

液状化実験のための地盤作製法の改良と作製地盤の品質

水野二十一¹・平出 務²

¹ 独立行政法人 建築研究所 研究専門役 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

² 独立行政法人 建築研究所 建築生産研究グループ 主任研究員 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

The paper presents construction experiments of test soils for shaking table tests, especially for liquefaction-related shaking table tests. The target is to make homogeneous saturated sand soils. The soils were prepared four times by scattering dry sand or wet sand into water through vibrating screen in water. The sand was transported and scattered by specially developed apparatus. For comparison, the soil was directly pored without using the developed apparatus and the vibrating screen. By using an oscillator setup on the extension of the soil box, relative densities of test soils were well controlled from relative density 40-50 percent to 90 percent. Homogeneous one-layer and two-layer test soils were confirmed well prepared by this method.

Key Word: Large-scale soil box, Sampling by Freezing, Radio Isotope Method, Relative Density, Quality of Soil, Liquefaction

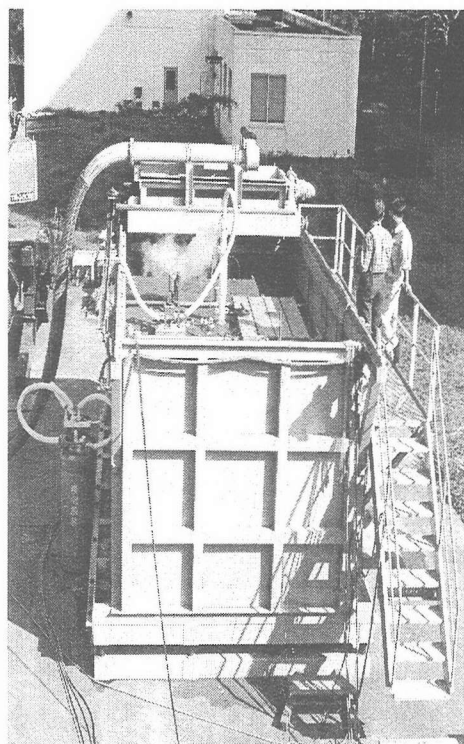
1. はじめに

超大型振動台を使い地盤関連の実験を行う場合、試験体の一部である、超大型の均質な地盤を作製することが解決すべき基本的な課題である。本プロジェクトでは、第1期、第2期を通じて、液状化関連現象を対象とし、主として飽和砂質地盤を対象に、また水中落下法による地盤作製を軸に、地盤品質の確認方法^{1),2)}、新たな地盤品質の評価方法^{3),4),5),6)}、新たな測定法の開発^{7),8)}、大型振動台実験(いくつかの機関による共同研究、例えば参考文献9))を行ってきた。

本研究は、これらの成果を踏まえ、超大型土槽での均質な地盤作製の基礎資料を得るために、砂搬送装置、砂撒き装置など、より均質な地盤を作製する工夫をして、大型土槽(土槽外形寸法6mx3mx2.5m)を用い地盤作製実験(水中落下法)を行なった。一つの特徴は、作製地盤の評価を確実にするために、凍結サンプリングによる試料採取により、直接密度、相対密度を測定したことである。また、超大型地盤における簡便な品質試験方法の候補として、RI法(ラジオアイソトープ法)による相対密度評価法(間接的な方法)を試みた。

本プロジェクトで開発した新たな評価法について比較測定を行なうため、(独)産業技術総合研究所(比

抵抗法)、(独)農業工学研究所(音響透水トモグラフィ法)の参加を得、共同実験を行なった。なお、これらの成果については、各研究機関により本シンポジウムに発表されている。



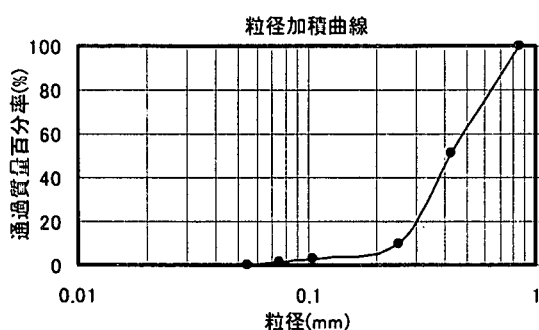
写真一 土槽全景と実験状況

表—1 実験ケース一覧

実験 Case	地盤作製条件					作製地盤の評価			
	使用砂	地盤作製 方法	層構成	砂撒き装置 走行速度	砂撒き 速度	凍結サン プリング	RI(ラジオ アイソト プ)計測	地盤の 比抵抗 計測	音響透水 トモグラ フィー
Case1	乾燥砂	砂撒き 装置使用	1層均質 地盤	低速	低速	○	○	○	-
Case2	乾燥砂	砂直接 投入法	1層均質 地盤	-	-	○	○	○	-
Case3	乾燥砂	砂撒き 装置使用	2層均質 地盤	高速	低速	○	○	○	○
Case4	湿潤砂	砂撒き 装置使用	1層均質 地盤	高速	高速	-	○	○	-
Case5	湿潤砂	砂撒き 装置使用	2層均質 地盤	低速	低速	○	○	○	-

表—2 物理試験結果

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.666
粗砂分 0.425~1mm (%)	48.7
細砂分 75 μ m~0.425mm (%)	49.6
シルト分 5~75 μ m (%)	1.7
均等係数 U_c	1.89
曲率係数 U_c	0.92
D50 (mm)	0.418
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.621
最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.342
最小間隙比 e_{min}	0.645
最小間隙比 e_{max}	0.987



図—1 粒径加積曲線

2. 実験概要

大型な土槽に均質な飽和砂地盤を作製する上では、作製地盤の均質性ととも地盤作製作業の効率化が必要となる。また、機械化による作業の均等化も均一な地盤作製に必要な要因である。ここでは、1ユニット分の砂撒き装置及び砂搬送装置を製作し、その性能テストを行うとともに、砂撒き装置の走行速度、砂撒き速度を変えた飽和地盤を作製し、作製した飽和地盤の評価を行った。

(1) 実験土槽および砂撒き装置、砂搬送装置

実験に用いた土槽は、内法寸法で、幅 6m、奥行き 3m、高さ 2.5m の固定土槽である。これに、砂撒き装置及び砂搬送装置を設置し、地盤の作製を行った。写真—1 に実験に用いた土槽及び砂撒き装置、砂搬送装置を実験状況とともに示す。なお、土槽端部に設置した起振機の振動により土槽に振動が加えられるように、土槽底部と基礎フレーム部分を固定せず、土槽底部フレームにアイソレータとフラットゲージを設置した。この起振機は、作製中の飽和地盤の締め固めや地盤作製後の液状化実験に使用した。

また、土槽上部レール上を走行する砂撒き装置から連続的に砂を撒き出すため、土槽脇に設置した砂搬送装置からフレキシブルチューブをかいして、常に砂を供給する事が可能となるようにした。砂搬送装置のホッパーに常に一定量の砂を入れておき、砂撒き装置の移動にあわせて、砂搬入用のフレキシブルチューブが自由に変形・移動することにより、走行する砂撒き装置に常に一定量の砂が供給される形である。

(2) 地盤作製方法

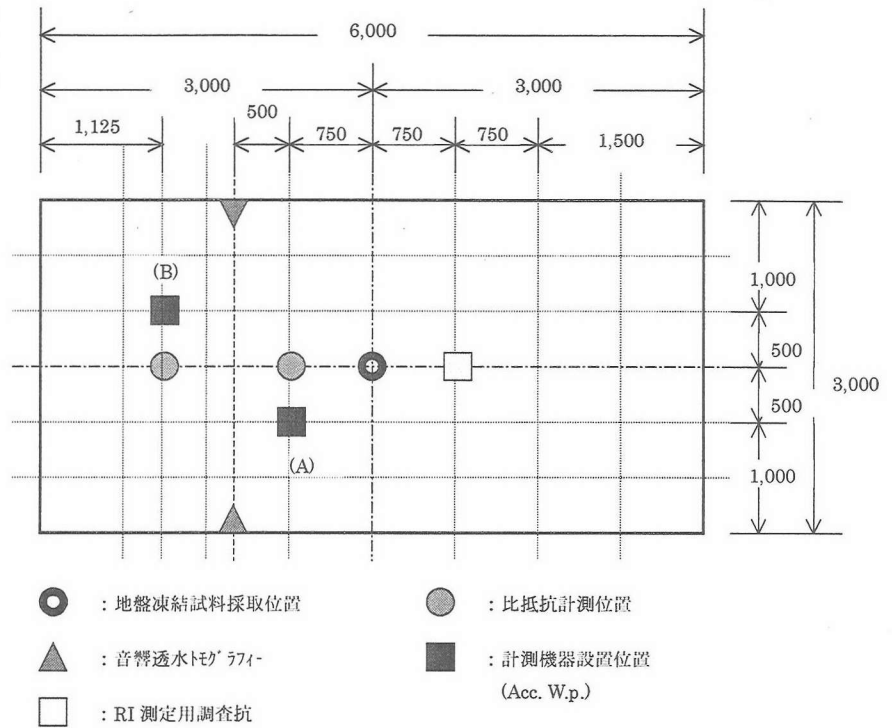
飽和地盤の作製方法には、水中振動スクリーンを使用した水中落下法を用いた。砂撒き装置から砂材料を水中に落下させる際に、水中に設置した振動スクリーンを通すことで、落下中に砂が巻き込む空気を振動で分離させ、飽和度の向上をはかる方法である。

(3) 実験ケース

実験ケース一覧を表—1 に示す。地盤作製方法、地盤材料、地盤の層構成、砂撒き速度及び砂撒き装置の走行速度を実験のパラメータとした。砂直接投



写真一2 凍結サンプリング試料全景



図一2 計測配置概要

表一3 実験結果概要

実験 Case	地盤作製条件	作製地盤調査	総質量 (kg)	走行速度 (m/min)	砂撒き速度 (m ³ /min)	平均地盤高さ (m)	凍結サンプリング試料による平均相対密度
Case1	乾燥砂 砂撒き装置使用 1層均質地盤	凍結サンプリング RI計測 比抵抗計測	35496	0.3	0.05	1.25	40% (1.0mまでの平均)
Case2	乾燥砂 砂直接投入法 1層地盤	凍結サンプリング RI計測 比抵抗計測	40531	-	-	1.67	24% (1.4mまでの平均)
Case3	乾燥砂 砂撒き装置使用 2層均質地盤	凍結サンプリング RI計測 比抵抗計測 音響透水トモグラフィ	40540	1.25	0.05	1.6	下層91% (0~0.8mまでの平均) 上層53%
Case4	湿潤砂 砂撒き装置使用 1層均質地盤	RI計測 比抵抗計測	(45598)	1.25	0.2	1.58	-
Case5	湿潤砂 砂撒き装置使用 2層均質地盤	凍結サンプリング RI計測 比抵抗計測	(55712)	0.3	0.05	1.86	下層76% (0~0.9mまでの平均) 上層39%

入法は、乾燥砂を直接水中に投入する方法である。地盤材料の湿潤砂は、地盤作製に一度使用して湿潤状態となった砂を再度用いるものである。2層均質地盤は、土槽底面より約1m高さまで地盤を作製した後、起振機による振動を加え締め固めた後、その上に地盤を作製して2層構成としたものである。

実験には日光ケイ砂5号を用いた。図一1に粒径加積曲線を、表一2に物理試験結果を示す。

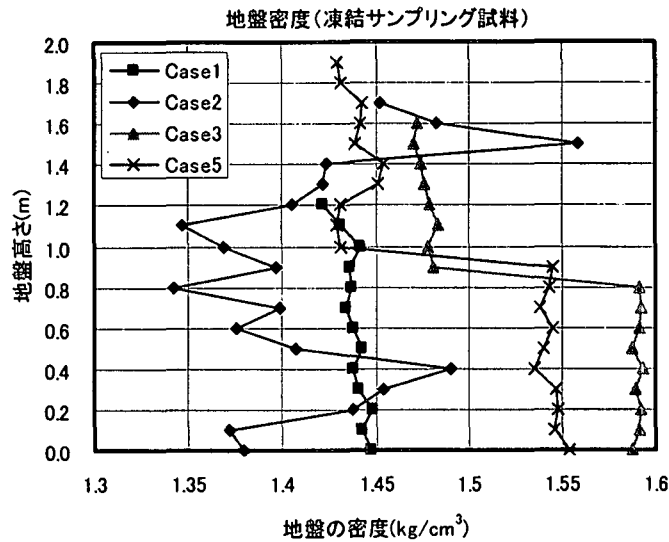
(4) 地盤の評価方法

作製した地盤の評価方法として、凍結サンプリング

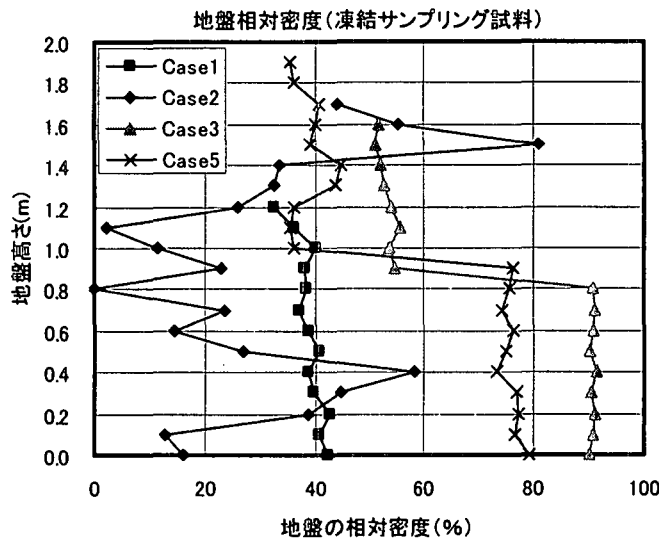
試料による密度評価、RI(ラジオアイソトープ)計測による密度評価、比抵抗計測(担当(独)産業総合技術研究所)、音響透水トモグラフィ計測(担当(独)農業工学研究所、Case3のみ)をそれぞれ実施した。

砂地盤においては、凍結サンプリング試料による密度評価結果が真値に最も近いと考えられるので、これを評価基準としている。採取された凍結サンプリング試料全景を写真一2に示す。

図一2は、計測位置の平面配置概要を示したものである。凍結サンプリング試料採取位置を土槽の中



図一3 地盤の密度分布 (凍結サンプリング試料による)



図一4 地盤の相対密度分布 (凍結サンプリング試料による)

心とし、その近傍でRI(ラジオアイソトープ)計測による密度評価を行っている。

比抵抗計測は、土槽長手方向中心線上に2ヶ所配置し、比抵抗計測の近傍に過剰間隙水圧計、加速度計を深さ方向に設置した。音響透水トモグラフィ計測は、比抵抗計測と直交するように配置した。

3. 実験結果の概要

(1) 凍結サンプリング試料による評価

表一2に地盤作製結果と凍結サンプリング試料による実験結果概要を示す。地盤作製時の砂撒き速度は、Case 4のみ0.2m³/minで、その他は0.05m³/minである。砂撒き装置の走行速度は、Case 3, Case 4が1.25m/minで、その他は0.3m/minである。地盤高さの値は、土槽内数カ所の地盤高さを平均化し

たものである。また、乾燥砂の総質量値は、投入したフレコンバックの質量値から求めている。

凍結サンプリング試料による地盤密度の深さ方向分布を図一3に、凍結サンプリング試料による地盤密度結果から求めた地盤の相対密度の深さ方向分布を図一4に示す。なお、相対密度の計算には表一2の最大乾燥密度と最小乾燥密度を用いた。

Case 1とCase 2で、水中落下法で砂撒き装置を使用した場合と砂を直接水中に投入した場合を比較してみると、砂を直接水中投入する方法では、深さ方向の地盤密度に大きな違いが見られ、地盤密度が深さによって大きくばらついていることがわかる。水中落下法で砂撒き装置を使用する方法では、地盤密度の深さ方向のばらつきが少ないことがわかる。

Case 3, Case 5では、地盤作製時に地盤高さが土槽底面より約1mの状態得起振機による加振により

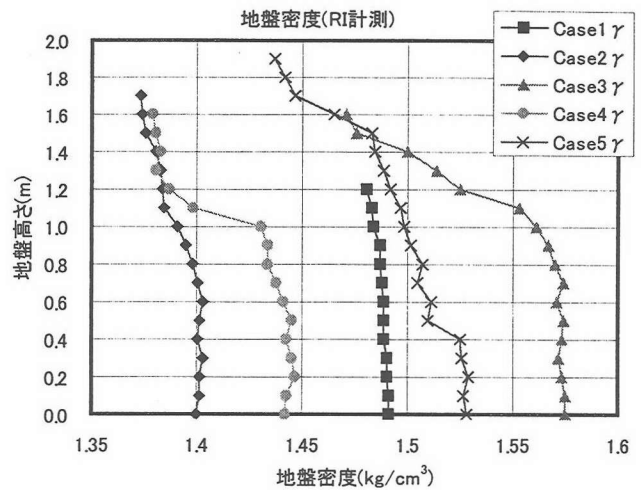
地盤の締め固めをおこない、2層地盤を作製している。凍結サンプリング試料による地盤密度結果には、はっきりとした層境界が見られ、2層地盤が形成されていることがわかる。

Case 4, Case 5では、Case 1~3までで一度使用した湿潤状態の砂を使用して地盤を作製している。Case 5の深さ方向の地盤密度分布状況にばらつきが少ないことから、水中落下法で砂撒き装置を使用した場合、湿潤砂を使用しても乾燥砂と大きな差がないことがわかる。

砂撒き装置の走行速度の関係を Case 1, Case 3, Case 5で比較すると、走行速度が速い Case 3の地盤密度が高く、締め固めた下層地盤で90%程度の相対密度が得られている。Case 5の上層の地盤密度とCase 1の地盤密度がほぼ同程度の値となっていることから、水中落下法と砂撒き装置を併用した方法での地盤作製の再現性は、高いと考えられる。

(2) RI(ラジオアイソトープ)計測による評価

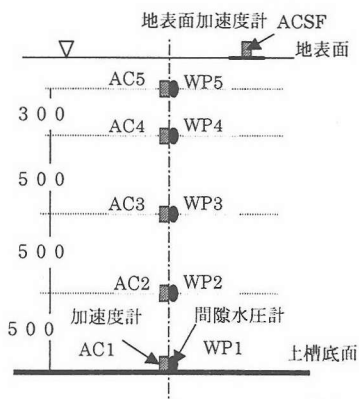
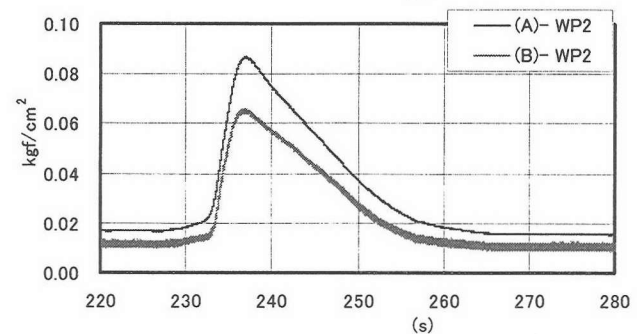
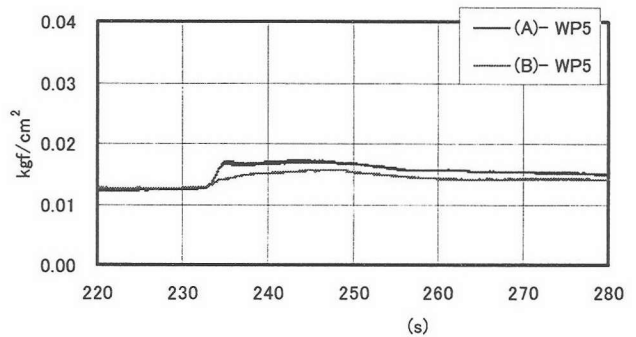
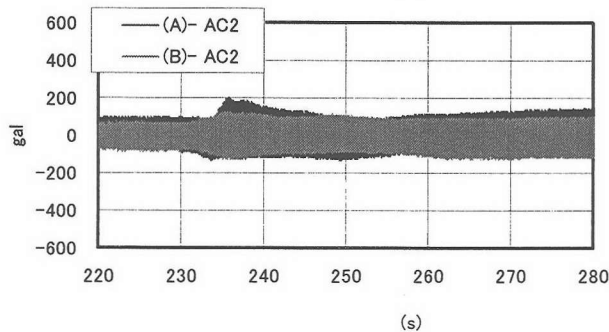
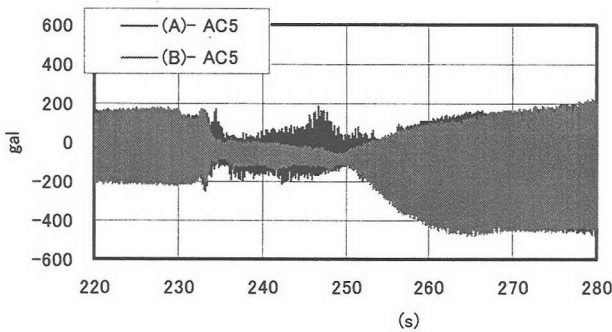
RI(ラジオアイソトープ)計測による地盤密度の深



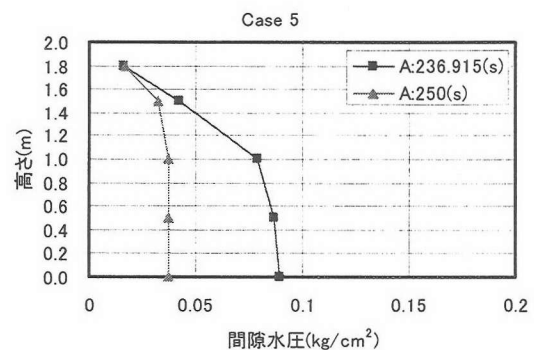
図一5 地盤の密度分布 (RI 計測による)

さ方向分布を図一5に示す。凍結サンプリング試料による地盤密度分布結果と比較すると、2層地盤の層境界が明確でなく、全体的に深さ方向の密度分布を平均化した様な分布形状となっている。

下層部地盤密度値の各実験の相対的な関係は、凍



図一6 起振機実験概要 (Case 5)



結サンプリング試料による結果と対応している。

(3) 起振機による液状化実験

各実験ケースにおいて、作製地盤の評価後に土槽端部に設置した起振機による加振を行い、作製地盤の液状化実験を行った。図-6に一例として Case 5の結果を示す。Case 5は、下層部が密な2層構造の地盤である。下層部の中間位置と地表面近くの加速度値と過剰間隙水圧値の時刻歴変化状況を図-6に示した。

下層地盤中の応答加速度に大きな変化は見られないが、地表面近くの応答加速度は下層地盤中の過剰間隙水圧値の上昇に伴って応答値が減少し、過剰間隙水圧の消散とともに再び応答値が増加する傾向が見られ、地盤密度分布構造の違いによる影響と考えられる。(A)と(B)での応答の違いは、(A)が凍結サンプリング試料採取位置に近い(図-2参照)、採取による影響が現れているものと考えられる。

4. まとめ

まとめれば、次のとおりである。

- (1) 水中落下法に砂撒き装置を使うことにより、より均質な砂質地盤を作製することができる。深く水を張った土槽であっても、砂撒き装置を使わずに直接砂を投入すると、均質な地盤とはならない。
- (2) 作製地盤の品質制御法の試みとして、地盤作製の途中で起振機により加振し、相対密度を高める試みを行った。その結果、水中落下法では相対密度50%程度(誤差10%の範囲)の地盤しか作製できないと言われてきたが、相対密度90%程度まで作製することができることがわかった。
- (3) その結果、乾燥砂・湿潤砂のいずれを用いても、相対密度の異なる2層均質地盤を作製することができた。
- (4) RI法による相対密度の測定は、地盤の凍結サンプリングによる採取試料を用いた密度測定と比べ、相対密度の識別度が低い。特に、2層地盤の層境界付近の測定では、相対密度がなだらかに変化している結果を与えている。ある領域の平均的な相対密度の測定には適した簡便な方法ではあるが、超大型地盤品質の確認方法としては精度が落ちる。

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地震防災性向上に関するシンポジウム論

文集, pp.249-254, 2000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地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.89-94, 2001年3月
- 3) 毛利栄征, 榊原淳一, 吉村公孝, 山本督男: せん断土槽地盤の作成方法と均一性, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.83-88, 2001年3月
- 4) 神宮司元治, 国松直, 泉博允: 比抵抗を用いた液状化地盤のモニタリング手法と大型土槽への適用方法, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.94-98, 2001年3月
- 5) 神宮司元治, 国松直: 大型土槽実験における比抵抗を用いた相対密度分布の計測, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.89-94, 2002年2月
- 6) 毛利栄征, 榊原淳一, 山本督男: 音響透水トモグラフィによる大型模型の均一性の可視化, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.95-100, 2002年2月
- 7) 佐藤正義, 阿部秋男: 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, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.77-82, 2002年2月
- 8) 佐藤忠信, 本田利器, 竹川直希: 光ファイバを用いた地盤変形計測システムの大型振動台実験への適用, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.89-94, 2001年3月
- 9) 水野二十一, 平出務, 飯場正紀: 液状化過程における杭基礎の挙動 - 起振既実験による動特性把握 -, 第3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論文集, pp.253-258, 2002年2月