

液状化実験用の大型地盤作成法と 液状化時の地盤変位測定

佐藤 正義¹・阿部秋男²

- 1 防災科学技術研究所 総括主任研究員 (〒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)

A method of vibrating a mesh screen installed under water level and pouring sand in water was proposed to make large-scale ground model of the high degree of saturation. 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: large-scale laminar container, liquefaction test, degree of saturation, P-wave velocity, S-wave velocity, bender-element, displacement measurement apparatus

1. 研究の概要

大型土槽による振動実験は、ある程度実地盤の地震時挙動を再現できると考えられるため、基礎・地盤の破壊メカニズムの解明が可能である。しかし、大型土槽実験を行うにあたり、現状では地盤の作成・解体法、破壊過程を捉える基礎・地盤応答の計測技術が確立していない。現在、防災科学技術研究所が三木市に建設を進めている2005年4月完成予定の実大三次元震動破壊実験施設(愛称: E-ディフェンス)では、超大型地盤の振動実験が行われる予定であり、大型地盤の作成および地盤応答の計測技術の開発が急務である。

大型地盤の実験において最も重要課題となるのは液状化実験であり、その場合飽和度の高い地盤を作成する必要がある。地盤の飽和度を把握するには、P波速度を計測することが最適と考えられるが、PS検層などの現状の試験法を土槽地盤に適用しても、P波速度を精度良く計測することが困難である。本研究ではこれまで、土槽地盤の飽和度を把握することを目的としてマイクロフォンとベンダーエレメントを用いたP波速度計測手法を開発し、また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、小型実験¹⁾、中型土槽実験²⁾を行ってきた。ここでは、大型の実験せん断土槽によりその成果を実証した。

また、液状化土槽実験において振動中の地盤変位を測定するため、回転角ポテンシオメータを応用した変位計測装置を開発し、その有効性を確認するため大型せん断土槽を用いた液状化実験に適用した。

2. 実験の概要

2.1 振動台とせん断土槽

大型せん断土槽実験に用いた振動実験装置は、防災科学技術研究所の一次元振動台でテーブルサイズは15m×14.5m(振動方向)である。最大搭載質量500tonを搭載した場合の加振能力は、最大加速度500Gal、最大速度75m/secである。

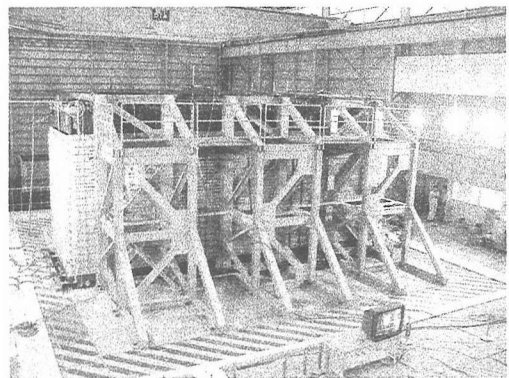


図-1 実験に用いた大型せん断土槽

振動実験に用いた大型せん断土槽の写真を、図1に示す。土槽の内寸法は、長さ11.6m×幅3.1mである。土槽高さは本来6.0mあるが、今回地盤高さを4.5mと

したので、土槽フレーム(H型鋼200mmx200mm)を24段とし高さ5.0mにて使用した。土槽内側には止水用に厚さ3mmのゴムメンブレンを取り付けている。また、各々の土槽フレーム間には外径200mmの鋼製パイプをローラーとして設置し、H型鋼との間にはテフロンシートを敷いて、土槽自体のせん断剛性を小さくしている。

2.2 計器配置

計器配置を図3に示す。種々の目的をもった合同実験として実施したため、この実験ケースには杭基礎も設置されている。測定計器は、地盤の液状化挙動測定のため地盤中に加速度計、間隙水圧計を設置した。P波・S波測定用として、ベンダーエレメント、マイクロフォンを設置し、液状化地盤変位測定用の回転角度計を設置した。さらに、回転角度計の取り付け板の地表部をレーザー変位計で測定し、土槽フレームには加速度計とLVDT型変位計を設置した。

2.3 実験に用いた砂

液状化実験に用いた砂は霞ヶ浦砂であり、その粒径

加積曲線を図-2に示す。平均粒径 $D_{50}=0.21\text{mm}$ 、細粒分含有率 $F_c=5.8$ である。

2.4 液状化実験における加振ケース

液状化実験における加振は神戸ポートアイランドGL-28mの観測波NS成分の加速度振幅を調整したものを、① $\alpha_{\text{max}}=\text{約}20\text{Gal}$ 、② $\alpha_{\text{max}}=\text{約}50\text{Gal}$ 、③ $\alpha_{\text{max}}=\text{約}100\text{Gal}$ 、④ $\alpha_{\text{max}}=\text{約}100\text{Gal}$ の4回の加振を行った。

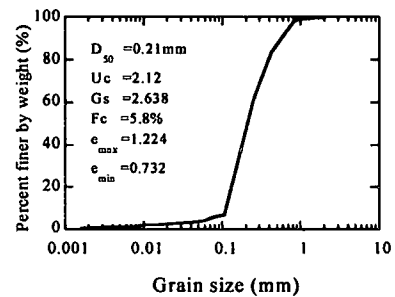


図-3 液状化実験に用いた砂の粒径加積曲線と物理定数

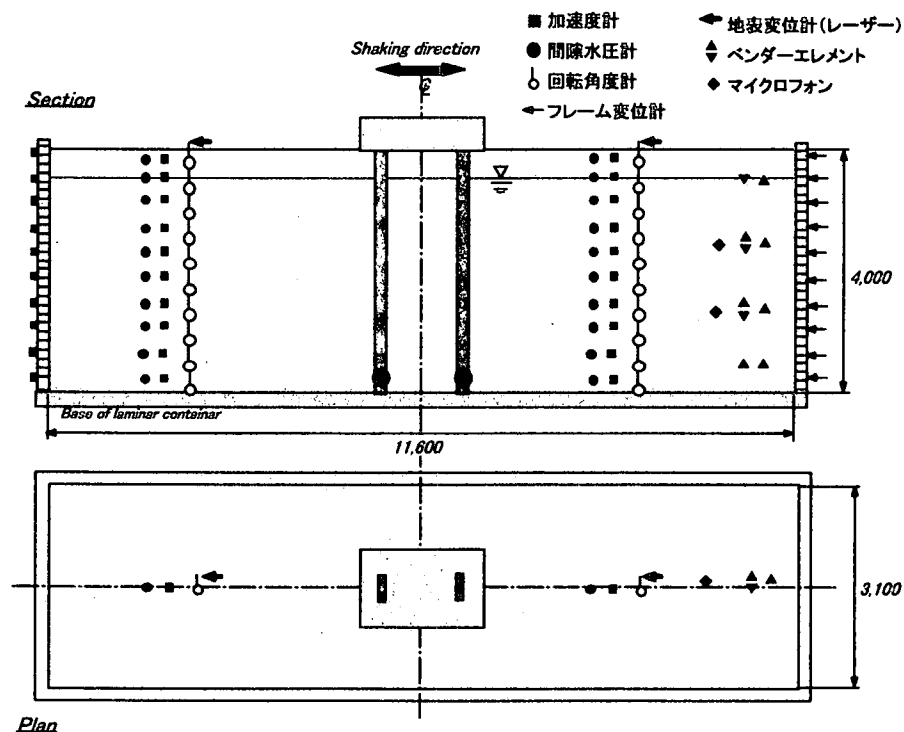


図-2 大型せん断土槽実験の計器配置

3. 高飽和度大規模地盤の作成法の検討

3.1 飽和地盤の作成法

提案する大規模地盤の作成法は、水中落下法による高飽和度の地盤作成法として、トンバッグにいれた湿潤砂を砂撒きバケットにいれ、バケット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法の概念を図-4に示す。また、図-5に大型せん断土槽において振動スクリーンを用いた地盤作成状況を示す。

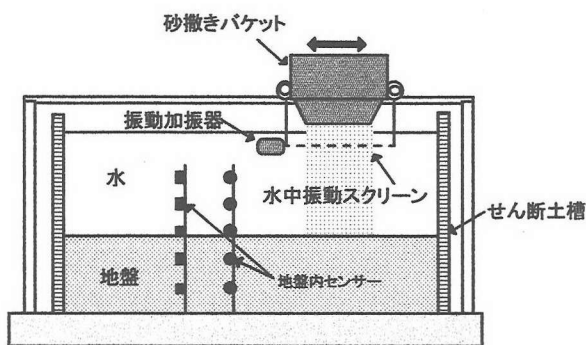


図-4 振動スクリーンを用いた地盤作成法の概念

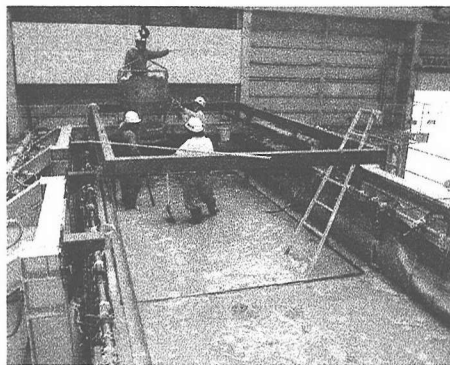


図-5 振動スクリーンを用いた地盤作成状況

3.2 飽和度の評価のための地盤のP波測定

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)}

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^{3),4)}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波測定の結果(実験開始時)を表-3に、またP波の時刻歴を図-6に示す。両方のP波の波形から、伝達波の立ち上がりが明確に読み取れることが分かる。表1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ものは同程度のP波速度を示しており、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 $V_p=1500\sim 1600\text{m/s}$ とほぼ程度¹⁾であり、提案した地盤作成法により、高飽和度の地盤が作成されていることが確かめられた。

本実験では水中落下法による地盤作成を行う場合、多量の水が必要となるため脱気水ではなく水道水を使用した。水道水にはある程度の空気(1~3%)が含まれる為水道水を使用した場合、液状化要素試験で言われるB値が0.95以上といった飽和度の地盤を作成することはできないと考えられる。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、またその時の地盤の液状化強度がどの程度になっているかについて検討しておく必要がある。

表-1 P波速度の測定結果(実験開始時)

標高(m)	GL-(m)	ベンダー-P波速度(m/s)	マイクP波速度(m/s)
3.5	0.5	1480	—
2.5	1.5	1510	1520
1.5	2.5	1550	1550
0.5	3.5	1590	—

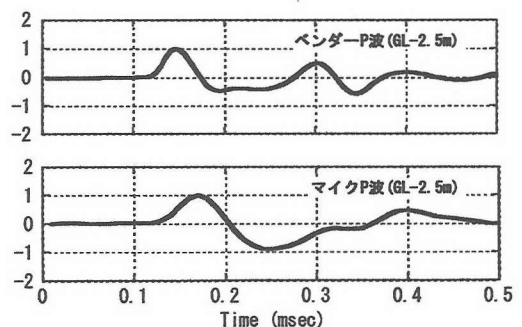


図-6 P波測定による波形

3.3 S波測定と常時微動測定

前述のP波測定と同様に、ベンダーエレメントでS波測定²⁾を行うとともに、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。常時微動測定では、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 $V_s = 4 H f_0$ と $G_0 = \rho V_s^2$ の関係から、地盤の初期せん断剛性 G_0 を算定できる。

S波測定の結果を表-2に示す。常時微動測定結果の土槽底面に対する地表面の周波数伝達関数を図-7に示す。地盤の一次固有振動数は6.7Hzであるので、これよりS波速度を算定すると $V_s = 107 \text{ m/s}$ になる。常時微動測定の結果は地盤全体の平均であり約GL-2.0mのものとする、表-2のベンダーエレメントによるS波測定による測定結果と概ね整合性がある。

表-2 S波速度の測定結果(実験開始時)

標高 (m)	GL- (m)	ベンダー-S波速度 (m/s)
2.5~3.5	0.5~1.5	105
1.5~2.5	1.5~2.5	110
0.5~1.5	2.5~3.5	118

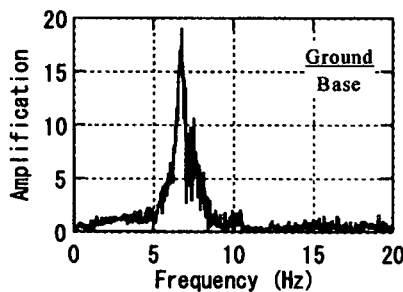


図-7 常時微動測定結果

4. 地盤の液状化実験における地盤変位測定

4.1 地盤の液状化実験結果

加振を4回行った結果の地表面近くの加速度時刻歴を図-8に示す。また、過剰間隙水圧の最大値分布を図-9に示す。地震波20Gal加振では過剰間隙水圧は大きいところでも0.5kPa程度しか上昇せず、ほぼ地盤の初期せん断剛性で震動した。地震波50Gal加振で

は、地表から約2mの深度まで過剰間隙水圧が上昇しており、地表面付近が液状化したことが図-9により分かる。今回、地盤作成を水中落下法で行っており、地盤の相対密度が約45%であったことより、地震波50Gal加振でも部分的な液状化が発生することはある程度納得できる。今後、液状化有効応力解析により検討する予定である。

地震波100Gal加振と150Gal加振では、両者ともほぼ全層液状化が発生した。図-9の各加振における地表の加速度応答時刻歴は、それぞれの加振加速度に応じて発生した過剰間隙水圧の影響により、応答波形に固有振動数の伸びと加速度応答振幅の減少が表れている。

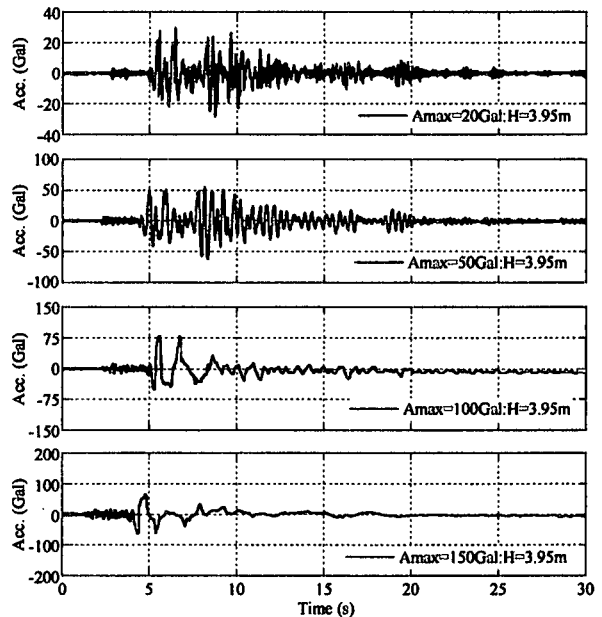


図-8 地盤の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴(150Gal)

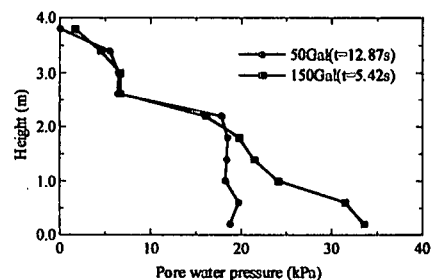


図-9 各加振における過剰間隙水圧の最大値分布

4.2 地盤変位測定装置

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-10に、大型せん断土槽内部に設置した状況を図-11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。

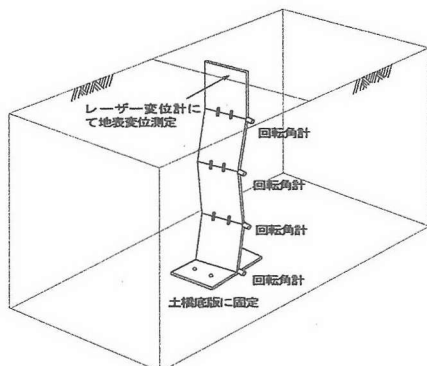


図-10 回転角計による地盤変位測定装置の概念

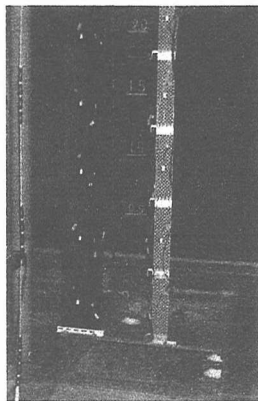


図-11 回転角計による地盤変位測定装置

4.3 回転角計による地盤変位測定結果

地盤と土槽フレームの地表加速度時刻歴の比較を

図-12に示す。この結果は150Gal加振のものであり、地盤は十分に液状化するに至った。地表地盤と対応する位置の土槽フレームでは、地盤の過剰間隙水圧が上昇し始めた7秒以後に、両者は異なった挙動をしている。地盤および土槽フレームの地表面変位時刻歴の比較を図-13に示す。レーザー変位計と回転角計から求めた変位はほぼ一致している。一方、土槽フレームの変位はレーザー変位計と回転角計から求めた変位とは異なっており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。この結果より、開発した回転角計による地盤変位測定装置により、地盤の液状化実験時における地盤変位測定が可能であることが確認された。

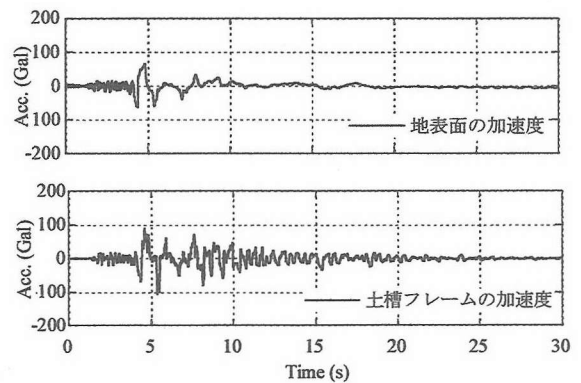


図-12 地盤と土槽フレームの地表加速度時刻歴の比較
(ポートアイランド波150Gal加振)

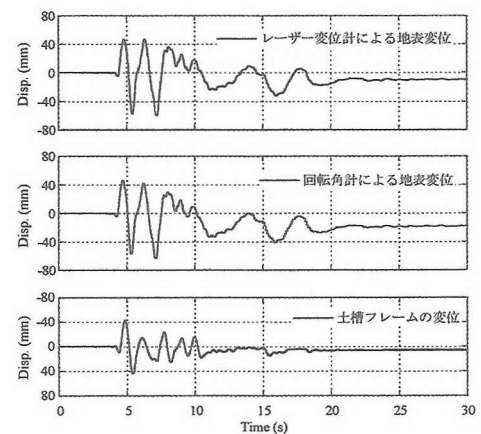


図-13 地盤および土槽フレームの地表面変位時刻歴の比較
(ポートアイランド波150Gal加振)

次に、回転角による地盤変位の最大値分布を図-14に示す。地震波20Gal加振の分布は小さいが、過剰間

隙水圧が発生した深度約2m付近から地中変位が大きくなる傾向を見せている。今回の加振実験により得られた回転角による地盤地表変位とレーザ変位計による地表変位の関係を図-15に示す。回転角計によるものとレーザ変位計によるものは、良い一致を見せており、開発した回転角度計によるものは液状化時の地盤変位を十分な精度で測定できている。

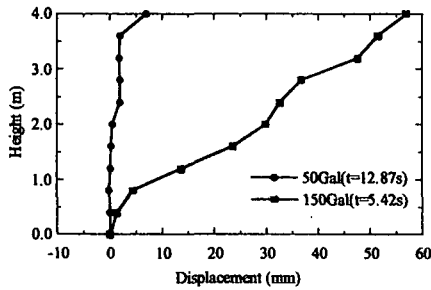


図-14 回転角による地盤変位の最大値分布

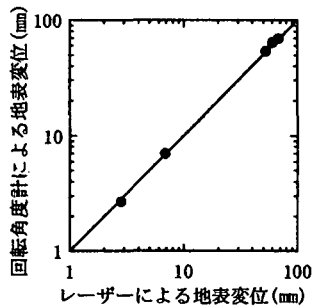


図-15 回転角による地盤変位とレーザ変位計による地表変位の関係

4. まとめ

- (1)飽和度の高い地盤を作成するため、水中振動スクリーンを用いた砂入れ装置を製作し、大型せん断土槽に地盤を作成することによりその実用性を確かめ、大型せん断土槽実験に適用できる地盤作成法を確立した。
- (2)開発した地盤作成法により飽和度の高い地盤が作成されていることを確認するため、マイクロ

フォンとベンダーエレメントを用いたP波速度計測手法を開発し、大型せん断土槽実験に適用してその有効性を確かめた。

- (3)開発した回転角ポテンショメータを応用した変位計測装置を大型土槽の液状化実験に適用し、この装置が、従来のものでは測定できなかった振動中の地盤変位を測定することが可能であり、実用に耐える事を実証した。

謝辞

本研究は、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」の一環として実施された「地盤合同実験」の内、「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。

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) 佐藤正義, 阿部秋男, 水野二十一, 田村修次: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, 第2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, 2002年3月
- 3) 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.
- 4) 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.