



締固め土の三軸液状化特性に及ぼす諸要因の影響とその評価に関する研究

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: ja 出版者: 公開日: 2023-11-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 佐々木, 朋子 メールアドレス: 所属: |
| URL | https://doi.org/10.15118/0002000156 |

令和5年度

博士学位論文

締固め土の三軸液状化特性に及ぼす
諸要因の影響とその評価に関する研究

令和5年9月

指導教員

川村 志麻 教授

室蘭工業大学大学院

工学研究科 博士後期課程

工学専攻 先端環境創生工学コース

佐々木朋子

目 次

| | |
|---------------------------|-----------|
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1.1 研究の背景 | 1 |
| 1.2 本研究の目的及び論文の構成 | 8 |
| 参考文献 | 10 |
| 第 2 章 既往の研究 | 12 |
| 2.1 液状化特性に関する研究 | 12 |
| 2.2 土の締固め特性に関する研究 | 16 |
| 2.3 供試体の不均一性に関する研究 | 19 |
| 2.4 本章のまとめ | 21 |
| 参考文献 | 23 |
| 第 3 章 試験試料及び試験方法 | 25 |
| 3.1 試験試料 | 25 |
| 3.1.1 一般的な盛土工で用いられる材料の選定 | 25 |
| 3.1.2 本研究で用いた試験試料の物理的特性 | 30 |
| 3.1.3 試料調製の妥当性及び供試体作製条件 | 34 |
| 3.2 試験装置 | 41 |
| 3.3 供試体作製方法 | 44 |
| 3.3.1 供試体作製方法及び条件の選択 | 44 |
| 3.3.2 一般的な三軸試験供試体の作製方法 | 46 |
| 3.3.3 本研究における供試体の条件及び作製方法 | 48 |
| 3.4 試験手順及び試験条件 | 60 |
| 3.5 応力及びひずみの定義 | 61 |
| 3.6 本章のまとめ | 64 |
| 参考文献 | 65 |
| 第 4 章 液状化試験結果及び考察 | 67 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 4.1 | 試験条件の検証 | 67 |
| 4.1.1 | 载荷方式が液状化特性に与える影響 | 67 |
| 4.1.2 | 载荷周波数が液状化特性に与える影響 | 69 |
| 4.2 | 均一な粒度組成をもつ土質材料の液状化特性 | 72 |
| 4.2.1 | 液状化強度曲線 | 72 |
| 4.2.2 | 繰返し载荷中の過剰間隙水圧の挙動 | 82 |
| 4.2.3 | 繰返し载荷中の軸ひずみの発達状況 | 85 |
| 4.3 | 広範囲な粒度組成をもつ土質材料の液状化特性 | 88 |
| 4.3.1 | 液状化強度曲線 | 88 |
| 4.3.2 | 繰返し载荷中の過剰間隙水圧の挙動 | 95 |
| 4.3.3 | 繰返し载荷中の軸ひずみの発達状況 | 98 |
| 4.4 | 供試体作製時の諸条件による液状化特性の比較検討 | 101 |
| 4.4.1 | 薄層で締め固めた供試体の不均一性 | 101 |
| 4.4.2 | 供試体の密度勾配を逆にした場合の比較 | 108 |
| 4.5 | 本章のまとめ | 109 |
| | 参考文献 | 111 |
| | | |
| 第5章 | 画像解析手法及び結果並びに考察 | 112 |
| 5.1 | CTによる画像解析 | 112 |
| 5.1.1 | CTを用いた画像解析による既往の研究 | 112 |
| 5.1.2 | CTによる画像解析手法 | 115 |
| 5.1.3 | CTによる画像解析結果及び考察 | 118 |
| 5.2 | PIVによる画像解析 | 122 |
| 5.2.1 | PIVを用いた画像解析による既往の研究 | 123 |
| 5.2.2 | PIVによる画像解析手法 | 124 |
| 5.2.3 | PIVによる画像解析結果及び考察 | 128 |
| 5.3 | 2種類の画像解析結果による供試体の不均一性と軸方向ひずみとの関係 | 138 |
| 5.4 | 本章のまとめ | 140 |
| | 参考文献 | 142 |
| | | |
| 第6章 | 三軸試験の供試体作製方法における提案 | 144 |
| 6.1 | 力学試験及び画像解析結果による土の締め固めと液状化強度に関する検討 | 144 |
| 6.2 | 湿潤締め固め法における適切な締め固め層厚の検討 | 148 |

| | | |
|------------|------------------|------------|
| 6.3 | 結果の適用 | 153 |
| 6.4 | 本章のまとめ | 155 |
| | 参考文献 | 156 |
| 第7章 | 結論及び今後の課題 | 157 |
| 7.1 | 結論 | 157 |
| 7.2 | 今後の課題 | 160 |
| | 付録 | 161 |
| | 謝辞 | |

第1章 序論

1.1 研究の背景

(1) 地震に伴う液状化災害の研究分野への影響

我が国では、頻発する大規模な自然災害によって、それらの対策はもちろんのこと、土構造物に対する多様性への需要が年々増加している。そのような状況の中で、地盤の液状化に関する研究は、地震災害の歴史と共に発展を遂げてきた。

我が国において、液状化による災害の認識が明確になったのは、1964年の新潟地震である。新潟地震は、1964年6月16日に新潟県の粟島南方沖を震源としたマグニチュード7.5、最大震度5（震源に近い地域では震度6程度）であった。本地震では、県営アパートが大きく傾いたことや、新潟空港の滑走路冠水、ガソリントankの損傷など、多方面で甚大な被害が報告され、地震による液状化現象が一般に認知されると共に、液状化の基礎研究の契機となった。

1978年の宮城県沖地震は、ライフラインの停止、ブロック塀の倒壊及び家屋倒壊による甚大な被災など我が国初となる都市型地震災害となったことから、3年後の1981年に建築基準法が改正¹⁾され、新耐震基準が制定された。この3年後の1984年に「砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会」²⁾によって液状化特性に及ぼす諸要因の影響に関する研究・調査結果が取りまとめられた。そこでは、特に供試体作製方法や供試体作製条件によって、液状化特性にどのような影響が現れるのか、その問題点が指摘されている。

その後の1997年の兵庫県南部地震では、広範囲で海岸埋立地の液状化被害が報告されている。また、本地震での特徴は、シルト地盤での液状化現象の報告であり、それまでの液状化に対する材料特性の議論に新たな要素が加わる。これらの検証を経て、1996年に道路橋示方書・同解説³⁾が改定され、耐震設計法や液状化検討項目が変更された。その後、材料の物性と液状化特性との関係については、活発な議論が展開される。

2004年の新潟県中越地震では、下水道施設の大規模災害を受けて、埋戻し土の耐震対策の必要性について取りまとめが行われ⁴⁾、2011年東北地方太平洋沖地震では、北東北から関東平野の広範囲で液状化による被害が報告された。特に、千葉県を中心として戸建て住宅の不動沈下やライフラインの寸断などの被害が目立ち、加えて、過去

の地震で液状化が発生した箇所での再液状化も報告された^{5),6)}。

2016年の熊本地震では、二日連続で最大震度7の揺れが発生したことによる被害の拡大や二日目の地震（本震）による再液状化が指摘されており、それらは、いずれも河川の氾濫原や火山山麓の扇状地で起こっていることなどが報告された⁷⁾。また、2018年の北海道胆振東部地震では、札幌市清田区における火山灰造成地で大規模な液状化被害が報告されており⁸⁾、未対策地域や埋立地における被害、再液状化など、従来からの問題点が再度指摘された。これら、液状化現象を伴う1964年以降の主な大規模地震及びその液状化被害の特徴の例を表1.1.1に示す。

表 1.1.1 大規模地震及びその液状化被害の特徴一覧

| 年 | 地震名称 | Mj | 最大震度 | 特徴 |
|------|------------|-----|------|---|
| 1964 | 新潟地震 | 7.5 | 5 | 液状化・津波による冠水，コンビナート火災 |
| 1978 | 宮城県沖地震 | 7.4 | 5 | ライフライン停止，ブロック塀及びビルの倒壊，新興住宅地の地盤崩壊，液状化によるビルの倒壊や傾斜 |
| 1995 | 兵庫県南部地震 | 7.3 | 7 | 家屋・建物倒壊・損壊，火災，液状化，ライフライン寸断，高速道路倒壊，高架橋の倒壊，落下 |
| 2004 | 新潟県中越地震 | 6.8 | 7 | 液状化，新幹線脱線，崖崩れ，ライフライン停止，道路寸断，家屋倒壊， |
| 2011 | 東北地方太平洋沖地震 | 8.4 | 7 | 津波，液状化，建物倒壊，道路損壊，山崖崩れ，福島第一原子力発電所事故 |
| 2016 | 熊本地震（本震） | 7.3 | 7 | 家屋損壊，土石流・崖崩れ，鉄道運転休止，道路通行止め，断水，文化財損壊，農地や農業用施設の被害，液状化 |
| 2018 | 北海道胆振東部地震 | 6.7 | 7 | 崖・土砂崩れ，家屋損壊，火災，液状化，大規模停電，道路損壊 |

以上のように、過去に発生した地震による被害の内容によって、液状化に関する対策やそれらに関する研究が進められ、それと共に、設計やそれに付随する地盤材料試験は、これまでのスペックを超えた内容や、細やかな条件に沿った結果が求められるようになっている。

(2) 供試体作製を対象とした研究の意義

地盤材料試験は、試験の実施に当たり、求める結果によって適切な方法や条件を選択する必要がある。適切な方法の選択に当たっては、いずれの試験においても初期の判断を的確に行うことが要点の一つといえる。例えば、物理試験では物性の観察やそれによる器具の選択、力学試験では試料の取扱い方法や供試体の作製方法などである。特に、力学試験は、結果に与える素因が多い分、初期の選択や判断を正確に行うことが肝要である。

前述のように、液状化の基礎的研究については、新潟地震が発生した 1964 年から液状化試験方法の基準が制定された 1990 年頃にかけて多くの成果が発表されており、1984 年にとりまとめが行われた「砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会」による報告⁹⁾では、測定器具の仕様や設置方法、供試体条件による結果の違いが検討され、それらを統一する必要性が示されている。試験方法の制定に当たっては、これらのような基礎的研究の結果を基に議論が行われ、十分な検討によって基準化が進められた。しかしながら、前述のような地盤材料試験に対する要求性能の変化によって、力学特性の土台となる供試体条件についても、更に詳細な知見が必要なケースが出ており、特に研究分野では、その需要が高まっている。

他の科学技術分野がそうであるように、地盤材料試験の分野においても、近年、新しい計測技術が取り入れられており^{例えば 10),11)}、それらの技術を合理的に採用したり、結果を適切に判断したりするためには、必要な範囲でサンプルの諸元を把握していることが重要である。例えば、変位や水圧などを供試体内の代表箇所測定するケースでは、供試体内の不均一性がどの程度であり、その結果、どの程度の影響があるのかを事前に知っておくことで、より適切な測定器の設置や実態に即した実験計画の構築及び結果の解釈につながると考えられる。

また、供試体条件のわずかな違いが、潜在的なばらつき、例えば試験機関による結果の相違などを助長し、データを横並びにした際に、検討の妨げになる場合もある。

図 1.1.1 は、「飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会」にて実施された豊浦砂を用いた液状化試験の全国一斉試験の結果¹²⁾である。これらのデータは、委員会から各試験機関に向けて、事前に通知した標準仕様を満足した結果を抽出したものである。図より、同じ条件による結果であっても、試験機関によって差があり、液状化試験によって得られる繰返し応力振幅比～繰返し载荷回数関係において、繰返し

載荷回数が 20 回のときの繰返し応力振幅比は、最小値に対する最大値は、4 割程度大きいことがみてとれる。耐震性能照査の分野では、一つの供試体条件について、一般的な調査業務で用いるよりはるかに多くの供試体本数を必要とする検討¹³⁾も行われるようになってきている。このような検討で結果のバラつきが出た場合、バラつきを踏まえたパラメータの算出は、技術者の判断によることが多くなるため、担当した技術者や試験機関による結果の差が広がる可能性が考えられる。以上のいずれのケースも、取得したい結果の精度と供試体のスペックとの関係を把握していることや、結果の精度を満足する供試体を用いた試験を行うことが重要である。

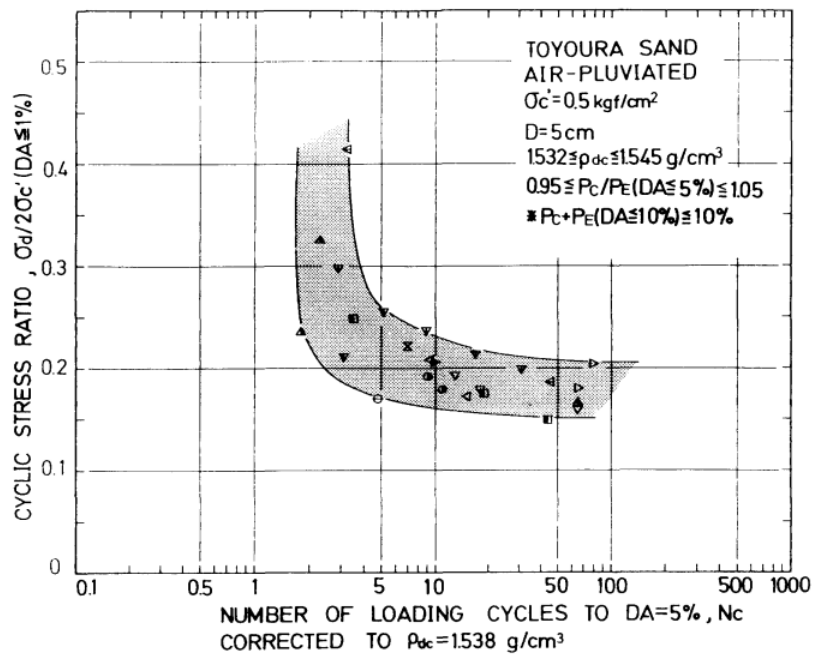


図 1.1.1 一斉試験において標準仕様を全て満足するデータによる液状化強度¹²⁾

(3) 三軸試験の供試体作製基準と本研究の概要

地盤工学会基準では、三軸試験の供試体作製・設置方法として2つの基準を設けている。一つは「土の三軸試験の供試体作製・設置方法」(JGS 0520)¹⁴⁾であり、もう一つは「粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法」(JGS 0530)¹⁵⁾である。これらは試料の最大粒径による適用範囲が規定されており、最大粒径が20 mmを超える試料には後者が適用される。また、これら2つの基準には、共に不攪乱試料と攪乱試料の取扱い方法が示されている。不攪乱試料については、サンプリング方法や供試体サイズによって手法の違いはあるものの、極力乱さずに準備及び作製することが求められている。他方、攪乱試料の再構成に当たっては、種々の方法が採られているが、その選択は目的や用途によって様々である。

JGS 0520 や JGS 0530 の供試体の再構成方法には、空中落下法、水中落下法、締固め法の記載があるが、この中で空中落下法や水中落下法などのまき出しによる方法は、試験試料がまき出しによって分級を起こさない粒度組成(単粒またはそれに近い試料)である必要がある。また、空中落下法の場合、試料の団粒化を避けるために含水比を炉乾燥状態か気乾状態に調整するが、これらが目的に対して適切か否かを考慮した上で、適用の判断をしなければならない。

一方、締固め法は、試料の粒度や含水状態の選択の幅が広く、現場の土の状態を維持またはそれに近い状態を再現し易いことから、調査業務や施工時の品質管理などの力学試験に用いる供試体の作製では、締固め法を用いることが多い。ただし、前述の各基準における締固め法の要求事項は、JGS 0530 では締固め層数を5~6層としているが、JGS 0520 では「数回」という表現に留まっており、JGS 0520 の締固め法では実質的な要求事項がほぼないといえる。このように、学会基準による締固め法、特に JGS 0520 は、使用に当たっての設定条件に対する自由度が高い。しかしながら、このように汎用性やそれに伴う自由度が高い方法を採用する場合、選択した条件に対する十分な知見や技能が必要となる。しかしながら、このような検討は、静的載荷による力学試験結果と比較すると、繰返し載荷試験による試験結果は大幅に少ないのが現状である。

以上の背景のもと、本研究では、2種類の砂質土を用いて湿潤締固め法による異なる作製条件下の供試体を作製し、繰返し非排水三軸試験と2種類の画像解析を実施している。画像解析では、はじめにX線CT(Computed Tomography: コンピュータ断層

撮影) 画像によって供試体作製時の供試体内部構造を把握し、その後、PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法) 解析結果によって繰返し载荷中の供試体表面における軸方向ひずみを計測し、締固め層厚が三軸液状化特性に及ぼす影響について明らかにしている。また、2 種類の砂質土による結果の比較を行うことで、粒度組成による液状化特性の相違についての考察も行っている。さらに、これらの結果に基づいて、繰返し三軸試験における湿潤締固め法の適用において、締固め層厚を中心とした供試体条件の提案を行っている。

1.2 本研究の目的及び論文の構成

本節では、本研究の目的を整理した結果を示し、その後、本論文の構成について示す。

まず、1.1 節の背景から、本研究では、次の 1) 及び 2) を目的とし、下記 a)～d) を実施した結果による検討を行った。

- 1) **JGS 0520** の補填のために、締固め法における適切な締固め層厚を提案する。
 - 2) バラつきが少なく、安定した繰返し三軸試験結果を提供するための供試体作製方法を提案する。
-
- a) 粒度組成の異なる 2 種類の砂質土を用いて、湿潤締固め法による供試体を作製し、締固め層厚の違いが液状化特性に及ぼす影響についてまとめた。
 - b) 各種測定方法（ノギス法及び X 線 CT による画像解析）によって供試体作製時の締固め層厚による供試体内の不均一性の違いを明らかにした。
 - c) 液状化試験中の供試体を撮影し、PIV による画像解析を用いて締固め層厚による供試体表面の局所的な軸方向ひずみの挙動の違いについて明らかにした。加えて、PIV 解析用供試体を作製する際の留意点についても整理した。
 - d) 試料の粒度組成のよって異なる締固め層厚による供試体への影響について整理し、試料条件による供試体作製時の注意点をまとめた。

以下に、本論文の構成を記す。また、**図 1.2.1** に、本論文の構成のフローを示す。

1 章では、研究の背景をまとめ、本論文の目的及び構成を示した。

2 章では、液状化、締固め及び供試体の不均一性に関する既往の研究成果について示した。

3 章では、本研究で使用した試験試料と試験方法について述べている。まず、試験試料の物性を物理試験及び締固め試験結果と共に記載した。続いて、試験装置、供試体作製方法、試験手順及び試験条件を順に示し、結果のまとめに用いたパラメータについても本章で定義した。

4 章では、3 章で決定した作製方法及び条件における供試体を用いて行った液状化試験の結果及び考察について試料ごとに整理した。また、供試体内の不均一性に関する考察及び検討結果について示している。

5 章では、2 種類の画像解析（CT 及び PIV）について、それぞれの手法及びそれらによる解析結果並びに考察を示した。

6 章では、上述の締固め層厚による液状化特性への影響について、2 種類の試料による比較検討を行った結果を示した。さらに、4 章及び 5 章の結果及び考察を用いて、液状化試験における再構成供試体の作製条件について提案している。

7 章では、本研究の結論及び今後の課題について述べている。

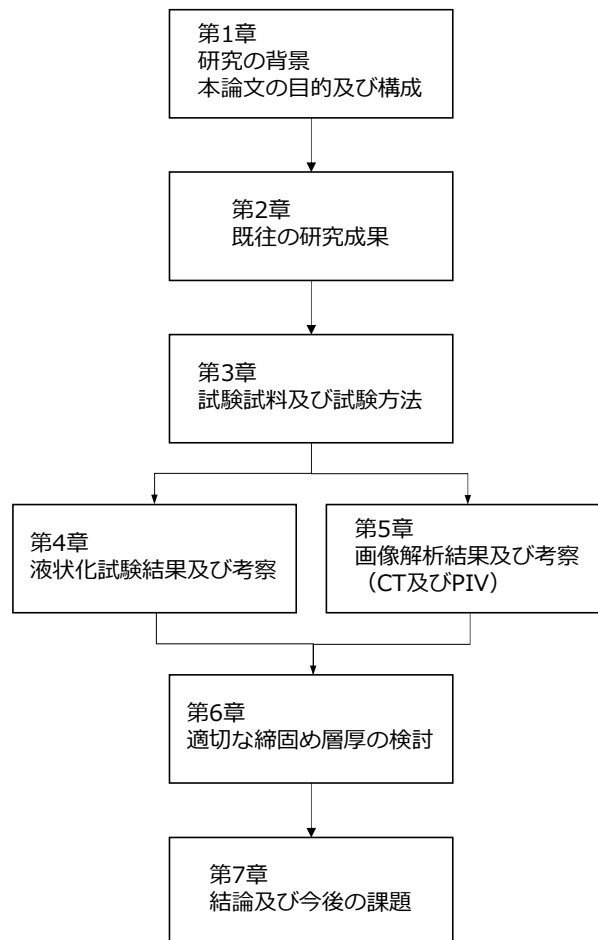


図 1.2.1 本論文の構成

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造指針，1988.
- 2) 土質工学会：砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価-室内試験法および試験結果の解釈と適用に関するシンポジウム発表論文集，pp.7-46，1984.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.
- 4) 国土交通省・下水道地震対策技術検討委員会：同委員会報告書「新潟県中越地震の総括と地震対策の現状を踏まえた今後の下水道地震対策のあり方」，2005.
- 5) 京川裕之，清田隆，近藤康人，小長井一男：東北地方太平洋沖地震による浦安市埋立地盤の液状化被害調査，地盤工学ジャーナル，Vo.7，No.1，pp.265-75，2012.
- 6) 若松加寿江，先名重樹，小澤京子：2011年東北地方太平洋沖地震による液状化発生の特性，日本地震工学会論文集，Vol.17，No.1，pp.43-62，2017.
- 7) 若松加寿，先名重樹，小澤京子：平成28年（2016年）熊本地震による液状化発生の特性，日本地震工学会論文集，Vol.17，No.4，2017.
- 8) 山下聡，小川かける，川尻峻三，川口貴之，渡邊達也：平成30年北海道胆振東部地震で被災した火山灰造成宅地の液状化特性，地盤工学ジャーナル，Vol.14，No.4，pp.353-361，2019.
- 9) 土質工学会：砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価-室内試験法および試験結果の解釈と適用に関するシンポジウム発表論文集，pp.7-46，1984.
- 10) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の2，第7編 変形・強度試験，第3章 土の三軸試験，ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法，2020.
- 11) 大坪正英，トロイータヌ デュッタ，佐藤剛司，桑野玲子：せん断载荷を受ける砂の弾性波伝播特性に関する研究，生産研究，Vol.70，No.6，2018.
- 12) 土質工学会：飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験の結果について，土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集，pp.1-35，1988.
- 13) 上野和広，泉明良，DUTTINE Antoine，矢崎澄雄，堀俊和：非排水繰返し载荷を受ける飽和土の非排水せん断強度に対する締固めの効果，農業農村工学会論文集，82巻6号，pp.383-393，2014.
- 14) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の2，第7編 変形・強度試験，第3章 土の三軸試験，土の三軸試験の供試体作製・設置方法，pp.553-557，2009.

15) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の 2，第 7 編 変形・強度試験，
第 3 章 土の三軸試験，粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法，pp.557-562，2009.

第2章 既往の研究

本章では、本研究の内容と関連性が高いテーマである「液状化特性」、「締固め特性」及び「土の不均一性」について、既往の研究内容を整理した。

2.1 液状化特性に関する研究

1章で述べたように、我が国では、1964年の新潟地震以降、多くの研究者によって種々の地盤材料による液状化特性についての研究が進められ、そのメカニズムとの関連について解明されてきた。液状化特性は、非排水条件であることに加えて、荷重モードが圧縮と伸張の両振幅で行われることもあり、その力学特性は、様々な要因が複雑に絡み合った状態で現れることが多く、近年、液状化特性に関連する研究テーマは、材料特性や固化などによる液状化対策、再液状化の問題、エネルギー法の適用や簡易評価など、多岐に亘る。

ここでは、土の繰返し非排水三軸試験（JSF T 541-1990）¹⁾の制定に当たって、原案作成の基となった「砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会」²⁾報告による検討項目及び結果について、表 2.1.1 にまとめた。表 2.1.1 中、No.16 の個人差を除くと、液状化試験結果に影響を及ぼす要因の検討内容は、No.1~4 の「試料に関する項目」、No.5 及び 6 の「供試体の境界条件に関する項目」、No.7~10 の「圧密過程に関する項目」、そして No.11~15 の「荷重方法による項目」の、4 つのカテゴリーに大別することができる。そして、それぞれの項目に対して検討が行われた結果、液状化特性への影響を考慮した要求事項がまとめられて基準化されている。

なお、No.11 の荷重周波数及び 15 の荷重波形については、本研究で用いる条件の範囲内で、荷重周波数による液状化特性への影響を調べた。これらの検討結果については、4.1 にて詳述する。

ここで、表 2.1.1 には記載がないが、本研究で用いたような礫分を含む試料の場合、メンブレン貫入（以下、MP）による液状化強度の過大評価が懸念される。このような MP の問題への対処については、1980 年代には既に広く議論が行われており、現在に至るまで種々の有用な方法が提案されてきた^{3)~5)}。MP によって液状化強度は過大評価になるが、その要因は、繰返し荷重過程において、過剰間隙水圧の上昇が抑えられてしまう点にある。過剰間隙水圧の上昇に関連するパラメータとして、例えば粒度組成、メンブレン厚、供試体の周面率及び密度が挙げられる。

表 2.1.1 液状化試験に影響を及ぼす要因

| No. | 検討項目 | 検討結果 |
|-----|---------------|---|
| 1 | 供試体 作製方法 | AP 法 ^{a)} , MSP 法 ^{b)} 及び WAV 法 ^{c)} の比較では, D_r ^{d)} による傾向の違いも含め, 作製方法による区別が必要である。 |
| 2 | 供試体の 大きさ | D ^{e)} =5~30 cm で 2 種類の D_r ^{d)} による検討を行った結果, D が小さいほど過大評価になっており, その影響は高い D_r ほど大きい。 |
| 3 | 供試体高さ | H ^{f)} =150 mm 程度までの場合, DA ^{g)} =10%までネッキングが生じていない。 |
| 4 | 供試体 高さ/直径比 | 大きい供試体は自重の影響を受けるが, D ^{e)} =70 mm に対する H ^{f)} =70~170 mm, D =75 mm に対する H =70~203 mm は, 変形の非一様性及びそれによる強度の過小評価は大きくない。 |
| 5 | 端面の摩擦 | H ^{f)} / D ^{e)} =2.0~2.4 の範囲内では, 端面摩擦の影響は無視できるほど小さい。 |
| 6 | 間隙水系の 体積変化 | 間隙水系の体積変化の影響より, ある程度の直径又は D^e/D_{50} ^{h)} を確保することでメンブレン貫入の影響を小さくする方が望ましい。 |
| 7 | B 値 | S_r ⁱ⁾ =99.8 % (B ^{j)} =0.88~0.92) でも CSR ^{k)} を 30 %程度過大評価するおそれがある。 |
| 8 | 圧密時の ひずみ履歴 | 等方圧密状態を保てなかった場合の影響は大きい。 |
| 9 | 過圧密 | Ishihara and Takatsu ^{o)} によると, 緩詰め供試体の CSR ^{k)} は OCR ^{l)} の平方根に比例するため, B ^{j)} 値の測定では, $\Delta\sigma$ ^{m)} を極力小さい値にすることが望ましい。 |
| 10 | 圧密時間 | 豊浦砂の場合, 圧密時間が 0.1~64 h の範囲では, 結果への影響が小さいと判断して問題なさそうである。 |
| 11 | 载荷周波数 | 豊浦砂を用いる場合, f ⁿ⁾ =0.05~1.0 Hz の範囲では結果への影響はほぼない。 |
| 12 | 繰返し荷重の 一様性 | 実務での運用を考慮して $P_C + P_E$ の変動を 10%未満とするが, 極力小さい方が好ましい。 |
| 13 | 繰返し荷重の 対称性 | 同一の P_C ^{o)} + P_E ^{p)} に対して P_C / P_E が小さいほど DA ^{g)} の値は大きくなる。→伸張側の耐力の方が小さい。 |
| 14 | 载荷荷重の 測定方法 | 荷重計をセル内部に設置した場合と比較すると外部に設置した場合は軸周辺の摩擦の影響で荷重を過大評価しやすくなる。 |
| 15 | 载荷波形 | 一般的な運用では正弦波が主であることから検討見送り |
| 16 | 個人差 | D_r ^{d)} や D_c ^{q)} が大きいほどばらつきの程度は大きくなるが, 試験の仕様をそろえる方が重要であり, ばらつきを抑えることができる。 |

a) AP 法: 空中落下法, b) MSP 法: 多重ふるい落下法

c) WAV 法: 水中振動締固め法, d) D_r : 相対密度 (%)

e) D : 供試体直径 (cm), f) H : 供試体高さ (cm)

g) DA : 両振幅軸ひずみ (%), h) D_{50} : 平均粒径 (mm)

i) S_r : 飽和度 (%), j) B : 間隙圧係数

k) CSR: 繰返し载荷回数 $N_c=20$ のときの繰返し応力振幅比

l) OCR: 過圧密比, m) $\Delta\sigma$: B 値測定時のセル圧の変化量 (kN/m²)

n) f : 繰返し载荷周波数 (Hz)

o) P_C : 繰返し载荷過程で等方状態から定義した圧縮荷重の片振幅 (kN)

p) P_E : 繰返し载荷過程で等方状態から定義した伸張荷重の片振幅 (kN)

q) D_c : 締固め度 (%)

また、Miura and Kawamura⁵⁾によると、MP 量についての研究は、概ね次の 4 種類に大別できる (表 2.1.2)。

表 2.1.2 メンブレンペネトレーションに関する論文一覧 ⁵⁾に加筆修正

| | I | II | III | IV |
|-------------------|---|---|--|---|
| ~ 1969 | 1. Newland and Allely (1957, 1959) 2. Roscoe et al. (1963) 3. Thuraiajah and Roscoe (1965) | | | |
| 1970 ~ 1979 | 4. Frydman et al. (1973) 5. Raju and Sadasivan (1974) | 1. Lade and Hernandez (1977) 2. Kiekbusch and Schuppener (1977) | 1. Miura and Yamanouchi (1972) 2. Martin et al. (1978) 3. Flavigny and Darve (1979) 4. Lade and Hernandez (1977) | 1. Wong et al. (1979) 2. Miura and Yamamoto (1976) |
| 1980 ~ 1989 | 6. Ramana and Raju (1982) 7. Vaid and Negussey (1984) | 3. Raju and Venkataramana (1980) 4. Tokimatsu and Nakamura (1986) 5. Lo et al. (1989) | 5. Molenkamp and Luger (1981) 6. Wu and Chang (1982) 7. Ghaboussi and Momen (1982) 8. Molenkamp and Tatsuoka (1983) 9. Baldi and Nova (1984) 10. Molenkamp (1985) | 3. Ohara and Yamamoto (1982) 4. Molenkamp and Tatsuoka (1983) 5. Goto et al. (1986) 6. Tokimatsu and Nakamura (1987) |
| 1990 ~ 1999 | 8. Tokimatsu (1990) 9. Tanaka et al. (1991) 10. Bohac and Fedal (1992) 11. Choi and Ishibashi (1992) | 6. Nicholson et al. (1992) 7. Evans et al. (1992) 8. Nicholson and Seed (1994) | 11. Kramer et al. (1990) | |
| 2000 ~ | | 9. Sasaoka and Okamoto (2021) ⁷⁾ | | |

I. MP 量を直接評価し、MP による体積変化を実験結果に基づいて算定する方法

II. MP 量の影響を排除又は低減させるため、メンブレンへの工夫を行う方法又は MP による見かけの体積変化量を非排水せん断において補正する方法

III. MP による見かけの体積変化を構成式又は MP によって消費される過剰間隙水圧量を算定し、それらによって補正する方法

IV. MP による非排水せん断挙動の変化や他の要因 (端面摩擦など) を定量的に評価

した方法

本研究では、上述の過剰間隙水圧の上昇に関連するパラメータ（粒度組成、メンブレン厚、供試体の周面率及び密度）のうち、密度以外は固定条件として比較検討を行っていることに加え、MP の補正に関しては様々な提案があり、適切な補正式の選出は難しいことなどから、MP の影響は考慮せずに比較検討を行う。

2.2 土の締固め特性に関する研究

一般によく知られているように、**JIS A 1210** の「突固めによる土の締固め試験方法」⁸⁾は、含水比を変化させた数種類の土を規定のエネルギーによって締め固めることで、ある一定のエネルギーのもとで最も締め固まる乾燥密度及び含水比を求める試験方法である。この乾燥密度～含水比関係からわかるように、土の含水比は、締固め特性との相関があり、さらには力学特性と密接な関係がある。三国⁹⁾ (1962) の研究成果によれば、上述のようにある一定のエネルギーによって土を締め固めた場合、圧縮強度は、最適含水比のやや乾燥側で最大となり、透水係数は、最適含水比のやや湿潤側で最大になる。このような土の含水比と力学特性との関係については、供試体内の水分が土粒子の配列に影響することが指摘されている。

鬼塚ら¹⁰⁾ (1979) は、静的及び動的に締め固めた土を水平及び垂直に削り出して作製した供試体を用いて、土粒子の堆積構造の異方性が力学特性に及ぼす影響について調べており、砂質土の場合、土粒子が水平方向に堆積した供試体より垂直方向に堆積した供試体の方が、圧縮指数及びせん断応力が高くなるが、飽和後のせん断強度は、水平方向に堆積した供試体と同程度まで低下することを示している。また、供試体上端面から突き固めた場合（動的载荷）の供試体内部はランダム構造に、静的に締め固めた場合の供試体内部は整然とした配列になりやすく、強度定数にも影響を及ぼすとしている（図 2.2.1）。さらに、Miura and Toki¹¹⁾ (1984) は、堆積構造の異方性の検証として砂の堆積方向に対して垂直にサンプリングした供試体と水平方向にサンプリングした供試体による三軸試験を行っている。その結果、繰返し载荷過程での軸ひずみは、垂直方向に堆積させた供試体では伸張側で軸ひずみが卓越し、一般的によく見られるような変形挙動を示すが、水平方向に堆積させた供試体では伸張側の軸ひずみの発達が抑えられており、圧縮側の軸ひずみがより発達する結果が示されており、堆積構造の異方性によって、繰返し载荷による軸ひずみの圧縮成分と伸張成分に明らかな違いがあることを示している。

ここで、土の締固めは、試料の粒度組成によっても異なる挙動を示す。山口ら¹²⁾ (1992) は、砂分及び細粒分の割合が異なる 12 種類の粒度組成による試料を用いて種々の含水比による供試体内の間隙径の測定を実施し、供試体内の間隙は、締固め時の含水比によって大きく異なり、最適含水比の乾燥側と湿潤側で間隙構造が異なることを示している。さらに、松村ら¹³⁾ (2012) は、このような異なる含水比と締固め度

とを掛け合わせた条件による砂質シルトの供試体を用いた繰返し非排水三軸試験を行っており、締固め時の含水比が変形特性や過剰間隙水圧の発生の程度に影響を与えることを示している。

一方、礫分を含む粗粒土による締固め時の含水比と力学特性の関係については、平川ら¹⁴⁾(2008)や川尻ら¹⁵⁾(2011)の研究成果があり、最適含水比を境に、乾燥側の含水比と湿潤側の含水比とで得られる力学特性に違いがあること、さらに、強度は最適含水比 w_{opt} のやや乾燥側含水比で最も高い値になることを具体的な試験結果と共に示している。また、川尻らは、含水比が一定であっても静的に締め固めた供試体と動的に締め固めた供試体とでは、土粒子同士が接触するときの力に違いが生じ、供試体内の粒子構造における配向性に相違が出ること、加えて、それらに起因してピーク強度や圧縮過程におけるダイレイタンス特性にも影響があることを示している。

また、これらのような粒子間接触に関連して、締固め条件と力学特性との関係については横浜ら¹⁶⁾(2012)が中間土による成果をまとめており、締固めエネルギー、締固め度及び含水比による力学特性への影響と共に、粗粒分及び細粒分それぞれの土粒子配列が密接に関係していることを述べている。

以上のように、土の締固めでは、締固め時の条件の違いによって供試体内の粒子構成が複雑に変化することから、力学特性に与える影響は少なくないことがわかる。本研究では、このような締固め時における含水比による力学特性への依存を検討項目の一つとした。

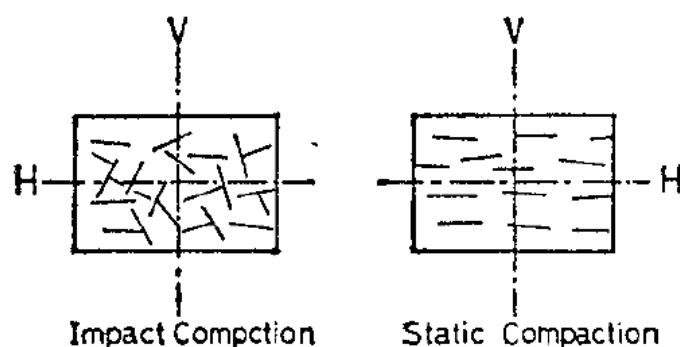


図 2.2.1 Yong と Warkentin による締固め土の構造を鬼塚らがモデル化した図¹⁰⁾

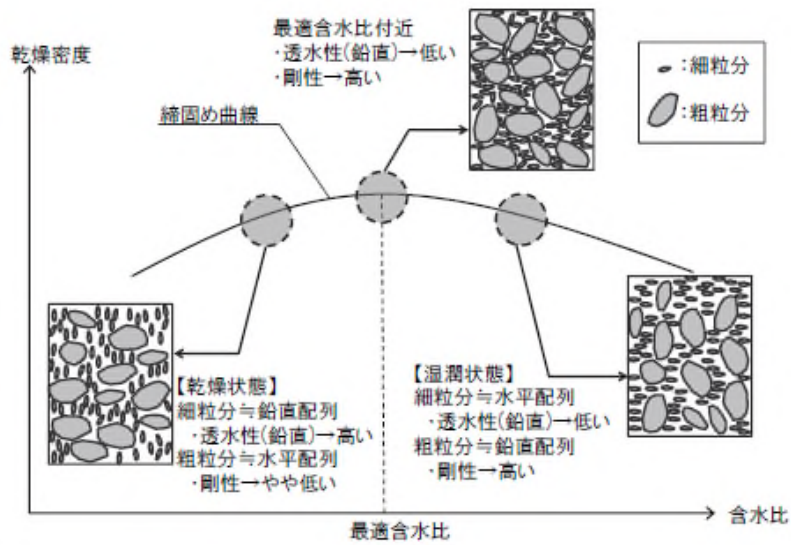


図 2.2.2 締めめ時の含水比の違いによる土粒子配列変化の概念図¹⁶⁾

表 2.2.1 締めめ条件と力学特性との相関¹⁶⁾

| | | 締めめ時含水比 w | | |
|-------------|---------------|-------------|-------|-------|
| | | 乾燥側条件 | 最適含水比 | 湿潤側条件 |
| 同一の締めめエネルギー | 乾燥密度 | 低い | 高い | 低い |
| | 非排水せん断強度 | 低い | 高い | 低い |
| | 破壊ひずみ | 小さい | 中程度 | 大きい |
| | 透水性 (鉛直) | 高い | 低い | 低い |
| | せん断剛性 | 低い | 高い | 低い |
| 同一の締めめ度 | 必要となる締めめエネルギー | 高い | 低い | 高い |
| | 非排水せん断強度 | 低い | 高い | 低い |
| | 破壊ひずみ | 小さい | 中程度 | 大きい |
| | 透水性 (鉛直) | 高い | 中程度 | 低い |
| | せん断剛性 | やや低い | やや低い | 高い |

2.3 供試体の不均一性に関する研究

上載圧によって土を締め固めた場合、対象土層には、深さ方向に密度勾配が形成される場合がある。益村ら¹⁷⁾(2000)は、種々の材料による現場転圧の結果を、密度と地盤深さとの関係で示しており、土質による傾向の違いはあるものの、同一層内の上層と下層では、概ね上層の方で密度が高く、転圧による密度の増加率も上層の方で高かったことを示している。

室内試験、特に要素試験において、現場の盛土工と同様の密度勾配が形成されるか否かについては、例えば、供試体作製時の締め固めエネルギーや、試料の粒度組成と供試体サイズとの関係などによっても異なることが予想される。実際に、室内試験で用いる供試体であっても、供試体の作製方法や作製条件によっては、供試体内の不均一性を誘発し、力学特性への影響なども指摘されている。

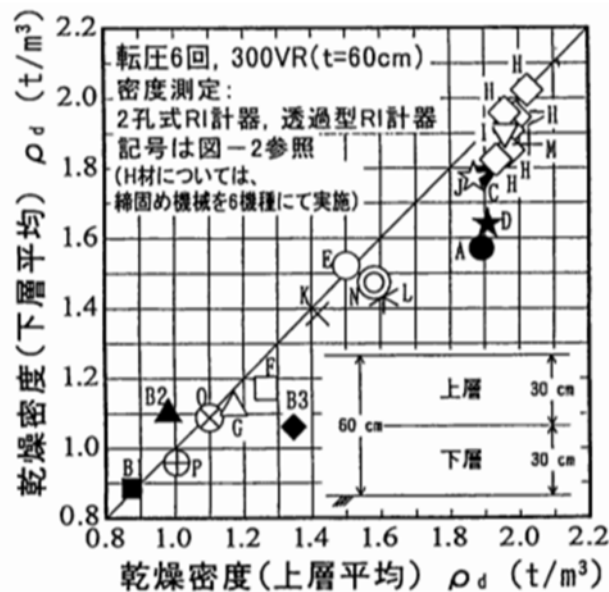


図 2.3.1 現場転圧による地盤深さ方向の密度分布¹⁷⁾

Thomson et al.¹⁸⁾(2008)の研究成果によると、粒径幅の狭い砂試料を湿潤締め固め法によって6層で締め固めた供試体の供試体内軸方向の間隙比の分布は、締め固めた各層において勾配が形成され、さらに、その勾配が、各層の層内の下部から上部に向かって間隙比が小さくなる傾向であることを示している。また、このような締め固めによる層構造の形成について、中出ら¹⁹⁾(2010)は、三軸CD試験を実施し、軸ひずみ及

びデジタル画像から算出した局所変位の発生状況を調べており、層境を中心に不均一な分布を示している。

一方、Yoshimine et al.²⁰⁾ (2005) は、粒径幅の広い試料を4粒径に分けて5層で堆積させることによって意図的に層状構造を作製した供試体と、供試体内を均一に堆積させたケースとの比較を行っている。供試体作製はAP法で行っており、不均一に作製した供試体は、一定の粒径ごとに分級した試料を粒子径の大きい方から撒きだし、同じ層内の下部から上部にかけて徐々に粒子径が大きくなる構造にしたものである。それらの供試体の非排水三軸強度及び液状化強度は、共に層状構造の供試体の方が高い強度を有しており、例えば自然地盤での堆積構造を室内試験で再構成する場合に、分級せずに作製した供試体は、実情より過小評価になる可能性を示している。

加えて、粒子径によって供試体内に層構造を作製した供試体で、より原位置の地盤の再現性が高い状態の供試体による検討を行った成果として、Zhao²¹⁾ (2017) の研究成果がある。Zhao は、よく混合した砂試料及びシルト試料をモールド内に水中落下させて供試体を作製し、粒子の落下速度の違いによって、供試体内に形成された砂層とシルト層の互層による繰返し載荷過程の評価について検討を行っている。Zhao は、それらの結果から、砂供試体内のシルト層の有無は、局所的なひずみの発生に影響を及ぼすことに加え、圧密過程におけるメンブレン貫入への影響についても指摘している。

以上のような室内試験の供試体に加えて、現場にて重機を用いた締固め土による供試体の不均一性を調べた研究成果がある。富田ら²²⁾ (2021) は、現場で締め固めた盛土の表層からサンプリングした供試体及び試験室において締め固めた供試体を用いて三軸圧縮試験を行い、両者が一義的な相関で表現できることを示している。その中で、供試体を上部及び下部に分けて密度測定を行っており、エネルギー管理によって作製した供試体の場合、供試体の上層より下層の方が高い密度を示していることから、上層の締固めエネルギーが下層の密度に影響を及ぼすことを指摘している。

これらの研究成果は、供試体作製時の条件は様々であるものの、いずれの研究においても、供試体作製時の供試体内の不均一性をテーマの要点として扱っている。本研究では締固め層厚による液状化特性への検討を行うが、上述のような供試体内の不均一性の影響にも言及している。

2.4 本章のまとめ

本章では、「液状化特性に及ぼす各種要因」、「土の締固め特性」及び「要素試験における供試体の不均一性」の3つのテーマに関する既往の研究について整理した。その結果、以下(1)～(5)の知見を得た。

- (1) 地盤工学会基準の液状化試験方法において、基準の要求事項に選択の幅がある場合、選択によってどのような力学特性にどのような影響が出るか調べた。これらの知見によって、本研究における検討項目や、事前に確認すべき項目が明確になった。また、基準の範囲内であっても、選択する方法によって得られる力学特性は変化することがわかった。
- (2) 土の締固め特性は、締固め時の含水比によって大きく異なり、最適含水比の乾燥側と湿潤側で強度特性が異なることや、例え強度特性が同様であっても、変形特性に相違が出ることなどがわかった。これらは、締固め時の含水比が異なることによる粒子間接触への影響によって、粒子構造が変化するためである。
- (3) 土の堆積方向を、供試体の軸方向に対して垂直と水平の2種類で作製した供試体による液状化試験結果において、繰返し載荷過程における力学特性は強い異方性を呈している。このことから、初期の供試体内の粒子構造が、その後の力学特性、特に液状化特性に影響を及ぼす可能性があるといえる。
- (4) 以上の(2)及び(3)の特性は、一般的に用いられる試料（特殊土を除く）であれば、概ね適用される。ただし、試料の特性、特に粒度組成によって、力学特性への影響の程度は変化する。
- (5) 施工現場や室内試験、特に室内試験における種々の作製条件及び試験条件による供試体内の不均一性、特に不均一性による力学特性への影響を確認した。これらの研究成果は、締固めの層境によって供試体初期状態や力学特性に影響を及ぼすことを示している。ただし、締固め層厚の違いについての一貫した研究成果は少なく、液状化特性における締固め層厚の影響、特に、実際の盛土工で使用するような材料による検討については、研究成果が限られている。

以上の知見から，本研究では，実務で利用されている試料，試験方法及び供試体作製方法の範囲を中心に，供試体作製方法，特に締固め層厚の違いによる液状化特性への影響について検討を行う。

参考文献

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，第7編 せん断試験，第10章 土の繰返し非排水三軸試験，pp.424-431，1990.
- 2) 土質工学会：砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価-室内試験法および試験結果の解釈と適用に関するシンポジウム発表論文集，pp.7-46，1984.
- 3) 土岐祥介，三浦清一，山下聡：三軸試験におけるメンブレン貫入とその評価，土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集，pp.89-96，1988.
- 4) Tokimatsu, K. and Nakamura, K. : A simplified correction for membrane compliance in liquefaction tests, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.4, pp.111-122, 1987.
- 5) Miura,S and Kawamura, S. : A procedure minimizing membrane penetration effects in undrained triaxial test, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.4, pp.119-126,1996.
- 6) Ishihara,K. and Takatsu, H. : Effects of overconsolidation and K_0 condition on the liquefaction characteristics of sands, *Soils and Foundations*, Vol.19, No.4, pp.59-68, 1979.
- 7) 笹岡里依,岡本道孝:粗粒材料の液状化強度特性評価に関する基礎的研究(その2), 鹿島技術研究所年報, 第69号, pp.22-27, 2021.
- 8) 日本産業規格 JIS A 1210 「突固めによる土の締固め試験方法」, 2009.
- 9) 三国英四郎：フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究（その1），土と基礎，10(1)，pp.4-12，1962.
- 10) 鬼塚克忠，林重徳，吉武茂樹，大石英隆：締固めた土の圧縮及び強度異方性について，土質工学会論文報告集，Vol.19, No.3, pp.113-123, 1979.
- 11) Miura.S. and Toki,S. : Anisotropy in Mechanical Properties and its Simulation of Sands Sampled from Natural Deposits, *Soils and Foundations*, Volume 24, Issue 3, pp.69-84, 1984.
- 12) 山口晴幸，池永均：締固め土の間隙構造，土木学会論文集，No.448, III-19, pp.35-44, 1992.
- 13) 松村聡，三浦清一，横浜勝司：砂質シルトの繰返し非排水せん断特性に与える締固め条件の影響とその評価，土木学会論文集 C, Vol.68, No.4, pp.597-609, 2012.
- 14) 平川大貴，川原園美幸，龍岡文夫：砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響，土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.253-266, 2008.

- 15) 川尻峻三, 川口貴之, 澁谷啓, 高橋正和 : 締固めた地盤材料の変形・強度特性に及ぼす締固め時の含水比および締固め方法の影響, 土木学会論文集 C, Vol.67, No.4, pp.532-543, 2011.
- 16) 横浜勝司, 三浦清一, 松村聡 : 築堤材に用いられる砂質シルトの強度・透水性・せん断剛性に及ぼす締固め管理条件の影響, 土木学会論文集 C, Vol.68, No.2, pp.422-432, 2012.
- 18) 益村公人, 三嶋信雄, 三浦清一 : 道路盛土の締固め層厚に関する現場転圧試験, 土と基礎, Vol.48, No.2, pp.28-30, 2000.
- 18) Thomson,P.R. and Wong, R.C.K. : Specimen nonuniformities in water-pluviated and moist-tamped sands under undrained triaxial compression and extension, Canadian Geotechnical Journal J. 45, pp.939-956, 2008.
- 19) 中出雄也, 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正 : PIV を用いた三軸試験における締固め土の力学特性, 第 45 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.717-718, 2010.
- 20) Yoshimine, M. and Koike, R.: Liquefaction of clean sand with stratified structure due to segregation of particle size, Soils and Foundations, Vol.45, No.4, pp.89-98, 2005.
- 21) Zhao,C. : Direct and indirect local deformation measurements of sand specimen in undrained cyclic triaxial and torsional shear tests, 東京大学大学院博士論文, 2017.
- 22) 富田佑一, 古関潤一, 龍岡文夫 : 現場と室内で締め固めた砂質土供試体の非一様性の評価と強度変形特性への影響, 地盤工学ジャーナル, Vol. 16, No. 4, pp. 355-369, 2021.

第3章 試験試料及び試験方法

3.1 試験試料

地盤材料の締固め特性は、使用する材料の物理特性に依存し、この物理特性の違いによって得られる力学特性は様々である。そこで、本研究では、はじめに試験試料として豊浦砂を用いた。豊浦砂は、物理的性質が概ね既知であり、かつ既存の研究成果が豊富な試料であるため、豊浦砂を用いた力学試験結果は、様々な土質によって得られた結果に対する基軸になり得ることが期待できる。よって、まずは、基礎研究の一環として豊浦砂による検討を行い、その後、一般的な盛土工への適用が可能な範囲の試料を用いて、検討を行った。この盛土工に適した材料には、利用先によって様々な規定があるため、本節では、盛土工に適する材料の土質についてまとめ、その後、実際に使用した試料の物理的特性について示す。

3.1.1 一般的な盛土工で用いられる材料の選定

本研究の成果を実務へ適用するには、実際の盛土工に用いられる範囲の材料による検討が必要である。このような材料の選定のために、本項(1)～(3)に、河川及び道路土工で適用される材料の規定類をまとめた。さらに、本研究は、土の締固めと液状化特性との関係を明確にすることを目的の一つとしているため、液状化判定の対象となる範囲内の材料であることも材料選定の要件の一つとした。具体的には、本項(4)に示す。

本研究では、(1)～(4)に示す条件を鑑み、試験試料の選定を行った。実際に試験に用いた試料の詳細については、3.1.2に示す。

(1) 河川土工に適用される材料

「河川土工マニュアル」¹⁾によると、河川堤体の土質材料として下記 a)～f) ような性質が必要とされているが、一般的に、下記の c) 及び e) は、締固め時の条件によっても変化することから、純粋な物性値による影響は、a), b), d) 及び f) といえる。

- a) 高い密度を与える粒度分布であること
- b) 不透水性が高いこと
- c) 堤体の堰堤に支障を及ぼすような圧縮変形や膨張性がないもの
- d) 施工性、特に締め固めが容易であること
- e) 浸水、乾燥などの環境変化に対してのり面のすべりやクラックが生じにくいこと
- f) 有機物や水に溶解する成分を含まないこと

表 3.1.1 に、河川盛土材料としての土質特性の一般評価の目安を示す。

表 3.1.1 河川盛土材料としての土質特性の一般評価の目安 ^{1)に加筆修正}

| 土の区分 | | 堤体材料としての評価 | |
|---------|---|---|---|
| 名称 | 記号 | 評価 | 留意事項 |
| 礫 | (GW), (GP) | ○ | 透水性が非常に大きい。 |
| 礫質土 | (G-M), (G-C), (G-O), (G-V), (GM), (GC) (GO), (GV) | ○ | |
| 砂 | (SW), (SP) | ○ | 透水性が大きく、のりくずれが生じやすい。 |
| 砂質土 | (S-M), (S-C), (S-O), (S-V), (SM), (SC) (SO), (SV) | ○ | |
| シルト | (ML), (MH) | ○ | (場合により対策を必要とする) 水を含んだ場合、機械施工は困難となり、締固めが不十分になることがある。 |
| 粘性土 | (CL), (CH) | | |
| 火山灰質粘性土 | (OV), (VH ₁), (VH ₂) | | |
| 有機質土 | (OL), (OH) | △ | 高含水比のものが多く、そのままでは機械施工によって締固めが困難である。 |
| 高有機質土 | (Pt), (Mt) | × | 含水比が高く、締固めが困難である。圧縮変形が大きく、また浸水乾燥などの環境変化に対しても安定性が悪い。 |
| | | ○ 使用可能なもの △ 必要に応じて対策を施せば、堤体材料として使用できるもの × 堤体材料として不適当なもの | |

上記から、堤体の材料による土質の評価では、細粒分を 15～50 % 程度含む礫質土又は砂質土が望ましい。また、締固め層厚に対して最大粒径があまりにも大きい場合、高い締固め効果が期待できないことから、最大粒径を 100～150 mm 以下とすることが望ましいとされている。

(2) 道路土工（一般道）に適用される材料

道路（一般道）の盛土工の材料は、以下のとおりである。「道路土工 盛土工指針 平成 22 年 4 月」²⁾によると、盛土材料の選定に当たっては、次を注意点として挙げている。

- a) 施工が容易で、盛土の安定性を保ち、かつ有害な変形が生じないような材料を用いなければならない。
- b) 可能な限り現地発生土を有効利用することを原則とし、盛土材料として良好でない材料等についても適切な処置を施し有効利用することが望ましい。

道路土工では、具体的な規定は特に示されておらず、施工後の盛土に求められる性能や品質が記されている。また、この「施工後の盛土に求められる性能や品質」とは、敷均し及び締固めなどの施工が容易であり、盛土の安定性を保ち、有害な変形が生じないことを確保することである。

これらの条件を土質材料（JGS 0051）に当てはまると、粒径幅の広い礫質土や砂質土（特に GFS, SF, SF-G, SFG：ただし、細粒分に火山灰土や有機質土を含まないこと）が該当し、これらを含む一般的な土質材料の評価の目安は表 3.1.2 のとおりである。

なお、表 3.1.2 の評価区分は、評価の目安であり、使用の可否を判断するためのものではなく、可能な限り現地発生土を用いることを基本としている。

(3) 高速道路の盛土工に適用される材料

最後に、高速道路の盛土における材料規定について示す。高速道路の盛土工では、部位によって細やかな材料規定がなされている³⁾。例えば、上部路床の材料規定によ

ると塑性指数 $I_p < 10$ 及び細粒分含有率 $F_c < 25\%$ 並びに最大粒径 $D_{max} \leq 100\text{ mm}$ の土質が適用される。この他に、上部路床の材料基準では、スレーキング率が 50% 以下であることや修正 CBR が 10% 以上であることなどが挙げられる。高速道路の盛土工では、他にも部位ごとに細やかな材料規定が設けられているが、本研究では、上記の上部路床の材料規定を選定対象として採用した。

表 3.1.2 道路盛土材料としての土質特性の一般評価の目安 ²⁾に加筆修正

| 分類 | 路体材料 | 路床材料・裏込め材料 | 備考 |
|------------|------|------------|---|
| 岩塊・玉石 | △ | × | 破碎の程度によって使用区分を考える。 |
| 礫{G} | ○ | ○ | |
| 礫質土{GF} | ○ | △ | 有機質，火山灰質の細粒土を含む（GO，GV 等）材料の場合：△ |
| 砂{S} | ○ | ○ | 粒径が均質な場合には降雨の作用に：よりのり面崩壊・浸食を受けやすいため、のり面付近に用いる場合：△ |
| 砂質土{SF} | ○ | ○ | 有機質，火山灰質の細粒土を含む（GO，GV 等）材料の場合：△ |
| シルト{M} | △ | △ | |
| 粘性土{C} | △ | △ | |
| 火山灰質粘性土{V} | △ | △ | |
| 有機質土{O} | △ | × | |
| 高有機質土{Pt} | △ | × | |

○：ほぼ問題ないもの、 △：注意して用いるか、何からの処置を必要とするもの
 ×：用いられないもの

(4) 液状化の対象土

液状化の対象となる材料は、「道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）」⁴⁾記載の、液状化判定の対象土とした。具体的には、物理特性に関する以下の 2 条件である。

- a) 細粒分含有率 F_c が 35% 以下又は F_c が 35% 以上であっても塑性指数 I_p が 15 以下の試料
- b) 平均粒径（50% 粒径） D_{50} が 10 mm 以下であり、かつ、有効径（10% 粒径） D_{10} が

1 mm 以下である試料

3.1.2 本研究で用いた試験試料の物理的特性

本項では、本研究で用いた試料の物理的特性について示す。本研究では、前述の豊浦砂及び一般的な盛土工に使用される材料として、3.1.1(1)～(3)の規定を概ね包含する材料を用いた。この後者の材料は、東北地方で一般販売されている暗灰～暗褐色の砂試料であり、特殊土などに類するものではない。また、本研究では、粒子硬度や粒子の鉱物組織など、土粒子自体に対する調査は行っていないが、例えば、供試体作製では、粒子破砕などの目視による変状は確認されなかった。

実際に使用した材料の物理的性質を次に示す。

図 3.1.1 及び図 3.1.2 に、本研究で用いた試験試料の粒径加積曲線及び締固め曲線を、表 3.1.3 には、物理及び締固め試験結果による各パラメータを示す。図 3.1.1 には、3.1.1 で示した各種材料規定の範囲（概略）も破線にて併記した。また、表 3.1.1 内に示す試験方法は、試料状態や条件によって選択肢がある。また、表 3.1.1 に示した試験方法の中で、試験の実施に当たって条件の幅があるものについて、本研究で用いた試験条件を以下に示す。

a) 土粒子密度試験（JIS A 1202:2009）⁵⁾

本研究で使用した試料はいずれも粗粒土であったため、炉乾燥による変状の影響は少ないと判断し、試験の実施に当たっては、乾燥試料を用いて仕込みをする方法を適用した。

b) 土の粒度試験（JIS A 1204:2009）⁶⁾

豊浦砂は細粒分が極端に少ない試料であることから、ふるい分析のみの評価とした。

c) 砂の最小密度・最大密度試験（JIS A 1224:2009）⁷⁾

当試験の適用範囲は、細粒分含有率が 5 %未満の試料であり、山砂はこれにあてはまらないため、豊浦砂のみの実施とした。

d) 突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210:2009）⁸⁾

本研究では一般的な盛土工を対象としたことから、A 法を用いた。また、豊浦砂は、搬入時に含水をほぼ持たなかったことや細粒分をほぼ含まないことから乾燥法（A-a 法及び A-b 法）でも問題ないが、山砂に合わせて A-c 法とした。

なお、本研究の検討期間内、2020年にJISの改正及びJGSの改定があったが、本研究では、2009年時点の試験法を用いて研究を進めた。2020年版の試験法の内容も調べたが、本研究で用いた試験方法の範囲に、基本的な考え方の変更や本研究の解釈に係る改正及び改定事項はなかった。

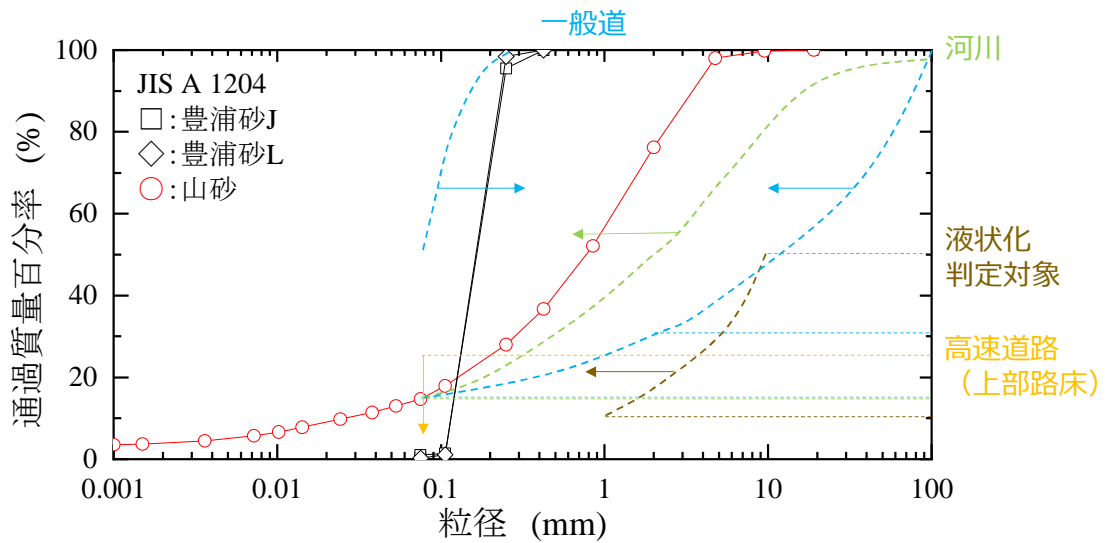


図 3.1.1 試験試料の粒径加積曲線

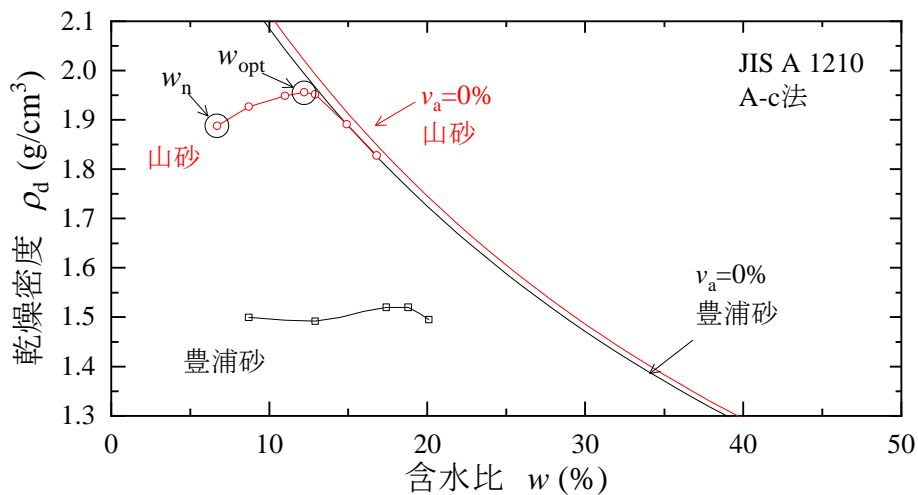


図 3.1.2 締固め曲線

表 3.1.3 試料の物理的特性

| 物理的特性項目 | | | 山砂 | 豊浦砂J | 豊浦砂L | 試験方法 |
|---------|---------------|-------------------|-------|-------|-------|-------------------|
| 土粒子の密度 | ρ_s | g/cm ³ | 2.719 | 2.634 | 2.651 | JIS A 1202 |
| 最大粒径 | D_{max} | mm | 19 | 0.425 | 0.425 | JIS A 1204 |
| 細粒分含有率 | F_c | % | 14.7 | 0.4 | 0.2 | 〃 |
| 平均粒径 | D_{50} | mm | 0.78 | 0.17 | 0.16 | 〃 |
| 均等係数 | U_c | | 43 | 1.4 | 1.6 | 〃 |
| 最大間隙比 | e_{max} | | - | 0.979 | 0.956 | JIS A 1224 |
| 最小間隙比 | e_{min} | | - | 0.612 | 0.591 | 〃 |
| 最大乾燥密度 | ρ_{dmax} | g/cm ³ | 1.956 | 1.522 | - | JIS A 1210 |
| 最適含水比 | w_{opt} | % | 12.2 | 18.2 | - | 〃 |

(1) 豊浦砂の物理的特性

はじめに、豊浦砂の物理的特性について述べる。図 3.1.1 及び表 3.1.3 より、豊浦砂は「地盤材料の工学的分類方法」(JGS 0051-2009) による分類では(SP)に当たり、本試料が、ほぼ目開き 250 μm のふるいを通り、目開き 106 μm のふるいに止まる単粒に近い粒度組成をもつ試料あることがわかる。また、本研究では購入時期が異なる 2 種類の豊浦砂(豊浦砂 J 及び豊浦砂 L: 以下、豊浦砂 J 及び/又は豊浦砂を「豊浦砂」と記す)を用いたが、図 3.1.1 及び表 3.1.3 に示すように、両者の性質に有意な差はない。ただし、供試体の作製に当たっては、各試料の最大間隙比及び最小間隙比を用いて目標とする乾燥密度の算出を行った。

図 3.1.2 の締固め曲線では、豊浦砂の締固め曲線は、併記した山砂の結果と比較すると粗粒土でありながら緩やかなカーブを描いており、突固めによる締固めの効果が低い材料であることが分かる。なお、豊浦砂の締固め試験では、 w_{opt} 付近の締固めでモールド底面から排水している様子が観察されているため、実際の最大乾燥密度及び最適含水比と比較して、過大評価になっている可能性が考えられる。

(2) 山砂の物理的特性

図 3.1.1 及び表 3.1.3 より、山砂は、均等係数 U_c が 43 であることから、「粒径幅が広い」と分類される試料であり、分類記号は(GS-F)である。また、図 3.1.2 より、山砂は締固め曲線のピークが明瞭であることから、突固めによる締固め効果の高い試料といえる。また、図 3.1.1 より、本研究で用いた山砂は、概ね 3.1.1(1)～(4)の範囲内の材料であるといえる。

3.1.3 試料調製の妥当性及び供試体作製条件

試験試料の粒度組成は、力学特性に影響を及ぼす。試料の最大粒径に対して供試体径が小さい場合、供試体内の間隙比は、相対的に大きくなる可能性が考えられる。このように、粒度条件によって試験結果に変化が出る範囲では、供試体径に対して最大粒径が過大であり、個々の粒径が供試体全体の構成に影響を与えている状態であるため、要素試験の供試体条件としては、不適切といえる。

表 3.1.1 で示したように、本研究で用いた山砂の原粒度の最大粒径は $D_{\max}=19$ mm であるが、液状化試験の供試体作製に用いた試料は、 $D_{\max}=4.75$ mm のせん頭粒度とした。この供試体作製時の山砂の粒度調整について、試料の最大粒径に対する影響を、供試体の直径及び締固め層厚による許容値との関係で整理し、さらに、 $D_{\max}=4.75$ mm のせん頭粒度に調整したことによる締固め度のへの影響を以下に詳述する。

(1) 供試体の直径に対する試料の最大粒径の許容値

本研究の供試体は、直径 75mm×高さ 150 mm とした。直径 75 mm の供試体が適用される **JGS 0520**¹⁰⁾の規定において、試料の最大粒径 D_{\max} は、粒径幅の狭い試料 ($U_c < 10$) の場合は供試体径の 1/20 以下、粒径幅の広い試料 ($U_c \geq 10$) の場合は供試体径の 1/5 以下としている。つまり、直径 75 mm の供試体の場合、適用可能な最大粒径は、粒径幅の狭い試料 ($U_c < 10$) で 3.75 mm、粒径幅の広い試料 ($U_c \geq 10$) で 15 mm である。

これらを、本研究で用いた試料に当てはめてみる。表 3.1.1 より、豊浦砂は、 $U_c=1.4$ であるため粒径幅の狭い試料に分類され、最大粒径の許容値は 3.75 mm である。この許容最大粒径に対して豊浦砂は $D_{\max}=0.425$ mm であることから、規定の範囲内である。一方、山砂は、 $U_c=43$ であるため粒径幅の広い試料に分類され、最大粒径の許容値は 15 mm となる。しかしながら、試料の最大粒径 D_{\max} が 19 mm であることから、原粒度では許容最大粒径の値を超える。よって、**JIS A 1204** に規定されるふるいの目開きを用いて、試料を 9.5 mm 以下にする必要がある。

ここで、奥山ら¹¹⁾による $D_{\max}=0.250\sim 22.4$ mm で $U_c=1.09\sim 1.19$ のガラスビーズを使用した最小密度・最大密度試験用容器の検討によると、直径 60 mm で深さが 127.3 mm 以上のモールドの場合、 $D_{\max}=2.36$ mm 以下の試料であれば、試料がモールドの影響を受けていない。同じように、直径 100 mm で深さが 127.3 mm 以上のモールドの場合、 $D_{\max}=8.0$ mm 以下の試料であれば、試料がモールドの影響を受けていない。これは、試料の最大粒径がモールド径に対してある程度大きい場合、モールドの内壁付近では、試料とモールドとが干渉することによって、モールド内の間隙が大きくなるが、試料の最大粒径がモールド径に対してある程度小さくなれば、干渉の程度が収束するためであるといえる。

これらの結果によると、単粒に近い粒度組成の試料の場合、モールドのサイズによる違いはあるものの、試料の最大粒径は、概ね供試体径の 1/12～1/25 以下であれば許容される計算になる。この結果を本研究で使用した直径 75 mm のモールドで計算すると、許容最大粒径は 6.25～3.00 mm であり、**JIS A 1204** に規定するふるいの目開きでは、4.75 又は 2 mm となる。

以上の結果から、供試体の直径に対する試料の許容最大粒径は、9.5 mm 及び 4.75 mm を候補とする。

(2) 供試体の締固め層厚に対する試料の最大粒径の許容値

JGS 0520の規定において、使用する試料の許容最大粒径は、上記(1)に示したような供試体直径に対する記述にとどまっているものの、実際には深さ方向の許容値も考慮する必要があると考えられる。例えば、高速道路の施工管理基準³⁾には、盛土の部位ごとに材料の許容最大粒径と施工層厚が示されており、最大粒径の影響が及ぶと想定される範囲より厚い層厚を、締固め層厚の最小値としている。

また、1.1で述べたように、**JGS 0520**より粗粒な試料を対象とする**JGS 0530**「粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法」¹²⁾では、締固め法を適用する場合の締固め層数の規定が記されている。**JGS 0530**では、適用される試料の適用範囲を最大粒径約20 mm以上の粗粒土としているが、試料の許容最大粒径は、その粒径幅によって供試体径の1/5~1/10としている。本研究の対象としている盛土工に使用されるような試料の場合、粒径幅が広いことが求められるため、供試体径の1/5以下の粒径が適用されることから、許容最大粒径は $300 \text{ mm} / 5 = 60 \text{ mm}$ であり、**JIS A 1204**に規定するふるいの場合、目開き53 mmが該当する。この許容最大粒径と**JGS 0530**に規定する締固め層数5~6層との関係について、表3.1.4(a)にまとめた。表3.1.4(a)より、**JGS 0530**の許容最大粒径に対する締固め層厚(層厚/ D_{\max})は、2倍程度に設定されていることが分かる。この直径300 mmのケースと同様に、本研究で用いた直径75 mm供試体について、表3.1.4(b)にまとめた。

表3.2.1(b)は、最大粒径を(1)で算出した9.5 mm及び4.75 mmのケースについて、層厚との関係を示したものである。表3.1.4(b)には、上述の**JGS 0530**による結果と同様に層厚/ D_{\max} を2.0としたものに加えて、参考までに、**JGS 0530**の規定にある締固め層数5層及び6層による各値も併記した。表3.1.4(b)より、最大粒径9.5 mmの場合、**JGS 0530**と同様に D_{\max} に対する締固め層厚の割合を2以上とすると、作製可能な締固め層数の上限は8層である。ただし、試料の最大粒径を4.75 mmとすると、締固め層数が16層まで許容される計算となる。

ここで、三軸試験以外の試験方法における、供試体寸法と許容最大粒径との関係について着目する。表3.1.5より、圧密試験¹³⁾及び一面せん断試験¹⁴⁾では、供試体直径に対して1/10程度(層厚/ $D_{\max}=10$)を試料の許容最大粒径としており(一面せん断試験は、せん断面の高さである10 mmで算出した。)、三軸試験用供試体のケースと比較すると、層厚/ D_{\max} の値はかなり大きい。圧密試験及び一面せん断試験は、供試体高さ

表 3.1.4(a) 締固め法における締固め層厚の検討（供試体直径 300 mm の場合）

| 直径 D mm | 高さ H mm | D_{\max} mm | 締固め層数 層 | 層厚 mm | D/D_{\max} | 層厚/ D_{\max} | 備考 |
|--------------|--------------|------------------|------------|----------|--------------|----------------|----------|
| 300 | 600 | 53 | 6 | 100 | 5.7 | 1.9 | JGS 0530 |
| | | | 5 | 120 | | 2.3 | JGS 0530 |

表 3.1.4(b) 締固め法における締固め層厚の検討（供試体直径 75 mm の場合）

| 直径 D mm | 高さ H mm | D_{\max} mm | 締固め層数 層 | 層厚 mm | D/D_{\max} | 層厚/ D_{\max} | 備考 |
|--------------|--------------|------------------|------------|----------|--------------|----------------|----|
| 75 | 150 | 9.5 | 8 | 18 | 7.9 | 2.0 | |
| | | | 6 | 25 | | 2.6 | |
| | | | 5 | 30 | | 3.2 | |
| 75 | 150 | 4.75 | 16 | 9 | 16 | 2.0 | |
| | | | 6 | 25 | | 5.3 | |
| | | | 5 | 30 | | 6.3 | |

が 20 mm であり、供試体の体積に対する境界面の割合が三軸試験と比較すると大きい
ため、最大粒径を小さくすることによって、供試体寸法の力学特性への影響を回避し
ていると考えられる。よって、高さが直径の 2 倍程度である三軸試験の供試体に適用
すると、許容最大粒径が過小になる可能性がある。また、本研究の主たる目的の一つ
は、締固め層厚による供試体内の不均一性について明らかにすることである。よって、
締固め層厚の範囲を極力広くとるため、試料の最大粒径を 4.75 mm、締固め層数は、
最も薄層のケースを 10 層（層厚/ $D_{\max} \cong 3$ ）、最も厚層のケースを 1 層とした。これら
の締固め層厚を含む供試体作製条件は、3.3.3 で詳述する。

なお、表 3.1.5 内、現場密度においては、直径に対して 1/2～1/6 倍程度の最大粒径
を許容していることから、層厚/ D_{\max} は 2～6 であり、表 3.1.4(b) の $D_{\max}=4.75$ mm の
ケースと同様であった。しかしながら、現場密度試験では、力学試験は行わず、密度
測定のみであることに注意が必要である。

表 3.1.5 供試体寸法に対する許容最大粒径の規定の例

| 試験方法 | 供試体寸法に対する最大粒径 (層厚/ D_{max}) の規定 | 備考 |
|---------|---|---|
| 圧密試験 | 直径 60 mm, 高さ 20 mm の 供試体に対して試料の最大粒径が 高さの 1/10 (2 mm) 以下 | JIS A 1217 5.1 ¹³⁾ |
| 一面せん断試験 | 直径 60 mm, 高さ 20 mm の 供試体に対して試料の最大粒径が 0.85 mm 以下 | JGS 0560 5.2 a) ¹⁴⁾ |
| 現場密度試験 | 試験法によるが, 試験孔の直径に対して 最大粒径が概ね 1/2~1/6 程度以下 | JIS A 1214 ¹⁵⁾ , JGS 1611 ¹⁶⁾ 及び JGS 1612 ¹⁷⁾ |

(3) 締固め度の算出

上述のように、山砂の原粒度における最大粒径は 19 mm (表 3.1.1 参照) であるが、供試体作製時の試料は、 $D_{\max}=4.75$ mm のせん頭粒度に調整した。

ここで、締固め特性を把握するために行った **JIS A 1210** では、A 法の上限粒度である $D_{\max}=19$ mm で行われており、締固め度 D_c の計算に当たっては、最大粒径の相違が生じる。これについて、以下のような検討を行った。

まず、最大乾燥密度を求めたときの最大粒径を、19 mm から 4.75 mm に変更した場合の、礫補正による最大乾燥密度の計算結果を表 3.1.6 に示す。礫補正には、Walker・Holtz の方法¹⁸⁾を用いた。

また、表 3.1.6 にて算出した補正後の最大乾燥密度に対する締固め度 D_c を表 3.1.7 に示す。供試体の乾燥密度は、各目標締固め度で作製した供試体の実測値を平均した値である。各締固め度の平均値を求めた供試体の本数は、後述する表 3.3.2 に示す採用本数と同様である。表 3.1.6 より、補正前後の D_c は、四捨五入によって整数桁で整理した場合、同様の値になる。加えて、+4.75 mm 分の体積は、供試体全体の 1%程度であることから、供試体内の粒子骨格への影響はわずかであると考えられるため、本研究における D_c の算出では礫補正による最大乾燥密度は使用せず、**JIS A 1210** による $\rho_{d\max}$ (g/cm³)を用いた。

表 3.1.6 山砂の礫補正の算出結果

| 項目 | | 試験値又は 計算値 | 備考 |
|------------------|--------------------------------|--------------|--------------------------------------|
| 基準密度 | ρ_{d0} g/cm ³ | 1.956 | JIS A 1210 による $\rho_{d\max}$ |
| カットする礫分 | P % | 0.02 | |
| カットする礫分の 絶乾密度 | D_d g/cm ³ | 2.719 | JIS A 1202 による ρ_s |
| 補正後の密度 | ρ_{d0}' g/cm ³ | 1.945 | |

表 3.1.7 最大乾燥密度による締固め度の相違

| 密度及び含水条件 | 作製した供試体の ρ_d の平均値 (g/cm ³) | ρ_{dmax} に対する D_c (%) | ρ_{d0} ' に対する D_c (%) |
|------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| $D_c=95\%$, w_{opt} | 1.851 | 94.6 ≒ 95 | 95.2 ≒ 95 |
| $D_c=90\%$, w_{opt} | 1.754 | 89.7 ≒ 90 | 90.2 ≒ 90 |
| $D_c=85\%$, w_{opt} | 1.657 | 84.7 ≒ 85 | 85.2 ≒ 85 |
| $D_c=90\%$, w_n | 1.758 | 89.9 ≒ 90 | 90.4 ≒ 90 |

3.2 試験装置

本節では、本研究の液状化試験で使用した試験装置について示す。

本研究の液状化試験は、2016年及び2019～2021年の計4年間にわたって行った。その中で、2016年は東京大学の土質/地盤研究室にて、2019～2021年は株式会社アースプライムの技術センターにてそれぞれ試験を行った。そのため、2016年と2019年以降とは、使用した試験機の機構が異なる。各試験機装置の概略を次の(1)及び(2)に示す。

(1) ひずみ速度制御による載荷装置

2016年度は、豊浦砂を用いて作製した供試体による液状化試験を行った。上述のとおり、2016年は東京大学の土質/地盤研究室で試験を行ったが、当該試験で用いた載荷装置は、ひずみ速度制御型の繰返し載荷装置である。本載荷装置は、ACサーボモーター及び電磁クラッチ式軸荷重載荷装置による。この装置は、ACサーボモーターによって軸ひずみ速度を任意の変化率で設定することができ、電磁クラッチによって載荷方向を滑らかに反転させることが可能であるため、ひずみ速度制御による繰返し載荷が可能となっている。また、繰返し載荷による載荷波形は、三角波である。本研究と同様の載荷システムの概略図を図3.2.1に示す。

繰返し載荷による軸荷重の測定には、荷重計を用いた。荷重計は、セル内、供試体の上部に設置することでロッドによる摩擦の影響を軽減している。供試体の軸変位は、三軸セル上部、ロッドと連結して設置した外部変位計によって測定した。また、高容量差圧計を用いて有効応力を測定し、間隙水圧を算出した。

ここで、地盤工学基準の「土の繰返し非

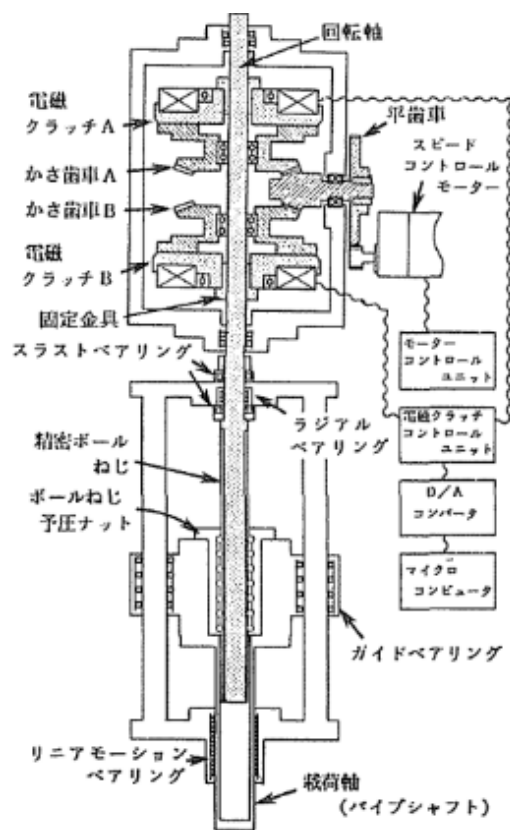


図 3.2.1 ひずみ速度制御による載荷装置概略図¹⁹⁾

排水三軸試験方法」(JGS 0541)²⁰⁾による液状化試験では、応力制御による荷重装置を用いることが求められているが、2016年の液状化試験において、ひずみ速度制御による荷重を行った理由は、次のとおりである。

本研究では、締め層厚による力学特性への影響を調査するために、繰返し荷重時の供試体表面における軸方向ひずみの計測結果による検討を目的の一つとしていた。軸方向ひずみの計測では、デジタルカメラを用いて一定間隔による画像撮影を予定していたため、荷重方式を $f=0.1\sim 1$ Hzの正弦波による応力制御とすると、特に軸差応力0付近や軸ひずみが卓越する領域では、取得できるデータの間隔が粗くなってしまいう可能性がある。他方、ひずみ速度制御の場合、供試体の状態や荷重サイクルのタイミングによらず一定間隔による画像の取得が可能である。

よって、豊浦砂は、軸差応力一定のひずみ速度制御(約 $0.01\sim 0.02\%$ /min)による繰返し荷重によって液状化試験を行った。この荷重速度は、JGS 0541の荷重周波数($f=0.1\sim 1.0$ Hz)と比較すると、軸ひずみが卓越する範囲ではかなり遅い荷重速度となる。この基準と荷重速度との違いについては、AP法による供試体で荷重を行った結果を既往の研究成果と比較している。これらの結果については、4.1.1で詳述する。本研究の豊浦砂供試体による液状化試験に用いた試験装置の概略を、図3.2.2に示す。

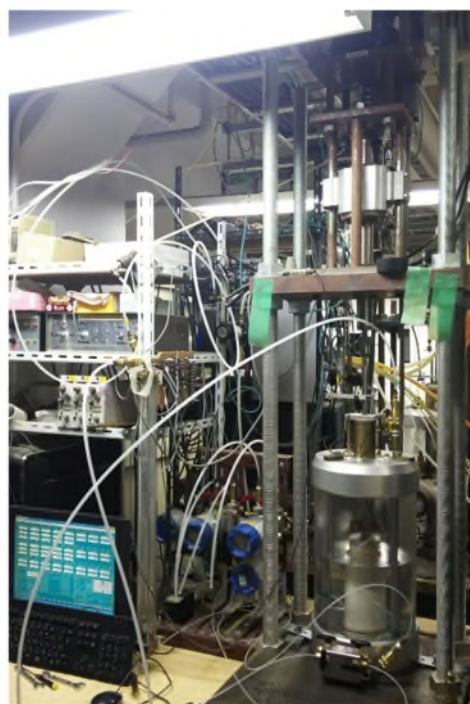
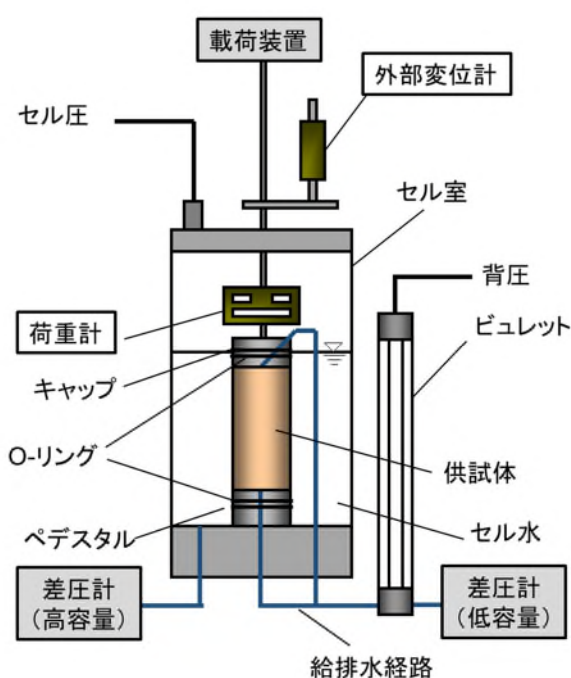


図 3.2.2 ひずみ速度制御型繰返し三軸試験装置概要

(2) 応力制御による载荷装置

2019～2021年に行った山砂を用いて作製した供試体による液状化試験では、応力制御型の载荷装置を用いた。荷重計及び外部変形計は、(1)のひずみ速度制御型载荷装置と同様である。過剰間隙水圧の測定は、セル近傍に設置した圧力計によって測定し、側圧及び背圧は、機械式圧力計を用いて、各段階で測定を行い、設定値と同様であることを確認している。本研究の山砂供試体による液状化試験に用いた試験装置の概略を、**図 3.2.3**に示す。

ここで、山砂供試体の液状化試験においても、豊浦砂と同様、繰返し载荷中の画像撮影を行った。上述のように、**JGS 0541**の周波数 ($f=0.1\sim 1\text{ Hz}$)による载荷では、画像精度に不十分な部分が出てしまう可能性が高い。さらに、正弦波による载荷では、ひずみ速度一定による载荷とは異なり、繰返し载荷によって発生する軸ひずみ量が1サイクル中の各時点で異なることから、圧縮及び伸張のピーク付近の画像が一定精度以上になるように载荷周波数を調整した。

圧縮及び伸張のピークにおける撮影枚数を豊浦砂に合わせる場合、各ピーク付近で4枚程度の画像が必要であり、この場合、载荷周波数は $f=0.01\text{ Hz}$ 程度となるが、撮影に使用するデジタルカメラの機能上も問題ないことから、山砂の载荷周波数は $f=0.01\text{ Hz}$ とした。また、载荷週周波数の違いによる比較検討について、4.1.1にて述べる。

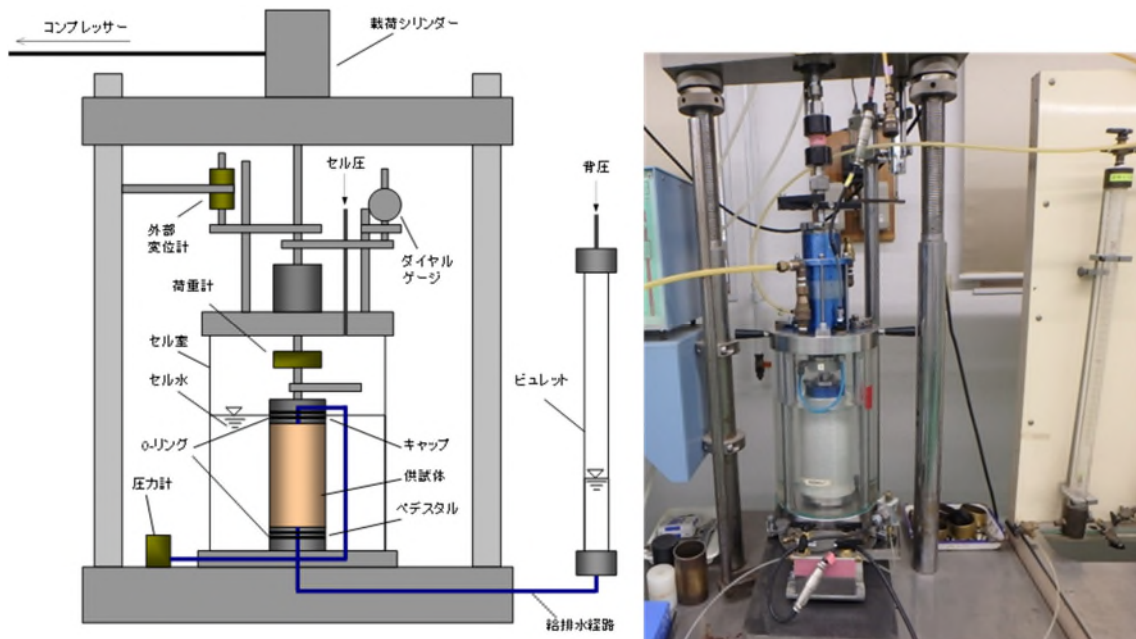


図 3.2.3 応力制御型繰返し三軸試験装置概要

3.3 供試体作製方法

本節では、供試体作製方法について、一般的な調査業務における作製条件の検討手順、各種作製方法の特徴及び本研究で用いた供試体作製条件及びその具体的な手順について示す。

3.3.1 供試体作製方法及び条件の選択

地盤材料の供試体作製では、様々な条件の中から適切な手法を選択して行うが、これは三軸試験でも同様である。図 3.3.1 に、三軸試験において締固め法を選択した場合の、一般的な供試体作製方法及び条件の検討手順のフローを示す。

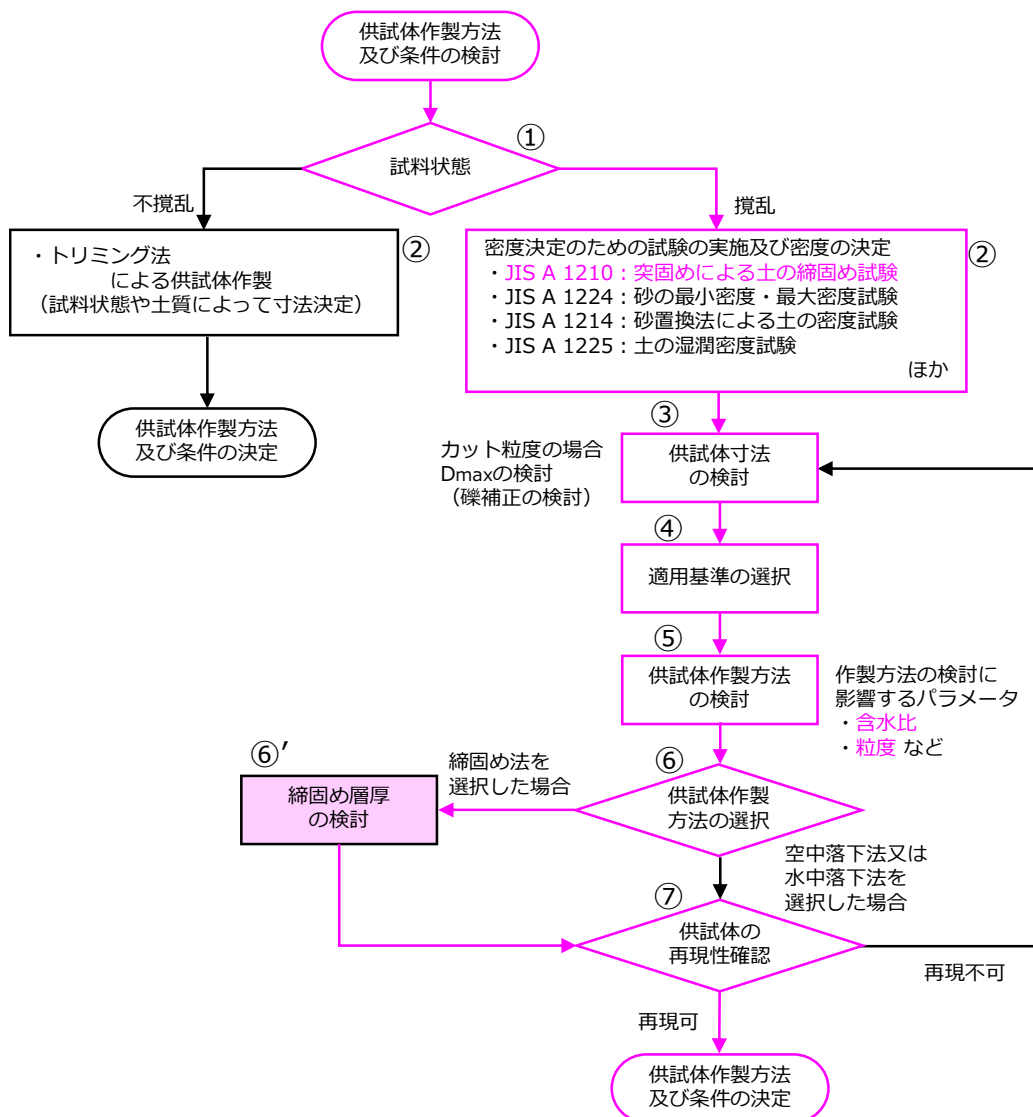


図 3.3.1 一般的な三軸試験における供試体作製の検討フロー

図中、本研究に関わる範囲は、ピンク色で色別している。また、本研究において比較検討を行う供試体の作製条件は、⑤「供試体作製方法の検討」での作製方法の検討に影響するパラメータ及び、締固め法を選択した場合の⑥'「締固め層厚」である。図 3.3.1 に示すように、不攪乱試料と比較すると、攪乱試料は、供試体作製方法の決定までに多くの工程を経ていることが分かる。

なお、図 3.3.1 では、不攪乱供試体は、供試体作製着手までの工程は少ないが、不攪乱試料の供試体作製では、乱さずに供試体を作製することが最も重要なポイントであり、不攪乱供試体の作製が容易であることを示しているのではない。

攪乱試料の供試体作製では、供試体作製方法及び条件の決定までに多くの選択を行う。それらの中には、例えば③「供試体寸法の検討」や⑤「供試体作製方法の検討」における粒度特性のように、様々な項目に関わるパラメータもある。また、供試体条件を決定した後であっても、⑦の「供試体寸法の再現性確認」において、再現不可になるケースもある。その場合、初期から再検討（図中では③「供試体寸法の検討」まで戻っているが、場合によっては、その前の工程である②「密度決定のための試験実施及び密度の決定」まで戻る）を行うこともある。また、場合によっては計画を立てた密度による供試体が成り立たないこともあるため、工程にある程度のゆとりがあることが望ましい。

なお、⑤「供試体作製方法の検討」については、後述の表 3.3.1 に、一般的な供試体作製方法の特徴及び注意事項をまとめており、粒度や含水状態によっては、作製に適さない条件や、作製時の注意点を示している。

3.3.2 一般的な三軸試験供試体の作製方法

本項では、三軸試験の供試体作製方法について、**JGS 0520**に記載されている3種類の概略を記す。また、各作製方法の特徴を、長所と短所に分けて表 3.3.1 に示す。

(a) 空中落下法

乾燥した試料を、ノズル又は多重ふるい装置を用いてモールド内に落下させる。前者の場合は、モールドの試料面とノズルとの落差及びノズル先端部の開口面積によって、後者の場合は、漏斗先端の開口径と落下高さによって供試体の密度を調整する。

(b) 水中落下法

乾燥した試料又は試料槽に多量の水とともに貯蔵された試料を、ノズルやスプーンを用いて、脱気水を満たしたモールド内に注ぐ。1 回当たりの試料の投入量又はモールド内の試料面とノズルとの落差によって供試体密度を調整する。

(c) 締固め法

スプーンやノズルを用いて試料を数回に分けて入れ、各回、試料の上方から突き棒などを用いて締め固める。その他、モールドの下部をハンマーで軽くたたき、振動機でモールドを加振するなどの方法がある。

表 3.2.1 に示すように、供試体作製方法には、対象とする試料の物理特性によっては適切ではないものもある。豊浦砂は、表 3.3.1 のいずれの方法も適用可能であるが、山砂は、試料の粒度組成や含水条件によって、空中落下法及び水中落下法を用いるのは適切ではない。

また、締固め法は、粒度組成や含水比など試料状態の選択の幅が広いことや、比較的器具が簡易的であることなどから、一般的な地質調査における供試体の再構成に利用されやすい。よって、本研究でも締固め法による供試体作製を基本とし、豊浦砂については、既往の研究成果との比較によるキャリブレーションや供試体作製方法による結果の検討にも使用するため、空中落下法による供試体作製も行った。また、締固め法に用いる試料は、締固め時の含水を湿潤状態とした。

これら本研究で用いた供試体作製方法の具体的な手順については、3.3.3(2)及び(3)で述べる。

表 3.3.1 一般的な供試体作製方法の特徴

| 名称 | 長所 | 短所 |
|----------------------|---|---|
| 空中落下法 | 供試体内を比較的均一に構成できる。 | 試料がある程度の粒径幅をもつ場合、落下中に試料が分級する。また、湿潤試料に適用できない。 |
| 水中落下法 | 供試体内を比較的均一に構成できる。 | 試料がある程度の粒径幅をもつ場合、落下中に試料が分級する。また、比較的準備に手間がかかる。 |
| 締固め法 (突固めによる) | 試料の粒度組成や含水状態について、選択の幅が広い。 作製器具が簡易的である。 | 軸方向に密度勾配が形成されやすい。 |
| 締固め法 (側方からの打撃による) | 試料の粒度組成や含水状態について、選択の幅が広い。 作製器具が簡易的である。 | 軸方向に密度勾配が形成されやすい。また、特に乾燥又は気乾試料を用いる場合、細粒分がモールド底面に落下しやすい。 |
| 締固め法 (振動による) | 試料の粒度組成や含水状態について、選択の幅が広い。 | 軸方向に密度勾配が形成されやすい。 |

3.3.3 本研究における供試体の条件及び作製方法

本項では、本研究の供試体の条件及び作製手順について示す。

(1) 供試体作製条件

本研究で作製した供試体の作製条件を表 3.3.2 に示す。

表 3.3.2 供試体作製条件

| No. | 試料 | 作製方法 ^{*)} | D_r (%) | D_c (%) | 締固め層数 | 締固め層厚(mm) | 締固め時含水比 w (%) ^{**)} | 作製本数 | 採用本数 |
|-----|-----|--------------------|-----------|-----------|-------|-----------|--------------------------------|------|------|
| 1 | 豊浦砂 | AP | 60 | - | - | - | 0.0 | 4 | 4 |
| 2 | 豊浦砂 | WT | 60 | - | 10 | 15.0 | 4.0 | 8 | 4 |
| 3 | 豊浦砂 | WT | 60 | - | 6 | 25.0 | 4.0 | 5 | 5 |
| 4 | 豊浦砂 | WT | 60 | - | 4 | 37.5 | 4.0 | 5 | 5 |
| 5 | 豊浦砂 | WT | 60 | - | 6 | 25.0 | 2.5 | 2 | 2 |
| 6 | 山砂 | WT | - | 95 | 10 | 15.0 | 12.2 (w_{opt}) | 3 | 3 |
| 7 | 山砂 | WT | - | 95 | 4 | 37.5 | 12.2 (w_{opt}) | 3 | 3 |
| 8 | 山砂 | WT | - | 95 | 1 | 150.0 | 12.2 (w_{opt}) | 3 | 3 |
| 9 | 山砂 | WT | - | 90 | 10 | 15.0 | 12.2 (w_{opt}) | 3 | 3 |
| 10 | 山砂 | WT | - | 90 | 4 | 37.5 | 12.2 (w_{opt}) | 3 | 3 |
| 11 | 山砂 | WT | - | 90 | 1 | 150.0 | 12.2 (w_{opt}) | 2 | 2 |
| 12 | 山砂 | WT | - | 85 | 10 | 15.0 | 12.2 (w_{opt}) | 3 | 3 |
| 13 | 山砂 | WT | - | 85 | 4 | 37.5 | 12.2 (w_{opt}) | 3 | 3 |
| 14 | 山砂 | WT | - | 85 | 1 | 150.0 | 12.2 (w_{opt}) | 3 | 3 |
| 15 | 山砂 | WT | - | 90 | 10 | 15.0 | 6.8 (w_n) | 3 | 3 |
| 16 | 山砂 | WT | - | 90 | 4 | 37.5 | 6.8 (w_n) | 3 | 3 |

^{*)} AP : Air-Pluviation (空中落下法), WT : Wet-Tamping (湿潤締固め法)

^{**)} w_{opt} : 最適含水比, w_n : 自然含水比

上述のように、本研究で用いた供試体はいずれも直径 75 mm×高さ 150 mm の円柱体である。また、供試体作製方法には、湿潤締固め法（以下、WT 法）を用い、比較として空中落下法（以下、AP 法）による供試体での検討も行った。供試体の作製に当たって、豊浦砂による供試体は、いずれも負圧法を併用した。負圧法は、負圧によってモ

ールド内部に密着させたメンブレンの中に試料を充填することで、供試体を作製・自立させる方法である。この負圧法の併用は、AP法など試料のまき出しによる供試体作製では、一般的に負圧法を併用することに加えて、豊浦砂の物理的特性上、密に締め固めても供試体が自立しないことによるものである。

表 3.3.2 にあるように、豊浦砂の設定密度は $D_r=60\%$ としたが、これは、より幅広い締め固め層厚のケースに対応するためである。加えて、豊浦砂の $D_r=60\%$ は、一般的に中詰めと分類される密度であり、既往の研究成果が豊富な密度条件の一つであることも選定理由に挙げられる。また、あまりに緩詰めの供試体の場合、その緩さが支配的になることで供試体条件による結果の差が判断しにくくなることを回避した結果でもある。

一方、山砂の設定密度は、河川堤防や道路土工で、盛土の施工に用いられる範囲の値として締め固め度は 90% と 95% を設定し、比較のために 85% を加えた 3 種類とした。

また、締め固め層数の設定について、上限は、3.1.3 (2)における検討結果を基に 10 層としたが、下限値は、豊浦砂供試体は 4 層、山砂供試体は 1 層と別の層数を用いた。豊浦砂は、粒径幅の狭い試料であるため、再現可能な密度が限られる。豊浦砂のような単粒に近い粒度組成の試料の場合、上載圧による締め固めより、JIS A 1224 の「砂の最小密度・最大密度試験方法」⁷⁾のように、モールド側方からの打撃による締め固めの方が、密になりやすい。そこで、事前実験として各試料における締め固め可能な層数を調べた結果、表 3.3.2 内の D_r 及び D_c 並びに含水条件において、再現可能な締め固め層数の下限値が、それぞれ 4 層及び 1 層であったことから、これらの層数を採用した。加えて、負圧法のように、三軸セル内で組み立てたモールド内で作製した供試体の場合、加えることができる締め固めエネルギーの限界が比較的低いことも層厚の設定に影響している。

また、豊浦砂の含水比の選定に当たっては、Tatsuoka et al.²¹⁾の研究での条件を基に、実際に使用する試料で事前実験を行い、土の締まり具合などによって決定した。Tatsuoka et al.の研究では、豊浦砂を用いた WT 法の供試体は、締め固め時の含水比を $w=3\%$ としているが、本研究で用いた豊浦砂の場合、 $w=3\%$ による供試体は、厚さの上限は締め固め層数 6 層が限界であり、この場合、締め固め層数の種類が限定されてしまう。本研究では、実務に近い条件を基本として進めているため、締め固め層数は、一般的に使用されている 3~6 層を含む条件設定が望ましい。よって、締め固め時の含水比は、こ

の締固め層数 3 層から 3.1.3(2)による 10 層を再現可能な含水比としたが、検討の結果、 $w=4.0\%$ で締固め層数は 4, 6 及び 10 層の 3 種類とした。

他方、山砂の締固め時含水比は、図 3.1.2 の結果から得た w_{opt} 及び w_n とした。近年、盛土工では、 w_{opt} 又は $\rho_{dmax} \times 95\%$ の湿潤側含水比を用いることが多いが、場合によっては w_n を用いることを許容することもあることを考慮し、 w_{opt} を基本とし、参考に w_n を追加した。

結果の検討に用いた供試体本数は、表 3.3.2 内、豊浦砂を使用した No.1~4 は、各条件 4~5 本を基本とし、No.5 のみ 2 本である。また、山砂を使用した No.6~16 は 3 本を基本としたが、No.11 のみ 2 本である。この採用本数に対して作製本数は、表 3.3.2 中、No.2 を除くと 100%であったものの、No.2 のみ実際に作製した本数は採用本数の 2 倍であり、再試率 50%である。この豊浦砂供試体の締固め層数 10 層における再試率の高さについては、4.4.1 にて詳述する。

(2) AP法による供試体の作製方法及び手順

AP法による供試体作製では、あらかじめ、漏斗先端からの落下高さと密度との関係を検定しておく。その結果から目標密度に当たる落下高を求め、その高さから漏斗を用いて乾燥砂をまき出すことで、供試体を作製した。試料のまき出しに当たっては、試料の落下高さを保つため、モールド内での試料の堆積の進行に伴ってノズルを上昇させた。また、供試体内の堆積構造の影響を緩和させる目的で、一定間隔(2~3回転)で落下方向を反転させながら砂をまきだした。図 3.3.2 に本研究で用いた豊浦砂による検定結果を、図 3.3.3 にまき出し方向の例を示す。

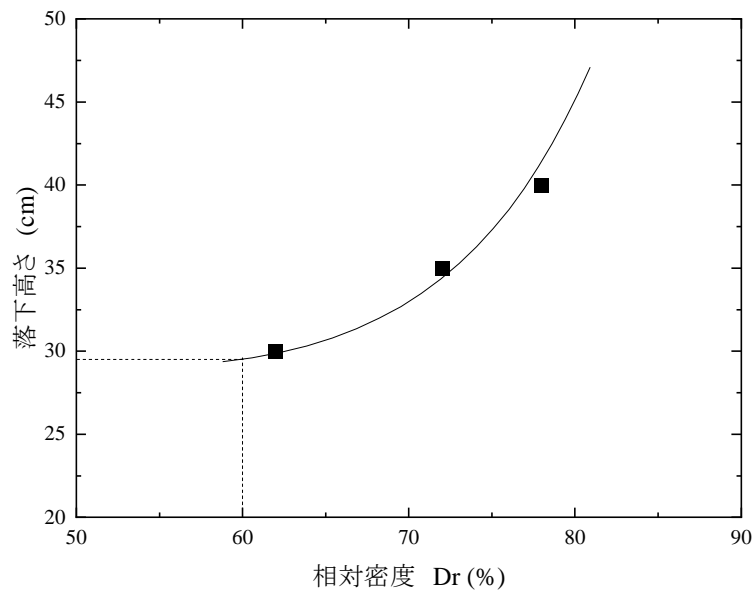


図 3.3.2 AP法の落下高さと密度との関係 (豊浦砂)

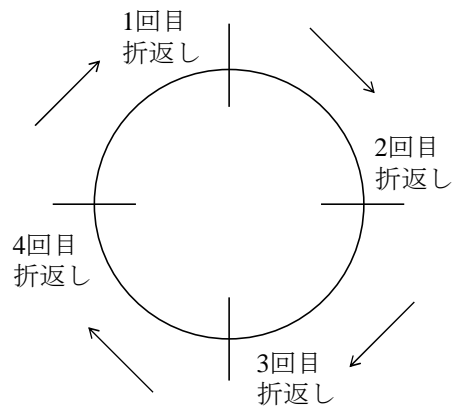


図 3.3.3 AP法におけるまき出し方向の例

(3) WT 法による供試体の作製方法及び手順

本研究の WT 法による供試体は、あらかじめ分取した一層分の試料を、目標とする高さまで締め固めて作製した。その層境は、上下層のなじみを良くするために、各層の層境を仕上がり面の上端から層厚の半分程度まで乱した上で次の層の砂を投入した。これらの手順は、豊浦砂と山砂とで共通しているものの、3.2 節で示した試験装置と同様、試験を実施した試験室の設備によって、使用した器具にやや違いがある。本研究で使用した供試体作製器具及び作製方法の概略を図 3.3.4 及び図 3.3.5 に示す。

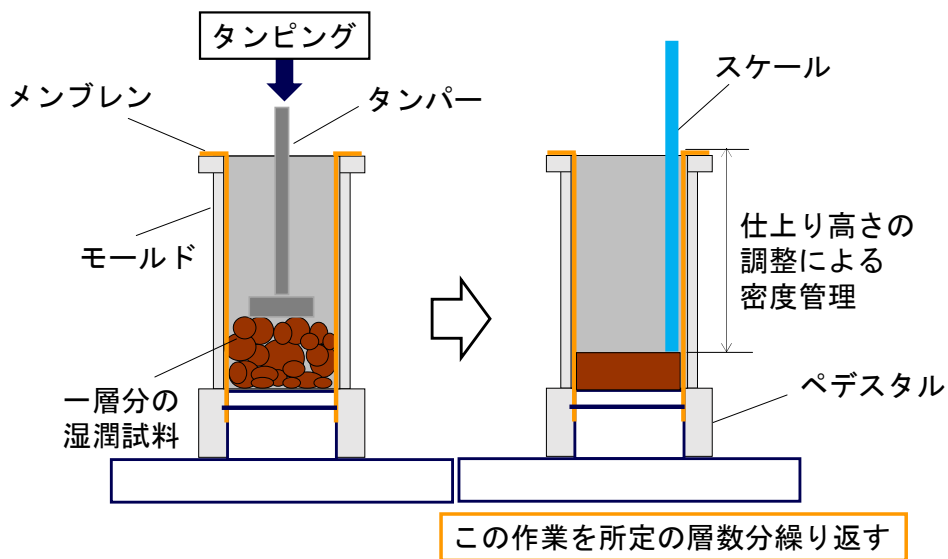


図 3.3.4 豊浦砂 WT 法の供試体作製方法の概略

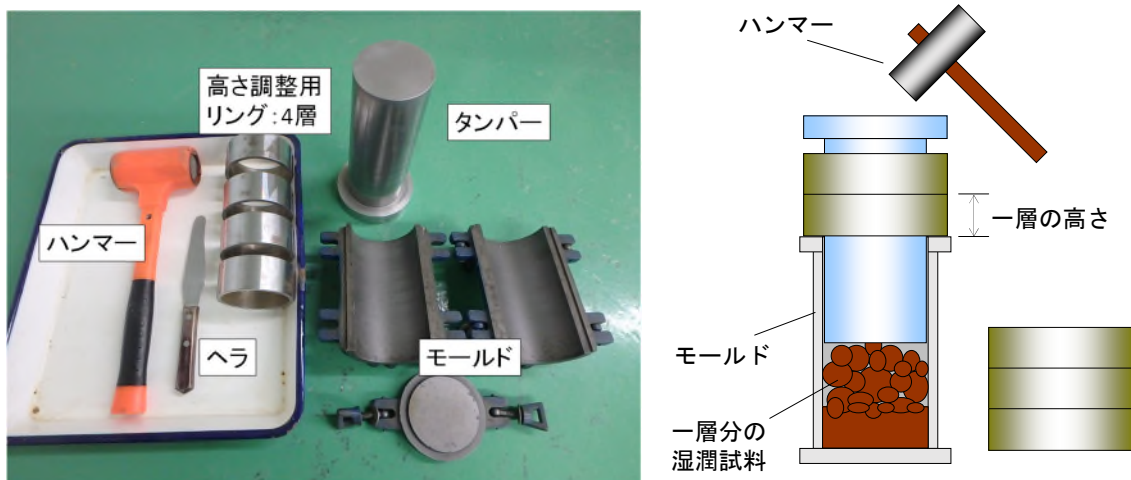


図 3.3.5 山砂 WT 法の供試体作製器具及び作製方法の概略

図 3.3.4 及び図 3.3.5 は、図 3.3.4 が豊浦砂供試体の WT 法で用いた供試体作製方法の概略であり、図 3.3.5 が山砂供試体の WT 法で用いた供試体作製器具及び作製方法の概略である。両試料、基本的な作製手法に違いはないものの、豊浦砂の供試体作製では、締め固め時の高さの管理にスケールを用い、タンパーの設置面が直径 35 mm のものを用いた。他方、山砂の供試体作製では、高さの管理に一層分の高さをもつリングを使用し、タンパーは、設置面の直径が 73.5 mm のものを用いた。

なお、前述のように、豊浦砂の供試体作製では負圧法を併用し、三軸セル室内に設置したモールド及びメンブレンの内部で試料の締め固めを行ったが、山砂の供試体作製では、鉄製の二つ割りモールド内に直接試料を入れて締め固めを行った。

以上のような供試体作製で用いた器具の違いによる懸念事項を、次の a)~d)にまとめた。

- a) タンパーの設置面積の違いや、豊浦砂供試体で負圧法を併用したことによる締め固めエネルギーの違い（負圧法では、突固めによるメンブレンの破損を回避するため、ある程度小さい圧による締め固めを行うことが多い）。
- b) 豊浦砂のタンパーの設置面積は、供試体の断面積に対して 2 割程度であるため、供試体条件によっては、突固め時に、タンパーの側面から試料が逃げてしまう。
- c) 豊浦砂の締め固めでは、一層の仕上がり高さの測定を、スケールを用いた目視によって行ったため、リングを用いた山砂より仕上がり高さが不均一である可能性がある。
- d) 山砂の締め固めでは、締め固め層厚を剛性の高い高さ調整用リングを使用することによって一律に上げることができる。その一方で、豊浦砂のように、締め固め中の試料の様子を観察することができないため、例えば、投入した試料がモールド内で偏っていても気づかずに締め固め続けてしまう可能性がある。

上記の a)及び b)について、豊浦砂供試体より山砂供試体の方が、高い締め固めエネルギーが作用している可能性がある。本研究における WT 法は、高さ管理によって供試体を作製しているため、同じ目標密度であれば、いずれのケースにおいても、供試体全体の密度差はほぼ無いといえる。しかしながら、締め固め時、層内に伝達するエネルギーの深さに違いがある可能性があることに注意する必要がある。参考までに、以下

に締固めの仕事量 E_c (J/m^3)の定義を示す。式中、 N_L 及び V 以外は固定値ではない。これについては、本項の(4)にて詳述する。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \text{ (J/m}^3\text{)}$$

W_R : ランマーの重量 (N)

H : ランマーの落下高さ (m)

N_B : 層当たりの突固め回数

N_L : 層の数

V : モールドの容積 (締め固めた供試体の体積) (m^3)

また、c)及びd)は、豊浦砂及び山砂で用いた締固め高さの各管理手法に対する懸念事項であるが、これらについては、以下のように対策を行った。

まず、c)については、豊浦砂の供試体作製における締固め高さの確認を、供試体の周面を6分割した各ポイントで行うことで、締固め高さの偏りを極力回避した。次に、d)の山砂供試体の同一層内における試料の偏りについては、一定回数締め固めた後、モールド側方からタンパーと高さ調整用リングとの隙間を観察し、この隙間に目視で識別できるほどの偏りが無いことを確認しながら締固めを進めた。

以上の内容を踏まえた本研究におけるWT法供試体の作製手順を以下に示す。

- 1) 試料の含水比を **JIS A 1203** によって測定する。このとき、必要であれば、試料を自然乾燥させる。
- 2) モールドを組み立て、ノギスを用いてモールドの体積を測定する。
- 3) 上記 1)で得た含水比及び 2)で得た体積を用いて、目標の乾燥密度に必要な供試体質量を算出する。
- 4) 上記 3)で得た質量を用いて、締固め層数分に小分けにし、ビニール袋に保管する。
- 5) 上記 4)で小分けにした試料のビニール内に加水し、目標の含水比に調整する。
- 6) モールドを組み立てる。
- 7) 上記 5)にて小分けにした1層分の試料を投入し、ヘラでならす。この試料投入において、試料がモールド内の一か所に集中しないように注意する。また、比較的乾燥した試料では、試料の分級を避ける目的で、高い位置からの試料投入は極力避け

る。

8) モールド内にタンパー（豊浦砂：直径 35 mm，山砂：直径 73.5 mm）を設置する。

その際に，山砂供試体は，設定層厚と同じ高さのリングをセットする。

9) モールド内に設置したタンパーを，手突き又はハンマーによって，設定した締固め層厚に至るまで打撃する。ハンマーによる打撃は，一定回数ごとに 90°回転させ，打撃方向による密度の偏りを避ける。

なお，試料の投入時や試料を締め固めるときに，モールド内壁やタンパーの側面など試料が付着する場合があるが，これらの試料は，当該試料の締固めの早い段階で試料の中に戻し，他の試料と共に締め固めることが望ましい。

10) 豊浦砂はスケールを用いて，山砂は高さ調整用リングとタンパーとの間に隙間がないことを確認することで締固め厚さの管理を行う。

11) 最終層以外，ヘラを用いて各層の層境を仕上がり面の上端から層厚の半分程度まで乱す。なお，毎回均一な深さで供試体端面の乱しができるように，ヘラに目標とする深さの目印を付けておき，その深さに到達するまでヘラを供試体内に入れた。

12) 締固め層数が 1 層以外の供試体は，所定の締固め層数まで 7)～11)を繰り返す。

(4) WT 法によって作製した供試体の再現性検討

上記(3)で述べたように、本研究における WT 法供試体の作製は、高さ管理による密度調整によって行った。この場合、目標密度に達したときの突固め回数にバラつきが出るため、供試体条件ごとに締固めエネルギーが異なる。ただし、同じ条件であるにも関わらず、突固め回数に極端な違いがある場合は、投入試料の粒度のバラつきや投入した場所の偏り、作製工程における何らかのミスなどによって、供試体及び／又は供試体の各層ごとの均一性が保てていない可能性がある。そこで、WT 法供試体の作製では、目標高さに締め固まるまでに要した突固め回数を記録した。

図 3.3.6 及び図 3.3.7 は、供試体作製時の突固め回数を供試体高さとの関係であり、図 3.3.6 が豊浦砂の結果で、図 3.3.7 が山砂の結果である。図 3.3.6 及び図 3.3.7 より、同じ条件の供試体は、概ね同じ突固め回数で作製されているといえる。

同じ試料及び含水比による比較では、締固め層数 10 層と比較すると 4 層のデータは勾配が急であり、1 層の締固めに必要な突固め回数は、供試体の下部ほど少なく、供試体の上層になるほど漸増していることが見てとれる。これについては、次の①及び②の要因が考えられる。

① 層境の乱しの影響

供試体作製における層境の乱しによって、供試体層内の密度勾配を緩和すると予想されるが、最下層及び最上層は、それぞれ下端及び上端で乱しの影響を受けないことから、中間層とは違った傾向を示していると推察される。ただし、その詳細や中間層の密度変化の解明についてはさらなる検証が必要である。

② 締固め時、規定の層内に入っていない試料の影響

供試体作製において締固め法を用いる場合、わずかな量ではあるものの、試料投入時、モールド内壁に付着する試料がある。また、密な供試体の場合、締固め時にタンパーの側方から逃げる試料が、結果的に規定の層内に収まりきっていない状態が観察される。

図 3.3.8 は、豊浦砂を用いて締固め層数 4 層、 $w=4.0\%$ で締め固めた供試体であり、(a)に全景を、(a)中、○の部分の拡大を(b)に示す。この供試体は、層ごとの境目を目視によって確認するため、1 層目及び 3 層目に投入する試料は、含水比調整後に油性インクで着色したものをを用いた。作製した供試体は、モールドごと冷凍庫に入れ、膨張を抑制するためのおもりを載せたうえで 24 時間凍結し、その後、脱型し

た供試体を高速カッターで軸方向に切断した。

図 3.3.8(a)及び(b)より、モールド内壁付近では、突き固めた試料が設定した締固め層内に収まっていない部分があることがわかる。図 3.2.8 の供試体を作製したときに用いたタンパーは直径 35 mm のものであり、全断面でない供試体は特に、このような状態になりやすいと考えられる。

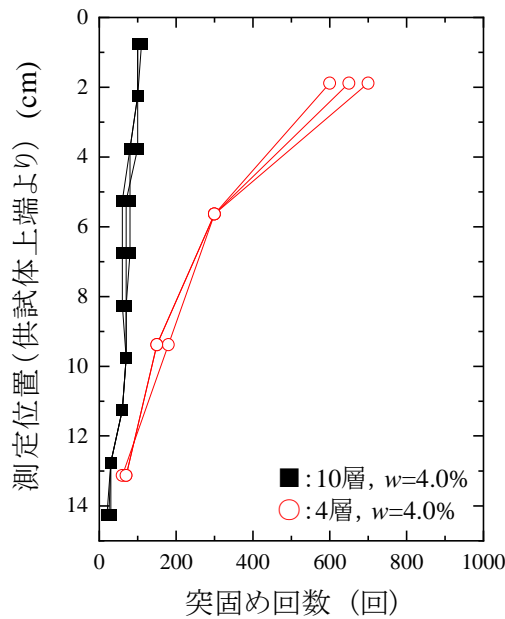


図 3.3.6 WT 法によって作製した供試体の突固め回数（豊浦砂）

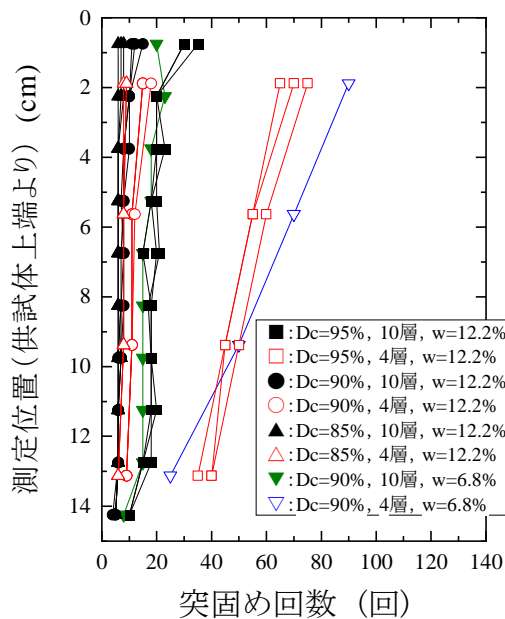


図 3.3.7 WT 法によって作製した供試体の突固め回数（山砂）

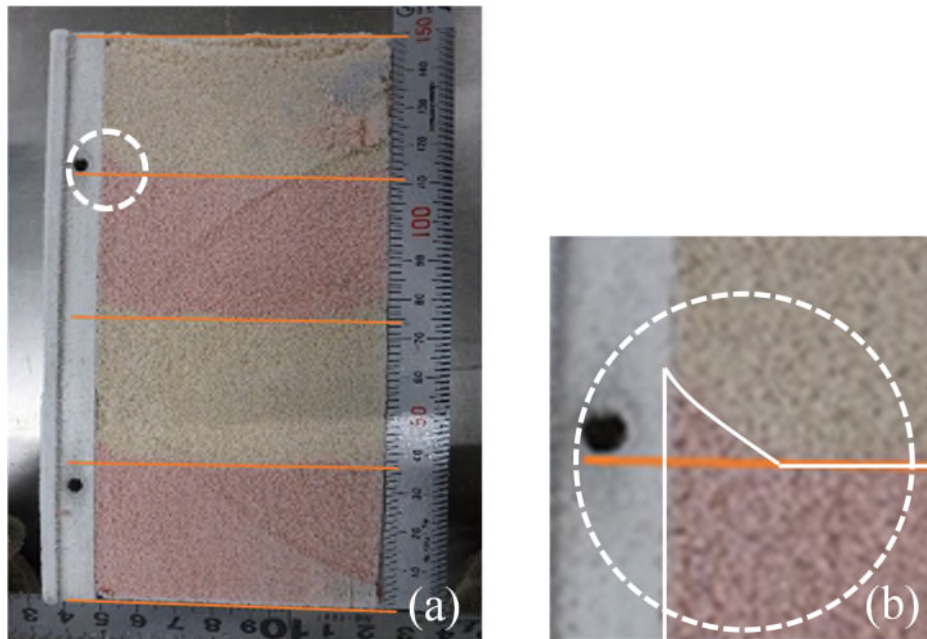


図 3.3.8 WT 法 4 層で作製した豊浦砂供試体の断面：(a) 全景，(b) 拡大

また、表 3.3.3 は、WT 法で作製した各供試体の突固め回数を、同じケースの平均値でまとめたものである。表内の「本数」は、この突固め回数の平均値算出に用いた供試体の本数である。なお、表内には、表 3.2.2 以外の条件による結果も記載してあるが、これは、別途検討した供試体作製時の情報をまとめたものである。これらの検討結果については、4.4 節で示す。表 3.3.3 より、以下のことがわかる。

- a) 豊浦砂の場合、供試体作製時の突固め回数は、同じ条件による比較では 10 層が最も少ない値になっており、6 層と 4 層の差はあまり無かった。
- b) 豊浦砂の締固め層数 6 層の、締固め時の含水比による比較では、両者に有意な差はみられなかった。通常、目標密度が同じで締固め時の含水比が異なる場合、最適含水比を中心として乾燥側に行くほど締固め時のエネルギーは大きくなるが、本研究の豊浦砂のケースでは、 $w=4.0\%$ 及び 2.5% のどちらも極端に乾燥側であることや、そもそも単粒に近い粒度組成の試料であるため、エネルギーの違いが出にくかった可能性がある。
- c) 豊浦砂の突固め回数は、タンパーの違いによって 3 倍程度異なる結果となった。
- d) 山砂で $w=12.2\%$ のケースの場合、供試体全体の突固め回数は、密詰め供試体 ($D_c=95\%$) では締固め層数が少ないほど多くなったが、緩詰め供試体 ($D_c=90\%$)

及び 85 %) では、一定の傾向はみられなかった。これは、設定密度の低下によって必要なエネルギー自体が小さくなるものの、タンパーの自重は一定であることや、締固め層数が多い場合、層ごとに必要となる手順（例えば、乱した層境の締め直しや締固め完了確認のための打撃など）のための突固めを必要とすることなども、実態としては存在するためであると考えられる。

e) 山砂， $D_c=90$ %の締固め時の含水比による比較では， $w=12.2$ %より $w=6.8$ %の方が，供試体全体の突固め回数は大きかった。その差は，10層で2倍程度，4層で4倍程度であった。この含水条件の違いによる差は，山砂の締固め特性の結果と整合しており，同じ乾燥密度に締め固める場合，締固め曲線の w_{opt} より乾燥側の締固めでは，より大きな締固めエネルギーが必要であった。

表 3.3.3 WT 法で作製した供試体の突固め回数

| 試料名 | 供試体条件 | | | 層境の乱し | タンパー直径 (mm) | 突固め回数 (加積) 平均値 | 本数 |
|-----|--------------------|-------|--------------------|-------|-------------|----------------|-----|
| | D_r 又は D_c (%) | 締固め層数 | w (%) | | | | |
| 豊浦砂 | 60 | 10 | 4.0 | 有 | 35 | 682 | 3 |
| | | 6 | | | | 1277 | 3 |
| | | 4 | | | | 1177 | 3 |
| | | 6 | 2.5 | | | 1283 | 3 |
| | 10 | 4.0 | 有 | 73.5 | 241 | 2 | |
| | 4 | | | | 342 | 2 | |
| | 10 | | | | 4.0 | 無 | 253 |
| 山砂 | 95 | 10 | 12.2 (w_{opt}) | 有 | 73.5 | 190 | 3 |
| | | 4 | | | | 212 | 3 |
| | | 1 | | | | 380 | 1 |
| | 90 | 10 | | | | 77 | 3 |
| | | 4 | | | | 47 | 4 |
| | | 1 | | | | 103 | 2 |
| | 85 | 10 | | | | 61 | 3 |
| | | 4 | | | | 31 | 3 |
| | | 1 | | | | - | - |
| | 90 | 10 | 6.8 (w_n) | 162 | 1 | | |
| | | 4 | | 184 | 1 | | |

3.4 試験手順及び試験条件

本項では、本研究の液状化試験の試験手順及び試験条件について示す。

(1) 液状化試験の試験手順

本研究の液状化試験の試験手順は、次のとおりである。なお、1)の供試体作製の詳細については、3.3.3にて述べたとおりである。

- 1) 供試体の作製及び設置
- 2) 飽和
- 3) 過剰間隙圧係数 B 測定
- 4) 圧密
- 5) 載荷

(2) 液状化試験の試験条件

本研究の試験条件を表 3.4.1 に示す。

表 3.4.1 試験条件一覧

| 項目 | 内容 |
|-------------|--|
| 供試体寸法 | 直径 75 mm × 高さ 150 mm |
| メンブレン厚さ | 0.30 mm |
| 供試体作製方法 | AP 法及び WT 法 |
| 試料準備時の含水状態 | 豊浦砂：炉乾燥状態，山砂：自然含水状態 |
| 飽和方法 | 二重負圧法及び背圧 |
| 飽和の判定 | 間隙圧係数 $B \geq 0.95$ |
| 有効拘束圧（圧密応力） | $\sigma_0' = \sigma_c' = 100 \text{ kN/m}^2$ |
| 載荷方式 | ひずみ速度制御及び応力制御 |
| 載荷速度 | ひずみ速度制御：0.01～0.02 %/min 応力制御：0.01 Hz |

3.5 応力及びひずみの定義

本節では、応力及びひずみの定義について示す。本研究の力学試験は、測定値による結果の算出も含めて日本産業規格（JIS）及び地盤工学会基準（JGS）による。その中で、本研究で用いたパラメータの定義を以下に示す。

(1) 供試体の諸元

供試体作製時の締固め度及び相対密度は、以下のように定義する。

$$D_c = \rho_d / \rho_{dmax}$$

ρ_d : 初期の乾燥密度 (g/cm³)

ρ_{dmax} : **JIS A 1210** による最大乾燥密度 (g/cm³)

$$D_r = (e_{max} - e_i) / (e_{max} - e_{min})$$

e_{max} : 最小密度試験による最大間隙比

e_{min} : 最大密度試験による最小間隙比

(2) 供試体の作製及び設置

供試体作製時の供試体に関する値を以下のように定義する。

V_i : 初期の供試体体積 (cm³)

A_i : 初期の供試体断面積 (cm²)

供試体設置から圧密までの変化量は、以下のように定義する。

$$H_0 = H_i - \Delta H_i$$

H_0 : 圧密前の供試体高さ (cm)

H_i : 初期の供試体高さ (cm)

ΔH_i : 初期状態から圧密前までに生じた供試体の軸変位量 (cm)

$$V_0 = V_i - \Delta V_i$$

V_0 : 圧密前の供試体体積(cm³)

V_i : 初期の供試体体積 (cm³)

ΔV_i : 初期状態から圧密前までに生じた供試体の体積変化量 (cm³)

なお、供試体の設置から飽和まで。供試体は不飽和状態であるため、現時点では体積変化を直接測定できない。よって、 ΔV_i は、供試体に等方的なひずみが生じたとし、計算によって得られる値を用いる。

$$\Delta V_i = \frac{3\Delta H_i}{H_i} V_i$$

(3) 飽和及び圧密過程

圧密前の飽和の確認は、次の式による。本研究の間隙圧係数 B の測定は、測定時に供試体が不飽和であったときの影響の範囲を極力抑える目的で、 $\Delta\sigma$ を 29.4 kN/m² に統一して行った。

$$B = \Delta u / \Delta\sigma$$

B : 間隙圧係数

$\Delta\sigma$: 等方応力の増加量 (kN/m²)

Δu : $\Delta\sigma$ に伴う間隙水圧の増加量 (kN/m²)

また、圧密過程における変化量及び圧密後の供試体に関する各値は、以下のように定義する。

ΔH_c : 圧密中に生じた供試体の軸変位量 (cm)

ΔV_c : 圧密中に生じた供試体の体積変化量 (cm³)

H_c : 圧密後の供試体高さ (cm)

D_c : 圧密後の供試体直径 (cm)

V_c : 圧密後の供試体体積 (cm³)

(4) 繰返し載荷過程

繰返し載荷過程で計算に用いるパラメータは、以下のように定義する。

σ_c' : 圧密応力 (kN/m²)

σ_0' : 有効拘束圧 (kN/m²)

$A_c=V_c/H_c$: 圧密後の断面積 (cm³)

$q=\sigma_a-\sigma_r$: 繰返し载荷中の軸差応力 (kN/m²)

$p'=(\sigma_a-2\sigma_r)/3$: 平均有効主応力(kN/m²)

$\sigma_d=\sigma_{amax}-\sigma_r$: 軸差応力 (ピーク値における定義) (kN/m²)

$\varepsilon_{a Ave}$: 繰返し中に生じた軸ひずみ (%)

$\varepsilon_{a Ave c}$: 繰返し中に生じた圧縮側の軸ひずみ (%)

DA : 繰返し中に生じた軸ひずみの両振幅 (%)

Δu : 過剰間隙水圧 (kN/m²)

せん断直後の σ_3' から逐次算出された σ_3' を引く。

$\sigma_d/2\sigma_0'=\tau_{max}/\sigma_0'$ (=CSR : Cyclic Stress Ratio)

繰返し载荷過程において $DA \leq 1\%$ の範囲の平均値を用いる。基準では N_c の値によって丸め方の規定があるが、本研究では、 N_c の値によらず算出値を、小数点以下 4 桁で四捨五入して小数点以下 3 桁に丸めた。

CSR($N_c=20$) : $DA=5\%$ の液状化強度曲線上で $N_c=20$ のときの CSR

$N_c(DA=5\%)$: $DA=5\%$ の時の N_c

3.6 本章のまとめ

本章では、本研究で用いる試験試料が研究の目的と整合していることを確認した。また、本研究で用いる試験器具及び試験方法をまとめた。これら本章のまとめは、以下のとおりである。

- (1) 本研究では、一般的な盛土工に用いられている材料を対象とするため、各種機関の材料規定を調べ、選定した材料の物理試験結果が、概ねそれらの範囲にあることを確認した。
- (2) 試験試料の物理試験結果及び締固め試験結果をまとめ、2種類の砂質土が全く異なる粒度組成及び締固め特性をもつことを示した。
- (3) 山砂の供試体作製に当たっては、試料の最大粒径の許容値について、供試体直径や締固め層厚を基に検討を行った。その結果、山砂の最大粒径を 4.75 mm にしたことによる本研究の検討内容への影響が少ないことを確認し、締固め層数を 10, 4 及び 1 層の 3 種類とした。
- (4) 豊浦砂及び山砂を用いて供試体作製したときの突固め回数を整理した。その結果、山砂で $D_c=85, 90\%$ など比較的低密度の供試体を除くと、概ね厚層の供試体で突固め回数が多く、例えば、豊浦砂の締固め層数 10 層と比較すると 4 層は 2 倍程度の突固め回数が必要であった。また、本研究で作製した供試体の突固め回数は、同じ条件の場合、同様の回数であったことから、同じ条件の複数の供試体は、概ね同じ突固めエネルギーによって締め固められていると考えられる。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター：河川土工マニュアル，pp.76-84，2009.
- 2) 日本道路協会：道路工 盛土工指針（平成 22 年度版），平成 22 年 4 月，2010.
- 3) 東日本高速道路(株) 中日本高速道路(株) 西日本高速道路(株)：土工施工管理要領，pp.2-1 - 2-12，2020.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編：平成 29 年 11 月，2017.
- 5) 日本産業規格 JIS A 1202 「土粒子の密度試験方法」，2009.
- 6) 日本産業規格 JIS A 1204 「土の粒度試験方法」，2009.
- 7) 日本産業規格 JIS A 1224 「砂の最小密度・最大密度試験」，2009.
- 8) 日本産業規格 JIS A 1210 「突固めによる土の締固め試験方法」，2009.
- 9) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の 1，第 2 編 地盤の工学的分類，第 2 章 地盤の工学的分類，pp.53-59，2009.
- 10) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の 2，第 7 編 変形・強度試験，第 3 章 土の三軸試験，pp.553-557，2009.
- 11) 奥山一典，藤原身江子，越智洋秀，井上真理子：砂の最大・最小密度試験における最大粒径制限値の拡大に関する研究，土木学会論文集，No.638，III-49，pp.11-27，1999.
- 12) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の 2，第 7 編 変形・強度試験，第 3 章 土の三軸試験，pp.557-562，2009.
- 13) 日本産業規格 JIS A 1217 「土の段階載荷による圧密試験方法」，2009.
- 14) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の 2，第 7 編 変形・強度試験，第 4 章 土の一面せん断試験，pp.661-671，2009.
- 15) 日本産業規格 JIS A 1214 「砂置換法による土の密度試験方法」，2013.
- 16) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説二分冊の 2，第 9 編 現場密度試験，第 3 章 突き砂法による土の密度試験，pp.780-784，2012.
- 17) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説二分冊の 2，第 9 編 現場密度試験，第 4 章 水置換法による土の密度試験，pp.790-795，2012.
- 18) Walker F.C. and Holtz W.G.：Control of Embankment Material by Laboratory Testing，Proc. ASCE，No.108，pp. 1-25，1951.
- 19) 佐藤剛司，朴春植，金有性，龍岡文夫：室内圧縮試験用高容量微小繰返し載荷装

置，第 27 回土質工学研究発表会，pp.11-14，1992.

20) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の 2，第 7 編 変形・強度試験，第 3 章 土の三軸試験，pp.730-736，2009.

21) Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. : Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.23-41, 1986.

第4章 液状化試験結果及び考察

4.1 試験条件の検証

3.2 節で述べたように、本研究では、画像解析用データの取得に当たって一定の精度を確保するために、異なる荷重方式や、JGS 0541¹⁾による要求事項の範囲外の周波数による繰返し荷重を行った。これら荷重条件の変更に当たっては、液状化試験結果への影響について事前に条件の比較検討を行った。それらの結果について、次に示す。

4.1.1 荷重方式が液状化特性に与える影響

図 4.1.1 は、豊浦砂を用いて行った液状化試験結果であり、繰返し応力振幅比と両振幅軸ひずみが 10% のときの繰返し荷重回数との関係である。図 4.1.1 には、Tatsuoka et al.²⁾によるデータも併記した。両データ共に、豊浦砂を用いて $D_r=60\%$ 、AP 法によって作製した供試体による結果であるが、荷重方式が異なる。本研究によるデータは、荷重速度 $0.01\sim 0.02\%$ /min のひずみ速度制御（応力振幅一定、三角波）によって繰返

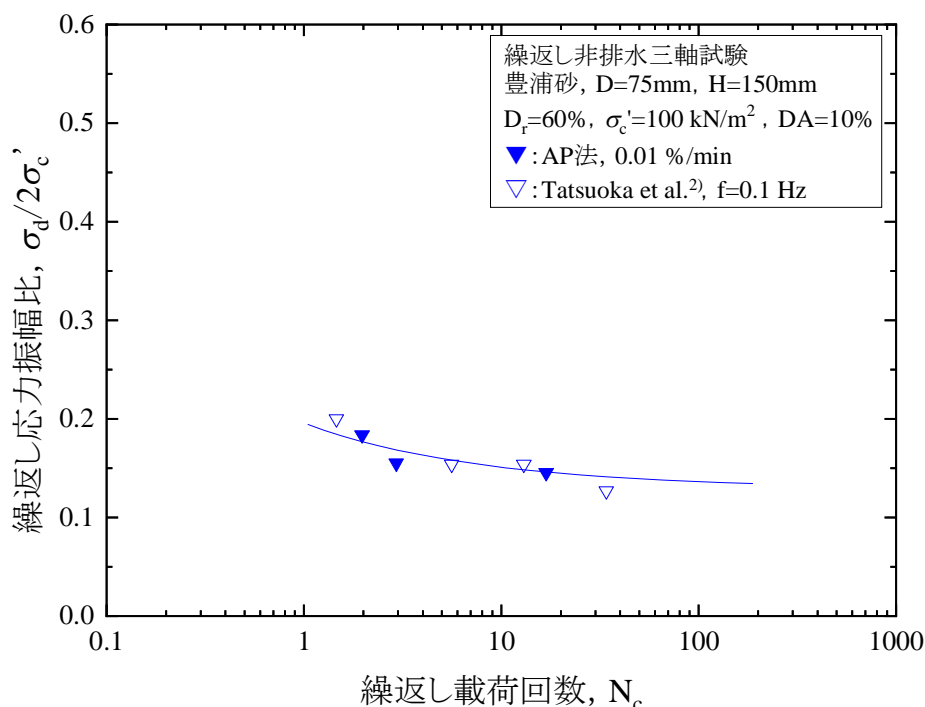


図 4.1.1 液状化強度曲線（豊浦砂，荷重方式の違いによる）

し載荷を行った結果であり，一方，Tatsuoka et al.によるデータは， $f=0.1$ Hz の応力制御によって繰返し載荷を行った結果である。

図 4.1.1 より，両データには，載荷方式及び載荷波形の違いによる有意な差がみられず，本研究で採用した載荷方式による液状化強度は，**JGS 0541** の載荷方式による結果と概ね一致することから，各載荷方式のデータによる直接の比較検討は，本研究の範囲内では，特に問題ないと判断した。

4.1.2 載荷周波数が液状化特性に与える影響

山砂の液状化試験では、豊浦砂での載荷方式とは異なり **JGS 0541** の要求事項どおり応力制御による繰返し載荷を行ったが、**3.2 節**で述べたように、本研究では、通常の $0.1\sim 1.0\text{ Hz}$ より遅い $f=0.01\text{ Hz}$ 程度の載荷周波数によるデータが必要であった。

一般的に、土の力学試験では、載荷速度が速いほど過大評価になることが知られている^(例えば³⁾)。特に、非排水条件による載荷では、過剰間隙水圧の発生が載荷速度の影響を受けるが、これらは、一般的に、過剰間隙水圧の上昇が追い付かないほどの領域では、比較的速い載荷速度において過大評価となる。液状化試験における載荷周波数の影響については、安田ら⁴⁾の研究成果がある。安田らの研究では、**AP**法によって作製した豊浦砂の供試体を $f=0.05, 0.1, 0.5$ 及び 1.0 Hz に変化させて液状化試験を行っており、この4種類の載荷周波数の範囲内では、有意な差はみられないとしている。本研究では、安田らの結果より遅い載荷周波数を用いる。また、載荷速度の違ったデータについては、**4.1.1**でも比較を行っているものの、これらの結果は試料の物理特性によって異なることが予想されるため、事前実験として、実際に使用する試料と同等の試料を用いて、載荷周波数による液状化特性への影響を検討した。

本項の予備実験では、予備実験用に購入した山砂（後に本番で用いる試料のロット違いの試料）を用いて、 $f=0.1\text{ Hz}$ と $f=0.01\text{ Hz}$ 、2種類の載荷周波数による液状化試験を行った。**表 4.1.1**に、予備実験に用いた試料の物理及び締固め特性の一覧を、**図 4.1.2**及び**図 4.1.3**に、予備実験用試料の粒径加積曲線及び締固め曲線を示す。また、**表 4.1.1**、**図 4.1.2**及び**図 4.1.3**には、比較として本番用の試料として用いた山砂の結果も併記した。予備実験用として用いた試料は、本番で使用した試料と比較するとやや粗粒であるものの、**JGS 0051**⁵⁾による分類では同じ(SF-G)であり、本試験用試料と同様に締固め効果の高い試料であるため、概ね本試験用の試料と同様と考えられる。

図 4.1.4～**図 4.1.6**は、載荷周波数 $f=0.1\text{ Hz}$ と 0.01 Hz とで繰返し載荷を行った液状化試験結果であり、 $D_c=90\%$ 、締固め層数 10 層、 w_{opt} で作製した供試体によるものである。**図 4.1.4**～**図 4.1.6**はそれぞれ、**図 4.1.4**に液状化強度曲線を、**図 4.1.5**及び**図 4.1.6**には、有効応力経路及び過剰間隙水圧比と各載荷サイクルにおける両振幅軸ひずみ DA を $DA=5\%$ で正規化した値との関係を示している。**図 4.1.4**～**図 4.1.6**より、繰返し応力振幅比のわずかな違いで**図 4.1.4**の液状化強度曲線及び**図 4.1.5**の有効応力経路上ではややデータのズレが見られるものの、ほぼ同様の結果であることと、**図**

4.1.6 の正規化した DA に対する過剰間隙水圧比の比較では、両者のデータはよく一致している。これらの結果から、本研究に用いた試料の場合、載荷周波数 $f=0.1$ Hz と $f=0.01$ Hz の違いによる液状化特性への有意な差はないと判断し、載荷周波数を $f=0.01$ Hz とした。

表 4.1.1 周波数の検討に用いた山砂の物理的特性一覧

| 物理的特性項目 | | | 予備実験用山砂 | 本試験用山砂 |
|---------|------------------|-----------------|---------|--------|
| 土粒子の密度 | ρ_s | g/cm^3 | 2.719 | 2.719 |
| 最大粒径 | $D_{\max}^*)$ | mm | 19 | 19 |
| 細粒分含有率 | F_c | % | 9.0 | 14.7 |
| 均等係数 | U_c | | 17 | 43 |
| 最大乾燥密度 | $\rho_{d\max}$ | g/cm^3 | 1.927 | 1.956 |
| 最適含水比 | w_{opt} | % | 12.8 | 12.2 |

*) 液状化試験実施時は $D_{\max}=4.75$ mm

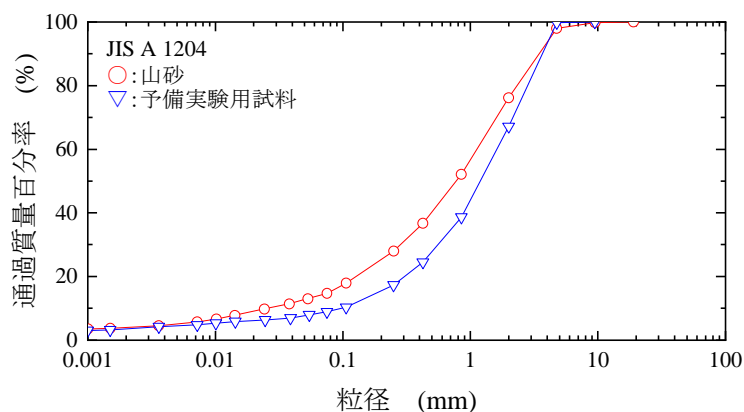


図 4.1.2 山砂の粒径加積曲線（予備実験用試料及び本試験用試料）

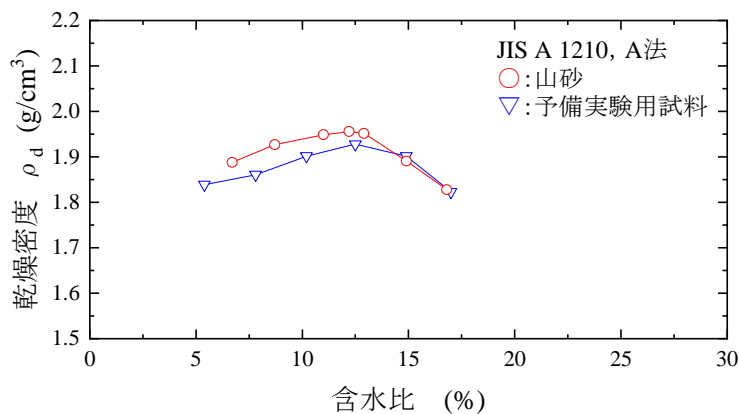


図 4.1.3 山砂の締固め曲線（予備実験用試料及び本試験用試料）

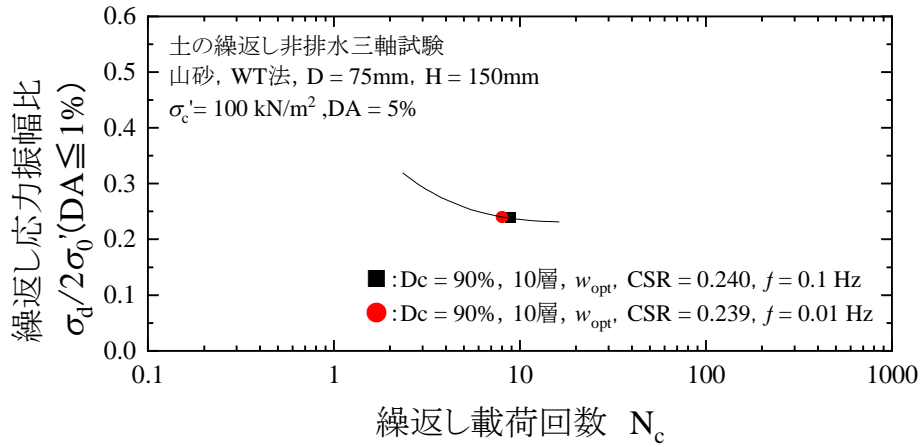


図 4.1.4 液状化強度曲線（山砂，载荷速度による比較）

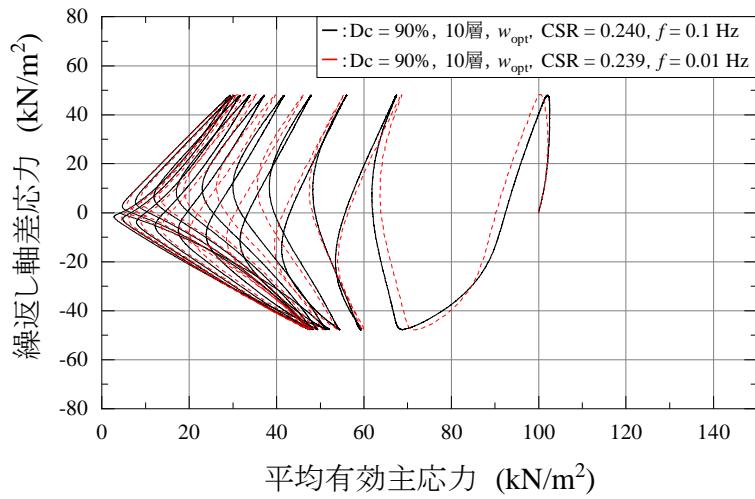


図 4.1.5 予備実験結果：有効応力経路（载荷周波数による比較）

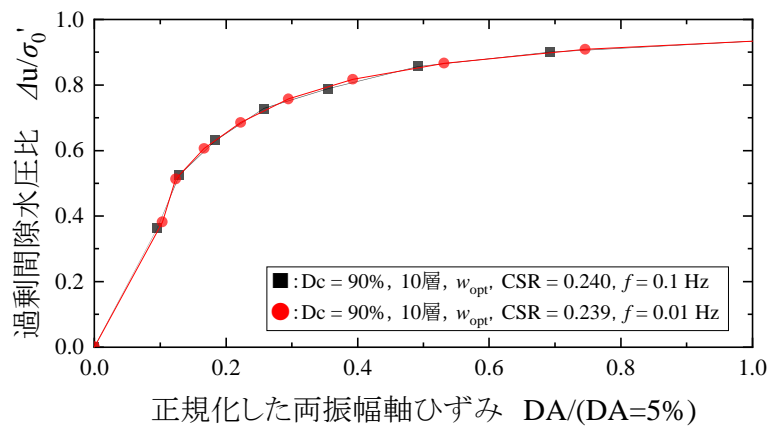


図 4.1.6 予備実験結果：過剰間隙水圧比～正規化した両振幅軸ひずみの関係（载荷周波数による比較）

4.2 均一な粒度組成をもつ土質材料の液状化特性

本節では、均一な粒度組成をもつ土質材料として、豊浦砂を用いた液状化試験並びに密度測定結果及びそれらの考察を行った結果について述べる。

4.2.1 液状化強度曲線

図 4.2.1 に、表 3.3.2 内、No.1～5 の条件で作製した（豊浦砂による）供試体の液状化強度曲線を示す。図中の縦軸は繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ であり、横軸は $DA=5\%$ の時の繰返し载荷回数 N_c である。また、図中のプロットは、 $DA=5\%$ のものである。図 4.2.1 より、供試体条件の違いによって、液状化強度曲線に違いが出ていることがわかる。

これらの結果について、供試体条件による相違を、条件ごとに分けて整理する。

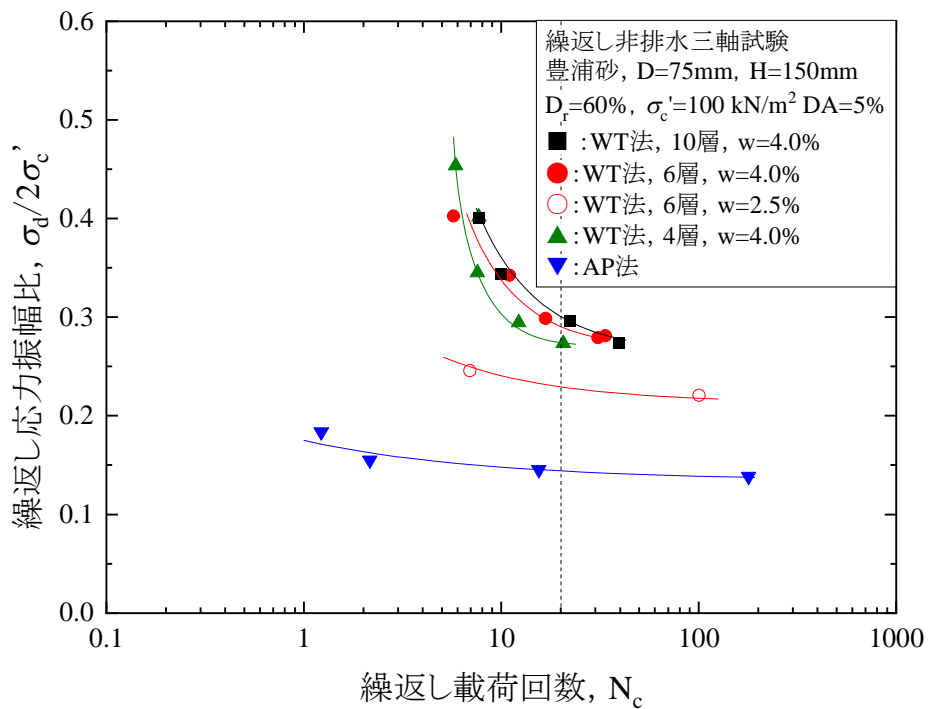


図 4.2.1 液状化強度曲線（豊浦砂）

(1) 供試体作製方法による比較

はじめに、供試体作製方法の違いによる結果の比較を行う。豊浦砂の液状化試験では、AP法とWT法の2種類の方法によって供試体を作製したが、図4.2.1では、同じ相対密度による供試体での比較にも関わらず、両者に明瞭な強度差がみられた。

このような作製方法の違いによる液状化強度への影響は、4種類の方法で作製した供試体によって繰返し三軸試験を行った Tatsuoka et al.²⁾の研究成果とも整合している。Tatsuoka et al.の結果においても、豊浦砂を用いた場合、WT法による液状化強度と比較すると、AP法による液状化強度は、明らかに低下するという結果が示されている。図4.2.1中、AP法で作製した供試体による結果は、WT法のいずれのケースと比較しても同じ N_c に至ったときの繰返し応力振幅比（以下、CSR：Cyclic Stress Ratio）は極端に低く、その曲線は、最もなだらかであった。このような、なだらかな液状化強度曲線は、極ゆるく作製した砂供試体などでよくみられる結果である。

図4.2.1中の代表的なケースの有効応力経路及び応力～軸ひずみ関係を図4.2.2(a)～(c)に示す。図4.2.2の(a)～(c)は、WT法の締固め層数10層及び4層で作製した供試体並びにAP法によって作製した供試体の有効応力経路及び応力～軸ひずみ関係である。これらのグラフは、いずれも $DA=5\%$ に至った時点の繰返し載荷回数 N_c （以下、 $N_c(DA=5\%)$ ）が16～22回の、同程度の繰返し載荷回数による結果である。WT法で作製した図4.2.2(a)及び図4.2.2(b)とAP法によって作製した図4.2.2(c)の有効応力経路とを比較すると、AP法で作製した図4.2.2(c)は、載荷初期は平均有効主応力 p' の減少傾向に大きな差はないものの $p'=50\text{ kN/m}^2$ 付近から変動が大きく、その後、1～2波程度破壊包絡線に至っている。一方、WT法で作製した図4.2.2(a)及び(b)の応力経路は、載荷開始から終了まで、比較的緩やかに推移するような結果が得られた。

応力～軸ひずみ関係においても有効応力経路と同様に、AP法の図4.2.2(c)では繰返し載荷中のある段階で軸ひずみの急変が見られ、AP法の軸ひずみは、概ね $DA=5\%$ に至る直前の3波程度で発生している。一方、WT法10層と4層の図4.2.2(a)及び(b)の挙動は、比較的漸増的に推移している。このように、同じ $D_r=60\%$ で作製した供試体であるものの、供試体作製方法の違いによって繰返し載荷による有効応力経路や応力～軸ひずみ関係には明確な違いがみられた。

なお、この供試体作製方法による結果の相違については、作製時の含水比がAP法では0.0%、WT法では4.0%と異なるため、純粹に作製方法のみの比較ではない。

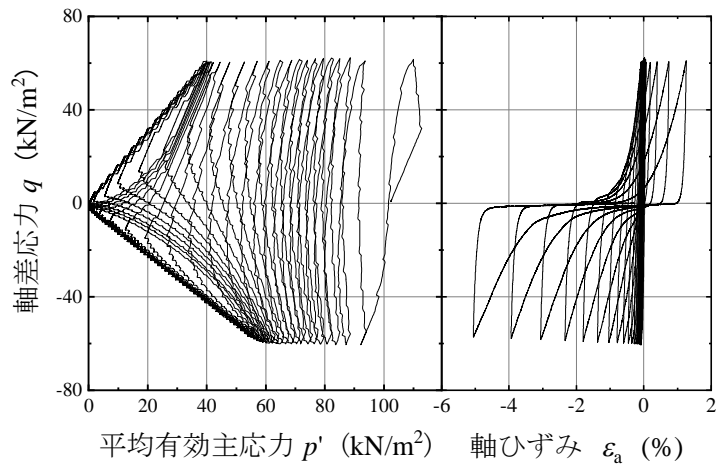


図 4.2.2(a) 有効応力経路及び応力～軸ひずみ関係（豊浦砂，WT法，10層）

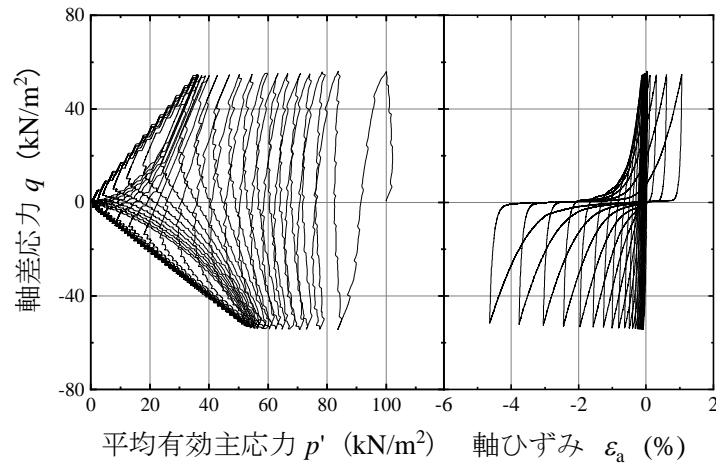


図 4.2.2(b) 有効応力経路及び応力～軸ひずみ関係（豊浦砂，WT法，4層）

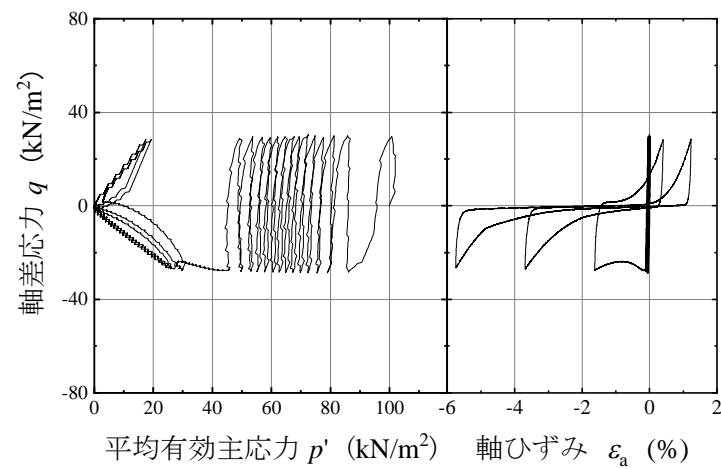


図 4.2.2(c) 有効応力経路及び応力～軸ひずみ関係（AP法）

(2) 締固め時の含水比による比較

次に、締固め時の含水比の違いに着目する。図 4.2.3 は、図 4.2.1 のデータの中から締固め層数 6 層の $w=4.0\%$ 及び 2.5% のデータをまとめたものであり、図 4.2.1 から読み取った各含水比における N_c が 20 回の時の CSR ($CSR(N_c=20)$) を $w=4.0\%$ の $CSR(N_c=20)$ で正規化した値と、含水比との関係を示している。図 4.2.3 より、締固め層数 6 層で $w=2.5\%$ のしたケースは、同じ 6 層で $w=4.0\%$ としたケースと比較すると、 $CSR(N_c=20)$ は 20 % 程度低下している。また、図 4.2.1 より、 $w=2.5\%$ の液状化強度曲線は、AP 法による供試体ほどではないものの、 $w=4.0\%$ と比較すると緩詰め供試体で見られるような、なだらかなラインを示した。

ここで、繰返し载荷中の間隙水圧の挙動を調べるために、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$ と $DA=5\%$ で正規化した DA との関係を図 4.2.4 に示す。図 4.2.4 は、WT 法 6 層で $N_c(DA=5\%)$ が 6 回程度であったケースの $w=2.5\%$ と $w=4.0\%$ との比較であるが、 $w=4.0\%$ のケースと比較すると $w=2.5\%$ のケースの方が明らかに Δu の上昇が早いことが分かる。

豊浦砂の供試体作製において、 $w=4.0\%$ で作製したケースでは、わずかではあるものの、加水による砂粒子同士の団粒化が観察されるような状態であった。土がこのような状態である場合、含水比が上昇することで粒子間の自由水が増加し、土粒子が安定した配列に移動しやすくなる。一方、 $w=2.5\%$ は、タンパーで試料を突いた際に、タンパー下端面から砂が逃げるような状況が観察されている。このような含水状態では、さらなる加圧をしても土粒子が移動するのみで、締固めによる供試体の密実化は期待できない。

このような初期含水比の違いによる力学特性への影響については、川尻⁹⁾らの成果とも整合する。本研究における WT 法 6 層の $w=2.5\%$ 及び 4.0% のケースは、いずれも w_{opt} ($=18.2\%$) より大幅に乾燥側の含水状態である。一般に、試料の含水状態が十分に不飽和側の場合、含水比が低いほど土粒子の接触力が低下するため、締め固めが不十分になるが、これは、上述の $w=2.5\%$ による供試体作製時に観察された試料の締まり難さと整合する。

これら 2 ケースの供試体は、締固め層数が同じ 6 層であり、初期含水比は 4.0% と 2.5% と、その差はわずか 1.5% である。締固め時の含水比における議論で、ここまでわずかな差によるデータの比較はあまりないものの、試料の粒度組成によっては、 1.5% というわずかな差であっても作製時の含水比によって供試体内の構造に変化が生じ、

力学特性に影響を与える可能性があることがわかった。

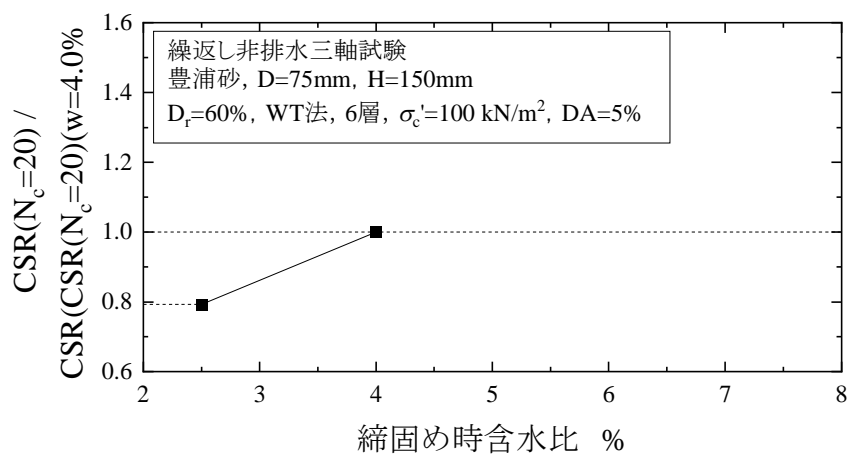


図 4.2.3 WT 法の液状化強度曲線における強度増加率（締固め時含水比による）

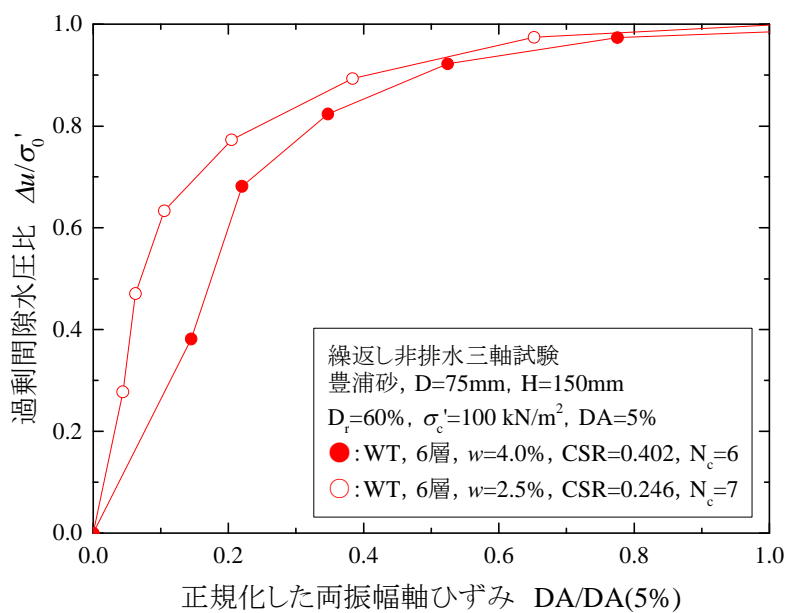


図 4.2.4 過剰間隙水圧比と正規化した DA の関係（豊浦砂，WT 法，6 層）

(3) 締固め層厚による比較

最後に、WT 法における供試体作製時の締固め層数の違いについて検討する。図 4.2.1 より、本研究の範囲内では、締固め層数が多いほど $CSR(N_c=20)$ は高い値を示すことがわかる。この強度増加について整理したものが図 4.2.5 であり、図 4.2.1 から読み取った各締固め層数における $CSR(N_c=20)$ を 4 層の $CSR(N_c=20)$ で正規化した値と締固め層数との関係を示している。図 4.2.5 より、4 層を基準とした場合の $CSR(N_c=20)$ は、6 層では 6%、10 層では 9% 程度増加しており、その強度増加率は、層数の増加に伴って収束するような傾向を示した。

これらの関係について、図 4.2.2 で示した有効応力経路と応力～軸ひずみ関係の (a) 及び (b) による比較検討を行う。まず、両データの有効応力経路を比較すると、载荷初期、特に $p'=100\sim60\text{ kN/m}^2$ の範囲では、図 4.2.2 (a) の 10 層の方が図 4.2.2 (b) の 4 層より p' の減少が緩やかであるといえる。その後、 $p'=60\sim40\text{ kN/m}^2$ の範囲では同様の挙動となり、 $p'=40\text{ kN/m}^2$ 以降の挙動は、図 4.2.2 (a) 及び (b) からは読み取ることが難しいものの、これらのデータは $DA=5\%$ に至るまでの N_c がほぼ同様であることから、サイクリックモビリティ以降の N_c は、4 層の方が多いと推定できる。一方、応力～軸ひずみ関係では、载荷全体の挙動に層数による顕著な違いはみられなかった。

本研究の供試体条件の範囲では、締固め層数の違いによる $CSR(N_c=20)$ の増加は、初期含水比の違いによる結果への影響と比較するとその度合は小さく、一見するとばらつきの範囲のデータとも見えなくない。しかしながら、前出の委員会報告⁷⁾における液状化試験の一斉試験結果によると、同じ試験機関によるデータの場合、密度補正後の液状化強度曲線は、ばらつきが解消されているケースも多くみられる。よって、試験基準の要求事項をクリアし、同じ条件による供試体で精度良く試験を行ってれば、ばらつきの少ない結果を出すことが可能な試験であるといえる。本研究の試験で作製した供試体は、表 3.3.2 に示す供試体条件ごとの相対密度の平均値が $D_r=57\sim58\%$ の範囲で収まっていることから、図 4.2.5 のような強度差は、供試体条件の違いによるものと考えられる。このような締固め層厚による結果の相違を中心に、4.2.2 及び 4.2.3 にてさらに考察を行う。

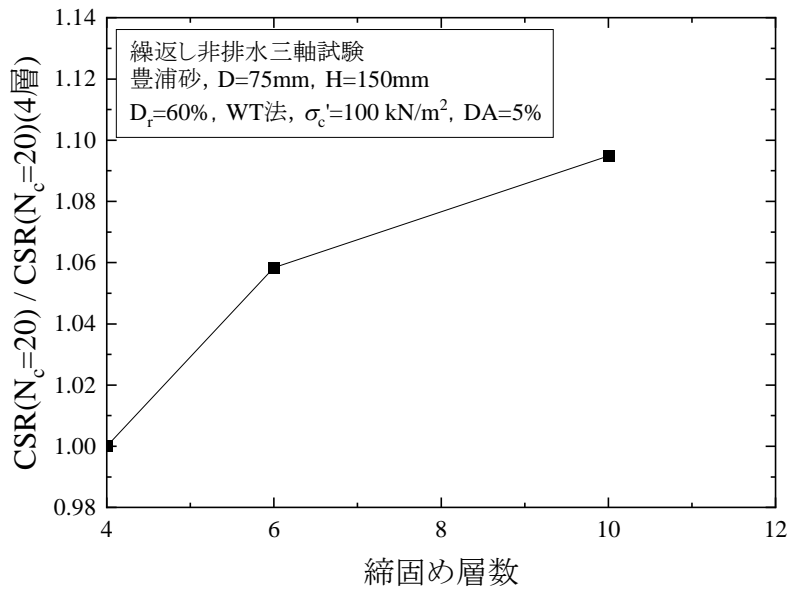


図 4.2.5 WT 法の液状化強度曲線における強度増加率
 (豊浦砂, 締固め層数による)

(4) 締固め層厚の違いによる供試体作製時の供試体内の密度分布

ここでは、(3)の結果に関連して、締固め層厚の違いが供試体作製直後の供試体内の密度分布に及ぼす影響について調べた結果について示す。

図 4.2.6 に、 $w=4.0\%$ に含水調整した豊浦砂を用い、WT 法によって目標相対密度 $D_r=60\%$ で作製した供試体の密度分布を示す。図 4.2.6 は、縦軸の測定位置（供試体上端面を 0 cm とした）と横軸の相対密度との関係であり、供試体内の密度が、供試体の高さ方向に対してどのように分布しているかを示している。また、供試体作製時の締固め層数は、10 層及び 4 層（表 3.3.2 内、No.2 及び No.4 の条件）であり、グラフ内の破線は、供試体作製時の層境の位置を示している。これらは、独立した二つ割りモールド内で供試体を締め固めた後、脱型前の供試体が入った状態でモールドの底板を外し、心太方式で数センチずつ供試体を押し出して、モールド上端から出た供試体の長さ及び試料質量を測定することで得たものである。測定に用いた試験器具は、JIS A 1225「土の湿潤密度試験方法」⁸⁾のノギス法による。なお、横軸の相対密度は、モールド上端から出た供試体の長さの合計がモールドの深さより長い場合、モールドの深さに合わせて供試体長を補正したものである。

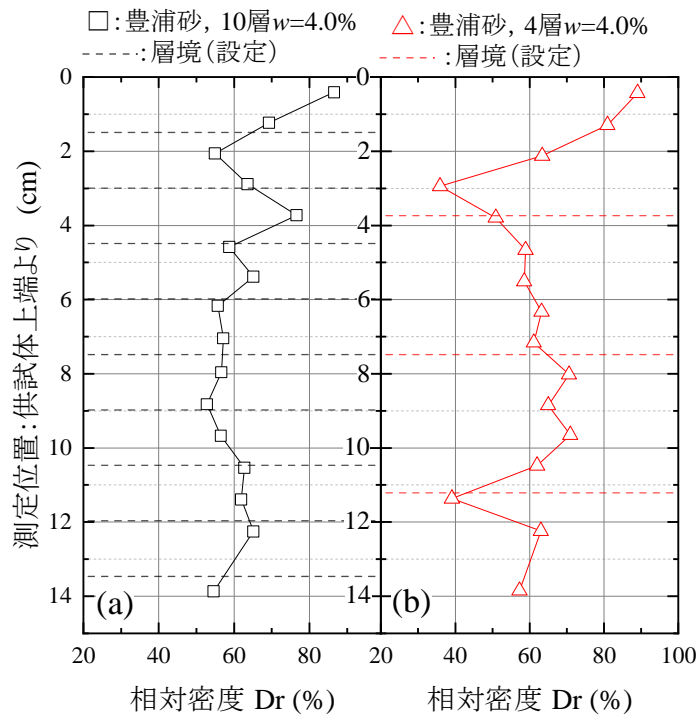


図 4.2.6 豊浦砂で作製した供試体の密度分布

(a) 締固め層数 10 層, (b) 締固め層数 4 層

図 4.2.6 より、10 層より 4 層の方が密度の分布範囲が広く、供試体内の密度のバラつきが大きいことが見てとれる。このような供試体内のバラつきについて、表 4.2.1 にまとめた。表 4.2.1 より、両データ共に、相対密度の最大値に大きな違いはないものの、最小値は、10 層が $D_r=52.8\%$ であるのに対して、4 層では $D_r=35.9\%$ と、17% 程度の差がある。この最小値の差に伴って、各供試体内の密度差は、10 層より 4 層の方が 1.5 倍程度大きく、供試体内のバラつきが大きいことが分かる。また、両データの平均値は同程度であるが、中央値は 4 層の方が高く、4 層の供試体の内部は、目標よりやや高い密度の中に、局所的に低密度の領域が存在している状態といえる。一方、10 層の中央値は、平均値よりやや低いものの 4 層のように極端な低密度値は無く、供試体上部では高密度領域が確認できるが、他は目立った変動はない。よって、4 層より 10 層の方が、全体的に供試体内の密度の変化が少なく、供試体内の密度は、締固め層数が多い方が、比較的均一な状態に近づいているといえる

各層ごとの密度の平均値は、10 層では算出に適した測定数を確保できなかったためデータがないものの、4 層では供試体上部から $D_r=68, 58, 67, 56\%$ であった。また、図 3.3.6 及び表 3.3.3 で示した供試体作製時の突固め回数より、1 供試体当たりの突固め回数は 4 層の方が多いため、厚層の締固めでは突固めによるエネルギーが対象層の下端まで届かず、突固め回数が多くなる傾向にある可能性が考えられる。

表 4.2.1 供試体内相対密度のバラつき（豊浦砂）

| 相対密度 | 締固め層数 | |
|---------|-------|-------|
| | 10 | 4 |
| 最大値 | 86.6 | 89.0 |
| 最小値 | 52.8 | 35.9 |
| 最大値－最小値 | 33.8 | 53.1 |
| 平均値 | 61.5 | 61.3 |
| 中央値 | 60.3 | 62.5 |
| 中央値/平均値 | 1.02 | 0.98 |
| 分散 | 76.7 | 164 |
| 標準偏差 | 8.76 | 12.8 |
| 変動係数 | 0.142 | 0.209 |

ここで、図 4.2.6 の検討に用いた供試体は、液状化特性を検討した際の供試体作製に用いた直径 35 mm のタンパーによるものではなく、山砂の供試体作製に用いた全断面のタンパーによって作製した供試体である。一般的に、全断面のタンパーの方が試料に対する拘束力が高く、突固めエネルギーも高いことから、深さ方向のエネルギーは、比較的伝わり易いといえる。よって、図 4.2.6 は、直径 35 mm のタンパーを用いた場合、より密度差が出る可能性がある。よって、ここでは傾向の検討のみとする。

なお、当初、この密度測定に当たっては、上記測定方法の他にも二つ割りモールド内に供試体を作製し、自立させるために十分に凍結した供試体を用いて、定置式切断機で軸方向に等分となるように輪切りにし、寸法を測定する方法も試した。供試体は、モールド上端に膨張抑制用のおもりを載せた状態で凍結させたが、凍結融解の影響と考えられる密度の低下がみられた。また、切断機による供試体の切り出しでは、8 分割が限界であったため、測定方法を上記のように変更している。

4.2.2 繰返し载荷中の過剰間隙水圧の挙動

図 4.2.1 及び図 4.2.5 で示したように、WT 法によって作製した供試体の場合、わずかながら締固め層厚の違いが液状化強度に影響を及ぼしている。一般に、液状化試験では、有効応力の減少が液状化強度（軸ひずみの増加）に与える影響は大きい。本研究で実施した試験において、繰返し载荷中の p' の挙動は代表例として示した図 4.2.2(a)～(c) の有効応力経路のとおりであるが、WT 法 2 ケースの締固め層数（10 層及び 4 層）による結果の違いが明瞭ではなかったことから、各軸ひずみにおける p' の挙動を明確にするために図 4.2.7 を示す。

図 4.2.7 の (a)～(c) は、载荷開始から $DA=5\%$ に至るまでの p' の減少傾向と $DA=5\%$ で正規化した DA との関係である。本グラフの縦軸は、载荷直後から $DA=5\%$ に至るまでの p' の減少を p' の初期値である p'_0 で正規化しているため、縦軸の値が上昇するほど供試体内の有効応力が減少していることを示している。

まず、図 4.2.7 (a) に WT 法 10, 6 及び 4 層の代表として 6 層のケースを示す。図より、初期液状化に至るまでの正規化した p' は、载荷初期に立ち上がりがあり、载荷の進行に伴い、 $p'=0$ に向かって漸増しており、 $DA/DA(5\%)$ が 0.2～0.4 当たりで変曲点をもち、その後、正規化した $p'=1.0$ に向かって収束するような形をとっている。

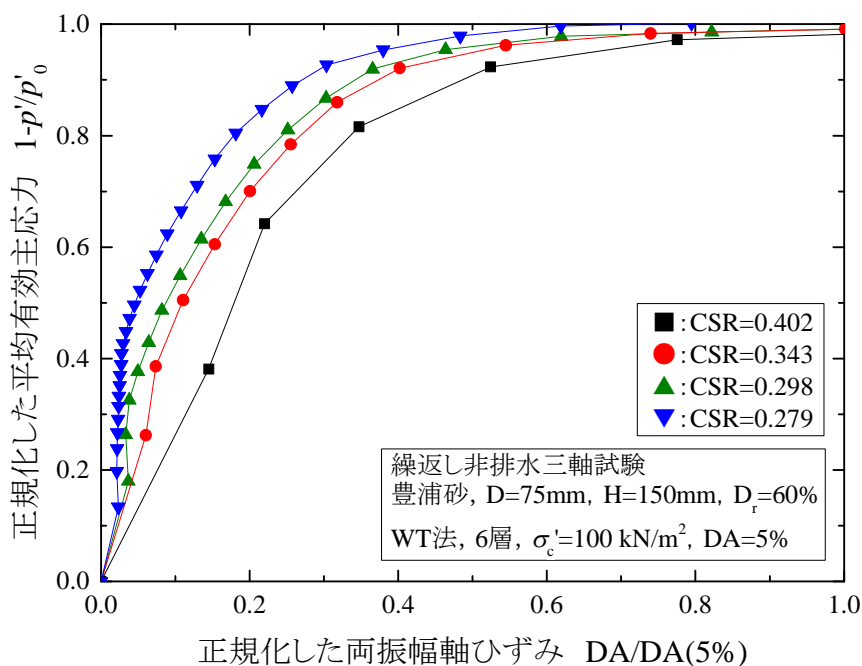


図 4.2.7(a) 正規化した p' と DA の関係（豊浦砂，WT 法，6 層）

また、図 4.2.7 (a) より、この関係では、CSR が高いほど（初期液状化までの N_c が少ないほど） p' の減少より変位が先行する傾向にあり、同じ DA における正規化した p' は、CSR が低いほど（初期液状化までの N_c が多いほど）早い段階で減少している。これは、他の WT 法 10 層、4 層及び AP 法でも同じ傾向であった。このように、有効応力の減少傾向は $DA=5\%$ に至るまでの N_c の影響を受けるため、 $N_c(DA=5\%)$ が同程度の、異なる供試体条件による結果の検討を行う。

図 4.2.7 (b) 及び (c) は、 $N_c(DA=5\%)$ がそれぞれ 8 回と 20 回付近の結果でによる $1-p'/p'_0 \sim DA/DA(5\%)$ 関係であり、図 4.2.7 (c) は、図 4.2.2 (a) ~ (c) と同じ供試体によるデータである。これら図 4.2.6 (b) 及び (c) から、次の特徴が見て取れる。

WT 法の締固め層数による比較では、 $DA/DA(5\%)=0.4 \sim 0.6$ ($DA=2 \sim 3\%$) 程度までの p' の減少は、同じひずみレベルの場合、10 層より 4 層の方がやや早い。つまり、同じ DA のときの p' の減少状況は、10 層より 4 層の方が大きい。このように、载荷初期における p' が比較的早く減少していることによる影響が、図 4.2.1 のような液状化曲線の違いに反映された可能性が考えられる。

なお、図 4.2.7 (c) では、 $DA/DA(5\%)$ が 0.1 未満の範囲で、供試体作製方法の違いによる p' の減少傾向の差が見られる。AP 法による供試体の場合、载荷初期の挙動について、正規化した p' の上昇は見られるものの、正規化した DA の変化はほぼ見られない。この状態は、正規化した p' が 0.5 付近に至る $N_c=13$ まで続いている。その後、 $DA=5\%$ に至る直前の 2~3 サイクルの载荷で p' が消散している。一方、WT 法による 2 つのデータにおいても、载荷の進行に伴って N_c 1 回当たりの DA は大きくなる傾向にあるものの、AP 法と比較すると漸増的である。このような AP 法の供試体における载荷中の変状は、図 4.2.2 (c) の有効応力経路と応力~軸ひずみ関係でも確認できたが、図 4.2.2 (c) では、同じひずみレベルにおいても、AP 法と WT 法とでは、 p' が異なる挙動を示していることが分かった。

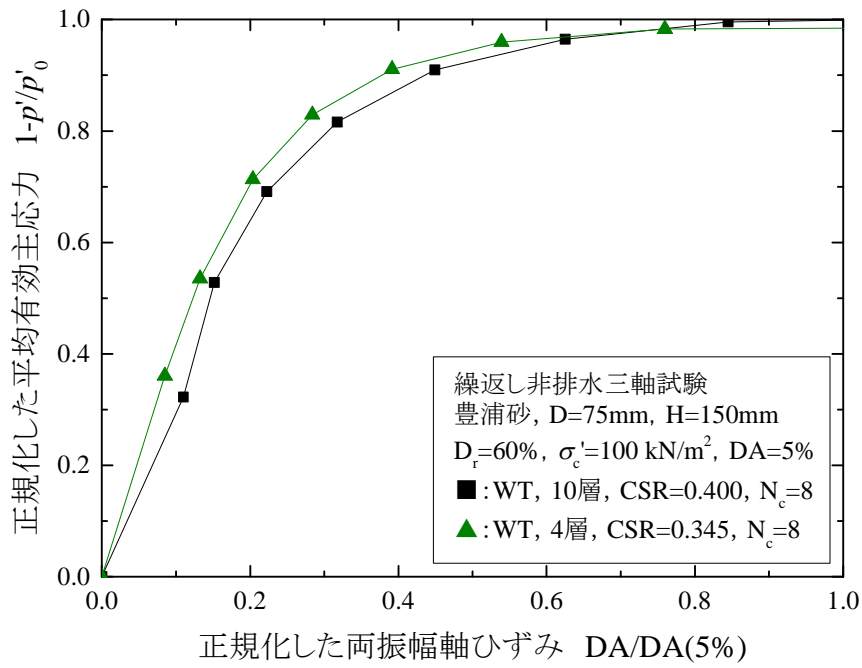


図 4.2.7(b) 正規化した p' と DA の関係 (豊浦砂, $N_c \approx 8$)

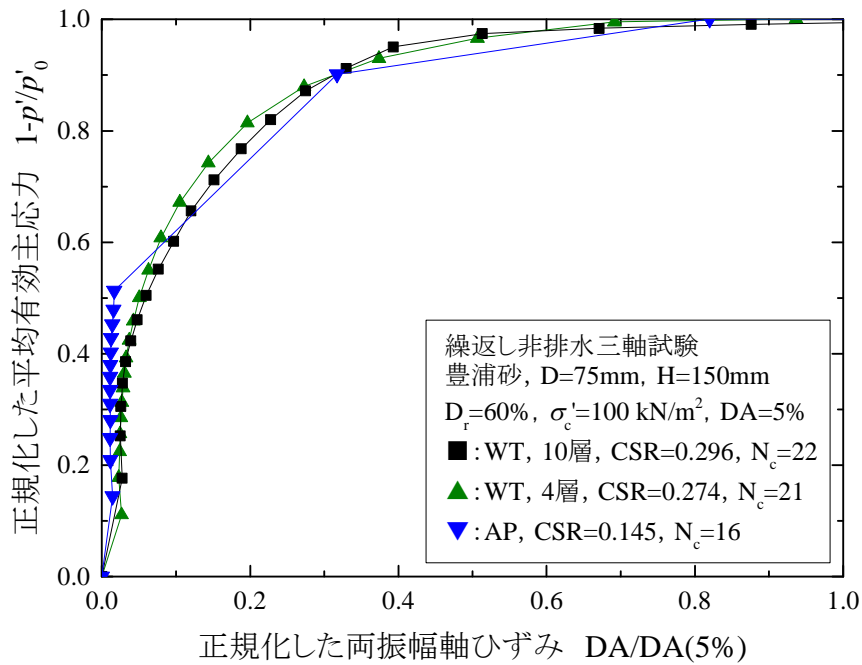


図 4.2.7(c) 正規化した p' と DA の関係 (豊浦砂, $N_c \approx 20$)

4.2.3 繰返し载荷中の軸ひずみの発達状況

図 4.2.1 で示したように、豊浦砂の液状化強度曲線において、締固め層厚の違いによる結果の相違がみられた。そこで、载荷の進行に伴う軸ひずみの発達状況を明確にするため、図 4.2.8(a)を示す。図 4.2.8(a)は、 $DA=5\%$ で正規化した両振幅軸ひずみ $DA/DA(5\%)$ と、 $DA=5\%$ のときの N_c で正規化した繰返し载荷回数 $N_c/N_c(DA=5\%)$ との関係であり、 $N_c(DA=5\%)$ が 20 回程度のデータによる結果である。この関係は、データの曲率が急であるほど軸ひずみが急速に発達したことを示す。なお、この図中のデータは、図 4.2.7(c) (図 4.2.2(a)～(c))と同じ供試体のものである。

図 4.2.8(a)より、AP 法による供試体の場合、载荷の進行に伴う軸ひずみの変化は、正規化した N_c が 0.8 未満の範囲ではほぼ見られず $DA=0.1\%$ 未満で推移しているが、その後のわずか 2 サイクル程度で DA が 4% ほど増加した。一般的な砂試料の場合、 $DA=2\sim 5\%$ で過剰間隙水圧比が初期液状化に至ることが多く、本研究における WT 法によって作製した供試体も、概ねそのような結果となった。しかしながら、本研究の条件における AP 法のような供試体では、その後の急激な軸ひずみの増加を考慮すると、载荷初期から $DA=0.1\%$ 未満の範囲であっても、いつ変形が卓越してもおかしくない状態であることがわかった。

一方、WT 法による供試体の場合、AP 法の結果と比較すると軸ひずみの推移は漸増的である。また、同じ WT 法の 10 層と 4 層とを比較すると、図 4.2.7(b) 及び(c)では、载荷初期で 10 層の方がわずかに p' の減少が遅く、これが CSR($N_c=20$)の上昇につながったとも考えられたが、図 4.2.8 の軸ひずみの発生状況では、10 層より 4 層の方が、より緩やかに増加する傾向を示しており、WT 法の供試体による軸ひずみの発達状況は、4 層より 10 層の方が AP 法のような低強度の供試体における結果に似た挙動であった。図 4.2.8(b)には、図 4.2.8(a)と同様の関係の、 $N_c(DA=5\%)$ が 6～8 回のデータによってまとめたものを示す。図より、同じ N_c 及び w の場合、締固め層数によらずほぼ同様の結果が得られており、 $N_c(DA=5\%) \approx 20$ でまとめた図 4.2.8(a)とは異なる傾向を示した。ただし、これらのデータは、図 4.2.1 中で締固め層厚による強度差が少ない領域のデータであり、その相関については、さらなる検討が必要である。

また、図 4.2.8(b)には、 $N_c(DA=5\%)$ が同程度の 6 層の $w=4.0\%$ 及び $w=2.5\%$ のデータも記載したが、初期含水比が低い $w=2.5\%$ は、载荷後半に軸ひずみが集中した AP 法に近い結果が得られており、比較的低強度の条件では、繰返し载荷の後半に軸ひずみ

が卓越するような傾向が得られた。

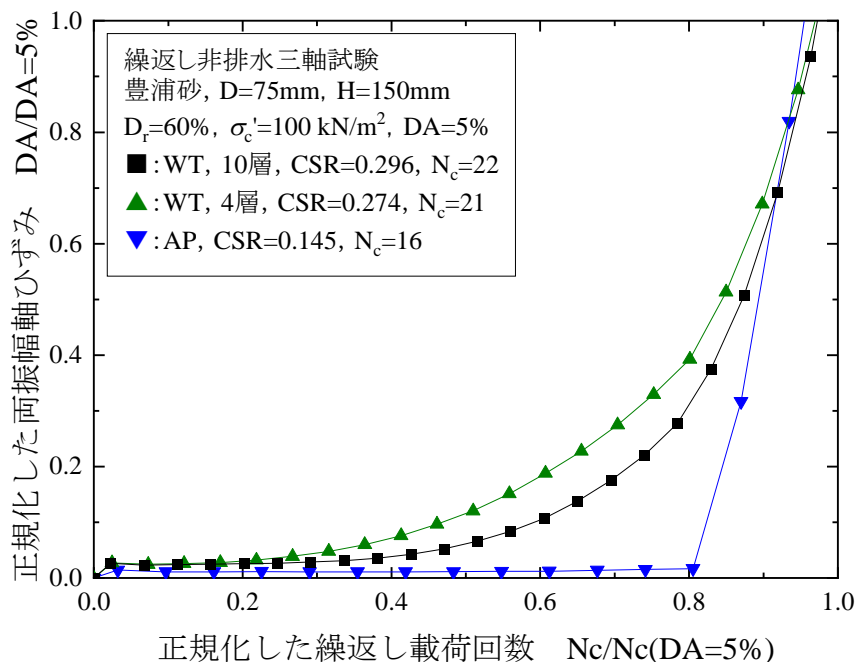


図 4.2.8 (a) 繰返し荷中の正規化した軸ひずみの発達状況 (豊浦砂, $N_c(DA=5\%) \doteq 20$)

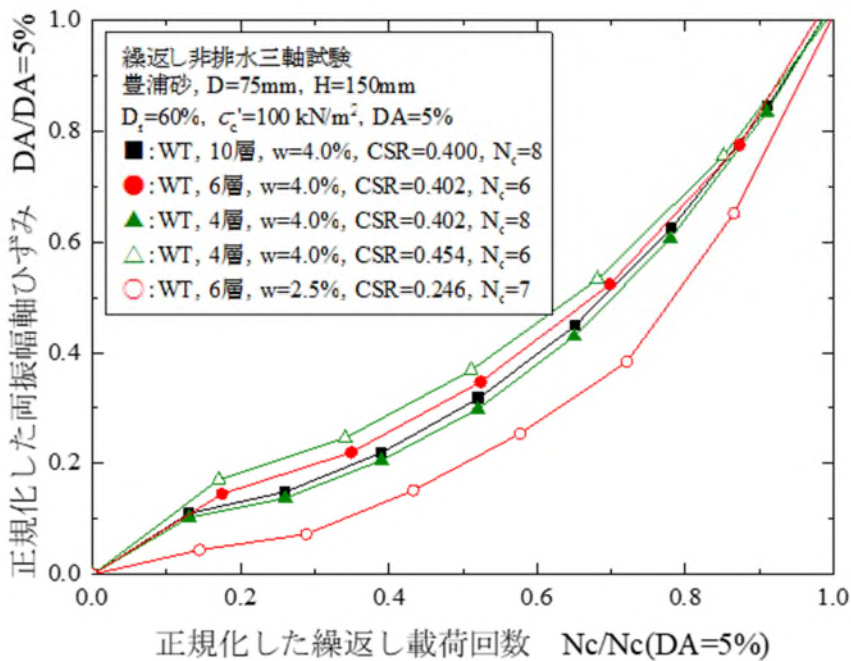


図 4.2.8 (b) 繰返し荷中の正規化した軸ひずみの発達状況 (豊浦砂, $N_c(DA=5\%) \doteq 8$)

以上の結果から、WT法10層の供試体は、供試体内の密度のバラつきが比較的少ないことから、層境の影響を受けない（均一な密度分布をもつと推測される）AP法に近い変形挙動を示したと考えられる。しかしながら、WT法4層のように供試体内に局部的にゆるい部分が存在しにくいいため、4層と比較すると、有効応力の減少はやや遅くなる傾向にあり、図4.2.1の $CSR(N_c=20)$ による評価では4層より強い結果となったと推察される。ただし、図4.2.1にみられるように、液状化強度曲線の立ち上がりは、10層より4層の方が明瞭である。

豊浦砂の液状化強度曲線では、密詰めの場合、ある一定の繰返し荷回数 N_c においてY軸に平行な漸近線に沿って立ち上がるような形状（図4.2.9参照）をみせることが多い。一方、緩詰めの場合、全体的になだらかな曲線を示す傾向にある。豊浦砂による締固め層数の比較では、10層の薄層作製供試体で前者、4層の厚層作製供試体で後者のような傾向がみられた。よって、本研究の範囲内では、WT法の液状化強度曲線は、供試体作製時の層厚が薄いほど $CSR(N_c=20)$ は高くなるような傾向を示したが、その変形挙動は、薄層の方が緩詰め供試体に近い結果を示したことから、評価方法によっては、一概に薄層が強いという結果にはならない可能性があることが示唆された。

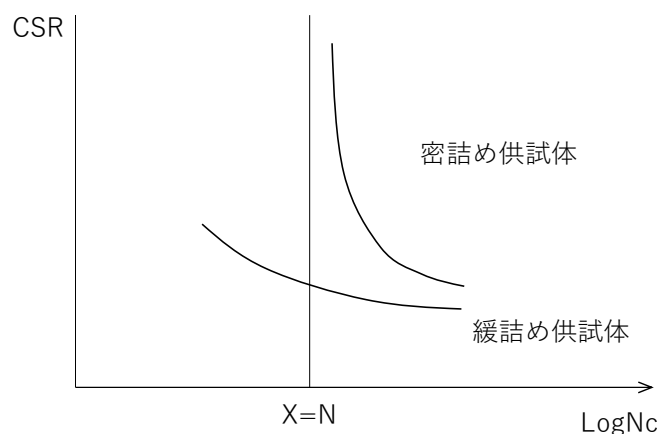


図 4.2.9 密詰め供試体及び緩詰め供試体の液状化強度曲線の模式図

4.3 広範囲な粒度組成をもつ土質材料の液状化特性

前節では、均一な粒度組成をもつ土質材料（豊浦砂）を用いて行った試験結果の考察を行ったが、本節では、実際の盛土工に用いられているような広範囲な粒度組成をもつ土質材料（山砂）について、試験結果及び考察を示す。

なお、本研究では 4.2 及び 4.3 に示すように粒度組成の異なる 2 種類の砂質土について試験を行ったが、それらの比較検討結果は、6 章にて述べる。

4.3.1 液状化強度曲線

表 3.3.2 の条件によって作製した山砂供試体(表 3.3.2 内, No.6~16 の条件による)の液状化強度曲線を図 4.3.1 に示す。図 4.2.1 と同様に、図中の縦軸は繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ であり、横軸は $DA=5\%$ の時の繰返し載荷回数 N_c である。次の (1)~(3) で、それぞれの供試体条件による液状化強度曲線の違いについて考察を行う。

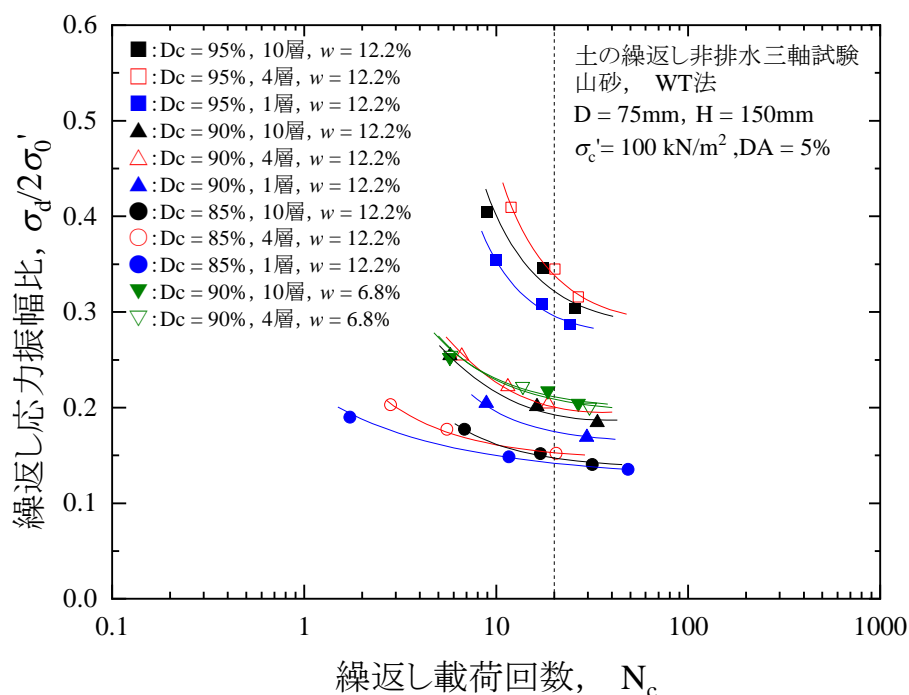


図 4.3.1 液状化強度曲線（山砂）

ここで、2章で述べたように、要素試験におけるMPの影響は、多くの研究者が取り組んできた研究テーマである。本研究では、MPに影響を及ぼす種々の条件（例えば、粒度組成、メンブレン厚、供試体の周面率及び密度）について、比較対象となる供試体の間では、同様の条件による結果を用いて検討を行っているため、MPの影響を考慮しないこととしたが、後に2つの試料の違いによる比較も行うため、MP補正式を用いて補正後の値を算出し、MPによる影響の程度を調べた。

図4.3.2に、Tokimatsu et al.⁹⁾によるMP補正式適用前後の液状化強度曲線を示す。図4.3.2には、図4.3.1の中から、 D_c 及び締固め層厚の差が最も大きい供試体条件のケースを対象とした結果を示している。具体的には、 $D_c=95\%$ で締固め層数10層及び1層のデータ並びに $D_c=85\%$ で締固め層数10層及び1層のデータである。

上記4ケースのデータにおける補正式適用後の N_c の変化は、過剰間隙水圧の上昇が繰返し載荷の後半に集中する $D_c=85\%$ の方が比較的小さい。ただし、 $D_c=95\%$ のケースであっても、補正式適用後の N_c の変化は最大で4回程度であり、ほとんどの場合は2回程度であることから、全体の評価には影響のない範囲であることがわかった。

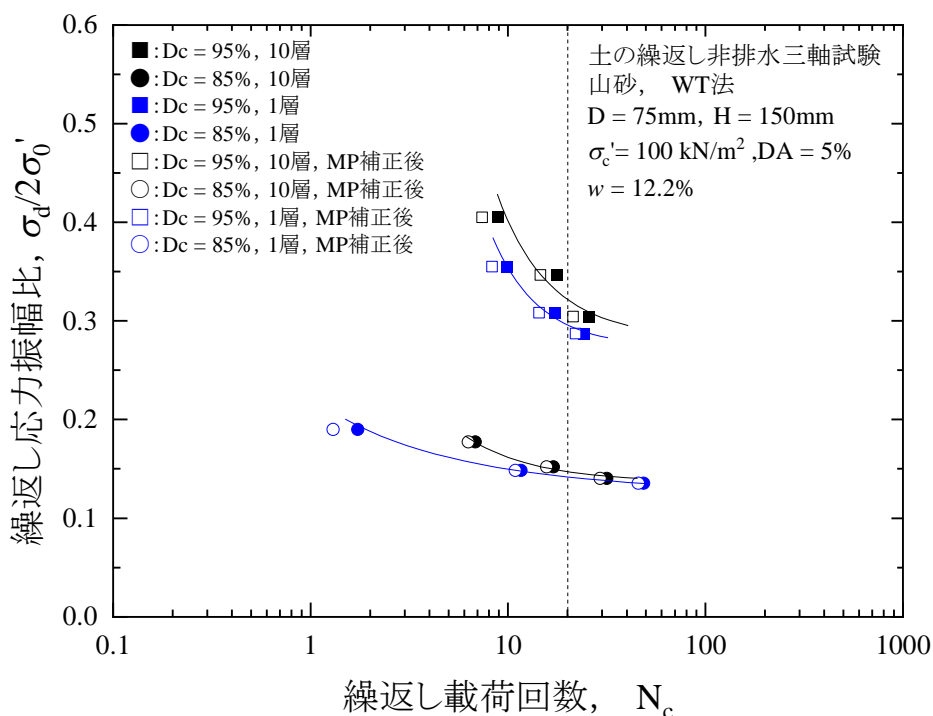


図 4.3.2 MP 補正前後の液状化強度曲線（山砂）

(1) 締固め度 D_c による比較

まず、締固め度 D_c の違いによる結果の比較では、 D_c が高いケースほど高い液状化強度を示している。最も高い密度である $D_c=95\%$ は、締固め層数によらず、一般的な密詰めの供試体でみられるような急な立ち上がりを伴う曲線を示しており、最も低い密度である $D_c=85\%$ は、一般的な緩詰めの供試体でみられるような緩やかな曲線を示した。

以上のような D_c による繰返し応力振幅比の変化を図 4.3.3 にまとめた。図 4.3.3 は、図 4.3.1 の各液状化強度曲線から $CSR(N_c=20)$ を読み取り、各ケースの $CSR(N_c=20)$ を、同じ締固め層数の $D_c=85\%$ の $CSR(N_c=20)$ で正規化した値と D_c との関係を示している。図 4.3.3 より、締固め層数によらず、 $D_c=85\%$ に対する 90% の強度増加率は約 1.3、 $D_c=85\%$ に対する 95% は約 2.2 となった。また、90% に対する 95% の強度増加率は約 1.7 であることから、同じ D_c の増加幅でも比較的高い D_c の方が、液状化抵抗の増加に対して効果的であることが伺える。

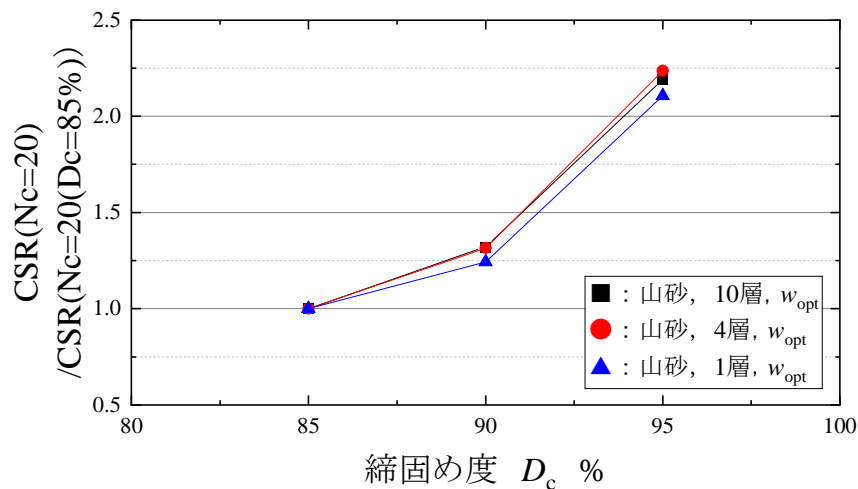


図 4.3.3 正規化した液状化強度～締固め度 (山砂)

(2) 締固め層厚による比較

次に、供試体作製時の層厚による比較を行う。図 4.3.1 より、 D_c による違いほどではないものの、層厚の違いによる結果への影響がみられた。そこで、同じ D_c における締固め層厚の影響を確認するために、各ケースの $CSR(N_c=20)$ を、同じ D_c の 10 層の $CSR(N_c=20)$ で正規化した値と締固め層数との関係を図 4.3.4 に示す。

図 4.3.4 より、山砂の強度増加率（正規化した $CSR(N_c=20)$ ）は、供試体作製時の含水比が w_{opt} の場合、締固め層数が 4、10、1 層の順に高いことが分かる。この強度増加率の締固め層厚による変化の程度は D_c によって多少異なり、例えば、1 層と比較した時の 4 層の $CSR(N_c=20)$ は、 $D_c=95\%$ 及び 90% の場合では 15% 程度上昇している。一方、 $D_c=85\%$ の $CSR(N_c=20)$ の増加率は 9% 程度であり、他の 2 ケースと比較すると、その増加の幅はやや小さい。このように、 w_{opt} のケースでは、供試体作製時の層厚の違いが $CSR(N_c=20)$ に影響を及ぼすことが明確に示されたが、その程度には D_c による違いがみられた。ただし、 $D_c=90\%$ 、 w_n の締固め層数 10 層と 4 層による比較では、 $CSR(N_c=20)$ に両者の違いはみられなかった。

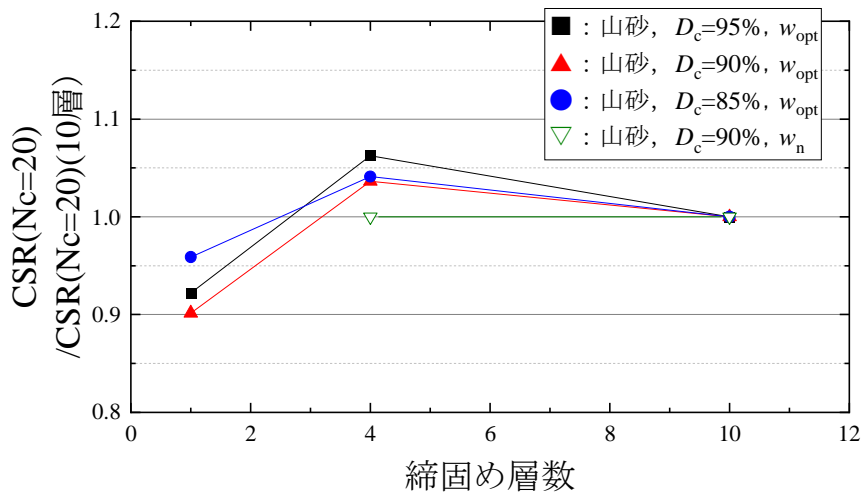


図 4.3.4 正規化した液状化強度～締固め層数（山砂）

(3) 締固め時の含水比による比較

最後に、含水比の違いによる比較を行う。近年、供試体作製時の含水比やそれに伴う飽和度と各力学挙動との関係がよく調査されており、含水比の変化が与える力学特性への影響が無視できないことが示されている。

本研究では、河川や道路で用いられている一般的な盛土を想定しているため、締固め時の含水比は、最適含水比 w_{opt} の 12.2 % と自然含水比 w_n の 6.8 % としている。図 4.3.1 より、同じ $D_c=90\%$ における液状化強度曲線の比較では、 w_n のケースの方がグラフのやや上方に位置しており、同じ締固め層数のケースによる比較では、 w_{opt} に対する w_n の $CSR(N_c=20)$ の増加率は、締固め層数 10 層で 9 % 程度、4 層で 5 % 程度であった。

ここで、締固め時の含水比の違いについて、 $DA=5\%$ に至るまでの有効応力経路を比較した。図 4.3.5 は、 $D_c=90\%$ で締固め層数 10 層の山砂供試体の DA が 5 % に至るまでの有効応力経路であり、(a) が w_{opt} 、(b) が w_n の結果である。これらの図より、(a) の w_{opt} は、载荷初期の p' の減少は大きいものの、破壊包絡線まで到達した後にサイクリックモビリティが継続していることがわかる。一方、(b) の w_n では、载荷初期の p' の減少は比較的緩やかであるが、 p' が下がりきる前に DA が 5% に至っている。なお、このような締固め時の含水比による応力経路の挙動の違いは、 $D_c=90\%$ 、締固め層数 4 層の $N_c(DA=5\%)$ が 13 回程度による比較でも同様であった。このような締固め時の含水

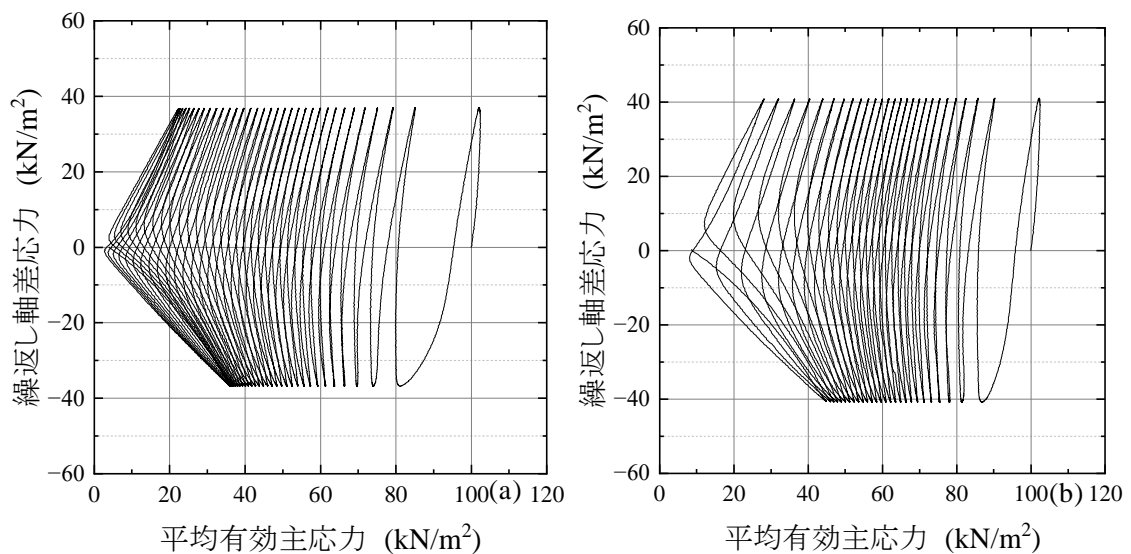


図 4.3.5 有効応力経路 (山砂, $D_c=90\%$, 10 層, $DA \leq 5\%$, $N_c(DA=5\%) \approx 30$):
(a) w_{opt} , (b) w_n

比の違いによる繰返し載荷過程の比較については、4.3.2及び4.3.3にて詳述する。

ここで、4.2節でも述べたように、締固め時の含水条件は、供試体内の粒子構成に影響を及ぼすため、表4.3.1に、等方圧密時の軸変位及び体積変化についてまとめた。また、圧密時の排水量測定による体積変化を $\Delta V_{\text{measured}}$ とし、供試体が完全等方状態であると仮定して軸変位量から体積 $\Delta V_{\text{calculated}}$ を算出した結果と $\Delta V_{\text{measured}}$ との関係を図4.3.6に示している。

表4.3.1及び図4.3.6より、同じ D_c (=90%)及び締固め層厚の w_{opt} と w_n との比較では、 w_n より w_{opt} の方が圧密に伴う体積変化が大きい。さらに、 w_{opt} の方が高い異方性を有していることが読み取れる。ただし、これらのような含水状態による供試体内の異方性については、試料の粒度組成や含水比の検討範囲によって様々な研究成果が出されており(例えば6,10,11)、本研究の検討における強度・変形特性との関連については、更なるデータの蓄積が必要であると考えられる。

なお、 D_c による比較では明らかな違いが出ており、 D_c が低いほど異方性が高くなっているが、同じ D_c の締固め層数による明確な違いはみられなかった。

表 4.3.1 山砂の等方圧密時の軸変位量及び体積変化量

| D_c % | w % | 締固め層数 | ΔH cm | ΔV cm ³ | 圧密後の締固め度% | $\Delta V_{\text{calculated}} / \Delta V_{\text{measured}}$ |
|---------|------------------|-------|---------------|----------------------------|-----------|---|
| 95 | w_{opt} | 10 | 0.033 | 4.9 | 98.1 | 0.89 |
| 95 | w_{opt} | 4 | 0.030 | 4.3 | 97.7 | 0.95 |
| 95 | w_{opt} | 1 | 0.030 | 4.5 | 98.0 | 0.90 |
| 90 | w_{opt} | 10 | 0.024 | 6.2 | 92.1 | 0.51 |
| 90 | w_{opt} | 4 | 0.031 | 6.5 | 92.9 | 0.63 |
| 90 | w_{opt} | 1 | 0.025 | 6.4 | 93.8 | 0.52 |
| 85 | w_{opt} | 10 | 0.028 | 10.8 | 87.9 | 0.35 |
| 85 | w_{opt} | 4 | 0.030 | 11.3 | 88.4 | 0.35 |
| 85 | w_{opt} | 1 | 0.029 | 11.5 | 88.7 | 0.35 |
| 90 | w_n | 10 | 0.035 | 5.5 | 92.6 | 0.86 |
| 90 | w_n | 4 | 0.030 | 5.1 | 92.1 | 0.77 |

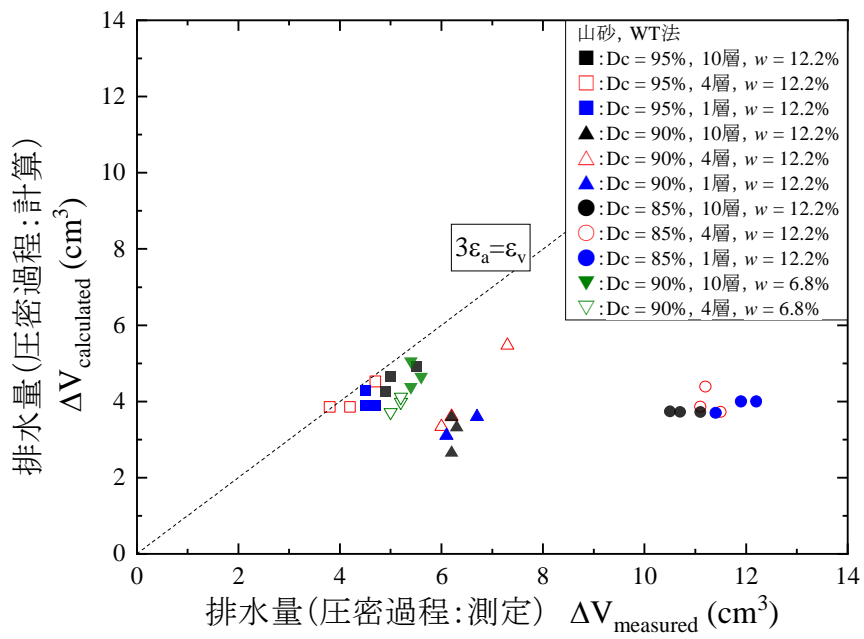


図 4.3.6 圧密時の排水量（測定値～計算値関係，山砂）

4.3.2 繰返し载荷中の過剰間隙水圧の挙動

ここでは、図 4.3.1 に示した繰返し非排水三軸試験結果について、繰返し载荷中の過剰間隙水圧の発生状況を検討する。図 4.3.7(a)~(c)は、縦軸に過剰間隙水圧比（以下、 $\Delta u/\sigma'_0$ ）、横軸に $DA=5\%$ に至るまでの両振幅軸ひずみを $DA=5\%$ で正規化した値でまとめてあり、(a)が $N_c(DA=5\%) \doteq 30$ 、(b)が $N_c(DA=5\%) \doteq 20$ 、(c)が $N_c(DA=5\%) \doteq 8$ による結果である。また、図 4.3.7(a')には、図 4.3.7(a)における $DA/(DA=5\%) \leq 0.1\%$ の範囲を拡大したものを示す。図 4.2.7(a)でも示したように、繰返し载荷中の有効応力の減少傾向は初期液状化に至るまでの N_c に依存するため、各条件 2~3 供試体のデータの中から $DA=5\%$ に至った N_c が概ね同程度のデータによって整理している。よって、各グラフの $N_c(DA=5\%)$ に当てはまるデータがない供試体条件では、グラフ上にデータの記載がないものもある。

まず、 D_c の違いに着目すると、繰返し载荷序盤において、同じ軸ひずみで比較した $\Delta u/\sigma'_0$ は、締固め時の含水比が同じである場合、 D_c が小さいほど値が大きく、より早く初期液状化に近づいていることが分かる。

締固め層数に違いによる比較では、例えば図 4.3.7 (a)の $N_c(DA=5\%) \doteq 30$ のケースと同じ D_c と w の場合、 $D_c=95\%$ 、 w_{opt} の 10 層及び 4 層以外、いずれのケースも、厚層の方が载荷初期の $\Delta u/\sigma'_0$ の上昇が早い。この傾向は、(b)及び(c)のグラフにおいても概ね同様であった。このことは、上述の D_c が低いケースの結果と類似しており、軸ひずみの発生挙動とも似た傾向にあることが確認された。

次に、供試体作製時の含水比による比較を行う。図 4.3.7(a)における $DA/(DA=5\%) \leq 0.1\%$ の範囲を拡大した図 4.3.7(a')において、同じ $D_c=90\%$ 、10 層で締め固めた供試体の w_{opt} と w_n とを比較すると、载荷開始から数回は、同じ軸ひずみの時の過剰間隙水圧は w_n の方が大きい。しかしながら、正規化した DA が 0.05 を超える辺りから w_n と w_{opt} の値の大小が逆転し、その後、 w_{opt} のケースでは初期液状化に向けて $\Delta u/\sigma'_0$ は上昇しているものの、 w_n のケースでは、 $\Delta u/\sigma'_0$ が上がりきらないまま $DA=5\%$ に至っている（図 4.3.7(a)）。このような過剰間隙水圧の上昇を伴わない DA の発達は、緩詰め供試体でよくみられる現象である。

図 4.3.1 の液状化強度曲線において、 $D_c=90\%$ で供試体作製時の含水比が w_n と w_{opt} による比較では、両者の差は小さかった。しかしながら、繰返し载荷過程における軸ひずみの発達や過剰間隙水圧の上昇傾向は、共に、 $D_c=90\%$ 、 w_{opt} と比較すると $D_c=90\%$ 、

w_n の方で、より低密度の供試体でみられるような挙動を示しており、その違いは明瞭であった。

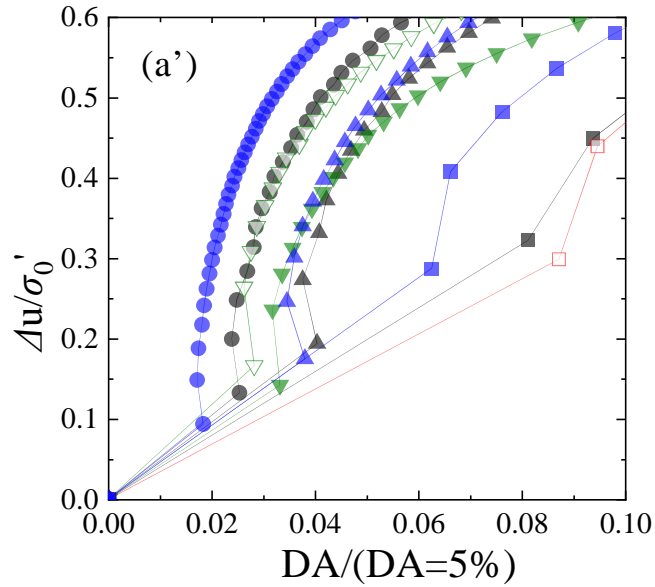
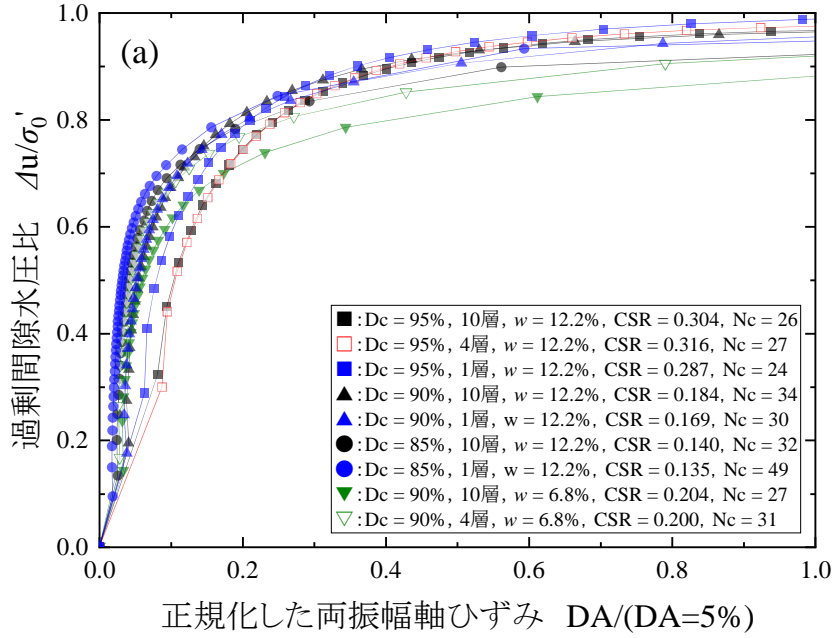


図 4.3.7 過剰間隙水圧の蓄積状況 山砂 :

$N_c(DA=5\%) \doteq 30$, (a) $DA/DA(5\%) \leq 1.0\%$, (a') $DA/DA(5\%) \leq 0.1\%$

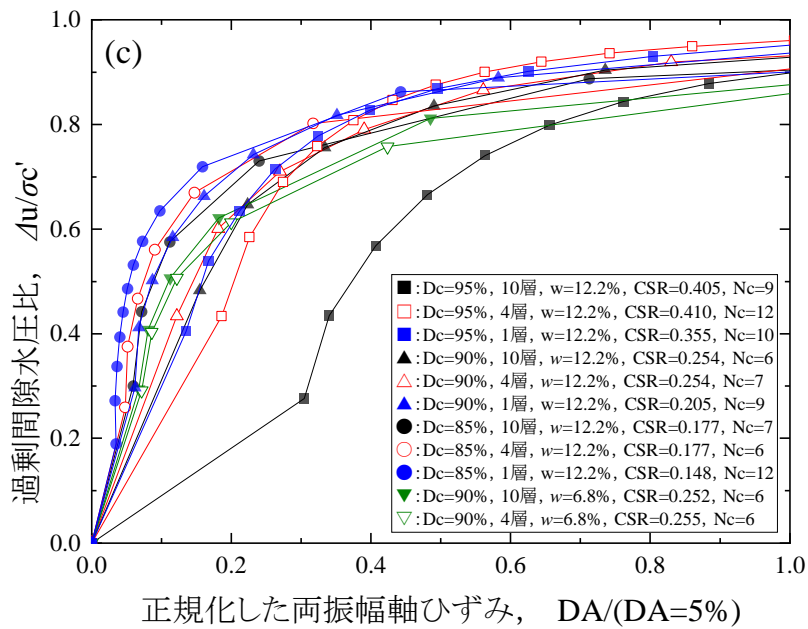
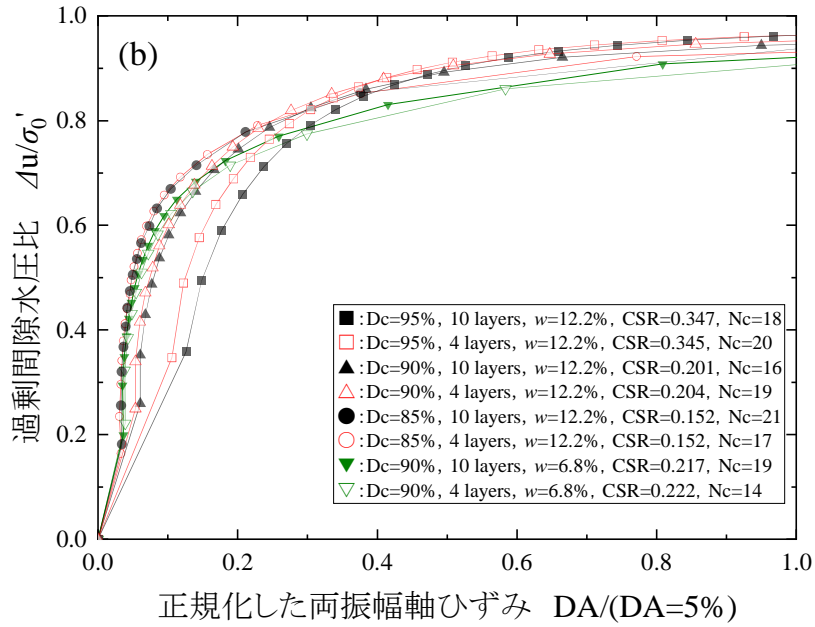


図 4.3.7 過剰間隙水圧の蓄積状況 山砂 : (b) $N_c(DA=5\%) \approx 20$, (c) $N_c(DA=5\%) \approx 8$

4.3.3 繰返し载荷中の軸ひずみの発達状況

次に、図 4.3.8 (a)~(c)及び図 4.3.9 に、図 4.3.7 (a)~(c)で示したデータと同じ供試体の繰返し载荷過程における軸ひずみの発達状況を示す。

図 4.3.8 (a)~(c)は、各载荷サイクルにおける両振幅軸ひずみ DA を $DA=5\%$ で正規化した値と、 N_c を $DA=5\%$ に至った時の N_c (以下、 $N_c(DA=5\%)$) で正規化した値との関係を示している。また、図 4.3.9 は、各载荷サイクルの圧縮応力と伸張応力によって発生した軸ひずみを正規化した N_c との関係で整理したものであり、図 4.3.8 (a)と同じ供試体による結果である。

図 4.3.8 (a)~(c)より、同じ締固め層厚で同じ含水条件の場合、 D_c が高いケースほど DA の発達が漸増的であることが分かる。この傾向は図 4.3.9 でも同様であり、圧縮と伸張のいずれの応力による軸ひずみであっても、低い D_c のケースほど $DA=5\%$ 直前に軸ひずみが卓越するような傾向を示した。

締固め層厚による比較では、 w によらず、図 4.3.8 (a)~(c)及び図 4.3.9 共に 10 層と 4 層に大きな違いはない。ただし、いずれのケースも 1 層の変形挙動は 10 層及び 4 層とはその傾向が異なる。例えば、 $D_c=95\%$ で締固め層数 1 層のケースは、 $D_c=90\%$ で締固め層数 10 層の結果に近い傾向を示すなど、実際の D_c より低い D_c のケースに近い挙動を示した。これは、3 種類の D_c に共通している。図 4.3.4 の締固め層厚による強度変化率の比較では、 $D_c=85\%$ のケースの $CSR(N_c=20)$ の変化は、 $D_c=95\%$ や $D_c=90\%$ のケースのものと比較すると小さく、 D_c による傾向の違いがみられた。しかしながら、繰返し载荷中の変形挙動における比較では、 D_c によらず、締固め層厚による明確な違いがみられた。

供試体作製時の含水比による比較では、図 4.3.8 (a)~(c)及び図 4.3.9 いずれの関係においても、 $D_c=90\%$ で w_{opt} のケースは、締固め層厚によらず軸ひずみの発達が比較的緩やかであった。他方、 $D_c=90\%$ で w_n のケースでは、各曲線における変曲点が明確であり、 $DA=5\%$ に至る過程の後半で集中的に軸ひずみが発生していることが分かる。これは、 D_c による比較において、より低い D_c でみられた傾向であった。このように、同じ D_c と同じ締固め層厚による供試体であっても、 w_{opt} と w_n の結果に明らかな違いがみられた。

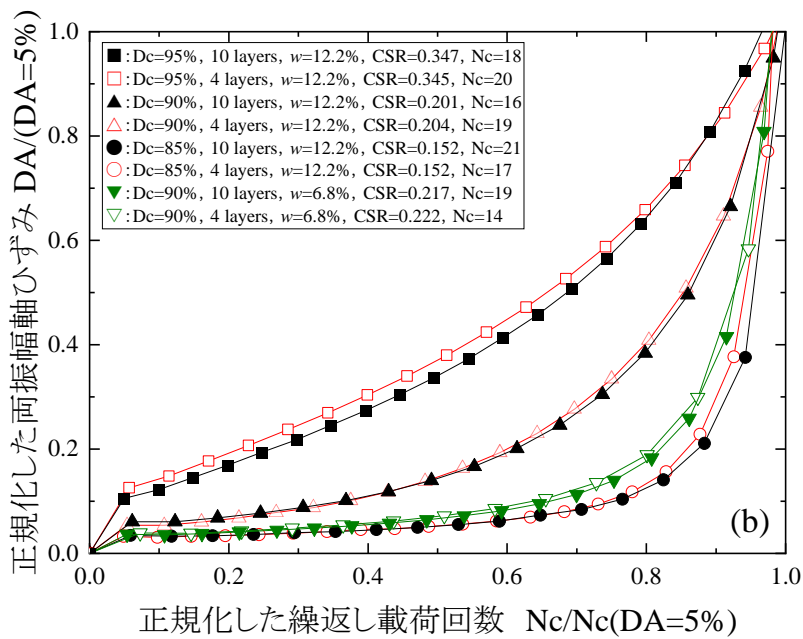
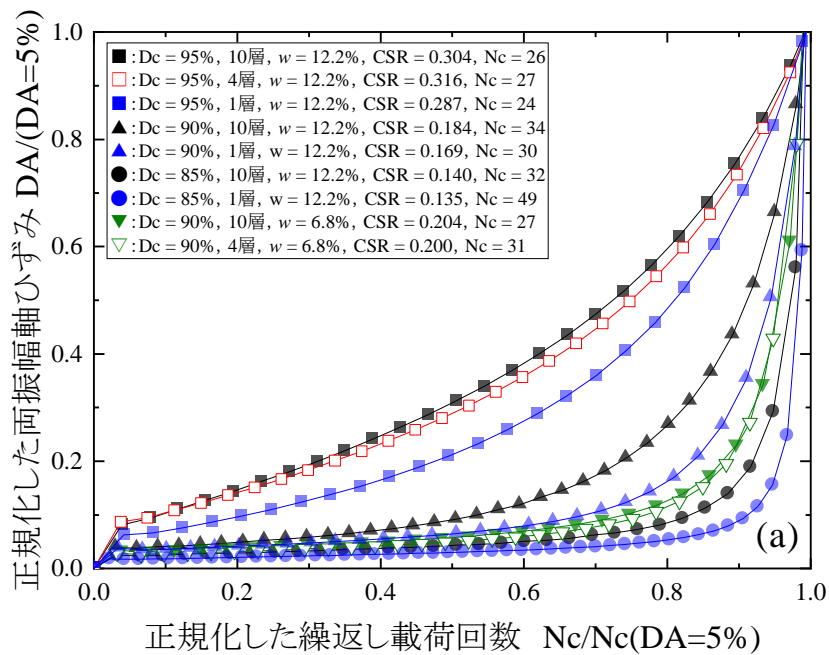


図 4.3.8 繰返し载荷中の正規化した軸ひずみの発達状況 山砂 :

(a) $N_c(DA=5\%) \doteq 30$, (b) $N_c(DA=5\%) \doteq 20$

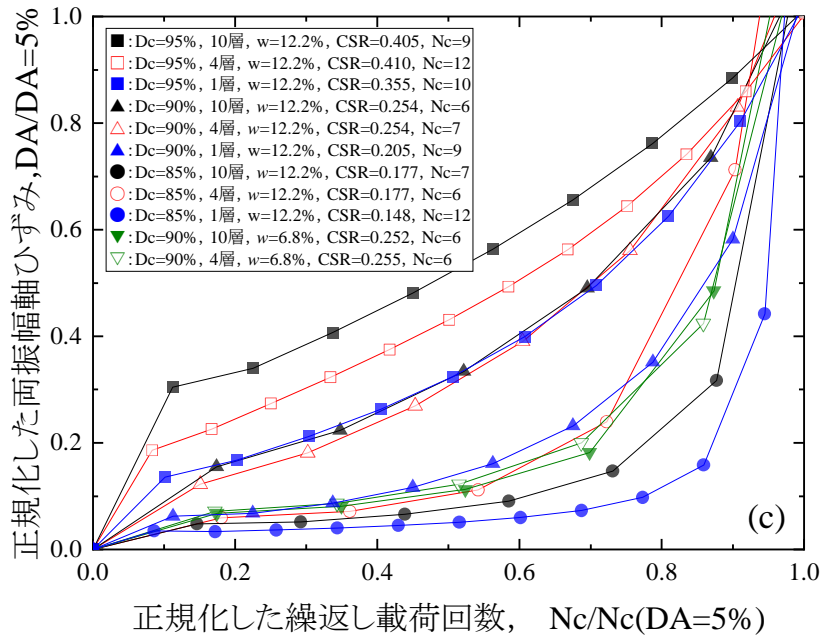


図 4.3.8 繰返し载荷中の正規格化した軸ひずみの発達状況 : (c) $N_c(DA=5\%) \div 8$

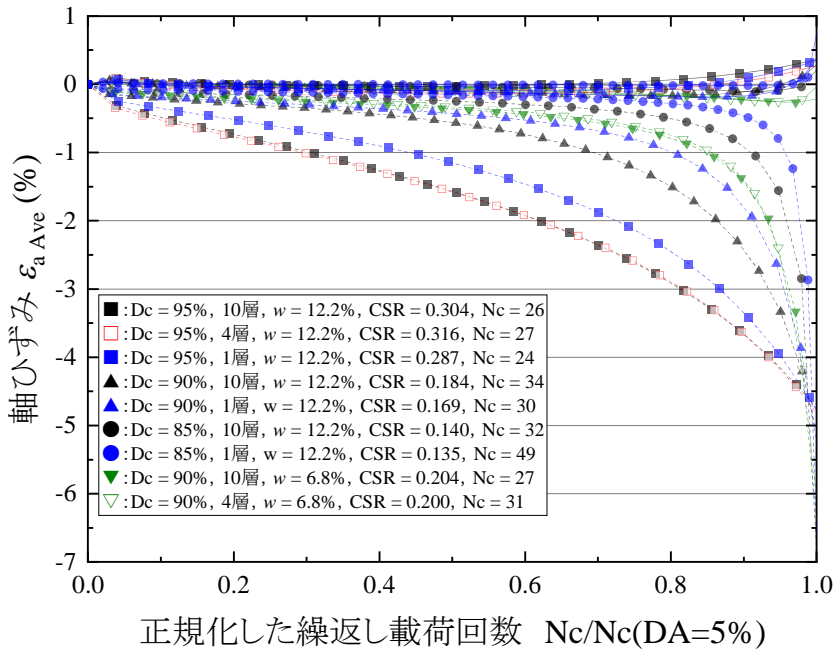


図 4.3.9 繰返し载荷中の軸ひずみの発達状況 山砂 $N_c(DA=5\%) \div 30$

4.4 供試体作製時の諸条件による液状化特性の比較検討

本節では、4.1～4.3節での検討項目以外で、供試体の不均一性に関連する内容について整理した。

4.4.1 薄層で締め固めた供試体の不均一性

図 4.2.6 にもあるように、WT 法による供試体作製では、締め固め時の条件次第で同一層内に密度のバラつきが生じる可能性があり、その程度は、厚層ほど大きくなると考えられる。よって、締め固め層厚は、試料の最大粒径や粒度組成の許容する範囲で薄い方が好ましいと考えられるが、本項では、WT 法による供試体を液状化試験に用いる場合、どの程度の薄さが適切であるかについて検討する。

豊浦砂の締め固め層数 10 層のケースでは、図 4.2.1 で示したデータ以外に、結果のバラつきによって不採用としたデータが多数出た。表 3.3.2 からわかるように、試験の再試率は、他のケースが 0% であるのに対して、当該データのみ 50% である。これら豊浦砂供試体の締め固め層数 10 層のケースで、不採用になったデータについて整理する。

豊浦砂の液状化試験では表 3.3.2 に示す 5 種の供試体条件によって試験を行ったが、WT 法、締め固め層数 10 層のケースのみ、 N_c が少ない領域で他とは違った傾向を示すデータが得られた。それらの結果を図 4.4.1 の液状化強度曲線に示す。図 4.4.1 内、「ネッキングなし」としたデータは、図 4.2.1 内の該当する条件と同じものであるが、「ネッキングあり」としたデータは、繰返し载荷において軸ひずみの発達と共に局所的な変形（顕著なネッキング）を示したデータであり、「ネッキングなし」としたデータより少ない繰返し载荷回数で液状化に至っている。ここで、本節で述べる「ネッキング」は、三軸液状化試験特有の供試体上部における変位の集中以外の局所変位を示す。

以上のような同じ締め固め層数 10 層でみられた結果の相違について、図 4.4.1 に記載したデータ及び AP 法によるデータ ($CSR=0.151$, $N_c(DA=5\%)=2$) の $1-p'/p'_0 \sim DA/DA$ 関係を図 4.4.2 に示す。図 4.4.2 より、締め固め層数 10 層で作製した中でネッキングを呈した結果の多くは、 p' が下がりきらない状態から急激に軸ひずみが卓越している。また、同じ $N_c(DA=5\%)=2$ の WT 法のデータと AP 法のデータとで比較すると、その違いは明らかである。

図 4.4.3 には、図 4.4.1 のデータの繰返し载荷における軸ひずみの圧縮成分と N_c/N_c

($DA=5\%$)との関係を示す。図より、ネッキングがなかったケースでは、 $DA \leq 5\%$ の範囲の圧縮側軸ひずみは $DA=5\%$ までに1%程度発達したが、ネッキングがあったケースでは、ネッキングがなかったケースと比較すると圧縮側の軸ひずみが全体的に小さく、载荷の進行に関わらず横ばいで推移するという結果になった。

以上のように、WT法10層の豊浦砂供試体のケースでは、他のケースでは見られないような挙動を示す試験結果が出た。経験的に、繰返し载荷試験においてネッキングを起こすような状態の供試体は、供試体内に弱点となる箇所が存在する場合が多い。豊浦砂のような粒径幅が狭い試料では、試料の最小密度と最大密度の幅も狭く、わずかな密度のバラつきであっても、相対的な密度差は大きくなってしまふ。また、薄層による供試体作製では一層の層厚が薄く、例えば、試料投入時の撒き出しで試料が偏っていても、目標高さまでの締固めが比較的容易であるため、結果的に水平方向に密度がバラつきやすくなることが原因の一つと考えられる。

よって、豊浦砂のように単粒に近い粒度組成の試料では、試料の最大粒径に対して十分な寸法及び層厚の供試体条件であっても、供試体内に不均一な箇所を構成してしまふ可能性があるといえる。ただし、これらの詳細については更なる検討が必要である。

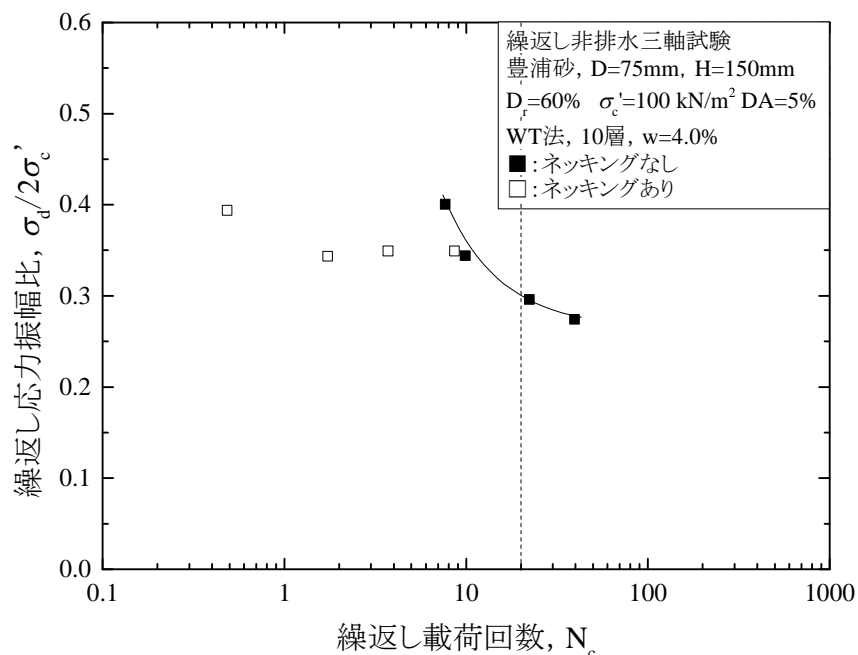


図 4.4.1 液状化強度曲線（豊浦砂，WT法，ネッキングの有無）

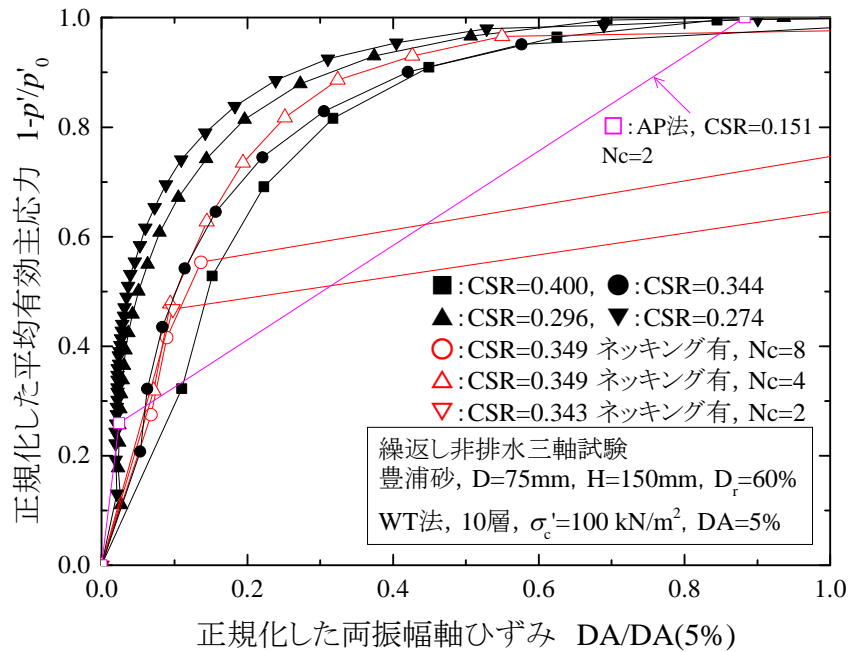


図 4.4.2 正規化した p' と DA の関係 (豊浦砂, WT 法, 10 層, $CSR \approx 0.35$)

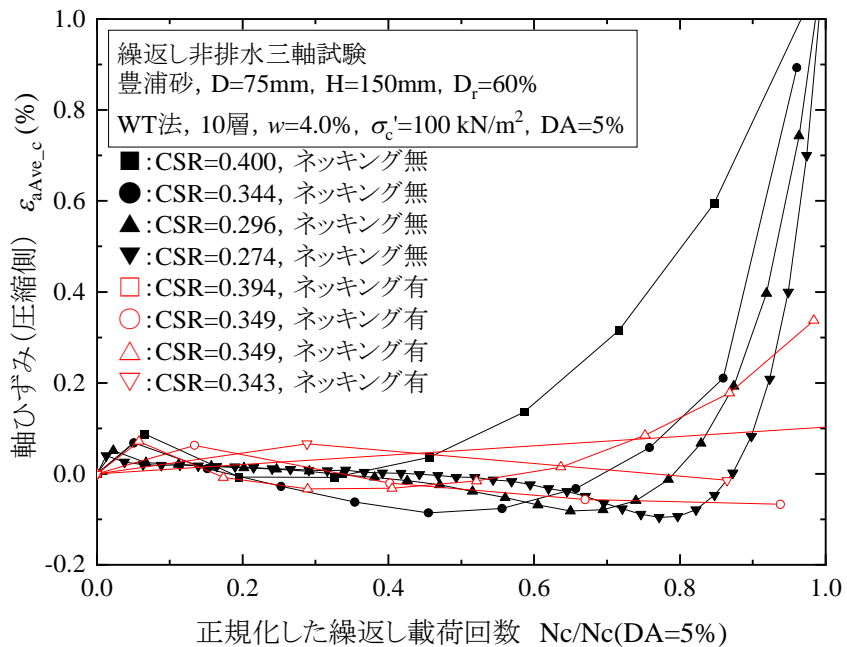


図 4.4.3 繰返し载荷中の圧縮ひずみと正規化した N_c の関係 (豊浦砂)

ここで、供試体の層境は、上下層のなじみを良くする目的で端面を多少乱すのが一般的である。この供試体の層境における乱しは、圧縮のみの载荷による試験より、液状化試験の载荷のように伸張側の応力が作用する試験の方で、効果が高いと考えられる。その一方で、層境を乱すことで、乱さない箇所との構造の違いが出る可能性がある。そこで、豊浦砂を用いて供試体作製時の層境の乱しが有りとなしとの供試体を作製し、結果の検討を行った。

図 4.4.4 に、締固め層数 10 層、 $w=4.0\%$ の豊浦砂供試体で、層境の乱しを入れた場合（有り）及び乱しを入れなかった場合（無し）の 2 ケースの液状化強度曲線を示す。また、図中には、図 4.2.1 内、WT 法で締固め層数 10 層、 $w=4.0\%$ による結果も併記した。なお、図 4.2.1 のデータは、目標密度が $D_r=60\%$ であったが、厳密には、図 4.4.4 の凡例にもあるように $D_r=58\%$ であり、追加で行ったケースは、 $D_r=64\%$ であるため、強度差が出ている。

図 4.4.4 より、層境の乱しが無いケースと比較すると、乱し有りのデータは、結果のバラつきが比較的大きく出た。中でも、乱し有りで $CSR=0.355$ 、 $N_c=11$ のデータは、同じ CSR のケースのデータとの差が大きく、本来の密度より相対密度が 6 % 低い $D_r=58\%$ の液状化強度曲線上に位置している。さらに、この乱し有りで $CSR=0.355$ 、 $N_c=11$ のデータは、軸ひずみの発達及び過剰間隙水圧の発生状況においても違った傾向を示している。

図 4.4.4 で示した $D_{r0}=58\%$ のケースにおける軸ひずみの発達及び過剰間隙水圧の発生状況を図 4.4.5 及び図 4.4.6 に示す。図 4.4.5 より、 $CSR=0.35$ 付近の 3 本のデータは、他の $CSR=0.30$ 付近及び $CSR=0.42$ 付近のデータと比較すると、各データ間の差が大きい。また、 $CSR=0.35$ 付近以外の $CSR=0.30$ 付近及び $CSR=0.42$ 付近のケースでは、 CSR が同じである場合、層境の乱し有り、無しの順でグラフの曲率が大きくなっているのに対して、乱し有りで $CSR=0.355$ 、 $N_c=11$ のデータは、逆の傾向を示している。他方、図 4.4.6 の過剰間隙水圧のグラフでは、 CSR の値が大きくなるほど、同じ $\Delta u/\sigma'_c$ が発生したときの DA は大きい値を示しているが、乱し有りで $CSR=0.355$ 、 $N_c=11$ のデータのみ、その傾向から外れている。加えて、乱し有りで $CSR=0.355$ 、 $N_c=11$ のデータを省いても、図 4.4.4 では、層境の乱しがあるケースより無しの方が、データのバラつきが抑えられている。よって、豊浦砂のように均一な粒度組成の試料の場合、薄層で構成する供試体では、層境を乱さずに作製した方が各データ間のバラつ

きが少なくでき、さらに液状化強度曲線への影響はほとんど無い結果が得られる可能性が示された。

また、**図 4.4.1** と **図 4.4.4** の層境の乱しが有る供試体との結果の違いは、締固めに用いたタンパー及び締固めエネルギーの違いでもある。

3.3.3(3) で述べたように、2016年と2017年以降に作製した WT 法の供試体とでは、試料の締固めに用いたタンパーの断面積に違いがある。各供試体の作製に用いたタンパーは、前者は直径 35 mm であり、試料との設置面の断面積が約 9.6 cm² であるため、供試体断面積に対する割合は 20 % 程度である。一方、後者は、直径 73.5 mm であり、試料との設置面の断面積が約 42 cm² であるため、断面積 44 cm² の供試体に対してほぼ全断面での締固めを行っている。**図 4.4.1** 及び **図 4.4.4** の結果から、全断面に近いタンパーで作製した供試体の場合、**図 4.4.4** に示すように液状化強度曲線上でのバラつきはあるものの、**図 4.4.1** の直径 35 mm のタンパーを用いて同じ密度と含水条件で作製した供試体と比較すると、バラつきの程度は、格段に小さい。さらに、供試体断面より小さいタンパーでの締固めでは、試料の状態や目標密度によっては締固め時にタンパーの底面から砂が逃げてしまうため、同一層内の上層と下層とでは、締固め後の供試体内の粒子構成が異なる可能性が考えられる。また、供試体を締め固めるときのエネルギーを大きくすることで、同一層内に形成される密度勾配の低減につながる可能性が考えられる。

よって、供試体を締め固めるときのタンパーは極力全断面に近いサイズとし、可能な範囲で高い締固めエネルギーを与えると、密度勾配を含む供試体内の不均一さの解消につながりやすいと考えられる。ただし、負圧法を併用する場合、高い締固めエネルギーは、メンブレンやモールドへの過度な負担となる可能性がある。よって、その適用には十分な注意が必要である。

図 4.4.7 には、供試体作製時の突固め回数と供試体高さとの関係を示す。**図 4.4.7** のデータは、**図 4.4.4** 中、直径 73.5 mm タンパーを用いた $D_r=64$ % の供試体のものである。図より、同じ密度に締め固めたときの突固め回数は、乱しの有る供試体と比較すると無い供試体の方が多結果となった。層境を乱した場合、下層の密詰め部分が一旦攪乱され、当該箇所を含めて締め固めを行うことから、層境を乱した方が多くの突固め回数を必要とすると予想されたが、逆の結果となった。

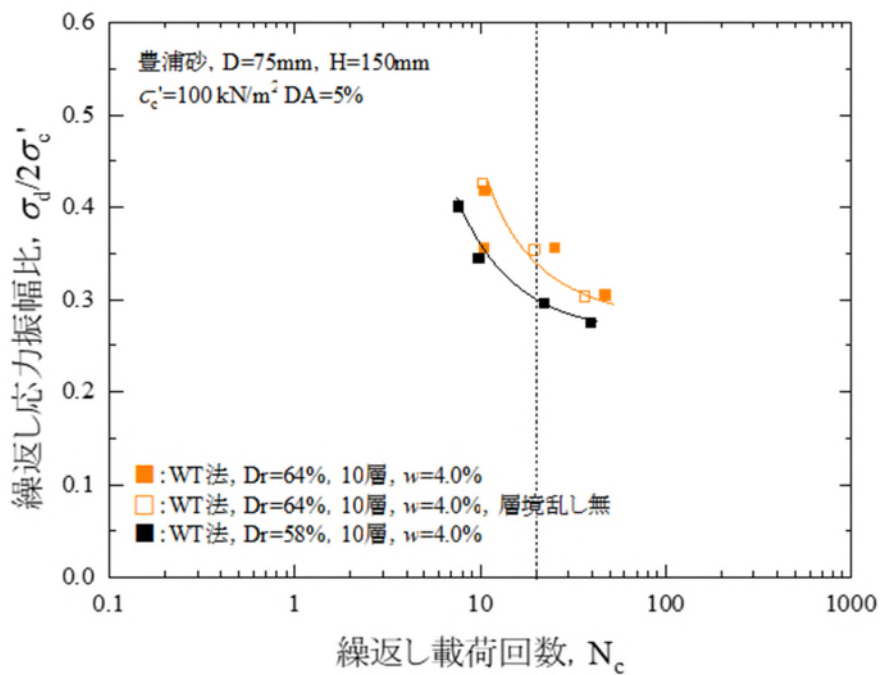


図 4.4.4 液状化強度曲線（豊浦砂，層境の処理の有無）

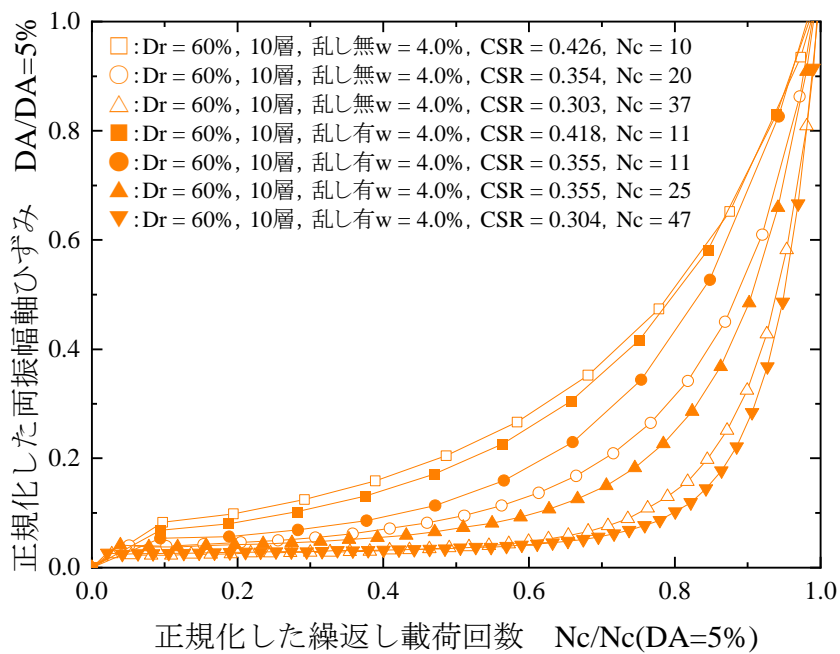


図 4.4.5 繰返し载荷中の正規化した軸ひずみの発達状況
（豊浦砂，WT 法，層境の処理の有無による比較）

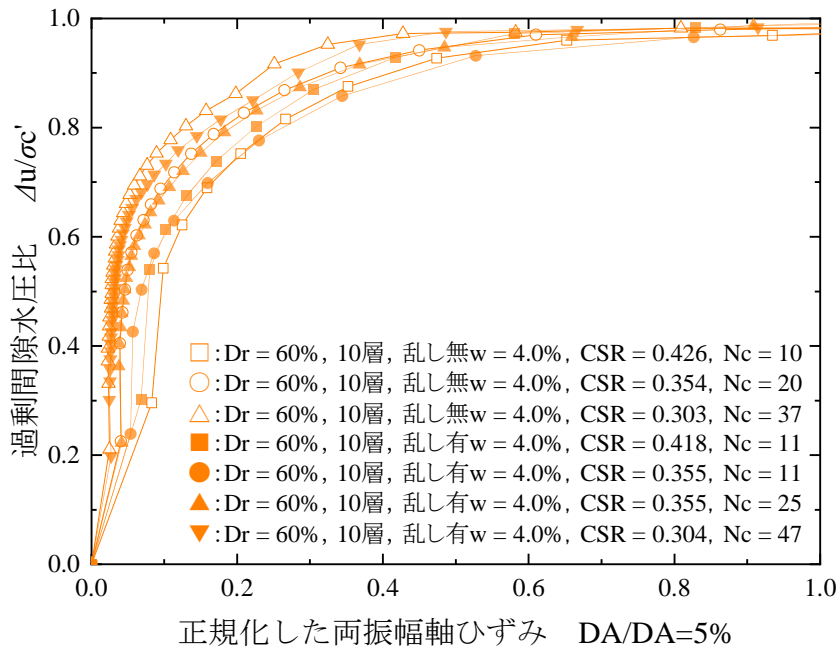


図 4.4.6 過剰間隙水圧比と正規化した DA の関係
(豊浦砂, WT 法, 層境の処理の有無による比較)

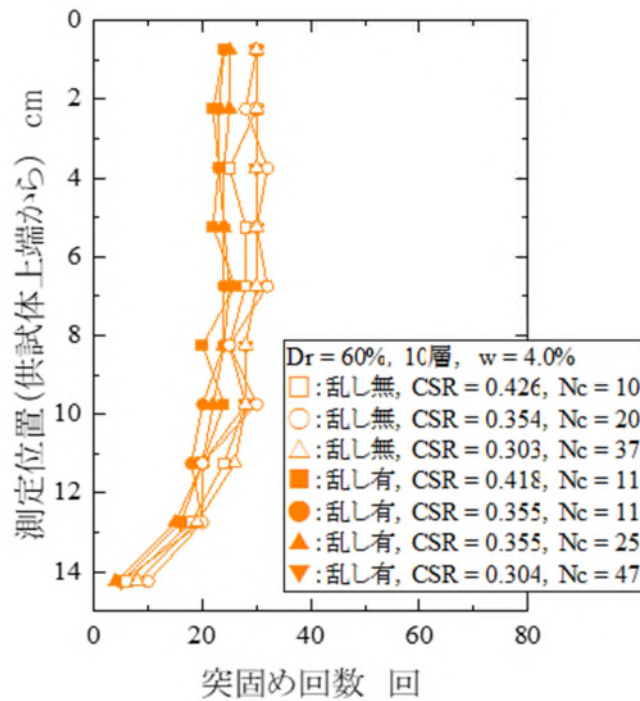


図 4.4.7 WT 法によって作製した供試体の突固め回数
(豊浦砂, WT 法, 直径 73.5 mm タンパー使用, 層境の処理の有無による比較)

4.4.2 供試体の密度勾配を逆にした場合の比較

本章の 4.2 節及び 4.3 節では、WT 法で作製した供試体の不均一性について、特に締固め時の層厚による検討を行ってきた。それらの液状化特性への影響の程度は条件によって様々であったが、本項では、供試体内に密度勾配がみられた供試体の上下端を逆にした場合、どのような影響がでるかを検証した結果を述べる。

図 4.4.7 は、豊浦砂を用いて、締固め層数 4 層、 $D_r=60\%$ 、 $w=4.0\%$ で作製した供試体を、三軸セル内の設置方向をそのままのケースと逆向きにした 2 ケースの結果である。図内には、図 4.2.1 内の同様の条件についても記載した。図 4.4.7 内、2 ケース (■, □) の結果を比較すると、3 ケースによるプロットは同一線上に整理することができ、設置方向による結果の違いは小さいといえる。5 章で後述するが、山砂を用いた締固め層数 4 層の供試体は、繰返し载荷中の局所的なひずみの発生においては供試体全体で軸方向ひずみの発生がみられた。この締固め層厚による変形特性の影響で、設置方向を変化させた場合でも、図 4.4.7 に示すケースでは差がみられなかったと考えられる。

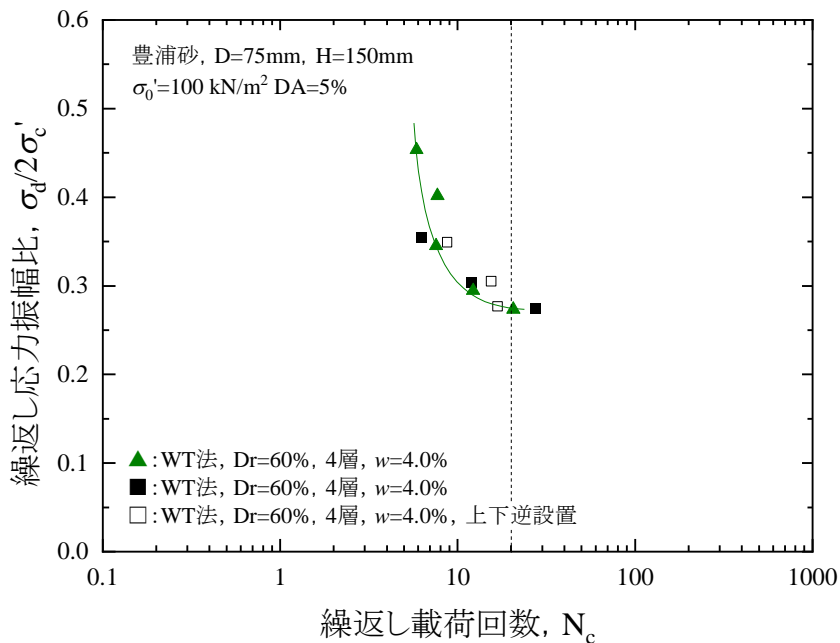


図 4.4.7 液状化強度曲線（供試体設置方向の違いによる比較）豊浦砂

4.5 本章のまとめ

本章では、3章で設定した条件の供試体を用いて液状化試験を行い、条件の違いによる各種検討を行った。なお、液状化試験実施に先行して、載荷方式や載荷速度による液状化特性への影響についても検証している。その後、粒度組成の異なる砂質土を用いて供試体作製条件による液状化特性の検討を行った結果、以下の2点について、試料による結果の相違がみられた。

- a) 締固め層厚による $CSR(N_c=20)$ は、豊浦砂では 10→6→4 層の(締固め層厚が薄い)順に高かったが、山砂では、4→10→1 層の順に高い値となった。また、同じ 10 層と 4 層との比較では、豊浦砂の方が山砂より $CSR(N_c=20)$ の差が大きかった。これらに関する比較検討は、6.1 節にて詳述する。
- b) 締固め時の含水比の違いによる $CSR(N_c=20)$ は、豊浦砂では $w=4.0\%$ より $w=2.5\%$ の方が明らかに低かったが、山砂では w_{opt} の $w=12.2\%$ より w_n の $w=6.8\%$ の方がわずかながら高い程度であった。火山灰質粗粒土の細粒分含有率を変化させて行った松村ら¹²⁾の研究成果によると、同じ締固め度の場合、含水比と液状化強度との関係は、細粒分含有率とそれに伴う骨格間隙比による影響を受けて変化することを示しており、物性値の違いはあるものの、本研究での試料による傾向の違いは、松村らの研究成果と同様に、粒度組成の影響によるものである可能性が考えられる。

以上、本章のまとめは、次のとおりである。

- (1) 本研究では、画像解析用データ取得のために **JGS 0541** によらない仕様による載荷を実施したが、これに先行して、本研究で採用した繰返し載荷の仕様と **JGS 0541** の要求事項による載荷方法との比較を行い、両者を直接検討することが可能であることを示した。
- (2) 豊浦砂を用いて締固め層数を変化させた液状化試験を行った結果、締固め層厚が薄くなると $CSR(N_c=20)$ は増加し、その変化率は、4 層と比較したときの 10 層では 9 % 程度であった。ただし、繰返し載荷中の軸ひずみの挙動は、本研究の範囲で $CSR(N_c=20)$ が最も高かった 10 層において、最も低い $CSR(N_c=20)$ を示した空中落下法の供試体に近い挙動を示した。

- (3) 締固め層数 10 層及び 4 層で作製した豊浦砂供試体で、初期の密度分布を測定した。その結果、いずれの供試体においても、供試体内の密度分布が不均一であることがわかった。これらは、供試体の上部ほど密度が高く、締固め層厚が厚い方が、密度のバラつきが大きかった。
- (4) 締固め時含水比 4.0 %及び 2.5 %による豊浦砂供試体の液状化強度への影響は、含水比の差が 1.5%であっても 20 %程度の強度変化がみられ、2.5 %の方が低かった。また、繰返し载荷中の挙動は、間隙水圧・軸ひずみ共に、4.0 %の方が漸増的であった。
- (5) 山砂を用いて 3 種類の締固め層厚による供試体を作製し、液状化試験を行った結果、 $CSR(N_c=20)$ は、締固め層数 4 層、10 層、1 層の順に高い値となった。締固め度 3 種の中で、 $D_c=95\%$ 及び 90% と $D_c=85\%$ とを比較すると、 $D_c=85\%$ の締固め層厚の違いが $CSR(N_c=20)$ に及ぼす影響は小さく、その影響の程度は供試体作製時の密度によって異なっていた。また、繰返し载荷中の軸ひずみの発生や過剰間隙水圧の上昇傾向については、 D_c によらず 10 層及び 4 層に分けて締め固めた供試体の挙動は比較的類似していたものの、1 層は他の 2 ケースと異なる挙動を示した。
- (6) 2 種類の締固め含水比で作製した山砂供試体の液状化特性は、 $CSR(N_c=20)$ による評価では変化の程度は小さかったものの、繰返し载荷中の変形特性は大きく異なり、比較的低含水比の供試体は、緩詰め供試体に似た挙動を示した。これは、含水比の違いが、供試体作製時の粒子構造に影響を及ぼすためであると考えられる。
- (7) 豊浦砂の湿潤締固め法による供試体では、締固め層数が 10 層のような薄層の場合、繰返し载荷において局所的な変位をおこすケースがみられた。これについて、豊浦砂のような単粒に近い試料を用いて薄層による供試体を作製した場合、供試体作製時の層境の乱しなど、わずかな粒子構造の違いが結果に大きく影響を及ぼした可能性が考えられる。
- (8) 湿潤締固め法によって供試体を作製する場合、タンパーの設置面積は、供試体断面積に違いものが望ましい。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の2，第7編 変形・強度試験，第3章 土の三軸試験，pp.730-736，2009.
- 2) Tatsuoka,F., Toki,S., Miura,S., Kato,H., Okamoto,M., Yamada,S., Yasuda,S. and Tanizawa,F. : Some factors affecting cyclic undrained triaxial strength of sand, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.99-116, 1986.
- 3) 清水正喜，高田亮：一軸圧縮強さに対する圧縮速度の影響-有効応力による評価-，第41回地盤工学シンポジウム，pp.29-32，1996.
- 4) 安田進，曾我誠：液状化特性に与える振動数等の影響，第19回土質工学研究発表会講演集，pp.549-550，1984.
- 5) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，二分冊の1，第2編 地盤の工学的分類，第2章 地盤の工学的分類，pp.53-59，2009.
- 6) 川尻峻三，川口貴之，澁谷啓，高橋正和：締固めた地盤材料の変形・強度特性に及ぼす締固め時の含水比および締固め方法の影響，*土木学会論文集 C(地圏工学)*, Vol.67, No.4, pp.532-543, 2011.
- 7) 土質工学会：土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集，pp.1-35，1988.
- 8) 日本産業規格 JIS A 1225 「土の湿潤密度試験方法」，2009.
- 9) Tokimatsu,K. and Nakamura,K. : A simplified correction for membrane compliance in liquefaction tests, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.4, pp.111-122, 1987.
- 10) Miura.S. and Toki,S. : A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.1, pp.61-77, 1982.
- 11) 横浜勝司，三浦清一，松村聡：築堤材に用いられる砂質シルトの強度・透水性・せん断剛性に及ぼす締固め管理条件の影響，*土木学会論文集 C*，Vol.68, No.2, pp.422-432, 2012.
- 12) 松村聡，三浦清一，横浜勝司：粗粒火山灰質土の非排水繰返しせん断強度に及ぼす締固め条件および非塑性細粒分の影響，*土木学会論文集 C*，Vol.70, No.2, pp.238-247, 2014.

第5章 画像解析手法及び結果並びに考察

5.1 CTによる画像解析

本研究のX線CTによる解析に用いた画像データの取得には、港湾空港技術研究所所有のマイクロフォーカスX線CTスキャナ¹⁾を使用した。以下に、本研究におけるX線CTデータを用いた画像解析実施の手順、解析結果及び考察について述べる。

5.1.1 CTを用いた画像解析による既往の研究

1900年代の前半から半ばにかけて医療分野において発展してきたX線CTの技術は、現在では、医療用と産業用とに用途を分けてさらなる発展を遂げており、産業用のX線CTスキャナは、近年、地盤力学の分野でも利用されるようになってきている。

地盤材料の力学挙動は、その性状を把握するために種々の試験方法が確立され、それらの試験方法を基に、多くの研究者による様々な成果が発表されてきた。しかしながら、地盤材料のメカニズムは複雑であり、一般的な地盤材料試験やそれらによって算出される土質定数のみでは解明できない現象も多いことから、供試体内部の挙動や、供試体を構成する土粒子の微視的構造などを把握することが求められてきた。

地盤力学の分野におけるX線CTスキャナの活用については、1970年代にサンプリングチューブの品質確認で用いられるようになり、要素試験の分野では、2000年の初頭に、Otani et al.²⁾が地盤材料の破壊時の検討に当たって、X線CT画像が十分に機能することを示しており、その成果は、その後の要素試験におけるX線CTスキャナ活用の基礎となっている。

Otani et al.は、一軸圧縮試験中の供試体によるX線CT画像の解析において、一軸圧縮によるピーク強度発現時からピーク後にかけて、せん断面付近で密度が徐々に変化していることを視覚的に示し、さらに、今後の画像解析における問題点を指摘している。また、吉川ら³⁾は、供試体に対する設置角度を変化させた複数のカメラを用いて、X線CTによる三軸圧縮中の画像データを取得し、せん断層の幅がせん断の進行によって変化することや、その挙動が試料によって異なることなどを示している。その後、X線CT画像は、一面せん断試験⁴⁾によるせん断帯の発生状況の観察や、ベーンせん断試験⁵⁾におけるせん断時の状況観察などにも使用されてきた。

また、サンプリング試料への適用^{例えば 6), 7)}によって、迅速な試料の状態確認や検査が可能になることから、作業の効率化や結果の高品質化などが期待されている。

4章でも述べたように、WT法によって作製した供試体の繰返し載荷では、締固め層厚の違いによる供試体内の不均一性が原因と考えられる力学挙動への影響がみられた。ただし、締固め層数と液状化強度との関係を比較した場合、豊浦砂と山砂とでは、異なる傾向を得ている(図4.2.5及び図4.3.4)。図3.1.2でも示したように、土の締固め特性は、用いる材料によって全く違った傾向を示す。本研究で用いた2つの砂質土は異なる粒度組成をもつため(図3.1.1)、突固めによって伝わるエネルギーの範囲や供試体内の粒子構成、それらの影響を受けた供試体内の密度は、豊浦砂と山砂とでは異なることが予想される。

豊浦砂による供試体の供試体内の密度分布は、4.2.1に示したとおりである。山砂でも同様の測定を試みたものの、山砂は、試料に礫分を含むことから供試体の切り出しに伴う乱れが激しく、適切に密度を測定できる状態ではなかった。よって、山砂の密度分布測定に当たっては、非破壊状態で供試体内の情報を得ることができるX線CTを用いることとした。

ここで、CT値(HU(Hounsfield Unit))は、水を0HU、空気を-1000HUとした場合の、撮影された画像の密度(X線の吸収値)が水に対してどの程度であるか表現したパラメータである。CT値と物質の密度との関係については、高野ら²⁾の成果に実際の測定データがあり、対象の物質間の相関が概ね良好であることがみてとれる(図5.1.1参照)。X線は密度が高い物質ほど吸収量が大きく、透過量が小さくなる。供試体内が、水、空気及び土粒子のみで構成されることを前提とした場合、CT画像における輝度値は土粒子の詰まり具合と線形関係をもつことから、供試体高さ方向の輝度値分布は、概ね密度分布の傾向と捉えることが可能である。よって、これらの性質を利用して、山砂供試体内の不均一性についての検討を行う。

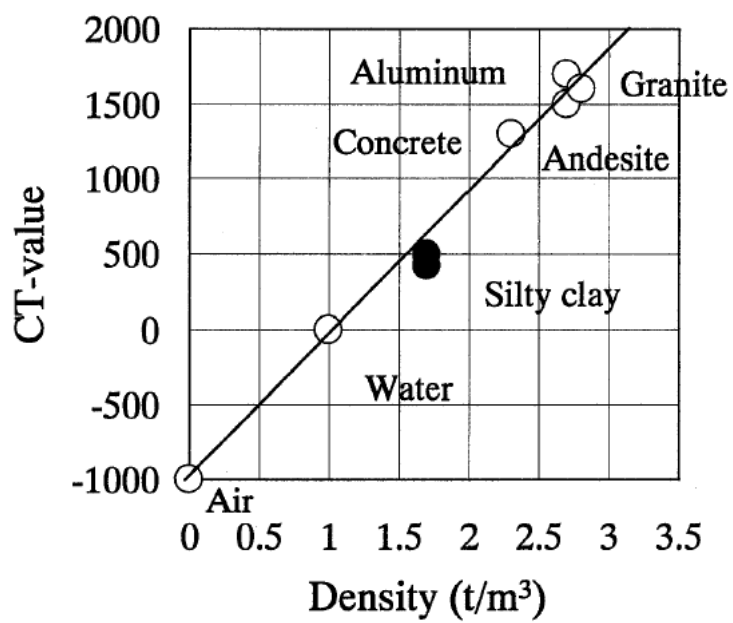


図 5.1.1 様々な材料の密度と CT 値との関係²⁾

5.1.2 CTによる画像解析手法

本研究のCT画像による検討を行った供試体は、4.3.1の山砂の液状化強度曲線上で最も強度差がみられた $D_c=95\%$ 、 w_{opt} で締固め層数が10、4及び1層の3ケースである。また、CTの撮影条件は、表5.1.1による。使用したCTスキャナは、開放管型のX線管が設置されたものであり、X線管の電圧は90 kV、電流は550 μ Aに設定した。また、画像分解能は0.131 mm/pixelであり、積算レート5.0 f/sec、プロジェクション数1500であることから1供試体当たりの撮影時間は300 secである。本研究の検討に用いた供試体高さ方向の輝度値分布は、次のように取得した。

上記の条件で取得した投影画像を用いてX-Y軸方向、Y-Z軸方向及びZ-X軸方向の3種類に再構成した画像データのうち、X-Y軸方向（供試体軸方向に対して鉛直方向：供試体断面）のCT画像を検討に使用した。これらのデータを用いた供試体高さ方向の平均輝度値分布は、次の1)~4)によって得た。

表 5.1.1 CT撮影条件一覧

| 項目 | 内容 |
|--------------------------------|----------------|
| X線管電圧 | 90 kV |
| X線管電流 | 550 μ A |
| 検出器ピクセルサイズ | 0.2780 mm |
| 拡大率 | 2.12204 |
| 画像分解能（空間解像度） | 0.131 mm/pixel |
| 積算レート (1 sec 当たりに撮影するフレーム数) | 5.0 フレーム/sec |
| プロジェクション数 (1周当たりのカット数) | 1500 |
| リングアーチファクト 低減フィルタ | なし |
| ノイズ除去フィルタ | なし |
| ビームハードニング補正值 | なし |
| 撮影モード | フルスキャン |

- 1) 画像内の供試体の水平断面の輪郭に沿って円を設定する。
- 2) この円内に含まれるピクセルの輝度値を合計する。
- 3) 上記 2) で取得した輝度値の合計を円内に含まれるピクセルの総数で割り、当該円内部の平均輝度値を算出する。
- 4) 以上 1)~3) を、取得した水平方向の画像中、供試体が写された全ての CT 画像に対して行う。

図 5.1.2 (a), (b) 及び (c) に、供試体水平方向及び鉛直方向で構成された CT 画像の例を示す。図 5.1.2 (a) 及び (b) は、図 5.1.2 (c) 中の破線部 A-A', B-B' の断面をそれぞれ示している。図 5.1.2 (a) と (b) を比較すると、供試体上部断面の (a) より下部断面の (b) の方が間隙を示す黒色部が多く、この供試体の内部は、上部より下部の方が緩い状態であることがみてとれる。水平方向の全 CT 画像から上述の手順で平均輝度値を算出し、供試体高さとの関係で示したものが (d) の平均輝度値分布である。この関係を用いて、供試体作製時の密度分布についての比較検討を行った。

なお、本研究では高さ 150 mm の供試体を用いたため、0.131 mm/pixel で撮影した場合、供試体は 1145 枚の水平方向の CT 画像で構成される。しかしながら、供試体の上端面及び下端面付近は、アーチファクトと呼ばれる CT 画像特有のノイズの影響を受け易く、実際とは異なる輝度値を示した。

CT 用データの取得に当たって、撮影の対象物は、CT 撮影装置内のテーブル上に設置するが、CT 画像の取得において、X 線エネルギーの吸収率に大幅な差がある物質が隣接している場合、低エネルギーの X 線は高エネルギーの X 線より吸収されやすいため、これらを連続して透過した場合、高エネルギーの X 線の比率が高くなる。このノイズによって、本来均一な物体であるにもかかわらず、2 つの物質の境目では密度が変化しているような結果が得られてしまう。本研究の場合は、テーブルと供試体との間にこのような現象が起こっており、供試体は、回転台からの影響を強く受けた結果が算出される。本研究では、これらの影響が及ぶと考えられる範囲を除いた約 840 枚（供試体上端から約 10~120 mm の範囲）について検討を行った。

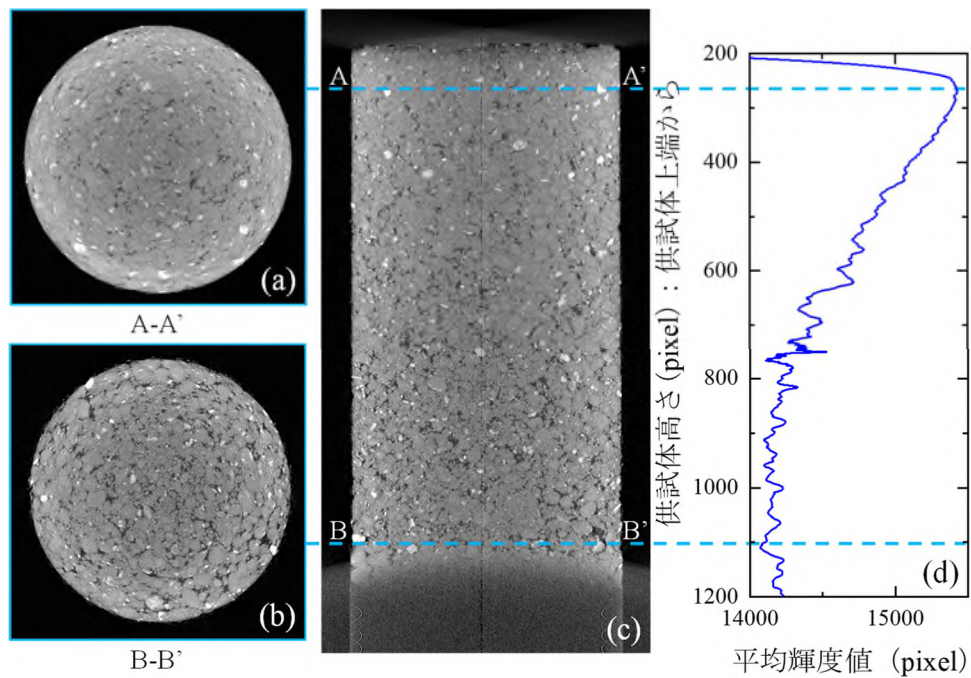


図 5.1.2 取得した CT 画像及び供試体高さ～平均輝度値の例:

(a)供試体上部の水平方向 CT 画像, (b)供試体下部の水平方向 CT 画像, (c)鉛直方向 CT 画像, (d)各供試体高さにおける平均輝度値の分布 (ただし, ここで示す各画像は, 本稿掲載用に輝度値を調整したものである。)

5.1.3 CTによる画像解析結果及び考察

図 5.1.3 は、縦軸に供試体軸方向の高さ、横軸に供試体の各高さにおける平均輝度値との関係を示したものであり、それぞれ、(a)が 10 層、(b)が 4 層、そして(c)が 1 層で締め固めた供試体による結果である。また、図 5.1.3 (a)及び(b)の破線は、供試体の層境（供試体を表 3.3.2 に示す締め固め層数で等分割した場合）を示している。

図 5.1.3 より、本研究で作製した供試体は、いずれの締め固め層数においても、全体的に供試体上部ほど高い密度に仕上がっている。また、締め固め層数による比較では、締め固め層数が少ないほど、密度勾配が大きくなっていることが分かる。加えて、供試体内に層境がある(a)の 10 層及び(b)の 4 層では、層境の前後で平均輝度値が上下している様子もみてとれる。

以上のことから、山砂のような粒径幅の広い試料であっても、締め固め時の含水比 w_{opt} 、上載圧による突固めによって供試体を作製した場合、各締め固め層内に密度勾配が形成されることが明らかにされた。なお、供試体上から 2 層目以降、各層内のピークが層境から離れているのは、3.3.3(3)で記したように、各層のなじみを良くする目的で層境を乱していることによる影響や、当該層の上層の締め固めによって、設定より層境が供試体の下方にずれている可能性などが考えられる。

図 5.1.3 の関係における平均輝度値の分布傾向をより明確にするため、平均輝度値を各ケース図 5.1.3 に示す範囲全体の平均輝度値の平均値で正規化した値と比較する。図 5.1.3 の平均輝度値の変動は、例えば(b)や(c)の供試体下部では、供試体内部の密度分布の変動なのか、バラツキによるものなのか判別が難しいことから、供試体を高さ方向に 40 分割し、各分割片の平均値を算出した。これらと供試体高さとの関係を図 5.1.4 に示す。なお、図 5.1.4(a)及び(b)も、図 5.1.3(a)及び(b)と同様、グラフ内に層境を記載している。

図 5.1.4 より、正規化した平均輝度値は、締め固め層数 1 層で最も変化が大きく、供試体下部の平均輝度値は、供試体上部の 10 %程度低下していることが分かる。また、1 層は、供試体の上半分では平均輝度値の変化がみられるものの、下半分はほぼ変化がみられない。つまり、締め固め層厚が 150 mm であっても、供試体作製時の条件によっては、供試体上端から締め固めたエネルギーは、供試体上端から半分程度までしか伝わらない可能性があるといえる。

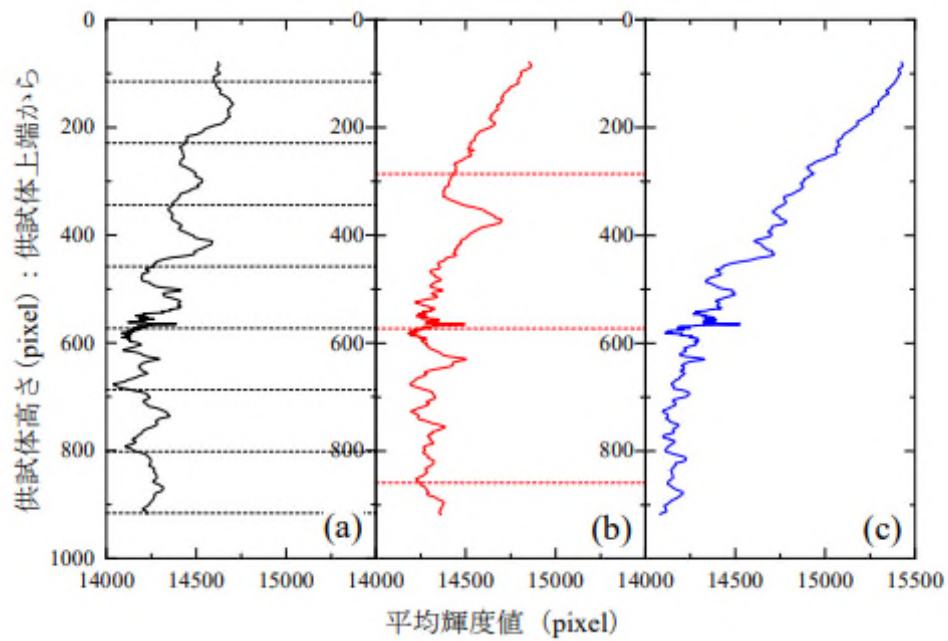


図 5.1.3 各ケースの平均輝度値（山砂）：(a)締固め層数 10 層, (b)4 層, (c)1 層

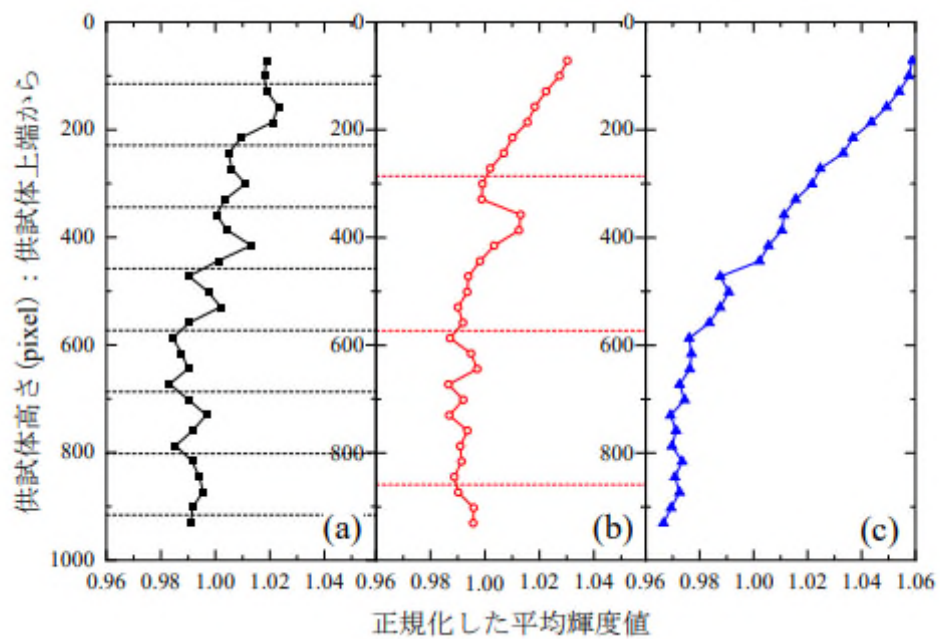


図 5.1.4 各ケースの全体の平均値で正規化した輝度値（山砂）：
 (a)締固め層数 10 層, (b)4 層, (c)1 層

また、図 5.1.3 の各締固め層数の CT 画像における平均輝度値のバラつきを、表 5.1.2 にまとめた。表内、平均輝度値の中央値は、10 層及び 4 層は平均値に近く、平均値に対する中央値もほぼ 1.00 である。他方、1 層の中央値は、平均値より低く、平均値に対する中央値は 0.989 であることから、1 層の供試体内は緩い部分が多く、比較的密な部分が局所的に存在しているという状態であるといえる。

各供試体における最小値と最大値との差は、10 層及び 4 層ではあまり違いがないものの、1 層の供試体は、他の供試体と比較すると 2 倍程度の違いがある。また、標準偏差は、やはり 1 層における値の大きさが目立つ。なお、10 層と 4 層との比較では、10 層の方が、標準偏差が大きい。これは、締固め層数が多いケースでは、供試体内の平均輝度値の変化が締固め層数分多くなるためであると考えられる。

図 5.1.4 (a)の 10 層及び(b)の 4 層のケースでは、正規化した平均輝度値の軸方向の変化は 1 層と比較すると小さく、供試体上部に対する下部への変化は両ケース共に 4% 程度の低下であり、10%程度であった 1 層の半分以下となった。ただし、10 層と 4 層では、供試体上部から下部に向けての正規化した平均輝度値の傾向に違いがみられる。締固め層数 10 層の正規化した平均輝度値は、上部から下部に向かって漸減している。一方、4 層の正規化した平均輝度値は、供試体上部から半分程度まで減少傾向が続くが、供試体の下半分の変動は小さい。

図 5.1.5 は、図 5.1.4 に示す正規化した平均輝度値の度数分布である。10 層と 4 層を比較すると、分布の範囲は同程度であることが分かる。度数分布の形状に注目すると、10 層は、ややバラつきがあるものの、平均値を中心とした正規分布に近い形状を示している。しかしながら、4 層は 0.99~1.00 の頻度が最も高く、次は 1.01~1.02 といったように、ピークが 2 つあるような分布である。このように、10 層と 4 層は供試体内の平均輝度値の範囲にはあまり差がないものの、平均輝度値の分布に違いあることが分かった。さらに、1 層は密度分布の範囲が最も広く、加えて分布のバラつきが最も顕著であることから、厚層で作製した供試体ほど供試体内の密度分布に偏り（不均一）があることが分かった。

表 5.1.2 平均輝度値のバラつき（山砂）

| 平均輝度値 | 締固め層数 | | |
|---------|-------|-------|-------|
| | 1 | 4 | 10 |
| 最大値 | 15431 | 14865 | 14705 |
| 最小値 | 14082 | 14180 | 14039 |
| 最大値－最小値 | 1349 | 685 | 666 |
| 平均値 | 14571 | 14422 | 14355 |
| 中央値 | 14410 | 14366 | 14321 |
| 中央値/平均値 | 0.989 | 0.996 | 0.998 |
| 分散 | 103 | 54 | 66 |
| 標準偏差 | 10606 | 2940 | 4357 |
| 変動係数 | 0.728 | 0.204 | 0.303 |

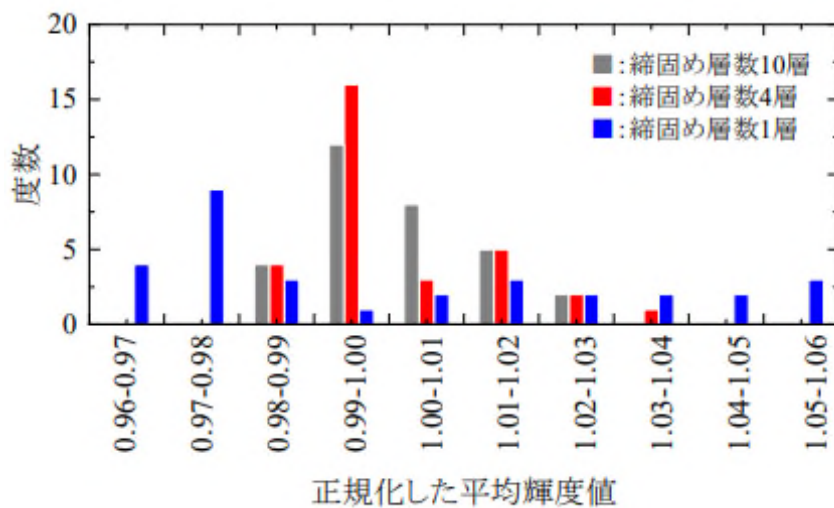


図 5.1.5 正規化した平均輝度値の分布（山砂）

5.2 PIV による画像解析

4.2.1(4)及び5.1.3で示したように、WT法による供試体作製では各層内に不均一さが形成される。また、同じ高さの供試体の場合、層数が少ないほど層厚は厚くなり、供試体内の密度差は大きくなる可能性がある。図5.2.1は、本研究で設定した締固め層数の中では最も少ない4層で作製した供試体の載荷状況であり、 DA が5%を超えたサイクルの伸張側ピーク付近（供試体の軸ひずみ $\varepsilon_{aAve}=-4.6\%$ ）のものである。層境付近を拡大すると、供試体側面の各層境の間にくびれのようなものがみられ、この付近に伸張側の軸ひずみが集中していると考えられる。本節では、このような供試体表面における変形の不均一性を、以下の画像解析結果を用いて検討すると共に、4章の液状化試験結果との関連について考察する。

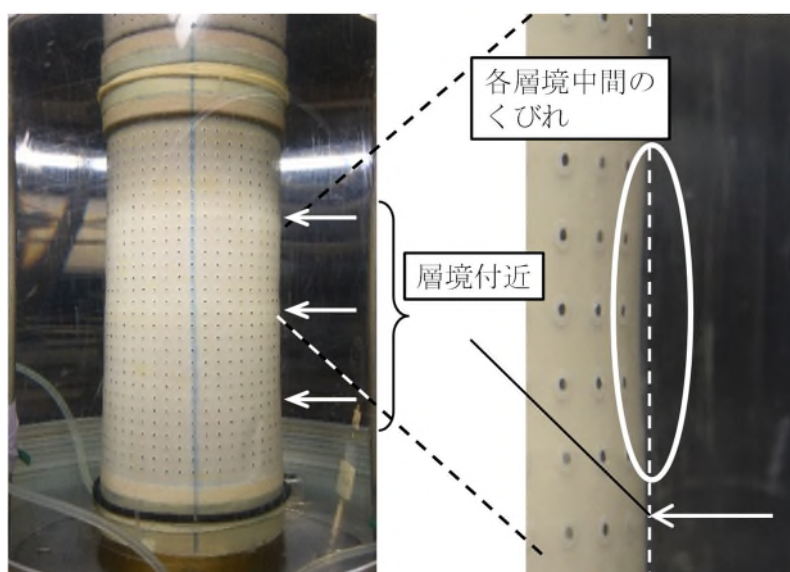


図 5.2.1 載荷中の供試体状況

(豊浦砂, 湿潤締固め法, 4 層, $CSR=0.274$, $\varepsilon_{aAve}=-4.6\%$, $DA=5\%$, 伸張側ピーク付近)

5.2.1 PIV を用いた画像解析による既往の研究

前節で述べた X 線 CT と同様に、非接触状態における物体の可視化、とりわけ変位計や流速計などを利用して解析する技術を用いた技術が、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry : 以下, PIV) である。PIV は、ある対象物を一定時間間隔 Δt で撮影した画像を用いて、一定時間における変化量を算出し、局所的な変位や速度などを把握することが可能であることから、流体力学や医療分野での発展が顕著であり、近年では、複数台のカメラを用いて 3 次元処理することで、空間全体における対象物の挙動を把握することも可能になっている。

PIV による画像解析手法は、地盤工学の分野でも積極的に取り入れられており、特に、2003 年に White, D. J. et al.⁸⁾ によってデジタル画像を用いた局所変位計測の有用性が実証されて以来、国内でも 2005 年頃から、地盤内の変形挙動や、変位データから得られるひずみ増分及び弾塑性モデルを用いた応力予測などに用いられている。また、要素試験への適用も行われている。

池田ら⁹⁾は、平面ひずみ供試体におけるせん断面を PIV によって左右対称成分と非対称成分に分解して調べている。池田らの研究では、先にせん断中の変形について、供試体内に分岐モードが出現することを画像解析によって押さえ、それによる供試体内の対称性が喪失することによってせん断面が形成されることを示している。また、吉川ら³⁾は、あらゆる角度から撮影した画像を用いてせん断中の三軸供試体の画像データを 2 種類の方法で取得し、破砕性の材料と硬質な材料では、せん断層の幅の形成過程違いがあることを示している。

実験に至るアプローチは異なるものの、本研究と同様に、土の締固め層厚に着目して PIV による分析を行った成果も出されている。中出ら¹⁰⁾は、3 種類の締固め層厚によって作製した供試体で三軸 CD 試験を行っており、供試体上の局所変形に締固め層厚の影響がみられることや、比較的厚層で作製した供試体は、強度が低下する傾向にあることを示している。

このように、地盤の分野における PIV 解析手法は、ここ 20 年程度でその精度を飛躍的に上昇させ、これまで明らかにされてこなかったミクロな視点での観察が可能になり、これらの成果によって、要素試験における力学特性への理解が一層深まってきた。本研究では、供試体表面の標点を追跡することで繰返し載荷中の局所変位を調べ、締固め層厚による局所変形挙動への影響について検討を行った。

5.2.2 PIVによる画像解析手法

本研究で行ったPIVによる画像解析の手順及び概略は、次のとおりである。

1) 標点の準備

本研究の画像解析では、ラテックス製のメンブレン上に同じ素材の黒色のドットを5 mm 間隔に付して試験を行い、このドットをターゲットとしてデジタルカメラによって画像撮影を行い、画像解析に用いた。メンブレンに付したドットは、あらかじめ印刷されたものを転写式に貼り付けるタイプのもので採用したため、等間隔にドットを付すことが可能であった。また、メンブレンとドットの素材を同じラテックスにすることで、メンブレンに対するドットの高い追随性が期待できた。また、三軸圧力室内のペDESTAL上にも基準となるドットを付けておき、画像解析では、このペDESTAL上のドットを不動点としてメンブレン上のドットの座標追跡を行った。

なお、このメンブレン上に付すドットについては、上記のラテックス素材の転写式ドットの他に、手打ちのドットによるメンブレンでの画像解析も試みたが、トッドの記載範囲のズレによる追跡枠の範囲が大幅に拡大する必要があり、解析時間と精度に難点が出たため不採用とした。

2) 試験器具の準備

液状化試験における画像データの撮影に当たっては、蛍光灯をセルの両側に配置し、明度を確保する共に供試体表面に周辺機器の影が投影されることを回避した。撮影機材の設置状況を写真5.2.1に示す。また、画像解析に当たって目標物の識別を極力スムーズに行うために、三軸圧力室のセルは、傷の少ない面を正面に配置した。同じ理由、グリ



写真 5.2.1 撮影機材設置状況

ースなどの汚れがセル上に付着している状態も極力避けたいことから、三軸圧力室の組立て時には、一旦上盤を通過させたセルを、アルコールなどを用いて底盤側から内部の汚れを拭き取り、画像上のドットが検出しやすい状態にした。

また、撮影に用いたカメラは、豊浦砂、山砂共に Nikon 製の一眼レフレックスタイプデジタルカメラであり、型式は D800 シリーズである。なお、カメラの条件設定や解析手法は、宮下¹¹⁾及び Zhao¹²⁾の研究成果を準用した。

3) 画像データの取得

前述のように、本研究の液状化試験は、年度によって 2 か所に分かれて行った。これに伴って、載荷時の画像データ取得方法もやや異なる。まず、豊浦砂の液状化試験では、東京大学土質/地盤研究室にて使用されていた載荷プログラム (DqigitShowBasic) を用いて画像データを取得した。本プログラムは、載荷中に記録される荷重計や変位計による測定値を用いて、カメラのシャッターを切るタイミングに反映させるプログラムが盛り込まれており、載荷の終了まで 2 枚/min のペースで連続して撮影したものである。自動撮影のメリットは、一定間隔の変位を確実に測定可能であることやシャッターを切る際の振動によって測定値への影響が少ないことなどが挙げられる。なお、豊浦砂供試体の画像データ撮影時の画素数は、4912×7360 pixel である。

他方、2017 年～の山砂を用いた検討では、試験機に付属されている取込みソフトの関係で上記のプログラムは使用できなかった。そこで、画像の撮影に用いたカメラの連続撮影機能を使用した。画像解析用の撮影に用いた D850 は、条件によっては最多で 9 枚/s の高速連続撮影が可能であったことから、連続撮影間隔を 1 s に設定して撮影を行った。山砂の繰返し載荷は、1 枚/min で行ったことから、載荷方式の違いを考慮すると、豊浦砂との条件の相違について、過度な開きはないと考えられる。なお、山砂供試体の画像データ撮影時の画素数は、5504×8256 pixel である。

4) 画像データのリネーム

取得した画像データは、データの認識をスムーズに行う都合上、ファイル名の下の 3 桁が「1」からスタートする連番になるようにリネームする。

5) 画像データのモノクロに変換

リネームを終えた画像データを、「Irfan View」を用いてカラーから白黒に変換する。「Irfan View」は画像ブラウザの一つであり、画像のリサイズや回転、反転、明るさ、コントラストの調整などの簡易的な加工を一度に処理することができるソフトである。ソフト内の変換設定は、グレースケールとする。出力された画像を確認し、不鮮明な場合、コントラストの値を調整することで鮮明な画像を取得する。

6) 画像上のドットの座標の取得

モノクロ変換した画像データを用いてメンブレン上のドットの座標を得る。座標の取得に当たっては、「Move-tr/2D 7.0」を使用した。「Move-tr/2D」は、ビデオカメラなどによる画像データから時刻歴による2次元の変位を計測し、座標データとしてアウトプットする。

7) 変位量並びにひずみの計算及びコンターの取得

ドットの座標から変位量とひずみを計算する。これらの計算値を用いて軸方向ひずみのコンターを取得する。これらのデータの解析には、「Mat lab」を用いた。「Mat lab」は、上記の「Move-tr/2D」などによって取得した座標データを読み取り、軸方向ひずみの計算やコンターの作成などを行うことができるソフトである。

本研究におけるPIV解析に当たっては、その解析範囲を供試体正面から目視可能な範囲の、中心から水平方向に向かって半分程度までとした。解析の対象範囲の例を図5.2.2に示す。円柱供試体を用いた2次元画像は、曲率の影響を受けて左右両端に近づくほど実際の変位との差が大きくなることから、極端な曲率の影響を避けるため解析範囲を限定した。その後、得られた変位量から微小ひずみ理論と形状関数を用いて軸方向ひずみを算出し、コンター図によって可視化した。

また、円柱供試体を用いた2次元画像の場合、各ドット間距離の取得に当たっては、上述のような曲率の影響を受ける。加えて、三軸試験では、繰返し载荷時に撮影機器から供試体までの距離が変動する。具体的には、圧縮側では、供試体が樽形に変形することから撮影機器までの距離が近くなる(図5.2.3)。一方、伸張側では、供試体が糸巻き形に変形し、撮影機器までの距離が遠くなる。よって、圧縮側はひずみ量の過

大評価，伸張側は過小評価が懸念される。しかしながら，本研究では，供試体作製条件の違いによる結果の傾向を定性的に評価することが目的であるため，これらの影響は補正せずに解析と考察を行った。

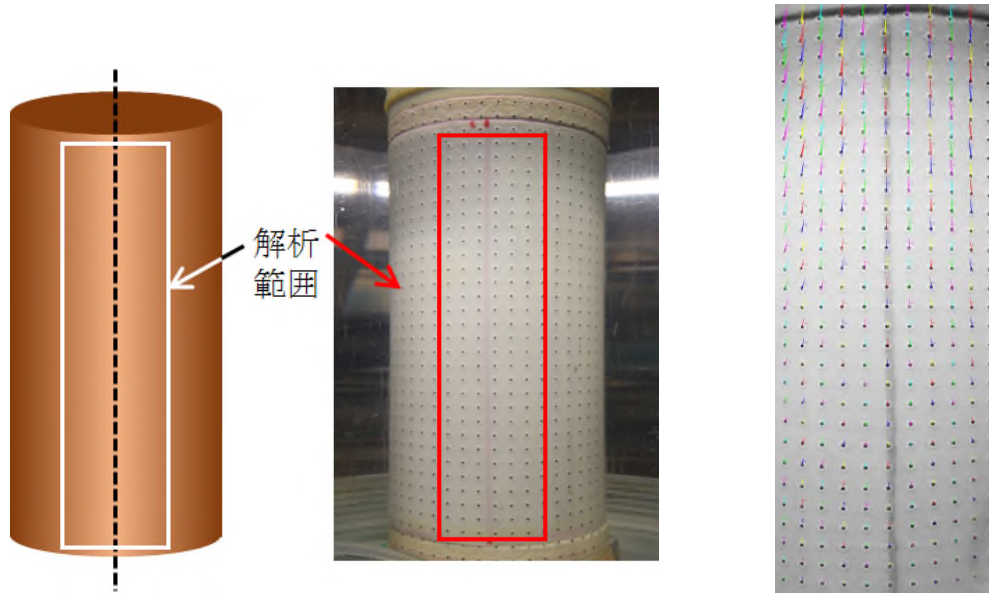


図 5.2.2 解析の対象範囲及び局所変位の追跡例

a) 解析の範囲，b) 局所変位の追跡結果

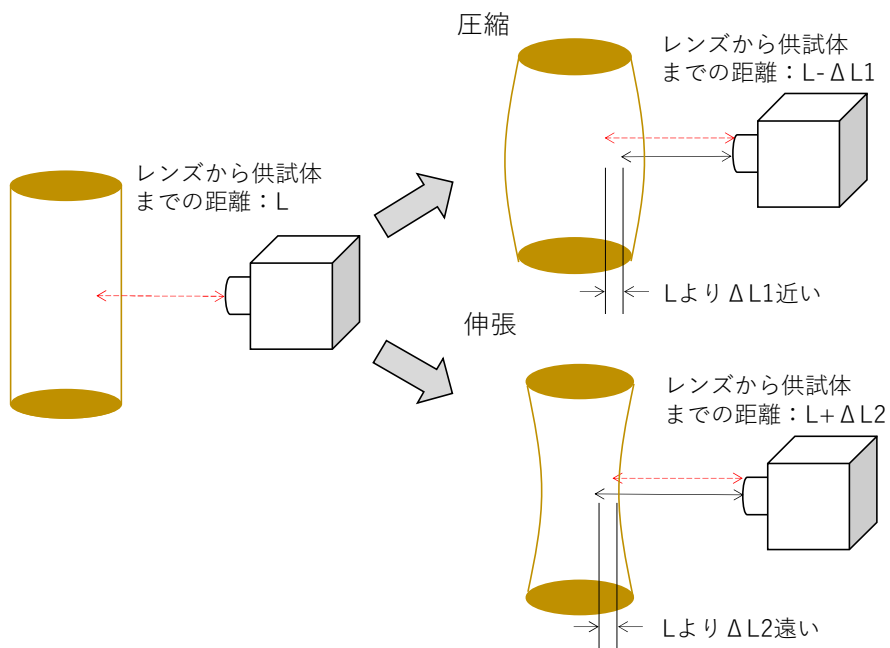


図 5.2.3 円柱体の2次元画像撮影時のエラー概念図

5.2.3 PIVによる画像解析結果及び考察

本項では、5.2.2の手法によって得たコンター図を基に、豊浦砂及び山砂を用いた湿潤締固め供試体の、供試体表面の軸方向ひずみに対する締固め層厚の影響について述べる。

(1) 豊浦砂の供試体による画像解析結果と考察

図5.2.4(a)～(d)は、画像解析によって得られた軸方向ひずみ ϵ_a の分布を示すコンター図であり、図中の色相は、 $\epsilon_a=0\%$ の黄色を中心に、赤みを強く呈するほど伸張側の軸方向ひずみの増加を示し、青みを強く呈するほど圧縮側の軸方向ひずみの増加を示している。図5.2.4中、(a)はAP法、(b)～(d)はWT法で作製した供試体による結果である。WT法の図5.2.4(b)、(c)、(d)は、それぞれ供試体作製時の締固め層数が10、6、4層の結果であり、図5.2.4(d)の $DA=5\%$ は図5.2.1に対応している。図5.2.4(a)～(d)の各供試体条件における3枚のコンターは、 DA が1、2、5%を超えたサイクルの伸張側ピーク付近のものであり、各コンター図には、各時点の供試体の軸ひずみ ϵ_{aAve} 及び各時点までに蓄積された過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$ も併せて記載している。また、図5.2.4(b)～(d)のWT法による供試体のコンター図側面に付した白抜き三角(\blacktriangle)は、各供試体の層境付近を示すものである。

なお、図5.2.4(a)～(d)は、 $N_c(DA=5\%)$ が10～40回程度であった供試体の結果である。これらは、図4.2.1において各条件による結果の違いが明瞭な領域である。

図5.2.4(a)より、AP法で作製した供試体表面の軸方向ひずみの分布は、供試体の下端から上端に向かって伸張側に大きくなる傾向を示している。また、局所的なバラツキは少なく、比較的均一である。

一方、WT法によって作製した図5.2.4(b)～(d)は、いずれの結果においても供試体中の層境付近を中心として不均一な軸方向ひずみの分布を示しており、この供試体内の不均一性は、作製時の締固め層厚が厚いほど明瞭である。また、10層の図5.2.4(b)と6層の図5.2.4(c)は、層境の影響が見られる一方で、AP法による供試体のように供試体の上部で、より大きい伸張側の軸方向ひずみが出ており、供試体下部における軸方向ひずみは、同じ供試体の上部と比較すると小さい。層厚が薄い供試体では、図4.2.6及び表4.2.1で示したように供試体内の密度差が小さいため、供試体内が比較的均一に形成されるAP法に似た傾向を示したと考えられる。また、4層の図5.2.4(d)

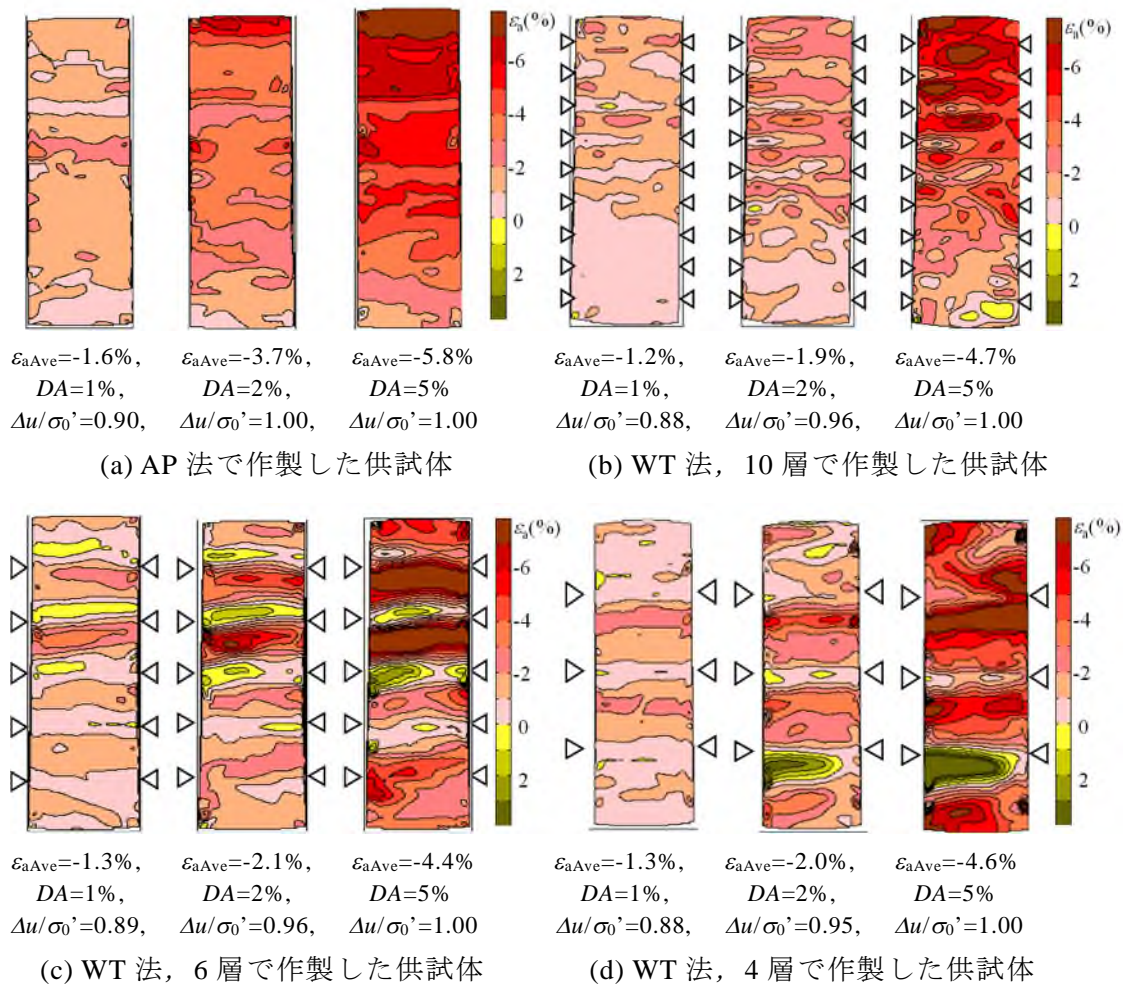


図 5.2.4 AP 法及び WT 法で作製した供試体の軸方向ひずみの分布（豊浦砂）

では、AP 法や WT 法の 10 層及び 6 層のように、供試体の上部と下部とで軸方向ひずみの分布の傾向に明確な差が無く、下端に近い部分でも大きな伸張側の軸方向ひずみがみられた。

本研究のような三軸液状化試験の場合、供試体の飽和単位体積重量がその側面にあるセル水の単位体積重量よりも大きいため、供試体上端では有効応力が完全に消失する状態が生じ得るものの、供試体下方では供試体の自重の影響で有効応力が完全に 0 にはならない。この現象を受けて、供試体上方では、過剰間隙水圧比が高くなるほど引張ひずみが局所的に大きくなる傾向にあると考えられる。本研究の豊浦砂を用いた供試体では、図 5.2.4(a)の AP 法や図 5.2.4(b)及び(c)の WT 法 10 層及び 6 層の供試体で、この影響が比較的色彩濃く出たと考えられる。一方、WT 法の 4 層の場合、液状化

による供試体上方での軸ひずみの集中より，図 4.2.6 (b)で示したような供試体内の密度のバラつきによる影響の方が大きかったため，他の 3 ケースとは異なる傾向の軸方向ひずみ分布が出たと想定される。

以上の結果から，WT 法によって作製した供試体では，締固め層数，つまり締固めによる 1 層の厚さによって，繰返し载荷中の軸方向ひずみの発生状況に違い出る可能性があるといえる。

(2) 山砂の供試体による画像解析結果と考察

図 5.2.5 (a)~(c)は、PIV による画像解析によって得られた軸方向ひずみ ε_a の分布を示すコンター図である。図中の色相及び供試体側面のマークは、(1)の豊浦砂と同様である。

図 5.2.5 (a)~(c)の山砂供試体は、 $D_c=95\%$ 、 w_{opt} であり、(a)が締固め層数 10 層、(b)が 4 層、そして(c)が 1 層のものである。また、いずれの供試体も、 $N_c(DA=5\%)$ が 20~25 回程度になるように繰返し载荷を行った。各条件につき 3 枚のコンターを併記しているが、それぞれ左から $DA=1, 2, 4\%$ を超えたサイクルの伸張側ピーク付近のものである。コンター図の下には、各時点の供試体全体の軸ひずみ ε_{aAve} と過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$ を示している。豊浦砂のコンターでは、 $DA=1, 2$ 及び 5%における比較を行ったが、山砂供試体では、 $DA=1, 2$ 及び 4%のデータで比較する。

締固め層数による軸方向ひずみの発生状況を比較すると、供試体内に層境が形成される 10 層及び 4 層は、層境付近でコンターの色調に変化がみられる。これは、 $DA=4\%$ 付近より、 $DA=1\%$ や 2%のコンターの方が明瞭である。他方、供試体作製時に層境が形成されない 1 層は、供試体の軸方向に沿って色調が一様に変化している。このような軸方向ひずみの発達状況の違いについて、以下、詳しく観察する。

はじめに、図 5.2.5 (a)の締固め層数 10 層のケースでは、 $DA=1\%$ から供試体上端付近を中心に軸方向ひずみの発達がみられ、 $DA=2\%$ から 4%に軸ひずみが増加するにつれて、その傾向が顕著になった。このような初期液状化付近における供試体上部の軸方向ひずみの集中は、図 5.2.4 (a)の豊浦砂の AP 法によるケースと類似しており、比較的均一な供試体で見られる変形挙動に近いといえる。

次に、図 5.2.5 (b)の締固め層数 4 層のケースでは、他のケースと比較すると、 $DA=2\%$ までは局所的な軸方向ひずみの発生が少ない様子が見て取れる。その後、 $DA=4\%$ を超えると、供試体上部から一つ目及び二つ目の層境を中心に軸方向ひずみが発達しており、初期液状化付近では、供試体の中心付近の軸方向ひずみが最も発達している。さらに、4 層では、 $DA=4\%$ 付近の伸張側のひずみを示す赤の色相が他の 2 ケースより 1 段階薄いことが特徴として挙げられる。このことは、4 層では層境を中心として軸方向ひずみが不均一に発生しているものの、 $\varepsilon_a=-7\%$ を超えるような比較的大きな軸方向ひずみの発生は抑えられていることを示すものである。

図 5.2.5 (c)の締固め層数 1 層のケースでは、供試体の下部に軸方向ひずみが集中し

ており、供試体の上端付近は、 $DA=1\%$ と $DA=2\%$ ではほぼ違いがみられず、 $DA=4\%$ においてもやや変化がみられる程度である。一方、供試体下部では、 $DA=1\%$ から 4% に至るまで一貫して軸方向ひずみが増加していることが分かる。これは、**図 5.1.3 (c)**で示した平均輝度値の分布の傾向と一致しており、**図 5.1.4 (c)**の結果によると、1層で作製した供試体の最小密度は、平均密度から 3% 程度低い値であり、他の2ケースと比較すると2倍程度低い値であった。このように、1層で締め固めた供試体では、平均輝度値が低いほど軸方向ひずみの発生が顕著になる結果となった。

以上のように、締め固め層厚3種の結果を比較すると、10層は供試体の上部、4層は供試体の中間部、1層は供試体下部を中心として軸方向ひずみの増加がみられた。

図 5.1.3に示したように、締め固め層数1層は、10層及び4層と比較すると、供試体上部の密度が高かった。**5.2.3(1)**で述べたような理由による一般的な三軸液状化試験の変形挙動を考慮すると、締め固め層数1層の供試体は、変形が発生しやすい供試体上部の密度が高いため、液状化試験における変形に対して有利な可能性がある。しかしながら、**図 5.2.5 (c)**によると、供試体上部の軸方向ひずみの発生は抑えられているものの、供試体下部の軸方向ひずみの発生が顕著であり、 $CSR(N_c=20)$ は3種の締め固め層厚の中で最も低い値を示した(**図 4.3.1**及び**図 4.3.4**)。よって、供試体内に低密度などの弱部がある場合、局所的であっても供試体全体の力学特性に強く影響を及ぼすと考えられる。

以上のことから、**図 4.3.1**及び**図 4.3.4**で示したような山砂を用いた場合の、締め固め層数による液状化強度への影響について、締め固め層数3種のうち4層が最も高い値を示したのは、以下の要因が考えられる。

- 1) **図 5.1.3**から分かるように、4層は、本来、三軸液状化試験で最も軸方向ひずみが卓越する供試体上端付近の密度が高いため、**図 5.2.5 (b)**のように、供試体上端面付近での軸方向ひずみの増加が抑えられている。
- 2) **図 5.1.5**で示されているような極端な密度の変化(1層のような)が、4層の供試体にはない。
- 3) 供試体作製時における密度分布の偏りの影響を受けて、伸張側の軸方向ひずみが集中している箇所があるものの、最も大きい軸方向ひずみは、他のケースと比較すると小さい範囲に収まっている(**図 5.2.5 (a)~(c)**)。

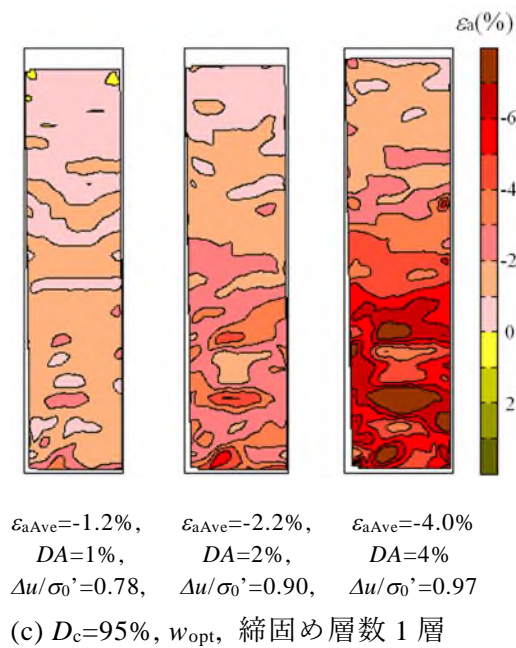
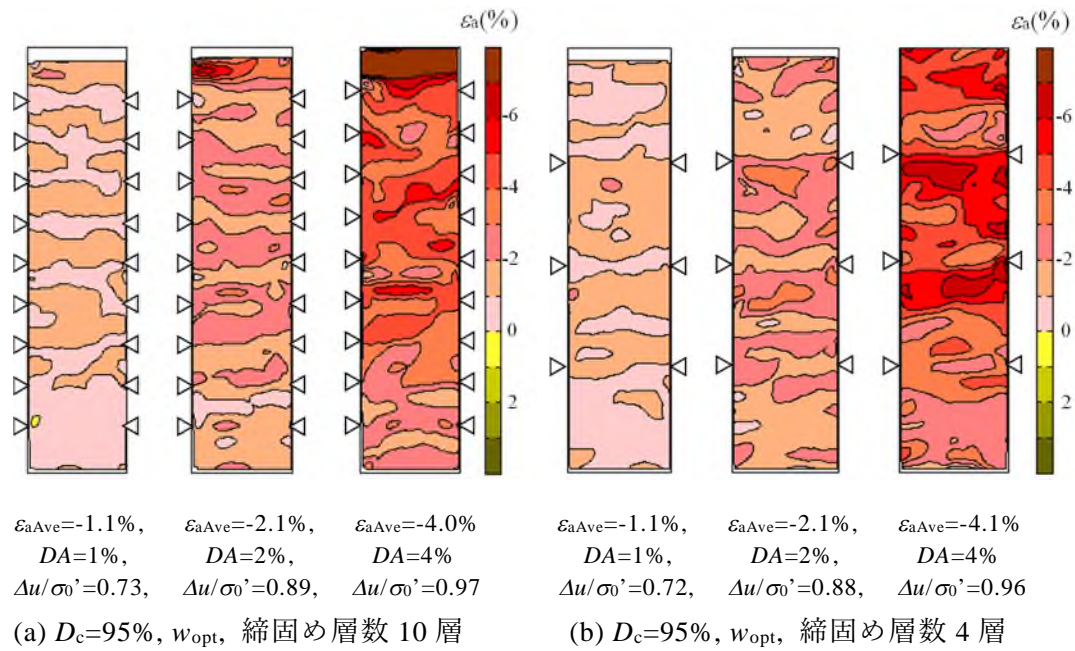


図 5.2.5 WT 法で作製した供試体の軸方向ひずみの分布 (山砂)

要素試験の供試体を作製する場合、供試体内が均質に構成されている方が好ましい。図 5.2.5 (c) の締固め層数 1 層のケースのように、密度分布の偏りによる軸ひずみの集中が発生し、試験結果の過小評価につながる懸念されるためである。ただし、

三軸液状化試験は、荷重による供試体内の密度分布が一様ではないために、図 5.2.5 (b)に示した4層の供試体のように、結果的に軸方向ひずみの分布が比較的均一になり、これが図 4.2.1 で示したような全体的な強度上昇につながる可能性があることが示唆された。

(3) PIVによる画像解析におけるエラー値の検証

ここまで豊浦砂及び山砂のPIVによる検討結果を示してきたが、豊浦砂の画像解析によるコンター図の中で、伸張側のピーク時の画像にもかかわらず、WT法の締固め層数が6層及び4層の $DA=2$ 及び5%での結果に、局所的に圧縮側の軸方向ひずみが生じている領域がある。通常、局所的であっても、三軸液状化試験の伸張側で供試体に圧縮側の軸ひずみが発生するのは考えにくい。しかしながら、図5.2.4の(c)及び(d)では、層数が少ないほど、加えて载荷が進むほど、圧縮側の軸方向ひずみを示すコンターの色調は濃くなり、供試体表面で圧縮ひずみが大きくなっていることを示している。

5.2.2 1)で詳述したように、本研究の画像解析ではメンブレン表面に付したドットの動きによって軸方向ひずみの分布を得ているため、その結果はメンブレンの特性やメンブレンの供試体に対する追随性の影響を受ける。しかしながら、液状化試験では、载荷開始から終了までメンブレンが供試体表面の動きを追随するのは難しいことが予想される。これについて、Zhao et al.¹³⁾は、円柱供試体による繰返し载荷時の画像解析を用いた考察を行っている。Zhao et al.は、画像解析におけるターゲットを、透過性の高いメンブレン上に付したドットと試料内に混ぜたカラーサンドの2種類とし、これらを同一の供試体に対して用いることで、メンブレンと供試体内の挙動の相関について検討を行っている。その結果によると、過剰間隙水圧比が0.98程度より高い領域ではメンブレン上のドットとカラーサンドの挙動の整合性が低い。この要因について、繰返し载荷によって有効応力が減少するとメンブレンと砂との間に滑りが生じることから、両者の動きが整合しなくなる可能性を指摘している。Zhao et al.の実験では、試験試料として珪砂($U_c=2.0$, $D_{50}=0.52$ mm)を使用しているが、同じように粒径幅の狭い砂試料を用いた本研究結果においても、同程度の過剰間隙水圧比付近から砂とメンブレンの間に滑りが生じている可能性があり、図5.2.4の(c)及び(d)で圧縮側の軸方向ひずみを示すコンターがみられた $\Delta u/\sigma'_0=0.95$ 以上の結果では、同様の現象が起こった可能性が考えられる。つまり、初期液状化以降の供試体表面に現れる軸方向ひずみの分布は、メンブレンの挙動の影響を受けていると推察される。

ここで、本研究では供試体の作製・設置に当たって負圧法を併用しているが、WT法では、作製において土を締め固める際にメンブレンへの過度な負担が生じている可能性が想定される。そこで、供試体作製時にかかるメンブレンへの負担を極力低減する

ために、負圧法によらず供試体を作製したケースを実施した。

図 5.2.6 は、図 5.2.4 の(d)と同じく WT 法の 4 層で作製した供試体の $DA=1, 2, 5\%$ 付近におけるコンター図であるが、供試体の作製及び設置は負圧法によらず、図 4.2.5 で示した密度分布のように、別途用意した二つ割りモールド内で供試体を作製し、凍結によって自立させた後に三軸セル内に設置したものである。また、図 5.2.4 と同様、コンター側面には層境付近であることを示すためのマークを付した。

図 5.2.6 のコンター図より、同じ WT 法 4 層で作製した図 5.2.4 の(d)と同様、層境を中心として軸方向ひずみの分布に変化がみられるものの、図 5.2.4 (d)でみられたような繰返し載荷伸張側での圧縮側の軸方向ひずみの増加は確認できなかった。上述のように、WT 法による供試体作製で負圧法を用いる場合、密詰め部付近では、局所的にメンブレンへの負担が増えることによるメンブレン張力増加の可能性が考えられる。この当該箇所では、繰返し載荷による有効応力の減少によって供試体側面とメンブレンとの間に滑りが生じ、供試体作製時に増加したメンブレン張力が解消されてメンブレンが載荷初期より縮んだことから、局所的に圧縮側の軸方向ひずみが発生したような結果につながったと考えられる。このようなメンブレン張力による供試体表面での見かけの局所変位の概略を図 5.2.7 に示す。

なお、図 5.2.6 の凍結供試体による繰返し載荷試験結果は、 $CSR=0.271$ で $N_c(DA=5\%)=18$ 回であり、図 4.1.1 の WT 法、4 層、 $w=4.0\%$ の液状化強度曲線上に位置する値であった。よって、本研究で設定した供試体条件の範囲内では、メンブレンの張力によって供試体表面が局所的に拘束を受けることによる液状化強度への影響は小さいと考えられる。しかしながら、微小な変形の測定や局所的な変位の把握などに当たっては、注意が必要であると推察される。

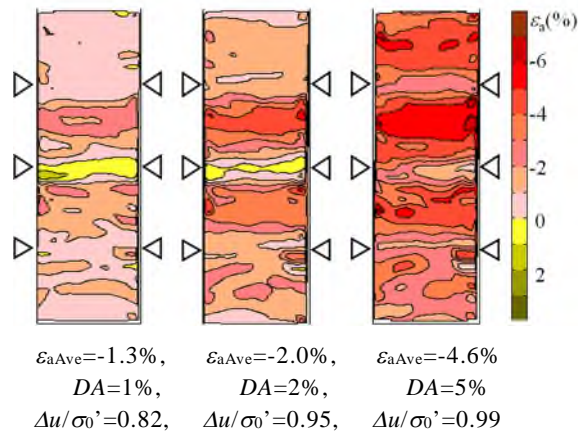


図 5.2.6 豊浦砂，WT 法，4 層で作製後に凍結した供試体の軸方向ひずみの分布

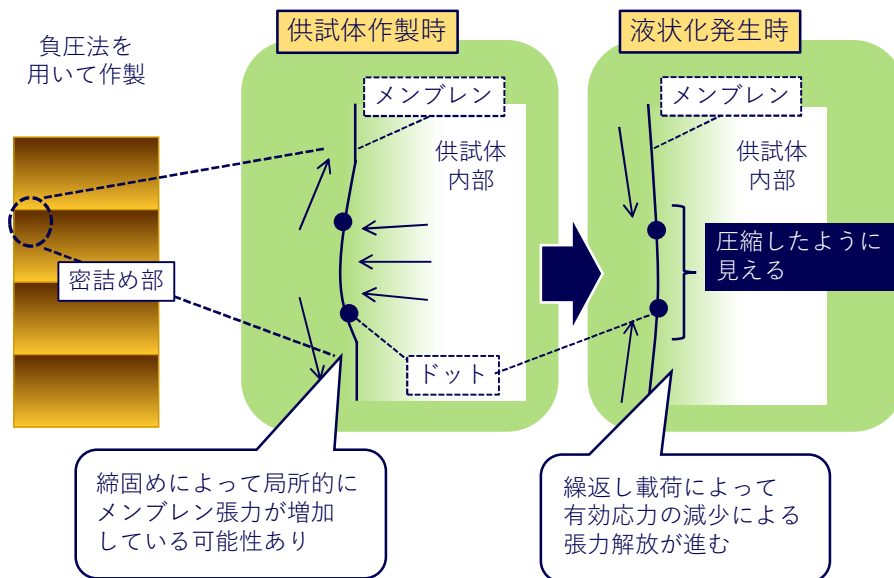


図 5.2.7 メンブレン張力の変化による供試体表面での見かけの局所変位の概略

5.3 2種類の画像解析結果による供試体の不均一性と軸方向ひずみとの関係

上述のように、CTによる供試体作製時の供試体内の密度分布及びPIVによる供試体表面の局所ひずみの結果から、それぞれの結果は、共に供試体内の不均一性の影響を受けていると考えられる。そこで、本節では、各画像解析の結果の相関について検討を行う。

ここで、PIVによる供試体表面の軸方向ひずみは、5.2.3(3)で述べた $\Delta u/\sigma_0'$ の上昇に伴って生じる供試体側面とメンブレンとの滑りを考慮すると、豊浦砂は $DA=1\%$ 程度、山砂は $DA=2\%$ 程度でそれぞれ $\Delta u/\sigma_0'=0.90$ 付近であり、その後は $\Delta u/\sigma_0'$ が0.95を超えることから、上記の各 DA におけるコンターとCTの結果によって得られた平均輝度値との関係について検討する。

図5.3.1及び図5.3.2は、豊浦砂及び山砂の供試体作製時の密度分布及び軸方向ひずみのコンターを併記したものであり、各試料共に、締固め層数は10層及び4層のデータである。併記したコンターは、上述のように、豊浦砂は $DA=1\%$ 、山砂は $DA=2\%$ とした。また、密度分布は、図4.2.6及び図5.1.4と同様である。

図5.3.1(a)より、豊浦砂の10層のケースでは、全体的な密度分布の傾向は読み取れるものの、層数に対して密度の測定点が16点程度であったことから、密度分布とコンターとの詳細な考察は難しい。一方、締固め層数4層の方は、いずれの試料も、同一層の中に密度分布のプロットを4点以上確保できたため、本節の検討では、豊浦砂供試体の検討は、締固め層数4層のデータを用いて詳細を調べる。

図5.3.1(b)及び図5.3.2(b)より、4層で作製した供試体の場合、繰返し载荷による軸方向ひずみは、試料の違いによらず供試体内の層境直下で大きくなっている。しかしながら、密度分布との関係において試料間の相違が出た。図5.3.1(b)より、豊浦砂4層の場合、コンター上で最も軸方向ひずみが卓越した領域は、密度分布のグラフ上、軸方向ひずみが発生しやすいと想定される低密度の領域や、密度の変化がある領域との相関はみられなかった。他方、図5.3.2(b)に示す山砂4層のケースでは、供試体の上端から1つ目及び2つ目の層境直下において密度分布の傾向に変化があり、いずれも供試体内の軸方向ひずみが卓越した領域と合致した結果が得られた。

また、図5.3.2(a)に示す山砂の10層のケースでは、密度分布の変化によらず、供試体の上端付近で軸方向ひずみが卓越していることがわかる。

以上の結果から、繰返し载荷による軸方向ひずみは、ある程度の層厚がある供試体

では同一層内の密度変化の影響を受け、10層程度の薄層では層内の密度の不均一さやそれに伴う層境の影響は少なくなる可能性があると考えられる。ただし、本検討では、両試料で密度分布の測定方法が異なるために詳細な比較が困難であったことから、同じ条件のデータによる検討が望まれる。

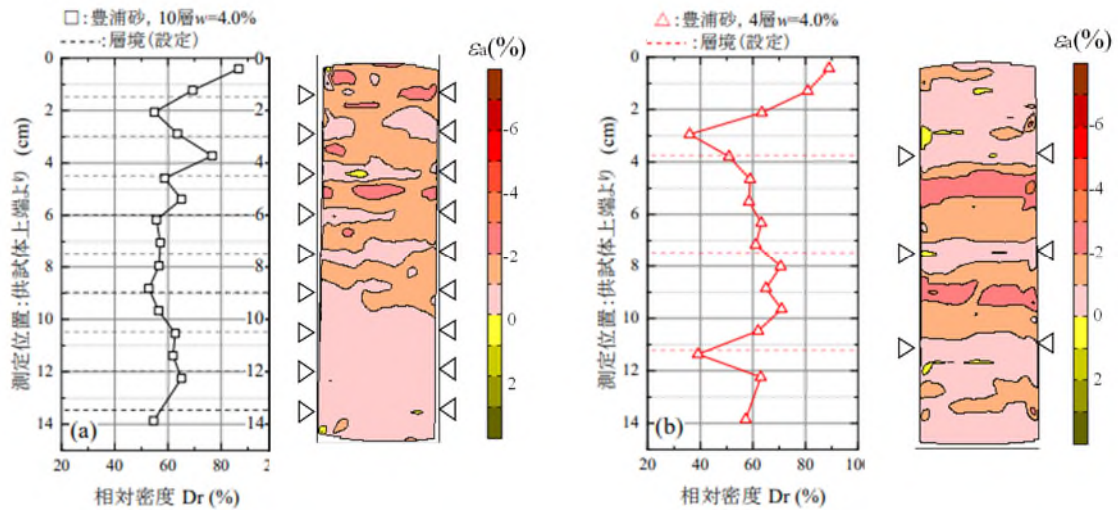


図 5.3.1 供試体作製時の密度分布及び繰返し載荷時の軸方向ひずみ
(豊浦砂, $D_r=60\%$, $w=4.0\%$, $DA=1\%$) (a) 締固め層数 10 層, (b) 4 層

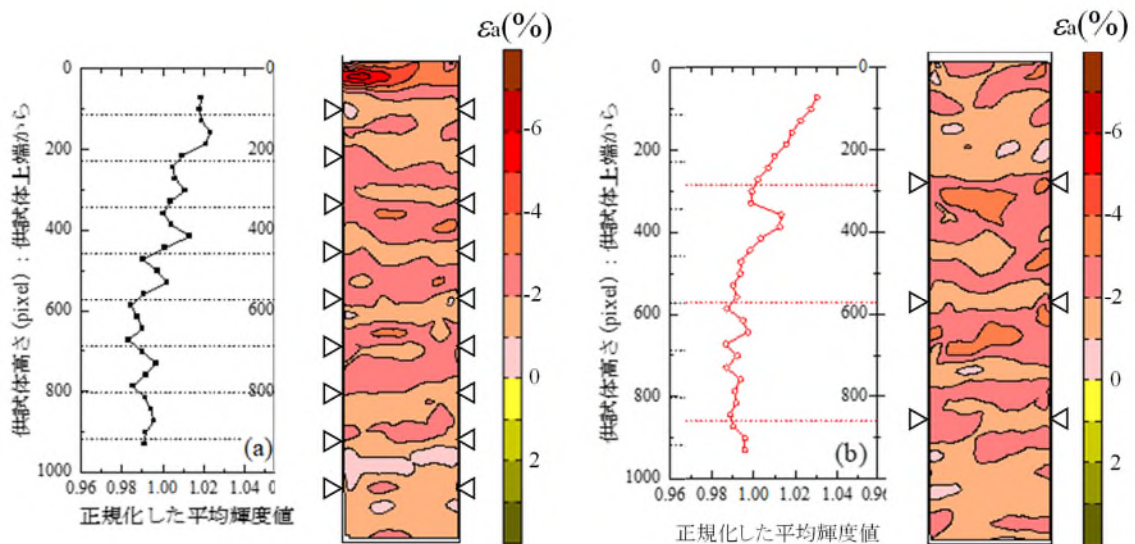


図 5.3.2 供試体作製時の密度分布及び繰返し載荷時の軸方向ひずみ
(山砂, $D_c=95\%$, w_{opt} , $DA=2\%$) (a) 締固め層数 10 層, (b) 4 層

5.4 本章のまとめ

本章では、3章で設定した条件の供試体の中から代表的なものを用いて、X線CT及びPIVによる画像解析を実施し、その結果及び考察を記した。これらの概要は、以下のとおりである。

- (1) X線CTによって計測した山砂供試体内の密度分布は、締固め層厚による傾向の違いがみられ、締固め層厚が厚い供試体ほど、密度の分布範囲が広くなることが分かった。また、厚層で締め固めた供試体ほど、密度の度数分布のバラつきが大きくなる傾向を示した。加えて、いずれの供試体も、層境付近における密度の変化が観察された。
- (2) 3種類の締固め層厚で作製した豊浦砂供試体でPIVによる画像解析を行った結果、繰返し载荷による軸方向ひずみの分布は、締固め時の層厚によって異なる傾向を示した。軸方向ひずみの分布は、10層及び6層では、層境の影響が見られる一方で、比較的均一な密度構成と考えられる空中落下法による供試体のように、供試体上端面に近いところでの軸方向ひずみの集中がみられた。他方、4層の供試体は、層境付近に軸方向ひずみが集中する傾向がみられた。
- (3) 3種類の締固め層厚で作製した山砂供試体でPIVによる画像解析を行った結果、繰返し载荷による軸方向ひずみの分布は、3種類の供試体それぞれで特徴的な挙動を示した。特に、 $DA \geq 4\%$ では、軸方向ひずみが卓越する範囲に明確な違いがあり、10層は供試体の上部、4層は供試体の中間部、1層は供試体下部で軸方向ひずみの増加がみられた。
- (4) 山砂の液状化試験結果による $CSR(N_c=20)$ は、締固め層数4層、10層、1層の順に高い値となった(4章による)。4層が最も高い値を得た要因は、液状化試験結果による考察からは不明瞭であったものの、本章のPIVによる画像解析結果によると、締固め層数4層は、供試体表面における軸方向ひずみの発生の偏りが比較的小さかったことにあると想定される。これは、CTによる画像解析結果によって得た供試体作製時の密度分布によると、4層の供試体は、本来、軸方向ひずみの発生が大きい領域で高い密度が形成されていたことや、1層ほど局所的な密度のバラつきが無く、結果的にバランス良く供試体に変形したためであると考えられる。

(5) 2 種類の画像解析の結果を用いて供試体内の密度分布と軸方向ひずみとの関係について調べた。その結果、ノギス法によって密度分布を測定した豊浦砂では、密度変化が大きい部分についての相関はみられたものの、細部についての考察は困難であった。一方、密度分布の検討に CT を用いた山砂では、密度変化と軸方向ひずみの分布との関係にある程度の相関がみられた。

以上のような 2 種類の画像解析を用いた供試体内の性状及び局所的挙動並びに三軸液状化試験による供試体全体に対する結果については、検討例が少ない。しかしながら、本研究の検討結果によると、力学試験実施に先行して CT 画像撮影などを取り入れて供試体の状態を把握することで、より有効な条件による要素試験の実施が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 松村聡, 水谷崇亮, 篠永龍毅: マイクロフォーカス X 線スキャナを用いた地盤工学への新たなアプローチ, 港湾空港技術研究所資料, No.1313, Dec, 2015.
- 2) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y. : Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 2, pp. 111-118, 2000.
- 3) 吉川直孝, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 西尾 伸也: 画像処理技術を用いた三軸試験における砂質土のせん断層の評価, 土木学会論文集 C, No.63, 1号, pp.59-71, 2007.
- 4) 小高 猛司, 寺本 優子, 平手 寿大, 元山 泰久: 圧縮ベントナイト緩衝材のせん断破壊時の性能評価, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 2, pp. 207-218, 2010.
- 5) 川尻 峻三, 田中 政典, 川口 貴之, 猶原 有希子, 平林 弘, 中村 大, 山下 聡: X 線 CT スキャンによるベーンせん断試験時のせん断機構の解釈, 地盤工学ジャーナル, Vol. 12, No. 1, pp. 79-90, 2017.
- 6) 平ら: ボーリングコアの X 線 CT スキャン解析による東北地方太平洋沖地震における地盤液状化層の同定, 地質工学雑誌, Vol.118, No.7, pp.410-418, 2012.
- 7) 吉津洋一, 井関恭輔, 井関宏崇, 中島伸一郎, 岸田潔: X 線 CT を用いた Modified GIN 工法導入地点でのグラウト浸透状況の可視化, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.76, No.4, pp.394-404, 2020.
- 8) White, D. J., Take, W. A. and Bolton, M. D.: Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique* 53, No.7, pp.619-631, 2003.
- 9) 池田清宏, 市村強, 高村浩之, 須藤良清, 堤成一郎: 土の平面ひずみ供試体の変形挙動の分岐メカニズムに基づく画像処理法, 土木学会論文集, No. 757, III-66, pp. 167-176, 2004.
- 10) 中出雄也, 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正: PIV を用いた三軸試験における締固め土の力学特性, 第 45 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.717-718, 2010.
- 11) 宮下千花: 固結した地盤材料の変形強度特性の拘束圧・载荷速度依存性, 東京大学大学院博士論文, 2016.
- 12) Zhao, C. : Direct and indirect local deformation measurements of sand specimen in undrained cyclic triaxial and torsional shear tests, 東京大学大学院博士論文, 2017.

13) Zhao,C., Koseki,J. and Miyashita,Y. : Direct and indirect local deformations of sand in undrained cyclic triaxial tests by image analysis technique, *Advances in Laboratory Testing and Modelling of Soils and Shales*, ISSMGE, pp.215-222, 2017.

第6章 三軸試験の供試体作製方法における提案

本章では、まず、本研究で使用した2種類の砂質土による液状化強度と締固め層数との関係を整理し、その後、締固め法で三軸供試体を作製する際の適切な層数について述べている。さらに、供試体作製時の推奨事項についてまとめた。

6.1 力学試験及び画像解析結果による土の締固めと液状化強度に関する検討

4章及び5章の結果によって、本研究の範囲内では、単粒に近い砂質土及び粒径幅の広い砂質土共に、締固め層厚の違いによって三軸液状化特性に影響が出ることが明らかにされた。ここでは、4章で述べた液状化強度と締固め層数との関係について、さらなる考察を行う。

図6.1.1は、液状化強度曲線から得られる $CSR(N_c=20)$ を、同じ D_c の10層の $CSR(N_c=20)$ で正規化した値と締固め層数との関係であり、4章では試料ごとに整理したが、図6.1.1では、表3.2.2の供試体作製条件一覧の中で、締固め層厚による比較ケースがある全ての供試体条件を記載している。

図6.1.1より、豊浦砂を用いた供試体の場合、締固め層厚が薄くなるほど正規化した $CSR(N_c=20)$ の値は高くなり、10層と4層の比較では、10層の $CSR(N_c=20)$ 値の方が10%程度高い。他方、山砂による結果は豊浦砂の傾向とは異なり、 $CSR(N_c=20)$ の値は、10層より4層の方が5%程度高い。また、10層と4層の強度比の差は豊浦砂の方が大きく、試料による結果の相違がみられた。

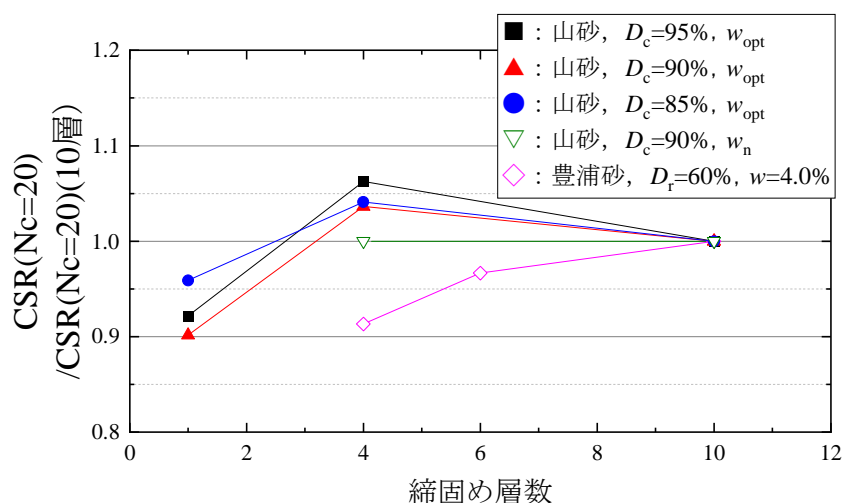


図 6.1.1 正規化した液状化強度～締固め層数（豊浦砂，山砂）

一般的に、土の力学特性において、供試体内に形成された弱部は、その供試体全体の強度に影響を及ぼすことが多い。図 6.1.2 に、豊浦砂を用いた繰返し非排水三軸試験による $CSR(N_c=20)$ を D_r 及び D_c との関係でまとめた。図中の $CSR(N_c=20)$ は、図 4.2.1 の結果を引用した。各 $CSR(N_c=20)$ 上に引かれた実線及び破線は、図 4.2.6 における D_r の範囲及び D_r を D_c に換算したときの D_c の範囲を示している。また、図中には、Tatsuoka et al.¹⁾ による豊浦砂の繰返し非排水三軸試験結果から得た AP 法及び WT 法によるデータも併記した。

図 6.1.2 より、 $CSR(N_c=20)$ が比較的低い 4 層の供試体は、供試体内に分布する密度の範囲が 10 層の供試体より広いことが分かる。特に、密度の最小値は、10 層と比較すると極端に低く、 $D_r=35\%$ 程度である。Tatsuoka et al.の結果によると、 D_r の変化による三軸液状化強度への影響の度合は、密度の変化に対して一律ではなく、 D_r が高くなるにつれて $CSR(N_c=20)$ の上昇に対する効果が高くなっている。また、 $CSR(N_c=20)$ が上昇する密度の範囲は、供試体作製方法によっても異なる。例えば、図 6.1.2 の関係において、AP 法では $D_r=80\%$ 付近から D_r の変化に対する $CSR(N_c=20)$ の立ち上がりが見られるが、WT 法では $D_r=60\sim 70\%$ においてその傾向が確認される。図 6.1.1 内に示した供試体の D_r の幅は、これら $CSR(N_c=20)$ の立ち上がり部の D_r の範囲を含むことから、同じ供試体内であっても、少なくともこの程度の密度のバラつきと、それに伴う強度変化があることが想定される。

なお、豊浦砂のような砂試料がわずかな含水を持つ場合、 D_r の範囲はマイナスの領域に及ぶ²⁾。つまり、供試体作製時の試料の扱い方によっては、供試体内に、図 6.1.2 に示す下限値よりはるかに低い密度が局所的に形成される可能性もある。

図 6.1.3 に、山砂のデータを用いて、図 6.1.2 と同様の整理を行った結果を示す。ここでは、図 4.3.1 の液状化強度曲線の中から w_{opt} による結果を引用した。また、図中に示す破線は、図 6.1.2 と同様、供試体内に分布する密度の最小・最大の範囲を示している。この図 6.1.3 における D_c の範囲は、図 5.1.3 における平均輝度値の平均値と供試体全体の乾燥密度とが一致すると仮定して算出した結果をプロットしたものであり、いずれも供試体上端から 10~120 mm の範囲のデータである。

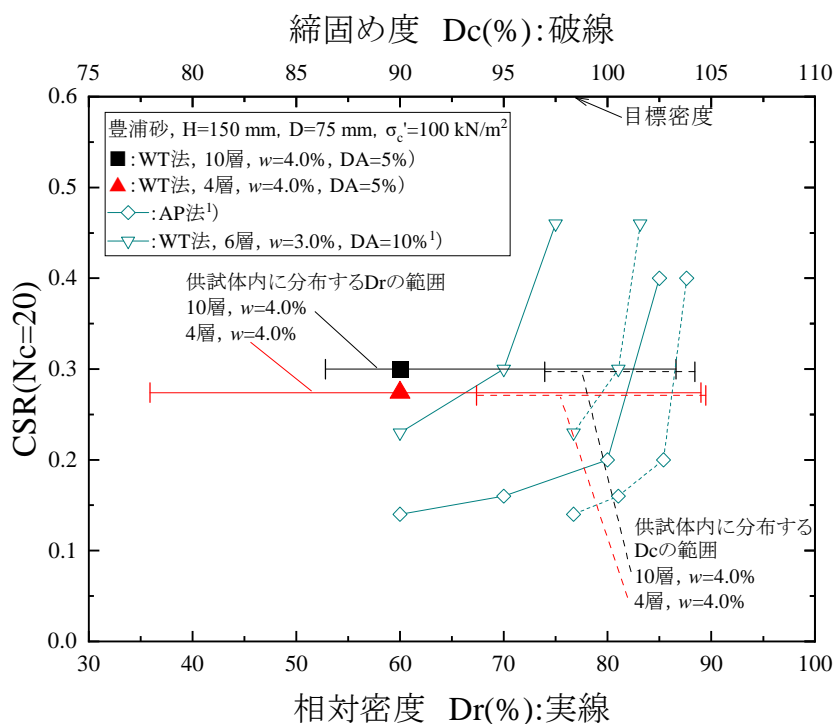


図 6. 1. 2 液状化強度～相対密度, 縮固め度の関係 (豊浦砂)

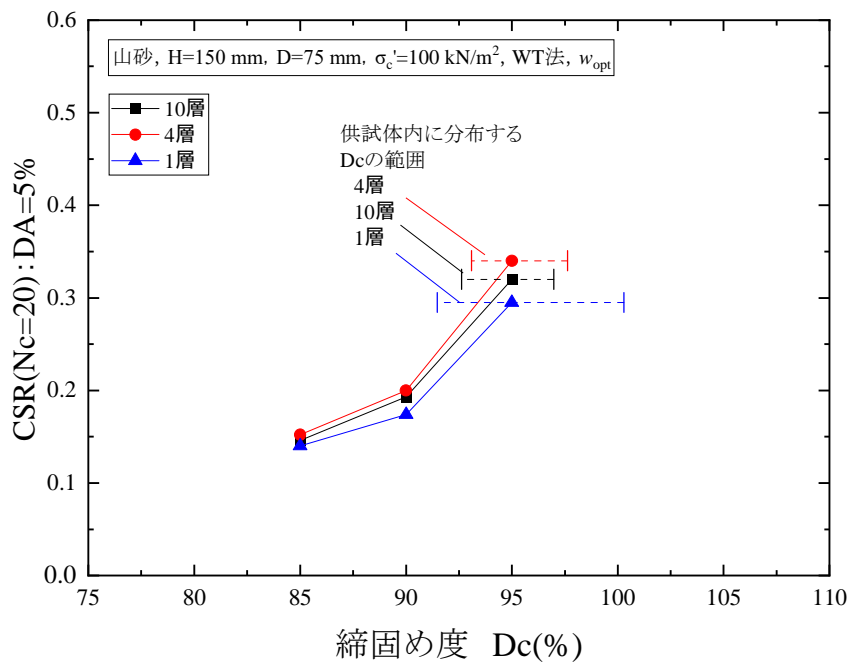


図 6. 1. 3 液状化強度～縮固め度の関係 (山砂)

図 6.1.3 では、破線で示した D_c の最小値が小さいほど $CSR(N_c=20)$ も低い値を示しており、豊浦砂と同様の結果が得られた。締固め層数による D_c の最小値の差は、4 層から 10 層が 0.5% 程度、4 層から 1 層が 1.5% 程度であり、特に 4 層と 10 層の違いはわずかである。ただし、図 4.3.3 でも示したように、山砂の $D_c=90\sim95\%$ は $CSR(N_c=20)$ の変化が大きい範囲であることから、わずかな密度変化であっても結果に影響を及ぼす可能性がある。また、本研究の場合、供試体内に分布する D_c の最大値による評価では、 $CSR(N_c=20)$ との相関は確認できなかった。

上述のように、図 6.1.1 の 10 層と 4 層による液状化強度の変化は、山砂より豊浦砂の方が大きかった。このことは、図 6.1.2 及び図 6.1.3 で示したように、豊浦砂の D_c の範囲と比較すると、同じ締固め層数における山砂の D_c の範囲は狭く、比較的安定した構造を有することを示唆するものであろう。なお、5 章で述べたように、山砂の D_c の範囲は CT 画像の解析結果から得たため、供試体上端 0 mm から下端全ての密度分布ではないことに注意が必要である。

以上の結果から、供試体内に密度の低い領域が形成されたケースほど、液状化強度は低くなることが定量的に示された。また、これらの傾向は粒度組成の違いによらず、同様であることがわかった。

6.2 湿潤締固め法における適切な締固め層厚の検討

3章で述べたように、三軸試験の供試体作製方法についての学会基準である **JGS 0520** には、締固めの回数に対する具体的な要求事項は明記されていない。そこで本節では、本研究の成果を基に、湿潤締固め法における適切な締固め層数について述べる。

(1) 締固め層厚の上限値

本研究の山砂供試体では、締固め層数を 10、4 及び 1 層の 3 種類としたが、**図 5.1.3** の供試体内の平均輝度値分布からわかるように、締固め層数 1 層による供試体は、供試体内密度の極端な偏りがみられた。この 1 層の供試体内の密度のバラつき（平均輝度値の最大値と最小値との差）は、供試体の上端から 10~120 mm の範囲で 10 層及び 4 層の約 2 倍である。また、この 1 層のケースでは、**図 5.2.5 (c)**にも示されているように、繰返し载荷中に供試体の軸方向ひずみが集中したエリアは、通常の三軸液状化試験で軸ひずみが卓越するエリアからは離れていた。一方、締固め層数 10 層及び 4 層は、1 層ほど軸方向ひずみの分布の傾向に、大きな違いはみられなかった。よって、本研究で用いた山砂のように突固めによる締固め効果が高い試料の場合、繰返し非排水三軸試験に用いる供試体の締固め層数は、4 層以上の層数、つまり 4 層より薄い層厚から必要に応じて選択することが望ましいと考えられる。

実務において、このような比較実験を行うことは難しい場合が多い。しかしながら、例えば、本研究で採用したノギス法や X 線 CT による密度分布の確認など、設備面の許容範囲で何らかの事前調査・確認を行うことによって、試験結果の高精度・高品質化を図ることができるといえる。

また、豊浦砂の供試体では、締固め層数を 10、6 及び 4 層の 3 種類としたが、その変形挙動の傾向は 4 層で変化がみられたことから、供試体サイズや含水比（特に本研究で採用した乾燥側のケース）など締固め時の条件によっては、4 層付近を限界とすることが適切な可能性がある。

(2) 締固め層厚の下限值

上記(1)では締固め層厚の厚さの限度についてまとめたが、ここでは、薄層の許容値について述べる。

これまで、薄層の限界値については、3.1.3 (2)で述べたように、最大粒径に対する許容値によって決められることが多かった。しかしながら、4.4.1の結果によると、締固め層数10層で作製した豊浦砂供試体では、ネッキングを呈する供試体が続出し、供試体内に弱部、つまり不均一な部分が存在したと予想される。この原因としては、供試体作製における層境の乱しや、各層における試料のまき出しに当たって、供試体断面に対して試料が均等に配置されていないことなどによる供試体内の不均一さが考えられる。このような薄層供試体のネッキングは、山砂供試体による試験ではみられなかったことから、締固め層厚の薄さが液状化特性に及ぼす影響は、試料の粒度組成によっても異なることが予想される。豊浦砂のような粒径幅の狭い試料では、密度差が同じであっても山砂のような粒径幅の広い試料と比較すると、相対的なバラツキの幅が広くなるため、上記のような弱部の形成がされやすい可能性が考えられる。

このように、豊浦砂のように締固め効果が低く、再現可能な密度の範囲が狭い試料では、層厚の薄さによる力学特性への影響が大きくなり易いと考えられる。よって、単粒に近い粒度をもつ試料の場合、締固め層数は10層のような薄層による作製は避けて6層程度を目安に選択するか、4.4.1の後半で述べたように、薄層の供試体作製では、層境を乱さずに作製することを選択肢の一つとすることが望ましいといえる。

(3) 供試体寸法の違いによる締固め層厚への影響

本研究では、直径 75 mm の供試体を用いて供試体内の不均一性に関する検討を行ったが、**JGS 0520** では直径 35～100 mm の供試体を扱っており、実務において締固め法の適用が多い再構成供試体に限定しても直径 50～100 mm と様々である。よって、本研究で検討したような供試体内の不均一性について、供試体寸法の違いが及ぼす影響は、不明確である。そこで、供試体寸法が異なる場合、締固め層厚の影響がどのように変化するか、本研究の成果を踏まえて考察する。

以下に、直径 50 mm 及び 100 mm で高さを直径の 2 倍とした供試体についてまとめた。なお、試料の最大粒径は、最も小さいサイズの供試体に対して十分小さいものがあり、各サイズ共通とする。

表 6.2.1 に、同じ締固め層数の場合の、供試体径による層厚の違いを整理した。この表 6.2.1 中、締固め層厚 25 mm 又は締固め層数が 4 層の場合の締め固め状況について推察した。その結果が表 6.2.2 及び表 6.2.3 である。

ここで、図 6.2.1 に、モールド内壁からの距離と供試体内の間隙比との関係を示した奥山ら³⁾の研究成果を示す。奥山らによると、単一粒径に近いガラスビーズを用いて最大密度程度まで試料をモールド内に詰めた場合、モールドの内壁から近い領域にはゆるみが生じ、そのゆるみが発生する範囲は、概ねモールドの内壁から $0.5D_G$ (D_G : ガラスビーズの直径) までとしている。この場合、緩詰め部分の体積は、モールドの寸法によらず試料によって決まるため、直径が小さい供試体ほど、その影響の範囲が大きい。これらの研究成果を基に、以下の考察を行う。

表 6.2.1 供試体径に対応する締固め層厚の例

| | | | |
|-------------|------|------|------|
| 直径 | mm | 50 | 100 |
| 高さ | mm | 100 | 200 |
| 試料の許容最大粒径 | mm | 9.5 | 19 |
| 締固め層厚 mm | 4 層 | 25.0 | 50.0 |
| | 6 層 | 16.7 | 33.3 |
| | 8 層 | 12.5 | 25.0 |
| | 10 層 | 10.0 | 20.0 |
| | 15 層 | 6.7 | 13.3 |

表 6.2.2 締め固め層厚が固定（25 mm）の場合の締め固め状況の比較（推定）

| 供試体条件 | | 側面の干渉 | 密度勾配 | 供試体内の 密度のバラつき |
|-----------|--------|-------|------|------------------|
| 直径 50 mm | 層数 4 層 | 大 | 大 | 大 |
| 直径 100 mm | 層数 8 層 | 小 | 小 | 小 |

表 6.2.3 締め固め層数が固定（4 層）の場合の締め固め状況の比較（推定）

| 供試体条件 | | 側面の干渉 | 密度勾配 | 供試体内の 密度のバラつき |
|-----------|----------|-------|------|------------------|
| 直径 50 mm | 層厚 25 mm | 大 | 小 | 不明 |
| 直径 100 mm | 層厚 50 mm | 小 | 大 | 不明 |

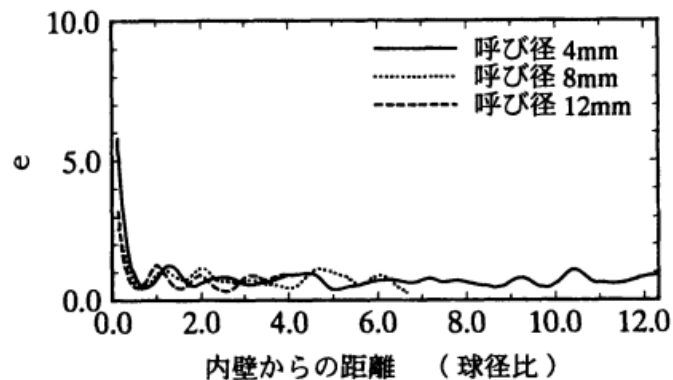


図 6.2.1 モールド内壁からの距離と間隙比の関係³⁾

表 6.2.2 は、締め固め層厚が固定（25 mm）の場合の締め固め状況の比較であり、表 6.2.3 は、締め固め層数が固定（4 層）の場合の締め固め状況の比較である。ただし、各表の記載内容は、推定によるものである。

円柱供試体の場合、高さを固定とすると、供試体側方の面積の変化は直径の関数として表現されることから、直径が小さいほどモールド内に投入した試料は締め固めにくくなる。そのため、表 6.2.2 のように層厚固定の場合、供試体直径が小さいほど深

さ方向の密度勾配は形成されやすく、供試体内の密度のバラつきは大きくなると考えられる。

一方、表 6.2.3 のように締固め層数が固定（4 層）の場合、供試体径が 50 mm の供試体は、供試体径 100 mm と比較すると供試体の体積に対する供試体側方の面積の比率が大きいことから締め固めにくくなる。一方で、締固め層厚は直径 50 mm の方が薄層であり、本研究の結果によると密度のバラつきは抑えられるが、実際の締固めでは、これら 2 つの要因が相殺される可能性があることから、本研究の対象外のサイズによる供試体を用いる場合、実際の供試体を用いた測定結果による検討が必要といえる。

6.3 結果の適用

本節では、本研究で得た知見を中心に、バラつきの少ない供試体の作製に当たっての推奨事項を示す。

(1) 締固め層数について

直径 75 mm、高さ 150 mm の湿潤締固め法による供試体を作製する場合、締固め層厚及びそれらに付随する適用条件についての推奨事項を以下に記す。

- a) 粒径幅が広い試料の場合、供試体の締固め層数は、4～10 層の中から選択することが望ましい。また、単粒に近い粒度組成の試料の場合は、6 層程度より厚い層数を選択することが望ましい。ただし、単粒に近い試料で 10 層程度の薄層による作製を行う場合、層境を乱さずに作製することで結果のバラつきを回避できる可能性がある。
- b) 供試体に対して局所的な測定を行う場合は、供試体内の密度のバラつきを考慮して、最大粒径に影響のない範囲（本研究の範囲では、層厚／最大粒径 ≥ 3 ）で層数を多くすることが望ましい。ただし、一般的には、締固め層数 3～6 層を用いることが多いことから、例えば、過去のデータとの比較検討では、それらとの相関を念頭に置き、厚層による作製も選択肢とする。必要な場合、事前に比較実験を行うことで、層厚によるバラつきの範囲を把握すると良い。
- c) 三軸供試体で粒径幅が広い試料を用いる場合、繰返し载荷による変形を比較的均一にすることが重要視されるケースでは、締固め層数 4 層付近での作製が推奨される。ただし、適用に当たっては、代表的な载荷条件での事前実験によって変形挙動の確認を行うことが望ましい。

(2) 土の締固めに当たって

- a) 供試体を締め固めるときのタンパーは極力全断面に近いサイズとし、可能な範囲で高い締固めエネルギーを与えると、供試体内の密度分布のバラつきを抑えやすいと考えられる。

以下は、本研究の検討結果によるものではないが、締固め法による供試体の作製時に当たって、バラつきを抑えるための推奨事項である。

- b) 試料の投入や試料を締め固めるときに、モールドに付着する試料は、早い段階で当該締固め層の試料の中に戻し、他の試料と共に締め固めることが望ましい。
- c) 試料の投入に当たっては、モールド内に試料が偏って入らないように、少量ずつ投入し、その際に、断面積に対する偏りが少なくなるように試料を配置する。
- d) 手突きによる締固めでは、打撃方向が偏らないように注意する。可能な場合、所定の回数ごとにモールドを回しながら（例えば 90°ごと）打撃する。

6.4 本章のまとめ

本章では、湿潤締固め法の締固め層厚が液状化強度に与える影響において、粒度組成による傾向の違いについての検討を行った。また、以上の結果から、湿潤締固め法において推奨される締固め層数についてまとめた。それら結果は、次のとおりである。

- (1) 2種類の砂質土による締固め層数の違いについて、 $CSR(N_c=20)$ と密度との関係による比較検討を行った。本研究で採用した供試体条件の場合、締固め層厚の変化による $CSR(N_c=20)$ への影響は、用いる試料によってその傾向に違いがみられたが、異なる粒度組成の試料であっても、供試体内に密度の低い領域が形成されたケースほど、 $CSR(N_c=20)$ は低くなった。
- (2) 本研究で用いた山砂のように粒径幅の広い試料の場合、WT法における締固め層数の適切な範囲は、下限値を4層、上限を10層以下とし、可能であれば、事前実験や密度測定などによって、供試体の再現性が高い範囲を把握することが望まれる。
- (3) 豊浦砂のように単粒に近い粒度組成の試料の場合、6層程度より厚い層数を選択することが望ましい。

参考文献

- 1) Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S., Okamoto, M. : Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.23-41, 1986.
- 2) 小丸裕介, 吉嶺充俊, 菊池喜昭, 水谷崇亮 : 非常に緩く均質な砂の供試体作成, 地盤工学会関東支部発表会発表講演集, 第7回, pp.24-27, 2010.
- 3) 奥山一典, 藤原身江子, 越智洋秀, 井上真理子 : 砂の最大・最小密度試験における最大粒径制限値の拡大に関する研究, *土木学会論文集*, No.638, III-49, pp.11-27, 1999.

第7章 結論及び今後の課題

7.1 結論

本研究では、粒度組成が異なる2種類の砂質土を用い、湿潤締固め法によって作製した供試体を用いて繰返し非排水三軸試験と2種類の画像解析を行った。その結果、本研究で作製した供試体（直径75 mm、高さ150 mm）では、以下の知見が得られた。

- (1) 豊浦砂を用いて締固め層数を変化させた液状化試験を行った結果、締固め層厚が薄くなると $CSR(N_c=20)$ は増加し、その変化率は、4層と比較したときの10層では9%程度であった。ただし、繰返し载荷中の軸ひずみの挙動は、本研究の範囲で $CSR(N_c=20)$ が最も高かった10層において、最も低い $CSR(N_c=20)$ を示した空中落下法の供試体に近い挙動を示した。
- (2) 締固め層数10層及び4層で作製した豊浦砂供試体で、初期の密度分布を測定した。その結果、いずれの供試体においても、供試体内の密度分布が不均一であることがわかった。これらは、供試体の上部ほど密度が高く、締固め層厚が厚い方が、密度のバラつきが大きかった。
- (3) 締固め時含水比4.0%及び2.5%による豊浦砂供試体の液状化強度への影響は、含水比の差が1.5%であっても20%程度の強度変化がみられ、2.5%の方が低かった。また、繰返し载荷中の挙動は、間隙水圧・軸ひずみ共に、4.0%の方が漸増的であった。
- (4) 豊浦砂の湿潤締固め法による供試体では、締固め層数が10層のような薄層の場合、繰返し载荷において局所的な変位をおこすケースがみられた。これについて、豊浦砂のような単粒に近い試料を用いて薄層による供試体を作製した場合、供試体作製時の層境の乱しなど、わずかな粒子構造の違いが結果に大きく影響を及ぼした可能性が考えられる。
- (5) 3種類の締固め層厚で作製した豊浦砂供試体でPIVによる画像解析を行った結果、繰返し载荷による軸方向ひずみの分布は、締固め時の層厚によって異なる傾向を示した。軸方向ひずみの分布は、10層及び6層では、層境の影響が見られる一方で、比較的均一な密度構成と考えられる空中落下法による供試体のように、供試体上端面に近いところでの軸方向ひずみの集中がみられた。他方、4層の供試体は、

層境付近に軸方向ひずみが集中する傾向がみられた。

- (6) 山砂を用いて 3 種類の締固め層厚による供試体を作製し、液状化試験を行った結果、 $CSR(N_c=20)$ は、締固め層数 4 層、10 層、1 層の順に高い値となった。締固め度 3 種の中で、 $D_c=95\%$ 及び 90% と $D_c=85\%$ とを比較すると、 $D_c=85\%$ の締固め層厚の違いが $CSR(N_c=20)$ に及ぼす影響は小さく、その影響の程度は供試体作製時の密度によって異なっていた。また、繰返し载荷中の軸ひずみの発生や過剰間隙水圧の上昇傾向については、 D_c によらず 10 層及び 4 層に分けて締め固めた供試体の挙動は比較的類似していたものの、1 層は他の 2 ケースと異なる挙動を示した。
- (7) 2 種類の締固め含水比で作製した山砂供試体の液状化特性は、 $CSR(N_c=20)$ による評価では変化の程度は小さかったものの、繰返し载荷中の変形特性は大きく異なり、比較的低含水比の供試体は、緩詰め供試体に似た挙動を示した。これは、含水比の違いが、供試体作製時の粒子構造に影響を及ぼすためであると考えられる。
- (8) X 線 CT によって計測した山砂供試体内の密度分布は、締固め層厚による傾向の違いがみられ、締固め層厚が厚い供試体ほど、密度の分布範囲が広くなることが分かった。また、厚層で締め固めた供試体ほど、密度の度数分布のバラつきが大きくなる傾向を示した。加えて、いずれの供試体も、層境付近における密度の変化が観察された。
- (9) 3 種類の締固め層厚で作製した山砂供試体で PIV による画像解析を行った結果、繰返し载荷による軸方向ひずみの分布は、3 種類の供試体それぞれで特徴的な挙動を示した。特に、 $DA \geq 4\%$ では、軸方向ひずみが卓越する範囲に明確な違いがあり、10 層は供試体の上部、4 層は供試体の中間部、1 層は供試体下部で軸方向ひずみの増加がみられた。
- (10) 山砂の液状化試験結果による $CSR(N_c=20)$ は、締固め層数 4 層、10 層、1 層の順に高い値となった。4 層が最も高い値を得た要因は、液状化試験結果による考察からは不明瞭であったものの、PIV による画像解析結果によると、締固め層数 4 層は、供試体表面における軸方向ひずみの発生の偏りが比較的小さかったことであると想定される。これは、CT による画像解析結果によって得た供試体作製時の密度分布によると、4 層の供試体は、本来、軸方向ひずみの発生が大きい領域で高い密度が形成されていたことや、1 層ほど局所的な密度のバラつきが無く、結果的にバランス良く供試体が変形したためであると考えられる。

- (11) 2 種類の画像解析の結果を用いて供試体内の密度分布と軸方向ひずみとの関係について調べた。その結果、ノギス法によって密度分布を測定した豊浦砂では、密度変化が大きい部分についての相関はみられたものの、細部についての考察は困難であった。一方、密度分布の検討に CT を用いた山砂では、密度変化と軸方向ひずみの分布との関係にある程度の相関がみられた。
- (12) 2 種類の砂質土による締固め層数の違いについて、 $CSR(N_c=20)$ と密度との関係による比較検討を行った。本研究で採用した供試体条件の場合、締固め層厚の変化による $CSR(N_c=20)$ への影響は、用いる試料によってその傾向に違いがみられたが、異なる粒度組成の試料であっても、供試体内に密度の低い領域が形成されたケースほど、 $CSR(N_c=20)$ は低くなった。
- (13) 湿潤締固め法における締固め層数の適切な範囲は、本研究の範囲内では、下限値は 4 層、上限値は 10 層以下が適切であると考えられるが、単粒に近い粒度組成の試料の場合、6 層程度より厚い層数を選択することが望ましい。また、可能であれば、事前実験や密度測定などによって、供試体の再現性が高い範囲を把握することが望ましい。

7.2 今後の課題

本研究では、供試体作製条件による液状化特性について、特に、供試体内の不均一性による影響についての検討を行った。本研究で得られた知見は、三軸液状化試験結果の利用において、試験の目的や結果に求める精度によっては、より細やかな設定条件が必要であることを示唆するものである。これらの結果は、例えば、供試体作製条件及び局所的な測定をする際の器具の設置に関する検討並びに試験結果の考察を行う際の基礎データの一部になり得ると考える。加えて、本研究の条件の範囲内であれば、供試体作製基準（JGS 0520）の内容を補完し得ると考える。

しかしながら、6.2(3)でも述べたように、本論文のデータは、直径 75 mm の供試体に対するものに限定されており、他の寸法の供試体を用いた場合の締固め層厚の影響については、不明な部分が残っている。

さらに、本論文では、締固め層厚が、試料の最大粒径に対して十分な範囲であっても、層厚が薄いことに起因すると思しき繰返し載荷中のネッキングがみられた。本研究では、層厚の上限による比較検討を行い、湿潤締固め法を用いた場合の適切な層厚を提案したが、薄層側の下限値については、不十分であるといえる。

以上から考えられる今後の課題を以下に示す。

- (1) 本研究で行った締固め層厚と液状化特性との関係について、他の供試体サイズを適用した検討を行う。
- (2) 豊浦砂の密度分布について、山砂と同様に CT による計測を行うことで詳細な密度分布を把握し、軸方向ひずみとの相関について調べる。
- (3) 供試体内の水平方向の密度分布を明らかにする。
- (4) 締固め時の含水比の違いによる変形挙動の要因を把握するために、CT を用いた密度分布の計測や粒子構造の観察を行い、含水条件による配向性の変化について、より微視的な考察を行う。
- (5) 豊浦砂の供試体作製において、山砂と同様の作製器具を用いて締固め層厚による検討を行い、締固め時のエネルギーによる違いが液状化特性に及ぼす影響について調べる。
- (6) 湿潤締固め法の締固め層厚の薄層の上限について、より具体的な案を示す。

付録 A : 載荷装置の調整 (広範囲な粒度組成をもつ土質材料の繰返し載荷)

3.2 節で述べたように、広範囲な粒度組成をもつ土質材料 (山砂) の繰返し載荷 (4.3 節) では、通常の液状化試験で用いる載荷周波数と比較すると大幅に遅い周波数による繰返し載荷を行った。

本研究で用いた載荷装置 (誠試工製) は、載荷システム内のレンジと微調整用のダイヤルとの組み合わせで任意の周波数設定が可能であったため、はじめにダミー供試体を用いて数パターンの載荷を行い、適切な設定値を調べた。本研究で行った 7 パターンの結果を表-付 1.1 に示す。当載荷システムでは、表内、「FG RANGE」で大まかな範囲を指定し、「FREQ.」で微調整を行うが、基本的に、両者の最小読取値の以上の数値による設定であれば、調整可能である。つまり、「FG RANGE」=0.1×「FREQ.」=10' 及び「FG RANGE」=0.01×「FREQ.」=100' は、同じ結果になるはずである。しかしながら、このようなタイプの載荷装置では、数値の掛け合わせによって正弦波の形状やアウトプットされた周波数などに違いやズレが出るのが予想されたため、事前調査を行ったものである。その結果を表-付 1.1 及び図-付 1.1~図-付 1.3 に示す。表 3.2.1 は、事前調査を行った載荷装置の設定のパターン 7 つであり、図-付 1.1~図-付 1.3 は、それぞれ $f=0.01$, 0.02 及び 0.05 Hz の載荷周波数を設定し、ダミー供試体を用いて繰返し載荷した荷重及び載荷時間の関係である。また、 $f=0.01$ Hz の図-付 1.1 には、表-付 1.1 の No.4 及び 5 に当たる 0.01×100 と 0.1×10 の二つの $f=0.01$ Hz の結果を示す。図-付 1.1 より、No.5 の波形は、載荷が進むにつれて、伸張荷重に遅れが出ており、それによって、一定の周波数を保つことができていることがわかる。また、このような載荷周波数のずれは、「FREQ.」が 20%を下回ると如実になることが、図-付 1.2 及び図-付 1.3 からわかる。よって、本研究の山砂供試体による繰返し載荷では、「FG RANGE」=0.01×「FREQ.」=100 (実際には微調整して「FREQ.」=98)' を用いることとした。

表-付 1.1 載荷装置の設定

| No. | FG RANGE | FREQ. (10~100 %) | f (Hz) | 判定 |
|-----|----------|---------------------|----------|----|
| 1 | 0.1 | 98 | 0.1 | ○ |
| 2 | 0.1 | 50 | 0.05 | ○ |
| 3 | 0.1 | 20 | 0.02 | × |
| 4 | 0.01 | 100 | 0.01 | ○ |
| 5 | 0.1 | 10 | 0.01 | × |
| 6 | 0.01 | 50 | 0.005 | ○ |
| 7 | 0.01 | 20 | 0.002 | ○ |

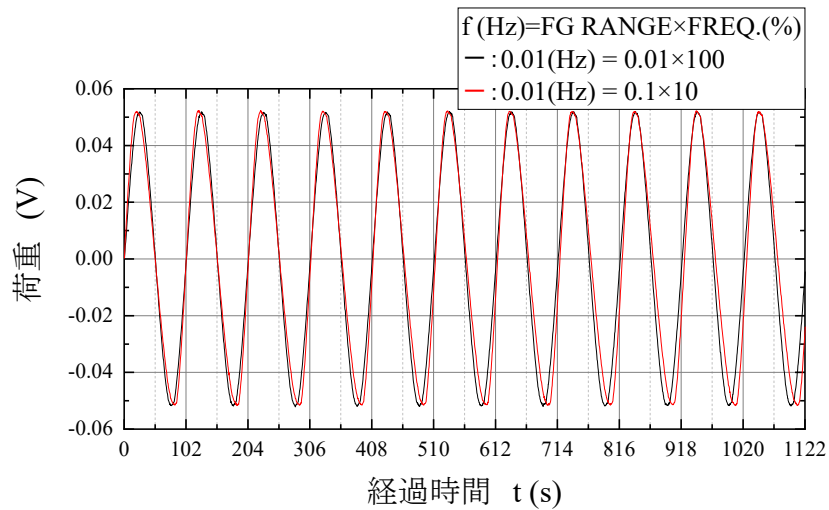


図-付 1.1 周波数設定の違いによる繰返し載荷による荷重への影響 ($f=0.01$ Hz)

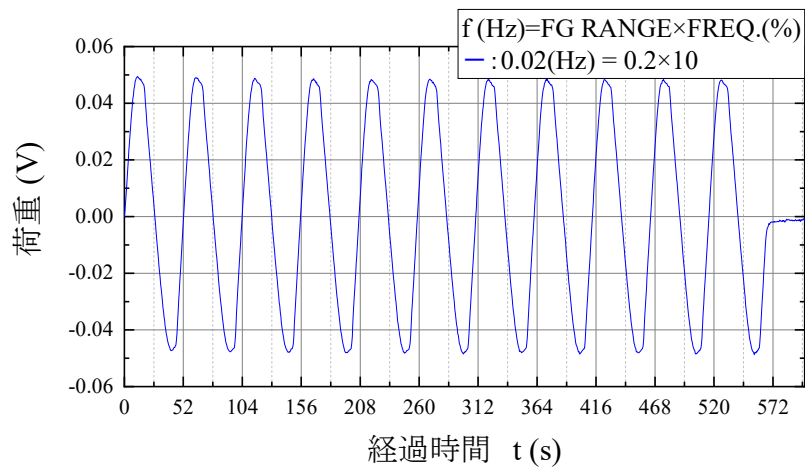


図-付 1.2 周波数設定の違いによる繰返し載荷による荷重への影響 ($f=0.02$ Hz)

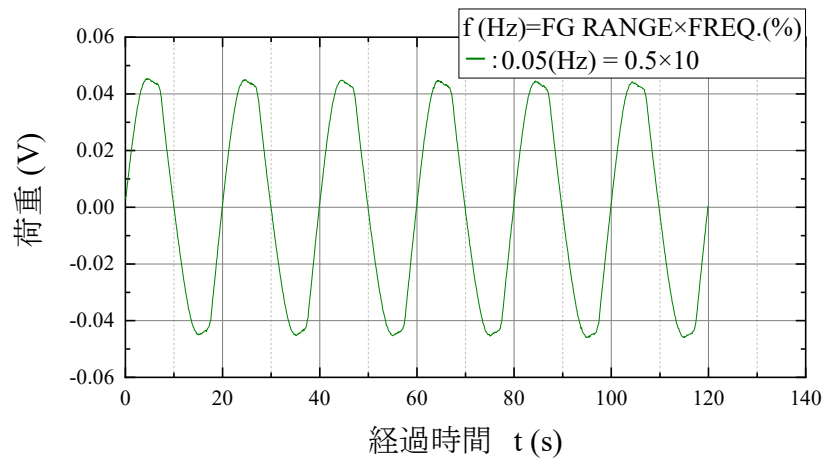


図-付 1.3 周波数設定の違いによる繰り返し载荷による荷重への影響 ($f=0.05$ Hz)

付録 B : MP 簡易補正方法

本研究の 4 章で示した MP 補正後の液状化強度曲線は, Tokimatsu et al. の MP 簡易補正を用いて行ったものである。具体的な方法を以下に示す。

- 1) 補正したい供試体の载荷データにおける各波の σ_d 及び Δu の圧縮及び伸張側ピークの値を用意する。 Δu は, **max-min** を算出する。
- 2) 上記 1) で, 用意したデータの中から, $\Delta u_{(\text{max-min})}$ の値が安定している区間を探し, その区間の $\Delta u_{(\text{max-min})}$ の平均値を算出する。
- 3) 上記 2) の $\Delta u_{(\text{max-min})}$ に対応する $\sigma_{d_Ave} \times 2$ の平均値を算出する。
- 4) 上記 2) 及び 3) で算出した各値から, $D = \sigma_{d_Ave} \times 2 / \Delta u_{(\text{max-min})_Ave}$ を算出する。
- 5) 上記 4) で算出した D 及びその供試体の間隙圧係数 B から, 次の式によって C_{RM} を算出する ($C_{RM} = B / D$)。
- 6) 上記 5) で算出した C_{RM} からと下記文献の Fig.15 から C_N を読み取る。
Tokimatsu, K., Nakamura, K. : A simplified correction for membrane compliance in liquefaction tests, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.4, pp.111-122, 1987.
- 7) 上記 6) で算出した $N_{c(\text{DA}=5\%)}$ を C_N で割って, 補正後の繰返し载荷回数 N_0 を算出する ($C_N = N_{c(\text{DA}=5\%)} / N_0$)。

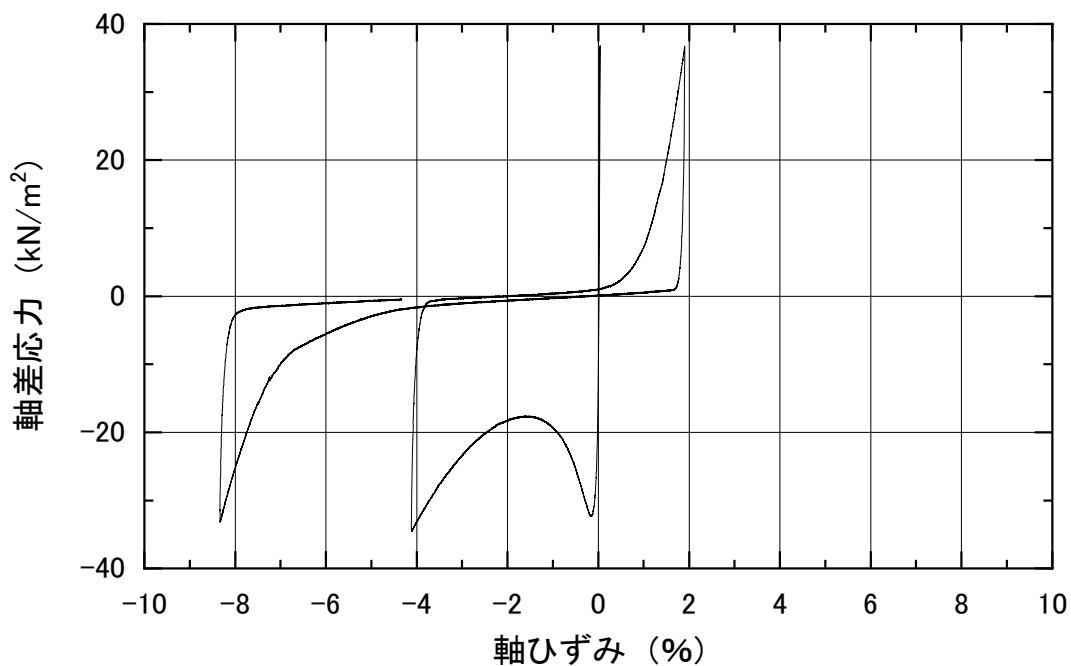
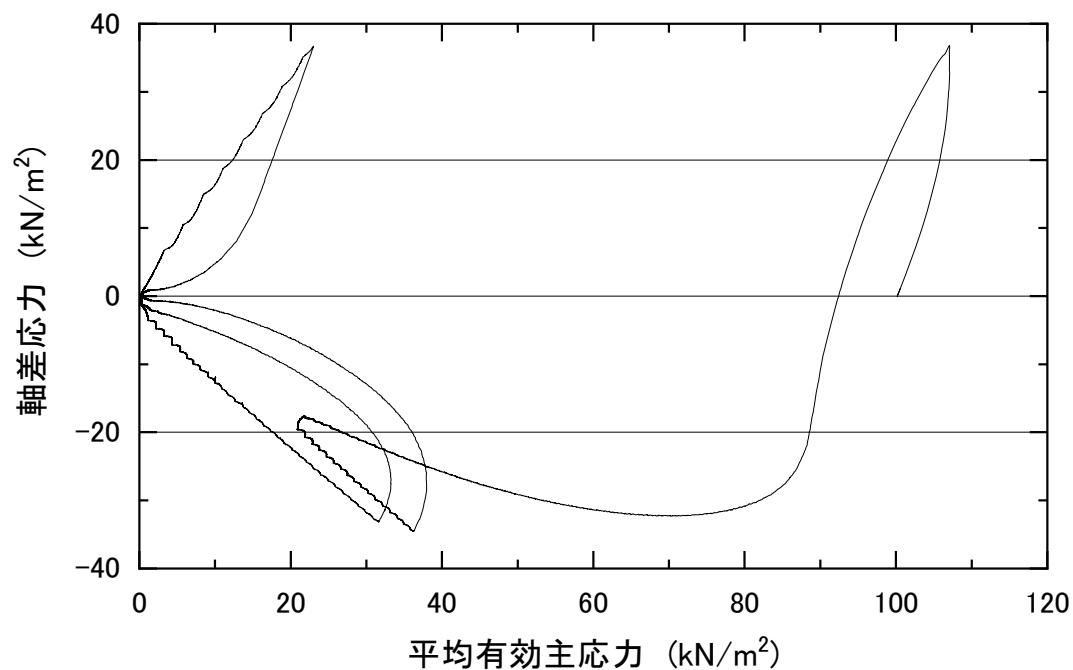
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.1, AP法による供試体作製(Dr=60%)

試験条件: 背圧 $u_b=400 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.178



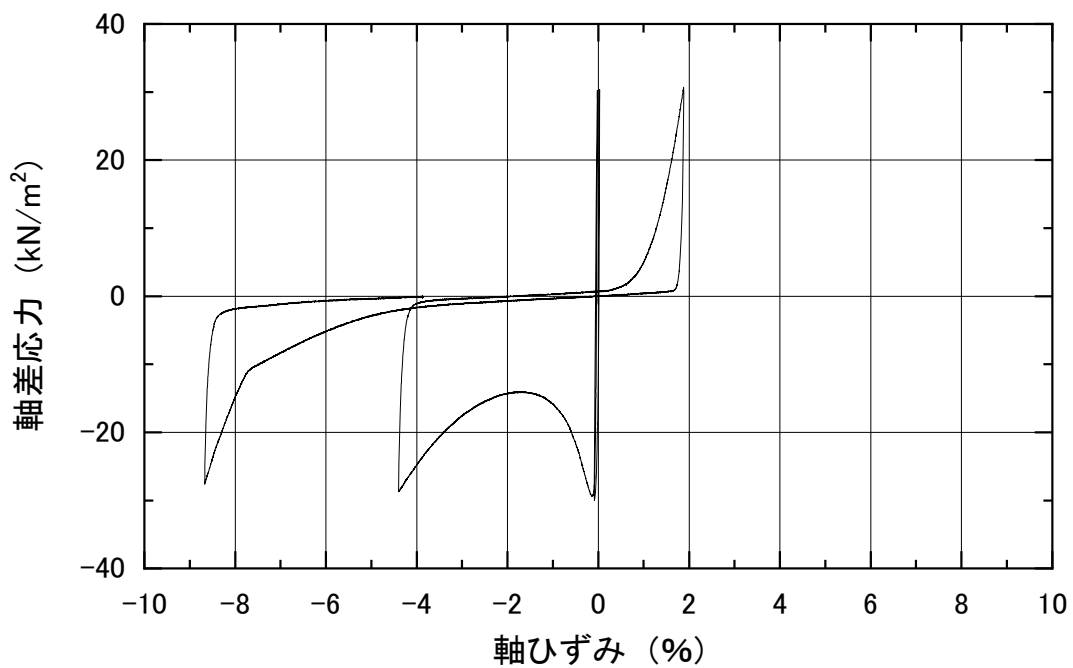
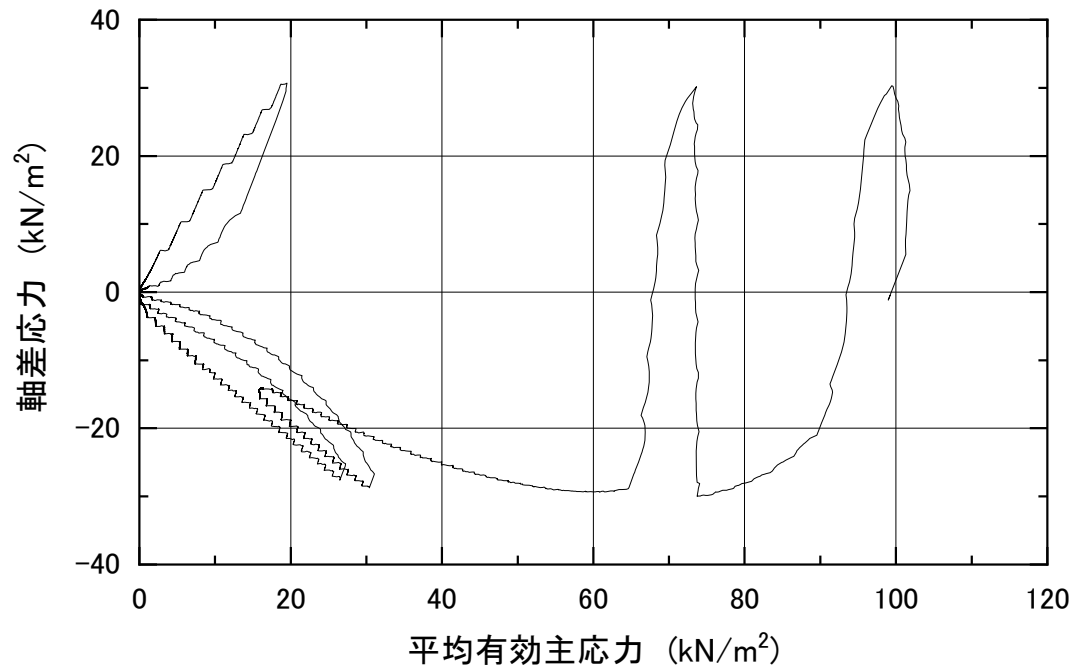
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.2, AP法による供試体作製(Dr=60%)

試験条件: 背圧 $u_b=400 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.151



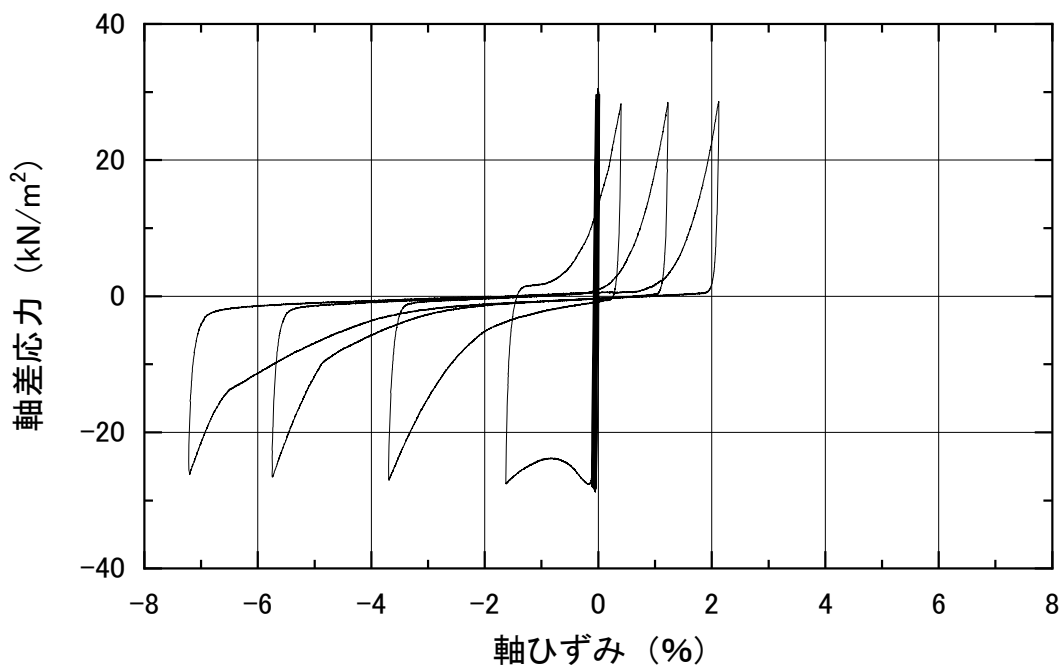
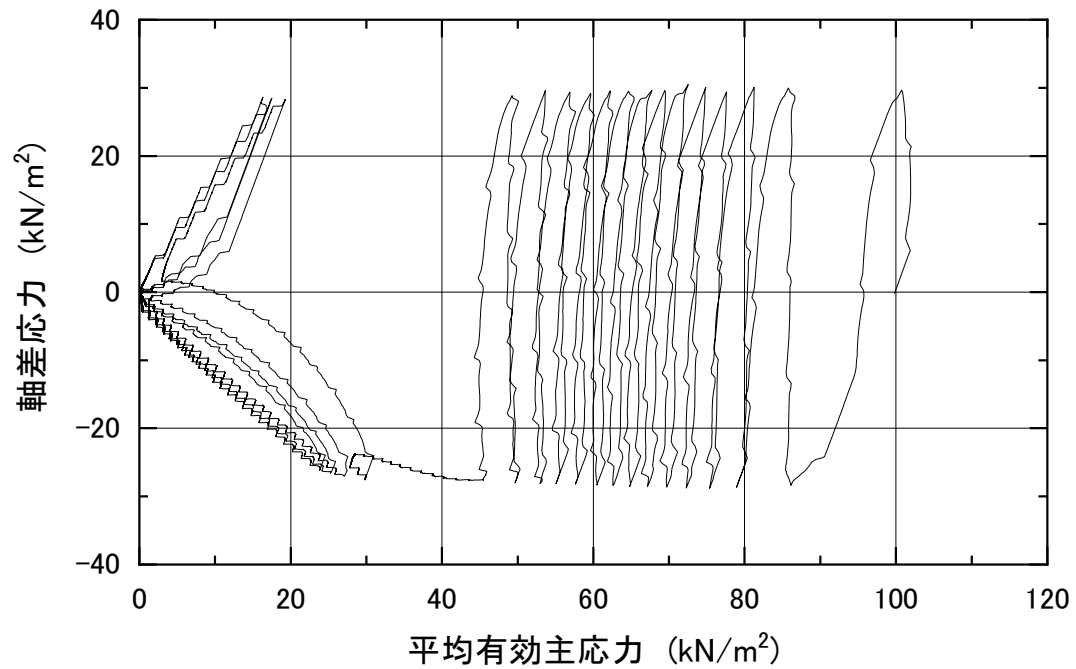
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.3, AP法による供試体作製(Dr=60%)

試験条件: 背圧 $u_b=400 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.145



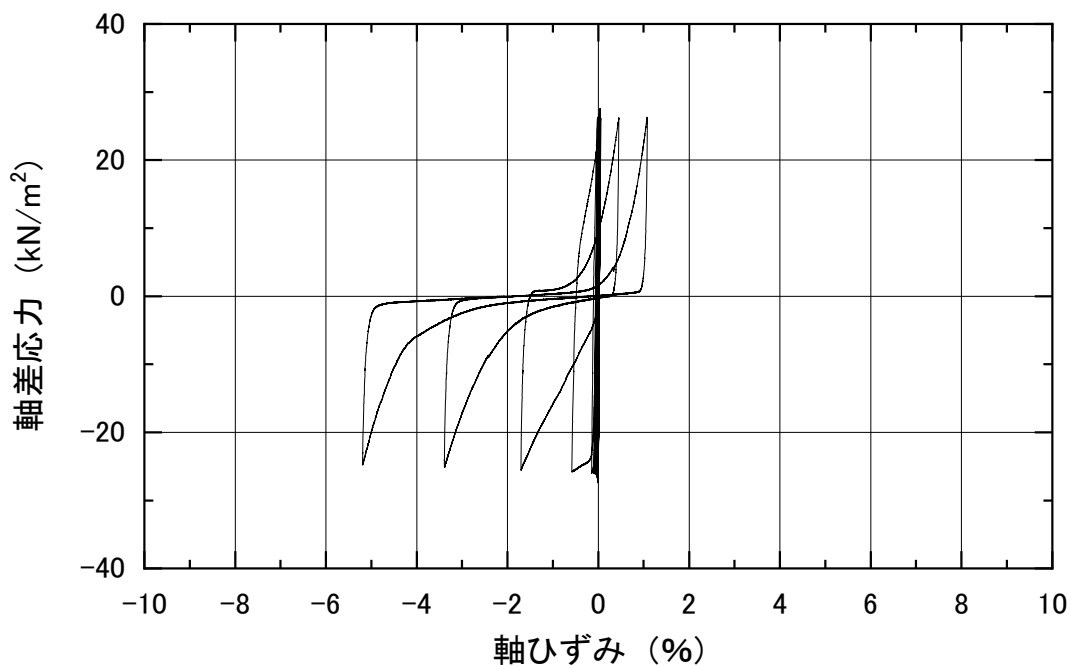
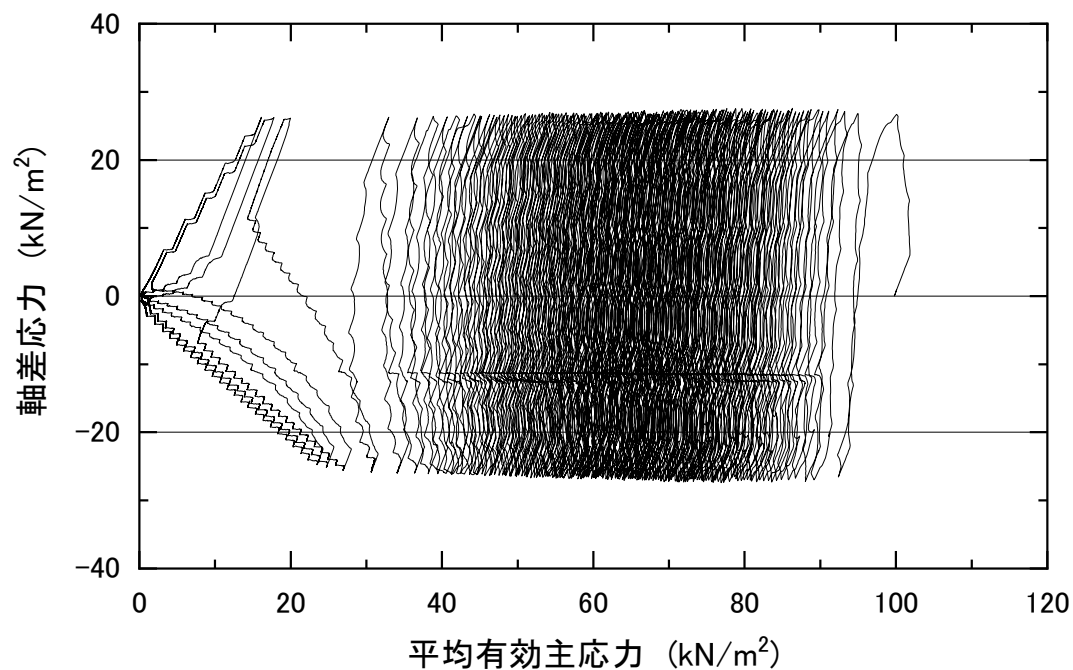
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.4, AP法による供試体作製(Dr=60%)

試験条件: 背圧 $u_b=400 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.134



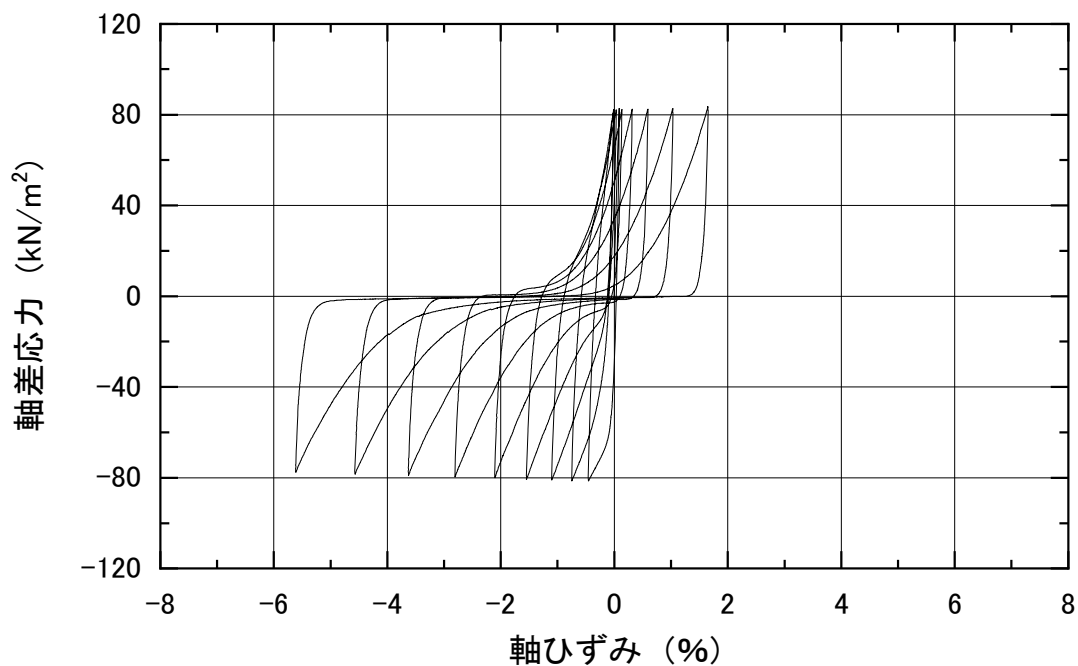
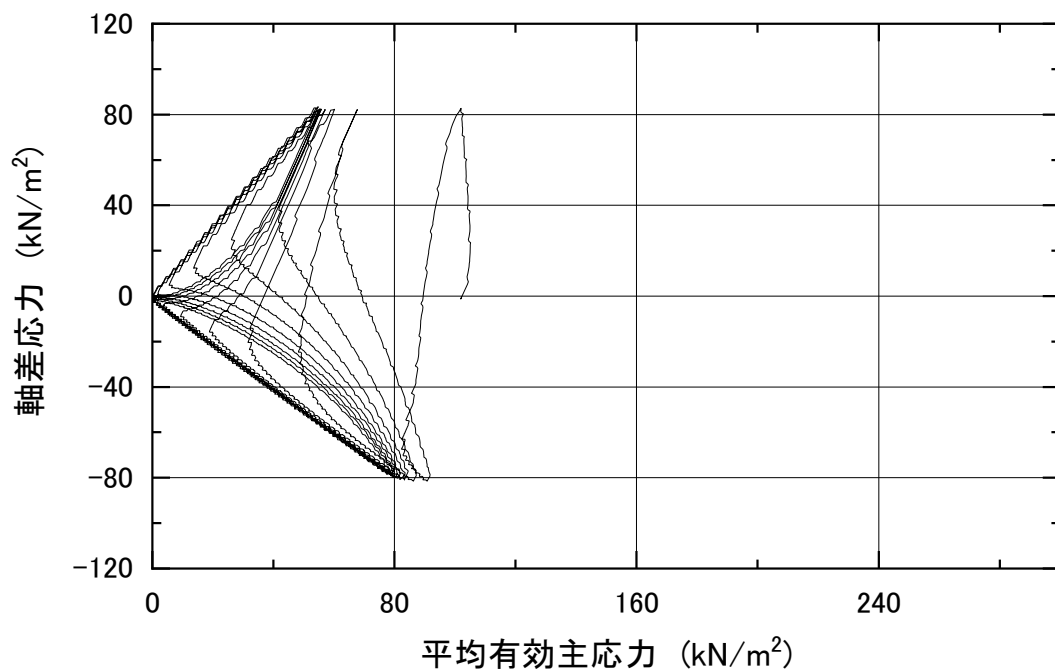
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.1, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 10層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.400



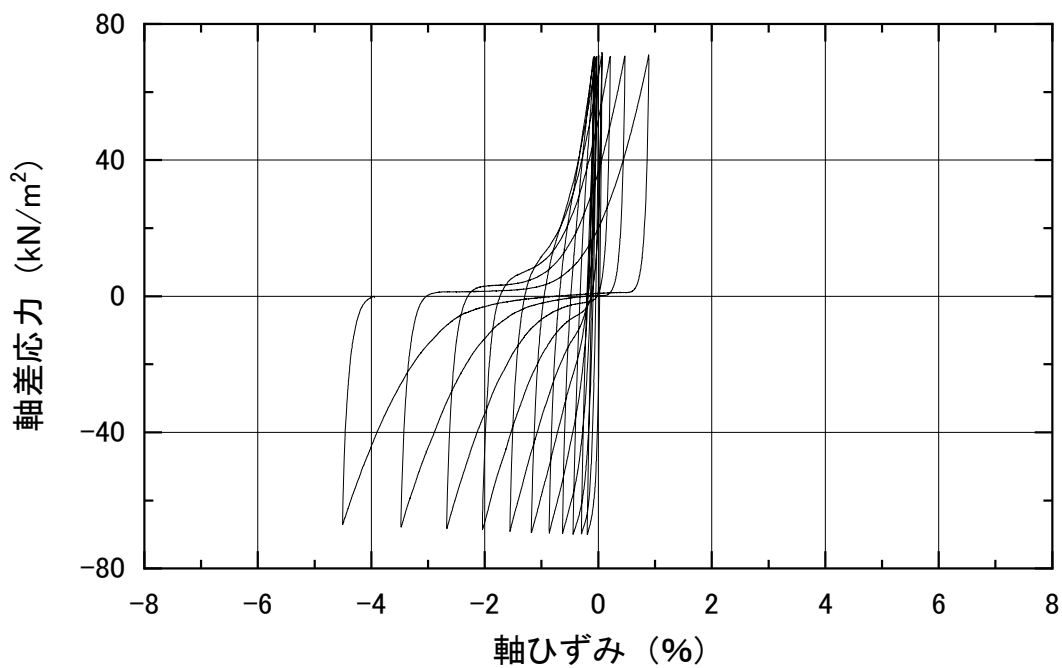
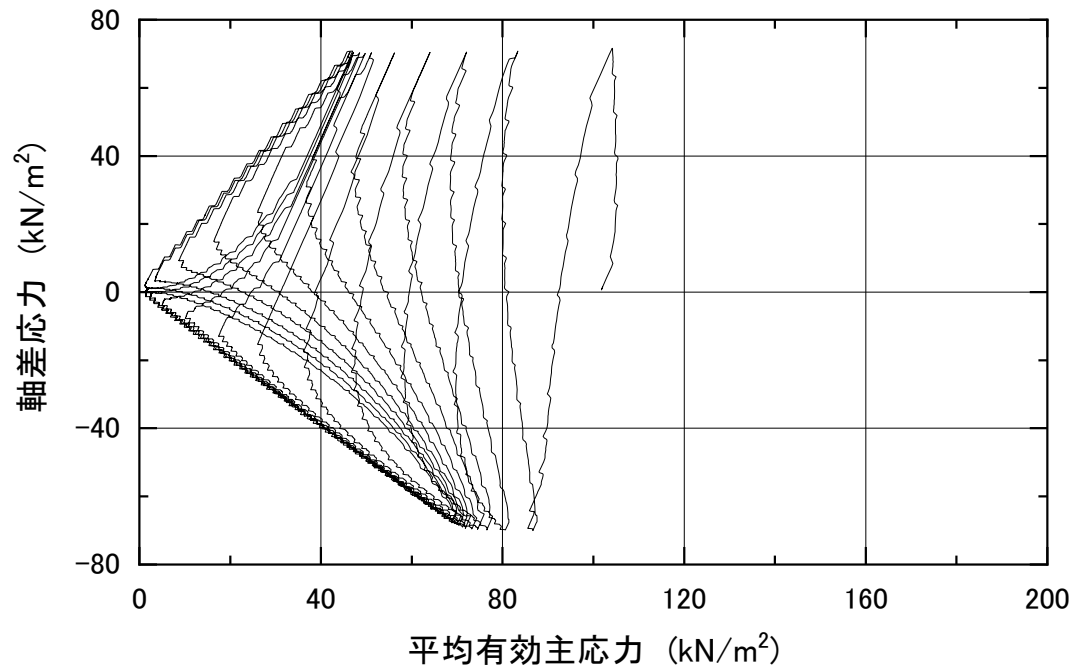
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.2, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 10層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.344



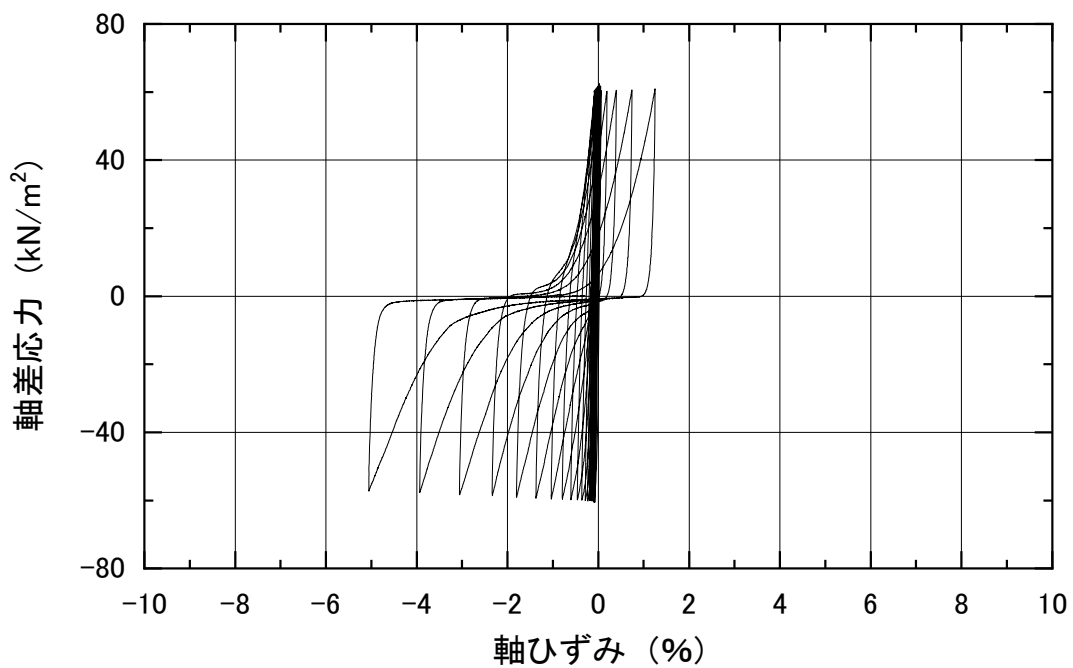
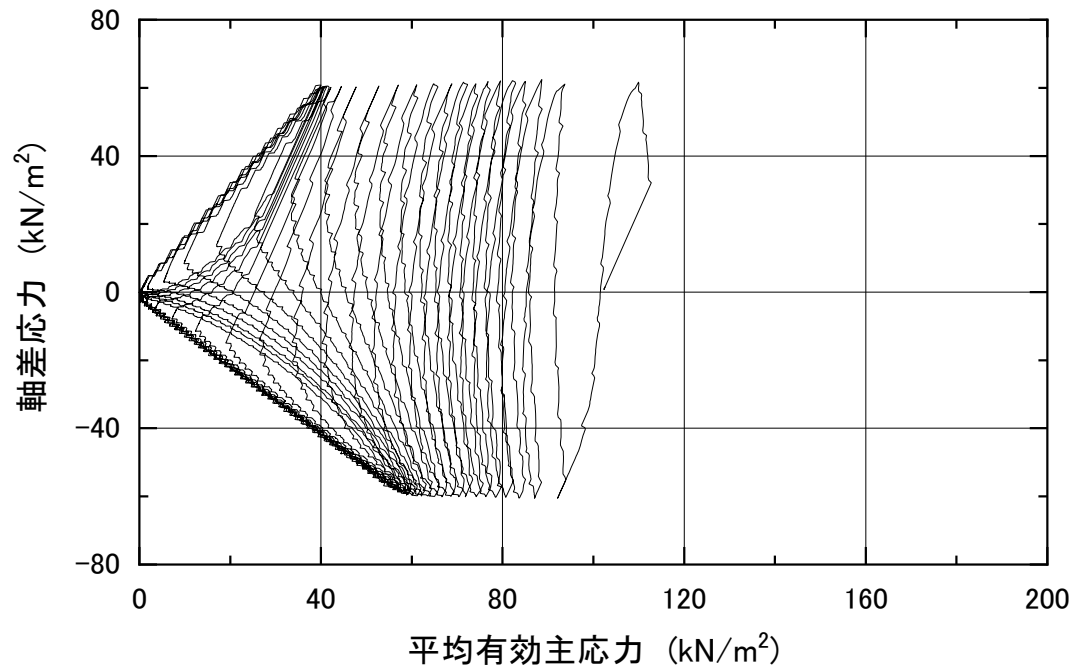
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.3, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 10層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.296



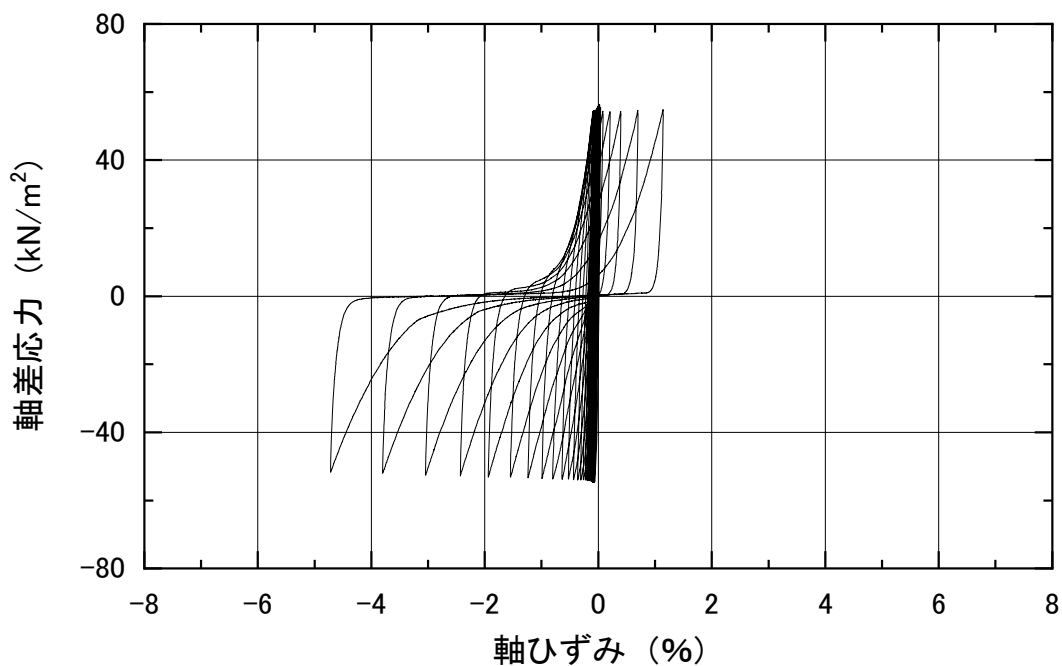
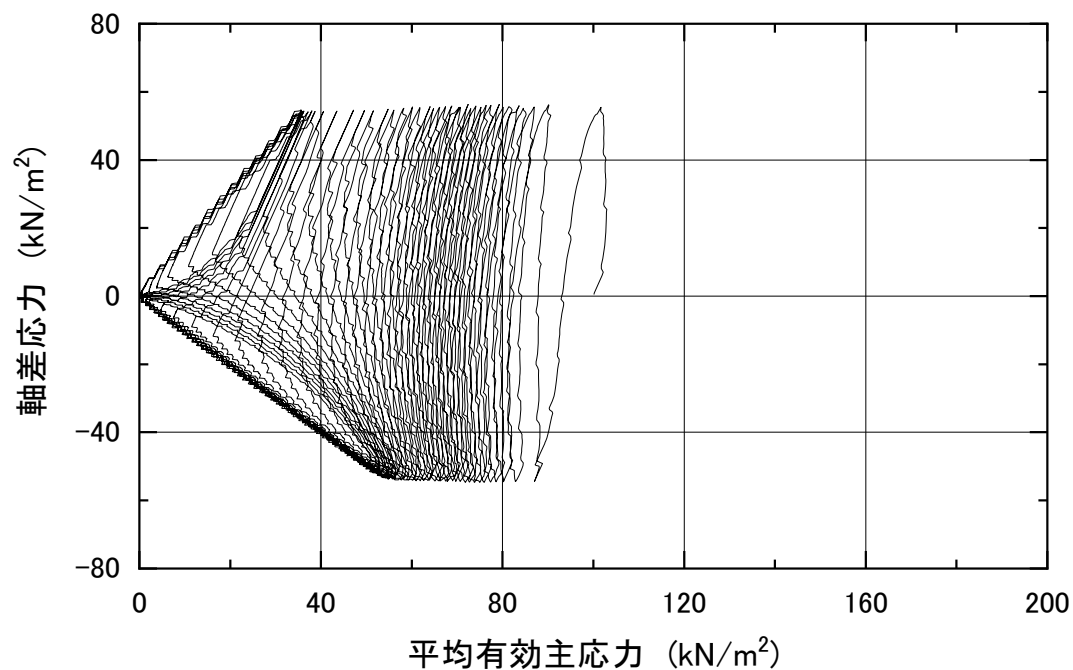
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.4, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 10層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.274



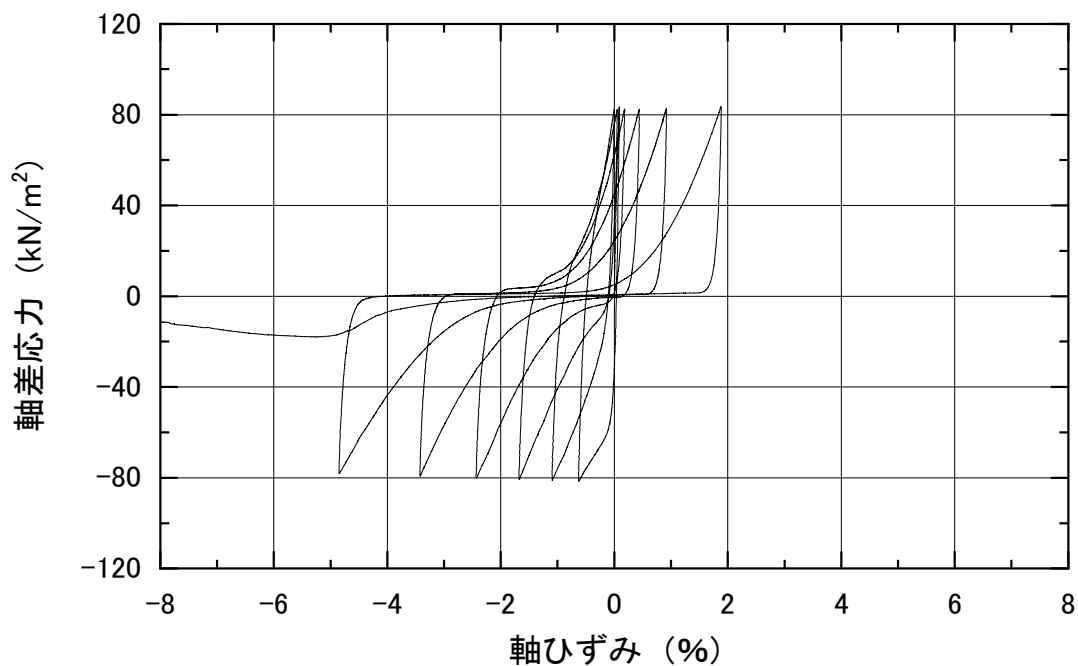
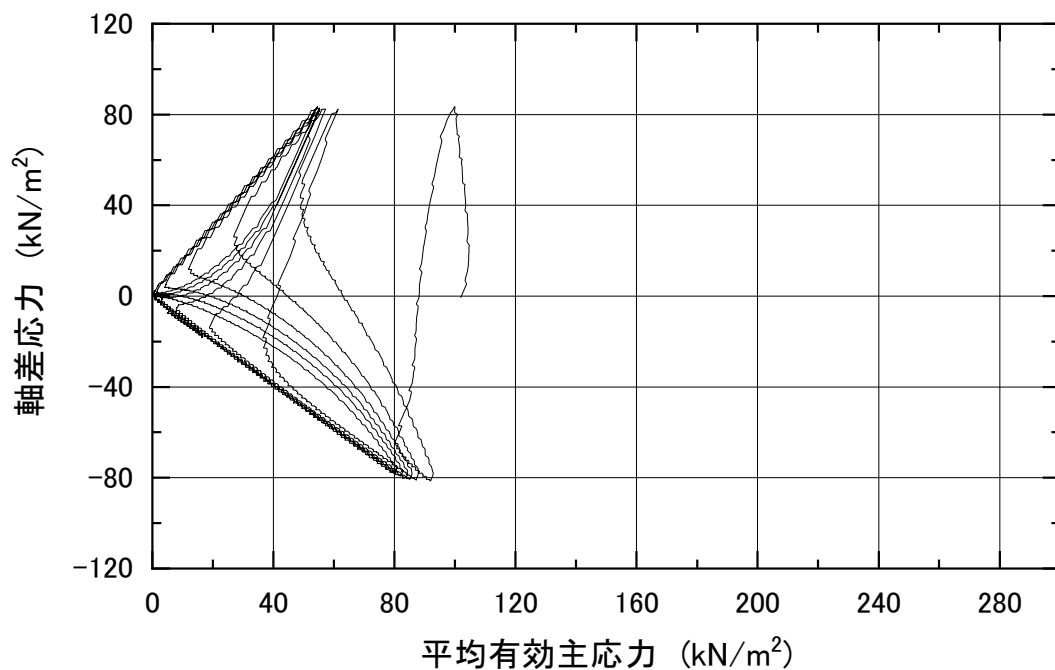
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.1, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 6層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.402



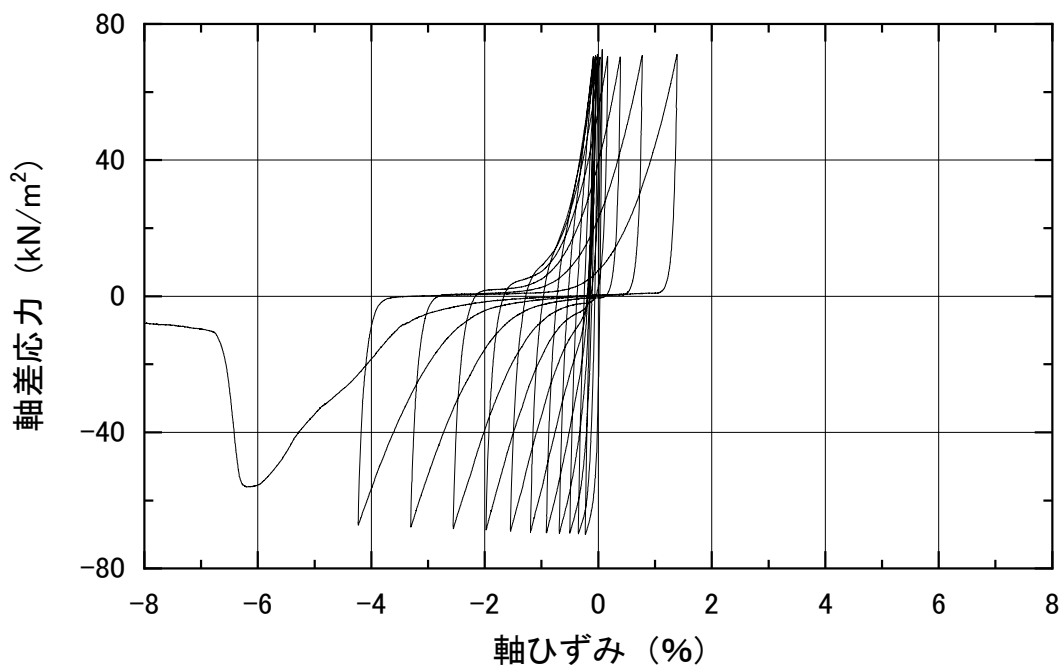
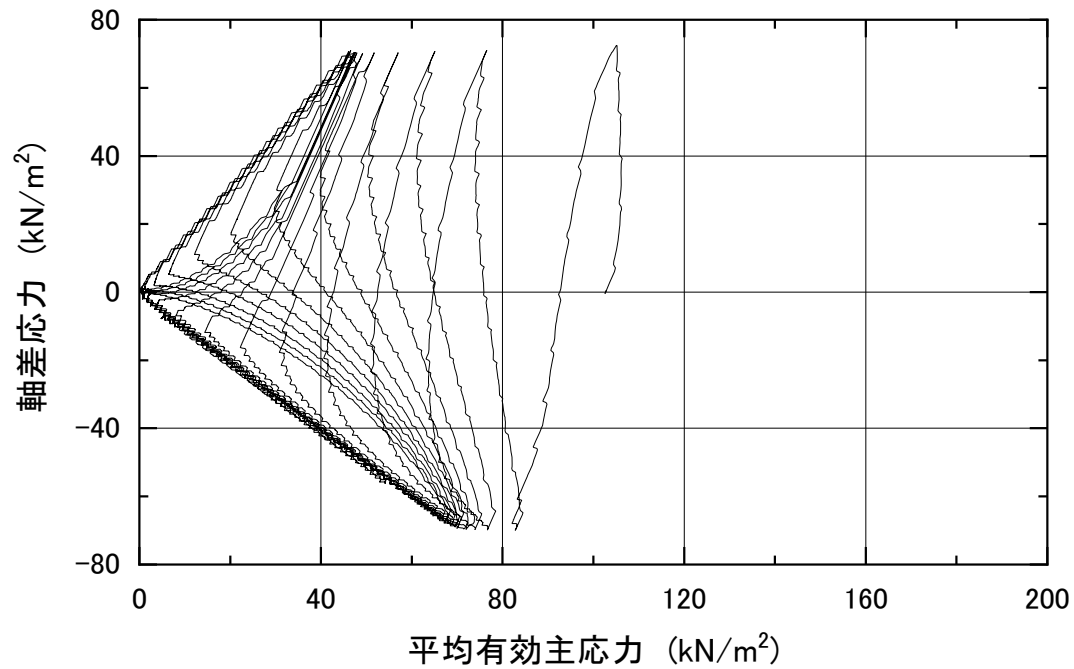
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.2, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 6層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.343



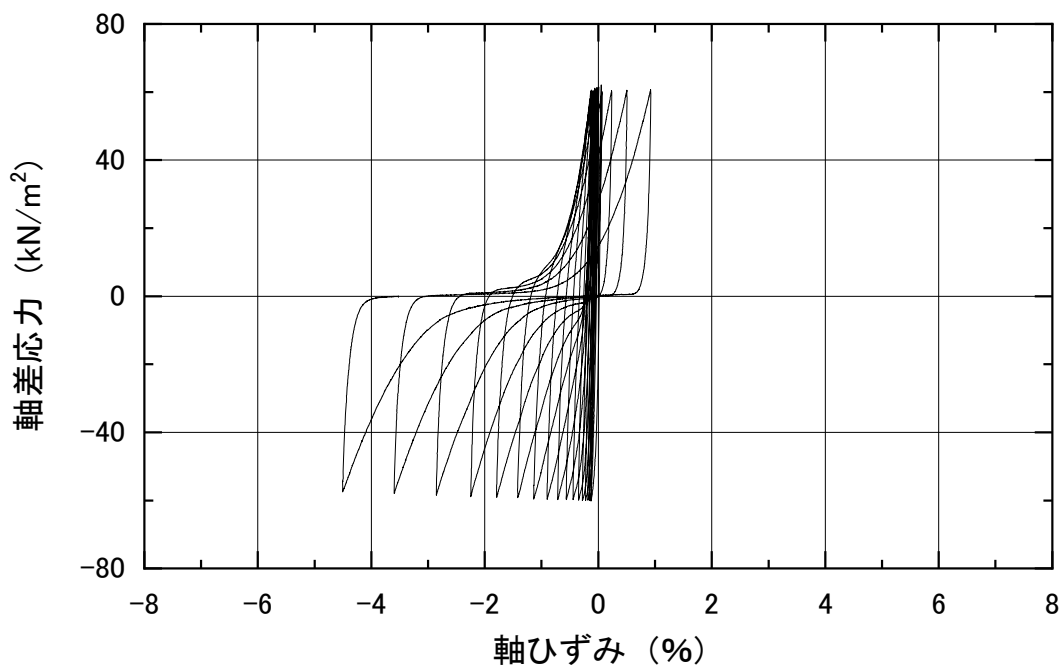
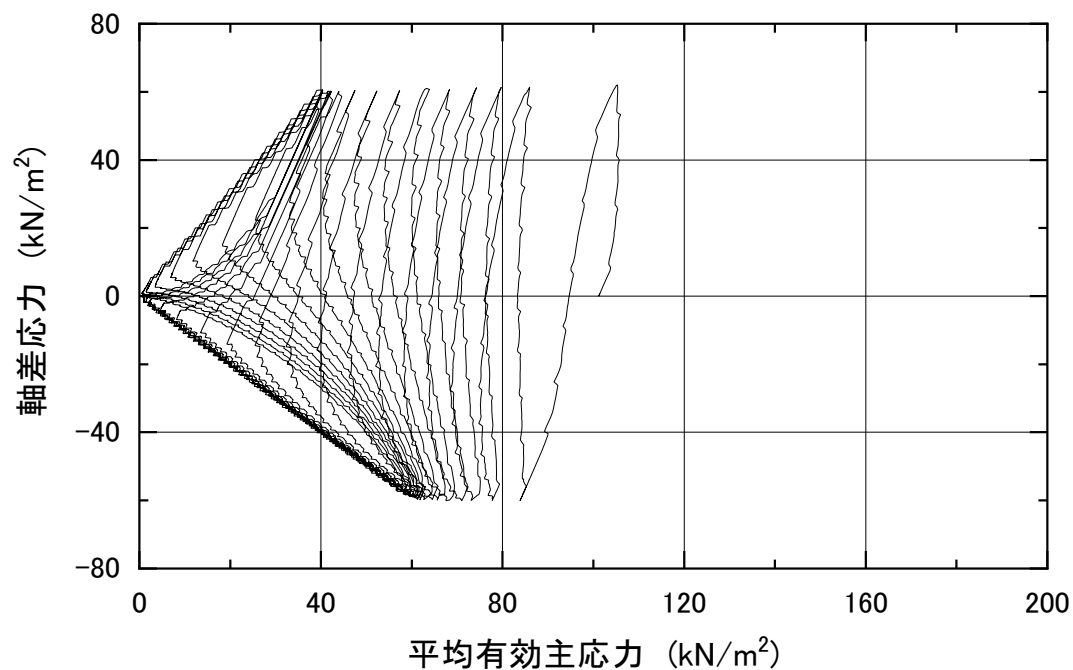
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.3, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 6層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.298



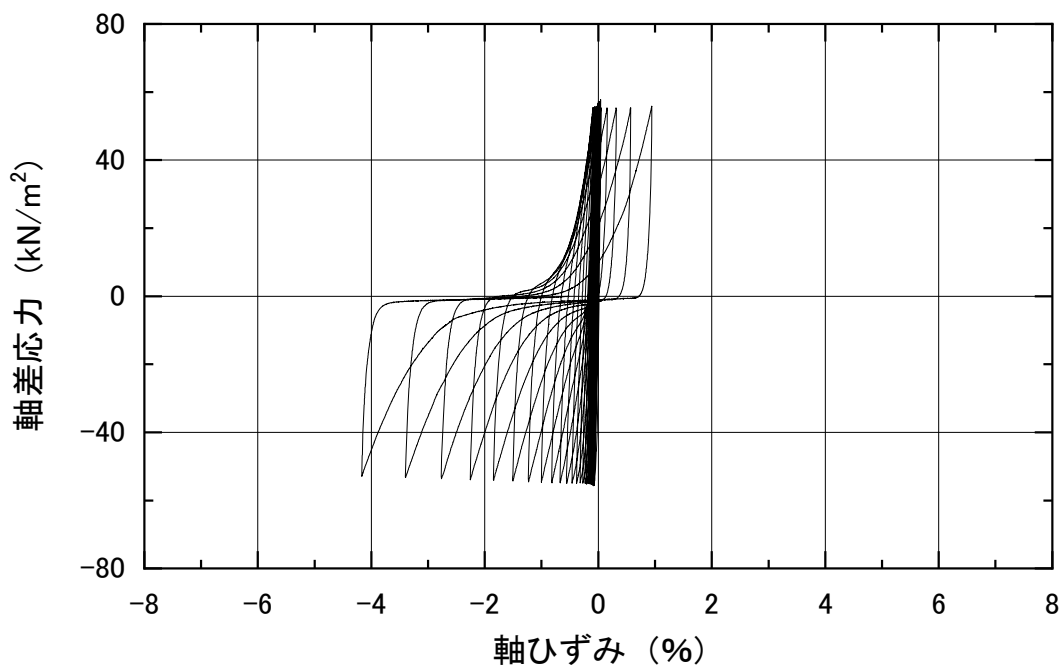
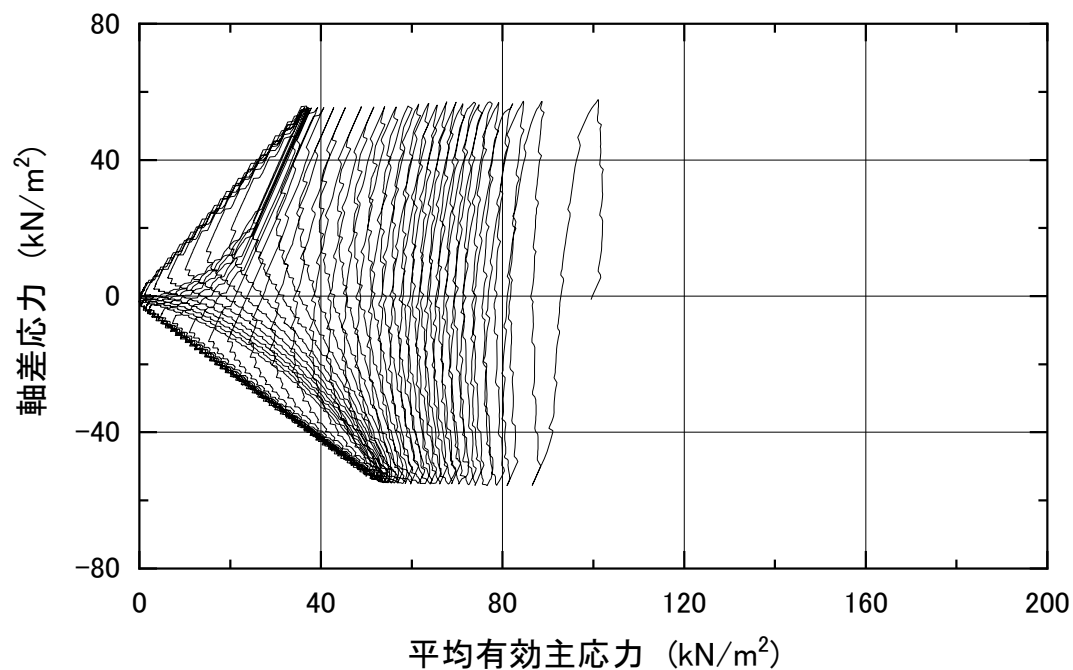
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.4, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 6層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.279



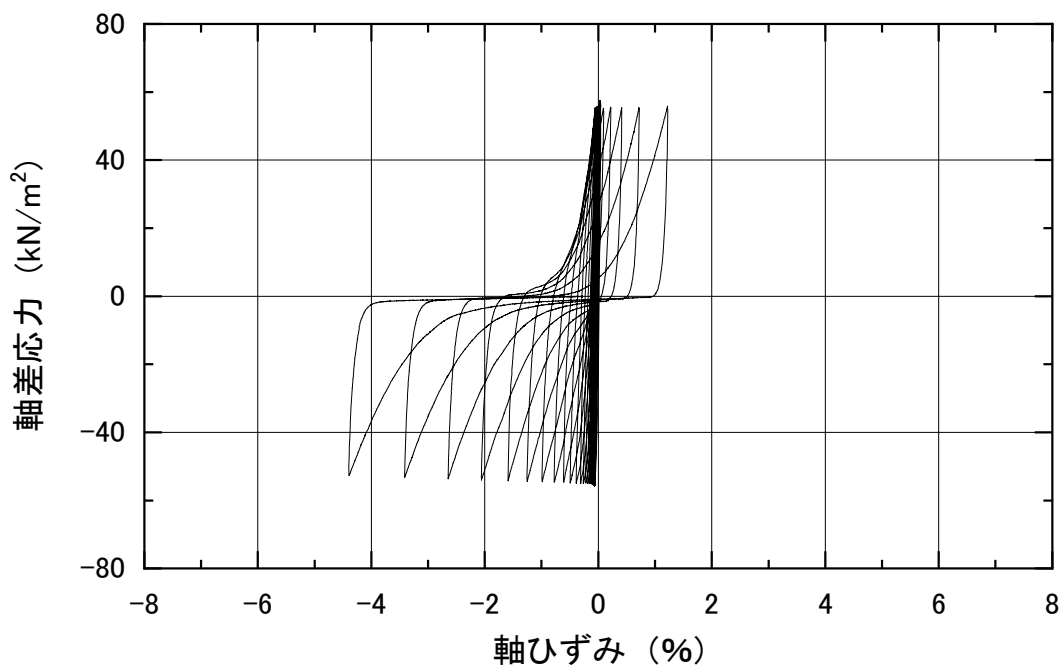
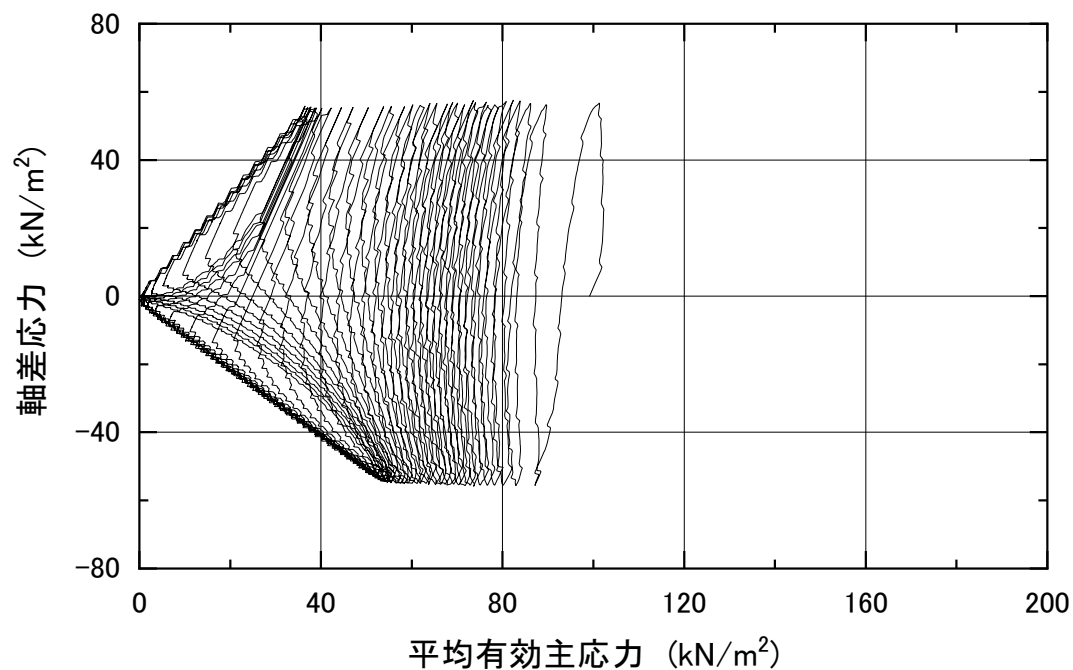
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.5, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 6層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.281



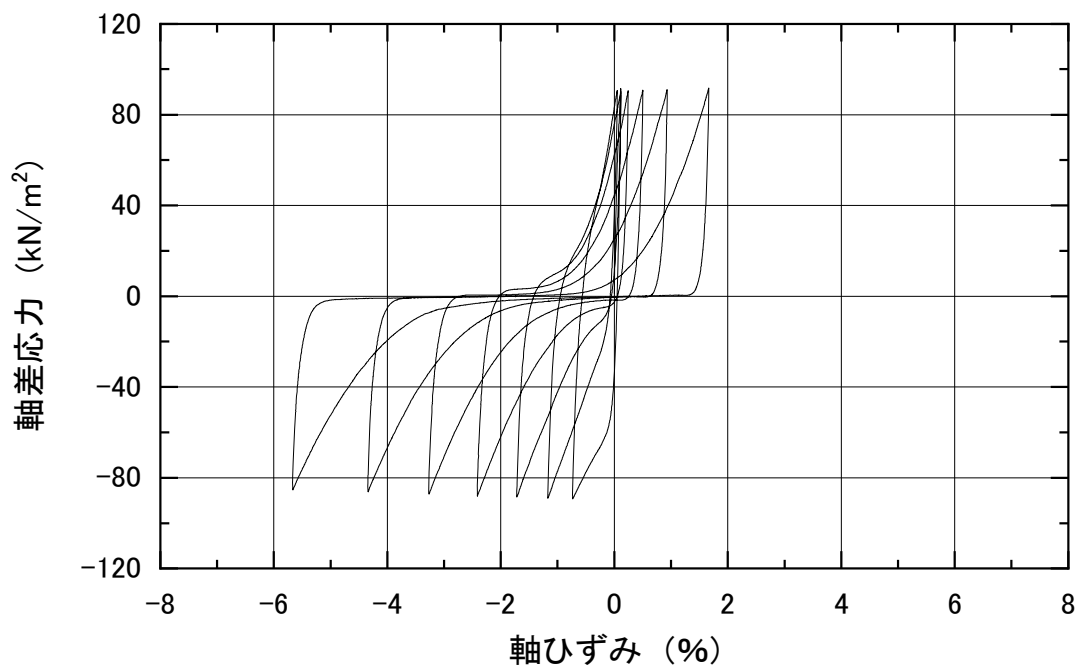
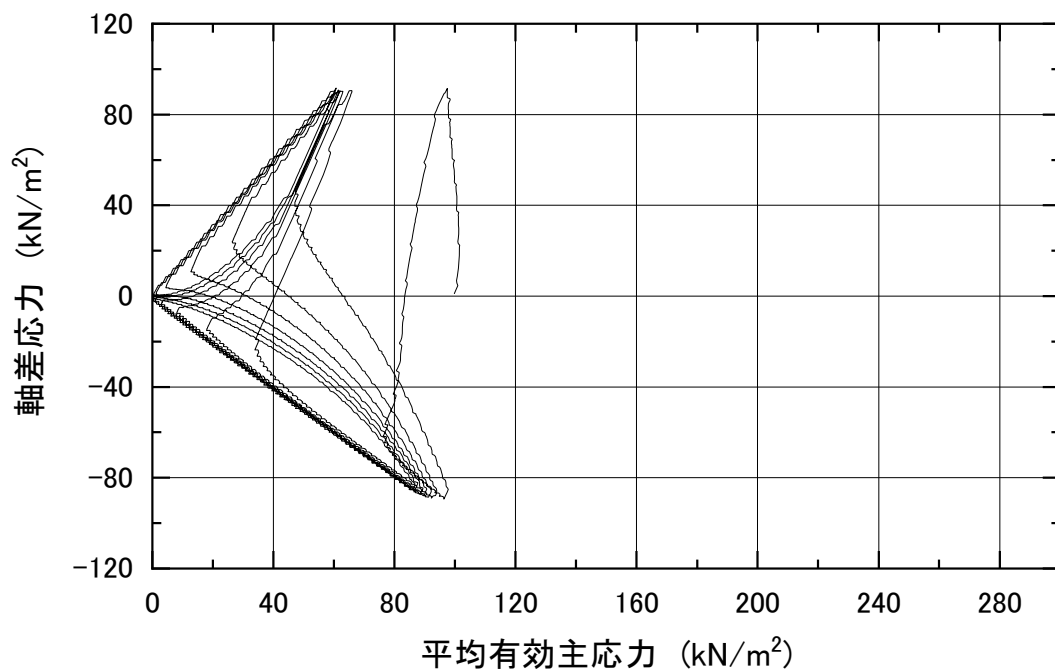
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.1, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 4層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

载荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.454



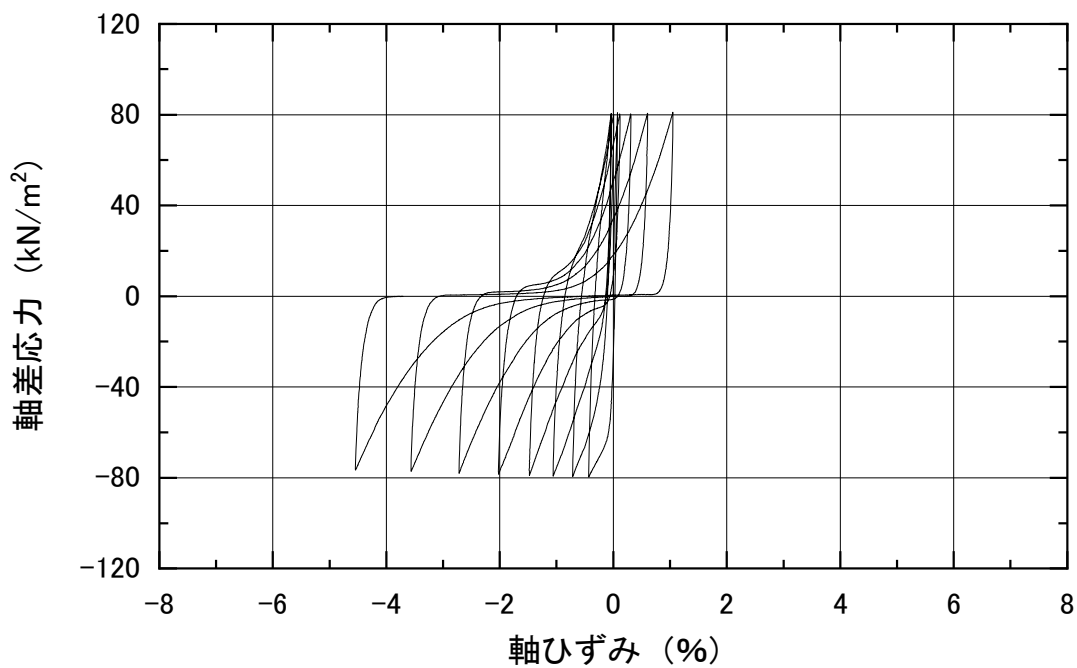
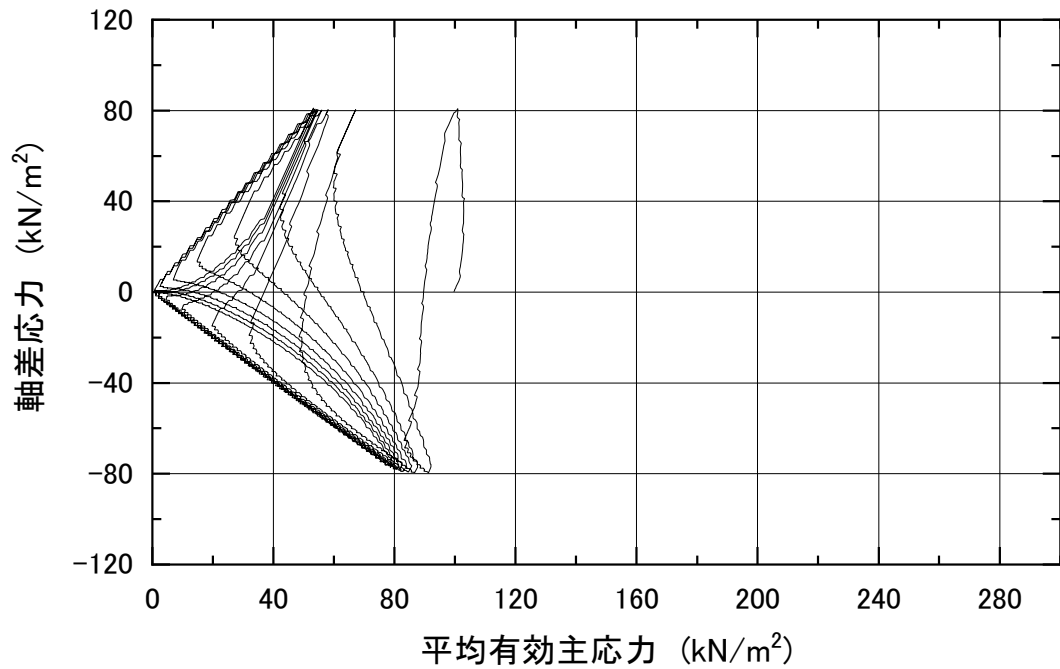
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.2, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 4層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.402



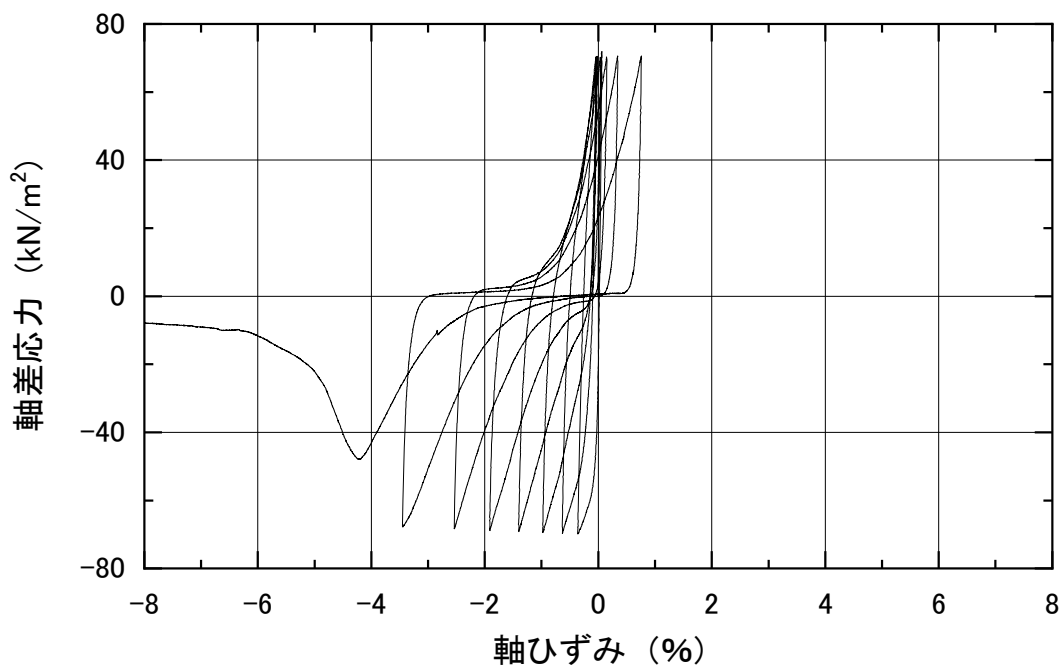
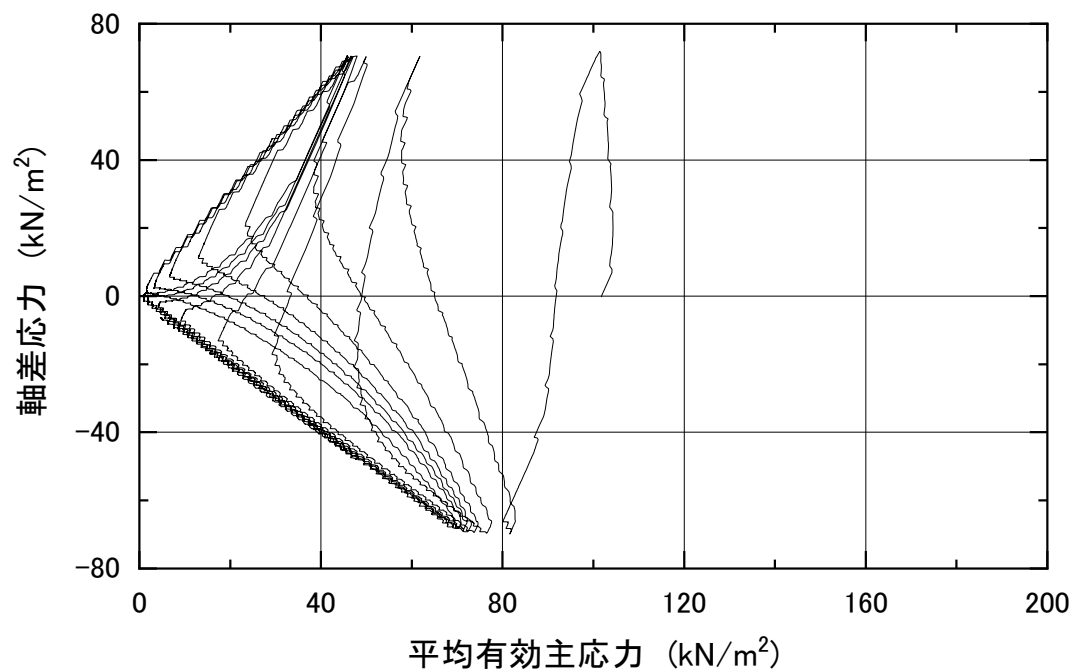
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.3, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 4層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.345



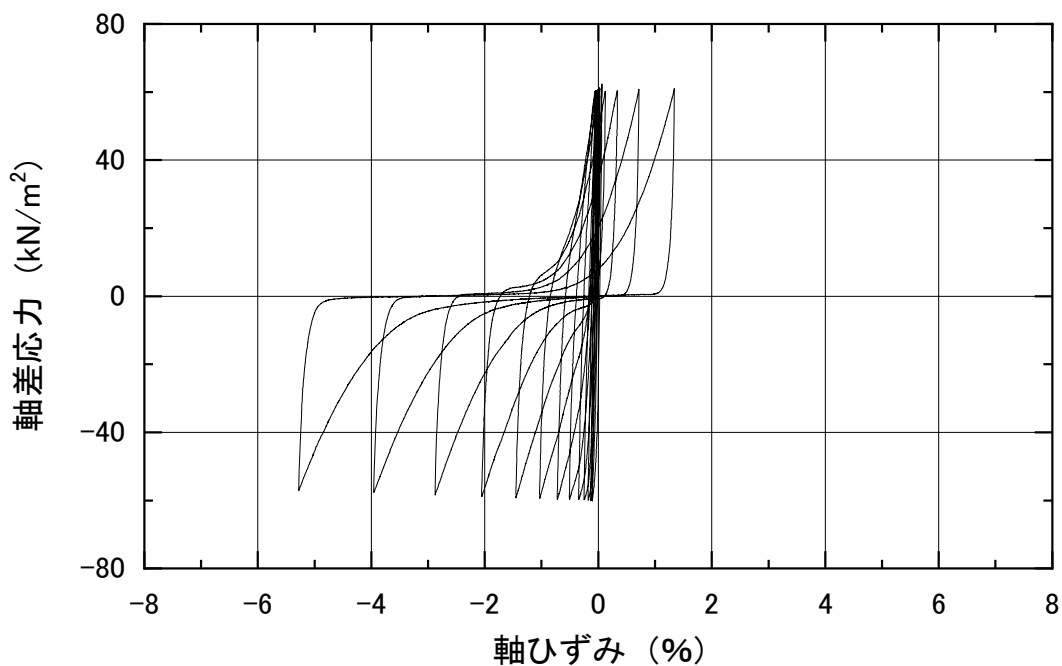
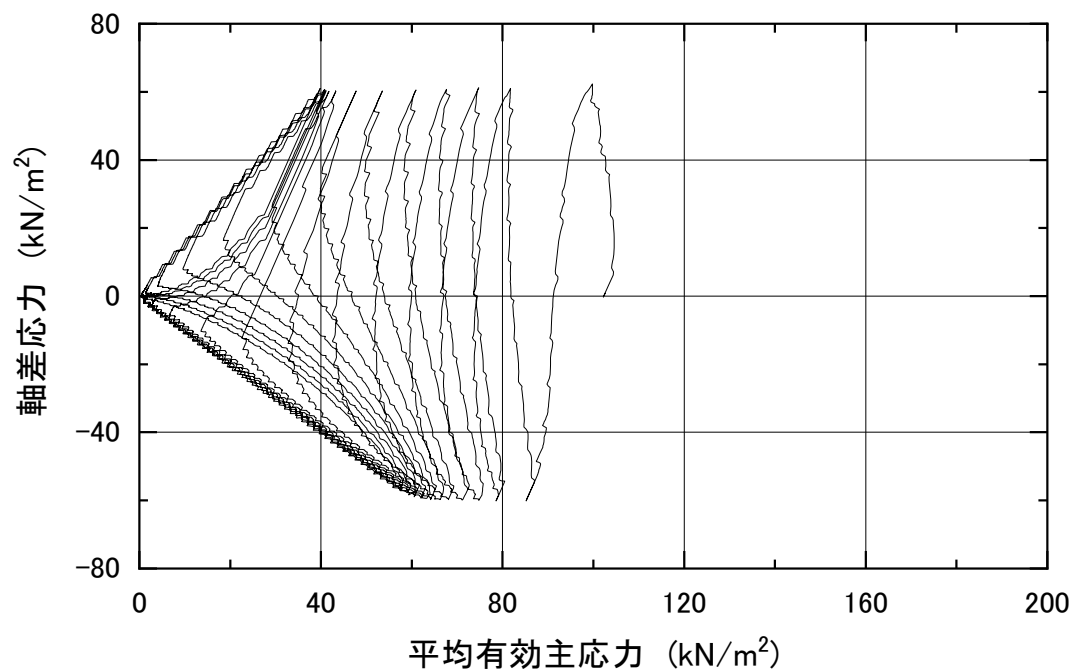
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.4, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 4層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

载荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.295



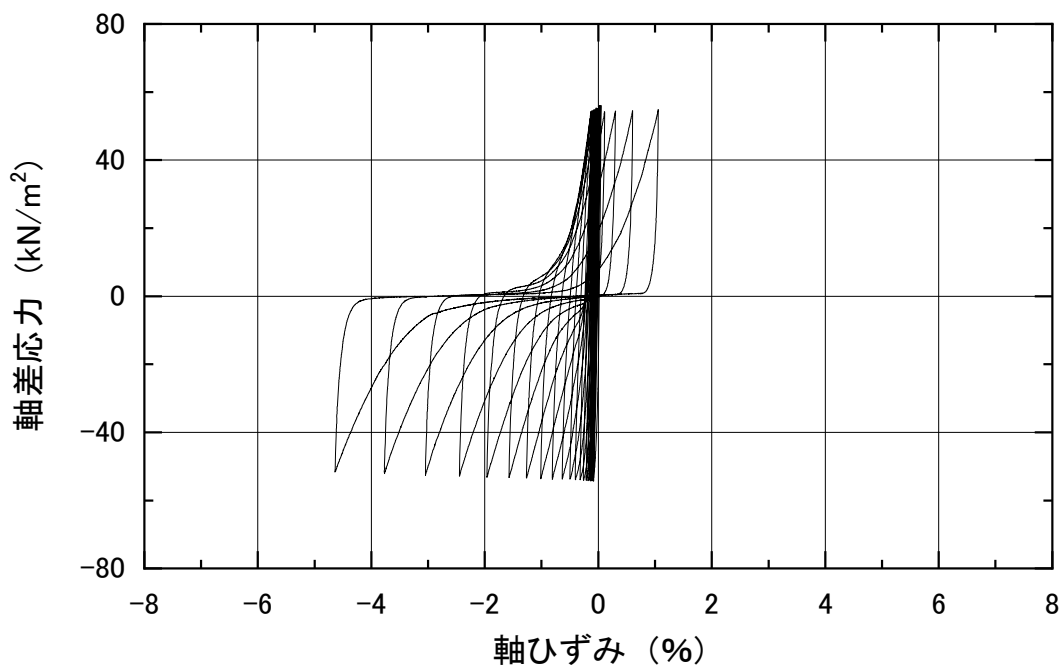
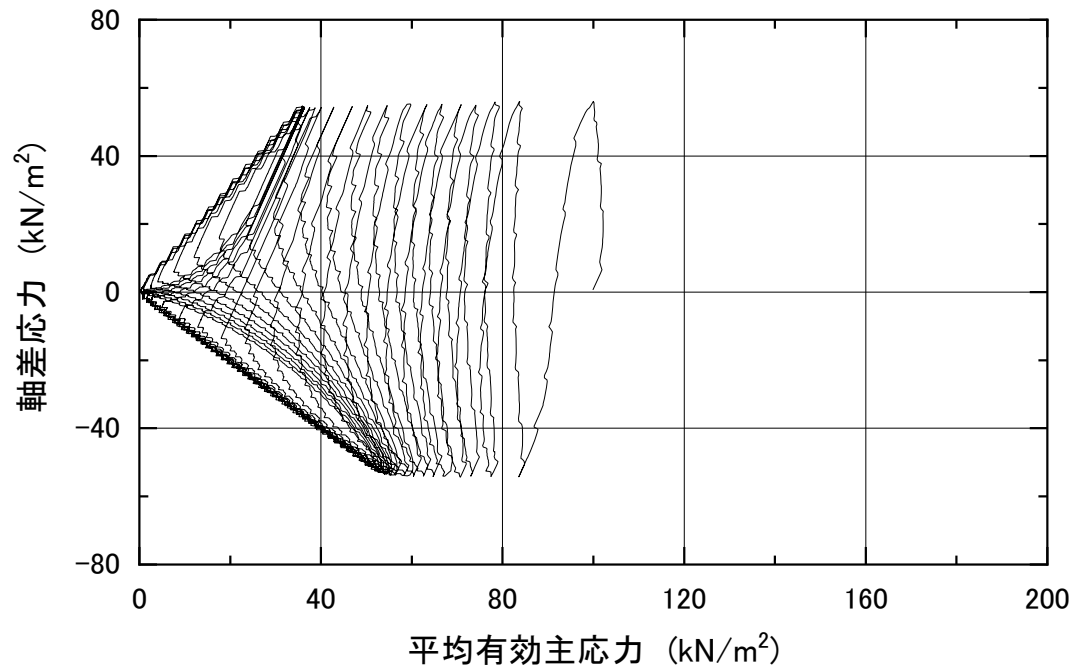
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.5, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 4層, w=4.0%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.274



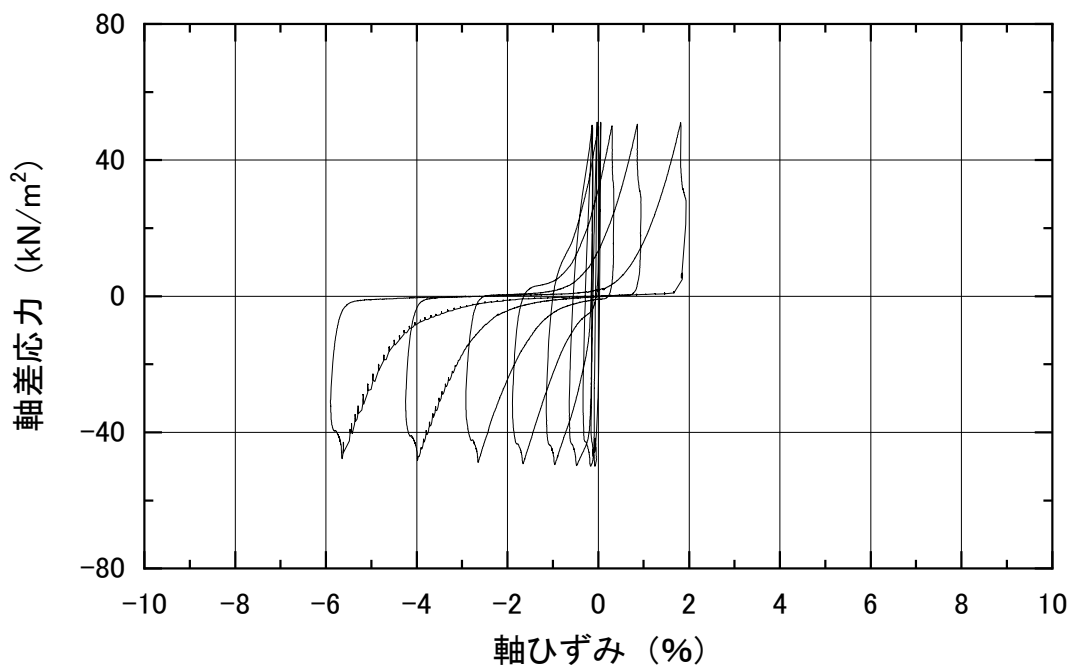
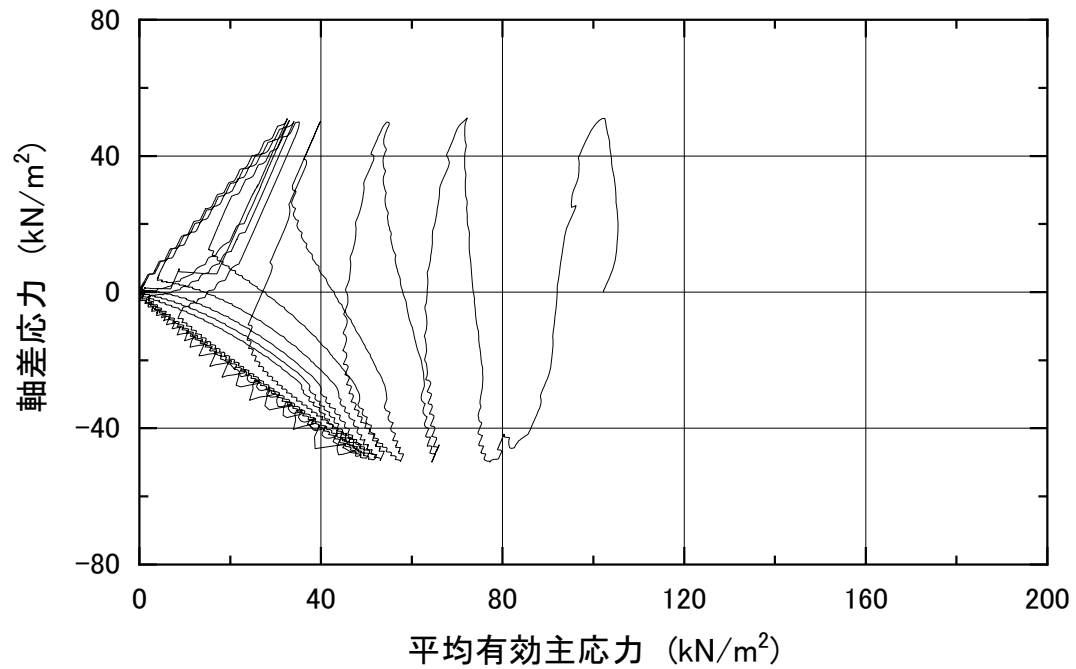
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.1, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 6層, w=2.5%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.246



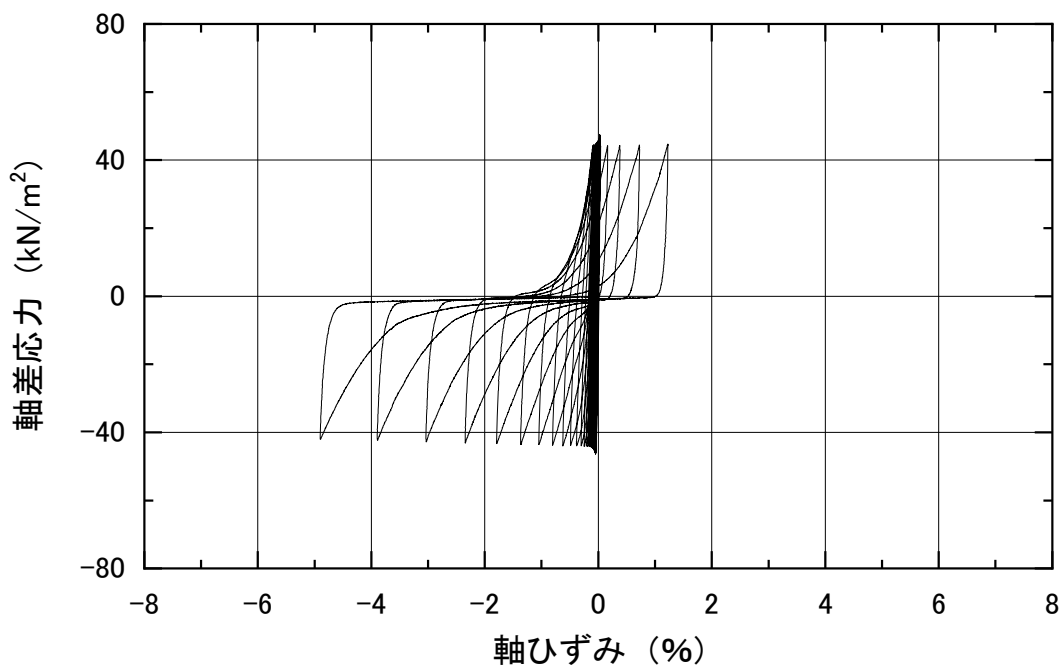
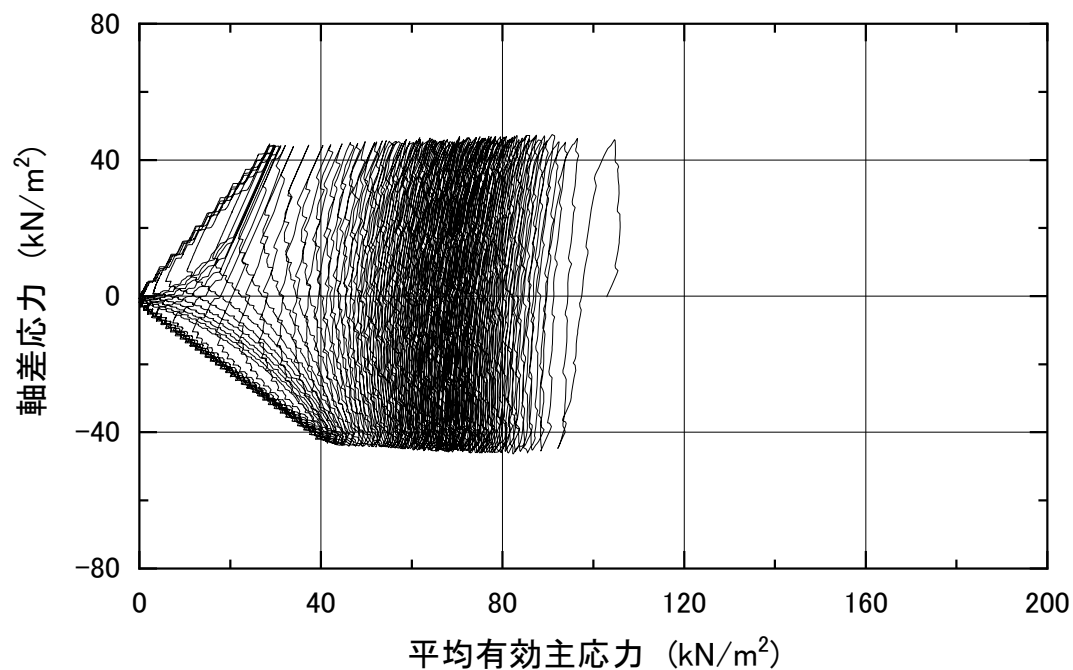
JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験(有効応力経路・応力-ひずみ関係)

試料番号: 豊浦砂

供試体No.2, 突固め法による供試体作製(Dr=60%), 6層, w=2.5%

試験条件: 背圧 $u_b=200 \text{ kN/m}^2$, 圧密応力 $\sigma'_c=100 \text{ kN/m}^2$, 有効拘束圧 $\sigma'_0=100 \text{ kN/m}^2$

載荷波形: 三角波, 繰返し応力振幅比: 0.221

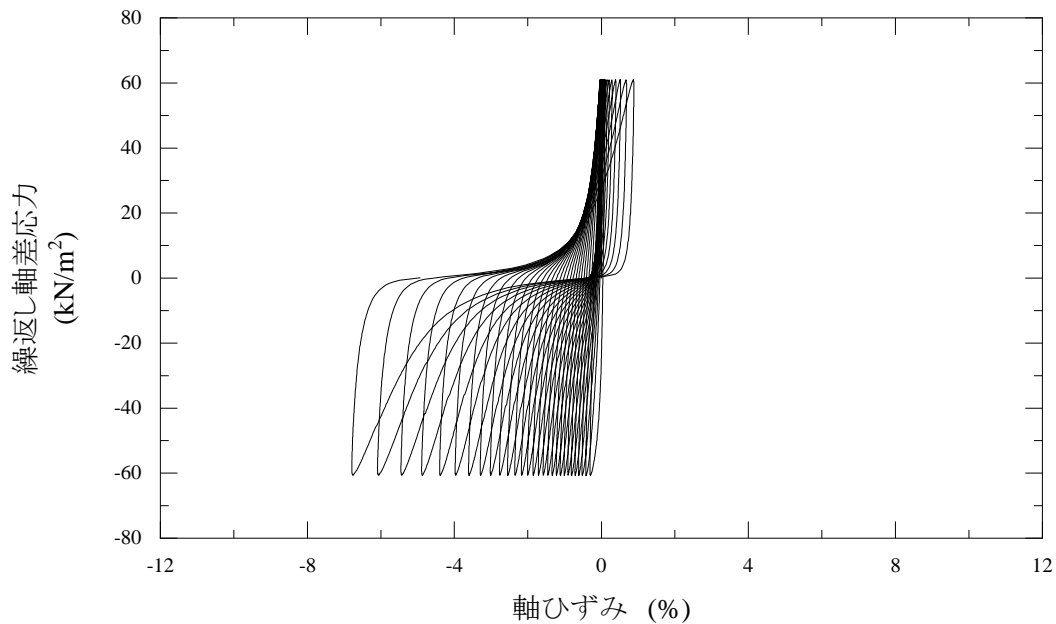
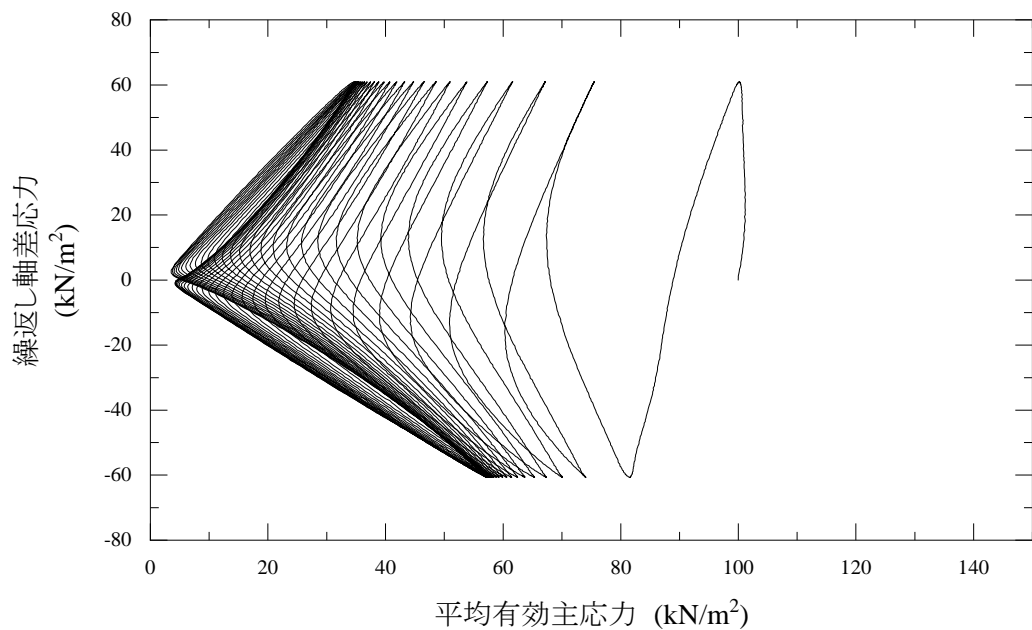


| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月23日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 60.9 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 60.8 | 8.5 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 60.8 | 16.0 |
| | | | 5% | 60.8 | 25.7 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.304 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | 22 | |



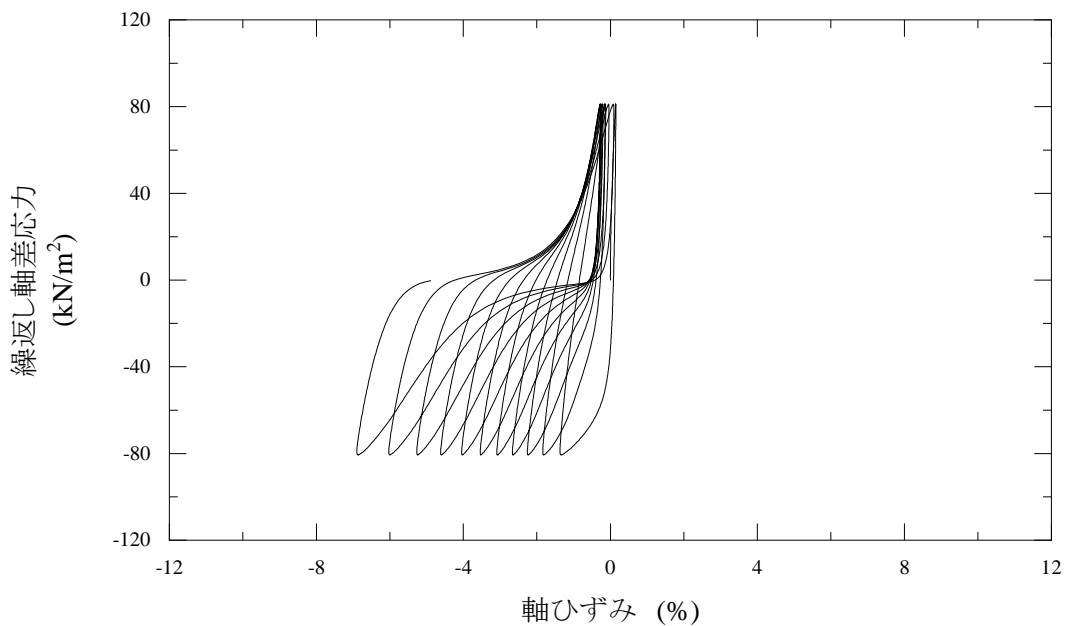
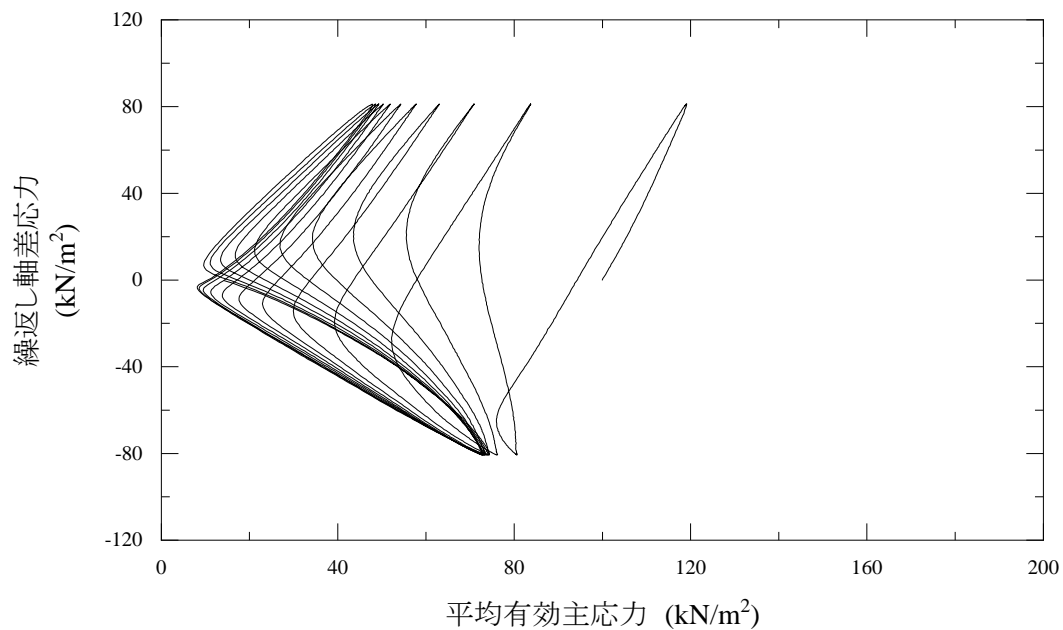
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月23日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 81.0 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 81.0 | 0.7 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 81.0 | 3.0 |
| | | | 5% | 80.9 | 8.9 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.405 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | - |



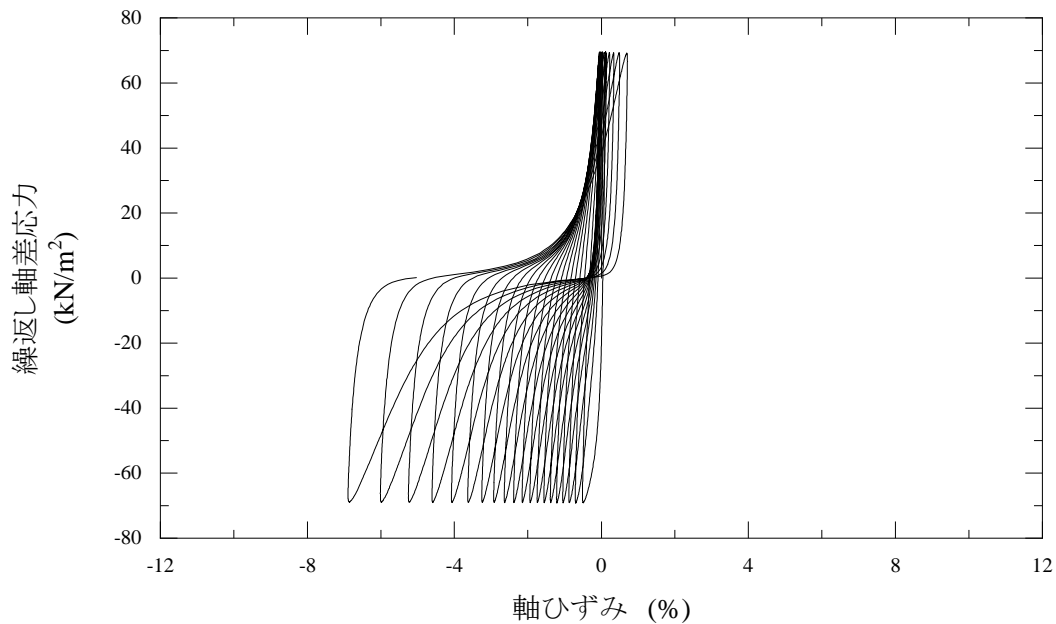
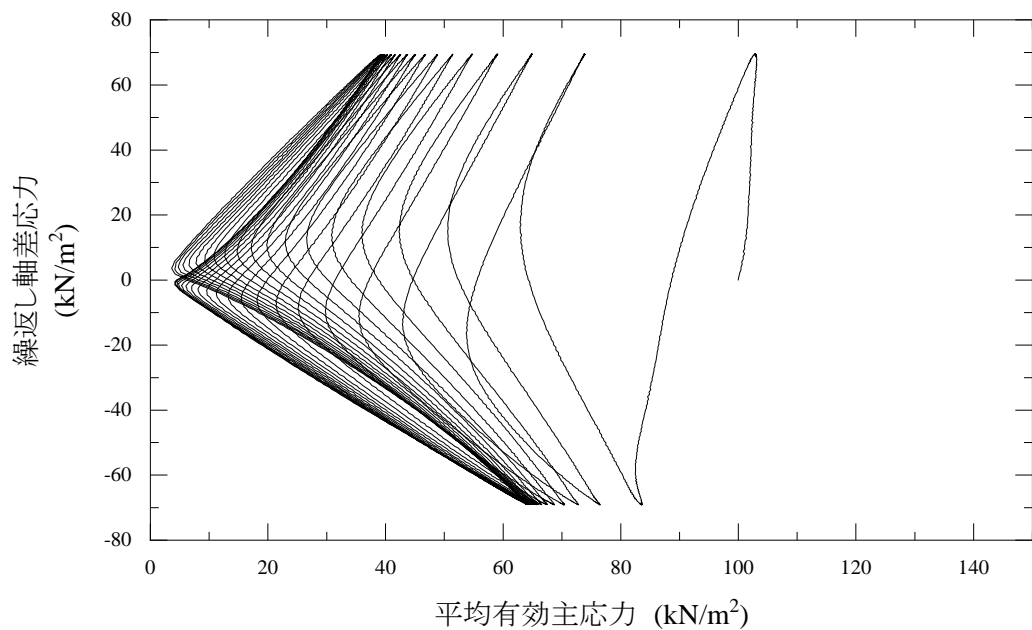
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月23日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 69.3 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 69.3 | 3.9 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 69.2 | 9.7 |
| | | | 5% | 69.1 | 17.5 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.347 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | 16 |



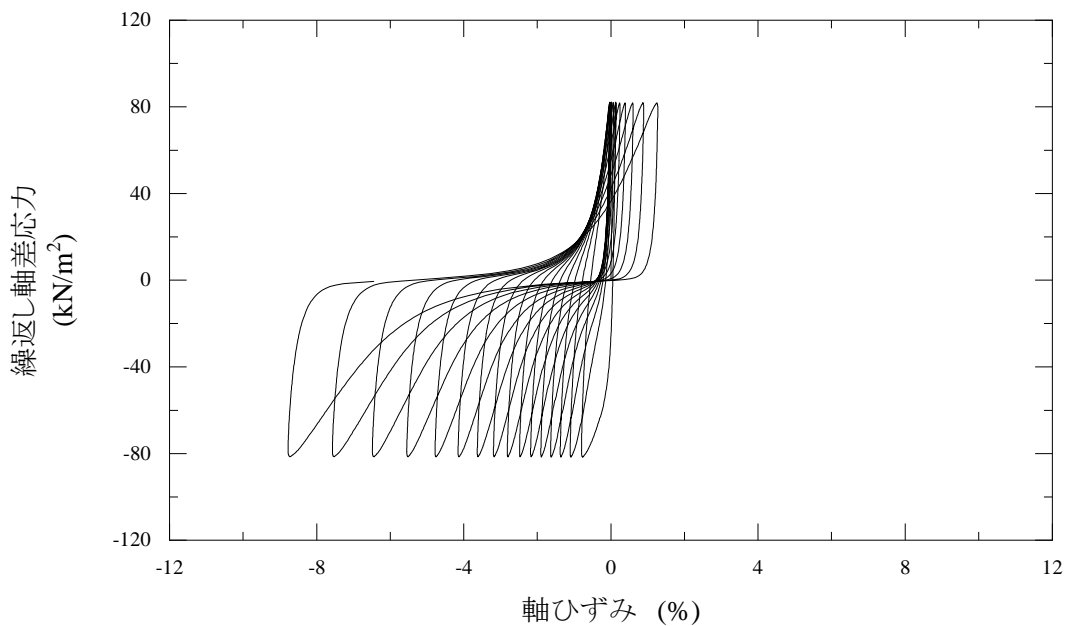
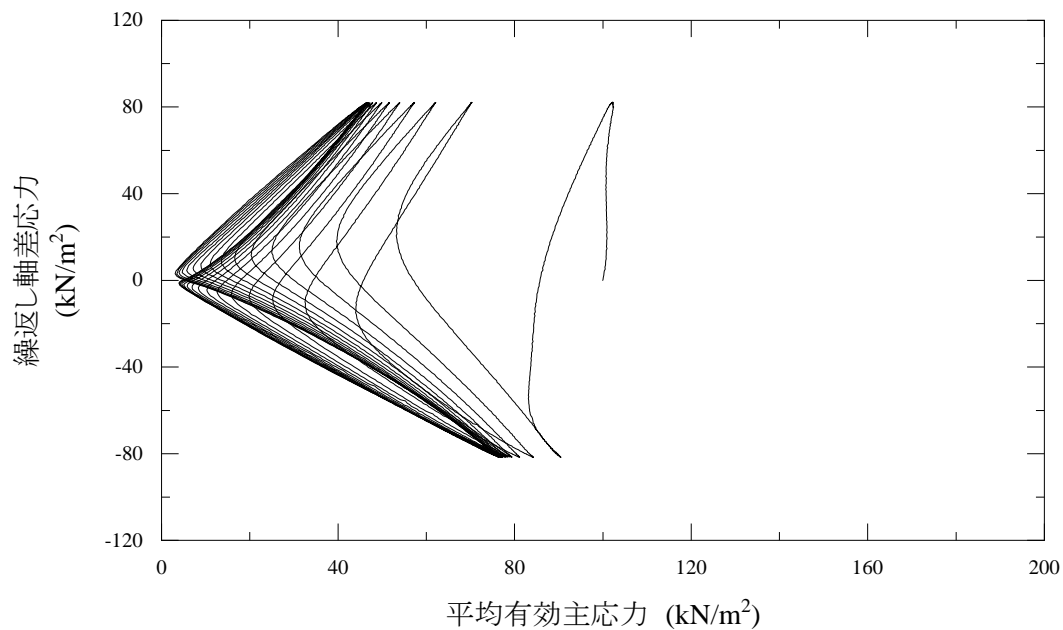
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月3日

試料番号 (深さ) WT04_pdmax95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|-------------------------------------|-------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | | | | | |
| 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 1.01 | 81.9 | - |
| 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 1.01 | 81.9 | 1.8 |
| 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 1.01 | 81.8 | 5.7 |
| | | 5% | 1.00 | 81.7 | 12.0 |
| 载荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.00 | 81.7 | 16.0 |
| 载荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.410 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | 11 | |



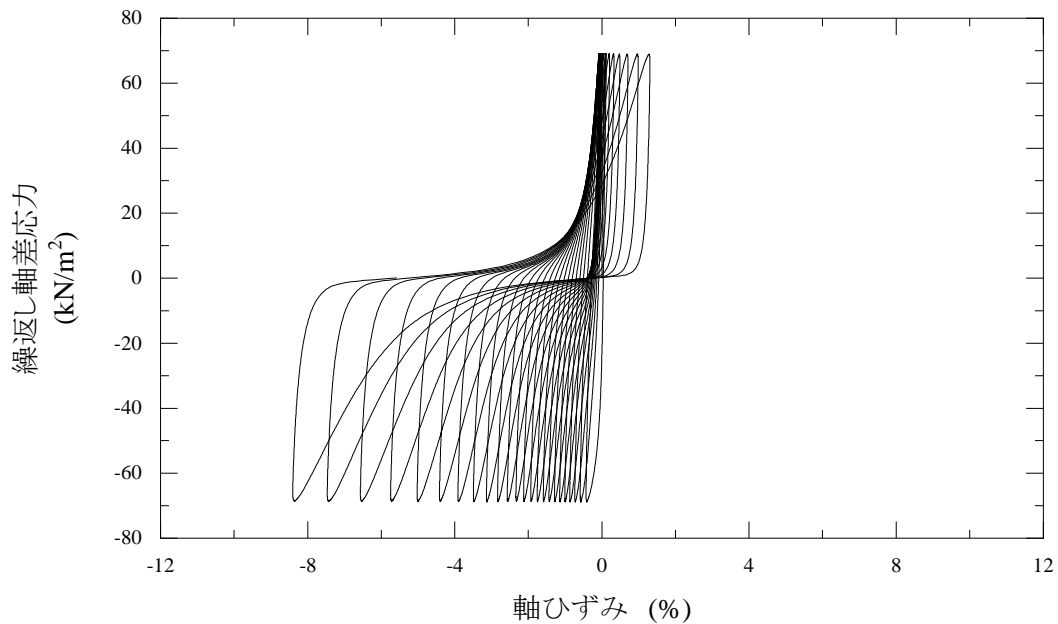
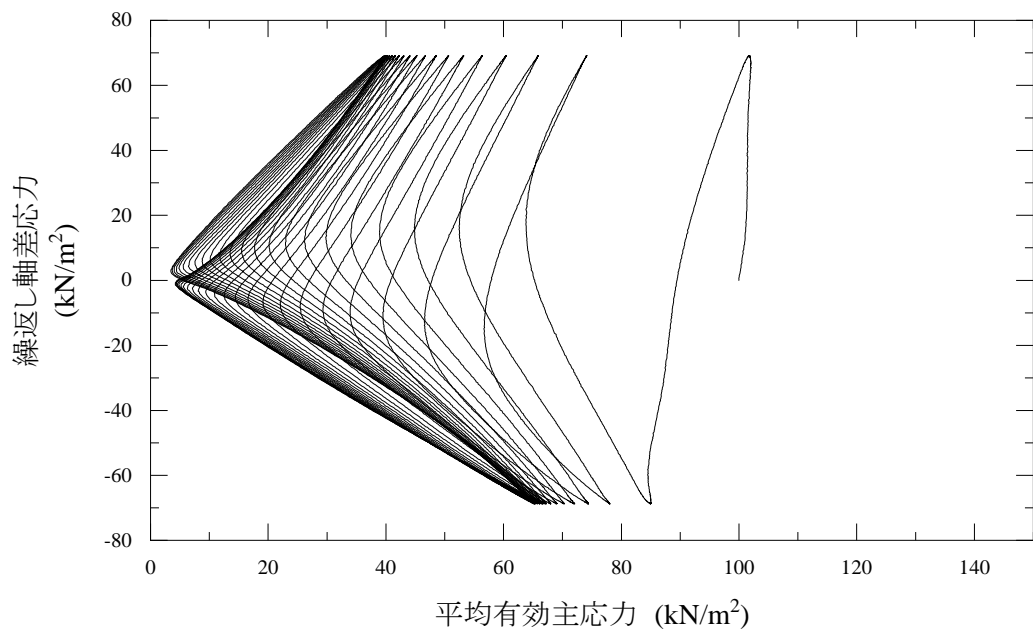
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |



| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月3日

試料番号 (深さ) WT04_pdmax95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 69.0 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 68.9 | 1.9 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 68.9 | 7.4 |
| | | | 5% | 68.9 | 20.2 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.345 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | 17 |



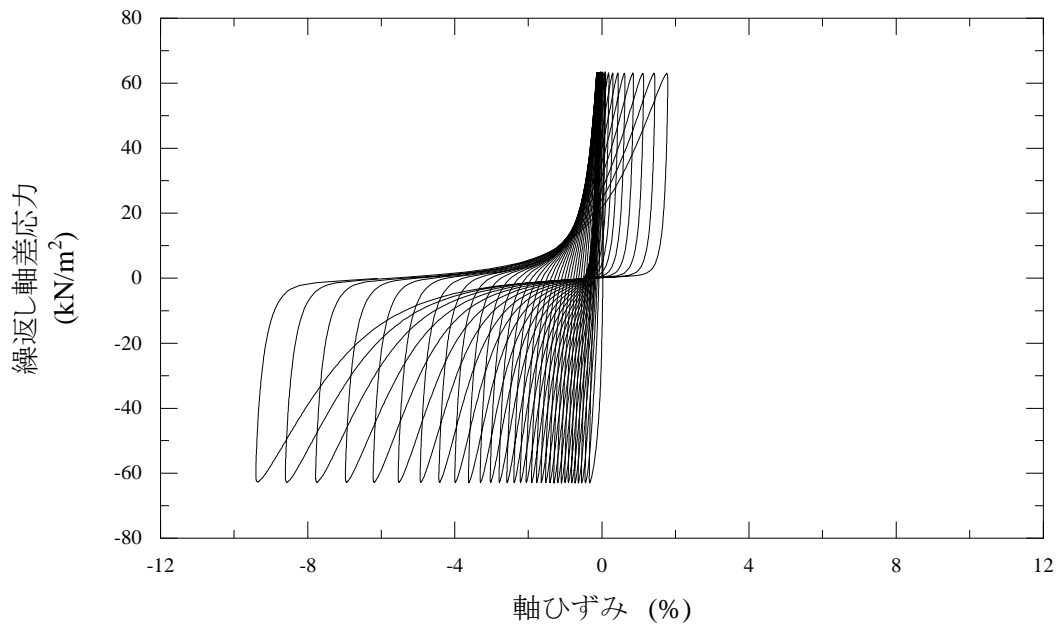
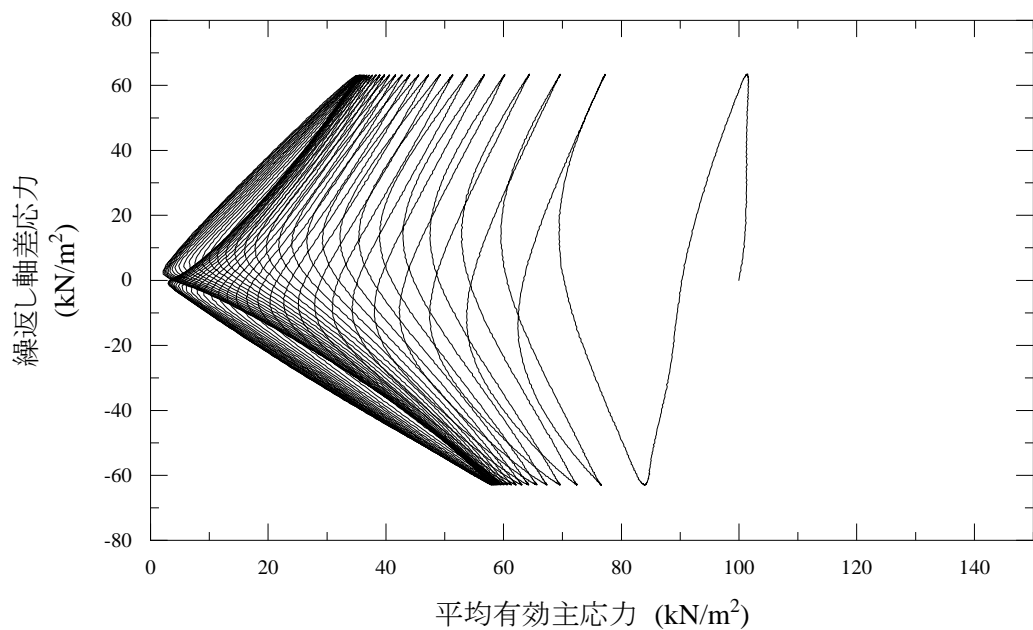
| | | | |
|---|--|---|---|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 |  |  |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月3日

試料番号 (深さ) WT04_pdmax95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 63.1 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 63.1 | 9.0 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 63.1 | 17.7 |
| | | | 5% | 63.0 | 26.8 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.00 | 62.9 | 32.0 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.316 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | 22 | |



特記事項

- 1) $DA=1\%$ までの平均値
- 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。

供試体初期状態

繰返し载荷後



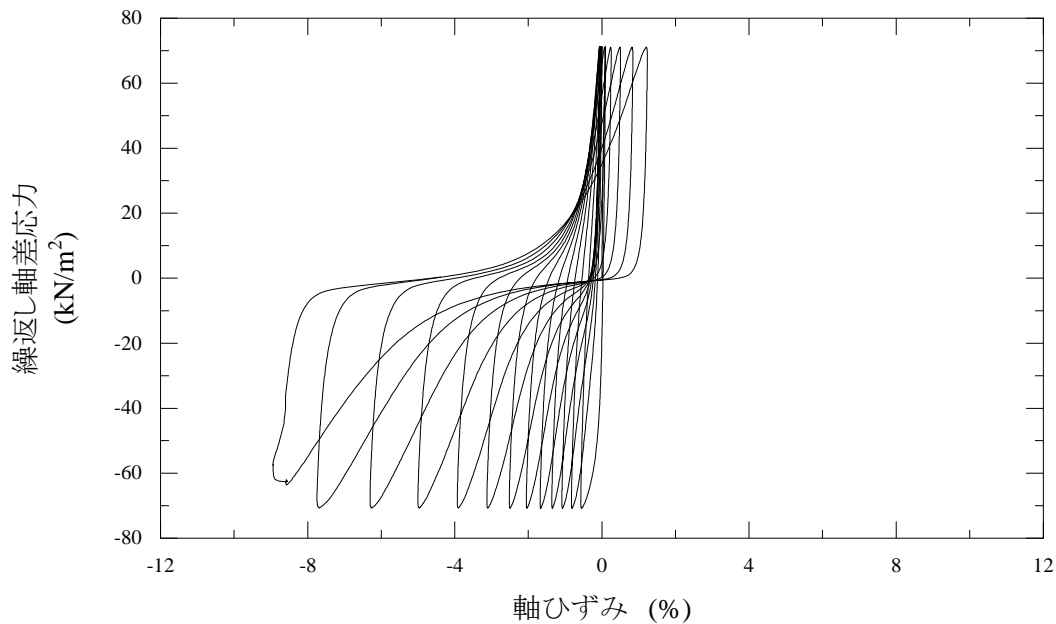
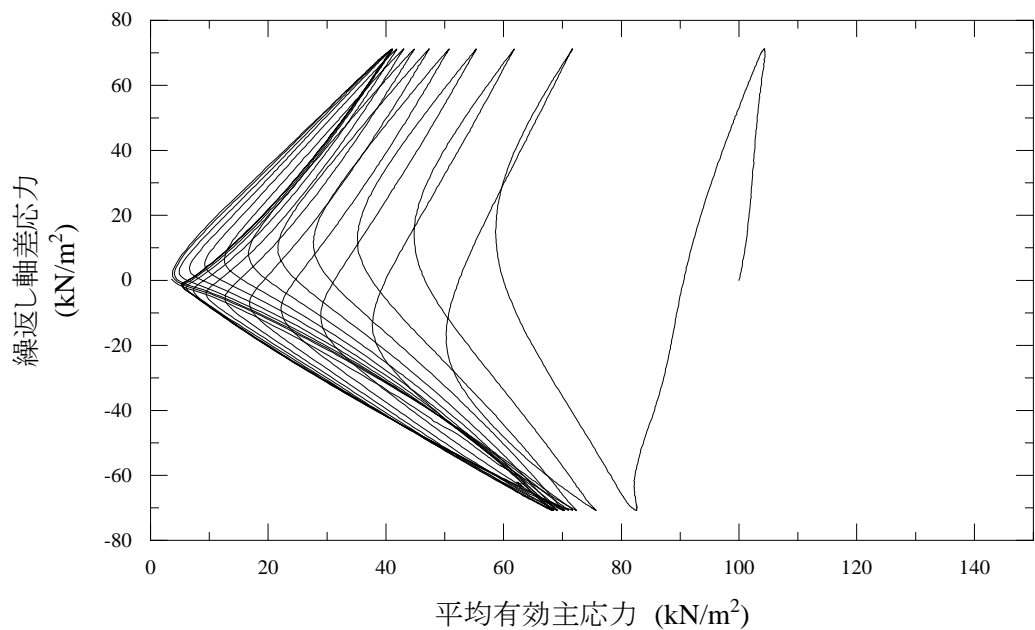
[1kN/m² ≒ 0.0102 kgf/cm²]

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年12月4日

試料番号 (深さ) WT01_rdma95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 71.0 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 71.0 | 2.9 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 71.0 | 6.1 |
| | | | 5% | 71.0 | 9.9 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.355 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | 10 | |



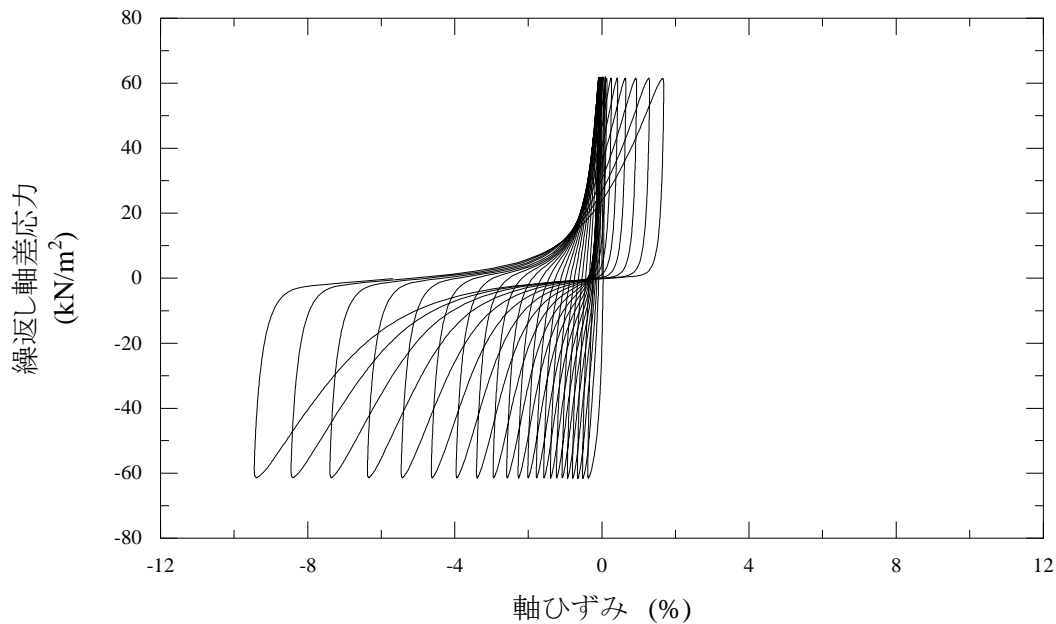
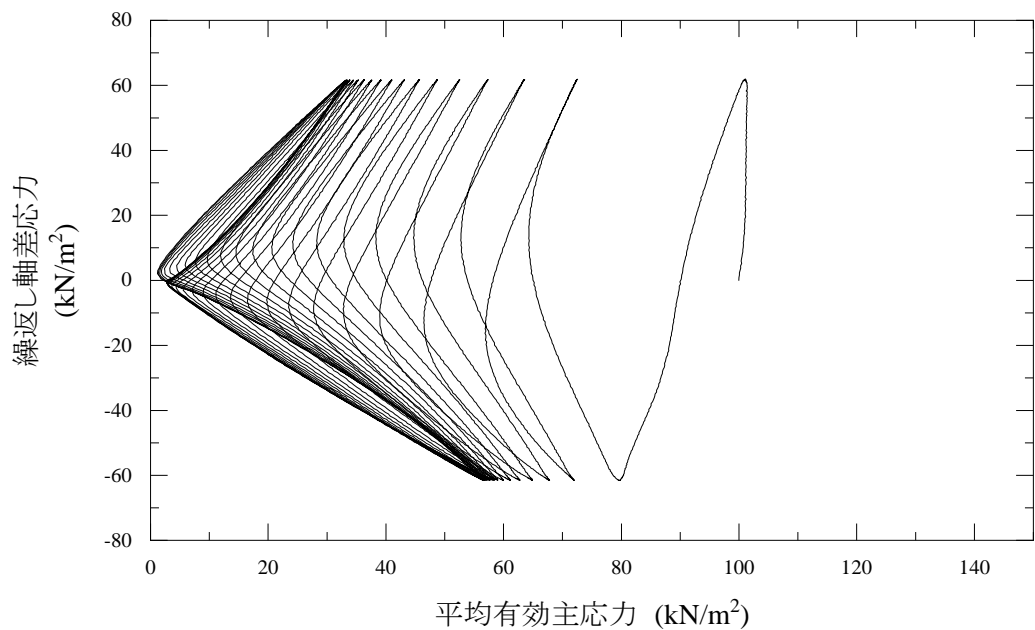
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年12月4日

試料番号 (深さ) WT01_rdmax95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 61.7 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 61.6 | 5.9 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 61.6 | 11.6 |
| | | | 5% | 61.5 | 17.3 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.00 | 61.5 | 21.3 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.308 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | 14 |



特記事項

- 1) $DA=1\%$ までの平均値
- 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。

供試体初期状態

繰返し载荷後



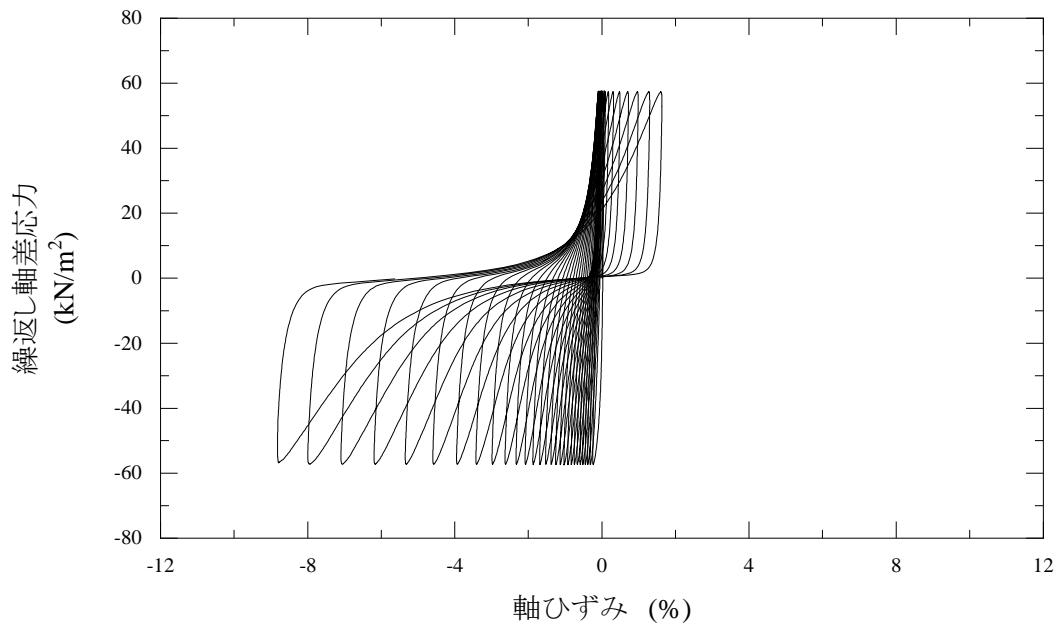
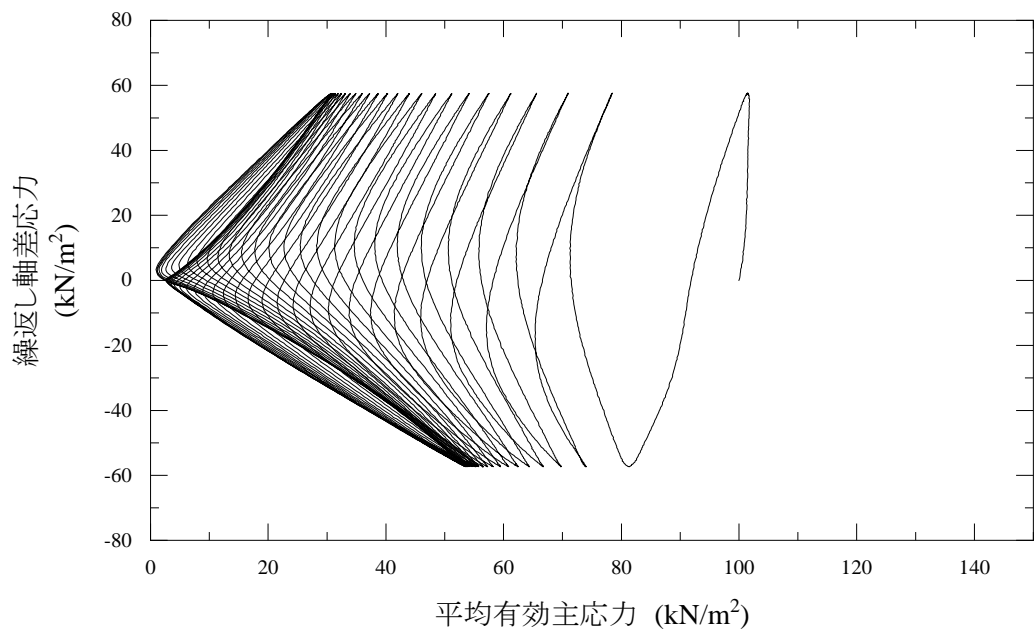
[1kN/m² ≒ 0.0102 kgf/cm²]

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年12月4日

試料番号 (深さ) WT01_rdma95%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 57.4 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 57.4 | 11.8 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 57.4 | 17.9 |
| | | | 5% | 57.4 | 24.2 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.01 | 57.1 | 28.7 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.287 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | 20 |



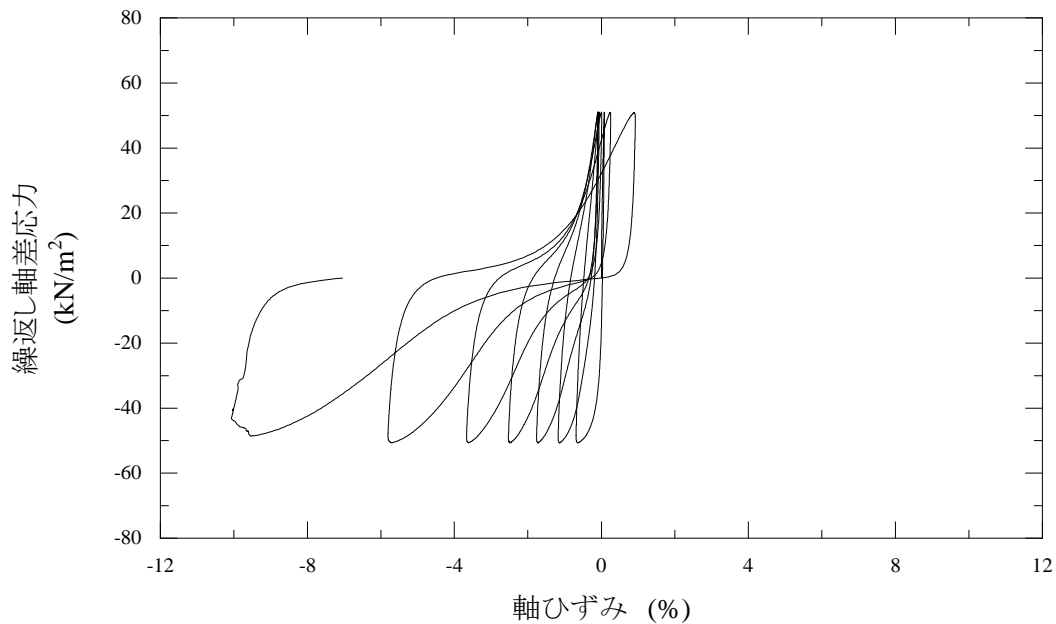
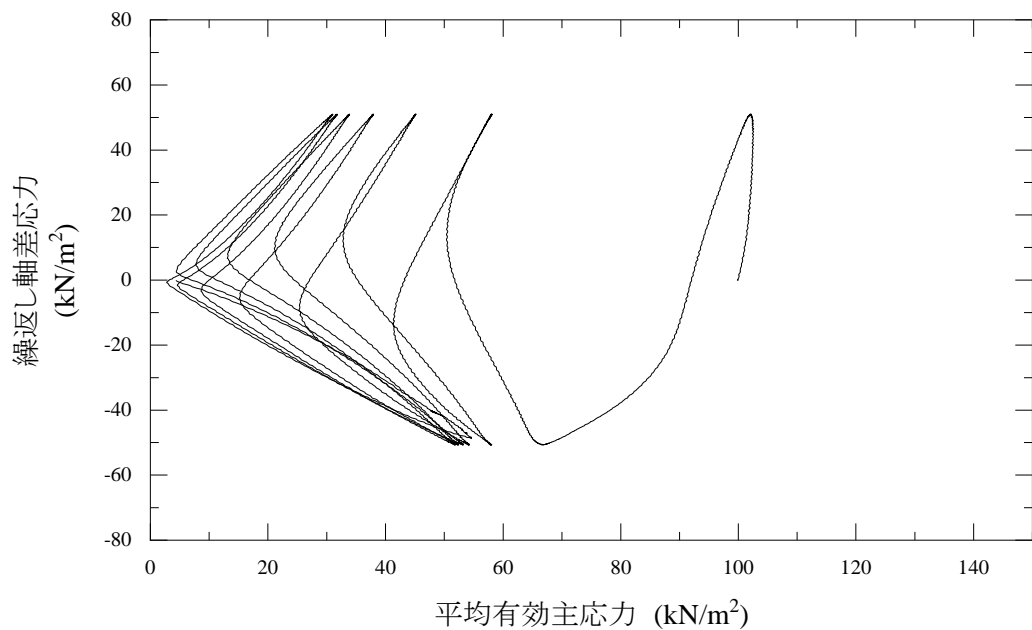
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年6月25日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax90%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 50.9 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 50.9 | 1.9 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 50.9 | 3.7 |
| | | | 5% | 50.8 | 5.8 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.05 | 49.8 | 6.9 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.254 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | 6 | |



特記事項

- 1) $DA=1\%$ までの平均値
- 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。

供試体初期状態

繰返し载荷後



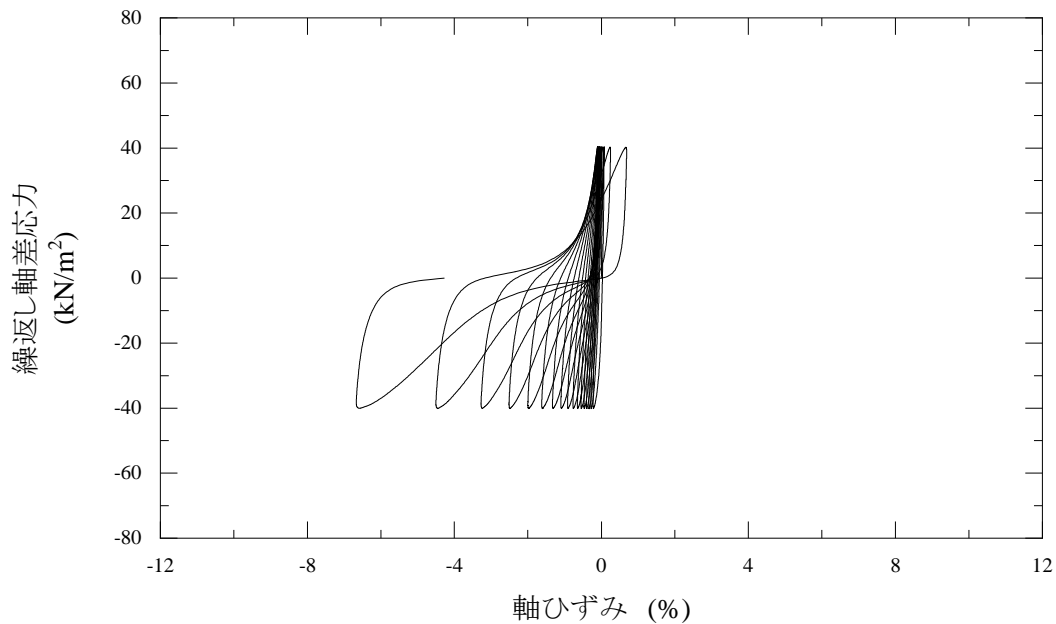
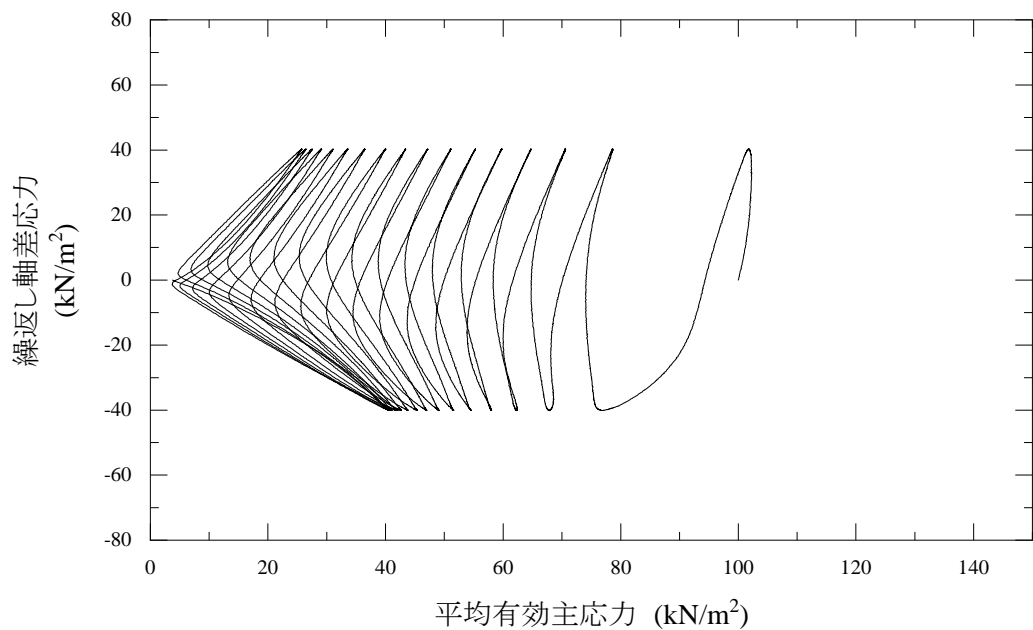
[1kN/m² ≒ 0.0102 kgf/cm²]

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年6月25日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax90%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 40.2 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 40.2 | 10.0 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 40.2 | 13.5 |
| | | | 5% | 40.2 | 16.3 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.201 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | 17 |



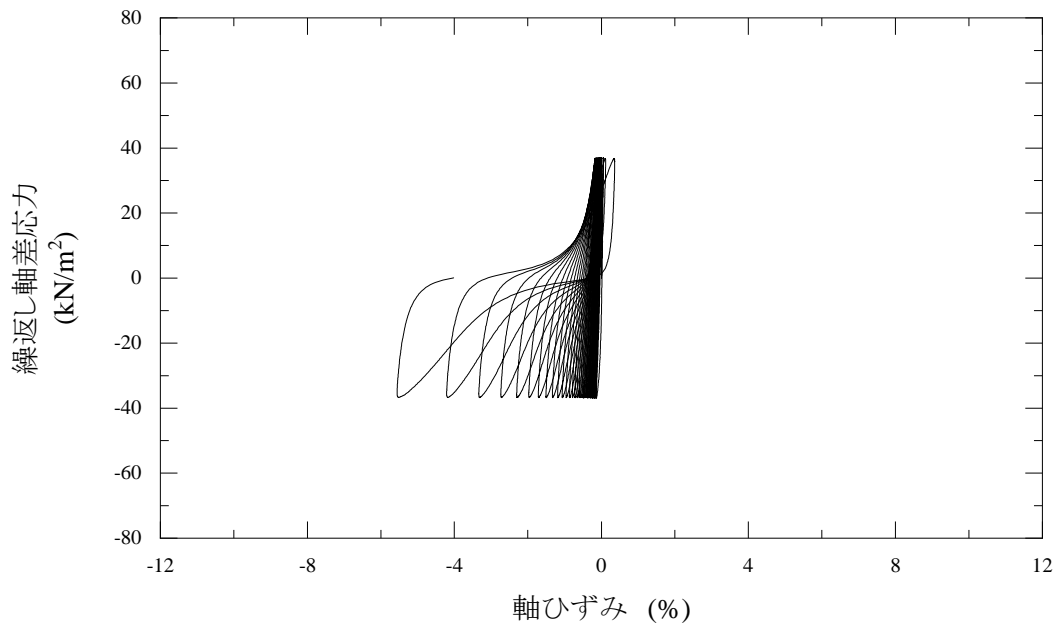
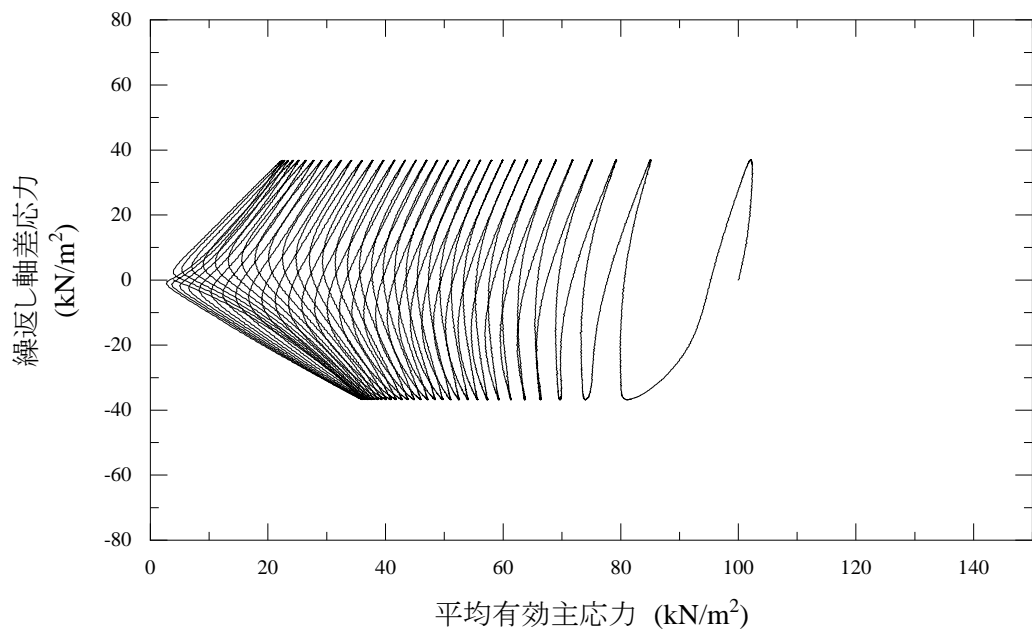
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年6月25日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax90%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 36.9 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 36.8 | 24.9 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 36.8 | 29.7 |
| | | | 5% | 36.8 | 33.7 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.184 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | | 32 |



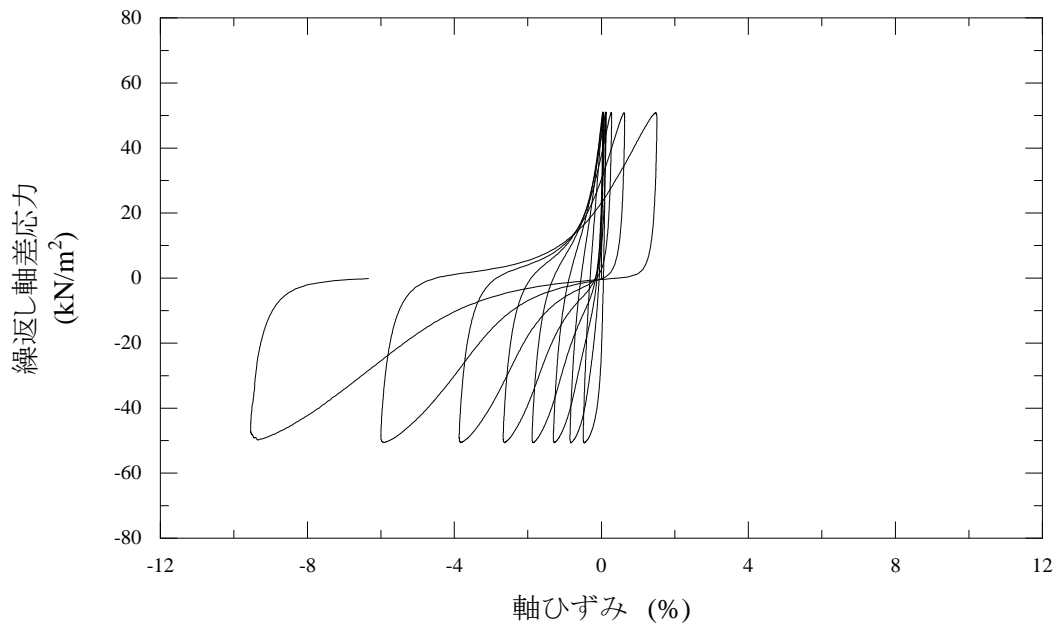
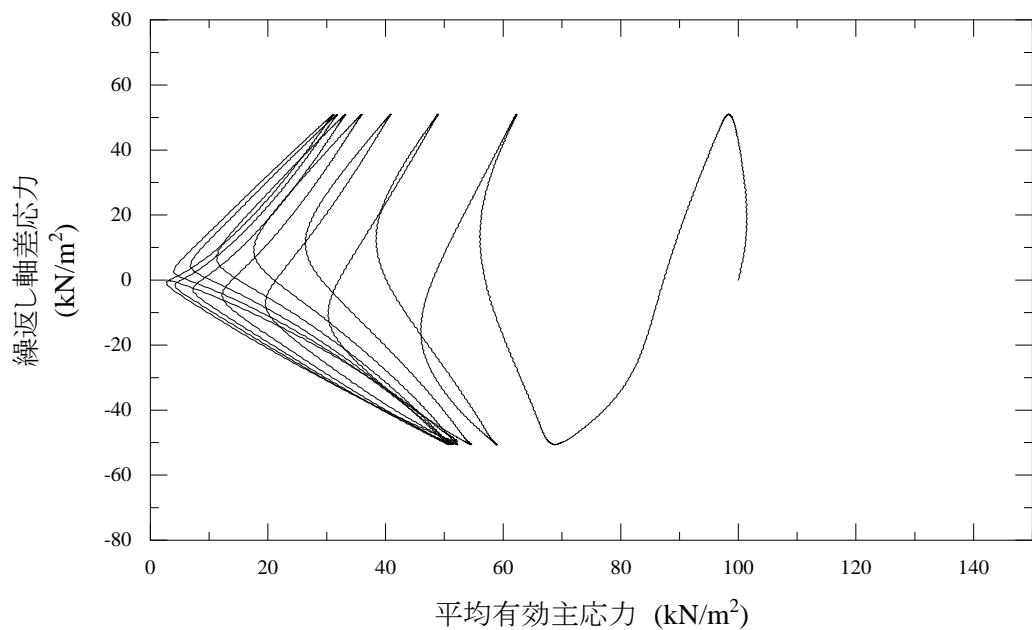
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年6月24日

試料番号 (深さ) WT04_pdmax90%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 50.8 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 50.8 | 2.6 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 50.8 | 4.4 |
| | | | 5% | 50.7 | 6.6 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.02 | 50.4 | 7.9 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.254 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | 7 |



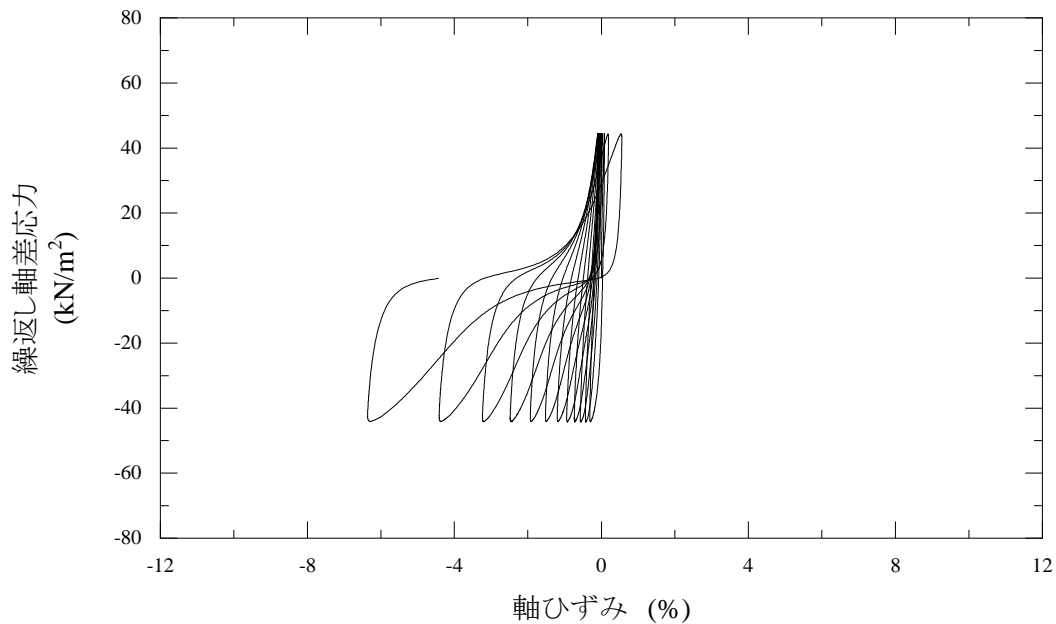
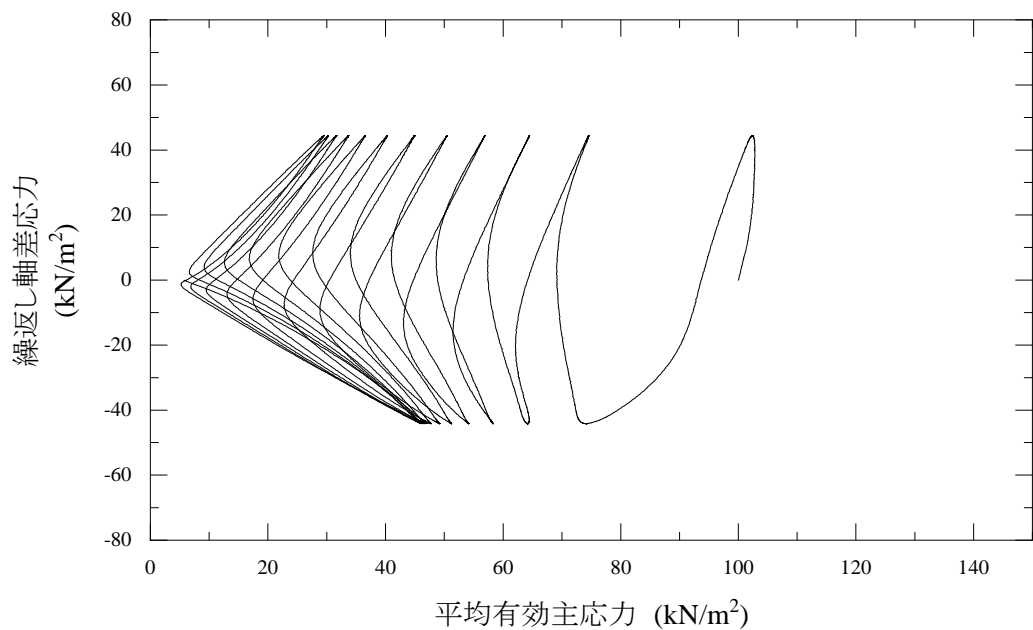
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年6月24日

試料番号 (深さ) WT04_pdmax90%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 44.4 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 44.3 | 5.8 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 44.3 | 8.6 |
| | | | 5% | 44.3 | 11.5 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.222 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | 12 | |



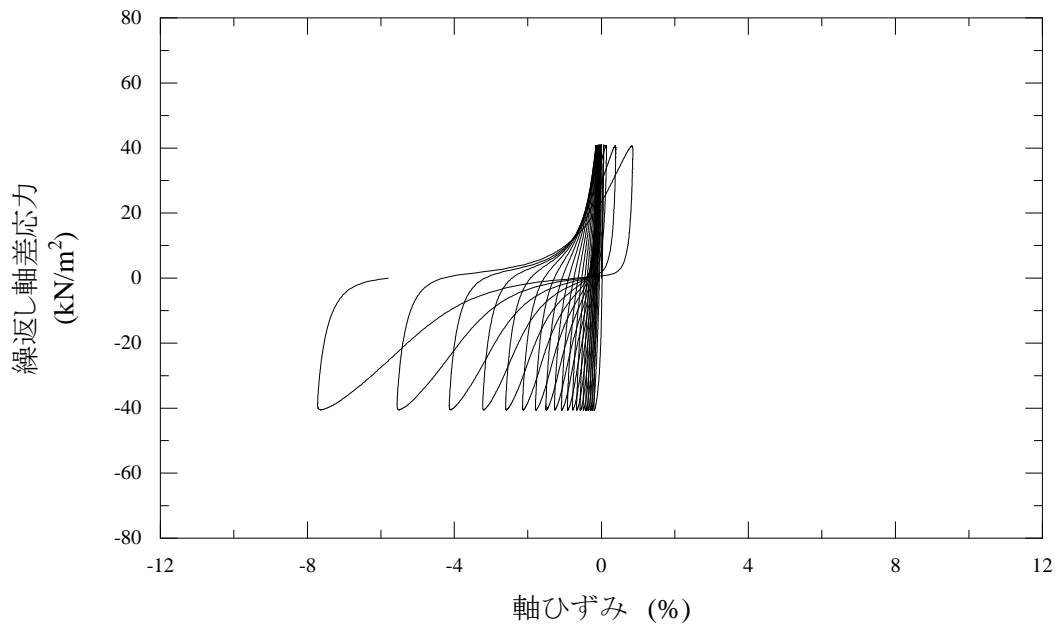
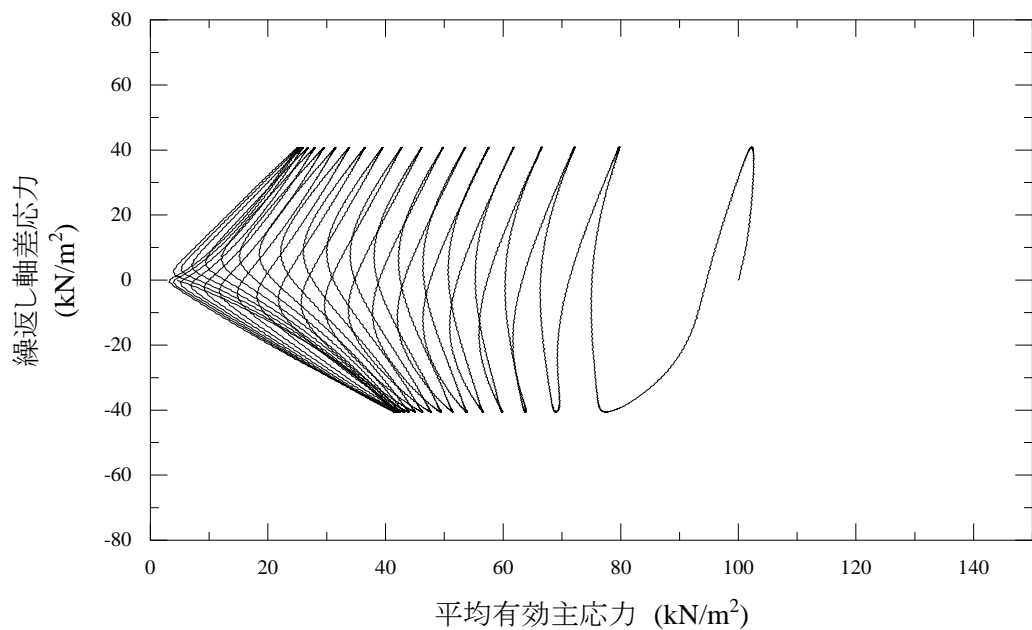
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年6月24日

試料番号 (深さ) WT04_pdmax90%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 40.8 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 40.7 | 11.6 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 40.7 | 14.9 |
| | | | 5% | 40.7 | 18.7 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.204 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | 18 | |



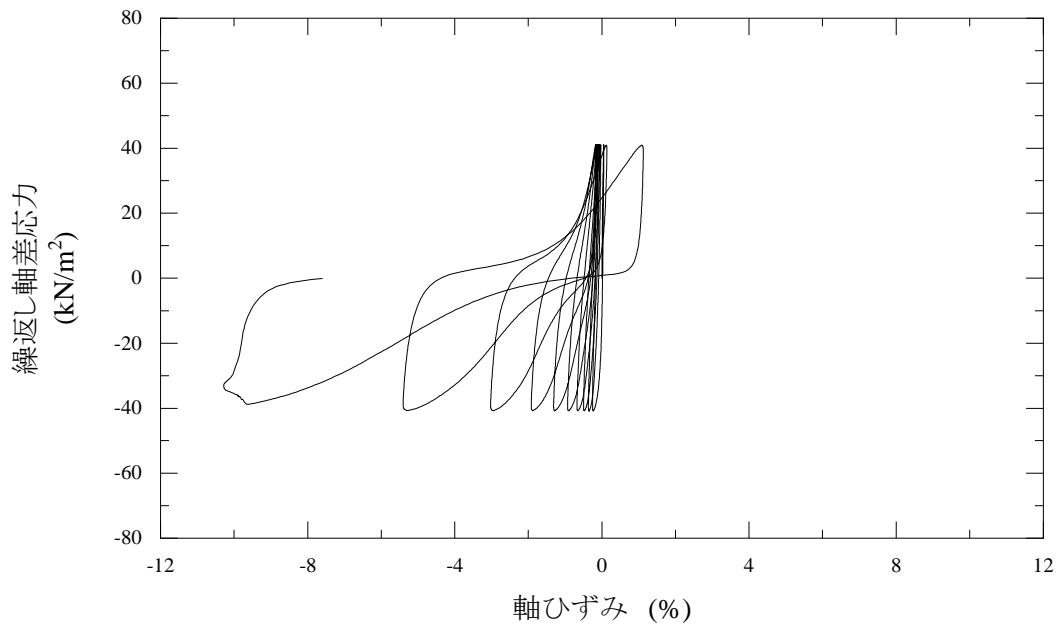
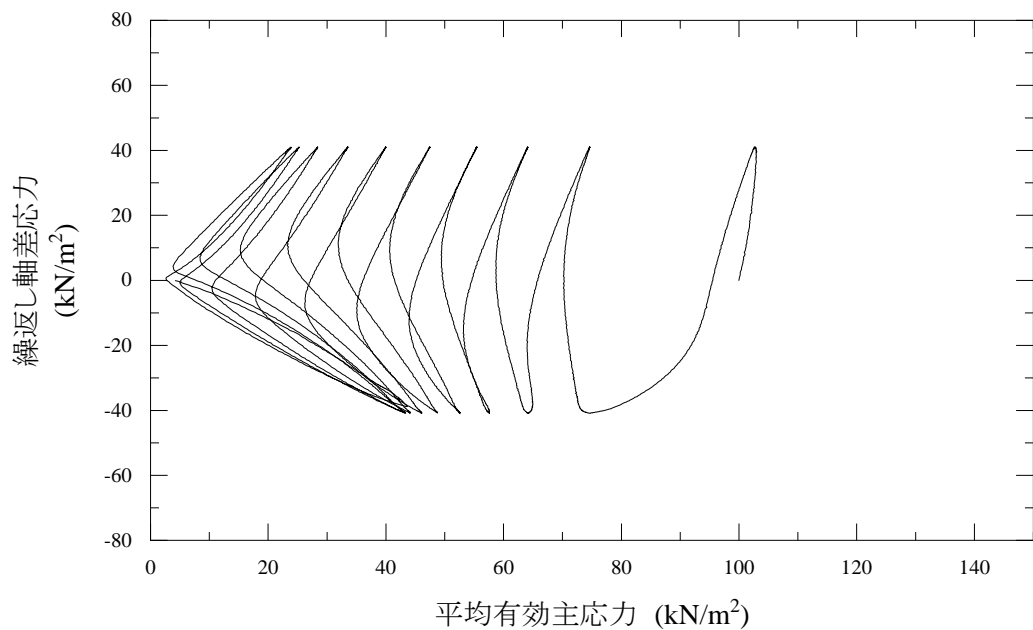
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年12月4日

試料番号 (深さ) WT01_rdma90%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 40.9 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 40.9 | 5.8 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 40.9 | 7.6 |
| | | | 5% | 40.8 | 8.9 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.06 | 39.9 | 9.0 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.205 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | 9 | |



特記事項

- 1) $DA=1\%$ までの平均値
- 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。

供試体初期状態

繰返し載荷後



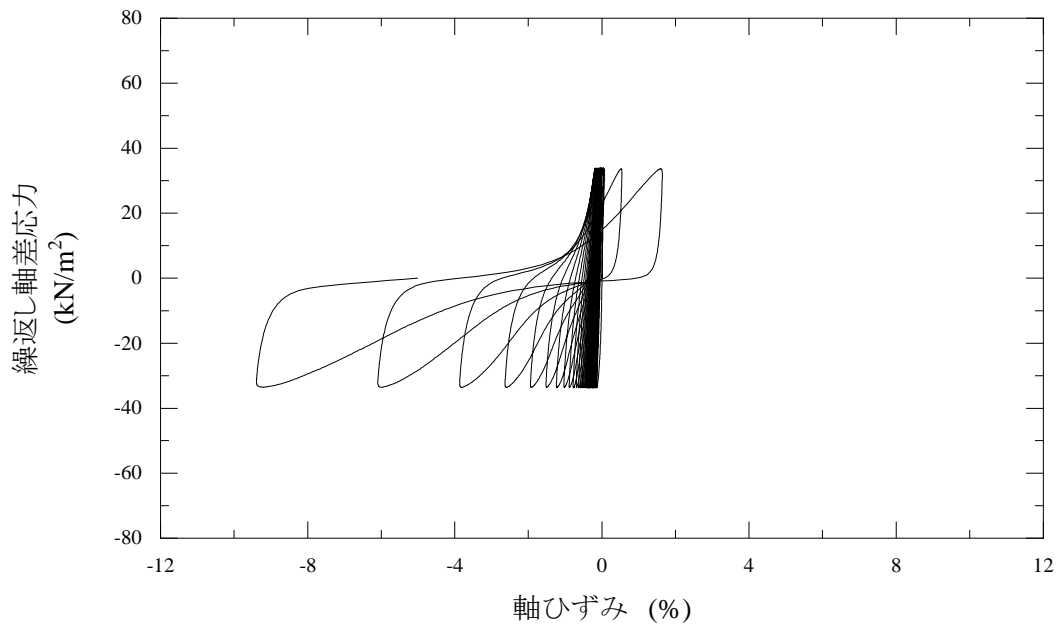
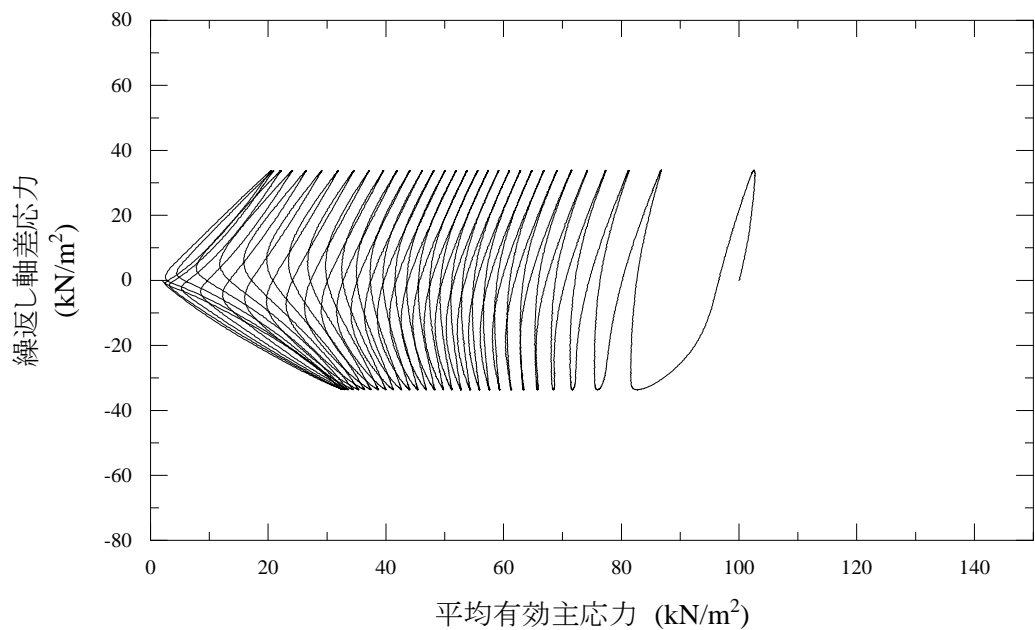
[1kN/m² ≒ 0.0102 kgf/cm²]

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年12月4日

試料番号 (深さ) WT01_rdma90%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 33.8 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 33.7 | 24.9 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 33.7 | 27.6 |
| | | | 5% | 33.7 | 29.6 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.00 | 33.6 | 30.8 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.169 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | 30 | |



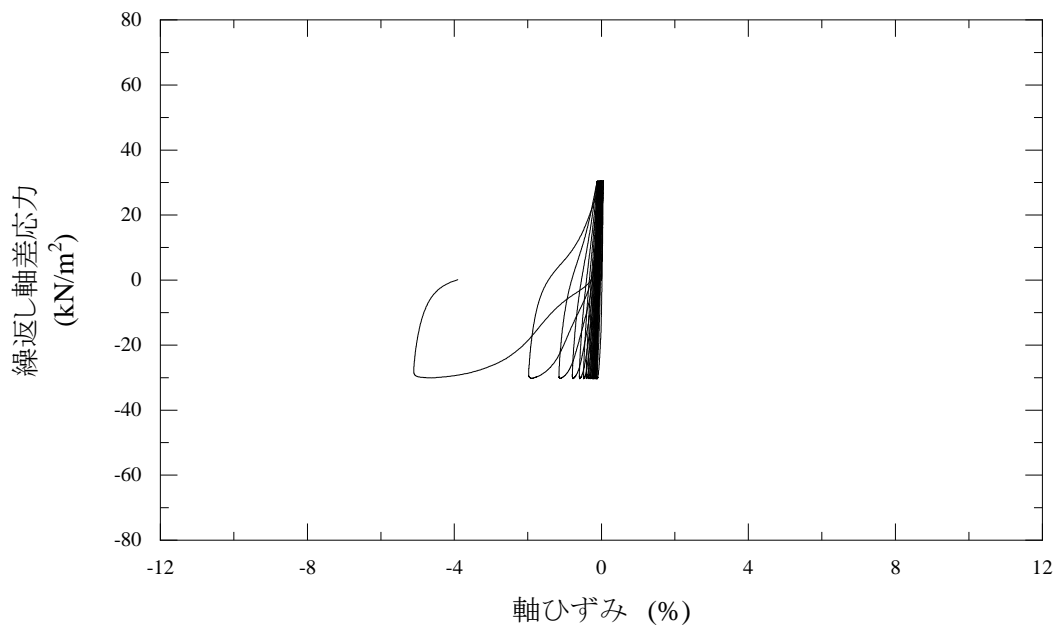
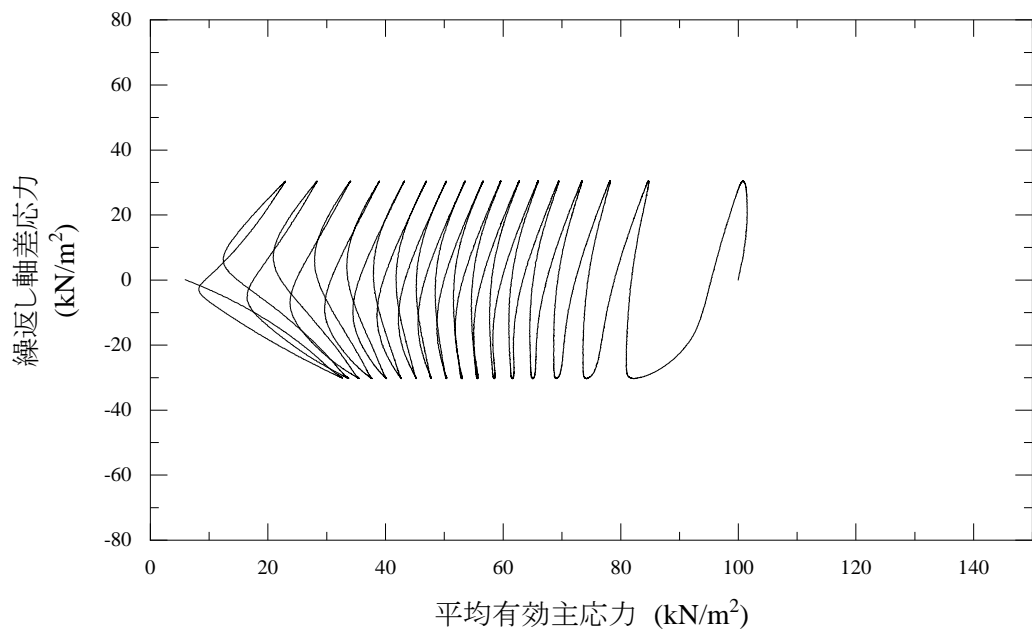
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月9日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 30.4 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 30.3 | 14.9 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 30.2 | 16.5 |
| | | | 5% | 30.2 | 17.0 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.152 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{u95} | | | - |



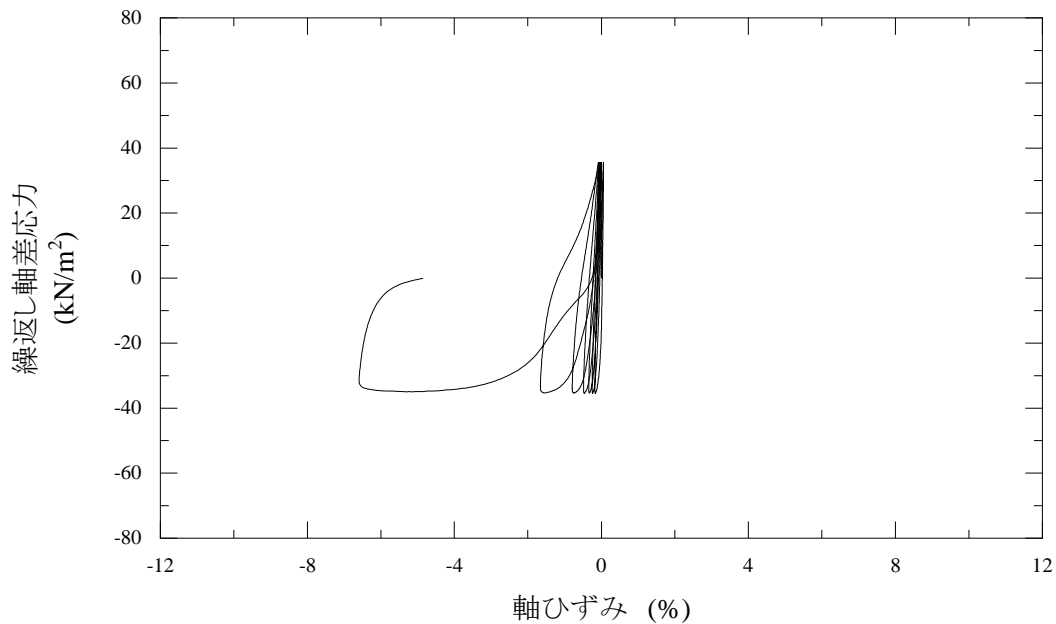
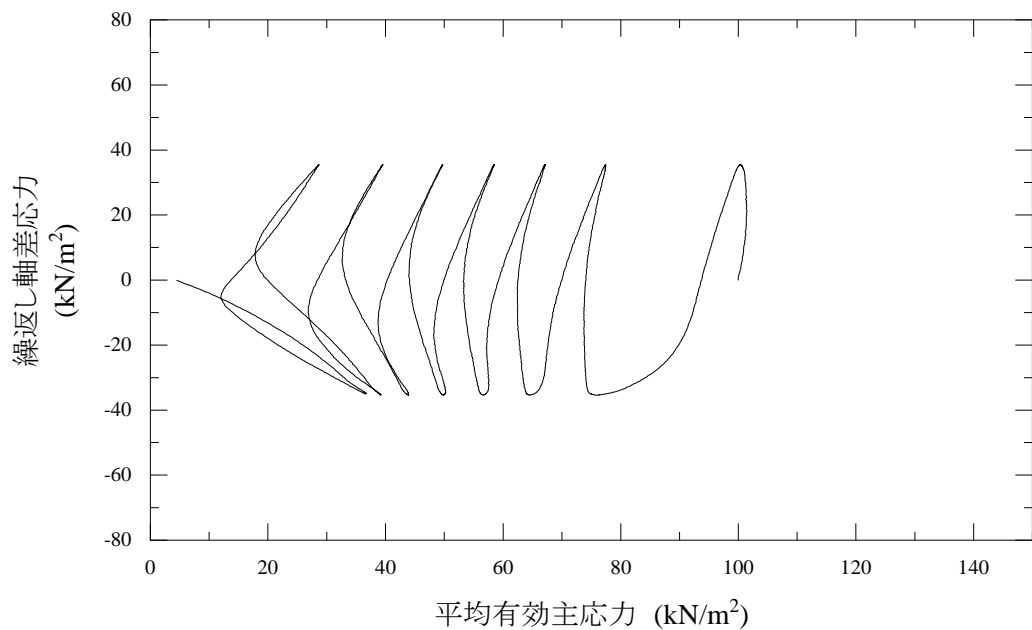
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月9日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c | |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|-----|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 1.00 | 35.5 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 1.00 | 35.4 | 5.7 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 1.01 | 35.2 | 6.5 |
| | | | 5% | 1.01 | 35.2 | 6.8 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - | |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.177 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | | 7 | |



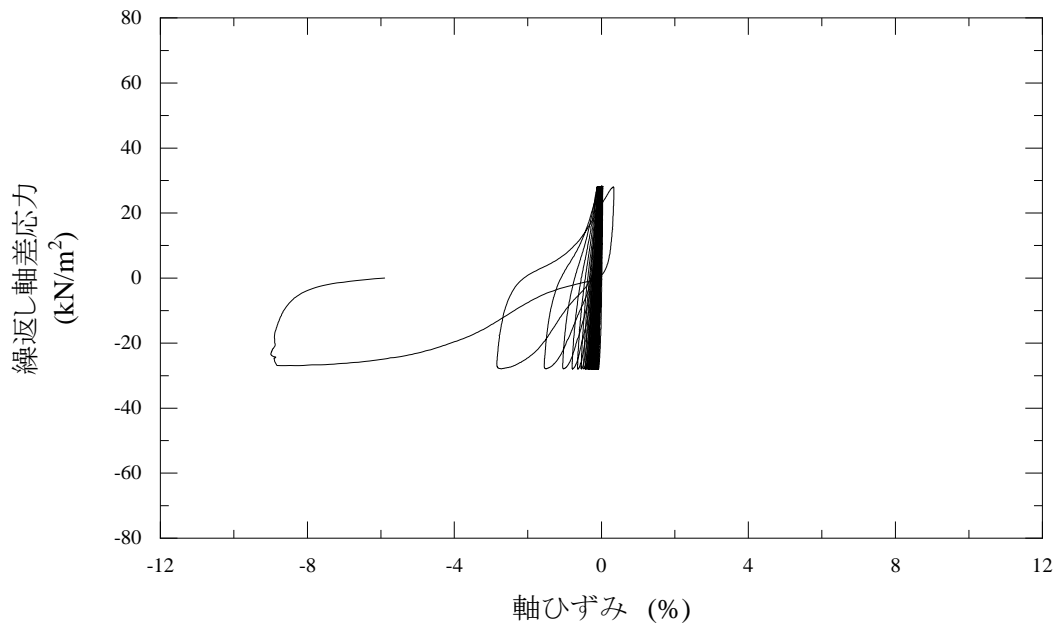
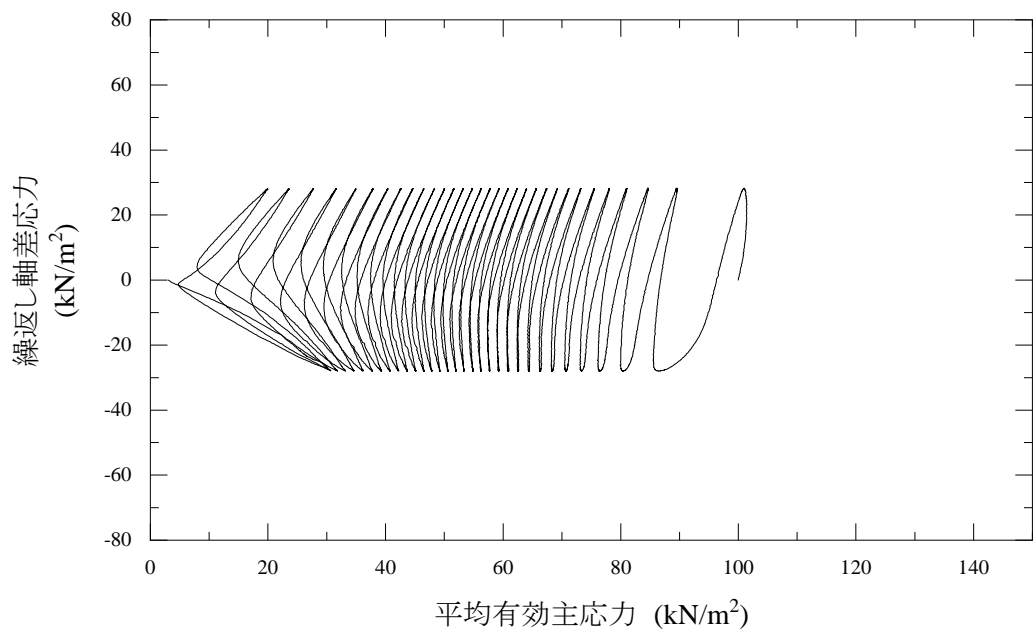
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月9日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 28.1 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 28.0 | 29.5 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 28.0 | 30.7 |
| | | | 5% | 27.5 | 31.6 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.140 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | 32 | |



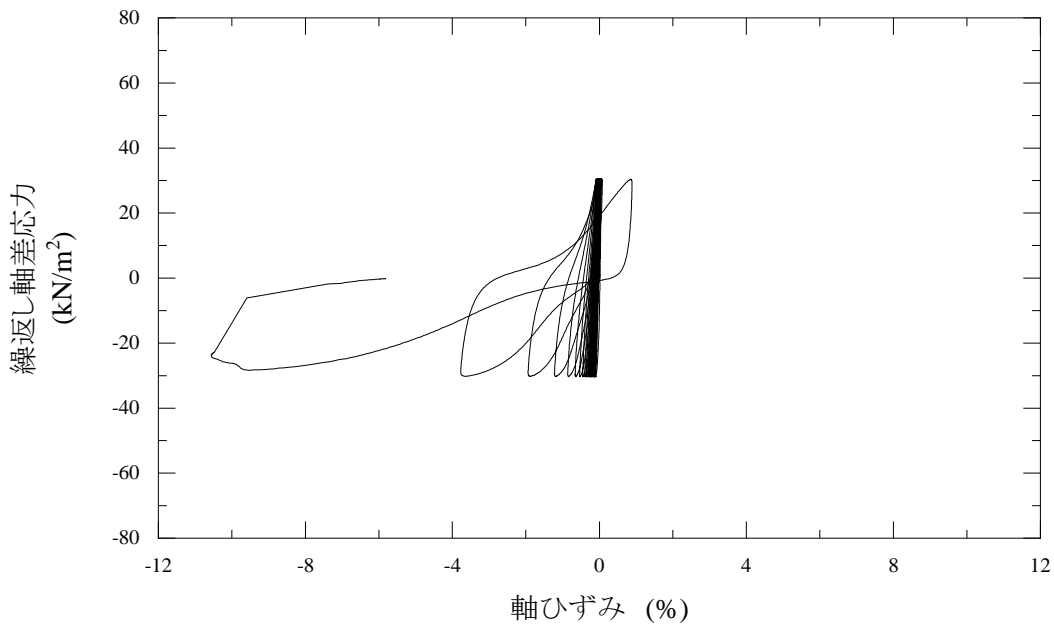
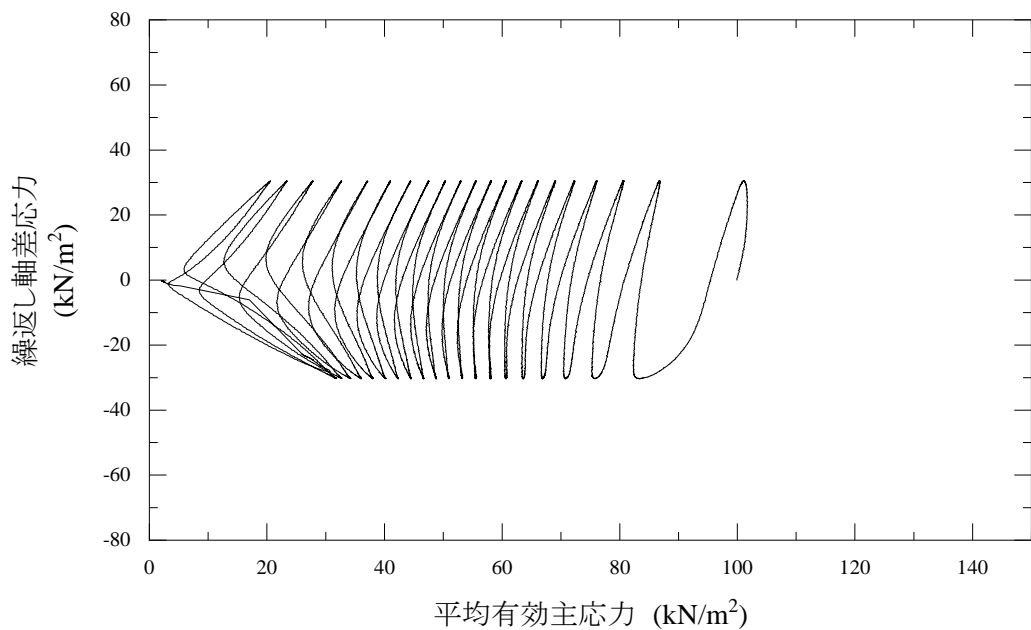
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月3日

試料番号 (深さ) WT4_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c | |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 30.4 | - | |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 30.4 | 17.8 | |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 1.01 | 30.3 | 19.4 |
| | | | 5% | 1.07 | 29.4 | 20.5 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - | |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.152 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | | 21 | |



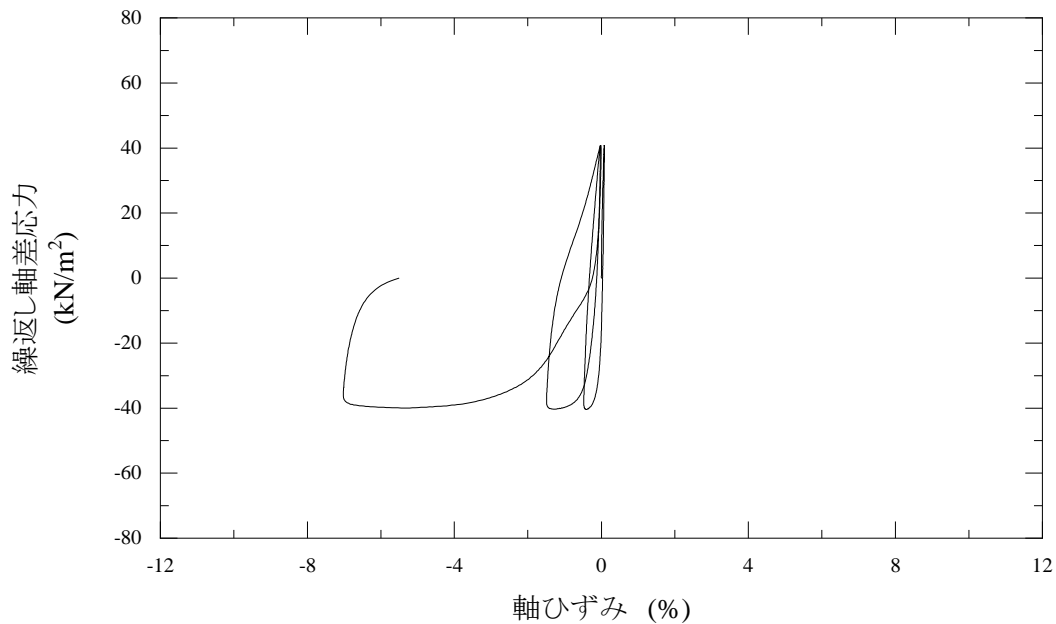
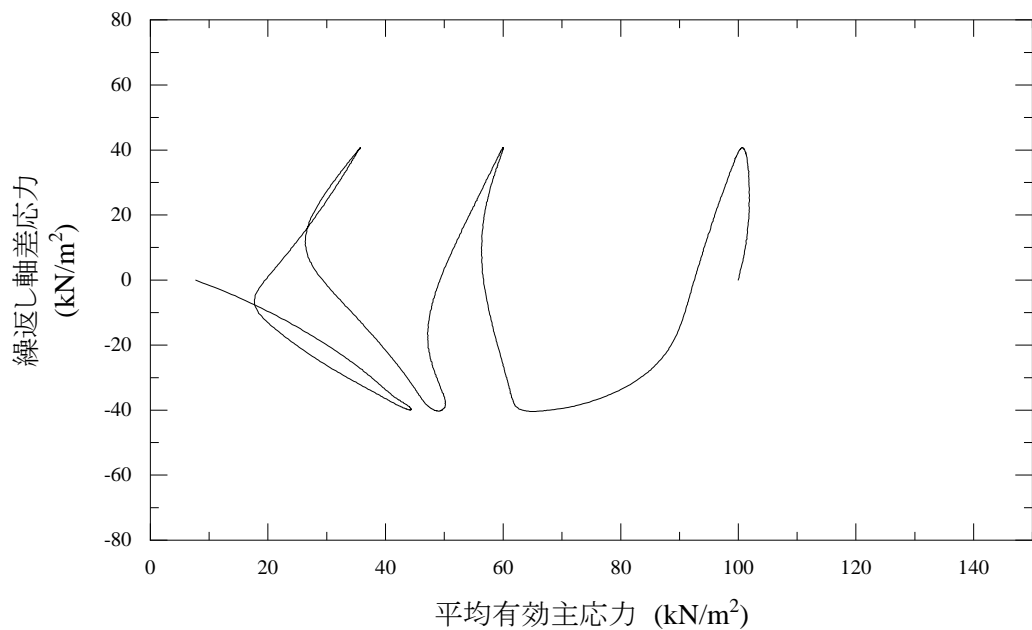
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月3日

試料番号 (深さ) WT4_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 40.6 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 40.6 | 1.8 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 40.4 | 2.5 |
| | | | 5% | 40.4 | 2.8 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.203 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | | - |



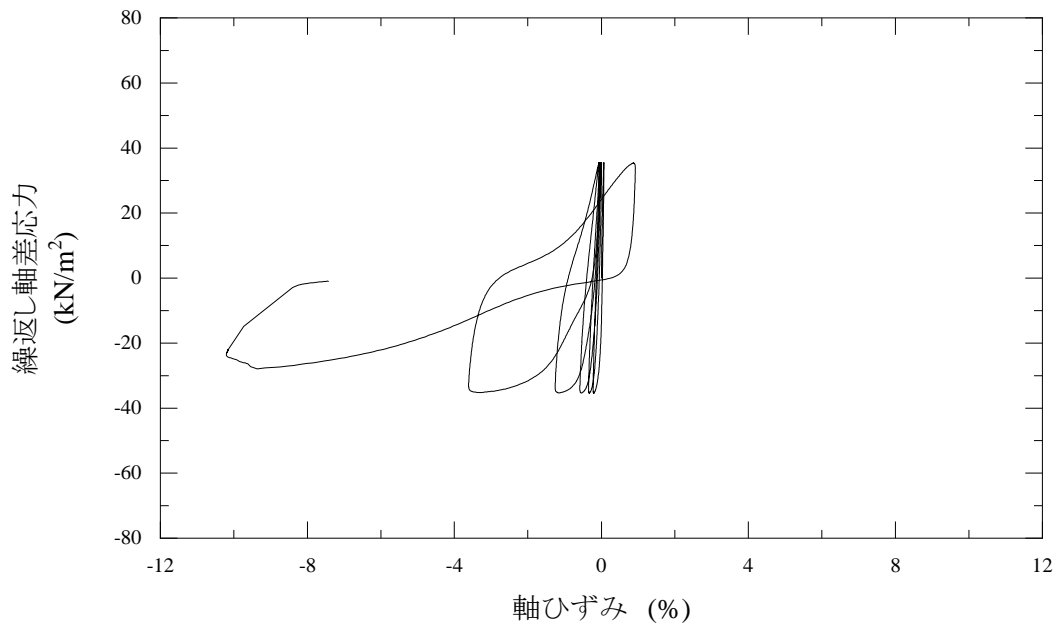
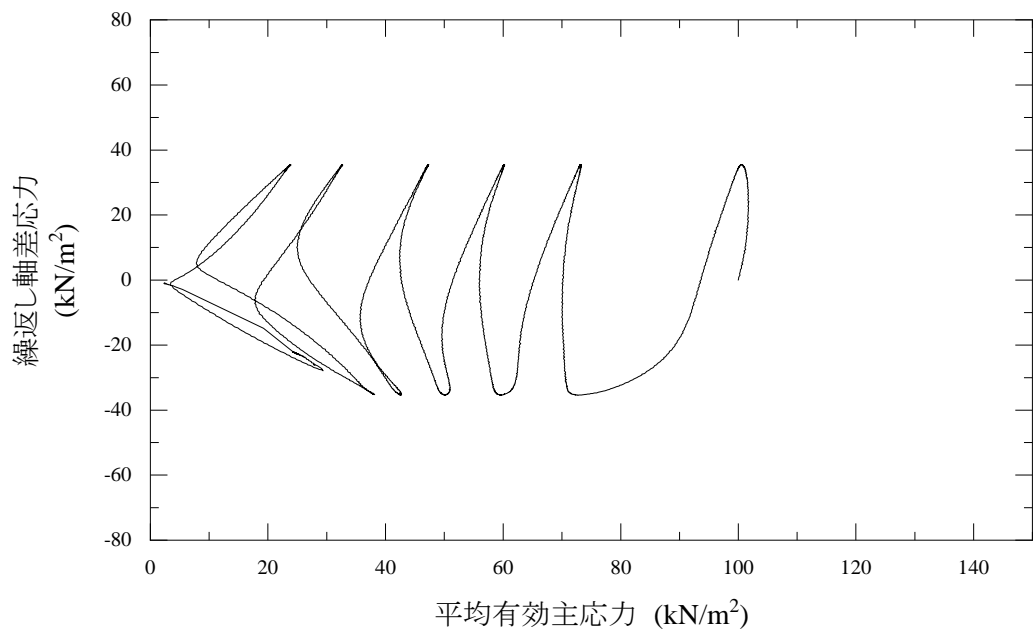
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年7月3日

試料番号 (深さ) WT4_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c | |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|-----|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 35.5 | - | |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 35.4 | 3.9 | |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 1.01 | 35.4 | 4.7 |
| | | | 5% | 1.27 | 31.7 | 5.5 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - | |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.177 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | 6 | |



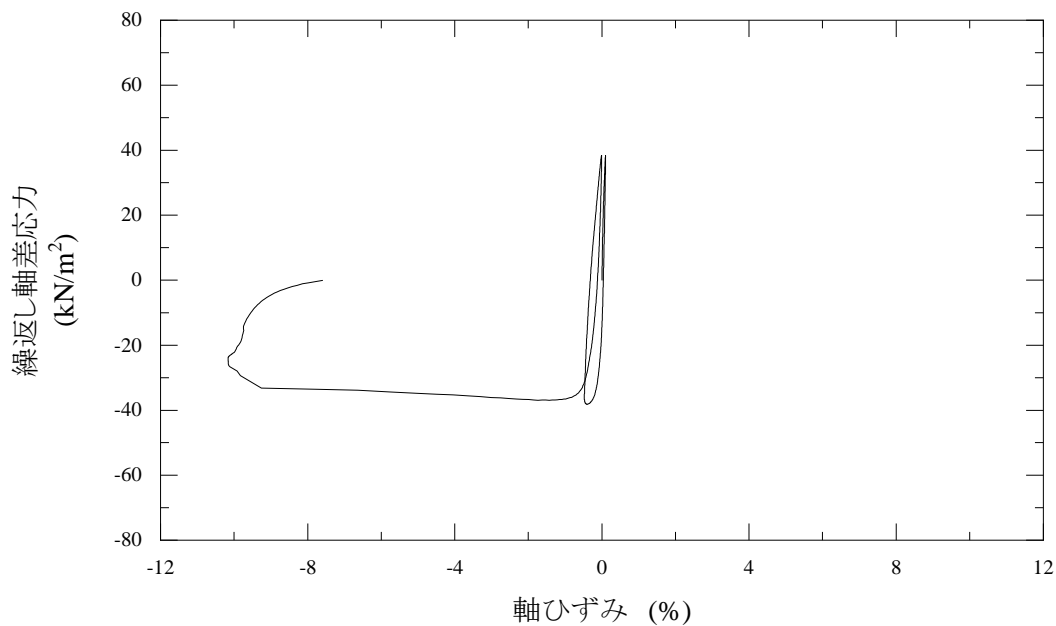
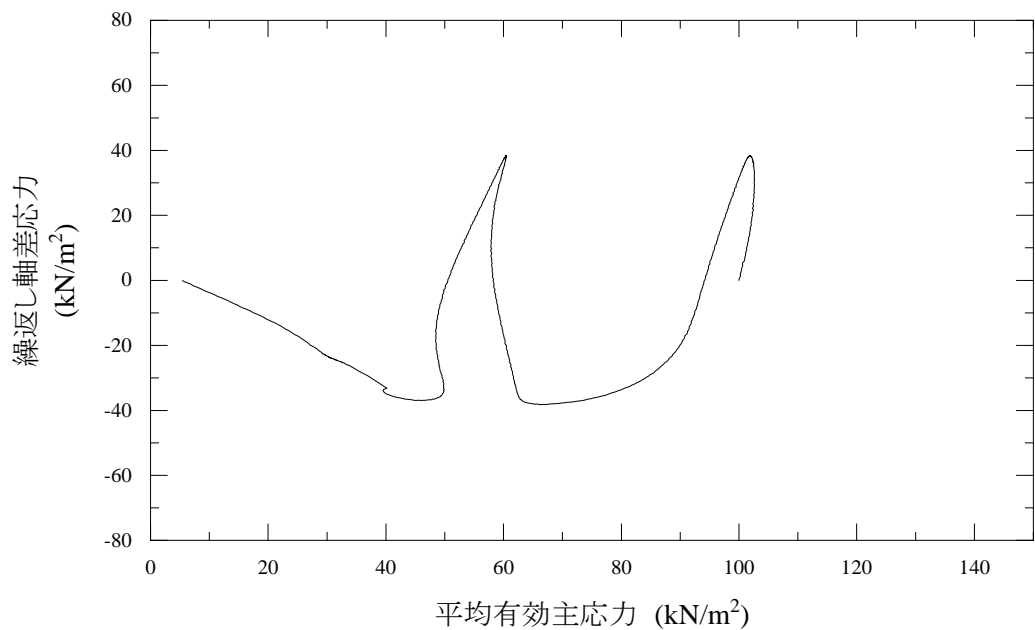
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2020年6月15日

試料番号 (深さ) WT1_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 38.0 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 37.6 | 1.5 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 37.6 | 1.6 |
| | | | 5% | 37.6 | 1.7 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.04 | 37.6 | 2.0 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.190 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | 2 | |



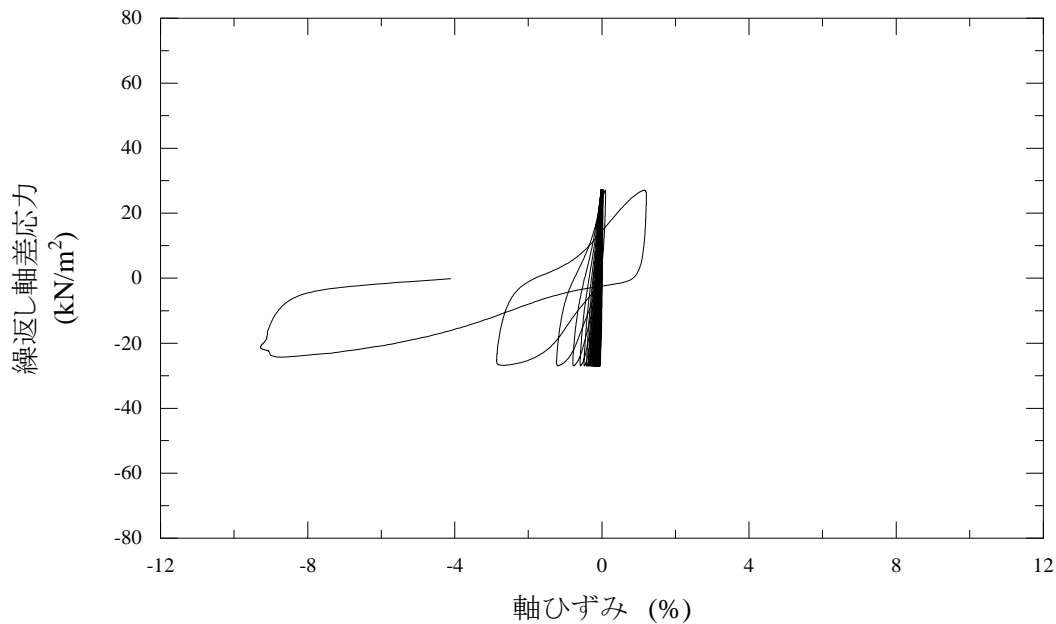
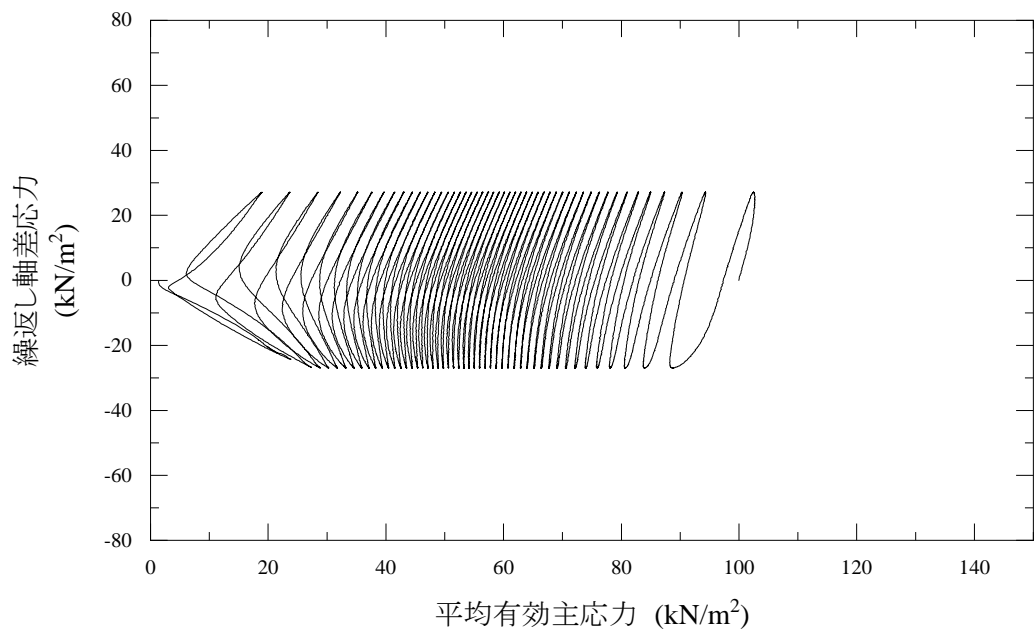
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2020年6月15日

試料番号 (深さ) WT1_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 27.1 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 27.0 | 46.7 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 27.0 | 47.7 |
| | | | 5% | 25.7 | 48.6 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.11 | 25.7 | 49.0 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.135 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | 49 | |



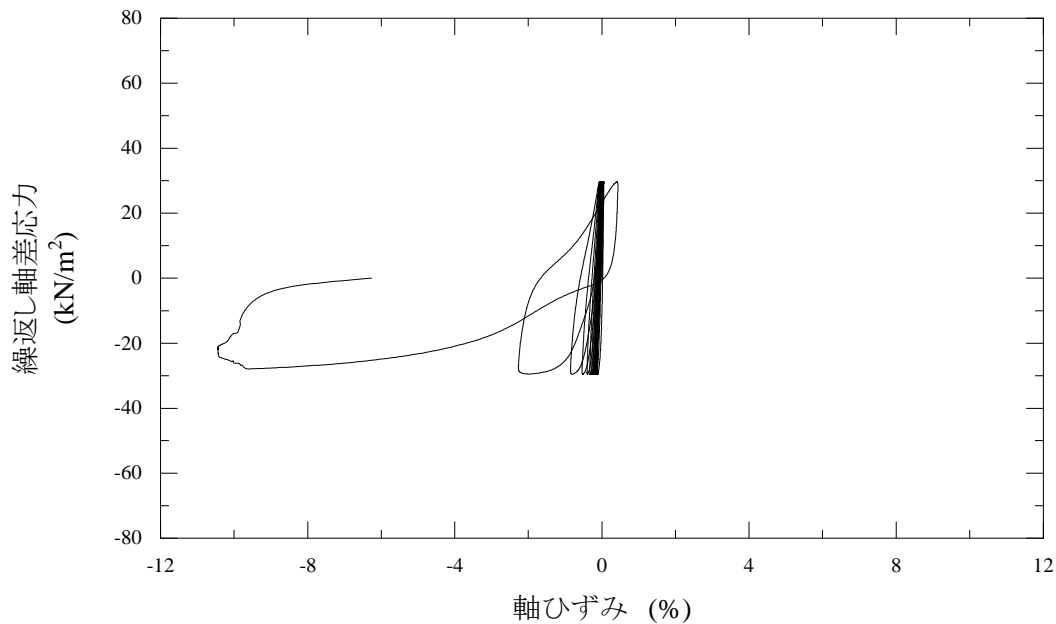
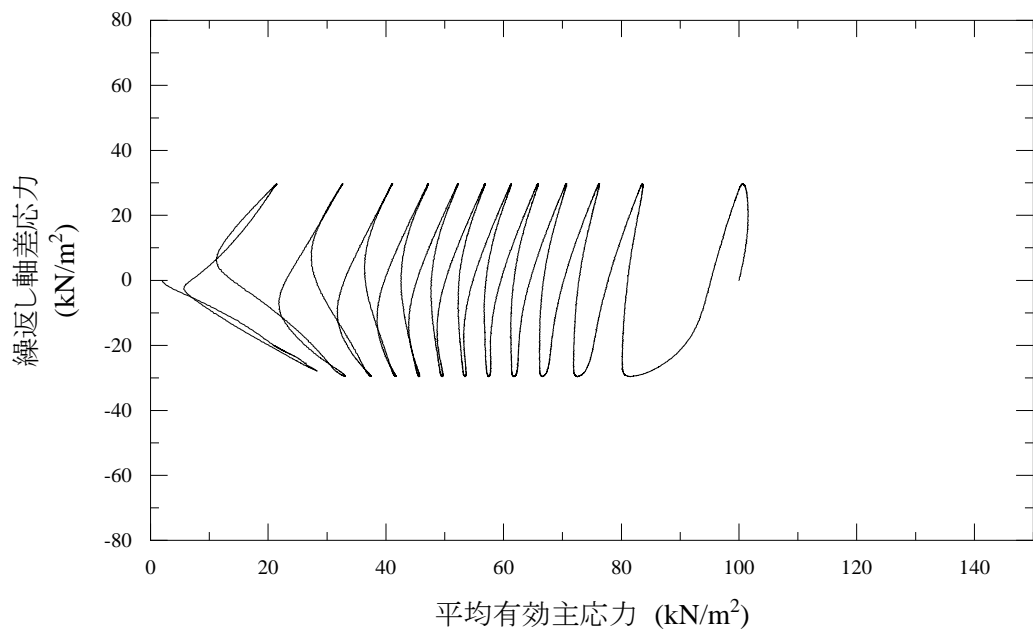
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2020年6月15日

試料番号 (深さ) WT1_pdmax85%_wopt 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 29.7 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 29.6 | 10.6 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 29.6 | 10.9 |
| | | | 5% | 28.8 | 11.6 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | 1.06 | 28.8 | 11.9 |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.148 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | 12 | |



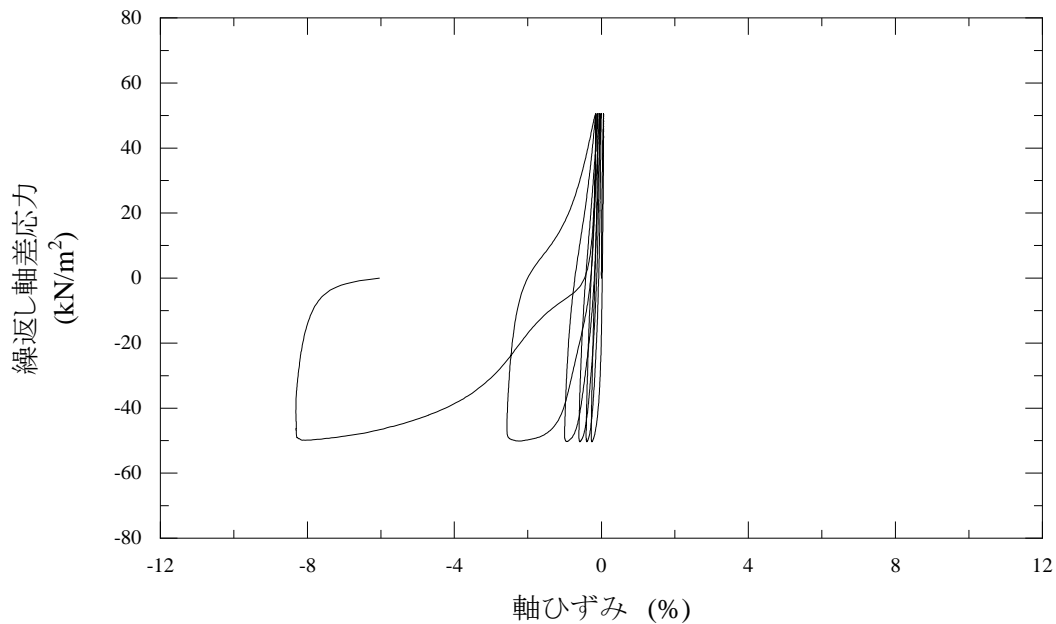
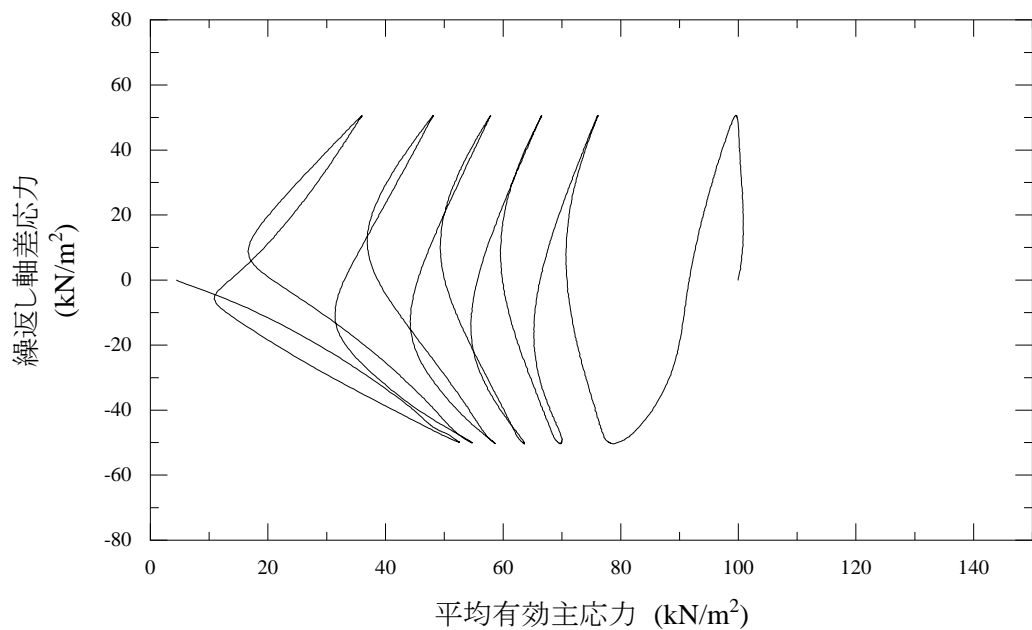
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月2日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax90%_wn 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 50.5 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 50.4 | 4.5 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 50.4 | 4.9 |
| | | | 5% | 50.3 | 5.7 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.252 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | | 6 |



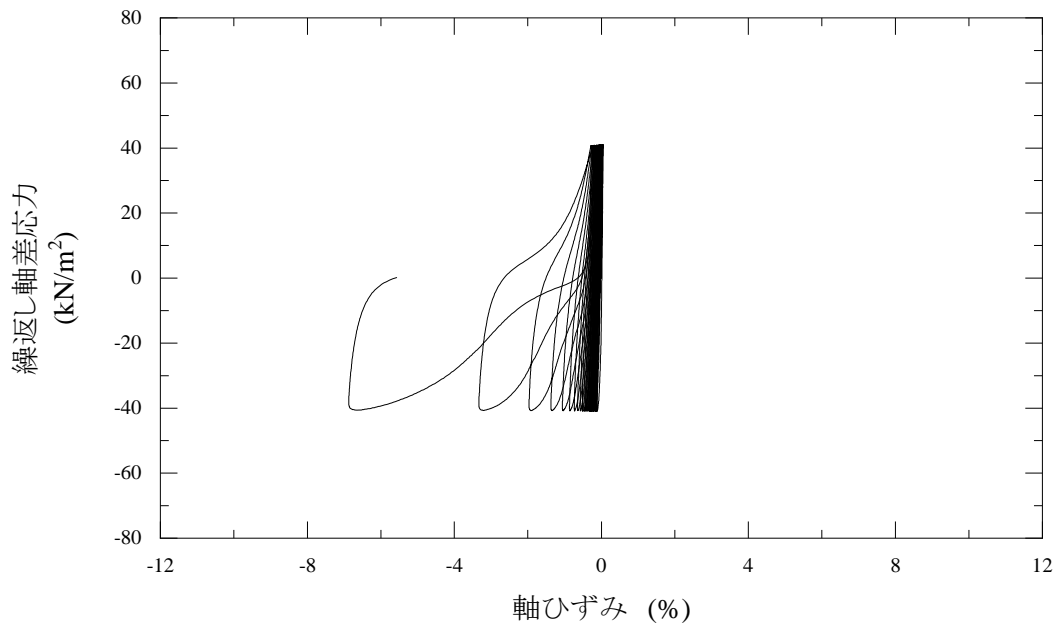
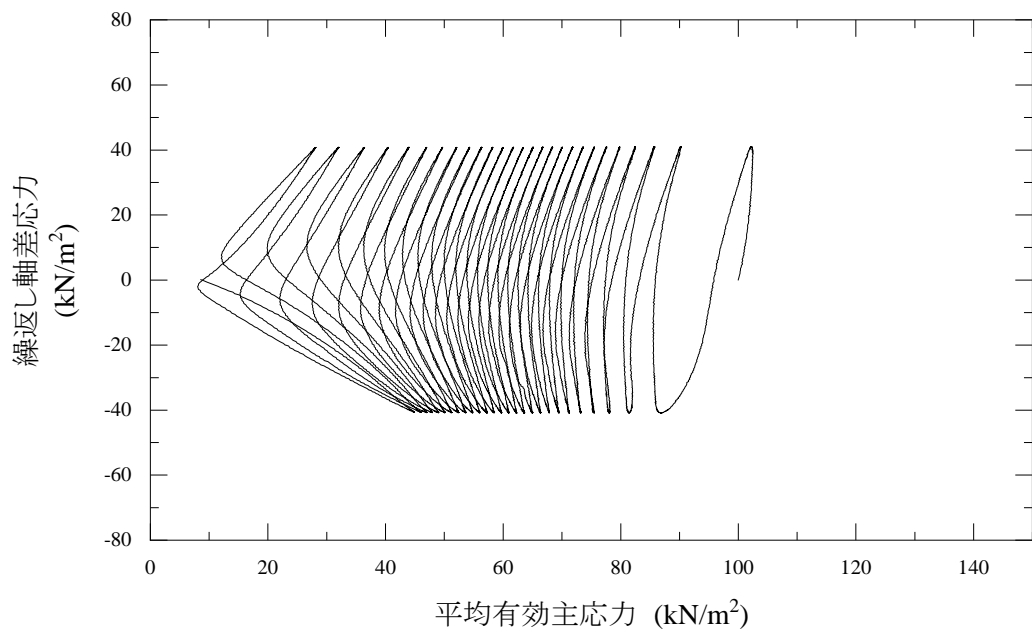
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月2日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax90%_wn 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 40.9 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 40.8 | 23.8 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 40.8 | 25.6 |
| | | | 5% | 40.7 | 26.8 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.204 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | | - |



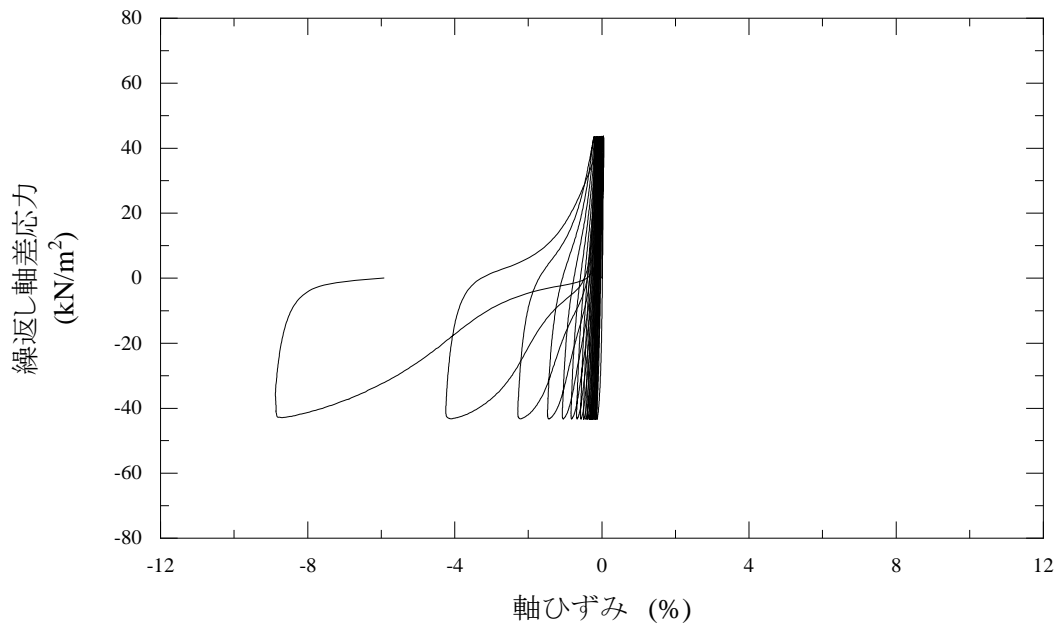
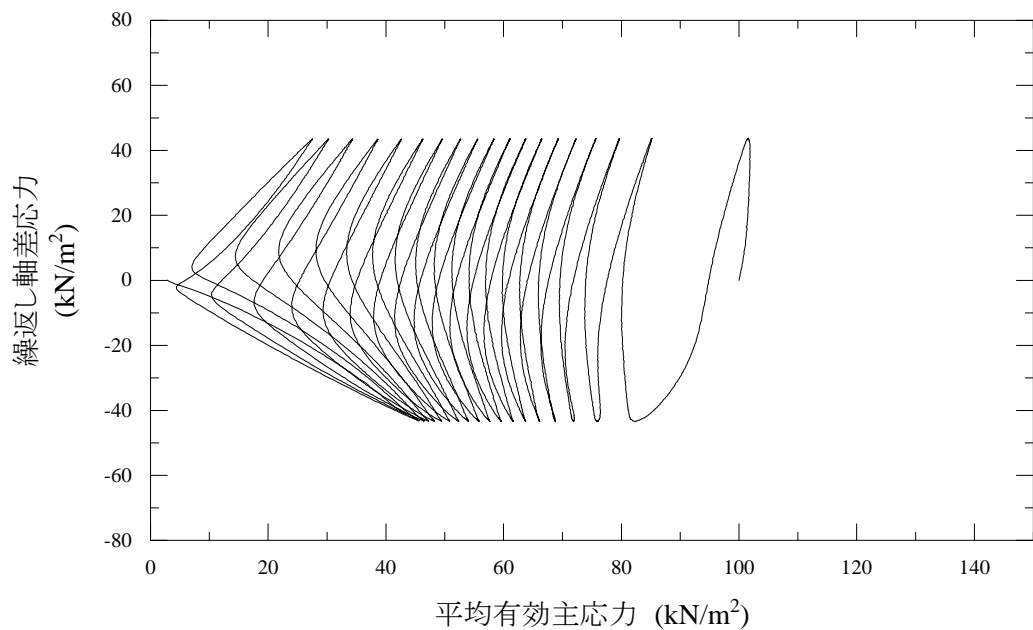
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月2日

試料番号 (深さ) WT10_pdmax90%_wn 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 43.5 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 43.4 | 15.6 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 43.4 | 17.0 |
| | | | 5% | 43.2 | 18.6 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.217 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | 19 |



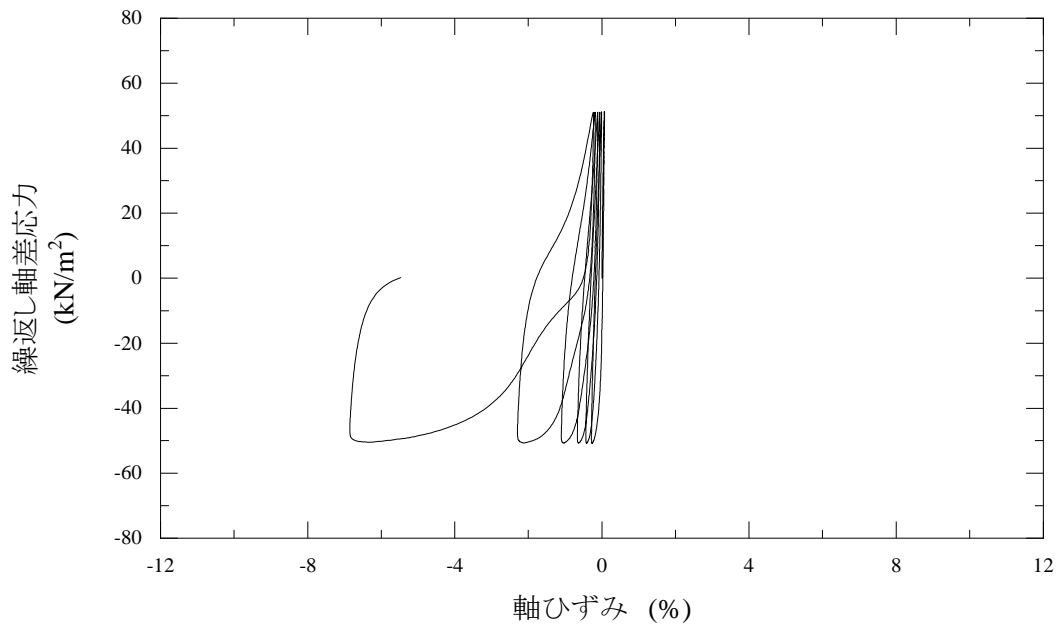
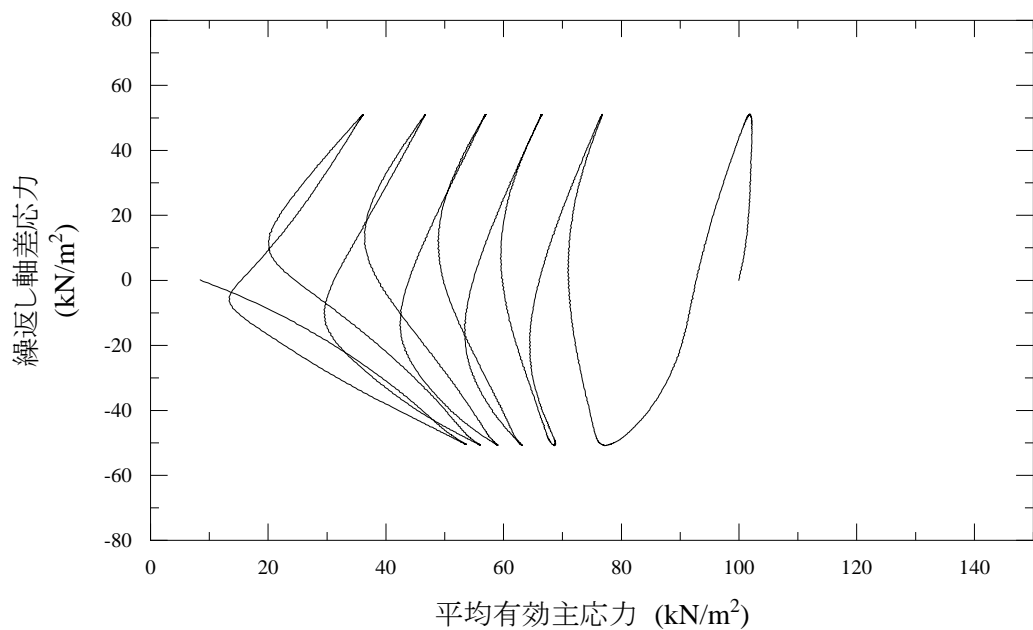
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月4日

試料番号 (深さ) WT4_pdmax90%_wn 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 1 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し载荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 50.9 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 50.8 | 4.5 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 50.8 | 4.9 |
| | | | 5% | 50.7 | 5.8 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.255 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し载荷回数 N_{95} | | | - |



| | | | |
|------|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し载荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |

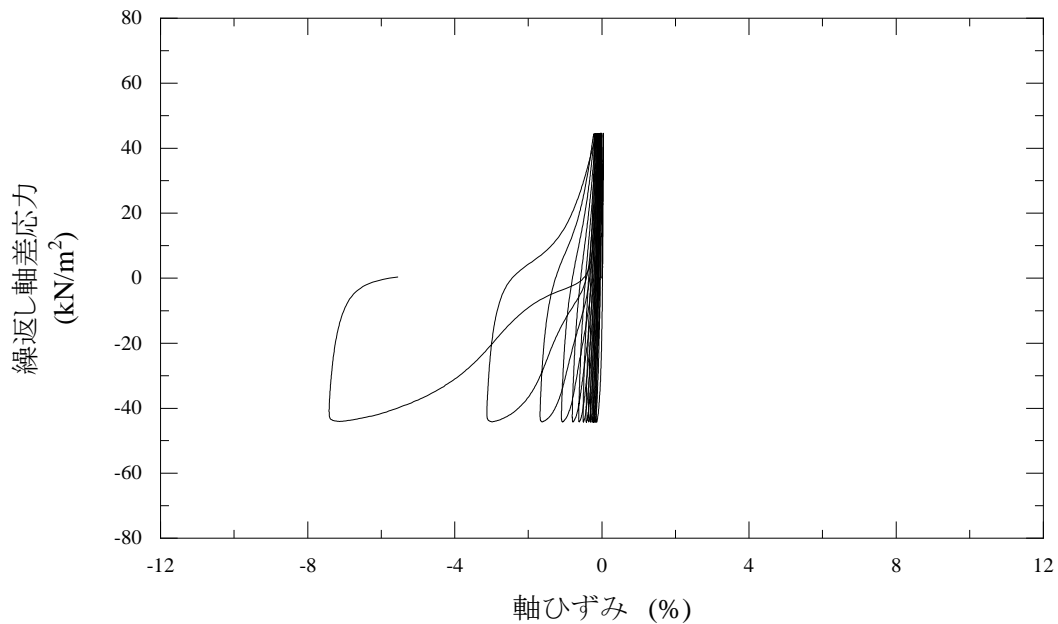
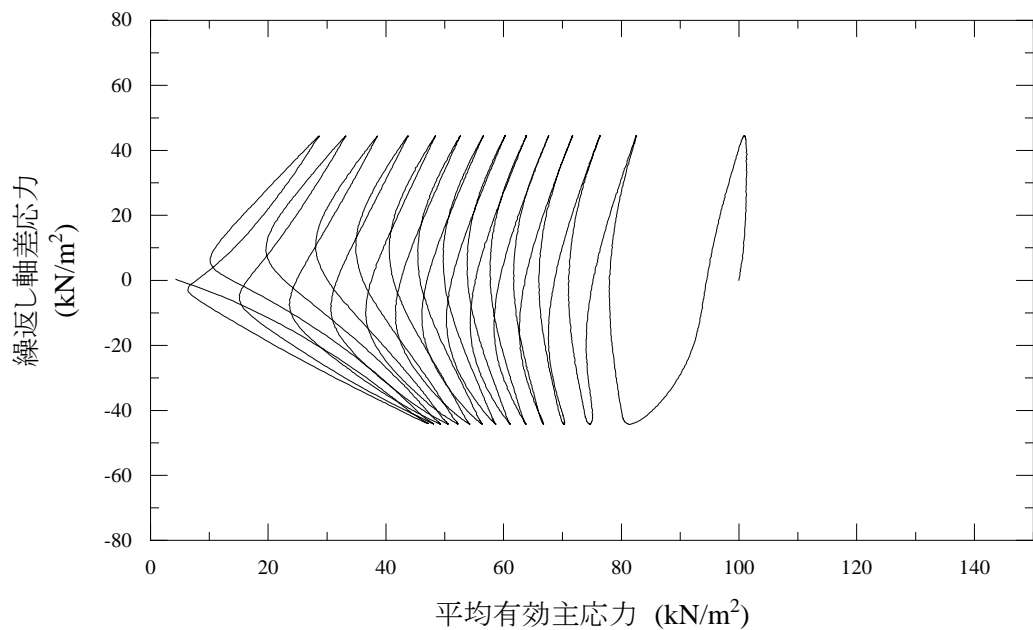
[1kN/m² ≒ 0.0102 kgf/cm²]

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月4日

試料番号 (深さ) WT4_pdmax90%_wn 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 2 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 44.4 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 44.3 | 11.6 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 44.3 | 12.7 |
| | | | 5% | 44.3 | 13.7 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.222 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | 14 | |



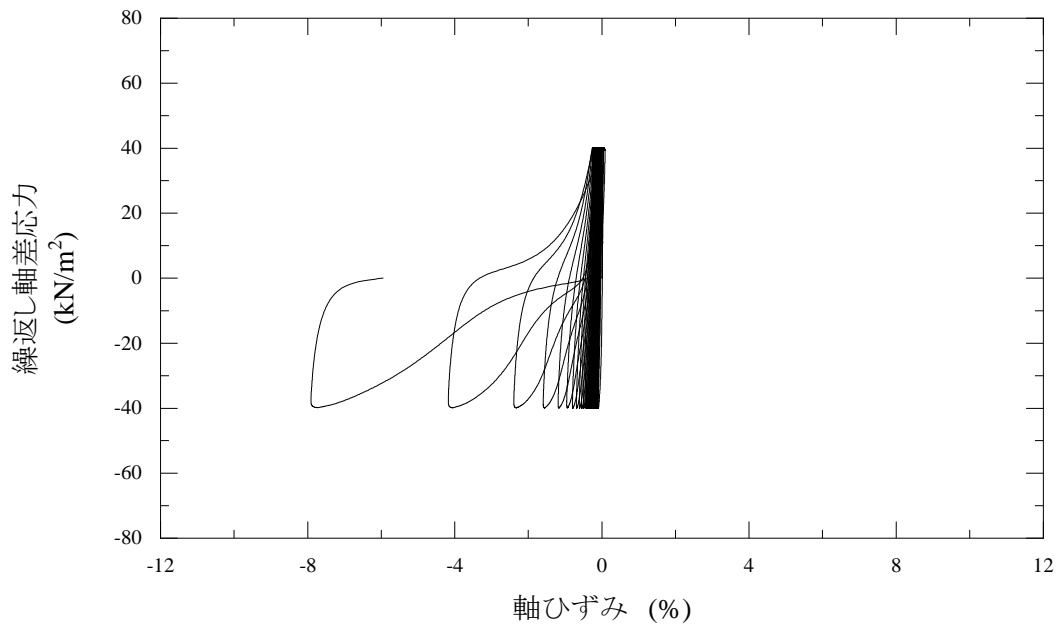
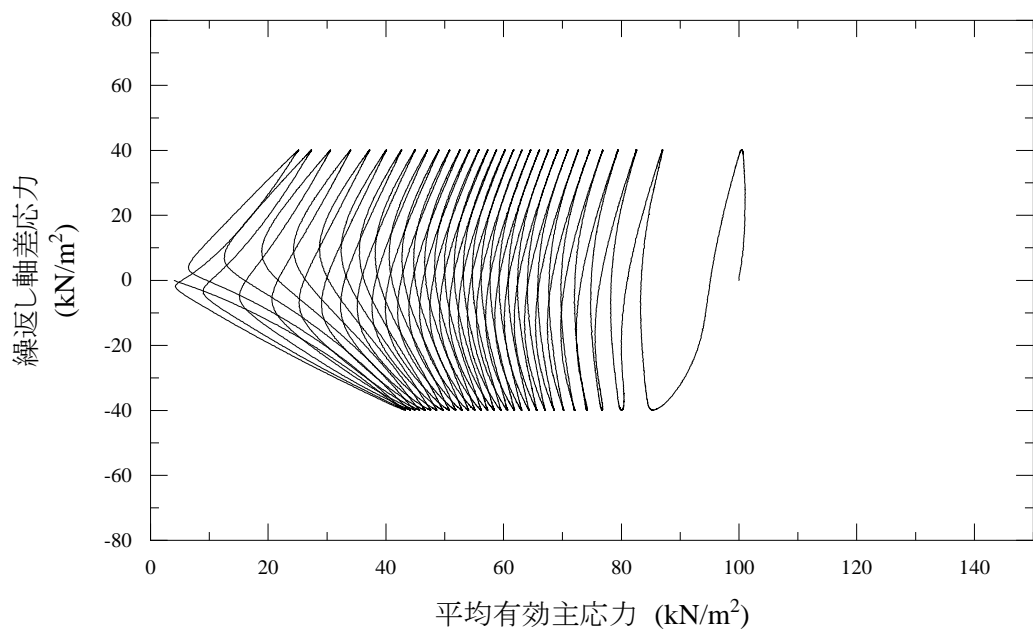
| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

| | | |
|----------|--------------|--------------------|
| JGS 0541 | 土の繰返し非排水三軸試験 | 有効応力経路 応力-ひずみ関係 |
|----------|--------------|--------------------|

調査件名 _____ 試験年月日 2019年10月4日

試料番号 (深さ) WT4_pdmax90%_wn 試験者 佐々木 朋子

| 供試体 No. | 3 | 軸ひずみの両振幅 | 圧縮・伸張荷重の比 P_C/P_E | 繰返し軸差応力 σ_d kN/m ² | 繰返し載荷回数 N_c |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|------------------|
| 試験条件 | 背圧 u_b kN/m ² | 200 | $DA \leq 1\%$ | 40.1 | - |
| | 圧密応力 σ_c' kN/m ² | 100 | $DA = 1\%$ | 40.0 | 27.6 |
| | 有効拘束圧 σ_0' kN/m ² | 100 | 2% | 40.0 | 28.9 |
| | | | 5% | 40.0 | 30.6 |
| 載荷波形 | 正弦波 | 10% | - | - | - |
| 載荷周波数 f Hz | 0.01 | | | | |
| 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ | 0.200 | 過剰間隙水圧比95%のときの繰返し載荷回数 N_{95} | | 22 | |



| | | | |
|---|--|---------|--------|
| 特記事項 | 1) $DA=1\%$ までの平均値 | 供試体初期状態 | 繰返し載荷後 |
| | 2) 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比または, 軸荷重, 軸変位, 過剰間隙水圧のいずれかを図示する。または別途添付してよい。必要に応じてセル圧の連続記録も添える。 | | |
| [1kN/m ² ≒ 0.0102 kgf/cm ²] | | | |

謝辞

本論文は、筆者が2016年に受託研究員として東京大学の土質/地盤研究室にて取り組んだ研究内容を基に、室蘭工業大学大学院の博士課程にて更に検討を深めた成果をまとめたものです。本研究は、室内土質試験の業務に伴う一つの問題を解決するために始めたものでしたが、これらの成果を学位論文に値する内容にまとめることが出来たのは、多くの方々にお力添えをいただいたおかげです。

まず、主査の川村志麻先生には、入学から4年半かかったにも関わらず、最後まで丁寧にご指導いただいたこと、心より感謝申し上げます。川村先生には、筆者が研究とは畑違いの業務に就いていたため、学位論文に求められる要件や研究に取り組む姿勢など、研究成果以外にも、学位の取得に当たって必要となる様々なことをご教授いただきました。

木幡行宏先生には副査をご担当いただき、審査会では、細やかなご指摘及びご指導をいただきました。また、長く研究分野から離れていた筆者が何とか論文を書き進めることができたのでは、学部及び修士時代に、木幡先生から論文執筆の基本をご指導いただいたおかげです。同じく副査の木村克俊先生には、研究成果による社会貢献の方向性など、本論文の意義について改めて考える機会をいただき、大変有難かったです。さらに、学外からは古関潤一先生にも副査をお引き受けいただきました。古関先生には、本研究テーマの着手や学位に挑戦するきっかけをいただいたことに加え、研究成果に対する様々なご指摘及びご指導をいただきました。また、本論文のPIV解析のために、2016年度の受託研究員の期間に加え、2019年以降も解析システムをご提供いただき、深く感謝しております。

本論文のX線CTによる解析に当たっては、港湾空港技術研究所の松村聡さんに、全面的にご協力いただきました。加えて、研究成果に対する様々なご意見をいただいたことで、本論文の内容を充実させることができました。

そして、元株式会社複合技術研究所の佐藤剛司さんをはじめ、2016年当時、東京大学の本郷及び駒場の土質/地盤研究室に所属されていた皆さま、関係者の方々には、試験機器の取扱いから載荷プログラムの内容、PIVによる画像解析の実施など、本論文のデータ取得における多くのことをご教授いただきました。また、同じ空間で研究活動に取り組む皆さまの姿を見ることで、「自分も頑張りたい」と思う気持ちを強くもつことができました。筆者が受託研究員として在籍した期間は2016年度の一年間でしたが、その後も、同研究

室に所属されていた皆さま、関係の皆さまにも、研究内容に関する意見交換の機会やご指摘、多くのご助言をいただきました。

学位の取得に当たっては、三浦清一先生をはじめ、室蘭工業大学の先輩方、同期の皆に、様々な場面で背中を押していただきました。折に触れていただいた激励のお言葉のおかげで、今日まで頑張ることができました。そして、筆者が室蘭工業大学の博士課程に在籍した 2019 年から 2023 年は、その多くが新型コロナウイルスによる行動制限の期間に当たり、川村研究室の皆さんとは web 会議などでのコミュニケーションがほとんどでしたが、研究に真摯に向き合う皆さんの姿に励まされた瞬間は少なくなかったです。

また、筆者が博士課程に身を置いた 4 年半の間には、自身の所属が変わったこともあり、個人的には様々な経験をし、更に多くの方々と関わった年月となりました。

前所属の株式会社アースプライムでは、本論文における多くの実験データを取らせていただきました。業務の他に研究テーマをもつことが難しい環境のなか、自由に研究活動をさせていただいたことに感謝の意を表します。

現所属の川崎地質株式会社では、入社して日が浅く、まだ何も実績が無いにも関わらず学位の取得を応援していただき、大変有難かったです。卒業年次は、予備審査や最終審査など踏ん張りどころが多く、それらに伴って不在にする日も多くありましたが、その度に「頑張って」とお声がけいただいた言葉の一つ一つに力をいただきました。また、三嶋信雄技術顧問には、独特な角度からのバックアップをいただくことが多く、様々な面で勉強をさせていただいたことに感謝しております。

以上のように、本論文は、多くの方々のご協力なくして完成させることはできませんでした。このご恩は、今後、技術者として少しずつでもお返しできればと考えております。

最後に、学位取得へのチャレンジを喜び、どのような状況でも応援してくれた家族への感謝の気持ちを表して、謝辞を締めたいと思います。

2023 年 9 月

佐々木 朋子