

模型実験における試料土の 再利用装置の開発

安田進¹・丹羽俊輔²・山下丈二²

¹工博 東京電機大学教授 理工部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²東京電機大学 大学院修士課程 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

Special technique to remold and reconstruct the model ground for shaking table tests in short time was developed. Two methods, boring from the bottom of a soil container and water jetting from ground surface, were adopted for clean sands. On the contrary, two methods, mixing with vanes and water jetting from nozzles, were applied for silty sands. Uniformity of the reconstructed ground was evaluated by cone penetrometer tests etc. Test results showed that the reconstructed ground was uniform and could be used for shaking table tests.

Key Words : Sandy soil, Model Test, Shaking table test, Testing method

1. まえがき

振動台を用いて地盤の液状化に関する模型実験などを行う場合、土槽内に試料土を出し入れする必要がある。しかも、地盤は均質に作製し、密度も所定の値に調整し、さらに液状化の実験では飽和化をさせねばならない。このため、小型の土槽でもこの作製に1~2日は要し、大型の土槽になるに比例して必要な日数が数日~10日程度まで増加してくる。また、加振実験後にはその試料土を取り出す作業が必要である。

このような作業を効率化させるためには、一度詰めた試料を加振終了後に攪拌などをして模型地盤を作り直し、再度加振実験を繰り返すことができる“再利用”技術を開発する事が望まれる。このような方法はきれいな砂に関してはボイリングを利用すると比較的簡単であり、これまでもいくつか試みられてきた。ところが、細粒分を含むとボイリング手法が使えなくなるため、これまで再利用方法は試みられてこなかった。

そこで、本研究ではきれいな砂と細粒分を含む砂に対し、再利用方法を開発することを試みた。この場合、再利用した地盤が、①均一であること、②所定の密度に調整出来ること、③飽和が容易に出来ること、④作業が短時間でしかも少人数でできることを目標とした。なお、きれいな砂と細粒分を含む砂で別個の再利用方法を検討した。

2. きれいな砂に対する再利用方法

(1) 実験概要

豊浦砂を使用した模型地盤を作成する際、目標とする相対密度の地盤を作成する一般的な方法として、空中落下法、及び、水中落下法などが挙げられる。

しかし、前者は、砂を乾燥させて絶乾状態にしなければならず、後者は絶乾状態にする必要は無いが、投入量を算出するために湿潤状態である砂の含水比の測定をし、水中での落下高を常に調節しなければならなかった。これらの方法は、模型地盤を目標とする相対密度に作成する方法として有効であるが、飽和度の事も厳密に考慮すると一回の実験を行うために、長時間の準備が必要である。

そこで、本実験では上記の非効率性を取り除き、実験後、液状化して締固まった模型地盤を再利用し、短期間で複数回の実験を行うことができるようにする方法を考えることを目的として行った。

(2) 実験方法

土槽には図-1に示すような擬似せん断土槽(幅1200mm×奥行き450mm×深さ700mm)を使用し、電気油圧式の振動台に固定した。また、試料土には豊浦砂($G_s=2.65$, $e_{max}=0.973$, $e_{min}=0.608$)を使用した。

まず、水中落下法により作製された模型地盤の左右に対して、相対密度50%、60%、70%の場合は、コーン・ペネトロメーターを、相対密度80%、90%の場合は、簡易貫入試験を用いて均一性を比較し、その後、周波数3Hzの正弦波を用いて30秒間加振

して模型地盤を液状化させた。

次に、この液状化によって締め固まった模型地盤に対して底盤から圧力水を送り込んで激しくボイリングを生じさせ、更にこれと同時に試料上部から圧力水をジェットノズルを用いて 10cm 間隔で送り込むジェット噴射を約 10 分程度行なった。その様子を図-2 に示す。このように攪拌を行なうことにより液状化により締め固まった模型地盤の土粒子を、一度完全な浮遊状態にし最も緩い状態で再堆積させ、振動させることによって所定の高さまで締め固めた。

そして、今度はこの再利用法により作製された模型地盤の左右に対して、相対密度 50%, 60%, 70% の場合は、コーン・ペネトロメーターを、相対密度 80%・90% の場合は、簡易貫入試験を用いて均一性を比較した。

以上の作業を相対密度 50%, 60%, 70%, 80%, 90% において何回か繰返し、水中落下法と再利用法で作製した模型地盤の均一性を比較した。

(3) 実験結果

水中落下法によって作成した模型地盤と、再利用法によって作成した模型地盤の均一性を判断するために行ったコーン・ペネトロメーター、及び簡易貫入試験による結果例を図-3 に示した。これらの結果に示されるように、貫入抵抗値、貫入打撃回数値は再利用の各回で多少のばらつきが見られるものの、ほぼ同一の値を示し、水中落下法で作製した地盤の値ともほぼ同一であった。従って、今回用いた再利用方法は再現性があると考えられる。

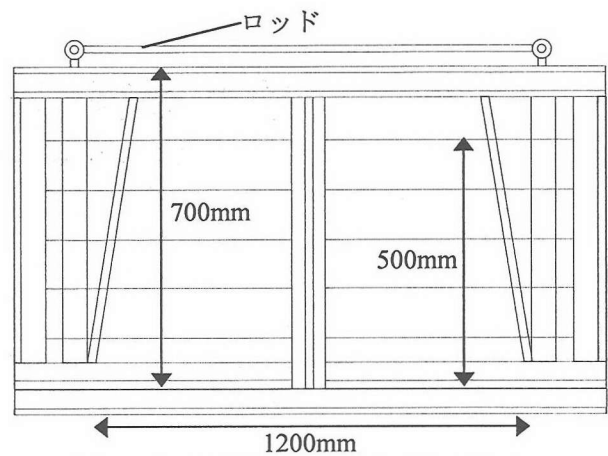


図-1 擬似せん断土槽の概略図 (正面)

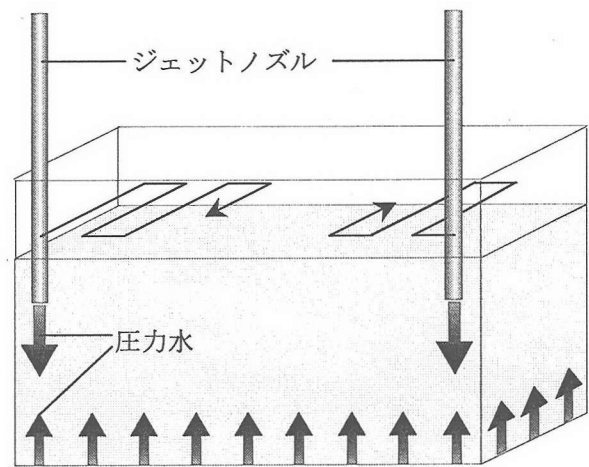


図-2 攪拌時の様子

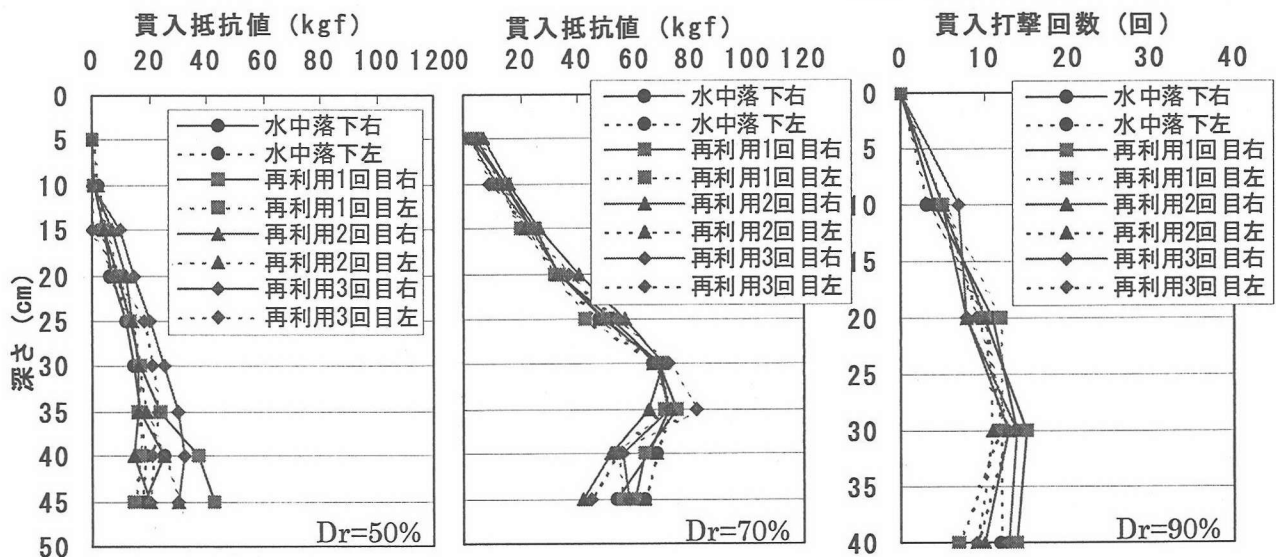


図-3 コーンペネトロメーター・簡易貫入試験試験結果例

3. 細粒分を含む砂に対する再利用方法

(1) 実験概要

細粒分を含んだ砂でボイリングとジェットを併用して模型地盤の再利用を行った場合、細粒分と粗粒分が交互に堆積してしまい、不均一な地盤になってしまうことや、試料中の細粒分が外に逃げてしまうといった問題が考えられる。

そこで、ここでは細粒分を含んだ砂を用いて室内標準貫入試験土槽の模型地盤の再利用方法に関する研究を行った。

(2) 実験装置

試料は、図-4 に示す高浜砂 ($G_s=2.688$, $\rho_{dmax}=1.663g/cm^3$) と尾久砂 ($G_s=2.713$, $\rho_{dmax}=1.671g/cm^3$) とした。

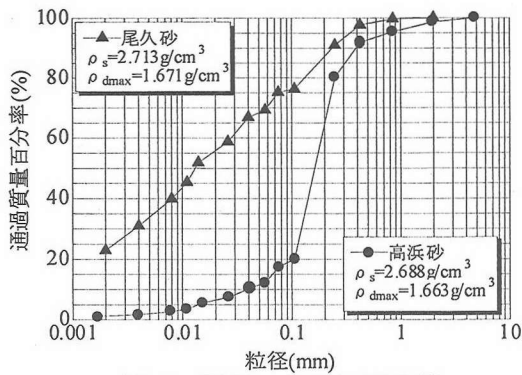


図-4 試料の粒径加積曲線

a) 標準貫入試験土槽

土槽の断面および立面図を図-5 に示す。土槽は内径 775mm、深さ 916mm の鋼製の中型円形土槽である。標準貫入試験を行う場合、実地盤を再現するため拘束圧を载荷して実験を行う必要がある。拘束圧は、土槽の内周面と底面を覆うゴム製のメンブレンを介して、この中に加圧水を送り込むことで、模型地盤に対する鉛直および水平方向の拘束圧を水圧によって独立に载荷することが可能である。また、土槽内に送り込んだ水の体積から、拘束圧载荷後の模型地盤の密度を求めることができる。土槽内に模型地盤を作製した後、蓋を閉めて蓋の中央に空けられた穴から標準貫入試験を行う。

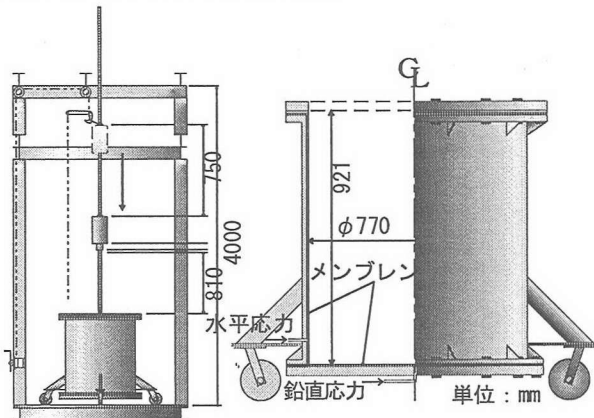


図-5 土槽断面および立面図

b) 再利用攪拌装置

図-5 に示す土槽に細粒分の入った試料を詰める場合、均一な模型地盤を作製するためこれまでは 2 重トレミー管¹⁾を用いて水中落下法により試料を詰めてきた。この方法は、通常の水中落下法に比べ大変手間を必要とする。また、ある模型地盤に対し標準貫入試験を行う場合は、試験を行う度に試料を詰め替えなければならず、試験後の試料の取り出しも合わせて、1 つの実験ケースに対し 2 日程度かかっていた。

これに対し、試験が終了した後、模型地盤を攪拌し、所定の密度に締め固めることが出来れば、試験期間の大幅な短縮になる。そこで、模型地盤を均一に攪拌する装置として図-6 に示す攪拌装置を開発し、土槽の上に設置した。この装置では以下のよう

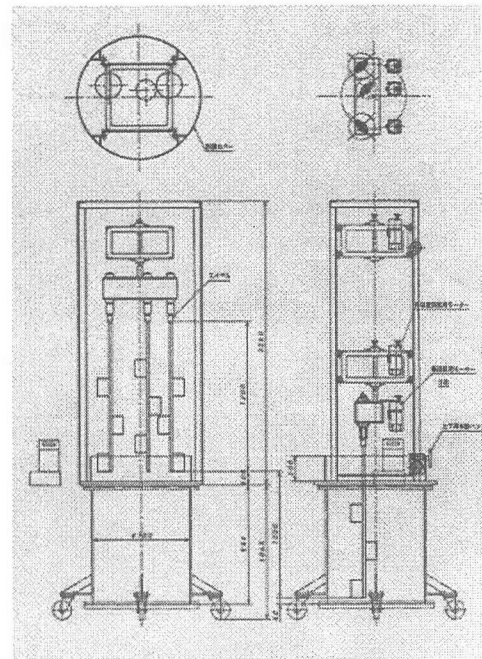


図-6 攪拌装置全体図

にして均一な地盤を作製できるように工夫してある。なお、この装置を用いると、試料の作製が 2 時間程度で可能である。

- i) 攪拌翼は 3 本のロッドに設置されている。これが同時に回転することにより、地盤を攪拌する。このロッドを模型地盤の下部まで攪拌しながら貫入した後、抜き出す。そして、図-7 に示すように平面的に 90 度位置を回転し、再び貫入する。90 度回転することを 3 回繰り返すと、丁度攪拌翼で攪拌する部分が土槽全体にゆきわたるようになっている。
- ii) 攪拌翼を貫入する際、ロッドに大きな負荷がかかる。これを軽減するために、ロッドの先端にノズルを設け、ここから水を噴射するようになっている。噴射する水は、土槽上部からあふれ出した水を水中ポンプでくみ上げたものとする。これにより、試料の中の間隙水が循環することになり、試料中の細粒分含有率を均一に保てる。
- iii) 模型地盤を攪拌後、バイブレータなどの締め固め機を用いて所定の密度に調整する。

(3) 実験結果

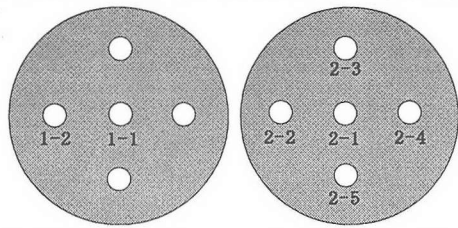
シンウォールチューブを用いて不攪乱試料のサンプリングを行い、模型地盤の均一性を確認するため、攪拌後の試料観察および粒度分布、密度分布を調べた。以下に、各試料の実験結果を示す。

a) 均一性の確認方法

攪拌後の地盤が均一であるかを確認するため、上述した方法で攪拌した後、シンウォールチューブを用いて不攪乱試料の採取を行った。サンプリングした位置を、図-7、8 に示す。土槽の数カ所でサンプリングしたのは、平面的な試料の均一性をみるためである。また、各サンプリングでは 60cm 程度の深

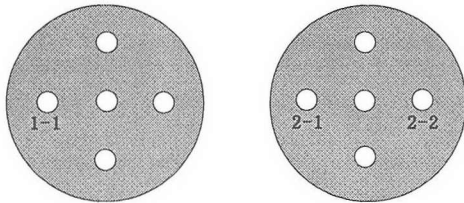
さまで試料を採取した。これは深さ方向の試料の均一性をみるためである。

このようにサンプリングした不攪乱試料を、押し

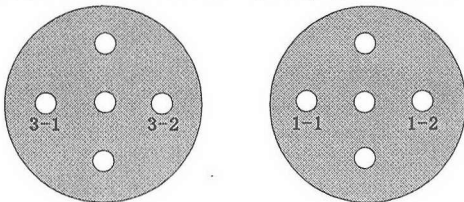


(i) 攪拌 1 回目 (ii) 攪拌 2 回目

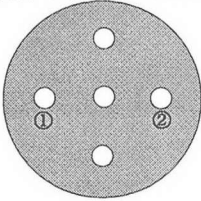
図-7 高浜砂サンプリング位置



(i) 攪拌 1 回目ノズル小 (ii) 攪拌 2 回目ノズル小



(iii) 攪拌 3 回目ノズル小 (iv) 攪拌 1 回目ノズル大



(iv) 水中落下法

図-8 尾久砂サンプリング位置

出し機で抜き出し、5cm ごとに試料観察、密度測定、粒度試験を行った。

b) 高浜砂の実験結果

まず、試料観察例として、図-7(ii)に示す 2-5 の位置で採取した試料(2 回目の攪拌後の試料で、土槽の周囲からサンプリングしたものを抜き出したものをデジタルカメラで撮影し、試料観察した。全試料とも試料の表面は均一で、層状にはなっていない。水中落下方法で試料を詰めると、細粒分と

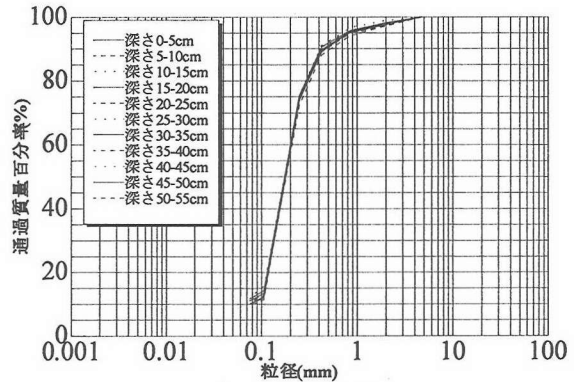


図-9(a) 高浜砂攪拌 1 回目 1-1

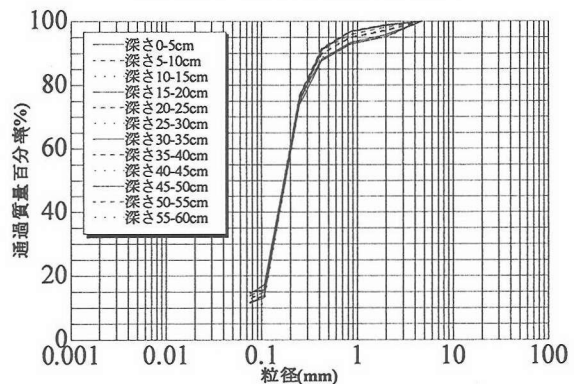


図-9(b) 高浜砂攪拌 2 回目 2-1

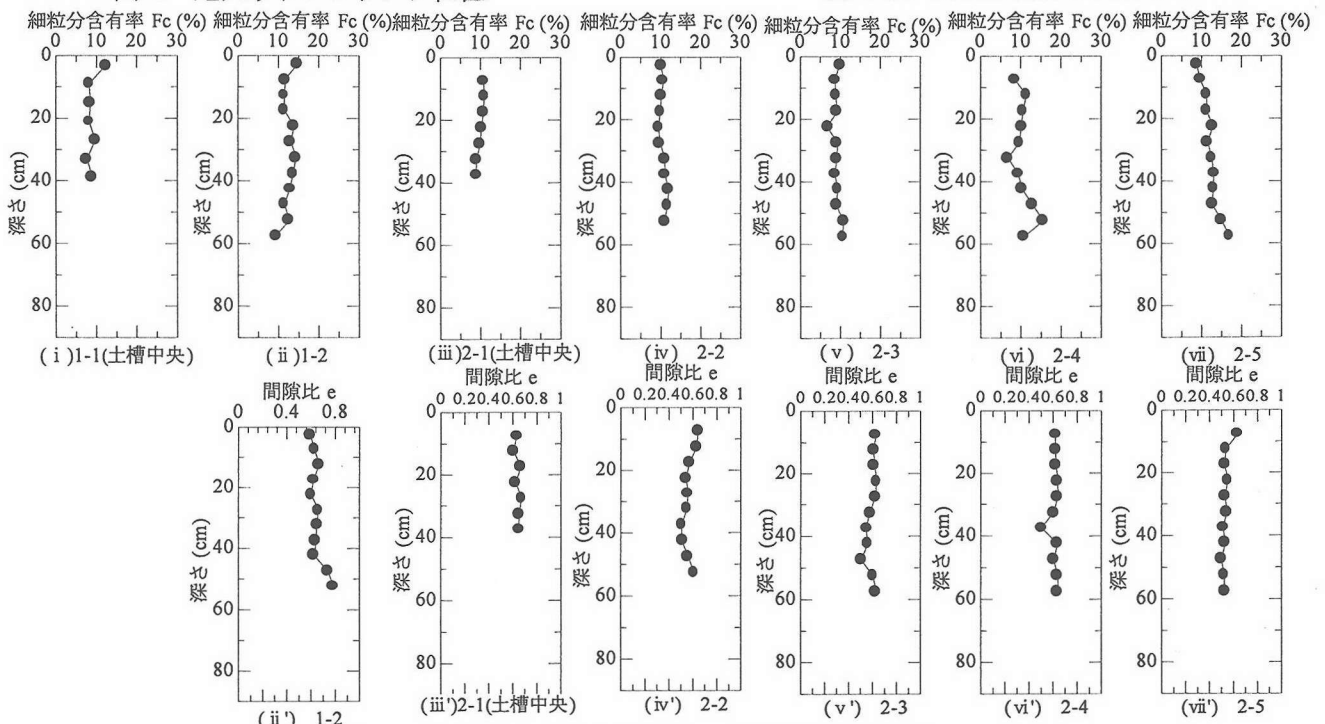


図-10 細粒分含有率と間隙比の実験結果(高浜砂)

粗粒分が互層状になることがあるが、そのようなことはなかった。また、写真を深さ方向に比較すると、見た目の粒径は深さ方向に一樣であった。

次に、5cm ごとに切り出した試料に対して粒度試験を行った結果について、粒径加積曲線を図-9、また細粒分含有率の深さ方向の分布を図-10 の上半分に示す。図-9 の粒径加積曲線を見ると、どのサンプリング深度でも切り出された試料の粒径加積曲線はほぼ同じとなった。また、図-10 の細粒分含有率の分布をみても、深さ方向だけでなく、サンプリング位置によってもほぼ細粒分含有率は 10%程度と一定の値を示した。従って、深さ方向にも平面的にも粒径はほぼ一定であり、土槽内の試料は均一に作成できていると考えられた。

図-10 の下段には、切り出した試料で湿潤密度および含水比を測定し、それをもとに間隙比を算出した結果を示す。図に見られるように、間隙比も深さ方向、平面方向にほぼ一定の値の 0.6 程度となった。従って、土槽内の密度もほぼ一定になっていると考えられる。

c) 尾久砂の実験結果

はじめに高浜砂の場合と同様に、抜き取った試料をデジタルカメラで撮影し、観察をした。こちらも、高浜砂の場合と同様に、全試料とも試料の表面は均一で、層状にはなっていないかった。深さ方向の比較をしても同様に、見た目の粒径は深さ方向に一樣であった。

次に、5cm ごとに切り出した試料に対して粒度試験を行った結果について、粒径加積曲線の代表例を図-11 に、また細粒分含有率の深さ方向の分布を

図-12 の上半分に示す。なお、ここでは比較のために 2 重トレミー管を用いて水中落下法での作製した地盤での結果も記載している。図-11 の粒径加積曲線を見ると、攪拌 1 回目の図では曲線にばらつきが見られる。また、図-12 の上半分の細粒分含有率の

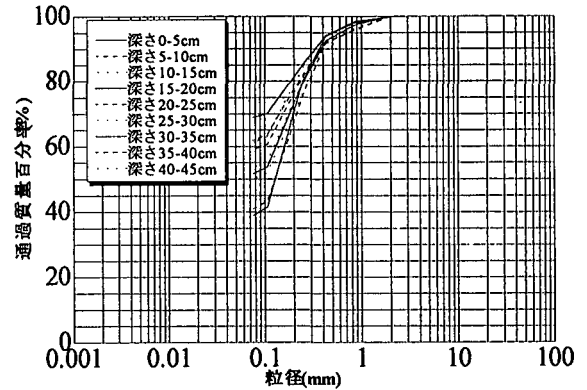


図-11(a) 尾久砂攪拌 1 回目 1-1

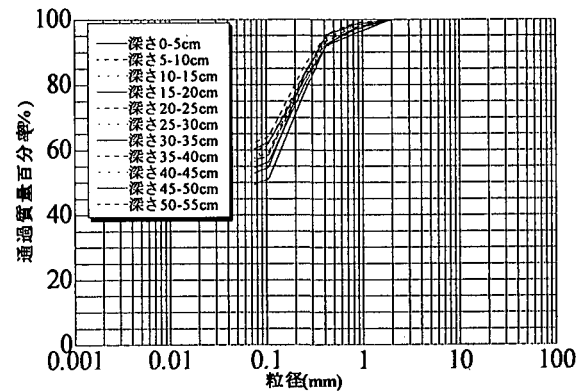


図-11(b) 尾久砂ノズル交換後攪拌一回目①

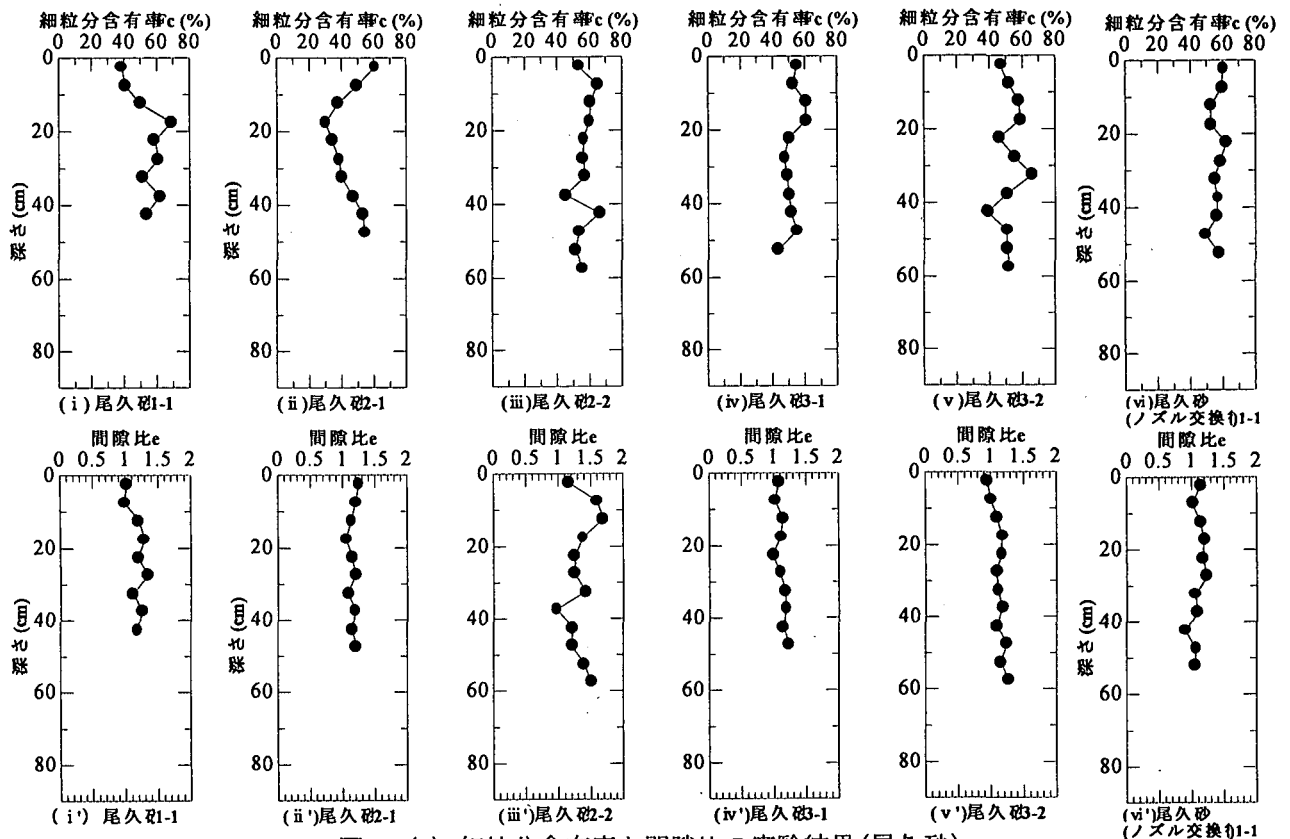


図-12(a) 細粒分含有率と間隙比の実験結果(尾久砂)

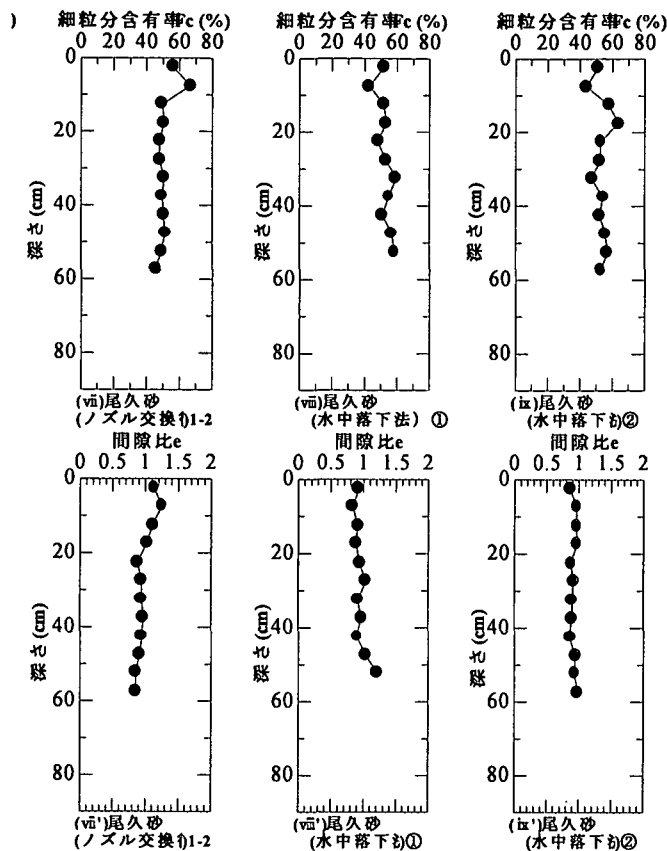


図-12(b) 細粒分含有率と間隙比の実験結果(尾久砂)

分布でも攪拌1回目や3回目の(i), (ii), (v)などではばらつきが大きくなる結果となった。これは、攪拌中に細粒分がノズルの先端を詰まらせたためであると考えられる。そこで、ノズルの先端をひとまわり大きなものに交換し、攪拌を行ったところノズルの詰まりは生じず、細粒分の混じった水が循環した。ノズル交換後の結果が、図-11(b)の粒径加積曲線であり、ノズル交換前や水中落下法で作製した地盤に比べ、ばらつきが小さくなっていることが分かる。同様に、図-12の上半分の(vi), (vii)の細粒分含有率を見ても、ノズル交換前や水中落下法で作製した地盤よりも均一であることがわかる。

さらに、各実験ごとの結果を比較しやすいように深さと細粒分含有率の関係でまとめたものが図-13である。図-13より、攪拌1回目から3回目においては、水中落下法で地盤を作製した場合よりもFcにばらつきが見られる。これは、上述したようにノズルの詰まりによるものであり、ノズル交換後は、通常に地盤を作製したものと同じか、それ以上に細粒分含有率のばらつきが少なく、均一な地盤が作製出来たという事が確認された。また、標準誤差を用いてまとめたのが表-1である。表-1からも確認できるように、ノズルを大きなものに交換したものは他の条件に比べ、最も標準誤差の値が小さくなっている。このことから細粒分含有率のばらつきが小さく、均一な地盤が作製できたことが証明された。図-12の下段には、切り出した試料で湿潤密度および含水比を測定し、それをもとに間隙比を算出した結果を示す。図-12(iii)に示す攪拌2回目で対象の

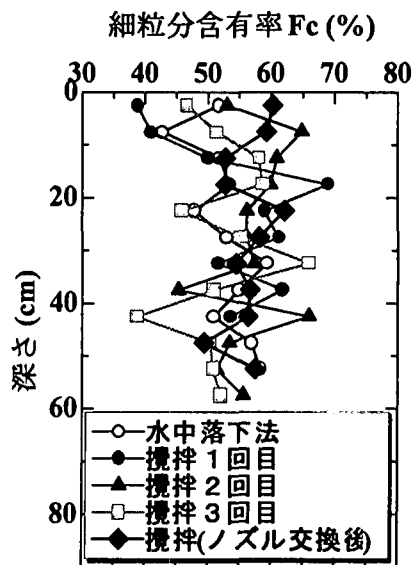


図-13 各条件における深さとFcの関係

表-1 標準誤差を用いた均一度の比較

条件	水中落下法	攪拌1回目	攪拌2回目	攪拌3回目	攪拌1回目
ノズル形状		小	小	小	大
標準誤差	4.55	9.34	5.51	6.54	3.57

値のばらつきが見られるほかは、ノズル交換前後に関係なく、間隙比は深さ方向、平面方向にほぼ一定の値の1.0程度となった。従って、土槽内の密度もほぼ一定になっていると考えられる。

4. まとめ

大型振動台による液状化実験などを対象にし、土槽内の土の詰め方に関して労力が少なくかつ短時間でできる“再利用”方法に関して検討した。その結果、きれいな砂には土槽底面からのボーリングと地表面からのジェット、細粒分を含む砂には攪拌装置とノズルからのジェットにより再利用が可能であることが分かった。作製された地盤の模型実験にあたっては加振やパイプレータによって密度調整をし、加速度計などは掘削を行って設置してきている。

なお、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」の一環として行った。

参考文献

- 山下丈二, 安田進, 勝沼美雪, 渡邊隆夫: 地盤の密度が液状化による浮上りに与える影響および模型地盤の再利用法, 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1985-1986, 2001.
- 丹羽俊輔, 安田進, 原田健二: シルト質砂におけるN値と密度, 静止度圧係数の関係, 土木学会第56回年次学術講演会, pp. 450-451, 2000.