

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 8 月 20 日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04358

研究課題名(和文)超音波を利用した浚渫土の減容化技術の開発に関する研究

研究課題名(英文) Study on the development of volume reduction techniques of dredged material using ultrasonic

研究代表者

上 俊二 (UE, SHUNJI)

徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・嘱託教授

研究者番号：30124093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：水中に堆積した浚渫土の減容化の実用化に向けた技術開発を目的として、新たに試作した超音波照射装置、実用サイズの試験容器を用いて、水中に堆積した細粒度(珪石粉、珪砂)の減容化特性を明らかにした。

実験は水中に投入した細粒土に対し超音波を水平方向より照射し、周波数は30～40kHz、照射時間は15～30分とし、試験後の湿潤密度、含水比、乾燥密度、間隙比、相対密度、減容化率を算出した。その結果、周波数30kHzで強力な出力電圧となり、照射時間30分程度で相対密度90%、減容化率34%となり、水中堆積浚渫土の減容化技術の実用化に向けて良好な結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波を水中に照射し、水中を伝わる微小振動を細粒材料に充てると個々の細粒材料が水中で微小振動し、水中を沈降、堆積する過程で粒子の粒子間の空隙を埋めるように再配列が進行し密度が増加し、容積の縮減が生じる。今回の研究が新規性を有する理由は材料が従来の大きさではなく細粒材料の大きさに対応する超音波周波数と音の大きさの関係を特定し、水中で超音波によって細粒材料の減容化率30%以上を可能にした方法と装置である点にある。加えて、それを可能にした振動子固定フリーに近い超音波振動子の開発があったことで実現できたもので、従来にない水中における細粒材料の減容化(高密度化)の方法と装置として新しい新規性を有する。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of developing technology for practical application of volume reduction of dredging degree deposited in water, using a newly prototyped ultrasonic irradiation device and practical size test container, fine particle size (silica stone powder, Clarified the volume reduction characteristics of silica sand). In the experiment, ultrasonic waves were radiated from the horizontal direction to the fine-grained soil put into water, the frequency was 30 to 40kHz, the irradiation time was 15 to 30minutes, and the wetdensity, water content ratio, dry density, gap ratio after the test, The relative density and volume reduction rate were calculated. As a result, the output voltage became maximum at a frequency of 30kHz and an irradiation time of about 30 minutes, the relative density was 90%, and the volume reduction rate was 34%, which was a good result for the practical application of the volume reduction technology for underwater sediment dredged soil.

研究分野：地盤工学

キーワード：超音波 浚渫土 減容化

1. 研究開始当初の背景

浚渫工事によって海底から掘り出された浚渫土砂は、周辺地域における埋め立て事業などへ有効活用されてきた。しかし現在は、多くの土砂処分場において浚渫土砂の受入れ容量に限界が近づいていることが問題となっており、これに代わる土砂処分場を確保すること、高含水状態にある浚渫土を減容化することにより土砂処分場の容量を確保することが緊急の課題となっている。超音波は様々な分野で応用されているが、建設事業の分野での利用は殆どないように思える。本研究で提案する超音波によるシルトなどの細粒材料の減容化技術(図-1)が実用化されるようになると、従来の工法にくらべ、エネルギー消費が少ないため建設コストの低減につながるものと考えられる。このように、クリーンでエコな新しい粒状材料の締固め工法として建設事業の機械化の推進や建設機械及び建設機械施工に貢献できるものと考えられる。

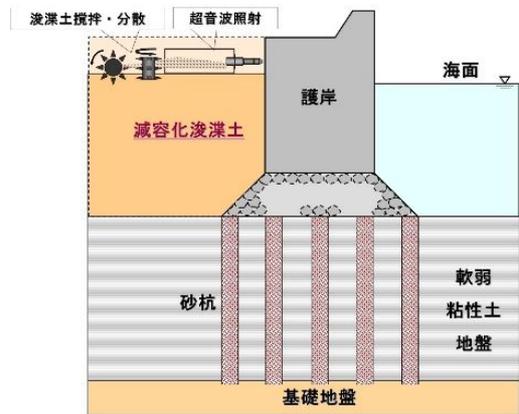


図-1 超音波による浚渫土減容化概念図

2. 研究の目的

本研究の目的は図-1に示す浚渫土の土砂処分場において、粒状材料の密度を増加させることができる超音波高密度化技術を応用して、粒径 2mm~5μm の砂~シルトに分類される水中に堆積した浚渫土の減容化を可能にする実用化技術を開発することである。また、図-2に示すように全体の約30%の減容化を目指すことにより、圧密期間を短縮し、圧密促進工事量の削減で工事費を削減することを目標としている。

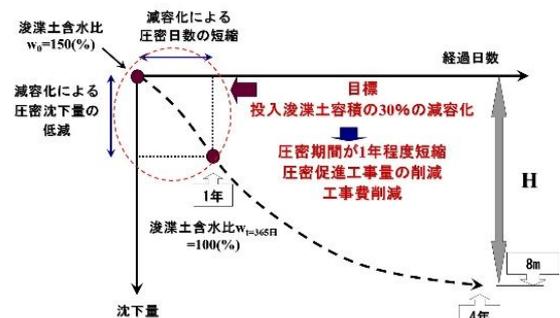


図-2 超音波による減容化工法の実施効果

3. 研究の方法

(1) 試料 本研究では細粒土に分類される浚渫土を対象とするため、市販されている珪石粉(土質分類:細粒土,土粒子密度 $s_s: 2.59(g/cm^3)$, 最大間隙比 $e_{max}: 1.67$, 最小間隙比 $e_{min}: 0.63$)を用いた。

(2) 試験装置

本研究では図-3に示すように超音波振動子(写真-1)、超音波発信機、オシロスコープ、円柱型のアクリル容器(直径29cm,高さ33cm)より成る実験装置を用いた。超音波振動子は超音波発信機とオシロスコープに接続されており、超音波振動子から出る出力電圧と超音波の波形がオシロスコープに表示される。一般的に超音波高出力回路ではLCR回路(L=インダクタンス(μH), C=振動子(キャパシタンスμF), R=抵抗(Ω))が使用されているケースが多く、本研究で用いた超音波発信機にもこのLCR回路が使用されている。振動子の出力電圧については、超音波発信機の中に組み込まれているマッチングコイルによって、振動子の最適な振動振幅を実現する周波数が超音波発信機より出力される。

(3) 試験方法

容器の中に水と試料を注ぎ入れてかき混ぜ一定時間放置し試料と水を馴染ませる。このとき、振動子が水の中にすべて浸かるようにして、試料と振動子の照射距離が3cm以内になるように設置する。超音波発信機とオシロスコープに電源を入れ、タイマーで所定の照射時間に設定し、超音波を照射する。実験条件は、周波数は30kHz~40kHz、照射時間は15~30分とし、未照射(24時間放置)の場合と比較した。試験終了後に容器の上澄み水を抜き、試料の湿潤質量、試料の高さ、含水比を測り、湿潤密度、乾燥密度を求めた。山中式土壌硬度計を用い、試料の表面の土壌硬度を測定した。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 $D_r(\%)$ は式(1)、減容化率 $D_v(\%)$ は式(2)により算出した。

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

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

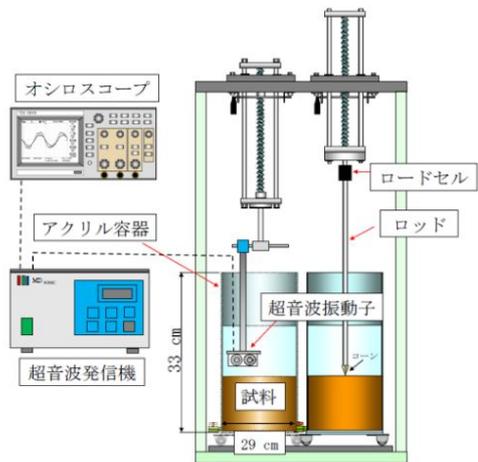


図-3 実験装置



写真-1 超音波振動子(振動子2個)

ここで、 e_{max} ：最大間隙比， e_{min} ：最小間隙比， e_0 ：超音波未照射時の間隙比， e ：超音波照射後の間隙比である．減容化率 $D_v(\%)$ を算出する際には，超音波を照射していないということは最も間隙が大きい時であると考え， e_{max} (最大間隙比)の値を用いることに注意して算出する．

4. 研究成果

(1) 図-4 に本研究で用いた超音波発振機の周波数と出力電圧の関係を示す．各周波数で実験した結果，30kHz が最も湿潤密度と相対密度と減容化率が大きくなり，周波数が大きくなるにつれて，これらが小さくなっていくという結果となった．これは，周波数が30kHz から40kHz へ大きくなっていくにつれて，出力電圧が小さくなっていったため，キャピテーションが小さくなっているものと考えられる．

(2) 実験により得られた試験結果を表-1 に示す．さらに湿潤密度についてのデータをグラフにしたものを，図-5 に示す．湿潤密度は，15分照射した時の値が35kHz より38kHzの方が良く，30kHz と38kHzの時だけ15分から20分に変化した時に湿潤密度が低くなっている．考えられる原因として，密度を計算する時の高さを，4か所の高さの平均高さで計算しているため表面が平らになっていないことによる誤差が出たのではないかと考えられる．30分照射した時の値は周波数が小さいほど湿潤密度が高くなっていることがわかる．これは40kHzより30kHzの方が出力電圧が大きいことから，強いキャピテーションが発生しているものと考えられる．

(3) 相対密度と照射時間の関係を図-6，減容化率と照射時間の関係を図-7 に示す．35kHz で15分照射した時の値が，出力電圧が今回の実験条件では2番目に大きいはずなのに，他の周波数と比べて相対密度と減容化率のどちらも最も低くなっていることがわかる．さらに，20分照射した時の30kHz と38kHzのデータが，湿潤密度と同様に15分の時に比べて小さくなっていることがわかる．30分照射した結果は，30kHzの値が相対密度と減容化率のどちらも最も大きいことがわかる．しかし，38kHzの方が40kHzよりも出力電圧が大きい，40kHzの方が相対密度と減容化率共に値が大きくなっている．これらの原因として，上澄み水を抜き取る際，試料の表面が細粒分により水分を多く含んで緩くなっており，水の抜き具合に差があったと考えられる．乾燥密度を測定する時は試料の表面近くのものを乾燥炉に入れて調べていたので，それにより値に影響が出たのも原因と考えられる．また，試料を攪拌させて24時間未照射の時の湿潤密度と相対密度と減容化率の値は，どの周波数の超音波を照射した時の値よりも小さいことから，30~40kHzの超音波を15分照射すれば，超音波未照射で24時間置いた時の浚土の減容化率の値を上回ることが可能であると言える．写真-2は超音波未照射で24時間置いたものから上澄み水を抜いたもので，写真-3は超音波30kHzで30分照射したものから上澄み水を抜いたものである．写真を比較すると，未照射の時は間隙の中に水を多く含んでおり，底面から試料高さ12cmあったのが，超音波を照射することで8.5cm程度まで下がっており，超音波を照射することで，試料が減容化(高

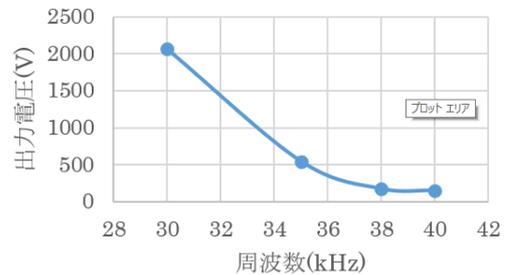


図-4 周波数と出力電圧の関係

表-1 実験結果

周波数 (kHz)	照射時間 (min)	含水比 w(%)	湿潤密度 γ (g/cm ³)	乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	間隙比 e	相対密度 $D_r(\%)$	減容化率 $D_v(\%)$
30	15	33.09	1.85	1.39	0.86	77.6	30.3
	20	36.03	1.85	1.36	0.90	73.7	28.7
	30	27.89	1.88	1.47	0.76	87.3	34.0
35	15	34.85	1.78	1.32	0.96	68.1	26.5
	20	31.43	1.84	1.40	0.85	79.3	30.9
	30	32.14	1.85	1.40	0.84	79.4	31.0
38	15	31.16	1.81	1.38	0.87	76.8	30.0
	20	33.58	1.79	1.34	0.94	70.2	27.3
	30	34.07	1.81	1.35	0.91	72.8	28.4
40	15	31.85	1.78	1.35	0.91	72.9	28.4
	20	28.06	1.78	1.39	0.86	77.6	30.3
	30	30.43	1.80	1.38	0.88	76.3	29.7
未照射	24h	34.62	1.74	1.30	0.99	65.2	25.4

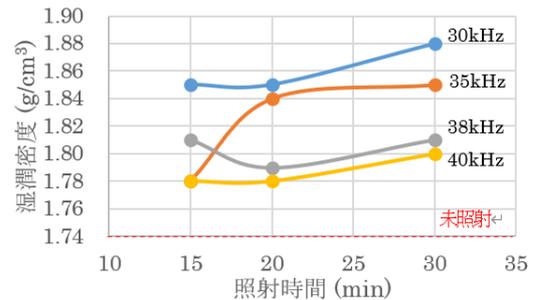


図-5 湿潤密度と照射時間の関係

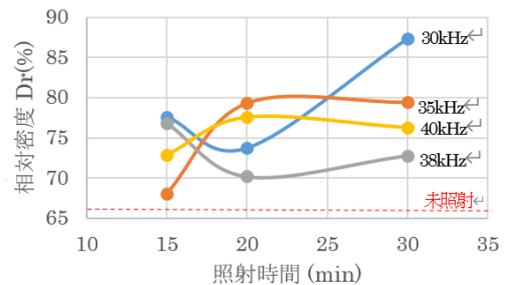


図-6 相対密度と照射時間の関係

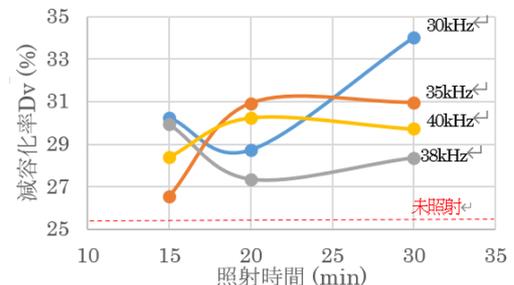


図-7 減容化率と照射時間の関係

密度化)していることがわかる。図-8の含水比と照射時間の関係、図-9の間隙比と照射時間の関係からも、30kHzで30分照射した時の値が最も低くなっており、超音波照射によって最も減容化(高密度化)しているのがわかる。図-10の乾燥密度と照射時間の関係からも30kHzで30分照射した場合の乾燥密度が最大となり、含水比が最小であることがわかる。

(4) 土砂処分場における浚渫土砂の受け入れ容量を増やすための効率的な減容化(高密度化)の実用化技術を確立すべく、超音波を水中で試料に間接的に照射する手法で細粒土の減容化(高密度化)特性を実験により検証した。得られた知見を纏めると以下のとおりである。

- 1)珪石粉などの粒径 0.02mm 以下のシルトや粘土を減容化させるのに最適な周波数は、本実験結果では 30kHz であるといえる。
- 2)細粒土に関して、減容化率を高めるためにはキャピテーションを活発にする必要があり、周波数が高くなるとキャピテーションが起きにくくなるため、高周波になるほど出力電圧も高くしなければ減容化率を高くすることができない。
- 3)超音波振動子の個数を増やして実用化する際は、鉛直方向はキャピテーションによって細粒分が攪拌して削られてしまうので、水平方向へ照射する振動子を増やすべきである。

(5) 本研究の今後の課題を挙げると以下のとおりである。

- 1)振動子の通電部を接続する材料は、超音波の振動を減衰させないシリコンのような絶縁体で金具を固定することで、実用化へ近づけることができる。
- 2)本研究で使用したアクリル容器は樹脂製であり、出力電圧やキャピテーションを減衰させている可能性があるため、実用化に向けてキャピテーションの反射が無い海洋と同条件に近づけるために、プールのようなフィールドで実験をすることが必要である。
- 3)本研究で使用した超音波照射装置は、洗浄機などで用いられるものなので、実用化に向けて、今回使用した超音波照射装置よりもコンパクトな回路で、他では使えない減容化に特化した照射装置を開発していくことが必要である。

<引用文献>

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.65, No.4, pp.776-787, 2010.

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.

Takahashi, K., Ue, S., Kuwajima, K., Fukuda, Y., Ohuchi, M.: An efficient volume reduction approach for water dredged soil by ultrasonic wave, The Fourth Australia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference, GEF-09, 2018.

原田大地, 上俊二, 桑嶋啓治, 福田靖: 超音波による浚渫土の減容化に向けた開発, 令和元年度徳山工業高等専門学校土木建築工学科 卒業研究論文集, 2019.



写真-2 未照射

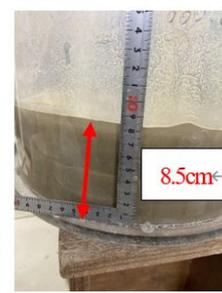


写真-3 30kHz照射

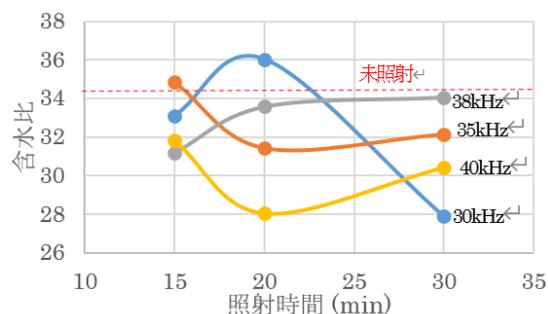


図-8 含水比と照射時間の関係

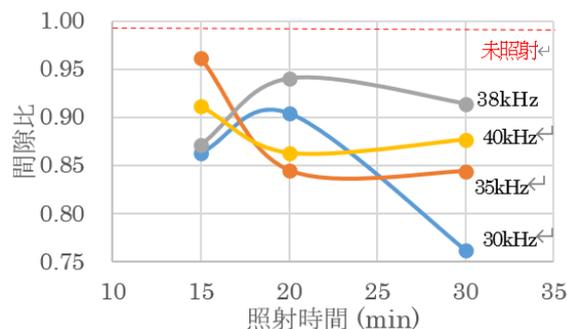


図-9 間隙比と照射時間の関係

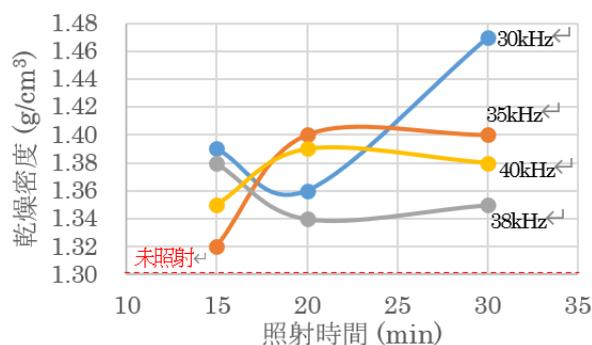


図-10 乾燥密度と照射時間の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 高橋康介, 上俊二, 桑嶋啓治, 福田靖, 大内光徳	4. 巻 第 部門
2. 論文標題 超音波を用いた水中浚渫土の減容化に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 平成30年度土木学会中国支部研究発表会発表会講演概要集	6. 最初と最後の頁 345-348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi, K., Ue, S., Kuwajima, K., Fukuda, Y., Ohuchi, M.	4. 巻 GEF-09
2. 論文標題 An efficient volume reduction approach for water dredged soil by ultrasonic wave	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of The Fourth Australia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高橋康介
2. 発表標題 超音波を用いた水中浚渫土の減容化に関する研究
3. 学会等名 平成30年度土木学会中国支部研究発表会発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahashi, K.
2. 発表標題 An efficient volume reduction approach for water dredged soil by ultrasonic wave
3. 学会等名 The Fourth Australia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大内 光徳 (Oouchi Mitsunori)		
研究協力者	佐野 徹 (Sano Toru)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------