

宅地地盤の液状化対策における地盤特性と空気注入
法の効果の関係に関する検討

報 告 書

平成 22 年 3 月

国土交通省国土技術政策総合研究所 都市研究部

(実施機関：財団法人 ベターリビング)

本文目次

1. 実験目的	1
2. 実験方法	
2.1 大型動的遠心力載荷実験装置	1
2.2 試験体	4
2.2.1 実験パラメータ	4
2.2.2 地盤材料	6
2.2.3 地盤作製方法および計測器	6
(1) 地盤作製方法および計測器の設置	6
(2) 地盤の飽和方法	8
(3) 住宅模型	12
2.3 飽和度測定方法	13
2.3.1 初期飽和度測定方法	13
2.3.2 加振に至るまでの飽和度測定方法	13
2.4 加振方法	16
2.5 測定項目とデータの収録	19
2.6 室内土質試験方法	25
3. 実験結果	
3.1 地盤の密度管理結果	31
3.2 飽和度測定結果	34
3.2.1 初期飽和度測定結果	34
3.2.2 加振に至るまでの地盤飽和度測定結果	34
3.3 加振結果	47
3.3.1 地盤及び住宅模型の変位量特性	47
3.3.2 過剰間隙水圧特性	57
3.3.3 応答加速度特性	80
3.3.4 地盤のS波速度測定結果	96
3.4 室内土質試験	
3.4.1 物理・安定化試験	99
3.4.2 せん断試験	101
4. まとめ	110

1. 実験目的

本実験は、地盤内に空気を注入する液状化対策工法について、この工法が特に効果的な地盤の条件を確かめる事が主たる目的である。

本実験では、地盤条件を変えた複数の試験体について、大型動的遠心力載荷試験装置を用いた加振実験を実施し、空気注入による液状化抑制効果を検証する。具体的には、震度5~6クラスの地震動に対し、飽和状態での地盤では液状化が発生するが、空気注入による液状化対策を施した地盤(不飽和状態での地盤)では液状化が抑制される事を実験的に確認する。

2. 実験方法

2.1 大型動的遠心力載荷試験装置

遠心力載荷実験は、実物大構造物を幾何学的に縮小した地盤を土槽内に作製し、実験装置で模型地盤に遠心加速度を与え、所定の遠心加速度で一次元的加振を行って地盤の挙動を調べるものである。表 2.1-1 に遠心力載荷実験における相似則を示す。縮小されて作製した地盤と実現象との間には、表 2.1-1 に示すような相似則が成り立つことが知られており、実物大実験に近い測定結果を得ることが可能である。

図 2.1-1 に大型動的遠心力載荷試験装置の概要を示す。実験土槽及びカウンタ - ウエイトを取り付けた揺動架台は、回転腕が回ると水平面に振り上がる構造となっている。揺動架台が振り上がった位置の回転腕には CCD カメラと高速度カメラが、取り付けられており、これらのカメラによって遠心重力場でも加振時の模型や地盤の挙動を観察することができる。表 2.2-1 に大型遠心力実験装置の仕様を示す。

表 2.1-1 遠心力載荷実験における相似則

項目	密度	長さ	加速度		質量	力	応力	ひずみ	時間	
			遠心時	加振時					動的現象	浸透現象
実物	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
模型	1	1/N	N	N	1/N ³	1/N ²	1	1	1/N	1/N ²

(NG:遠心加速度)

(1/N:縮尺率)

表 2.1-2 大型動的遠心力載荷実験装置の仕様

遠心力載荷装置	有効回転半径	6600 mm
	最大遠心加速度	静的試験：150G 動的試験：100G
	最大積載容量	400 ton・G
	揺動架台 2台	静的試験：両側 動的試験：片側
	容器の載荷スペース	幅 2400mm,奥行き 1300mm 高さ 1000mm
加振装置	台の大きさ	幅 1700mm,奥行き 1000mm
	最大加振容量	40 ton・G
	最大加振加速度	40 G
	最大速度	900mm/s
	最大変位	± 5 mm
	加振周波数	10 ~ 400 Hz
計測機能	光伝送方式	
	測定点数	静的試験：100ch 動的試験：80ch

2.2 実験方法

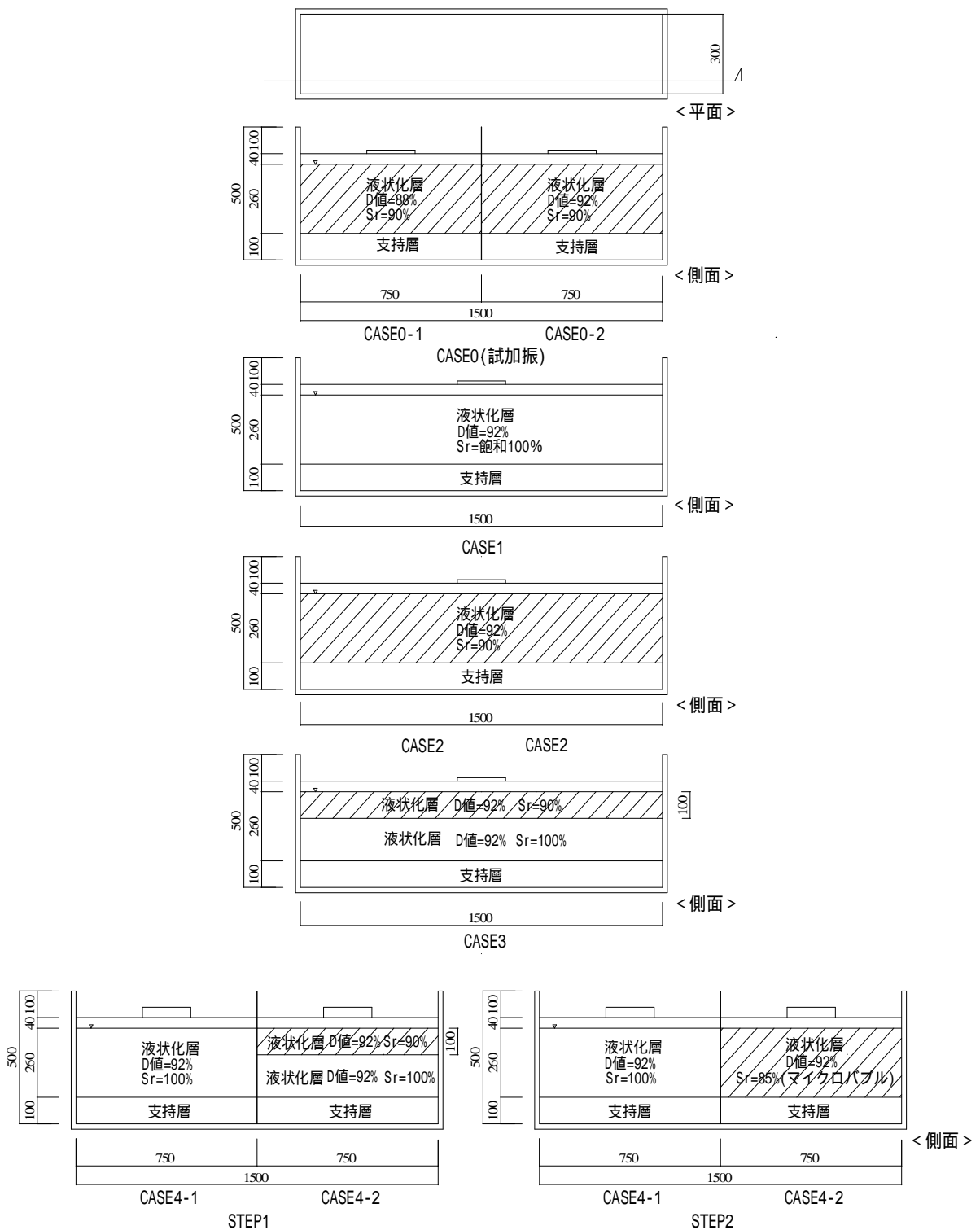
2.2.1 実験パラメータ

表 2.2-1 に実験パラメータ一覧を示す。図 2.2-1 に試験体図を示す。

表 2.2-1 実験パラメータ一覧

CASE	STEP	地盤条件				加振条件		備考		
		間隙流体	地盤材料	液状化層 目標 締固め度	飽和状態	目標飽和度 Sr (%)	支持層 地盤材料		入力波形	目標加速度 (gal)
0-1	1	水道水		88	不飽和	90	7号硅砂	sin波 20波 (50Hz)	270	試験加振：土槽2分轄
	2			92	不飽和	90		400		
0-2	1	水道水		92	飽和	100	7号硅砂	sin波 20波 (50Hz)	270	飽和地盤
	2			92	不飽和	90		400		
1	1	水道水		92	飽和	100	7号硅砂	sin波 20波 (50Hz)	270	飽和地盤
	2			92	不飽和	90		400		
2	1	水道水		92	不飽和	90	7号硅砂	sin波 20波 (50Hz)	270	不飽和地盤
	2			92	不飽和	90		400		
2'	1	水道水		92	不飽和	90	7号硅砂	sin波 20波 (50Hz)	270	CASE2の再実験
	2			92	部分不飽和	90		400		
3	1	マイクロバブル水		92	部分不飽和	90	7号硅砂	sin波 20波 (50Hz)	270	部分不飽和地盤
	2			92	不飽和	100		400		
	3			92	飽和	85		400		
4-1	1	水道水		92	飽和	100	7号硅砂			観測波：土槽2分轄
	2			92	飽和	100				
4-2	1	水道水		92	部分不飽和	90	7号硅砂			飽和地盤と部分不飽和地盤の比較
	2			92	不飽和	100				

マイクロバブル水：直径が数十マイクロメートル程度の微細な気泡を含む水



側面：平面に図示した矢指図を示す。

図 2.2-1 試験体図

2.2.2 地盤材料

液状化層の材料には、江戸崎砂を用いた。実験には、5mm のふるいを通して使用した。支持層には7号硅砂を使用した。

2.2.3 地盤作製方法および計測器

模型地盤は幅 1500mm、高さ 500mm、奥行き 300mm の土槽内に、厚さ 100mm の支持層（7号硅砂）と厚さ 300mm の液状化層（江戸崎砂）を作製した。地盤密度の管理は、所定の高さまで作製した時の地盤材料の乾燥質量と土槽上端からの高さを測定して得られる各土層の体積から、乾燥密度を求めることで行った。相対密度や締固め度は、各土層の乾燥密度から算定した。以下に、地盤作製方法および計測器の設置について詳細を示す。

(1)地盤作製方法および計測器の設置

支持層

支持層は、気乾状態の7号硅砂を木製の突固め棒によりできるだけ締固めて作製した。作製層厚は 20mm ピッチとした。支持層の相対密度は概ね 100%程度である。非液状化層を写真 2.2-1 に示す。

液状化層

液状化層の作製状況を、写真 2.2-2~2.2-6 に示す。作製は木製の突固め棒により締固めで行った。締固め含水比は、最適含水比付近の約 15%である。作製層厚は 20mm ピッチとした。作製した層の表面は上層と馴染み易くするため釘で引っかき傷をつけた。(写真 2.2-4 および写真 2.2-5 参照) 所定位置に計測器（加速度計、過剰間隙水圧計、土壌水分計）を埋設した。(写真 2.2-4 および写真 2.2-5 参照)。

メッシュ作製及び標点の設置

加振前後における地盤の変形状況を観察するため、土槽前後面のガラス面に水平方向と鉛直方向のメッシュを作製した。メッシュ材料には白色の7号硅砂を用いた。

水平方向のメッシュは、へら等を用いて作製した。一方鉛直方向のメッシュ作製は、ガラス面内側の所定の位置に凹型アルミ棒を垂直に設置し、この中に硅砂を入れ、所定の高さまで地盤を作製した後それを順次引き抜くことで行った。標点には、直径 8mm のアルミ製リベットを用いた。この標点は、加振中の地盤や盛土の変形を高速度カメラで追跡するためのもので、上端面は地盤の色と対照的なピンク色で着色した。リベット表面には、グリースを塗布してガラス面との摩擦を出来るだけ低減させた。(写真 2.2-6 参照)



写真 2.2-1 非液状化層



写真 2.2-2 地盤材料の撒き出し状況

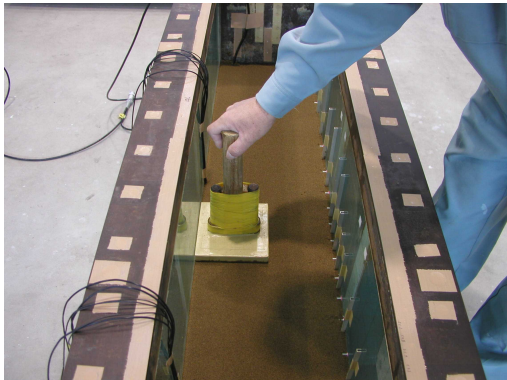


写真 2.2-3 液状化層の締固め状況

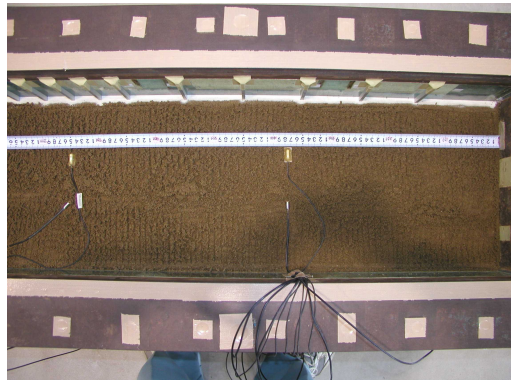


写真 2.2-4 加速度計と水圧計の設置



写真 2.2-5 土壌水分計の設置状況

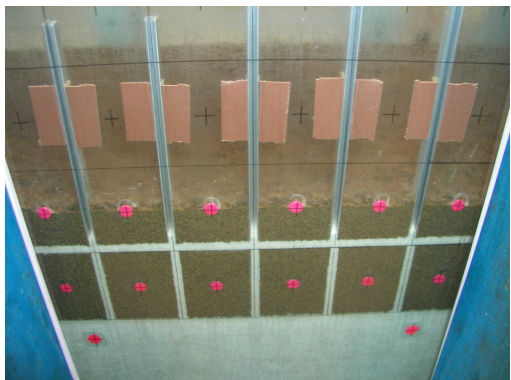


写真 2.2-6 メッシュ作製と標点の設置状況

(2)地盤の飽和方法

液状化層及び支持層の飽和

地盤の完全な飽和は、地盤作製後に写真 2.2-7 の脱気槽を用いて負圧法により行った。この脱気槽は、実験土槽をそのまま収容する事ができる。間隙流体には水道水を用いた。

飽和方法は、まず土槽全体を脱気槽に入れ、真空ポンプで約 98kN/m^2 の負圧を与え、脱気槽がほぼ真空状態になるまで放置する。次に、ほぼ真空状態になった事を確認してから、真空土槽と間隙流体の入った注水タンクの間 $9.8\sim 13.7\text{ kN/m}^2$ の差圧をかける。この差圧によって、間隙流体が地盤表面に滴下し地盤を飽和させる。地盤の飽和には、夜間を利用して約 12 時間を要した。

不飽和液状化層の作製

不飽和液状化層の作製は、遠心重力場で行なった。一度完全飽和した地盤の間隙水を遠心力により抜き、注水タンクに圧力を $30\sim 100\text{kN/m}^2$ かけ再注水することで行った。間隙水の注排水は、土槽底面に取り付電動式バルブ計測室にて開閉することで行った。今回の実験で使用した電動式バルブの仕様を以下に示す通りである。(写真 2.2-8 参照)

地盤の間隙流体には水道水を用いたが、CASE3 STEP3 及び CASE4-2 STEP2 については、水道水に微細な気泡を混入したマイクロバブル水を使用した。マイクロバブル水の作製状況は巻末の写真記録集に示す。

液状化層の不飽和作業は、最終的に地盤内水位が 1cm/min. になるように注水タンクにかける圧力を調整した。

< 小型電動バルブ >

- ・ 型式：株式会社 キッツ(KITZ)社製 EA 100-2
- ・ 仕様：定格電流 100mA、最大消費電力 10W、開閉時間(90°) 約 1 秒
最大出力トルク $9.8\text{N}\cdot\text{m}$ 電源 AC100V



写真 2.2-7 地盤の飽和に用いた脱気槽と注水タンク



写真 2.2-8 電動式の排水弁

試加振の CASE0 (試加振) 及び CASE2 においては、排水弁の不具合により遠心重力場で弁を閉じることができなかった。そこで遠心重力場で排水した後、一旦遠心加速度を重力場に戻してから排水弁を閉め、遠心重力場で再注水し不飽和地盤を作製した。

CASE2 では、地盤の過圧密を避けるため、遠心加速度 50G における土層底面の有効上載圧に相当する 20G の遠心加速度において注水を行なって不飽和地盤を作製した。

CASE2 の遠心加速度 20G における不飽和化作業で地盤飽和度を下げられる事が確認できた為、CASE3 での不飽和化作業は遠心加速度 20G で行うこととした。不飽和化作業終了後、所定の 50G まで遠心加速度を上昇させ加振を行なった。

CASE4-1 は飽和地盤の地下水位調整は、重力場で実施した。地盤飽和後に土槽底面から所定位置(G.L.-40mm)に排水パイプを立ち上げ一晩放置した。サクシオン等で間隙水は、遠心場より重力場の方が土中に留まりやすいため、遠心重力場で確認した地下水位は、予定していた水位より高く G.L.-10mm となった。

CASE4-2 での不飽和化作業も CASE3 と同様遠心加速度 20G で行った。STEP2 のマイクロバブルによる不飽和化作業では、1 回の注排水で飽和度の低下が小さかった為、遠心加速度をさらに 10G に下げて注排水を行った。

図 2.2-2 ~ 図 2.2-3 に各ケースの加振するまでに行った地盤の不飽和化状況を示す。

地下水位の調整

地盤が完全飽和である CASE1 での地下水位は、土槽底面の排水弁に繋がったシンフレックスチューブ先端を、土槽背面の所定位置まで立ち上げることで調整した。この方法では、遠心重力場においても水位調整が可能である。

一方、遠心重力場で地盤に注排水して作製する不飽和地盤ケースでの地下水位調整は、所定の地下水位に到達したら実験ピット外に設置した注水タンク弁を閉める方法で行った。地下水位位置は、CCD カメラの他、実験土槽底面に固定した間隙水圧計で確認した。

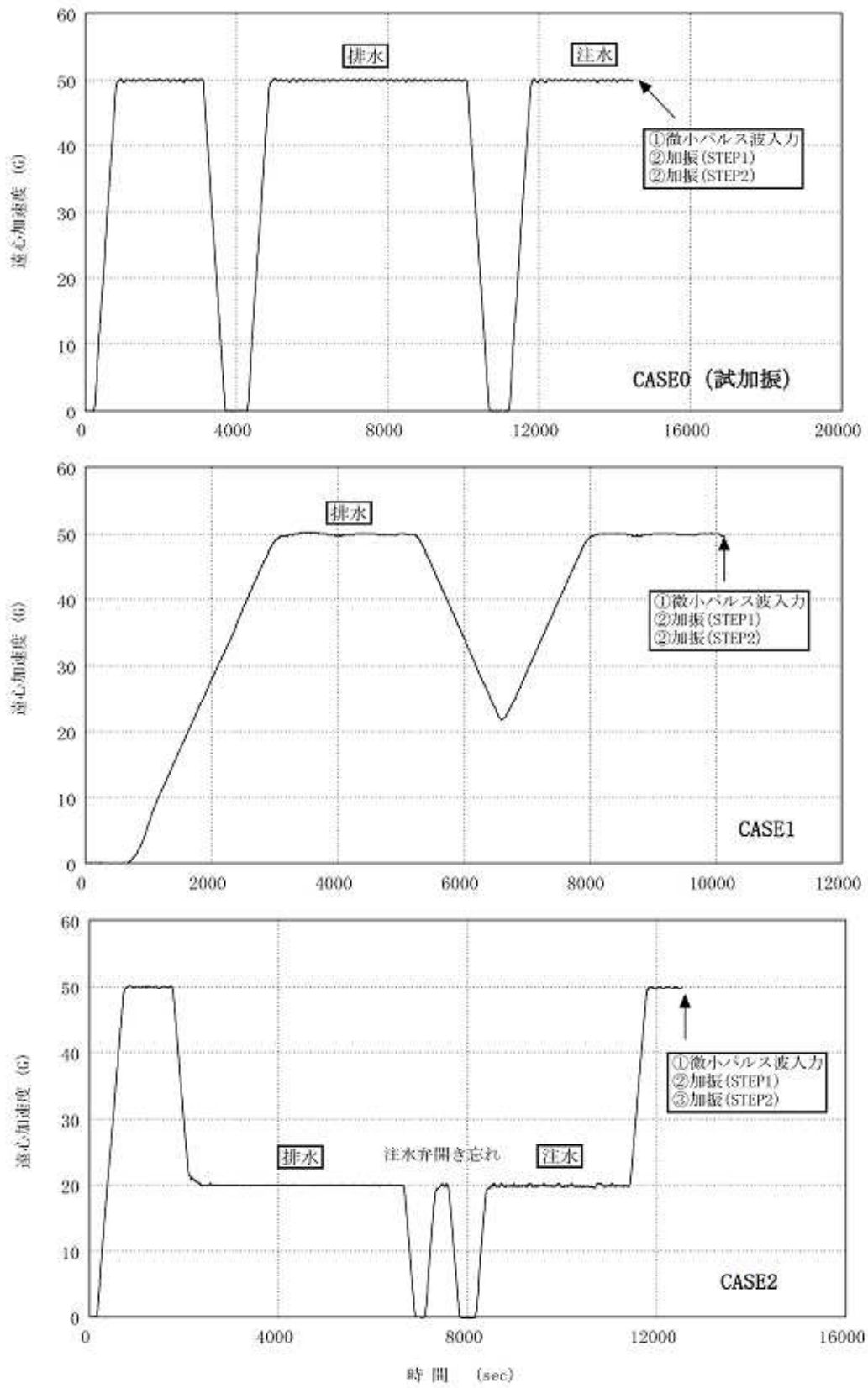


図 2.2-2 加振前までの注排水の状況(CASE0~2)

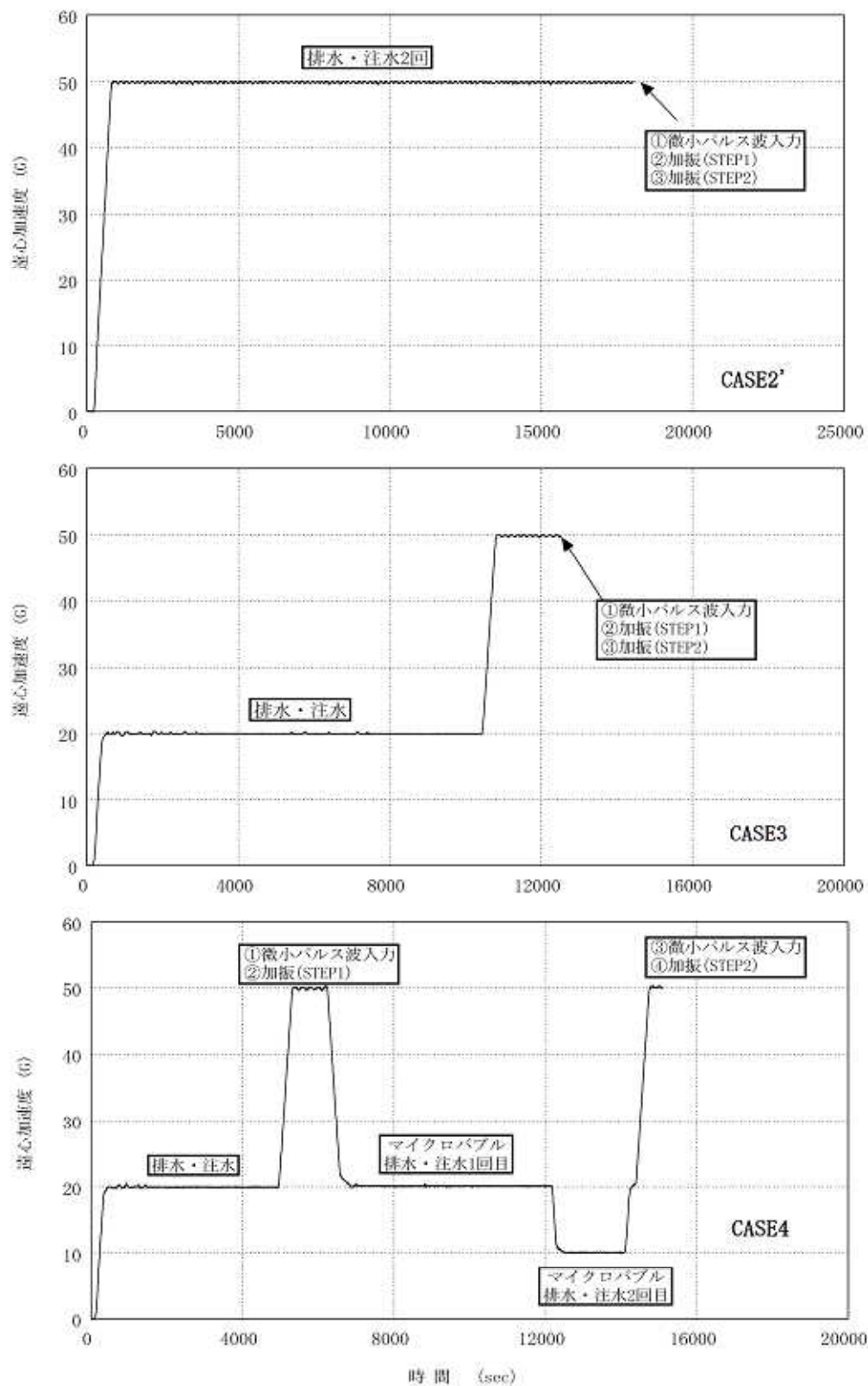


図 2.2-3 加振前までの注排水の状況(CASE2 ~ 4)

(3)住宅模型

住宅模型を写真 2.2-9 および写真 2.2-10 に示す。住宅模型は、セメントペーストを用いて製作しており、曲げ破壊を防ぐため中には金網を敷設した。加振を行う遠心重力場での模型設地圧が実際の住宅と同じ 15kN/m^2 程度(2 階建て在来木造住宅のベタ基礎)および 45kN/m^2 程度(2 階建て壁式 RC 造住宅のベタ基礎)を目標に密度調整をした。RC 造を想定した住宅模型において、接地圧の目標を 45kN/m^2 に設定したが、実際に作製した住宅模型の接地圧は 38kN/m^2 であった。

住宅模型には、鉛直・水平変位とともに応答加速度を設置した。また、模型側面と土槽ガラス面の間は標点とすき間テープを貼り付けた。このうち、すき間テープはわずかにガラス面が接触しているだけなので、両者の摩擦は無視できると考えられる。

各ケースの模型仕様は、次の通りである。

CASE0~3

模型仕様：幅 200mm、奥行き 296mm、厚さ 13mm、質量 1755g

実物換算：幅 10m、奥行き 14.8m、質量 2152kN、接地圧 15kN/m^2

CASE4

模型仕様：幅 200mm、奥行き 296mm、厚さ 39mm、質量 4540g

実物換算：幅 10m、奥行き 14.8m、質量 5565kN、接地圧 38kN/m^2

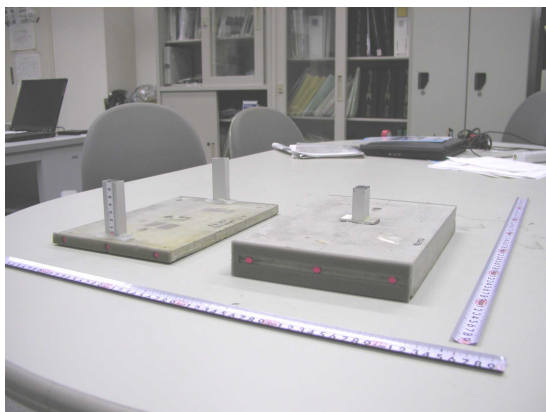


写真 2.2-9 住宅模型の全景

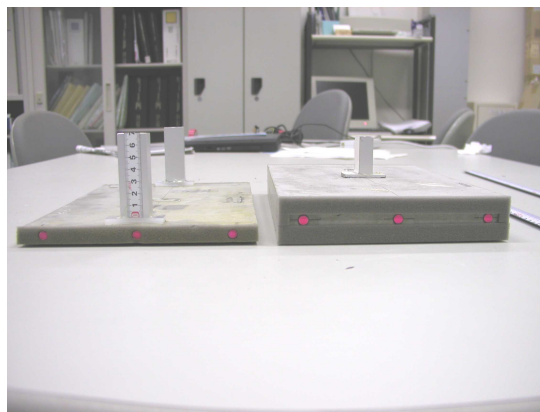


写真 2.2-10 住宅模型の正面

2.3 飽和度測定方法

2.3.1 初期飽和度測定方法

重力場において飽和させた地盤について、飽和度の測定を行った。測定方法は、飽和後の地盤をそのまま脱気槽内に残す。それから脱気槽全体に 20kPa 程度の負圧をかけ、その圧力変化と水面変化量から飽和度を求めるものである(写真 2.3-1 参照)。飽和度は不飽和土中に存在する空気を理想気体で間隙水を圧縮と仮定して、ボイルの法則から算定される*)。

水面変化は、レーザ変位計(定格容量 $\pm 15\text{mm}$)を用いて測定しており、水面に浮かべるターゲットには発砲スチロールを用いた。なおターゲットは変位測定時に動かないよう、塩ビパイプ内に設置した。



写真 2.3-1 地盤飽和度の測定状況

*) 参考文献

岡村未対・来山博昭：遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作製法と飽和度計測法に関する研究、土木学会論文集 C Vol.64 No.3, 662-771, 2008.8.

2.3.2 加振に至るまでの飽和度測定方法

重力場から加振終了後までの飽和度の測定には、TDR(Time Domain Refractometer)土壤水分計を使用して実施した。TDR 土壤水分計を写真 2.3-2 および写真 2.3-3 に示す。このセンサーは本体部から発振された電磁波が 2 本のステンレスロッド間を伝わり、その時の伝播時間から土壤水分を計測するものである。今回の実験では以下に示す 2 種類の土壤水分計を使用した。

このうち土壤水分計(CS-616)は予めキャリブレーションを行っており、伝播時間、出力電圧と体積含水率及び飽和度の関係を図 2.3-1 に示す。

キャリブレーションは幅 800mm, 高さ 30cm 奥行き 20cm 小型剛土槽を用いて実施した。含水調整をした江戸崎で所定飽和度を有する地盤を作製する。地盤層厚は 100mm とし、その中心深度に水分計を埋設した。締固め度は実験時と同じ $D=88\%, 92\%$ とした。図 2.3-1 に

示したように、2種類の締固め度におけるキャリレーションカーブは、ほとんど同じであった。なお土壌水分計(Trime)でもキャリレーションを行ったが、測定生データ(電圧)にノイズ成分が多く見られ、正確なキャリレーションカーブが求められなかった。

(1)土壌水分計 CS-616 (写真2.3-2 参照)

- ・名称：CS-616
- ・データロガー：CR-800 サポートソフトウェア PC400
- ・仕様：本体寸法 長さ 110mm, 幅 63mm, 厚さ 20mm
ステンレスロッド長さ 30mm, 間隔 32mm、消費電力 25mA、供給電源 12VDC
- ・製造元：CABELL SCIENTIFIC, INC. (アメリカ製)
- ・代理店：(株)フィールドプロ

(2) 土壌水分計 TRIME (写真2.3-3 参照)

- ・名称：TRIME-ES P2 タイプ
- ・仕様：本体寸法 直径 32mm, 長さ 65mm, t=20mm
ステンレスロッド長さ 110mm, 間隔 32mm、供給電源 12VDC
- ・製造元：IMKO MICROMODULTECHNIK GMBH
- ・代理店：東北電子産業株式会社

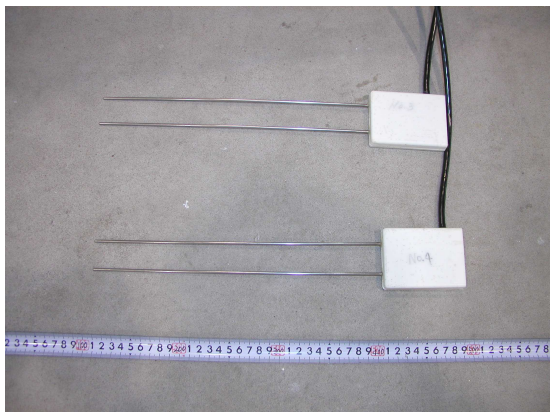


写真 2.3-2 TDR 式土壌水分計 (CS616)

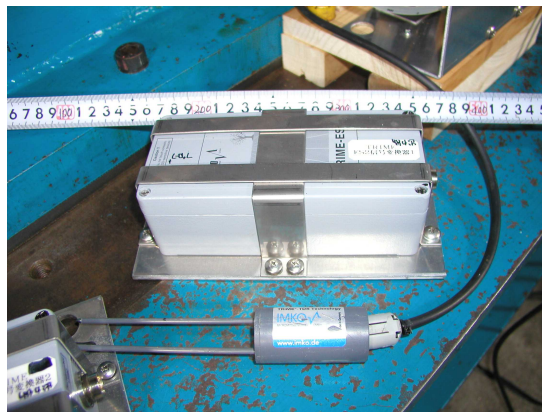


写真 2.3-3 TDR 式土壌水分計 (TRIME)

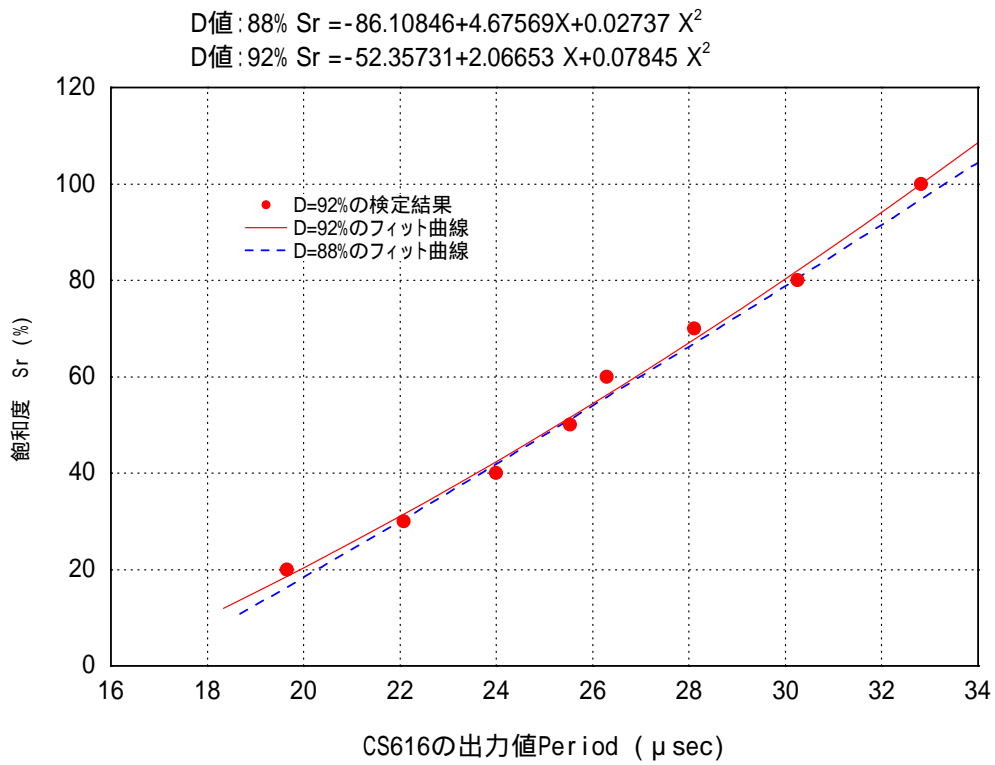
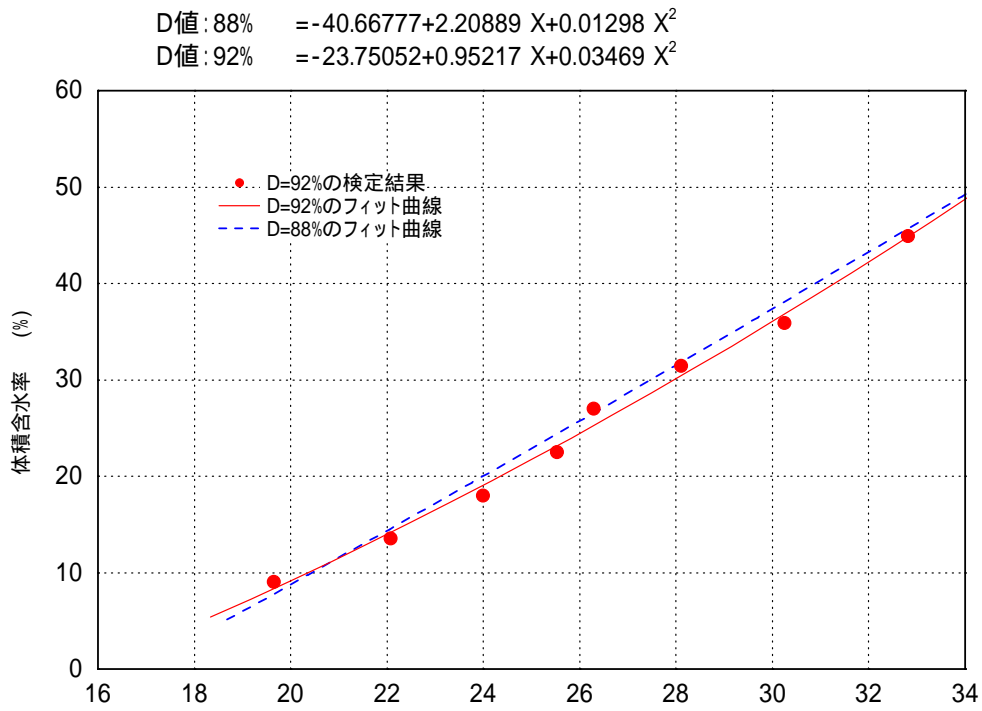


図 2.3-1 土壤水分計(TDR CS-616)の検定結果

2.4 加振方法

遠心加速度は、上昇・下降は 5G/min.の割合で行った。遠心重力場で地盤を不飽和化させてから、加振までの手順を以下に示す。

実験土槽を揺動架台にセットし、写真撮影と地表面標点座標の計測を行う。

遠心加速度を所定の 20G あるいは 50G にて土槽に注排水し、不飽和地盤を作製する。

加振を行う遠心加速度 50G に上昇させ、模型沈下や過剰間隙水圧が定常状態になるのを確認する。

加振装置暖気のための予備加振を行った後、微小レベルのインパルス波を入力する。

データ収録と高速度カメラを外部トリガーモードにし、ビデオをスタートさせてから、本加振(STEP1)を開始する。

加振データ収録が終了したら、2 回目(STEP2)の加振を行う。

遠心加速度を重力場に戻し、地盤変形後の写真撮影と地表面標点座標の計測を行って地盤を解体する。

本実験で使用した入力加速度の時刻歴波形を図 2.4-1 および図 2.4-2 に示す。入力加速度の時刻歴波波形は、図 2.4-1 および図 2.4-2 に示す様に sin 波(周波数 50Hz、主要動 20 波) および道路橋示方書によるタイプ I の I 種地盤の加速度波形 I-I-3 波と土木研究所暫定提案の露頭基盤面における加速度応答スペクトルにフィッティングされた神戸海洋气象台記録波形の振幅を加振能力により 0.85 倍に調整した波である。

本実験で使用した sin 波の入力波形は、CASE0(試加振)によりレベル調整をして決定した。表 2.4-1 に加振条件一覧を示す。

表 2.4-1 加振条件一覧

CASE	STEP	加振条件	
		入力波形	目標加速度(gal)
0	1	sin波 20波 (50Hz)	270
	2		400
1	1	sin波 20波 (50Hz)	270
	2		400
2	1	sin波 20波 (50Hz)	270
	2		400
2'	1	sin波 20波 (50Hz)	270
	2		400
3	1	sin波 20波 (50Hz)	270
	2		400
	3		400
4	1	神戸波 (JMA基盤波)	
	2		

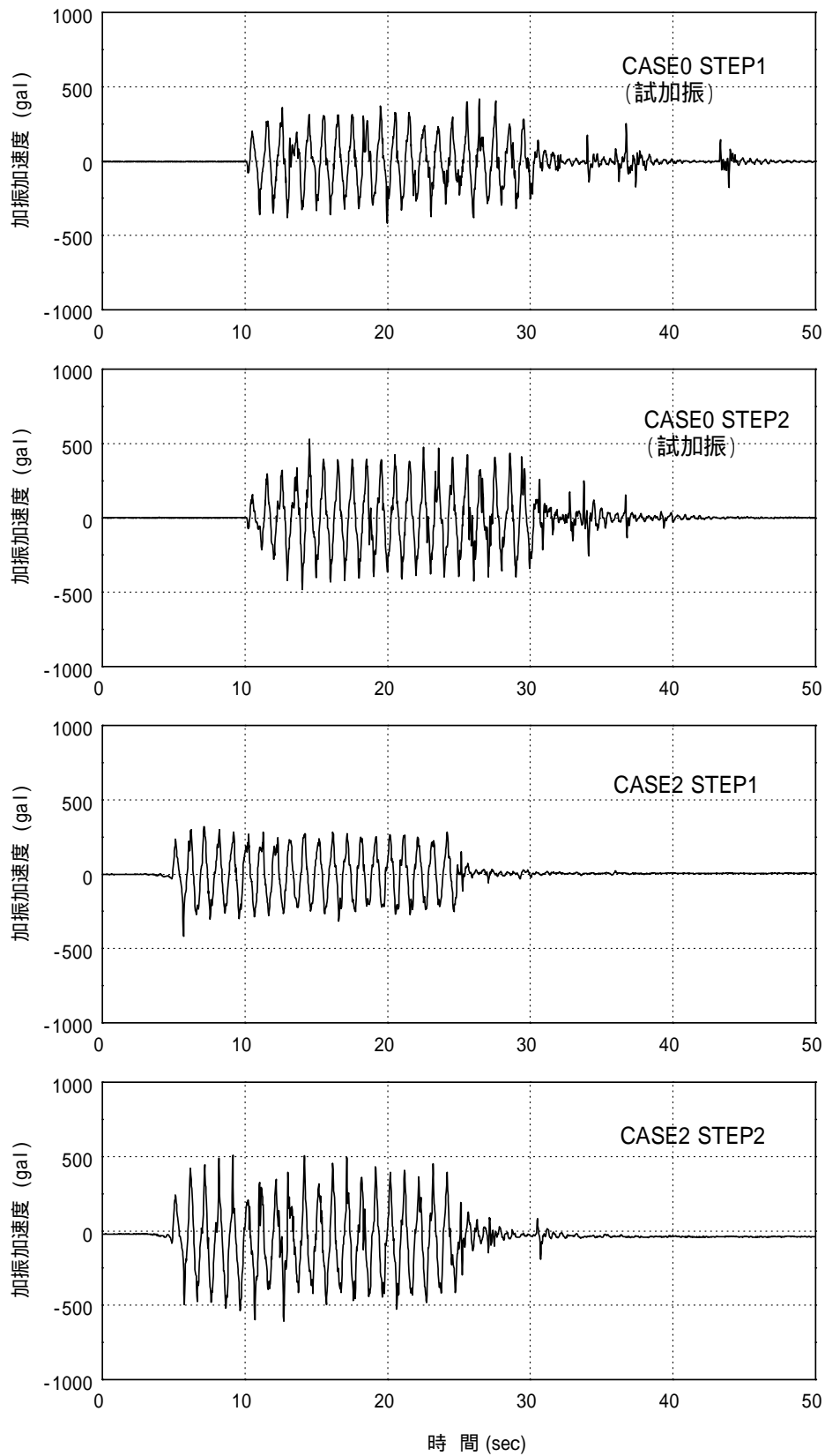
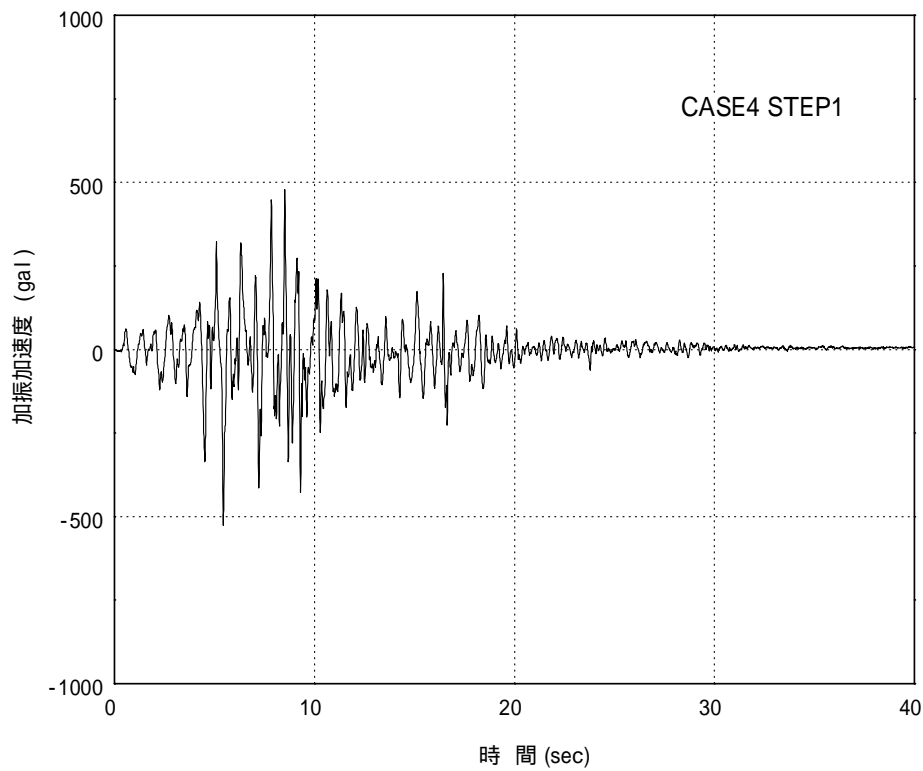


図 2.4-1 本実験で使用した入力加速度の時刻歴波形(CASE0 ~ 3)



< 入力加速度波形 >

使用実績:平成21年度河川堤防の動的遠心模型実験業務(CASE2)

波形の種類:土木研究所暫定提案の露頭基盤面における加速度応答スペクトルにフィッティングされた神戸海洋気象台記録波形の振幅を加振能力により0.85倍に調整した波形。

参考資料:国土交通省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室
大規模地震を考慮した地中構造物の耐震設計法に関する試験調査
平成12年度振動研究室調査試験研究成果概要報告書
振動研究室資料第22号、pp.19-20, 2001.3

図 2.4-2 本実験で使用した入力加速度の時刻歴波形(CASE4)

2.5 測定項目とデータ収録

(1) 測定項目

地盤及び模型の計測器及びメッシュ・標点位置を試験体ケース毎に図 2.5-1 ~ 図 2.5-5 に示す。

(2) データ収録

データの収録方法と測定データの極性をそれぞれ表 2.5-1 および表 2.5-2 に示す。初期値計測（ゼロバランス）は、遠心加速度を上昇させる前と加振直前に実施した。

表 2.5-1 データの収録方法

実験過程	サンプリング周波数	計測時間
遠心加速度上昇時	0.25Hz	任意
不飽和液状化層通水時	0.25Hz	任意
パルス波入力	20,000Hz	1.0 秒
加振	2,000Hz	30 秒
遠心加速度下降時	1.0Hz	任意

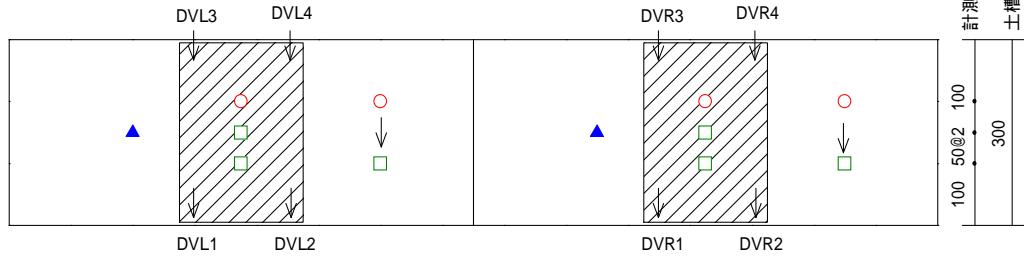
表 2.5-2 測定データの極性

沈下計	水平変位計 (レーザー変位計)	加速度計	水圧計
沈下方向が負	土槽右方向の変位が正	土槽右方向への加速を正	圧縮方向が正

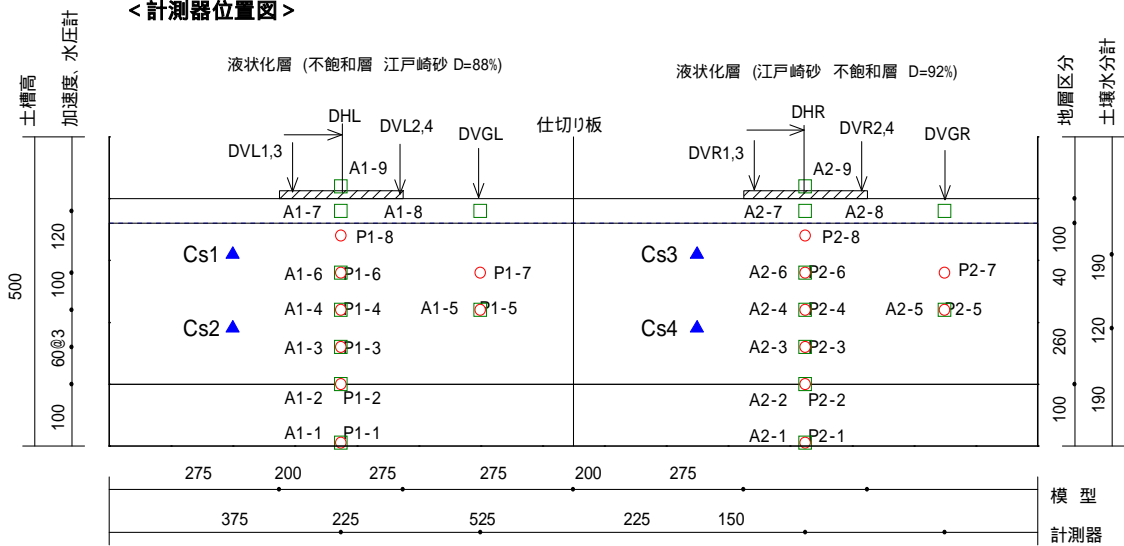
(3) 盛土及び水平地盤の変形状況の観察

盛土及び水平地盤の変形状況の観察は、重力場で撮影したデジタル画像を拡大し、それから標点やメッシュの座標位置を読み取ってその座標を加振前後で比較することにより行った。その他地表面にも標点を配置しており、地盤作製時・地下水位調整時・加振終了時に重力場においてメジャーにより標点座標を計測した。

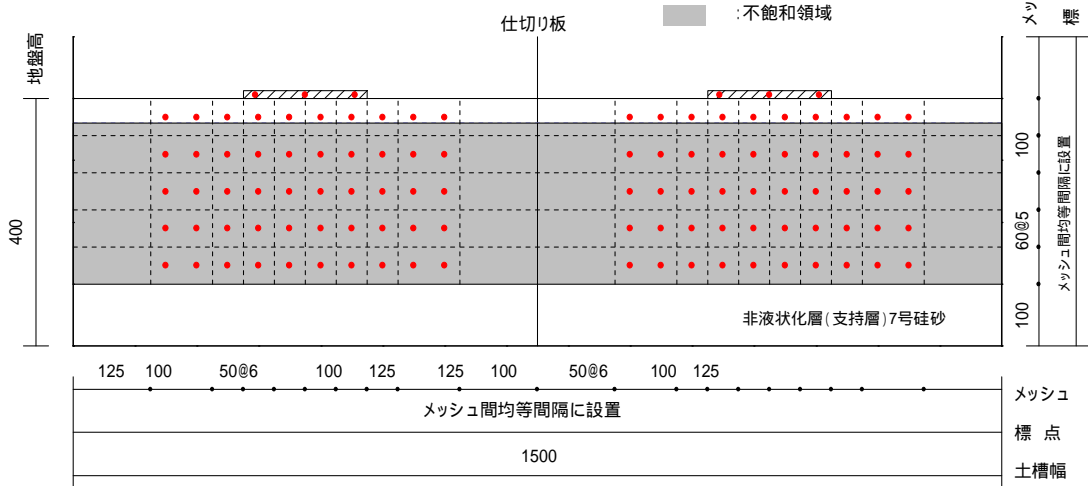
< 計測器位置図 >



< 計測器位置図 >

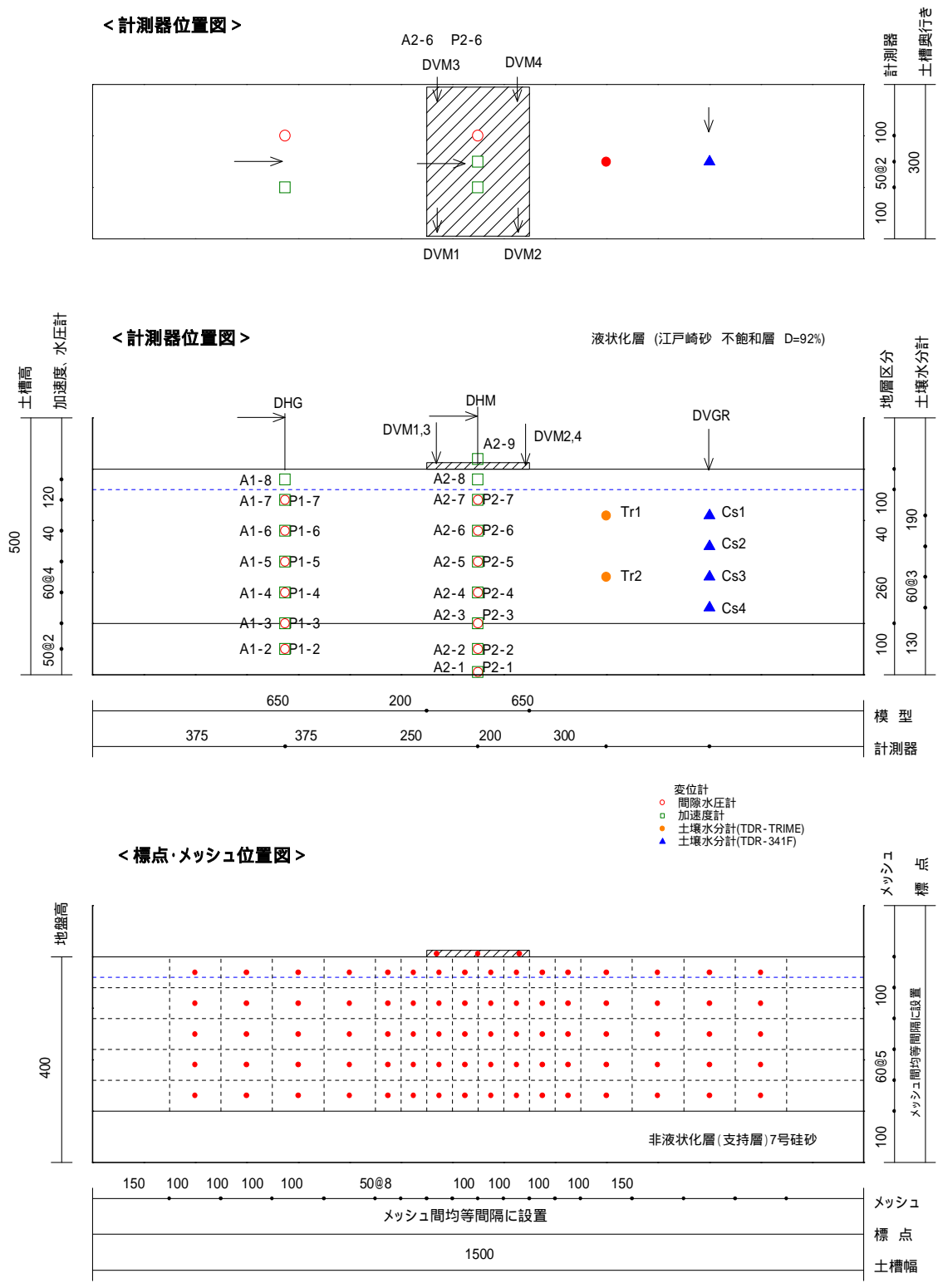


< 標点・メッシュ位置図 >



縮尺:1/10 単位:mm

図 2.5-1 地盤及び模型の計測器及びメッシュ・標点位置(CASE0)



縮尺:1/10 単位:mm

図 2.5-2 地盤及び模型の計測器及びメッシュ・標点位置(CASE1)

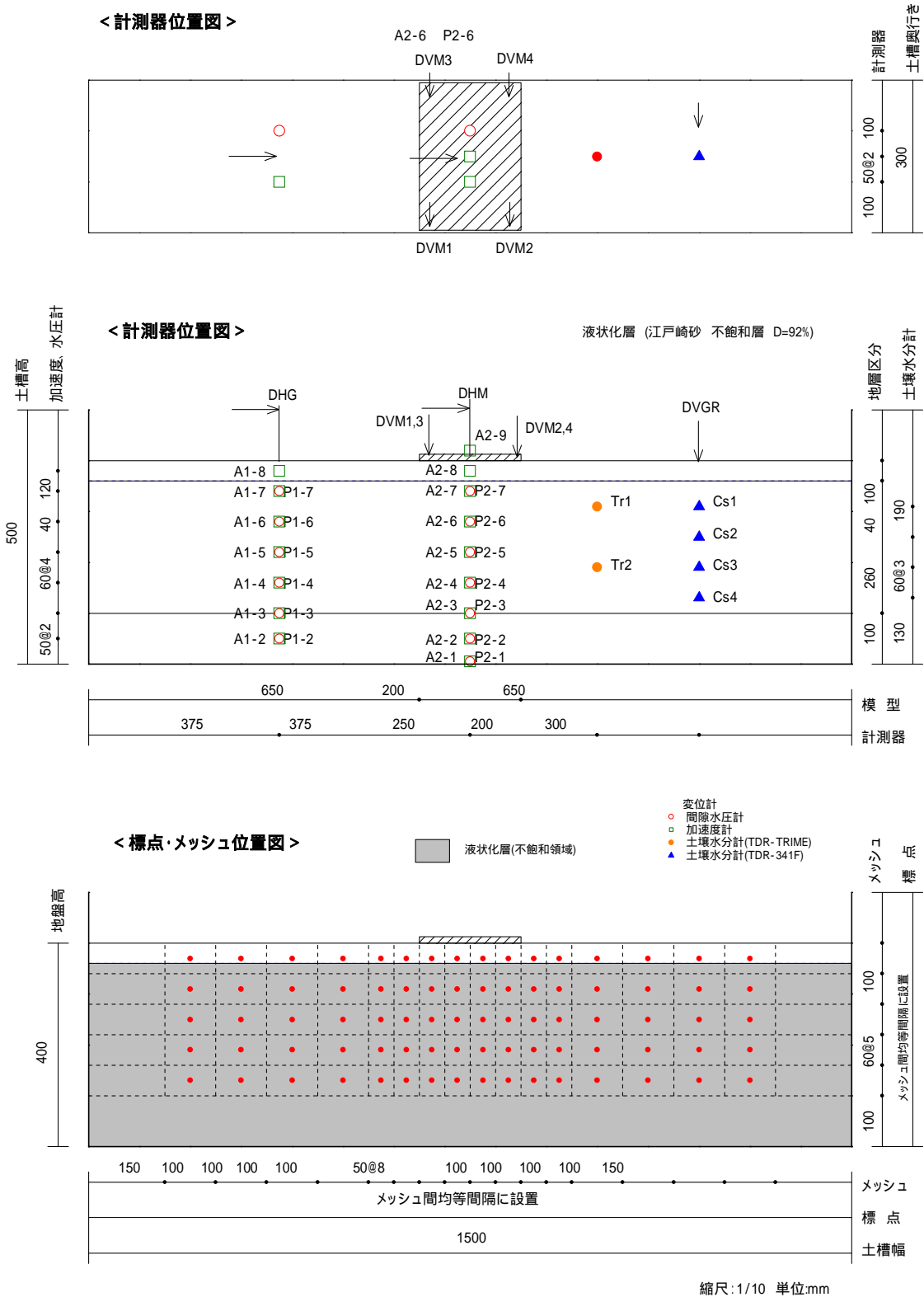


図 2.5-3 地盤及び模型の計測器及びメッシュ・標点位置(CASE2 および 2)

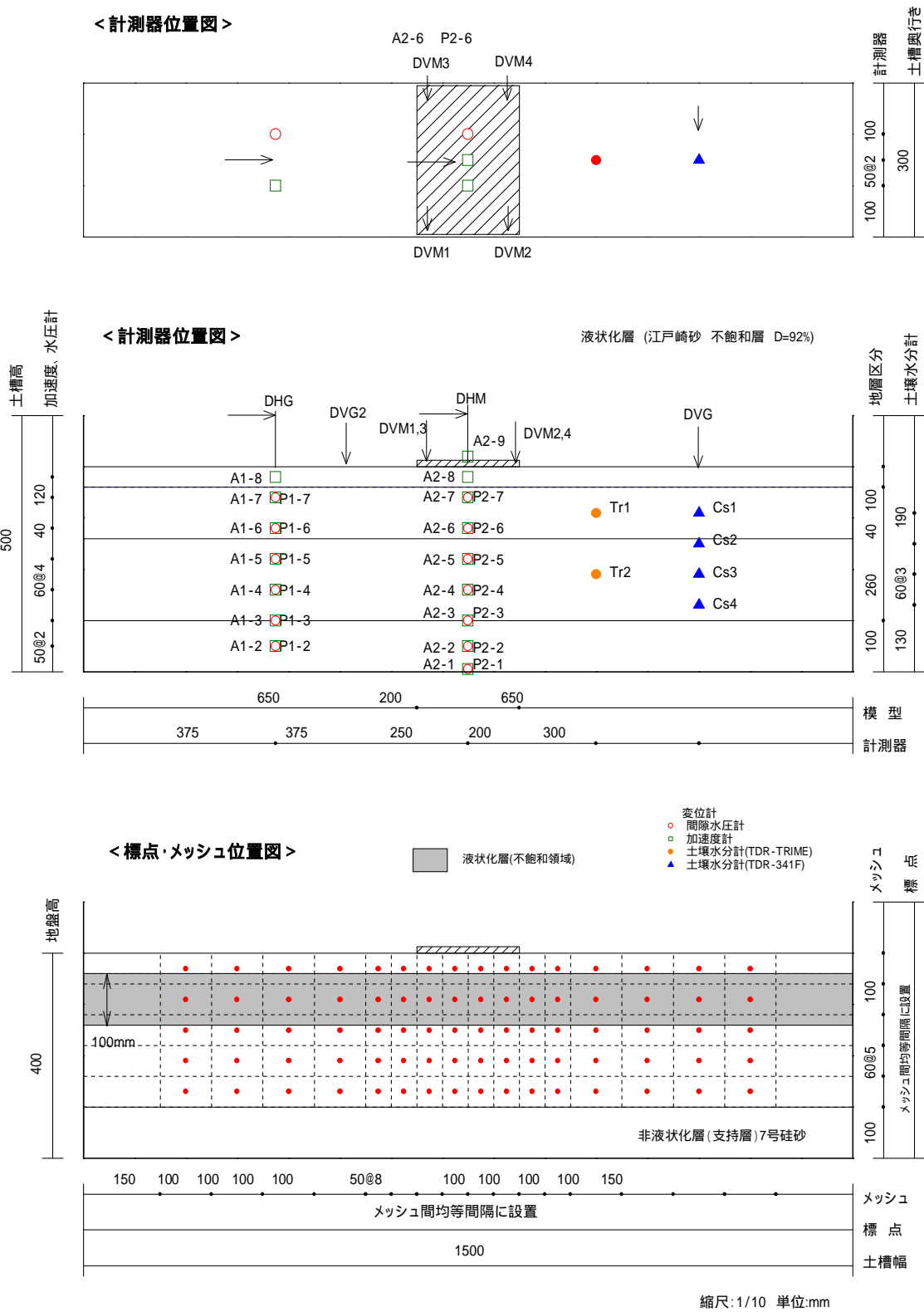
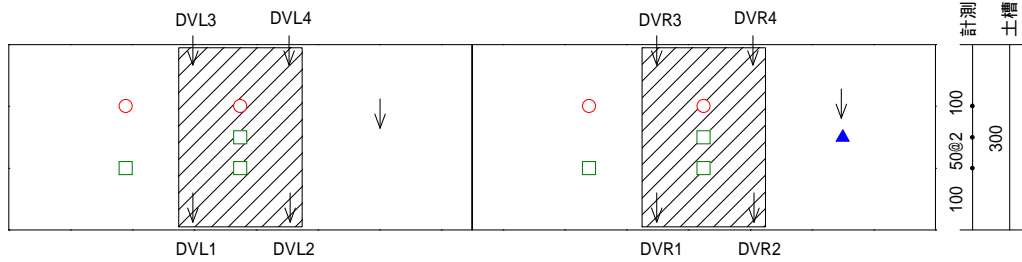
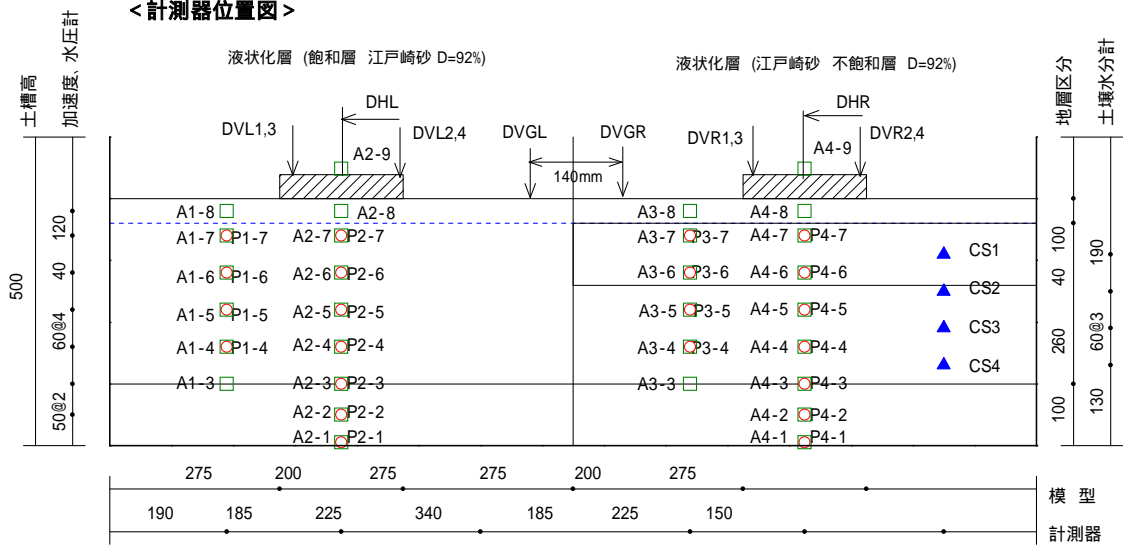


図 2.5-4 地盤及び模型の計測器及びメッシュ・標点位置(CASE3)

< 計測器位置図 >

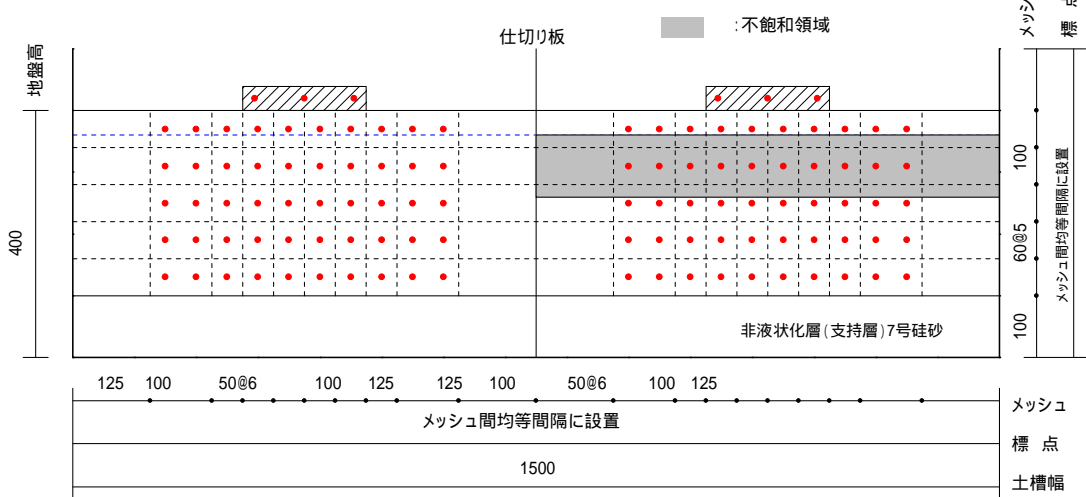


< 計測器位置図 >



- 変位計
- 間隙水圧計
- 加速度計
- ▲ 土壌水分計(CS-616)

< 標点・メッシュ位置図 >



縮尺:1/10 単位:mm

図 2.5-5 地盤及び模型の計測器及びメッシュ・標点位置(CASE4)

2.6 室内土質試験

(1) 物理及び安定化試験

地盤材料である7号硅砂と江戸崎砂に対し、物理試験及びせん断試験を実施した。表2.6-1に各試験の項目と規格を示す。

表 2.6-1 物理及び安定化試験の項目と規格

土質試験名	規格・基準	試料名	備考
土粒子の密度試験	JIS A 1202	江戸崎	
土の粒度試験	JIS A 1204	江戸崎	ふるい分析
砂の最大密度・最小密度試験	JGS 0161	7号硅砂	
突固めによる土の締固め試験	JIS A 1210	江戸崎砂	A-c 法

(2) せん断試験

液状化層の江戸崎砂に対し、せん断試験（三軸圧縮試験と液状化試験）を実施した。試験の詳細方法を以下に示す。なお、不飽和土の試験において、所定の飽和度を得るために通水量を変えて供試体を作製する飽和度測定試験を予め実施した。

試験体作製方法

三軸試験用供試体は、図2.6-1に示す質量750gのランマーを用いて締固めて作製した。供試体作製に際し、所定の乾燥密度の供試体を作製するため、直径5cm、高さ10cmのモールドを用いて、落下高さ(5cm)一定で落下回数を変えて予め密度検定を実施している。供試体作製手順は次の通りである。

- 1) 試料と2つ割りモールドの摩擦を軽減するためモールドの内面にラップを貼る。
- 2) 最適含水比16%付近に調整した必要量の試料を各層毎に用意する。
- 3) 1層当たりの試料をモールド内に投入し、ランマーを自由落下させる。所定の落下回数に達したら次の層となじみやすくするため試料上面を軽くかき乱す。
- 4) 3)の操作を5層目まで繰り返す。
- 5) 供試体の最上端面を直ナイフでカット後、ガラス板で軽く押し平に仕上げる。
- 6) 2つ割りモールドから供試体を取り出し、供試体寸法等を測定する。

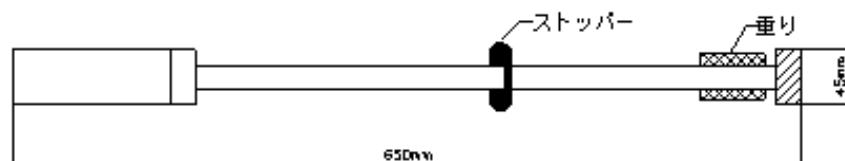


図 2.6-1 供試体の作製に使用したランマー

圧密非排水(CUB)三軸圧縮試験

三軸圧縮試験条件を表 2.6-2 に示す。試験は、地盤工学会基準 (JGS0527) に基づき実施した。供試体の不飽和化の状況は液状化試験の場合と同様である。

表 2.6-2 圧密非排水(CUB)三軸圧縮試験条件

試験番号		
供試体寸法	直径 5cm, 高さ H10cm	
締固め度	D=92% ($d=1.504\text{g/cm}^3$)	
飽和度	100% (飽和)	90% (不飽和)
圧密状態	等方状態	
圧密圧力	50, 100, 200 kN/m ²	
背 圧	65kN/m ²	
排水条件	圧密・非排水	
飽和条件	飽和度 100%, B 値 0.95 以上	

注記・圧密圧力と背圧：遠心載荷実験の液状化層中心位置で設定

繰返し非排水三軸試験

繰返し非排水三軸試験（液状化試験）は、地盤工学会基準「土の繰返し非排水三軸試験方法」（JGS 0541-2000）に準じて実施した。試験条件を表 2.6-3 に示す。また、本試験では不飽和度を測定するため、三軸試験機は圧力室が供試体体積を精度よく測定できる二重セル構造のものを使用した。（図 2.6-2 参照）

表 2.6-3 繰返し非排水三軸試験条件

試験番号			
供試体寸法	直径 5cm, 高さ H10cm		
締固め度	D=92% ($d_s=1.504\text{g/cm}^3$)		
飽和度	100% (飽和)	90% (不飽和)	90% (不飽和)
圧密状態	等方状態		
圧密圧力	95kN/m ²		55kN/m ²
背 圧	65kN/m ²		25kN/m ²
排水条件	圧密・非排水		
飽和条件	飽和度 100%, B 値 0.95 以上		
載荷条件	波形	正弦波	
	周波数	0.1Hz	

注記) 圧密圧力と背圧

試験番号 : 遠心載荷実験(CASE1,2)の液状化層中心位置で設定

試験番号 : 遠心載荷実験(CASE3)の不飽和液状化層中心位置で設定

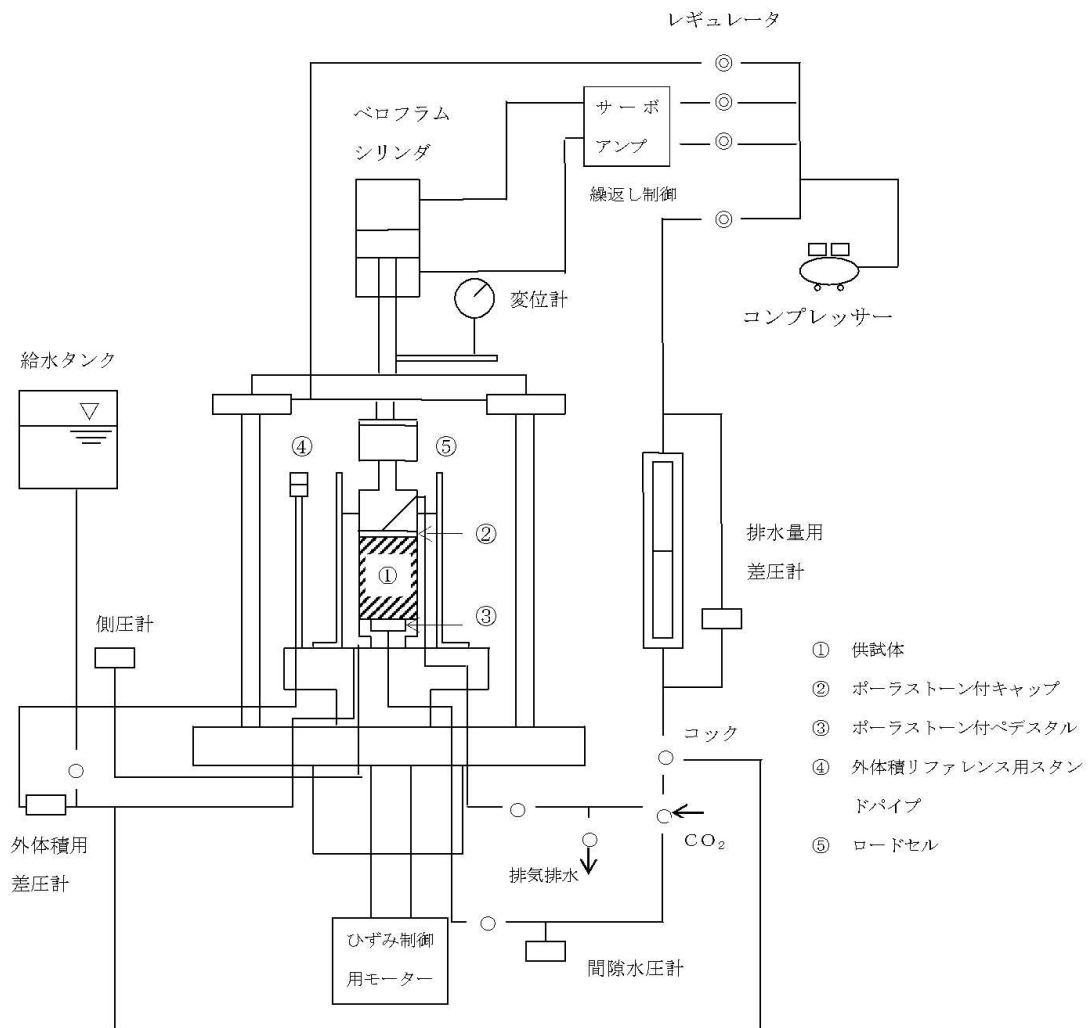


図 2.6-2 繰返し三軸試験機の概要図

< 繰返し非排水三軸試験手順 >

繰返し非排水三軸試験の手順を図 2.6-3 に示す。同図にある飽和度測定及び間隙水圧係数 B 値測定時の圧力変動は 20kN/m² 程度とする。ここで、供試体の飽和度測定は、供試体に背圧を加えた時のピューレット水位の変動量から算出される供試体流入水量と、下記に示すボイルの法則から求めることができる。但し、土粒子及び間隙水の体積は非圧縮とする。

(1) 土の状態量

V : 供試体全体の体積 (cm³)

V_s : 供試体の土粒子の体積 (cm³)

(常に一定)

V_a : 供試体の空気の体積 (cm³) V_w : 供試体の水の体積 (cm³)

m_s : 土粒子の質量 (g) s : 土粒子の密度 (g/cm³)

(2) ボイルの法則を用いた供試体の飽和度算出

ボイルの法則は $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$ で表される。

ここで

P₁ : 背圧 (kN/m²)

V₁ : p₁ 時の土中空気の体積(cm³) P₂ : p₁ + 変動圧 (kN/m²)

V₂ : p₂ 時の土中空気の体積(cm³)

V : 変動圧による体積変化 $V = V_1 - V_2$ (cm³)

{ ピューレットから供試体に流入する水量 }

である。よって、ボイルの法則式は次式のように変形できる。

$$V_1 = \frac{P_2}{P_2 - P_1} \cdot \Delta V$$

上式を用いて任意の応力状態における飽和度 Sr(%)は次式で求められる。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{(V - V_s - V_1)}{(V - V_s)} \times 100$$

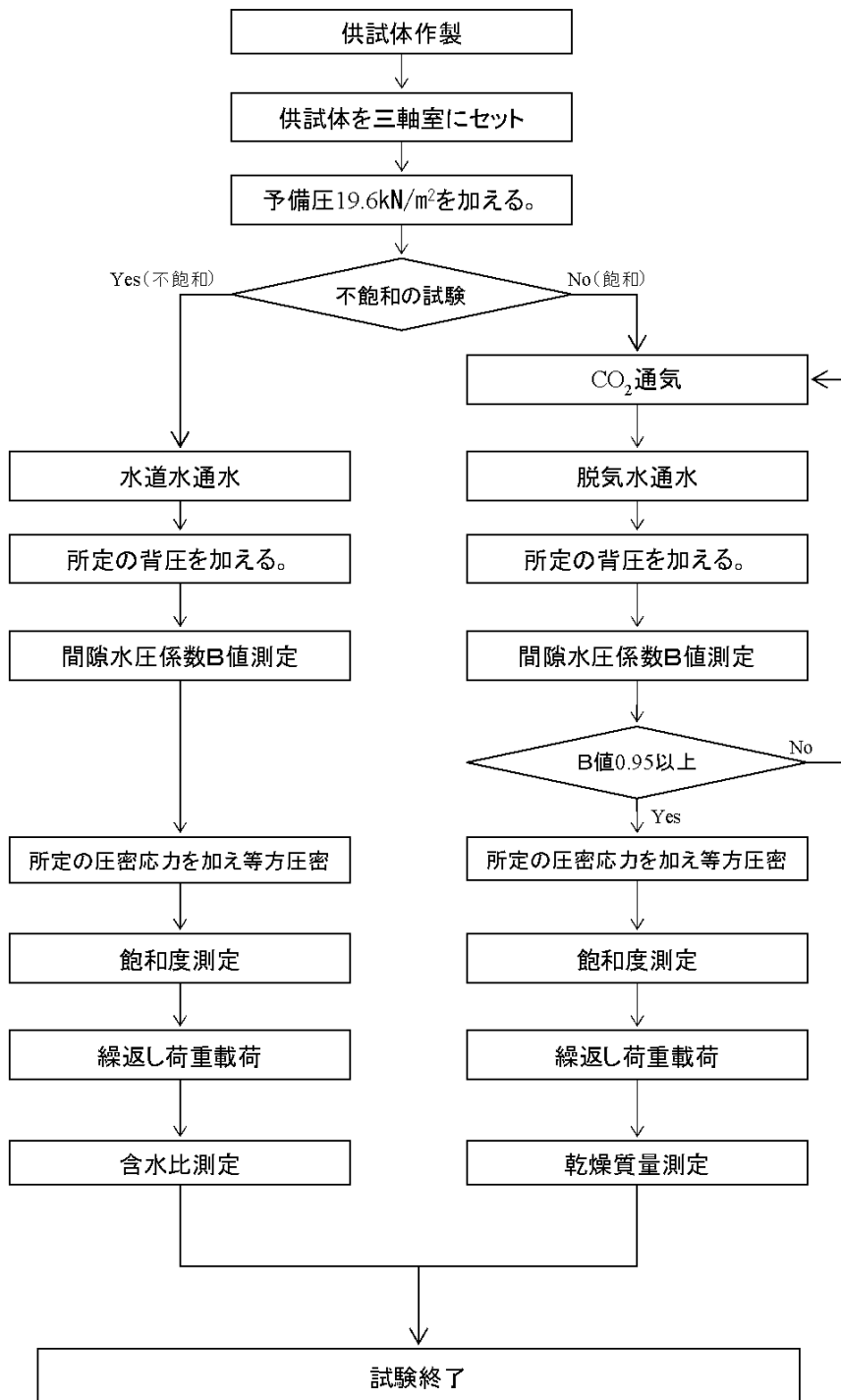


図 2.6-3 繰返し非排水三軸試験の手順