

# 実用サイズによる超音波高密度砂杭の 造成法に関する基礎的研究

大内光徳<sup>1</sup>・村上俊秀<sup>2</sup>・兵動正幸<sup>3</sup>・吉本憲正<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 井森工業 (株) 土木部 (〒742-1352 山口県柳井市伊保庄4907)  
E-mail:ohuchi@imori.co.jp

<sup>2</sup>正会員 井森工業 (株) 土木部 (〒742-1352 山口県柳井市伊保庄4907)  
E-mail:murakami@imori.co.jp

<sup>3</sup>正会員 山口大学教授 大学院理工学研究科 環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)  
E-mail:hyodo@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 山口大学助教 大学院理工学研究科 環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)  
E-mail:nyoshi@yamaguchi-u.ac.jp

超音波を利用した高密度砂杭工法の開発を最終目的にしている。本研究は既に効果が確認された室内要素試験<sup>1), 2)</sup>と同等レベルの高密度化が可能で、かつ実用サイズに反映できる超音波の照射方法、および必要な水量を調査することを目的にした。加えて、ポータブルコーン貫入試験を実施し、相対密度と強度の関係についても調査した。そのため、実用サイズの土槽実験装置を試作し、実験を実施した。その結果、実用サイズについても室内要素試験と同程度の密度に豊浦砂が高密度化できること、豊浦砂の高密度化に土槽内の水位が影響しないこと、高密度化した豊浦砂の相対密度とポータブルコーン貫入抵抗の間に良好な相関関係があることが確認できた。

**Key Words** : ultrasonic wave, ground improvement method, compaction method, vibration, laboratory apparatus

## 1. はじめに

軟弱地盤中に振動締固めによって大口径の砂杭を造成して軟弱地盤を改良する代表的な締固め工法<sup>3)</sup>として、サンドコンパクションパイル工法、振動締固め工法、衝撃締固め工法などがある。このうちサンドコンパクションパイル工法は、複雑な地層構成を持つ軟弱地盤を改良する低兼で汎用性の高い地盤改良工法として陸上、海上工事において実績を残している<sup>4)</sup>。しかし、ケーシングパイプの貫入・引き抜き、砂杭の締固め・拡張のためにバイブロハンマーを用いるため、騒音、振動、隣接構造物基礎の変位など周辺環境への影響が避けられないという問題がある<sup>5)</sup>。また、軟弱地盤深度 50m 程度の改良ができる 3 連装海上サンドコンパクションパイル施工船を 8 時間稼働させて砂杭を造成した場合、消費される電力量は一般家庭の 1 年分を上回り、大量に電力を消費する問題も抱えている。これらの問題を抱える中、社会的には環境負荷の低減が求められ、地盤改良工事においても騒音、振動の低減、エネルギー消費の削減およ

び温暖化対策として CO<sub>2</sub> の排出削減が求められている。このような状況にあつて、近年、超音波振動を砂に直接または間接的に伝えて締固める方法が提案され、室内土槽を利用して基礎実験が行われている。この方法が現場施工に活用できれば騒音、振動を伴わない従来にない新しい砂杭の造成方法になることが考えられる。

後藤・桑山<sup>6)</sup>は幅 0.35m、長さ 1.90m、深さ 0.40m の室内実験土槽の端部中央に長さ方向に向けて振動数 19kHz、最大出力 1100W の超音波振動子を格納した金属容器を取り付け、土槽内に緩く堆積させ飽和させた豊浦砂に超音波を照射して砂の表面沈下現象を調べた。代表的な実験結果として、砂の表面沈下量が金属容器から 0cm の位置で 0.7cm、15cm の位置で 0.33cm、そして 45cm の位置で 0cm であったことを報告している。また内崎<sup>7), 8)</sup>は平均粒径 0.16mm の細砂、0.82mm の中砂、3.2mm の細礫を使って、19.5kHz の超音波振動子にこれらの材料を当てて跳躍現象を調べている。また、水セメント比 W/C を 18% から 30% まで 2% ずつ増加させて 7 種類の固練りモルタルを作製し、直径 50mm の型枠に投入して圧力

1.568MPa (16kgf/cm<sup>2</sup>)で加圧しながら 28.5kHz の超音波振動体をモルタルに直接押し当て、超音波振動体からどの程度の厚さまで緻密層が形成されるかを調べている。これらの研究では、一旦所定量の砂やモルタルを容器に詰め、その後超音波振動体を直接材料に接して振動を伝え、締固める方法を基本にしている。この方法の場合、超音波振動体周辺の締固めは短時間で終了する。しかし、締固められた材料は超音波振動体に負荷質量として作用し、超音波振動を吸収するため、パワーの小さい超音波では振動が遠方に伝わらず、所定の締固め効果が得られなくなると考えられる。したがって、超音波振動体を直接材料に接して振動を伝えて締固める方法では、現場を対象とする広範囲、あるいは一度に大きな質量を対象にする締固めには適さないと考えられる。

著者らは図-1 に示すように、水中に超音波を照射しながら粒状材料を薄層に堆積させると、疎密波が粒状材料に伝わり個々の粒子を微小振動させる。その結果、粒子間の摩擦抵抗が減少し粒子の再配列が促され間隙が減少して粒状材料が高密度化できるという高密度化概念に基づいた超音波供試体作製装置<sup>9)</sup>を開発した。装置を利用した室内実験で、超音波を照射して供試体を作製すると、超音波を使わずに作製した供試体と比較して、相対密度の増加が明確に認められること、および超音波照射距離、超音波出力、試料投入速度の3者を組み合わせて供試体を作製すると供試体の相対密度が容易に調節できることを確かめている<sup>11)2)</sup>。本方法を砂杭の造成方法に適用し発展させると、高密度の砂杭を連続して造成できる工法に繋がると考えられる。

図-2 にサンドコンパクションパイル工法と想定高密度砂杭工法対比図を示す。図-2(a)に示すように、サンドコンパクションパイル工法は、軟弱地盤中に貫入したケーシングパイプを所定の長さ引き抜くことで、ケーシングパイプ先端下部に一時的にできる空間内にケーシングパイプ先端から砂を排出し、ケーシングパイプを再貫入して、砂の締固めと拡径を行う砂杭造成工法である。

一方、図-2(b)に示す想定高密度砂杭工法はケーシングパイプを引き抜くことでケーシングパイプ先端下部にできる空間を水で満たし、超音波振動体を直接砂に押し当てることなく、超音波を水中に照射しながらその中に砂を連続投入して高密度な砂杭を造成することを想定している。したがって、パワーの小さい超音波でも軟弱地盤中に高密度の砂杭を造成することができると考えられる。この方法が実用化できれば、施工時に発生する騒音、振動を低減し、サンドコンパクションパイル工法と比較して消費電力を低減できる砂杭造成工法<sup>10)</sup>になると考えられる。そのためには、室内要素試験結果を実際の施工に適用できる手法を確立する必要がある。特に陸上施工

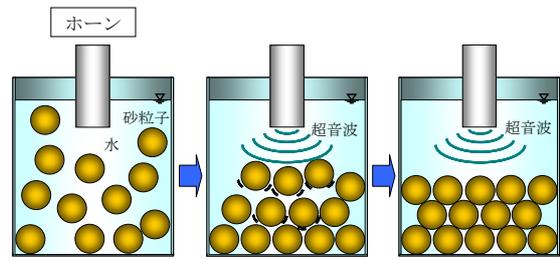
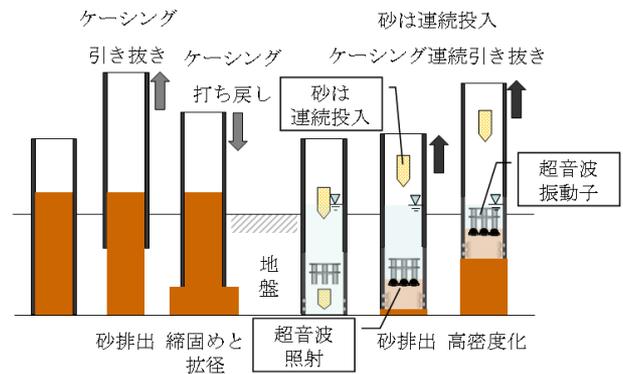


図-1 超音波照射による砂の高密度化概念



(a) サンドコンパクション (b) 想定高密度砂杭工法  
パイル工法

図-2 サンドコンパクションパイル工法と  
想定高密度砂杭工法の対比図

の場合、超音波を粒状材料に伝達させるために多量の水が必要になると、水の供給や排水処理のために相応の装置が必要となり、装置の駆動による騒音、振動の発生、および相応のエネルギー消費が避けられず、環境負荷を低減できる砂杭造成工法の確立を目指す観点からかけ離れることになる。したがって、少量の水で超音波を粒状材料中に伝達できることが工法の実用化には重要な要素になると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では実用サイズの土槽内に超音波を照射して試料が高密度化できる超音波照射装置と高密度化された試料に対してポータブルコーン貫入試験が実施できる部位を1組にした室内超音波土槽実験装置を試作した。装置を用いて、高密度化する範囲が拡大した場合の超音波照射方法および超音波を試料中に伝播させる水量が試料の高密度化に与える影響を調べた。さらに超音波の照射によって高密度化した試料の強度確認のため、相対密度とコーン貫入抵抗の関係を調べた。

## 2. 室内超音波土槽実験装置

### (1) 装置の概要

図-3 に室内超音波土槽実験装置の概要を示す。本装

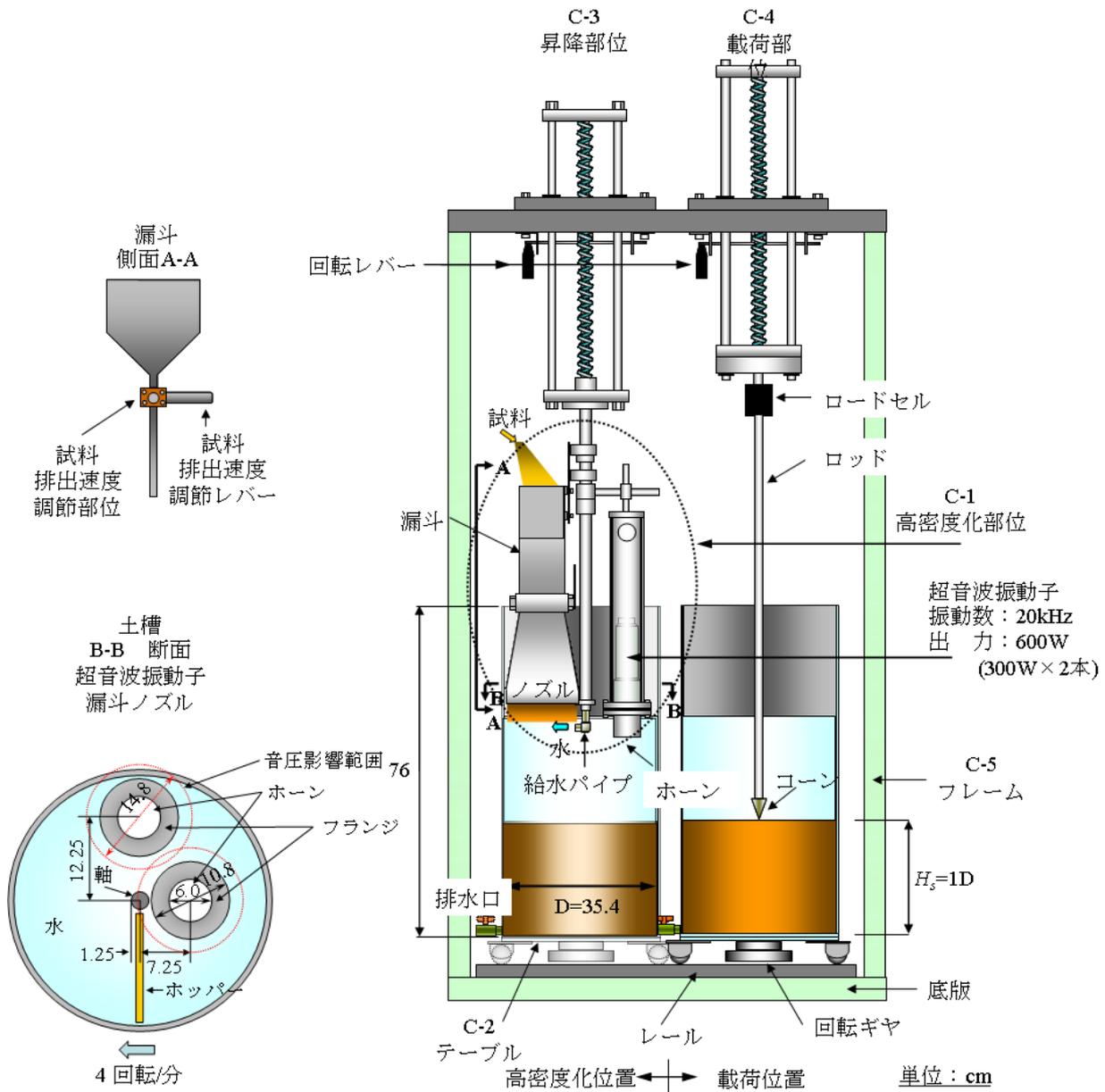


図-3 室内超音波土槽実験装置

置の特徴は、豊浦砂を使った室内要素試験で確かめられた高密度化条件、すなわち超音波出力、超音波照射距離、試料投入速度が実用サイズの土槽で再現でき、超音波で試料を高密度化できること、および高密度化した試料に対してポータブルコーン貫入試験が行えることにある。

本装置は次に示す5つの主要部位で構成される。高密度化部位 C-1 は超音波振動子と超音波振動子に取り付けたホーン、試料を土槽内に導く漏斗、および土槽内に水を供給する給水パイプを1組として構成される部位である。テーブル C-2 は高密度化部位 C-1 に配置したホーンから照射される超音波が土槽内に堆積する試料全面に照射できるように土槽を乗せて回転し、高密度化した試料に対してコーン貫入ができる位置に土槽が移動できる部

位である。昇降部位 C-3 は高密度化部位 C-1 を取り付け軸棒を備え、超音波照射距離と水面と試料投入高さを一定に保つ機能を持った密度化部位 C-1 を昇降させる部位である。载荷部位 C-4 はコーン貫入試験を行う部位である。フレーム C-5 はテーブル C-2 を移動させるためのレールを備えた底板と昇降部位 C-3 と载荷部位 C-4 の昇降用ギヤを備え、载荷部位 C-4 で行うポータブルコーン貫入試験で载荷反力を得るための部位である。

## (2) 主要部位の仕様

### a) 高密度化部位

ホーン先端からビーム状に照射された超音波はホーンから遠ざかるとビーム中央部と周辺部で音圧の差が顕

著になる。室内要素試験では、直径 75mm のモールドに対してホーンの直径は 60mm であり、ホーンから照射される超音波の音圧は試料堆積面において中央部と周辺部で差がなかったと考えられる。しかし、高密度化する範囲が拡大すると直径 60mm のホーンからビーム状に照射される超音波の音圧は試料堆積面において差が生じると考えられる。したがって、拡大した高密度化範囲全体に対して、室内要素試験で試料堆積面が受けた音圧と同程度の音圧が得られるように、後述する超音波振動子の平面配置とテーブル仕様と組み合わせ、なおかつ合理性を考慮して、以下のとおり超音波振動子を配置した。超音波振動子は 2 本を一对として超音波発振器に接続し、電圧 200V で 2 本の超音波振動子を同期させて駆動させる振動数 20kHz、ボルト締めランジユバン型振動子<sup>1)</sup>である。超音波発振器の出力<sup>2)</sup>は（以下超音波出力と記述する）下限 40W～上限 600W である。超音波振動子は絶縁と防水のために塩化ビニルパイプ内に格納し、超音波振動子先端に直径 60mm、長さ 63mm の金属ホーン<sup>3)</sup>を取り付けて、塩化ビニルパイプの外に露出させた構造である。漏斗の先端には中空ノズルが取り付けられている。中空ノズルの先端形状は縦 6mm、横 160mm の長方形であり、試料がカーテン状に土槽に投入できる。漏斗とノズルとの接合部には試料排出速度調節部位が取り付けられており、漏斗で一旦受けた試料の投入速度を調節して土槽に投入できる。試料排出速度調節部位には排出速度調節レバーがあり、レバーを水平にすると試料排出速度が最大となり、レバーを反時計回りに 90 度回転すると試料の排出が停止する。（本論文では用語として漏斗から排出される試料に対して試料排出速度、漏斗から排出され土槽に投入される試料に対して試料投入速度を使う）試料排出速度は 0～112g/s まで連続して調節できる。試料排出速度と後述するテーブルの回転速度（回/分）を連動させて調節すると、テーブルが 1 回転した時の土槽内に堆積する試料の厚さが調節できる。給水パイプは内径 13mm の鋼製パイプで、給水バルブによって土槽内への注水量が調節できる。最大試料排出速度 112g/s は室内要素試験で用いた最大試料投入速度 65.9g/s を実用サイズに反映させるように以下のように決定した。室内要素試験では直径 60mm のホーンからビーム状に照射された超音波が広がることなく試料堆積面に届いたとみなすと、直径 60mm の円内に最大試料投入速度 65.9g/s で試料が投入され、高密度化されたことになる。本装置では超音波振動子を 2 本配置したことから、試料投入速度は室内要素試験の最大試料投入速度 65.9g/s の 2 倍 131.8g/s に決め、最大試料排出速度 131.8g/s で試料が排出できるように漏斗先端のノズル形状を決定した。豊浦砂を使った排出試験を 20 回行い、その平均値 112g/s を装置の最大試料排出

速度にした。

#### b) テーブル

テーブルは四すみに取り付けられた車輪で底板に備えたレールに乗っており、高密度化部位 C-1 と載荷部位 C-4 の間を移動できる。テーブルの固定はテーブル端部にある固定レバーで行う。テーブルは中央底に回転ギヤを備えている。回転ギヤは底板横に取り付けたテーブル回転駆動モーターとチェーンによって連結されて、駆動モーターによってテーブルが回転できる。テーブルの回転速度は最大 4 回転/分で、0～4 回転/分まで連続調節できる。

#### c) 昇降部位

昇降装置は高密度化部位のホーン先端と試料堆積面および漏斗ノズル先端と水面までの距離を調節して、超音波照射距離および水面と試料投入高さを試験中一定に保つ機能を有している。昇降装置下部中央に取り付けられた直径 25mm の鋼製棒で高密度化部位 C-1 を支持している。レバーを回転させると高密度化部位が上下に移動でき、レバーを 1 回転させると 10mm 移動する。

#### d) 載荷部位

載荷部位は高密度化部位 C-1 で試料の高密度化が終了した土槽を移動させ、ポータブルコーン貫入試験を行う部位である。載荷装置下部にロードセルを取り付け、その下部にロッドとコーンを取り付ける構造である。載荷装置はレバーを回転させてコーンを連続貫入させるもので、レバーを 1 回転させるとコーンが 10mm 貫入できる。

#### e) フレーム

フレームは 1 辺 75mm の角鋼管によって門型に組まれており、鋼製底板に固定されている。上部に昇降装置、載荷装置を組み込んだ構造で、高密度化部位 C-1 の支持と載荷部位 C-4 の反力としての機能を有している。

#### f) 実験土槽サイズ

陸上 SCP 工法の標準的なケーシングパイプサイズに相当する内径 35.4cm のアクリル製土槽を用いた。

### 3. 土槽試料の高密度化

#### (1) 供試体作製方法および条件

##### a) 供試体作製方法

供試体は以下の 3 種類の条件によって作製した。なお、超音波照射距離  $H_u$ 、土槽内の水位  $H_w$  は図-4 に示すとおりである。(1)超音波照射距離  $H_u$  を 5.6cm にして、土槽内の水位  $H_w$  を 10.7, 18.2, 25.7cm に変化させた場合。(2)超音波照射距離  $H_u$  を 13.1, 20.6cm に変化させ、土槽内の水位  $H_w$  を 25.7cm で一定にした場合。(3)超音波を照射せず、土槽内に試料を投入し、堆積する試料の堆積面と水面までの距離を 10.7, 18.2, 25.7cm に変化させて供試

体を作製した場合. なお, 実験で設定する水位 10.7, 18.2, 25.7cm は超音波照射距離を 5.6, 13.1, 20.6cm とした時, 超音波振動子のフランジ下面が水に浸る水位である.

b) 超音波出力の設定

超音波出力は超音波発振器の上限出力 600W とした.

c) 超音波照射距離  $H_u$  の設定

図-4 に超音波照射距離  $H_u$  の設定概要図を示す. 水で満たした土槽内にホーン先端を下向きに水没させ, 超音波を照射すると超音波は土槽底面で反射する. この時, 超音波波長  $\lambda$  に基づいてホーン先端と土槽底面間の距離を図-4 に示すように調節すると, 土槽底面で音圧が最大となる定在波が形成される. ただし, 超音波はホーン先端から下方にのみ照射され, 減衰することなく土槽底面に達し, 土槽底面で 100% 上向きに反射されると仮定する. 土槽底面  $o$  を座標原点として, 下向きをプラス, 上向きをマイナスに座標軸をとると, ホーンと土槽底面間で形成される定在波の音圧  $P$  (Pa) は式(1) <sup>13)</sup> で表される.

$$P = 2\omega\rho A \cdot \cos(kx) \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

ここで, 式(1)の  $2\omega\rho A$  は音圧振幅の最大値 (Pa) <sup>14)</sup> を表す. 研究で使用した超音波装置は超音波振動子の振動数が 20kHz に保たれた状態で超音波出力を変化させるもので, 超音波出力を変えるとホーン先端の振動振幅が変化し, ホーン先端から照射される超音波の音圧振幅が変わるものである (本論文では音圧振幅が大きいことを音圧が大きい, 音圧振幅が小さいことを音圧が小さいと記述する). また,  $\omega$  と  $k$  はそれぞれ  $\omega=2\pi f$ ,  $k=2\pi/\lambda$  の関係がある. ここで,  $\omega$  は角速度 (rad/s),  $f$  は振動数 (Hz),  $\rho$  は静止時の水の密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\lambda$  は水中を伝わる超音波の波長 (m),  $x$  は座標軸に添う距離 (m),  $t$  は時間 (s),  $A$  は超音波の音の大きさにより決まる定数,  $k$  は位相定数 (rad/m) をそれぞれ表す. 式(1)から音圧  $P$  の空間的分布は  $\cos(kx)=\cos(2\pi x/\lambda)$  で表され, 音圧  $P$  が最大になる位置はモールド底面を  $x=0$  とすると,  $x=0, -\lambda/2, -\lambda, \dots$  となる. 以上から, 超音波周波数を 20kHz, 水中音速を  $1500\text{m/s}$  <sup>15)</sup> として超音波波長を算出すると  $\lambda=0.075\text{m}$  となる. 波長  $\lambda$  を基に底面位置で音圧  $P$  <sup>16)</sup> が最大となる距離を求め, その内 5.6cm と 13.1cm および 20.6cm の 3 種類を超音波照射距離  $H_u$  に設定した.

d) 超音波振動子の平面配置

超音波振動子は決められた共振周波数で大振幅駆動するように設計, 製作されており, 共振周波数に対応した超音波振動子のサイズが存在する. したがって, 高密度化する範囲が大きくなった場合, 超音波振動子のサイ

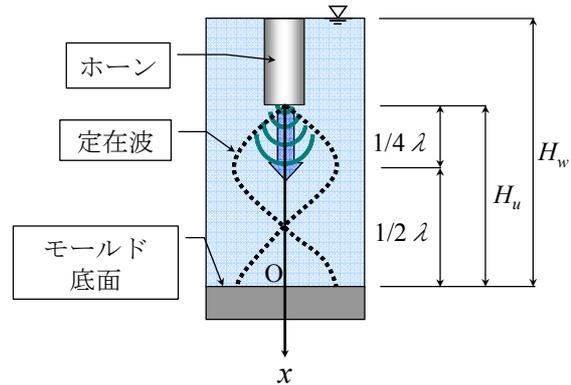


図-4 超音波照射距離  $H_u$  の設定概要図

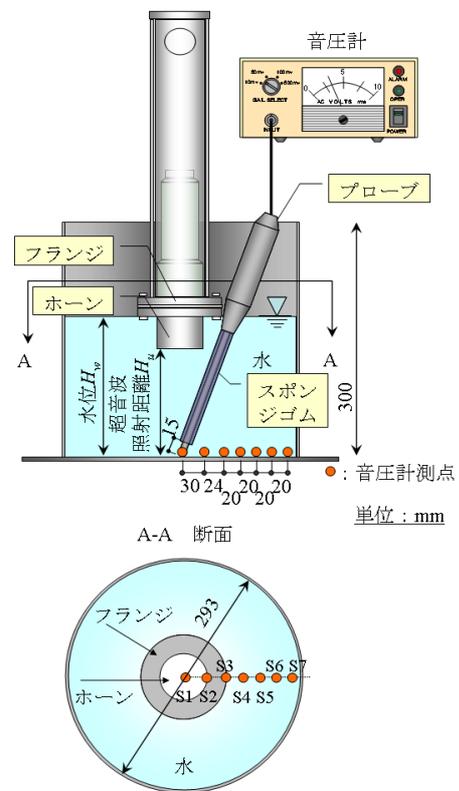


図-5 音圧指示値計測概要図

ズを単に大きくして, 室内要素試験の高密度化条件を実用サイズにスケールアップすることはできない. 高密度化に使用する超音波振動子の周波数を変更しないことを前提にすると, 室内要素試験と同等な高密度化効果が得られる音圧範囲を評価し, 高密度化する範囲に対応させて超音波振動子の数を決定する必要がある. 超音波振動子の平面配置は, 後述する音圧指示計 HUS-5 (本多電子製) を利用して, 実験で設定する最大超音波照射距離 20.6cm において, ホーン中央直下で計測される音圧指示値の 50% 指示値が得られる距離を音圧影響距離  $L$  として,

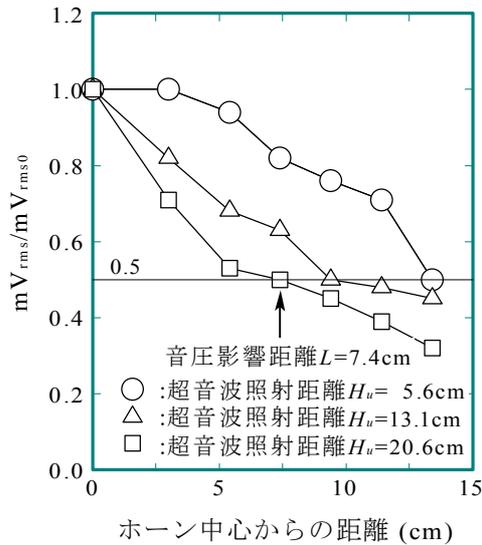


図-6 ホーン中央直下音圧指示値  $mV_{rms0}$  に対する各計測点の音圧指示値  $mV_{rms}$  比

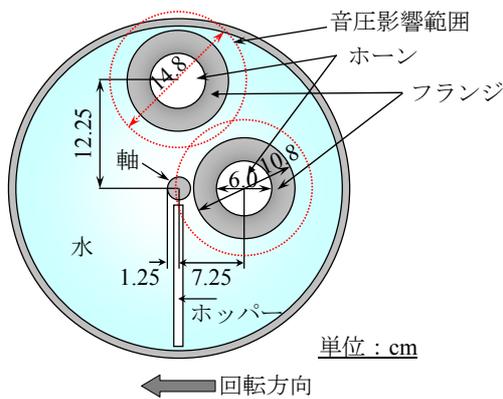


図-7 超音波振動子の平面配置

半径  $L$  の円を室内要素試験と同等な高密度化効果が得られる音圧影響範囲と定義して振動子を配置した（本論文では音圧指示計 HUS-5 で計測する値を式(1)で定義する音圧と区別するため音圧指示値と記述する）．図-5 に音圧指示値計測概要図を示す．内径 293mm, 高さ 300mm の円筒アクリル容器の中央に超音波振動子を設置した．超音波照射距離は実験で設定する 5.6, 13.1, 20.6cm の 3 種類とした．水位は各超音波照射距離に対して, 振動子のフランジ下面が水に浸る 10.7, 18.2, 25.7cm とした．容器底面に音圧指示値計測点を 7 点設け, 各測点にプローブ先端を移動させて音圧指示値を順次計測した．音圧指示値計測点はホーン中央直下 S1 から容器壁に向かって S7 まで一直線に設けた．計測点 S2 はホーン端部直下に, 計測点 S3 はフランジ端部直下に, そして計測点 S3~S7 まで 20mm 間隔で設けた．音圧指示

表-1 豊浦砂の物理定数

土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.643
最大粒径 $D_{max}$ (mm)	0.425
均等係数 $U_c$	1.65
曲率係数 $U_c'$	0.90
最大密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.650
最小密度 $\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.337

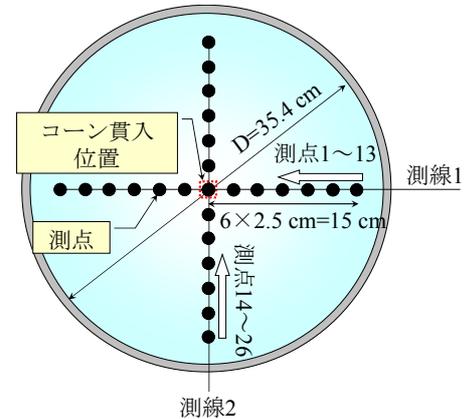


図-8 試料堆積厚さ計測位置およびポータブルコーン貫入試験位置図

計 HUS-5 は水中を伝播する超音波の音圧をプローブで受振し, 音圧振幅に対応する電圧に変換して電圧実効値  $mV_{rms}$  として表示するものである．音圧指示計 HUS-5 が受信できる周波数範囲は 10kHz~5MHz である．プローブは土槽底面における超音波のみを受振できるように, 受振部全長 210mm の内, 195mm を厚さ 5mm のスポンジゴムで被覆して先端 15mm を露出させた．各超音波照射距離に対して, 各計測点で音圧指示値を計測した．各計測点における音圧指示値の計測時間は 1 分間とし, その間不規則に変動する音圧指示値を継続して読み取り, 1 分間読み取った音圧指示値の内, 上限値と下限値を平均して, その計測点の音圧指示値とした．図-6 にホーン中央直下音圧指示値  $mV_{rms0}$  に対する各計測点の音圧指示値  $mV_{rms}$  の比を示す．図-6 からホーン中央直下で計測された超音波照射距離 20.6cm における音圧影響距離  $L$  は, ホーン中央直下から 7.4cm とした．よって, ホーン 1 本の音圧影響範囲は半径  $L=7.4cm$  の円の面積  $172cm^2$  と評価でき, ホーン 2 本の音圧影響範囲は  $344cm^2$  である．図-7 に音圧指示値計測結果に基づいて決定した超音波振動子の平面配置を示す．図のように超音波振動子を配置した場合, 土槽が 1 回転すると, 2 本の超音波振動子の音圧影響範囲で土槽全面がカバーでき, 土槽内に堆積する試料全面に超音波が照射できる．また, 音圧影響範囲  $344cm^2$  が土槽全面  $984cm^2$  を 15 秒で通過する．

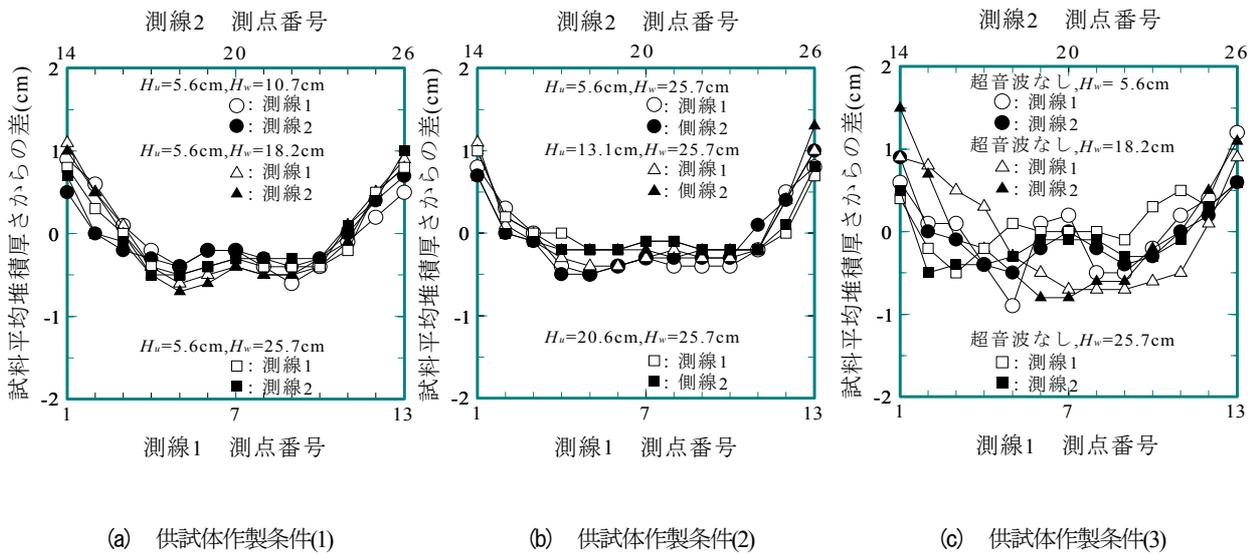


図9 供試体作製条件(1)~(3)によって堆積した試料の各測点における試料堆積厚さと平均試料堆積厚さとの差

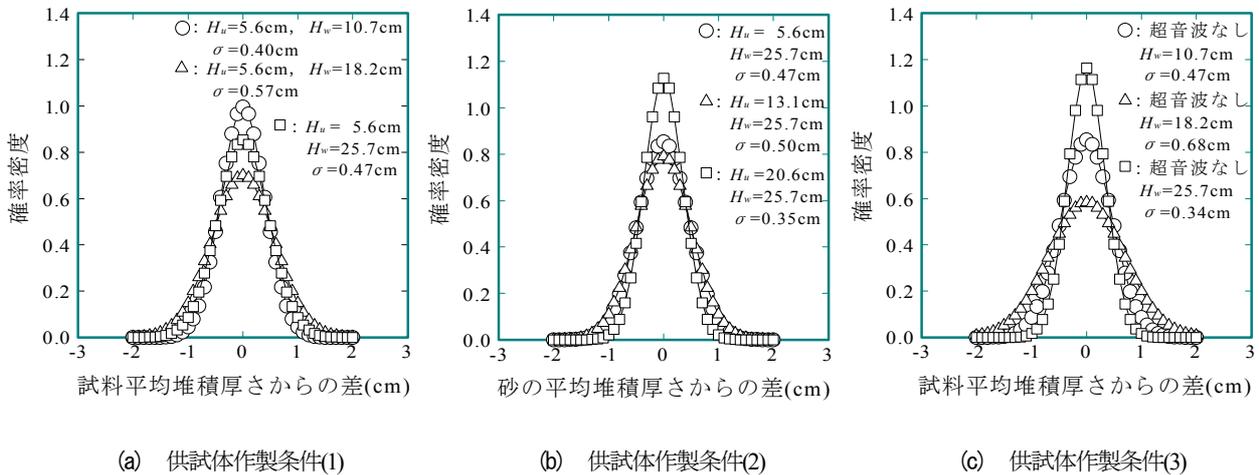


図10 供試体作製条件(1)~(3)によって堆積した試料の各測点における試料堆積厚さと平均試料堆積厚さとの差に対する確率密度

e) 用いた試料および水

試料は乾燥豊浦砂を用いた。表-1 に豊浦砂の物理定数を示す。また水は水道水を用いた。水道水は蛇口から汲み取る際、水の中に周辺の空気などを取り込まないように、注意して汲み取った。また、水道水は日によって含まれる気体の量や揮発性成分の量に変動があるため、蛇口から一旦バケツに汲み取った後 24 時間放置し、水道水に含まれる気体や揮発性成分を除去した後利用した。

(2) 供試体作製手順

供試体の作製は以下の手順で行った。

n1 土槽および高密度化部位を超音波照射位置に移動し、高密度化部位の高さを調節して、ホーン先端と土槽底面の距離を所定の超音波照射距離に設定する。

n2 漏斗先端ノズルと水面までの距離が 5cm になるように漏斗高さを調節し、土槽内に注水し、ホーン全体を水没させる。

n3 試料投入速度を 112g/s に設定する。

n4 テーブルを回転速度 4 回/分で回転させる。

n5 漏斗上部から試料投入を開始し、ノズルから土槽に投入される試料が水中を沈降して底面に堆積し始めた時点で、超音波の照射を開始する。

n6 土槽内に堆積する試料堆積面に対する超音波照射距離が一定となるように昇降装置によって高密度化部位を上昇させる。また水位を振動子のフランジ下に保つ。

n7 漏斗への試料投入が終了し、全ての試料が土槽内に堆積したことを確認した後、テーブルの回転、超音波の照射、土槽内への注水を停止する。

表-2 土槽実験結果

実験条件	超音波出力 (W)	超音波照射距離 $H_u$ (cm)	試料投入速度 (g/s)	水位 $H_w$ (cm)	乾燥密度 $\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	相対密度 $D_r$ (%)
(1)-1	600	5.6	112	10.7	1.630	94.9
(1)-2				18.2	1.629	94.6
(1)-3				25.7	1.627	94.3
(2)-1	13.1	25.7		1.610	89.7	
(2)-2	20.6	25.7		1.584	82.5	
(3)-1	---	---		10.7	1.405	25.5
(3)-2			18.2	1.403	24.9	
(3)-3			25.7	1.410	27.5	

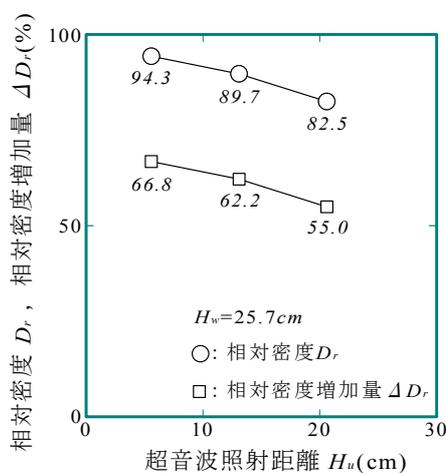


図-11 超音波照射距離  $H_u$ -相対密度  $D_r$ -相対密度増加量  $\Delta D_r$  関係図

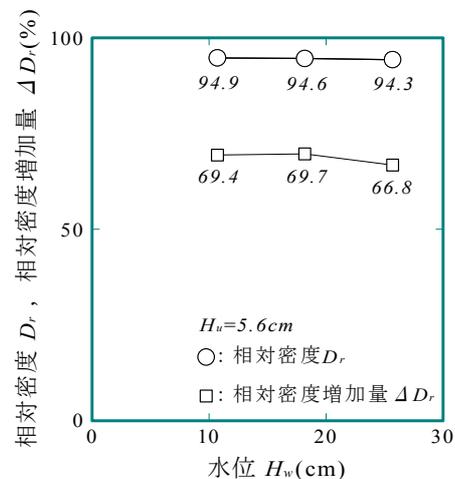


図-12 水位  $H_w$ -相対密度  $D_r$ -相対密度増加量  $\Delta D_r$  関係図

図-8 に高密度化した試料堆積厚さの計測位置とポータブルコーン貫入試験位置図を示す。土槽内に堆積した試料の厚さは図-8 に示す測線 1 に設けた測点 1~13, および測線 2 に設けた測点 14~26 で計測する。測点 1~26 で計測した試料堆積厚さを平均して土槽内に堆積した平均試料堆積厚さを求める。平均試料堆積厚さに土槽断面積を乗じて試料体積を求め、全投入試料重量と試料体積から相対密度を求める。

### (3) 実験結果および考察

#### a) 試料の堆積厚分布

供試体作製条件(1)~(3)によって異なる密度と厚さで土槽内に堆積した試料の平面的な堆積厚分布を同一指標で見るために、図-9(a), (b), (c) に図-8 に示す測線 1 と測線 2 に設けた各測点における試料堆積厚さと平均試料堆積厚さとの差をプロットして示す。図-9(a), (b), (c) から、超音波を照射せず試料を堆積させた場合、堆

積厚さのばらつきが大きいことがわかる。しかし、図-9(a), (b) から、超音波を照射して試料を堆積させた場合、堆積厚さのばらつきにほとんど差がないことがわかる。一方、試料堆積厚さの平面的な分布形態は、超音波を照射して試料を堆積させた場合と超音波を照射せず試料を堆積させた場合とで類似しており、いずれも平均試料堆積厚さからわずかに低く堆積した土槽中央から周囲に向かって一旦堆積厚さが減少し、その後ほぼ直線的に堆積厚さが増し、土槽周辺で平均試料堆積厚さより 1cm 程度厚く堆積していることがわかる。そこで、試料堆積厚さの平面的なばらつきの程度を調べるために、図-9(a), (b), (c) の結果に基づいて、各測点の試料堆積厚さと平均試料堆積厚さの差について求めた確率密度  $f(x)$  を図-10(a), (b), (c) に示す。確率密度  $f(x)$  は各測点の試料堆積厚さと平均試料堆積厚さの差のばらつきが、平均試料堆積厚さを中心に正規分布すると仮定して求めた。図-10(a), (b), (c) から、超音波を照射して試料を堆

積させた場合、標準偏差  $\sigma$  は 0.35~0.57cm であり、超音波を照射せず試料を堆積させた場合、標準偏差  $\sigma$  は 0.34~0.68cm である。両者の差は最大 0.11cm であり、試料堆積厚さのばらつきの程度にほとんど差がないことが読み取れる。

以上の結果から、実用サイズの土槽においても、音圧影響範囲に基づいて超音波振動子を配置し、超音波を水中に照射しながら試料を堆積させると、試料堆積面全体に超音波が均一に照射される。したがって、堆積した試料粒子はほぼ一律に下方に沈降し、試料は室内要素試験と同様に均一に高密度化できることがわかる。

b) 超音波照射距離と水位の影響

表-2 に土槽実験結果表を示す。なお、相対密度の算出に用いる平均試料堆積厚さ  $H_m$  は前項の結果を踏まえて、図-8 に示す測点 1~26 で計測した各測点における試料堆積厚さを単純平均して求めた。

表-2 から、超音波を照射して試料を高密度化すると、いずれの供試体作製条件においても明らかな密度増加が認められる。表-2 から、超音波照射距離を 5.6cm にして、土槽内の水位を 10.7, 18.2, 25.7cm に変えて超音波を照射して試料を高密度化した場合、試料の相対密度は 94.3~94.9% でほぼ同じであり、超音波照射による試料の密度増加に土槽内の水位は影響しないことがわかる。表-2 から、超音波照射距離が長くなるに伴い、超音波照射によって高密度化した試料の密度が小さくなることがわかる。表-2 の結果に基づいて、図-11 に超音波照射距離  $H_0$ -相対密度  $D_r$ -相対密度増加量  $\Delta D_r$  関係図を、図-12 に水位  $H_w$ -相対密度  $D_r$ -相対密度増加量  $\Delta D_r$  関係図をそれぞれ示す。図-11 から超音波照射距離と相対密度の間に直線的な関係が認められる。試料堆積面全体を音圧影響範囲でカバーできるように超音波振動子を配置し、超音波出力を 600W、試料投入速度を 112g/s、そして超音波照射距離を 5.6~20.6cm の間で調節して超音波を照射して試料を高密度化すると、試料の相対密度が 82.5~94.3% 程度に調節できることがわかる。図-12 から、水位の変化に対して相対密度にほとんど違いが認められず、超音波を照射して試料を高密度化する場合、相対密度の大小は水位の影響を受けないことがわかる。一般に水と気体のような音響特性が異なる境界では一部は反射し一部は透過することが示されている<sup>11)</sup>。今回の実験では、ホーン先端から下方に照射された超音波は試料堆積面において、試料の高密度化に作用するものと透過するもの、および反射して水面に届き、水面でまた反射され下方に進むものが存在すると考えられる。これら 3 者の内、水面で反射され下方に進む超音波は再度試料堆積面に届き、試料の高密度化に影響する可能性が考えられる。土槽内の水位が浅いほど、水面で反射され試料堆積面に届く超

表-3 室内要素試験と実用サイズ土槽実験結果対比表

実験種別	試料投入速度 (g/s)	試料堆積面積 (cm <sup>2</sup> )	試料堆積速度 (cm/s)	相対密度 $D_r$ (%)
室内要素試験 <sup>2)</sup>	24.4	44	0.30	94.5
	65.9	44	0.80	89.9
実用サイズ土槽実験	112.0	344	0.17	94.3~94.9

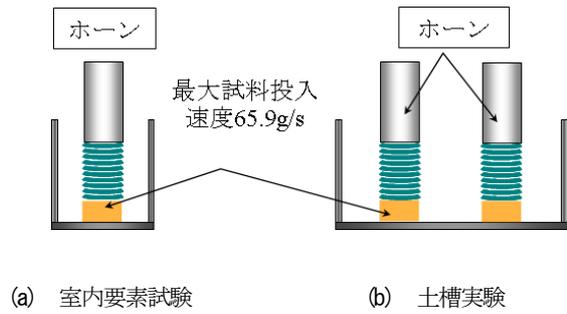


図-13 土槽実験装置設計時点における試料投入速度算定図

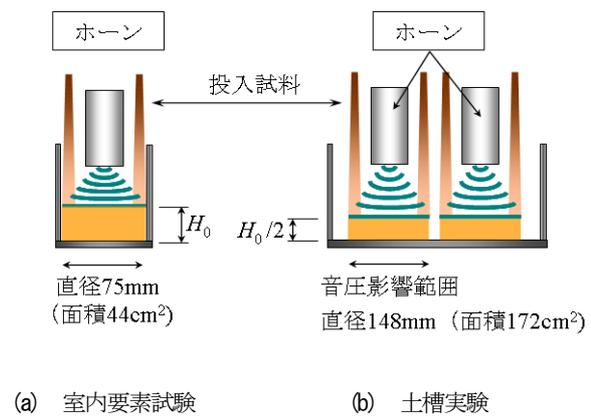


図-14 土槽実験結果に基づく試料投入速度算定図

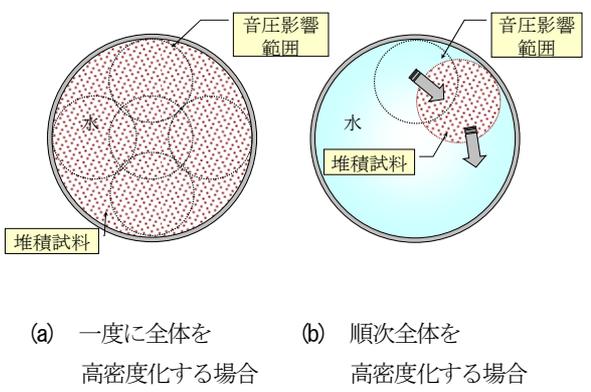


図-15 音圧影響範囲に基づく高密度化方法図

音波の音圧が大きくなり、試料の高密度化に及ぼす影響が大きくなると考えられる。しかし、最も浅い水位 10.7cm と最も深い水位 25.7cm における実験結果を比較しても、超音波を照射して高密度化された試料の相対密度の大きさにほとんど違いがない。この結果から、水面で反射される超音波の音圧は試料堆積面において音圧影響範囲内の音圧に比べて小さく、相対密度に変化を及ぼすほどの大きさではないため、水位による影響がないものと推測できる。また、図-11、図-12 から、超音波を照射せず堆積させた試料の相対密度に対して、超音波を照射して高密度化した場合、試料の相対密度は最大 69.7%増加することが読み取れる。

c) 試料投入速度の影響

表-3 に著者らが別報<sup>2)</sup>で報告した室内要素試験結果と、実用サイズ土槽実験結果を対比させて示す。なお、両者で超音波照射距離、超音波出力、試料投入速度の内、超音波照射距離 5.6cm と超音波出力 600W が同じである。表-3 から、実用サイズ土槽実験における相対密度は 94.3 ~ 94.9% であり、試料投入速度 24.4g/s の室内要素試験の結果が再現されている。図-3 に示す室内超音波土槽実験装置の最大試料排出速度は、図-13 に示す土槽実験装置設計時点における試料投入速度算定図のように、室内要素試験で用いた最大試料投入速度 65.9g/s をスケールアップして 112g/s に決定した。しかし、実験結果は試料投入速度 24.4g/s の室内要素試験結果が再現されている。この結果は、図-14 に示す土槽実験結果に基づく試料投入速度算定図のように考えられる。室内要素試験で用いた直径 75mm、底面積 44cm<sup>2</sup> のモールド内に超音波を照射せずに試料投入速度 24.4g/s で投入した試料は 1 秒間に 0.30cm、試料投入速度 65.9g/s で投入した試料は 1 秒間に 0.80cm 堆積し、その飽和密度は 1.879g/cm<sup>3</sup> であった。一方、土槽実験結果から算出すると、試料投入速度 112g/s で音圧影響範囲 344cm<sup>2</sup> に 1 秒間に堆積した試料厚さは 0.17cm で、その飽和密度は 1.874g/cm<sup>3</sup> であり、実用サイズ土槽実験における試料堆積厚さは室内要素試験における試料堆積厚さの約 1/2 である。すなわち、高密度化する範囲を拡大させ、超音波出力を 600W、超音波照射距離を 5.6cm の条件で試料を高密度化する場合、音圧影響範囲内に 1 秒間に堆積する試料厚さが室内要素試験でモールド内に 1 秒間に堆積する試料厚さの 1/2 になるように試料投入速度を設定すると、室内要素試験の結果が実用化サイズの高密度化に反映できると考えられる。

以上の結果から、試料を高密度化するサイズを拡大して、高密度化する試料の相対密度を 95%程度にする方法として、図-15 音圧影響範囲に基づく高密度化方法図に示すような 2 つの方法が考えられる。1 つ目の方法は図-15(a) に示すように、音圧影響範囲に基づいて試料

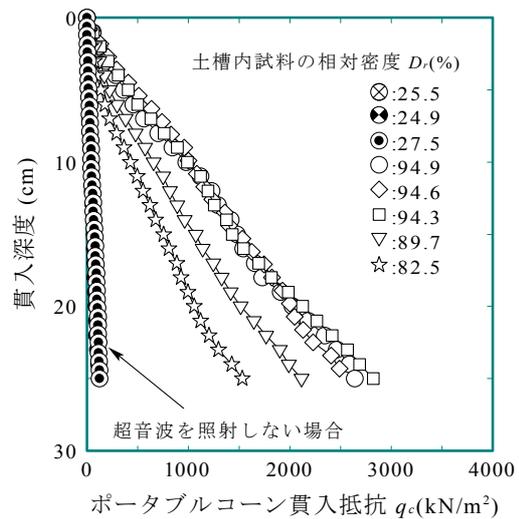


図-16 ポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$ -貫入深度関係図

を高密度化する全範囲を勘案した数の超音波振動子を配置し、超音波照射距離および単位時間当たりの試料堆積厚さが室内要素試験の 1/2 になる試料投入速度を設定して超音波を照射して試料を高密度化する方法。2 つ目の方法は図-15(b) に示すように、音圧影響範囲に基づいて超音波振動子を配置し、超音波照射距離および試料投入速度は 1 つ目の方法と同様に設定して試料を高密度化する方法。これらの作業を鉛直方向に連続して行なうことができれば高密度の砂杭が連続して造成できると思われる。さらに、超音波照射距離、試料投入速度を調節することで、超音波を照射して造成する砂杭の相対密度が調節できることになる<sup>2)</sup>。また、超音波を照射して試料を高密度化する場合、特別水量の影響を考慮する必要がないという結果から、想定する高密度砂杭工法では特別な給排水装置を必要とせず、装置の駆動に伴う騒音、振動の発生およびエネルギー消費に対する処置が不必要であると考えられ、従来の締固め原理に基づく工法に比べ、騒音、振動、エネルギー消費が低減できる砂杭の造成工法になると思われる。

4. コーン貫入抵抗

(1) 実験手順

ポータブルコーン貫入試験は図-8 に示した土槽中央部で行った。試験は地盤工学会基準 (JGS 1431-1995)<sup>17)</sup> ポータブルコーン貫入試験方法に従って実施した。なお、先端コーンは鋼製で先端角 30°、底面積 6.45cm<sup>2</sup> のものを、ロッドは単管式を使用した。また、コーン圧入力  $Q_{cl}$  はコーン貫入量 1mm ごとに、ロッド頭部に取り付けたロードセルによって計測した。

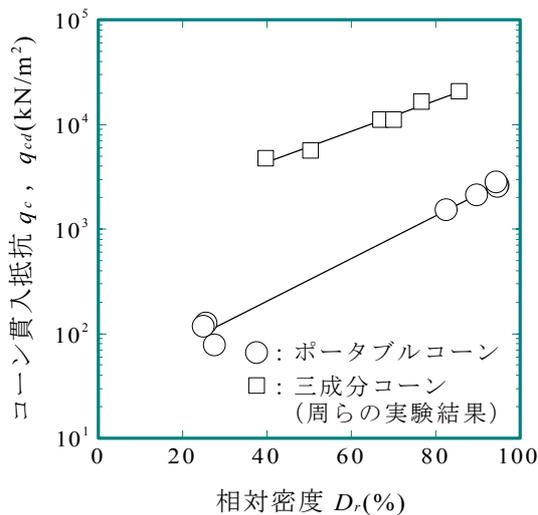


図-17 相対密度  $D_r$ -コーン貫入抵抗  $q_c$ ,  $q_{cd}$  関係図

表-4 ポータブルコーン貫入試験と三成分コーン貫入試験実験条件表

名称	単位	ポータブルコーン	三成分コーン
土槽内径 $D_c$	(cm)	35.4	75
コーン先端角 $\alpha$	(度)	30	60
コーン先端直径 $d_c$	(cm)	2.8	3.56
コーン先端断面積 $A_c$	(cm²)	6.45	10
初期鉛直応力 $\sigma_{v0}$	(kN/cm²)	0	98

(2) 実験結果および考察

図-16 にポータブルコーン貫入試験結果を示す。なお、各相対密度に対する貫入抵抗曲線は貫入抵抗に土槽底面の影響が及ばない最大貫入深度 25cm までのデータをプロットしている。ポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  と貫入深度の関係は相対密度がほぼ同じ試料について、ほぼ同じ値が得られており、ポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  と貫入深度の関係が比例関係にあることがわかる。また、高密度化した試料の相対密度に対応してポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  に明瞭な差が認められる。図-17 はポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  と相対密度の関係を見るため、図-16 に示す最大貫入深度 25cm におけるポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  を縦軸に対数目盛りで、相対密度を横軸に算術目盛りでプロットして示す。同時に周ら<sup>18)</sup>の実験結果  $q_{cd}$  もプロットしている。周らは、直径 75cm、高さ 90cm の水平と鉛直圧力が任意に制御できる土槽を使い、豊浦砂 ( $G_s=2.64$ ,  $D_{50}=0.16\text{mm}$ ,  $e_{\min}=0.605$ ,  $e_{\max}=0.977$ ) を空中落下法によって相対密度  $D_r=25\sim95\%$  に堆積させ、コーン先端角  $\alpha=60^\circ$ 、断面積  $A_c=10\text{cm}^2$ 、フリクションスリーブ表面積  $A_f=100\text{cm}^2$  の三成分コーンを初期鉛直応力  $\sigma_{v0}=49\sim294\text{kN/m}^2$  ( $0.5\sim3.0\text{kgf/cm}^2$ ) の条件で貫入試験を行った。実験は飽和状態と気乾状態で貫入

抵抗  $q_{cd}$  に大差が見られないとして気乾状態で行なっている。この内、図-17 には土槽周辺の境界条件（水平方向ひずみ  $\epsilon_{hr}=0$ , 鉛直方向ひずみ  $\epsilon_v=0$ ）が等しい実験結果をプロットしている。また、表-4 にポータブルコーン貫入試験と三成分コーン貫入試験の実験条件を示す。図-17 からポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  と相対密度との間に直線的な相関関係が認められ、三成分コーン貫入試験結果と同様な傾向を示している。このことから、ポータブルコーン貫入試験によって超音波を照射して土槽内に高密度化した試料の密度に対応した強度指標を求めることができる。

5. 結論

本研究の結果、以下の知見が得られた。

- (1)超音波を照射して豊浦砂を高密度化すると、室内要素試験と同様に直径 35.4cm の実用サイズの土槽においても豊浦砂の密度増加が明らかに認められる。
- (2)直径 35.4cm の実用サイズの土槽においても、音圧影響範囲に基づいて超音波振動子を配置し、超音波を照射しながら試料を堆積させると、試料堆積面全体に超音波が均一に照射され、試料は室内要素試験と同様に均一に高密度化できる。
- (3)直径 35.4cm の実用サイズの土槽内に超音波を照射して豊浦砂を高密度化すると、超音波を照射せず堆積させた豊浦砂の相対密度に対して、相対密度が最大 69.7%増加する。
- (4)直径 35.4cm の実用サイズの土槽において、超音波出力を 600W、試料投入速度を 112g/s、超音波照射距離を 5.6cm に設定した場合、超音波を照射して豊浦砂を最も高密度にでき、相対密度は 94.3~94.9%になる。また、この結果は土槽内の水位を 10.7, 18.2, 25.7cm に変えても変わらない。
- (5)直径 35.4cm の実用サイズの土槽において、超音波出力を 600W、試料投入速度を 112g/s で、超音波照射距離を 5.6~20.6cm の間で調節して、超音波を照射して豊浦砂を高密度化すると、相対密度が 82.5~94.3%程度に調節できる。
- (6)直径 35.4cm の実用サイズの土槽において、超音波を照射して豊浦砂を高密度化する場合、相対密度の大小は試料堆積面における音圧の大きさに関係し、水位の影響を受けない。
- (7)直径 35.4cm の実用サイズの土槽において、水面で反射される超音波の音圧は試料堆積面において音圧影響範囲内の音圧に比べて小さく、水位の違いは高密度化する豊浦砂の密度に影響しない。

(8)直径 35.4cm の実用サイズの土槽において、超音波出力を 600W、超音波照射距離を 5.6cm の条件で試料を高密度化する場合、音圧影響範囲内に 1 秒間に堆積する試料厚さが室内要素試験の 1/2 になるように試料投入速度を設定すると、室内要素試験の結果が実用化サイズに反映できる。

(9)直径 35.4cm の実用サイズの土槽において、ポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  と貫入深度の関係は直線関係にある。また、縦軸に対数目盛りでプロットしたポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  と横軸に算術目盛りでプロットした豊浦砂の相対密度との間に直線的な相関関係が認められ、ポータブルコーン貫入試験によって超音波を照射して土槽内に高密度化した試料の密度に対応した強度指標を求めることができる。

**謝辞：**本研究の 1 部は、財団法人周南地域地場産業振興センター、サポート事業、平成 16 年度ものづくり支援・事業化枠で実施した内容を含む。記して謝辞を表す。

#### 参考文献

- 1) 吉本憲正, 大内光徳, 井上翔太, 兵動正幸, 中田幸男: 超音波による様々な砂質土の高密度化に関する基礎的研究, 第 8 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.197-202, 日本材料学会, 2008.
- 2) 大内光徳, 村上俊秀, 兵動正幸, 吉本憲正: 超音波による高密度砂杭造成に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.4, pp.929-942, 2009.
- 3) 土木工法辞典改訂 V, p.321, 財団法人経済産業調査会, 2001.
- 4) 大内光徳, 中西和生, 兵動正幸: 軟弱地盤におけるサンド

- コンパクションパイル工法の施工上の問題点, 土質工学会セミナー報告会資料, p.1, 1997.
- 5) 土質工学会: 軟弱地盤対策工法 (現場技術者のための土と基礎シリーズ 16), p.119, 1997.
  - 6) 後藤邦泰, 桑山忠: 水中での超音波の減衰特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集 3(B), Vol.55, pp.674-675, 2000.
  - 7) 内崎巖: 超音波振動によるセメント混合物の締め固め, コンクリート工学年次論文報告集, pp.679-682, 1989.
  - 8) 内崎巖: 超音波締め固めにおける砂の粒径の効果, コンクリート工学年次論文報告集, pp.989-992, 1990.
  - 9) 特許公報, 特開 2008-088640: 模型地盤作製装置および方法, 日本国特許庁, 2008.
  - 10) 特許公報, 特開 2004-036248: 地盤改良工法と該工法に使用される装置, 日本国特許庁, 2004.
  - 11) 社団法人日本電子機械工業会編: 超音波工学, p.12, pp.72-77, pp.239-240, コロナ社, 1999.
  - 12) 伊藤健一: 超音波のはなし, pp.41-42, 日刊工業新聞社, 1999.
  - 13) 超音波技術便覧, pp.20-213, 日刊工業新聞社, 1960.
  - 14) 西巻正郎: 電気音響概論, pp.7-16, 森北出版, 2000.
  - 15) 中村信良: 超音波, p.2, コロナ社, 2003.
  - 16) 大賀寿郎, 鎌倉友男, 斉藤繁実, 武田一哉: 音響エレクトロニクス, pp.28-29, 培風館, 2005.
  - 17) 地盤工学会: 地盤調査法, pp.221-226, 1996.
  - 18) 周神根, 岩崎公俊, 谷沢房郎, 鈴木聡, 龍岡文夫: 中型土槽内砂層を用いたコーン貫入特性, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp.147-150, 1988.

(2009. 9. 30 受付)

## FUNDAMENTAL STUDY ON A CONSTRUCTING METHOD OF THE HIGH DENSITY SAND PILE BY IRRADIATION OF THE ULTRASONIC WAVE BY THE PRACTICAL SIZE

Mitsunori OHUCHI, Toshihide MURAKAMI, Masayuki HYODO and Norimasa YOSHIMOTO

The purpose of this study is to investigate the conditions that can be applied the results of the element experiment to the experiment of the practical size. In addition, is to investigate the relation between the water level in the chamber and the density of Toyoura sand irradiated ultrasonic wave. Moreover, Portable Corn Penetration Test was carried out to investigate the relation between the relative density and the strength of Toyoura sand in the chamber. As the result of the experiment, following has been understood. The density of Toyoura sand can be made high density as well as the element experiment. Water level in the chamber does not affect the increase in density of Toyoura sand. There is a good correlation between the relative density and the cone penetration resistance.