

超音波による砂杭の  
高密度機構に関する研究  
Density growth mechanism of sand pile  
by irradiation of ultrasonic wave

平成 22 年 5 月

大 内 光 徳

山口大学大学院理工学研究科



# 目次

第1章 序論	1
1-1 概説	1
1-2 既往の研究	2
1-2-1 砂杭の造成法に関する既往の研究	2
1-2-2 超音波を利用した粒状材料の締固めに関する既往の研究	5
1-3 本研究の目的および本論文の構成	6
1-3-1 研究の目的	6
1-3-2 本論文の構成	7
参考文献	10
第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念	11
2-1 概説	11
2-2 音の強さ	14
2-2-1 音の強さ測定	14
2-2-2 実験方法および条件	19
2-2-3 実験手順	22
2-2-4 計測データおよび整理方法	23
2-3 直流成分	27
2-3-1 直流成分測定	27
2-3-2 実験方法および条件	29
2-3-3 実験手順	30
2-3-4 計測データおよび整理方法	31
2-4 キャピテーション	31
2-4-1 キャピテーション測定	31
2-4-2 実験方法および条件	33
2-4-3 実験手順	34
2-4-4 計測データおよび整理方法	35
2-5 実験結果および考察	36
2-5-1 音の強さ	36

2-5-2	直流成分	43
2-5-3	キャビテーション	46
2-6	砂の高密度化概念	51
2-7	本章の要約	53
	参考文献	55
第3章 超音波による砂の高密度化方法		57
3-1	概説	57
3-2	開発した超音波供試体作製装置	57
3-2-1	装置の概要	57
3-2-2	主要部位の仕様	59
3-3	供試体作製条件の違いが相対密度に及ぼす影響	60
3-3-1	供試体作製方法および条件	60
3-3-2	供試体作製手順	63
3-3-3	実験結果および考察	64
3-4	作製された供試体のせん断特性	72
3-4-1	供試体作製方法および条件	72
3-4-2	実験結果および考察	77
3-5	本章の要約	80
	参考文献	81
第4章 様々の砂質土の超音波による高密度化		82
4-1	概説	82
4-2	超音波供試体作製装置	82
4-2-1	装置の概要	82
4-2-2	主要部位の仕様	83
4-3	用いた試料	83
4-4	砂質土の高密度化	86
4-4-1	実験方法および条件	86
4-4-2	実験手順	86
4-4-3	実験結果および考察	86

4-5	強度特性	89
4-5-1	実験方法および条件	89
4-5-2	実験手順	90
4-5-3	実験結果および考察	91
4-6	本章の要約	101
	参考文献	102
第5章 実用サイズによる砂の超音波高密度化方法		103
5-1	概説	103
5-2	室内超音波土槽実験装置	105
5-2-1	装置の概要	105
5-2-2	主要部位の仕様	105
5-3	土槽試料の高密度化	107
5-3-1	供試体作製方法および条件	107
5-3-2	供試体作製手順	111
5-3-3	実験結果および考察	112
5-4	コーン貫入抵抗	120
5-4-1	実験手順	120
5-4-2	実験結果および考察	121
5-5	本章の要約	124
	参考文献	126
第6章 結論		127

## 第1章 序論

### 1—1 概説

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>1)</sup>として、サンドコンパクションパイル（SCP）工法，振動締固め工法が，また，地中で発破をかけ発破の衝撃力を利用する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>2)</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・拡径のためにバイブロハンマーを用いるために，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>3)</sup>。また図 1-1 に示すような，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で 1 年間に消費される電力量を上回り，大量に電力を消費するなどの問題を抱えている。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。

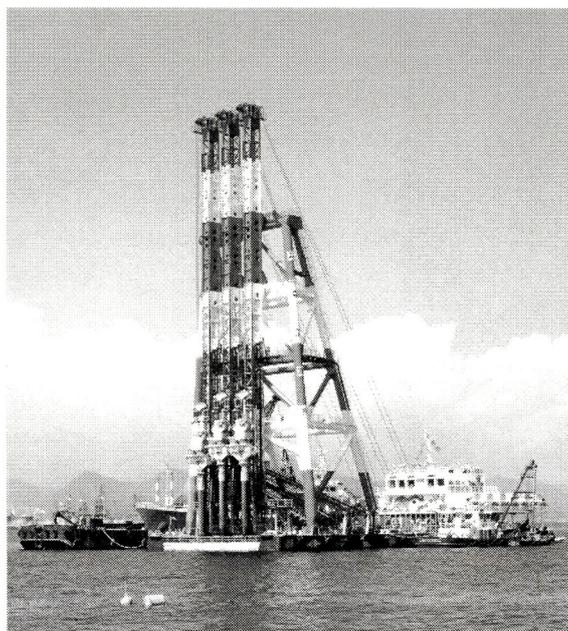


図 1-1 3 連装海上 SCP 施工船

## 1—2 既往の研究

### 1—2—1 砂杭の造成法に関する既往の研究

サンドコンパクションパイル工法はわが国において 1955 年（昭和 30 年）に開発され、翌年実用化された軟弱地盤改良工法<sup>4)</sup>である。

海外において、*Soil Mechanics in Engineering Practice*<sup>5)</sup>に Fitz らによるサンドコンパクションパイル工法の開発、実用化に繋がる興味深い事例報告があることを榎<sup>6)</sup>が紹介している。その事例は「矢板締め切り囲いの中に詰められた沼沢土の盛土を締固めるために直径 12 インチの鋼管を盛土中に打ち込み、鋼管の下端は緩く取り付けられた鋼製円盤で閉ざすが、管を引く抜く時に地中に残る。管を沼沢土の底面まで打ち込んでから砂利と砂の混合物で満たし気密のキャップをかぶせる。そこで 20～30lb/in<sup>2</sup> の圧力のもとで空気を送りながら管を除去する。砂利が管から孔の中に落ち込んでいる間中この空気圧で軟らかい土をもとの場所に支えてそれが砂利の中にめり込むのを防ぐ」というものである。内容は、装置の種類や規模、鋼管を打ち込み、引き抜く方法など多くの不明な点はあるが、軟弱な地盤中に砂利と砂の混合物を排出させる過程で鋼管を引き抜いた後、できる空間に砂利と砂の混合物が落ち込む間、空気圧によって軟らかい地盤を元の場所に支えておく方法はサンドコンパクションパイル工法の施工における核心部分である。

わが国において、1956 年（昭和 31 年）圧密砂杭工法の公開実験が実施されている<sup>4)</sup>。この公開実験において、当時の京都大学村山朔郎博士によって圧密砂杭工法が「サンドコンパクションパイル (SCP) 工法」と命名されたようである。また村山博士によって、鋼管の打設と引き抜きにバイブロハンマーを利用する提案があり、サンドコンパクションパイル工法の原型ができています。

1956 年（昭和 31 年）に実用化されたサンドコンパクションパイル工法は、その後 10 年程度は官民の協力による研究開発、パイロット事業による検証施工、実施工を重ねることで施工技術の検証と蓄積が行われた時期となる<sup>2)</sup>。1973 年（昭和 48 年）東京湾中央防波堤内側埋立処分場の埋め立て時期を挟んだ、おおよそ前後 10 年の期間が、サンドコンパクションパイル工法の砂杭造成理論の確立と造成理論に基づいた施工方法、品質管理方法が確立された時期と思われる。

この間 1964 年（昭和 39 年）新潟県地震において地盤の液状化現象による構造物

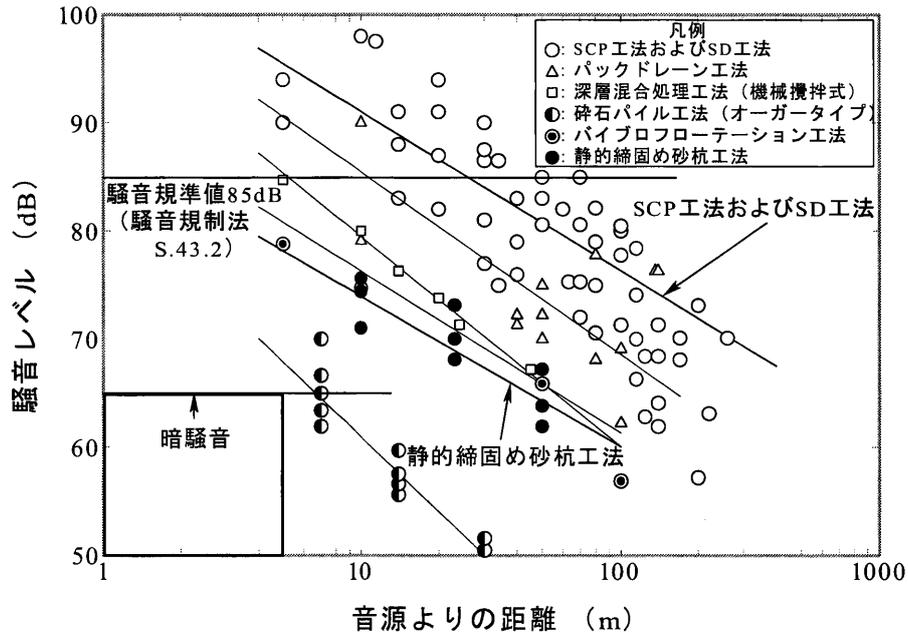
## 第1章 序論

の変状，破壊を経験することで，軟弱地盤としてルーズな砂地盤が認識され<sup>7)</sup>，これまでの軟弱粘性土地盤を対象にした研究に軟弱砂地盤が加わり，サンドコンパクションパイル工法に液状化対策工法としての課題が加わることになった。

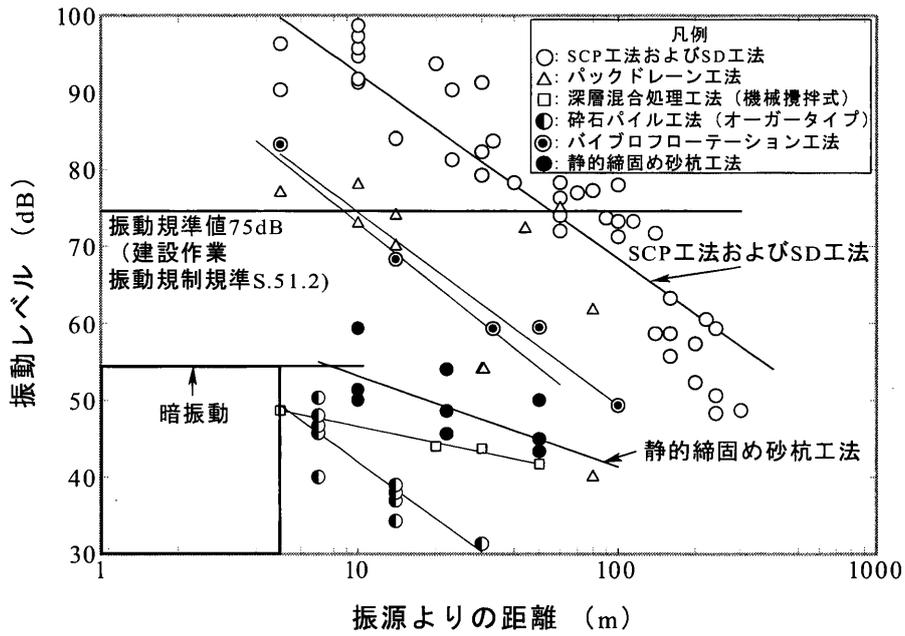
サンドコンパクションパイル工法の実用化から 26 年を経た 1982 年（昭和 57 年），榎<sup>6)</sup>によって，これまで主に経験に頼っていた砂杭の造成方法が理論の枠組みによって体系化された。砂杭の造成理論は次の 4 つの重要な考え方によって構成されている。ケーシングパイプを軟弱粘性土地盤中に貫入する過程で，ケーシングパイプ内に軟弱粘性土地盤土の侵入を防止する考え方を示した先端閉塞効果の利用方法。ケーシングパイプ先端から地盤中にケーシングパイプ内の砂を，周辺土圧に抵抗して効率良く適正に排出する考え方を示したウエット施工方法とドライ施工方法。軟弱地盤中にケーシングパイプ先端から排出された砂の締固めと拡径を行う方法についての考え方を示した砂杭の拡径の方法。この 4 つの重要な理論の確立によって，砂杭造成の大深度化と大深度施工における砂杭の品質確保が可能になったと言える。

1988 年（昭和 63 年），市街地や既設構造物に近接する陸上工事における騒音，振動および周辺地盤の変位抑制を目的に高周波型の小口径サンドコンパクションパイル工法<sup>8)</sup>が実用化された。この工法は騒音，振動および変位の距離に対する減衰を大きくするためサンドコンパクションパイル工法で使用している 10Hz 程度のバイブロハンマーを 20Hz 程度の高周波バイブロハンマーに変更し，かつ貫入力の下下に対してケーシングパイプを小口径にして対処したもので，バイブロハンマーの振動を粒状材料の締固めに利用している点で従来のサンドコンパクションパイル工法の改良型と捉えられる。1995 年（平成 7 年），粒状材料が有するダイレイタンス特性を締固め原理とする，静的な力によって締まった粒状材料の杭を低騒音，低振動で造成できる優れた軟弱地盤改良工法の 1 つとして静的締固め砂杭工法<sup>4)</sup>が実用化されている。図 1-2 は代表的な陸上における地盤改良工法の騒音，振動レベル（dB）<sup>9)</sup>を示している。静的締固め砂杭工法はサンドコンパクションパイル工法に比べて騒音，振動が大幅に低減された工法であることがわかる。静的締固め砂杭工法の実用化は，振動締固め方法による砂杭の造成方法では騒音，振動の問題が根本的に解決できないという砂杭の造成方法に対する 1 つの考え方を反映させた結果ともとれる。

第1章 序論



(a) 騒音レベル



(b) 振動レベル

図 1-2 代表的な地盤改良工法の騒音, 振動レベル (dB)

### 1—2—2 超音波を利用した粒状材料の締固めに関する既往の研究

建設工事に伴う周辺住民からの騒音，振動に対する苦情は減少していないのが実情である<sup>10)</sup>．一般に人間が音や振動をうるさい，あるいは不快と感じることなく話し生活できる騒音，振動の大きさは，騒音レベルで 65dB 以下，振動レベルで 55dB 以下のいわゆる暗騒音，暗振動といわれる大きさである．法律で騒音，振動を規制するために基準値として設けられている騒音，振動レベルと，人間が感覚的に感じる騒音，振動レベルとの間にある差が周辺住民からの苦情が減少していない要因であると考えられる．したがって，建設工事に際して発生する騒音，振動問題を根本的に解決するには，暗騒音，暗振動レベルで施工ができる新しい地盤改良工法の実用化が必要とされている．

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，室内土槽による基礎実験が行われている．この方法を現場施工に活用することができれば騒音，振動を伴わない従来にない新しい施工法になることが考えられる．後藤・桑山<sup>11)</sup>は幅 0.35m，深さ 0.40m，長さ 1.90m の室内実験土槽内に緩く堆積させ飽和させた豊浦砂に，長さ 1.90m の実験土槽の端に砂方向に向けて水平に振動数 19kHz の超音波振動子を取り付け，超音波を照射して土槽内の砂の表面沈下現象を調べた．また内崎<sup>12),13)</sup>は超音波振動体に接触する砂の挙動を調べることを目的として，平均粒径 0.16～3.2mm の砂～小礫を 19.5kHz の超音波振動子に当て，砂の跳躍試験を行っている．さらに実際に含水比の低い固練りのモルタルに 28.5kHz の超音波振動体を直接押し当て，モルタルの挙動と締固めたモルタルの密実性を調べている．しかし，これらの研究では，超音波振動体を対象とする材料に接して振動を伝えることを基本にしているため，パワーの小さい超音波振動では，実際の現場を対象とするような広範囲，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．

1975 年（昭和 50 年），著者らと同様に超音波を間接的に粒状材料に照射すると密度が増加することを，直径 10mm，高さ 100mm 程度のメスシリンダーを利用した実験で確認し，軟弱地盤改良工法に応用できる可能性を示した特許出願<sup>14)</sup>がされている．ただし，出願したのみで特許にすることもなく，また研究が進めれた様子も確認できない．

### 1—3 本研究の目的および本論文の構成

#### 1—3—1 研究の目的

図 1-3 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の対比図を示す。図 1-3(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ことで砂杭を造成する工法である。一方、図 1-3(b)に示すように、高密度砂杭工法はケーシングパイプ内と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が造成できると考えられる。上記の方法が実用化できれば、施工時に発生する騒音，振動を暗騒音，暗振動レベルに低減し，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大幅に低減でき，同時に細粒材料，リサイクル材料などを利用して軟弱地盤中に高密度な粒状材料の杭を効率よく造成する地盤改良工法<sup>15)</sup>になると考えられる。

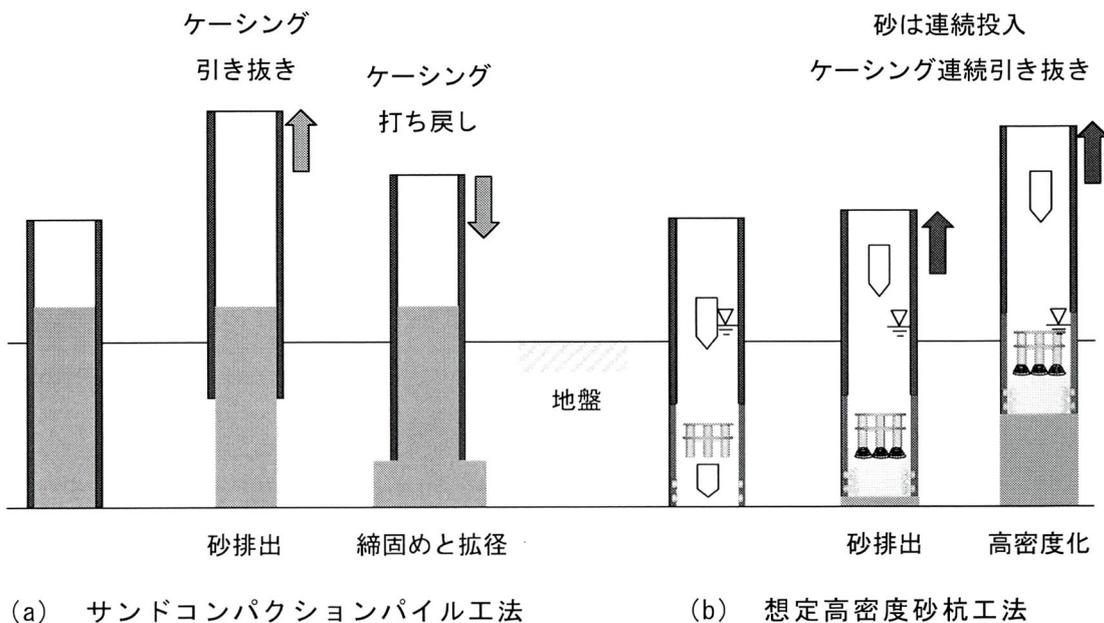


図 1-3 サンドコンパクションパイル工法と想定高密度砂杭工法の対比

## 第1章 序論

本研究の目的は砂杭の造成工法の実用化を想定して、超音波を照射することで砂が高密度になる機構を室内要素実験および実用サイズの土槽によって明らかにすることである。

### 1—3—2 本論文の構成

本論文は6章で構成される。本論文の構成を図1-4に示す。

各章の要点を以下に述べる。

#### 1章 序論

1章では、研究の背景、サンドコンパクションパイル工法の国内、海外における開発経緯と砂杭造成理論に関する既往の研究について時系列で解説した。次に、超音波による砂や粒状材料の締固めに関する既往の研究を紹介した後、それら研究の問題点を明確にして本研究に至った経緯と研究の目的を述べている。

#### 2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

第2章では、超音波を水中に照射すると粗密波による振動力が伝わり、直流成分、キャビテーションによる力が誘起されることを実験により検証した。そして、これら超音波により誘起される力が砂の高密度化に関わるという仮定のもと、超音波による粒状材料の高密度化概念を提示した。

#### 3章 超音波による砂の高密度化法

3章では、超音波による砂の高密度化概念に基づいて、超音波による砂の高密度化を要素試験レベルで行うために開発した超音波供試体作製装置について詳細な説明を行った。そして、開発した装置を使って供試体作製条件の違いが相対密度に及ぼす影響および作製された供試体のせん断特性について述べている。

#### 4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

4章では、実用化の観点から、粒子形状と粒度分布が異なる試料に対する超音波の効果を超音波によって高密度化した供試体と水中落下打撃法により作製した供試体の密度増加と強度特性を比較して検証した結果を述べている。

## 第1章 序論

### 5章 実用サイズによる砂の超音波高密度化方法

5章では、実際の施工への適用を想定して、3章において得られた要素試験レベルの結果が、実用サイズにおいても要素試験と同様に超音波によって砂が高密度化できること示した。そして、超音波によって実用サイズの土槽内に高密度化した砂の強度指標を得るため相対密度とコーン貫入抵抗の関係について述べている。

### 6章 結論

6章では各章で得られた知見をまとめて記述した。超音波高密度法を砂杭の施工法に適用した場合、想定できる高密度砂杭工法の概要を提示した。

## 第1章 序論

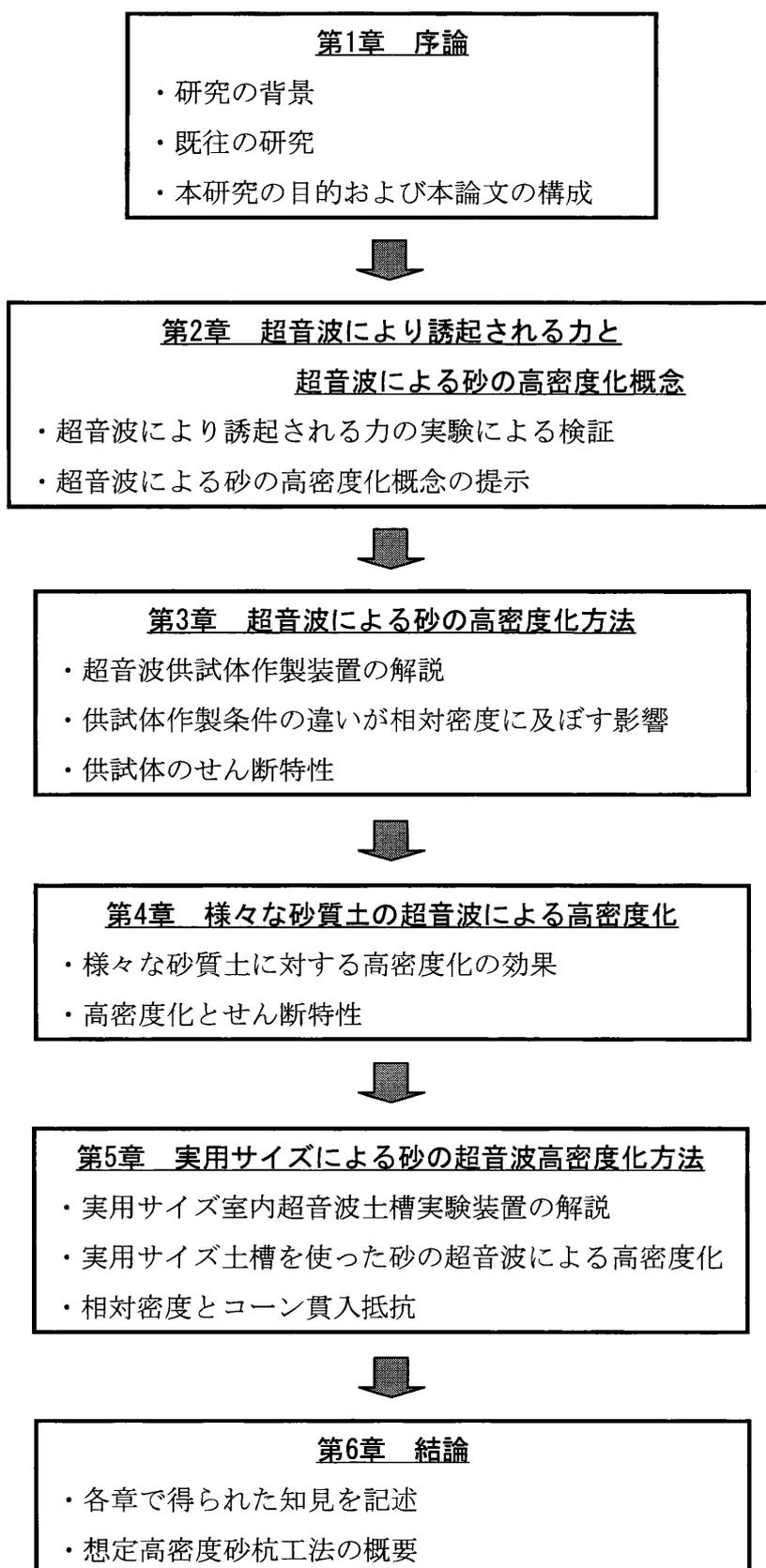


図 1-4 論文の構成

参考文献

- 1) 土木工法辞典改訂 V：財団法人 経済産業調査会，P.321， 2001.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 坪井英夫，東祥二，野津光夫：締め固め砂杭（サンドコンパクションパイル）工法の変遷，土と基礎 Vol.54 No.7，PP.7-9， 2006.
- 5) KARL TERZAGHI and RALPH B. PECK：Soil Mechanics in Engineering Practice, JOHN WILEY and SONS, Inc., PP.379-381, 1948.
- 6) 榎明潔：軟弱地盤における砂杭の造成機構に関する研究，京都大学博士論文，P.3， 1982.
- 7) 安田進：地盤の動的問題と対策，土と基礎 Vol.47 No.11,P.46,1999.
- 8) 河本憲二，高橋嘉樹，奥田眞也，山下裕司，多賀久勝：高周波小径サンドコンパクションパイル工法の施工結果，第 27 回土質工学研究発表会，pp.2153-2156， 1992.
- 9) 安藤裕，荻島達也：地盤改良工法における騒音・振動対策，特集 最近の地盤改良工法-環境・省資源への対応技術,基礎工，pp.8-9， 1999.
- 10) 環境省：平成 20 年版環境・循環型社会白書，pp.142-143， 2008.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 特許公報，特開昭 51-99812：軟弱地盤の締め固め工法，日本国特許庁， 1975.
- 15) 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.

## 第2章 超音波により誘起される力と 超音波による砂の高密度化概念

### 2—1 概説

一般に超音波とは振動数が20kHz以上で人の耳で聞き取ることが困難な音と定義されている。音響工学あるいは超音波工学分野では超音波モーター、超音波浮揚、超音波洗浄機など、物体を動かす力として超音波を利用する研究や実用化が精力的に行われており、産業分野のみならず、われわれが手にする身近な日常品にもその技術が利用されている。たとえば、弾性体の表面を一方向に伝わる超音波による振動を利用した超音波モーターはカメラの自動焦点機構の動力として利用され、磁石を使ったモーターと異なり、強力な上に磁界の影響を受けない優れた利点を有している。超音波浮揚は音のエネルギーに誘起される直進的な力を利用し、シリコンウエハーの搬送装置などに、そして超音波洗浄装置は強力超音波によって発生するキャビテーション効果を利用して汚れを除去する装置として利用されている<sup>1), 2)</sup>。

気体や液体中に照射された超音波によって形成される音場内に1つの微小要素を考えた場合、そこに働く力は体積力と面積力がある。前者は直進流、あるいは音響流(acoustic streaming)、後者は音響放射圧(acoustic radiation pressure)と定義され、両者を合わせて直流成分と定義されている。直進流(音響流)は流体中に照射される音波のエネルギーの一部が体積力として駆動力に変換されることで誘起され、音響放射圧は超音波のエネルギーの一部が物体に表面力として作用するにより誘起される。また、音場内で直進的な気体や液体の流れが誘起されない場合にも音響放射圧は観測され、音場内に置かれた物体を動かす力として作用する<sup>3), 4), 5)</sup>。

図2-1aは超音波のエネルギーによって誘起される直進流の存在を撮影した写真を、図2-1bは超音波のエネルギーによって生成された気泡の振動によって発生する固体表面の微小流れを模式的に示したものである。いずれも、超音波のエネルギーが水中で力を誘起し、水の流れや気泡の生成、気泡の微小振動による気泡周囲の微小流れなどの現象を発生させることが報告されている<sup>6)</sup>。

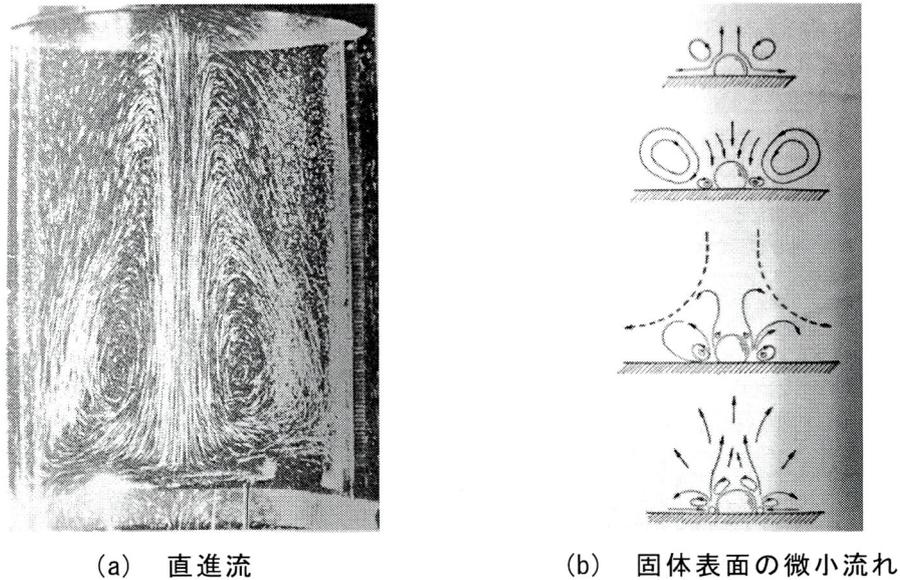


図 2-1 超音波による直進流の可視化および生成気泡の微小振動による固体表面の微小流れ模式図<sup>6)</sup>

音波のエネルギーは、音響パワー (acoustic power)、音響インテンシティー (sound intensity)、音の強さ、音の強度、音響密度などと呼ばれ、音の進行方向に垂直な単位面積を単位時間に通過する音のエネルギー(W/cm<sup>2</sup>)として定義<sup>6)</sup>されている。

水中を伝搬する一次元平面進行波の場合、音のエネルギーは式 2-1<sup>6)</sup>で与えられる。

$$I = \rho c V_{rms}^2 \quad (2-1)$$

ここで、 $\rho$  は水の密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $c$  は水中音速 1500(m/s)、 $V_{rms}$  は水粒子の変位速度実効値(m/s)を表す。また、密度と音速の積で表される  $\rho c$  を媒質の特性インピーダンス (characteristic impedance)、固有音響インピーダンス (specific acoustic impedance) と呼んでいる。固有音響インピーダンス  $\rho c$  は式 2-2<sup>7)</sup>の関係があり、音を伝える媒体粒子の変位速度に対する音圧 P(Pa)の比で与えられる重要な定数である。

$$\frac{p}{v} = \rho c \quad (2-2)$$

今、音波が存在しないときの静圧を  $P_0$  とし、音波が存在するときの任意の場所にお

## 第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

ける任意の時間の圧力を  $P_n$  とすると、音圧  $P(\text{Pa})$  は  $P=P_n-P_0$  で表される微小な圧力である<sup>8)</sup>。式 2-1 で与えられる音のエネルギーの単位 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) を力の単位に書き直すと、式 2-3 のように書ける。式 2-3 右辺第 1 項は力を表し、下線部は疎密波がもたらす音圧  $P$  によりなされる仕事であることが再確認できる。

$$[\text{g}/\text{cm}^3][\text{cm}/\text{s}][\text{cm}^2/\text{s}^2]=[\underline{\text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}^2}][\underline{\text{cm}}][1/\text{cm}^2][1/\text{s}] \quad (2-3)$$

なお、本論文では、音のエネルギー ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) を音の強さ、 $\rho c$  を固有音響インピーダンスに統一して記述する。ただし、特に超音波が存在する音場内においてエネルギーの存在や作用を強調して説明する場合、音のエネルギーと記述する。

図 2-2 はキャビテーションの発生原理である。液体中に強力な超音波を照射するとキャビテーション（空洞現象，cavitation）<sup>6)</sup> が発生する。液体中に超音波を照射すると、液体中を進行する粗密波によって過圧と負圧が発生する。この負圧によって液体が引き裂かれ空洞が発生する現象がキャビテーションである。発生する気泡の大きさがある大きさになると消滅せず音場内で振動する。また振動する気泡はつぶれることがあり、このとき衝撃波が発生し、液体中に局部的に大きな力を与えることが報告<sup>6)</sup> されている。図 2-3 にキャビテーションによって発生するノイズの周波数成分概要<sup>6)</sup> を示す。20kHz の超音波振動子を空中で駆動させても、その音を聞き取ることは容易ではない。しかし、超音波振動子を水中で駆動させると、雑音が聞きとれるようになる。

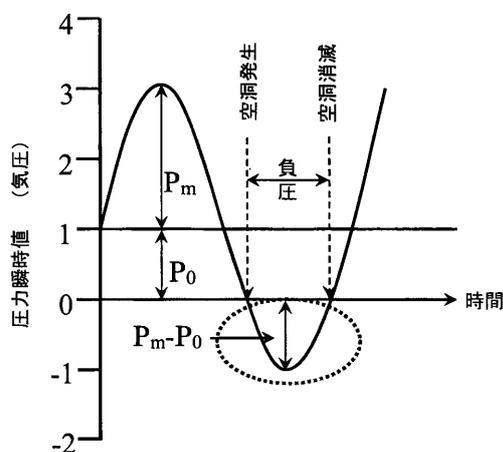


図 2-2 キャビテーションの発生原理

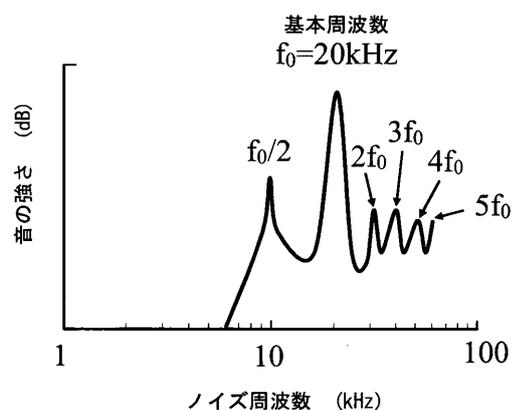


図 2-3 キャビテーションノイズの周波数成分

## 第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

この雑音の周波数を調べると、20kHzの基本周波数 $f_0$ のほか、基本周波数 $f_0$ の1/2低調波、及び基本周波数 $f_0$ の2, 3, 4・・・倍の高調波が規則的に現れることが報告<sup>6), 9), 10)</sup>されている。

本章では、超音波を水中に照射することで水中に投入される音の強さ、水中を伝搬する音の強さ、超音波によって水中に投入されるエネルギーによって誘起される直流成分、およびキャビテーションと砂の高密度化に影響すると考えられる超音波出力、超音波照射距離との関係を実験により検証し、砂の高密度化概念を提示する。

### 2-2 音の強さ

#### 2-2-1 音の強さ測定

図2-4に音の強さ伝達概要を示す。図2-4aに示すように、同じ仕様の振動子を対向させホーン先端を接合して、照射側振動子ホーン先端から超音波を照射すると、照射側振動子と受振側振動子は共振状態が保たれ、照射側振動子から照射された音の強さはほぼ100%受振側振動子ホーンに伝搬すると考えられる<sup>11)</sup>。しかし、図2-4bのよう

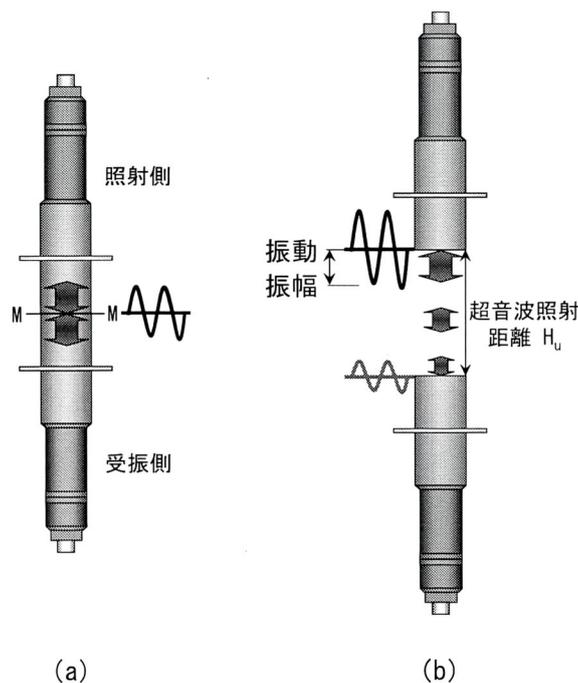


図 2-4 超音波振動子ホーン先端変位伝達概要

## 第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

に、水中を伝搬する超音波の波長を考慮した距離だけ照射側と受振側超音波振動子ホーンを離した場合、照射側振動子と受振側振動子の共振状態は保たれる<sup>12)</sup>ものの、照射側超音波振動子ホーン先端から水中に投入される音の強さは、水中を伝搬する過程で低減されて受振側振動子ホーンに届く。実験では図 2-4b の状態を再現できる装置を利用して、水中を伝搬する過程で変化する超音波の強さと超音波出力および超音波照射距離との関係を明らかにする。実験は超音波振動子ホーン先端に着目してその動きを捉えることで、ホーン先端の前面にある水粒子の動きを把握する手法をとる。したがって、本論文では超音波振動子ホーン先端の変位、速度、音の強さと表現するが、振動子ホーン先端に接する水粒子の変位、水粒子の速度、単位面積当たりの水粒子が持つエネルギー、すなわち音の強さを指す。

### (1) 実験装置の概要

図 2-5 に音の強さ測定装置の概要を示す。本装置は次の 3 つの主要部位で構成される。20kHz 超音波振動子①、超音波振動子①を防水目的で格納する円筒形塩化ビニールパイプ⑤、超音波振動子①を駆動させる超音波発振器⑦で構成される超音波照射部位。超音波振動子①から水中に照射された超音波を受振するための超音波振動子②がフランジで底版に固定された水槽⑥。超音波振動子①から水中に照射された超音波を受振するための超音波振動子②、超音波振動子①②のホーン先端振動変位を計測する小型超音波振動子③④、小型超音波振動子③④から出力される電圧値を読み取るオシロスコープ⑧で構成される計測部位。

### (2) 主要部位の仕様

#### a. 超音波照射部位

照射側超音波振動子は先端に直径 60mm、長さ 123mm のホーンを取り付け、防水目的で円筒形塩化ビニールパイプに格納し、ホーン先端 50mm を露出させた構造である。超音波振動子は超音波発振器に接続し、電圧 200V、20kHz で駆動させるボルト締めランジュバン型振動子である。実験では、超音波出力は出力の大きさの違いによる効果を確認するため 3 種類とした。そのため、2 種類の超音波振動子と超音波発振器を用いた。超音波振動子 1 本を超音波発振器の出力（以下超音波出力と記述する）下限 40W ～上限 600W で駆動させるもの、および 2 本の超音波振動子を超音波発振器に接続し、2 本の超音波振動子を同期させて超音波出力上限 600W で駆動させるものである。

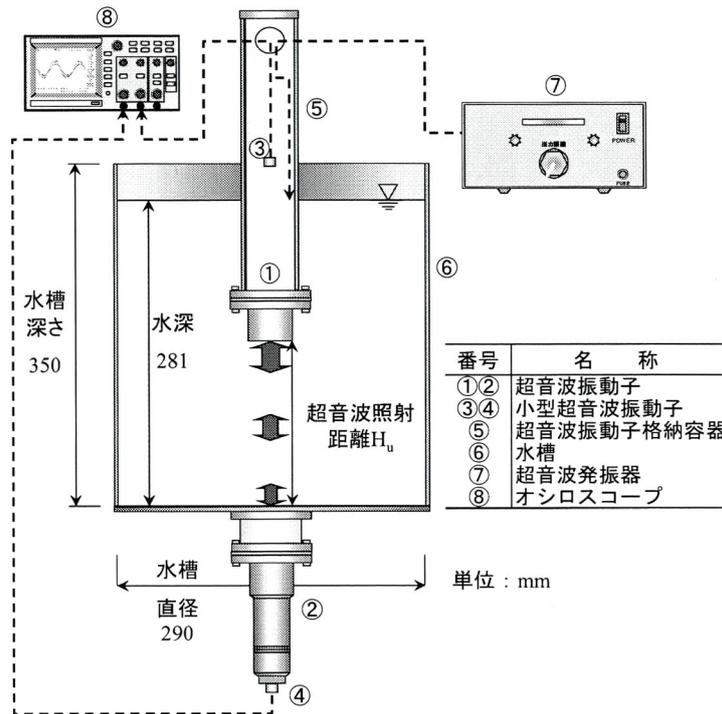


図 2-5 音の強さ測定装置の概要

実験では、一方の超音波振動子を実験用水槽に、もう一方を他の水槽に設置して駆動させることで実験用水槽に設置した超音波振動子は超音波出力上限 300W で駆動される。超音波振動子はホーンを鉛直下向きに水槽底版に固定された超音波振動子と直線に対向させて設置される。格納容器頭部は上下移動装置に固定され鉛直方向に任意に移動できる。

#### b. 水槽

水槽は内径 290mm、深さ 350mm のアクリル製円筒形容器である。水槽底版中央には超音波振動子①と同仕様の超音波振動子を超音波振動子ホーン先端が底版上面と同じ高さになるように、上向きでフランジに固定されている。超音波振動子①から照射された超音波が受振できる。なお、水槽は実験と同じ条件で各部位を組み立てた後、水槽底版に鉛直、水平 2 方向に加速度センサー (9G305SW) を取り付け、水槽上部 2 箇所を鉛直、水平方向にプラスチックハンマーで打撃して固有振動数を確認し、装置が超音波周波数 20kHz に共振しないことを確認している。また、後述する実験で使う水槽、および直流成分計測部位についても同様な方法で超音波周波数 20kHz に共振し

ないことを確認している。

### c. 計測部位

計測部位は超音波振動子①と②のホーン先端変位を計測するものである。超音波振動子①と②には超音波振動子ホーン先端変位を間接的に計測する小型超音波振動子③と④が取り付けられている。小型超音波振動子は超音波装置製作メーカーにおいて取り付け加工され、同時に超音波振動子ホーン先端中央変位量と小型超音波振動子③と④から出力される電圧値との相関が求められている。超音波振動子ホーン先端の変位量が小型超音波振動子から出力される電圧値を読み取ることによって求めることができる。図 2-6 にホーンを取り付けた超音波振動子の縦振動モードを示す。なお、縦振動モードは理解を容易にするため、縦方向を横方向に図示している。また中心 X 軸の矢印方向を(+)として上側に、矢印と逆方向を(-)として下側に図示している。超音波振動子ホーン先端中央 M 点と小型超音波振動子を取り付けられている超音波振動子後部 m 点の振動モードは等しく、同位相である。したがって、M 点と m 点の変位量の相関を求めておけば、m 点の変位量を計測することで間接的に M 点の変位量が求まる。

図 2-7 に変位計測装置の概要を示す。装置はファンクションシンセサイザー⑦で発生させた 20kHz の正弦波を高周波アンプ⑥で増幅させ超音波振動子を駆動させる。駆動する超音波振動子①ホーン先端中央 M 点の変位量をレーザードップラー変位計③④で計測し、データをオシロスコープ⑤読み取る。同時に超音波振動子①の後部に取り付けた小型超音波振動子②から出力される電圧値をオシロスコープ⑧で読み取る。超音波振動子①を駆動させる出力を段階的に変え、以上の作業を繰り返して行い、オシロスコープ⑤と⑧で読み取ったデータから両者の相関が求められている。表 2-1 にレーザードップラー変位計の仕様を示す。また、超音波振動子に取り付けてある小型超音波振動子の種類と小型超音波振動子から出力される電圧値(volt)と超音波振動子ホーン先端変位量( $\mu\text{m}$ )との相関係数を表 2-2 に示す。小型超音波振動子は、音響マイクروفोनのように広範囲な周波数に対して平坦な周波数特性を持たない。図 2-7 と同種類の計測装置で、小型超音波振動子の振動特性を確認すると周波数 20kHz のほかに 50~70kHz, 90~130kHz の周波数に対して共振することを確認している。20kHz 以外の周波数を持つ振動変位量に対する小型超音波振動子から出力される電圧値は増幅

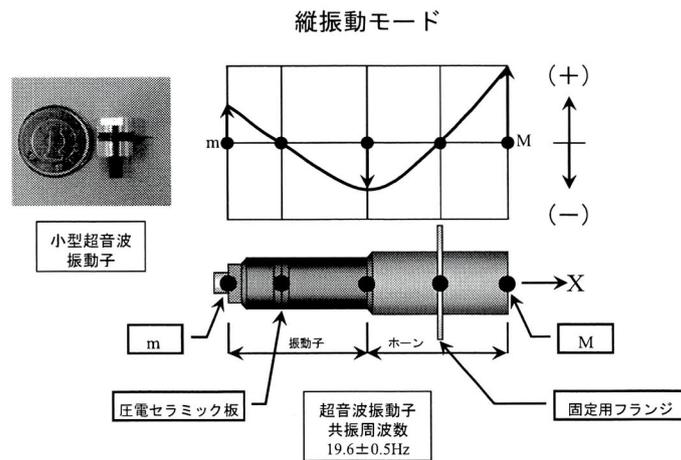


図 2-6 ホーンを取り付けた超音波振動子の縦振動モード

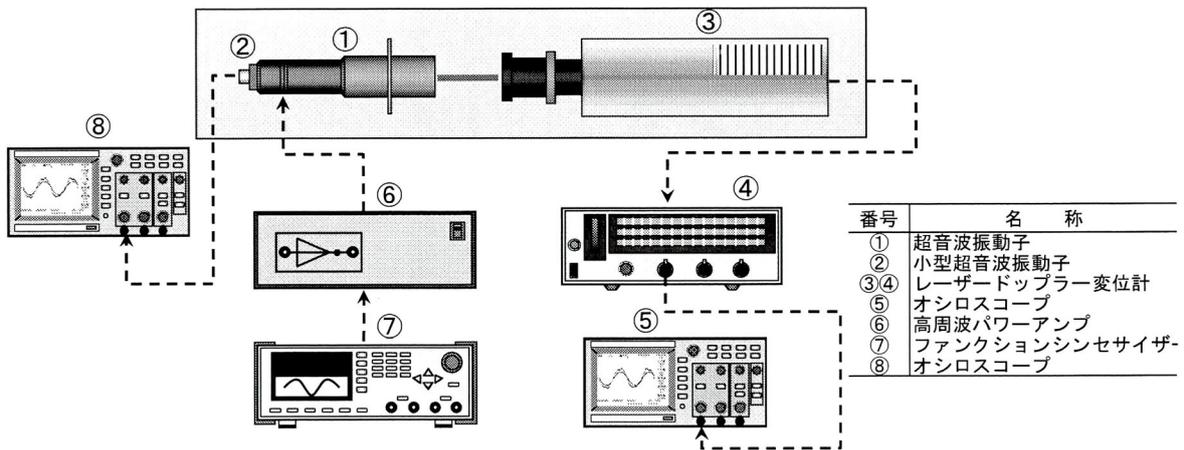


図 2-7 変位計測装置の概要

表 2-1 レーザードップラー変位計仕様

機種名	計測周波数範囲	変位設定レンジ (1 kHz~200 kHz)	測定精度	電圧出力
LV-1710	1 Hz~3 MHz	1 (μm/V)	±5 %	±10 V

表 2-2 小型超音波振動子出力電圧値(volt)と  
超音波振動子ホーン先端変位量(μm)との相関係数

名称	取り付け超音波振動子	相関係数
DA21P	照射側	0.1557 μm/V
HEC-10P2BPS	受振側	0.3406 μm/V

されて出力される。しかし、共振周波数に対する増幅倍率は既知ではないため 20kHz 以外の周波数を示す電圧値はノイズとして処理する。

### 2—2—2 実験方法および条件

#### (1) 超音波出力の設定

超音波出力は超音波振動子 1 本を下限出力 40W～上限出力 600W で駆動させるもの、および超音波振動子 1 本あたり 300W で駆動させるものである。超音波出力は 40W, 300W, 600W の 3 種類を設定した。

#### (2) 超音波照射距離の設定

図 2-8 に超音波照射距離  $H_0$  設定概要を示す。ホーン先端とモールド底面間の距離を水中に照射される超音波の波長  $\lambda$  に基づいて後述のとおり調節すると図 2-8(a)に示すように、底面で音圧  $P$  が最大となる定在波と図 2-8(b)に示すように音圧  $P$  が最小となる定在波が形成される。モールド底面における音圧  $P$  が最大と最小になる定在波について、超音波出力および超音波照射距離と音の強さ、直流成分、キャビテーションの関係を検証するため、超音波照射距離を以下のとおり設定した。図 2-8(a)に示すように、水で満たしたモールド内にホーン先端を下向きに水没させ、ホーン先端から下向きに超音波を照射すると超音波はモールド底面で反射する。この時、超音波波長  $\lambda$  に基づいてホーン先端とモールド底面間の距離を図 2-8(a)に示すように調節すると、モールド底面で音圧が最大となるような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、超音波は減衰することなくモールド底面に達し、モールド底面で 100%上向きに反射されると仮定する。図 2-8(a)に示すようにモールド底面  $O$  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、ホーンから照射された超音波がモールド底面で反射され、ホーンとモールド底面間で形成される定在波の音圧  $P(\text{Pa})$  は式 2-4<sup>13)</sup>で表される。

$$P = -2\omega\rho A \cdot \cos(kx) \cdot \sin(\omega t) \quad (2-4)$$

ここで、 $\omega\rho A$  は音圧振幅( $\text{Pa}$ )<sup>14)</sup>を表す。研究で使用した超音波装置は振動子の振動

## 第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

数が 20kHz に保っ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を音圧、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  $\omega=2\pi f$  ,  $k=2\pi/\lambda$  の関係を有する。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),  $A$  は超音波の音圧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 2-4 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  $P$  が最大と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。また図 2-8(b) のようにホーン先端とモールド底面間の距離を調節すると底面位置で音圧  $P$  が最小となる。以上から、超音波周波数が 20kHz, 水中音速が  $1500\text{m/s}^{15)}$  , として求めた水中での超音波波長を  $\lambda=7.5\text{cm}$  として水槽底面で音圧  $P$  が最大になる超音波照射距離として 5.6, 13.1, 20.6cm の 3 種類, 水槽底面で音圧  $P$  が最小になる超音波照射距離として 3.8, 11.3, 18.8cm の 3 種類, 合計 6 種類の超音波照射距離を設定した。表 2-3 に超音波出力, 音圧最大位置, 音圧最小位置, 超音波照射距離の関係を示す。

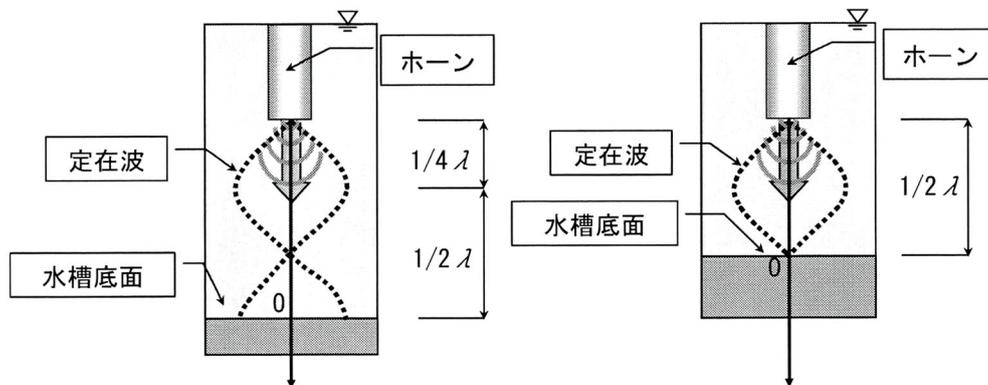


図 2-8 超音波照射距離設定概要

表 2-3 超音波出力, 音圧最大・最小位置, 超音波照射距離関係

超音波出力 (W)	底版における 音 圧	超音波照射距離 $H_0$ (cm)
40	最 小	3.8, 11.3, 18.8
	最 大	5.6, 13.1, 20.6
300	最 小	3.8, 11.3, 18.8
	最 大	5.6, 13.1, 20.6
600	最 小	3.8, 11.3, 18.8
	最 大	5.6, 13.1, 20.6

(3) 用いた水

水は水道水を用いた。水道水は蛇口からくみ取る際、水の中に周辺の空気などを取り込まないように、注意してくみ取った。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くみ取った後 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。

(4) 水位の設定

水槽内の水位は 28.1cm に設定した。実験で設定した最大超音波照射距離 20.6cm に 1 波長  $\lambda = 7.5\text{cm}$  を加えた 28.1cm を水位とした。

(5) 超音波振動子ホーン先端変位量の読み取り方法

小型超音波振動子から出力される電圧値をオシロスコープで読み取ったデジタル値から元の波形を正しく再生できるように、読み取り時間（サンプリング時間）を以下のとおり設定した。周波数  $f$  の波形をデジタル値として読み取り、その読み取ったデジタル値から元の波形を正しく再生するには、対象波形周波数  $f$  の 2 倍の周波数  $2f$ （ナイキスト周波）に相当する時間間隔でサンプリングする必要がある<sup>16)</sup>。20kHz を中心に 50kHz までの高調波が分析できるように、サンプリング周波数 100kHz に相当するサンプリング時間間隔を  $1/100000 = 10\mu\text{s}$  とした。読み取った波形は図 2-9 に示すように、1 周期 0.00005 秒の 2 倍 0.0001 秒間の波形データが 2500 点のデジタル値として保存される。表 2-4 にオシロスコープの仕様を示す。

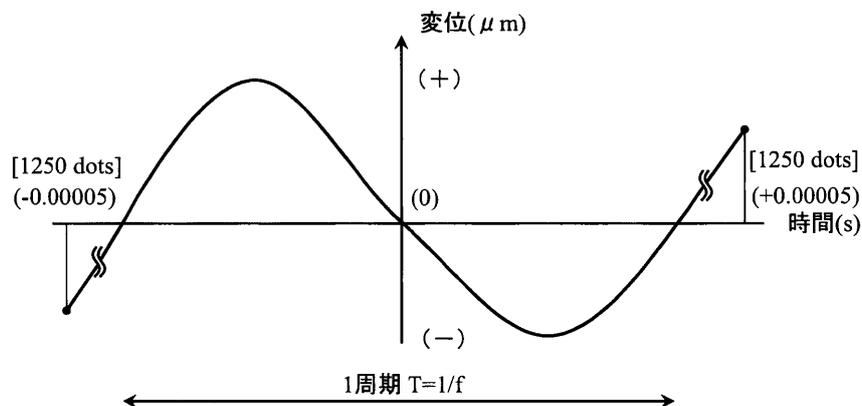


図 2-9 オシロスコープ読み取り波形概要

表 2-4 オシロスコープの仕様

機種名	周波数帯域	サンプル・レート範囲	分解能	入力感度	確度
TDS1001B	40 MHz	5 S/s~1 GS/s	8-Bits	2 mV~5 V/div	±3 %

### 2—2—3 実験手順

実験は次の手順で行った。

- 1) 照射側超音波振動子①を水槽中央に移動させ、超音波照射距離を所定の距離に設定する。
- 2) 水を水槽に注ぎ込み水位を 28.1cm に調節する。水は空気の連行あるいは、急激な投入によって泡が発生しないように水槽内壁に沿わせて静かに注ぎ込む。
- 3) 水温が 18℃~22℃の範囲にあることを確認する。水温がこの範囲にない場合、加温または冷却により水温が 18℃~22℃の範囲になる処置を行う。
- 4) 小型超音波振動子③④をオシロスコープの入力端子に接続する。オシロスコープの電源を ON にし、入力条件の設定を確認する。
- 5) 超音波発振器⑦の出力を下限値に設定し、電源を ON にする。超音波振動子①を駆動させ、超音波の照射を開始する。ただし、2本の超音波振動子を同期して駆動させる種類の場合、手順 5)は行なわない。
- 6) オシロスコープ⑧の画面に表示される小型超音波振動子③から入力される電圧波形が定常状態になったことを確認後、オシロスコープ⑧が読み取っている小型超音波振動子③および④から入力される下限出力に対する電圧値をメモリーに保存する。ただし、2本の超音波振動子を同期して駆動させる種類の場合、手順 6)は行なわない。
- 7) 超音波発振器⑦の出力調整ダイヤルを回し出力を上限値に設定する。
- 8) オシロスコープ⑧が読み取っている小型超音波振動子③および④から入力される上限出力に対する電圧値をメモリーに保存する。
- 9) 超音波発振器⑦を停止する。
- 10) 超音波振動子①を次の超音波照射距離に移動し、設置する。
- 11) 超音波振動子①と格納容器⑤の移動によって、水没する体積が変わるため水位が変化する。注水または排水を行い、所定の水位に調節する。

12)各実験条件について 5)~11)を繰り返す.

13)全ての実験条件で実験を3回行う.

## 2-2-4 計測データおよび整理方法

### (1) 音の強さの算出

図 2-10 に代表的な照射側超音波振動子①ホーン先端変位および受振側超音波振動子②ホーン先端変位-時間関係を示す. 照射側, 受振側波形とも波形のヒズミおよび細かなノイズが全体に含まれていることが見て取れる.

図 2-11, 図 2-12 に照射側, 受振側波形から離散フーリエ変換 (DFT) を行い算出した周波数-変位パワースペクトル密度関係を示す. 照射側, 受振側振動子ホーン先端とも基本周波数 20kHz で振動している. 20kHz 周辺の周波数も含まれているが確認できる周波数は小型超音波振動子の共振周波数と重なることから, これらの周波数成分は 2-2-1(2) c. 計測部位にしたがってノイズとみなして除去した.

図 2-13 に図 2-10 に示した計測波形から 20kHz の周波数のみを残し, 再生した照射側および受振側超音波振動子ホーン先端変位-時間関係を示す. また, 図中, 図 2-10 に示した照射側および受振側超音波振動子ホーン先端変位-時間関係をドットで示した.

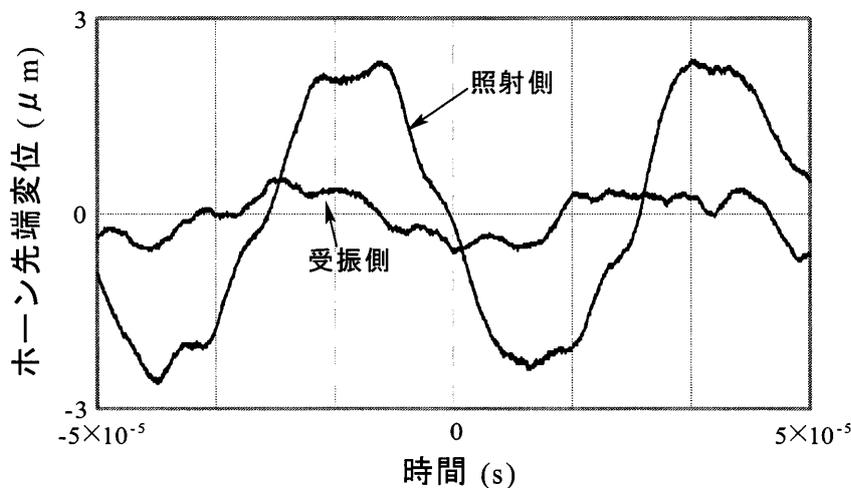


図 2-10 代表的照射側超音波振動子ホーン先端変位および受振側超音波振動子ホーン先端変位-時間関係

第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

図 2-14 に振動速度算出概要を示す。時間  $t_i$  における変位を  $u_i$ ,  $t_{i+1}$  における変位を  $u_{i+1}$  として、その間を直線で近似すると、振動速度  $v_i$  は式 2-5 で算出できる。

$$v_i = \frac{\Delta u}{\Delta t} \doteq \frac{u_{t_{i+1}} - u_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (2-5)$$

図 2-15 に再生波形から図 2-14 に示した振動速度算出方法によって求めた振動速度-時間関係を示す。

図 2-16 に振動速度実効値  $V_{rms}$  算出概要を示す。時間  $t_i$  における速度を  $v_i$ ,  $t_{i+1}$  における速度を  $v_{i+1}$  として、 $t_i$  と  $t_{i+1}$  の時間間隔を  $\Delta t_i$  として、1 周期に渡って積分すると速度実効値  $V_{rms}$  が式 2-6 で算出できる。

$$V_{rms} = \frac{1}{T} \int_{\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} v^2 dt \doteq \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{i=n} (\Delta v_i)^2 \Delta t \quad (2-6)$$

ここで、 $v_i$  は速度の瞬時値(m/s),  $\Delta t$  は時間間隔(s),  $T$  は周期(s)を表す。

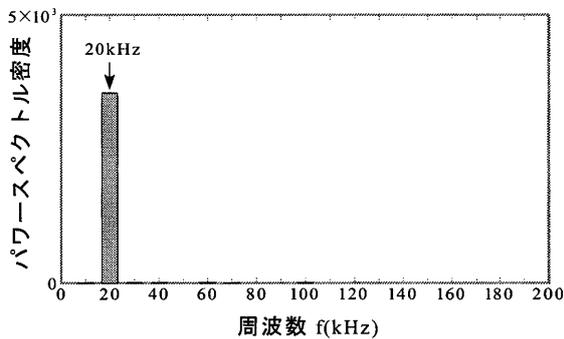


図 2-11 照射側変位  
パワースペクトル密度

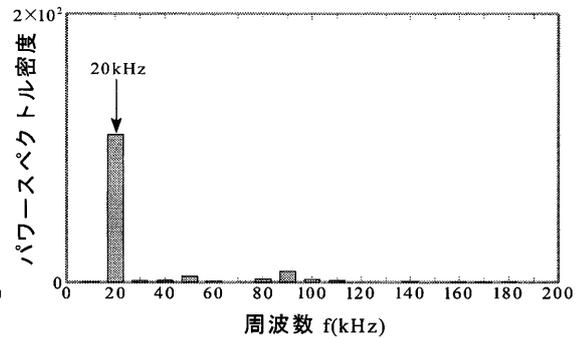


図 2-12 受振側変位  
パワースペクトル密度

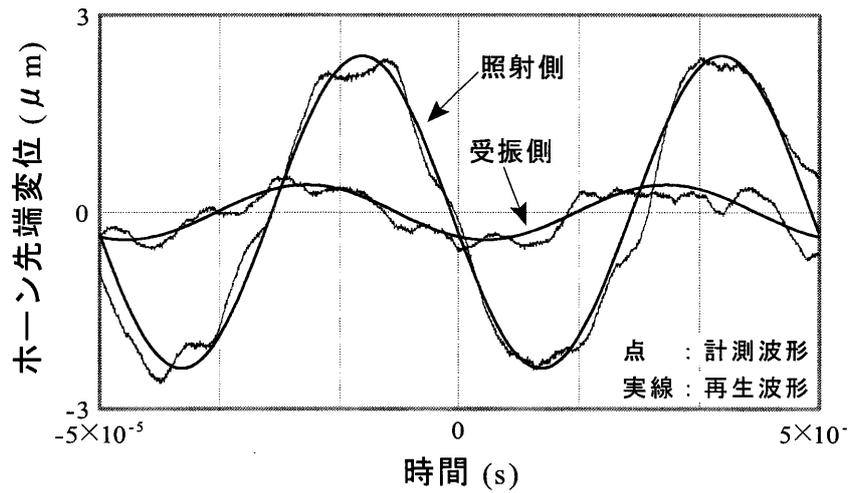


図 2-13 再生照射側および受振側超音波振動子ホーン先端変位-時間関係

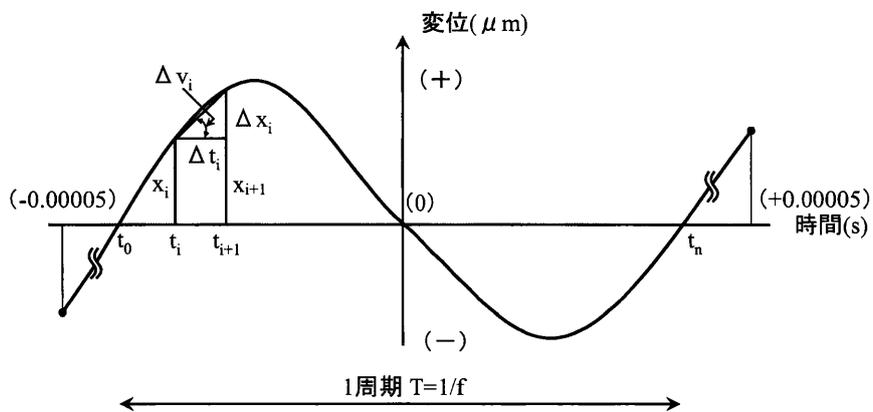


図 2-14 振動速度算出概要

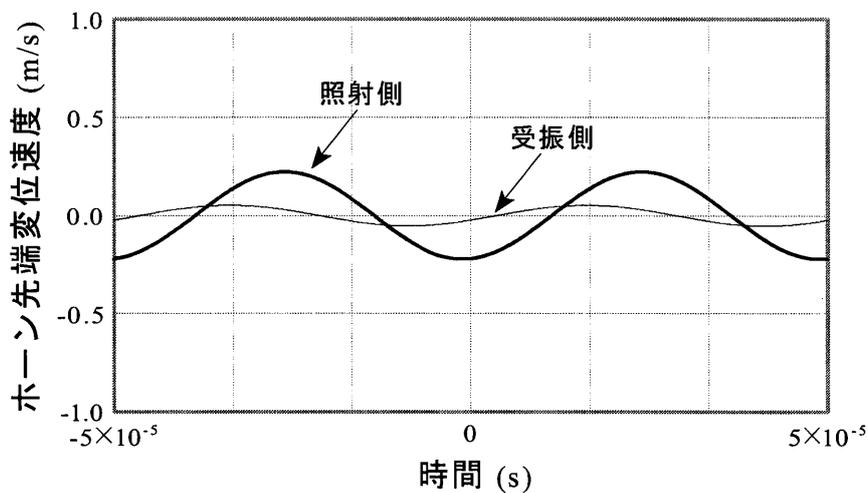


図 2-15 再生波形から算出した振動速度-時間関係

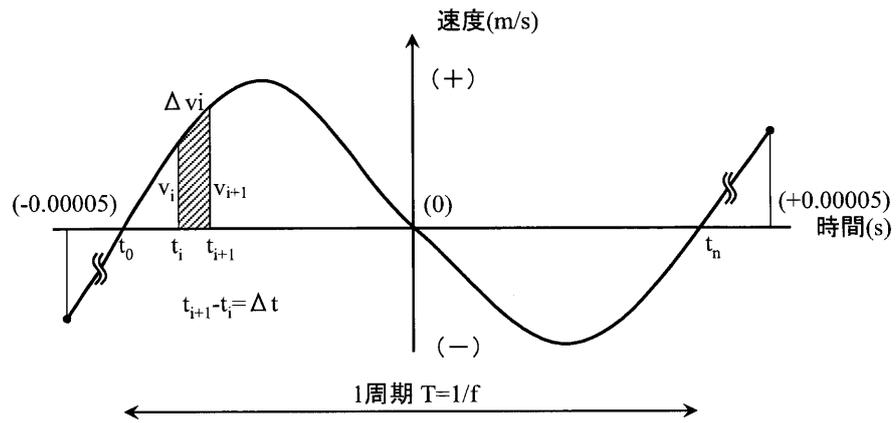


図 2-16 振動速度実効値  $V_{rms}$  算出概要

## 2—3 直流成分

### 2—3—1 直流成分測定

超音波振動子ホーン先端から水中に照射され、水中を伝搬する音の強さによって誘起される直流成分と超音波出力、および超音波照射距離との関係を明らかにする。

直流成分は音響流と音響放射圧とからなり、音響流はトレーサーを音場内に投入してその動きを光学機器等により追跡することで、あるいはレーザードップラー流量計などを使って計測される<sup>3)</sup>。一方、音響放射圧は吊り線のねじれ弾性を利用する方法や重力とつりあわせて測定する方法が古くから利用されていた<sup>17)</sup>。この内、重力とつりあわせて測定する古典的な方法に天秤法がある。天秤の片方の腕の下に放射圧を受ける板、球を吊り下げたもので、垂直に下からくる超音波を測定するという方法である。現在行われている天秤法は超音波を照射することで発生する放射力を受圧板で受け、その力を電子天秤で測定して、超音波パワーを求めることを目的にした方法である<sup>18)</sup>。

本章で行った音響流と音響放射力からなる直流成分の測定は、天秤法を応用した装置を製作して行った。ただし、音響流と音響放射力は分けることなく、直流成分として測定した。

#### (1) 装置の概要

図2-17に直流成分測定装置の概要を示す。装置は次の4つの主要部位で構成される。超音波振動子①と超音波発振器⑨で構成される超音波照射部位。超音波振動子①のホーン先端変位量を計測するため超音波振動子後部に取り付けた小型超音波振動子②と小型超音波振動子②から出力される電圧値を読み取るオシロスコープ⑩で構成される計測部位。超音波を水中に照射するための超音波振動子①を底版中央にフランジで固定した水槽。超音波振動子①から水中に照射される超音波によって誘起される直流成分を受振するための受圧板④、受圧板④で受けた直流成分をスチール板が変形することでスチール板中央に貼り付けたひずみゲージのひずみ量として計測するスチール板⑥に伝える支持棒⑤、スチール板⑥を支持するフレーム⑦、フレームを固定する固定端⑧、スチール板⑥に貼り付けたヒズミゲージのヒズミ値を読み取るデータロガー⑪で構成される直流成分計測部位。

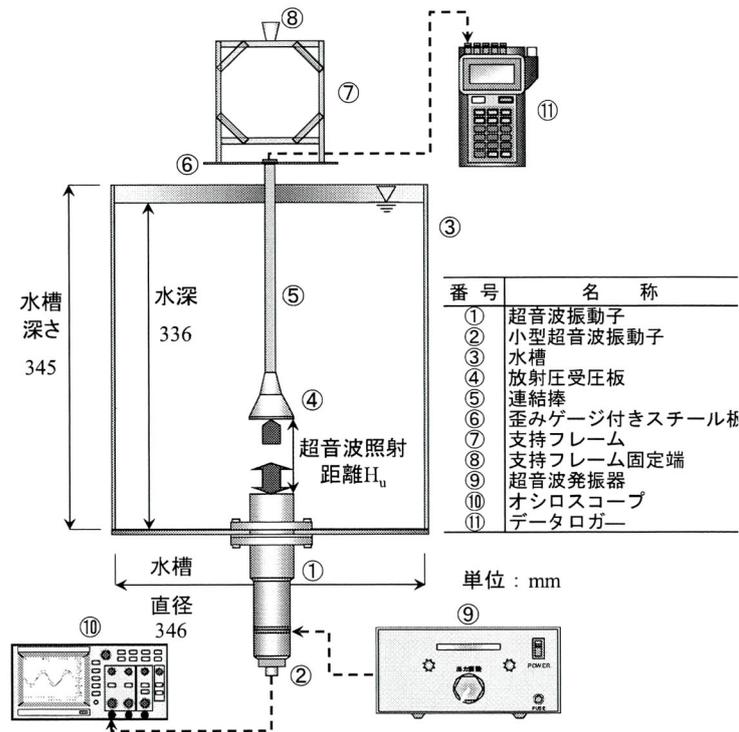


図 2-17 直流成分測定装置概要

(2) 主要部位の仕様

a. 超音波照射部位

2-2-1(2) a.超音波照射部位と同じである。

b. 水槽

水槽は内径 346mm，深さ 345mm の塩化ビニール製円筒形容器である。水槽底版中央には超音波振動子①が上向きに，ホーンを水槽内に 55mm 挿入して固定されている。

c. 直流成分計測部位

超音波振動子ホーン先端から水中に照射された超音波によって誘起される直流成分を超音波振動子ホーンと同じ直径 60mm のステンレス製（超音波振動子ホーンと同じ材質）円盤で受振できる。ステンレス製円盤はプラスチック製支持棒を介してひずみゲージを貼り付けたスチール板中央に取り付けてある。さらに，スチール板は上部プラスチック製フレームに 2 点で固定され，プラスチック製フレームは支持点⑧で固定支持されている。支持点⑧は上下方向に任意に移動でき，超音波振動子ホーン先端

## 第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

とステンレス製円盤間の超音波照射距離  $H_u$  が任意に調節できる。ひずみゲージを貼り付けたスチール板精度はスチール板中央に貼り付けたヒズミゲージ  $1\mu(\varepsilon)$  に対してスチール板中央下向力は  $0.15g$  である。相関係数は  $k=0.15g/\mu(\varepsilon)$  となる。スチール板は実験開始前と実験終了後に実荷重を載荷して精度をチェックしている。

### 2-3-2 実験方法および条件

#### (1) 超音波出力の設定

2-2-2(1) 超音波出力の設定にしたがって設定した。

#### (2) 超音波照射距離の設定

2-2-2(2) 超音波照射距離の設定にしたがって設定した。

#### (3) 用いた水

水は水道水を用いた。水道水は 2-2-2(3)と同じ方法で準備した。

#### (4) 水位の設定

2-2-2(4)水位の設定にしたがって設定した。

#### (5) 超音波振動子ホーン先端変位量の読み取り方法

2-2-2(5)超音波振動子ホーン先端変位量の読み取り方法にしたがって読み取った。

#### (6) データロガー読み取り方法

予備実験において、受圧板が受ける直流成分が不規則に変動するため、同一超音波出力、超音波照射距離に対してデータロガーによるひずみの読み取りは時間間隔 1 秒で 20 回とした。表 2-5 にデータロガーの仕様を示す

表 2-5 データロガー仕様

機種名	測定範囲 (ひずみ)	サンプリング速度	分解能	確度 $\pm(\%reading+digit)$
TC-31K	$\pm 30000 \times 10^{-6}$	0.25 s	$1 \times 10^{-6}$	0.08+1

### 2—3—3 実験手順

実験は次の手順で行った。

- 1) 受圧板④を水槽中央に移動させ、超音波照射距離を所定の距離に設定する。
- 2) 水を水槽に注ぎ込み水位を超音波振動子ホーン先端から 28.1cm、水槽底面から 33.6cm に調節する。水は空気の連行あるいは、急激な投入によって泡が発生しないように水槽内壁に沿わせて静かに注ぎ込む。
- 3) 水温が 18～22℃の範囲にあることを確認する。水温がこの範囲にない場合、加温または冷却により水温が 18～22℃の範囲になる処置を行う。
- 4) スチール板⑥に貼り付けられたヒズミゲージのケーブルをデータロガー⑪に接続し、電源を ON にする。入力条件を確認する。
- 5) 超音波振動子①と超音波発振器⑨をケーブルで接続する。
- 6) 超音波振動子①に取り付けられた小型超音波振動子②をオシロスコープ⑩の入力端子に接続する。オシロスコープ⑩の電源を ON にし、入力条件を確認する。
- 7) データロガー⑪を操作し、初期値の取得と入力スタンバイの状態にセットする。
- 8) 超音波発振器⑦の出力を下限値に設定し、電源を ON にする。超音波振動子①を駆動させ、超音波の照射を開始する。ただし、2本の超音波振動子を同期して駆動させる種類の場合、手順 8)は行なわない。
- 9) オシロスコープ⑩の画面に表示される小型超音波振動子②から入力される電圧波形が定常状態になったことを確認後、オシロスコープ⑩が読み取っている小型超音波振動子②から入力される下限出力に対する電圧値をメモリーに保存する。同時にデータロガー⑪を作動させてスチール板⑥のヒズミを 20 回計測し、メモリーに保存する。ただし、2本の超音波振動子を同期して駆動させる種類の場合、手順 9)は行なわない。
- 10)超音波発振器⑨の出力調整ダイヤルを回し出力を上限値に設定する。
- 11)オシロスコープ⑩が読み取っている小型超音波振動子②から入力される上限出力に対する電圧値をメモリーに保存する。同時にデータロガー⑪を作動させてスチール板⑥のヒズミを 20 回計測し、メモリーに保存する。
- 12)超音波発振器⑨の電源を OFF にする。
- 13)受圧板④を次の超音波照射距離に移動し、設置する。
- 14)受圧板④が上下に移動するため水槽内の水位が変化する。注水または排水を行い、

所定の水位に調節する。

15)各実験条件について7)~14)の手順を繰り返す。

16)全ての実験条件で実験を2回行う。

#### 2—3—4 計測データおよび整理方法

##### (1) 音の強さの算出

2-2-4(1)にしたがって算出する。

##### (2) 直流成分の算出

直流成分は式 2-7 で，データロガーのメモリーに保存されたヒズミ値  $\varepsilon$  に相関係数  $k$  を乗じて算出する。

$$N_{rms} = \varepsilon \cdot k \quad (2-7)$$

#### 2—4 キャビテーション

##### 2—4—1 キャビテーション測定

20kHz の超音波振動子ホーン先端から水中に照射された超音波によって発生するキャビテーションによって生成される気泡の微小振動と気泡の圧壊現象により水中に発せられるノイズを受振し，これらの現象が超音波によって連続的に繰り返されていること，および超音波出力，ノイズ受振距離との関係を明らかにする。

##### (1) 試験装置の概要

図 2-18 にキャビテーション測定装置の概要を示す。キャビテーション測定装置は次の3つの主要部位で構成される。超音波振動子①と超音波発振器⑤で構成される超音波照射部位。水槽④。水中でキャビテーション音を受振するプローブ⑦とプローブで受振した音を電圧値として読み取る音圧計⑥，音圧計⑥で読み取った電圧値を周波数解析しモニターすると同時に小型超音波振動子から出力される電圧値を読み取るオシロ

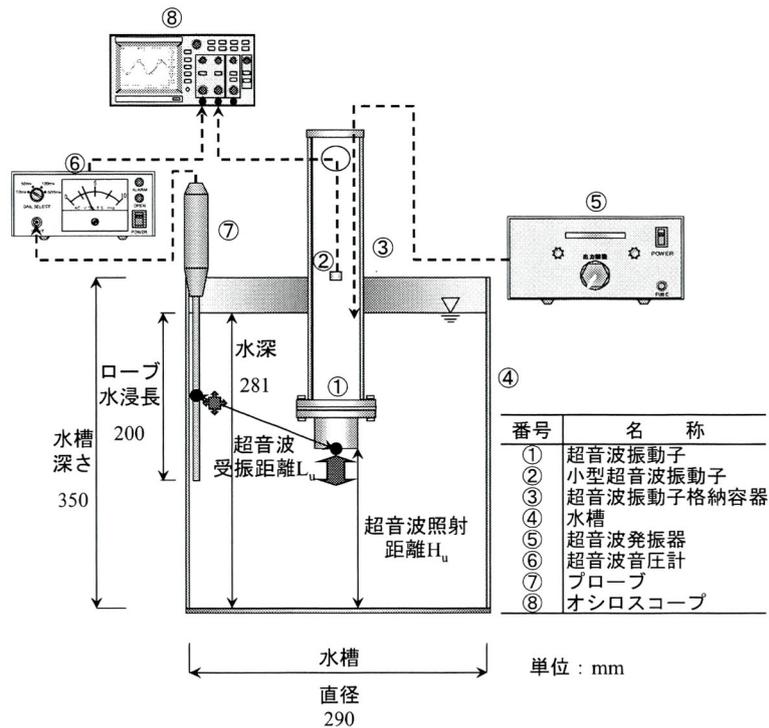


図 2-18 キャビテーション測定装置概要

スコープ⑧で構成される計測部位。超音波振動子は上下方向に任意に移動，調節できる。

## (2) 主要部位の仕様

### a. 超音波照射部位

2-2-1(2) a.超音波照射部位と同じである。

### b. 水槽

水槽は音の強さ計測で利用したのと同じ仕様のもので，内径 290mm，深さ 350mm のアクリル製円筒形容器である。

### c. 計測部位

プローブ先端 200mm を水中に水浸させ，水槽壁から 5mm 離してプローブ頭部を水槽と接していない金属フレームに固定している。プローブで受振した電気信号を音圧計⑥で受振し，外部出力端子と接続されているオシロスコープ⑧で読み取り，保存す

表 2-6 音圧計 HUS-5 およびプローブ仕様

機種名	周波数特性	測定レンジ	メータ指示値
HUS-5	10 kHz～5 MHz	10,50,100,500 mV	r m s (実効値)

名称	周波数特性	指向性特性
HUS-5-PS	10 kHz～5 MHz	無指向性

る.同時に小型超音波振動子②から出力される電圧値をオシロスコープ⑧で読み取り,保存する.

### (3) キャビテーションデータの読み取り方法

キャビテーション音の計測には音圧計 (SONIC SENSOR) HUS-5 を利用した. 音圧計 HUS-5 およびプローブの仕様を表 2-6 に示す. 2 章 1 節 2-1 で述べたように, 20kHz の超音波振動子ホーン先端から水中に照射された超音波によってキャビテーションが発生すると仮定した場合, キャビテーションによって生成される気泡の微小振動, 気泡の圧壊等の現象により発せられる特徴的なノイズが観測できるはずである. ノイズが持つ周波数の特徴は, 20kHz の基本周波数  $f_0$  のほか, 基本周波数の 1/2 低調波, 及び基本周波数の 2, 3, 4... 倍の高調波が現れることである. 実験で確認する周波数を基本周波数 20kHz の 1/2 低調波 10kHz から基本周波数の 1 桁高い高調波 100kHz までとした. サンプルレートの設定は 2-2-2(5)に従い, 100kHz までの周波数が分析できるように, サンプル周波数 250kHz に相当するサンプリング時間間隔  $4 \mu s$  とした.

## 2—4—2 実験方法および条件

### (1) 超音波出力の設定

2-2-2(1) 超音波出力の設定に従って設定した.

### (2) 超音波照射距離の設定

音圧プローブ中央と超音波振動子ホーン先端との超音波受振距離  $L_u$  は超音波照射距離  $H_u$  に対応して, 表 2-7 のとおりである.

表 2-7 超音波受振距離  $L_u$ -超音波照射距離  $H_u$  関係

超音波照射距離 $H_u$ (cm)	超音波受振距離 $L_u$ (cm)
3.8	20.0
5.6	18.8
18.8	14.0
20.6	14.2

### (3) 用いた水

水は水道水を用いた。水道水は 2-2-2(3)と同じ方法で準備した。

### (4) 水位の設定

2-2-2(4)水位の設定にしたがって設定した。

## 2—4—3 実験手順

実験は次の手順で行った。

- 1) 超音波振動子①を水槽中央に移動させ、超音波照射距離を所定の距離に設定する。
- 2) 水を水槽に注ぎ込み水位を 28.1cm に調節する。  
水は空気の連行あるいは、急激な投入によって泡が発生しないように水槽内壁に沿わせて静かに注ぎ込む。
- 3) 水温が 18℃～22℃の範囲にあることを確認する。水温がこの範囲にない場合、加温または冷却により水温が 18℃～22℃の範囲になる処置を行う。
- 4) プロブの先端 20cm を水中に挿入し、水槽内壁から 5mm 離して水槽と接していない外部フレームに固定する。
- 5) プロブ⑦と音圧計⑥の入力端子に接続し、音圧計⑥のモニター出力端子とオシロスコープ⑧の入力端子を接続する。同時に小型超音波振動子②をオシロスコープ⑧に入力端子に接続する。音圧計⑥およびオシロスコープ⑧の電源を ON にし、各装置の入力条件を確認する。
- 6) 超音波振動子①と超音波発振器⑤をケーブルで接続する。
- 7) 超音波発振器⑤の出力を下限値に設定し、電源を ON にする。超音波振動子①を駆

## 第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

動させ、超音波の照射を開始する。ただし、2本の超音波振動子を同期して駆動させる種類の場合、手順7)は行なわない。

- 8) オシロスコープ⑧の画面に表示される電圧波形が定常状態になったことを確認後、オシロスコープ⑧が読み取っている小型超音波振動子②から入力される下限出力に対する電圧波形データをメモリーに保存する。ただし、2本の超音波振動子を同期して駆動させる種類の場合、手順8)は行なわない。同時にオシロスコープ⑧で読み取っている音圧計⑥のモニター出力端子から入力される電圧値を、オシロスコープの演算機能により周波数解析を行い、スペクトルデータをメモリーに保存する。
- 9) 超音波発振器⑤の出力調整ダイヤルを回し出力を上限値に設定する。
- 10) 小型超音波振動子②から入力される上限出力に対する電圧値をメモリーに保存する。同時にオシロスコープ⑧で読み取っている音圧計⑥のモニター出力端子から入力される電圧値を、オシロスコープの演算機能により周波数解析を行い、スペクトルデータをメモリーに保存する。
- 11) 超音波発振器⑤の電源をOFFにし、超音波振動子①の駆動を停止する。
- 12) 超音波振動子①を次の超音波照射距離に移動し、設置する。
- 13) 超音波振動子①と格納容器③が上下に移動するため、水没する体積が変わり水位が変化する。注水または排水を行い、所定の水位に調節する。
- 14) 全ての実験条件について7)～13)の手順を繰り返す。

### 2-4-4 計測データおよび整理方法

#### (1) 音の強さの算出

2-2-4(1)にしたがって算出する。

#### (2) キャビテーションデータの整理

オシロスコープに保存されたデータから、基本周波数 20kHz の低調波、高調波の存在と音の大きさを確認し、超音波出力、超音波受振距離との関係を整理する。

## 2-5 実験結果および考察

### 2-5-1 音の強さ

図 2-19 に超音波照射距離とホーン先端速度実効値の関係を示す。超音波出力 600W, 300W, 40W とも、各超音波照射距離における照射側ホーン先端速度実効値に差が認められるが、超音波照射距離と照射側ホーン先端速度実効値との間に相関関係のようなものは認められない。

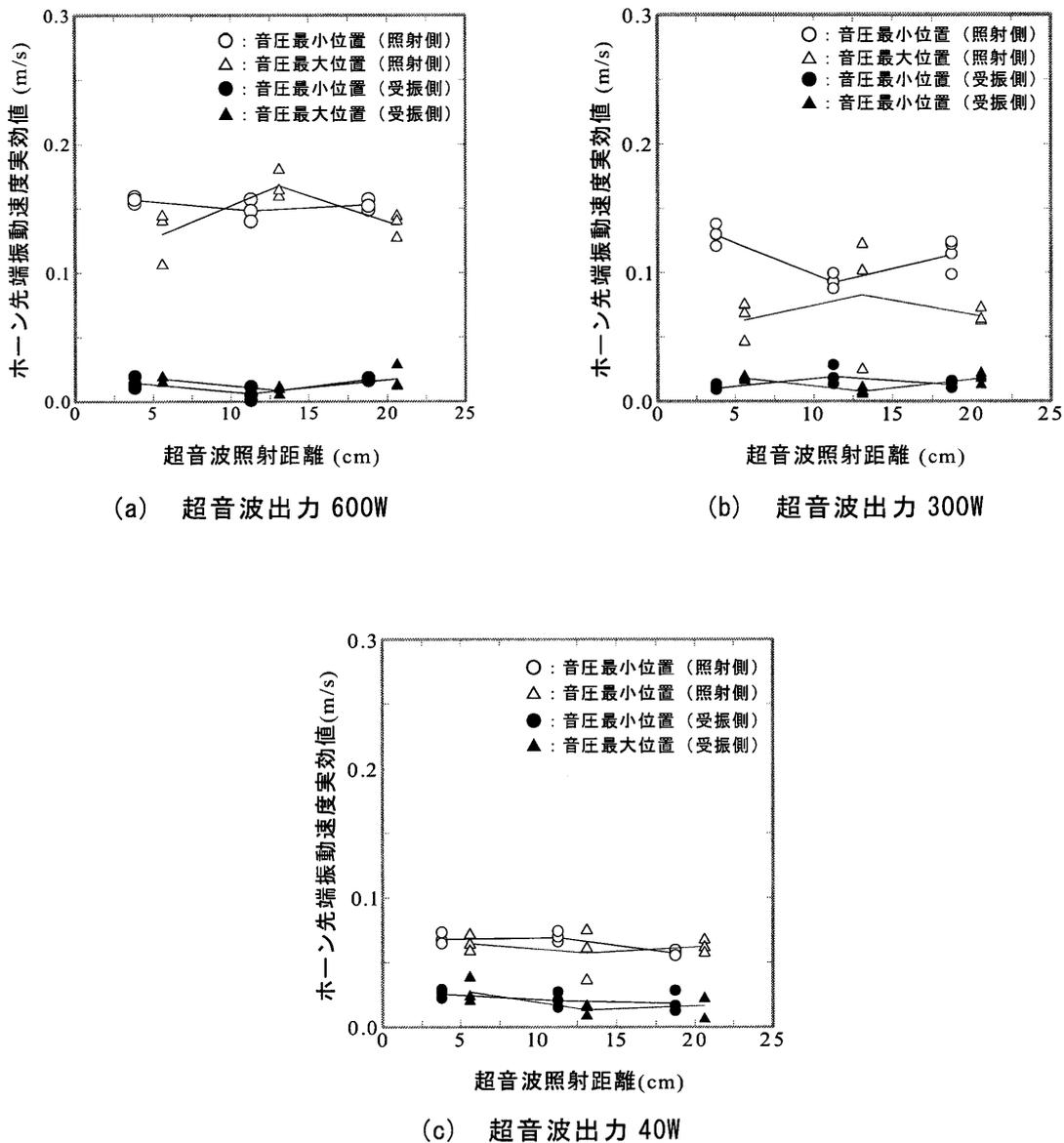


図 2-19 超音波照射距離と超音波振動子ホーン先端速度実効値関係

## 第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

図 2-20 に超音波照射距離と照射側および受振側ホーン先端変位の位相差関係<sup>19)</sup>を示す。また、図 2-21 に図 2-20 の位相差に対応するホーン先端の動きを模式的に示す。照射側と受振側ホーン先端が対向して反対方向に動く場合、位相差は  $0(\text{rad})$ 、同じ向きに動く場合、位相差は  $\pi(\text{rad})$  となる。位相差は受振側ホーン先端変位の位相から照射側ホーン先端変位の位相を差し引いて算出している。位相差が負になる場合、受振側ホーン先端変位の位相が照射側ホーン先端変位の位相より進んでいることを示している。

超音波出力 600W, 300W, 40W の場合、音圧最小位置における位相差は  $1\sim 3\text{rad}$  の範囲にあり、照射側ホーン先端と受振側ホーン先端相互の動きは図 2-21(b)に示すように両者の距離を保った動きをし、一方のホーン先端の動きがもう一方のホーン先端の動きに抵抗しない動き方をしている。音圧最大位置における位相差は超音波出力 600W の場合  $-1\sim 0\text{rad}$  の範囲に、超音波出力 300W の場合ほぼ  $0\text{rad}$ 、超音波出力 40W の場合、値にばらつきはあるが平均値は  $1\text{rad}$  付近にある。音圧最大位置における照射側ホーン先端と受振側ホーン先端相互の動きは、図 2-21(a)に示すように、両者の距離が近づいたり離れたりする動きをし、一方のホーン先端の動きがもう一方のホーン先端の動きに抵抗する動きに近い。音圧最大位置における照射側ホーン先端と受振側ホーン先端相互の動きは超音波出力と超音波照射距離の違いで大きく異なることがわかる。特に超音波出力 600W の場合、音圧最大位置にあたる超音波照射距離 13.1cm における位相差のみが  $-1\text{rad}$  と負の値であることが、他の超音波照射距離 5.6cm, 20.6cm における照射側ホーン先端速度実効値に比べ際立って大きな値になる原因と考えられる。

受振側ホーン先端速度実効値は、照射側の結果と逆の傾向を示している。受振側ホーン先端速度実効値は超音波出力 600W, 300W, 40W とともに超音波照射距離に関わらず同程度の値である。また、超音波照射距離と受振側ホーン先端速度実効値との間に相関関係は認められない。

図 2-22 に超音波照射距離と音の強さの関係を示す。音の強さは式 2-1 で算出され、ホーン先端速度実効値と線型関係にある。したがって、超音波照射距離と音の強さの関係は超音波照射距離とホーン先端速度実効値の関係と同様な傾向が得られる。

超音波出力 600W, 300W, 40W とともに、照射側音の強さは超音波照射距離に関わらず、超音波出力が大きいと大きくなる。一方受振側音の強さは各超音波照射距離において、照射側音の強さが大きいと逆に小さくなることがわかる。また、超音波照射距離に対して音の強さにばらつきが見られるが、これは位相差によるものである。

第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

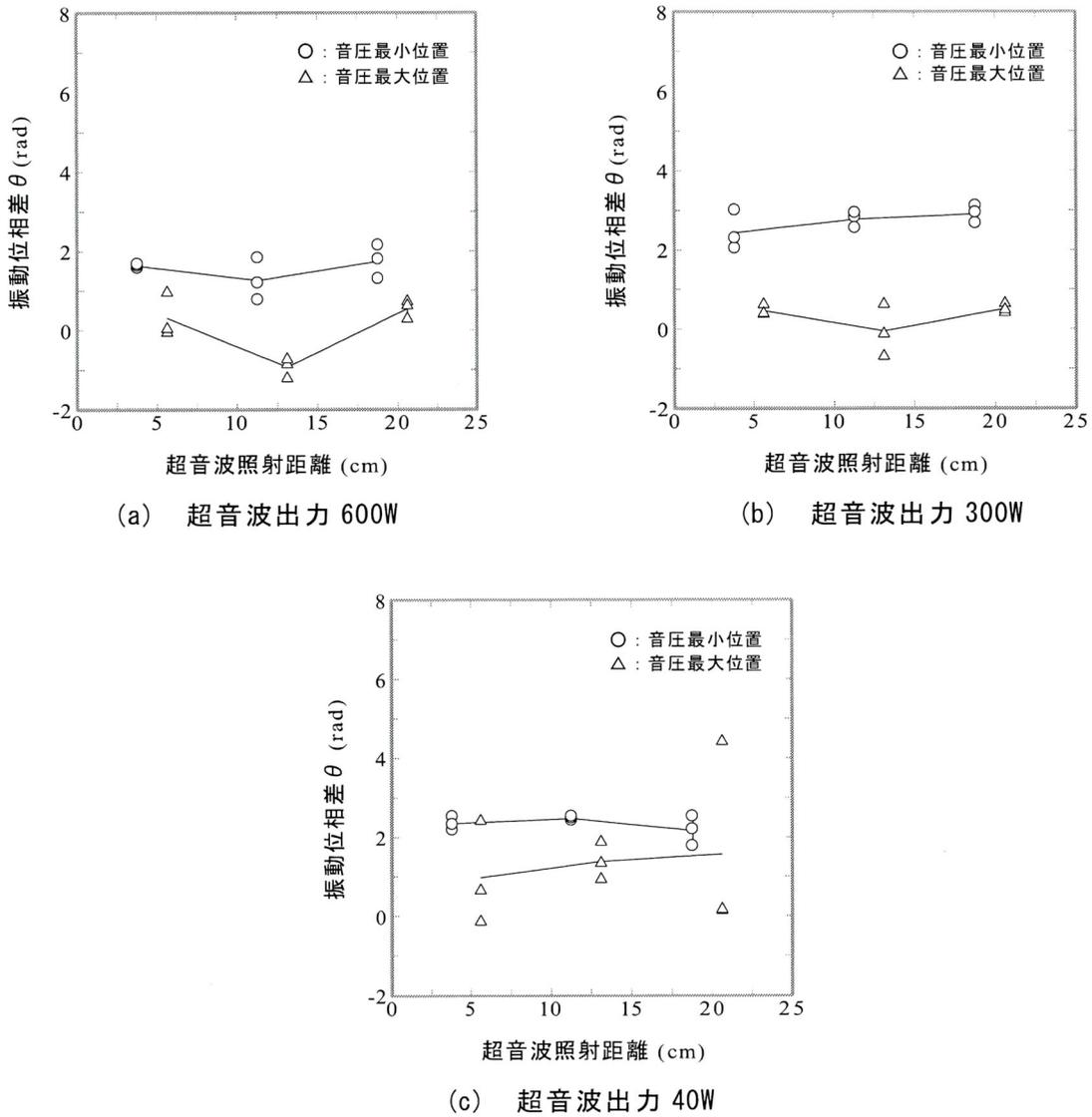


図 2-20 超音波照射距離と照射側，受振側振動子ホーン先端変位位相差関係

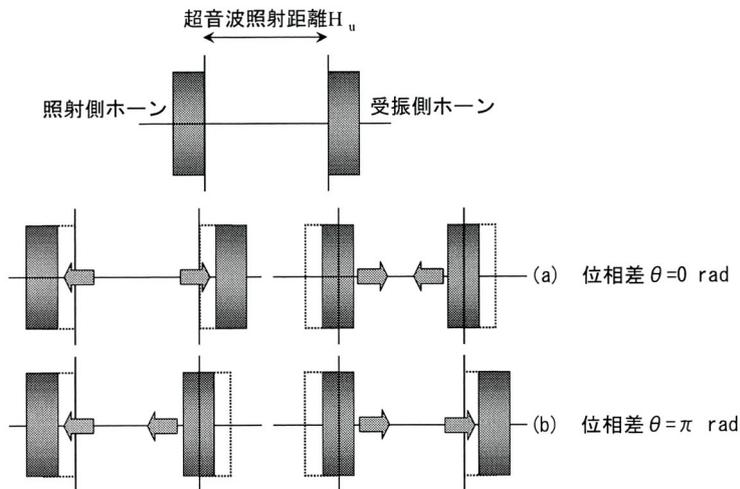


図 2-21 位相差に対応するホーン先端の動き

第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

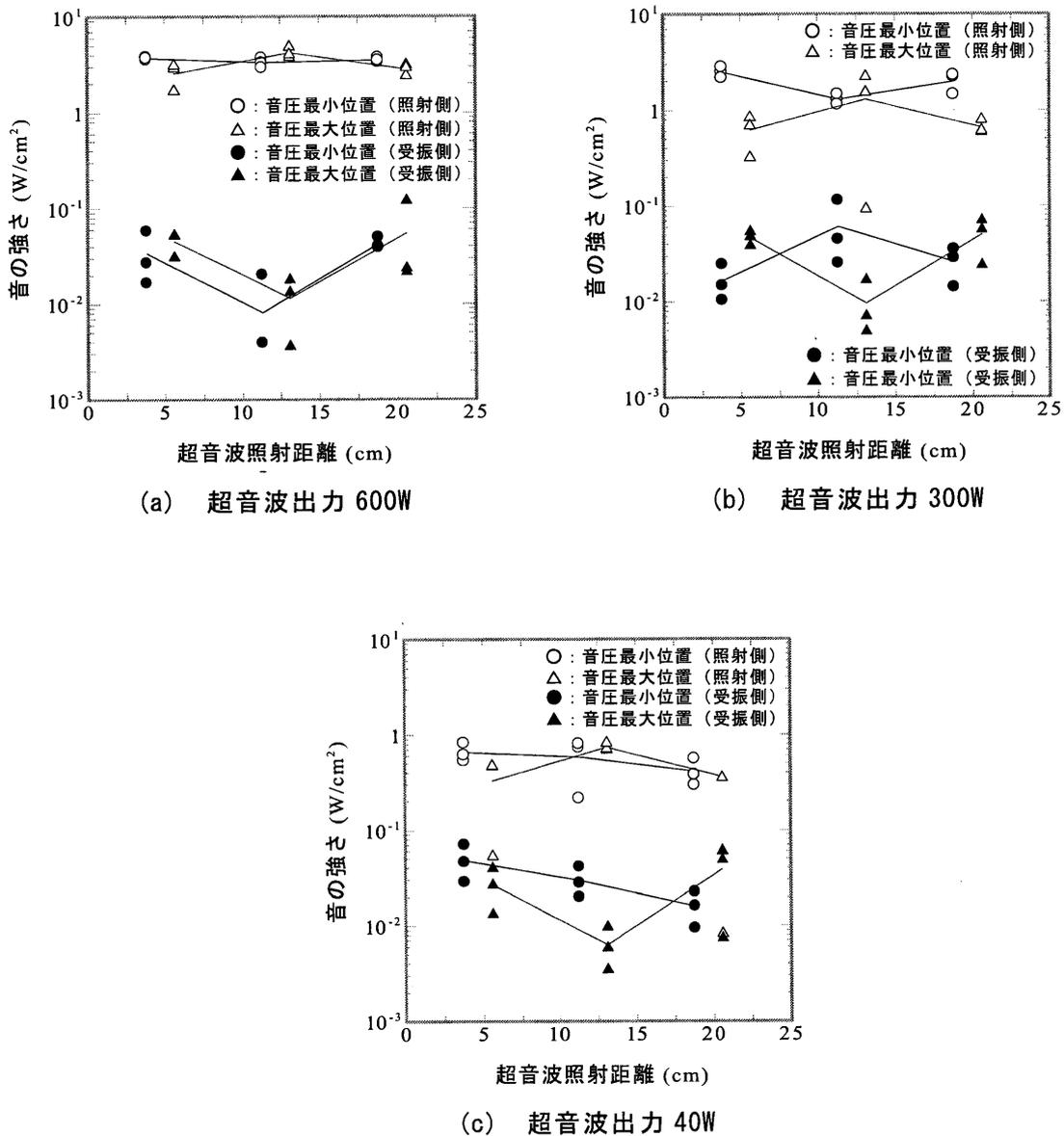


図 2-22 超音波照射距離と音の強さ関係

図 2-23 に図 2-22 の結果に基づいて算出した超音波照射距離と音の強さ比の関係を示す。図は各超音波照射距離において、照射側音の強さに対してどの程度の音の強さが受振側に届くかを調べるため、超音波照射距離を横軸に算術目盛りで、音の強さ比を縦軸に対数目盛りでプロットしている。超音波出力 600W, 300W, 40W の場合、照射側超音波出力が増すと各超音波照射距離において音の強さ比は減少することがわかる。また、総じて音圧最大位置にあたる超音波照射距離における音の強さ比が音圧最小位置にあたる超音波照射距離における値に比べて大きい。音の強さ比は大きさに変動はあるが超音波照射距離に対して相関関係は認められない。

第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

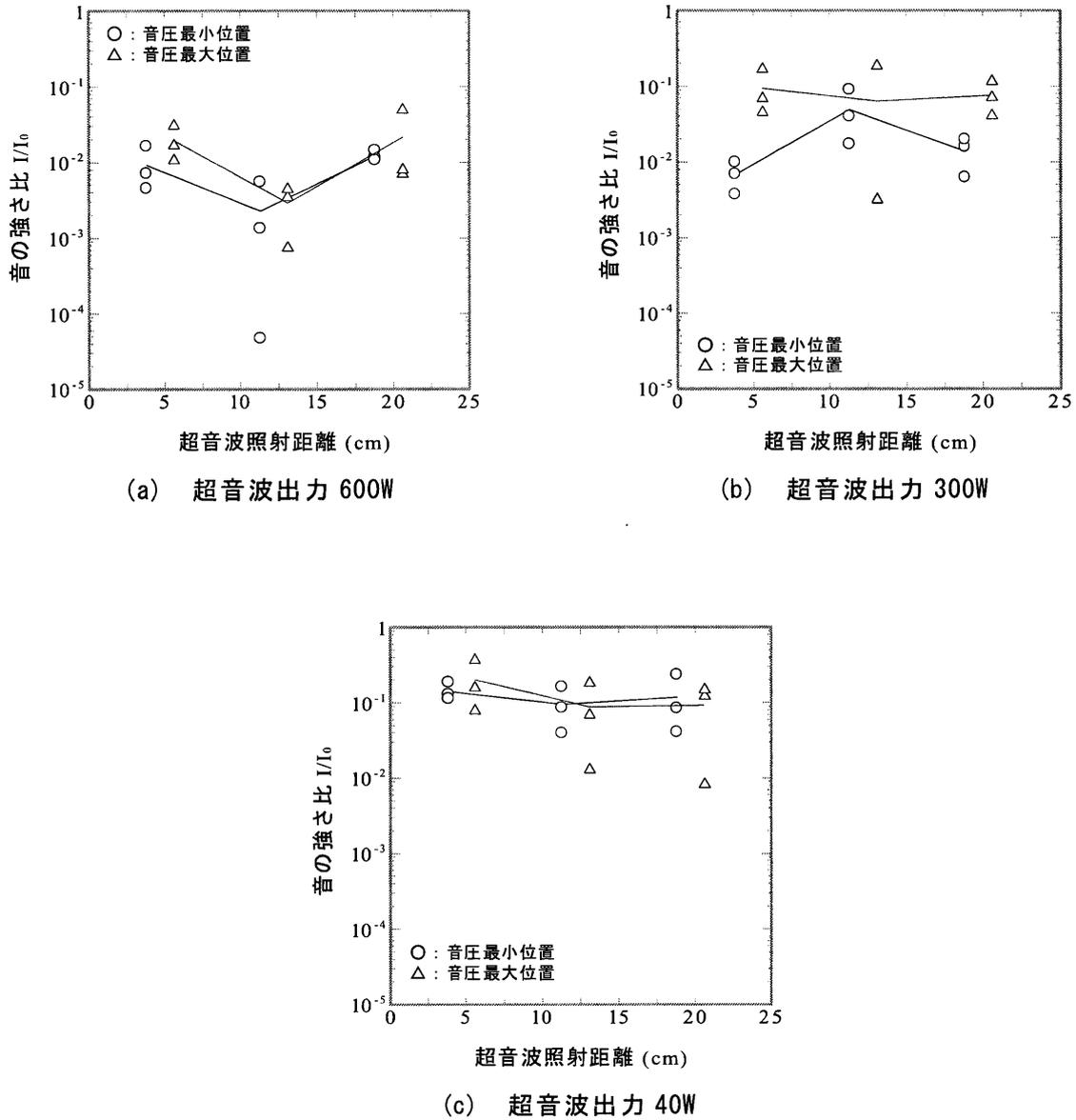
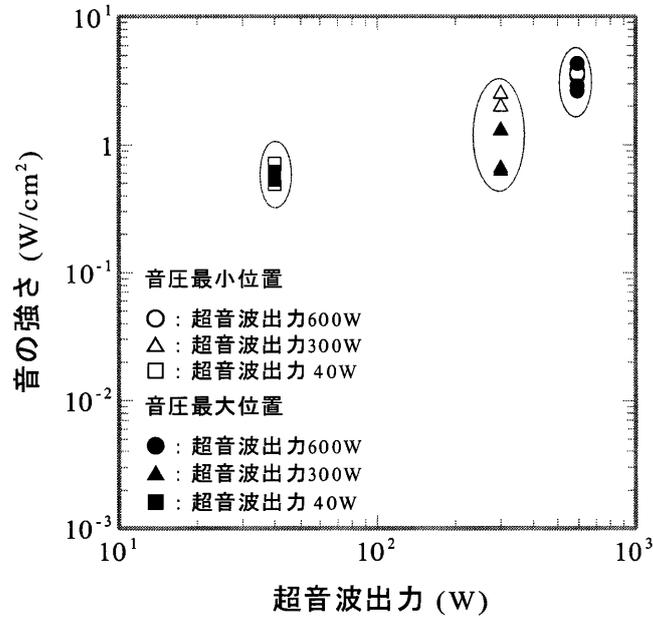


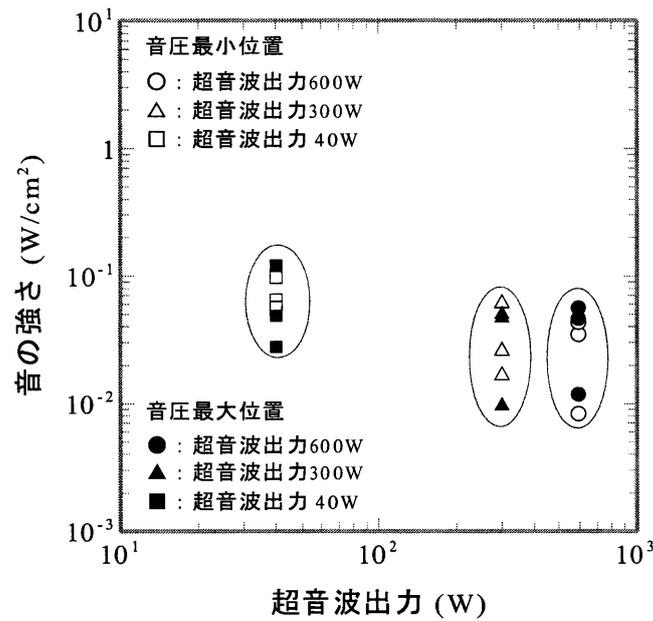
図 2-23 超音波照射距離と音の強さ比関係

また各超音波照射距離における音の強さ比が変動している理由は、前述のとおり照射側と受振側ホーン先端変位の位相差によるものである。

図 2-24 に図 2-22 の結果に基づいて算出した超音波出力と音の強さの関係を示す。超音波出力 600W, 300W, 40W の場合、照射側ホーン先端の音の強さは超音波出力 600W で約  $2\sim 4\text{W/cm}^2$ , 300W で約  $0.7\sim 3\text{W/cm}^2$ , 40W で約  $0.4\sim 0.7\text{W/cm}^2$  と、超音波出力が大きくなると音の強さが大きくなる傾向が認められる。しかし受振側ホーン先端の音の強さは超音波出力 600W で約  $0.008\sim 0.05\text{W/cm}^2$ , 300W で約  $0.01\sim 0.05\text{W/cm}^2$ , 40W で約  $0.03\sim 0.1\text{W/cm}^2$  と照射側超音波出力が大きくなると、音の強さは減少する傾



(a) 照射側



(b) 受振側

図 2-24 超音波出力と音の強さ関係

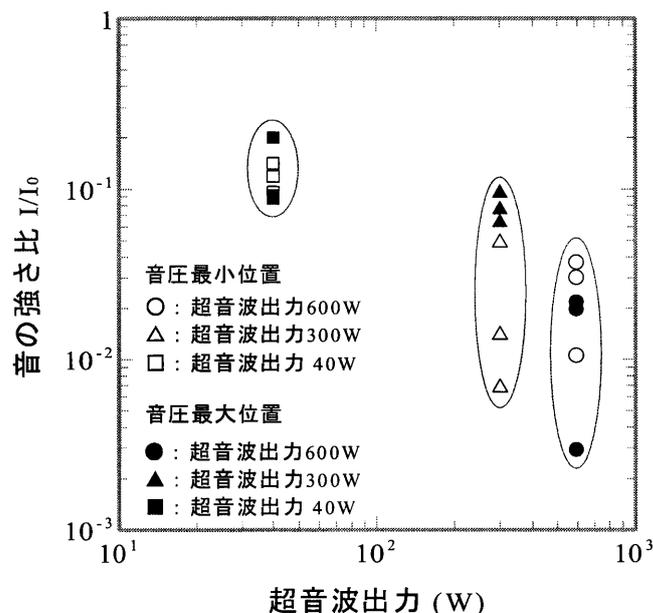


図 2-25 超音波出力と照射側ホーン先端から水中に照射される超音波の音の強さに対する受振側ホーン先端に届く音の強さの割合

向にある。また、照射側超音波出力を 300W から 600W に 2 倍に増加させても、受振側の音の強さに変化がないことがわかる。

図 2-25 は図 2-23 の結果に基づいて算出した、超音波出力と照射側ホーン先端から水中に照射される超音波の音の強さが受振側ホーン先端に届く割合を示している。受振側ホーン先端に届く音の強さの割合は照射側超音波出力 600W の場合約 1%程度、300W の場合 3%程度、40W の場合 15%程度である。照射側超音波出力が小さいほど受振側に届く音の強さの割合は大きく、超音波のエネルギーを伝える場合、超音波出力が小さいほど効率が良いことがわかる。

## 2—5—2 直流成分

図 2-26 に超音波照射距離と直流成分の関係を示す。図には最大値と最小値の幅も示している。超音波出力 600W, 300W, 40W の場合, 超音波出力が 600W, 300W, 40W と低下すると直流成分が届く距離は短くなることがわかる。超音波出力 600W の場合, 音圧最小位置, 音圧最大位置に関わらず超音波照射距離と直流成分との間に直線的な関係が認められる。直流成分は超音波照射距離 20.6cm で 0.5Pa 程度に減少しており, 照射側の超音波出力 600W で直流成分が届く距離は 20.6cm 程度であることがわかる。

超音波出力 300W の場合, 音圧最小位置にあたる超音波照射距離 11.3cm, および音圧最大位置にあたる超音波照射距離 13.1cm で直流成分は 0.5Pa 程度になり, 超音波照射距離 20.6cm まで 0.5Pa 程度で推移する。超音波照射距離 3.8cm と 5.6cm における直流成分の平均値を比較すると, 平均値は超音波照射距離 5.6cm で大きい。しかし, 超音波照射距離 3.8cm と 5.6cm における直流成分の最大値と最小値の幅を比較すると, 超音波照射距離 5.6cm における値が超音波照射距離 3.8cm における値の 3.5 倍程度ある。この最大値と最小値の幅を考慮して, 両者の値を見直すと, 超音波照射距離 3.8cm における直流成分が超音波照射距離 5.6cm の直流成分と同程度になると推測できる。

超音波出力 40W の場合, 音圧最小位置にあたる超音波照射距離 11.3cm まで直流成分の大きさは 2Pa 程度, それを越え 20.6cm でほぼ 0Pa になっている。超音波出力 40W の場合, 直流成分はほとんど誘起されないと推測できる。

図 2-27 に図 2-22 に基づいて, 超音波出力と照射側ホーン先端の音の強さが受振側ホーン先端に届く間に失われた音の強さの関係を示す。照射側超音波出力 40W で  $0.5\text{W}/\text{cm}^2$  程度, 超音波出力 300W で  $1\text{W}/\text{cm}^2$  程度, 超音波出力 600W で  $3\text{W}/\text{cm}^2$  程度の音の強さが損失している。照射側の超音波出力 40W より 600W の方が, 音の強さの損失が大きくなることがわかる。

図 2-28 に損失音の強さと直流成分の関係を示す。損失音の強さと直流成分との間に右肩上がりの傾向が見られる。超音波のエネルギーが直流成分を誘起するために使われ, 音の強さの損失分が大きいほど誘起される直流成分も大きいことがわかる。

第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

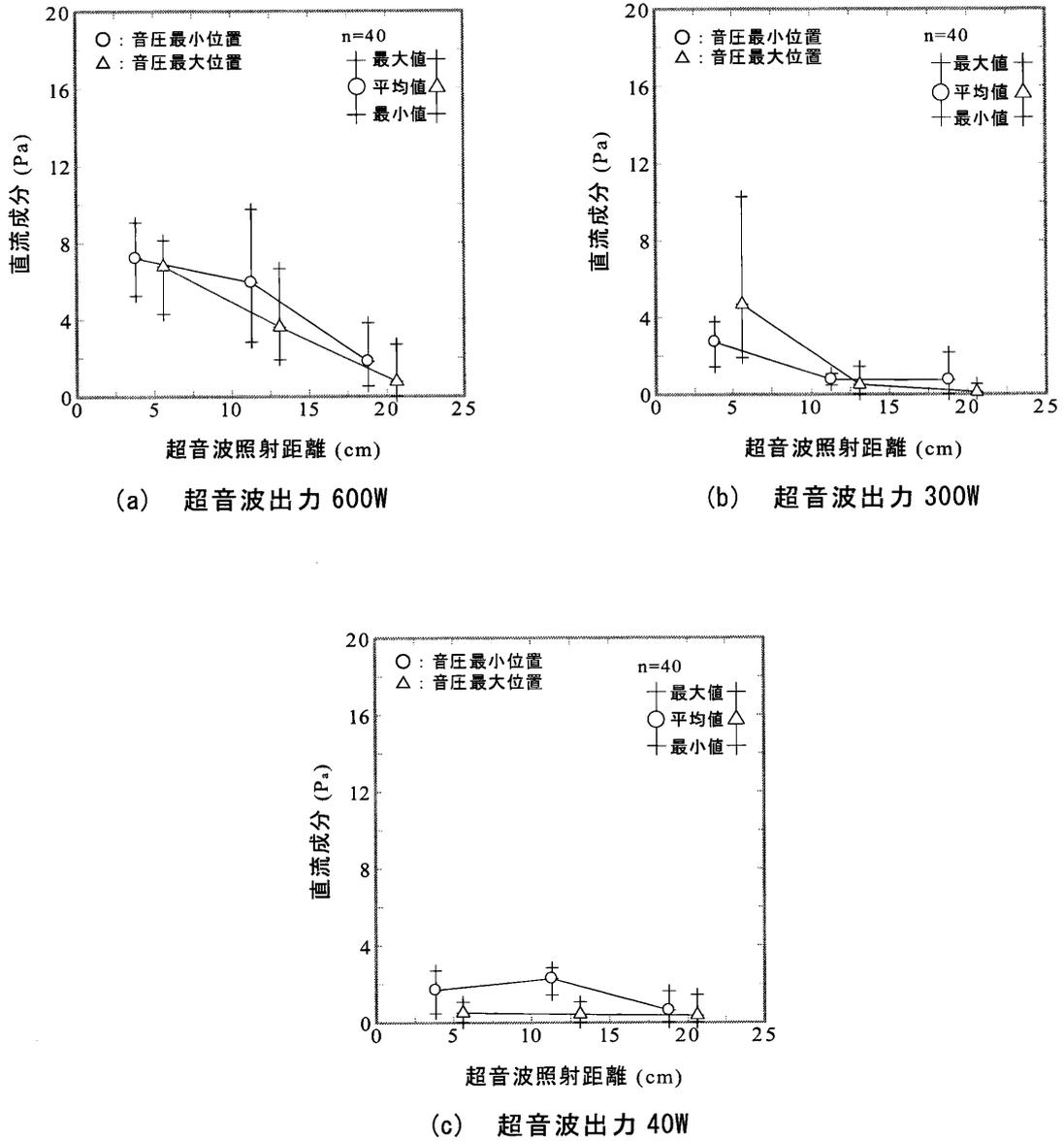


図 2-26 超音波照射距離と直流成分関係

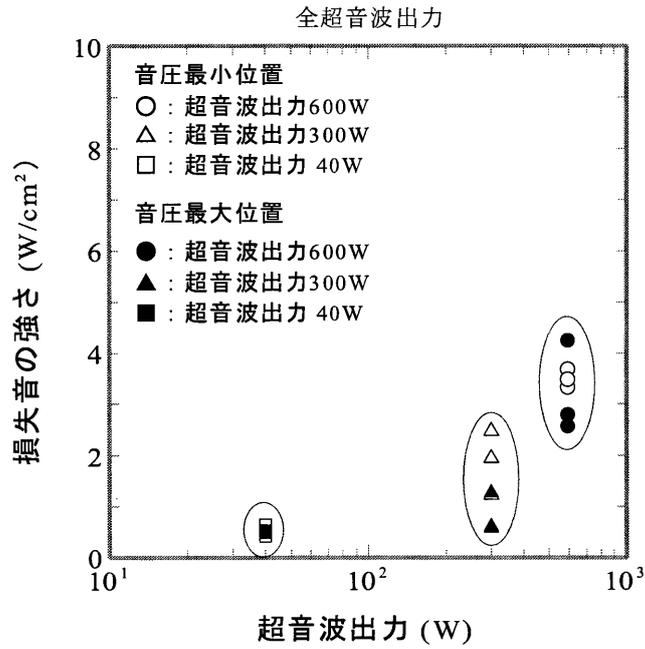


図 2-27 超音波出力と照射側ホーン先端の音の強さが受振側ホーン先端に届く間に失われた音の強さの関係

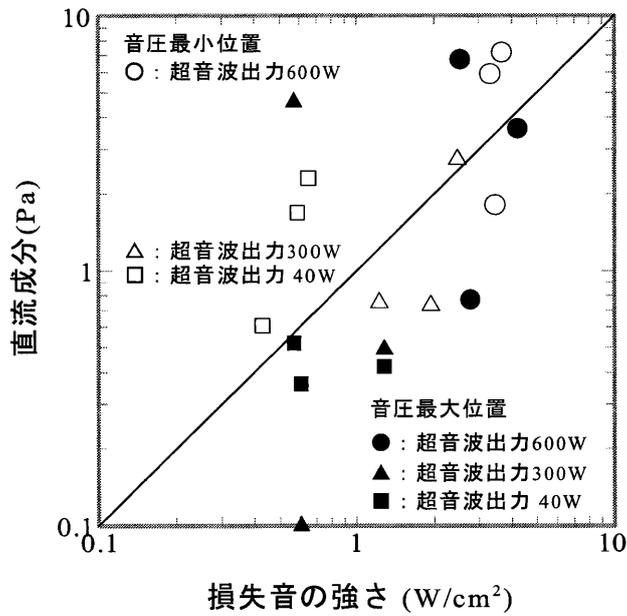


図 2-28 損失音の強さと直流成分関係

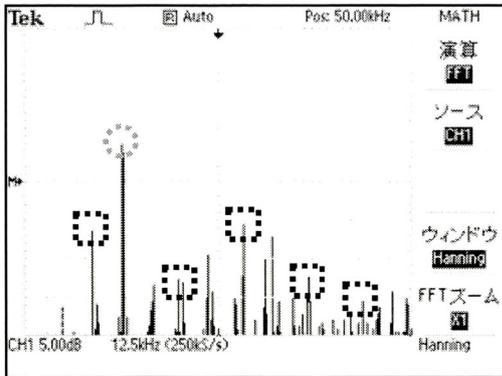
### 2—5—3 キャビテーション

図 2-29, 図 2-30, 図 2-31, 図 2-32 に超音波照射距離に対して照射側の超音波出力を 40W, 300W, 600W に変化させて超音波を水中に照射して, 観測された音響パワースペクトル値 (sound spectrum) (dB)を示す. また図 2-29(d)にスペクトル図に表示される要素の意味を説明している. 音響パワースペクトル値(dB)は音圧計のプロープで受振した超音波の音圧(Pa)を電圧に変換し, その電圧波形の振幅の大きさを表している. 表示は電圧 (実効値)  $1V_{rms}$  を 0(dB)としている. ここで示す音響パワースペクトル値 (dB)は音波の周波数を分析し, 得られた異なる周波数の波が持つ個々の振幅を相対的に比較するもので, 通常音の強さを表す指標として用いられる音圧レベル SPL (sound pressure level) <sup>8)</sup>とは異なる.

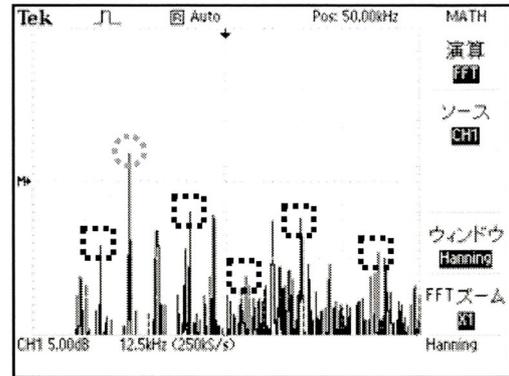
図 2-29, 図 2-30, 図 2-31, 図 2-32 においてキャビテーションが発生した場合に観測されるノイズが持つ特徴的な周波数が読み取れる. 超音波出力 40W の場合, 基本周波数 20kHz に加えて, 低調波 10kHz, 高調波 30, 40, 50, 60, 80, 100, 110kHz を示すスペクトルが確認できる. 超音波出力を 40W から 300W そして 600W に増すと, 基本周波, 低調波, 高調波の間に無数の周波数を持つノイズの増加が認められ, ランダムな大きさの気泡の発生と気泡のランダムな微小振動が連続して起きていることを示唆している.

図 2-29, 図 2-30 と図 2-31, 図 2-32 を比較すると, ホーン先端中央と音圧計のプロープ中央の距離, すなわち超音波受振距離  $L_u$  が近いと, 基本周波, 低調波, 高調波の間に無数に現れるノイズの音響パワースペクトル値(dB)が大きく, より活発な気泡の発生と気泡のランダムな微小振動が生じていることがわかる. 既往の研究から超音波を水中に照射した場合, キャビテーションが発生する音のエネルギーのしきい値は  $0.33W/cm^2$  であることが報告 <sup>10)</sup>されている. 図 2-24 を見ると, 超音波出力 600W, 300W, 40W のいずれの場合も, 照射側ホーン先端から照射される音の強さは  $0.33W/cm^2$  を越えている. この結果からもキャビテーションが発生していることが証明される. 照射側の超音波出力が 40W より 600W の方がキャビテーションの発生に必要な音の強さが大きく, ランダムな大きさの気泡の発生とよりランダムな気泡の微小振動を誘起させることができる. また, 超音波を照射するホーンに近いほど, 基本周波数, 低調波, 高調波の発生に加え, これら周波数の間に現れるノイズの音響パワースペクトル値 (dB)が大きい.

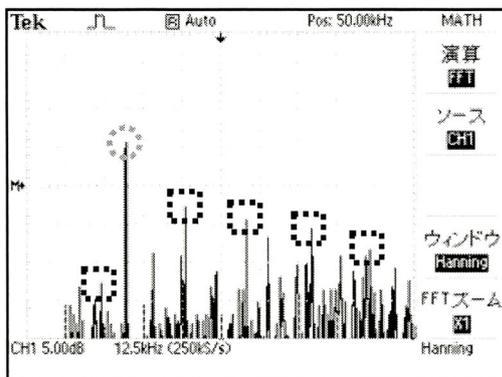
第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念



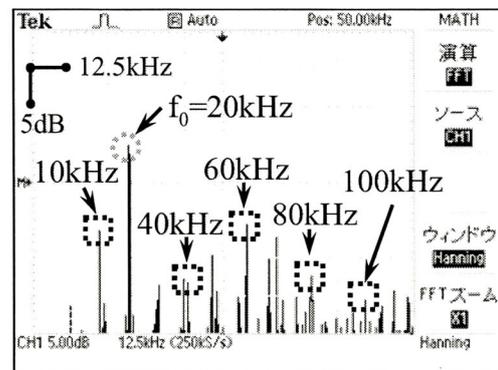
(a) 超音波出力 40W



(b) 超音波出力 300W



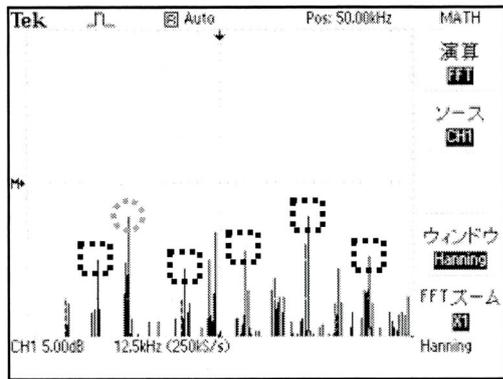
(c) 超音波出力 600W



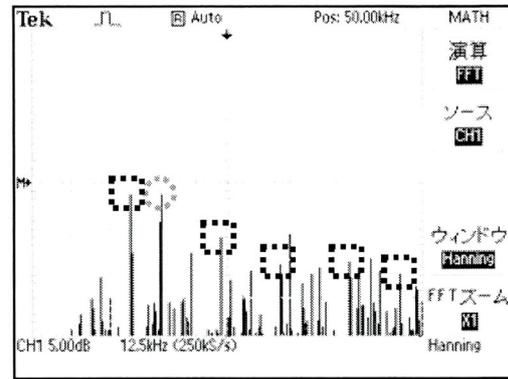
(d) 表示要素説明

図 2-29 超音波照射距離に対する音響パワースペクトル値  
(超音波照射距離  $H_0=3.8\text{cm}$ )

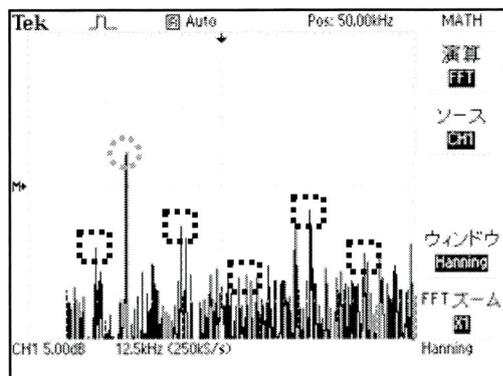
第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念



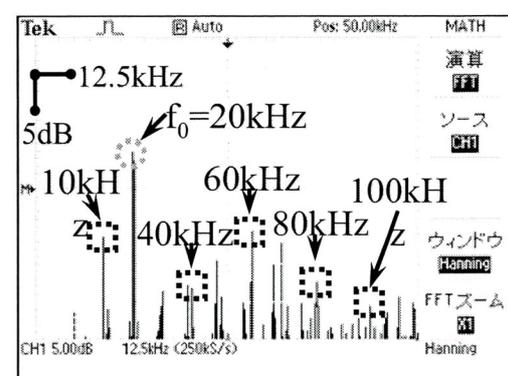
(a) 超音波出力 40W



(b) 超音波出力 300W

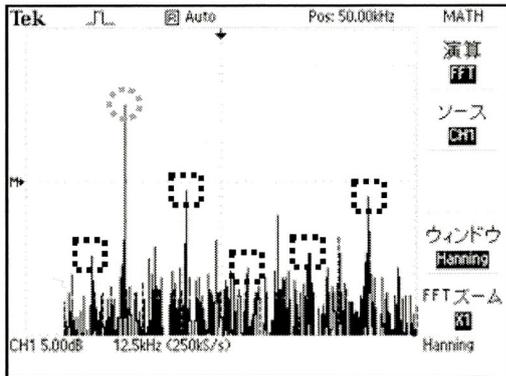


(c) 超音波出力 600W

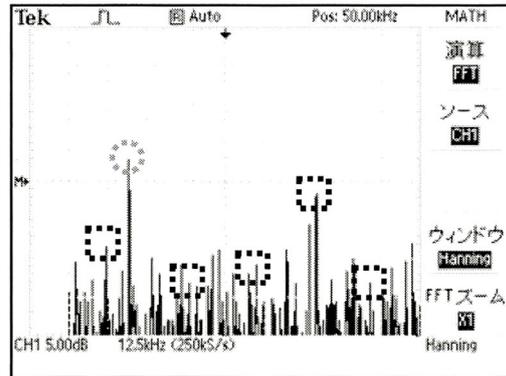


(d) 表示要素説明

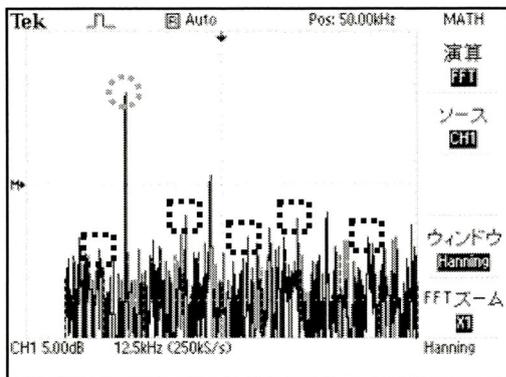
図 2-30 超音波照射距離に対する音響パワースペクトル値  
(超音波照射距離  $H_0=5.6\text{cm}$ )



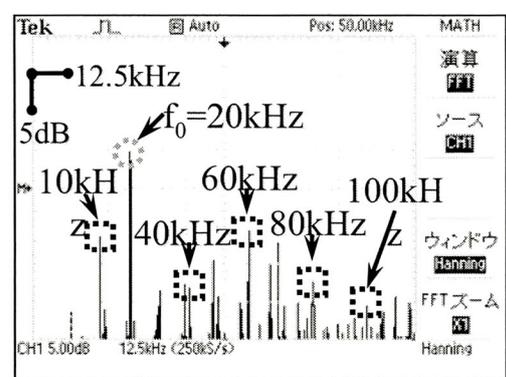
(a) 超音波出力 40W



(b) 超音波出力 300W



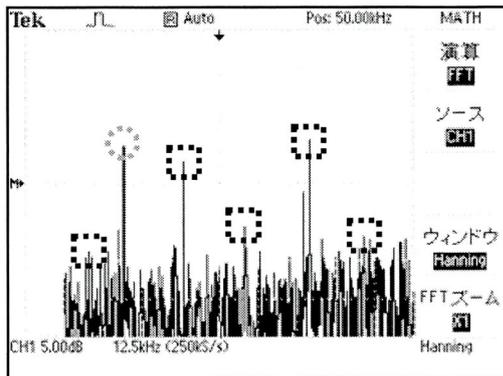
(c) 超音波出力 600W



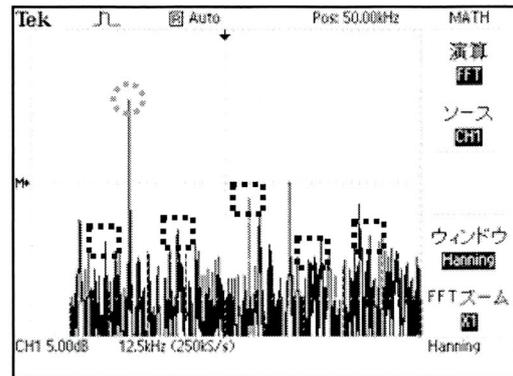
(d) 表示要素説明

図 2-31 超音波照射距離に対する音響パワースペクトル値  
(超音波照射距離  $H_0=18.8\text{cm}$ )

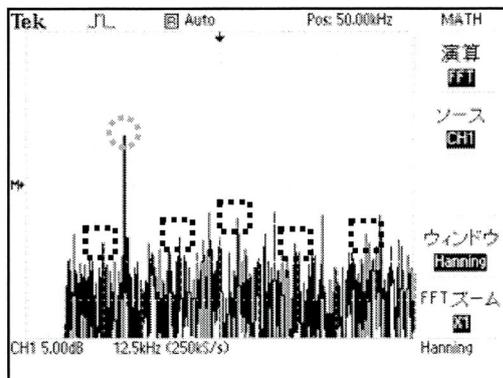
第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念



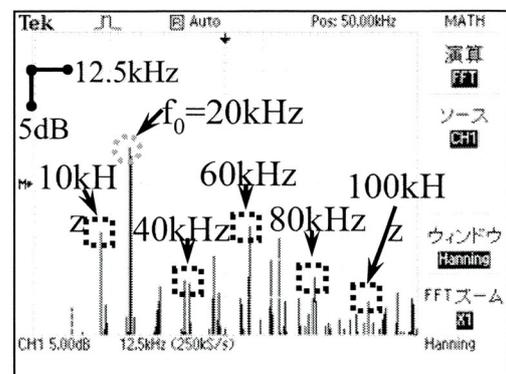
(a) 超音波出力 40W



(b) 超音波出力 300W



(c) 超音波出力 600W



(d) 表示要素説明

図 2-32 超音波照射距離に対する音響パワースペクトル値  
(超音波照射距離  $H_u=20.6\text{cm}$ )

## 2—6 砂の高密度化概念

超音波を水中に照射すると図 2-33 に示すように疎密波が水中を伝搬すると圧力の変動，すなわち振動力が伝わり，疎密波のエネルギーの 1 部は直流成分を誘起し，1 部はキャビテーションを発生させることが検証できた．そして図 2-34 に示すように，振動力，直流成分，キャビテーションが水中で粒子を動かす力であると考えた場合，図 2-35 に示すような超音波照射による粒状材料の高密度化概念が導きだせる．水中に超音波を照射しながら粒状材料を連続して堆積させると，超音波によって誘起される力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力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される．

図 2-36 に供試体レベルにおける超音波高密度化方法と水中落下打撃法による締固め状況を比較して示す．

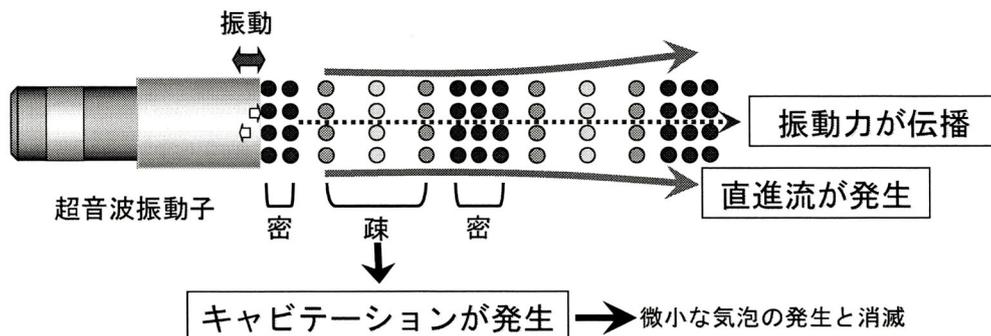


図-23 超音波により誘起される力の種類

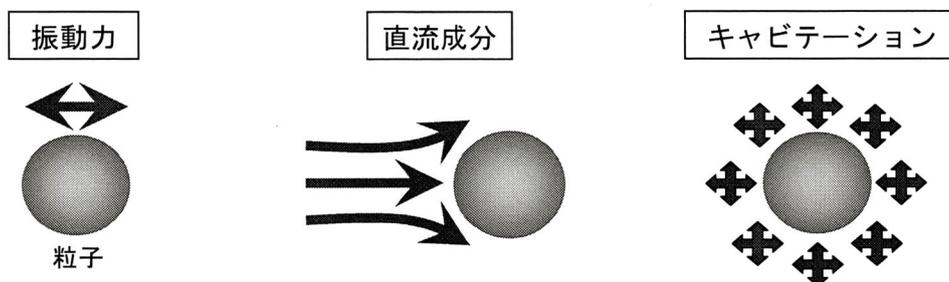


図-24 粒子を動かす振動力，直流成分，キャビテーション

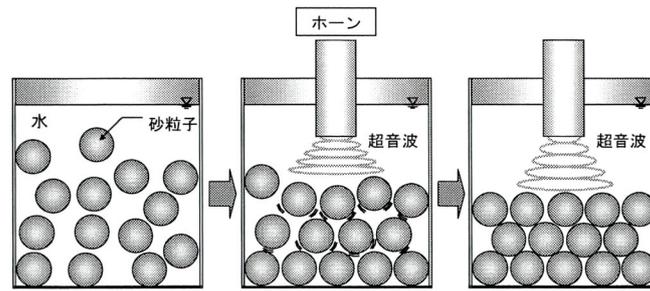


図 2-35 超音波照射による砂の高密度化概念

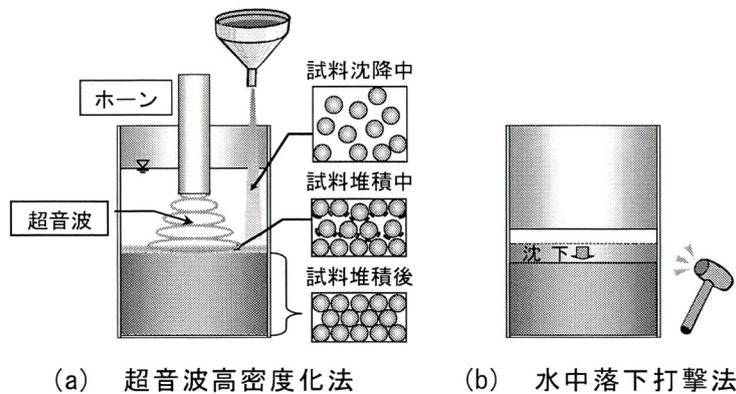


図 2-36 超音波高密度化法と水中落下打撃法の比較

超音波高密度化法は、図 2-36(a)に示すように粒状材料の個々の粒子を微小振動させて、粒子の再配列を促し粒子 1 個の質量に相当する力で高密度化する方法である。一方、水中落下打撃法は、図 2-36(b)に示すように、まず所定量の粒状材料を容器に詰め、容器を打撃して発生する振動によって容器内にある粒子を振動させ、粒子の再配列を促すもので、粒子の集合体としての質量に相当する力で締固める方法である。サンドコンパクションパイル工法における砂の締固め方法は、ケーシングパイプ先端から地盤中に排出した砂の集合体をケーシングパイプの再貫入によって砂を締固めるもので、水中落下打撃法のように砂の集合体に振動を加えるという点で類似している。一方、ケーシングパイプ先端から地盤中に砂を排出する過程で、砂に超音波を照射しながら砂を高密度化する超音波高密度化法が実際の施工に適用できれば、砂の締固めに必要となる力はサンドコンパクションパイル工法と比較して小さくなると考えられる。結果として騒音、振動および施工に伴う消費電力の少ない砂杭の造成工法になることが推測できる。

## 2—7 本章の要約

本章では、超音波を水中に照射すると粗密波による振動力が伝わり、直流成分、キャビテーションによる力が誘起されることを実験により検証した。そして、これら超音波により誘起される力が砂の高密度化に関わるという仮定のもと、超音波による粒状材料の高密度化概念を提示した。

### 音の強さ測定で得られた知見

- 1) 超音波出力 600W, 300W, 40W とも、照射側ホーン先端の音の強さは超音波照射距離に関わらず、超音波出力が増すと大きくなる。一方受振側ホーン先端の音の強さは照射側ホーン先端の音の強さが増すと逆に小さくなる。
- 2) 超音波出力 600W, 300W の場合、照射側超音波出力を 300W から 600W に 2 倍に増加させても、受振側ホーン先端の音の強さは変わらない。
- 3) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合、照射側超音波出力が小さいほど受振側に届く音の強さの割合は大きく、超音波出力が小さいほど超音波のエネルギーを効率が良く伝えられる。
- 4) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合、音圧最大位置における音の強さ比は音圧最小位置における音の強さ比に比べて大きい。
- 5) 音の強さ比と超音波照射距離との相関関係は認められない。

### 直流成分測定で得られた知見

- 6) 照射側の超音波出力が 40W より 600W で、音の強さの損失が大きくなる。
- 7) 損失音の強さと直流成分との間に相関関係がある。超音波のエネルギーは直流成分を誘起するために使われ、音の強さの損失分が大きいほど誘起される直流成分も大きい。
- 8) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合、超音波出力が 600W, 300W, 40W と低下すると直流成分が届く距離は短くなる。照射側の超音波出力が 600W の場合、直流成分が届く距離は 20.6cm 程度である。超音波出力 40W の場合、直流成分はほとんど誘起されない。

キャビテーション測定で得られた知見

- 9) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合, 超音波照射距離 3.8cm, 5.6cm, 18.8cm, 20.6cm で水中に超音波を照射すると, キャビテーションが発生した場合に観測されるノイズが持つ特徴的な周波数が計測できる. 超音波出力を 40W から 300W そして 600W に増すと, 基本周波, 低調波, 高調波の間に無数の周波数を持つノイズの増加が認められ, ランダムな大きさの気泡の発生と気泡のランダムな微小振動が連続して起きていることがわかる.
- 10) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合, 照射側ホーン先端から照射される音の強さはキャビテーションが発生する音の強さのしきい値  $0.33\text{W}/\text{cm}^2$  を越えており, キャビテーションが発生していることが証明される.
- 11) 照射側の超音波出力が 40W より 600W の方がキャビテーションの発生に必要な音の強さが大きく, また, 超音波を照射するホーンに近いほど, 基本周波数, 低調波, 高調波の発生に加え, これら周波数の間に現れるノイズの音響パワースペクトル値 (dB) が大きい.

粒状材料の高密度化概念

- 12) 超音波を水中に照射すると誘起される振動力, 直流成分, キャビテーションによる力が粒子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て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される.

参考文献

- 1) 本多敬介：超音波の世界，pp.123-167，日本放送出版会，1994.
- 2) 一ノ瀬昇，高橋貞行：やさしい超音波工学，pp.294-297，(株)工業調査会，1999.
- 3) 鎌倉友男，熊本芳朗：音響流と放射圧，信学技法,US96-93, EA96-97, pp.31-38, (社)電子情報通信学会，1997.
- 4) 長谷川高陽：ランジュバン放射圧に関する統一理論，日本音響学会誌 52 卷 3 号，pp187-194, 1996.
- 5) Takahi Hasegawa, Tohru Kido, Takeshi Iizuka and Chihiro Mitsuoka : J.Acoust.Soc.Jpn.(E) 21, 3, pp.145-152, 2000.
- 6) 島川正憲：超音波工学（理論と実際），pp.14-16, p.19, pp.21-22, (株)工業調査会，1975.
- 7) 富川義朗：超音波エレクトロニクス振動論，pp.3-6, (株)朝倉書店，1998.
- 8) 大賀寿朗，鎌倉友男，斎藤繁実，武田一哉：音響エレクトロニクス，pp.28-29, pp.52-53, (株)培風館，2005.
- 9) 根岸勝雄，熊本乙彦：超音波によるキャビテーション雑音について，音響学会講演論文集，pp.21-22, 1958.
- 10) 奥島基良，実吉純一：超音波空洞現象発生時の音圧波形観測，音響学会講演論文集，pp.3-4, 1959.
- 11) 上羽貞行，森栄司：ボルト締めランジュバン形縦振動子の共振条件およびボルト直径の検討，日本音響学会誌 34 卷 11 号，pp.635-640, 1978.
- 12) 日本学術振興会，製鋼第 19 委員会編，超音波探傷法，pp.34-35, 日刊工業新聞社，1974.
- 13) 実吉純一，菊池喜充，熊本乙彦：超音波技術便覧，pp.20-21, 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) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，pp.49-52, 技報堂出版，1993.
- 17) 実吉純一，菊池喜充，熊本乙彦：超音波技術便覧，pp.445-45, 日刊工業新聞社，1960.
- 18) 菊池恒男，佐藤宗純，吉岡正裕：産総研における超音波標準の開発—天秤法による超音波振動子の「放射コンダクタンス」校正システム，信学技法 US2003-56, pp.25-30,

## 第2章 超音波により誘起される力と超音波による砂の高密度化概念

電子情報通信学会，2003.

19)磯田八郎，荒隆裕：基礎電気回路（上），pp.83-86，オーム社，2004.

## 第3章 超音波による砂の高密度化方法

### 3—1 概説

図 1-3(a)に示したように、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張を行うことで砂杭を造成する工法である。一方、図 1-3(b)に示したように、高密度砂杭工法はケーシングパイプ内と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が造成できると考えられる。上記の方法が実用化できれば、施工時に発生する騒音、振動を暗騒音、暗振動レベルに低減し、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大幅に低減でき、同時に細粒材料、リサイクル材料などを利用して軟弱地盤中に高密度な粒状材料の杭を効率よく造成する地盤改良工法<sup>1)</sup>になると考えられる。

本章では、超音波供試体作製装置<sup>2)</sup>を開発し、要素試験レベルにおいて超音波照射による試料の高密度特性の把握および作製した供試体のせん断特性を調べた。

### 3—2 開発した超音波供試体作製装置

#### 3—2—1 装置の概要

図 3-1 に超音波による砂の高密度化の概念を応用して開発した超音波供試体作製装置の概要を示す。

本装置の特徴は、超音波によって所定の密度で粒状材料の高密度化ができる

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

ことにある。装置は次に示す 4 つの主要部位で構成される。超音波振動子①に取り付けた先端ホーン②（以下ホーンと記述する。）で構成される振動体。振動子部位を格納する空間を中心部に持ち、外郭に粒状材料の貯留と排出を行なう中空円筒形の部位を持つ貯留容器③。ホーン②を水中に保持する機能と貯留容器から排出された粒状材料を透明アクリル製モールドに導くホッパー④。超音波振動子と貯留容器を昇降させる昇降装置⑤。

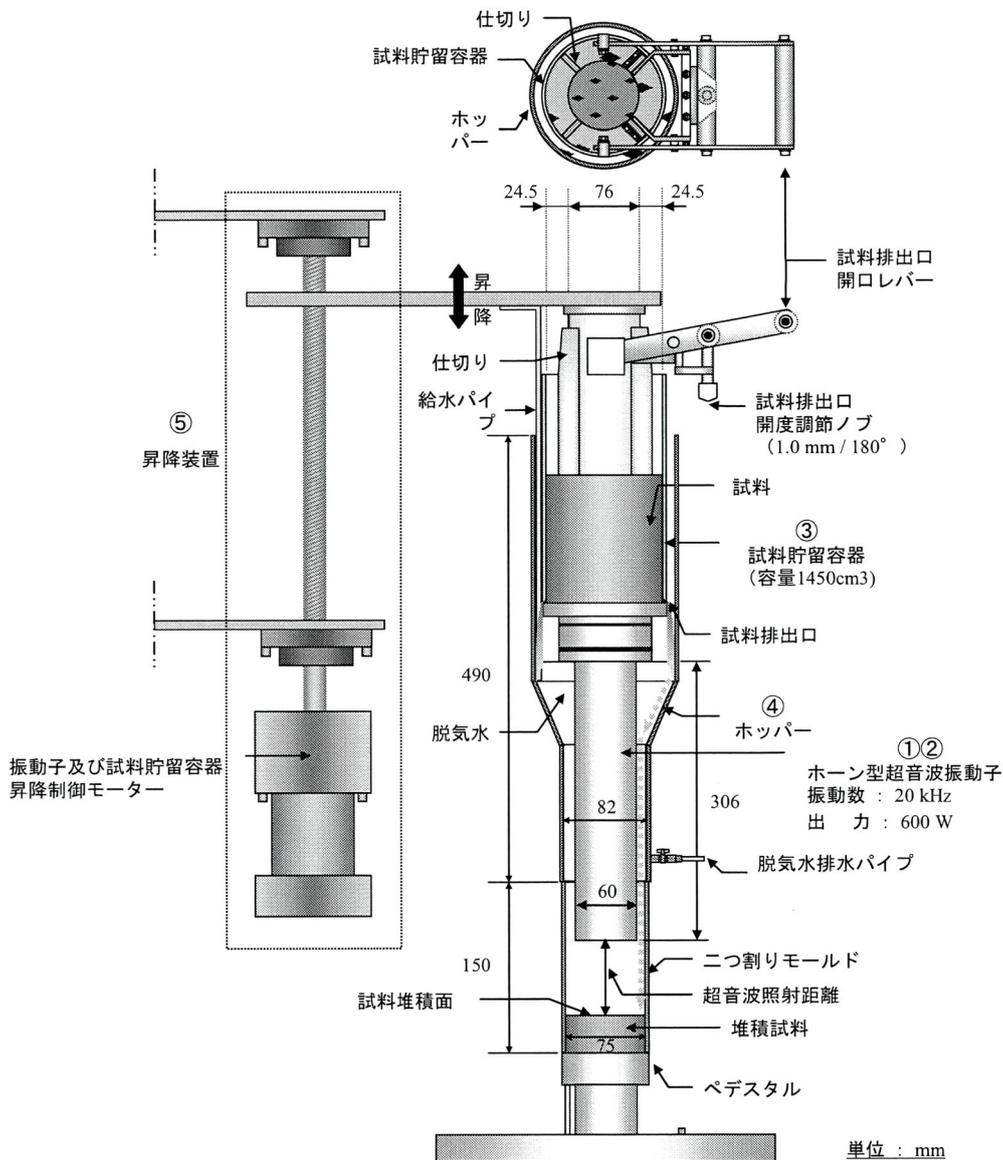


図 3-1 超音波供試体作製装置の概要

### 3—2—2 主要部位の仕様

#### (1) 振動体

超音波振動子は超音波発振器に接続し、電圧 200V で駆動させる振動数 20kHz、ボルト締めランジュバン型振動子<sup>3)</sup>である。超音波発振器の出力<sup>4)</sup>は(以下超音波出力と記述する。)下限 40W~上限 600W である。本装置は超音波振動子を貯留容器中心部に格納し、振動子先端に長さ 31.9cm のホーン<sup>3)</sup>を取り付け、露出させた構造である。

#### (2) 貯留容器

粒状材料を貯留する部位は粒状材料を周囲に均等に排出させる目的で仕切り板によって 4 区画に分割している。各区画の容積は  $362.5\text{cm}^3$  で、4 区画合わせた容積は  $1450\text{cm}^3$  であり、最大寸法、直径 7.5cm、高さ 15cm の円筒形供試体が作製できる量に余裕を含めた量に匹敵する。貯留容器の下部には粒状材料を周囲 360 度に排出できる開口機能があり、貯留容器の外側壁を上部に引き上げることで開口する仕組みになっている。この開口高さは上部開口高調節ノブで最大 5mm まで 0.5mm 単位で調節でき、粒状材料の投入速度が開口高さによって制御できる。

#### (3) ホッパー

超音波振動子はホーン全体を水中に没してホーンから超音波を水中に照射した場合、超音波出力最小 40W~最大 600W に相当する性能が発揮できる仕様であるため、ホッパー④はホーンを水中に保持できるように水を貯留できる構造にしている。水はホッパー上部給水パイプから外部水中ポンプによって注水でき、注水量が調節できる。ホッパー内の水の排出は下部排水パイプから行う。また、貯留容器開口部から排出された粒状材料は透明アクリル製モールドへと導かれる。

#### (4) 昇降装置

透明アクリル製モールドに導かれた粒状材料はモールド内に堆積する。昇降装置⑤はこの堆積面とホーン先端との超音波照射距離  $H_u$  を一定に保つ機能を

持つ。また、貯留容器開口部とホッパー内にある水面との距離を一定に保ち、貯留容器開口部から排出される粒状材料の空中落下距離を一定に保つ機能を持つ。昇降速度は昇降モーター速度調節ノブで  $0.3\sim 2.3\text{cm/s}$  の範囲に調節できる。

## 3—3 供試体作製条件の違いが相対密度に及ぼす影響

### 3—3—1 供試体作製方法および条件

#### (1) 供試体作製方法

供試体は以下のように定義する連続投入法と断続投入法で作製した。図 3-2 に供試体作製方法の模式図を、また図 3-3 に図 3-2 の供試体作製方法の模式図に対応させて連続投入法と断続投入法の違いを示す。連続投入法は図 3-2 の経路 0—①で示すように、モールド高さ分の供試体を連続して作製する方法と定義した。断続投入法は図 3-2 の経路 0—②—③—④—⑤—⑥で示すように、モールドの高さを均等に 3 層に分け、各層を同じ手順で作製し、最終的にモールド高さ分の供試体を作製する方法と定義した。

断続投入法が連続投入法と異なる点は、断続投入法では図 3-2 の経路 0—②—③—④—⑤—⑥における供試体作製過程で 1 層目と 2 層目で所定の厚さの試料が堆積した時点で、試料の投入と超音波照射を②—③、④—⑤に相当する時間中断することである。図 3-2 の断続投入法と連続投入法の経路で共通する②の位置における供試体作製状況を図 3-3 を参照して説明する。

連続投入法では経路中②の位置で図 3-3(a)に示すように、試料の投入、超音波照射は継続される。一方断続投入法では経路中②の位置で図 3-3(b)に示すように、試料の投入を停止してから③の位置で超音波照射を停止するまで試料堆積面に堆積中の試料および堆積が終了した試料に対して高密度化が継続されることになる。

断続投入法で採用した 1 層の高さは  $5\text{cm}$  とし、高さ  $5\text{cm}$  モールドでは 1 層、高さ  $10\text{cm}$  モールドでは 2 層、高さ  $15\text{cm}$  モールドでは 3 層で供試体を作製した。供試体作製用モールドは透明アクリル製で内径  $7.9\text{cm}$ 、高さ  $5\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ 、

第3章 超音波による砂の高密度化方法

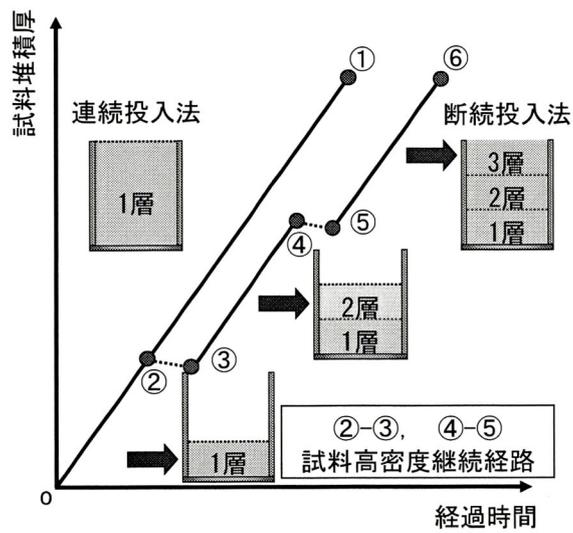


図 3-2 供試体作製方法の模式図

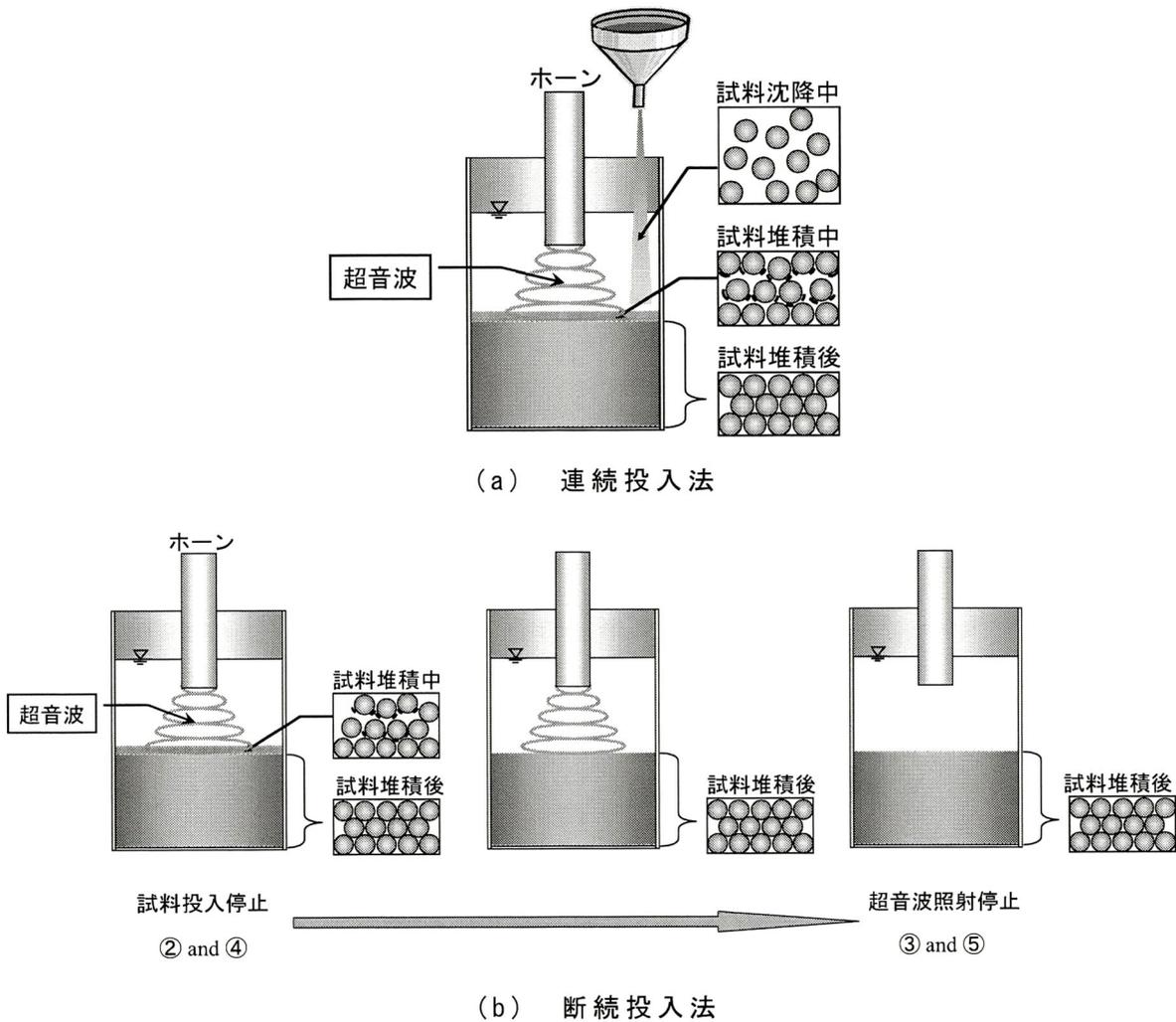


図 3-3 連続投入法と断続投入法の違い

15cm の 3 種類を用いた。

(2) 超音波出力の設定

超音波出力は下限出力 40W と上限出力 600W の 2 種類とした。

(3) 超音波照射距離の設定

超音波照射距離は第 2 章, 2-2-2(2)に従ってモールド底面位置で音圧  $P^5$  が最大となる距離を求め, その内 5.6cm と 16.9cm の 2 種類を超音波照射距離  $H_u$  に設定した。

(4) 試料投入速度の設定

試料投入速度は貯留容器下部開口高 1mm と 2mm に対応した試料投入速度 24.4g/s と 65.9g/s の 2 種類とした。両試料投入速度は試料投入速度 24.4g/s, 超音波出力 600W, 超音波照射距離 5.6cm の条件で作製した供試体の相対密度が約 95%, 試料投入速度 65.9g/s, 超音波出力 40W, 超音波照射距離 16.9cm の条件で作製した供試体の相対密度が約 70%になることを予備試験によって確認して決定した。(用語として貯留容器下部試料排出口から排出される試料に対して試料排出速度を貯留容器下部試料排出口から排出され供試体内に投入される試料に対して試料投入速度を使う)

(5) 用いた試料

実験に用いた試料は乾燥させた豊浦砂である。物理定数を表 3-1 に示す。

表 3-1 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

### 3—3—2 供試体作製手順

以下に記述する試料準備過程，実験準備過程は連続投入法と断続投入法で共通する手順である．

#### (1) 試料準備過程

- 1) 所定量の試料を用意する．
- 2) 用意した試料を4等分して貯留容器の4区画にそれぞれ投入して留める．

#### (2) 実験準備過程

- 1) モールドをテーブル中央に設置する．
- 2) モールド上部にホッパーを載せて，ホッパーに予め取り付けられているゴムスリーブを引き下げ，モールドとホッパー外部とに密着させてシールする．
- 3) 昇降装置を作動させ，モールド底面から超音波照射距離  $H_u$  の位置にホーン先端を移動して停止させる．
- 4) モールドとホーン全てが浸かる高さまで，ホッパー内に給水パイプで注水する．水漏れのないことを確認する．水は脱気水を使用した．

#### (3) 供試体作製過程

連続投入法による供試体作製は以下の手順で行った．

- 1) 試料排出口開度調節ノブを回し，所定の試料投入速度で試料が排出される開度に合わせる．
- 2) 試料排出口開口レバーを引き下げ，貯留容器排出口を開口して試料を排出させる．
- 3) 試料がホッパー内を沈降し，モールド底面に堆積し始めると同時に，昇降装置によりホーンと貯留容器の上昇および超音波の照射を開始する．なお，供試体を作製する間，試料堆積面とホーン先端との距離を一定に保つため，昇降装置の上昇速度は，モールド内に堆積する試料の堆積速度と同じに調節する．
- 4) 超音波照射中，ホーン全てが常に水中に浸るよう，ホッパー内に注水を続ける．

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

- 5) 貯留容器から試料の排出が終了し、ホッパー内を沈降していた試料の堆積が終了したことを確認後、注水、超音波照射、および昇降装置を停止する。
- 6) ホッパー内の脱気水を排水パイプから全て排水させた後、モールドに振動を与えないように注意してホッパーを取り外す。
- 7) 供試体上面の成形を行い平滑に仕上げる。
- 8) モールド内の試料を取り出し、炉乾燥させた後、乾燥重量を計り、相対密度を求める。
- 9) 同条件、同手順で供試体の作製を3回行い、平均相対密度を求める。  
断続投入法による供試体作製は以下の手順で行った。手順5)の終了後、次の手順で供試体を作製する。
- 6) 一旦試料排出開口レバーを引き上げ、貯留容器下部の試料排出口を閉じる。
- 7) 試料準備過程1)、2)で試料を用意する。
- 8) 供試体作製過程2)から5)までを行う。
- 9) 選択したモールド高さ分、高密度化が終了した後、供試体作製過程6)～9)を行う。

#### 3—3—3 実験結果および考察

##### (1) 実験シリーズ A

以下で連続投入法と断続投入法で供試体を作製して、供試体作製法としての優位性について検証を行った。供試体作製条件および実験結果（実験シリーズ A）を表 3-2 に示す。

実験番号 A-1, A-3, 超音波照射距離が 5.6cm で試料投入速度が 24.4g/s の場合、連続投入法と断続投入法で作製した供試体の平均相対密度はそれぞれ 94.8%, 94.5% である。両者の平均相対密度はほぼ等しく、同程度の密度であることがわかる。また、モールド高さ 5cm, 10cm, 15cm の供試体について、最大相対密度と最小相対密度の差を求めた相対密度差は連続投入法の場合 0.3%, 断続投入法の場合 0.5% である。両者の相対密度差に大きな差はなく、作製したいずれの高さの供試体もほぼ均一な密度であることがわかる。

実験番号 A-2, A-4, 超音波照射距離が 16.9cm で試料投入速度が 65.9g/s の場合、連続投入法で作製した供試体の平均相対密度は 80.9%, 断続投入法

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

表 3-2 供試体作製条件および実験結果（実験シリーズ A）

実験シリーズ	実験番号	試料投入法	超音波出力 (W)	超音波照射距離 (cm)	試料投入速度 (g/s)	モールド高さ (cm)	各相対密度 $D_n$ (%)	相対密度差 $\Delta d_n$ (%)	平均相対密度 $D_n$ (%)	
A	A-1	連続投入法	600	5.6	24.4	5	94.7	0.3	94.8	
						10	94.8			
						15	95.0			
	A-2					5	83.4	7.7		80.9
						10	83.4			
						15	75.7★			
	A-3	断続投入法	600	5.6	24.4	5	94.7	0.5	94.5	
						10	94.2			
15						94.6				
5						86.9	1.0			87.3
10	87.1									
15	87.9									

で作製した供試体の平均相対密度は 87.3%であり、連続投入法で作製した供試体の相対密度が断続投入法で作製した供試体の相対密度より小さい。実験番号 A-2 の★印を付けたモールド高さ 15cm の供試体の相対密度は 75.7%で、モールド高さ 5cm, 10cm の供試体の相対密度に比べて 7.7%小さく、供試体上部で高密度化が十分に進んでいないことがわかる。これは、モールド高さ 15cm の供試体を作製するために貯留容器から排出される試料の量が、モールド高さ 5cm, 10cm の供試体を作製する場合に比べて多く、試料がホッパー内部を沈降する過程でホーンから照射される超音波の影響をより多く受けるため、沈降する試料の飛散、上昇、停滞する量が増し、試料の堆積速度が変動したことが考えられる。そのため、水中に留まる試料によって超音波の散乱、拡散が増すと同時に超音波照射距離が変動するため、試料の堆積面における音圧の減少と変動によって密度の増加が十分に進まなかったと考えられる。

実験番号 A-4 の供試体の相対密度差は 1.0%で多少の差は認められるが実験番号 A-2 の相対密度差 7.7%と比べると小さい。これは供試体を 3層に分けて一層当たり 5cm で供試体を作製するため実験番号 A-2 で認められる事象による影響が少なく、相対密度差が小さくなったと考えられる。

ところで、モールド高さが 5cm の場合、連続投入法と断続投入法で供試体作製条件が同じである。実験番号 A-2, A-4 について超音波照射距離が 16.9cm で試料投入速度が 65.9g/s の場合、供試体の相対密度は実験番号 A-2 で 83.4%、実験番号 A-4 で 86.9%となり、供試体の作製条件が同じであるにも関わらず両者の差は 3.5%になる。これは、砂の投入速度が速いためモールド内に堆積する砂の堆積速度の変動が大きいことに加え、モールド底面上に試料が堆積し始めると同時に超音波を照射すると、砂粒子がモールド底面上を容

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

易に移動して砂粒子の混合作用が顕著となり、超音波によって砂粒子間の間隙の減少が進まないまま上層に砂の堆積が進んだため、作製する供試体の密度にむらが生じたと考えられる。

実験番号 A-2 と A-4 について、モールド高さが 10cm の場合を比較すると、連続投入法で作製した供試体の相対密度は 83.4%、断続投入法で作製した供試体の相対密度は 87.1%で、断続投入法で作製した供試体の相対密度が 3.7% 大きい。断続投入法では、図 3-2 の②点にあたる 1 層の堆積が終了する時点で、わずかな時間砂が堆積していない状況で超音波が照射され砂の高密度化が継続する。しかし、連続投入法では断続投入法で 1 層の堆積が終了する時点に相当する図 3-2 の②点では砂の堆積が続いている状況で堆積面に超音波が照射され高密度化される。この両者の違いによって、断続投入法で作製した供試体の密度が連続投入法で作製した供試体の密度より増加したと考ええると、相対密度に差があることが理解できる。

以上の結果から、超音波照射距離が 5.6cm の場合、連続投入法と断続投入法で作製した供試体の相対密度および均一性に顕著な差がないことが明らかとなった。しかし、超音波照射距離が 16.9cm の場合、連続投入法で作製した供試体の相対密度は断続投入法で作製した供試体の相対密度に比べて約 7%程度小さく、均一性も劣る結果となった。

#### (2) 実験シリーズ B

以下で超音波出力、超音波照射距離、試料投入速度が作製する供試体の相対密度の大小に与える影響について検証を行った。供試体作製条件および実験結果を表 3-3 に示す。

表 3-3 の結果に基づき図 3-4 に相対密度と超音波出力の関係を示す。実験番号 B-1～B-4 から超音波出力 40W で作製した供試体の相対密度は約 70～90%、実験番号 B-5～B-8 から超音波出力 600W で作製した供試体の相対密度は約 86～95%であり、超音波出力 600W で作製した供試体の相対密度は超音波出力 40W で作製した供試体の相対密度より約 5～16%大きいことがわかる。

実験番号 B-1, B-2, B-5, B-6 から超音波照射距離が 5.6cm の場合、超音波出力 40W で作製した供試体の相対密度は約 85～90%、超音波出力 600W

第3章 超音波による砂の高密度化方法

表 3-3 供試体作製条件および実験結果（実験シリーズ B）

実験シリーズ	実験番号	試料投入法	超音波出力 (W)	超音波照射距離 (cm)	試料投入速度 (g/s)	モールド高さ (cm)	各相対密度 $D_n$ (%)	平均相対密度 $D_n$ (%)
B	B-1	断続投入法	40	5.6	24.4	5	90.5	89.8
						10	90.5	
						15	88.5	
	B-2				65.9	5	83.7	84.7
					10	85.4		
					15	84.9		
	B-3			16.9	24.4	5	74.3	74.2
					10	73.4		
					15	74.8		
	B-4				65.9	5	69.8	69.5
				10	69.4			
				15	69.1			
B-5		600	5.6	24.4	5	94.7	94.5	
				10	94.2			
				15	94.6			
B-6				65.9	5	89.7	89.9	
			10	90.5				
			15	89.6				
B-7		16.9	24.4	5	86.9	87.3		
			10	87.1				
			15	87.9				
B-8			65.9	5	84.2	85.5		
		10	86.5					
		15	85.9					

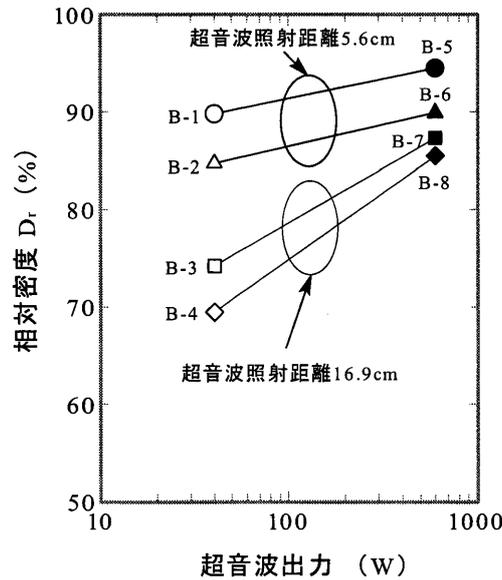


図 3-4 相対密度と超音波出力の関係

で作製した供試体の相対密度は約 90~95%であり、超音波出力を 40W から 600W に増して供試体を作製すると、供試体の相対密度は約 5%増加する。

実験番号 B-3, B-4, B-7, B-8 から超音波照射距離が 16.9cm の場合、超音波出力 40W で作製した供試体の相対密度は約 70~75%, 超音波出力 600W

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

で作製した供試体の相対密度は約 86~88%であり、超音波出力を 40W から 600W に増して供試体を作製すると、供試体の相対密度が約 13~16%増加する。これは、超音波出力を 40W から 600W に増すと、音圧振幅が増し、試料堆積面における音圧が超音波出力 40W の場合に比べて大きくなる。そのため試料堆積面にある試料粒子を振動させる力が大きくなり、粒子の再配列が超音波出力 40W に比べ促進されるため相対密度が超音波出力 600W の場合、超音波出力 40W の場合に比べて増加すると考えられる。しかし、超音波出力の増加に対する、供試体の相対密度の増加傾向は超音波出力 40W の場合に比べて、600W の場合約 10%小さい。これは、両者で超音波照射距離が異なるため、超音波出力の増加に対する試料堆積面における音圧の増加量に差があるためと考えられる。

実験番号 B-1, B-2, B-5, B-6 では超音波照射距離が 5.6cm と短く、超音波出力を 40W から 600W に増加しても試料堆積面における音圧が超音波出力の増加量に相当するほど増加しないと推測できる。

実験番号 B-3, B-4, B-7, B-8 では超音波照射距離が 16.9cm と実験番号 B-1, B-2, B-5, B-6 に比べ照射距離が 3 倍長いため、超音波出力を 40W から 600W に増加すると、試料堆積面における音圧の増加量が大きいと推測でき、この超音波照射距離の違いによる音圧の増加量の差が、相対密度の増加量の差になっていると考えられる。また実験番号 B-1, B-2 と B-7, B-8 で相対密度がほぼ等しく、超音波照射距離を 5.6cm として超音波出力を 40W にした場合と、超音波照射距離を 16.9cm にして超音波出力を 600W にした場合とで、試料堆積面における音圧が同程度の大きさになるものと推測できる。

表 3-3 の結果に基づき図 3-5 に相対密度と超音波照射距離の関係を示す。実験番号 B-1, B-2, B-5, B-6 から超音波照射距離 5.6cm で作製した供試体の相対密度は約 85~95%、実験番号 B-3, B-4, B-7, B-8 から超音波照射距離 16.9cm で作製した供試体の相対密度は約 70~90%であり、超音波照射距離 16.9cm で作製した供試体の相対密度は超音波照射距離 5.6cm で作製した供試体の相対密度より約 5~15%低くなることがわかる。超音波照射距離が 5.6cm から 16.9cm に長くなることによる相対密度の低下傾向は、超音波出力 600W に比べて超音波出力の低い 40W の方がより顕著である。超音波照射距離の増加による相対密度の低下量は超音波出力 40W の場合約 15%であり、超

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

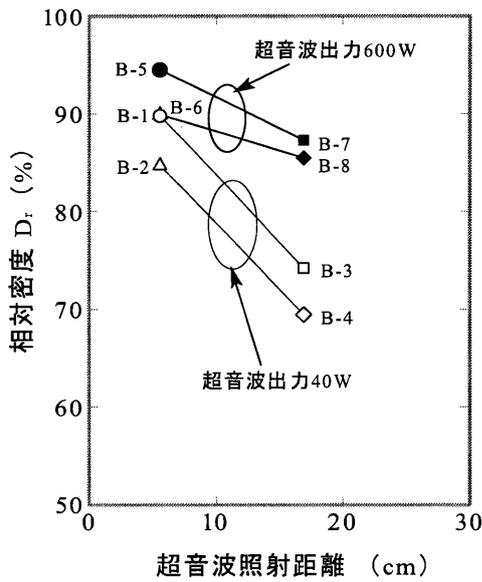


図 3-5 相対密度と  
超音波照射距離の関係

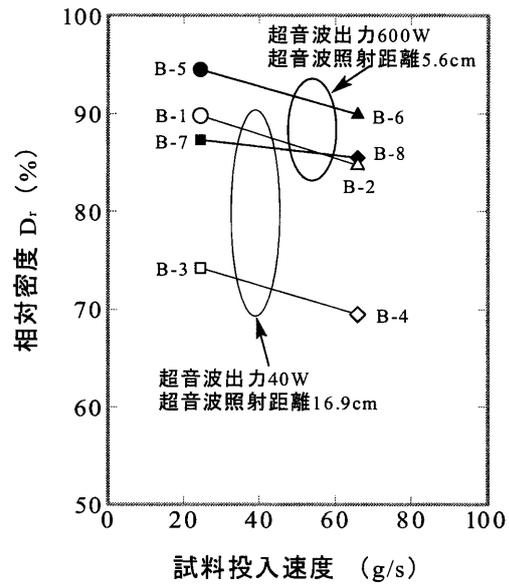


図 3-6 相対密度と  
試料投入速度の関係

音波出力 600W の場合の約 4~7% に比べて 3 倍程度大きくなっている。これは、超音波出力が 40W の場合、600W に比べてホーンから水中に照射される超音波の音圧が低いため、超音波照射距離が 5.6cm から 16.9cm に長くなると、距離に相当する分音圧の低下量が増加し、試料の堆積面における音圧の低下量が超音波出力 600W の場合に比べて大きくなるためと考えられる。その結果、堆積面にある試料粒子を振動させる力が小さくなり、供試体の高密度化が十分に進まなかったものと考えられる。

表 3-3 の結果に基づき図 3-6 に相対密度と試料投入速度の関係を示す。

実験番号 B-1, B-3, B-5, B-7 から試料投入速度 24.4/g で作製した供試体の相対密度は約 75~95%, 実験番号 B-2, B-4, B-6, B-8 から試料投入速度 65.9g/s で作製した供試体の相対密度は約 70~90% であり, 試料投入速度 65.9g/s で作製した供試体の相対密度は試料投入速度 24.4g/s で作製した供試体より約 5% 程度相対密度が低いことがわかる。特に実験番号 B-3, B-4, 超音波出力 40W, 超音波照射距離 16.9cm で作製した供試体の相対密度が他の実験番号の供試体の相対密度に比べて, 試料投入速度 24.4g/s, 65.9g/s とも約 13~20% 程度低く違いが際立っている。これは、超音波出力 40W, 超音波

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

照射距離 16.9cm の組み合わせの場合が超音波出力と超音波照射距離の種々の組み合わせの中で、試料の堆積面における音圧が最も低いため、作製する供試体の相対密度が際立って低くなったものと考えられる。

実験番号 B-7, B-8 の供試体の相対密度差が 1.8% と他の実験番号と比べて多少低いですが、試料投入速度を 24.4g/s から 65.9g/s に速くすると、超音波出力、超音波照射距離に関わらず作製する供試体の相対密度の低下量が約 5% であることがわかる。これは、試料投入速度を 24.4g/s から 65.9g/s にして試料が堆積する速さが増すと、前に堆積した試料粒子の上部に次の試料粒子の堆積する速さが増し、堆積した試料粒子が超音波によって高密度化される時間が短くなる。その短くなる時間は超音波出力、超音波照射距離の違いに関わらず一定であるため、作製する供試体の相対密度がほぼ一律に低下したと考えられる。

表 3-4 に表 3-3 の結果に基づいて作成した相対密度－供試体作製条件関係を示す。目標相対密度の供試体を作製する場合、表 3-4 に示すように超音波出力、超音波照射距離、試料投入速度を組み合わせると、相対密度が約 70～95% まで 5% 間隔で供試体を作製できることがわかる。また、最も砂を高密度にできる条件は、超音波出力が大きく、超音波照射距離が短く、試料投入速度が遅い場合であることもわかる。

表 3-4 相対密度－供試体作製条件関係

超音波出力 (W)	超音波照射距離 (cm)	試料投入速度 (g/s)	実測相対密度 $D_i$ (%)	目標相対密度 $D_r$ (%)
40	5.6	24.4	89.8	90
		65.9	84.7	85
	16.9	24.4	74.2	75
		65.9	69.5	70
600	5.6	24.4	94.5	95
		65.9	89.9	90
	16.9	24.4	87.3	90
		65.9	85.5	85

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

これらの結果を実際の施工へ適用することを想定した場合，超音波出力は電力消費量と関わる要素であり，超音波出力を大きくすると電力消費量の増加に繋がる．試料投入速度は砂杭の造成速度に関わる要素であり，試料投入速度を遅くすると，砂杭の造成速度が遅くなり，施工期間の延長に繋がる．しかし，超音波照射距離は電力消費量や砂杭の造成速度とは無関係な要素である．したがって，超音波照射距離を調節して最大音圧が得られる距離を決め，消費電力が最小で所定の密度の砂杭が造成できるように試料投入速度および超音波出力を選択するという方法が考えられる．このような施工方法で砂杭を造成すると，従来の研究では振動体を高密度化する材料に直接接触させるために，超音波が減衰して高密度化できる範囲が限定されるという実用化の妨げになっていた問題が解決でき，機械的な制約を除けば長さ方向に半無限に高密度の砂杭が連続して造成できると考えられる．

図 1-1(a)に示したように，サンドコンパクションパイル工法はケーシングパイプの再貫入によって砂の締固めと拡径を行い，砂杭を造成する工法であり，杭間地盤の強度増加も見込める<sup>6)</sup>という特徴がある．しかし，地盤によっては拡径により原地盤の盛り上がり数 m にも及ぶことがあり，干満の差が大きく水深の浅い水域における施工では，干潮時盛り上がり地盤が海面近くに迫り，作業船の転船に支障が生じ，施工効率の低下を余儀なくされる場合がある．また施工機械の大型化によって砂杭の大径化と大深度施工が可能になった反面，騒音や振動の発生が問題となっている．

一方，高密度砂杭工法は，図 1-1(b)に示したように，連続引き抜きによる砂杭の造成を想定しており，拡径に伴う騒音，振動がなくなり，また原地盤の乱れを最小限にできると考えられる．しかし，拡径を行わないためサンドコンパクションパイル工法と同等な複合地盤を造成するには，均一で高密度な砂杭を効率良く施工することが必須となる．また，後述の第 4 章<sup>7)</sup>で示すように粒径や粒度分布，粒子形状の違いによって，超音波による高密度化の効果が異なる様々な粒状材料の利用も想定しており，効率良く粒状材料を高密度化できる超音波照射方法などを実用化に向けて克服する必要がある．

これらの課題を克服するため考えられる方法として，周波数 20kHz の単周波のほか，周波数の異なる超音波を数種類組み合わせ，粒径や粒度分布，粒子形状が異なる粒状材料の高密度化に適する超音波が照射できる装置の製作や，

周波数変調によって音圧が最大となる位置に幅を持たせて、材料堆積面の変動に音圧最大位置が追従できるような方策が考えられる。さらに、超音波装置の出力増加や間欠波（バースト波）、矩形波などを使うことで超音波が減衰する割合を小さくし、高密度化に必要な音圧が得られる超音波照射距離を長くするなどの方策によって、実用化の過程で解決しなければならない課題は克服できると考えられる。

## 3—4 作製された供試体のせん断特性

### 3—4—1 供試体作製方法および条件

供試体は断続投入法、超音波なし（水中落下打撃法<sup>8)</sup>）、超音波なし（連続投入法）の3種類の供試体作製法で作製した。

断続投入法によって目標相対密度95%と70%の供試体を2種類、超音波なし（水中落下打撃法）によって目標相対密度70%の供試体を1種類、超音波なし（連続投入法）で供試体を1種類、合計4種類の供試体を作製した。

供試体は高さ15cm、直径7.5cmの円筒形供試体である。各供試体作製法とも供試体高さ15cmに余盛高さ2cmを加えた高さ17cmの供試体を作製した後、余盛り分を取り除き、上端を成形して15cmの供試体とした。断続投入法による目標相対密度95%の供試体作製条件は超音波出力600W、超音波照射距離5.6cm、試料投入速度24.4g/sとし、目標相対密度70%の供試体作製条件は超音波出力40W、超音波照射距離70%の供試体作製条件は超音波出力40W、超音波照射距離16.9cm、試料投入速度を65.9g/sとした。

超音波なし（連続投入法）による供試体の作製条件は超音波照射距離を5.6cmとしたときの試料排出口位置から試料投入速度24.4g/sで試料を排出させて作製した。超音波なし（水中落下打撃法）による供試体作製は供試体高さ15cmを10層に、余盛り高さ2cmを2層に分割して、モールド内に1層分の試料を投入してモールド周辺を木槌で均等に16回打撃した。この作業を繰り返し、合計192回の打撃を加えて17cmの供試体を作製した後、余盛り分を取り除き、上端を成形して高さ15cmの供試体を作製した。

### 第3章 超音波による砂の高密度化方法

三軸圧縮試験は圧密非排水（ $\overline{\text{CU}}$ ）三軸圧縮試験を適用し，地盤工学会基準（JGS A 0523-2000<sup>8)</sup>）に従って実施した．三軸圧縮試験装置はひずみ制御式三軸圧縮試験機を用いて次の手順で行った．

- 1) 高さ 150mm，直径 75mm の円筒形供試体を作製し，三軸圧力室を組み立てる．
- 2) 供試体を非排水状態にして，間隙圧係数 B 値が 0.95 以上であることを確認する．
- 3) 所定の有効拘束圧で 30 分圧密を行う．
- 4) 軸圧縮を行う．一定ひずみ速度 0.13%/min で供試体を圧縮し，軸ひずみが 20%に達した時点で軸圧縮を終了する．

なお，本論文で用いる主要なパラメーターおよび記号は次のとおりである．主応力差  $q = \sigma_a - \sigma_r$ ，平均有効主応力  $p' = (\sigma_a' + 2\sigma_r')/3$ ，応力比  $\eta = q/p'$ ， $\varepsilon_a$ ：軸ひずみ， $\sigma_a$ ：軸方向応力， $\sigma_r$ ：側方向応力．

#### 3-4-2 実験結果および考察

表 3-5 に三軸圧縮試験の供試体作製条件，供試体状態，有効拘束圧，圧密状態を示す．なお参考に測定した供試体作製時間は，目標相対密度を 95%として，直径 75mm，高さ 150mm の円筒形供試体を作製した場合，断続投入法で 9~11 分，超音波なし（水中落下打撃法）で約 30 分であった．

表 3-5 三軸圧縮試験の供試体作製条件，供試体状態

実験シリーズ	試料投入法	超音波出力 (W)	超音波照射距離 (cm)	試料投入速度 (g/s)	供試体 (No.)	有効拘束圧 $\sigma_c$ (kPa)	初期相対密度 $D_{ri}$ (%)	圧密後相対密度 $D_{rf}$ (%)
C	断続投入法	40	16.9	65.9	1	49	68.4	69.6
					2	98	69.0	71.1
					3	147	70.8	72.9
		600	5.6	24.4	1	49	94.2	95.0
					2	98	93.6	95.5
					3	147	95.5	98.1
D	超音波なし (水中落下打撃法)	—	—	—	1	49	70.5	71.4
					2	98	70.8	72.3
					3	147	71.1	73.2
E	超音波なし (連続投入法)	—	—	24.4	1	49	27.3	29.8
					2	98	27.7	30.9
					3	147	30.9	37.4

#### (1) 実験シリーズ C

以下で断続投入法によって作製した異なる相対密度を持つ供試体のせん断挙動の違いを比較した。目標相対密度 70%と 95%で作製した供試体について、図 3-7 に非排水三軸圧縮試験から求められた主応力差  $q$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係を示す。主応力差  $q$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係から、有効拘束圧 49kPa, 98kPa, 147kPa とも、主応力差がせん断開始から軸ひずみの増加とともに直線的に増加し、軸ひずみ 5%付近で最大値に達した後軟化挙動を示している。相対密度の違いによるせん断挙動に特筆する違いは認められない。

図 3-8 に主応力差  $q$  - 平均有効主応力  $p'$  関係を、図 3-9 にせん断初期の部分を拡大して示す。図 3-8 から有効拘束圧 49kPa, 98kPa, 147kPa とも応力経路に顕著な差異は認められず、類似した挙動を示している。図 3-9 から有効拘束圧 49kPa, 98kPa, 147kPa とも、主応力差の立ち上がりから主応力差が破壊線に近接した後、破壊線に沿って増加する類似の挙動を示しており、相対密度の違いによるダイレイタンス特性に特筆する差は認められない。

以上、超音波照射によって作製した相対密度の異なる供試体のせん断試験の結果から、相対密度が異なると強度発現には違いが認められる。しかし、せん断挙動には際立つ違いは認められない。

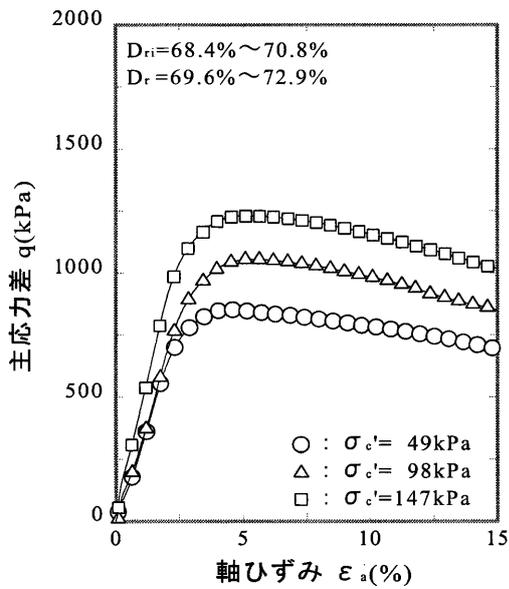
#### (2) 実験シリーズ D

以下では同じ相対密度になるように断続投入法と超音波なし（水中落下打撃法）で作製した供試体のせん断挙動の違いを比較した。

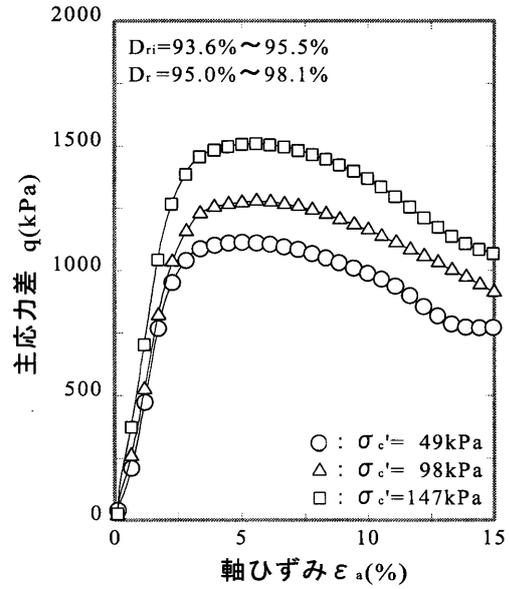
図 3-10 に主応力差  $q$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係を示す。主応力差  $q$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係から、断続投入法および超音波なし（水中落下打撃法）で作製した供試体について、有効拘束圧 49kPa, 98kPa, 147kPa とも主応力差はせん断開始から軸ひずみの増加とともに直線的に増加し、軸ひずみ 5%付近で最大になり、その後軟化挙動を示し、軸ひずみ 15%で両者でほぼ同じ値となっている。しかし、主応力差の最大値は断続投入法が超音波なし（水中落下打撃法）に比べて 50~60kPa 程度大きいことが認められる。

図 3-11(a)に断続投入法による主応力差  $q$  - 平均有効主応力  $p'$  関係を、図 3-11(b)にせん断初期の部分を拡大して示す。また、図 3-11(c)に超音波なし（水中落下打撃法）による主応力差  $q$  - 平均有効主応力  $p'$  関係を、図 3-11

第3章 超音波による砂の高密度化方法

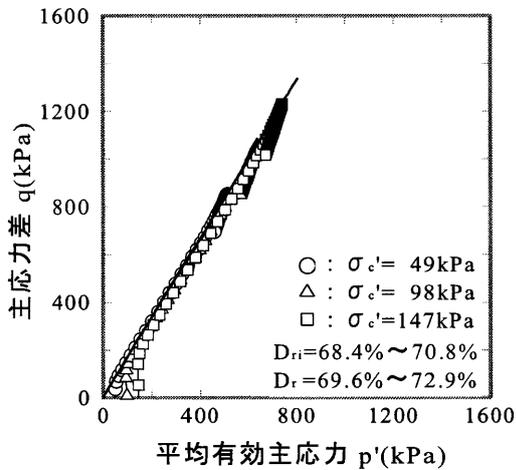


(a) 断続投入法  
(目標相対密度 70%)

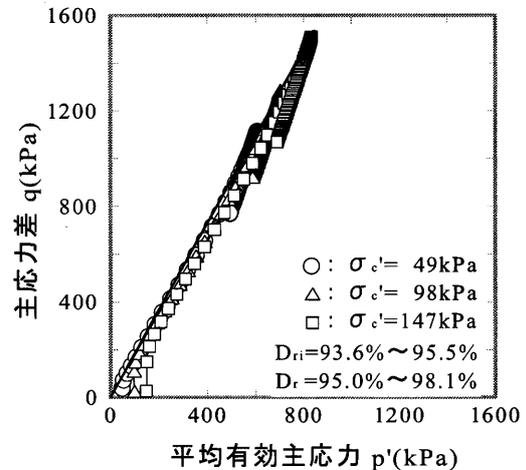


(b) 断続投入法  
(目標相対密度 95%)

図 3-7 超音波により作製した相対密度の異なる供試体の主応力差  $q$ —軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係



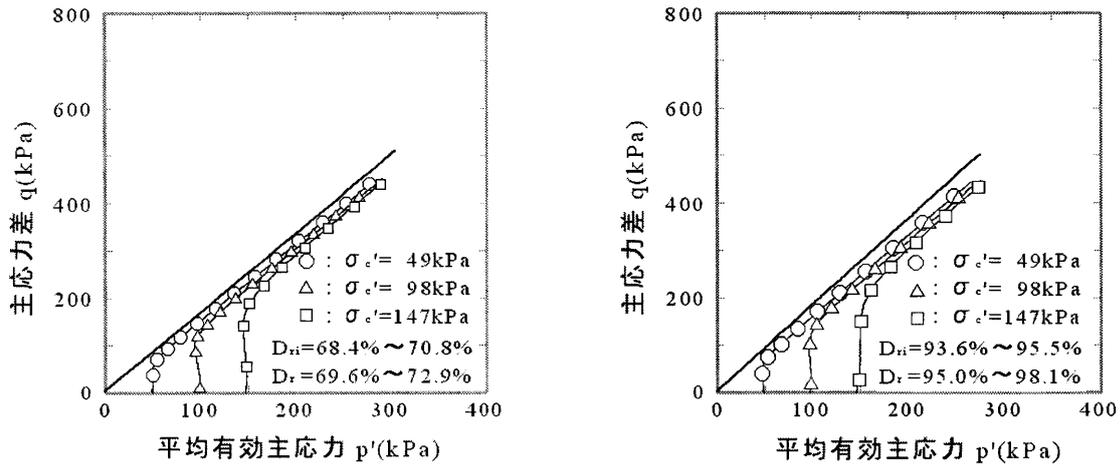
(a) 断続投入法  
(目標相対密度 70%)



(b) 断続投入法  
(目標相対密度 95%)

図 3-8 超音波により作製した相対密度の異なる供試体の主応力差  $q$ —平均有効主応力  $p'$  関係

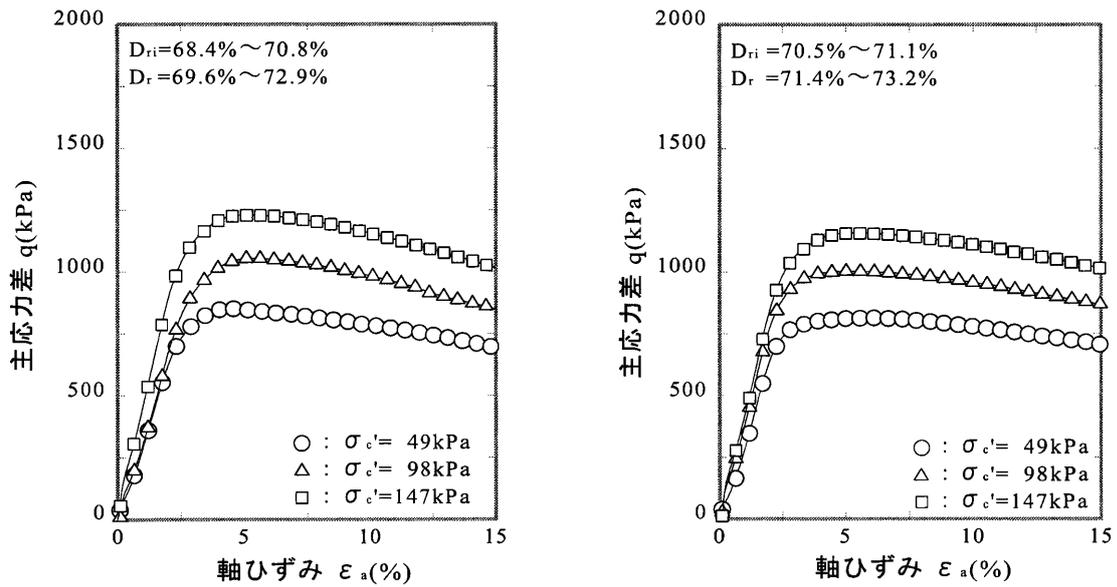
第3章 超音波による砂の高密度化方法



(a) 断続投入法拡大  
(目標相対密度 70%)

(b) 断続投入法拡大  
(目標相対密度 95%)

図 3-9 超音波により作製した相対密度の異なる供試体の主応力差  $q$  - 平均有効主応力  $p'$  関係拡大



(a) 断続投入法  
(目標相対密度 70%)

(b) 超音波なし (水中落下打撃法)  
(目標相対密度 70%)

図 3-10 超音波と超音波なし (水中落下打撃法) により作製した同じ相対密度の主応力差  $q$  - 軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係

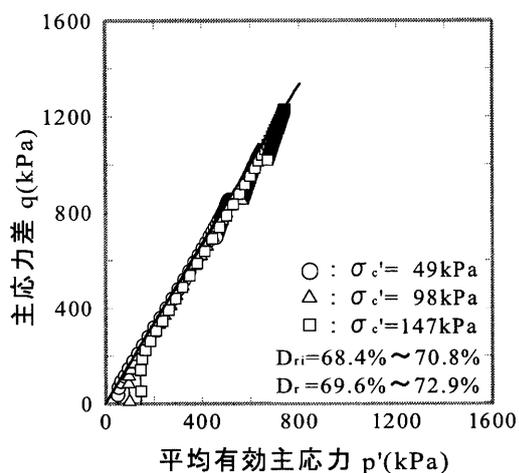
(d)にせん断初期の部分を拡大して示す。図 3-11(b), (d) の主応力差  $q$  - 平均有効主応力  $p'$  関係から、断続投入法および超音波なし（水中落下打撃法）で作製した供試体について、いずれも主応力差が破壊線に近接した後、破壊線に沿って増加する挙動を示しており、せん断によるダイレイタンス挙動は類似していることが認められる。

以上、断続投入法と超音波なし（水中落下打撃法）で同じ相対密度で作製した供試体のせん断挙動の違いを比較した結果、主応力差の最大値で断続投入法が超音波なし（水中落下打撃法）に比べて 50~60kPa 程度大きい。しかし、せん断挙動は類似している。また、有効拘束圧による影響は認められないことがわかる。

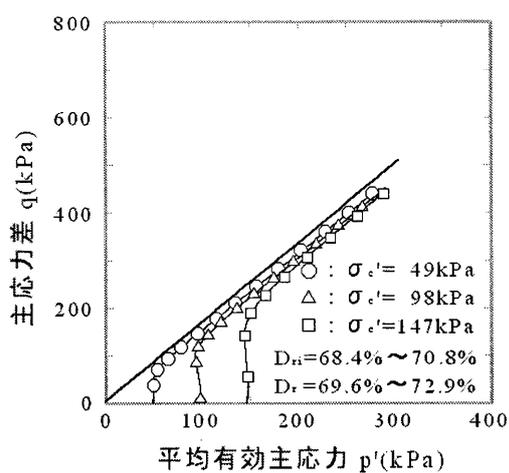
#### (3) 実験シリーズ E

断続投入法と超音波なし（水中落下打撃法）によって作製した供試体と超音波なし（断続投入法）で作製した供試体について相対密度と内部摩擦角の違いを比較した。表 3-6 および図 3-12 に破壊時の応力からモール・クーロンの破壊基準を適用して求めた内部摩擦角  $\phi'$  と相対密度の関係を示す。超音波の照射によって供試体の相対密度は 28.6% から 69.4~94.4% に 40.8~65.8% 増加している。また、内部摩擦角は 33.9 度から 40.5~44.2 度に 6.6~10.3 度増加している。

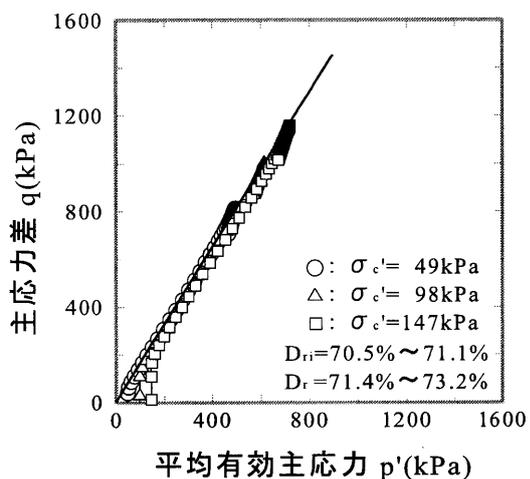
断続投入法と超音波なし（水中落下打撃法）で内部摩擦角を比較すると、断続投入法で相対密度 69.4% における内部摩擦角は 40.5 度、超音波なし（水中落下打撃法）で相対密度 70.8% における内部摩擦角は 39.5 度となっており、わずかではあるが断続投入法による内部摩擦角の方が大きいことがわかる。この違いは、断続投入法で作製した供試体の砂粒子が超音波なし（水中落下打撃法）で作製した供試体の砂粒子に比べて安定した堆積構造をしているためではないかと考えられる<sup>7)</sup>。



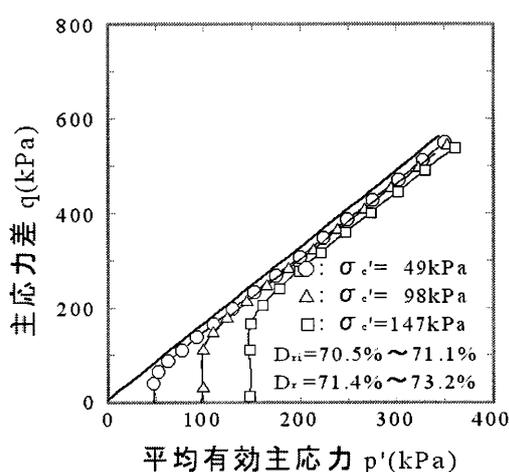
(a) 断続投入法  
(目標相対密度 70%)



(b) 断続投入法拡大  
(目標相対密度 70%)



(c) 超音波なし (水中落下打撃法)  
(目標相対密度 70%)



(d) 超音波なし (水中落下打撃法) 拡大,  
(目標相対密度 70%)

図 3-11 超音波と超音波なし (水中落下打撃法) により作製した  
同じ相対密度の主応力差  $q$  - 平均有効主応力  $p'$  関係

第3章 超音波による砂の高密度化方法

表 2-6 内部摩擦角  $\phi'$

供試体作製法	初期 相対密度 $D_{ri}$ (%)	内部摩擦角 $\phi'$ (度)
断続投入法	69.4	40.5
超音波なし (連続投入法)	28.6	33.9
超音波なし (水中落下打撃法)	70.8	39.5

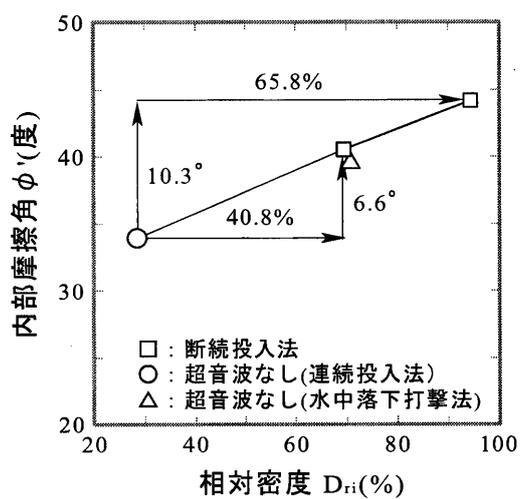


図 3-12 内部摩擦角  $\phi'$ -相対密度  $D_{ri}$  関係

### 3—5 本章の要約

本章では、超音波による砂の高密度化概念に基づいて、超音波による砂の高密度化実験を要素試験レベルで行うために開発した超音波供試体作製装置について詳細な説明を行った。そして、開発した装置を使って供試体作製条件の違いが相対密度に及ぼす影響、作製された供試体のせん断特性について調べた。その結果以下の知見が得られた。

- 1) 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、相対密度が明らかに増加する。
- 2) 超音波出力 600W、超音波照射距離 5.6cm の条件で、断続投入法と連続投入法によって作製した供試体の均一性は断続投入法が連続投入法より勝る。しかし、相対密度に差は認められない。
- 3) 断続投入法で作製される供試体の相対密度の大きさは、試料堆積面における音圧の大きさに比例する。しかし、作製される供試体の均一性に音圧の大小の影響はない。
- 4) 試料堆積面の音圧の大小は超音波出力および超音波照射距離の組み合わせで決まる。音圧を一定とした場合、作製する供試体の相対密度は試料投入速度に比例する。
- 5) 超音波出力、超音波照射距離、試料投入速度の組み合わせと、作製される供試体の相対密度の間には表 3-4 に示す関係がある。
- 6) 断続投入法で作製した目標相対密度 70%と 95%の供試体のせん断挙動には両方で大きな違いは認められない。
- 7) 超音波出力を 40w、600w、超音波照射距離を 5.6cm、16.9cm、試料投入速度を 24.4g/s、65.9g/s の条件を組み合わせ超音波を照射して供試体を作製すると、供試体の相対密度は 28.6%から 69.4~94.4%に 40.8~65.8%増加し、内部摩擦角  $\phi'$  は 33.9 度から 40.5~44.2 度に 6.6~10.3 度増加する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) (社) 日本電子機械工業会編：超音波工学，p.12，pp.72-77，コロナ社，1999.
- 4) 伊藤健一：超音波のはなし，pp.41-42，日刊工業新聞社，1999.
- 5) 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.
- 6) 地盤工学会：打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法設計・施工マニュアル，p.44，2009.
- 7) 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.
- 8) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，pp.469-473，pp.477-478，pp.496-497，2000.

## 第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

### 4—1 概説

本章では、実用化の観点から、粒子形状と粒度分布が異なる試料に対する超音波の効果を超音波によって高密度化した供試体と水中落下打撃法により作製した供試体の密度増加と強度特性を比較して検証する。

### 4—2 超音波供試体作製装置

#### 4—2—1 装置の概要

図4-1に装置の概要を示す。装置の仕様は超音波振動子を除いて第3章、3-2-1と同じである。超音波振動子先端ホーンの直径が直径50mm、高さ100mmの円筒形供試体が作製できるように35mmに変更されている。

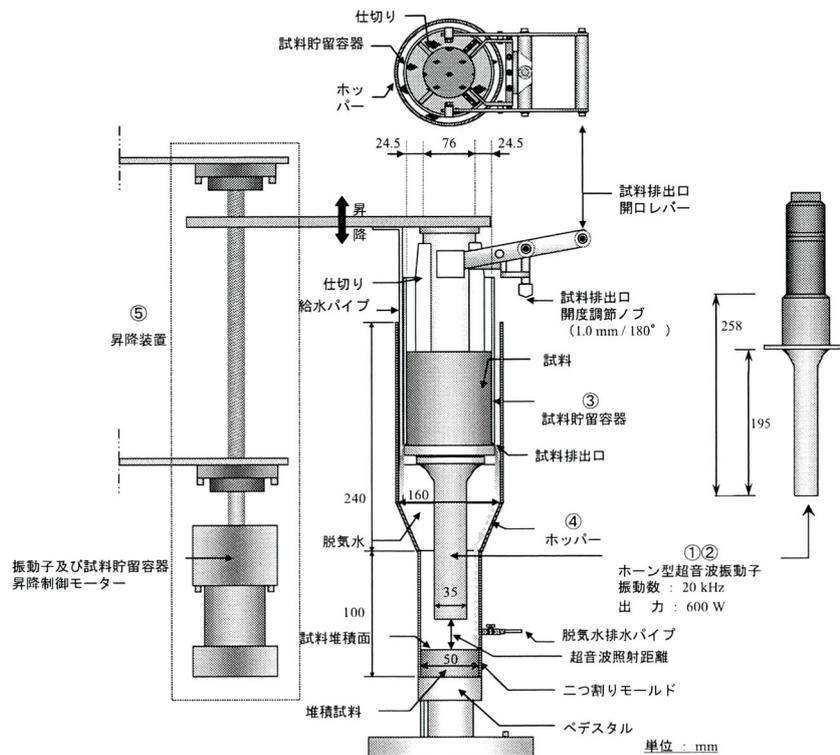


図4-1 装置の概要

4-2-2 主要部位の仕様

超音波振動子ホーンの形状はテーパで直径 35mm に縮小したステップ形である。

4-3 用いた試料

サンドコンパクションパイル工法で使用した実績の多い砂の粒子形状と粒度分布を基に、砂の粒子形状に近い材料として宇部珪砂を、粒子形状の粗い材料として廃ガラスを、これら材料と比較し参考にするため球状に近いガラスビーズの3種類を選定し、各選定材料について粒度分布を7種類に調整した。

図 4-2 に調整試料粒度加積曲線を示す。7種類の試料の粒度分布は平均粒径  $D_{50}$ 、均等係数  $U_c$  を変化させ調整している。表 4-1 に用いた試料の物理的性質を示す。

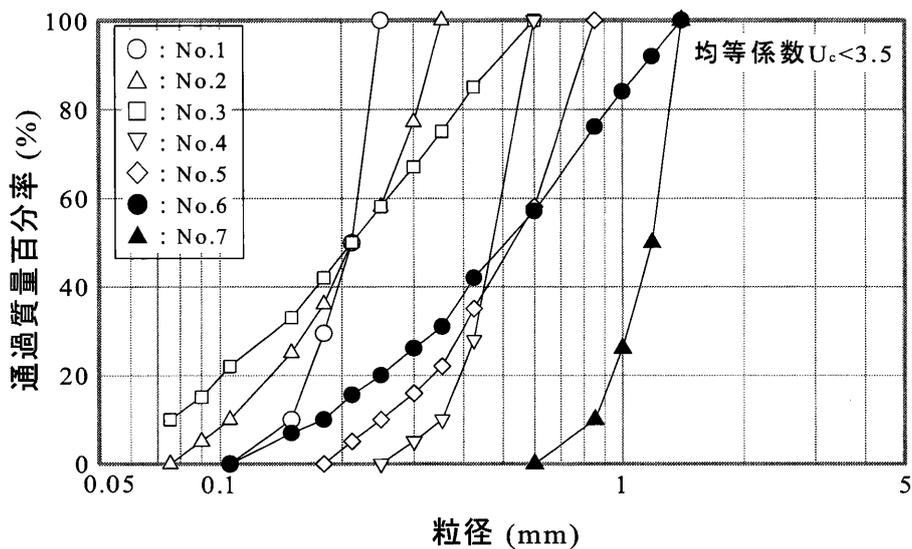


図 4-2 調整試料粒度加積曲線

第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

表 4-1 用いた試料の物理的性質

(a) 宇部珪砂調整試料

試料 No.	D <sub>50</sub> (mm)	U <sub>c</sub> (-)	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>max</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>min</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	A <sub>r</sub> (-)	R <sub>c</sub> (-)
No.1	0.2	1.5		1.590	1.244	1.460	1.317
No.2	0.2	2.5		1.645	1.277	1.511	1.272
No.3	0.2	3.5		1.675	1.314	1.477	1.351
No.4	0.5	1.5	2.631	1.604	1.283	1.500	1.435
No.5	0.5	2.5		1.664	1.330	1.512	1.457
No.6	0.5	3.5		1.748	1.376	1.449	1.341
No.7	1.2	1.5		1.534	1.284	1.469	1.436

(b) 廃ガラス調整試料

試料 No.	D <sub>50</sub> (mm)	U <sub>c</sub> (-)	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>max</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>min</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	A <sub>r</sub> (-)	R <sub>c</sub> (-)
No.1	0.2	1.5		1.366	0.998	1.538	1.634
No.2	0.2	2.5		1.432	1.051	1.687	1.714
No.3	0.2	3.5		1.484	1.085	1.720	1.761
No.4	0.5	1.5	2.500	1.428	1.102	1.547	1.641
No.5	0.5	2.5		1.498	1.152	1.665	1.858
No.6	0.5	3.5		1.566	1.183	1.734	1.879
No.7	1.2	1.5		1.502	1.210	1.621	1.695

(c) ガラスビーズ調整試料

試料 No.	D <sub>50</sub> (mm)	U <sub>c</sub> (-)	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>max</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>min</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	A <sub>r</sub> (-)	R <sub>c</sub> (-)
No.1	0.2	1.5		1.612	1.462	1.087	1.376
No.2	0.2	2.5		1.688	1.521	1.049	1.259
No.3	0.2	3.5		1.739	1.558	1.065	1.180
No.4	0.5	1.5	2.495	1.636	1.464	1.069	1.188
No.5	0.5	2.5		1.675	1.498	1.113	1.302
No.6	0.5	3.5		1.765	1.577	1.096	1.201
No.7	1.2	1.5		1.597	1.502	1.127	1.320

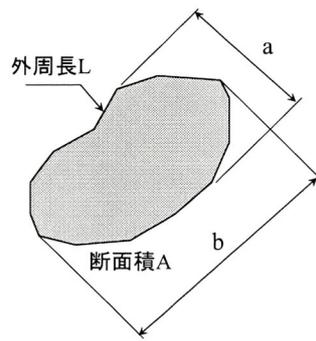


図 4-3 試料粒子模式図

図 4-3 に試料粒子を長軸と中間軸を含む平面に投影した模式図を示す。粒子形状は式 4-1 で定義される真円度  $R_c$ <sup>1)</sup>と式 4-2 で定義される縦横比  $A_r$ <sup>1)</sup>で評価する。

$$R_c = \frac{L^2}{4\pi A} \quad (4-1)$$

ここで、 $L$  は粒子投影図の外周長、 $A$  は粒子投影図の断面積である。粒子の形状と真円度  $R_c$  の関係は、真円度  $R_c$  が 1 に近いほど、粒子の形状が円に近いことを示す。また、真円度  $R_c$  は吉村・小川が提案した粒子の凸凹を表す指標 FU 値<sup>2)</sup>の逆数になる。これらの指標は粒子の形が粗くなると外周長  $L$  が増し、断面積  $A$  に対する外周長  $L$  の比が大きくなることに着目したもので、粒子の粗さを定量的に評価できる簡便で実用的な手法である。なお、本研究を通して利用する豊浦砂の粒子 30 個をランダムに抽出して算出した真円度  $R_c$  は 1.284、FU 値は 0.779 である。

$$A_r = \frac{b}{a} \quad (b > a) \quad (4-2)$$

ここで、 $a$  は粒子投影図の最短長、 $b$  は粒子投影図の最大長である。選定した 3 種類の材料について、各材料 20~30 個の粒子をランダムに抽出し、個々の真円度  $R_c$  および縦横比  $A_r$  を算出し、すべての材料について求めた値を平均して各材料の真円度  $R_c$ 、縦横比  $A_r$  とした。

## 4—4 砂質土の高密度化

### 4—4—1 実験方法および条件

超音波出力および超音波照射距離は第3章, 3-3-3 (2) 実験シリーズの結果に基づき, 超音波によって豊浦砂を高密度化した場合, 相対密度が90%を越える条件の1つ超音波出力40W, 超音波照射距離5.6cmとした。超音波振動子ホーンの上昇速度は事前に宇部珪砂, 廃ガラス, ガラスビーズの水中沈降速度を調べ, 各材料の沈降速度に対して超音波照射距離が5.6cmに保てるように設定した。供試体作製方法は第3章, 3-3-1で定義した連続投入法と断続投入法によった。第3章, 3-3-3において, 断続投入法が連続投入法に比べ高密度化効果において優位であることがわかっている。しかし, 本章では異なる材料に対する超音波による高密度化効果の確認を異なる供試体のサイズを使って実施するため, 再度, 連続投入法と断続投入法による効果の確認を行った。供試体作製時間は連続投入法で数十秒, 断続投入法では途中一旦試料の投入を中断するため連続投入法に比べ遅くなり, 5~10分程度である。しかし, 水中落下打撃法と比較すると供試体作製時間は格段に短縮される。

### 4—4—2 実験手順

実験手順は第3章, 3-3-2に準じる。なお, 実験は3回実施する。

### 4—4—3 実験結果および考察

#### (1) 連続投入法と断続投入法の比較

図4-4に選定材料を代表させ, 宇部珪砂調整試料No.1~7を用いて連続投入法と断続投入法で作製した供試体の相対密度を比較して示す。すべてのデータプロット位置が左上に位置し, 断続投入法によって作製した供試体の相対密度が連続投入法によって作製した供試体の相対密度より高くなっている。直径75mm, 高さ150mmの供試体を使った実験と同じ結果が得られている。以上の結果を踏まえ, 実験では断続投入法により供試体を作製した。

図4-5に宇部珪砂調整試料No.1~7, 廃ガラス調整試料No.1~7, ガラスビーズ調整

#### 第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

試料 No.1~7 を使い，超音波を照射したものと，超音波を照射せず水を溜めたモールドにただ試料を沈降させた場合の相対密度を比較して示す．また，棒グラフは3回の実験結果の平均値を示し，棒グラフの頂点付近には最大と最小の範囲も併せて示している．図 4-5 から全ての調整試料において，超音波を照射することで密度の増加が認められ，超音波による試料の高密度化が確認できる．宇部珪砂と廃ガラスでは密度のばらつきが小さく，ガラスビーズでは密度のばらつきが大きい．宇部珪砂と廃ガラスの再現性は高い．しかしガラスビーズの場合，平均的には超音波による高密度化は認められるが，ばらつきを含めて観察すると，超音波の効果は小さいものと考えられる．

図 4-6 に真円度  $R_c$  と相対密度増加関係を，図 4-7 に縦横比  $A_r$  と相対密度増加関係を示す．相対密度の増加量は 20%~80%程度あることがわかる．真円度  $R_c$ ，縦横比  $A_r$  ともばらつきはあるものの，相対密度の増加量は真円度  $R_c$ ，縦横比  $A_r$  に対して右上がりの傾向を示している．そして，真円度  $R_c$ ，縦横比  $A_r$  が大きくなり，粒子形状が粗くなると相対密度の増加量が増す傾向を示している．

サンドコンパクションパイル工事で利用される砂や，利用が進んでいる再生材料などの粒子形状が宇部珪砂や廃ガラスに近いこと，また，今回設定した超音波出力が 40W と低い超音波出力に対する結果であることを併せて考えると，サンドコンパクションパイル工事で利用される砂や，再生材料に対する超音波による高密度化の効果は十分に期待できる．

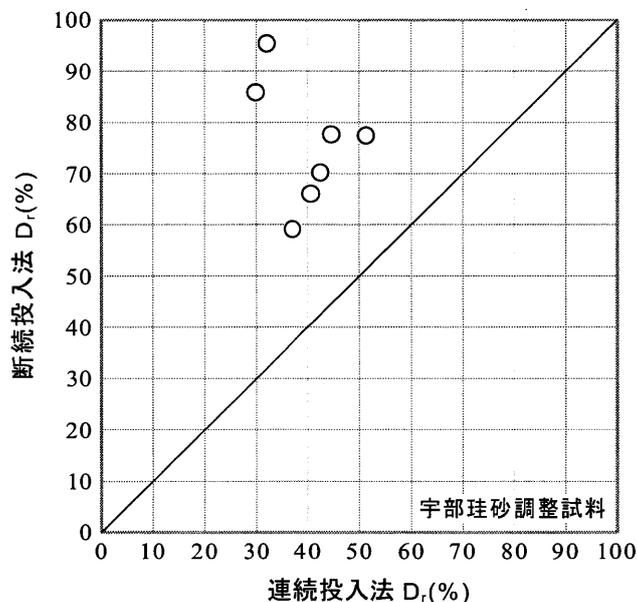
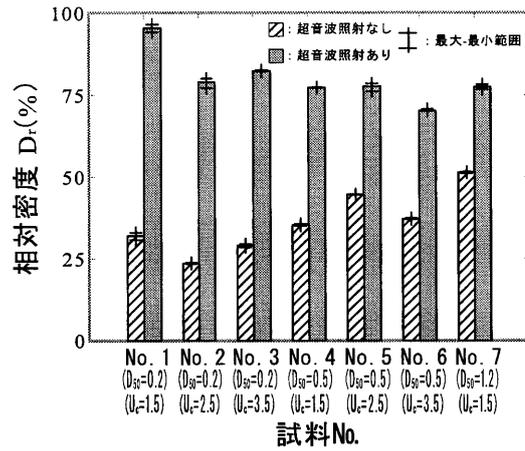
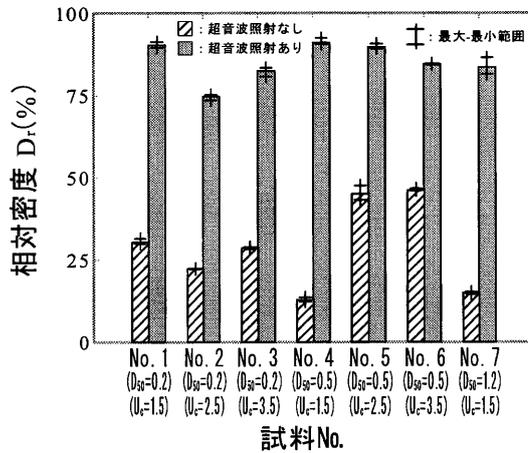


図 4-4 供試体作製方法の違いによる相対密度の比較

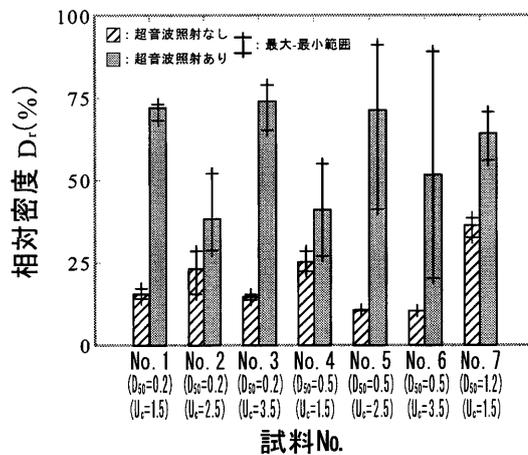
第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化



(a) 宇部珪砂調整試料



(b) 廃ガラス調整試料



(c) ガラスビーズ調整試料

図 4-5 各調整粒度試料の相対密度の比較

## 第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

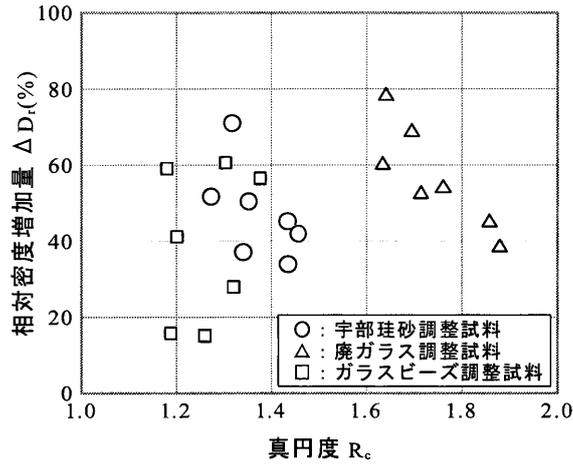


図 4-6 真円度  $R_c$  と相対密度増加量  $\Delta D_r$  関係

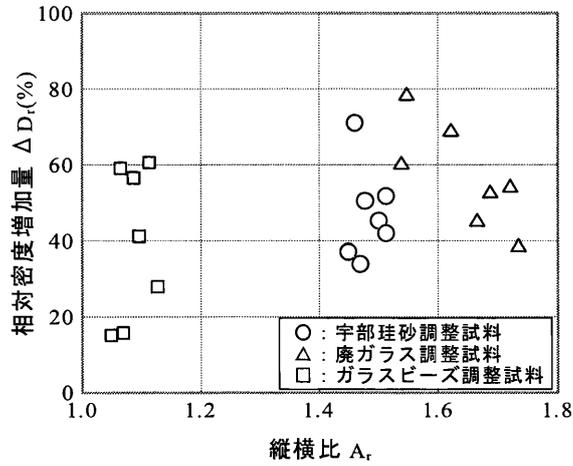


図 4-7 縦横比  $A_r$  と相対密度増加量  $\Delta D_r$  関係

### 4—5 強度特性

#### 4—5—1 実験方法および条件

4-4 砂質土の高密度化実験において、超音波を照射して作製した供試体の高密度化が確認された。ここでは、超音波を照射して作製した供試体のせん断特性を調べるため土の圧密排水（CD）三軸圧縮試験を実施した。

## 第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

実験は供試体作製法の違いによる影響を検証するため、超音波を照射して作製した供試体と同じ密度になるように水中落下打撃法で作製した供試体を用いた。

表 4-2 に用いた試料の種類および試料 No.を示す。宇部珪砂調整試料は No.1, 2, 3, 4, 7 の 5 種類を用いた。廃ガラス、ガラスビーズ調整試料は No.1, 7 の 2 種類を用いた。

### 4—5—2 実験手順

#### (1) 供試体作製

供試体作製方法は第3章、3-4-1 に準じる。

各調整試料の供試体の相対密度は 4-4 砂質土の高密度化で得られた最大相対密度に合わせた。水中落下打撃法による供試体作製はモールド底に深さ 2cm 水を溜め、飽和水浸試料をスプーンでモールド内に静かに投入し、モールド底に堆積させる。モールド周囲を木槌で打撃し、断続投入法による相対密度と同じ相対密度に仕上げる。

#### (2) 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験はひずみ制御式三軸圧縮試験装置を用いて、地盤工学会基準 (JGS 0524-2000<sup>3)</sup>) 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験方法に準じて行った。有効拘束圧は  $\sigma' = 50, 100, 200\text{kPa}$  の 3 種類、載荷ひずみ速度は  $0.1\%/\text{min}$ 、背圧 BP は  $200\text{kPa}$  とした。

表 4-2 試料種類と試料 No. 一覧表

試料種類	試料 No.
宇部珪砂調整試料	1, 2, 3, 4, 7
廃ガラス調整試料	1, 7
ガラスビーズ調整試料	1, 7

### 4—5—3 実験結果および考察

図 4-8～図 4-11 に三軸圧縮試験結果を示す。

宇部珪砂調整試料 No.1, 2, 3, 4, 7 において、超音波を照射して作製した供試体と水中落下打撃法で作製した供試体で総じて類似したせん断挙動を示し、体積変化挙動も収縮から膨張に推移する様子に大きな違いは認められない。しかし、細部で超音波を照射して作製した供試体と水中落下打撃法で作製した供試体で異なる点が認められる。No.3 試料において、有効拘束圧が 50kPa, 100kPa の場合、超音波を照射して作製した供試体の軸差応力が水中落下打撃法で作製した供試体の軸差応力より大きくなる。No.1, 2 試料において、有効拘束圧が 200kPa の場合、超音波を照射して作製した供試体の軸差応力と水中落下打撃法で作製した供試体の軸差応力の発現に差が認められ、水中落下打撃法で作製した供試体の軸差応力のピークが超音波を照射して作製した供試体の軸差応力のピークより大きくなる。また、No.1, 2, 3 試料において、せん断初期の軸差応力の勾配が、超音波により作製された供試体の方が水中落下打撃法により作製された供試体より大きいことがわかる。

廃ガラス調整試料 No.1, 7 において、超音波を照射して作製した供試体と水中落下打撃法で作製した供試体で類似したせん断挙動を示し、体積変化挙動も収縮から膨張に推移する様子に大きな違いは認められない。しかし、軸差応力の大きさに差が認められる。有効拘束圧に関わらず、超音波を照射して作製した供試体の軸差応力が水中落下打撃法で作製した供試体の軸差応力より小さくなる。また、せん断初期の軸差応力の勾配が、超音波により作製された供試体の方が水中落下打撃法により作製された供試体より小さくなることがわかる。

クリスタルビーズ調整試料 No.1, 7 において、超音波を照射して作製した供試体と水中落下打撃法で作製した供試体で類似したせん断挙動を示し、体積変化挙動も違いは認められない。しかし、No.1 と No.2 試料を比べた場合、せん断挙動および体積変化挙動で粒子サイズが影響したと考えられる違いが認められる。

図 4-12～図 4-14 にせん断試験のピーク時の軸差応力と有効拘束圧を用いてモールの応力円を描き、それに接する破壊線を引いたものを示す。図から、超音波を照射せず作製した供試体と超音波を照射して作製した供試体でわずかな違いが認められるものもあるが、内部摩擦角  $\phi_{cd}$  を算出して比較すると、大きな差は認められない。

第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

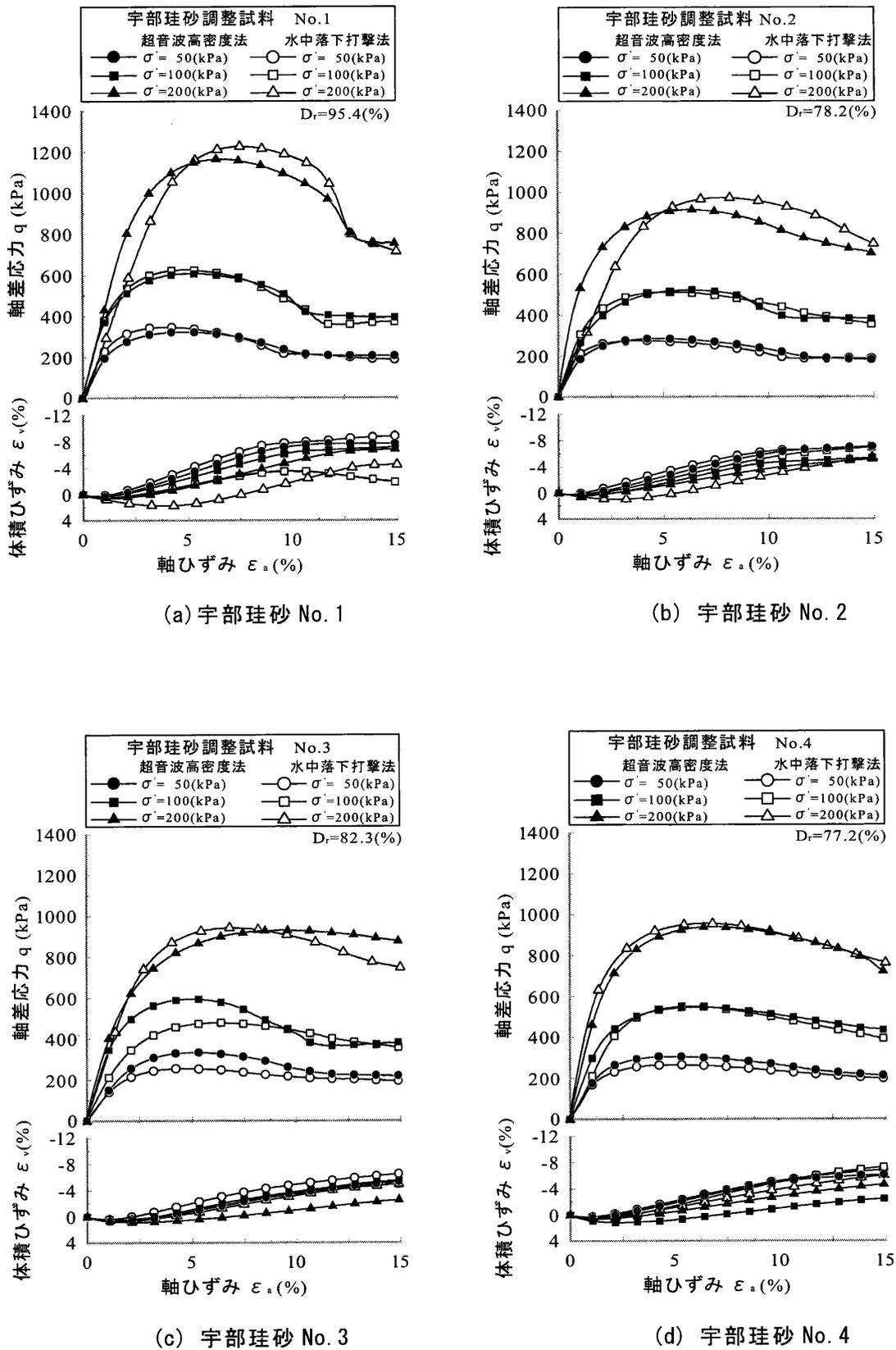
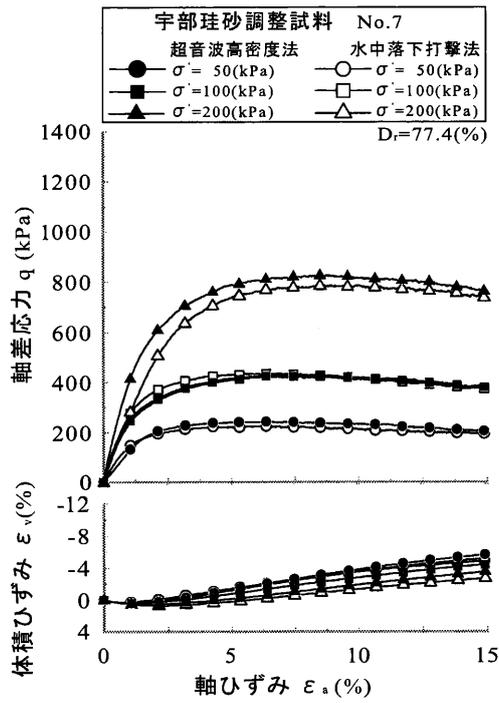


図 4-8 軸ひずみ  $\epsilon_a$ -軸差応力  $q$ -体積ひずみ  $\epsilon_v$  関係 (宇部珪砂調整試料)

第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化



(e) 宇部珪砂 No. 7

図 4-9 軸ひずみ  $\varepsilon_a$ -軸差応力  $q$ -体積ひずみ  $\varepsilon_v$  関係 (宇部珪砂調整試料)

第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

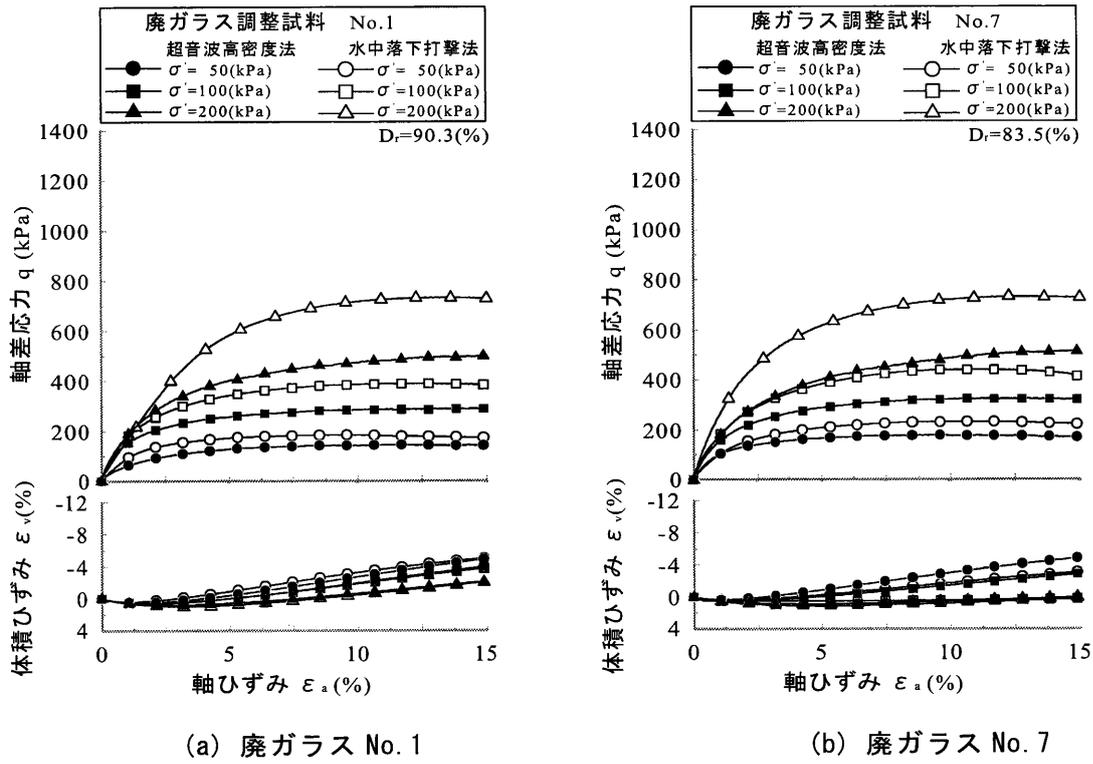


図 4-10 軸ひずみ  $\epsilon_a$ -軸差応力  $q$ -体積ひずみ  $\epsilon_v$  関係 (廃ガラス調整試料)

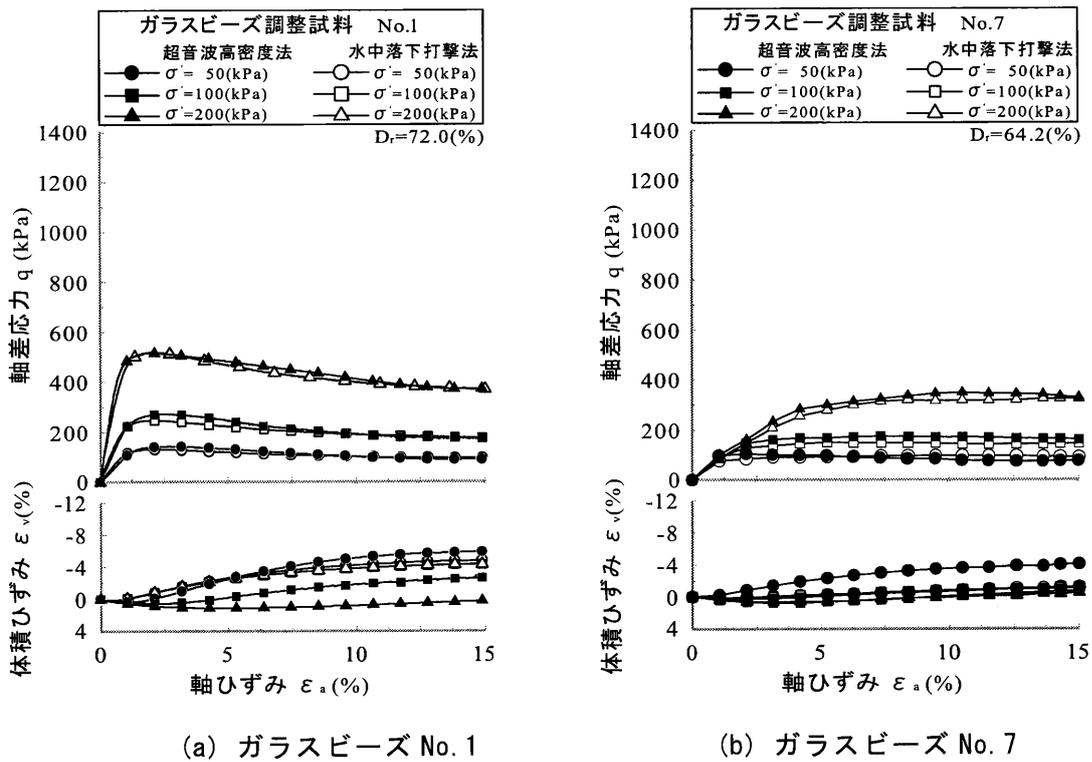
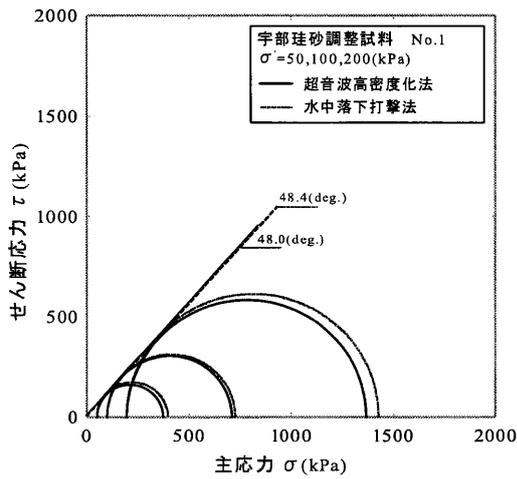
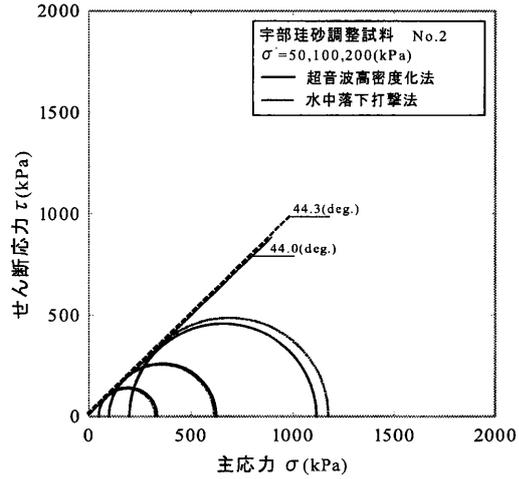


図 4-11 軸ひずみ  $\epsilon_a$ -軸差応力  $q$ -体積ひずみ  $\epsilon_v$  関係 (ガラスビーズ調整試料)

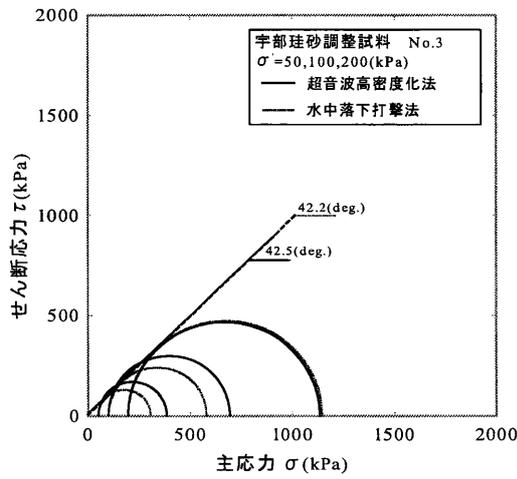
第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化



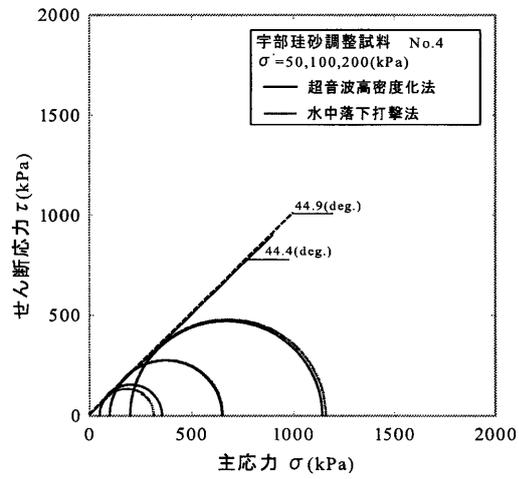
(a) 宇部珪砂 No. 1



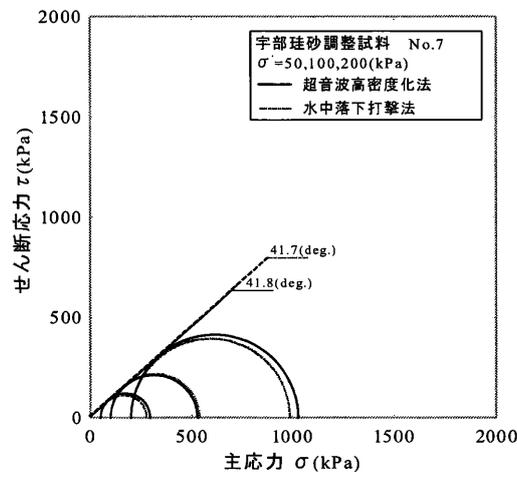
(b) 宇部珪砂 No. 2



(c) 宇部珪砂 No. 3



(d) 宇部珪砂 No. 4



(e) 宇部珪砂 No. 7

図 4-12 モールの応力円  
(宇部珪砂調整試料)

第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

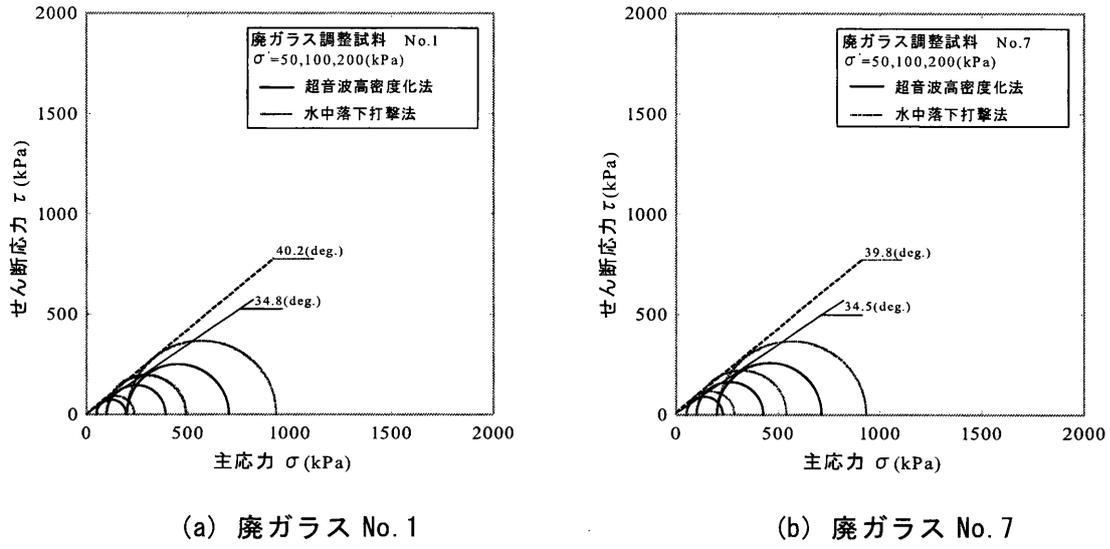


図 4-13 モールの応力円  
(廃ガラス調整試料)

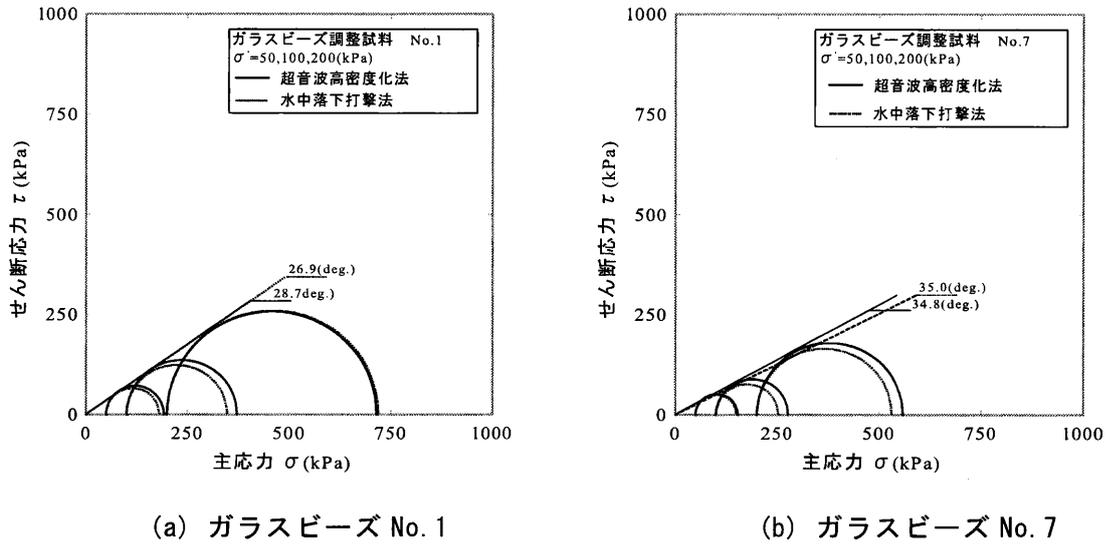


図 4-14 モールの応力円  
(ガラスビーズ調整試料)

#### 第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

次に全ての結果について変形係数  $E_{50}$  を式 4-3 で算出して比較した。

$$E_{50} = \frac{\frac{q_{peak}}{2}}{\varepsilon_{50}} / 10 \quad (4-3)$$

ここで、 $E_{50}$  は変形係数(MPa)、 $q_{peak}$  はピーク軸差応力(kPa)、 $\varepsilon_{50}$  は軸差応力  $q=q_{peak}/2$  の時の圧縮ひずみ(%)である。図 4-15、図 4-16 に宇部珪砂調整試料と廃ガラス調整試料について、水中落下打撃法で作製された供試体の  $E_{50}$  と超音波を照射して作製した供試体の  $E_{50}$  を示す。宇部珪砂調整試料の場合、大半の値は±5MPa の範囲にある。5MPa を越える値を示すものは超音波を照射して作製した供試体の結果であり、総合的に見ると超音波を照射して供試体を作製すると変形係数  $E_{50}$  が高めになると考えられる。超音波照射によって、粒子が微小振動しながら安定した堆積構造へと移行すると考えると、微小変形領域の特性を示す変形係数  $E_{50}$  がわずかではあるが高めの値を示す理由も理解できる。

廃ガラス調整試料の場合、宇部珪砂調整試料とは異なる結果が得られている。超音波を照射して作製した場合、水中落下打撃法によって作製した場合に比べ低めの値を示している。最大 8MPa 程度低い結果もある。

図 4-17、図 4-18 に宇部珪砂調整試料と廃ガラス調整試料について、水中落下打撃法で作製された供試体の内部摩擦角  $\phi_{cd}$  を横軸に、超音波を照射して作製された供試体の内部摩擦角  $\phi_{cd}$  を縦軸にプロットして示す。宇部珪砂調整試料では差はほとんどない。しかし、廃ガラス調整試料の場合、プロットされた点は中央対角線の下側に位置する傾向がある。超音波を照射して供試体を作製した場合、水中落下打撃法によって供試体を作製した場合に比べ内部摩擦角  $\phi_{cd}$  が 5(度)程度小さい。変形係数  $E_{50}$  と同じように内部摩擦角  $\phi_{cd}$  についても、水中落下打撃法で作製された供試体の値に比べ、超音波を照射して作製された供試体の値が小さい。

棒状の粒子が重力の影響下で堆積すると、粒子の長軸が水平に堆積する傾向があり、せん断初期には長軸が圧縮方向に直交する傾向を示し、せん断面形成後には粒子の長軸方向がせん断面に平行な向きに再配列することが報告されている。<sup>4), 5)</sup>

第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

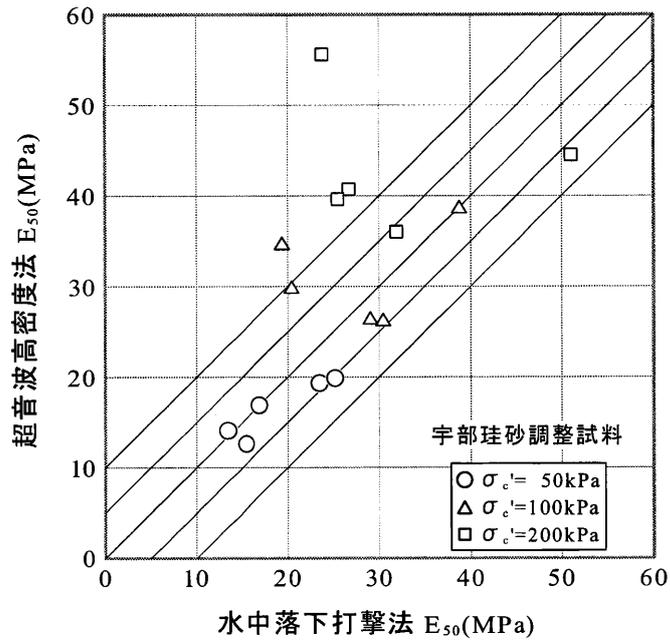


図 4-15 超音波高密度化法と水中落下打撃法による供試体の変形係数  $E_{50}$  の比較 (宇部珪砂調整試料)

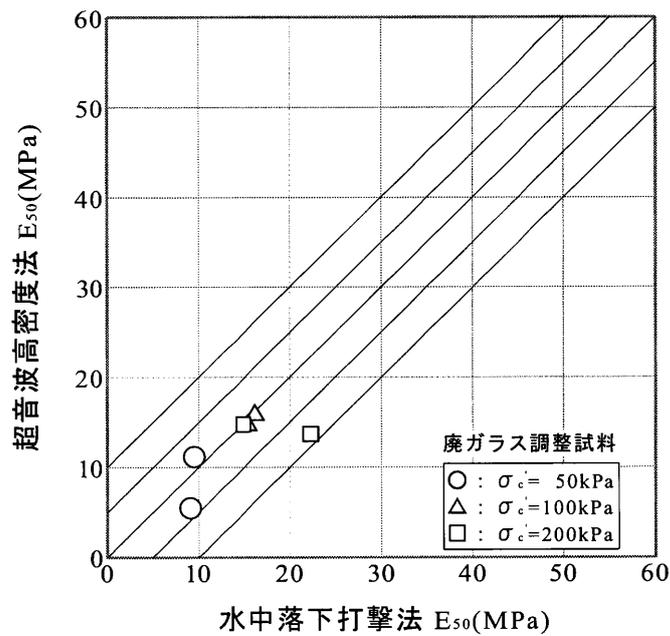


図 4-16 超音波高密度化法と水中落下打撃法による供試体の変形係数  $E_{50}$  の比較 (廃ガラス調整試料)

第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

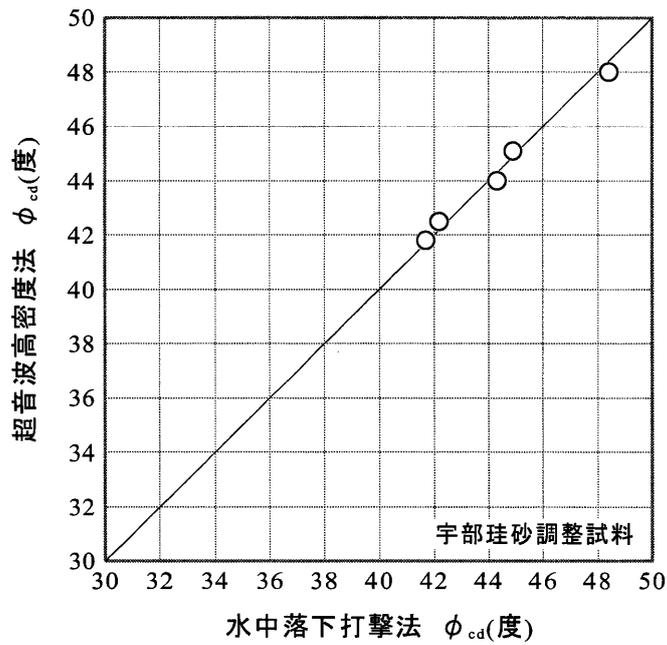


図 4-17 超音波高密度化法と水中落下打撃法による供試体の内部摩擦角  $\phi_{cd}$  の比較（宇部珪砂調整試料）

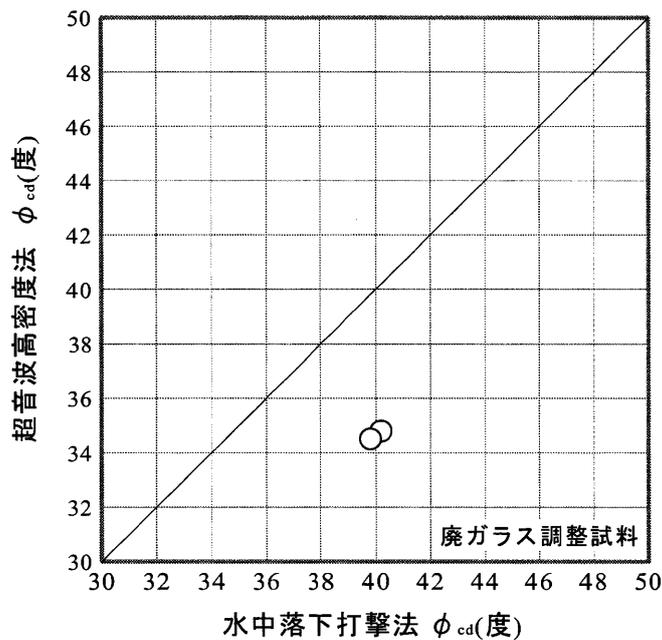


図 4-18 超音波高密度化法と水中落下打撃法による供試体の内部摩擦角  $\phi_{cd}$  の比較（廃ガラス調整試料）

#### 第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

今回実験で使用した宇部珪砂調整試料 No.4, 5, 6, 7 を用いて超音波を照射して高密度にした供試体と水中落下打撃法で締固めた供試体を利用して、粒子の配列を調べた結果が報告されている。<sup>6)</sup> 報告によれば超音波を照射して高密度化した供試体の場合、粒子の長軸方向が水平方向に向いている傾向が強く、水中落下打撃法で作製した供試体の場合、粒子の長軸方向は全方向あるいは縦方向に向いている傾向が強いことが示されている。実験で使用した廃ガラス調整試料 No.1, 7 と宇部珪砂調整試料 No.1, 7 について表 4-1 に示した縦横比  $A_r$  を比べると、廃ガラスの方が宇部珪砂に比べ細長い粒子形状である。超音波を照射して作製した供試体では廃ガラスの粒子の方が宇部珪砂と比べ、粒子の長軸方向がより水平に向いている傾向が強いと考えられる。このことから、廃ガラス調整試料の場合、超音波を照射して作製した供試体と水中落下打撃法で作製した供試体で粒子の配列状態が異なり、せん断強度に差が生じたと考えられる。したがって、廃ガラスのように粒子形状が棒状の材料を用いて超音波を照射して高密度化する場合、粒子の堆積方法や堆積する粒子に対する超音波の照射方法などを考慮して粒子の堆積構造を変化させると、水中落下打撃法で作製した供試体と同程度のせん断強度および変形係数の供試体を作製できると考えられる。

## 4—6 本章の要約

本章では、実用化の観点から、粒子形状と粒度分布が異なる試料に対する超音波の効果を超音波によって高密度化した供試体と水中落下打撃法により作製した供試体の密度増加と強度特性を比較して検証した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 宇部珪砂，廃ガラス調整試料 No.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 を水中に沈降させ，堆積する過程で超音波を照射すると，超音波を照射せず試料を堆積させた場合に比べ，明らかに密度の増加が認められる。
- 2) ガラスビーズ調整試料 No.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 の場合，超音波の密度増加効果は宇部珪砂，廃ガラスに比べ小さい。
- 3) 宇部珪砂，廃ガラス，ガラスビーズ調整試料 No.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 において，真円度  $R_c$ ，縦横比  $A_r$  が大きくなると相対密度の増加量が大きくなる。
- 5) 宇部珪砂調整試料 No.1, 2, 3, 4, 7 の場合，超音波を照射して作製した供試体の変形係数  $E_{50}$ ，内部摩擦角  $\phi_{cd}$  は水中落下打撃法で作製した供試体と同等以上である。
- 6) 宇部珪砂調整試料 No.1, 2, 3, 4, 7 の場合，超音波を照射して作製した供試体と，水中落下打撃法で作製した供試体を比較すると，超音波を照射して作製した供試体で粒子がより安定した堆積構造をしている。
- 7) 廃ガラス調整試料 No.1, 7 の場合，超音波を照射して作製した供試体の変形係数  $E_{50}$ ，内部摩擦角  $\phi_{cd}$  とも水中落下打撃法で作製した供試体より低めの値となる。  
しかし，粒子の堆積方法や堆積する粒子に対する超音波の照射方法などを考慮して粒子の堆積構造を変化させることで，変形係数  $E_{50}$ ，内部摩擦角  $\phi_{cd}$  とも水中落下打撃法で作製した供試体の値と同程度にできる。
- 8) サンドコンパクションパイル工事で利用される砂や，再生材料に対する超音波による高密度化の効果は十分に期待できる。

参考文献

- 1) 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一: 地盤材料の単粒子破碎特性, 土木学会論文集, No.673/Ⅲ-54, pp.189-194, 2001.
- 2) 吉村優治, 小川正二: 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22, pp.95-103, 1993.
- 3) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, pp.473-477, 2000.
- 4) Masanobu Oda: Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, Soil and Foundations, Vol.12, No.1, pp.17-36, 1972.
- 5) Masanobu Oda, Isao Koishikawa and Toshio Higuchi: Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test, Soil and Foundations, Vol.18, No.1, pp.25-38, 1978.
- 6) 井上翔太: 超音波による砂質土の高密度化, 山口大学修士論文, pp.45-54, 2008.

## 第5章 実用サイズによる砂の超音波高密度化方法

### 5—1 概説

第3章，第4章において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が確かめられた．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高密度砂杭工法の確立に繋がると考えられる．

しかし，室内要素試験結果を実際の施工に適できるようにスケールアップするには，実用サイズに対して室内要素試験結果が再現できる方法を確立する必要がある．また，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，装置の駆動によるエネルギーの消費，騒音や振動の発生が避けられず，環境負荷を大幅に低減できる工法の目的からかけ離れることになる．そのため水を介して超音波を粒状材料に伝達させるため，どの程度の水量が必要になるかが工法の実用化には重要な要素の1つになると考えられる．

以上を踏まえ，本章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にできる超音波高密度装置と高密度化された土槽内の試料に対してポータブルコーン貫入試験が実施できる載荷装置を一組とした室内超音波土槽実験装置を製作した．製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に伝達す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．

第5章 実用サイズによる砂の超音波高密度化方法

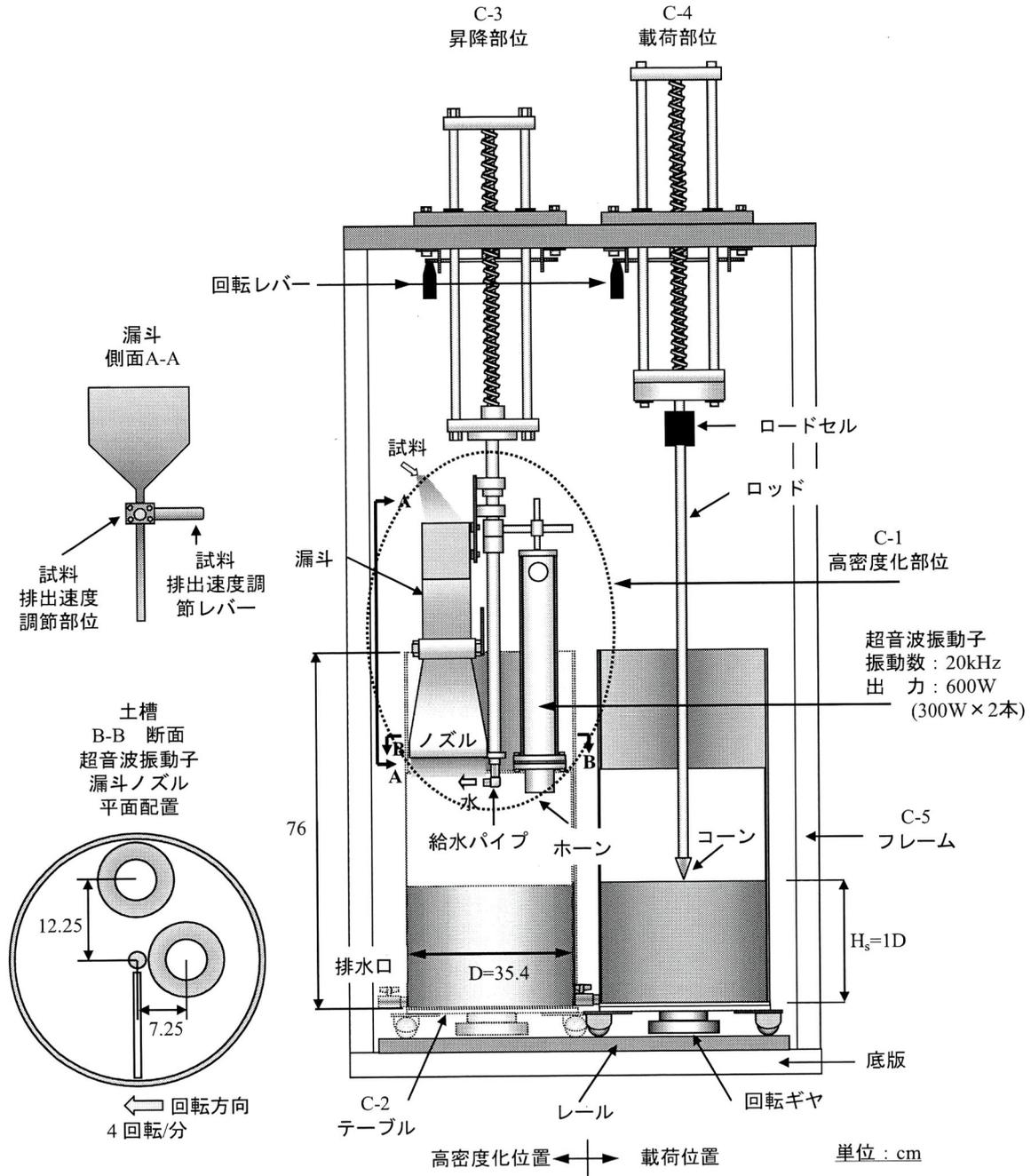


図 5-1 室内超音波土槽実験装置の概要

## 5—2 室内超音波土槽実験装置

### 5—2—1 装置の概要

図 5-1 に室内超音波土槽実験装置の概要を示す。本装置の特徴は、室内要素試験レベルで豊浦砂に対する高密度化条件として確かめられた超音波出力、超音波照射距離、試料投入速度を実用サイズの土槽で再現し、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 を取り付ける軸棒を備え、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つ密度化部位 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版と高密度化部位 C-1 を昇降させる昇降部位 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用の载荷反力を得るための部位である。

### 5—2—2 主要部位の仕様

#### (1) 高密度化部位

超音波はホーン先端から一定の広がりをもってビーム状に照射され、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。室内要素試験用いた供試体作製のモールド直径 75mm 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ほぼ同程度の強さで、試料の高密度化に影響を与えるほどの差はなかったと考えられる。高密度化する範囲が拡大すると、試料堆積面において直径 60mm のホーンから照射される超音波を受ける部分と受けない部分が存在することになる。したがって、拡大した高密度化範囲に対して、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、超音波振動子

## 第5章 実用サイズによる砂の超音波高密度化方法

はテーブル仕様と組み合わせ、なおかつ合理的設計を考慮して、以下のとおり配置した。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、ボルト締めランジュバン型振動子<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>1)</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高さ6mm、幅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、レバーを水平にした場合、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。(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)を連動させて試料を土槽内に投入すると、テーブルを1回転させたときに土槽内に堆積する試料の堆積厚さが調節できる。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、この直径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。

### (2) テーブル

テーブルは四角に取り付けた車輪で底版に備えたレールに乗っており、高密度化部位C-1と载荷部位C-4の間を移動できる。テーブルの移動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、回転ギヤは底版横に取

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/分まで連続的に調節できる。

### (3) 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、超音波照射距離と水面に投入する試料投入高さを試験中に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ことで高密度化部位を上下に移動でき、レバーを1回転させると10mm移動する。

### (4) 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を10mm貫入できる。

### (5) フレーム

フレームは1辺75mmの角鋼管によって門型に組み立てられており、鋼製底版に固定されている。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。

### (6) 実験土槽サイズ

陸上サンドコンパクションパイル工事で利用される実機のケーシングパイプサイズに相当する内径35.4cmの亚克力製土槽を用いた。

## 5—3 土槽試料の高密度化

### 5—3—1 供試体作製方法および条件

### (1) 供試体作製方法

供試体は後述する超音波振動子の平面配置に従って2本の振動子を配置し、以下の3種類の条件によって作製した。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 5.6, 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、振動子のフランジ下面が水に浸る水位である。

### (2) 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。

### (3) 超音波照射距離 $H_u$ の設定

超音波照射距離は第2章, 2-2-2(2)に準じて設定した。

### (4) 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、振動子のサイ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) 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%音圧指示値が得られるホーン中央からの距離を音圧影響距離  $L$  とした。この音圧影響距離  $L$  を半径とした円を求め、こ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 で計測する計測値を第2章, 2-2-2(2), 式 2-4 で定義した音圧と区別するため音圧指示値と記述する) 図 5-2 に音圧指示値計測概要を示す。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。

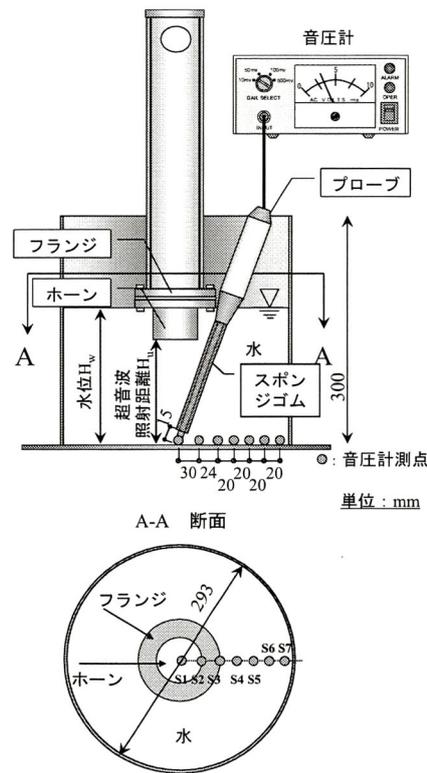


図 5-2 音圧指示値計測概要

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、振動子のフレ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 はフレンジ端部直下に設け、計測点 S3～S7 まで 20mm 間隔で設けた。音圧指示計 HUS-5 は水中を伝播する超音波をプローブで受信し、プローブが受信した超音波の音圧振幅に対応した電圧に変換して電圧実効値  $mV_{rms}$  (millivolt root mean square value) として表示するもので、周波数特性は 10kHz～5MHz である。音圧指示計の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 のみ露出させた。各超音波照射距離に対して、計測点における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値してその計測点の音圧指示値とした。

図 5-3 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 5-3 からホーン中央直下で計測された超音波照射距離 20.6cm における音圧指示値の 50%音圧指示値が得られる距離は、ホーン中央直下から 7.4cm までとした。よって、ホーン 1 本の音圧影響範囲は半径 7.4cm の面積  $172cm^2$  と評価でき、ホーン 2 本の音圧影響範囲は面積  $344cm^2$  と算出できる。

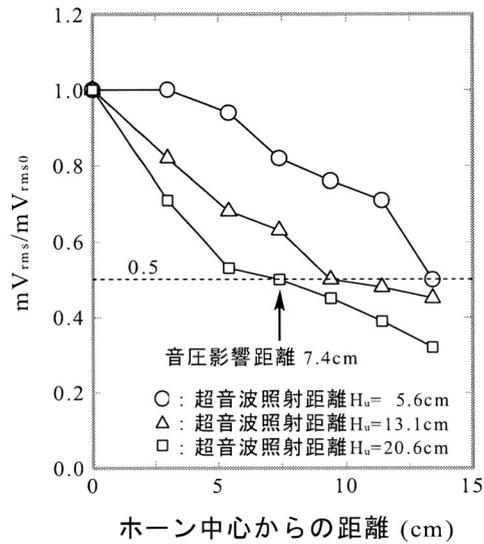


図 5-3 ホーン中央直下音圧指示値  $mV_{rms0}$  に対する各計測点の音圧指示値  $mV_{rms}$  の比

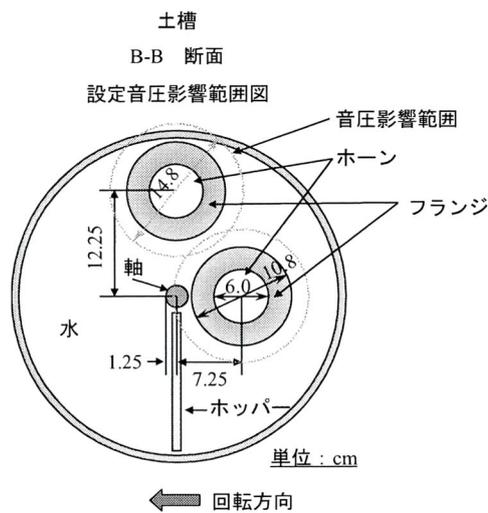


図 5-4 超音波振動子の平面配置

図 5-4 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。このように振動子を配置した場合、土槽が 1 回転すると、土槽全面が 2 本の超音波振動子の音圧影響範囲でカバーでき、土槽内に堆積する試料全面に超音波が照射できる。音圧影響範囲  $344\text{cm}^2$  が土槽全面  $984\text{cm}^2$  を 15 秒で通過する。

### (5) 用いた試料および水

試料は豊浦砂を用いた。豊浦砂の物理定数は第 3 章, 3-3-1 (5), 表 3-1 のとおりである。また水は水道水を用いた。水道水は蛇口からくみ取る際、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くみ取った。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くみ取った後 2 4 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。

### 5—3—2 供試体作製手順

供試体の作製は以下の手順で行った。土槽および高密度化部位を超音波照射位置に移動する。昇降装置の昇降レバーを回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。漏斗先端ノズルと水面までの距離が  $5\text{cm}$  になるように漏斗高さを調節する。給水パイプで土槽内に注水し、ホーン全体を水没させる。試料排出速度調節レバーを回して試料投入速度を  $112\text{g/s}$  に設定する。テーブルを回転速度 4 回/分で回転させる。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。土槽内に堆積する試料堆積面に対して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。水位は振動子のフランジ下に保つ。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。

図 5-5 に高密度化試料堆積厚さ計測位置とポータブルコーン貫入試験位置を示す。土槽内に堆積した試料の厚さは図 5-5 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。

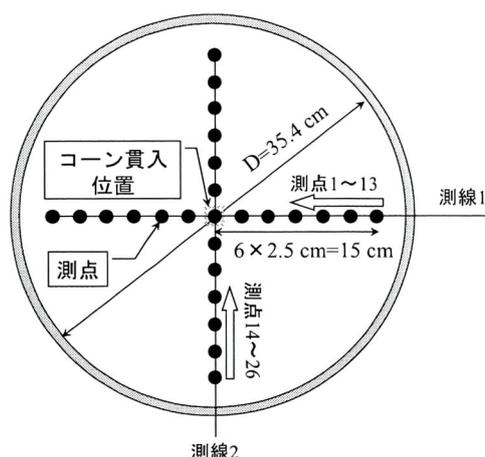


図 5-5 高密度化試料堆積厚さ計測位置とポータブルコーン貫入試験位置

### 5—3—3 実験結果および考察

#### (1) 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 5-6 に図 5-5 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 5-6(a), (b), (c) から、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を比較すると、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 5-6(a), (b) から、超音波を照射して試料を堆積させた場合を比較すると、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見てとれる。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 5-6 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との差について求めた確率密度  $f(x)$  を図 5-7 に示す。

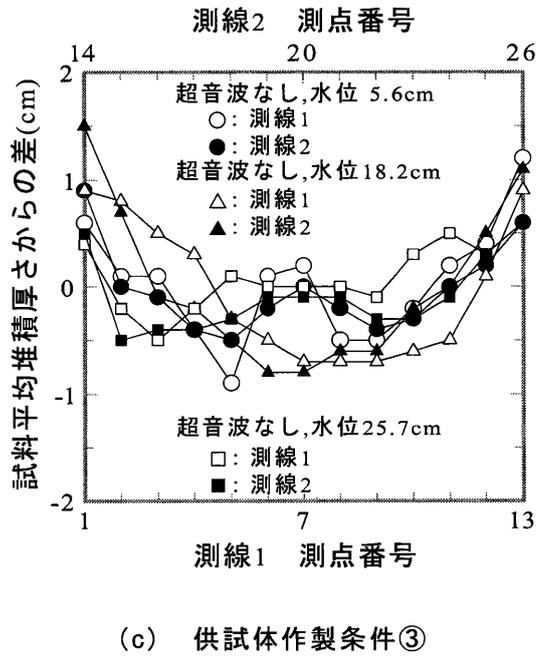
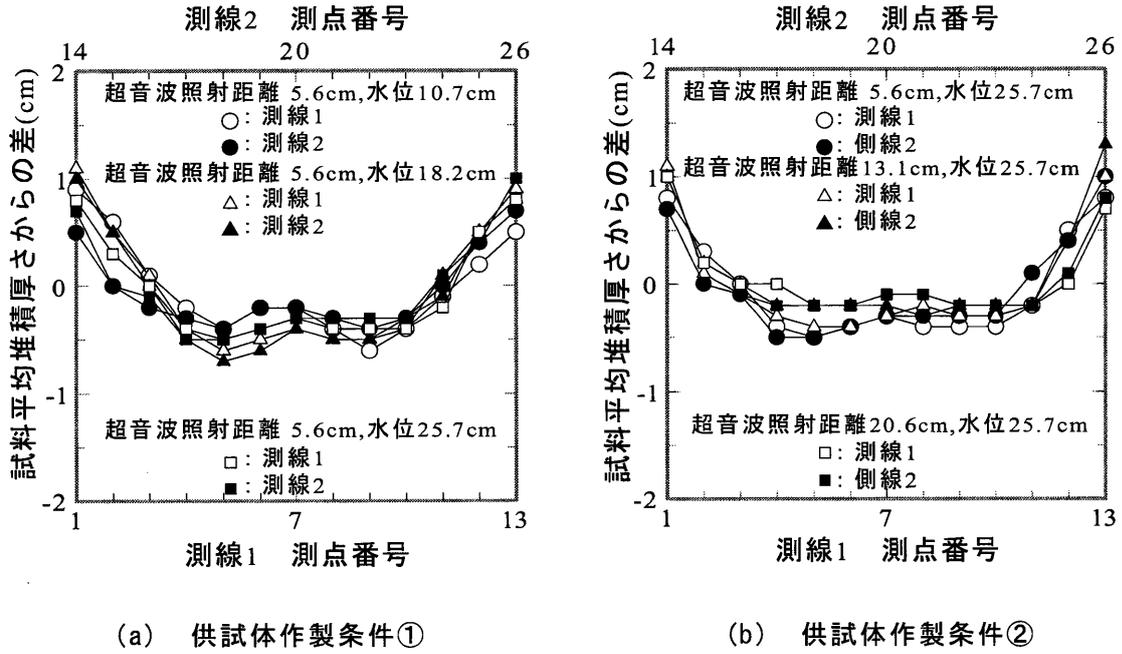
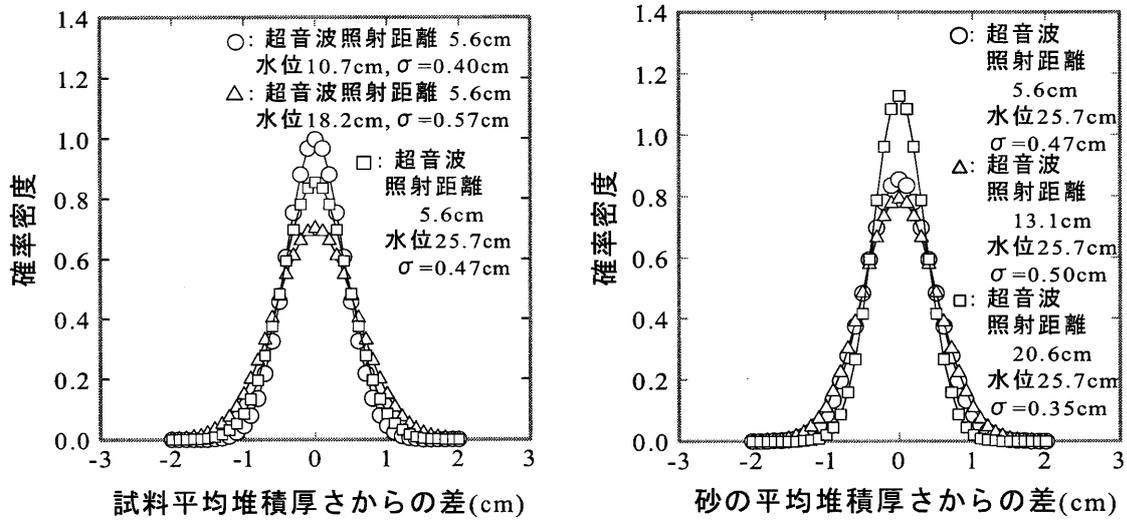
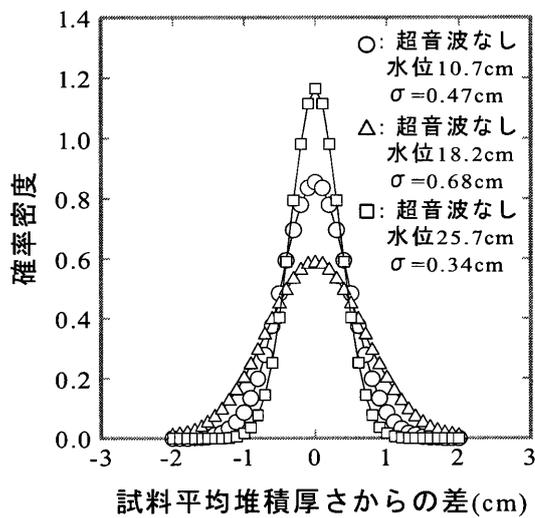


図 5-6 供試体作製条件①～③によって堆積した試料の各測点における試料堆積厚さと平均試料堆積厚さとの差



(a) 供試体作製条件①

(b) 供試体作製条件②



(c) 供試体作製条件③

図 5-7 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

図 5-6 の試料堆積厚さ分布測定結果から、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との差のばらつきが、平均試料堆積厚さを中心に正規分布するとして式 5-1 により求めた。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5-1)$$

ただし、 $x$  は各測点の試料堆積厚さと平均試料堆積厚さとの差(cm)、 $\mu$  は平均試料堆積厚さ(cm)、 $\sigma$  は標準偏差(cm)である。図 5-7(a), (b), (c) から、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を比較すると、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ほぼ均一に照射されるため、堆積した試料粒子はほぼ一律に下方に沈降し、室内要素試験と同様に試料は均一に高密度化できることがわかる。

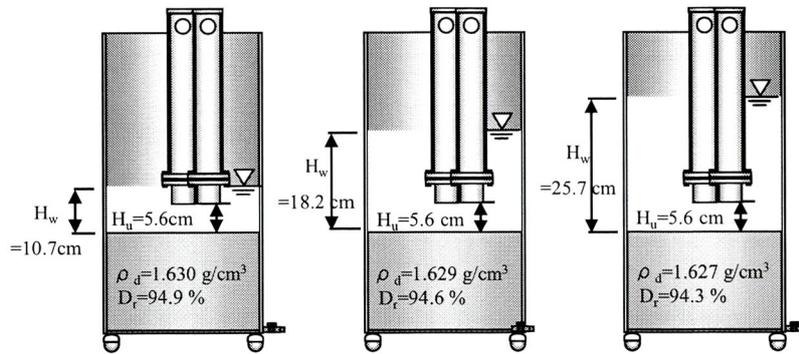
## (2) 超音波照射距離と水位の影響

図 5-8 に土槽実験結果を示す。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 5-5 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する式 5-2 により求めた。

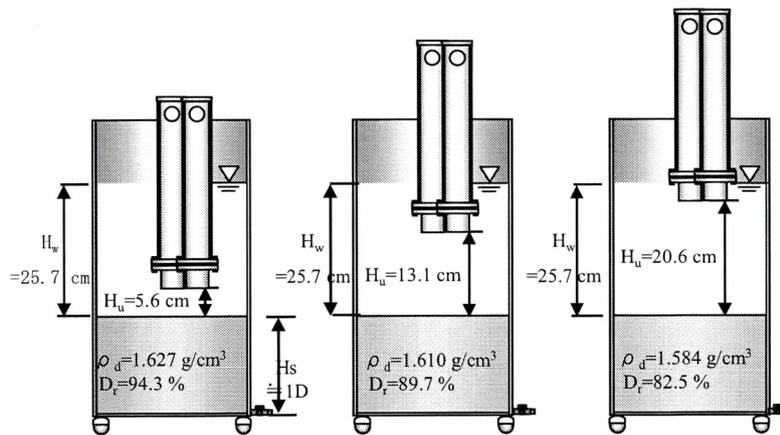
$$H_m = \frac{\sum_{j=1}^{26} H_j}{n} \quad (5-2)$$

ここで、 $H_m$  は平均試料堆積厚さ(cm)、 $H_j$  は  $j$  番目の測点における試料堆積厚さ(cm)、 $n$  は測点数をそれぞれ表す。図 5-8(a), (b) 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。

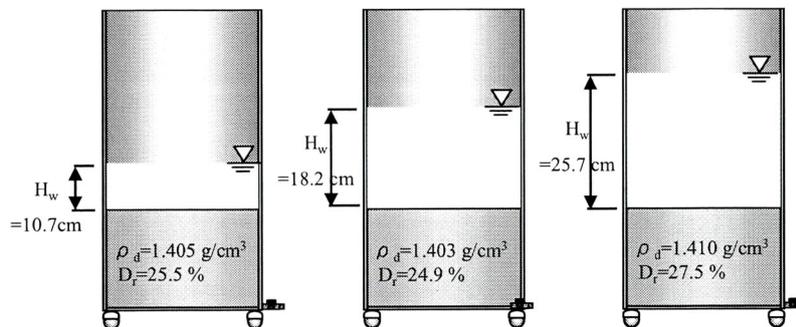
第5章 実用サイズによる砂の超音波高密度化方法



(a) 超音波照射距離  $H_u$  を一定，水位  $H_w$  を変化させた場合



(b) 超音波照射距離  $H_u$  を変化させ，水位  $H_w$  を一定とした場合



(c) 超音波を照射せず，水位  $H_w$  を変化させた場合

図 5-8 土槽実験結果

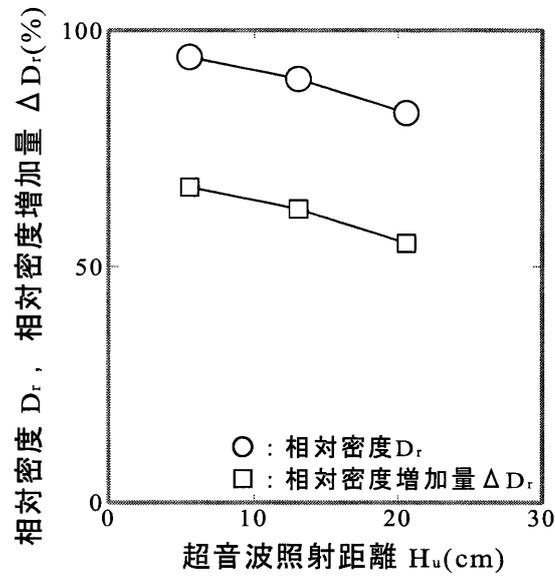


图 5-9 超音波照射距離  $H_u$ -相对密度  $D_r$ -相对密度增加量  $\Delta D_r$  関係

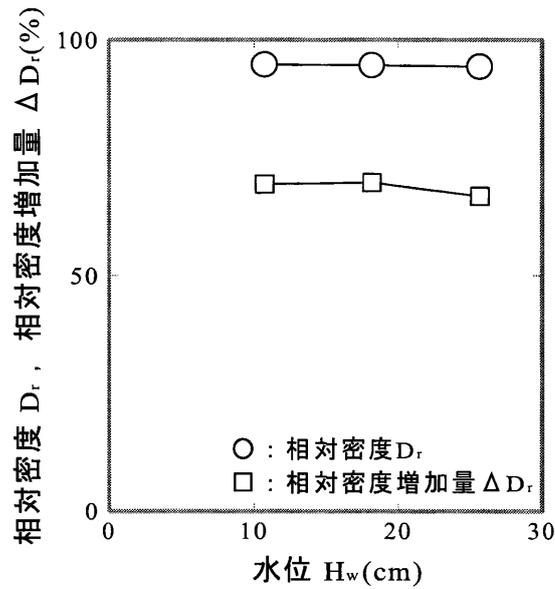


图 5-10 水位  $H_w$ -相对密度  $D_r$ -相对密度增加量  $\Delta D_r$  関係

## 第5章 実用サイズによる砂の超音波高密度化方法

図 5-8(a)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%でほぼ同じ値であり、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。図 5-8(b)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。図 5-8 の結果に基づいて、図 5-9 に超音波照射距離  $H_u$  - 相対密度  $D_r$  - 相対密度増加量  $\Delta D_r$  関係を、図 5-10 に水位  $H_w$  - 相対密度  $D_r$  - 相対密度増加量  $\Delta D_r$  関係をそれぞれ示す。図 5-9 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す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 に設定して、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 5-10 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の異なる境界では一部は反射し、一部は透過することが知られている<sup>3)</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 5-9、図 5-10 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 69.4%増加することが読み取れる。

(3) 試料投入速度の影響

表 5-1 に第 3 章, 3-3-3(2), 表 3-3 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, 試料投入速度の供試体作製条件の内, 超音波照射距離 5.6cm と超音波出力 600W が同じである. 表 5-1 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 5-1 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 5-11 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反映されている. この結果は, 図 5-12 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, 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 が音圧影響範囲 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用いた試料投入速度によって 1 秒間にモールド内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高密度化の範囲を拡大した実用サイズの高密度化に反映できることがわかる.

表 5-1 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 (%)
室内要素試験	24.4	44	0.30	94.5
	65.2	44	0.80	89.9
実用サイズ土槽実験	112.0	344	0.17	94.3~94.9

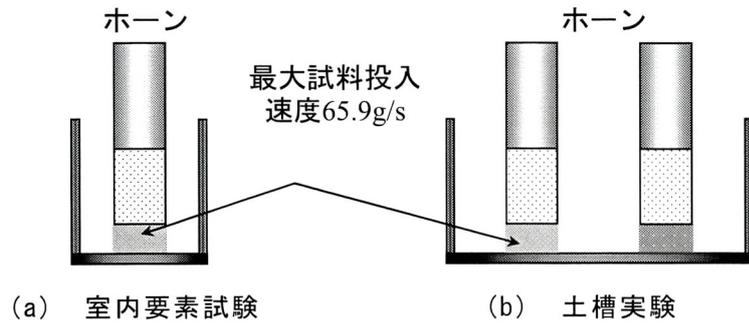


図 5-11 土槽実験装置設計時における試料投入速度算定図

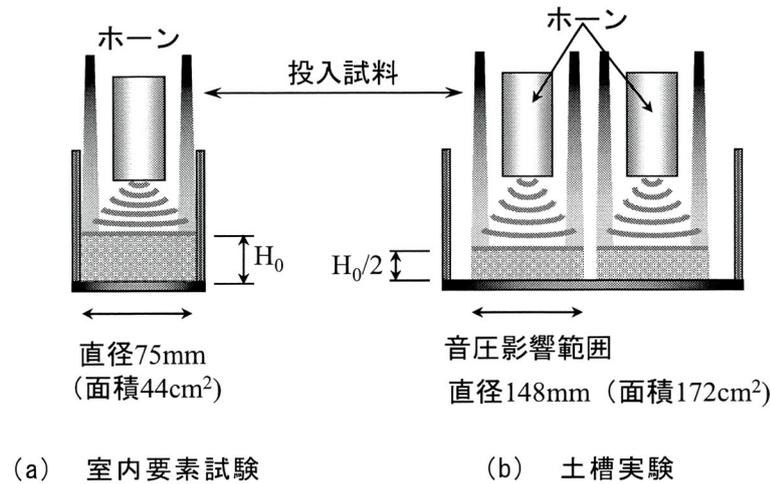


図 5-12 土槽実験結果に基づく試料投入速度算定図

## 5—4 コーン貫入抵抗

### 5—4—1 実験手順

ポータブルコーン貫入試験は図 5-5 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>4)</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  $30^\circ$ 、底面積  $6.45\text{cm}^2$  のものを、ロッドは単管式を使用した。また、先端コーン貫入力値  $Q_{rd}$  はコーン貫入量  $1\text{mm}$  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。

#### 5—4—2 実験結果および考察

図 5-13 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の大きさに対応してポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$  の大きさに明瞭な差が認められる。図 5-14 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 5-13 に示すポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$ —貫入深度関係において、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>5)</sup>の実験結果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内に豊浦砂 ( $G_s=2.64$ ,  $D_{50}=0.16\text{mm}$ ,  $e_{\min}=0.605$ ,  $e_{\max}=0.977$ ) を空中落下法によって相対密度  $D_r=25\sim 95\%$  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  $A_f=100\text{cm}^2$  の三成分コーンを使い、初期鉛直応力  $\sigma_{v0}=49\sim 294\text{kN/m}^2$  ( $0.5\sim 3.0\text{kgf/cm}^2$ ) 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の貫入抵抗  $q_{cd}$  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、土槽周辺の境界条件 (水平方向ひずみ  $\varepsilon_h=0$ , 鉛直方向ひずみ  $\varepsilon_v=0$ ) が等しい実験結果をプロットしている。また、表 5-2 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 5-14 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は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精度よく求めることが可能である。

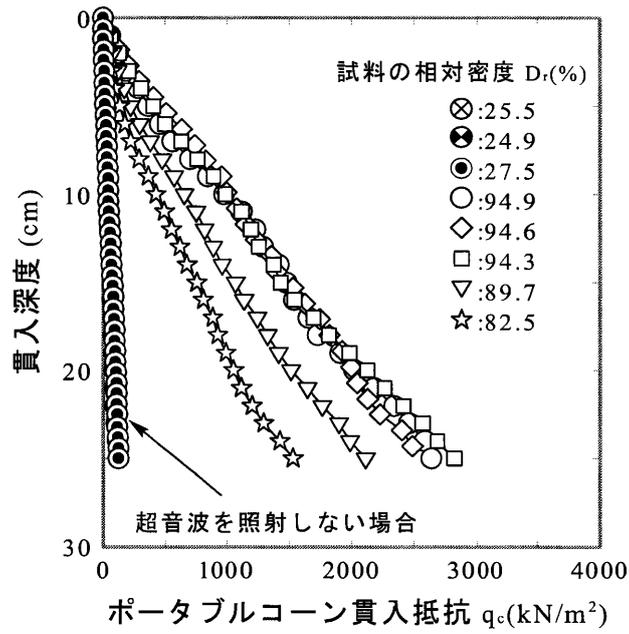


図 5-13 ポータブルコーン貫入抵抗  $q_c$ -貫入深度関係

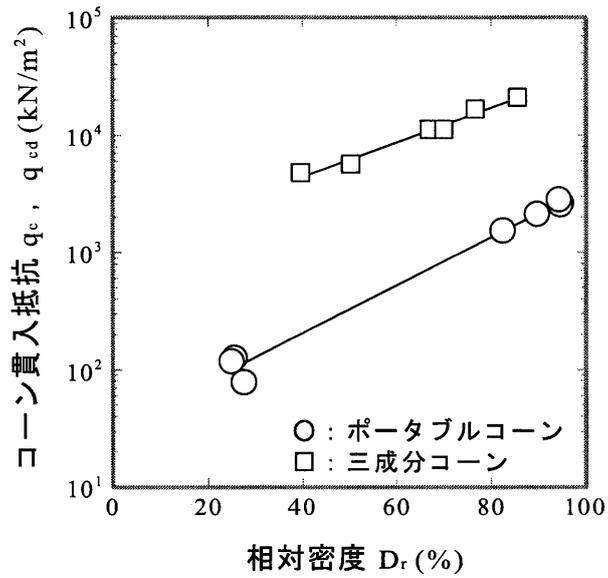


図 5-14 相対密度  $D_r$ -コーン貫入抵抗  $q_c$ ,  $q_{cd}$  関係

表 5-2 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

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 $A_c$	(cm <sup>2</sup> )	6.45	10
初期鉛直応力 $\sigma_{v0}$	(kN/cm <sup>2</sup> )	0	98

## 5—5 本章の要約

本章では、実際の施工への適用を想定して、3章において得られた要素試験レベルの結果が、実用サイズにおいても要素試験と同様に超音波によって砂が高密度化できること示した。そして、超音波によって実用サイズの土槽内に高密度化した砂の強度指標を得るため相対密度とコーン貫入抵抗の関係について調べた。その結果、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、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、均一に高密度化できる。
- 3) 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 に条件を設定した場合、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した場合、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。
- 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 で、超音波照射距離を 5.6～20.6cm の間で調節して、豊浦を高密度化すると、相対密度が 82.5～94.3%程度にほぼ 5%間隔で調節できる。
- 5) 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投入速度および超音波出力と超音波照射距離によって決まる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。
- 6) 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、水位の違いが高密度化する豊浦砂の密度の大きさに影響しない。
- 7) 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で用いた試料投入速度によって 1 秒間にモールド内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拡大したサイズに反映できる。
- 8) 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

## 第5章 実用サイズによる砂の超音波高密度化方法

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精度よく求めることができる。

参考文献

- 1) (社) 日本電子機械工業会編：超音波工学， p.12， pp.72-77， pp.239-240， (株)コ  
ロナ社， 1999.
- 2) 伊藤健一：超音波のはなし， pp.41-42， 日刊工業新聞社， 1999.
- 3) (社) 日本電子機械工業会編：超音波工学， p.12， pp.72-77， pp.239-240， (株)コ  
ロナ社， 1999.
- 4) 地盤工学会：地盤調査法， pp.221-226， 1996.
- 5) 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.

## 第6章 結論

本研究の目的は砂杭の造成工法の実用化を想定して、超音波を照射することで砂が高密度になる機構を室内要素実験および実用サイズの土槽によって明らかにすることである。

各章で得られた知見を以下にまとめて列挙する。超音波高密度法を砂杭の施工法に適用した場合、想定できる高密度砂杭工法の概要を提示した。

### 各章で得られた知見

#### 第1章 序論

第1章では、研究の背景を概説し、サンドコンパクションパイル工法の国内、海外における開発経緯と砂杭造成理論に関する既往の研究について時系列で解説した。

次に超音波による砂や粒状材料の締固めに関する既往の研究を紹介した。そして、それら研究の問題点を明確にし、本研究に至った経緯と研究の目的を述べた。

#### 第2章 超音波により誘起される力と砂の高密度化概念

第2章では、超音波を水中に照射すると粗密波による振動力が伝わり、直流成分、キャビテーションによる力が誘起されることを実験により検証した。そして、これら超音波により誘起される力が砂の高密度化に関わるという仮定のもと、超音波による粒状材料の高密度化概念を提示した。

#### 音の強さ測定で得られた知見

- 1) 超音波出力 600W, 300W, 40W とともに、照射側ホーン先端の音の強さは超音波照射距離に関わらず、超音波出力が増すと大きくなる。一方受振側ホーン先端の音の強さは照射側ホーン先端の音の強さが増すと逆に小さくなる。

## 第6章 結論

- 2) 超音波出力 600W, 300W の場合, 照射側超音波出力を 300W から 600W に 2 倍に増加させても, 受振側ホーン先端の音の強さは変わらない.
- 3) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合, 照射側超音波出力が小さいほど受振側に届く音の強さの割合は大きく, 超音波出力が小さいほど超音波のエネルギーを効率が良く伝えられる.
- 4) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合, 音圧最大位置における音の強さ比は音圧最小位置における音の強さ比に比べて大きい.
- 5) 音の強さ比と超音波照射距離との相関関係は認められない.

### 直流成分測定で得られた知見

- 6) 照射側の超音波出力が 40W より 600W で, 音の強さの損失が大きくなる.
- 7) 損失音の強さと直流成分との間に相関関係がある. 超音波のエネルギーは直流成分を誘起するために使われ, 音の強さの損失分が大きいほど誘起される直流成分も大きい.
- 8) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合, 超音波出力が 600W, 300W, 40W と低下すると直流成分が届く距離は短くなる. 照射側の超音波出力が 600W の場合, 直流成分が届く距離は 20.6cm 程度である. 超音波出力 40W の場合, 直流成分はほとんど誘起されない.

### キャビテーション測定で得られた知見

- 9) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合, 超音波照射距離 3.8cm, 5.6cm, 18.8cm, 20.6cm で水中に超音波を照射すると, キャビテーションが発生した場合に観測されるノイズが持つ特徴的な周波数が計測できる. 超音波出力を 40W から 300W そして 600W に増すと, 基本周波, 低調波, 高調波の間に無数の周波数を持つノイズの増加が認められ, ランダムな大きさの気泡の発生と気泡のランダムな微小振動が連続して起きていることがわかる.
- 10) 超音波出力 600W, 300W, 40W の場合, 照射側ホーン先端から照射される音の強さはキャビテーションが発生する音の強さのしきい値  $0.33\text{W}/\text{cm}^2$  を越えており, キャビテーションが発生していることが証明される.
- 11) 照射側の超音波出力が 40W より 600W の方がキャビテーションの発生に必要な音の強さが大きく, また, 超音波を照射するホーンに近いほど, 基本周

## 第6章 結論

波数，低調波，高調波の発生に加え，これら周波数の間に現れるノイズの音響パワースペクトル値(dB)が大きい。

### 粒状材料の高密度化概念

12)超音波を水中に照射すると誘起される振動力，直流成分，キャビテーションによる力が粒子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て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される。

## 第3章 超音波による砂の高密度化

第3章では，超音波による砂の高密度化概念に基づいて，超音波による砂の高密度化実験を要素試験レベルで行うために開発した超音波供試体作製装置について詳細な説明を行った。そして，開発した装置を使って供試体作製条件の違いが相対密度に及ぼす影響，作製された供試体のせん断特性について調べた。その結果以下の知見が得られた。

- 1) 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，相対密度が明らかに増加する。
- 2) 超音波出力 600W，超音波照射距離 5.6cm の条件で，断続投入法と連続投入法によって作製した供試体の均一性は断続投入法が連続投入法より勝る。しかし，相対密度に差は認められない。
- 3) 断続投入法で作製される供試体の相対密度の大きさは，試料堆積面における音圧の大きさに比例する。しかし，作製される供試体の均一性に音圧の大小の影響はない。
- 4) 試料堆積面の音圧の大小は超音波出力および超音波照射距離の組み合わせで決まる。音圧を一定とした場合，作製する供試体の相対密度は試料投入速度に比例する。
- 5) 超音波出力，超音波照射距離，試料投入速度の組み合わせと，作製される供試体の相対密度の間には表 3-4 に示す関係がある。
- 6) 断続投入法で作製した目標相対密度 70%と 95%の供試体のせん断挙動には両方で大きな違いは認められない。

- 7) 超音波出力を 40w, 600w, 超音波照射距離を 5.6cm, 16.9cm, 試料投入速度を 24.4g/s, 65.9g/s の条件を組み合わせ超音波を照射して供試体を作製すると, 供試体の相対密度は 28.6%から 69.4~94.4%に 40.8~65.8%増加し, 内部摩擦角  $\phi'$  は 33.9 度から 40.5~44.2 度に 6.6~10.3 度増加する.

#### 第4章 様々な砂質土の超音波による高密度化

第4章では, 実用化の観点から, 粒子形状と粒度分布が異なる試料に対する超音波の効果を超音波によって高密度化した供試体と水中落下打撃法により作製した供試体の密度増加と強度特性を比較して検証した. その結果, 以下の知見が得られた.

- 1) 宇部珪砂, 廃ガラス調整試料 No.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 を水中に沈降させ, 堆積する過程で超音波を照射すると, 超音波を照射せず試料を堆積させた場合に比べ, 明らかに密度の増加が認められる.
- 2) ガラスビーズ調整試料 No.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 の場合, 超音波の密度増加効果は宇部珪砂, 廃ガラスに比べ小さい.
- 3) 宇部珪砂, 廃ガラス, ガラスビーズ調整試料 No.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 において, 真円度  $R_c$ , 縦横比  $A_r$  が大きくなると相対密度の増加量が大きくなる.
- 5) 宇部珪砂調整試料 No.1, 2, 3, 4, 7 の場合, 超音波を照射して作製した供試体の変形係数  $E_{50}$ , 内部摩擦角  $\phi_{cd}$  は水中落下打撃法で作製した供試体と同等以上である.
- 6) 宇部珪砂調整試料 No.1, 2, 3, 4, 7 の場合, 超音波を照射して作製した供試体と, 水中落下打撃法で作製した供試体を比較すると, 超音波を照射して作製した供試体で粒子がより安定した堆積構造をしている.
- 7) 廃ガラス調整試料 No.1, 7 の場合, 超音波を照射して作製した供試体の変形係数  $E_{50}$ , 内部摩擦角  $\phi_{cd}$  とも水中落下打撃法で作製した供試体より低めの値となる. しかし, 粒子の堆積方法や堆積する粒子に対する超音波の照射方法などを考慮して粒子の堆積構造を変化させることで, 変形係数  $E_{50}$ , 内部摩擦角  $\phi_{cd}$  とも水中落下打撃法で作製した供試体の値と同程度にできる.
- 8) サンドコンパクションパイル工事で利用される砂や, 再生材料に対する超音波による高密度化の効果は十分に期待できる.

## 第5章 実用サイズによる砂の超音波高密度方法

第5章では、実際の施工への適用を想定して、3章において得られた要素試験レベルの結果が、実用サイズにおいても要素試験と同様に超音波によって砂が高密度化できること示した。そして、超音波によって実用サイズの土槽内に高密度化した砂の強度指標を得るため相対密度とコーン貫入抵抗の関係について調べた。その結果、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、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、均一に高密度化できる。
- 3) 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 に条件を設定した場合、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した場合、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。
- 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 で、超音波照射距離を 5.6～20.6cm の間で調節して、豊浦を高密度化すると、相対密度が 82.5～94.3%程度にほぼ 5%間隔で調節できる。
- 5) 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投入速度および超音波出力と超音波照射距離によって決まる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。
- 6) 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、水位の違いが高密度化する豊浦砂の密度の大きさに影響しない。
- 7) 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で用いた試料投入速度によって 1 秒間にモールド内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拡大したサイズに反映できる。

## 第6章 結論

- 8) 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精度よく求めることができる。

想定高密度砂杭工法の概要

図 6-1 に示す超音波高密度法が砂杭の施工法に適用できれば、図 6-2 に示すような高密度砂杭工法になることが想定できる。

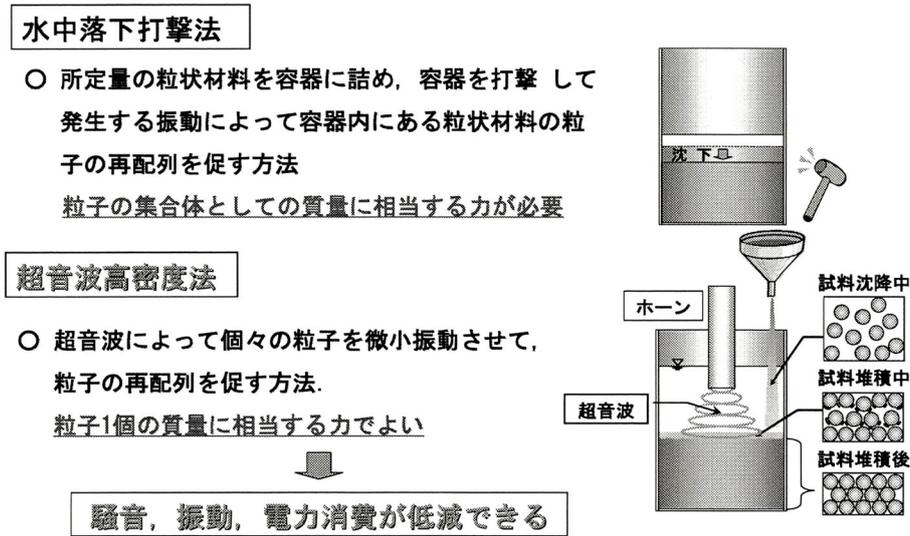


図 6-1 水中落下打撃法と超音波高密度法の比較

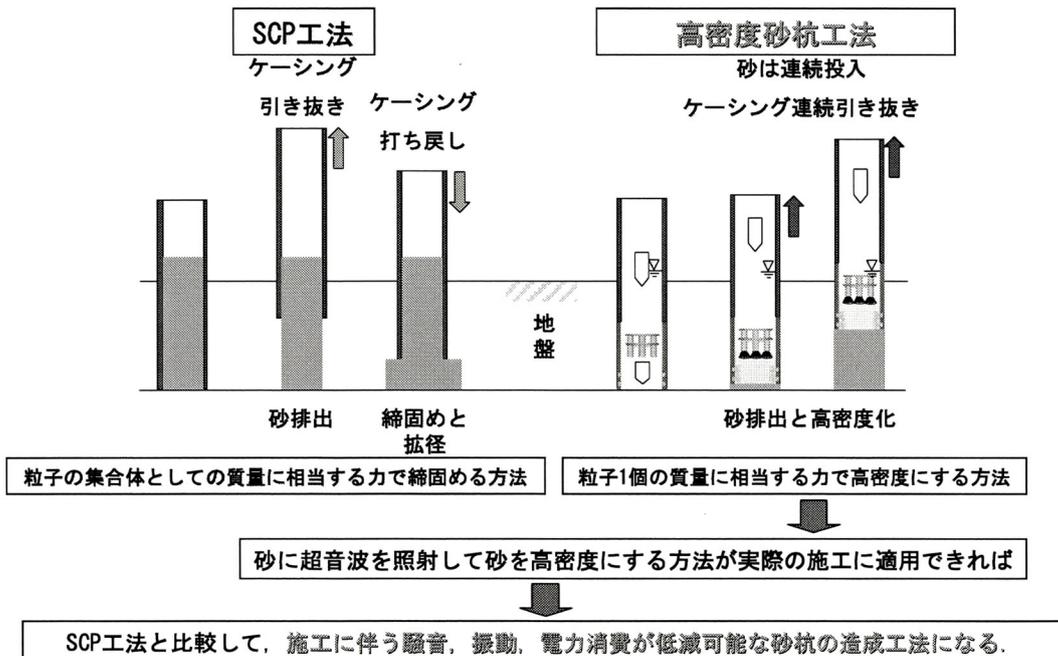


図 6-2 想定高密度砂杭工法の概要

## 謝辞

本論文は私が平成 18 年から 4 年間、山口大学工学部地盤工学研究室に在籍し、主査兵動正幸教授の指導のもとでまとめたものである。研究の遂行および本論文の著述にあたり、多くの方々に指導と支援をしていただきました。

兵動正幸教授：兵動先生には平成 6 年（1994）にお会いして以来、今日まで 16 年間、地盤工学に関わる多くのことをお教えいただきました。先生の後押しがなければ、私が博士課程に進学することはなかったと思います。今日を迎えることができましたのは一重に先生のご教授と叱咤激励によるものです。ありがとうございました。

中田幸男教授：中田先生には無言のプレッシャー与えていただきました。目的に向かって自身を前進させる力を与えていただいたと感謝しています。

吉本憲正助教：吉本先生には論文の著述に関して、常に的確な指摘と助言をいただきました。論文を書き上げることができたのも先生のおかげと感謝に耐えません。

井森浩視社長：井森社長には SCP 工法に携わる機会と超音波研究を続ける機会を与えていただいていることに感謝いたします。実用化を達成し、事業業績につなげる所存です。

吉崎雅文常務：吉崎常務には常に研究開発に関する理解者として全面的な支援をしていただきました。ありがとうございました。

桑山忠先生（前大同工業大学教授）：桑山先生には平成 11 年に先生の研究室を訪問し、SCP 工法が抱えている問題、われわれが目指す方向を伝え、超音波によって砂杭が造成できる可能性を問い、「可能性があるね」の一言から本研究が始まりました。先生の一言が無ければ今日の成果はありませんでした。改めてお礼申し上げます。

鳥取大学榎明潔教授：榎先生には SCP 工法に関する理論と施工技術、そして古典的土質力学の有用性など多くのことを学ばせていただきました。何時訪問しても常に暖かく接していただき、研究への励まし、そして研究の方向性を教授していただきました。ありがとうございました。

徳山工業高等専門学校上俊二教授：上先生には昭和 60 年、土の三軸圧縮試験をお願いして以来 25 年間、様々なことで支援をしていただきました。また、本研究の遂行に際しては、言葉では言い尽くせないほどの支援をしていただきました。ありがとうございました。

東京大学山田卓助教：山田先生には平成 18 年 4 月～平成 19 年 1 月までの 10 ヶ月、井森工業株式会社の委託社員として初期の超音波研究に関わっていただき、超音波高密度化法の理解者として支えていただきました。ありがとうございました。

日鉄鉱コンサルタント（株）井上翔太君：井上君には様々な材料を使った超音波による密度増加効果に関する実験は山口大学博士前期課程在学中、彼によって行なわれたものです。多くの貴重な結果を実験によって明らかにしていただきました。ありがとうございました。

（財）周南地域地場産業振興センター藤井基志氏、徳原慶二氏：両氏には、実用サイズの超音波土槽実験装置をものづくり支援施策によって製作できる機会を与えていただき、その結果がベースとなって研究開発を大きく進展させることができました。お礼申し上げます。

(有)リンクス, 阿武健一郎社長 山根茂高専務 田中伸幸氏: 三氏には高度な機械設計技術と経験を余すところなく超音波高密度装置の設計製作につき込んでいただき, 今日研究成果を挙げる大きな役割を担っていただきました. 改めてお礼申し上げます.

(有) コウワ技研, 仲原弘社長: 仲原社長には1技術者の思いをくみ取っていただき, 超音波機器の製作のほか多くの支援をしていただきました. お礼申し上げます.

鋤田敏雄氏: 鋤田には超音波探傷の専門家として超音波のいろはを指導していただきました. ありがとうございます.

井森礼二氏 (前井森工業株式会社常務取締役): 井森氏には私が入社以来, 公私に渡るお付き合いをいただきました. 常に励まし, 勉強する機会を与えていただきました. ありがとうございます.

石津俊英取締役, 鶴岡龍彦氏 (前井森工業株式会社技術部長), (故) 戸田信之氏 (前井森工業株式会社東京支店営業部長), 山川真史君 (前井森工業株式会社技術員): 四氏が当社に途中入社されたことで, 私がSCP工法に深く関わることになり, それが超音波の高密度化の研究開発に繋がりました. 感謝に耐えません. また, 私が身につけた多くの地盤改良に関わる知識, 技術は鶴岡龍彦氏より教授していただいたものです. ありがとうございます.

井森アーステック (株) 吉村尚久君・畑田智康君: 両君は主に屋外土槽を使った実用サイズによる超音波高密度化実験に関わり, 責任をもって実験の様々な計測, 砂杭評価のための試験を実施してくれました. 感謝します.

井森工業 (株) 土木部村上俊秀君: 超音波研究に関わる実験の大半は村上君の手によるものです. 何事も疎かにすることなく, 1つ1つの実験を粘り強く繰り返し, 多くの成果を出してくれたことに感謝します.

三浦正昭先生 (前日本文理大学教授): 三浦先生には学生時代, コンクリート工学に関わる理論をお教えいただきました. 社会人となってからも, お付き合いをいただき, 私の研究活動についても励ましをいただきました. ありがとうございます.

恩師薄慶治先生 (前九州産業大学教授): 薄先生には構造工学の知識, 物の変形に関わる考え方をお教えいただきました. 構造工学分野ではありませんが, 多くの仲間, 支援者と研究に取り組み, 新しい技術を生み出す技術者の1人に成り得たことを喜んでいただけるものと思います. 今日までのご指導に改めてお礼申し上げます.

親友園田一則君: 園田君は私の個性をだれよりも理解し, 常に認めてくれ, 友として励まし, 研究を応援してくれました. 感謝

妻由枝: ただただ私を支え続けてくれました. 言い尽くせないほど感謝しています. 「ありがとう」. また暖かくエールを贈り続けてくれた長男崇之, 長女郁, 二男晃, 「ありがとう」

亡き義母, 五十嵐富美: 今日の報告を心より喜んでくれていると思います. 「ありがとう, 感謝で一杯です」

最後に, 何にも代えがたい健康な体を与えてくれ, そして教育の機会を与えてくれた両親に感謝の意を表し, 本論文を終わります.