

宅地耐震技術としての空気注入による  
液状化抑制効果確認の実測業務

報 告 書

平成 21 年 3 月

国土技術政策総合研究所 都市研究部

## 目 次

1. 実験方法	1
1.1 実験装置	1
1.2 試験体	2
(1)試験ケース	2
(2)盛土材料	3
(3)試験体の作製	4
(4)注水方法及び飽和度の管理方法	7
(5)フーチング模型と浮き上がり埋設物	13
2. 計測方法	14
2.1 計測内容および計測項目	14
2.2 計測器の設置方法	16
3. 加振条件	17
4. 試験体の状態	18
4.1 実験地盤の状態	18
4.2 飽和度管理結果	21
5. 実験結果	24
5.1 地盤の応答加速度特性	24
5.2 過剰間隙水圧及び水圧比の結果	31
5.3 地盤の沈下量特性	48
6. まとめ	50

## 1.実験方法

### 1.1 実験装置

実験装置は、独立行政法人築研究所 建築基礎・地盤実験棟屋内ピットに常設されている。本装置は、せん断土槽（17 段）、油圧アクチュエータ、土砂自動搬送装置および計測システムからなり、せん断フレーム内に長さ 10m、深さ 5m、幅 3.6mの地盤を作製し、地震時の地盤の振動を再現することができる。また、各種構造物と地盤との地震時の相互作用について最大高さ 5mまでの実物大の実験的検証が可能である。本装置の概要を図-1.1.1 に示す。

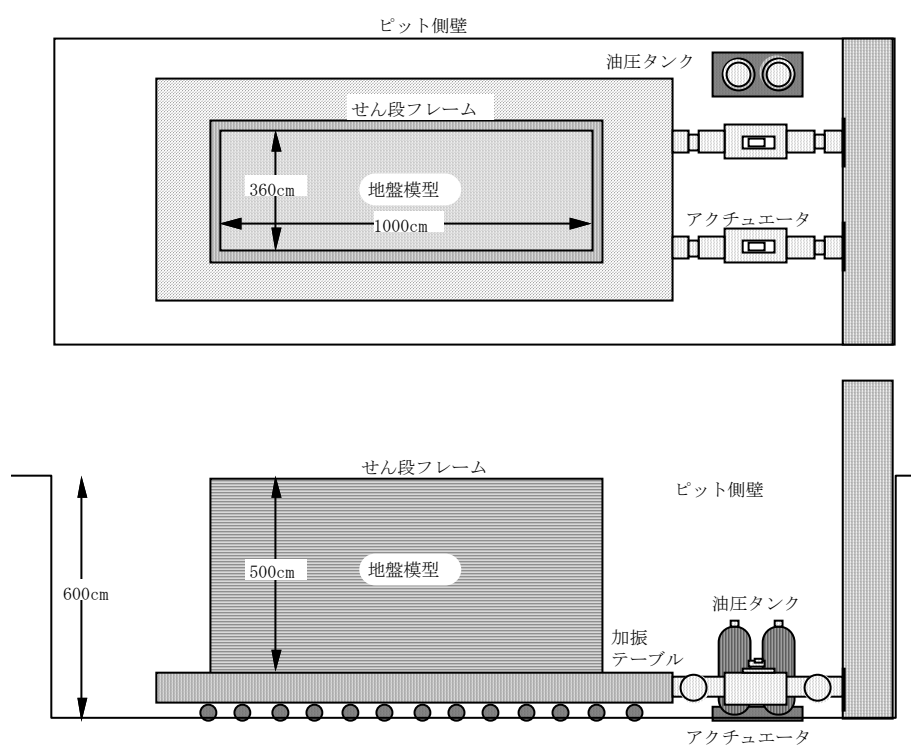
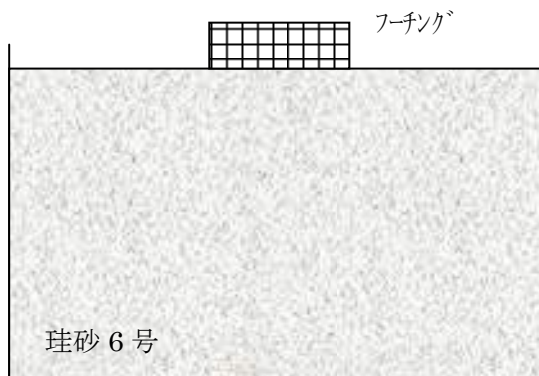


図-1.1.1 大型せん断土槽の概要

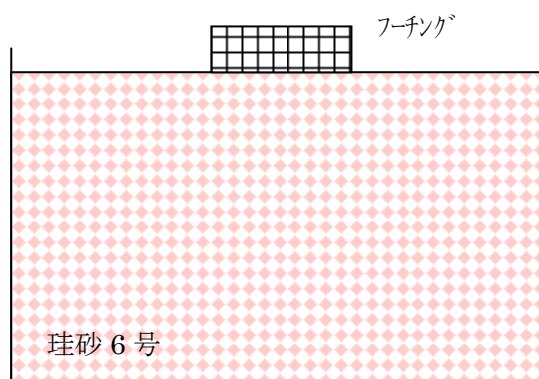
## 1.2 試験体

### (1) 試験ケース

ケース.1 無対策



ケース.2 対策工 (マイクロバブル：強)



ケース.3 無対策 (飽和度：高)

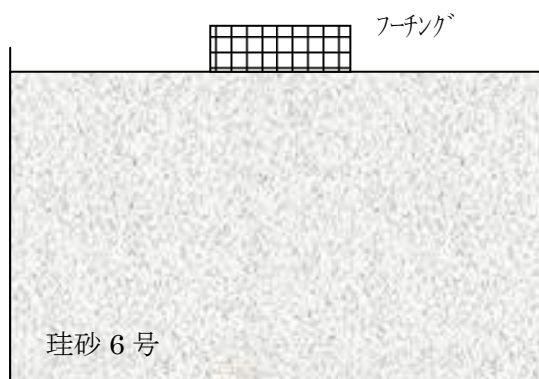


図 1.2.1 試験ケースの概要

(2) 盛土材料

盛土材料は、栃木県産の日光珪砂6号を用いる。本材料は、細粒分7%平均粒径0.25mm,均等係数2.3の{S-F}に分類される比較的粒径のそろった材料である。

物理および力学的性質を表-1.2.1に、粒径加積曲線を図-1.2.2に示す。

表-1.2.1 盛土材料（栃木県産日光珪砂6号）の物理・力学的性質

項 目		試験結果		備 考
物理一般	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	2.643		
	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ g/cm <sup>3</sup>	1.698		
	最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$ g/cm <sup>3</sup>	1.326		
粒度特性	礫分 2~75mm %	0		
	砂分 75 $\mu$ m~2mm %	97		
	シルト分 5~75 $\mu$ m %	3		
	粘土分 5 $\mu$ m未満 %			
	均等係数 $U_c$	2.09		
	曲率係数 $U_c'$	1.00		
	最大粒径 mm	0.850		
分類	分類名	細粒分まじり砂		
	分類記号	{S-F}		
透水係数	$k_{15}$ cm/sec (Dr=30%)	2.57 $\times 10^{-2}$ (e=0.863)		
	$k_{15}$ cm/sec (Dr=60%)	1.38 $\times 10^{-2}$ (e=0.731)		
三軸圧縮特性	供試体密度	Dr=30%	Dr=60%	圧密排水 試験
	粘着力 $c_d$ kN/m <sup>2</sup>	2.6	0.3	
	内部摩擦角 $\phi'$ 度	31.9	35.3	

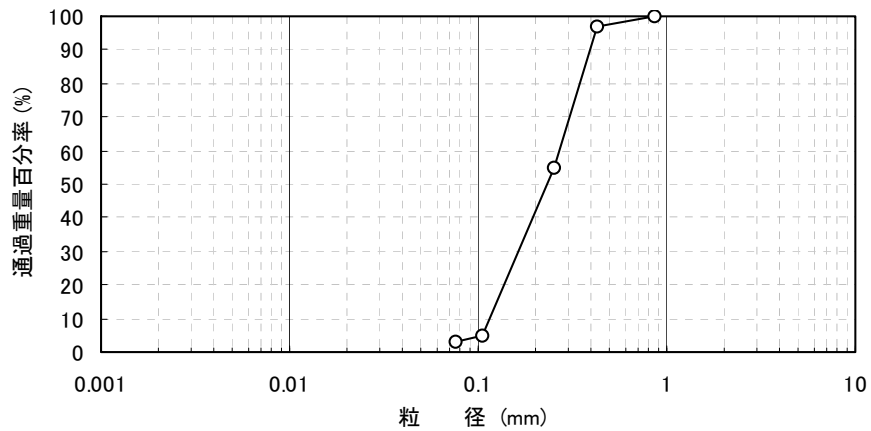


図-1.2.2 盛土材料の粒径加積曲線

### (3) 試験体の作製

本実験では、大型せん断土槽内に  $3.6\text{m} \times 10\text{m} \times 4.8\text{m}$  の実験地盤を作成した。大型せん断土槽への砂の投入については、隣接の砂ピットより土砂搬送装置を用いて空中落下法により砂の質量を計測しながら投入を実施した。砂の投入状況の写真を図 1.2.3 に示す。湿潤砂の撒き出し厚さを  $25\text{cm}$  として均一に敷き均し、プレートタンパーにより乾燥砂であるケース 1 では 2 回、湿潤砂であるケース 2、ケース 3 では 4 回締固めた。また、埋設物近傍や土槽フレーム端部は木だこを用いて人力にて締固めを実施した。締固め施工方法の模式図を図 1.2.4 に示す。盛土施工時の土の締固め程度は相対密度  $45\%$  程度を目標管理値とし、コアカッター法により各層毎に密度測定を実施した。また、併せて動的平板載荷試験により盛土地盤の均一性を確認するものとした。また、盛土終了後、注水終了後、加振終了後に盛土地盤の地盤強度を確認するためにスウェーデン式サウンディング、標準貫入試験（鉄研式コーン連続貫入試験）、小型動的貫入試験機（ミニラム）および土研式貫入試験機（簡易動的コーン貫入試験機）を行った。なお、土研式貫入試験機（簡易動的コーン貫入試験機）はケース 1 試験体ではおこなっていない。盛土施工に係わる調査・試験の内容を表-1.2.2 に示す。



図 1.2.3 砂の投入状況

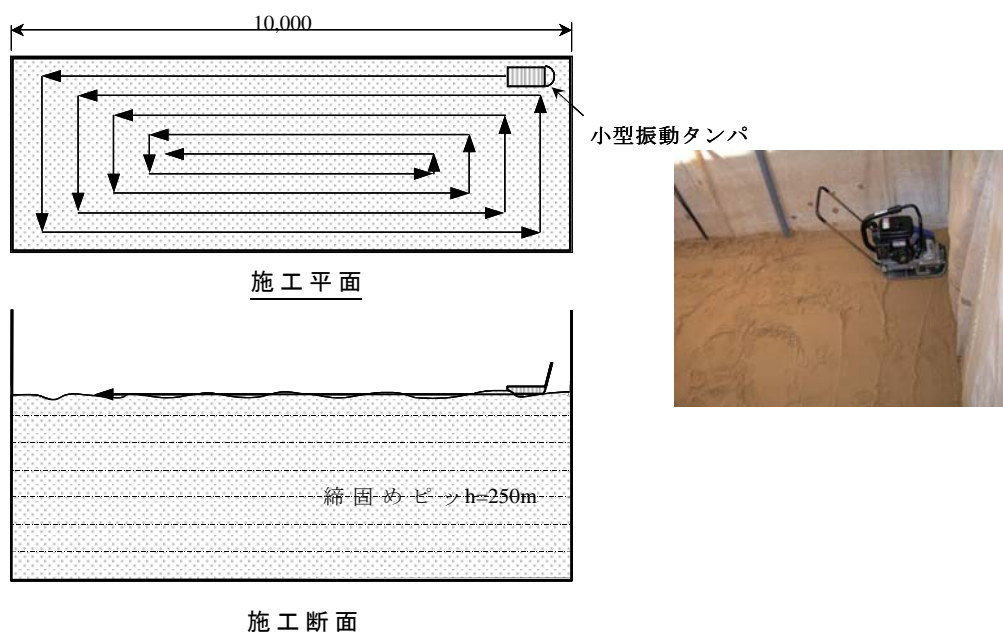


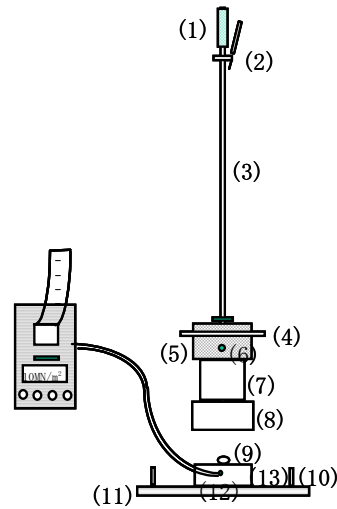
図 1.2.4 締固め施工方法の模式図



コアカッター法による密度測定状況

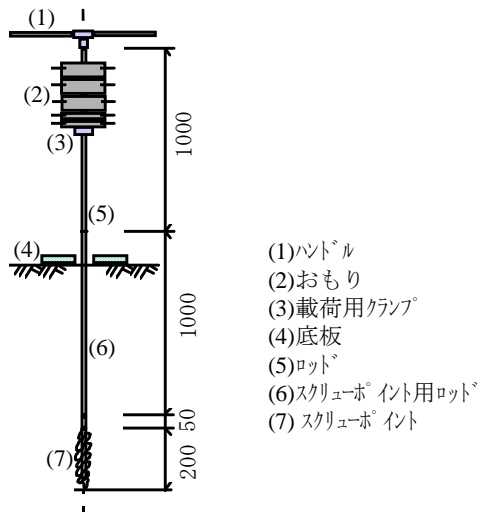


動的平板載荷試験の状況



- (1) クリップ
- (2) ウェイト引っ掛け装置
- (3) ガイロット
- (4) ウェイト用ハンドル
- (5) 10kgウェイト
- (6) ウェイト止め (安全装置)
- (7) 皿バネ部分
- (8) 横倒し防止装置
- (9) 中心球
- (10) 平板運搬用ハンドル
- (11) 300mm平板
- (12) 沈下計測器との連結ソケット
- (13) 負荷吸収ケース

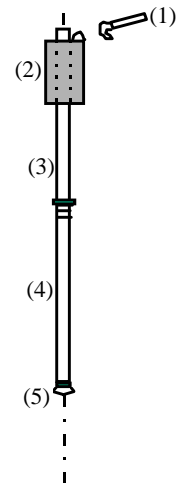
動的平板載荷試験の概要



- (1) ハンドル
- (2) おもり
- (3) 載荷用クランプ
- (4) 底板
- (5) ロッド
- (6) スクリューポイント用ロッド
- (7) スクリューポイント

(単位 : mm)

スウェーデン式サウンディング一般図



- (1) トンビ
- (2) おもり (63.5kg)
- (3) おもり用ロッド
- (4) ロッド
- (5) 先端コーン

動的コーン貫入試験一般図



スウェーデン式サウンディング



標準貫入試験



ミニラム

表一1.2.2 盛土施工に係わる調査・試験の内容

項目	目的	数量	備考
密度測定	盛土地盤の密度を確認し、作製地盤の締固め度とばらつきを把握する。	3点×10層 (@0.5m)	コアカッター法
動的平板載荷試験	盛土地盤の変形係数（動的）を確認し、地盤の均一性と地盤物性に関する情報を収集する。	3点×10層 (@0.5m)	
スウェーデン式サウンディング	作製した盛土地盤の地盤強度 (N <sub>sw</sub> 、N 値、N <sub>d</sub> 値)に関する情報を収集する。	2回	不飽和・飽和
標準貫入試験		1回	不飽和・飽和
小型動的貫入試験機(ミニラム)		1回	不飽和・飽和
土研式貫入試験機(簡易動的コーン貫入試験機)		2回	不飽和・飽和



#### (4) 注水方法及び飽和度の管理方法

作成地盤への注水は、ケース 1 は水道水、ケース 2 ではマイクロバブル水、ケース 3 では脱気水を注水した。いずれも、せん断土槽の底盤からの注水である。ケース 1 ではせん断土槽に付帯せられている注水装置にサニーホースを介して塩化ビニル管を用いて注水をおこなった。ケース 2 及びケース 3 ではマイクロバブルジェネレータを使用して注水をおこなった。注水状況の写真を図 1.2.5 に示す。

試験体の飽和度の管理方法として 4 種類の測定をおこなった。作成地盤の飽和度管理項目を表-1.2.3 に示す。具体的には、注水量の管理による方法、ADR による方法、TDR による方法、比抵抗による方法による 4 種類である。飽和度管理には TDR の値を用いておこなった。また、ケース 3 試験体は、出来るだけ飽和度を上げる事が目的であったので脱気水を注水した。脱気水は脱気ポンプを使用して作成し管理目標値は DO 値(溶存酸素濃度)3ppm 以下とした。脱気水の作成には ASP 型脱気ポンプ ((株)横田製作所製)を使用した。作成方法は、下写真に示すように真空ポンプで減圧をする事で脱気水を作成し、その後検査用として予備タンク一定量貯蔵し DO 値を測定した。予備タンクの脱気水が管理許容値の 3ppm を下回った事を確認した後、タンク(脱気水)に貯蔵しマイクロバブルジェネレータを介して土槽に注水した。ADR、ADR-ECO、TDR 測定位置を図 2.2.8 に示す。

表一1.2.3 作成地盤の飽和度管理項目

計測内容		計測項目	目的
注水流量		注水量	注水流量を確認する
		排水量	土槽排水量を確認する
飽和度	土壌水分系	ADR	注水前、注水中、注水後の飽和度の変化を確認する。
		ADR-ECO	
	TDR		
	比抵抗	比抵抗	

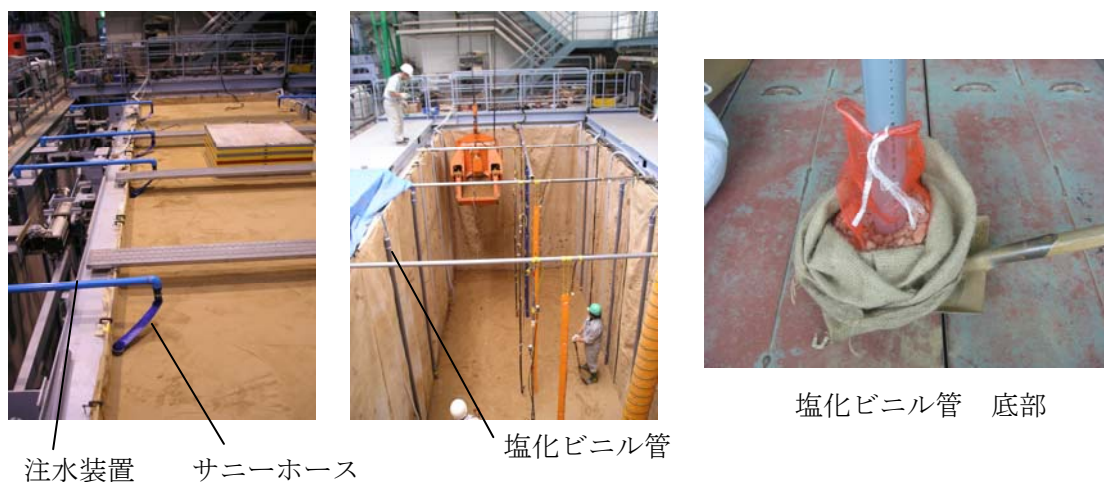


図 1.2.5(1) 注水状況の写真(ケース 1)



マイクロバブルジェネレーター



図 1.2.5(2) 注水状況の写真

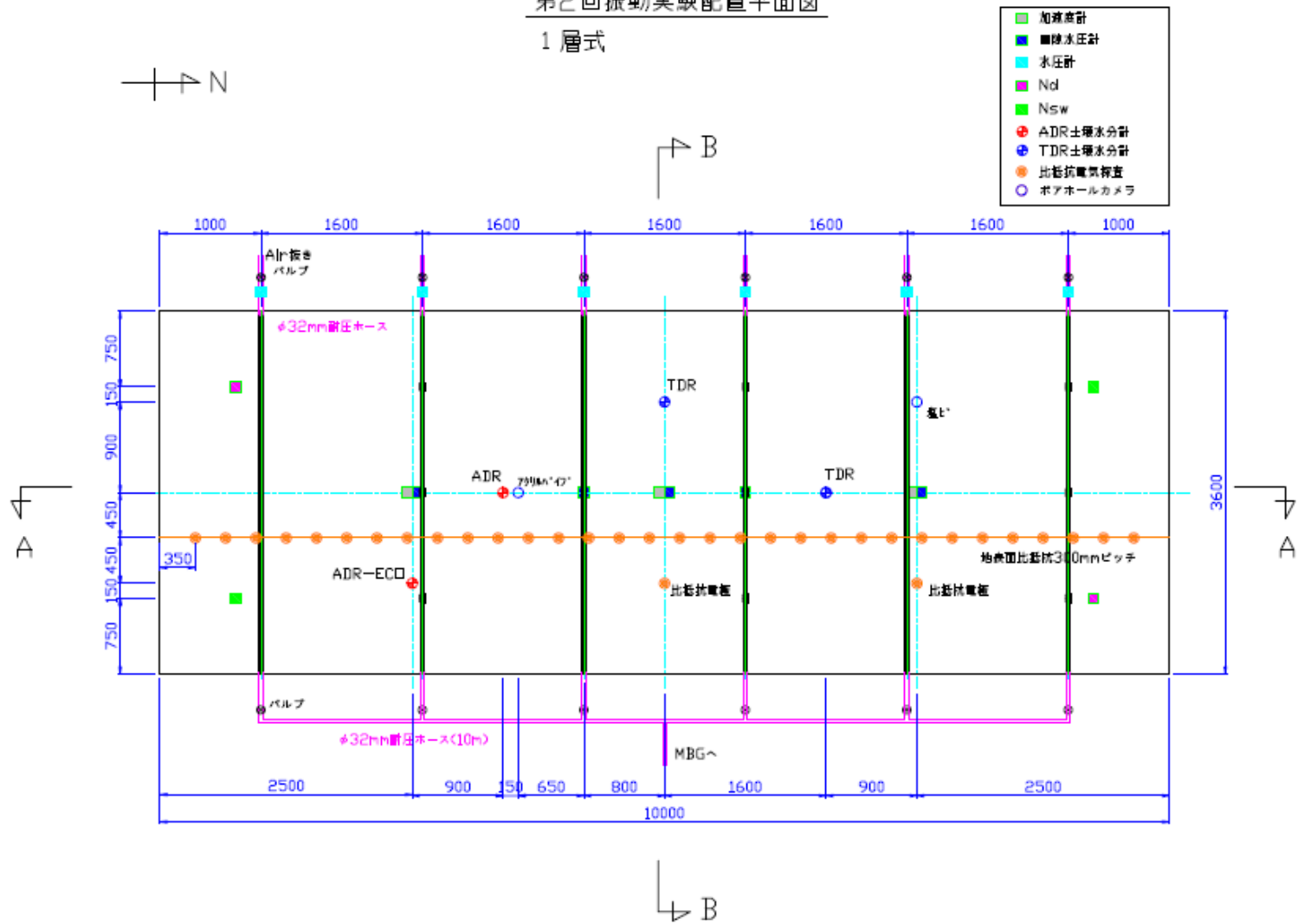


- 真空ポンプ
- 逆止弁
- ポンプ (脱気水)
- タンク (脱気水)
- 予備タンク (脱気水)
- 制御盤

図 1.2.5(3) 注水状況の写真(ケース 3)

## 第2回振動実験配置平面図

1層式



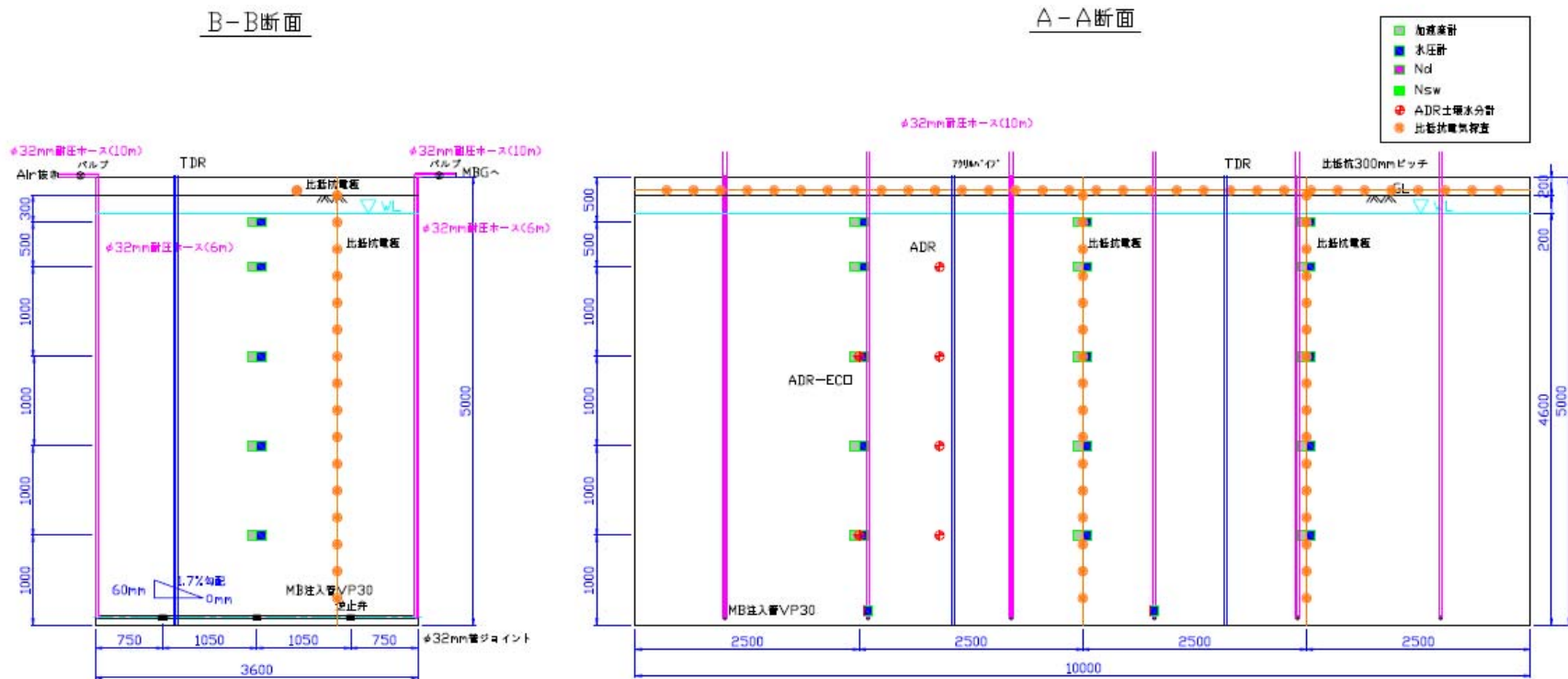
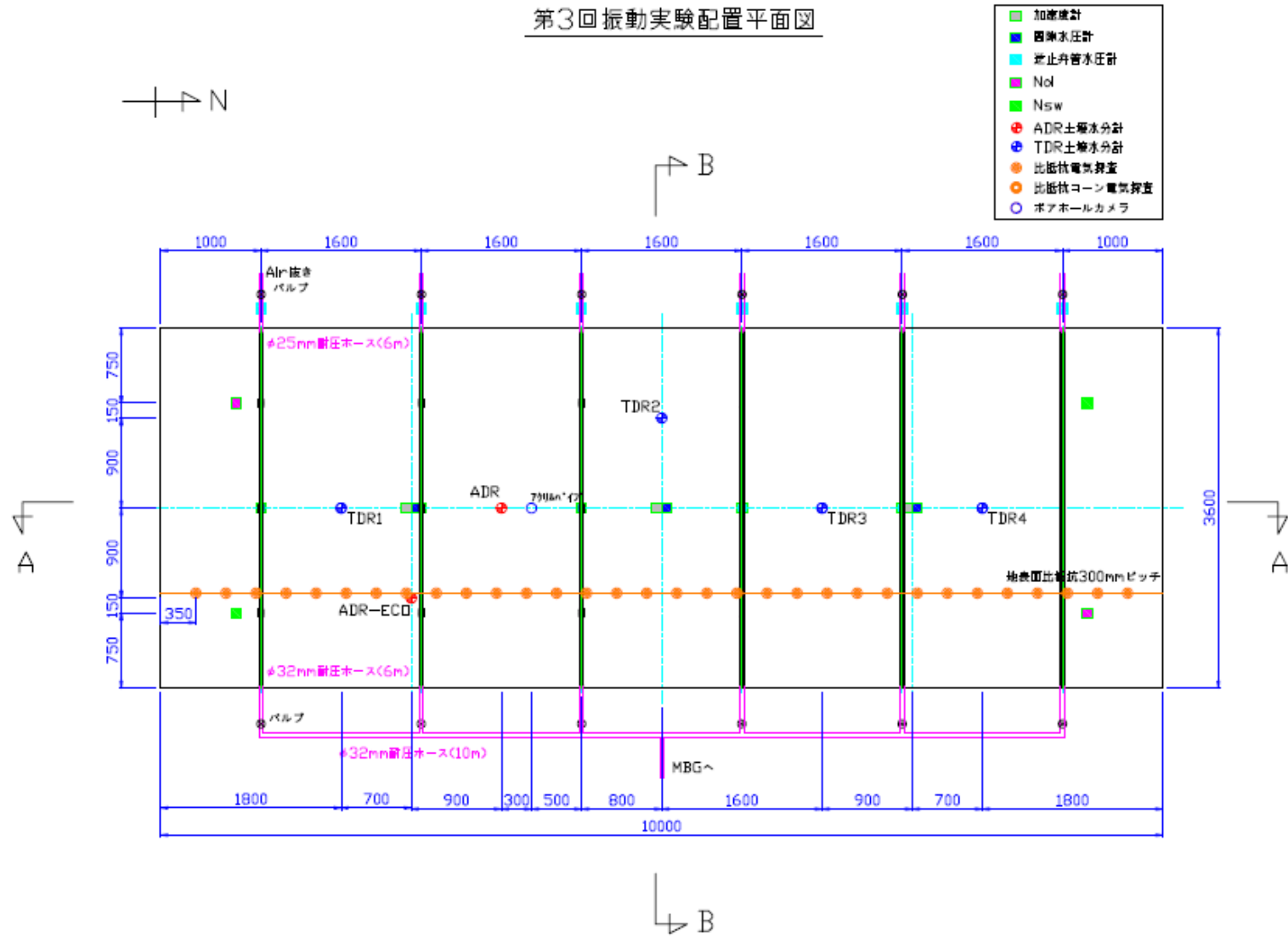


図 1.2.6(1) ADR、ADR-ECO、TDR 測定位置(ケース 2)

第3回振動実験配置平面図



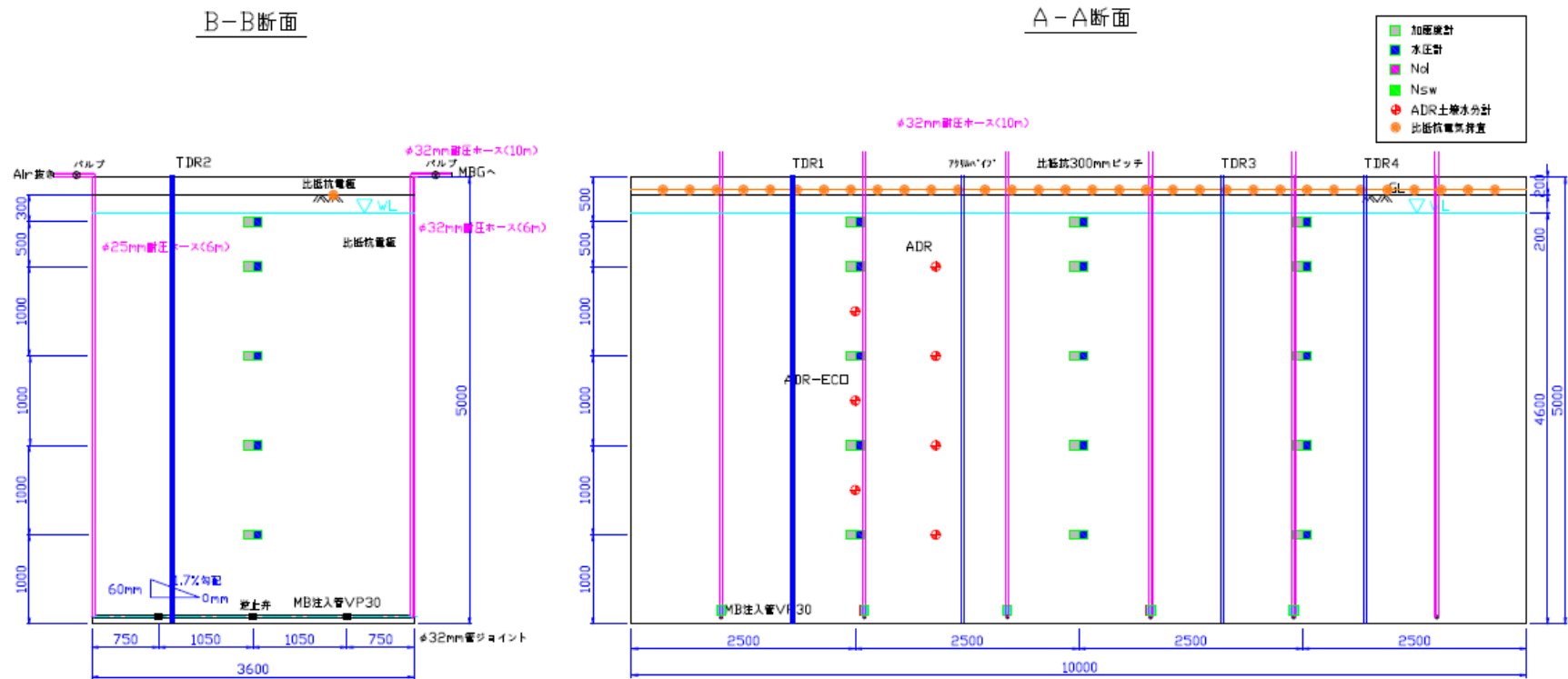


図 1.2.6(2) ADR、ADR-ECO,TDR 測定位置(ケース 3)

(5) フーチング模型と浮き上がり埋設物

フーチング模型の設置にはビジュアル化、撮影対象となる建築基礎模型の検討を目的としている。錘には5cmの帯を配置してある。

錘の仕様・寸法・質量は以下に示す。

仕様：外周部は4面が鋼板（ $t=9\text{mm}$ ）、内部はコンクリート、500mm 間隔の貫通孔有

寸法： $B \times W \times H=1300 \times 1300 \times 500\text{mm}$

質量：約 2.5 t（25kN）：15kN/m<sup>2</sup>

数量：1台



フーチング模型



浮き上がり埋設物

## 2.計測方法

### 2.1 計測内容および計測項目

計測内容および計測項目を表-2.1.1 に示す。

計測位置図を図-2.1.1 に示す。

表-2.1.1 計測内容および計測項目

計測内容		計測項目	数 量	目 的
各深度の水圧		水圧計	15 3 側線 5 深度	各深度（1 m間隔）における水圧の上昇や消散を確認する。
各深度の応答加速度		加速度計	29	各深度（1 m間隔）における応答加速度の大きさを確認する。併せて、フーチングに対する入力大きさも確認する。（土槽全体の挙動確認含む）
各層のせん断ひずみ		変位計	21	加振時の地盤のせん断ひずみの大きさを確認する。併せて、フーチングの沈下量を非接触変位計を使用して確認する。
地表面沈下	レベル測定	(加振後)	8	加振後の地表面沈下を測定し、加振後の盛土状態(密度変化)を確認する。併せて、フーチングの変動量を確認する。
気泡の可視化		ボアホールカメラ	1	地盤内の気泡の状況を確認する。



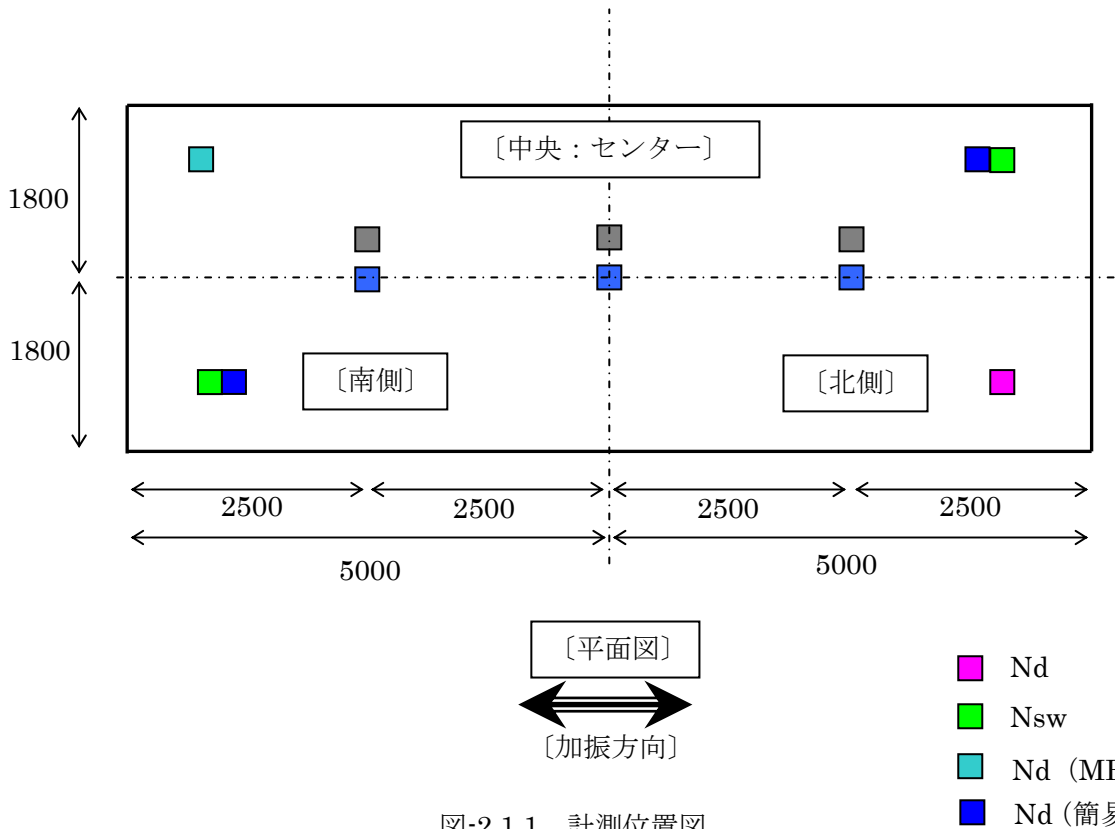
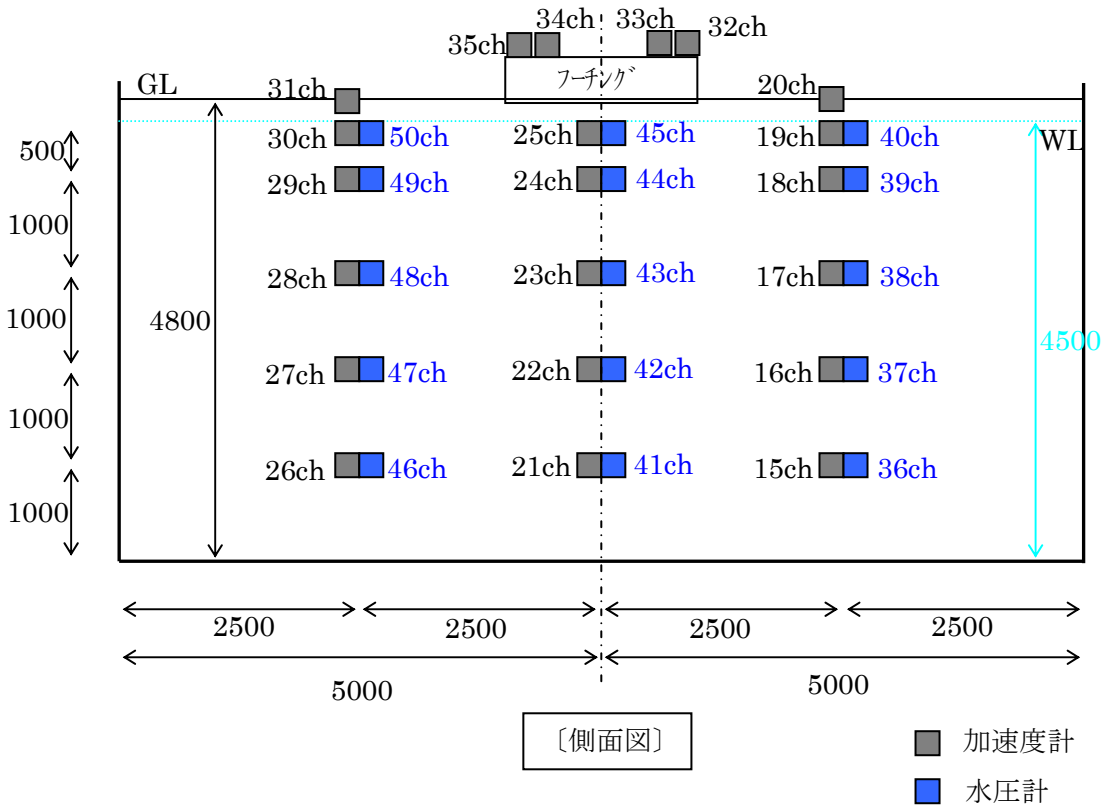


図-2.1.1 計測位置図

## 2.2 計測器の設置方法

- 水圧計：鉄筋棒などを用いて所定の深度・位置に固定する。
- 加速度計：サニーホースなどを用いて所定の深度・位置に固定する。



### 3. 加振条件

加振条件を表-3.1.1 に示す。

加振は、スイープ加振およびステップ加振を行う。スイープ加振は、試験装置の共振振動数を求めるため、10gal 程度の振幅一定の正弦波を 0.1Hz~10Hz に変化させて基盤に入力し、応答加速度を確認する。また、ステップ加振は、入力加速度振幅の大きさを増加させる段階加振とし、入力波形は正弦波とする。ケース 1 に関しては 50gal の加振はおこなっていない。

表-3.1.1 加振条件

加振条件	スイープ加振		ステップ加振				備考
	周波数	入力加速度	ステップ°	周波数	入力加速度	波形	
無対策	0.1~10Hz	10gal	①	2.0Hz	50gal	正弦波	20 波
			②	2.0Hz	100gal	正弦波	
			③	2.0Hz	150gal	正弦波	

データ収録は、サンプリング周波数を 100Hz、収録時間を 3 分とする。

また、加振収録終了後は静的にインターバル測定を行い、水圧の消散を確認する。

#### 4.実験結果

##### 4.1 実験地盤の状態

本実験では、液状化地盤として相対密度  $D_r=45\%$  を目標とし地盤作成をおこなった。地盤作成終了時におけるコアカッター法による密度測定結果を表-4.1.1、図 4.1.1 に示す。表-4.1.1 中の数値は得られた実験値の全ての平均値である。相対密度はケース 1 で 43.5%、ケース 2 で 45.7%、ケース 3 では 44.5%で試験体間では大きな差は見られず概ね管理目標値の 45%程度の $\pm 2\%$ の範囲で収まっている。飽和度はケース 1 で 8.0%、ケース 2 では 21.4%、ケース 3 では 26.7%であった。

表—4.1.1 コアカッター法による密度測定結果

試験項目		ケース 1	ケース 2	ケース 3
密度管理	湿潤密度 (gf/cm <sup>3</sup> )	平均 1.501	1.568	1.588
	乾燥密度 (gf/cm <sup>3</sup> )	平均 1.466	1.474	1.469
	含水比(%)	平均 2.4	6.4	8.1
	相対密度(%)	平均 43.5	45.7	44.5
	間隙比	平均 0.80	0.79	0.80
	飽和度(%)	平均 8.0	21.4	26.7

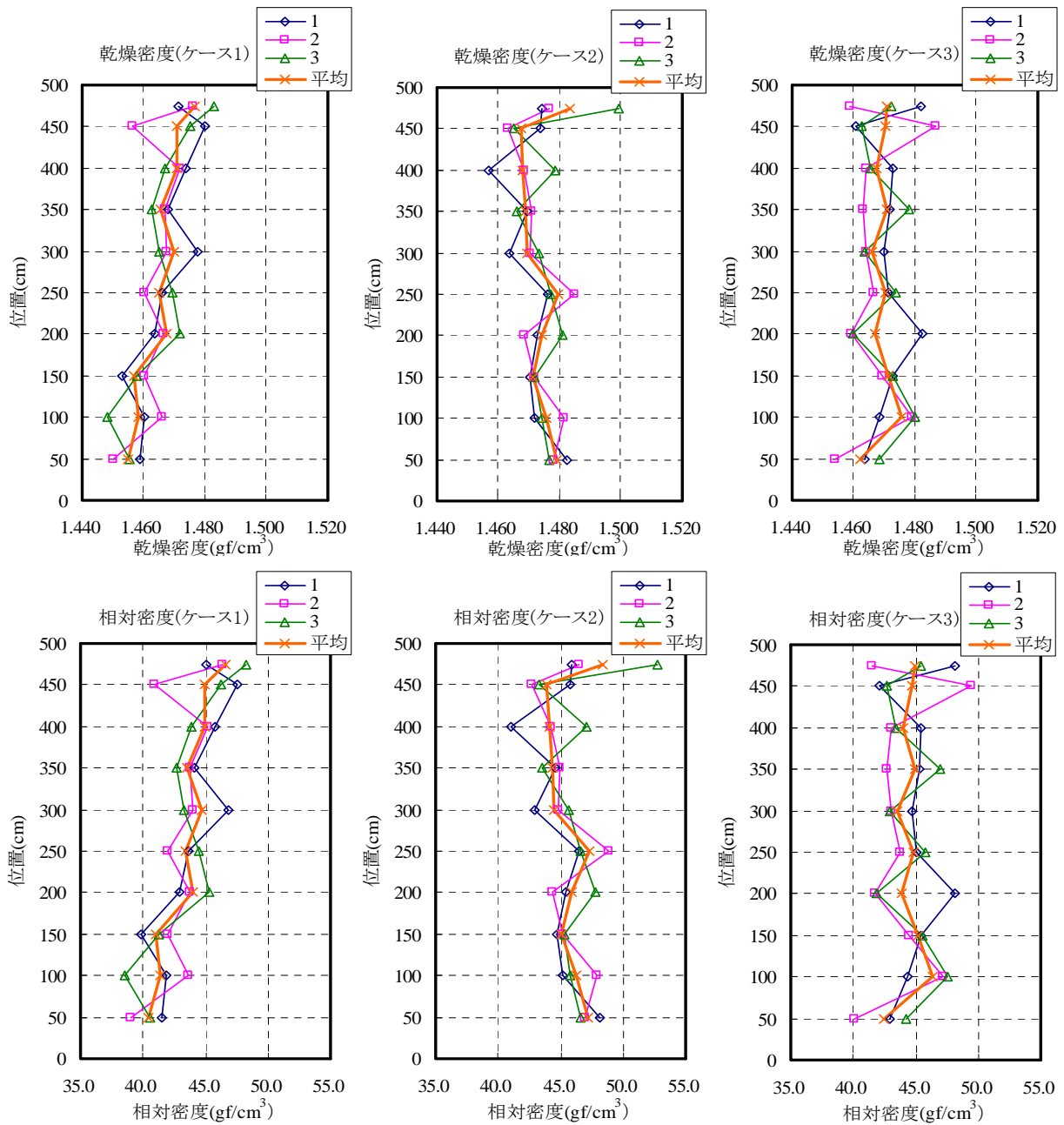


図-4.1.1 コアカッター法による密度測定結果

地盤作成時、飽和後、加振後に実施した地盤調査結果を表-4.1.2に示す。表-4.1.2中の数値は全深度の平均値としている。標準貫入試験における注水前の平均値の結果として、ケース1では5.6、ケース2では6.8、ケース3では6.7程度であった。注水後は、ケース1で1.8、ケース2で4.8、ケース3では5.9程度であった。

表4-1.2より、標準貫入試験結果のN値と小型動的貫入試験結果のNd値は近い値を示している。一方、スウェーデン式サウンディングの換算N値、簡易動的コーン貫入試験によるN値は、標準貫入試験、小型動的貫入試験に比べ大きい値を示した。

表一4.1.2 作製地盤の管理結果

試験項目				ケース 1		ケース 2		ケース 3	
地盤 調査	スウェーデン式サウンディング換算 N 値	平均 (注水前)	平均 (注水後)	7.9	3.1	13.2	5.7	12.5	4.9
	標準貫入試験 N 値	平均 (注水前)	平均 (注水後)	5.6	1.8	6.8	4.8	6.7	5.9
	小型動的貫入試験 (ミニラム) Nd 値	平均 (注水前)	平均 (注水後)	5.1	2.2	6.0	3.9	6.5	4.2
	土研式貫入試験 (簡易動的コーン貫入試験)	平均 (注水前)	平均 (注水後)	-	-	10.3	4.6	12.0	9.3

## 4.2 飽和度管理結果

試験体の飽和度の管理結果を表-4.2.1に示す。

TDRによる飽和度結果(ケース2とケース3の比較)を図-4.2.1に示す。表4-2.1中のADRの計測時期はケース2においては2008年11月17日16時時点の結果、ケース3は2009年1月26日17時時点の結果である。ADR-ECOの結果としてケース2は2008年11月17日16時時点の結果、ケース3は2009年1月26日10時の結果である。TDRの測定は土槽底盤から200mmピッチで測定し表中のデータは土槽底盤+300mm以下を除いた平均値である。なお、ジョイント部のデータは削除している。計測時期はSweep加振前のデータとしている。

ADRによる飽和度の結果として、ケース1では81.1%、ケース2では76.2%、ケース3では79.8%であった。ADR-ECOによる飽和度の結果はケース2では90.6%、ケース3では93.2%である。TDRによる飽和度の結果はケース2では87.3%、ケース3では91.2%であった。いずれの計測方法においてもケース2とケース3の飽和度の比較を行うとケース2の方が低い値であった。

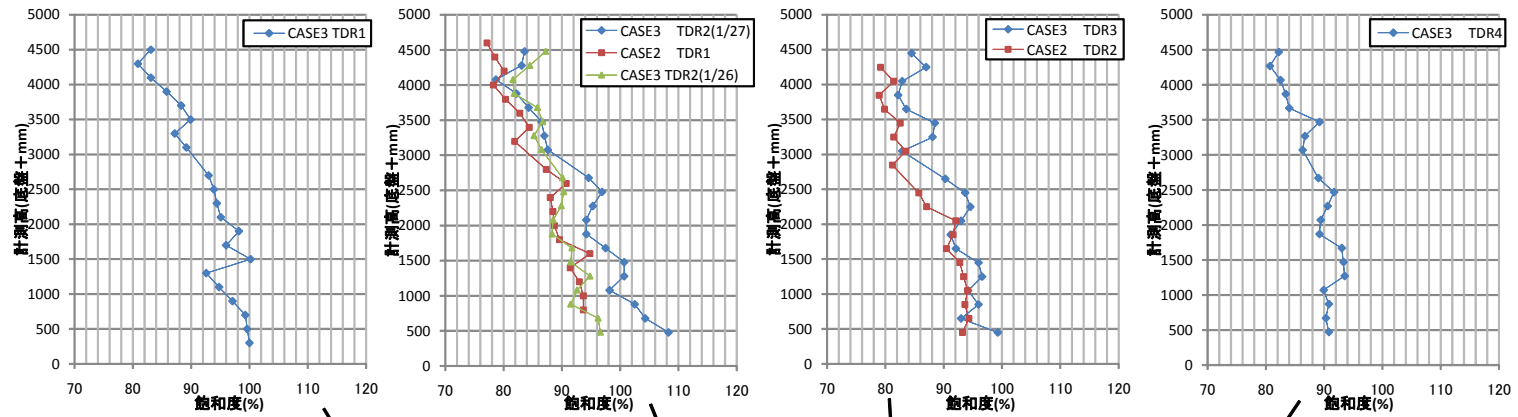
表-4.2.1 飽和度の管理結果

管理項目		ケース1	ケース2	ケース3
ADRによる 飽和度(%)	GL-0.8m	81.5	78.7	91.4
	GL-1.8m	83.3	83.0	78.3
	GL-2.8m	80.1	65.1	64.9
	GL-3.8m	79.4	78.0	84.4
	平均	81.1	76.2	79.8
ADR-ECO による飽和度 (%)	GL-1.3m	-	87.7	96.1
	GL-2.3m	-	95.2	95.0
	GL-3.3m	-	88.9	88.4
	平均	-	90.6	93.2
TDRによる 飽和度(%)	TDR1	-	87.4	92.5
	TDR2	-	87.2	92.2
	TDR3	-	-	91.7
	TDR4	-	-	88.3
	平均	-	87.3	91.2

ADR：ケース2は2008年11月17日16時時点の結果、ケース3は2009年1月26日17時時点の結果である。

ADR-ECO：ケース2は2008年11月17日16時時点の結果、ケース3は2009年1月26日10時の結果である。

TDR：土槽底盤+300mm以上のデータの平均値である。なお、ジョイント部のデータは削除している。また、Sweep加振前のデータとした。



土槽底盤+300mm以上のデータを記載した。ジョイント部のデータは削除している。

CASE3のデータについて Sweep加振 1/27である。測定日はSweep加振の前日のデータである。TDR2のみSweep加振日(1/27)のデータを併せて示す。

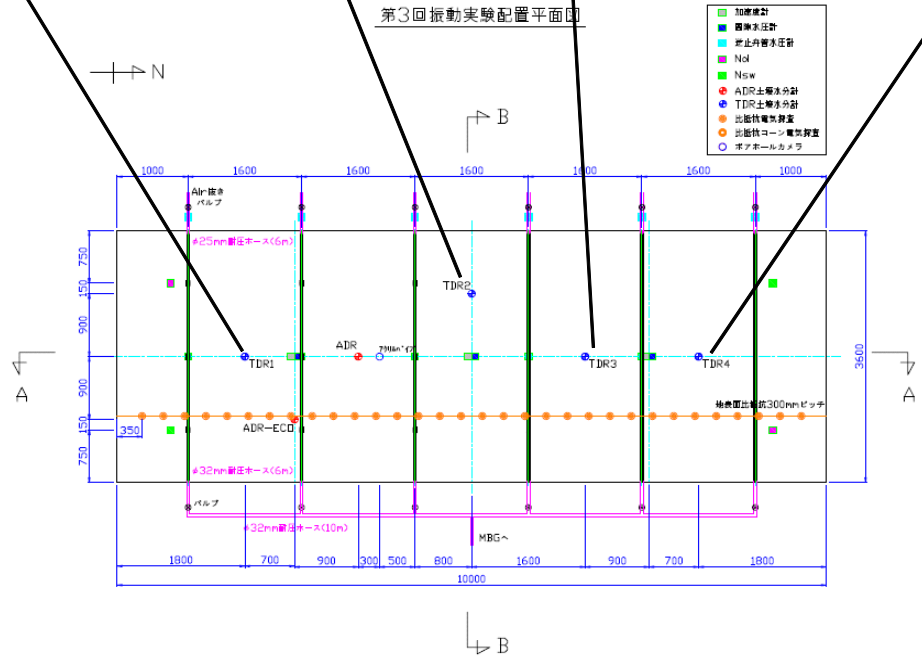


図 4.2.1(1) TDR による飽和度結果(ケース 2 とケース 3 の比較)



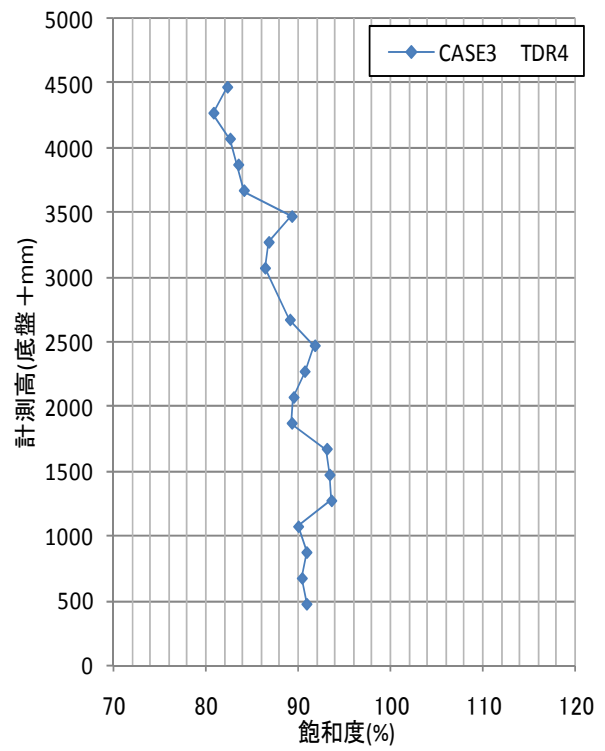
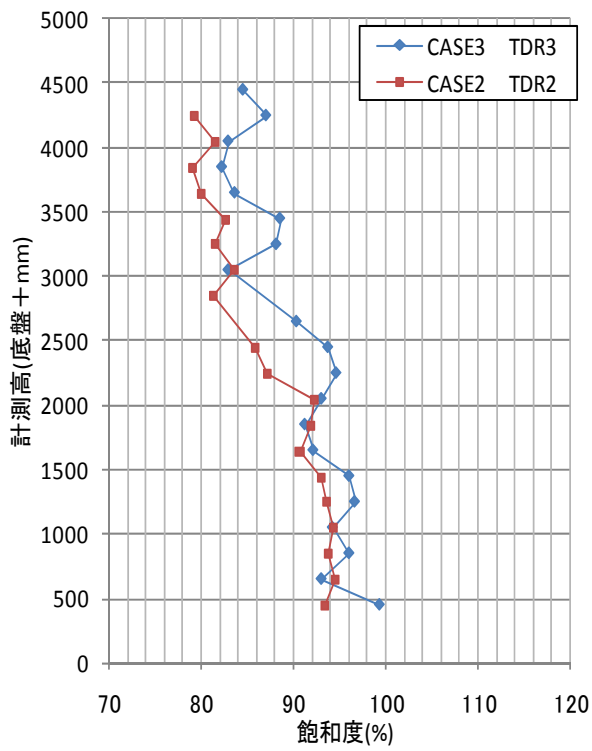
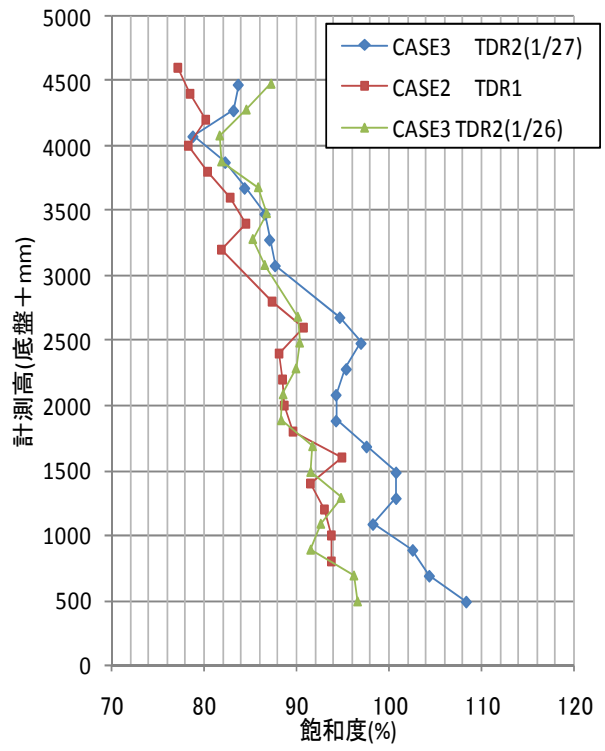
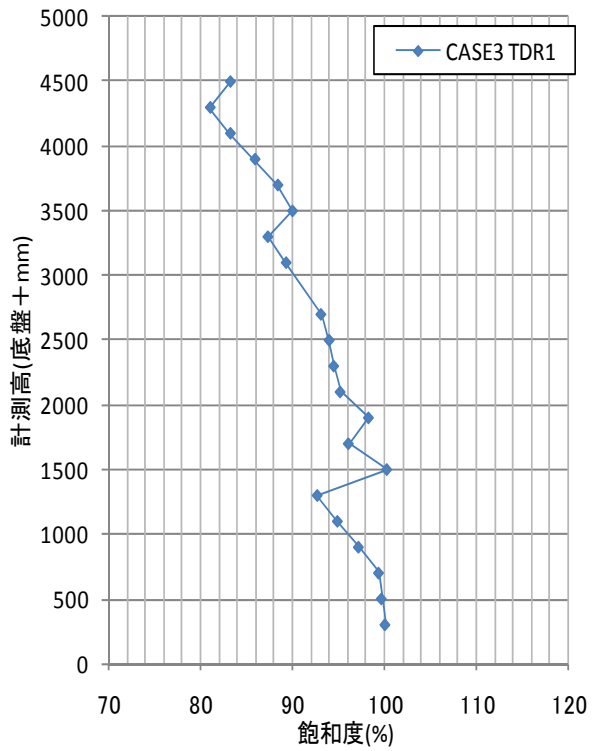


図 4.2.1(2) TDR による飽和度結果(ケース 2 とケース 3 の比較)

## 5. 実験結果

### 5.1 地盤の応答加速度特性

地表面における最大応答加速度結果を表 5.1.1 に深度ごとの時刻歴変化（地盤中央部）を図 5.1.1 に示す。

表 5.1.1 中の値より、振動台の最大加速度は目標とした加速度と概ね近い値となっている。また、地表面の加速度は振動台の加速度に比べ増幅している。特徴的なのはケース 3、150gal の結果で、図 5.1.1 (6) のでは入力振動が深い位置で急速に減衰してしまっている事がわかる。

表-5.1.1 最大加速度の結果

計測項目		ケース 1	ケース 2	ケース 3	
最大加速度 (gal)	入力加速度 50gal	振動台	—	60	76
		地表面	—	93	90
	入力加速度 100gal	振動台	113	99	127
		地表面	173	183	199
	入力加速度 150gal	振動台	168	162	179
		地表面	458	308	181

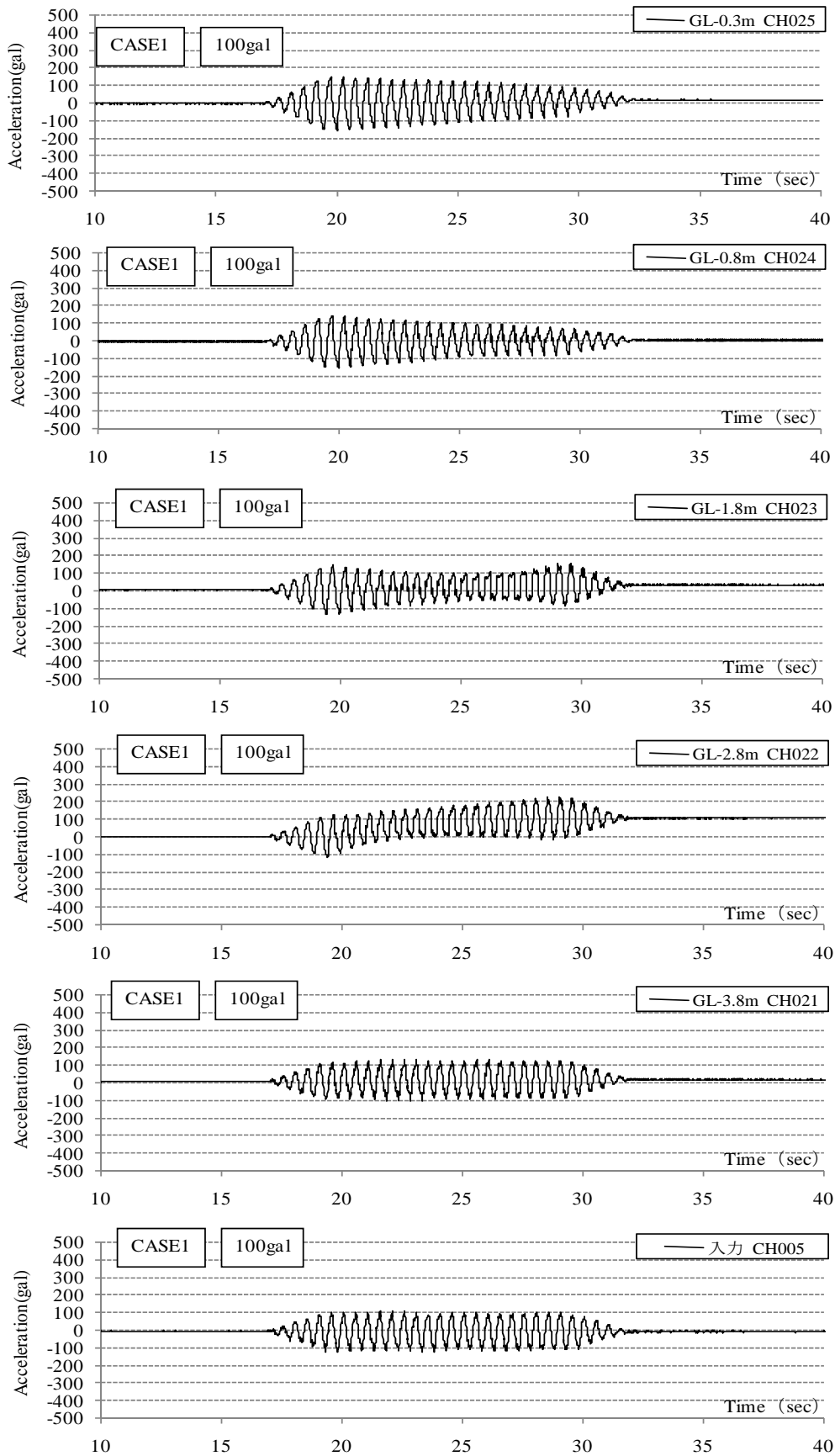


図 5.1.1(1) 地盤中央における応答加速度時刻歴(ケース 1、100gal)

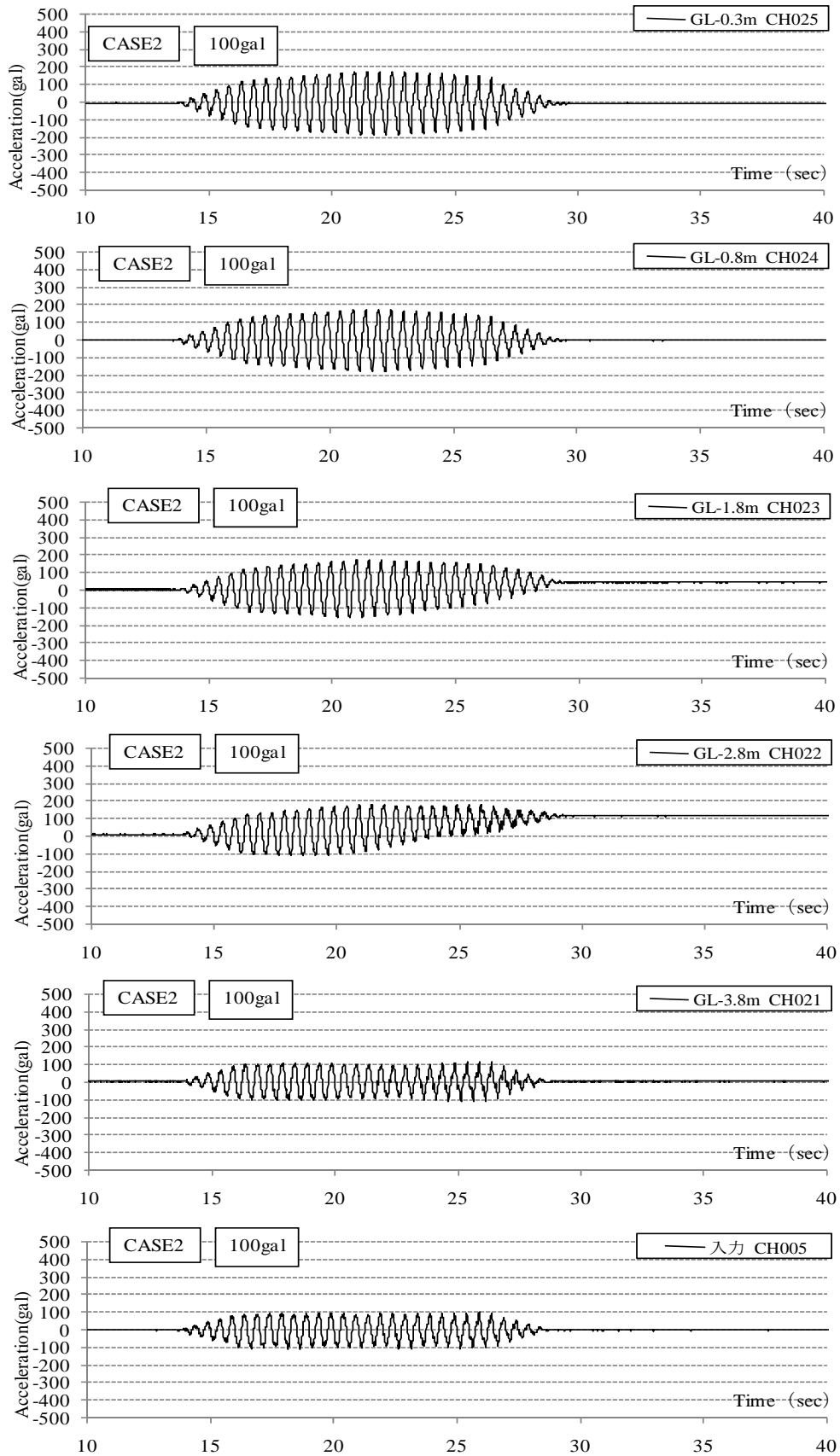


図 5.1.1(2) 地盤中央における応答加速度時刻歴(ケース 2、100gal)

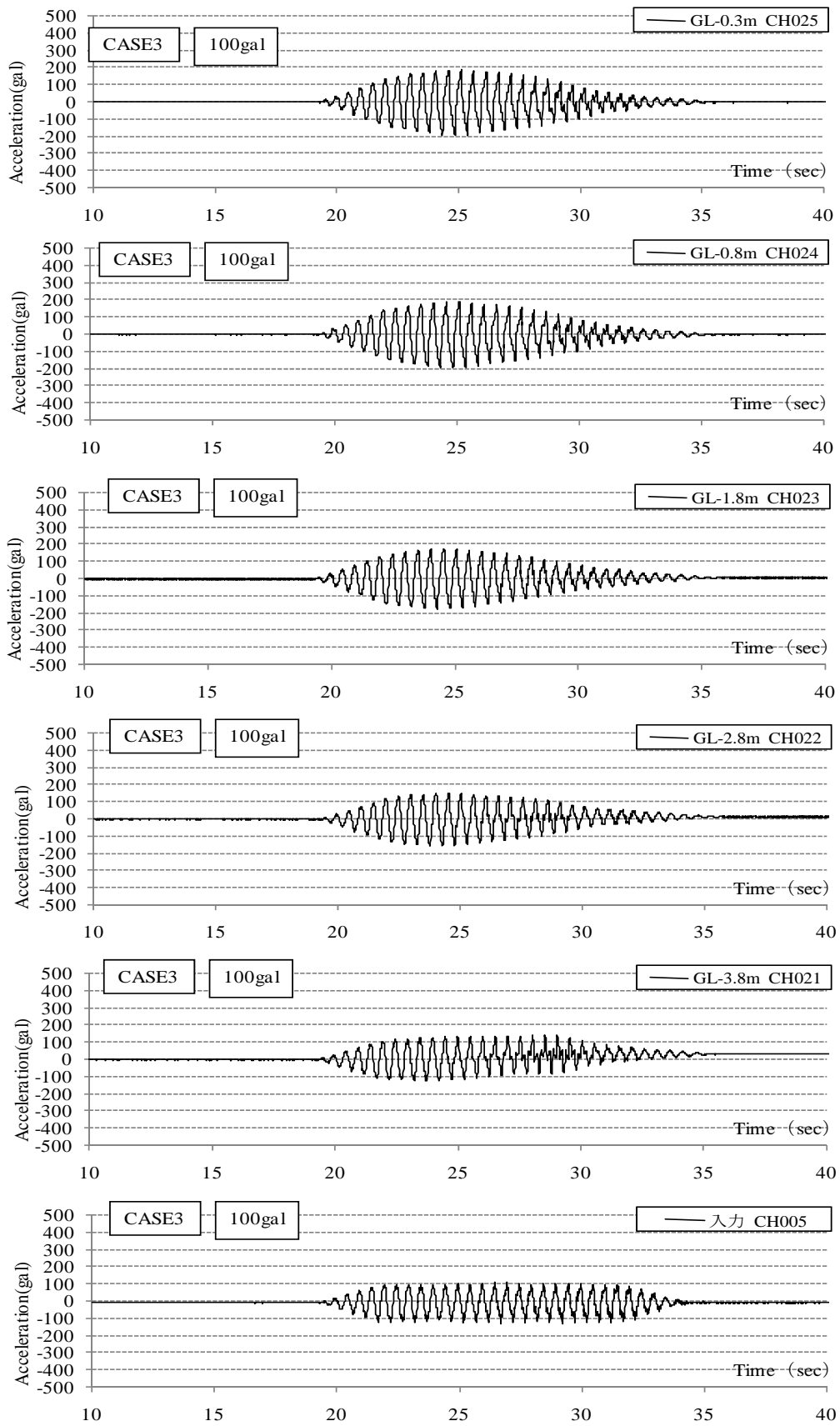


図 5.1.1(3) 地盤中央における応答加速度時刻歴(ケース 3、100gal)

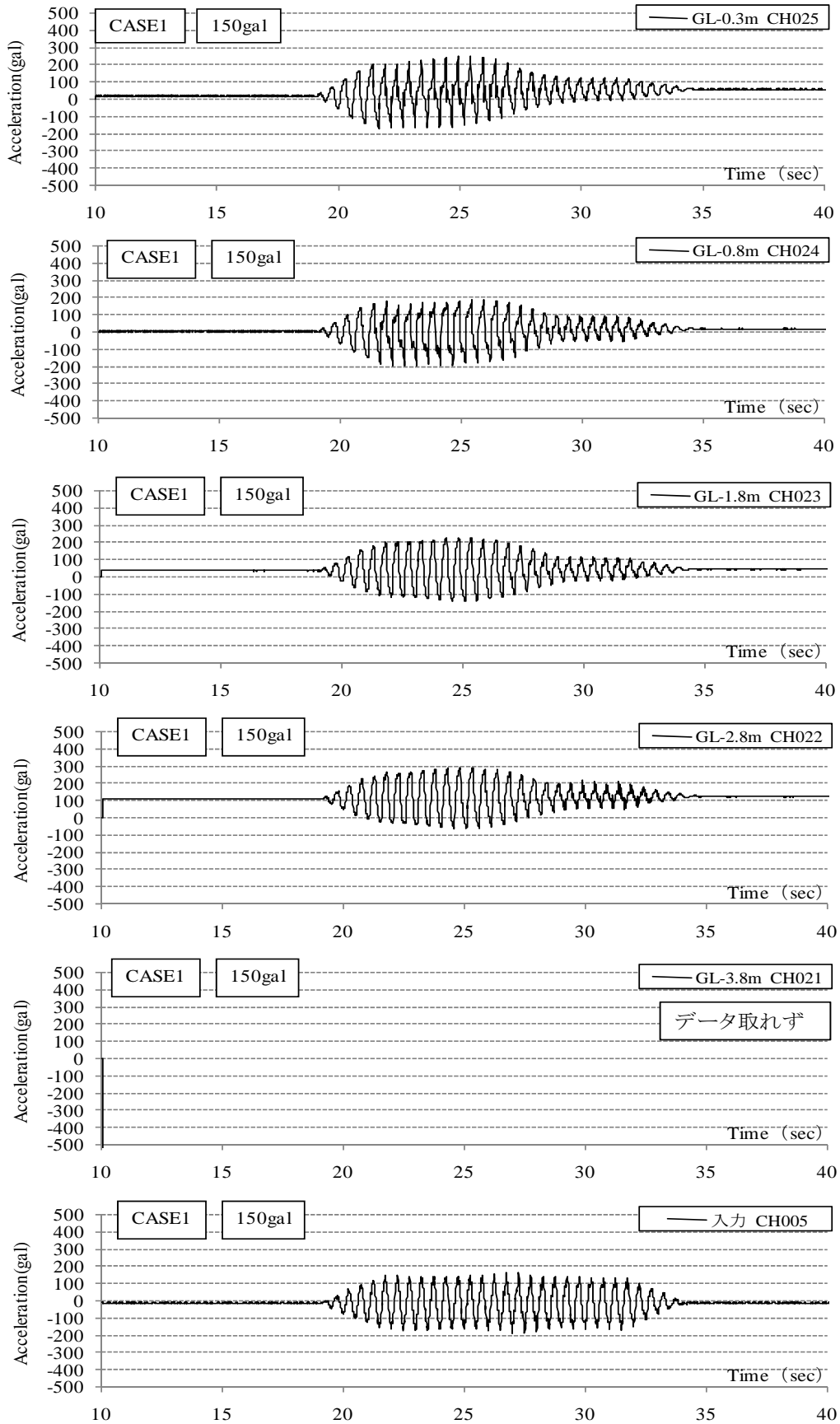


図 5.1.1(4) 地盤中央における応答加速度時刻歴(ケース 1、150gal)

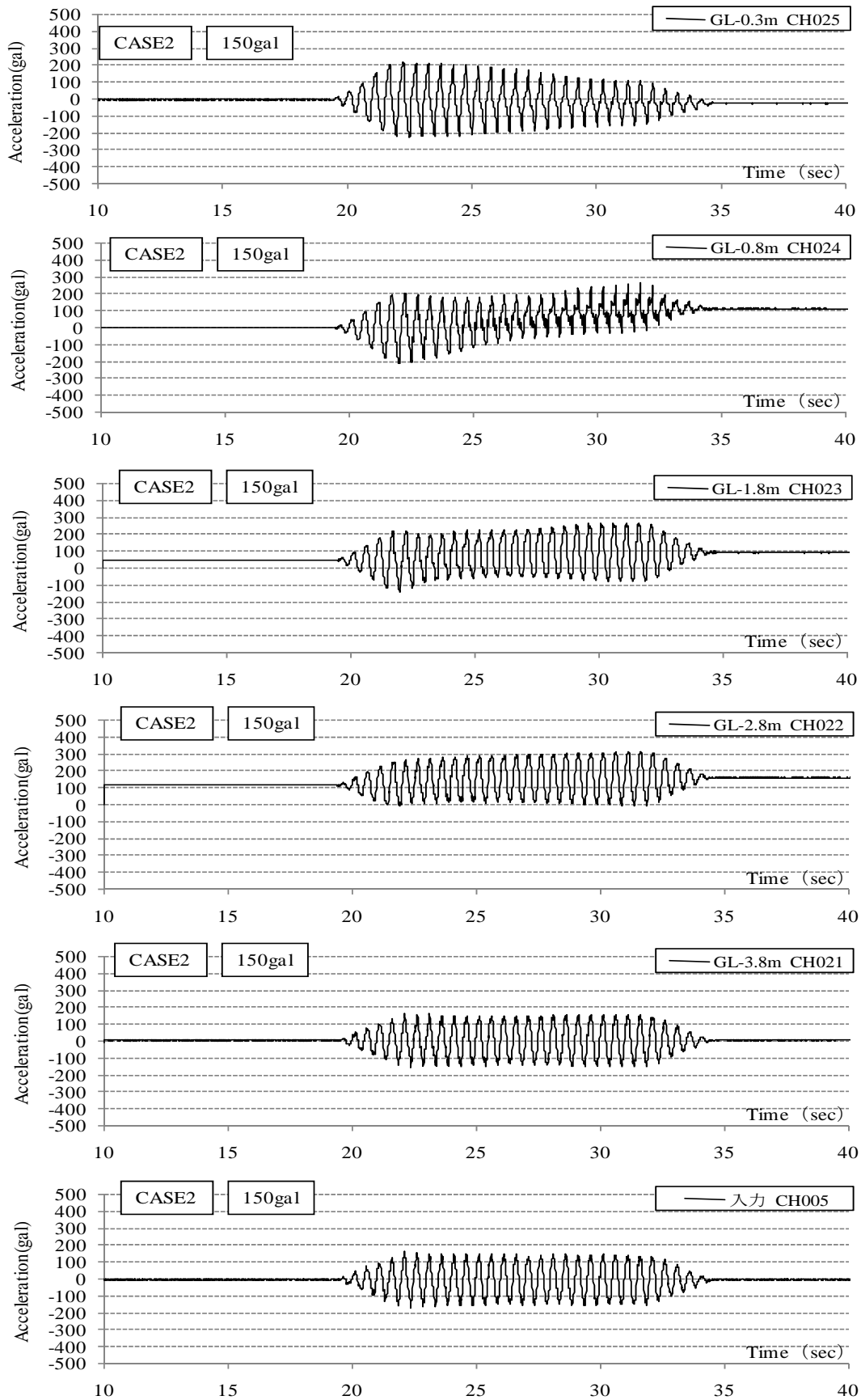


図 5.1.1(5) 地盤中央における応答加速度時刻歴(ケース 2、150gal)

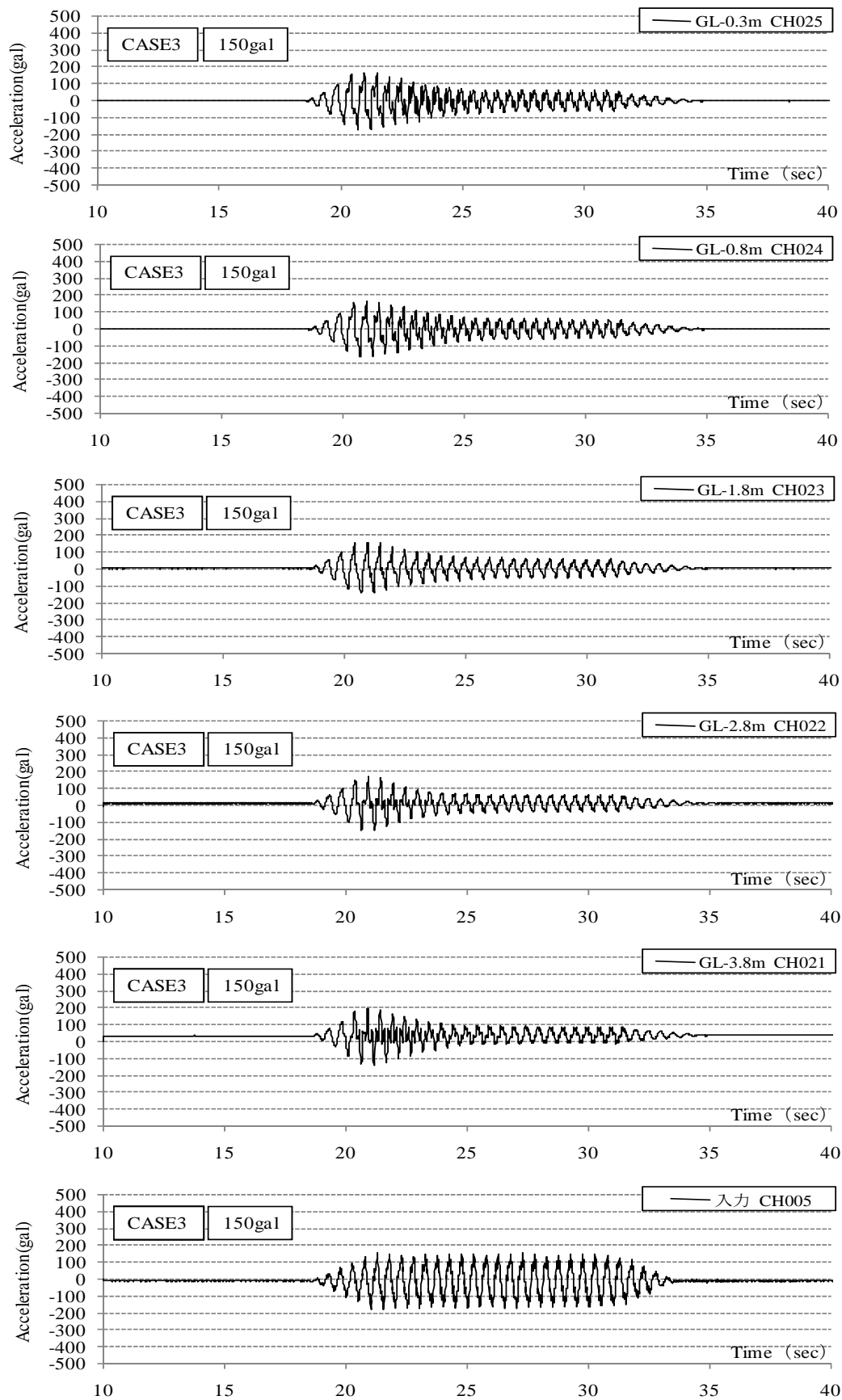


図 5.1.1(6) 地盤中央における応答加速度時刻歴(ケース 3、150gal)



## 5.2 過剰間隙水圧及び水圧比の結果

地盤中央における過剰間隙水圧の深さごとの時刻歴結果を図 5.2.1 に過剰間隙水圧「比」の結果を図 5.2.2 に示す。ケース 2 の水圧の上昇はケース 1、ケース 3 に比べ緩やかな傾向である。また、ケース 1 では地表面に近い深度の水圧上昇が著しいのに対して、逆にケース 2 及びケース 3 では深度の深い場所で水圧の上昇が大きい。特にケース 3 では L-3.8m の水圧上昇が大きいのが特徴的である。

また、図 5.2.3 及び図 5.2.4 は、過剰間隙水圧及び過剰間隙水圧「比」の最大値コンターをケース 2 とケース 3 について、作成したものである。マイクロバブル水注入地盤では、100gal 入力では深さの中央部が水圧比 0.5 程度でやや緩んでいるが液状化には至っていないが 150gal 入力では地表付近が水圧比 1.0 近くに上昇し液状化が推定される。これに対し、脱気水注入地盤では、100gal 及び 150gal 入力とも底部で水圧比が高い値を示し、上部の水圧比は低いままであり、液状化が底部で発生して上部に達しなかったものと推察される。

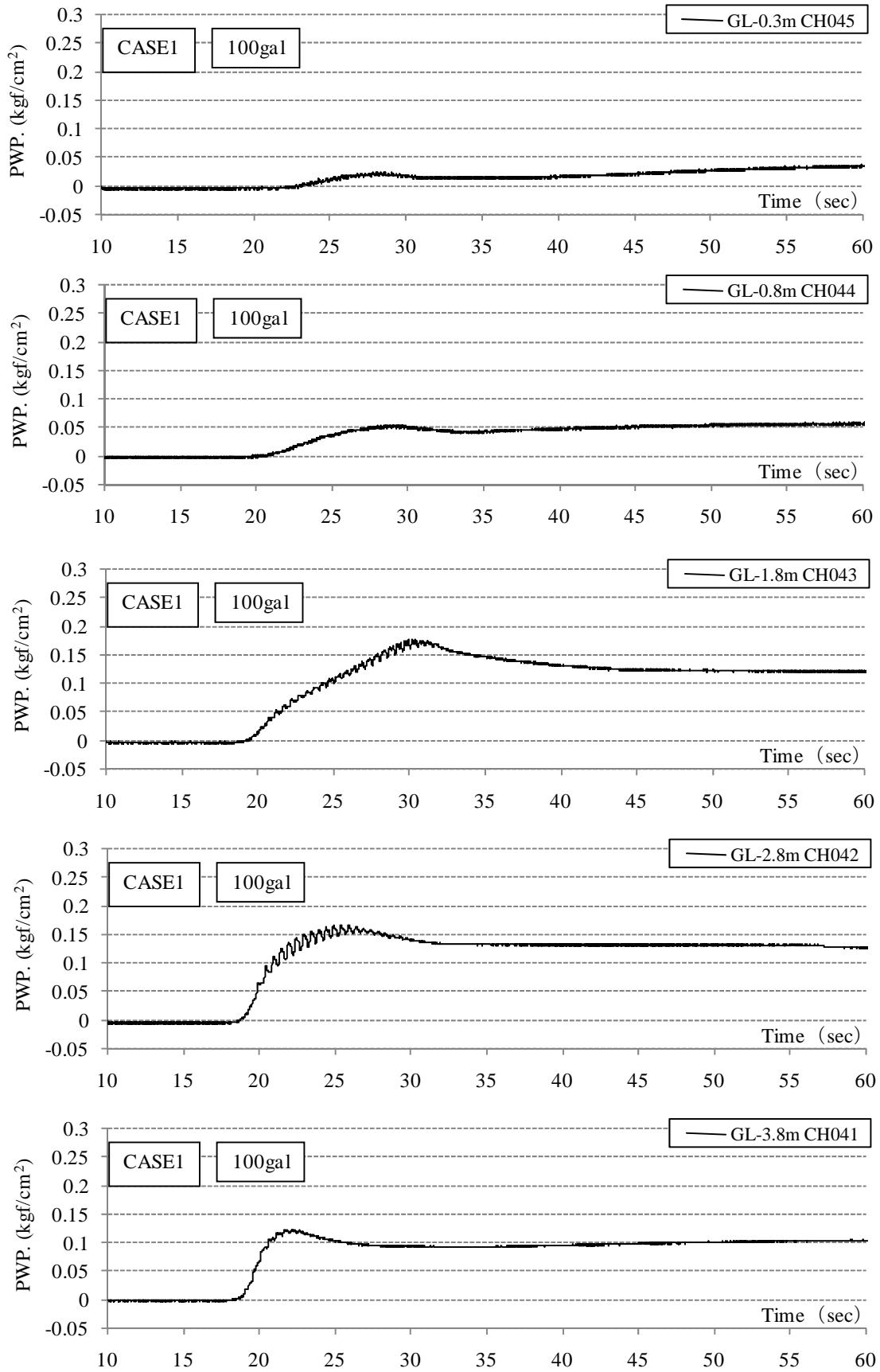


図 5.2.1(1) 過剰間隙水圧の時刻歴結果(ケース 1、100gal)

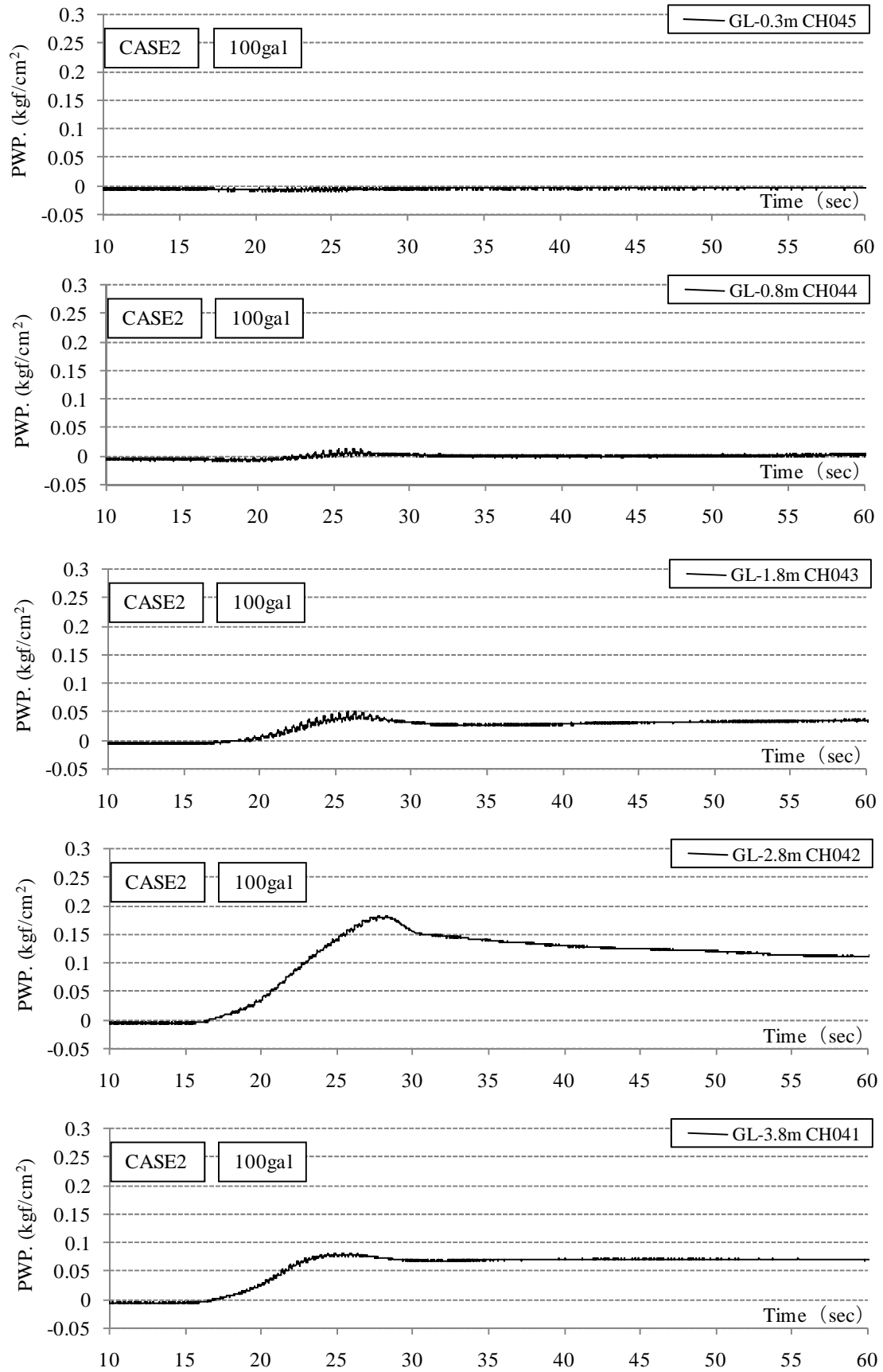


図 5.2.1(2) 過剰間隙水圧の時刻歴結果(ケース 2、100gal)

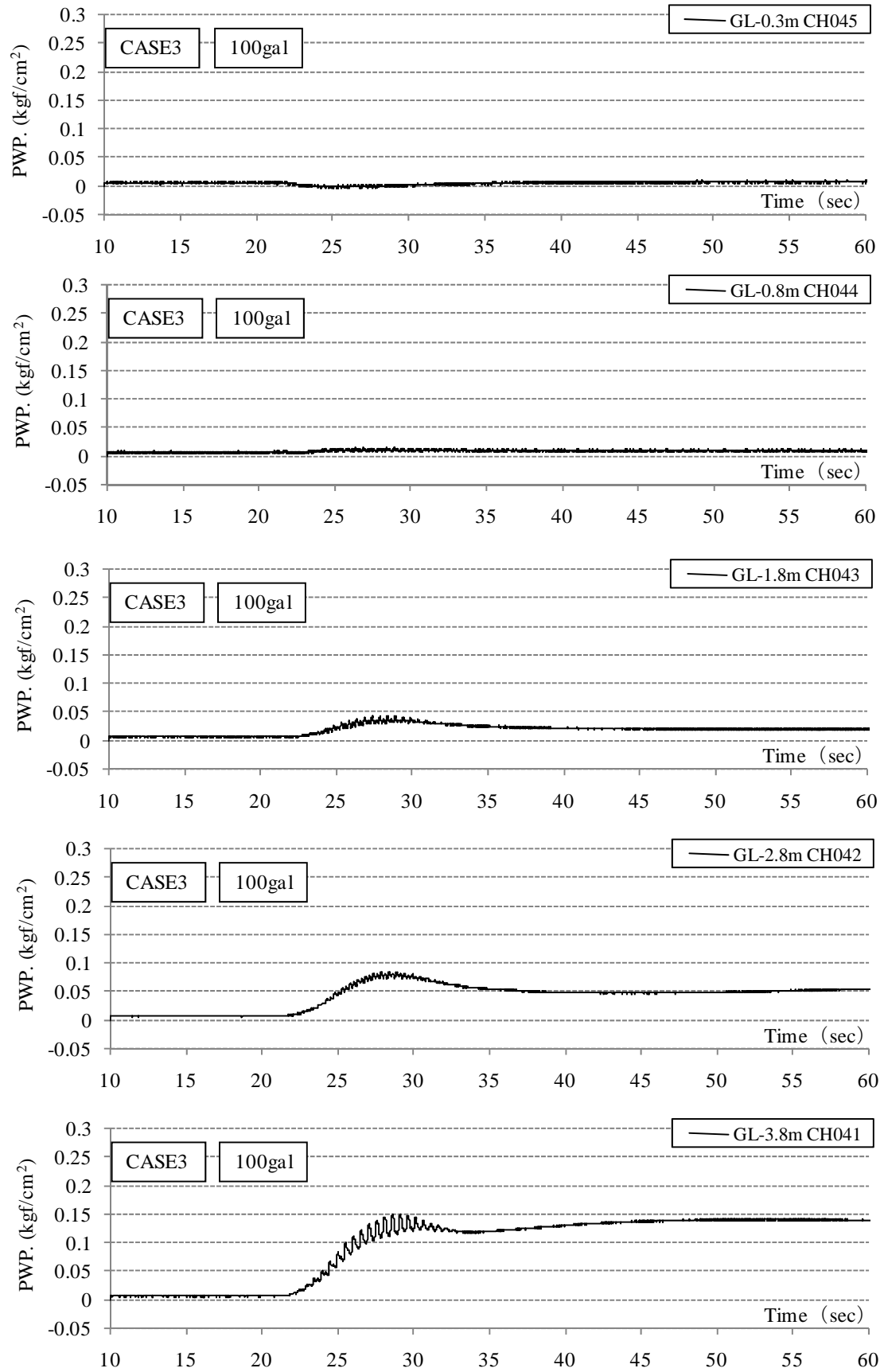


図 5.2.1(3) 過剰間隙水圧の時刻歴結果(ケース 3、100gal)

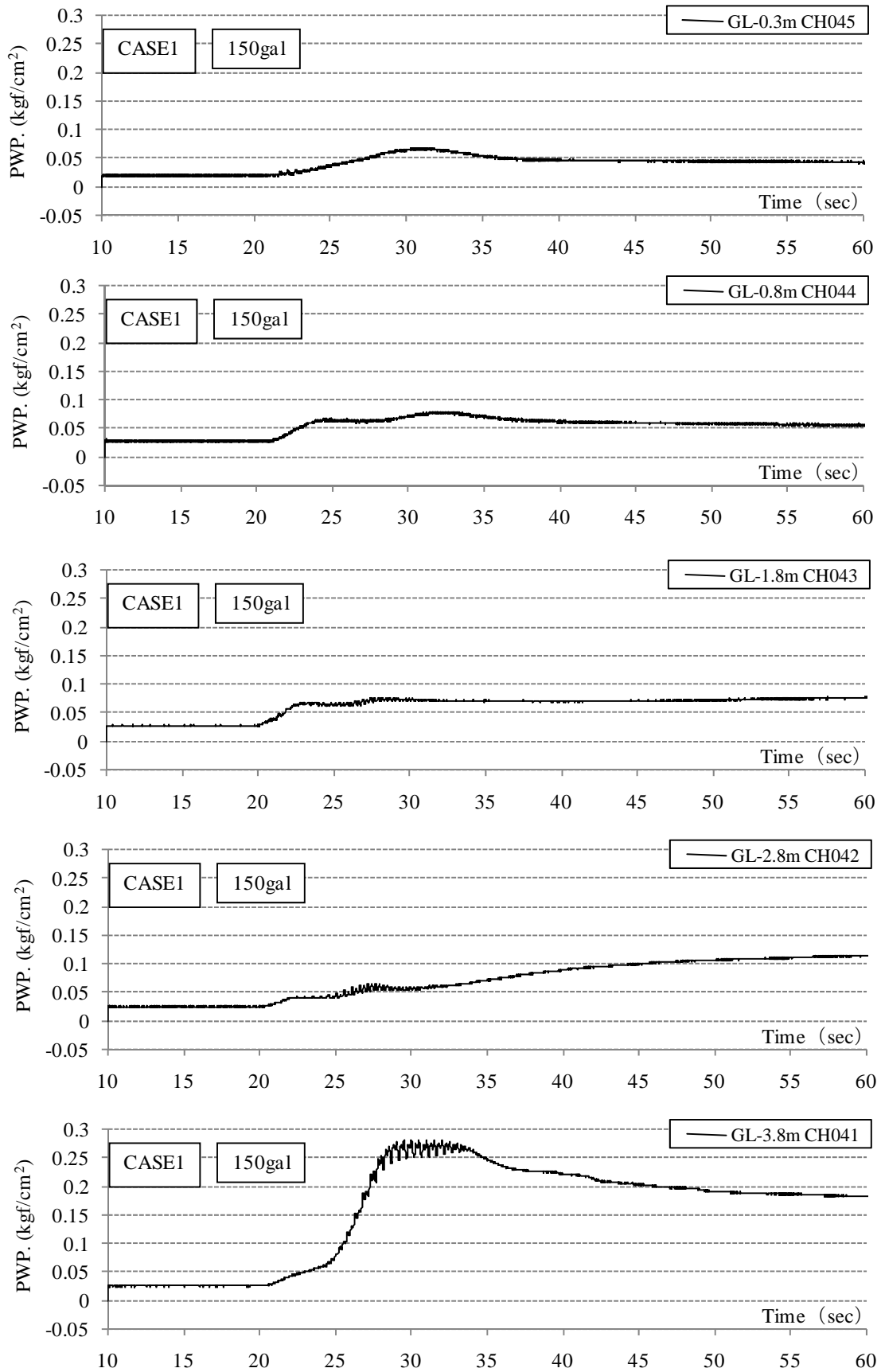


図 5.2.1(4) 過剰間隙水圧の時刻歴結果(ケース 1、150gal)

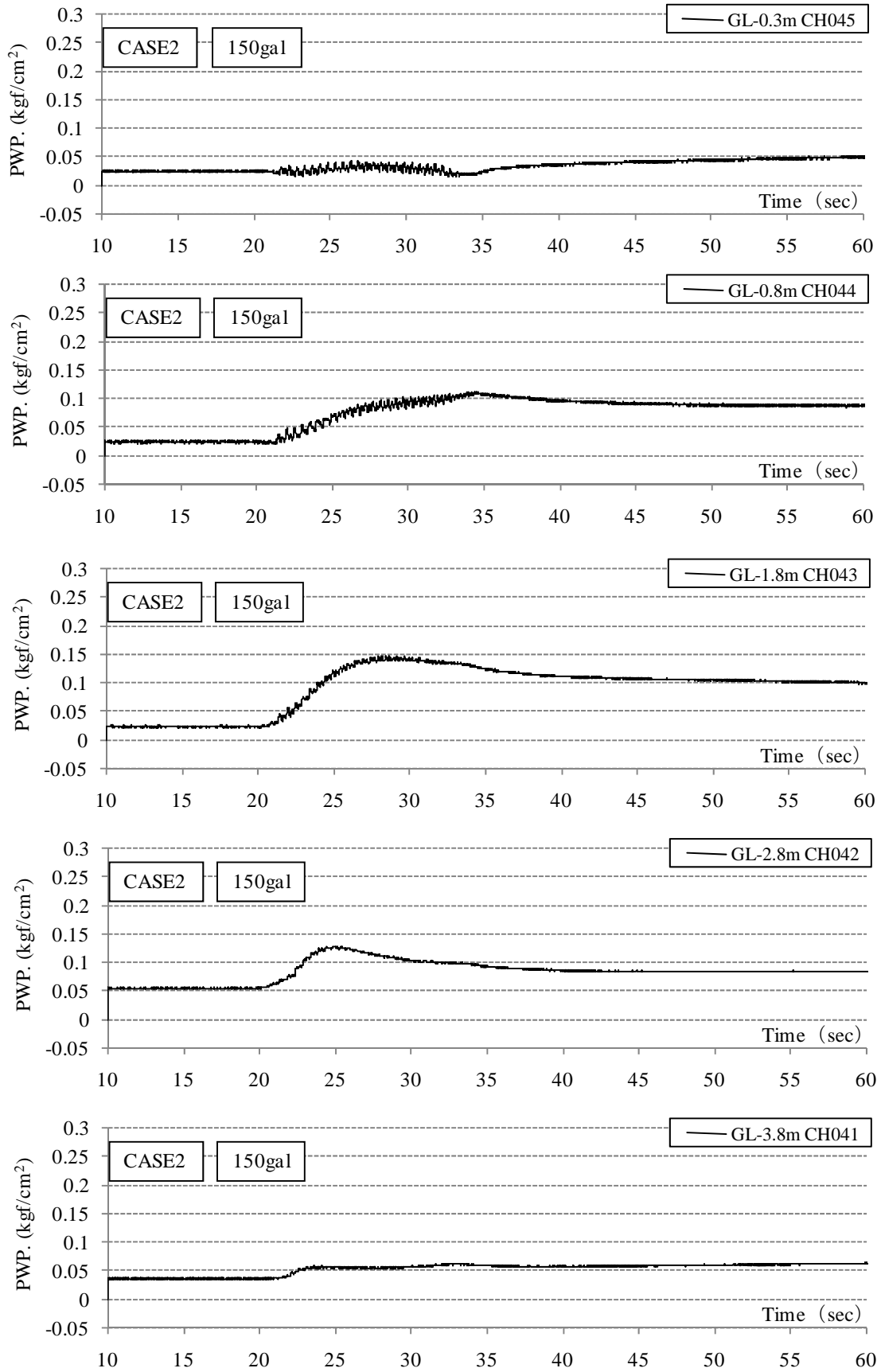


図 5.2.1(5) 過剰間隙水圧の時刻歴結果(ケース 2、150gal)

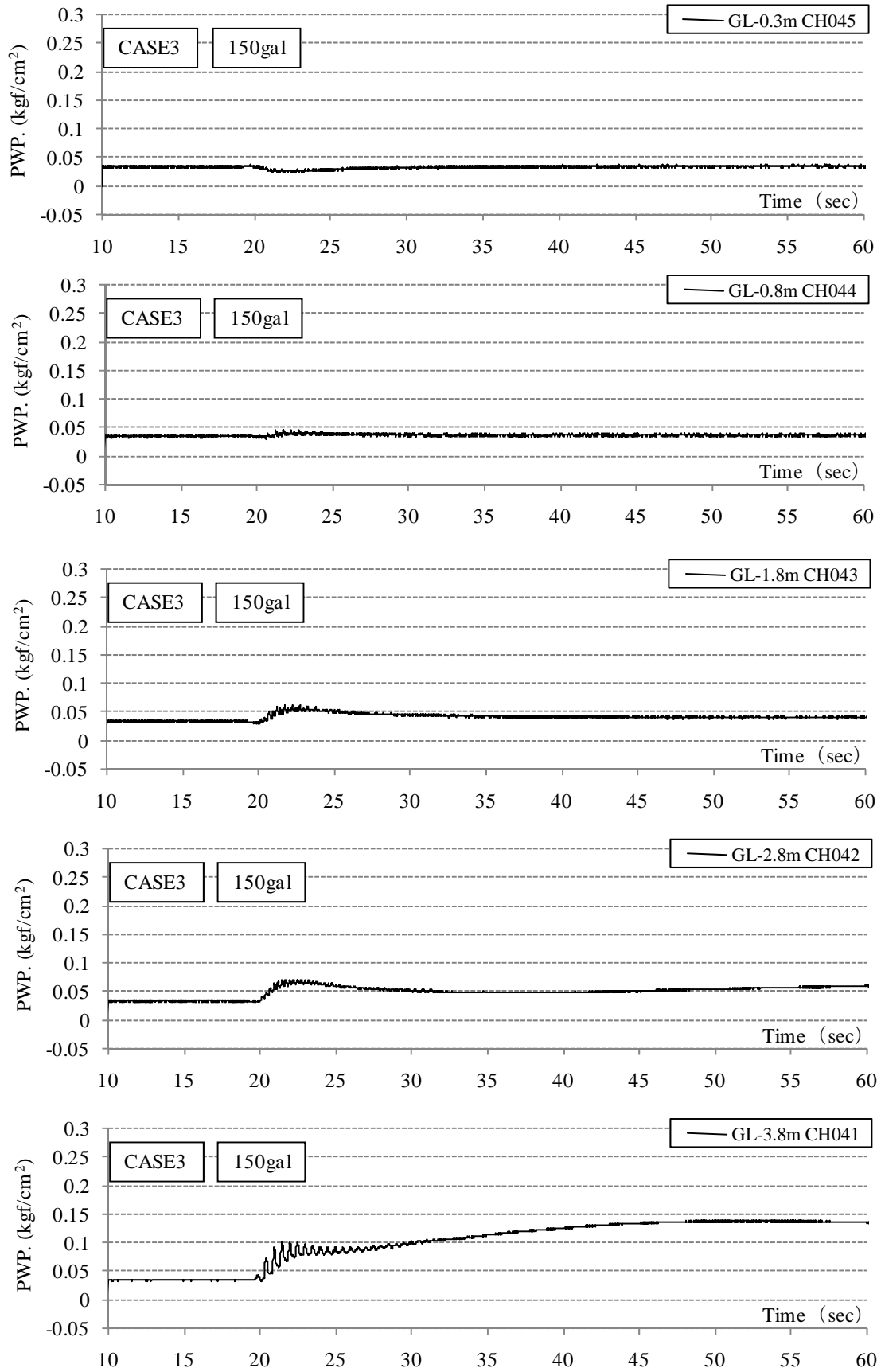


図 5.2.1(6) 過剰間隙水圧の時刻歴結果(ケース 3、150gal)

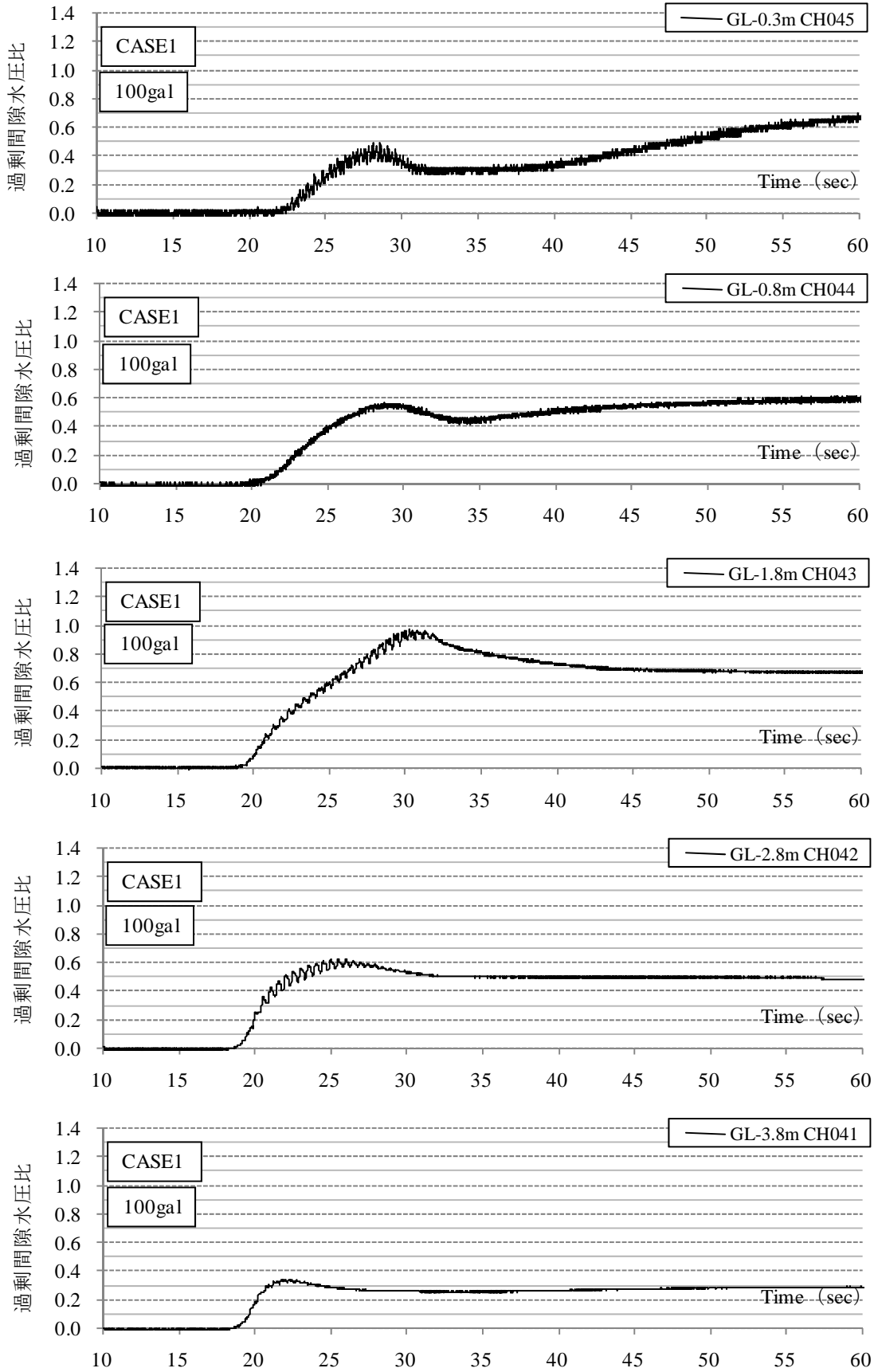


図 5.2.2(1) 過剰間隙水圧比の時刻歴結果(ケース 1、100gal)



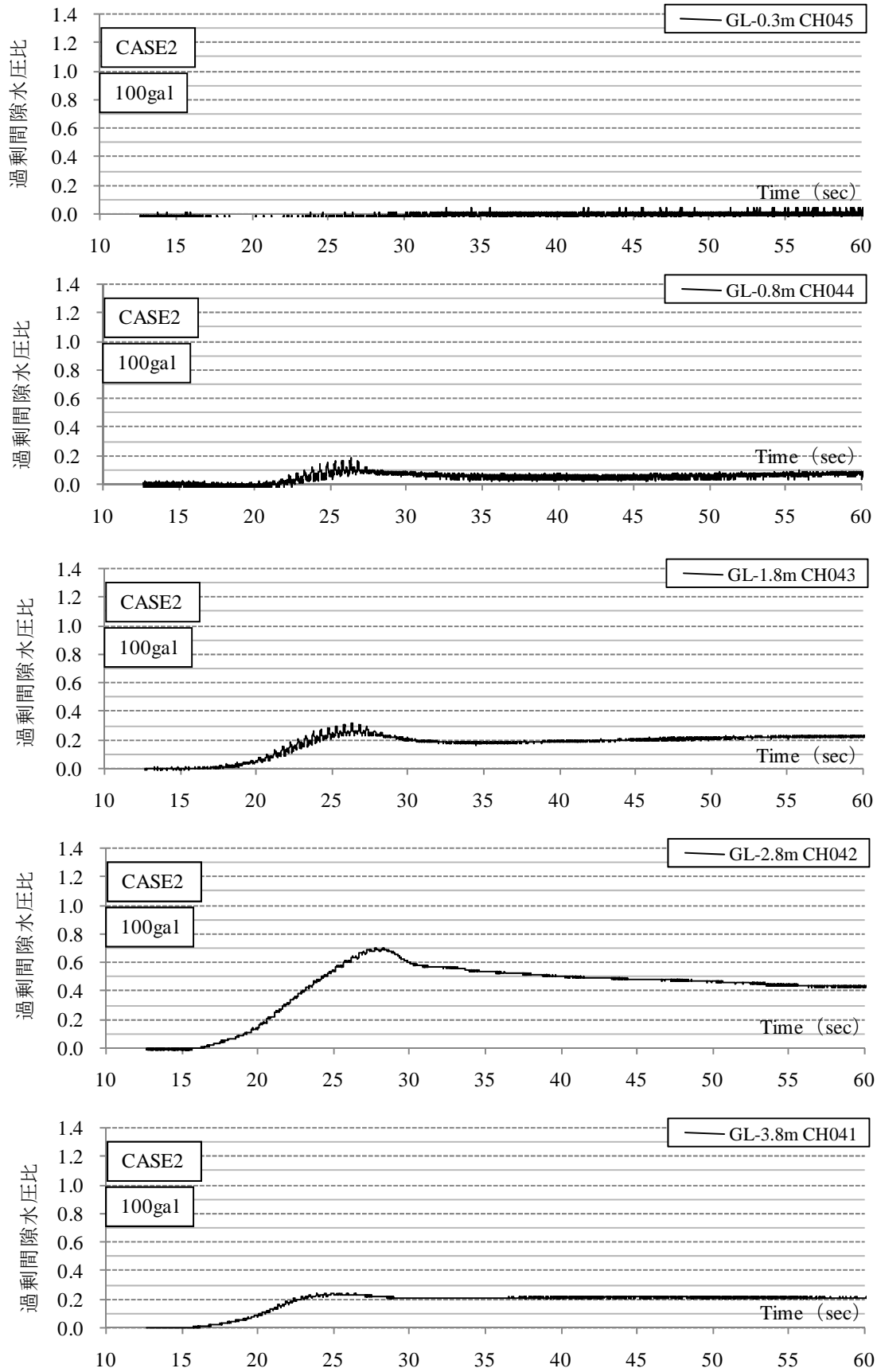


図 5.2.2(2) 過剰間隙水圧比の時刻歴結果(ケース 2、100gal)

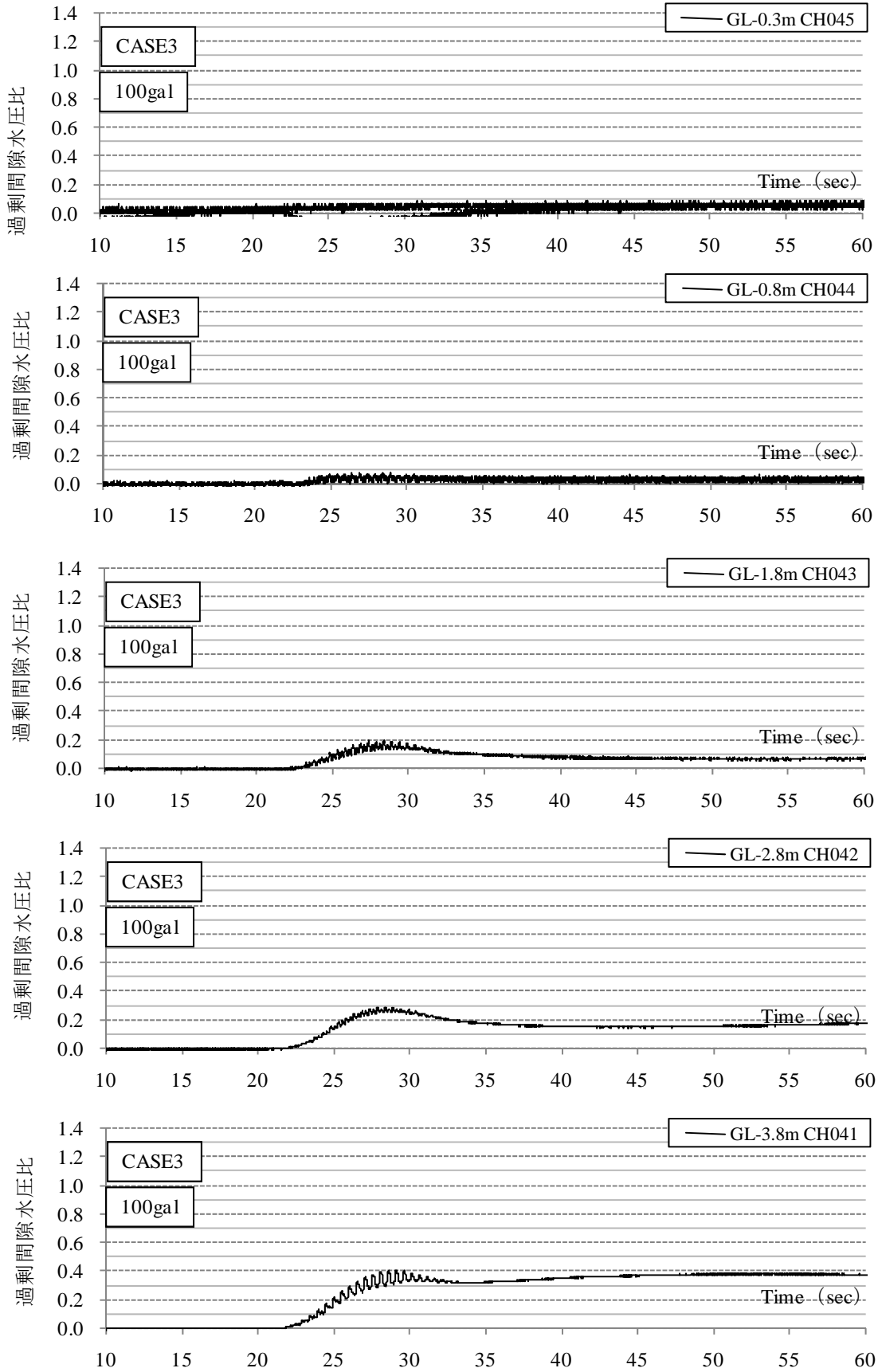


図 5.2.2(3) 過剰間隙水圧比の時刻歴結果(ケース 3、100gal)

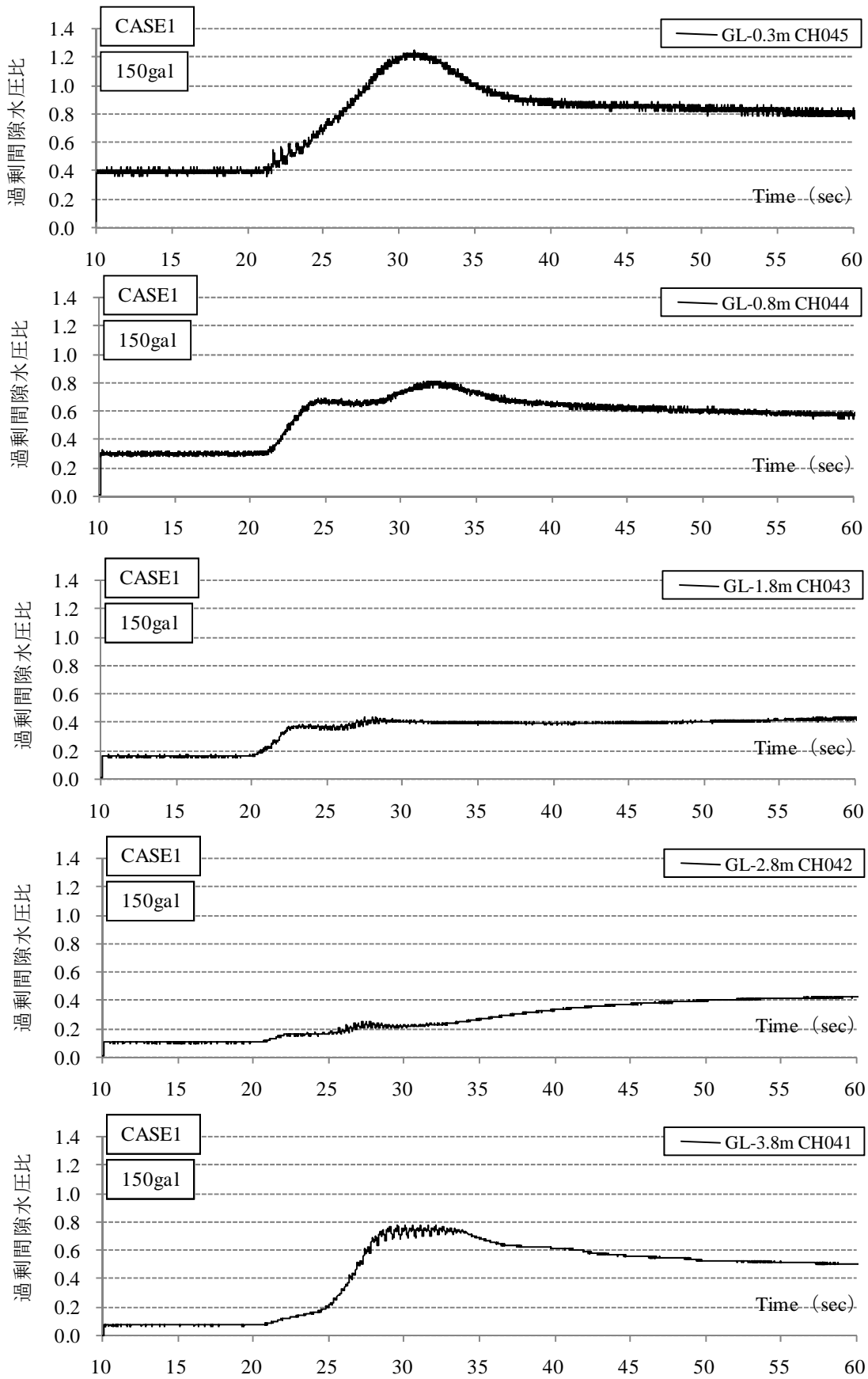


図 5.2.2(4) 過剰間隙水圧比の時刻歴結果(ケース 1、150gal)

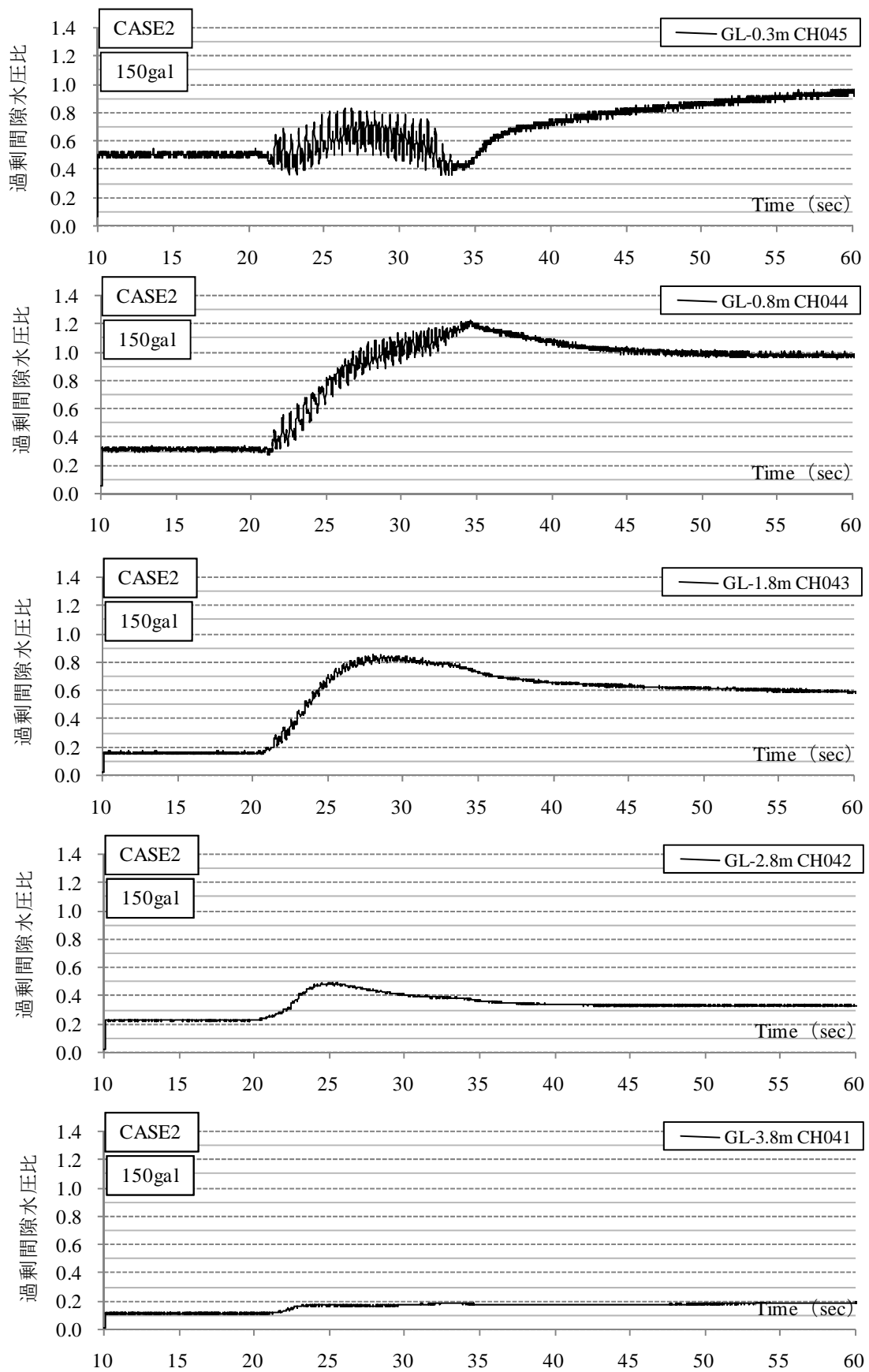


図 5.2.2(5) 過剰間隙水圧比の時刻歴結果(ケース 2、150gal)

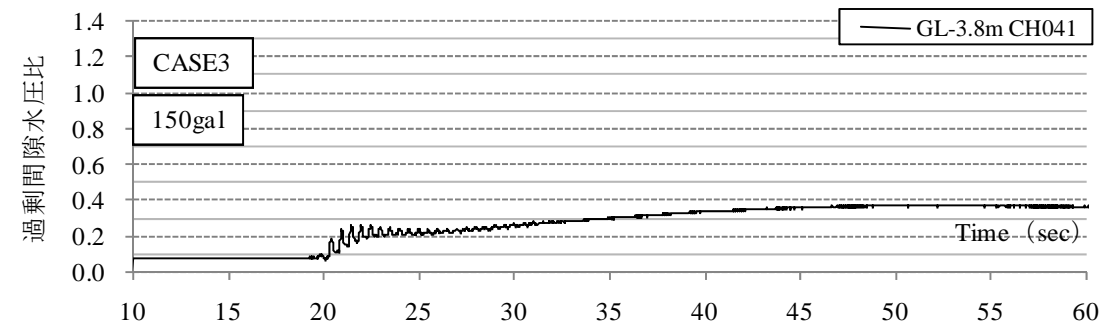
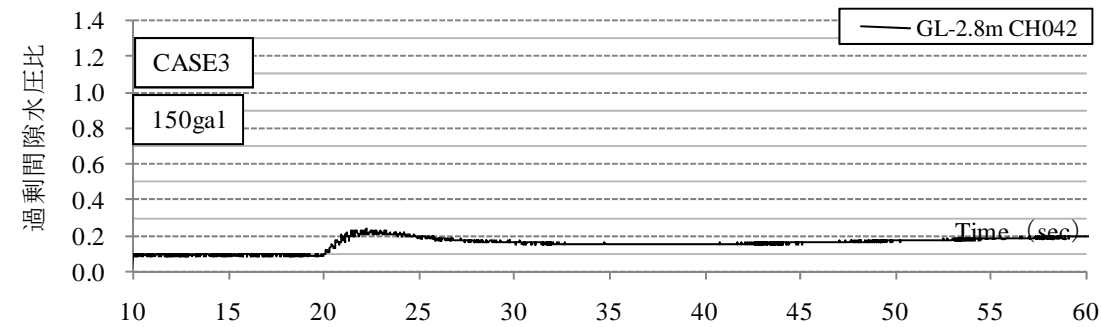
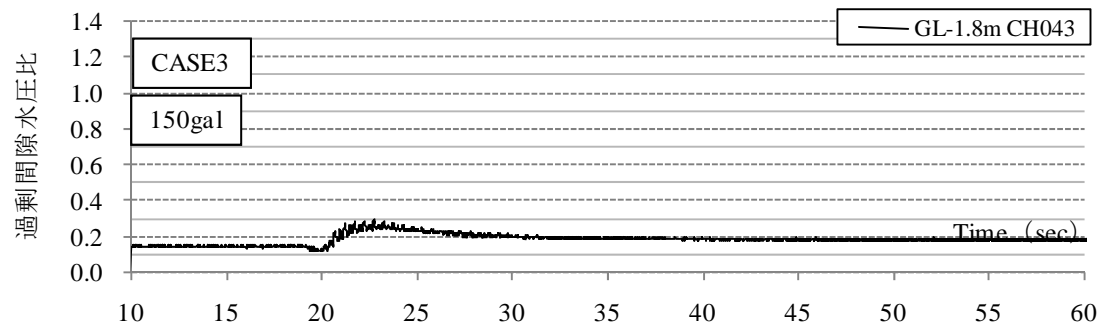
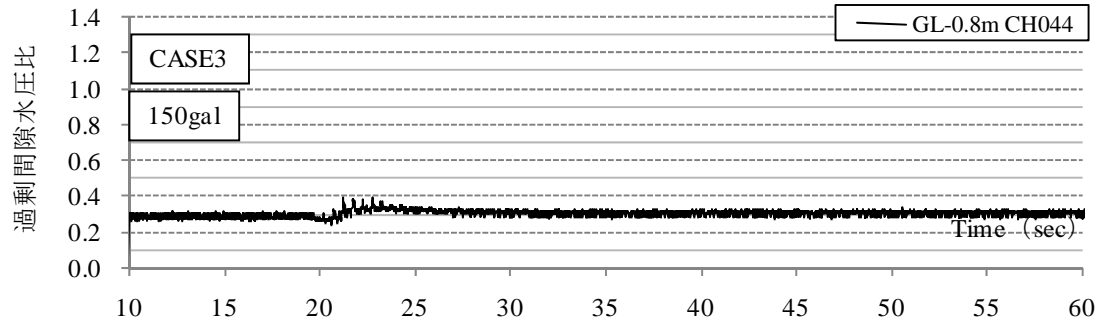
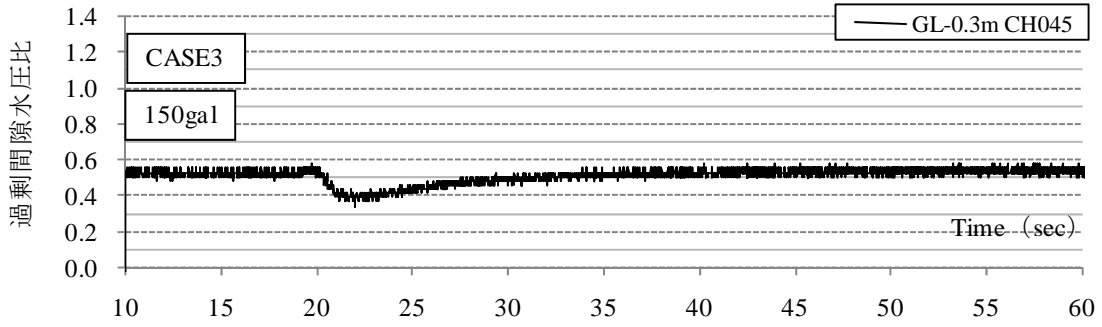


図 5.2.2(6) 過剰間隙水圧比の時刻歴結果(ケース 3、150gal)

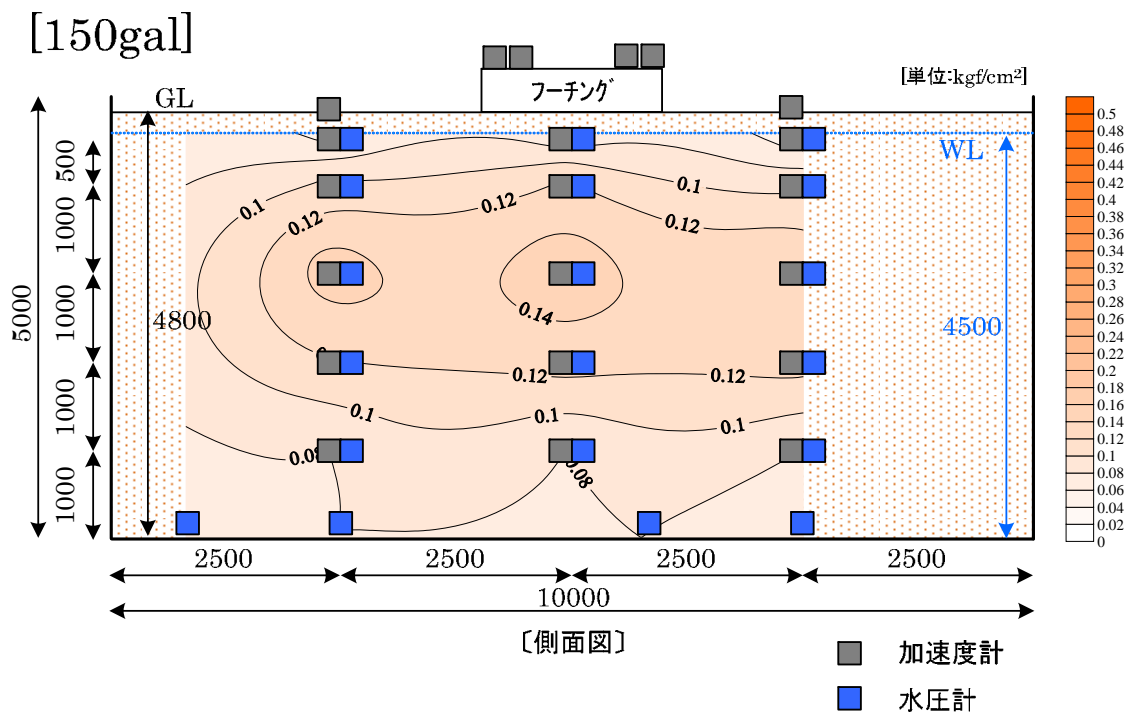
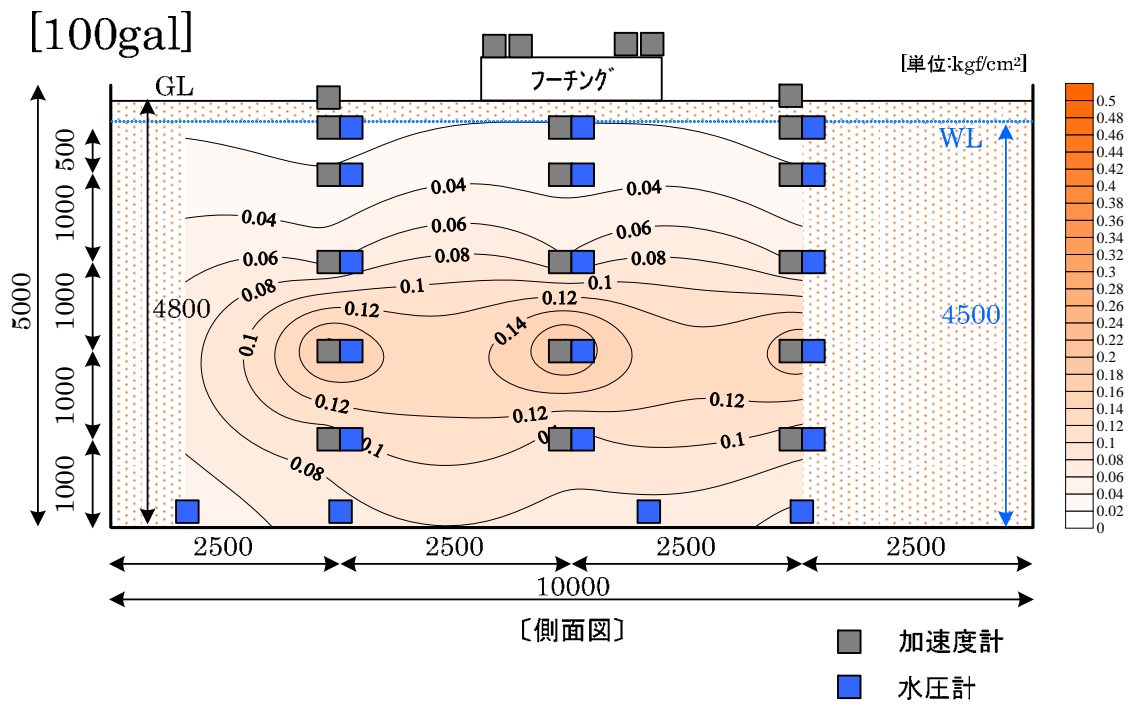


図 5.2.3(1) 過剰間隙水圧最大値のコンター図(ケース 2)

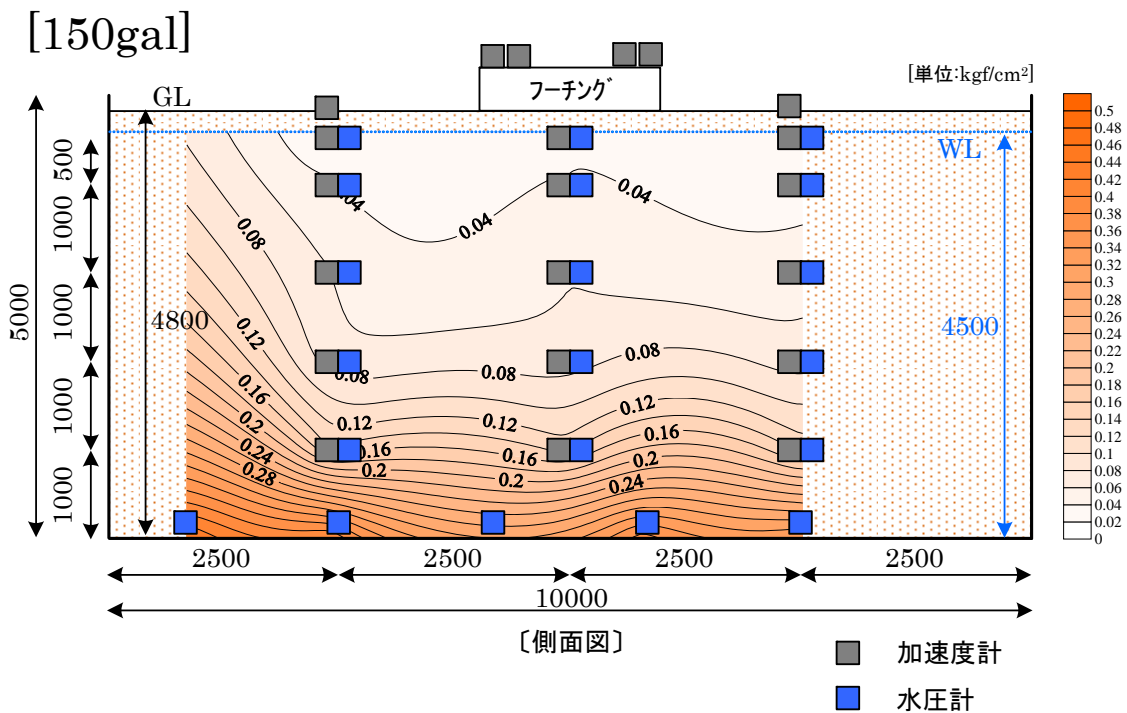
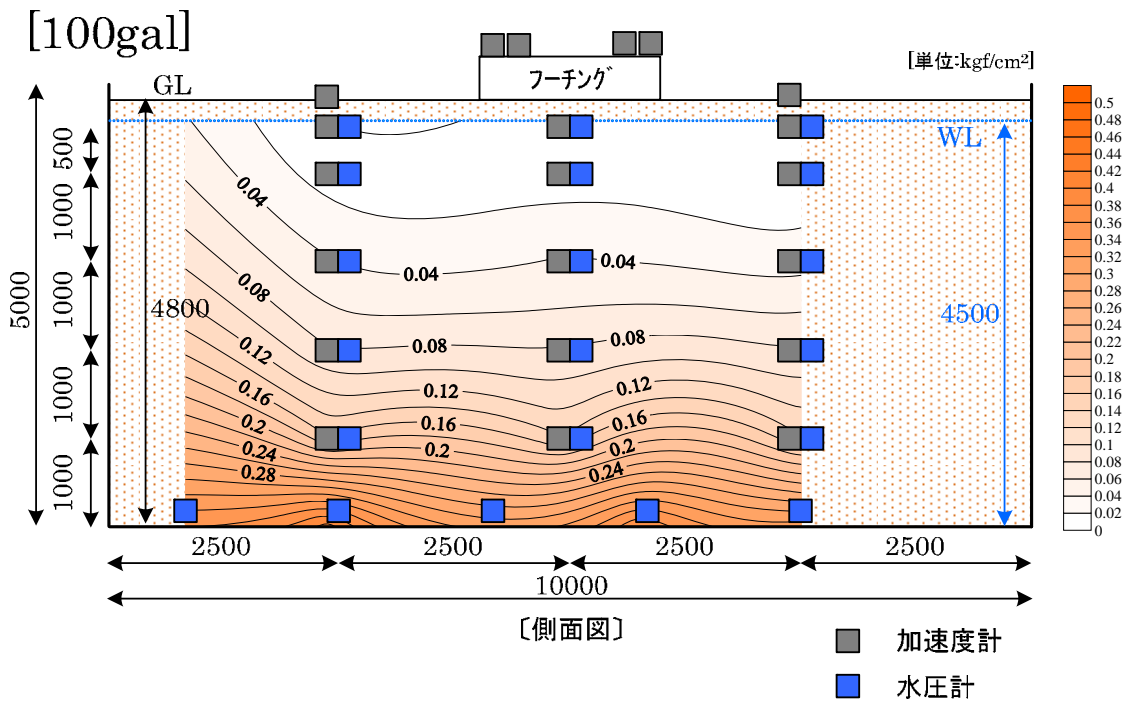


図 5.2.3(2) 過剰間隙水圧最大値のコンター図(ケース 3)

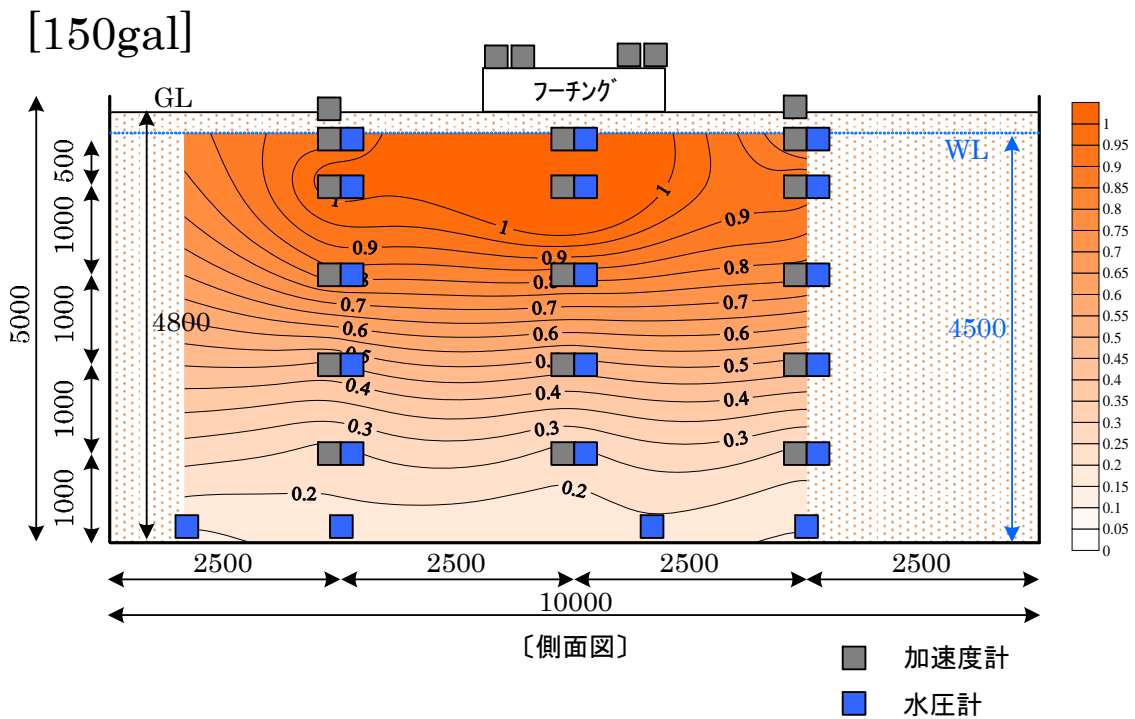
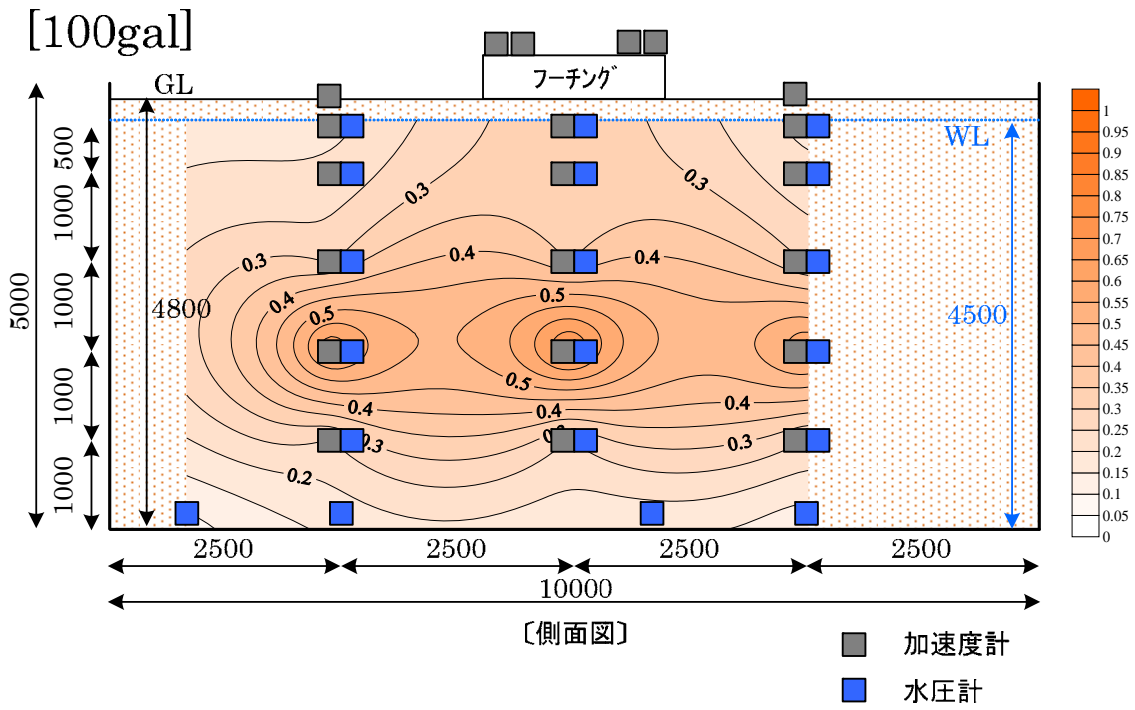


図 5.2.4(1) 過剰間隙水圧比最大値のコンター図(ケース 2)



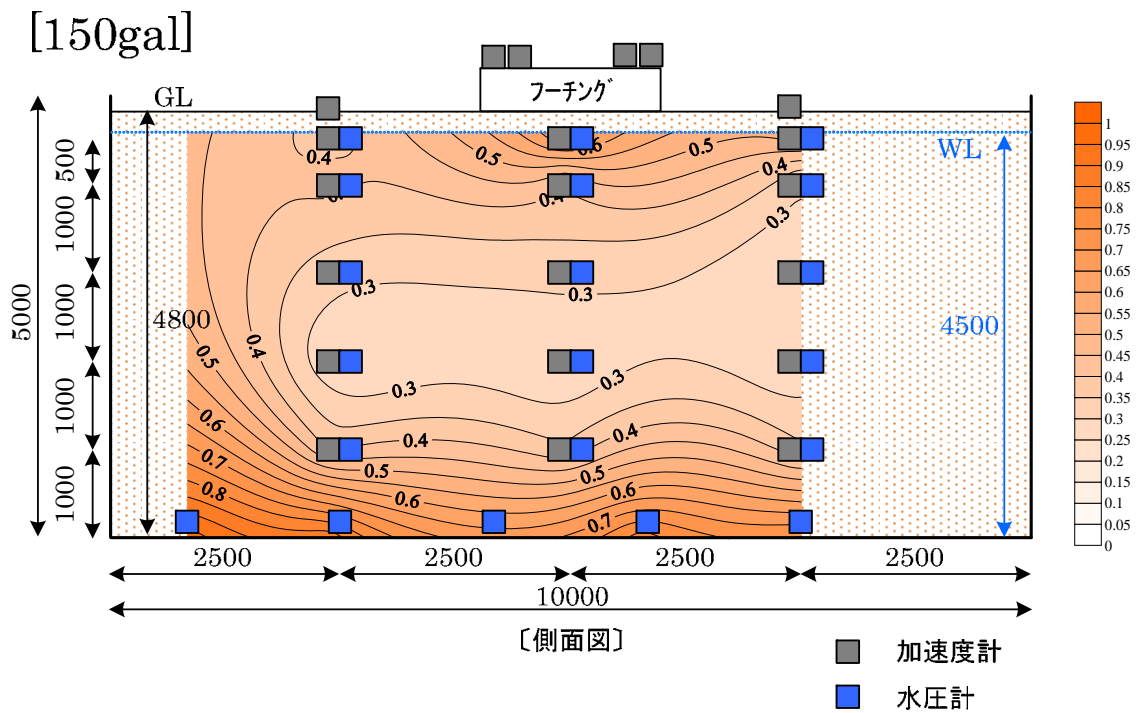
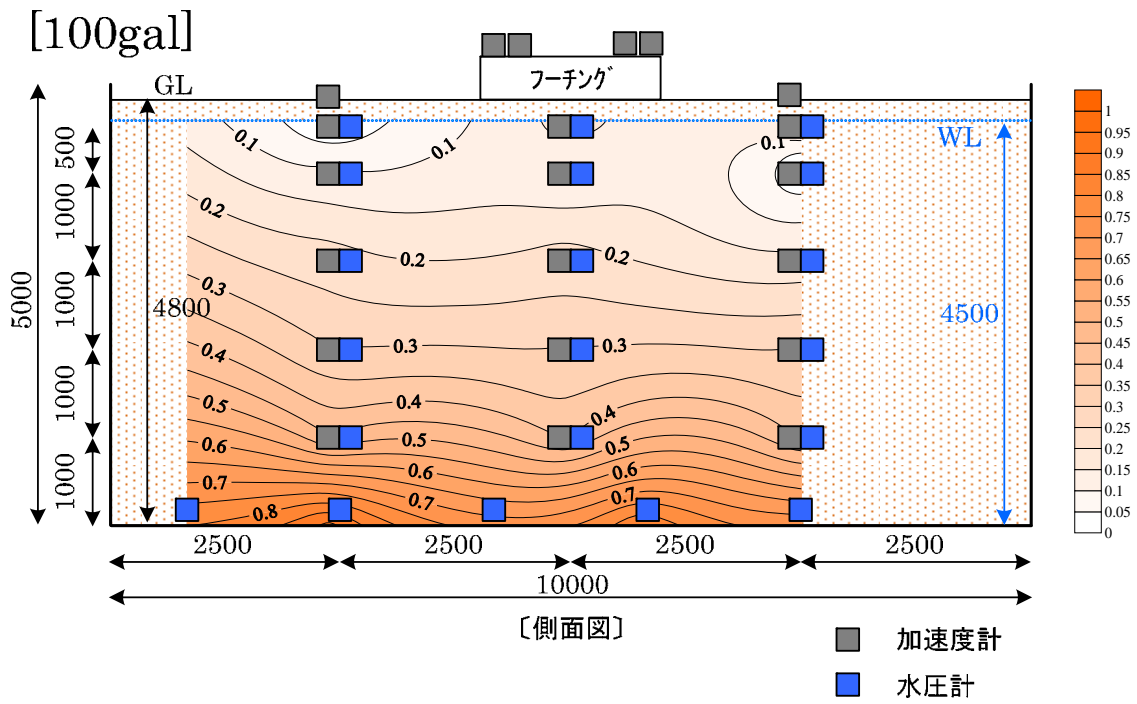


図 5.2.4(2) 過剰間隙水圧比最大値のコンター図(ケース 3)

### 5.3 地盤の沈下量特性

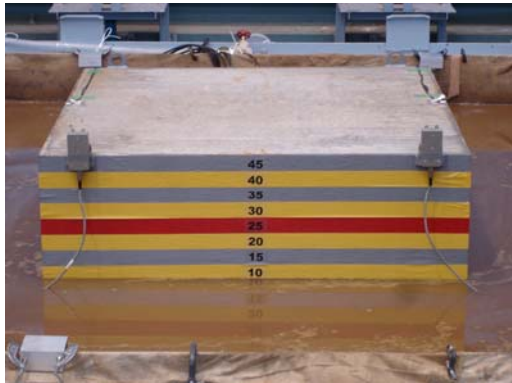
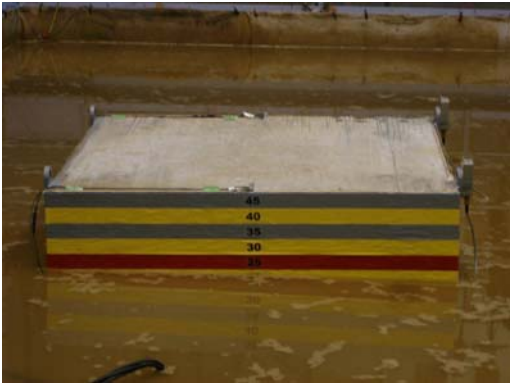
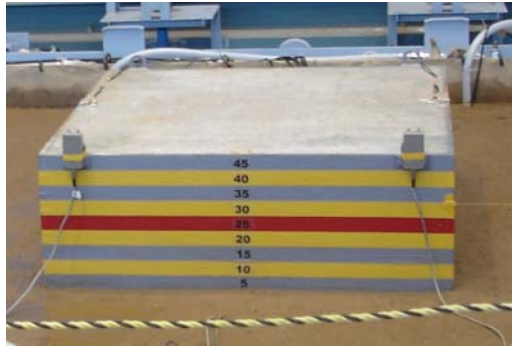



加振後の地盤沈下量及びフーチング沈下量の一覧を表-5.3.1 示す。加振後のフーチング写真を図 5.3.1 に示す。地盤の沈下量は 6 ヲ所測定しており 6 ヲ所の平均値とした。フーチングの沈下量は 4 ヲ所の平均値としている。表 5.3.1 において 100gal の地盤沈下量はケース 1 では 36mm、ケース 2 では 15mm、ケース 3 では 16mm であった。フーチング沈下量はケース 1 で 72mm、ケース 2 では 20mm、ケース 3 では 24mm であった。

表 5.3.1 地盤及びフーチング沈下量

計測項目		ケース 1	ケース 2	ケース 3
地盤・フーチング沈下量(mm)	50gal 地盤沈下量	—	0	1
	50gal フーチング沈下量	—	0	2
	100gal 地盤沈下量	36	15	16
	100gal フーチング沈下量	72	20	24
	150gal 地盤沈下量	77	41	25
	150gal フーチング沈下量	201	101	37

\*地盤沈下量は 6 ヲ所測定しており、6 ヲ所の平均値とした。フーチング沈下量は 4 ヲ所の平均値とした。表中の値は、Sweep 加振前を初期値として累積沈下量を示す。

図 5.3.1 加振後のフーチング写真

	100gal 加振後	150gal 加振後
ケース 1		
ケース 2		
ケース 3		

## 6.まとめ

### 目視観察による実験結果

目視観察による試験結果は、マイクロバブル水（ケース2）と脱気水（ケース3）では大きな差が見られなかった。マイクロバブル水（ケース2）と脱気水（ケース3）のどちらも、入力加速度 50gal および 100gal では地表面が液状化せず、150gal で液状化が見られた。150gal 加振後の地表面水の状態を比較すると、液状化対策を行ったマイクロバブル水（ケース2）の方が多くの地表面水が確認された。地盤および基礎模型の沈下量は、マイクロバブル水（ケース2）の方が大きく、かつ 150gal で 50mm を超えた。

### 計測による実験結果

マイクロバブル水（ケース2）と脱気水（ケース3）の試験結果から、飽和度 98%の層では、最大加速度 140gal で液状化が発生した。飽和度 85%以下の層では、最大加速度 200gal でも液状化は発生しなかった。液状化が生じた場合でも、マイクロバブル水（ケース2）を注入した地盤は、液状化の発生時期が遅くなる。空気を注入して飽和度を一定レベル以下に下げることによって、液状化の抑止に一定の効果があると考えられる。

### マイクロバブル水注入の効果

マイクロバブル水（ケース2）と脱気水（ケース3）の試験結果から液状化発生状況を確認し、マイクロバブル水注入により地盤の飽和度を数パーセント下げることによって（空気を注入する）液状化抑制効果があると考えられる。

### 考察

1. ゆるい砂地盤（N 値=6~7）であっても、空気を多く含む層（飽和度 80%程度）では液状化に対する抵抗力が顕著に増加し、最大加速度 200gal 程度の揺れに対しても液状化を発生しないことが確認された。
2. 空気を注入して地盤全体の抵抗力を高めると、地震時応答が大きくなり、最終的には相対的に弱い層で液状化が生じた。マイクロバブル水（ケース2）では、この相対的に弱い層が地表面に近かったために、建物沈下量が増大したと考えられる。
3. 無対策（脱気水（ケース3））の地盤では、地表面から深い層の飽和度が高く、小さな地震動で深い層の部分で液状化が発生したが、逆に浅い層への地震入力が減少して建物沈下が小さくなったと考えられる。
4. 本研究結果は、砂層地盤上の戸建て住宅の場合において、建物周辺の地盤表層部（深度 3m 程度）に空気を注入して飽和度を下げることにより表層部の液状化を抑制するとともに、その下層部が液状化させることで表層の入力加速度を減衰させ、より大きな地震動に対しても建物被害を軽減させる方法（液状化免震技術）の可能性を示唆し得るものと考えられる。