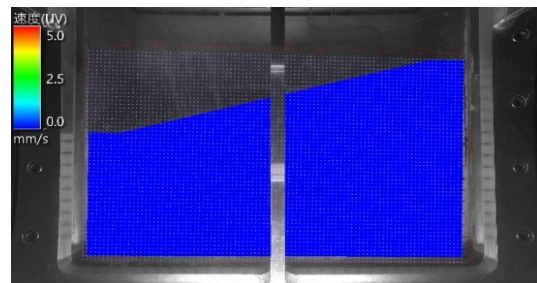


(b) 相対鉛直変位

図 4-99 変位分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)

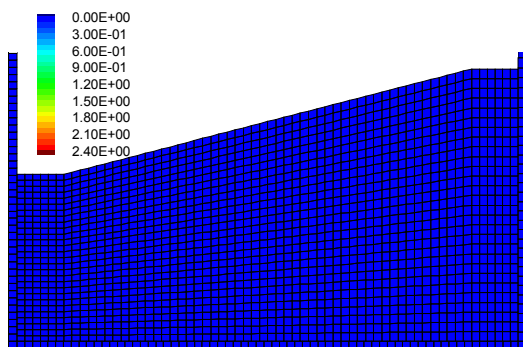


(a) 変位ベクトル図

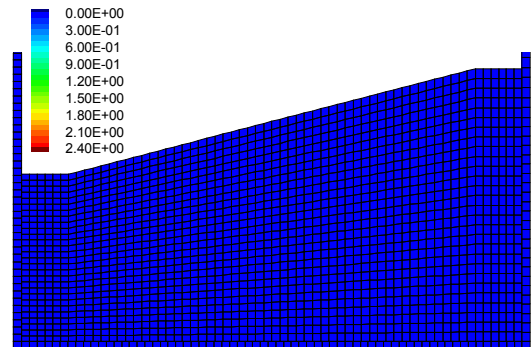


(b) 変位コンター図

図 4-100 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)

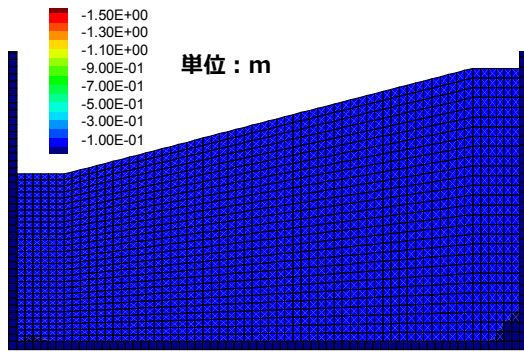


(a) せん断ひずみ増分

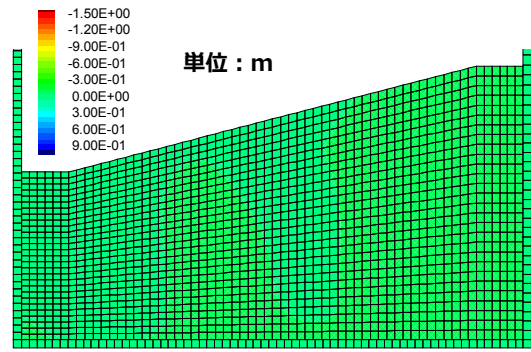


(b) ひずみの第2不変量

図 4-101 ひずみ分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)

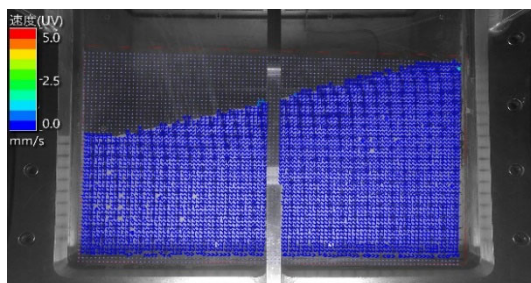


(a) 相対水平変位

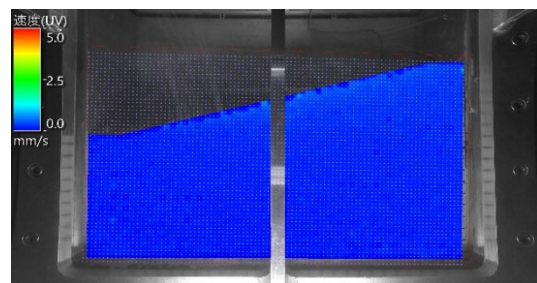


(b) 相対鉛直変位

図 4-102 変位分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)

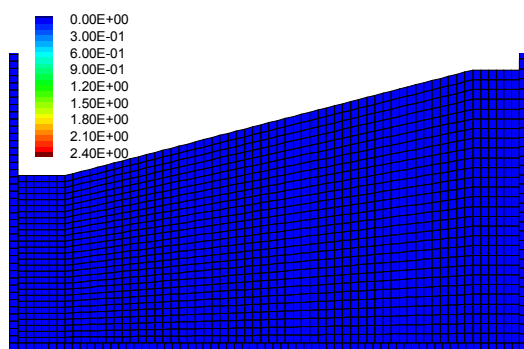


(a) 変位ベクトル図

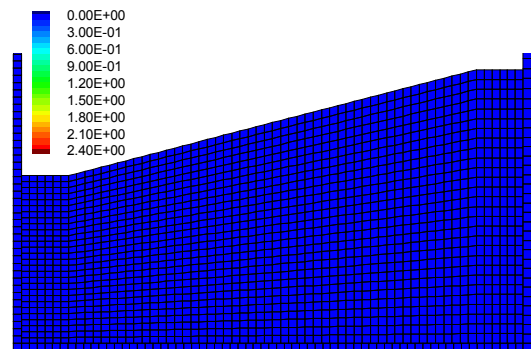


(b) 変位コンター図

図 4-103 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)

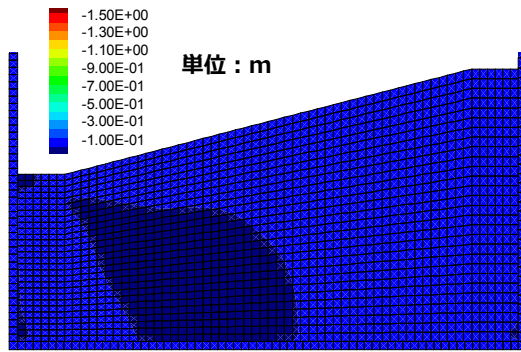


(a) せん断ひずみ増分

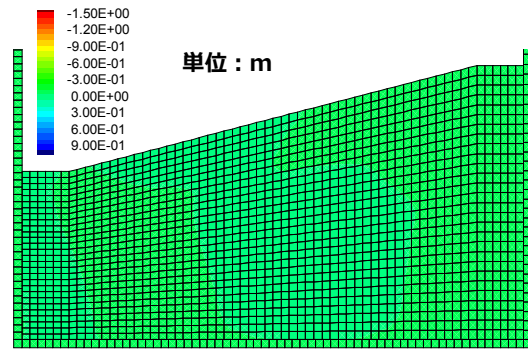


(b) ひずみの第2不変量

図 4-104 ひずみ分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)

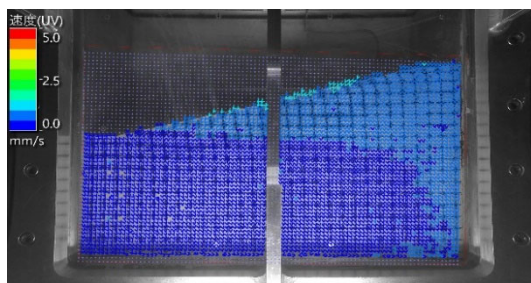


(a) 相対水平変位

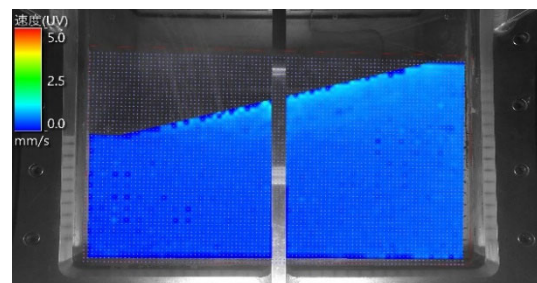


(b) 相対鉛直変位

図 4-105 変位分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)

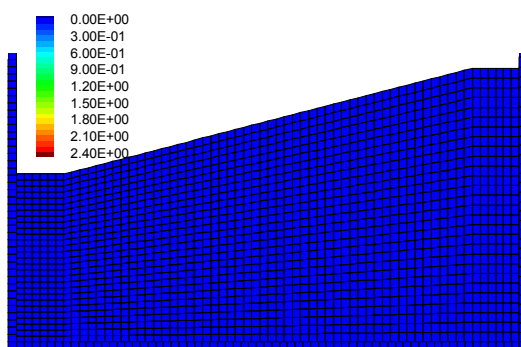


(a) 変位ベクトル図

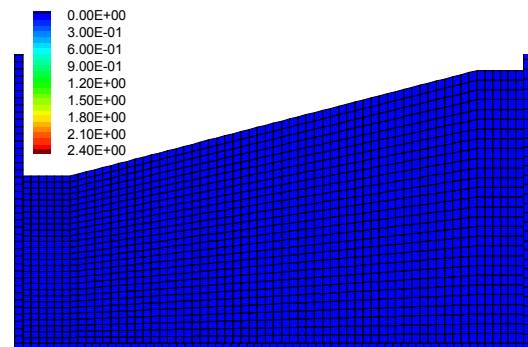


(b) 変位コンター図

図 4-106 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)

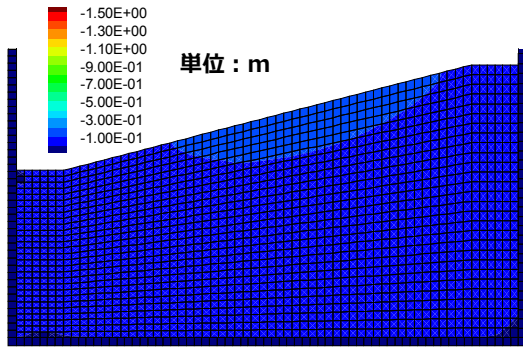


(a) せん断ひずみ増分

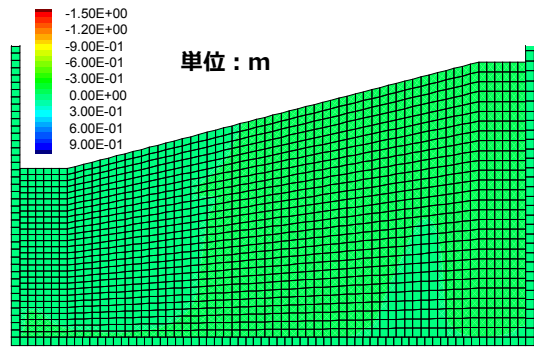


(b) ひずみの第2不変量

図 4-107 ひずみ分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)

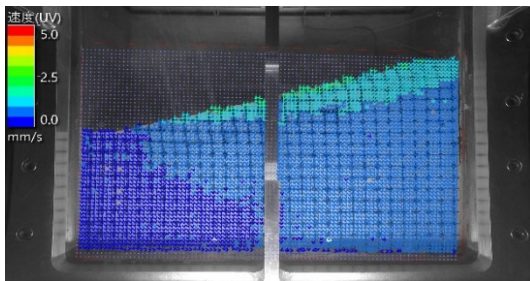


(a) 相対水平変位

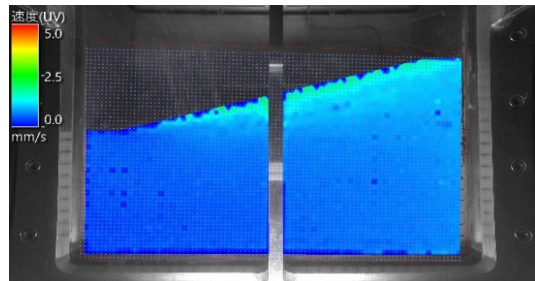


(b) 相対鉛直変位

図 4-108 変位分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)

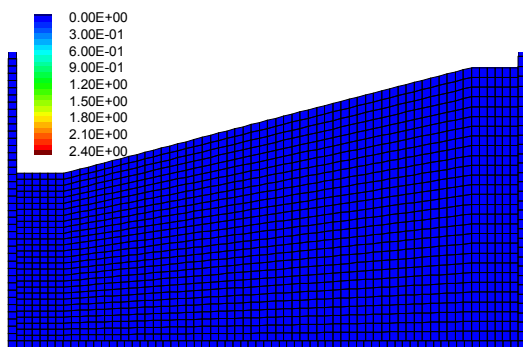


(a) 変位ベクトル図

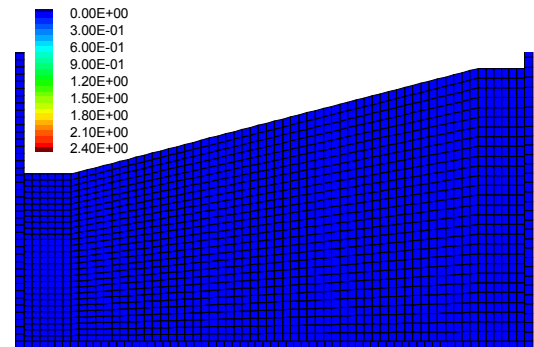


(b) 変位コンター図

図 4-109 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)

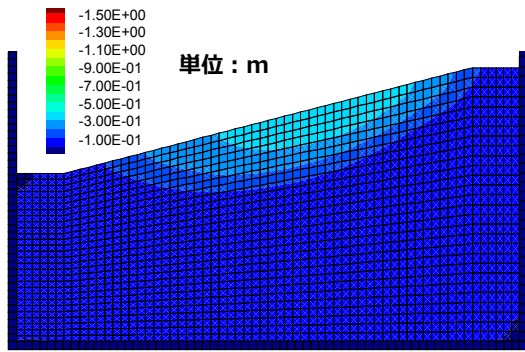


(a) せん断ひずみ増分

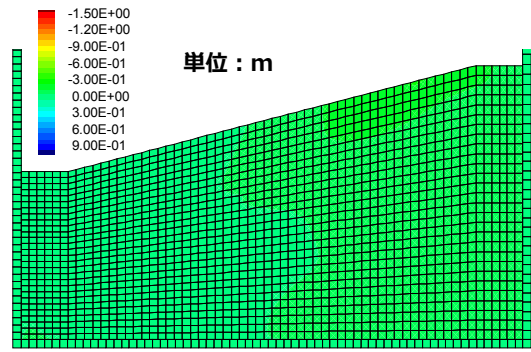


(b) ひずみの第2不変量

図 4-110 ひずみ分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)

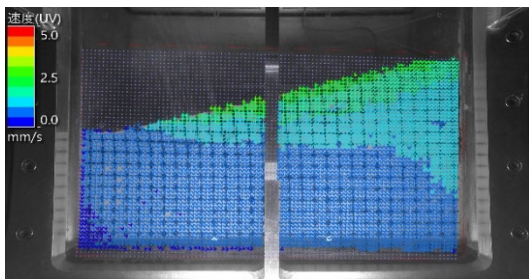


(a) 相对水平変位

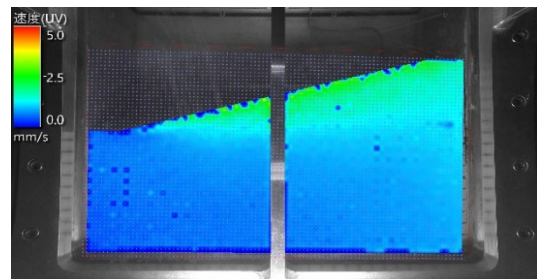


(b) 相对鉛直変位

図 4-111 変位分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)

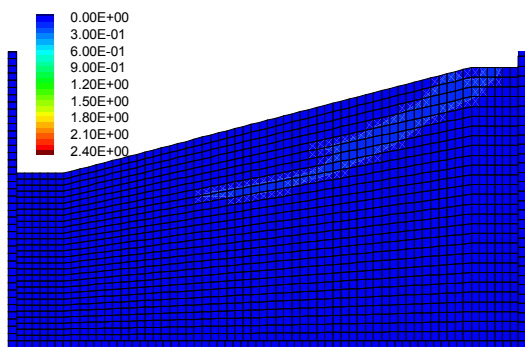


(a) 変位ベクトル図

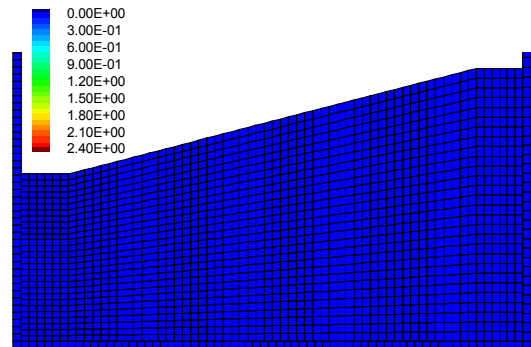


(b) 変位コンター図

図 4-112 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)

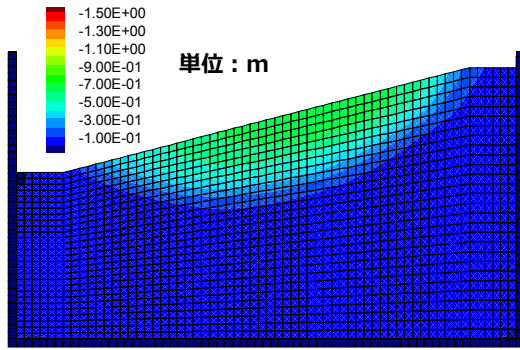


(a) せん断ひずみ増分

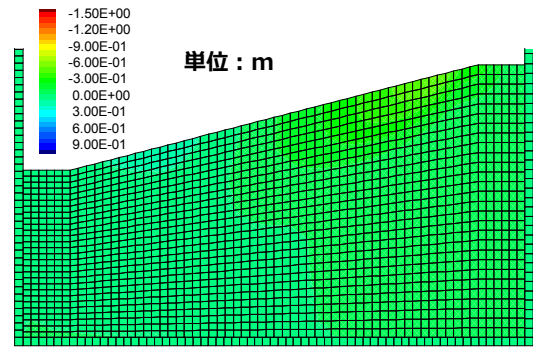


(b) ひずみの第2不変量

図 4-113 ひずみ分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)

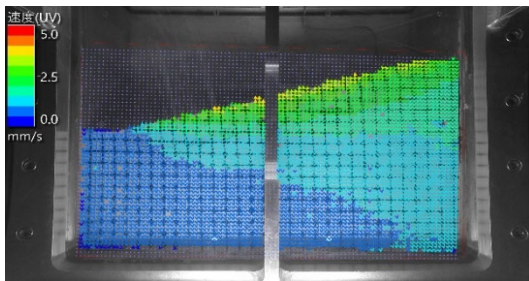


(a) 相対水平変位

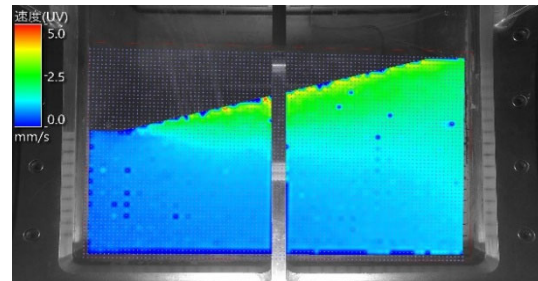


(b) 相対鉛直変位

図 4-114 変位分布 (Case3 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)

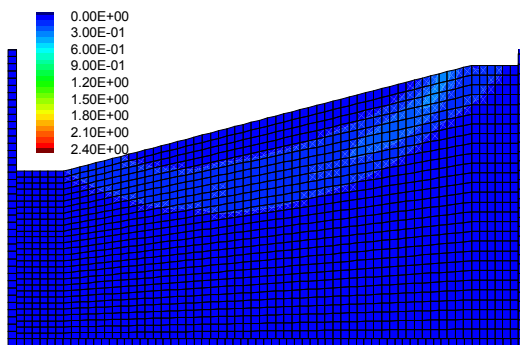


(a) 変位ベクトル図

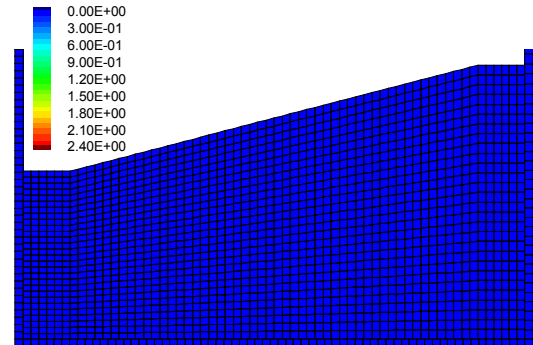


(b) 変位コンター図

図 4-115 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (1 回目)加振終了時)

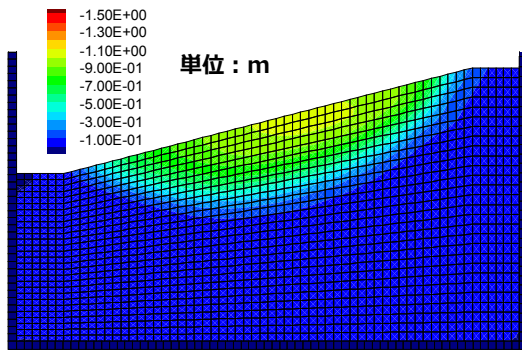


(a) せん断ひずみ増分

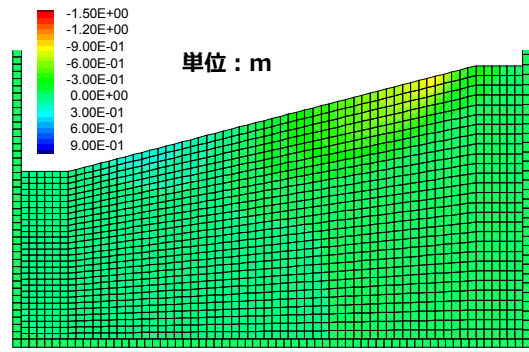


(b) ひずみの第2不変量

図 4-116 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (1 回目)加振終了時)

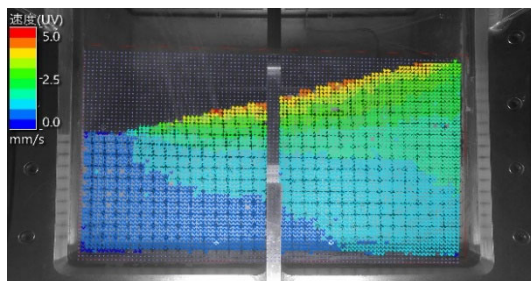


(a) 相対水平変位

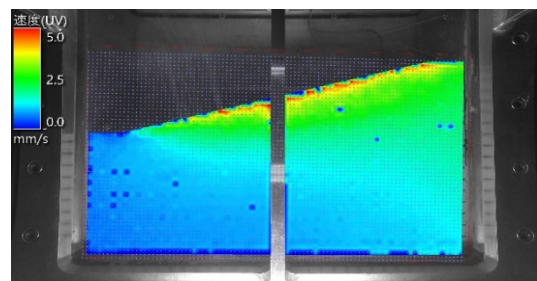


(b) 相対鉛直変位

図 4-117 変位分布 (Case3 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)

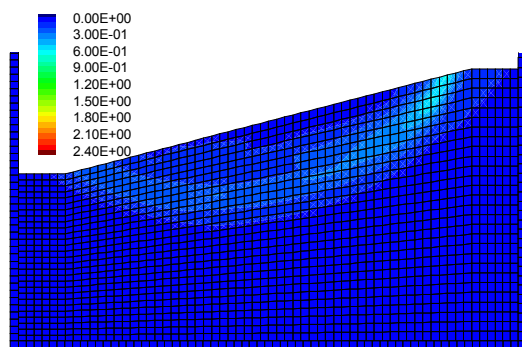


(a) 変位ベクトル図

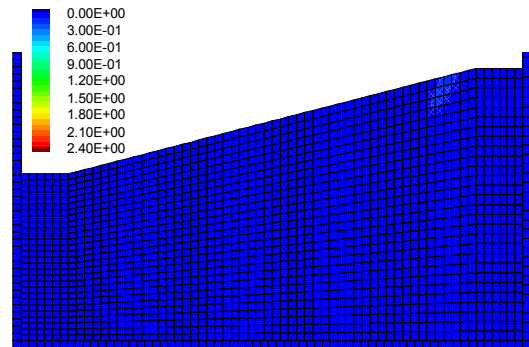


(b) 変位コンター図

図 4-118 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (2 回目)加振終了時)

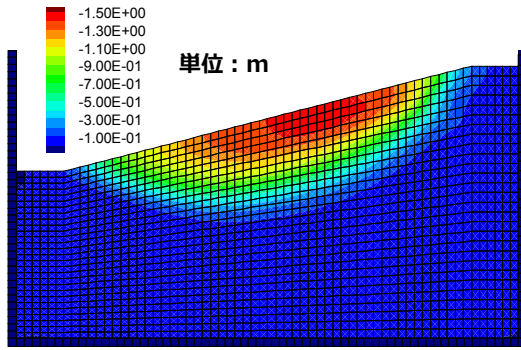


(a) せん断ひずみ増分

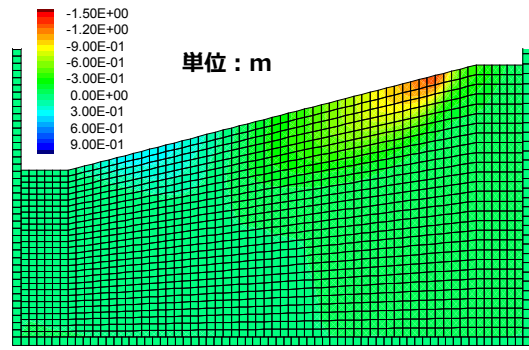


(b) ひずみの第2不変量

図 4-119 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (2 回目)加振終了時)

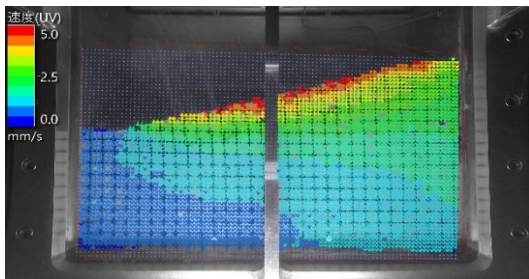


(a) 相対水平変位

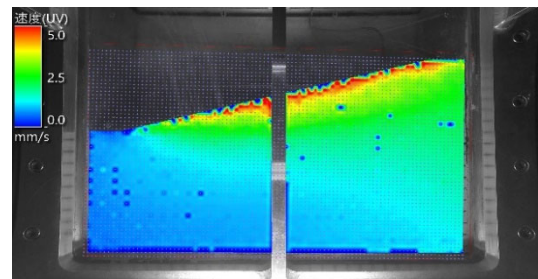


(b) 相対鉛直変位

図 4-120 変位分布 (Case3 : 300Gal (3 回目) 加振終了時)

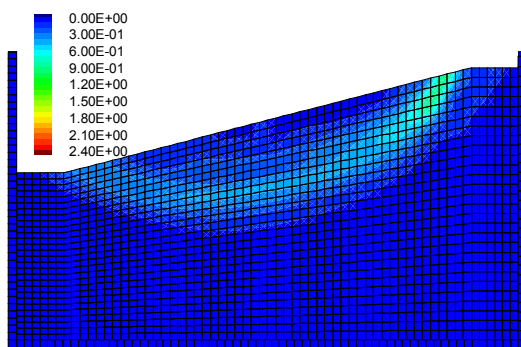


(a) 変位ベクトル図

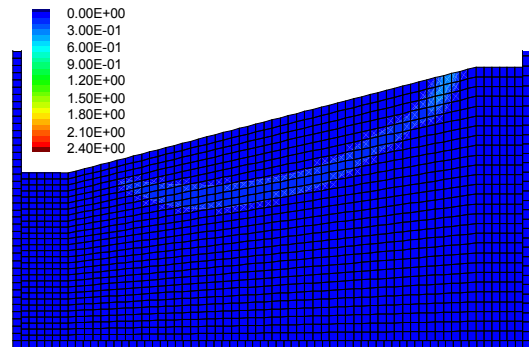


(b) 変位コンター図

図 4-121 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (3 回目)加振終了時)

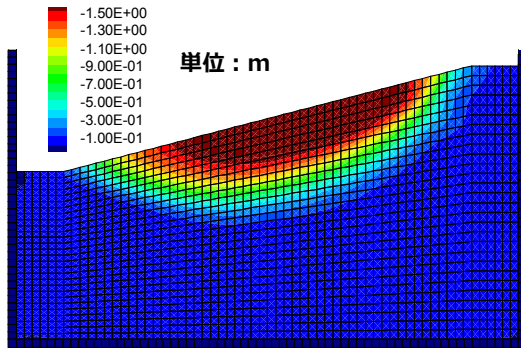


(a) せん断ひずみ増分

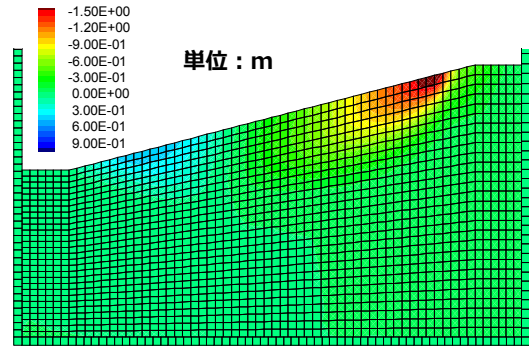


(b) ひずみの第2不変量

図 4-122 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (3 回目)加振終了時)

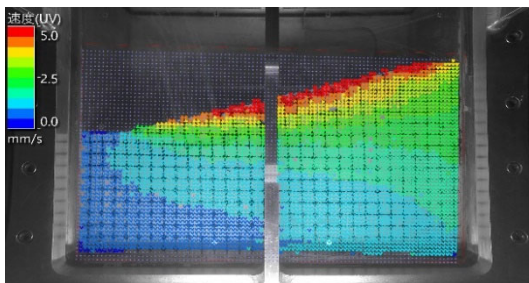


(a) 相对水平変位

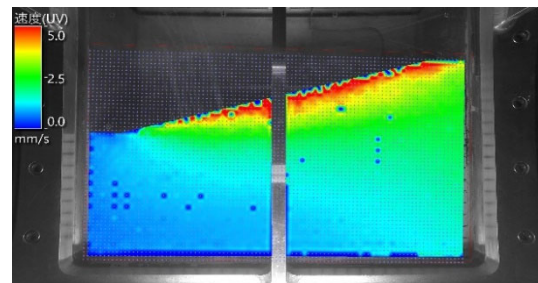


(b) 相对鉛直変位

図 4-123 変位分布 (Case3 : 300Gal (4 回目) 加振終了時)

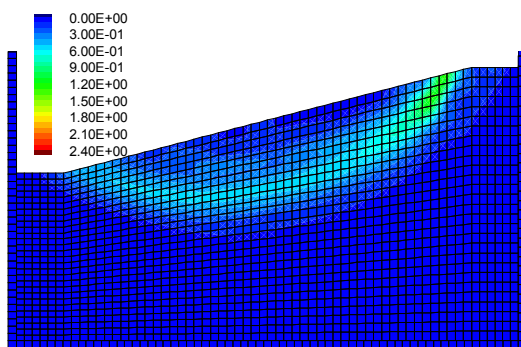


(a) 変位ベクトル図

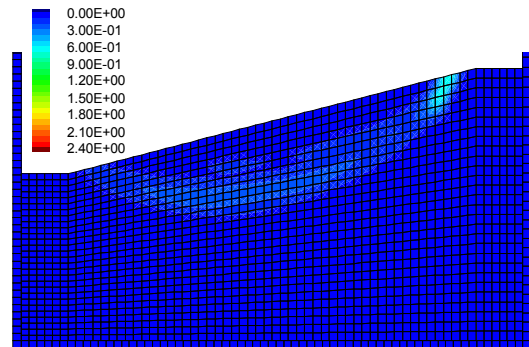


(b) 変位コンター図

図 4-124 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (4 回目)加振終了時)

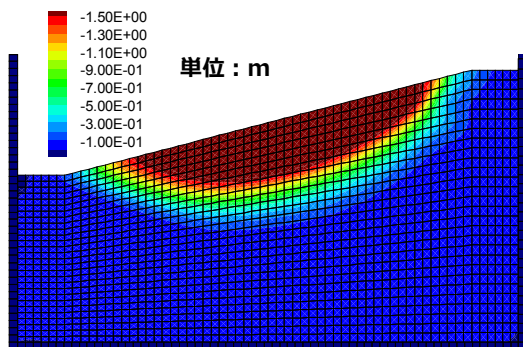


(a) せん断ひずみ増分

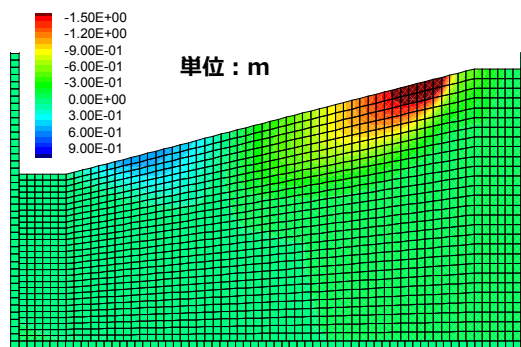


(b) ひずみの第2不変量

図 4-125 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (4 回目)加振終了時)

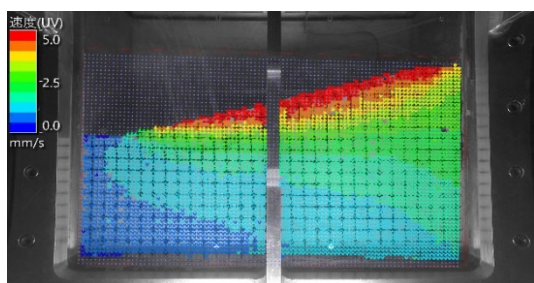


(a) 相対水平変位

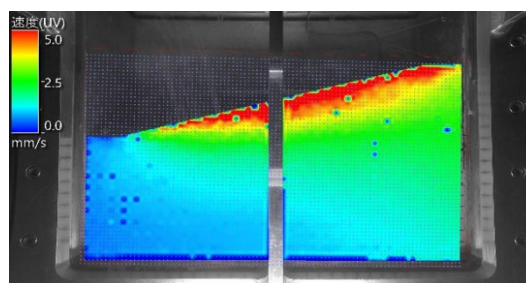


(b) 相対鉛直変位

図 4-126 変位分布 (Case3 : 300Gal (5 回目) 加振終了時)

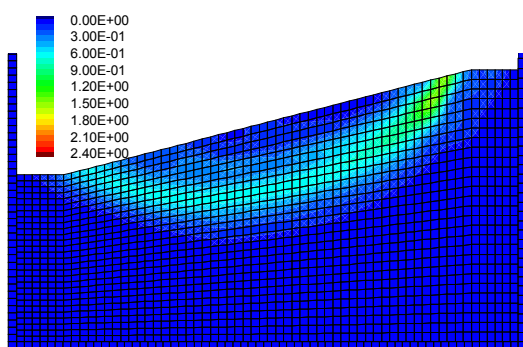


(a) 変位ベクトル図

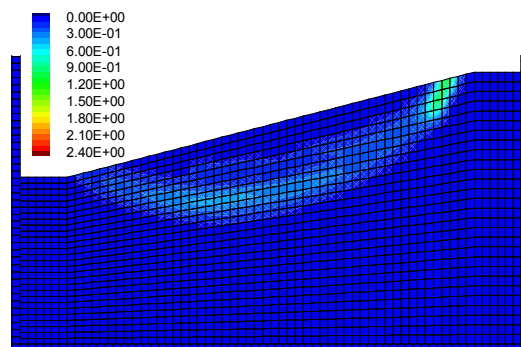


(b) 変位コンター図

図 4-127 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (5 回目) 加振終了時)

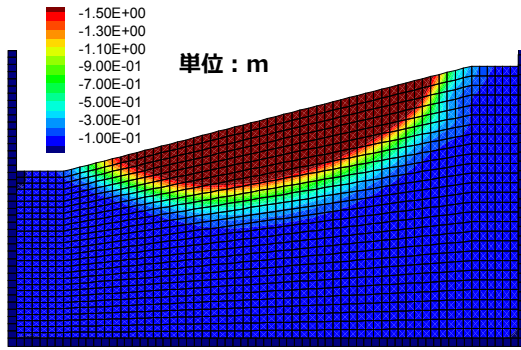


(a) せん断ひずみ増分

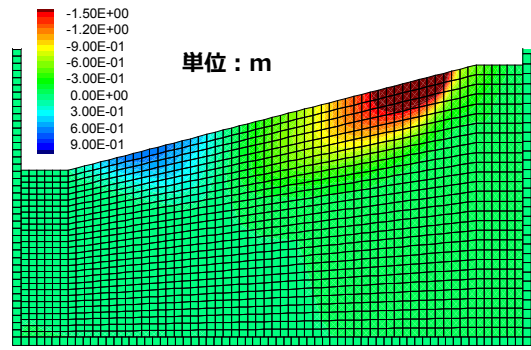


(b) ひずみの第2不変量

図 4-128 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (5 回目) 加振終了時)

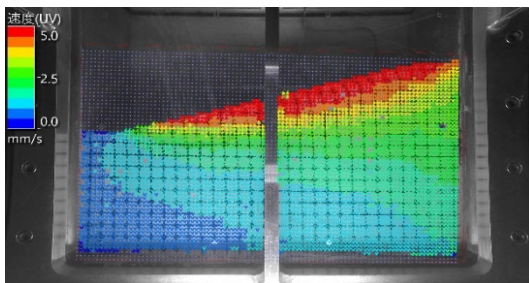


(a) 相対水平変位

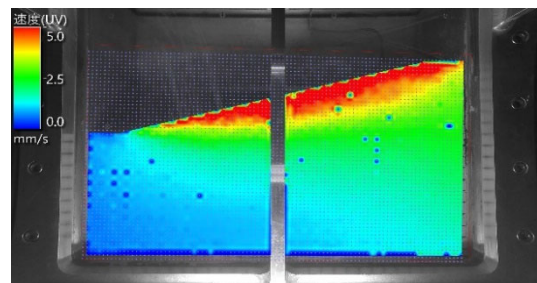


(b) 相対鉛直変位

図 4-129 変位分布 (Case3 : 300Gal (6 回目) 加振終了時)

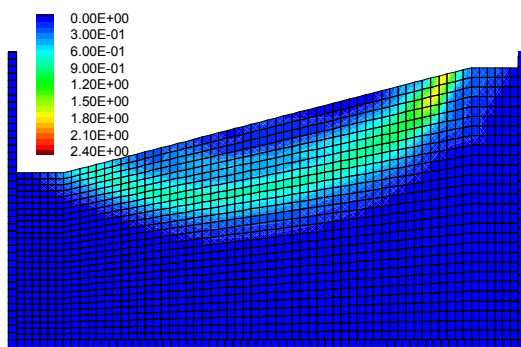


(a) 変位ベクトル図

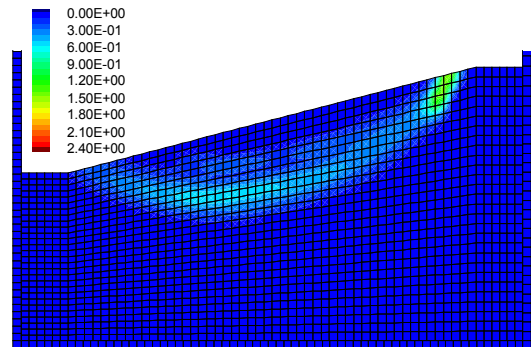


(b) 変位コンター図

図 4-130 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (6 回目) 加振終了時)

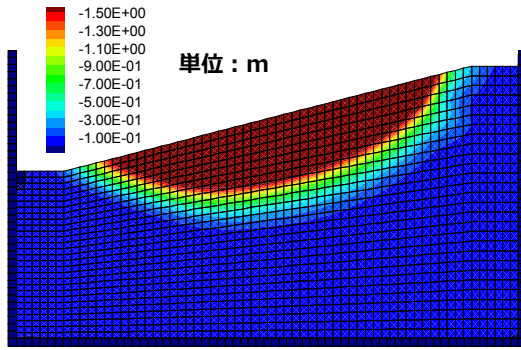


(a) せん断ひずみ増分

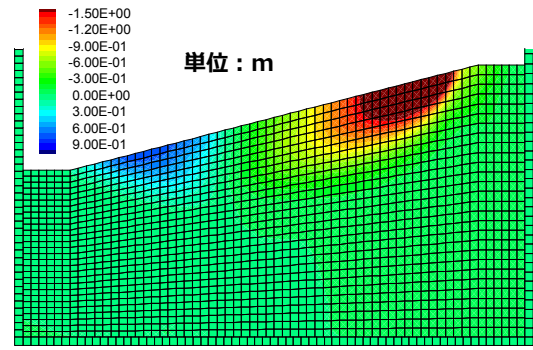


(b) ひずみの第2不変量

図 4-131 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (6 回目) 加振終了時)

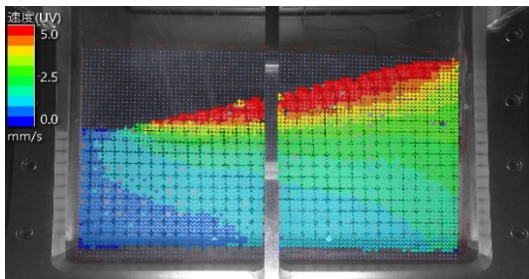


(a) 相対水平変位

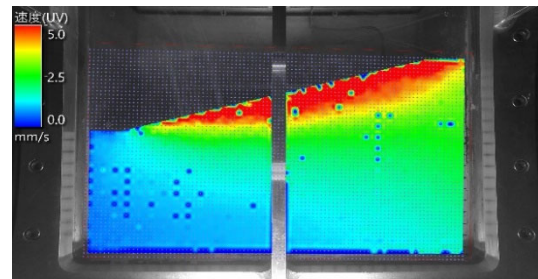


(b) 相対鉛直変位

図 4-132 変位分布 (Case3 : 300Gal (7 回目) 加振終了時)

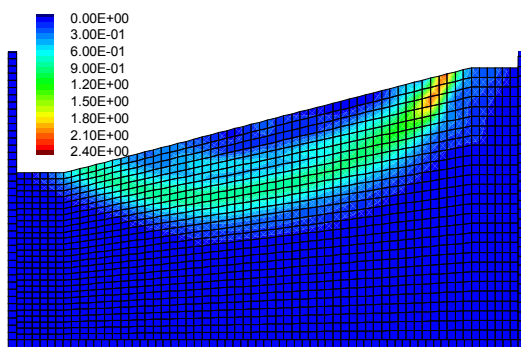


(a) 変位ベクトル図

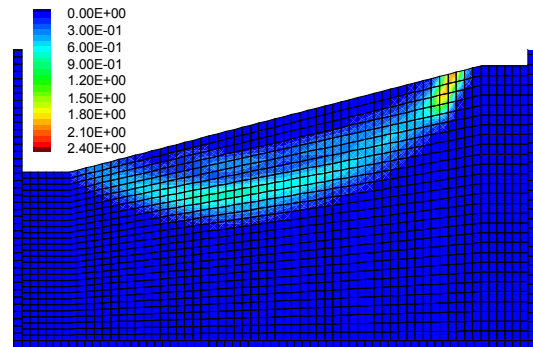


(b) 変位コンター図

図 4-133 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (7 回目)加振終了時)

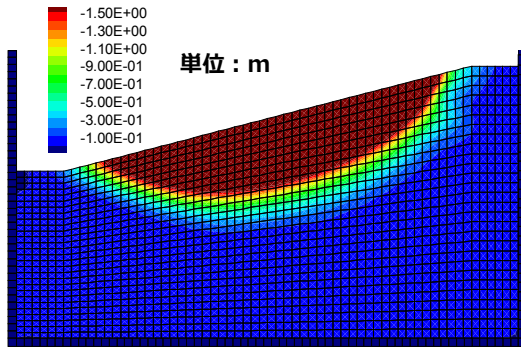


(a) せん断ひずみ増分

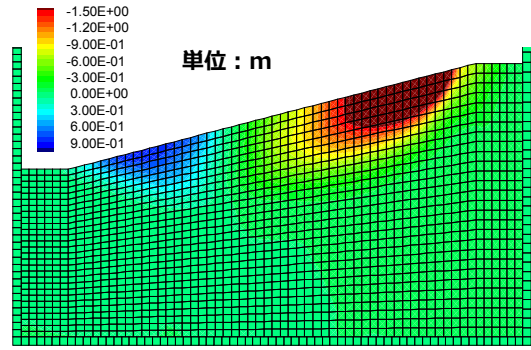


(b) ひずみの第2不変量

図 4-134 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (7 回目)加振終了時)

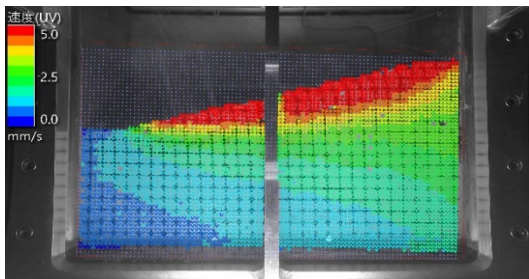


(a) 相対水平変位

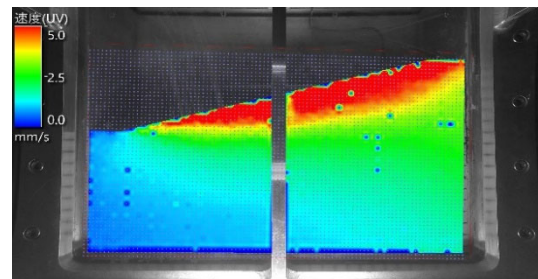


(b) 相対鉛直変位

図 4-135 変位分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)

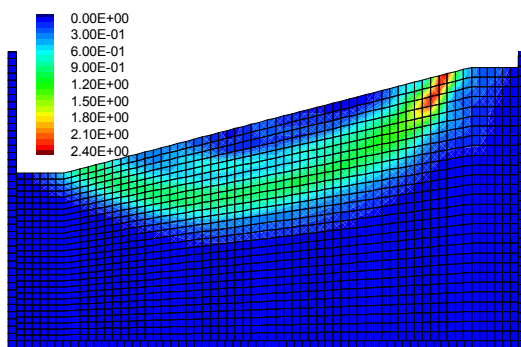


(a) 変位ベクトル図

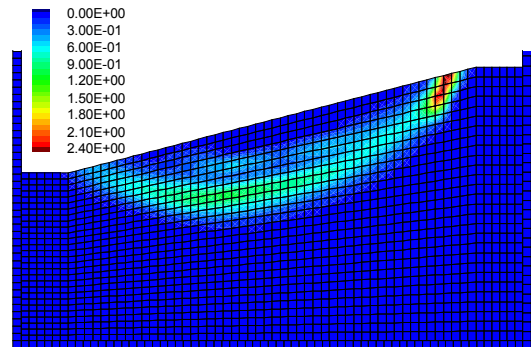


(b) 変位コンター図

図 4-136 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)



(a) せん断ひずみ増分



(b) ひずみの第2不変量

図 4-137 ひずみ分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)

次に、双曲線モデル（HD モデル）の結果を示す。表 4-4 に解析パラメータを示す。解析パラメータにおける基準ひずみ γ_r は、以下の方法で求めた。まず図 4-138 に示すようにせん断強度 τ_f と拘束圧の関係を強度定数（ c 、 ϕ ）より求める。さらに図 4-139 に示すようにせん断弾性係数 G と拘束圧の関係をヤング率から求める。最後に τ_f を G で除すことで基準ひずみと拘束圧の関係を（図 4-140）を求め、その平均的値の 0.0025 を採用した。

Case1 の解析モデル図 4-141 に示す。基盤入力加速度を図 4-142 に示す。50 Gal、250 Gal 加振時における法肩の応答加速度(解析)を基盤入力波形とともに図 4-143 に示す。

50Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-144 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-145 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-146 に示す。

100Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-147 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-148 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-149 に示す。

150Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-150 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-151 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-152 に示す。

200Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-153 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-154 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-155 に示す。

250Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-156 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-157 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-158 に示す。

表 4-4 地盤の解析パラメータ (HD モデル)

地盤	物性値
密度 ρ (kg/m ³)	1744
弾性係数 E (kN/m ²)	$E = 16100 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{0.66}$
ポアソン比(-)	0.499
基準ひずみ γ_{ref}	0.0025

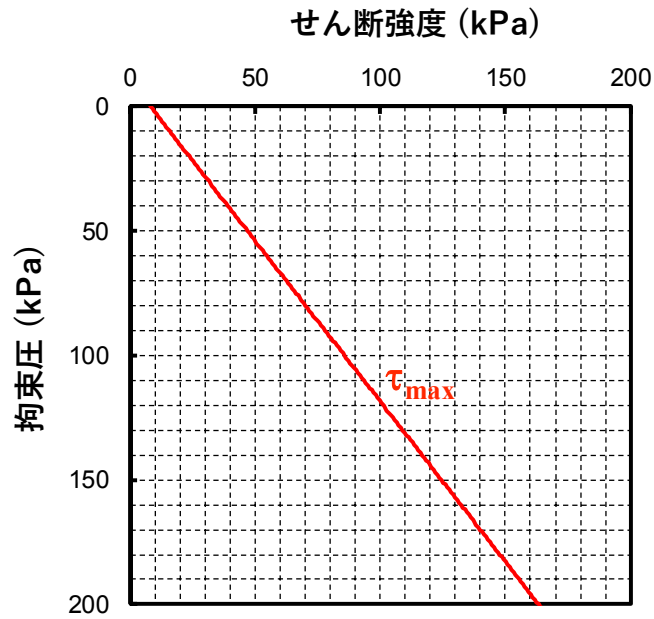


図 4-138 せん断強度と拘束圧の関係

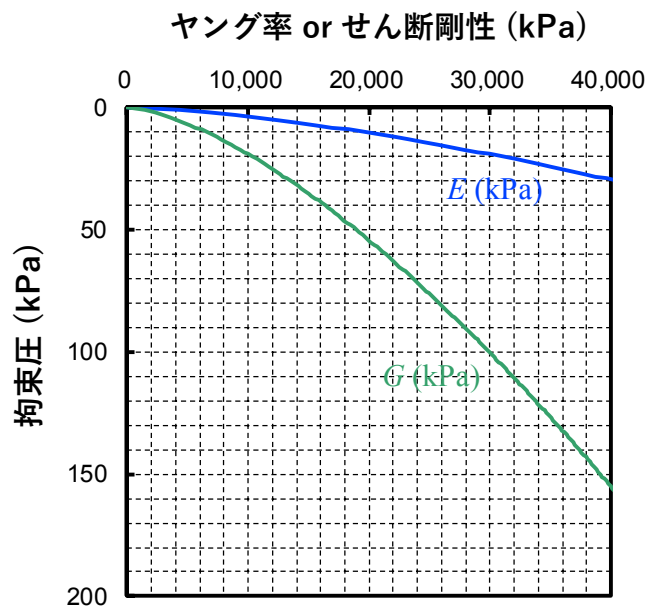


図 4-139 せん断弾性係数と拘束圧の関係

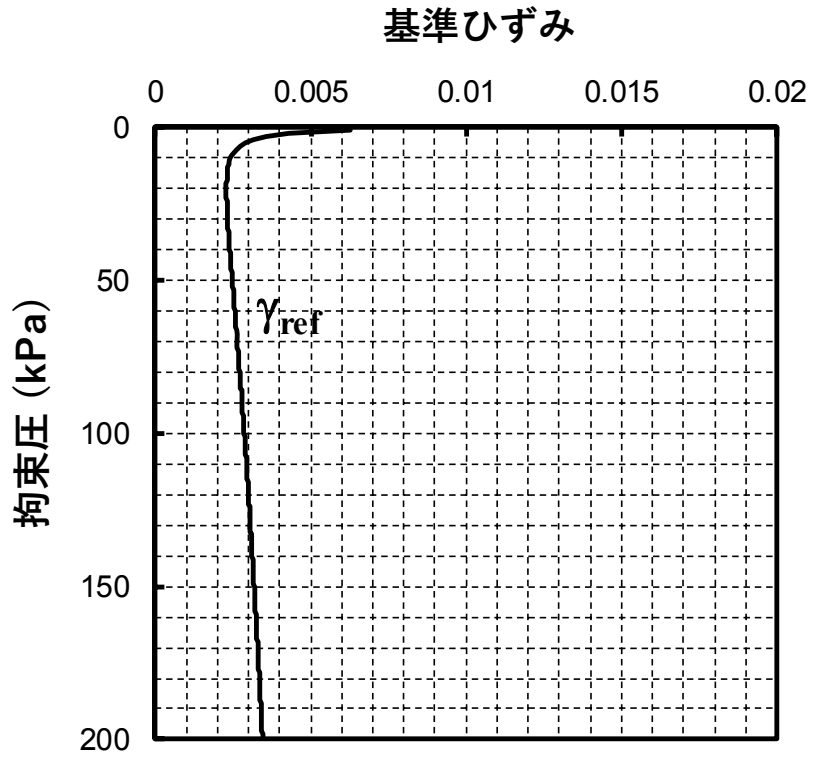


図 4-140 基準ひずみと拘束圧の関係

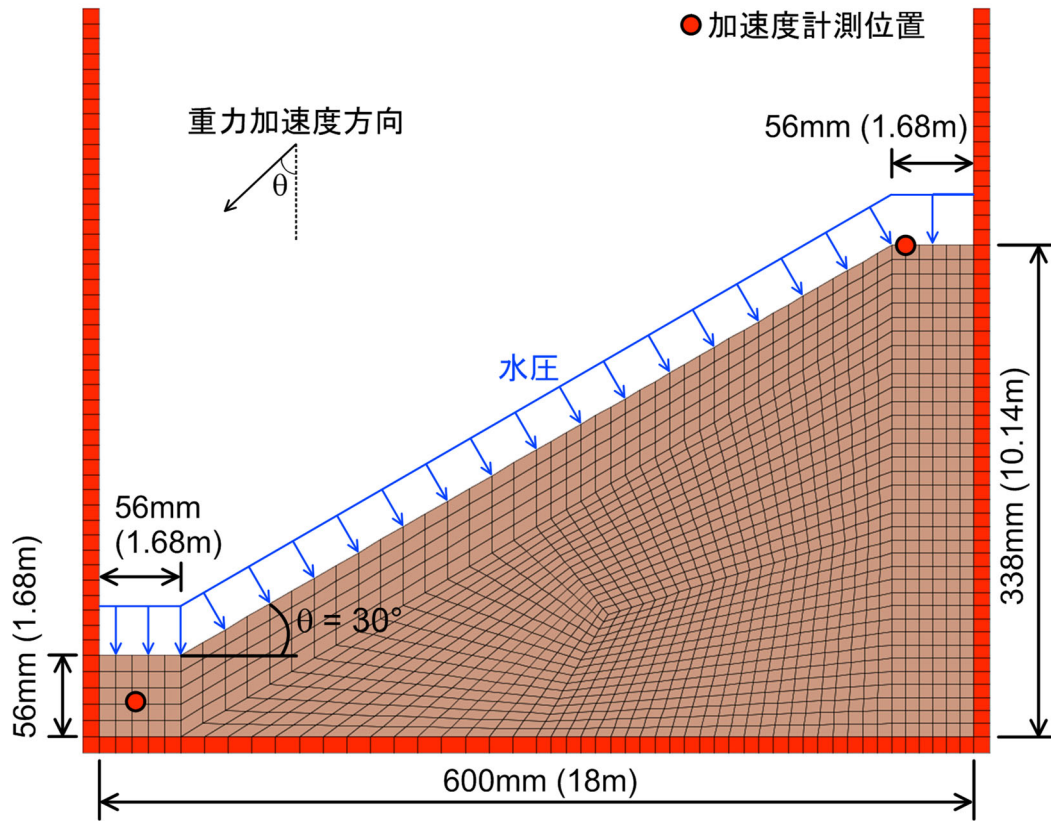


図 4-141 解析モデル図 (Case1)

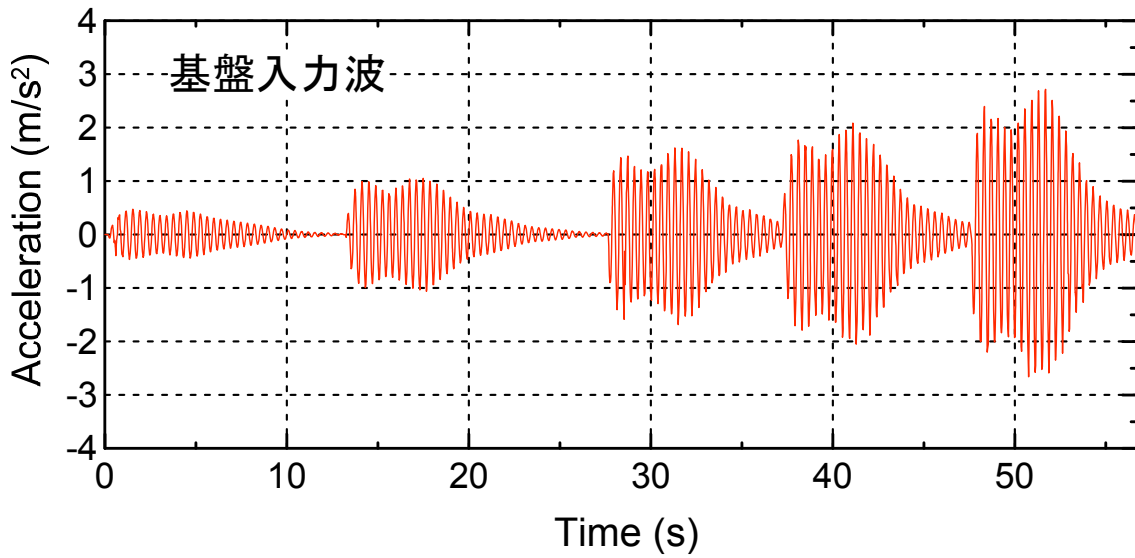


図 4-142 基盤入力加速度 (Case1)

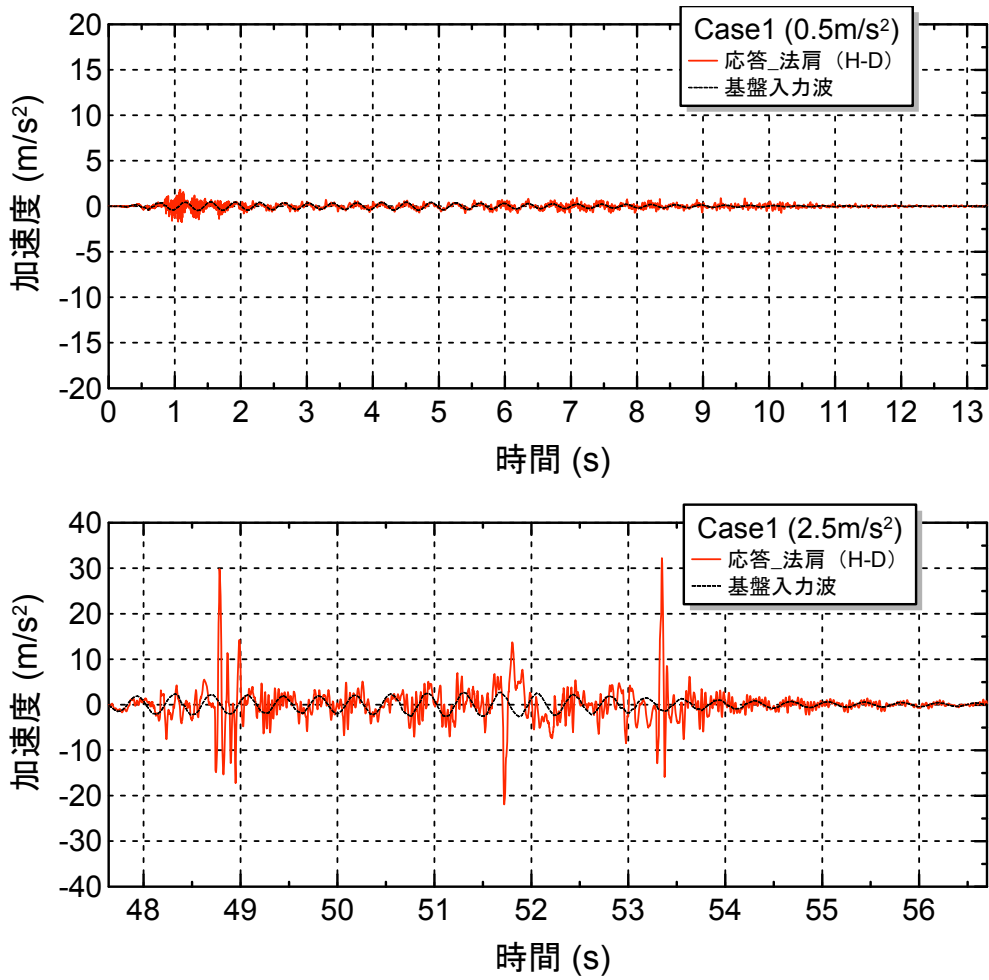
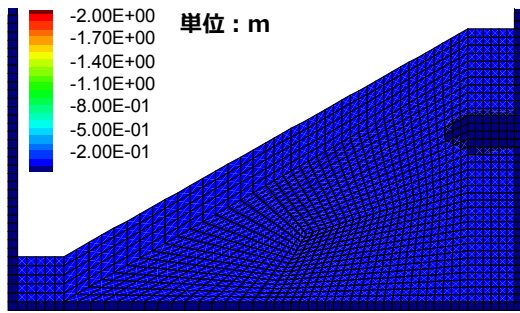
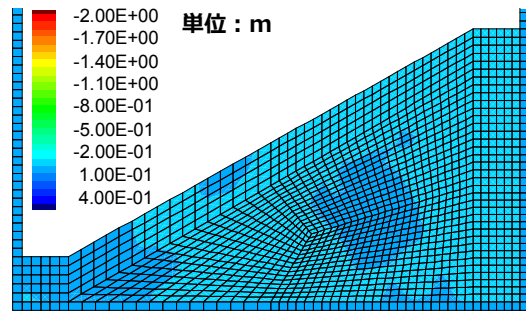


図 4-143 法肩の応答加速度の解析結果 (Case1)

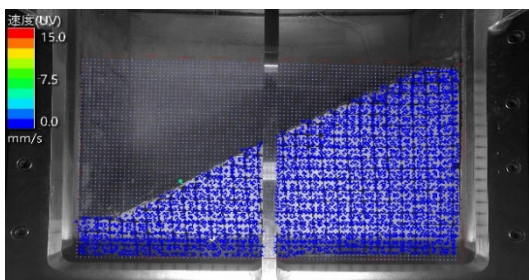


(a) 相对水平変位

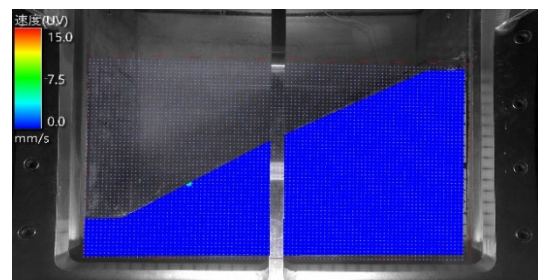


(b) 相对鉛直変位

図 4-144 変位分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)

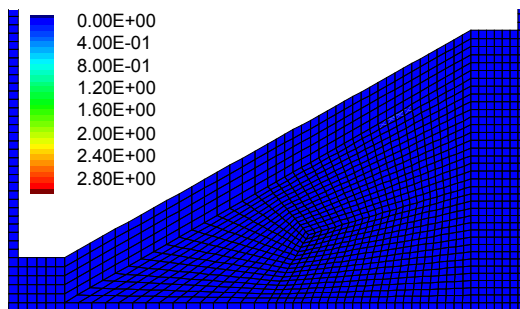


(a) 変位ベクトル図

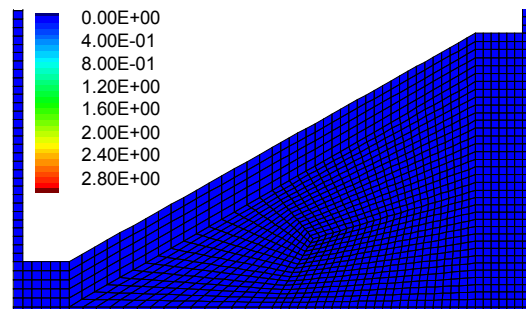


(b) 変位コンター図

図 4-145 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)

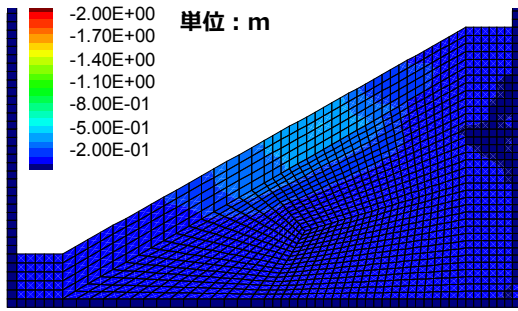


(a) せん断ひずみ増分

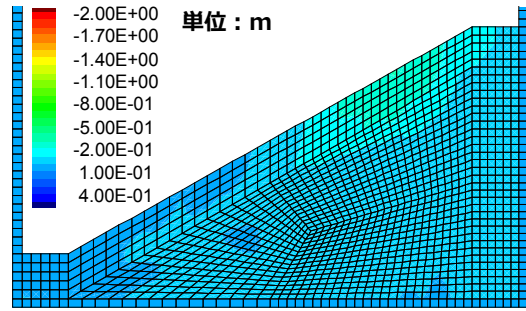


(b) ひずみの第2不変量

図 4-146 ひずみ分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)

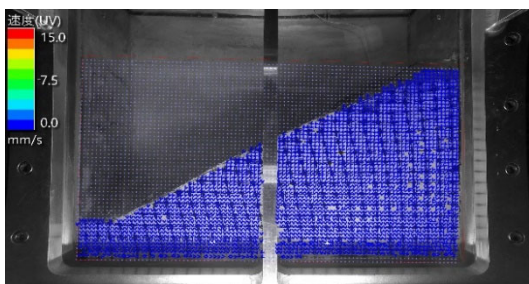


(a) 相对水平変位

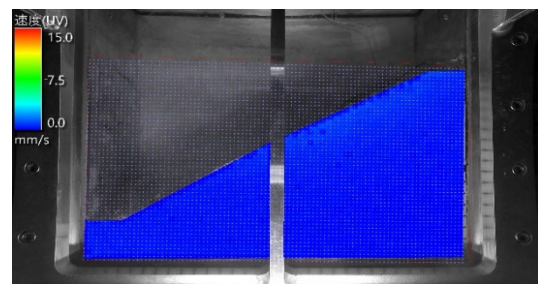


(b) 相对鉛直変位

図 4-147 変位分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)

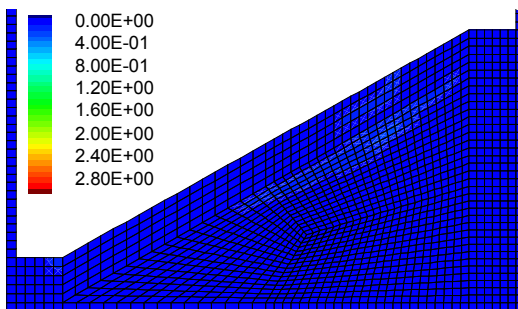


(a) 変位ベクトル図

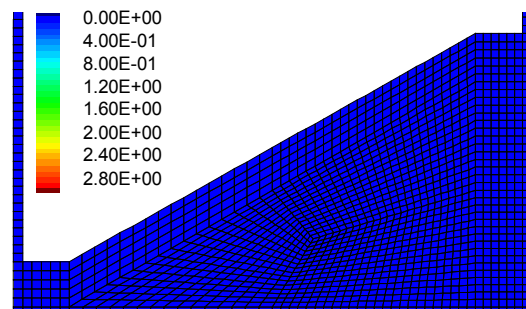


(b) 変位コンター図

図 4-148 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)

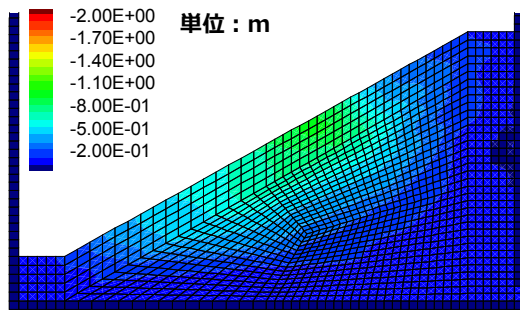


(a) せん断ひずみ増分

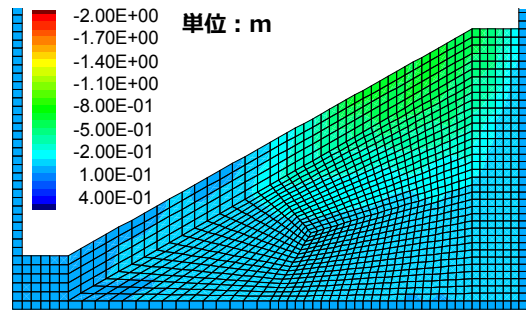


(b) ひずみの第2不変量

図 4-149 ひずみ分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)

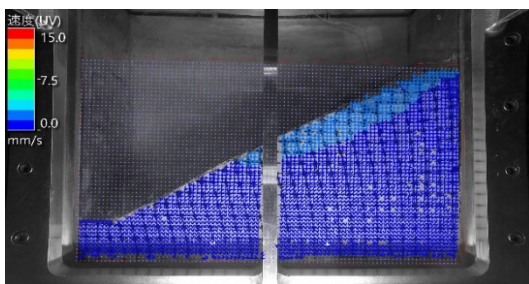


(a) 相对水平変位

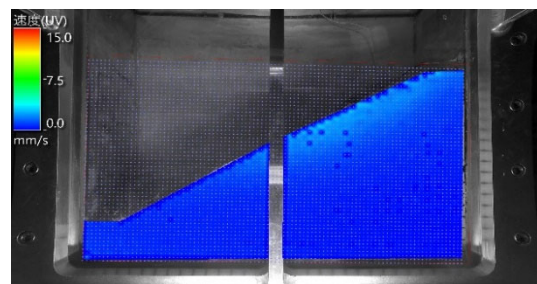


(b) 相对鉛直変位

図 4-150 変位分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)

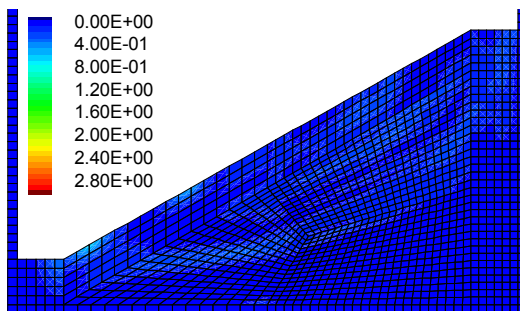


(a) 変位ベクトル図

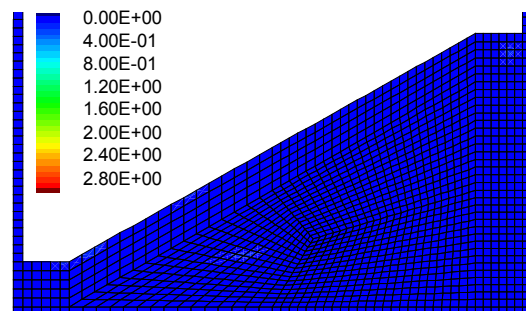


(b) 変位コンター図

図 4-151 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)

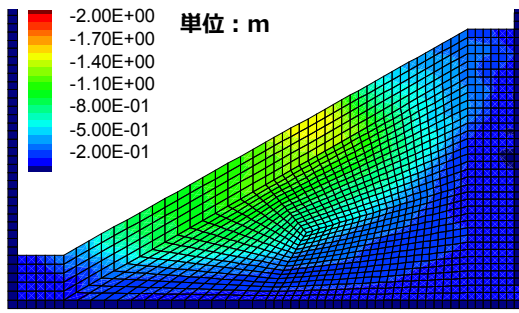


(a) せん断ひずみ増分

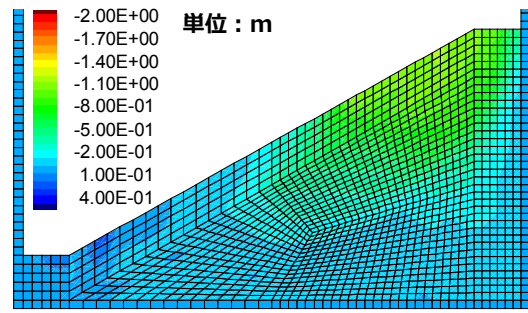


(b) ひずみの第2不変量

図 4-152 ひずみ分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)

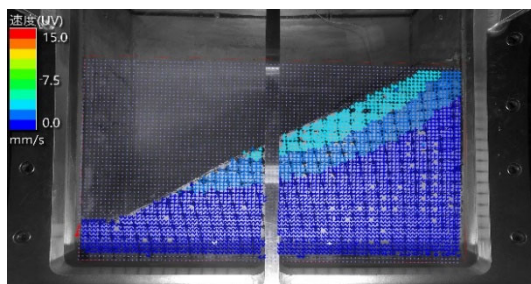


(a) 相对水平変位

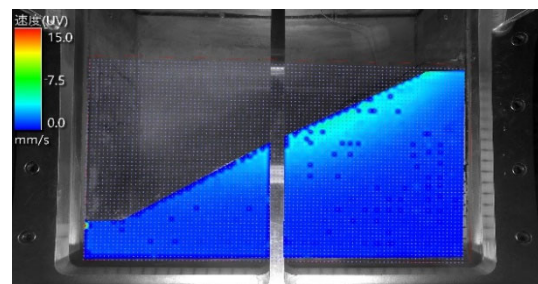


(b) 相对鉛直変位

図 4-153 変位分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)

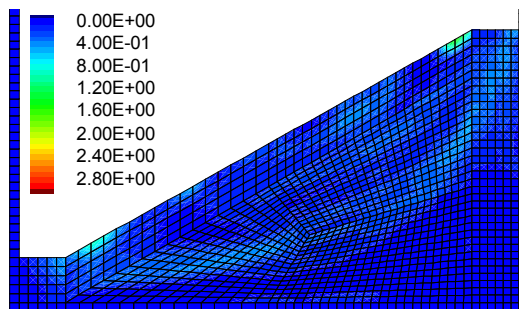


(a) 変位ベクトル図

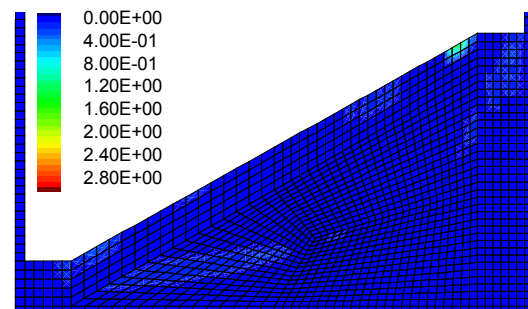


(b) 変位コンター図

図 4-154 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)

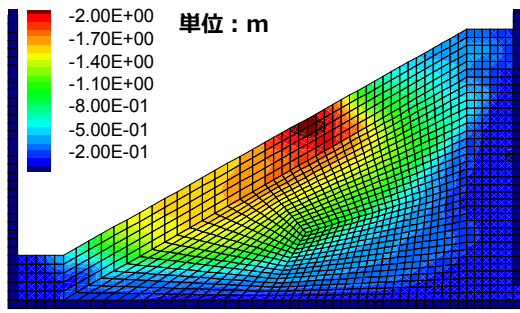


(a) せん断ひずみ増分

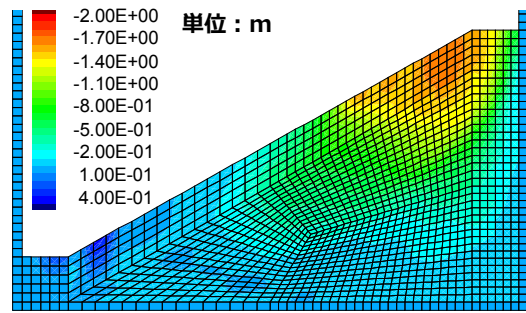


(b) ひずみの第2不変量

図 4-155 ひずみ分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)

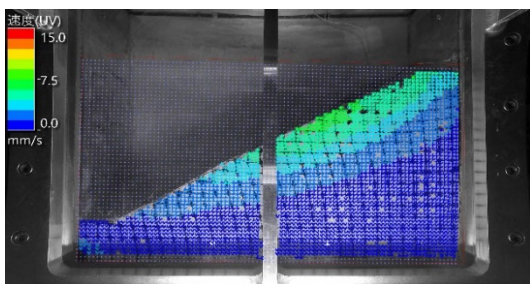


(a) 相对水平変位

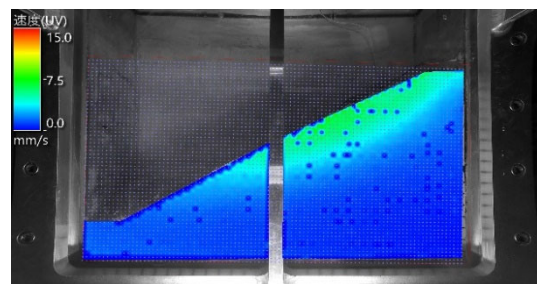


(b) 相对鉛直変位

図 4-156 変位分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)

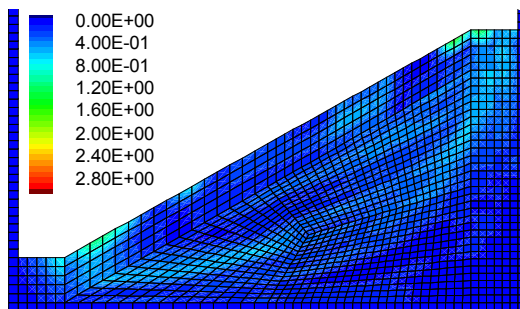


(a) 変位ベクトル図

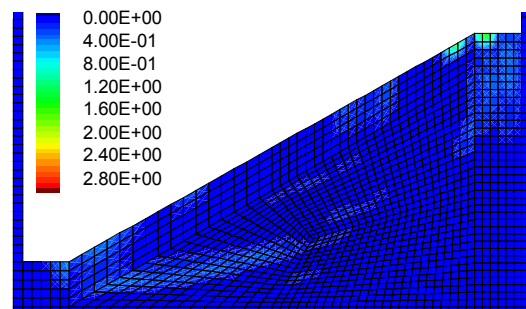


(b) 変位コンター図

図 4-157 PIV 解析による変位分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)



(a) せん断ひずみ増分



(b) ひずみの第2不変量

図 4-158 ひずみ分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)

Case2 の解析モデルを図 4-159 に示す。基盤入力加速度を図 4-160 に示す。50 Gal、250 Gal 加振時における法肩の応答加速度（解析）を法肩の応答加速度（実験）および基盤入力波形とともに図 4-161 に示す。

50Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-162 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-163 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-164 に示す。

100Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-165 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-166 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-167 に示す。

150Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-168 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-169 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-170 に示す。

200Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-171 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-172 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-173 に示す。

250Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-174 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-175 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-176 に示す。

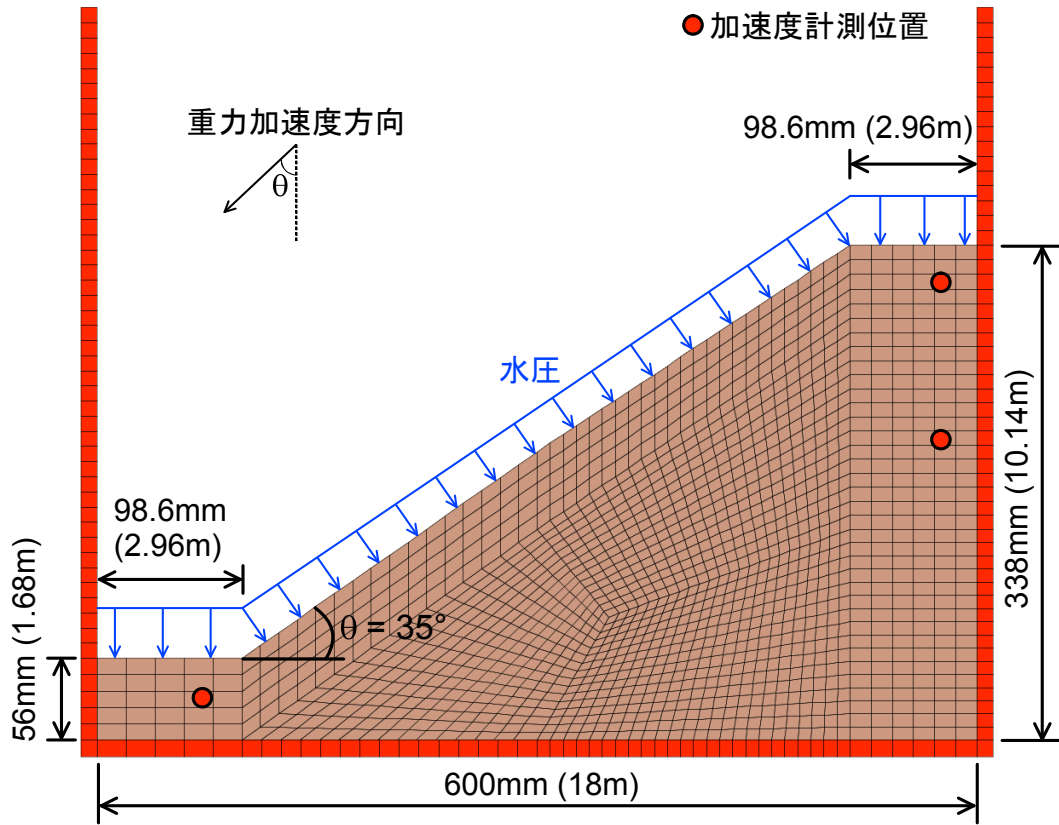


図 4-159 解析モデル図 (Case2)

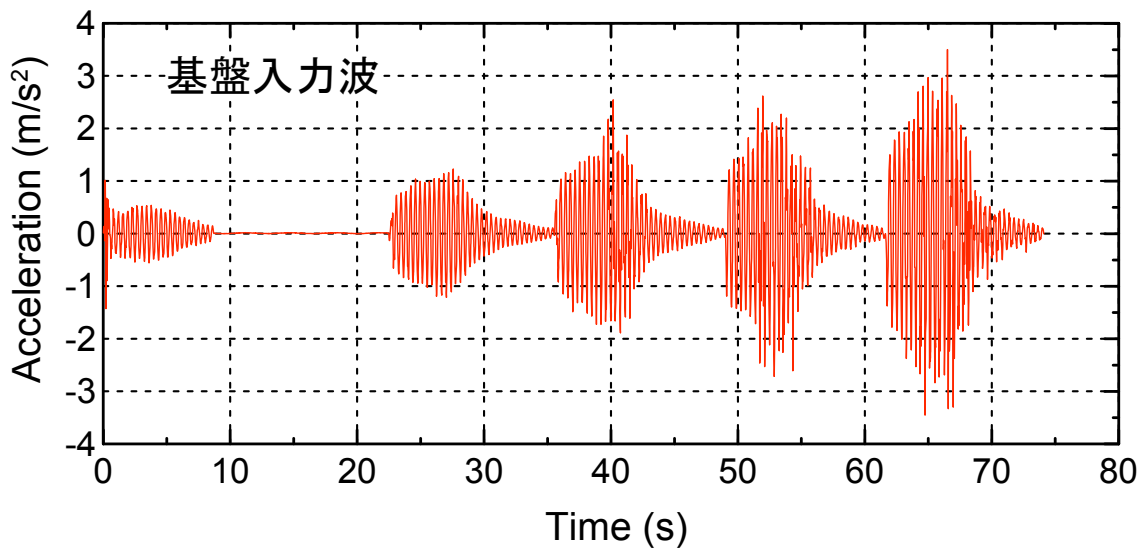


図 4-160 基盤入力加速度 (Case2)

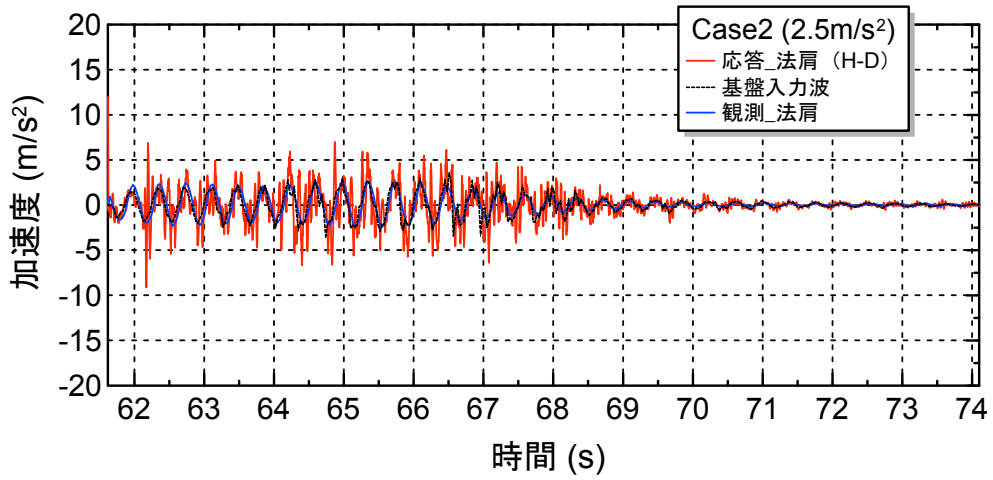
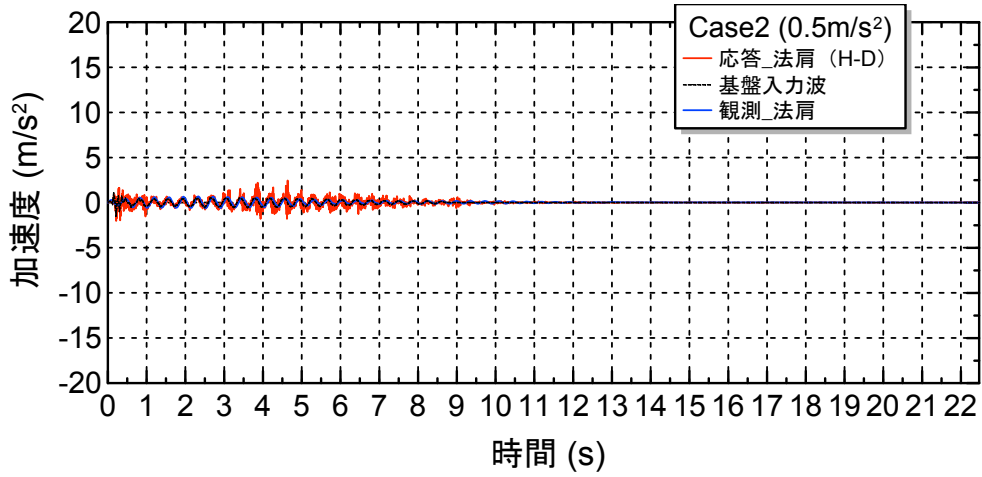
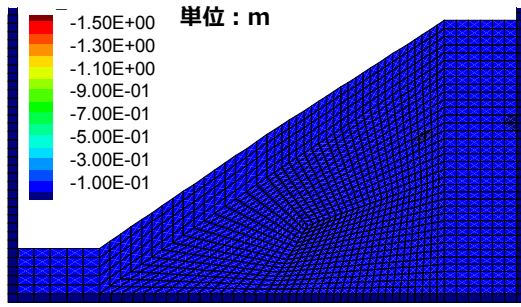
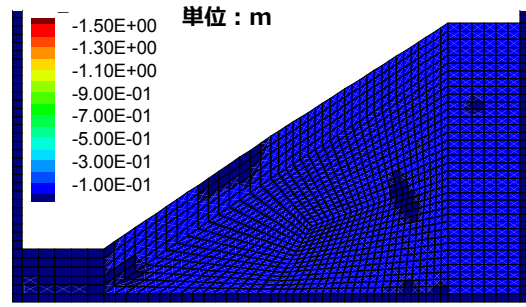


図 4-161 法肩の応答加速度の解析結果 (Case2)

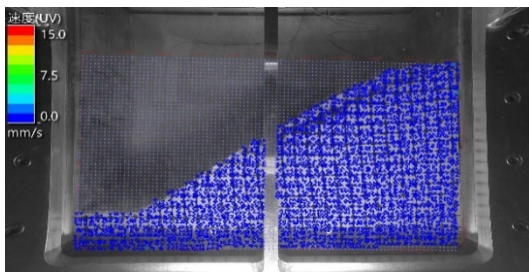


(a) 相对水平変位

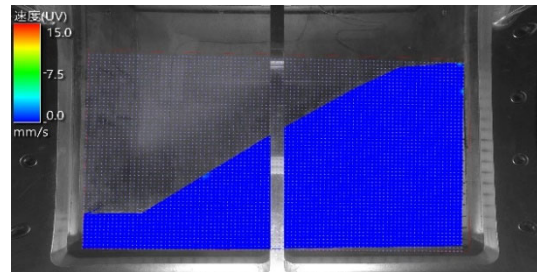


(b) 相对鉛直変位

図 4-162 変位分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)

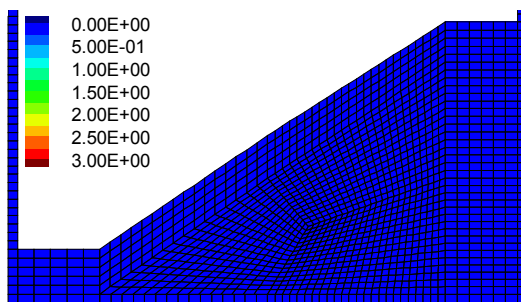


(a) 変位ベクトル図

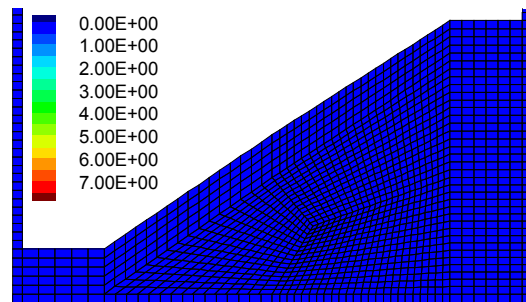


(b) 変位コンター図

図 4-163 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)

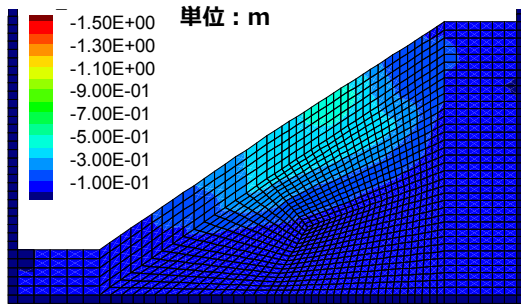


(a) せん断ひずみ増分

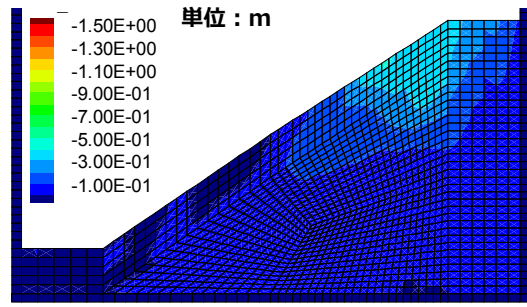


(b) ひずみの第2不変量

図 4-164 ひずみ分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)

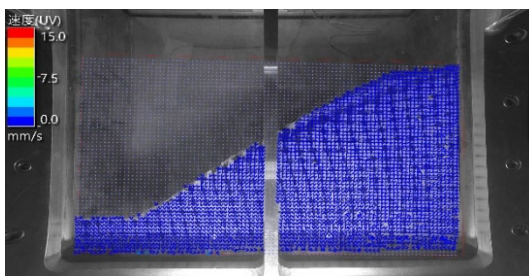


(a) 相对水平変位

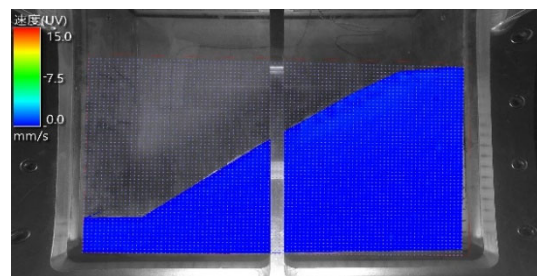


(b) 相对鉛直変位

図 4-165 変位分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)

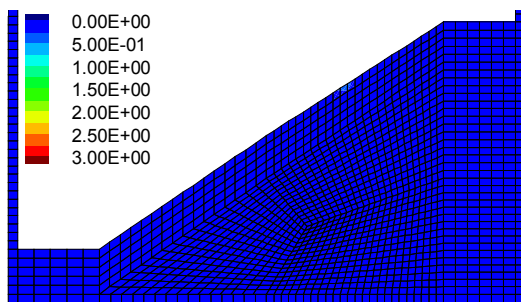


(a) 変位ベクトル図

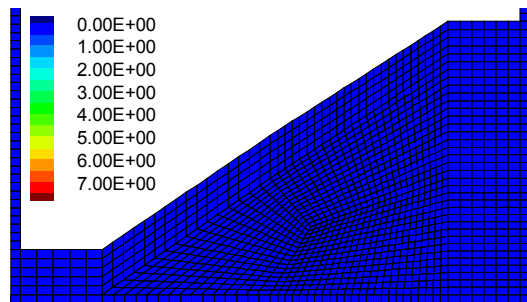


(b) 変位コンター図

図 4-166 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)

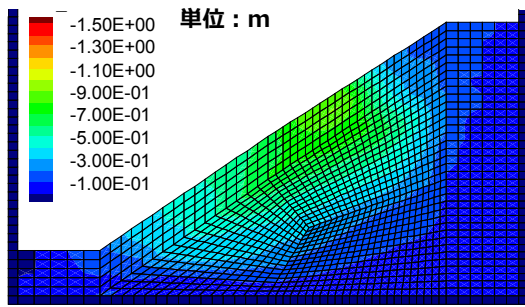


(a) せん断ひずみ増分

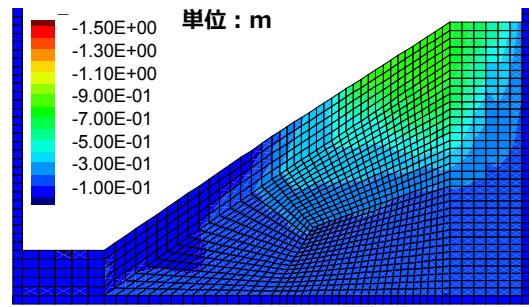


(b) ひずみの第2不変量

図 4-167 ひずみ分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)

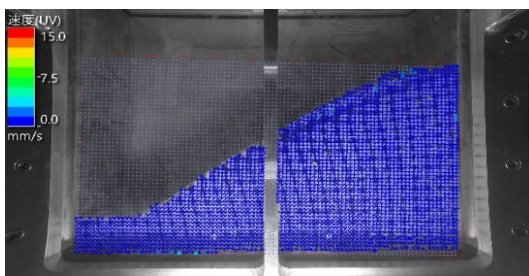


(a) 相对水平変位

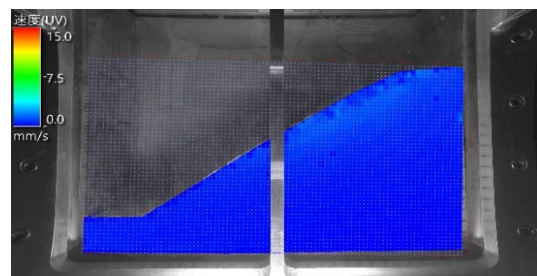


(b) 相对鉛直変位

図 4-168 変位分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)

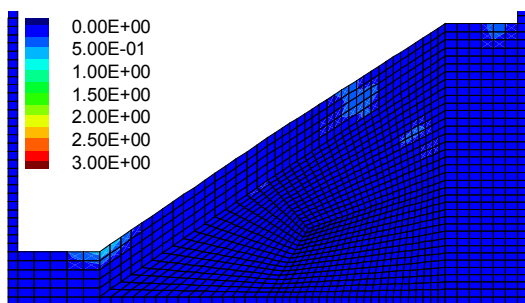


(a) 変位ベクトル図

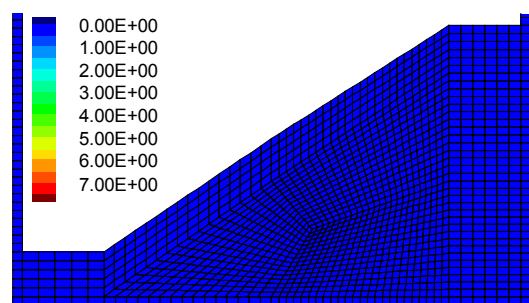


(b) 変位コンター図

図 4-169 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)

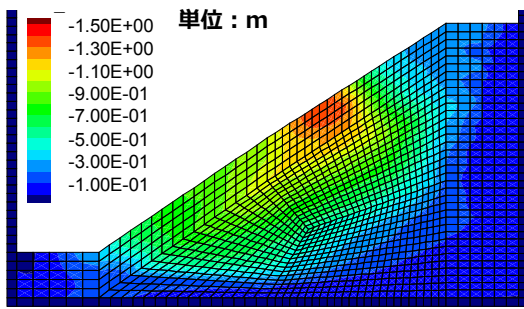


(a) せん断ひずみ増分

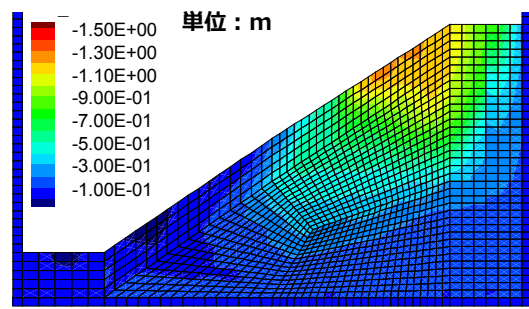


(b) ひずみの第2不変量

図 4-170 ひずみ分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)

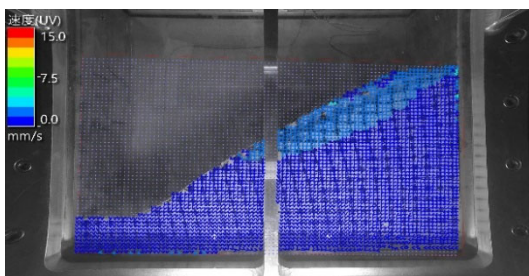


(a) 相对水平変位

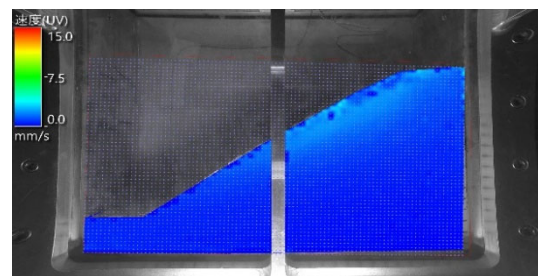


(b) 相对鉛直変位

図 4-171 変位分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)

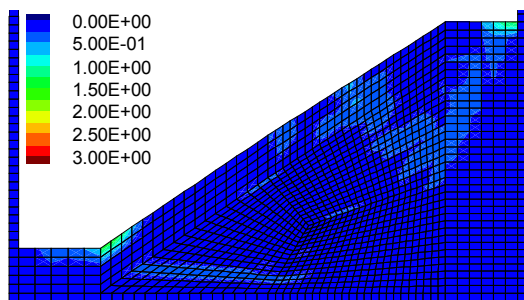


(a) 変位ベクトル図

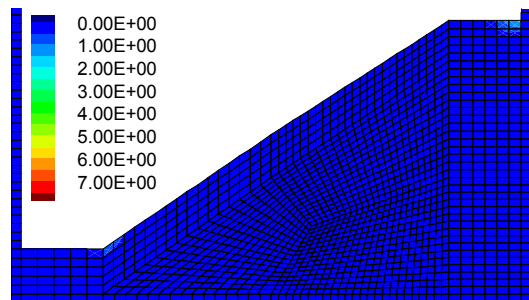


(b) 変位コンター図

図 4-172 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)

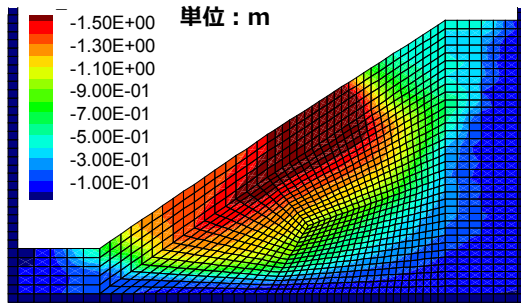


(a) せん断ひずみ増分

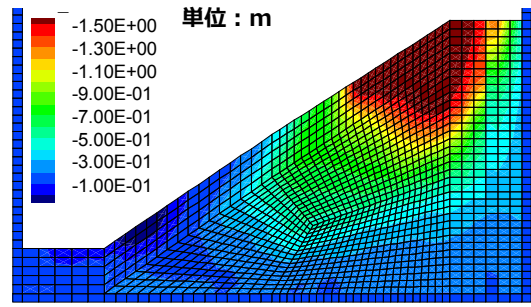


(b) ひずみの第2不変量

図 4-173 ひずみ分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)

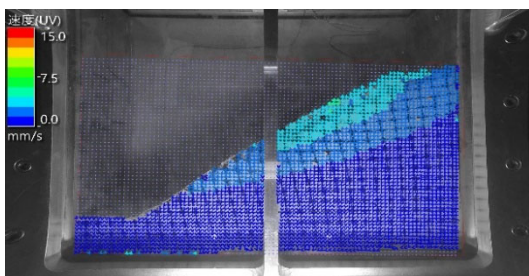


(a) 相对水平変位

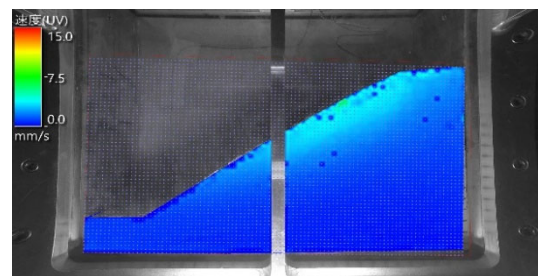


(b) 相对鉛直変位

図 4-174 変位分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)

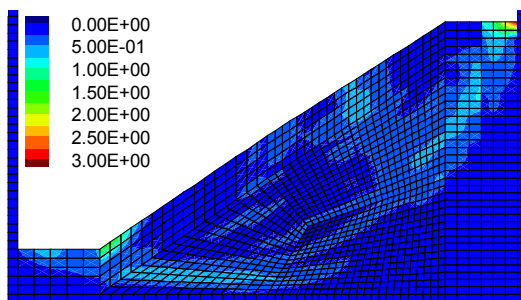


(a) 変位ベクトル図

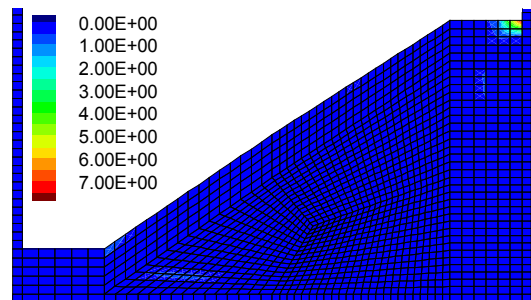


(b) 変位コンター図

図 4-175 PIV 解析による変位分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)



(a) せん断ひずみ増分



(b) ひずみの第2不変量

図 4-176 ひずみ分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)

Case3 の解析モデルを図 4-177 に示す。基盤入力加速度を図 4-178 に示す。50 Gal、250 Gal、300 Gal (1 回目)、300 Gal (2 回目) 加振時における法肩の応答加速度 (解析) を法肩の応答加速度 (実験) および基盤入力波形とともに図 4-179 に示す。

50Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-180 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-181 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-182 に示す。

100Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-183 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-184 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-185 に示す。

150Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-186 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-187 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-188 に示す。

200Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-189 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-190 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-191 に示す。

250Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-192 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-193 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-194 に示す。

300Gal (1 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-195 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-196 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-197 に示す。

300Gal (2 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-198 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-199 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-200 に示す。

300Gal (3 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-201 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-202 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-203 に示す。

300Gal (4 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-204 に示す。

比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-205 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-206 に示す。

300Gal (5 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-207 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-208 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-209 に示す。

300Gal (6 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-210 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-211 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-212 に示す。

300Gal (7 回目) 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-213 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-214 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-215 に示す。

325Gal 加振終了時の相対水平変位と相対鉛直変位分布を図 4-216 に示す。比較のために PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-217 に示す。せん断ひずみ増分およびひずみの第 2 不変量のコンターを図 4-218 に示す。

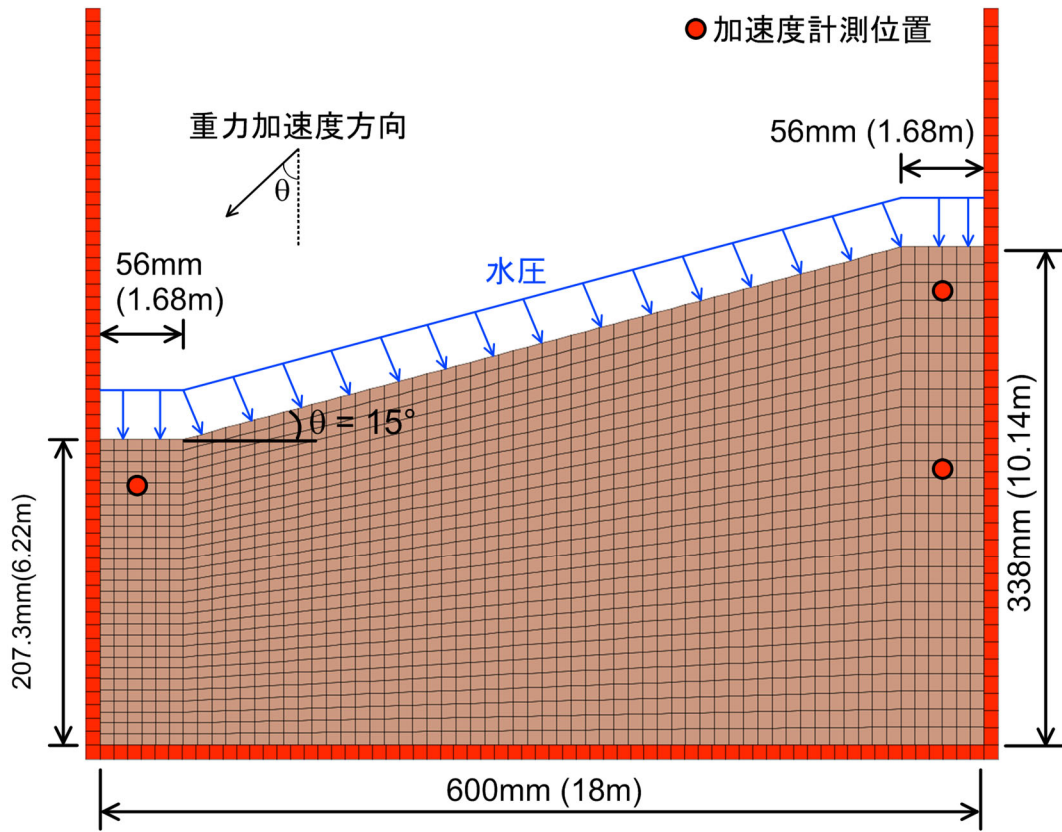


図 4-177 解析モデル図 (Case3)

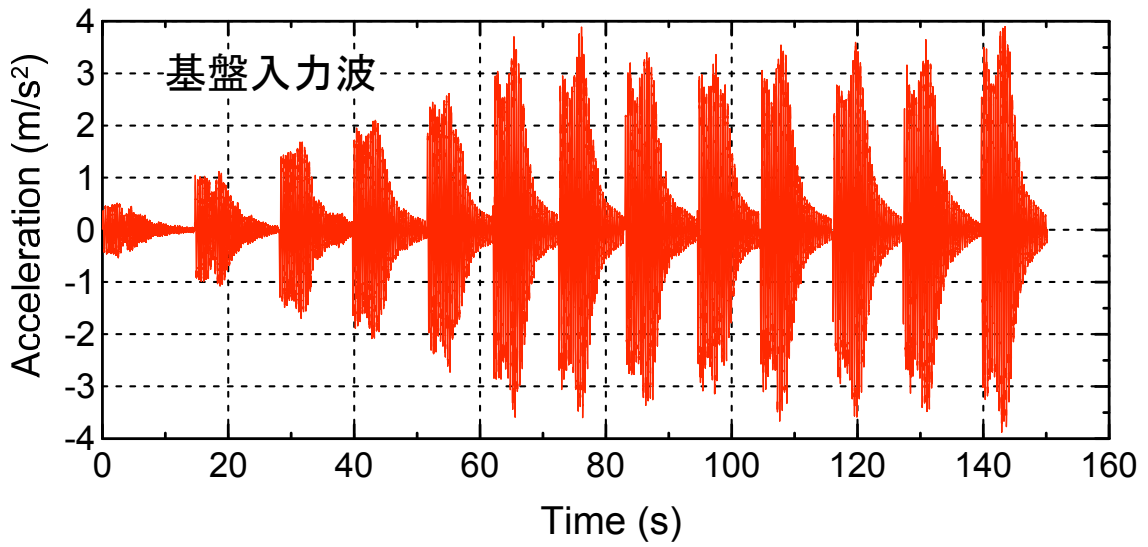


図 4-178 基盤入力加速度 (Case3)

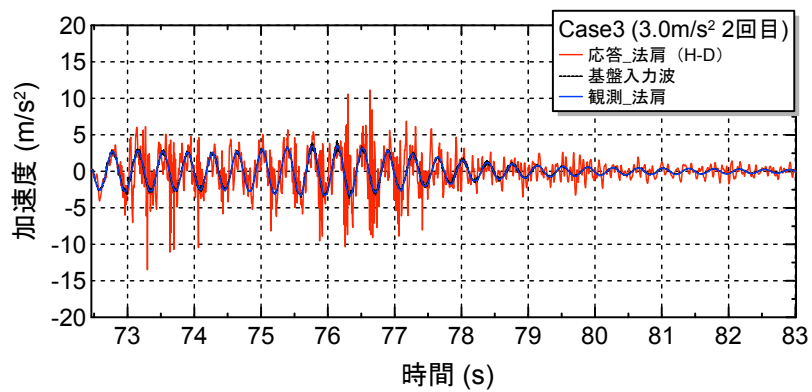
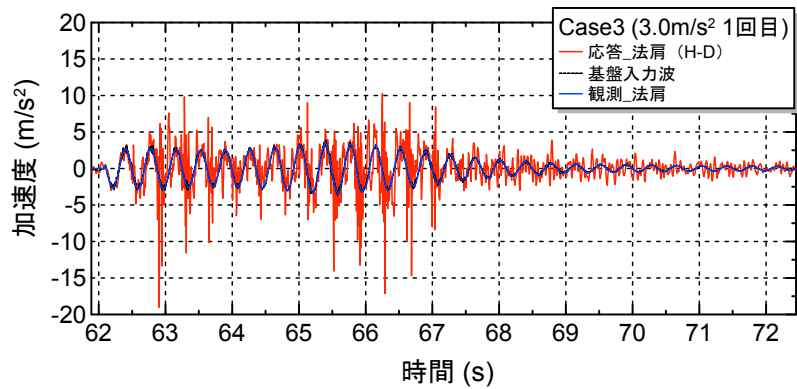
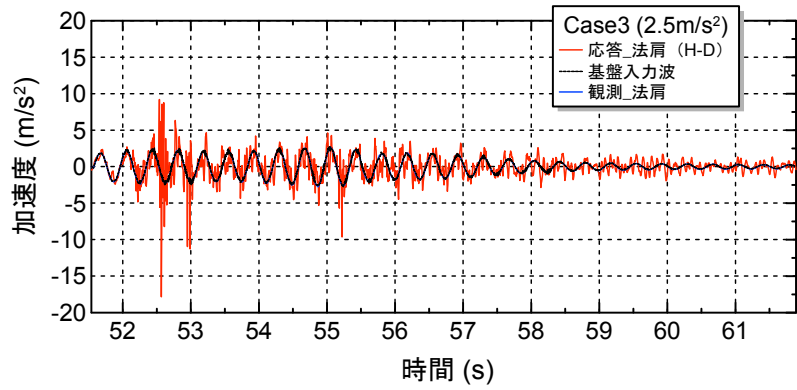
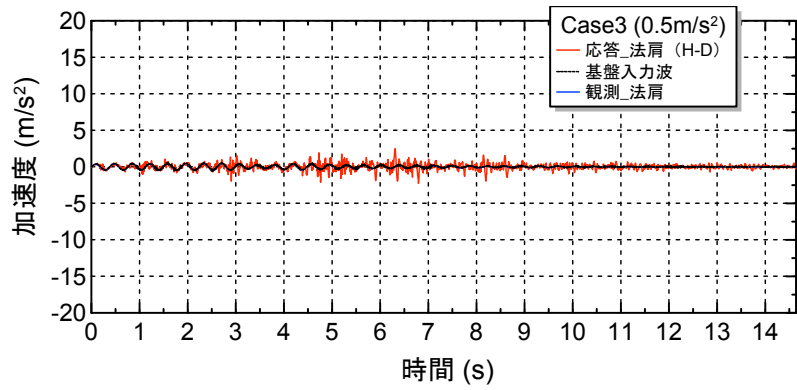
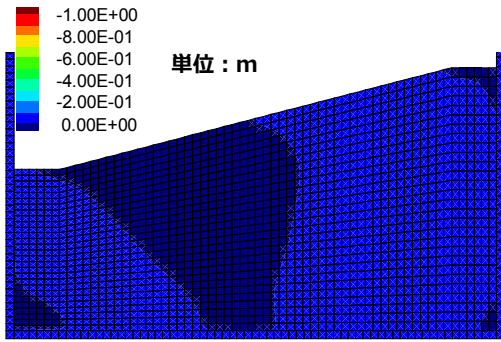
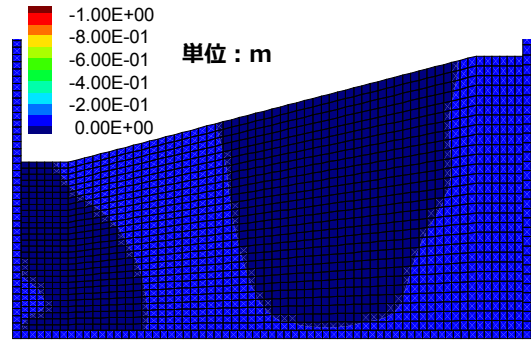


図 4-179 法肩の応答加速度の解析結果 (Case3)

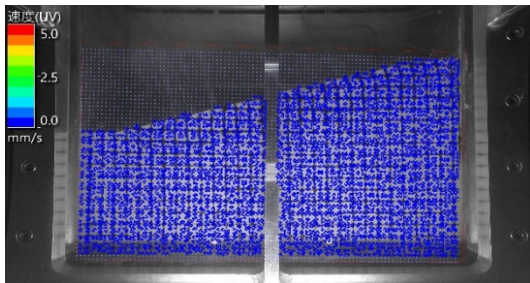


(a) 相対水平変位

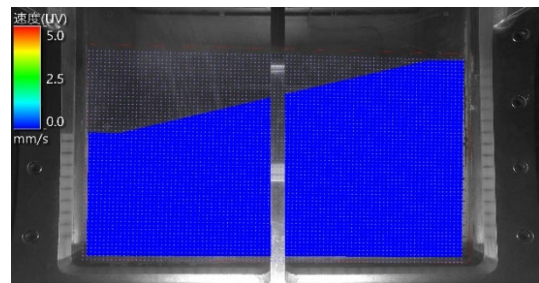


(b) 相対鉛直変位

図 4-180 変位分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)

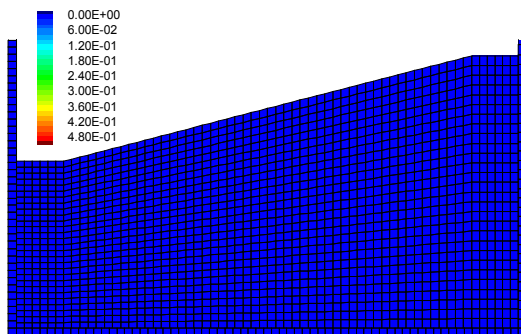


(a) 変位ベクトル図

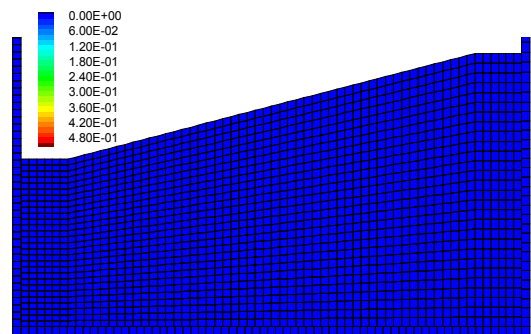


(b) 変位コンター図

図 4-181 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)

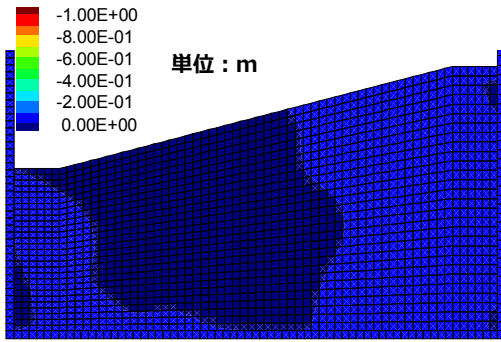


(a) せん断ひずみ増分

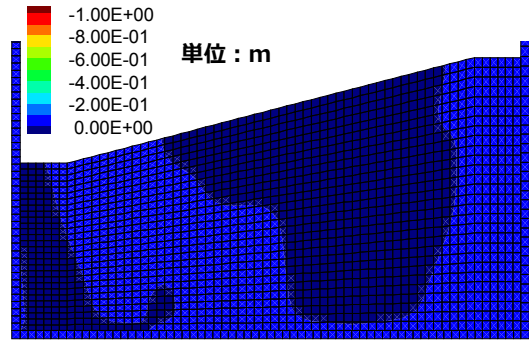


(b) ひずみの第2不変量

図 4-182 ひずみ分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)

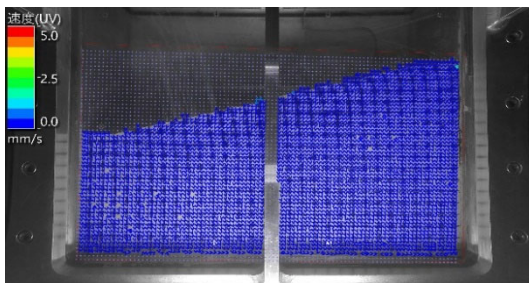


(a) 相对水平変位

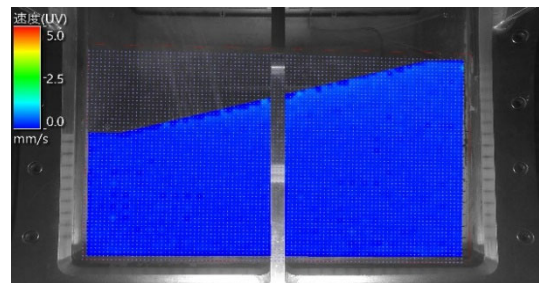


(b) 相对鉛直変位

図 4-183 変位分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)

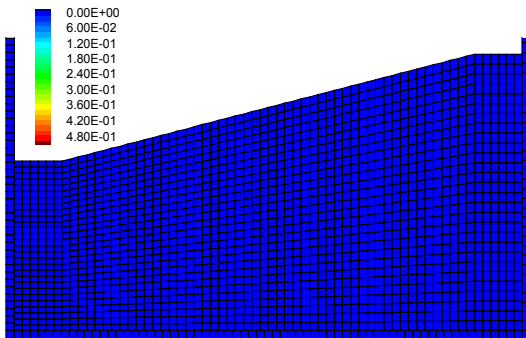


(a) 変位ベクトル図

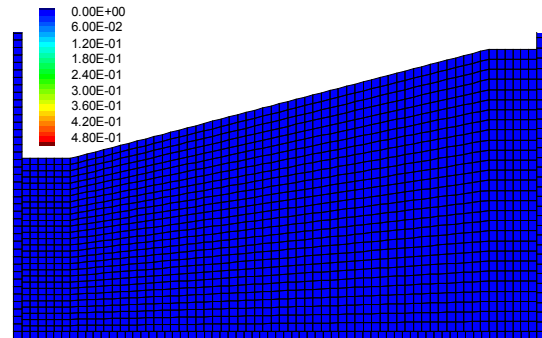


(b) 変位コンター図

図 4-184 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)

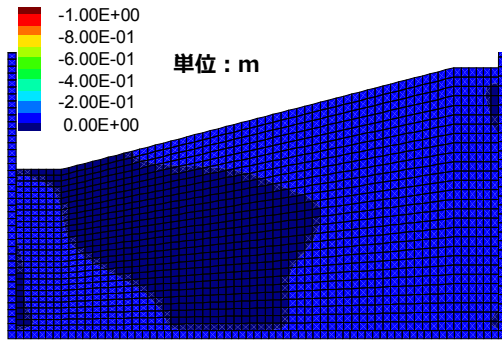


(a) せん断ひずみ増分

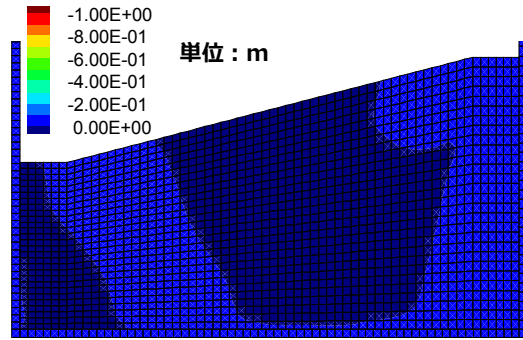


(b) ひずみの第2不変量

図 4-185 ひずみ分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)

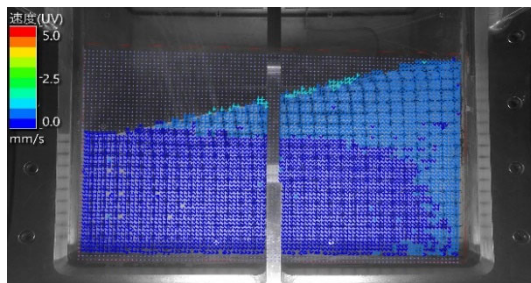


(a) 相対水平変位

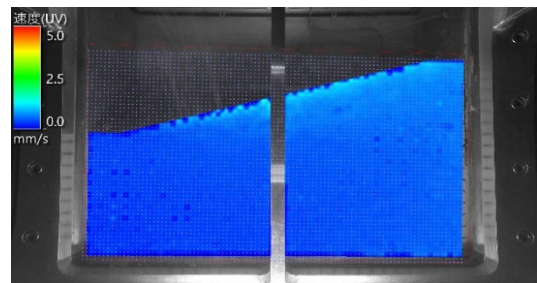


(b) 相対鉛直変位

図 4-186 変位分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)

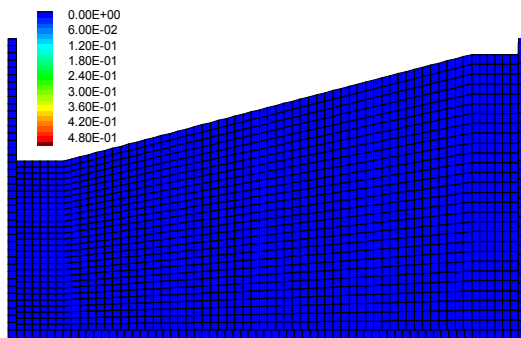


(a) 変位ベクトル図

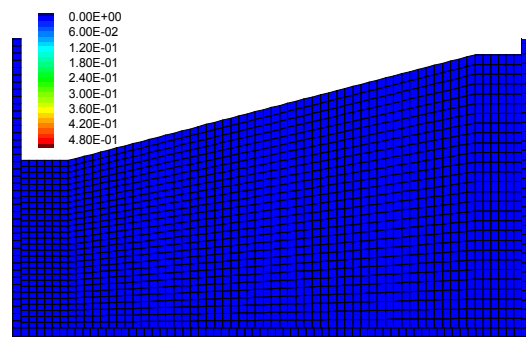


(b) 変位コンター図

図 4-187 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)

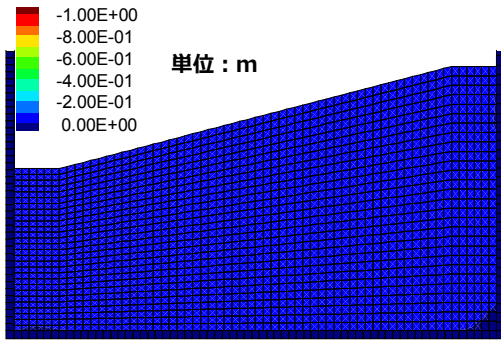


(a) せん断ひずみ増分

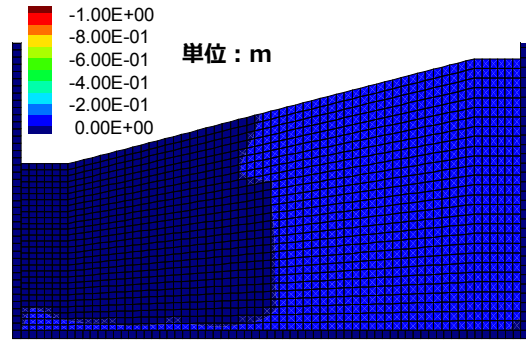


(b) ひずみの第2不変量

図 4-188 ひずみ分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)

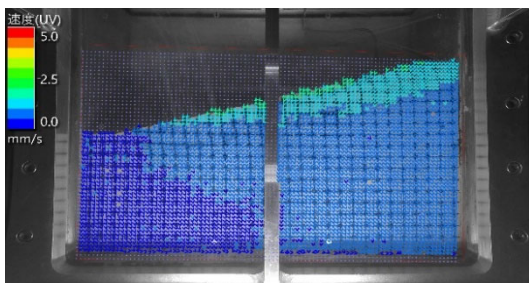


(a) 相対水平変位

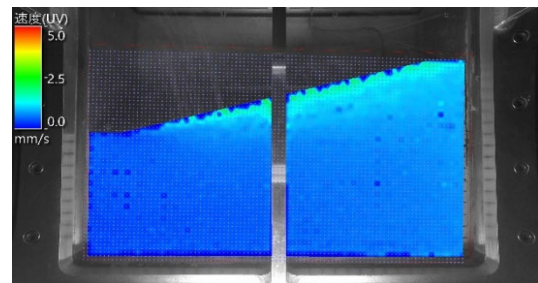


(b) 相対鉛直変位

図 4-189 変位分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)

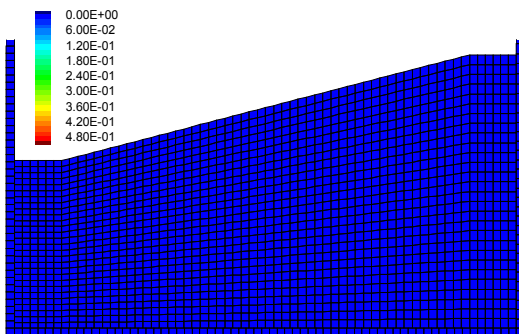


(a) 変位ベクトル図

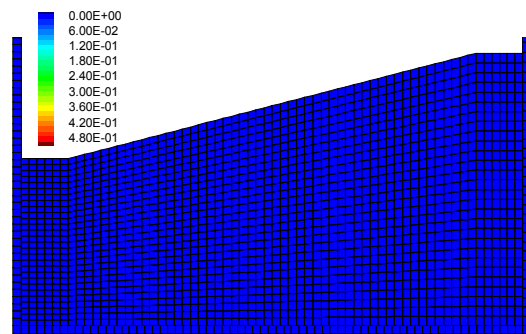


(b) 変位コンター図

図 4-190 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)

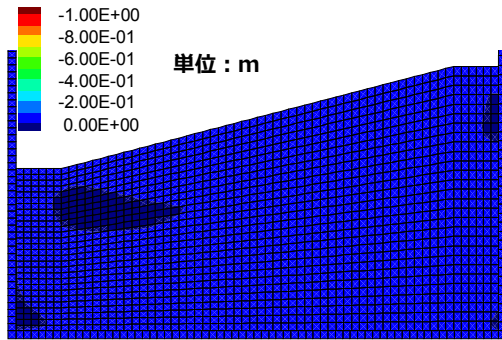


(a) せん断ひずみ増分

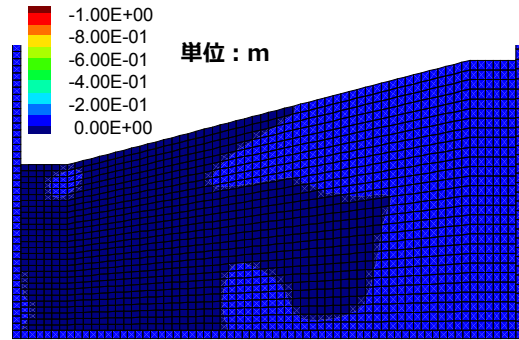


(b) ひずみの第2不変量

図 4-191 ひずみ分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)

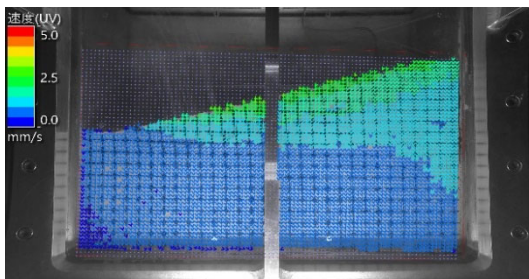


(a) 相对水平変位

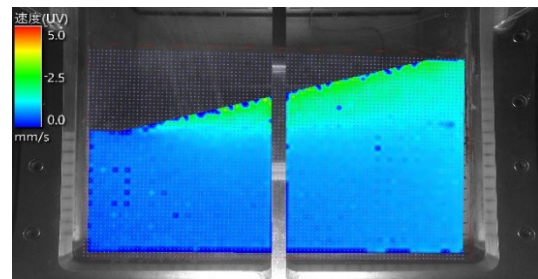


(b) 相对鉛直変位

図 4-192 変位分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)

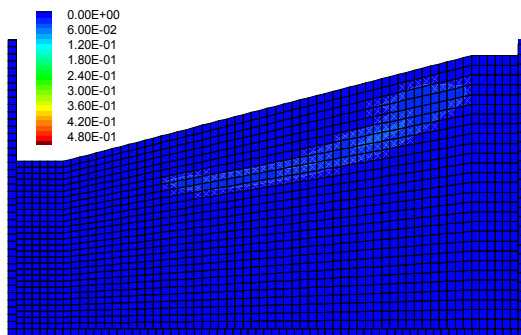


(a) 変位ベクトル図

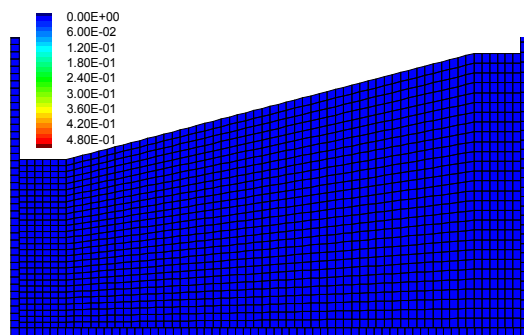


(b) 変位コンター図

図 4-193 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)

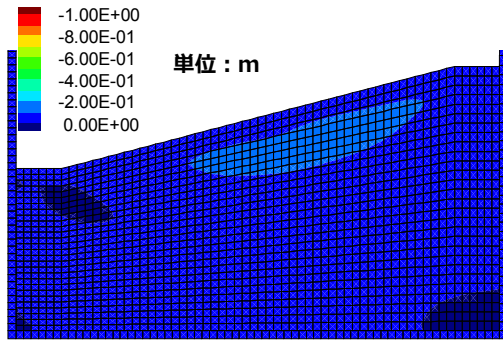


(a) せん断ひずみ増分

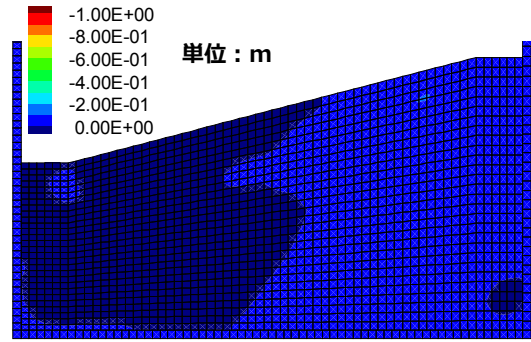


(b) ひずみの第2不変量

図 4-194 ひずみ分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)

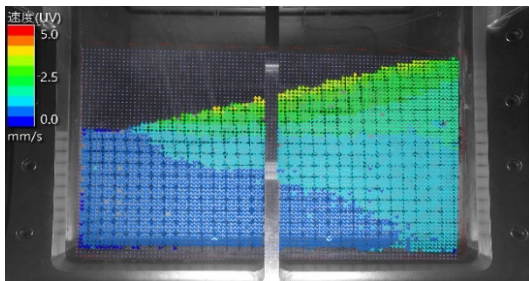


(a) 相対水平変位

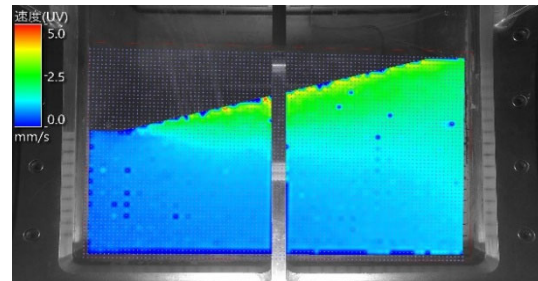


(b) 相対鉛直変位

図 4-195 変位分布 (Case3 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)

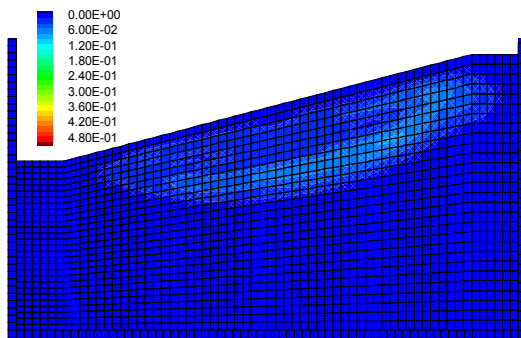


(a) 変位ベクトル図

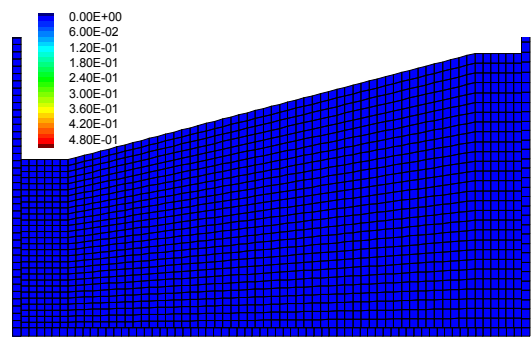


(b) 変位コンター図

図 4-196 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)

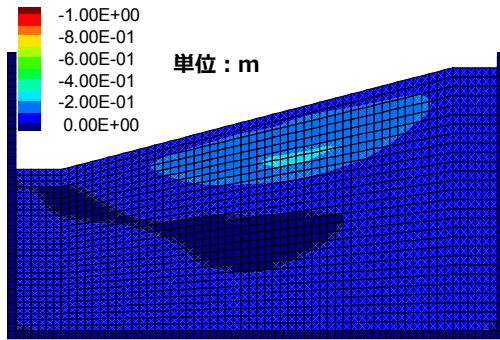


(a) せん断ひずみ増分

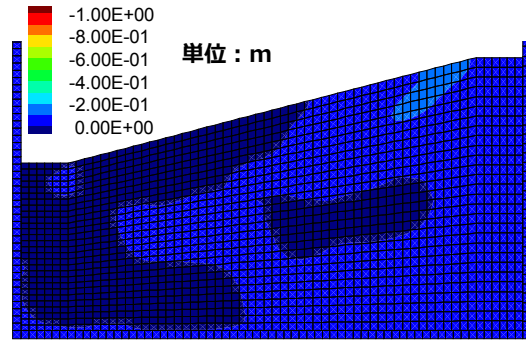


(b) ひずみの第2不変量

図 4-197 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)

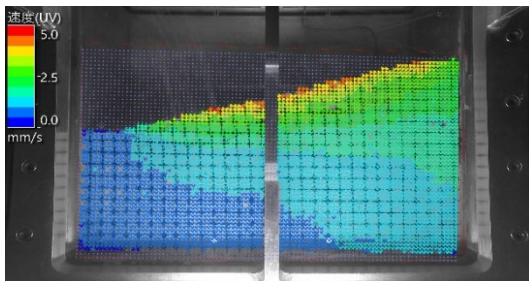


(a) 相対水平変位

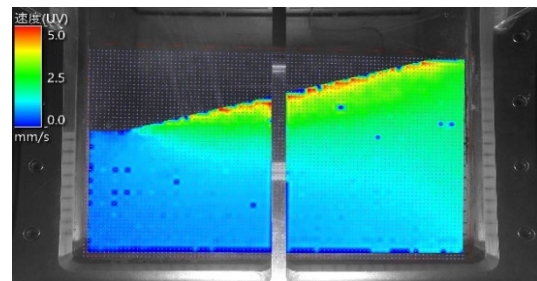


(b) 相対鉛直変位

図 4-198 変位分布 (Case3 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)

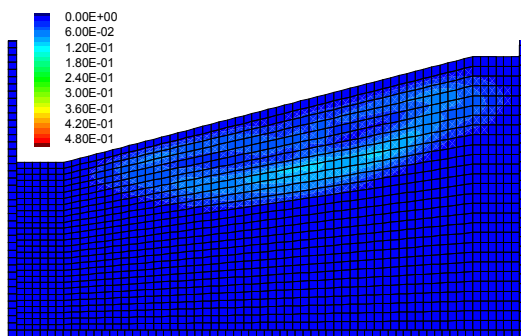


(a) 変位ベクトル図

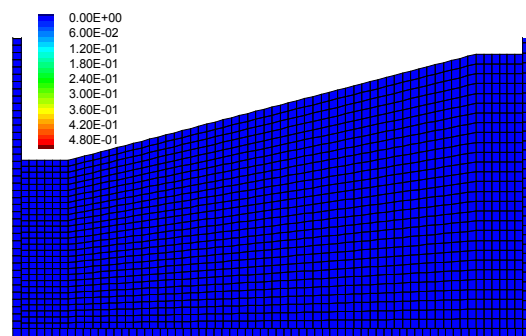


(b) 変位コンター図

図 4-199 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)

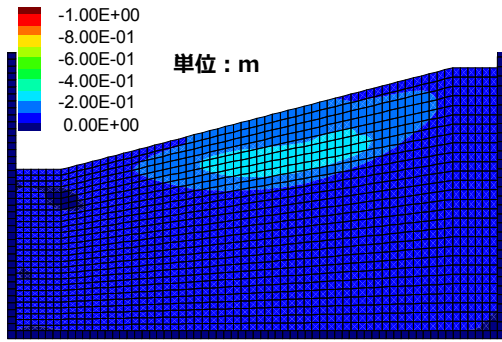


(a) せん断ひずみ増分

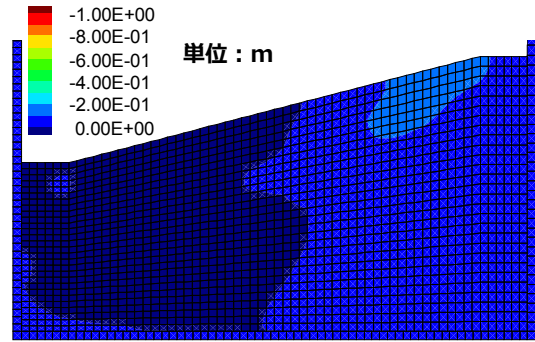


(b) ひずみの第2不変量

図 4-200 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)

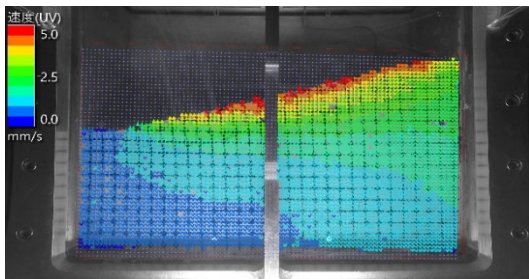


(a) 相対水平変位

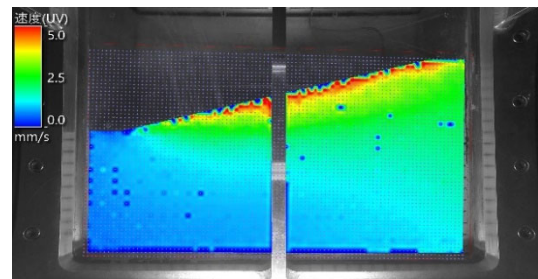


(b) 相対鉛直変位

図 4-201 変位分布 (Case3 : 300Gal (3 回目) 加振終了時)

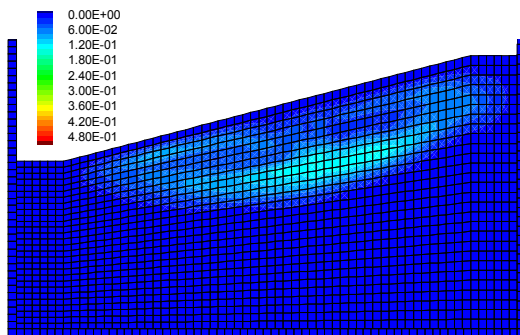


(a) 変位ベクトル図

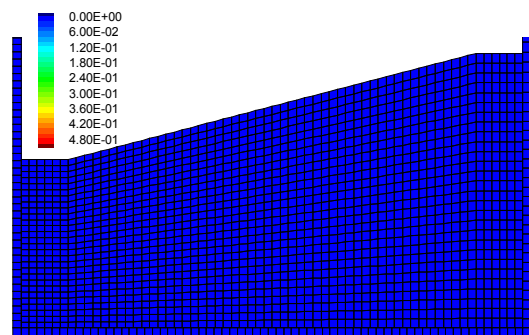


(b) 変位コンター図

図 4-202 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (3 回目) 加振終了時)

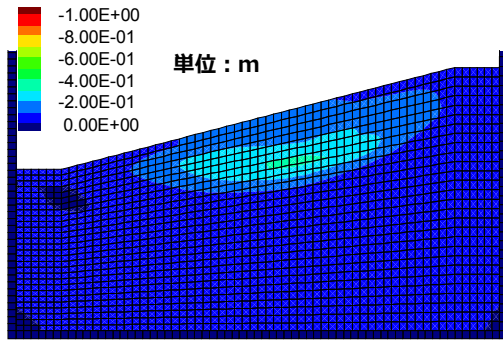


(a) せん断ひずみ増分

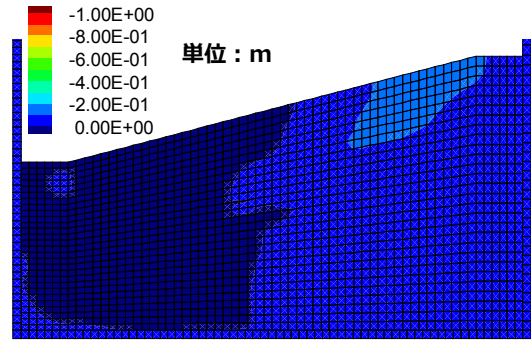


(b) ひずみの第2不変量

図 4-203 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (3 回目) 加振終了時)

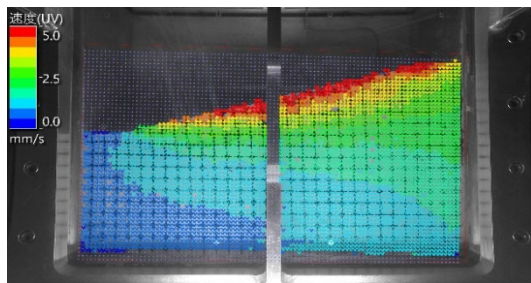


(a) 相对水平変位

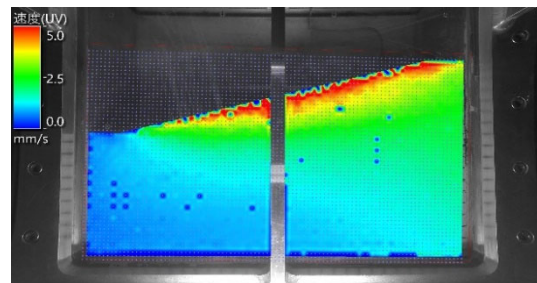


(b) 相对鉛直変位

図 4-204 変位分布 (Case3 : 300Gal (4 回目) 加振終了時)

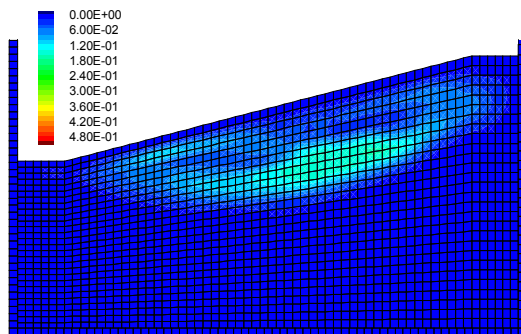


(a) 変位ベクトル図

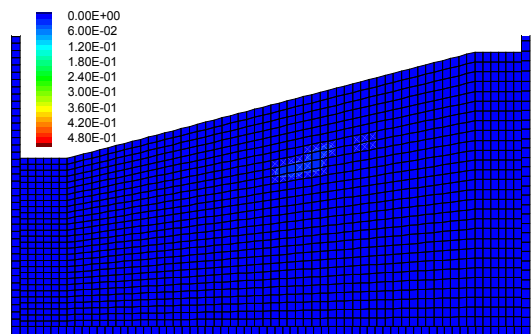


(b) 変位コンター図

図 4-205 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (4 回目)加振終了時)

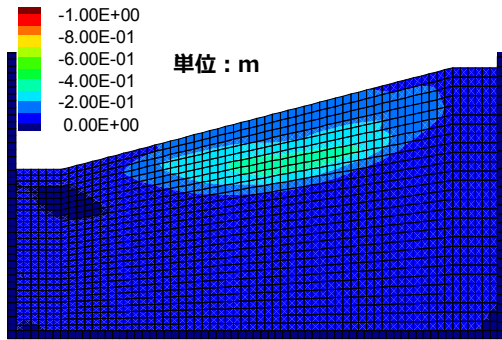


(a) せん断ひずみ増分

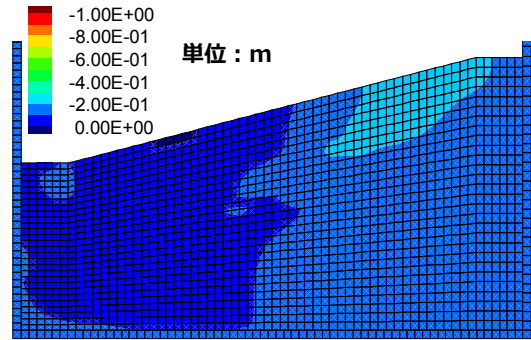


(b) ひずみの第2不変量

図 4-206 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (4 回目)加振終了時)

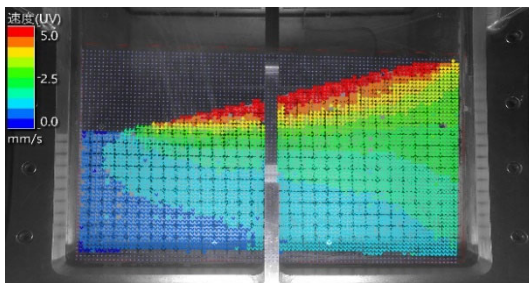


(a) 相对水平変位

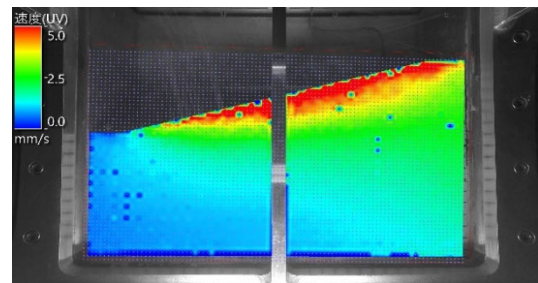


(b) 相对鉛直変位

図 4-207 変位分布 (Case3 : 300Gal (5 回目) 加振終了時)

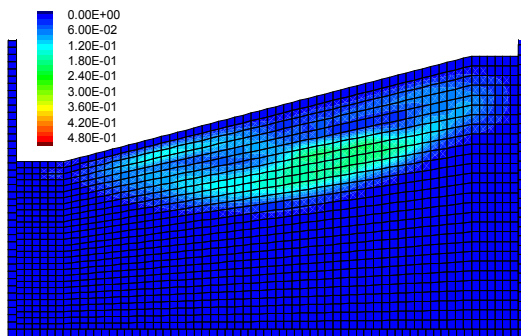


(a) 変位ベクトル図

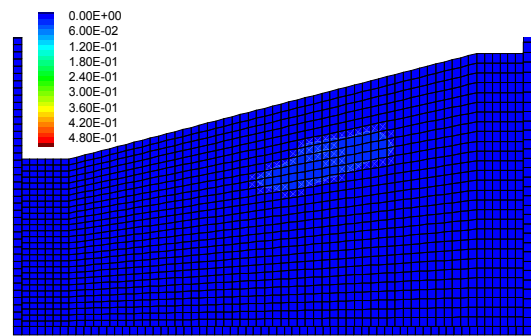


(b) 変位コンター図

図 4-208 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (5 回目)加振終了時)

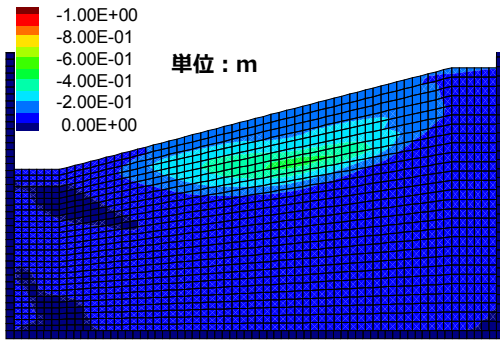


(a) せん断ひずみ増分

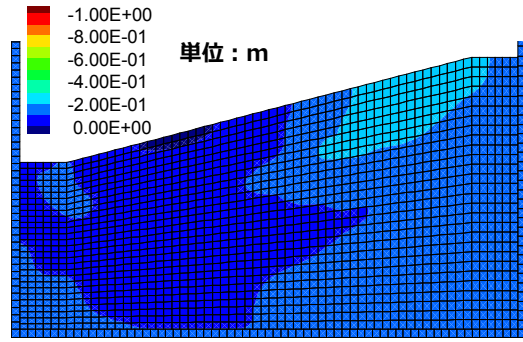


(b) ひずみの第2不変量

図 4-209 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (5 回目)加振終了時)

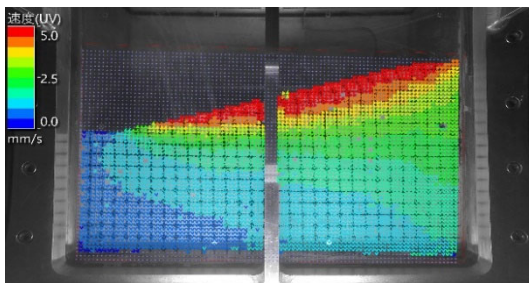


(a) 相対水平変位

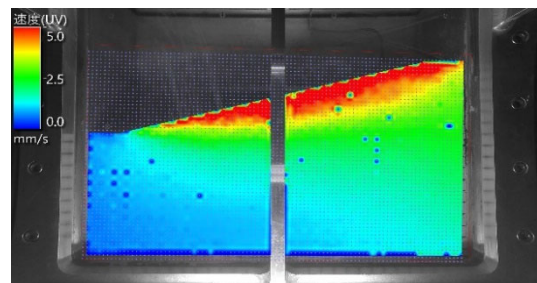


(b) 相対鉛直変位

図 4-210 変位分布 (Case3 : 300Gal (6 回目) 加振終了時)

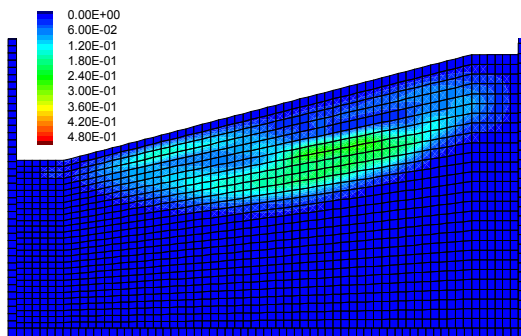


(a) 変位ベクトル図

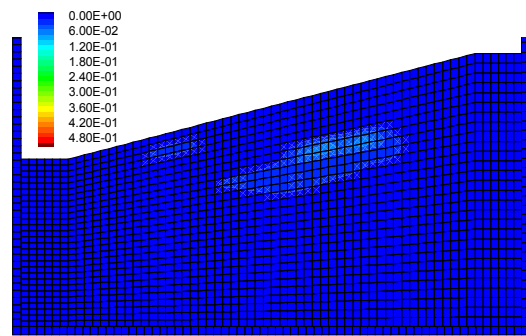


(b) 変位コンター図

図 4-211 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (6 回目)加振終了時)

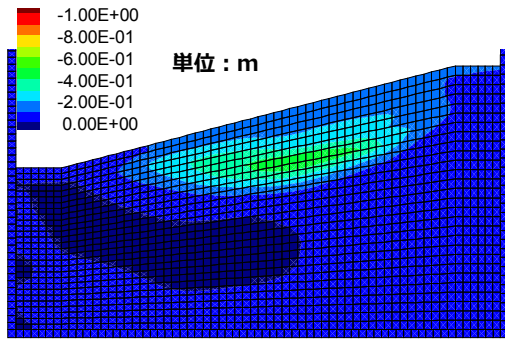


(a) せん断ひずみ増分

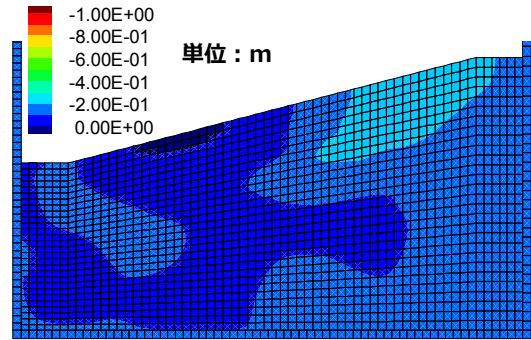


(b) ひずみの第2不変量

図 4-212 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (6 回目)加振終了時)

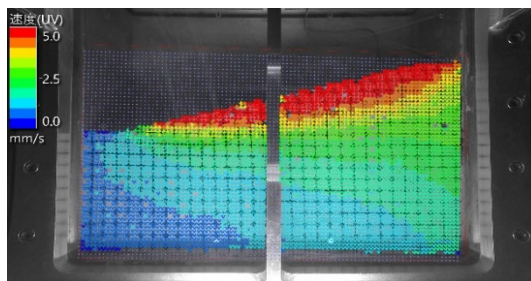


(a) 相对水平変位

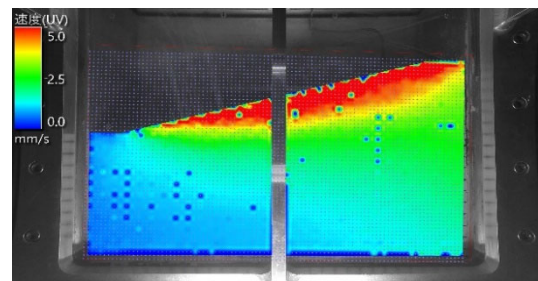


(b) 相对鉛直変位

図 4-213 変位分布 (Case3 : 300Gal (7 回目) 加振終了時)

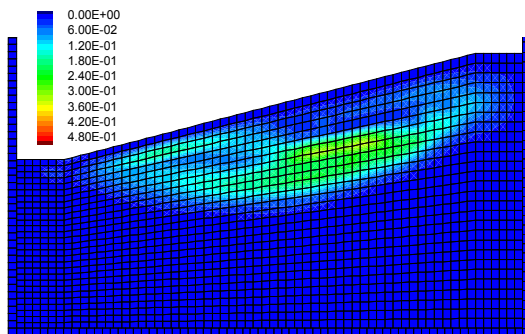


(a) 変位ベクトル図

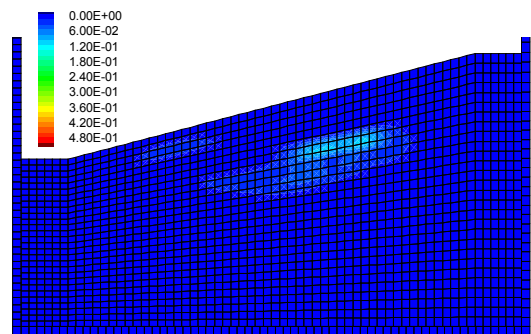


(b) 変位コンター図

図 4-214 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (7 回目)加振終了時)

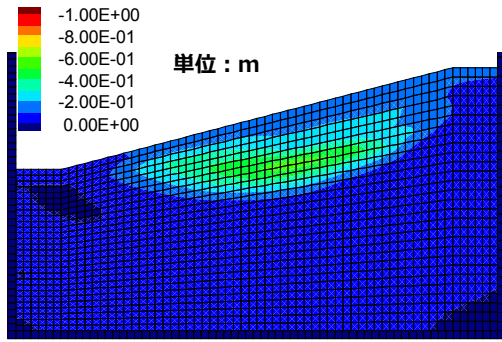


(a) せん断ひずみ増分

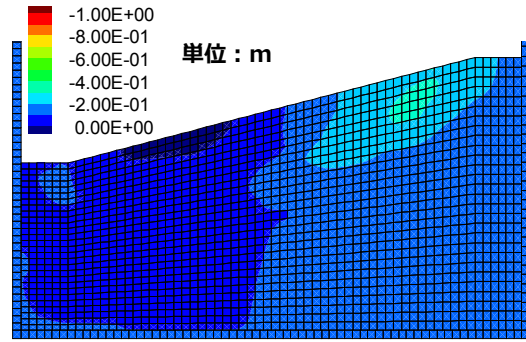


(b) ひずみの第2不変量

図 4-215 ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (7 回目)加振終了時)

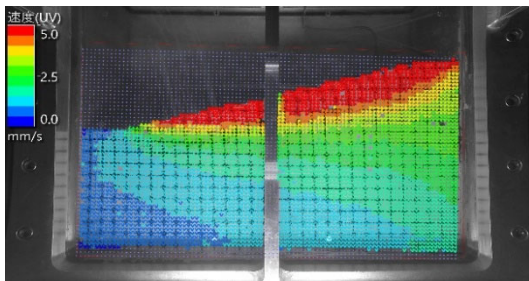


(a) 相対水平変位

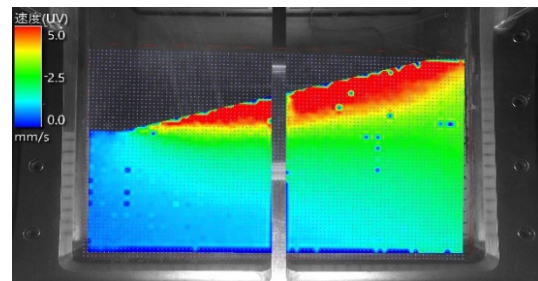


(b) 相対鉛直変位

図 4-216 変位分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)

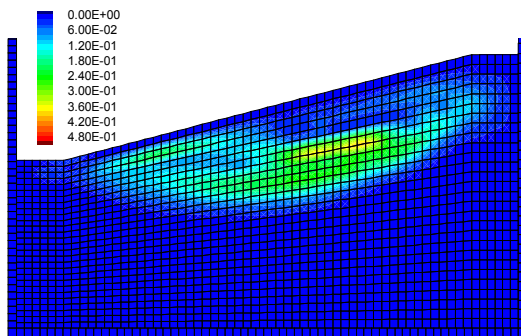


(a) 変位ベクトル図

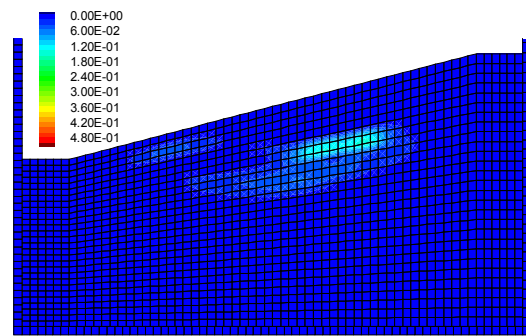


(b) 変位コンター図

図 4-217 PIV 解析による変位分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)



(a) せん断ひずみ増分



(b) ひずみの第2不変量

図 4-218 ひずみ分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)

4.2 静的な遠心力模型実験に対する再現解析

4.2.1 修正フェレニウス法による斜面安定解析

修正フェレニウス法による解析方法については 4.1.1 を参照参照されたい。

(事前解析)

すべり面は、実験結果でせん断ひずみが大きく発生した箇所を参考に、法尻を通り法肩に達する円弧の中で、最小の安全率となる円弧とした。

解析に用いた強度定数を表 4-5 に示す。ベーンせん断試験結果は幅を持っているため、粘着力にも幅を持たせた。

90G 場の解析断面を図 4-219 に示す。設定したすべり面と PIV 解析結果の比較を図 4-220 に示す。安全率と傾斜角度の関係を図 4-221 に示す。ただし図中の最大傾斜角度は傾斜台の傾斜限界角度である。安全率について水深の違いはまったく見られなかったので水深 45m のケースのみを示す。傾斜角が 7 度付近で安全率が 1 に達しており、実験で目立った変形が見られはじめた角度と概ね対応している。また内部摩擦角を 1 度異なる場合の計算結果を示したが両者の差異はほとんど見られない。

30G 場の解析断面を図 4-222 に示す。設定したすべり面と PIV 解析結果の比較を図 4-223 に示す。安全率と傾斜角度の関係を図 4-224 に示す。粘着力が 12kPa では、傾斜角 15 度付近で安全率が 1 に達しており、実験で目立った変位が見られ始めた角度と概ね対応している。

(事後解析)

解析条件とすべり安全率が 1 となる強度定数を表 4-6 に示す。ここでは斜面全体を加圧密領域であると仮定した。すべり面位置は前述の PIV 解析より得られたせん断変形領域の下限位置とし図 4-225 に示す。90G 場の遠心载荷実験ですべり面が形成された傾斜角 13° に対して、見直した強度特性を用いて得られた粘着力は 25.3kPa、30G 場の遠心载荷実験ですべり面が形成された傾斜角 19° のケース 4 に対して、粘着力は 11.7kPa となった。いずれも、粘着力の大きさは、過圧密地盤において想定される強度特性として妥当な結果となっている。

表 4-5 強度定数

遠心場	①正規圧密		②過圧密	
	c_{cu} (kPa)	ϕ_{cu} (°)	c_{cu} (kPa)	ϕ_{cu} (°)
90G	2.7	14.4	26.6	7.2
30G	2.7	14.4	8,10,12,18,27	7.2

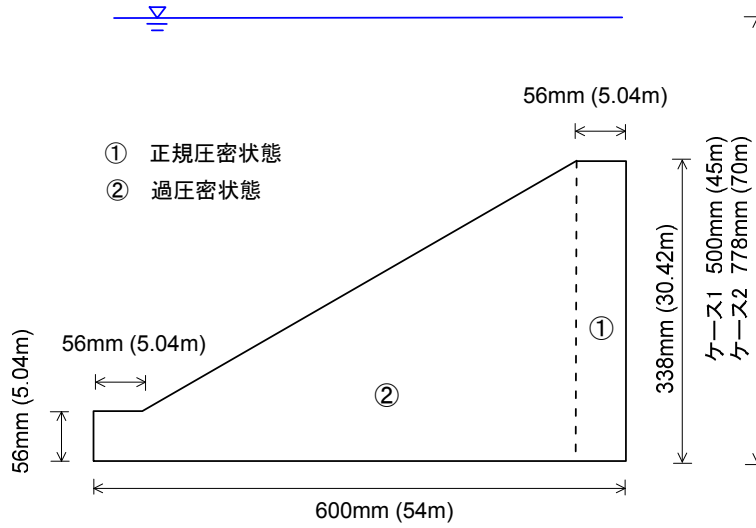
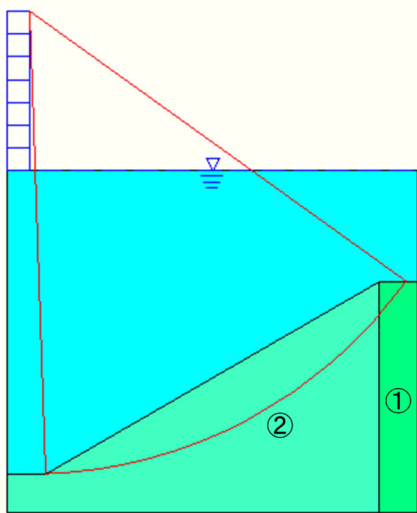
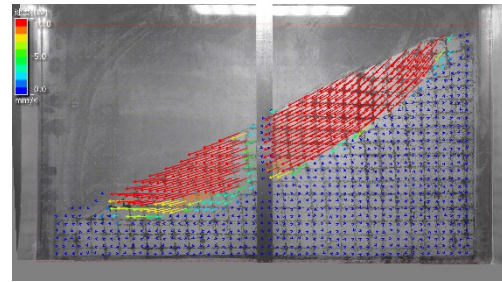


図 4-219 解析対象断面 (90G 場)



(a) 設定したすべり面



(b) PIV 解析結果 (傾斜角 11.6 度)

図 4-220 設定したすべり面と実験結果の比較

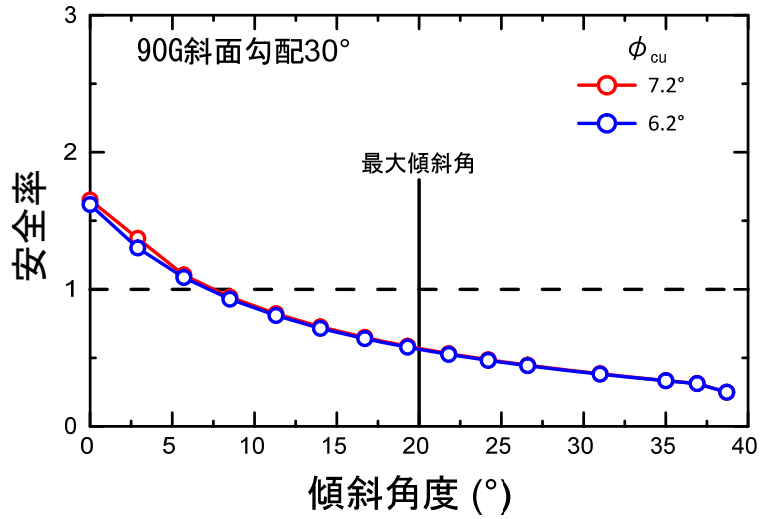


図 4-221 安全率と傾斜角度の関係 (90G)

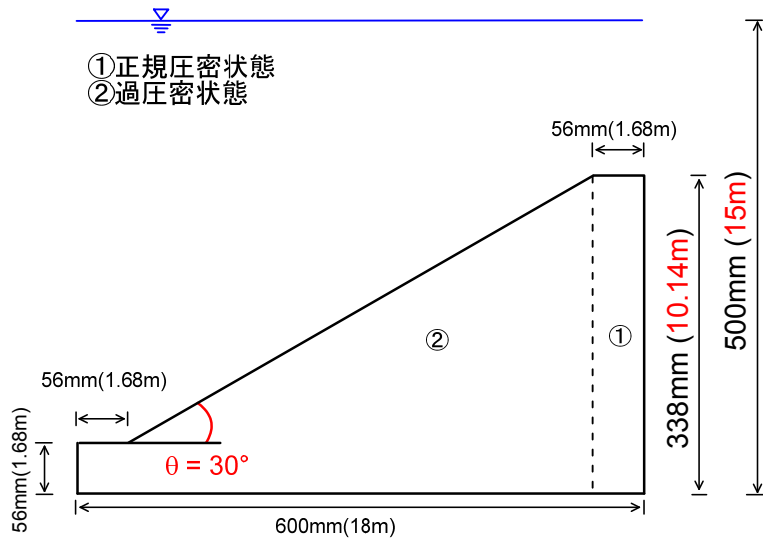
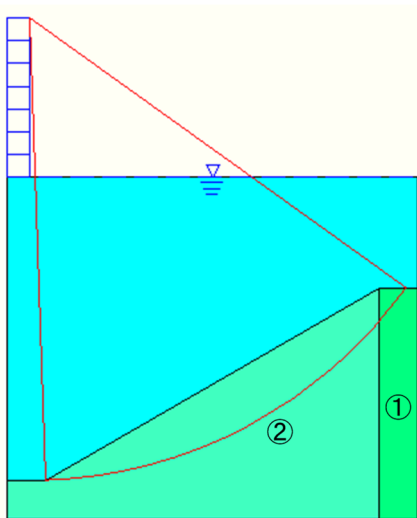
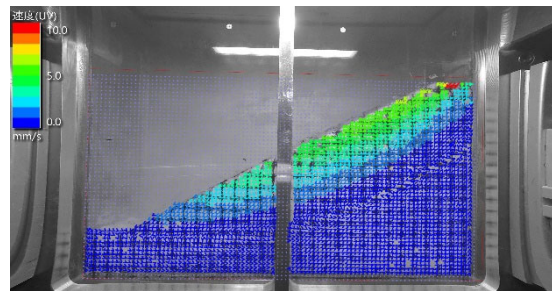


図 4-222 解析対象断面 (30G)



(a) 設定したすべり面



(b) PIV 解析結果 (傾斜角 15 度)

図 4-223 設定したすべり面と実験結果の比較

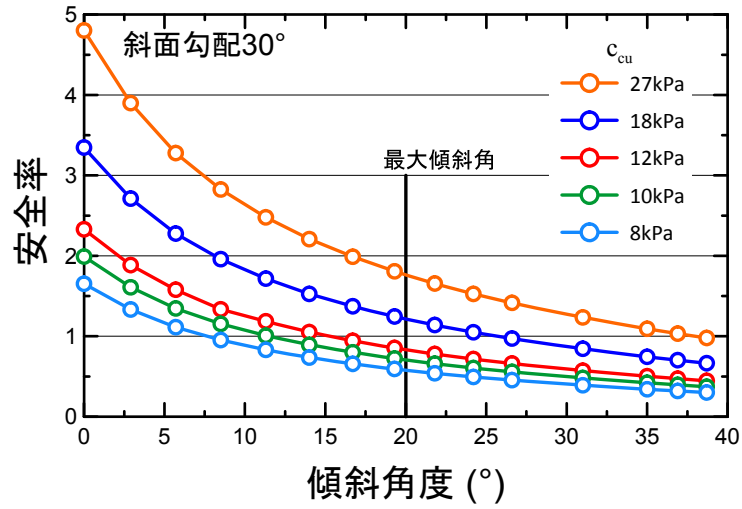


図 4-224 安全率と傾斜角度の関係 (30G)

表 4-6 解析条件とすべり安全率が1となる強度定数

	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	k	崩壊時角度 (°)
90G場	17.1		22.8	0.19	11
		7.2	25.4	0.23	13
Case4	16.8		11.7	0.34	19

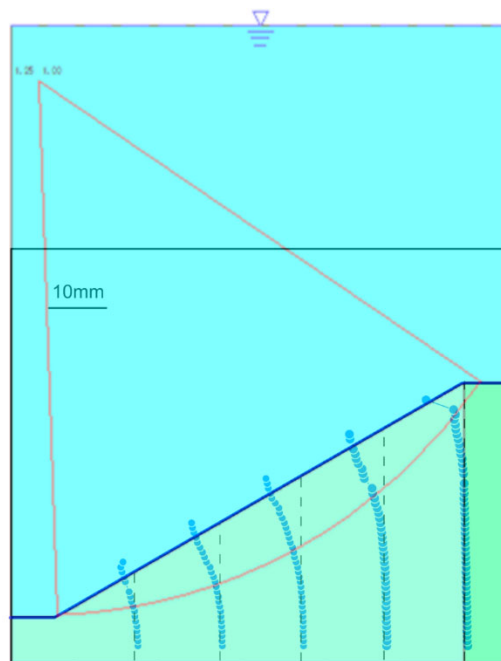


図 4-225 解析に用いたすべり面 (Case4)

4.2.2 静的解析による再現解析

静的解析はモールクーロンモデルとマルチスプリングモデルについて実施した。H28年度に実施した実験（Case1、 Case2）の再現解析結果を示す。解析モデルを図 4-226 に示す。解析パラメータを表 4-7 に示す。

まずモールクーロンモデルの結果を示す。以下に Case1（水深 45m）と Case2（水深 70m）の再現解析結果を示す。共に傾斜角 9 度において斜面が滑った。ここでは 9 度の結果を示す。せん断ひずみ増分のコンターを図 4-227 に示す。変位ベクトルを図 4-228 に示す。比較のために斜面崩壊時の PIV 画像解析の変位ベクトルとコンターを図 4-229 に示す。

次に、マルチスプリングモデルの結果を示す。以下に Case1（水深 45m）と Case2（水深 70m）の解析結果を示す。共に傾斜角 4 度において斜面が崩壊した。ここでは 4 度の結果を示す。せん断ひずみ増分のコンターを図 4-230 に示す。変位ベクトルを図 4-231 に示す。

表 4-7 解析パラメータ (モールクーロンモデル、マルチスプリングモデル)

地盤	物性値
密度 ρ (kg/m ³)	1744
弾性係数 E (kN/m ²)	$E = 16100 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{0.66}$
ポアソン比(-)	0.499
内部摩擦角 ϕ (°)	33.4
粘着力 C (kN/m ²)	12.7

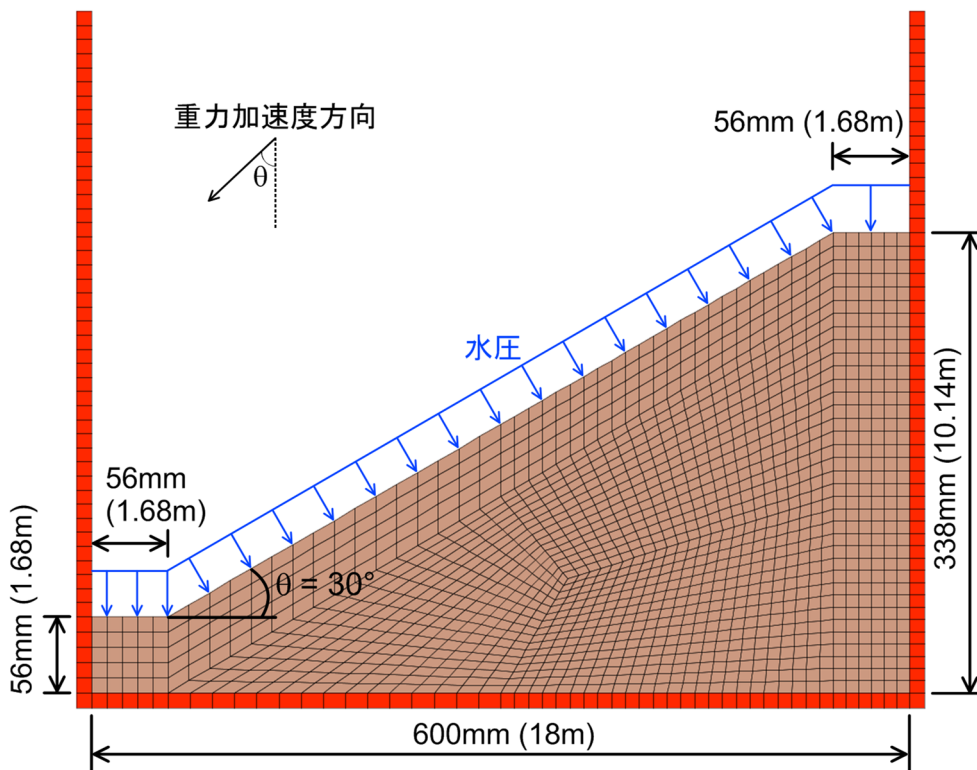
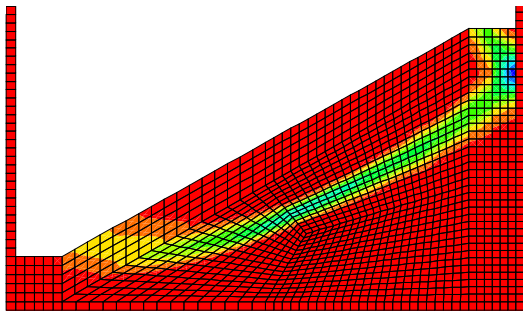
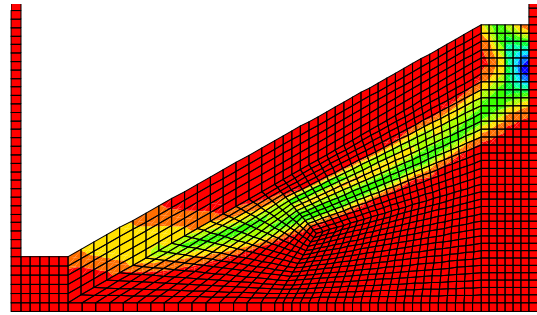


図 4-226 解析モデル図

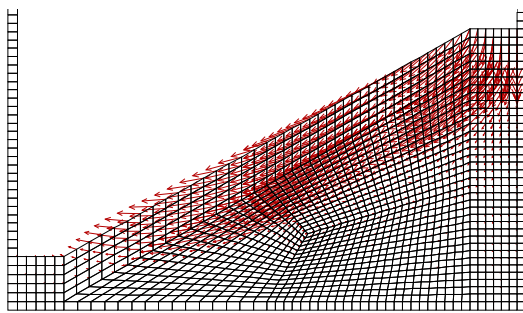


(a) せん断ひずみ増分 (水深 45m)

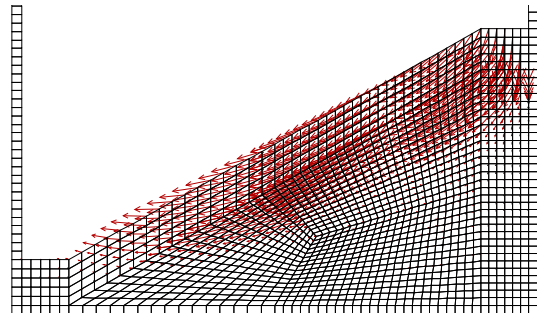


(b) せん断ひずみ増分 (水深 70m)

図 4-227 ひずみ分布 (傾斜角 9 度、モールクーロンモデル)

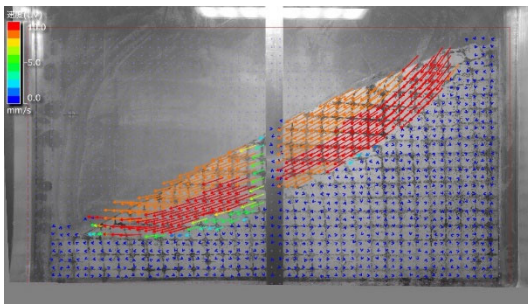


(a) 変位ベクトル図 (水深 45m)

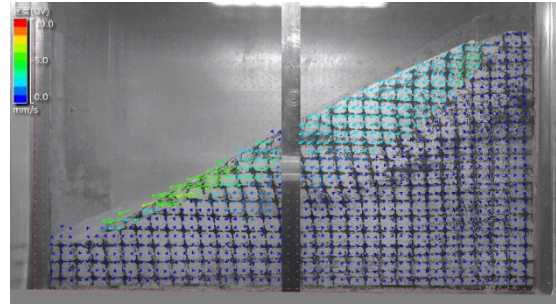


(b) 変位ベクトル図 (水深 70m)

図 4-228 変位ベクトル (傾斜角 9 度、モールクーロンモデル)

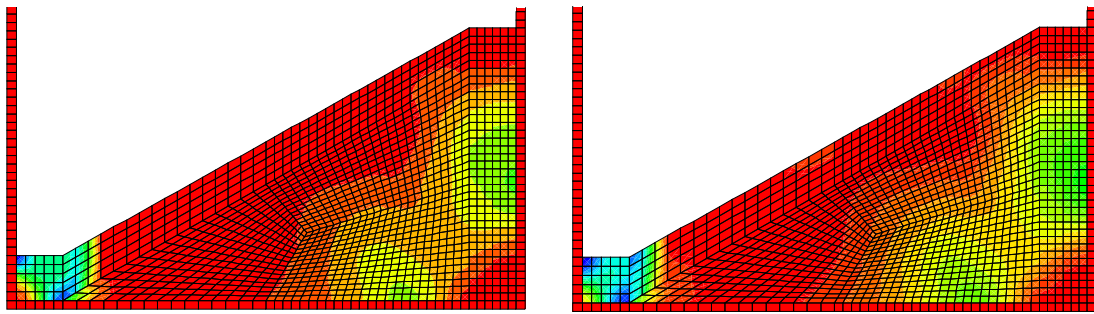


(a) Case1 (11.7° ~ 11.8°)



(b) Case2 (14.1° ~ 14.3°)

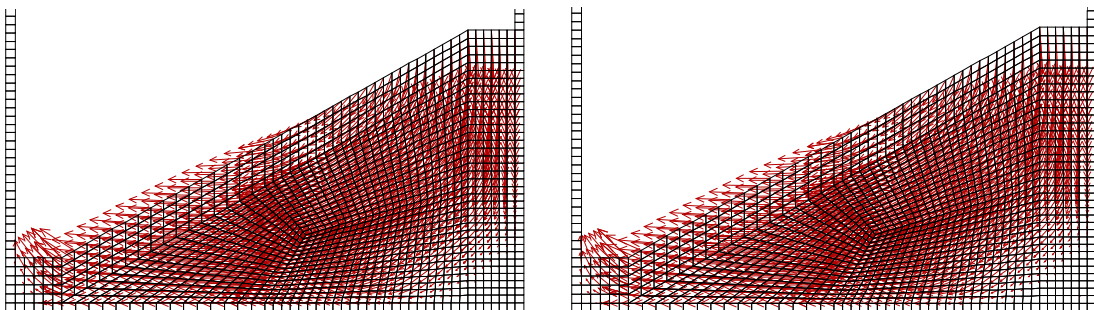
図 4-229 PIV 解析による変位分布 (左 : 水深 45m、右 : 水深 70m)



(a) せん断ひずみ増分 (水深 45m)

(b) せん断ひずみ増分 (水深 70m)

図 4-230 ひずみ分布 (傾斜角 4 度、マルチスプリングモデル)



(a) 変位ベクトル図 (水深 45m)

(b) 変位ベクトル図 (水深 70m)

図 4-231 変位ベクトル (傾斜角 4 度、マルチスプリングモデル)

今年度に実施した実験 (Case4) の再現解析結果を示す。解析モデルを図 4-232 に示す。解析パラメータを表 4-8 に示す。

まずモールクーロンモデルの結果を示す。傾斜角 15 度において斜面にすべりが発生したため、ここでは 15 度の結果を示す。せん断ひずみ増分と変位ベクトルを図 4-233 に示す。比較のために斜面崩壊時の PIV 画像解析 (傾斜角 15 度) の変位ベクトルとコンターを図 4-234 に示す。

次に、マルチスプリングモデルの結果を示す。実験では傾斜角 19.5 度に達してすべりが顕著になったが、解析では傾斜角 20 度まで傾けても斜面が崩壊に至らなかった。ここでは 20 度の結果を示す。せん断ひずみ増分と変位ベクトルを図 4-235 に示す。

表 4-8 解析パラメータ（モールクーロンモデル、マルチスプリングモデル）

地盤	物性値
密度 ρ (kg/m ³)	1744
弾性係数 E (kN/m ²)	$E = 16100 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{0.66}$
ポアソン比(-)	0.499
内部摩擦角 ϕ (°)	37.8
粘着力 C (kN/m ²)	8.2

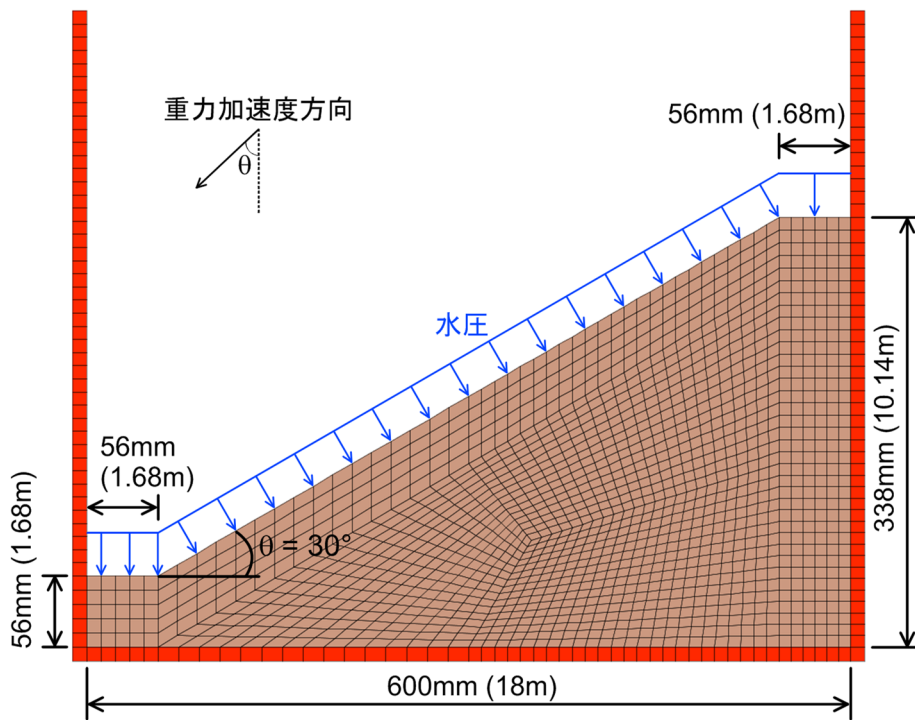
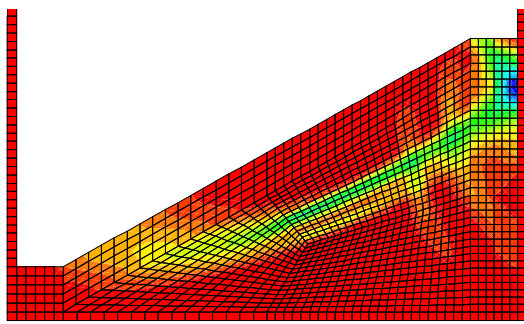
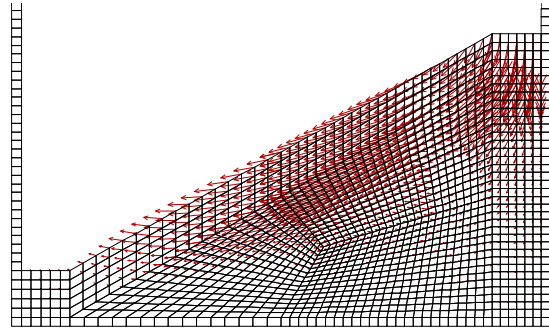


図 4-232 解析モデル図

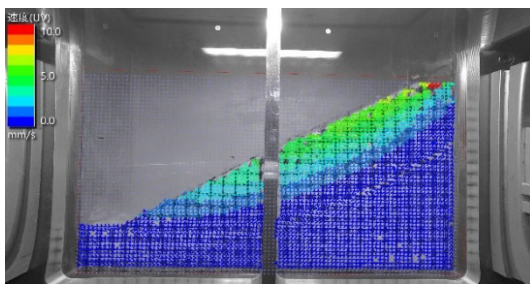


(a) せん断ひずみ増分

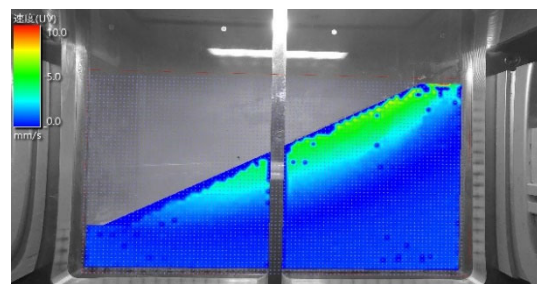


(b) 変位ベクトル図

図 4-233 ひずみ分布と変位ベクトル (傾斜角 15 度 : モールクーロンモデル)

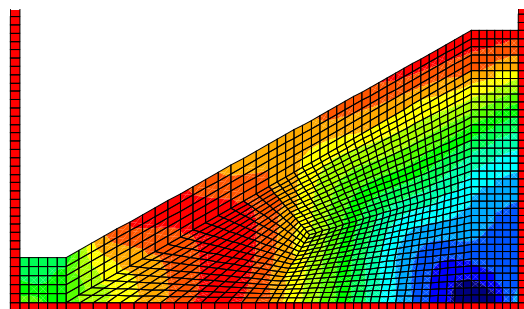


(a) 変位ベクトル図

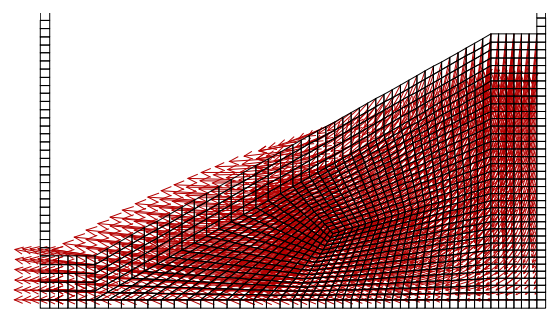


(b) 変位コンター図

図 4-234 PIV 解析による変位分布 (傾斜角 15 度) (左 : 水深 45m、右 : 水深 70m)



(a) せん断ひずみ増分



(b) 変位ベクトル図

図 4-235 ひずみ分布と変位ベクトル (傾斜角 20 度 : マルチスプリングモデル)

5 まとめ

平成 30 年度事業では、水圧等の影響を考慮した斜面模型の動的、静的遠心力載荷実験を実施し、円弧すべり法（修正フェレニウス法）の海底環境下における適用性の把握を実施した。

まず、平成 29 年度の再現解析における課題として挙げられた斜面模型の過圧密における模型地盤のせん断強度の推定を実施した。そのため、三軸圧縮試験を先行圧密応力、圧密応力、背圧が異なる 18 ケースについて実施した。過圧密比（OCR）は 1～6.75 であり遠心載荷実験での斜面地盤の位置の違いをできるだけカバーするように設定した。過圧密の程度による応力-ひずみ関係の違いに着目すると、ひずみの増加とともに軸差応力は増加し、ピーク強度を示した後に残留状態になるような挙動は示していない。強度増加率は背圧 350kPa に対して 0.085～0.153(平均 0.128)、背圧 600kPa に対して 0.097～0.116 (平均 0.108)でと得られた。強度増加率は、背圧の増加とともに低下しているというより 0.085～0.153 の範囲でばらつきがあると見なすことができる。その平均は 0.117 であり、勾配 ϕ に換算すると 6.7°となる。平成 28 年度に実施した過圧密状態の試料を用いた一面せん断試験により得られた内部摩擦角 ϕ は 7.2°であり、強度増加率と同程度の値となっており、すべり面の形成と同様な破壊挙動を示す要素試験の結果でもあり、斜面安定解析にはこの実験結果を用いることとした。粘着力については法面下のすべり面深度は一定でないことから幅を持たせて評価することにした。数値解析の材料特性に用いる強度特性は、低拘束圧については実験後に実施した一軸圧縮強さ、高拘束圧については三軸圧縮試験による強度特性を包括する破壊線(2 次曲線近似)を求め、拘束圧 0kPa における接線の切片を粘着力、傾きを内部摩擦角とする方法により設定することとした。

次に、海底環境下で、地震動のような動的な外力に対する斜面模型のすべり面の伸展や崩壊モードなどの崩壊挙動を把握するため、30G 場での遠心載荷実験を実施した。実験は、斜面模型の勾配（30°、35°、15°）と水圧(水深 15m、23m)を変えた 3 ケースを実施した。加えて、斜面模型を徐々に傾け静的な外力を与える静的遠心載荷実験(ケ

ケース 4)を 30G 場で 1 ケース実施した。ケース 4 では傾斜角 19° 程度ですべり面が形成され、崩壊に至ったが、斜面勾配 30° (水深 15m)のケース 1、斜面勾配 35° (水深 23m)のケース 2 および斜面勾配 15° (水深 23m)のケース 3 とも明確なすべり面を形成するような崩壊には至らなかった。

地盤の破壊状況について考察するために、PIV 解析で変位を求めた標点のうち、斜面内で 5 断面周辺に位置する標点を抽出し、各断面の深度方向に沿った標点の水平変位分布とせん断ひずみの分布を求めた。これより、ケース 4 が法面から 5~6cm の位置にて増加、つまり変形の局所化が生じているのに対して、ケース 1 は法面から 5~10cm まで、ケース 3 は法面から 2~4cm までが全体として一様にせん断変形しているという点で大きく異なっている。斜面勾配 35° のケース 2 は、ケース 1 とケース 4 の中間的な変形挙動を示していた。また、ケース 1 および 2 においてせん断ひずみが 10~20%を示している深さの下限を斜面安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる地盤の破壊位置とすると、その位置はケース 4 においてすべり面が形成された深度、つまりせん断ひずみの局所化が生じている深度に比べて深い。また、ケース 3 において、せん断ひずみが 5%程度を示している深さの下限を斜面安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる地盤の破壊位置とすると、すべり面位置はケース 4 より浅い位置に形成されると推定される。さらに、ケース 4 ですべり面が生じる直前の傾斜角 19° は震度換算で 0.34 であり、ケース 1 においてせん断ひずみが 10~20%を示した加速度振幅 250~300Gal と概ね対応している。ケース 2 についても、斜面安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる状態の加振加速度は 250~300Gal であると推定される。ケース 3 についてはせん断ひずみが 5%程度と小さいことから、斜面安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる状態の加振加速度は 300Gal 以上と推測される。実験では、水圧が崩壊挙動に及ぼす有意な影響を認めることができなかった。今後、正規圧密状態にある模型にて斜面勾配同一で水深のみを変更した場合の実験による比較の実施などの検討が必要と考えられる。

次に、円弧すべり法（修正フェレニウス法）による斜面安定解析を実施し、30G 場の動的遠心載荷実験により得られた変形挙動との比較を実施した。強度特性は前述の推定結果を用い、すべり面の位置は前述の PIV 解析より得られたせん断変形領域の下限位置とした。さらに、ケース 1~3 においてすべり面の形成が生じる震度を 0.25 と仮定した。

後述する静的遠心載荷実験のケース 4 の粘着力 11.0kPa に対して、斜面勾配 30°のケース 1 は粘着力 10.3kPa と同程度、斜面勾配 35°のケース 2 は粘着力 14kPa と少し大きめの値となっている。斜面勾配 15° のケース 3 は、仮定したすべり面がケース 4 より浅いこともあり、5.9kPa とケース 1 より小さな値となっている。各ケースの粘着力の大きさは、過圧密地盤において想定される強度特性として妥当な結果となっている。このことは、ケース 1 以外、すべり面を形成していないものの、変形の程度を勘案すると斜面安定解析においてすべり安全率が 1.0 の状態に至っているとの仮定も妥当であると考えられる。しかし、静的遠心載荷実験のケース 4 のすべり面と動的遠心載荷実験のケース 1 の実験で得られたせん断ひずみが増加している領域の下限位置は異なっており、その差異の原因説明については今後の検討が必要である。

次に、数値解析による動的遠心実験により得られた崩壊挙動の再現解析、および斜面崩壊に及ぼす水圧の影響について検討を実施した。数値解析には、平成 29 年度と同様に有限差分法による解析コード「FLAC」を用いる。解析より得られた変位の増加傾向についてみると、両材料特性とも絶対値として解析は大きく評価している。その傾向はモールクーロンモデルでは斜面上部の水平、鉛直変位とも大きく評価しているに対して、HD モデルでは水平変位は斜面下部、鉛直変位は斜面上部が大きく評価している。絶対的な変形は法肩部が大きいことから、PIV 解析により得られた実験による変形は斜面上部が大きく評価しているものの、HD モデルの方が定性的傾向をよく示している。また、 J_2 (最大せん断ひずみの自乗)の分布についてみると、モールクーロンモデルによるその大きな位置は実験によりせん断ひずみが増加している下限位置より浅く、HD モデルによるその大きな位置はせん断ひずみが増加している下限位置より深い。ただし、斜面勾配が 15° のケース 3 について、モールクーロンモデルと HD モデルとも J_2 の大きな位置の分布は同程度となっている。

最後に、平成 28 年度事業にて実施した 90G 場、平成 30 年度事業にて実施した 30G 場での傾斜台を用いた静的遠心載荷実験で得られた崩壊状況と、円弧すべり法（修正フェレニウス法）による斜面安定解析、解析コード「FLAC」を用いた再現解析との比較を行った。再現解析の材料特性にはモールクーロンモデルとマルチスプリングモデルを用いた。斜面安定解析についてみると、90G 場の遠心載荷実験ですべり面が形成された

傾斜角 13° に対して、見直した強度特性を用いて得られた粘着力は 25.3kPa 、 30G 場の遠心載荷実験ですべり面が形成された傾斜角 19° のケース 4 に対して、粘着力は 11.0kPa となった。いずれも、粘着力の大きさは、過圧密地盤において想定される強度特性として妥当な結果となっている。再現解析についてみると、強度特性の見直しにより、モールクーロンモデルを用いた解析では 90G 場に対するケースが 9° で崩壊し、実験で崩壊が生じた 13° に対して強度見直し前の 4° に比べて大きく改善した。 30G 場の実験に対しても、実験では 19° で崩壊したケースが 15° で崩壊という結果が得られた。マルチスプリングモデルは、平成 28 年度事業と同様に地盤の変形状態が実験と大きく異なった結果となった。モールクーロンモデルを用いた解析で崩壊が生じた傾斜角は実験で得られた傾斜角の 70%と小さいものの、ほぼ評価できていると考えることができる。また、水圧が崩壊に及ぼす影響については、解析結果から有意な影響を認めることができなかった。

今年度実施した実験では、動的遠心載荷実験のケース 1~3 について、明確なすべり面の形成を伴う崩壊挙動を確認できなかった。斜面模型の形状を精度よく作成するということから、過圧密状態で模型斜面を製作しており、前述の過圧密粘土の応力-ひずみ関係の特性から、低い遠心場では明瞭なすべり面を形成しにくい状態にあると考えられる。そこで、実海底地盤と同様な正規圧密状態にある模型を対象とした実験の実施などの検討が必要と考えられる。しかし、正規圧密粘土斜面の作成方法については検討が必要である。さらに、本年事業で妥当性の確認ができた数値解析による検討を実施することも必要と考えられる。

6 参考文献

平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費、海底における斜面の地震時安定評価に関する基礎検討、281514、平成 29 年 3 月