

# 超音波を用いた水中浚渫土の減容化に関する研究

徳山工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○高橋 康介  
 徳山工業高等専門学校 正会員 上 俊二  
 徳山工業高等専門学校 正会員 桑島 啓治  
 徳山工業高等専門学校 正会員 福田 靖  
 安原設備工業株式会社 正会員 大内 光徳

## 1. 結論

泊地、航路および水中構造物の建設に伴い海底の土砂を浚渫する工が必要になる。浚渫工事は、水域施設を整備・維持する上で欠かすことのできない公共事業である。しかし近年、多くの浚渫工事によって発生した浚渫土砂の増加に伴い、土砂処理場の受け入れ容量の限界が近づいている。そのため、土砂処理場の容量を確保して港湾整備事業を円滑に進めるためにも、浚渫土砂の効率的な減容化が必要である。この問題の解決策として、超音波振動を用いて土砂を減容化する方法が提案されている。この方法は土砂そのものに直接または間接的に超音波を照射して、減容化を図るものである。

図-1 に超音波による砂の高密度化の概念を示す。超音波を水平方向から照射しながら土粒子を堆積させると、超音波が水を媒体として土粒子に伝わり、土粒子を微小振動させる。飽和した土粒子が振動することで土粒子間の摩擦抵抗力が減少するため、土粒子の再配列が促され密度が増加する。

既往の研究として、大内ら<sup>1)</sup>は 20kHz の超音波振動を豊浦砂（粒径 0.075~2.000mm）の土槽に照射した結果、土槽内の間隙比を小さくすることに成功している。しかし、砂よりも粒径の小さいシルト（粒径 0.005~0.075mm）や粘土（粒径 0.005mm 以下）の土層においては、間隙比を減少させることができなかった。

以上をふまえて本研究では、砂より粒径の小さい試料の土槽に対して水平方向から超音波を照射し、また、超音波の周波数、照射時間および出力電圧を定量的に変化させて、減容化特性を明らかにし、減容化率 30%を目指すことを目標とする。

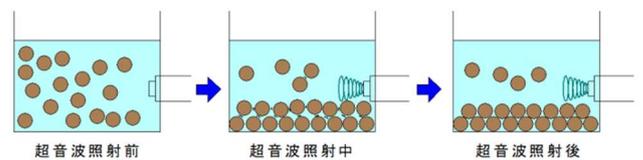


図-1 超音波照射による砂の高密度化概念図

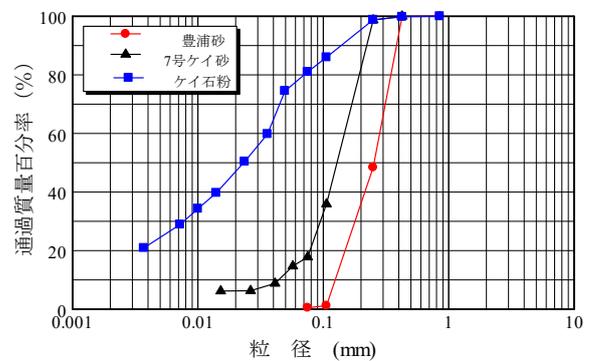


図-2 試料の粒径加積曲線

表-1 試料の物理的性質

試料	豊浦標準砂	7号ケイ砂	ケイ石粉
土粒子の密度	2.637	2.604	5.590
最大間隙比	0.960	1.163	1.502
最小間隙比	0.640	0.655	0.668
30%粒径 D <sub>30</sub>	0.2	0.1	0.006

## 2. 実験の概要

### (1) 試料

本実験では豊浦砂、7号ケイ砂、ケイ石粉を用いた。豊浦砂は山口県の豊浦エリアで産出された粒径 0.1mm~0.3mm の純粋な天然のシリカサンドである。7号ケイ砂は秋吉台近くの平野山鉱山で採掘された石英砂である。ケイ石粉は、高品位の珪石を粉碎技術と空気分級設備で加工した試料である。粒径については豊浦砂が一番大きく、7号ケイ砂、ケイ石粉の順に小さい。図-2 に試料の粒径加積曲線を、表-1 に試料の物理的性質を示す。

キーワード 超音波 水平方向 相対密度 減容化

連絡先 〒745-8585 山口県周南市学園台 徳山工業高等専門学校内 地盤工学研究室 TEL 0834-29-6321

## (2) 実験装置

超音波による水中土層実験の装置を写真-1 に示す。超音波振動子は超音波発信器とオシロスコープに接続されている。超音波振動子のホーン先端の電圧を出力電圧といい、その大きさは超音波発信器のつまみによって調節できる。超音波の波形はオシロスコープに表示される。

写真-2 は、本研究で用いた超音波振動子と容器である。超音波は、圧電セラミックスに電圧をかけて振動子を振動させることで発生させる。容器は、長辺の長さが振動子から発せられる超音波の波長に合わせて設計されているため、右壁にぶつかった波がきれいに反射するよう設計されている。

## (3) 実験方法

表-2 に示す実験条件のもと、以下の手順で実験を行った。

- 1) 容器を組み立て、超音波発信器およびオシロスコープに接続する。
- 2) 容器内に、試料をよく攪拌させた泥水（含水比 150%）を入れる。ここで、試料と水量は 28kHz で 933g : 1400ml, 40kHz で 800g : 1200ml, 60kHz で 666g : 1000ml である。
- 3) 超音波発信器の電源を入れ、出力調整のつまみを回して出力電圧を上げる。
- 4) 30 分間超音波を照射（写真-3）したら、出力調整を 0 に戻して超音波発信器の電源を切る。
- 5) 容器の上澄み試料を定規ですり切り、湿潤質量 (g) を測定する。
- 6) 下部容器内の試料をバットに移し、乾燥炉で乾燥させ、乾燥質量 (g) を量る。
- 7) 5), 6) の値から湿潤密度  $\rho_t$  (g/cm<sup>3</sup>) と乾燥密度  $\rho_d$  (g/cm<sup>3</sup>), 含水比  $w$  (%) および間隙比  $e$  を求め、相対密度  $D_r$  (%) と減容化率  $D_v$  (%) を算出する。

なお、相対密度は式(1)、減容化率は式(2)により算出した。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$D_v = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \times 100(\%) \quad (2)$$

$D_r$  : 相対密度 (%)      $D_v$  : 減容化率 (%)

$e_{max}$  : 最大間隙比      $e_0$  : 超音波未照射時の間隙比

$e_{min}$  : 最小間隙比      $e$  : 超音波照射後の間隙比

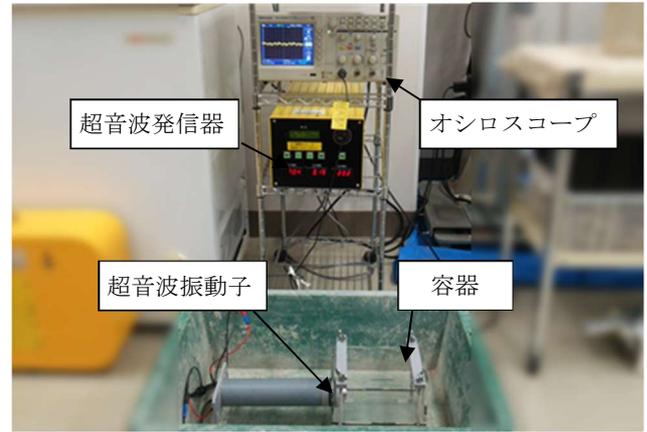


写真-1 実験装置

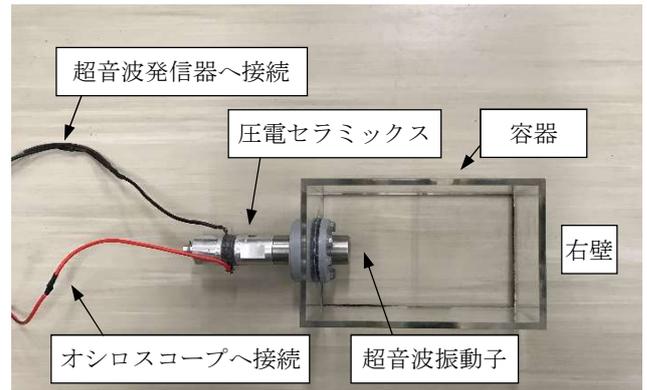


写真-2 超音波振動子と容器

表-2 実験条件

周波数 (kHz)	出力電圧 (V)	投入する泥水の高さ	照射時間	実験回数
0	0	9cm	30分	3回ずつ
28	100			
	200			
	300			
40	100			
	200			
	300			
60	100			
	200			
	300			

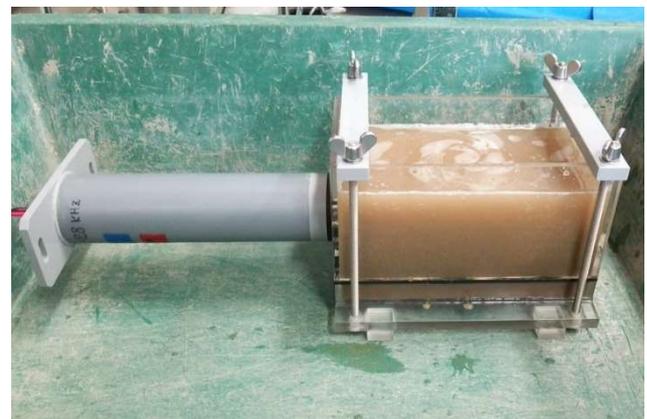


写真-3 実験の様子

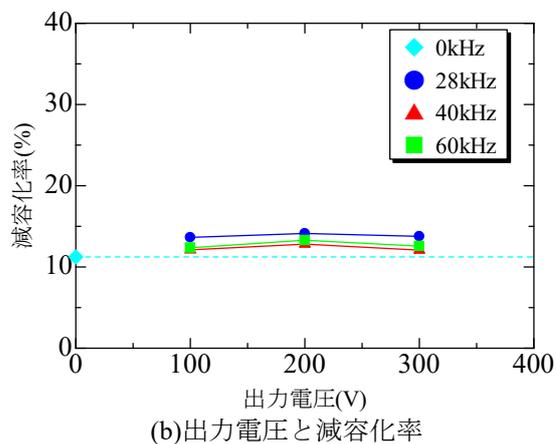
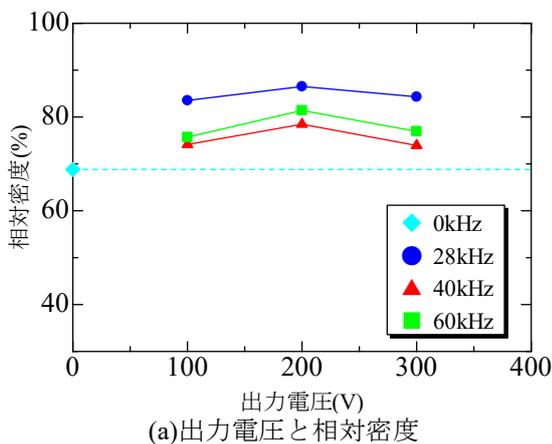


図-3 豊浦標準砂

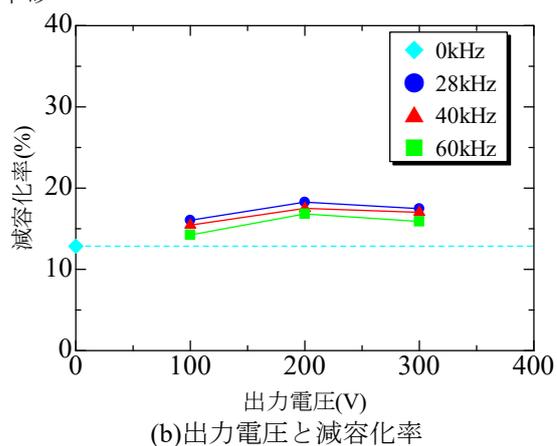
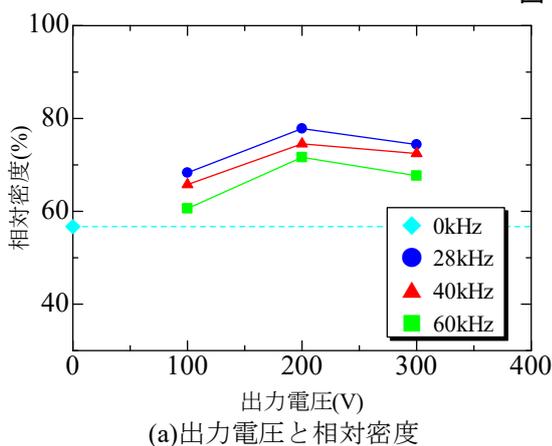


図-4 7号ケイ砂

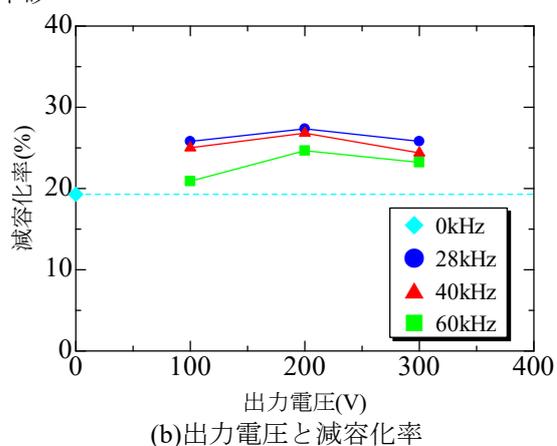
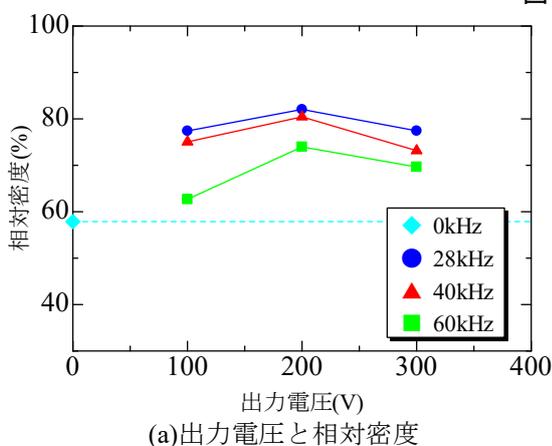


図-5 ケイ石粉

### 3. 実験結果

図-3から図-5は、試料別の実験結果を示しており、(a)は出力電圧と相対密度、(b)は出力電圧と減容化率の関係を示している。グラフは超音波の周波数ごとに色分けされている。

#### (1) 豊浦標準砂

図-3に豊浦標準砂の実験結果を示す。豊浦標準砂の相対密度は、すべての周波数において70%を超えた。このことから、いずれの周波数でも間隙比が減少し、締固めの効果が得られたといえる。

#### (2) 7号ケイ砂

図-4に7号ケイ砂の実験結果を示す。豊浦標準砂と比べ、相対密度は小さくなったが、減容化率が大きくなった。ゆえに、相対密度および減容化率は、試料の粒径に関係していることが明らかである。

#### (3) ケイ石粉

図-5にケイ石粉の実験結果を示す。周波数 28kHz、出力電圧 200V のとき、相対密度および減容化率が最大となった。このときの減容化率は 27.3%であり、3つの試料の中で一番高い値となった。

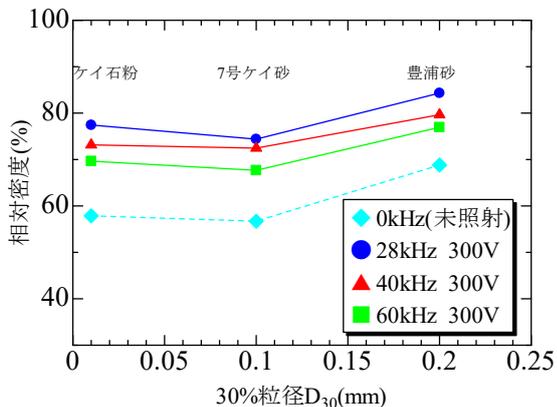


図-6 相対密度と30%粒径の関係(300V)

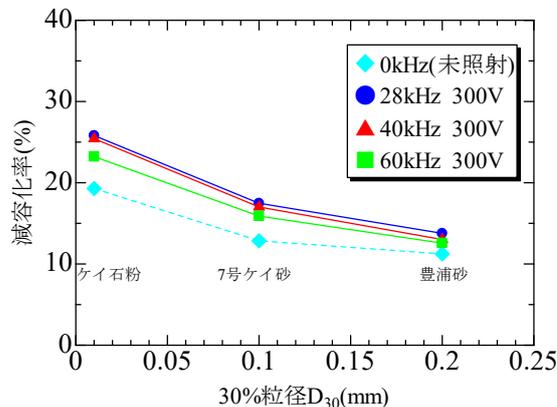


図-7 減容化率と30%粒径の関係(300V)

#### (4) 粒径ごとの比較

図-6と図-7は、出力電圧300Vのときの実験結果を粒径ごとに比較したものである。縦軸にそれぞれ相対密度と減容化率、横軸に30%粒径を示している。横軸の30%粒径は0.006mmの点がケイ石粉、0.1mmの点が7号ケイ砂、0.2mmの点が豊浦標準砂を表している。

全体的な傾向として、相対密度は試料の粒径が大きいほど高くなり、減容化率は小さくなった。このような結果になるわけは、試料の物理的性質と、相対密度および減容化率の算出式をみれば明らかである。豊浦標準砂のように粒径の大きい砂粒子だと、他の試料に比べ超音波照射前の時点において間隙が少ない。つまり、最大間隙比と最小間隙比の差が小さいため、粒子の再配列による密度の増加は可能であるが、減容化はできない。一方、ケイ石粉のように粒子が小さいと、最大間隙比と最小間隙比の差が大きいため、その結果超音波照射による減容化率が上昇する。

次に超音波の周波数に着目する。自然沈下のグラフと比較すると、いずれの周波数においても密度の増加と減容化が図れている。そして周波数28kHz、40kHz、60kHzの順に相対密度および減容化率が高い傾向となった。実験前の段階では、粒径の小さい土粒子に対しては、周波数が小さい超音波のほうが減容化に有効であると予想していた。なぜなら、高周波のほうが水や粒子の対流現象が起きにくく、粒子が飛散するのを抑制できると考えたためである。60kHzの実験結果はこの予想に反していたが、土粒子の分散・凝集効果を目視で確認することは困難であり、確実に振動を与えられていない可能性もあるため、今後の課題としたい。

#### 4. 結言

本研究では、土砂処理場において浚渫土を受け入れられる容量を増やすための効率的な減容化方法を確立するべく、超音波を試料に直接照射する手法で減容化特性および高密度化を検証した。実験によって得られた結果を以下に示す。

- 1) 超音波を水平方向から照射することで、砂より粒径の小さいケイ石粉に対しても、締固めの効果を発揮する。
- 2) 豊浦標準砂などの粒径の大きい砂粒子については、超音波照射前の時点で間隙が少ないため、粒子の再配列による密度の増加は可能であるが、減容化はできない。
- 3) 粒子が小さくなると、間隙が埋まりやすくなり、また、最大間隙比と最小間隙比の差が大きくなるため、その結果超音波照射による減容化率が上昇する。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 大内光徳, 村上俊秀, 兵動正幸, 吉本憲正, “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,” 土木学会論文集 C, Vol.66, No.4, pp.776-787, 2010.
- 3) 寺本崇史, 上俊二, 大内光徳: 超音波による細粒材料の高密度化(減容化)特性に関する研究, 平成26年度土木学会中国支部研究発表会講演概要集III部門, 2014.
- 4) 上俊二, 桑島敬治, 福田靖, 大内光徳: 超音波による細粒土の減容化特性に関する研究, 第50回地盤工学研究発表会講演概要集, 2015.