

液状化土槽実験における飽和度評価のための P波測定と液状化時の地盤変位測定

佐藤 正義¹・阿部秋男²・水野二十一³・田村修次⁴

¹ 防災科学技術研究所 耐震工学研究室 室長 (〒305-0006 つくば市天王台3-1)

² (株)東京ソイルリサーチ 特殊試験室 室長 (〒305-0045 つくば市梅園2-1-12)

³ 国土交通省 建築研究所 先端技術研究官 (〒305-0802 つくば市立原1)

⁴ 信州大学 工学部 社会開発工学科 助教授 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

A ground preparation method of the high degree of saturation was proposed by vibrating a mesh screen installed under water and pouring sand in water. P-wave velocities were measured to confirm the validity of the ground preparation method of a high degree of saturation by the experiments using a medium-scale laminar container. Next, we developed the displacement instrument applied rotational angle potentiometer to measure the distribution of the dynamic ground. The efficacy was confirmed with conducting the liquefaction experiments.

Key Words: laminar container, liquefaction test, degree of saturation, P-wave velocity, S-wave velocity, bender-element, displacement measurement apparatus

1. まえがき

振動台を用いて地盤の液状化実験を実施する時、飽和度の高い模型地盤を作成することが重要である。それは、地盤の液状化強度が飽和度に依存するので、飽和度の低い地盤で実験を行うと、液状化の発生条件を定量的に評価することが非常に困難になるためである。大型土槽実験において、飽和度の高い地盤を作成することは容易なことではない。そこで、水中落下法による高飽和度の地盤作成法として、水中にメッシュを設置してそれを振動させて、気泡の少ない地盤を作成する方法を提案し、これまで小型の実験土槽を用いてその効果を実証し¹⁾、大規模な土槽実験への適用の見通しを得た。しかし、この手法を大型土槽実験へ適用し問題点が発生した場合、その場で対応・修正することが困難なことが予想される。そのため、ここでは大型土槽実験と同様の条件で、中規模せん断土槽を用いて模型地盤を作成することにより、大規模土槽実験への適用性の確認を行う事とした。また、高飽和度の地盤作成法の妥当性を確かめるため飽和度をP波測定により検討することとした。P波測定は、バンダーエレメントを用いた方法と水中マイクロフォンを用いた方法の2つの方法で行なった。

次に、液状化土槽実験において振動中の地盤変位の分布を測定するため、回転角ポテンショメータを応用した変位計測器を開発し、液状化実験でその有効性を確認することとした。

2. 実験装置の概要と実験ケース

(1) 振動実験装置

実験に用いた振動台は、国土交通省 建築研究所が所有するもので、テーブルサイズ4m×3m、最大搭載質量30tである。最大質量搭載時における加振能力は、最大加振加速度2gである。実験に使用したせん断土槽の内寸法は、長さ3.5m(加振方向)、幅0.8m、深さ31.0mで、角パイプ製の土槽フレームを18段積み重ねたものであり、その概観を写真-1に示す。土槽内側には止水用に厚さ1.5mmのゴムメンブレンを取り付けている。土槽フレームはその慣性力の影響を受けにくいように□50mm、厚さ3mmの長方形中空のアルミニウム角パイプを用いて軽量化を図っている。また、各々の角パイプ間には、平型ベアリング(ベアリング厚さ2mm、ベース厚さ1mm)を設置して、土槽フレーム間のせん断剛性を小さくしている。

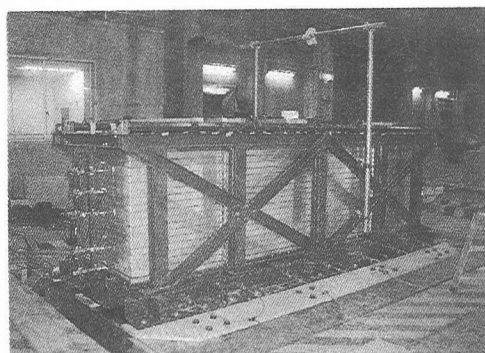


写真-1 実験に用いたせん断土槽の概観

表-1 実験ケースの一覧

実験ケース	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
投入砂	乾燥砂	乾燥砂	乾燥砂	湿潤砂 (w=17%)
地盤作成法	水中ふるい +パイプレータ	水中ふるい +パイプレータ	一旦水位 低下後、 水位再上昇	水中ふるい +パイプレータ
砂の投入速度 (kg/min)	52	20	80	10
平均相対密度 Dr(%)	47	46	45	45

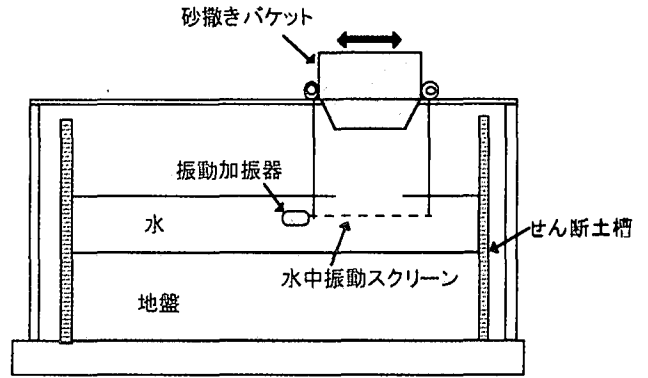


図-1 水中振動スクリーンによる地盤作成装置の概念

(3) 実験ケースと地盤の作成方法

実施した実験ケースの一覧を表-1に示す。実験ケース数は4ケースであり、地盤作成方法はいずれもほぼ同じである。具体的には、水中落下法による高飽和度の地盤作成法として、トンバッグにいた乾燥砂を砂撒きバケツにいれ、バケツから砂材料を水中に落下させる際、水中に設置した振動スクリーンを通すことで、落下中に砂が巻き込む空気を振動で分離させ、飽和度の向上をはかる方法である。水中振動スクリーンによる地盤作成装置の概念を図-1に示す。CASE-1とCASE-2の違いは、砂の投入速度を変化させたものである。CASE-3は、作成した飽和地盤の地下水位を低下させた後、再度地下水位を上昇させることにより、意図的に飽和度の低い地盤を作成した。実際に大型土槽実験を実施する場合には砂を繰り返し使用することになるが、その場合砂を表乾状態にすることは困難であり、多少湿った砂を用いることになる可能性が高い。CASE-4は、その状況でこの水中振動スクリーンによる方法の適用性を把握するという意味から、含水比17%の湿った砂を用いた。

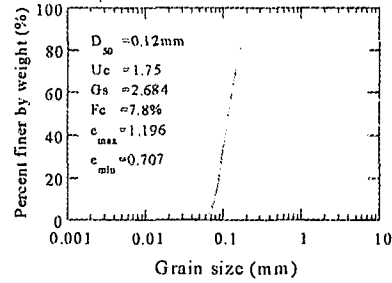


図-2 液状化実験に用いた砂の粒径加積曲線と物理定数

(4) 実験に用いた砂

液状化実験に用いた砂は日光珪砂の6号であり、その粒径加積曲線を図-2に示す。平均粒径 $D_{50}=0.12\text{mm}$ 、細粒含有率 $F_c=7.8$ で、透水係数は $k=0.0102\text{cm/s}$ である。実験は冬に実施したので、気温を考慮するとこの値よりも小さくなっていると考えられる。

(5) 計器配置

計器配置は、CASE-1からCASE-4まで同じであり、そ

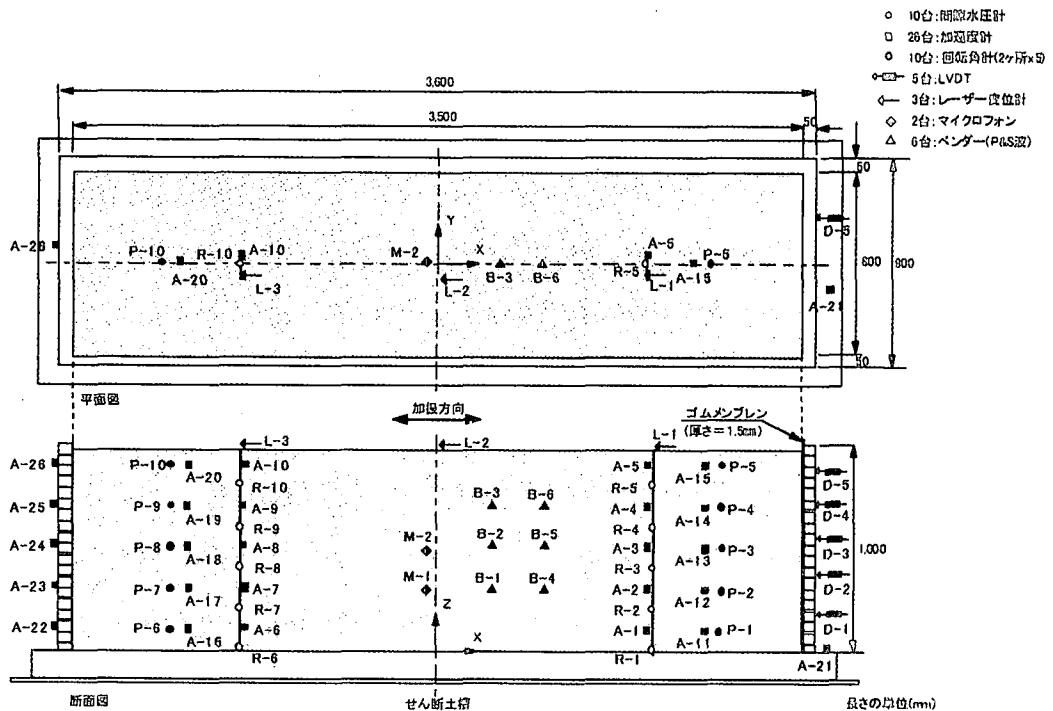


図-3 実験に用いた試験体と計器配置

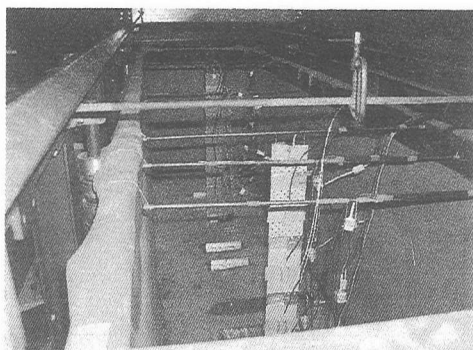


写真-2 地盤内計器の設置状況

表-2 常時微動測定及びS波測定の結果

実験ケース		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
常時微動測定	初期剛性時の固有振動数	21.9	18.8	18.5	20.8
	換算S波速度 (m/s)	82	71	70	78
	平均初期せん断剛性(kPa)	12747	9394	9097	11499
ベンダーエレメント測定	GL-35cmのS波速度(m/s)	76	69	66	70
	初期せん断剛性(kPa)	10859	8951	8189	9212
	GL-65cmのS波速度(m/s)	88	74	82	82
	初期せん断剛性(kPa)	14559	10295	12641	12641

の配置を図-3に、また計器の設置状況を写真-2に示す。計器の設置は、水中落下法を用いているため計器をワイヤーに取り付けて、あらかじめ吊るしておき、その状態で水中落下法により地盤作成を行った。液状化時の地盤挙動把握のため加速度計(A-11～A-15, A-16～A-20)と間隙水圧計(P-1～P-5, P-6～P-10)を2地点にそれぞれ上下方向5箇所埋設し、土槽底面に加速度計(A-21)を設置した。液状化時の地中変位測定のため回転角計(R-1～R-5, R-6～R-10)を設置した変位測定装置を2地点にそれぞれ上下方向5箇所埋設した。土槽フレームには、地盤の変位と加速度との違いを把握するためLVDT式変位計(D-1～D-5)と加速度計(A-22～A26)を設置し、地表面地盤の水平変位を測定するためレーザ変位計(L-1～L-3)を3箇所設置した。

また、地盤のS波速度とP波速度の測定のためベンダーエレメント(B-1～B-6)を、P波速度の測定のためマイクロフォン(M-1～M-2)を埋設した。

(6) 加振

加振はCASE-1～CASE-4の実験とも同じであり、以下に示す4回の加震を行った。EL-CENTRO波においては時間縮尺を行っていない。

- ① EL-CENTRO 波 ; α_{max} = 約 20Gal
- ② EL-CENTRO 波 ; α_{max} = 約 100Gal
- ③ EL-CENTRO 波 ; α_{max} = 約 200Gal
- ④ 正弦波 3Hz ; α = 約 100Gal, 15秒間

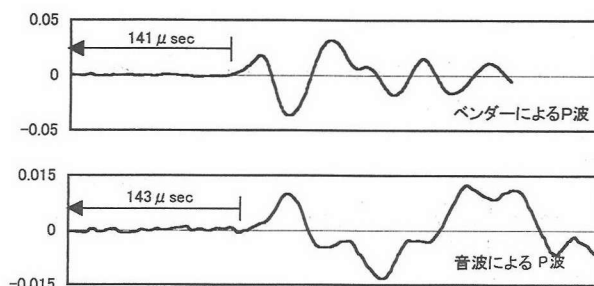


図-4 ベンダーエレメント及びマイクロフォンによるP波の時刻歴

表-3 ベンダーエレメント及びマイクロフォンによるP波測定の結果

実験ケース		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
ベンダーエレメントによるP波速度(m/s)	GL-20cm	1330	1250	690	1430
	GL-50cm	1390	1370	700	1480
	GL-80cm	1420	1420	890	1520
マイクロフォンによるP波速度(m/s)	GL-50cm	1400	1400	750	1460
	GL-80cm	1450	1400	780	1500

4. 地盤作成法の違いによる地盤の特性

(1) 常時微動による固有振動数とS波による地盤の初期剛性への影響

液状化実験の前に模型地盤の底部と地表面上にサーボ型加速度計を設置して、基盤に対する地表面の周波数伝達関数を求めることにより、模型地盤の固有振動数を把握した。常時微動測定であるので、微小ひずみ領域での固有振動数 f_0 が求まる。この結果より $V_s = 4Hf_0$ と $G_0 = \rho V_s^2$ の関係から、地盤の初期せん断剛性: G_0 を算定した。また、ベンダーエレメントによりS波を測定²⁾した。

常時微動測定及びS波測定の結果を表-2に示す。常時微動測定の結果は地盤全体の平均であり約GL-50cmのものとする、ベンダーエレメントによるS波測定による平均値と概ね整合性がある。CASE-1～CASE-4の地盤の相対密度はほとんど変わらないにもかかわらず、地盤の作成法の違いがS波に及ぼす影響は小さくない。この点については、再検討が必要であると考えている。

(2) マイクロフォンとベンダーエレメントによるP波への影響

土槽実験の地盤は閉じた空間であるため、土槽フレームに打撃を加えてP波を発生させる方法ではフレームを伝播する波や反射波が存在し、正確な値を測定することができない。土槽内地盤のP波速度を計測するためには、高い周波数のP波を土槽内で発生させ、直達波の初

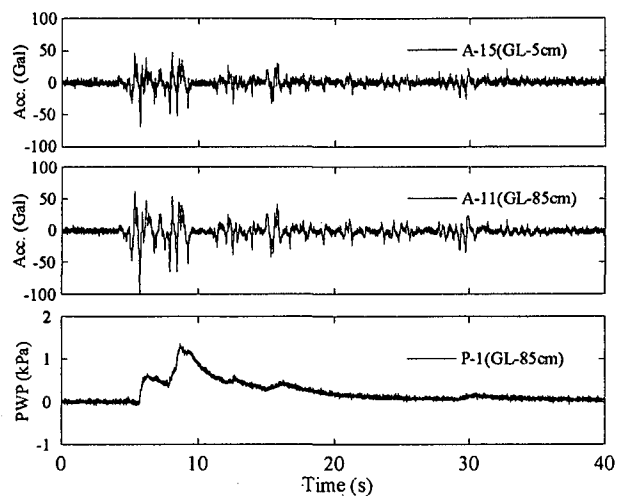


図-5 地盤の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴
(CASE-2; EL-CENTRO波 100Gal 加振)

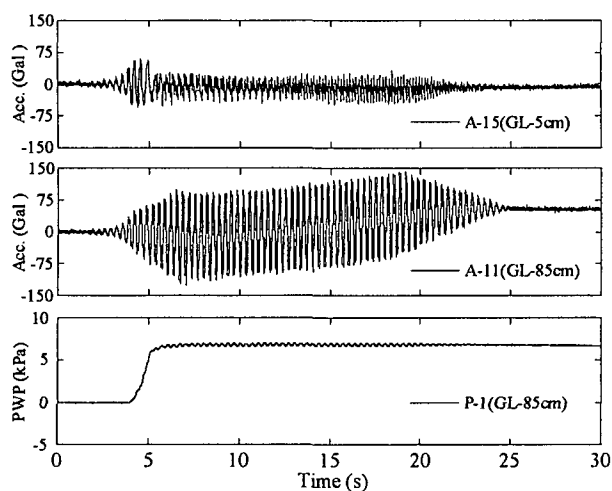


図-6 地盤の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴
(CASE-2; 正弦波 3Hz 100Gal 加振)

動の立ち上がりを明確に捉えることが必要である。そこで、①起振源として0.5～4kHz程度のP波を発生する圧電型パルス発生装置を用い、受信はポータブル水中マイクロフォンを用いる方法¹⁾、②ベンダーエレメントにより5kHz程度のパルス波を発生させそれをベンダーエレメントで受信することによりP波を測定する方法²⁾の2つを用いた。

ベンダーエレメント及びマイクロフォンによるP波の時刻歴を図-4に、またP波測定の結果を表-3に示す。両方のP波の波形から、伝達波の立ち上りはある程度明確に読み取れることが分かる。表のCASE-1～CASE-4において、マイクロフォンとベンダーエレメントを用いた方法は同程度のP波速度を示しており、両者ともある程度の精度を持ったP波測定法と評価できる。CASE-1とCASE-2は乾燥砂の投入速度が異なる作成方法であるが、ほぼ同程度のP波速度を示しており、P波速度は乾燥砂の投入速度に依存していないという結果である。CASE-3は意図的に飽和度の低い地盤を作成したため、P波速度は他の3つのケースよりも明確に小さなP波速度を示

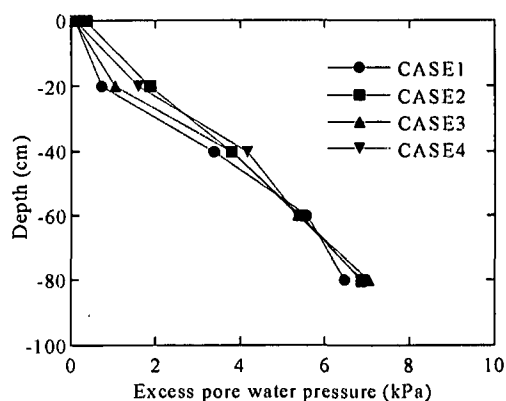


図-7 地盤の過剰間隙水圧の深度分布
(CASE-1～CASE-4; EL-CENTRO波 200Gal 加振)

している。CASE-4は湿潤砂を用いて作成したものであるが、このケースが最も大きなP波速度が得られている。乾燥砂の場合には見られなかった、砂の投入速度が最も小さいと言う事の効果があるのかもしれない。このメカニズムについては、更に詳細な検討が必要である。この結果から、乾燥砂でなく湿潤砂を用いてもP波速度は低くならず、大型実験では湿潤砂を用いて地盤作成をしても良い事が分かった。

砂の種類は異なるが、大型三軸試験を用いて調べた十分に飽和した地盤のP波速度は、 $V_p=1500\sim 1600\text{m/s}$ 程度であったり、CASE-4の場合は比較的この値に近い。本実験では、水中落下法を行う場合、脱気水ではなく水道水を使用した。水道水を使用した場合、どの程度の飽和度の地盤が得られるかについて検討しておく必要がある。というのは、大型の土槽実験を行う時、脱気水を用いて地盤作成を行うには相当の困難が伴うため、通常は水道水を用いる事が現実的と考えられるためである。

(3) 地盤の液状化挙動

CASE-1～CASE-4の液状化実験において、最初のEL-CENTRO波約20Gal加振では、いずれのケースも液状化しなかった。次のEL-CENTRO波約100Gal加振では、最も飽和度の高かったCASE-4のケースだけが液状化した。他のケースでは過剰間隙水圧比が0.3～0.7程度までで、液状化には至らなかった。EL-CENTRO波約200Gal加振と正弦波3Hz、 $\alpha=$ 約100Galの加振ではいずれのケースも液状化が発生した。CASE-3は液状化すると泡が地表に浮き出てきて、飽和度が低いことが目視で分かった。

CASE-2のEL-CENTRO波約100Gal加振における地盤の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を図-5に、正弦波3Hz100Gal加振の時刻歴を図-6に示す。EL-CENTRO波約100Gal加振では、過剰間隙水圧比が0.3程度しか上がっておらず地表近くの地盤加速度はある程度応答しているが、正弦波3Hz100Gal加振ではほぼ液状化してお

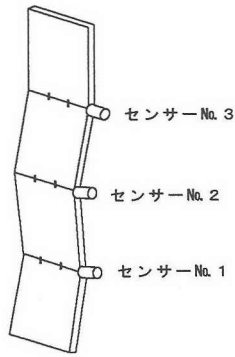


図-8 液状化時の地盤変位測定装置の概念

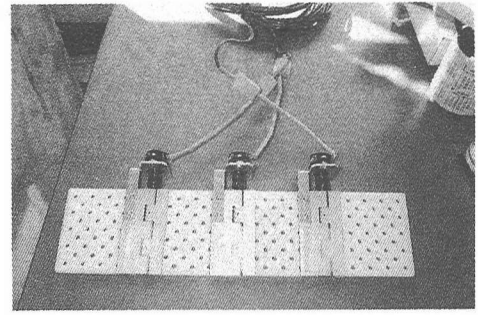


写真-3 液状化時の地盤変位測定装置の写真

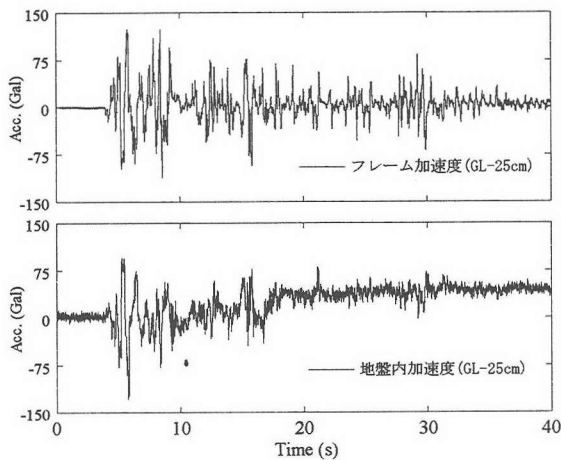


図-9 地盤と土槽フレームの加速度時刻歴の比較 (CASE-2; EL-CENTRO波100Gal加振)

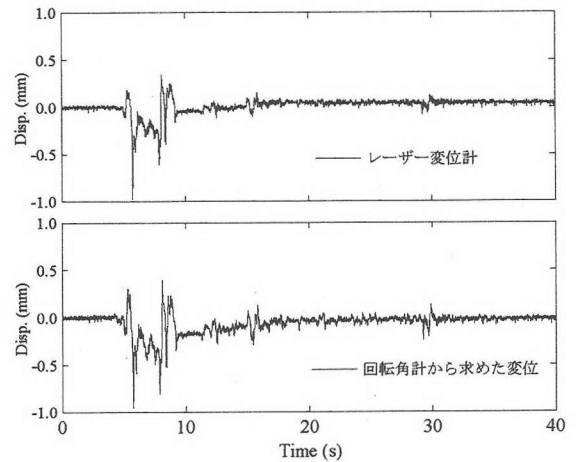


図-11 地表変位計と回転角計による地表変位の時刻歴の比較 (CASE-2; EL-CENTRO波100Gal加振)

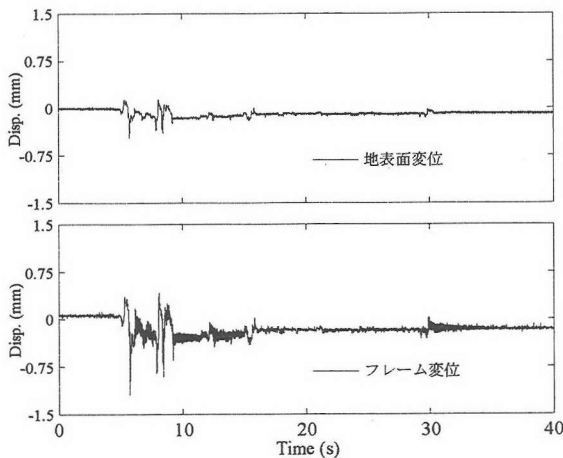


図-10 地表面と土槽フレームの変位時刻歴の比較 (CASE-2; EL-CENTRO波100Gal加振)

り、地表近くの地盤加速度の応答が大きく低下している事が分かる。

CASE-1～CASE-4のEL-CENTRO波200Gal加振における地盤の過剰間隙水圧の深度分布を図-7に示す。200Gal加振では、CASE-1～CASE-4とも概ね地盤の上層から下層まで一様に液状化している事が分かる。

(3) 液状化時の地盤変位

液状化時における地盤の変形を正確に測定することは、地盤中に設置された構造物や杭などが受ける力や変形などを検討する上では非常に重要である。これまで、液状化地盤の地震中の動きを正確に測定することは困難であった。そこで、回転角ポテンシオメータを応用した液状化地盤の変位計測装置を開発し、その動作チェックを行ってきた。開発した装置の概念を図-8に、実際に製作したものを写真-3に示す。この装置は計測板を連結するヒンジ部の回転をポテンシオメータで計測し、それを変形量に換算することにより地盤の変形を計測しようとするものである。これまで連結する計測板に加速度計を取りつける類似の方法があったが、それに比較して地盤振動加速度成分を含まない、測定精度が高いという特徴がある。

CASE2のEL-CENTRO波100Gal加振における地盤と土槽フレームの加速度時刻歴の比較を図-9に、同様に変位時刻歴の比較を図-10に示す。加速度に関して地盤内と対応する位置の土槽フレームでは、異なった波形形状をしている事が分かる。変位に関して波形形状は似ているものの、変位振幅に3倍程度の違いが見られる。これ

表-4 地表変位と回転角計による最大変位の関係
(EL-CENTRO波 100Gal 加震)

実験ケース	レーザーにより測定した最大変位 (mm)	回転角計から求めた最大変位 (mm)
CASE-1	1.23	1.20
CASE-2	0.99	0.98
CASE-3	1.32	1.29
CASE-4	28.91	31.13

より、今回のように土槽フレームと飽和地盤の質量比が約1:15の土槽フレームの慣性力の影響が比較的小さな土槽を用い、地盤が完全に液状化していない場合でも、土槽フレームの変位を地盤の変位とみなすことは精度が良くない事がわかる。

CASE-2のEL-CENTRO波 100Gal加振における地表変位計と回転角計によるレーザー変位計の時刻歴の比較を図-11に示す。回転角計による地表変位は、土槽下端を固定し各深度の回転角を積分して求めたもので、レーザー変位計の値と一致していれば、途中の地盤内変位も測定できているとみなせる。図-11によると、波形形状及び振幅ともほぼ一致していることが分かる。表-4にはCASE-1～CASE-4のEL-CENTRO波 100Gal加震における地表変位と回転角計による最大変位の関係を示したが、いずれも両者の変位はほぼ一致しており、とくに液状化に至ったCASE-4においては最大変位が約30mmと大きいにもかかわらず10%以内の誤差で概ね一致していると言える。また、回転角計の波形には地盤の振動加速度の影響は見られない。この結果より、開発した回転角計による液状化地盤の変位測定装置が実用に耐える事が実証できたと考える。

5. まとめ

大型土槽実験において、水中落下法による高飽和度の地盤作成法として、水中にメッシュを設置してそれを振動させる方法を提案し、中規模せん断土槽を用いて模型地盤を作成することにより、大規模土槽実験への適用性の確認実験を行う事とした。また、高飽和度の地盤作成法の妥当性を確かめるため飽和度をP波測定により検討した。次に、液状化土槽実験において振動中の地盤変位の分布を測定するため、回転角ポテンシオメータを応用した変位計測器を開発し、液状化実験でその有効性を確認した。

- (1) 常時微動測定とベンダーエレメントによるS波測定から求めた地盤の初期剛性は概ね整合性がある。
- (2) マイクロフォンとベンダーエレメントを用いた方法は同程度のP波速度を示しており、両者ともある程度の精度を持ったP波測定法と評価できる。

- (3) 乾燥砂でなく湿潤砂を用いてもP波速度は低くならず、大型実験では湿潤砂を用いて地盤作成をしても良い事が分かった。
- (4) 回転角計による液状化地盤の変位とレーザー地表変位は概ね一致する結果が得られ、開発した回転角計による液状化地盤の変位測定装置が実用に耐える事が実証できた。

謝辞

本研究は、科学技術庁(現文部科学省)振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として、「大規模地盤の振動実験における地盤作成法・計測技術の開発」のテーマで実施したものであり、本プロジェクトの関係各位の多大な努力の基に進められていることに感謝致します。また、この研究において実施したベンダーエレメントによるS波、P波の計測においては、清水建設技術研究所主任研究員西尾伸也博士に多大な協力を頂いた。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 田村修次、阿部秋男:P波を用いた地盤の飽和度計測法の開発、第1回構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関するシンポジウム、2001年3月
- 2) 西尾伸也、馬場幸吉、安部透、岩井俊之:ベンダーエレメント試験におけるせん断発振子の変位計測、物理探査学会第100回学術講演会論文集、PP. 127-131、1999年。
- 3) 西尾伸也:砂および砂礫の弾性波速度に与える飽和度の影響、不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム、(社)土質工学会、PP. 221-224、昭和62年12月。