

(別紙 2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 課題番号 第 6 号
2. 研究課題名 基礎地盤不飽和化による液状化対策工法の実証的研究
3. 研究期間 平成 23 年度～平成 24 年度
4. 代表者及び研究代表者、共同研究者

| | | |
|-------|--------|-----------------------|
| 代表者 | 畑中 宗憲 | 千葉工業大学・教授 |
| 研究代表者 | 畑中 宗憲 | 千葉工業大学・教授 |
| 共同研究者 | 吉田 正 | 東京ソイルリサーチ・東京支店技術調査部部長 |
| 共同研究者 | 田部井 哲夫 | 東京ソイルリサーチ・統括管理部長 |
| 共同研究者 | 乾 一幸 | 東京ソイルリサーチ・東京支店技術調査部課長 |
| 共同研究者 | 安 浩輝 | 東京ソイルリサーチ・東京支店技術調査部係長 |

5. 補助金交付総額 18,000,000 円

6. 研究・技術開発の目的

更地地盤を対象とした基礎地盤の液状化対策工法は各種開発され、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震でも、それらの工法の有効性が検証されております。しかし、既存建物がある基礎地盤の液状化対策工法は現在に至るもまだ有効な方法が開発されていない。本研究は、既存建物がある基礎地盤の液状化対策工法の開発を目的とした。具体的には、基礎地盤を不飽和化して、地盤の液状化強度を増加させ、液状化による被害の低減を目指すものである。不飽和化工法は、低コストで環境に優しく、戸建住宅の様な狭小な敷地でも施工が可能などの利点があります。

7. 研究・技術開発の内容と成果

| | 目 | 次 | PAGE |
|-------|----------------------|-------|------|
| 1. | 研究概要 | ..... | 3 |
| 1.1 | 研究開発の概要・目標 | ..... | 3 |
| 1.2 | 研究開発の計画・方法 | ..... | 4 |
| 1.3 | 研究課題の実験内容 | ..... | 6 |
| 1.4 | 産官学テーマ推進委員会 | ..... | 7 |
| 2. | 研究結果 | ..... | 8 |
| 2.1 | 動的遠心载荷実験結果 | ..... | 8 |
| 2.1.1 | 実験装置と実験方法 | ..... | 8 |
| 2.1.2 | 実験結果 | ..... | 14 |
| 2.2 | 実験地盤の調査結果 | ..... |  |
| 2.2.1 | 地盤特性 | ..... | 21 |
| 2.2.2 | 実験井戸の概要 | ..... | 26 |
| 2.3 | 地盤の不飽和化実験結果 | ..... | 27 |
| 2.3.1 | マイクロバブル水および空気の注入実験結果 | ..... | 27 |
| 2.3.2 | 地盤不飽和化モニタリング結果 | ..... | 29 |
| 2.3.3 | 不飽和化による影響調査結果 | ..... | 34 |
| 2.4 | 原位置飽和度と液状化強度の測定結果 | ..... | 36 |
| 2.4.1 | 凍結サンプリング結果 | ..... | 36 |
| 2.4.2 | 飽和度測定結果 | ..... | 38 |
| 2.4.3 | 液状化強度の評価結果 | ..... | 40 |
| 3. | 研究開発の成果 | ..... | 42 |
| 3.1 | 研究結果のまとめ | ..... | 42 |
| 3.2 | 研究課題に対する成果 | ..... | 43 |
| 3.3 | 今後の課題 | ..... | 43 |

1. 研究概要

1.1 研究開発の概要・目標

(1) 研究開発課題名

基礎地盤不飽和化による液状化対策工法の実証的研究

(2) 研究開発の概要

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震にも見られるように、砂地盤の液状化による土木及び建築構造物への被害は深刻である。浦安市や習志野市などでは多くの被害住宅が未だに対策が立てられないままの状態にある。既存構造物のある基礎地盤の液状化対策として、基礎地盤の飽和度を低下させて、地盤の液状化強度を増加させる基礎地盤不飽和化工法についての基礎的研究が進められている^{1)~3)}。

本研究では、今までの研究成果を踏まえて、実地盤における地盤不飽和化システムの有効性を実証し、地盤飽和度測定法の確立を目指し、さらに不攪乱試料採取により実地盤の飽和度および液状化強度の確認を行うとともに、遠心載荷試験により地震動による不飽和砂地盤の沈下特性の評価を目的とする。

(3) 研究開発の目標

本研究の開発目標と課題の概要を図-1.1.1に示す。

開発目標 1：飽和度設計法の確立

課題①：実大規模での液状化被害低減効果の確認

・動的遠心載荷実験

課題②：不飽和砂地盤の液状化強度の評価

・不攪乱砂試料を用いた液状化強度試験

+

開発目標 2：施工計画の検討法の確立

課題③：不飽和化システムの確立

・実砂地盤へのマイクロバブル水・空気注入実験

課題④：不飽和領域の評価法の確立

・飽和度測定法の検討



本工法の確証

図-1.1.1 研究開発の概要図

1.2 研究開発の計画・方法

(1) 研究計画と方法

課題に対する研究計画と方法を以下に示す。

課題①：実大規模での液状化被害低減効果の評価

実地盤実験で、地震動による不飽和地盤の液状化被害低減効果を把握するのは困難なので、遠心載荷装置を利用して縮小模型で実大規模地盤を再現し、振動実験により不飽和地盤の液状化被害低減効果について確認した。

飽和地盤の液状化による沈下性状については既往の研究成果⁴⁾⁵⁾が示されているが、不飽和地盤の沈下特性については十分な成果が得られていない。本工法が有用であるためには、液状化強度の増加だけではなく、地盤沈下の特性も定量的に把握する必要がある。そこで、遠心載荷装置を用いた振動実験を行い、不飽和地盤の過剰間隙水圧の上昇・蓄積、地盤の加速度応答および振動による地盤の沈下量について評価した。

課題②：不飽和砂地盤の液状化強度の評価

既往の研究では、再調整試料を用いた室内要素試験により、不飽和化による液状化強度の増加を確認している。しかし、実地盤の不飽和化試料の液状化強度の評価については実施例が少なく不十分である⁹⁾。本研究では、不飽和化した実地盤から凍結サンプリングにより不攪乱試料を採取し、液状化強度を求めて地盤不飽和化の効果を確認し、飽和度と液状化強度の関係を確認した。

課題③：不飽和化システムの確立

既往研究では、模型砂地盤における砂地盤の不飽和化システムの検討がなされてきた。しかし、実地盤における施工実験事例^{6~8)}が少なく、不飽和化の設計・施工法の確立には不十分である。本研究では、東北地方太平洋沖地震で液状化した地盤において、不飽和化システムの適用性の確認を行った。

課題④：不飽和領域の評価法の確立

本工法では不飽和化領域を3次元的に把握する必要がある。そこで、現場実験において、注入井戸のほかに観測井戸を設置し、不飽和化領域把握のため、地盤の飽和度を測定した。

本工法の液状化被害低減効果は確実に飽和度を低下させることで保証される。その為、飽和度を確認する手法は必要不可欠である。そこで、P波速度による方法^{9)・10)}および電気比抵抗による方法を検討するとともに、凍結サンプリングにより採取した不攪乱試料を用いて飽和度を直接測定し、飽和度測定方法の評価を行った。

(2) 開発研究の工程

本研究計画の実施スケジュールを表-1.2.1 に示す。

表-1.2.1 研究計画のスケジュール

| 研究項目 | | 日程 | | 平成24年 | | | | | | | | 平成25年 | | |
|------|-----|--------------------------------|---------------|-------|----|------------|---------------|-----------------|-------------------|--------------------|------------------|---------|----|----|
| | | | | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 |
| 設計法 | 課題① | 実大規模での液状化被害低減効果の確認 (遠心载荷実験) | | 準備工 | | 飽和加振(3ケース) | | | 不飽和加振 | | | | | |
| | 課題② | | | 試加振 | | | | | | | | 繰返し3軸試験 | | |
| 施工法 | 課題③ | システム確立の 不飽和化の | 地盤調査 | 事前調査 | | | | PS, 飽和度 (飽和) | | | PS, 飽和度 (不飽和) | | | |
| | | | 井戸設置 | | | | 注水井, 揚水井, 観測井 | | | | | | | |
| | | | 不飽和化実験 | | | | | ↓気泡注入開始 | | 準備工 (マイクロバブル水, 空気) | | | | |
| | 課題④ | 評価法の領域の確立の | 三次元空間のモニタリング | 準備工 | | | センサー設置 | | 注入前の測定 (飽和度の経時変化) | | | | | |
| | | | 原位置地盤凍結サンプリング | | | | | | | 乱さない試料採取 (注入後地盤) | | | | |
| | | | 原位置飽和度実測 | | | | 飽和地盤 | | | 不飽和地盤 | | | | |

1.3 研究課題の実験内容

研究課題に対する具体的な実験内容を表-1.3.1 に示す。同表には各研究課題に対応する次章「2.研究結果」の該当項目を記載している。

表-1.3.1 研究課題と実験内容の関係

| 開発目標 | 課題 | 研究課題 | 具体的 実験内容 | 次章「2.研究結果」 該当項 |
|------|----|--------------------|-----------------------|--|
| 設計法 | ① | 実大規模での液状化被害低減効果の確認 | 動的遠心荷重実験 | 2.1 動的遠心荷重実験結果 |
| | ② | 不飽和砂地盤の液状化強度の評価 | 凍結サンプリング試料を用いた液状化強度試験 | 2.4 原位置飽和度と液状化強度の測定結果 |
| 施工法 | ③ | 不飽和化システムの確立 | 地盤調査, 井戸設置と気泡注入実験 | 2.2 実験地盤の調査結果 2.3 地盤の不飽和化実験結果 |
| | ④ | 不飽和領域の評価法の確立 | モニタリングと原位置飽和度実測 | 2.3 地盤の地盤不飽和化実験結果 2.4 原位置飽和度と液状化強度の測定結果 |

1.4 産官学テーマ推進委員会

本研究は、産業分野関係者、官公庁分野関係者、学識経験者によるテーマ推進委員会を組織し、開発内容の有効性の確認と、開発成果の具体的な事業化計画の作成を目指した。委員会委員名簿を表-1.4.1に示し、各回委員会の実施日と検討内容を表-1.4.2に示す。

表-1.4.1 産官学テーマ推進委員会委員名簿

| 氏名 | 分類 | 所属 |
|--------|----|--|
| 加倉井 正昭 | 学 | 東京理科大学工学部第一部 建築学科 客員教授 |
| 秋葉 正一 | 学 | 日本大学生産工学部 土木工学科 教授 |
| 新井 洋 | 官 | 国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 構造基準研究室 主任研究官 |
| 江川 幸成 | 官 | 習志野市 都市整備部 住宅課 主幹 |
| 内田 明彦 | 産 | 株式会社竹中工務店 技術研究所 地盤基礎部門 主任研究員 |
| 工藤 賢二 | 産 | 積水ハウス株式会社 施工部管理室 施工企画グループ 基礎構造東京チーム長 課長 |

表-1.4.2 実施日と検討内容

| 実施回 | 実施日 | 検討内容 |
|-----|--------------|---|
| 第1回 | 2012. 4. 3 | 研究方式に関する検討 |
| 第2回 | 2012. 6. 22 | 研究の中間報告及び今後の研究計画に関する検討 及び事業化計画に関する検討 |
| 第3回 | 2012. 12. 12 | 実証実験方法に関する検討 |
| 第4回 | 2013. 3. 19 | 最終報告及び成果の事業化に向けた検討 |

2. 研究結果

2.1 動的遠心载荷実験結果

2.1.1 実験装置と実験方法

(1) 実験装置の概要

遠心载荷実験は、実物大構造物を幾何学的に縮小した模型地盤に、所定の遠心加速度を与え、一次元（水平方向）動的加振を行い模型や地盤の挙動を調べるものである。

今回実験に用いた大型動的遠心力载荷実験装置¹⁾を図-2.1.1、表-2.1.1に示す。実験土槽及びカウンターウェイトを取り付けた揺動架台は、回転腕が回ると水平面に振り上がる構造となっている。動的遠心载荷実験は、（公益社団法人）土木研究所の遠心载荷試験装置を借用して行った。

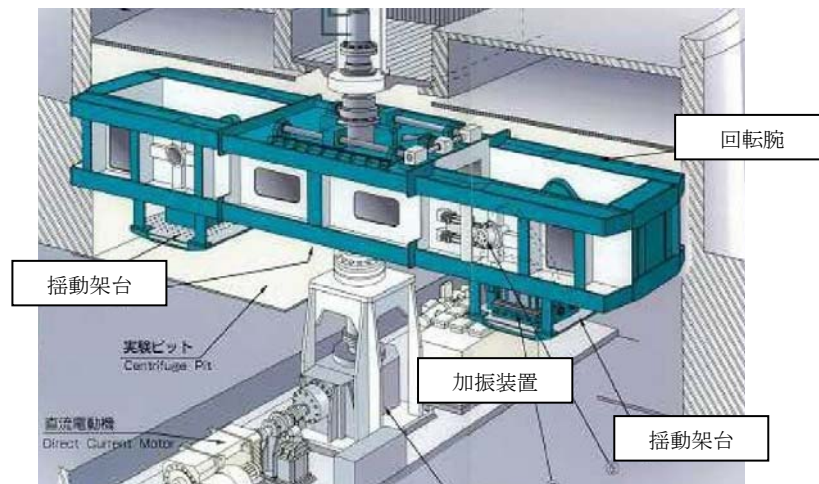


図-2.1.1 大型動的遠心载荷実験装置¹⁾

表 2.1.1 実験装置の仕様

| | | |
|-----------|--------------------------------|--------------------|
| 遠心力载荷装置 | 有効回転半径 | 6600mm |
| | 最大遠心加速度 | 静的試験：150G |
| | | 動的試験：100G |
| | 最大積載容量 | 400 ton-G |
| | 揺動架台 2台 | 静的試験：両側 動的試験：片側 |
| 容量の载荷スペース | 幅2400mm, 奥行き1300mm 高さ1000mm | |
| 加振装置 | 台の大きさ | 幅1700mm, 奥行き1000mm |
| | 最大加振容量 | 40 ton-G |
| | 最大加振加速度 | 40G |
| | 最大速度 | 900mm/s |
| | 最大変位 | ±5mm |
| 計測器 | 加振周波数 | 10～400 Hz |
| | 光り伝送方式 | |
| | 測定点数 | 120ch |

実験に用いたせん断土槽を写真-2.1.1 に示す。土槽内側には防水用ゴムシート（厚さ 0.5mm）を設置した。



- ・土槽内寸：幅 750mm
奥行き 377mm
高さ 500mm

写真-2.1.1 実験に用いたせん断土層

遠心载荷実験において、縮小されて作製した模型や地盤と実現象との間の相似則を表-2.1.2 に示す。今回の遠心载荷実験は 50G 場で行った。

せん断土層内のセンサー配置図を図-2.1.2 に示す。センサーとしては、加速度計、間隙水圧計、土壌水分計、標点を設置した。

< 模型地盤の仕様 >

- ・模型仕様：幅 750mm、奥行き 377mm、深さ 2005mm
- ・実物換算：幅 37.5m、奥行き 18.9m、深さ 10m

表-2.1.2 遠心载荷実験における相似則

| 項目 | 密度 | 長さ | 加速度 | | 質量 | 力 | 応力 | ひずみ | 時間 | |
|----|----|-----|-----|-----|------------------|------------------|----|-----|------|------------------|
| | | | 遠心時 | 加振時 | | | | | 動的現象 | 浸透現象 |
| 実物 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 模型 | 1 | 1/N | N | N | 1/N ³ | 1/N ² | 1 | 1 | 1/N | 1/N ² |

(2) 模型地盤（不飽和地盤及び飽和地盤）の作成方法

地盤材料は図-2.1.3、表-2.1.2 に示す 7号硅砂を使用した。模型地盤は、せん断土槽内に厚さ 200mm の支持層と、飽和層・不飽和層を作製した。支持層は 7号硅砂を用い、相対密度を $Dr=90\%$ に締固めて作成した。

飽和層と不飽和層は、空中落下方法により作製した。投入砂の重量と体積を測定し、相対密度を算定することで、密度管理を行った。

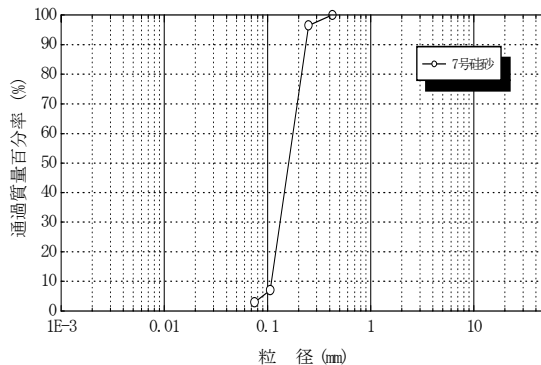


図-2.1.4 7号硅砂の粒径加積曲線

表 2.1.2 7号硅砂の物理特性

| 項目 | | 7号硅砂 |
|--------------------|---|-------|
| 物理 | 土粒子密度 ρ_s (g/cm ³) | 2.624 |
| | 礫分含有率 (%) | 0 |
| | 砂分含有率 (%) | 97.1 |
| | シルト分含有率 (%) | 2.9 |
| | 粘土分含有率 (%) | |
| | 均等係数 U_c | 1.50 |
| 平均粒径 D_{50} (mm) | 0.162 | |
| 密度 | 最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ²) | 1.573 |
| | 最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ²) | 1.236 |

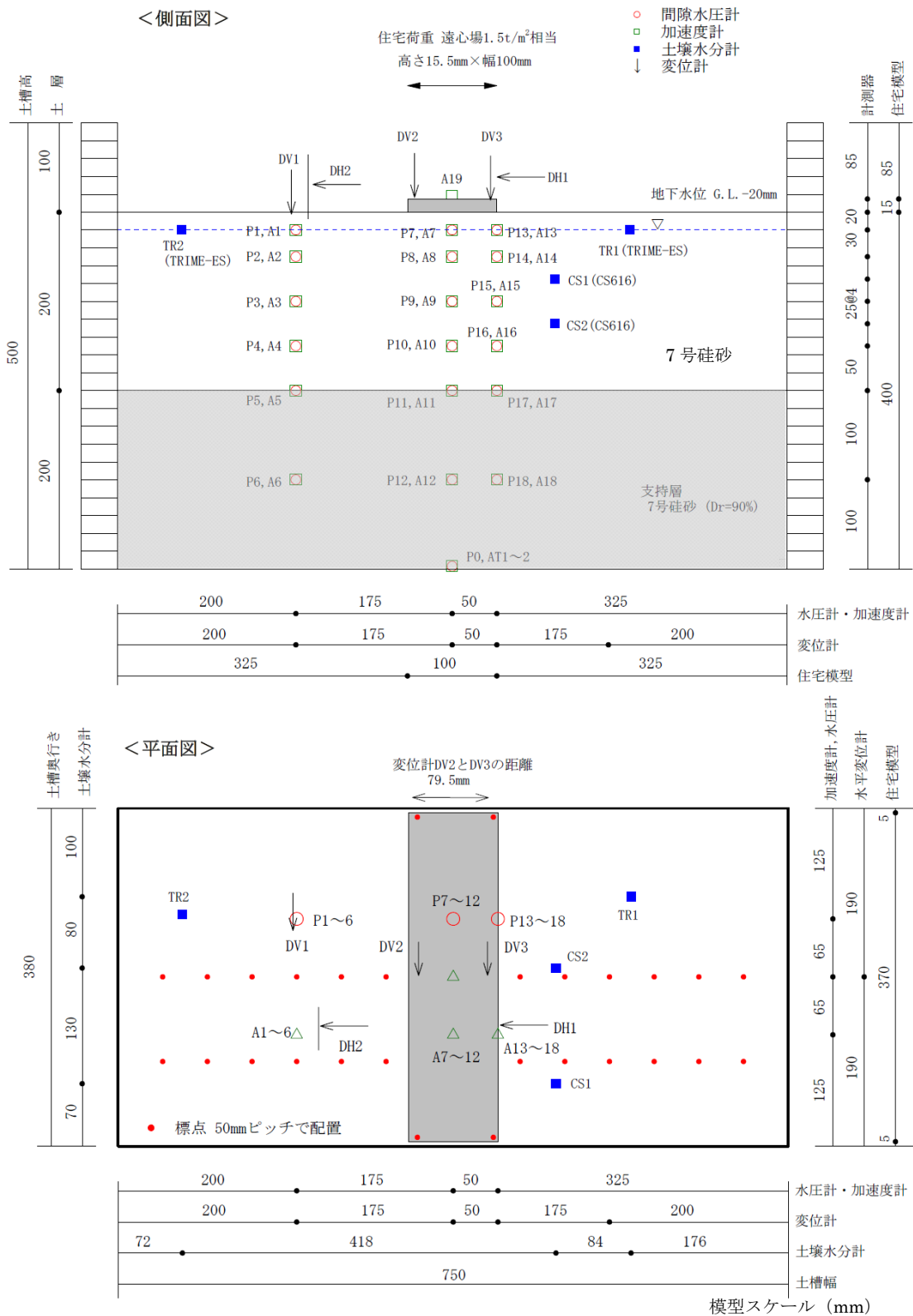


図-2.1.2 センサー配置図

模型地盤の作成において、飽和地盤の間隙水は脱気水を使用し、不飽和地盤の間隙水は MB 水を使用した。

① 和地盤の作製

地盤の飽和方法は、地盤作製後に土槽全体を脱気槽にいれ、真空ポンプで約 98kN/m^2 の負圧を与え、脱気槽がほぼ真空状態になったのを確認したのち、差圧 (10kN/m^2 程度) により、脱気水を地盤表面にゆっくり (約 12 時間かけて) 滴下する方法で行った。

② 不飽和地盤の作製

作製方法の概要を以下に示す。

- (a) 重力場の真空土槽内で間隙水を滴下し、飽和地盤を作製する。
- (b) 遠心重力 20G の状態で、排水電動弁を開き間隙水を排水させる。
- (c) 地盤内にマイクロバブル水を外部タンクから土槽底面へ速やかに注水した。
- (d) 所定の水位まで上昇させた時点で、排水弁を閉じる。

上記手順において、遠心加速度 20G で注排水を行った理由は、地盤の過圧密を避けるためである。遠心加速度 50G における飽和地盤底面の有効上載圧は、遠心加速度 20G の不飽和地盤の有効上載圧に相当する。また、遠心場で間隙水の排水が容易となる効果もある。間隙水の注排水は、土槽底面に取付けた電動式バルブを遠隔操作で開閉することで行った。

③ 地盤の初期地下水位調整

地盤飽和時の地下水位調整は、重力場にて行った。水位調整方法は、土槽底面から立ち上げた排水管 (シンフレックスチューブ) 先端の高さを任意の地下水位面に固定し、余分な水を排水することで調整を行った。一方不飽和地盤の地下水位調整は、土槽底面からマイクロバブル水を注水し、土槽底面の間隙水圧計で水位をモニターし、所定の水位へ到達した時点で、注水弁を閉じる方法で行った。

(3) 住宅模型

住宅模型は、遠心重力場での設置荷重が、住宅荷重相当の 1.5t/m^2 程度になるよう調整したセメント製模型を使用した (写真-2.1.2 参照)。セメント製模型内には曲げ耐力を補強するため、金網を敷設した。

住宅模型上面には加速度計、ポテンシオメータ式の変位計及びレーザー変位計を設置し、模型住宅の加速度、沈下量と水平変位量を測定した。

<住宅模型の仕様>

- ・模型仕様：幅 100mm
奥行き 374mm
高さ 15.5mm
質量 1346g
- ・実物換算：幅 5.000m
奥行き 18.700m
高さ 0.775m
質量 168.3ton

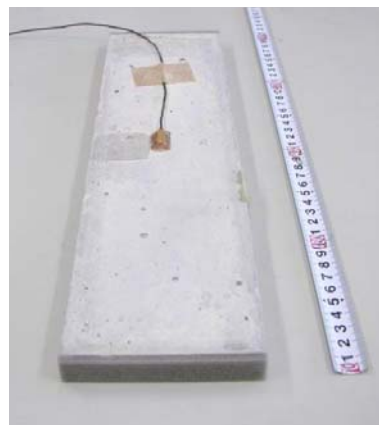


写真-2.1.2 住宅模型 (セメント製模型)

(4) 計測項目と計測方法

計測項目を表-2.1.4に整理するとともに、取り付け状況を写真-2.1.3に示した。

表-2.1.4 計測項目一覧表

| 計測器 | 設置位置 | 数量 | 備考 |
|-------|--------|-----|----------|
| 加速度計 | 住宅模型 | 1 | |
| | 地盤 | 18 | |
| | 加振テーブル | 2 | |
| 間隙水圧計 | 地盤 | 18 | |
| 変位計 | 地盤 | 2 | 鉛直1, 水平1 |
| | 住宅模型 | 3 | 鉛直2, 水平1 |
| 土壌水分計 | 地表部 | 1~2 | TRIME-ES |
| | 地中部 | 2 | CS-616 |
| 標点 | 地表面 | 24 | |
| | 住宅模型 | 4 | 4隅 |

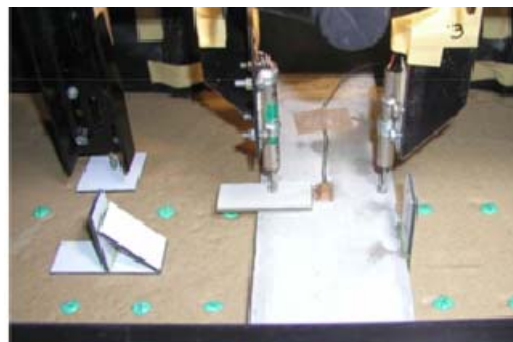


写真-2.1.3 変位計の取り付け状

データの収録方法を表-2.1.5に整理した。

表-2.1.5 データ収録方法

| 実験過程 | サンプリング 周波数 | 計測時間 |
|-----------|---------------|-------|
| ①遠心加速度上昇時 | 0.5Hz | 任意 |
| ②不応和層作成時 | 0.5Hz | 任意 |
| ③加振時 | 5.000Hz | 最大30秒 |
| ④遠心加速度下降時 | 0.5Hz | 任意 |

地盤の飽和度測定には土壌水分計を用いた。土壌水分計は、本体部から発振された高周波を2本のステンレスロッドで受信し、土壌のインピーダンス差によって生じる干渉反射波の振幅を電圧として出力し、その誘電率を測定するものである。

今回測定には、写真-2.1.4に示す2種類の土壌水分計を用い、地表部と地中部の測定を行った。なお、地中測定は不飽和地盤のみ実施した。

TRIME-ES
(東北電子産業株式会社)



地表測定用 (TR1、2)

CS616
(株式会社フィールドプロ)



地中測定用(CS1、2)

写真-2.1.4 土壌水分計 (設置状況)

(5) 加振方法

動的遠心载荷実験は、50G の遠心場において、飽和と不飽和の砂地盤模型に対し、所定の加速度振幅で加振実験を行った。実験は表-2.1.6 に示す 4 ケースを実施し、ケース 1~3 は飽和地盤の実験で、ケース 4 は不飽和地盤の実験を行った。また、各ケースの中で数回のステップに分け加振条件を変化させた実験を行った。ステップ加振毎に地盤の沈下量を測定し、各ステップ加振前の地盤の相対密度を算出した。

入力波は、sin 波（主要動 15 波、50Hz）とし、図-2.1.6 に一例を示す。

表-2.1.6 遠心载荷実験ケース一覧

| CASE | STEP | 地盤飽和度 Sr (%) | 間隙水 | 作製時相対密度 Dr (%) | 加振前相対密度 Dr (%) | 加振条件 | | | |
|------|------|--------------|----------|----------------|----------------|---------------------|-------------|-------------|----------------|
| | | | | | | 入力波形 | 最大加速度 (gal) | 最小加速度 (gal) | 絶対値平均加速度 (gal) |
| 予備 | 1 | 100 (飽和) | 脱気水 | 60 | - | - | - | - | - |
| 1 | 1 | 100 (飽和) | 脱気水 | 59 | 63 | sin波 15波 50Hz | 498 | -379 | 273 |
| | 2 | | | | 78 | | 122 | -111 | 101 |
| | 3 | | | | 86 | | 253 | -180 | 190 |
| 2 | 1 | 100 (飽和) | 脱気水 | 60 | 64 | | 212 | -199 | 171 |
| | 2 | | | | 77 | | 216 | -191 | 178 |
| | 3 | | | | 82 | | 143 | -143 | 119 |
| | 4 | | | | 83 | | 95 | -86 | 76 |
| 3 | 1 | 100 (飽和) | 脱気水 | 59 | 63 | | 81 | -80 | 69 |
| | 2 | | | | 74 | | 85 | -190 | 83 |
| | 3 | | | | 76 | | 258 | -192 | 128 |
| | 4 | | | | 85 | | 304 | -297 | 201 |
| 4 | 1 | 89 (不飽和) | マイクロバブル水 | 59 | 63 | | 38 | -52 | 36 |
| | 2 | | | | 64 | | 242 | -173 | 182 |
| | 3 | | | | 70 | | 258 | -196 | 208 |
| | 4 | | | | 75 | | 314 | -286 | 269 |
| | 5 | | | | 80 | 405 | -450 | 392 | |

注) 表中加速度は振動台の測定値

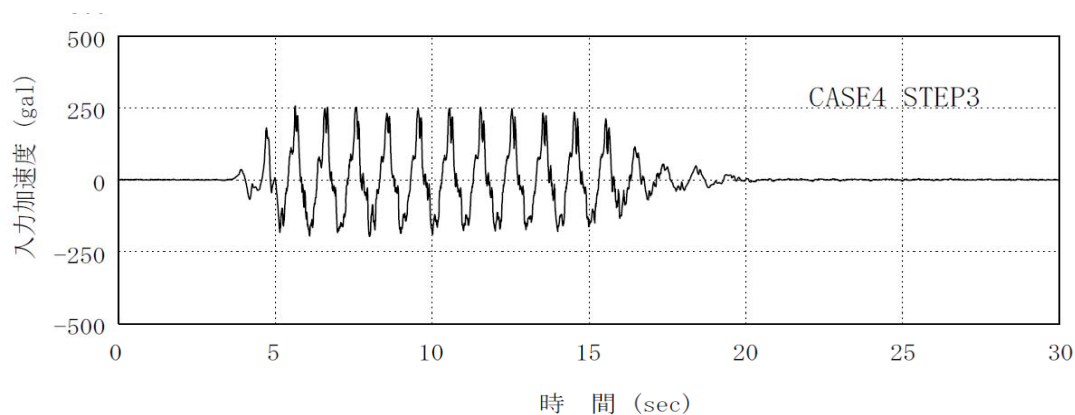


図-2.1.6 入力波形の一例（振動台測定）

2.1.2 実験結果

実験結果は、遠心重力場(50G)の測定データを、実物換算して整理した。すなわち、前述の相似則に基づき、変位や時間の測定値は 50 倍、加速度の測定値は 1/50 倍、圧力は 1 倍とした。

(1) 地盤飽和度の測定結果

不飽和地盤で実験を行ったケース 4 においては、実験中の地盤飽和度推移を土壌水分計で測定した。地盤中の飽和度測定の例を図-2.1.7 に示す。これによると地盤中の飽和度は、実験中 $S_r=84\sim 90\%$ の範囲で、平均 87% であった。

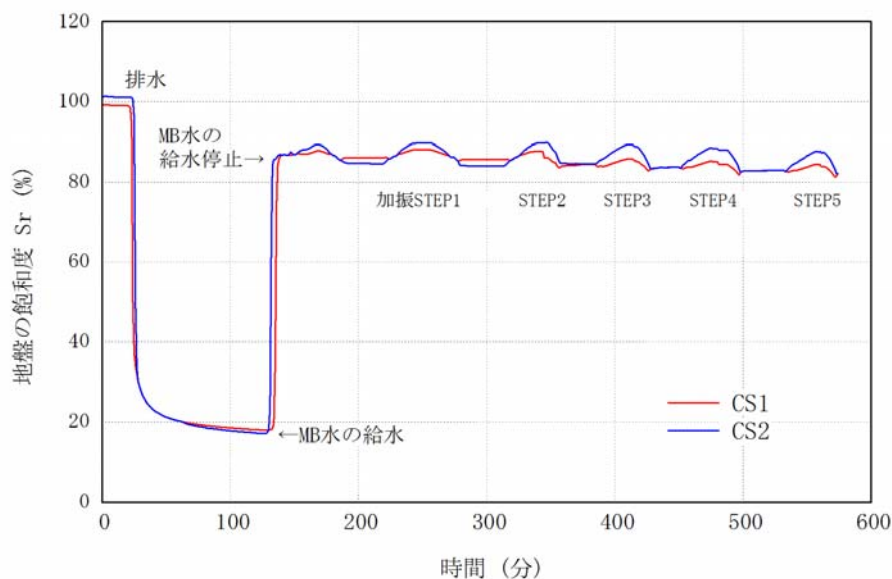


図-2.1.7 模型地盤中の飽和度推移の測定結果例（地中測定 CS-616）

(2) 加速度と過剰間隙水圧比の測定結果

加速度計と間隙水圧計の設置位置を図-2.1.9 に示す。図中測線①~③の加速度と過剰間隙水圧比の時刻歴を図-2.1.10 (1) ~ (3) に示す。黒線が飽和地盤、赤線が不飽和地盤である。同図は飽和地盤と不飽和地盤を比較するため、加速度レベルが 170~180gal でほぼ同じであった CASE2 STEP1 と CASE4 STEP2 の結果を用いた。

① 加速度の傾向

加速度応答は、飽和地盤の地表面近くでは、応答が非常に小さくなる傾向にあり、液状化した挙動特性を示した。不飽和地盤では、入力加速度の応答が減少することなく地表面まで加速度が伝わっており、液状化していない挙動を示した。この事は、不飽和地盤の場合、建物への加速度による影響を考慮する必要があることを示唆している。

② 過剰間隙水圧比の傾向

過剰間隙水圧比は、不飽和地盤は飽和地盤に比べて、上昇が遅く、そして、上昇量が小さい。さらに、建物直下である側線②と自由地盤である側線①の過剰間隙水圧比を比べると、同じ深さでは建物直下の過剰間隙水圧比が小さい。これは、建物の自重による拘束圧の影響を受けているためと考えられる。

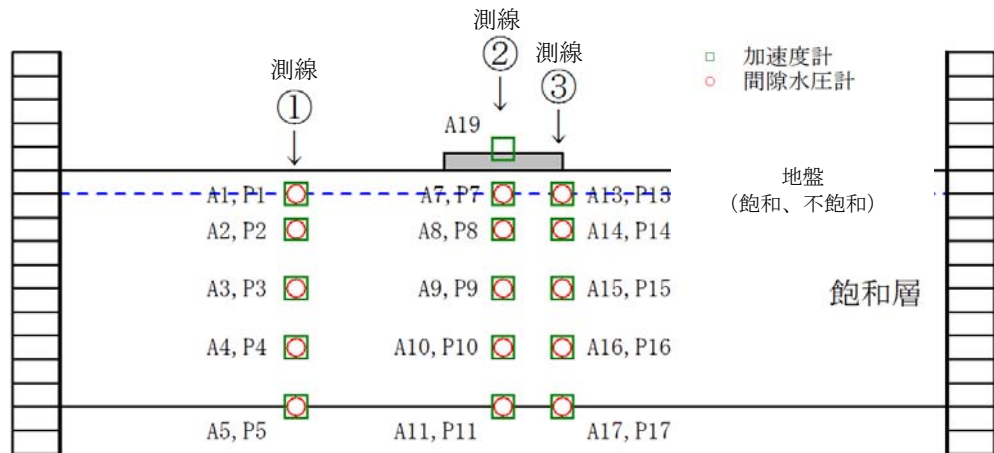


図-2.1.9 加速度計と間隙水圧計の設置位置

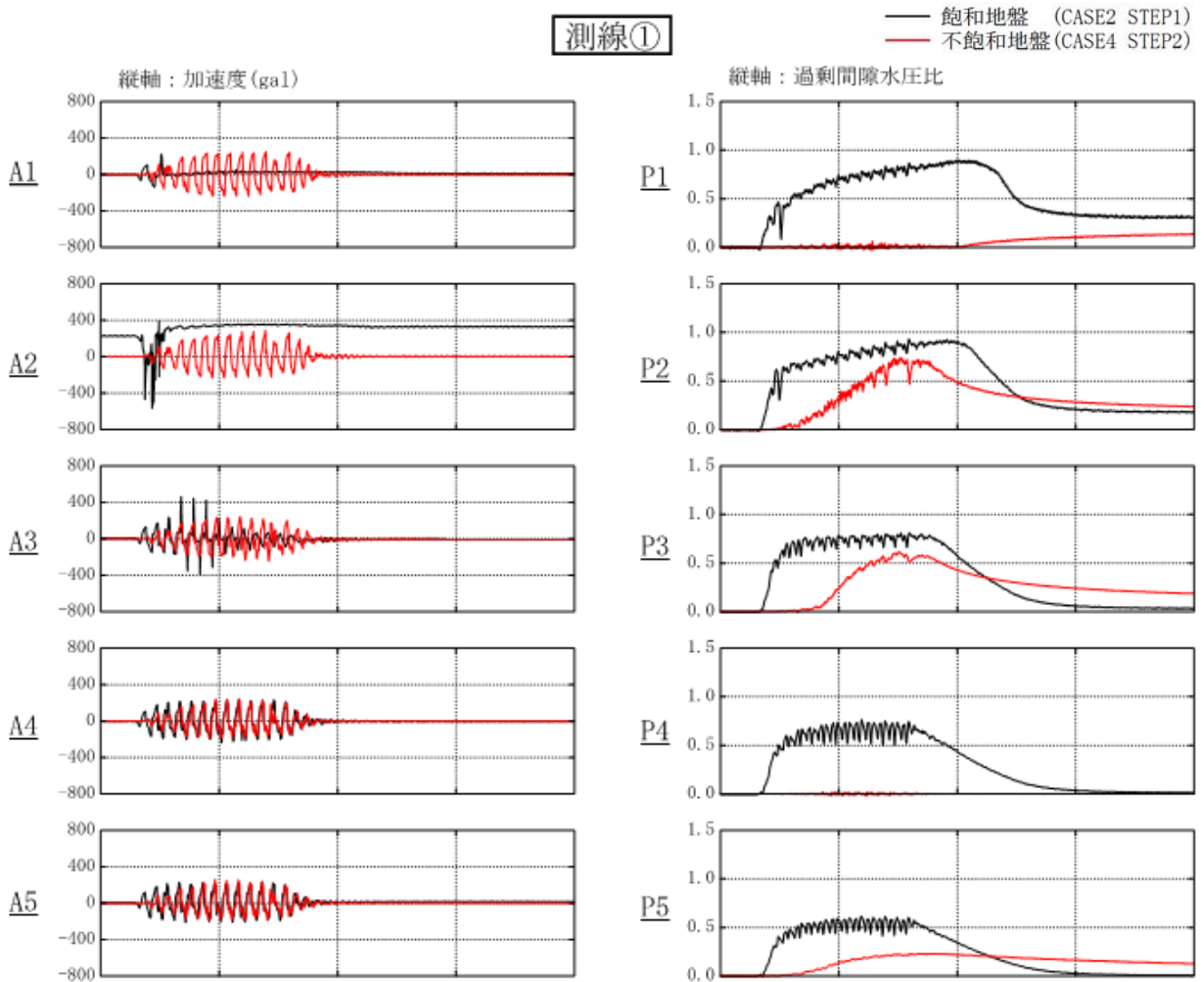


図-2.1.10 (1) 応答加速度と過剰間隙水圧比の経時変化 (側線①)

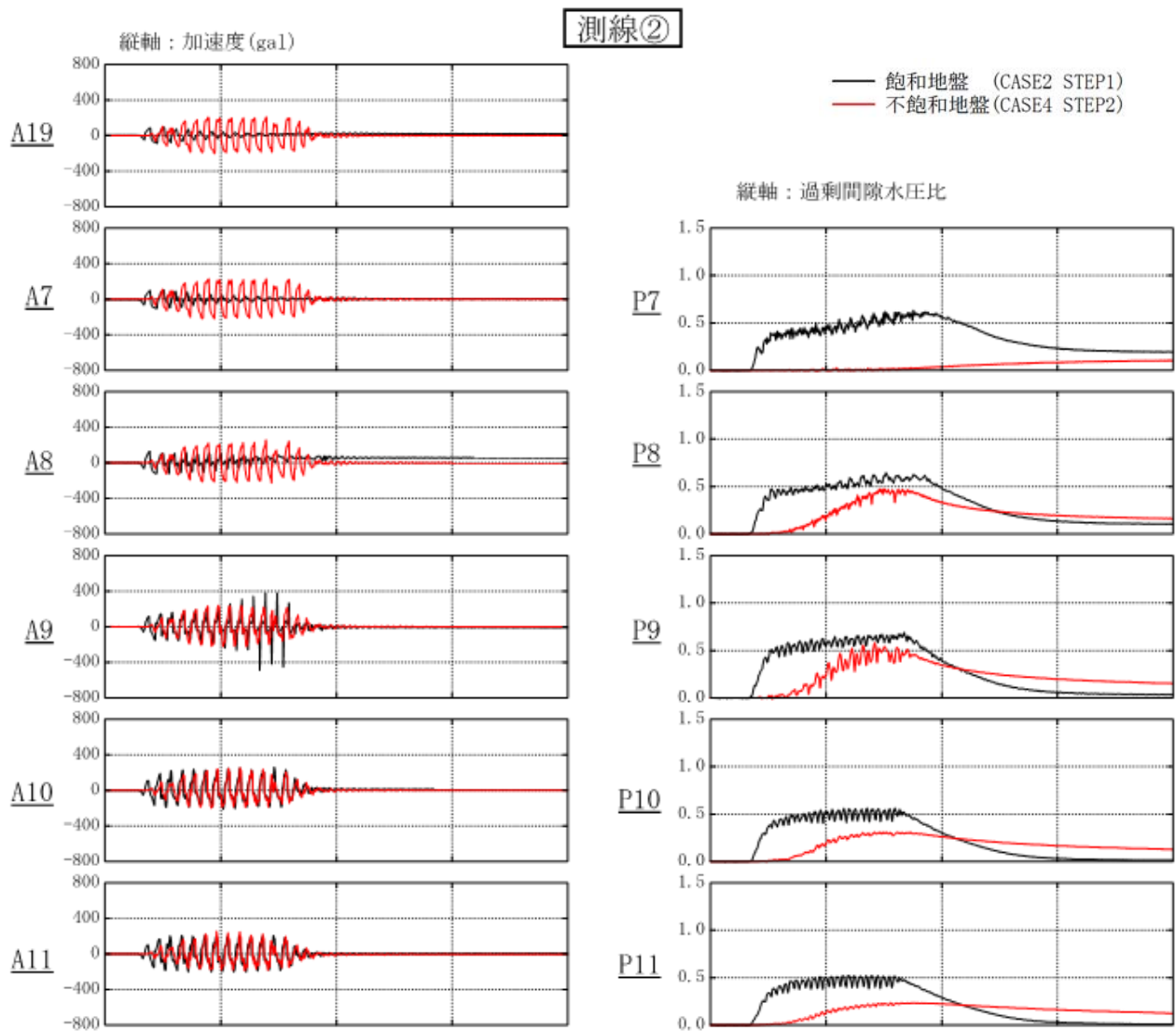


図-2.1.10 (2) 応答加速度と過剰間隙水圧比の経時変化 (側線②)

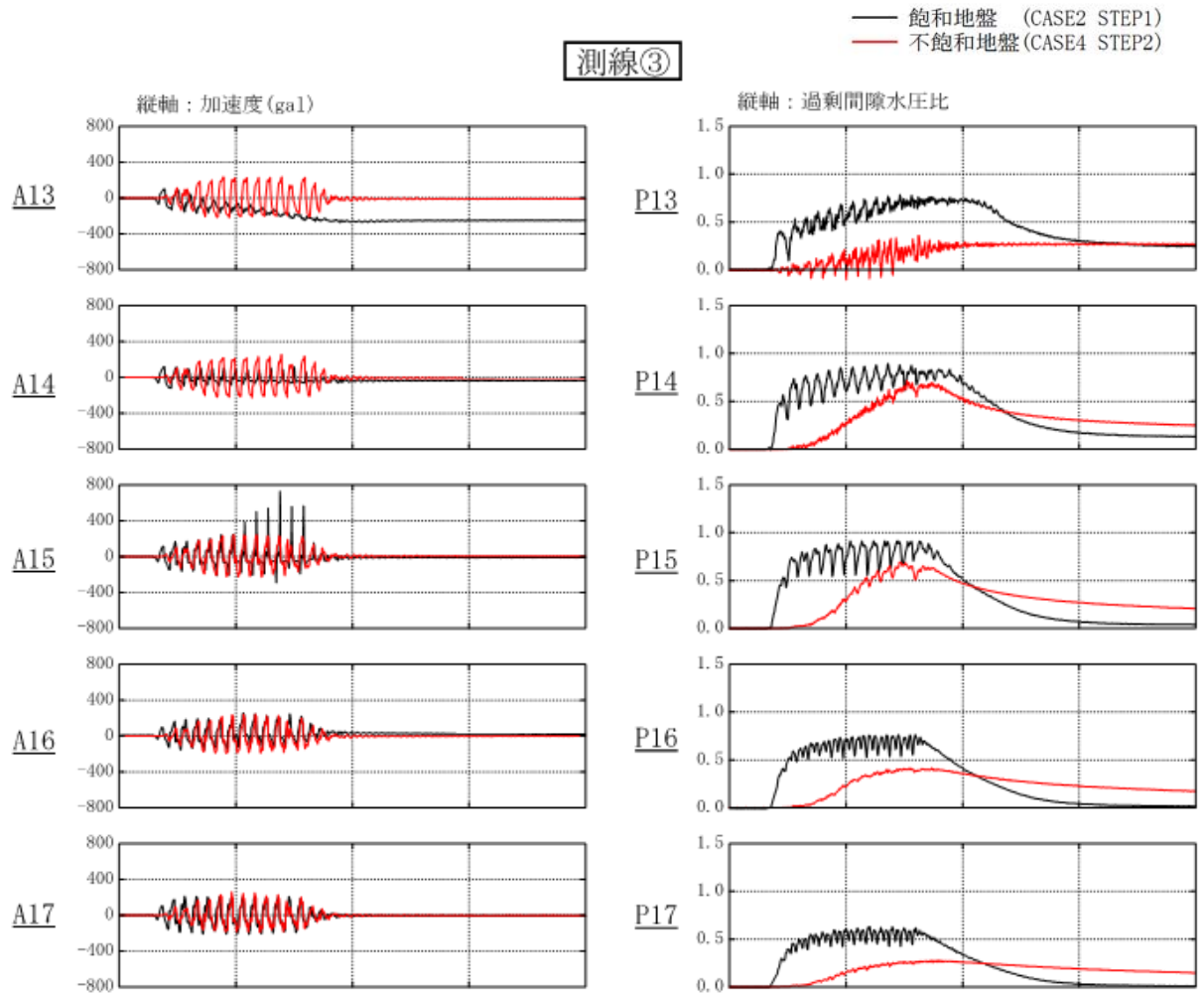


図-2.1.10 (3) 応答加速度と過剰間隙水圧比の経時変化 (側線③)

(3) 地盤及び住宅模型の沈下

加振後に測定した地盤及び住宅模型の沈下量を表-2.1.7 にまとめた。飽和地盤と不飽和地盤の沈下量の比較を図-2.1.11 に示す。比較には入力加速度レベルがほぼ同じ(170~180gal) CASE2 STEP1 と CASE4 STEP2 の結果を用いた。なお同図にある相対沈下量と住宅模型の傾斜は、以下の式で定義した。

$$\begin{aligned} \text{相対沈下量} &= (\text{住宅模型の沈下量}) - (\text{自由地盤の沈下量}) \\ &= (\text{DV2 と DV3 の平均}) - (\text{DV1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{住宅模型の傾斜} &= (\text{住宅両端の沈下量の差}) / (\text{建物幅}) \\ &= (\text{DV3}-\text{DV2}) / (\text{DV2 と DV3 の距離 4m}) \end{aligned}$$

自由地盤と住宅模型の沈下量は、飽和地盤に比べ、不飽和地盤が小さくなっている。また、住宅模型と自由地盤の相対沈下量、および住宅模型の傾斜では、飽和地盤で相対沈下量と傾斜が大きく発生しているのに対し、不飽和地盤では殆ど発生していない。

表-2.1.7 地盤と住宅模型の沈下量の測定結果一覧表

| CASE | STEP | 地盤飽和度 Sr (%) | 相対密度加振前 Dr (%) | 入力加速度 (gal) | | 最終沈下量 (m) | | |
|------|------|--------------|----------------|-------------|-------|-----------|----------|--------|
| | | | | 振動台 | 支持地盤面 | 自由地盤変位計 | 自由地盤評点測定 | 住宅模型平均 |
| 1 | 1 | 100 (飽和) | 63 | 273 | 348 | 0.360 | 0.231 | 0.741 |
| | 2 | | 78 | 101 | 124 | 0.160 | 0.170 | 0.219 |
| | 3 | | 86 | 190 | 220 | 0.082 | 0.035 | 0.124 |
| 2 | 1 | 100 (飽和) | 64 | 171 | 198 | 0.300 | 0.242 | 0.694 |
| | 2 | | 77 | 178 | 204 | 0.130 | 0.110 | 0.336 |
| | 3 | | 82 | 119 | 159 | 0.024 | -- | 0.024 |
| | 4 | | 83 | 76 | 105 | 0.014 | 0.015 | 0.020 |
| 3 | 1 | 100 (飽和) | 63 | 69 | 92 | 0.244 | 0.184 | 0.247 |
| | 2 | | 74 | 83 | 107 | 0.055 | -- | 0.084 |
| | 3 | | 76 | 128 | 151 | 0.085 | -- | 0.169 |
| | 4 | | 85 | 201 | 229 | 0.080 | 0.149 | 0.211 |
| 4 | 1 | 89 (不飽和) | 63 | 36 | 57 | 0.005 | -0.049 | 0.006 |
| | 2 | | 64 | 182 | 224 | 0.145 | 0.001 | 0.166 |
| | 3 | | 70 | 208 | 255 | 0.122 | 0.005 | 0.136 |
| | 4 | | 75 | 269 | 305 | 0.124 | 0.075 | 0.137 |
| | 5 | | 80 | 392 | 384 | 0.175 | 0.035 | 0.162 |

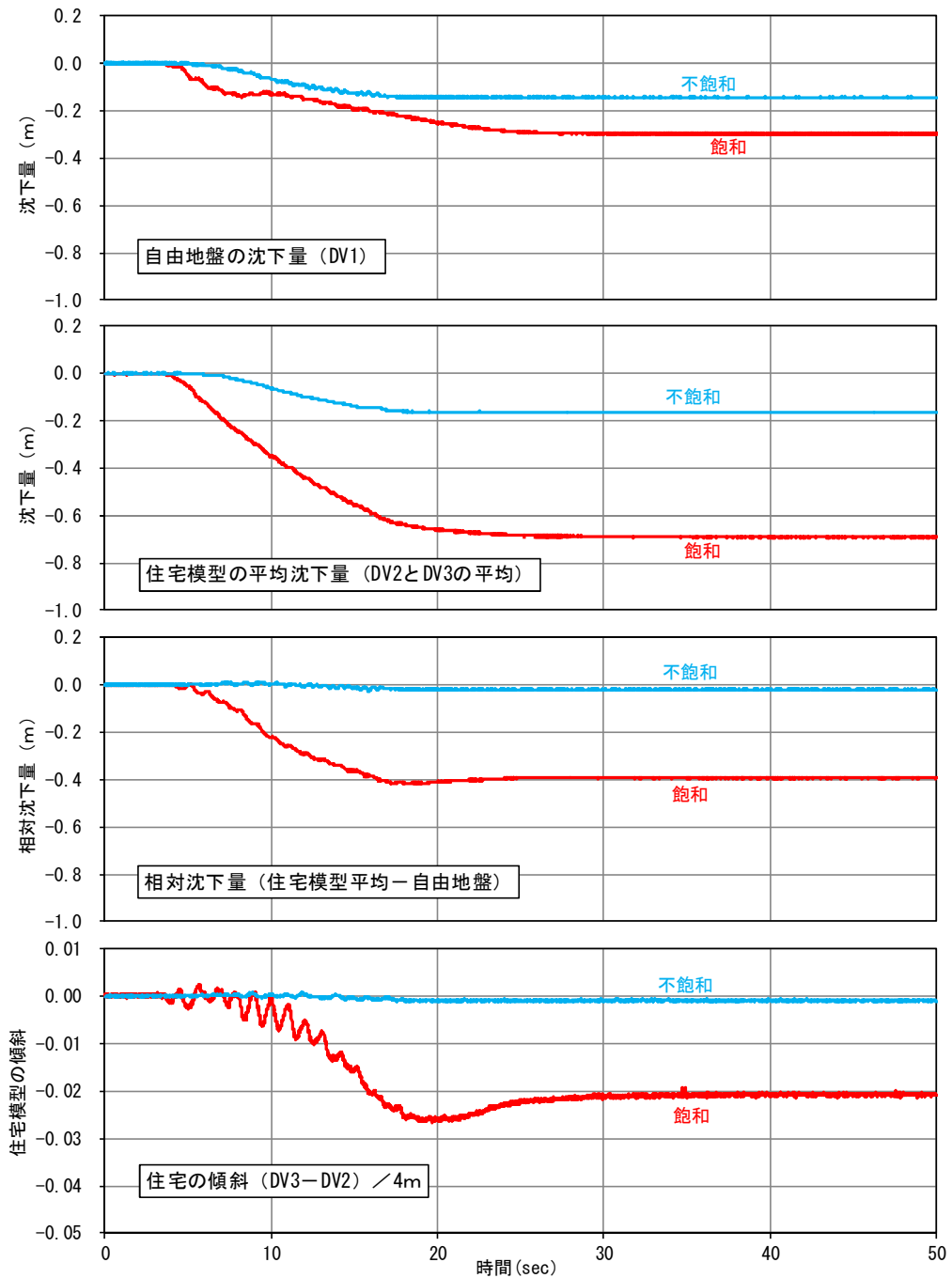
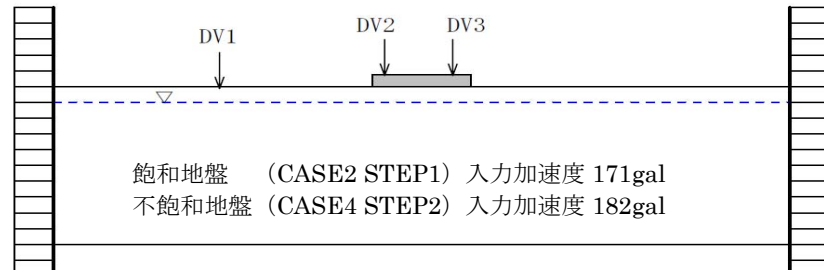


図-2.1.11 地盤と住宅模型の沈下量 (例)

(4) 実験全ケースのまとめ

図-2.1.12 は地盤及び住宅模型の最終沈下量と入力加速度の関係に及ぼす地盤の飽和度の影響を示している。入力加速度がほぼ同じ約 200gal での結果をみると、不飽和地盤は飽和地盤の約半分以下の沈下量を示している。なお、住宅模型の沈下量は自重の影響もあり自由地盤の沈下量に比べ大きな値を示している。

また、図-2.1.13 は飽和地盤における、自由地盤の最終沈下量と入力加速度の関係に及ぼす相対密度の影響を示している。相対密度が高くなるにつれ最終沈下量が小さな値を示し、相対密度の増大も沈下量の抑制に有用であることを再確認するものである。

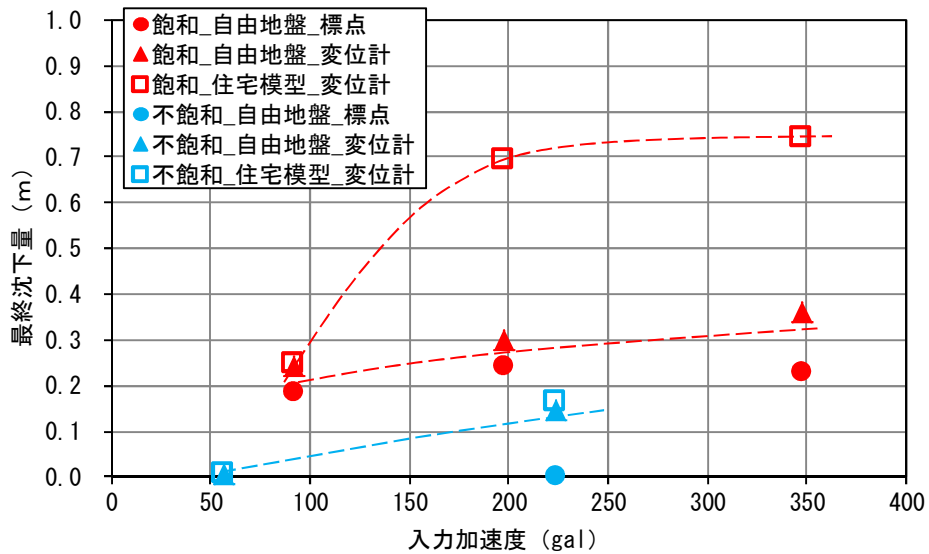


図-2.1.13 最終沈下量と入力加速度及び飽和度の関係

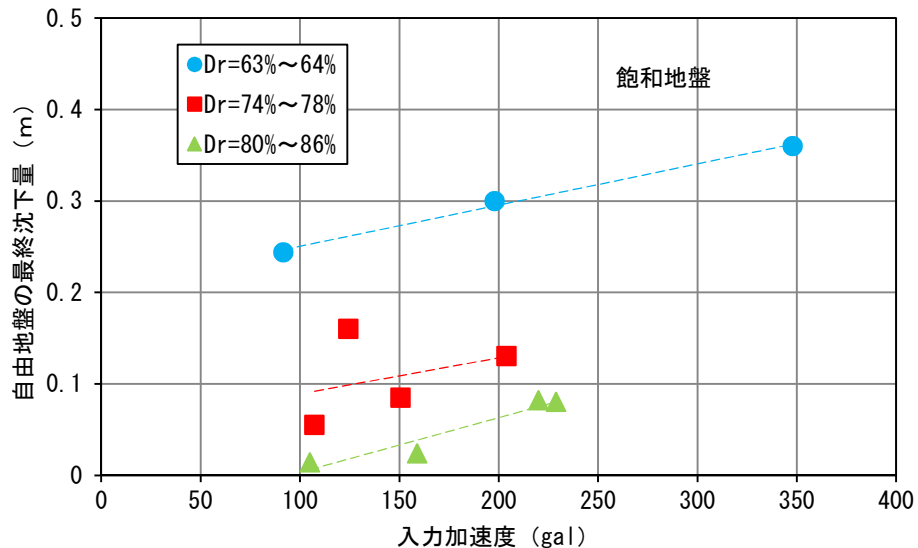


図-2.1.12 自由地盤における最終沈下量と入力加速度及び相対密度の影響

2.2 実験地盤の調査結果

2.2.1 地盤特性

(1) 実験地の位置

実験地は、千葉県習志野市芝園 2-1-1 の千葉工業大学茜浜運動施設内に位置する (図-2.2.1、-2.2.2 参照)。事前調査地点ではN値を 1m 毎、深度 20m まで実施し、追加 (事後) 調査地点では、N値を 0.5m 毎、深度 8m まで実施した。また、地盤不飽和化の事後A地点と事前B地点においては、それぞれ深度 8m 付近の粘性土から不攪乱試料を採取し、圧密試験を実施した。また、掘削孔を利用してP波速度を測定し、地盤不飽和化前後で比較を行った。



図-2.2.1 実験地 (千葉工業大学茜浜運動施設内)

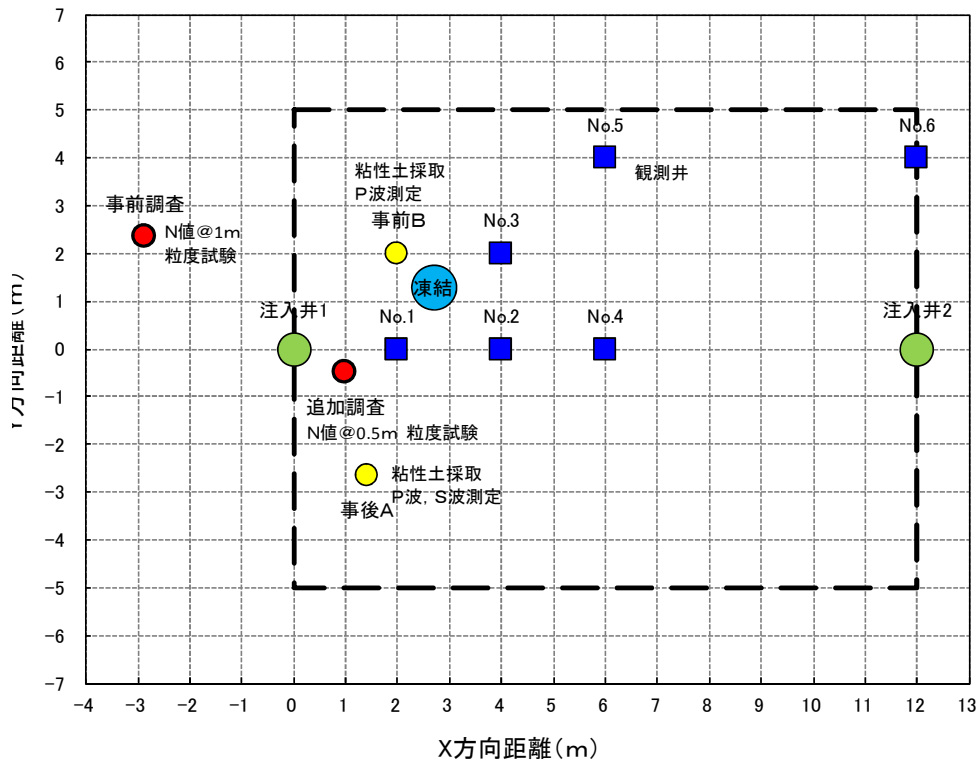


図-2.2.2 ボーリング調査位置図

(2) 地盤調査の方法

① 機械ボーリング

事前に実験地の地盤特性を把握するため機械ボーリングによる地盤調査を実施した。機械ボーリングは図-2.2.3に示すロータリー式オイルフィード型ボーリング機械を用いて行った。

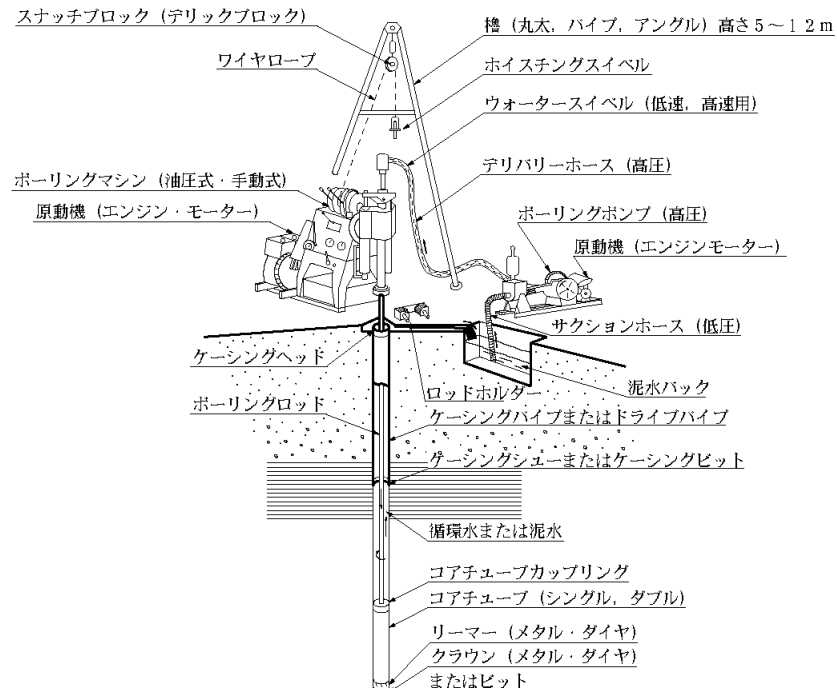


図-2.2.3 使用ボーリング機械

② 標準貫入試験

標準貫入試験は、JIS-A-1219「自動落下法」に基づき、事前調査地点では1m毎で実施し、追加調査地点では0.5m毎で実施した。

③ 不攪乱試料の採取

粘性土の不攪乱試料の採取は、地盤工学会基準に基づいたトリプルチューブサンプラー（ロータリー式三重管サンプラー、JGS 1223-2003）を用いた。

④ P波測定

P波測定は、ダウンホール法により測定した。事後調査はS波測定も実施した。

⑤ 室内土質試験

室内土質試験はJIS規格及びJGS基準に準拠して以下の試験を実施した。

- ・土粒子の密度試験 JIS A 1202-2009
- ・含水比試験 JIS A 1203-2009
- ・粒度試験 JIS A 1204-2009
- ・液性・塑性限界試験 JIS A 1205-2009
- ・湿潤密度試験 JIS A 1225-2009
- ・圧密試験 JIS A 1217-2009

(3) 地盤調査の結果

① 地形地質概要

実験地は、図-2.2.4 に示すように、昭和 44 年以降の海域埋立地で、2011 年東北地方太平洋沖地震による液状化履歴地¹²⁾ に該当する。

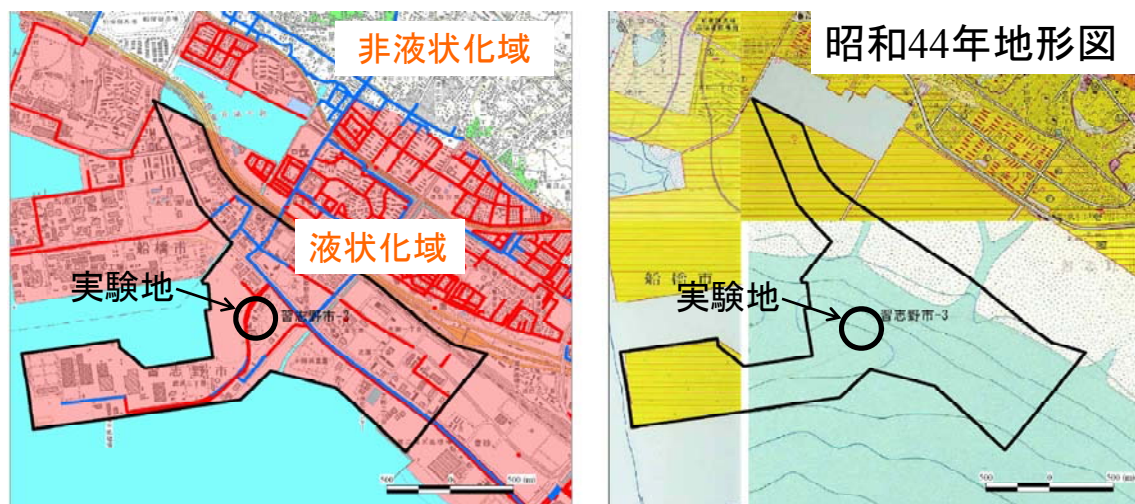


図-2.2.4 実験敷地の液状化履歴と土地条件図¹²⁾

② 実験地の地盤構成

調査結果を図-2.2.5 の土層断面図にまとめ、地盤構成の特徴を以下に示す。

地表より深度 2m までは粘性土からなる盛土が分布し、瓦礫を多量混入する。今回の不飽和化実験対象を含む深度 2~7m は、埋立土の砂質土が分布し、暗灰~暗黄褐色の細砂、シルト質細砂から構成される。N 値は上部の深度 2~5m 間で $N=5\sim9$ 、中部の深度 5~6m 間で $N=15\sim20$ 、下部の深度 6~7m で $N=7\sim14$ を示す。さらに下位の深度 7~9m 間には埋立土の粘性土が分布し、 $N=0\sim3$ の粘土質シルトや砂質シルトで構成される。

その下位は、第四紀完新世の沖積層の砂質土と粘性土が交互に出現し、深度 15m 以深では N 値が深度方向に増加する。さらに深度 15m より第四紀更新世の洪積層が出現する。

③ P 波測定結果

地盤不飽和化前後の P 波の測定結果を図-2.2.6 に示す。不飽和化前の V_p は深度 3m 以深で水中伝搬速度 ($\approx 1500\text{m/s}$) 程度を示すが、不飽和化後は $V_p=1000\text{m/s}$ 程度に低下している。

④ 室内土質試験結果

ボーリング調査において採取した標準貫入試験試料 (乱した試料) および不攪乱試料を用いて室内試験を実施した。図-2.2.7 に土性図を示す。不飽和化対象の F_s 層に該当する深度 3~6m は砂質土優勢で、細粒分は概ね 20% 含有している。また、不飽和化前後の F_c 層より採取した粘性土の圧密試験結果を図-2.2.8 にまとめた。圧密降伏応力は、有効土被り圧を若干上回る程度の正規圧密状態にあり、不飽和化前後で顕著な変化はみられない。

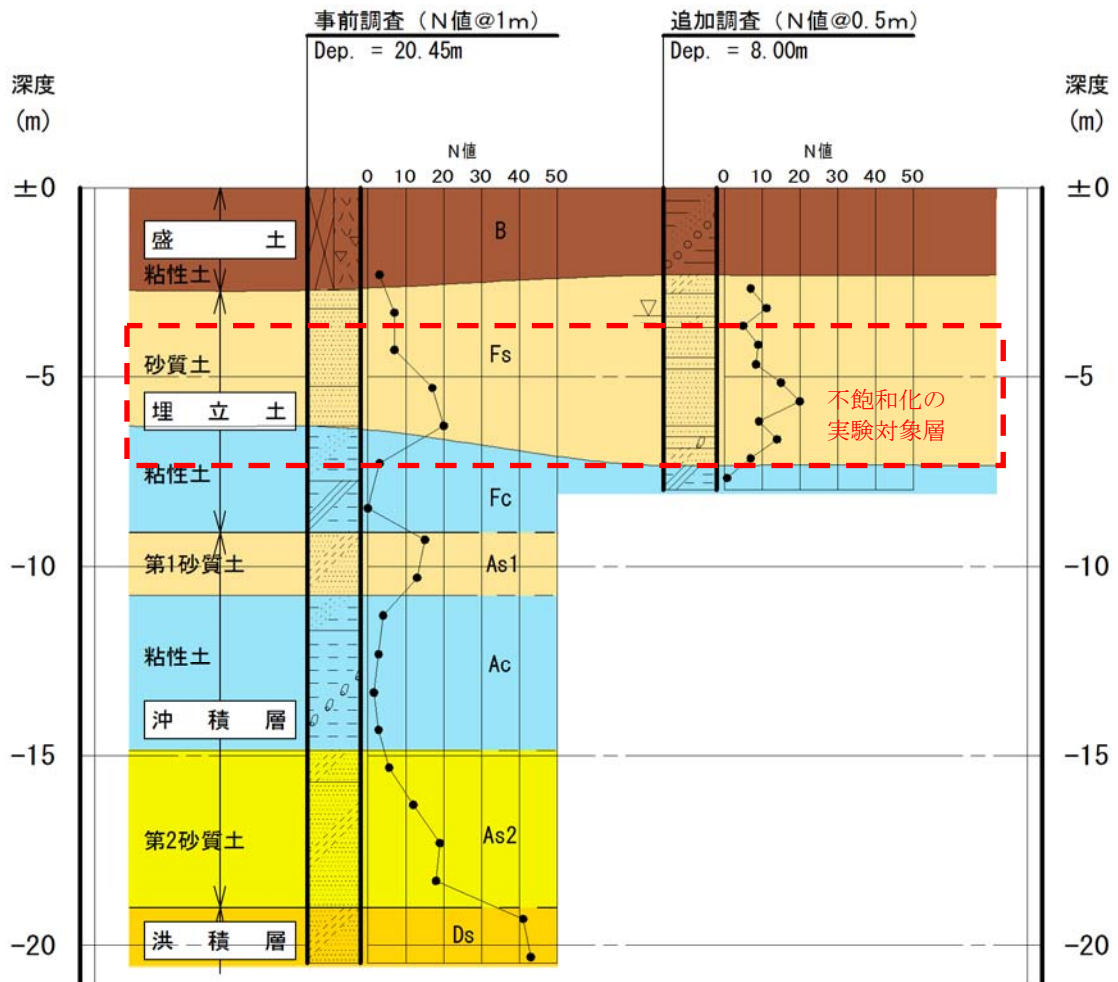


図-2.2.5 実験地の土層断面図 (V:1/200、H:1/100)

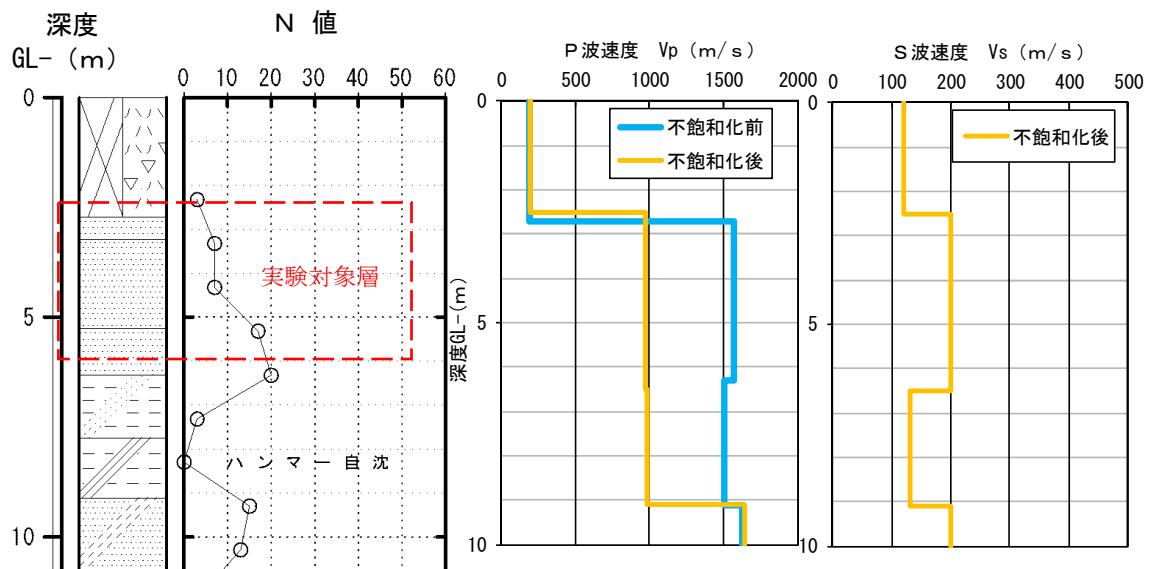


図-2.2.6 PS 検層結果

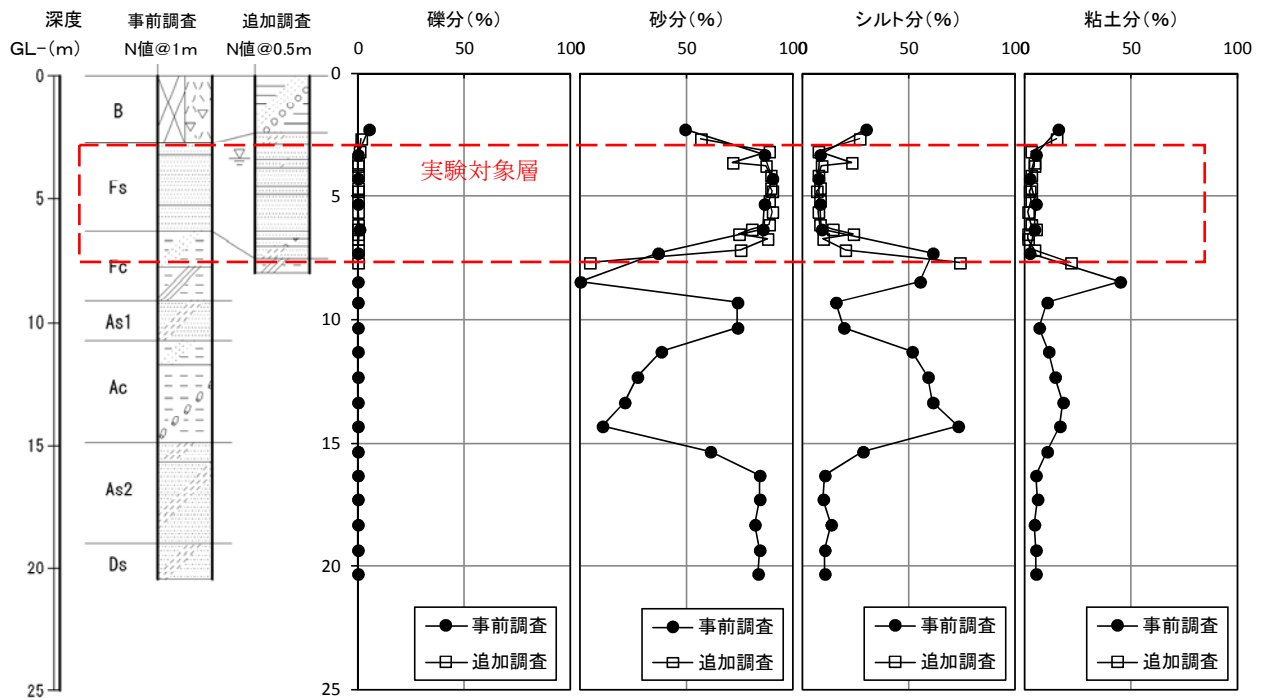


図-2.2.7 実験敷地の土性図

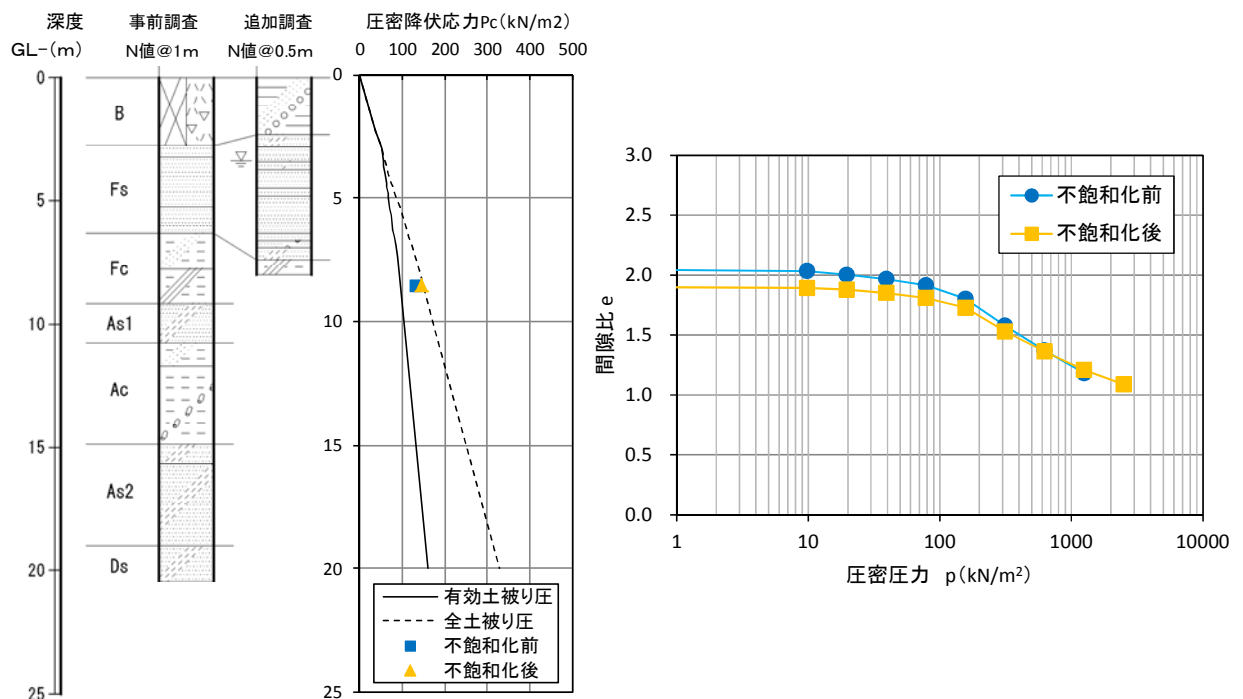


図-2.2.8 不飽和化対象層直下の粘土層の圧密試験結果 (不飽和化前後の比較)

2.2.2 実験井戸の概要

(1) 井戸設置作業

実験ヤードにおける井戸の配置断面状況を図-2.2.9 に示す（平面図は前述図-2.2.2 参照）。なお、注入井戸 2 は計画時では揚水井戸としたが、結果的には、揚水による地下水低下が懸念されたため、揚水は実施せずに、注入井戸 2 として利用した。

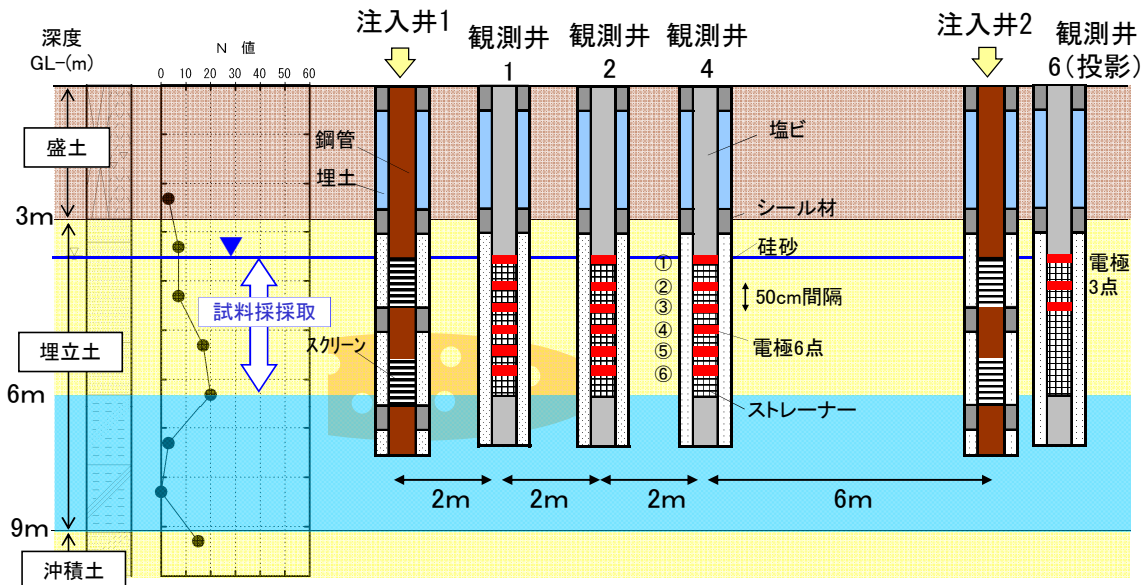


図-2.2.9 井戸の配置断面状況

① 観測井の設置

観測井の仕様を写真-2.2.1 に示す。観測井は塩ビ管 VP100 を使用し、スクリーン深度は深度 3.00～6.50m とした。継手部分に電気抵抗観測用の電極を深度方向 50 cm 間隔で 3～5 箇所設置した。



観測井スクリーン
(開口率 8%)



電極 (幅 4 cm)

写真-2.2.1 観測井の仕様

② 注入井の設置

注入井は鋼管 100A を用い、スクリーン深度は深度 3.5～4.5m と深度 5.5～6.5m とした。

2.3 地盤の不飽和化実験結果

2.3.1 マイクロバブル水および空気の注入実験結果

地盤を不飽和化するため、マイクロバブル水（以下 MB 水と表示）および空気を地盤中へ注入する実験を行った。なお、MB 水は微細気泡（気泡径 10μ 程度）と水の混合液である。以下に実験結果の概要を示す。

(1) 注入装置の概要

① MB 水注入装置

MB 水（マイクロバブル水）の発生には、図-2.3.1 に示す MB 水発生装置¹³⁾を使用した。また、MB 水の注入には図-2.3.2 に示す注入装置を用いた。図-2.3.3 に MB 水作成例を示す。



図-2.3.1 MB 水発生装置の概要¹³⁾

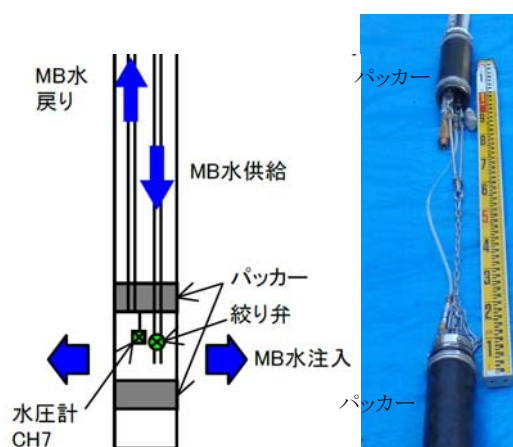


図-2.3.2 MB 水注入装置



図-2.3.3 MB 水の作成例

② 空気注入装置

空気注入は、エアコンプレッサーの圧縮空気を制御装置で調整し、図-2.3.2 の先端ノズルの吐出孔より空気注入を行った。

(2) MB水および空気の注入実験結果

注入実験は、表-2.3.1に示す3種類の方法(①MB水注入、②空気注入、③MB水水頭圧注入)で注入を行った。それぞれの注入結果の概要を以下にまとめた。

表-2.3.1 注入工程

| 注入方法 | | 日程 | 平成24年 | | | | 平成25年 | |
|------|----------|-----|-------|------|------|------|--------|--|
| | | | 11月 | | 12月 | | 1月 | |
| ① | MB水注入 | 1回目 | | 注入井1 | | | | |
| | | 2回目 | | 注入井1 | | | | |
| | | 3回目 | | 注入井1 | | | 観測井2,3 | |
| ② | 空気注入 | - | | | 注入井1 | | | |
| ③ | MB水水頭圧注入 | 1回目 | | | | 注入井2 | | |
| | | 2回目 | | | | | 観測井2,3 | |

①MB水注入「注入井1」

注入井1においてMB水の注入を3回実施した。図-2.3.4に各注入回の開始時を初期とした経時変化を示す。注入初期における傾向は、1回目に比べ2回目、3回目の方が注入量の低下が大きい。今回の実験結果から、土粒子間に残留する気泡が、2回目注入以降の地盤の透水性を低下させていることが考えられる。室内における模型地盤の注入実験でも同様の傾向が確認されている。

②空気注入「注入井1」

注入結果を図-2.3.5に示す。空気注入圧は注入深度5.5m付近の有効土被り圧(75kN/m²)を大きく超過しない圧で定常注入を行った。

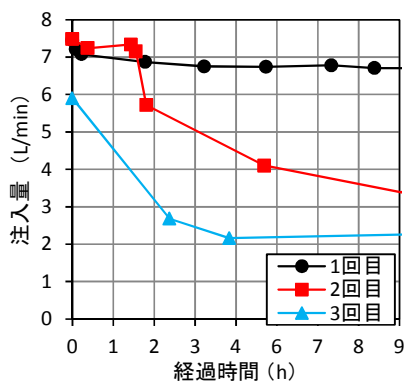


図-2.3.4 注入経過 (①MB水注入)

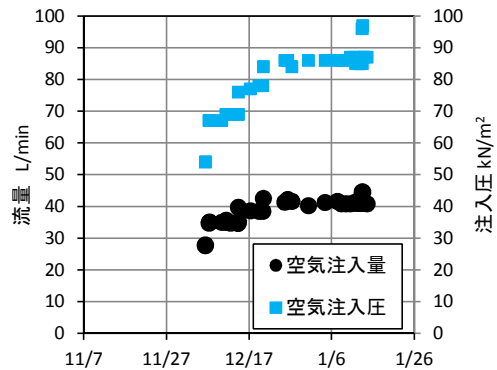


図-2.3.5 注入経過 (②空気注入)

③MB水の水頭圧注入「注入井2」、「観測井2、3」

注入方法は、パッカーを使用せず、井戸内に注入したMB水の水位のみによる水頭圧注入を行った。注入結果を図-2.3.6に示す。①MB水注入と同様に注入量が低下した。

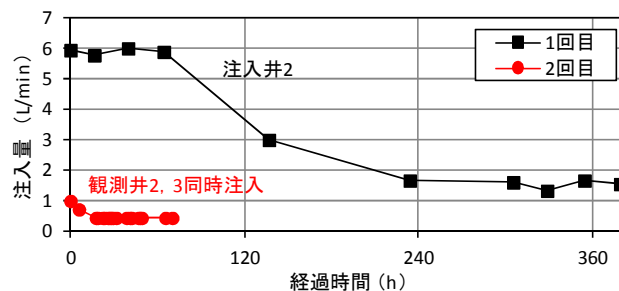


図-2.3.6 注入経過 (③MB水の水頭圧注入)

2.3.2 地盤不飽和化モニタリング結果

不飽和領域を把握するため、P波速度の変化の測定、井戸内に到達する気泡の観測、および地盤の電気抵抗の変化を測定した。以下に測定結果の概要を示す。

(1) P波速度の変化

不飽和化前後のP波測定では、前述の結果に示すように深度方向に均一に1500m/sから1000m/s程度に低下している。これを図-2.3.7に示す既往測定例⁹⁾と比較すると、飽和度 $S_r=90\sim 100\%$ 間におけるP波の急変域に該当しており、飽和度が低下している可能性を示す。

なお、今回は部分的な測定であるが、不飽和化領域としては、P波測定位置が注入井1から水平距離3mにあることから、少なくとも注入井1から半径3mの範囲は飽和度が低下している可能性を示すものである。

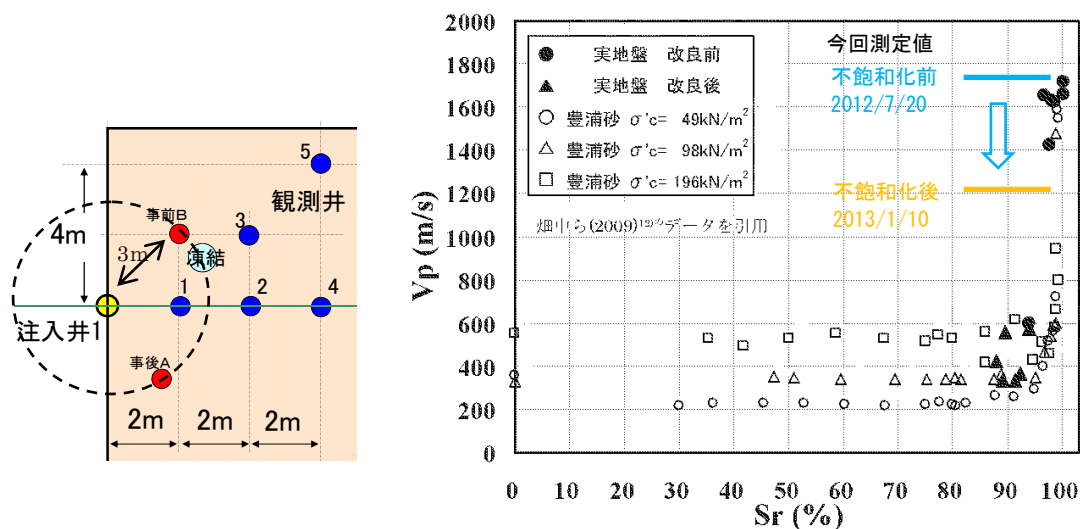


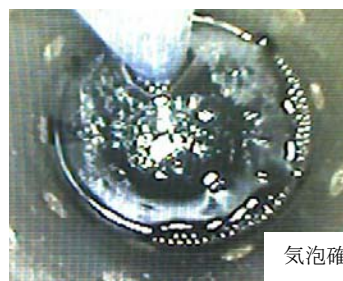
図-2.3.7 不飽和化前後の地盤の飽和度と既往の飽和度とP波の関係⁹⁾

(2) 井戸内の気泡観測

観測井への気泡到達状況を図-2.3.8に示す孔内カメラ(GラインスコープII)¹⁴⁾による目視観測を行った。気泡を確認した位置と深度を図-2.3.9にまとめた。今回確認した範囲では、何れの場合も深度3.3~4.1mの地下水位面に近い、比較的浅い深度に限られている。また、原因は不明であるが、観測井2では観測期間中に一度も気泡を確認していない。



GラインスコープII



気泡確認例

図-2.3.8 孔内カメラと気泡確認例

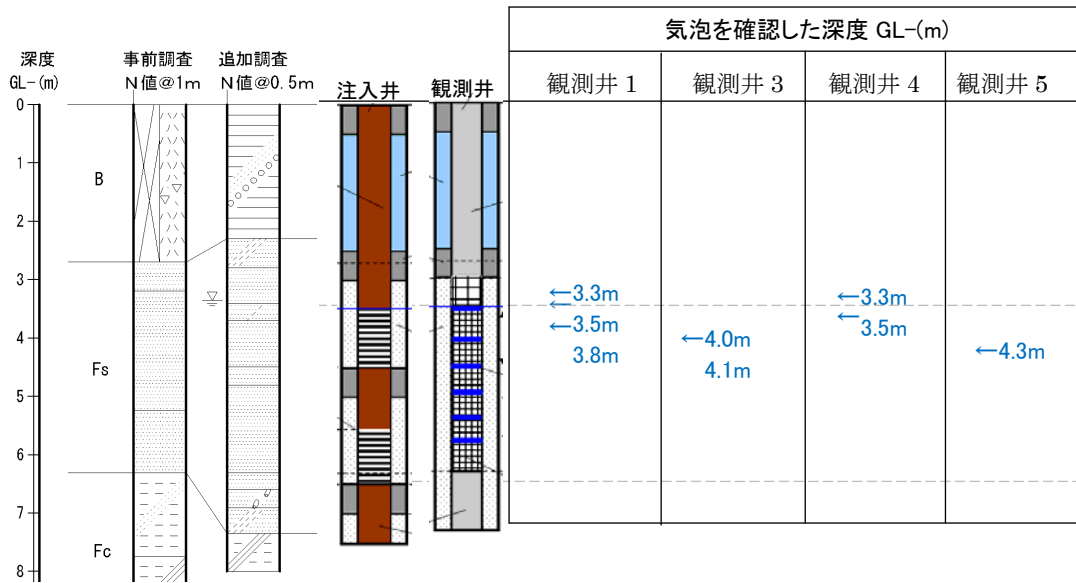
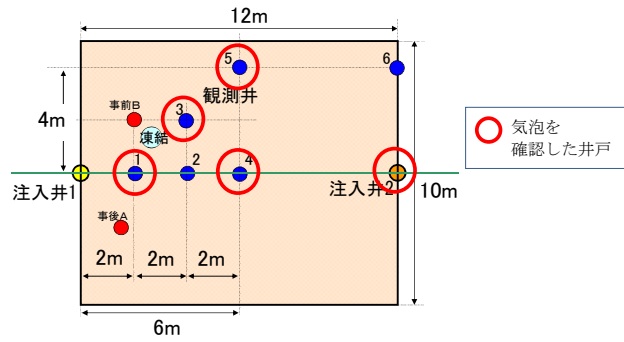


図-2.3.9 気泡の目視位置と深度

(3) 地盤の電気抵抗の変化

地盤の電気抵抗は 2 種類（2 電極使用と 4 電極使用）の測定を行った。

1) 2 電極を使用した電気抵抗測定

2 電極による測定は図-2.3.10 に示す回路素子測定器（LCR ハイテスタ）¹⁵⁾ を使用した。観測井戸に設置された 2 電極間において、定電圧（0.1V）の周波数 1 kHz で通電し、電気抵抗（インピーダンス Z）を計測した。



図-2.3.10 LCR ハイテスタの概要 ¹⁵⁾

2) 4 電極を使用した電気抵抗測定

4 電極による測定は、図-2.3.11 に示す高密度電気探査装置（NEXT-400RS）¹⁶⁾ を使用した。観測井に設置された 2 つの電極間（電流電極）に電流を流し、別の観測井に設置された 2 つの電極間（電圧電極）の電圧を測定し、比抵抗を算出した。また、地盤内の見かけの比抵抗分布を推定するため、図-2.3.12 に示すような測定概念を用いた。



図-2.3.11 高密度電気探査装置の概要 ¹⁶⁾

$$\rho_a = G \frac{V}{I}$$

$$G = 4\pi \left(\frac{1}{C_a P_a} - \frac{1}{C_a P_b} - \frac{1}{C_b P_a} + \frac{1}{C_b P_b} + \frac{1}{C'_a P_a} - \frac{1}{C'_a P_b} - \frac{1}{C'_b P_a} + \frac{1}{C'_b P_b} \right)^{-1}$$

ρ_a : 地盤の見掛け比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
 I : 2 電流電極 (C_a, C_b) 間に流れる電流(A)
 V : 2 電圧電極 (P_a, P_b) 間の電位差(V)
 G : 電極配置係数

図-2.3.12 電気比抵抗の測定概念（ダイポール・ダイポール法）¹⁷⁾

異なる二つの井戸間で測定した変化率の深度分布例を図-2.3.13 (1) (2) に示す。2 電極測定は同一深度の 2 電極間を測定し、4 電極は深さ 50cm 毎の平均的な値を測定している。変化率は不飽和化前の抵抗 (比抵抗) に対して、各注入段階①～③での変化の割合を示す。

①MB水注入

2 電極と 4 電極測定ともに、MB 水注入に伴い対象地層全体で比抵抗が増加し、地層下部でより増加が大きい。また、注入井からの水平距離 2～4m では変化が顕著であるが、4mを超えると変化率が小さくなる。

②空気注入

先行注入したMB水残留の影響により層全体で比抵抗が減少する傾向がみられたため、ここでは空気注入開始 (12/6) を初期とする変化率としてまとめた。2 電極測定では顕著な変化が確認できないが、4 電極測定では層上部では比抵抗が増加した。注入①と同様に注入井からの水平距離 2～4m では変化が見られるが、4mを超えると変化率が小さくなる。

③MB水の水頭圧注入

注入方法は、前述①②が注入装置のパッカー間注入に対し、③はパッカーを使用しない水頭差注入を行った。観測井 2、3 は注入井に近い範囲 (水平距離 2m以内) の比抵抗変化を確認したものである。観測井 2、3 からの注入では、概ね全深度で比抵抗が増加しており、水頭差のみでも注入できる可能性を示すものである。

なお、4 電極測定は 2 電極測定に比べ測定区間による変化率の違いが小さい。

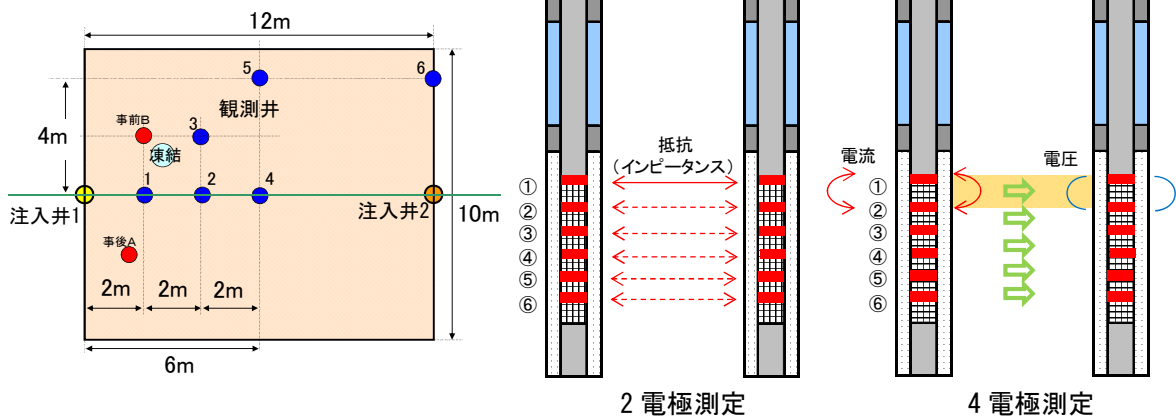


図-2.3.13 (1) 測定電極の深度分布

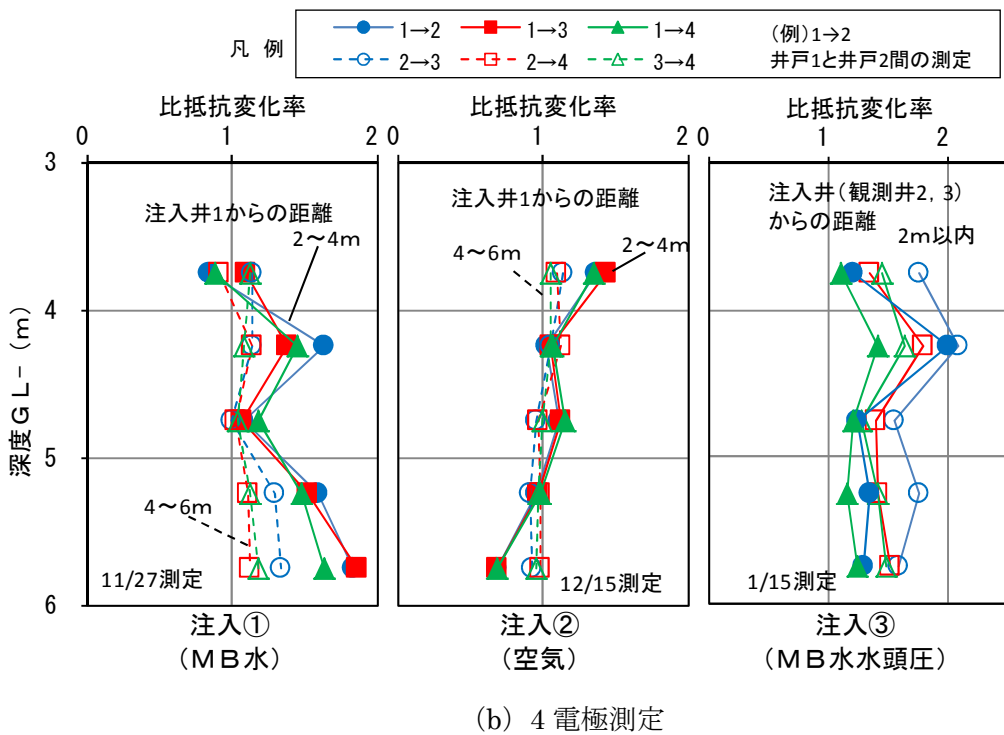
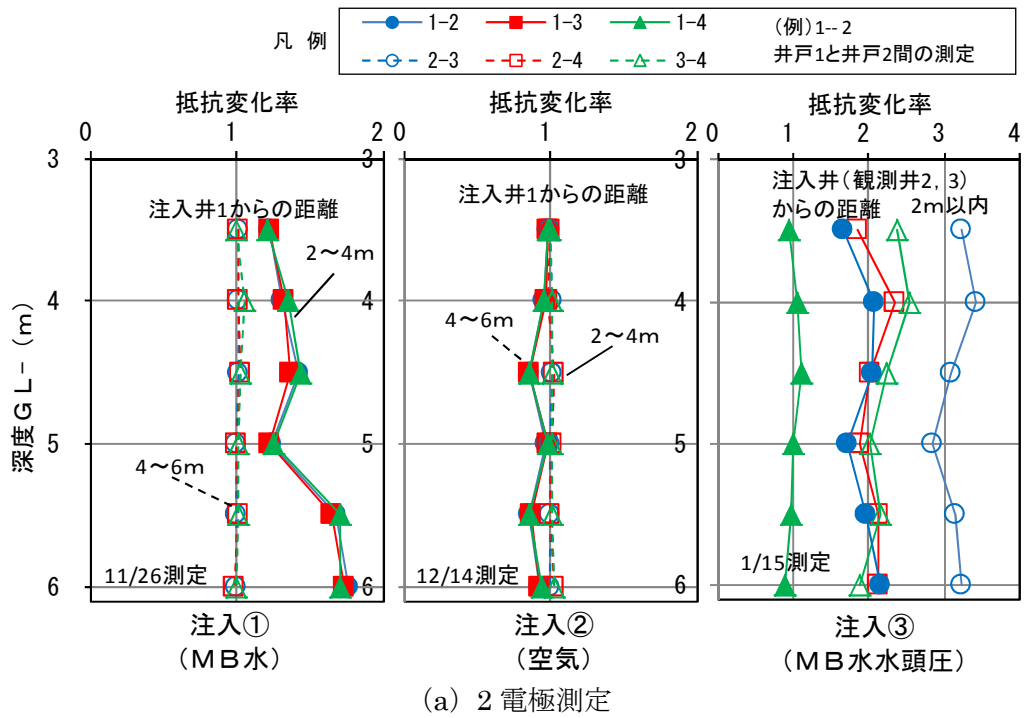


図-2.3.13 (2) 変化率の深度分布

2.3.3 不飽和化による影響調査結果

不飽和化実験による影響調査として、(1) 地下水の比抵抗測定、(2) 地盤変位（沈下）、(3) 地下水位の変化の調査を行った。

(1) 地下水の比抵抗測定結果

地盤の電気抵抗測定では、地下水の比抵抗が変化する場合、地盤の比抵抗に影響する可能性がある。一般に電気伝導度（率） σ と比抵抗 ρ の間には $\rho = 1/\sigma$ の関係があることから、地下水の電気伝導度を測定し、同式より地下水の比抵抗を算出した。

MB水や空気注入時における水に比抵抗の経時変化を図-2.3.14 に示す。①MB水（水道水）の注入では、殆ど比抵抗に変化はみられない。②空気注入中でも水の比抵抗は殆ど変化していない。ただし、水道水の比抵抗が若干低下しており、水道水も比抵抗が一定ではなく、変化する可能性があることを示している。また、③MB水を直接観測井2 観測井3 に注入した場合は、水の比抵抗が $18\sim 20\Omega\text{m}$ 程度増加している。これは、比抵抗が異なる地下水が浸透すると、地盤の電気抵抗も変化する可能性があることを示すものである。

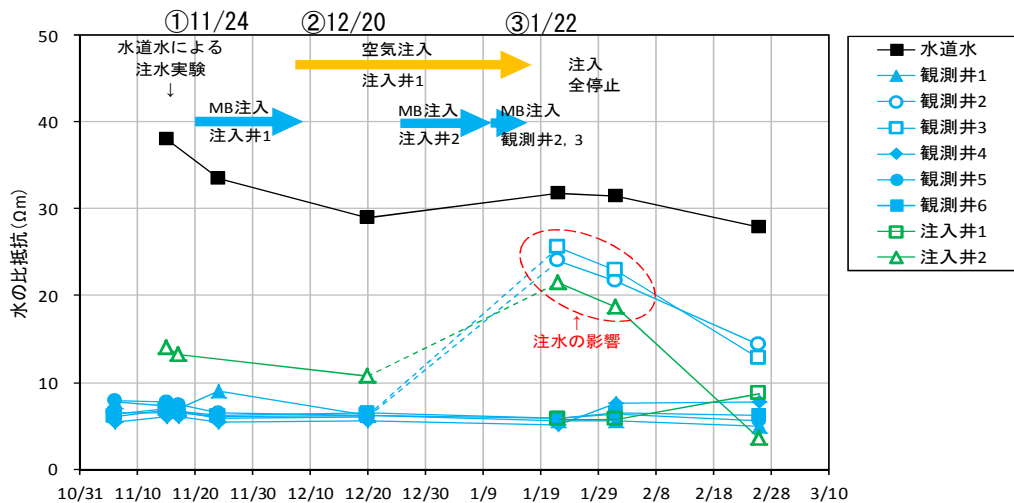


図-2.3.14 各井戸水の比抵抗の経時変化

(2) 地盤変位の計測結果

不飽和化実験では、MB 水と空気を地盤中への注入による地表面変位の発生の有無の確認を行った。ここでは、注入井 1 周辺を中心に地盤高計測杭を設置し、注入実験中における鉛直変位の経時変化を測定した。地盤変位の経時変化を図-2.3.15 に示す。図-2.3.15 によると、注入に伴う地盤の鉛直変位は見られなかった。

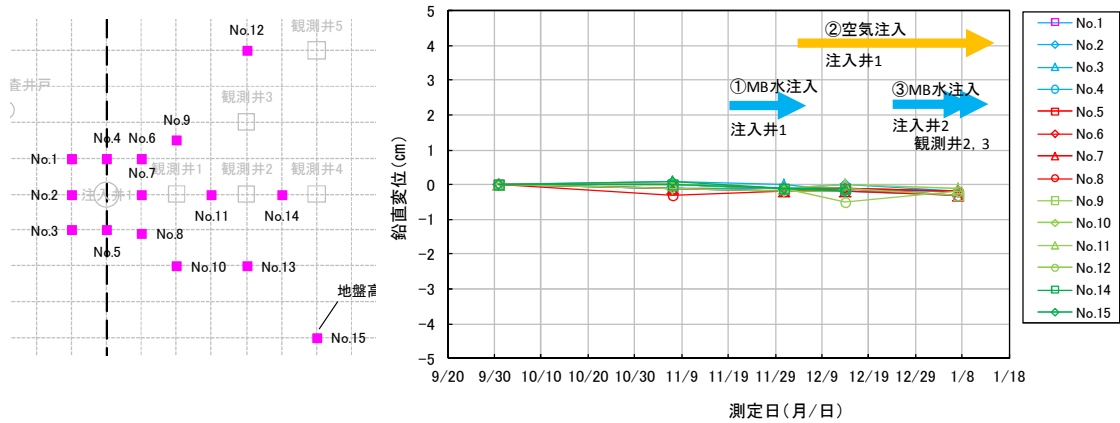


図-2.3.15 MB 水および空気の地盤への注入による地盤高さの経時変化

(3) 地下水位の計測結果

不飽和化実験における地下水位への影響を確認するため、地下水位の経時変化を測定した。測定結果を図-2.3.16 に示す。図-2.3.16 によると、MB 水を直接井戸内に注入した場合を除き、注入実験による地下水位への影響は小さい。むしろ、降水量が多い場合 (20mm 程度以上)、地下水位が降水に連動して変化しているように見える。

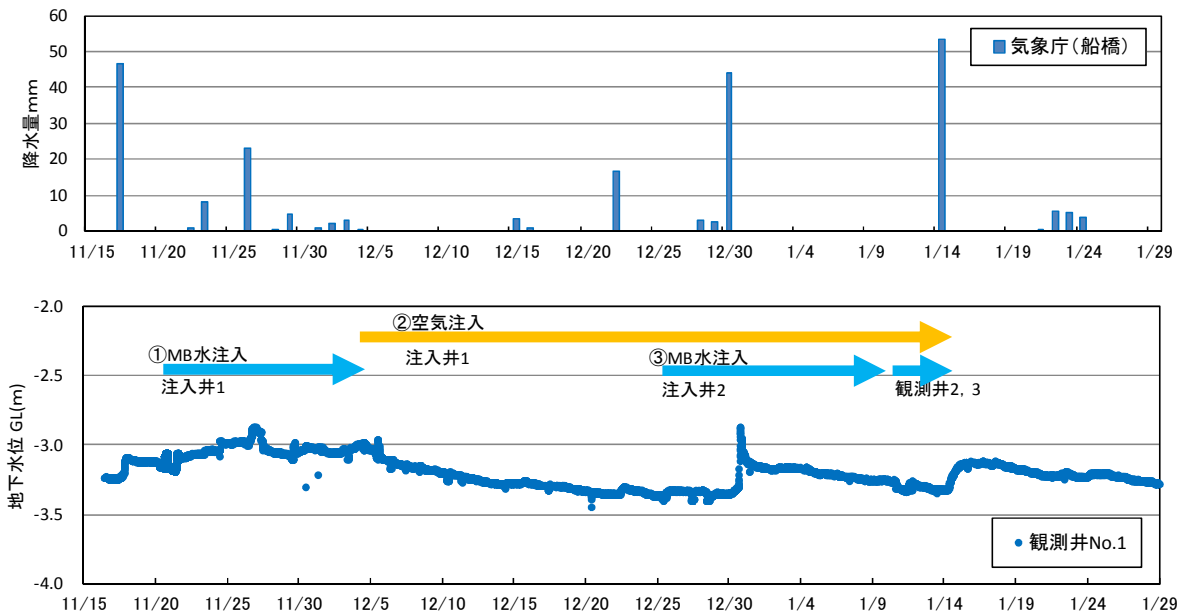


図-2.3.16 地下水位計の測定結果 (例)

2.4 原位置飽和度と液状化強度の測定結果

不飽和化後の原位置地盤の飽和度と液状化強度を確認するため、凍結サンプリングによる不攪乱試料採取を行った。以下に、凍結サンプリング結果と飽和度測定結果、および液状化試験結果を示す。

2.4.1 凍結サンプリング結果

不攪乱試料の採取は、図-2.4.1 に示す凍結位置において地盤凍結サンプリングを実施した。凍結管を中心とした半径 0.5m の範囲を凍結し、4 箇所 (FS-1~4) で不攪乱試料の採取で行った。凍結管の位置は、注水井 1 と観測井 3 を結んだ直線上の注水井 1 から水平距離 3.0m の位置とした。凍結サンプリングの手順を図-2.4.2 に示す。

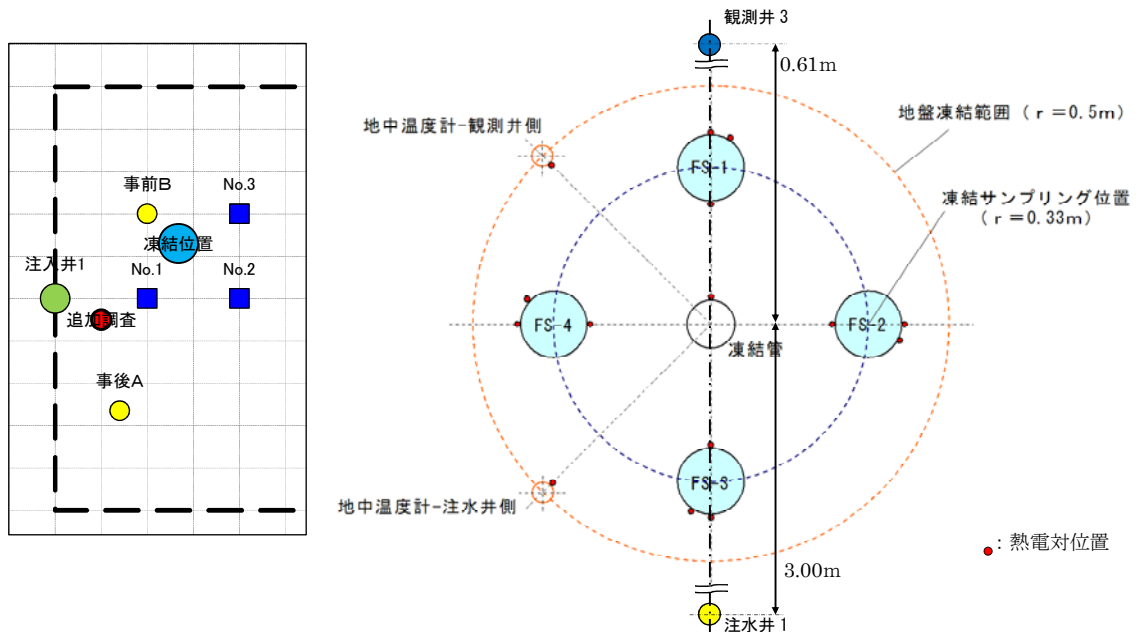


図-2.4.1 凍結サンプリング位置

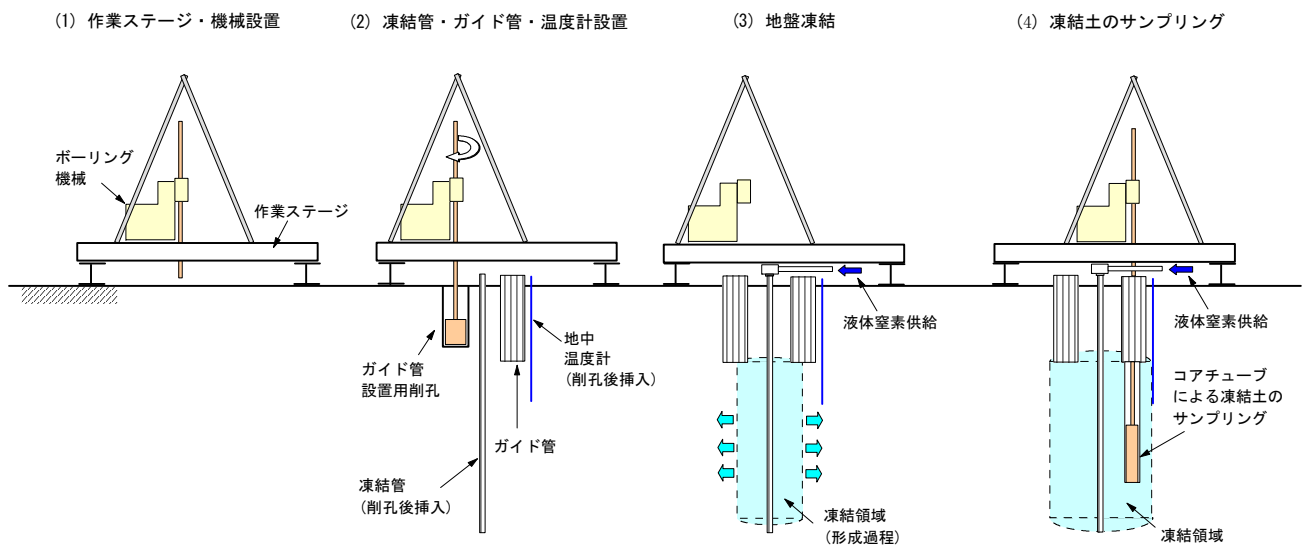


図-2.4.2 凍結サンプリング手順図

凍結サンプリングした試料を図-2.4.3にまとめた。このうち、飽和度測定は、FS-2地点の①～⑩試料と、FS-1～4地点の液状化強度試験用の試料で測定した。また、液状化試験は、N値=9の上部試料（GL-4.0～4.3m）と、N値=9～20（平均15）の下部試料（GL5.7～6.2m）で実施した。

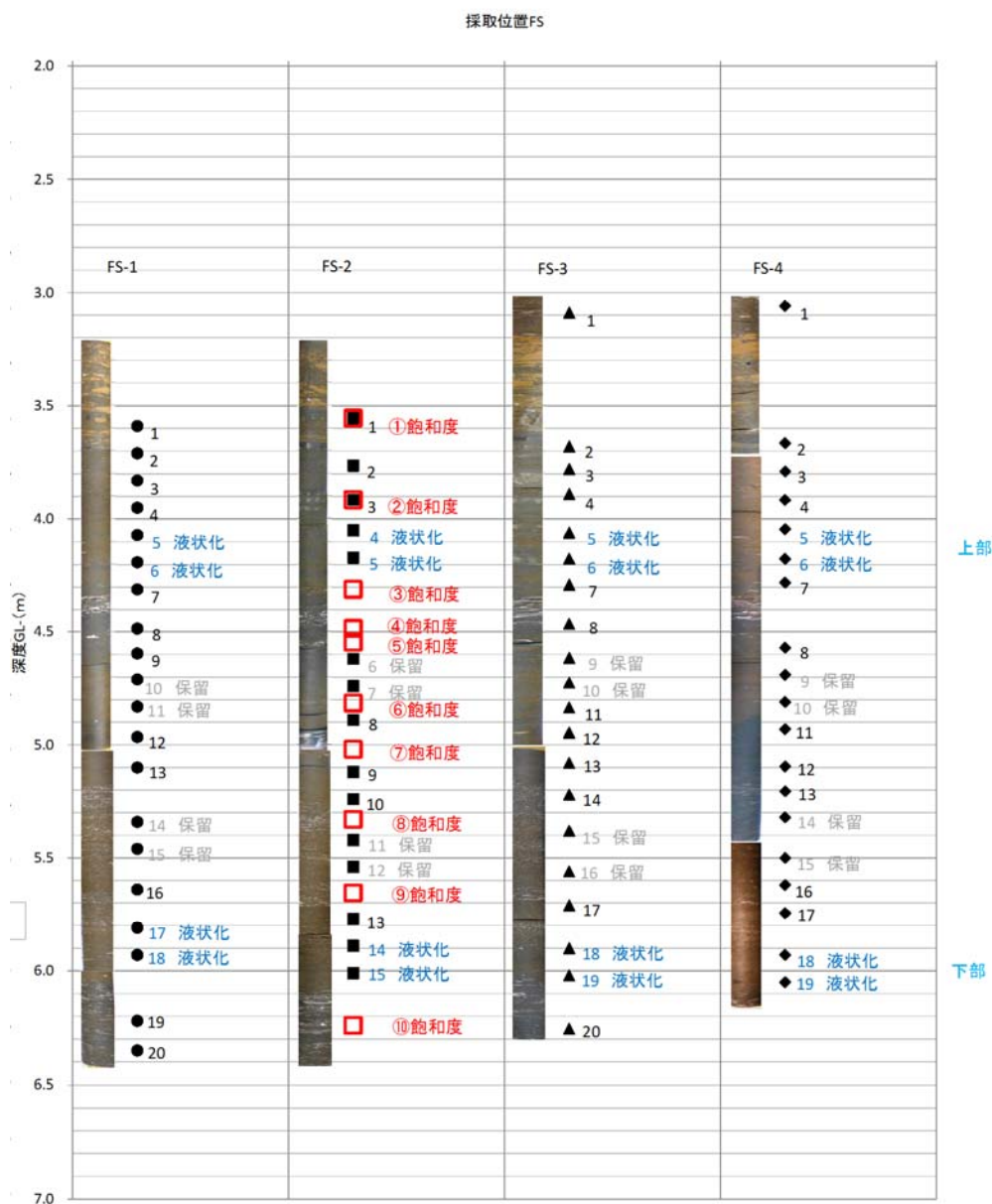


図-2.4.3 採取試料一覧と試験試料深さ

2.4.2 飽和度測定結果

原位置の飽和度は、採取した凍結試料で実測し、電気比抵抗変化率から換算した飽和度と比較した。

(1) 不攪乱試料による飽和度測定結果

採取した凍結試料の飽和度 S_r の実測は、下式の関係を用いた。ここで、凍結試料の湿潤密度は凍結状態で測定しているため、氷の密度を 0.917g/cm^3 として測定結果を下記のように補正した。

原位置の飽和度測定結果を図-2.4.4 に示す。これによると、上部の深度 4m 付近で 80~85% 程度の飽和度を示すが、それ以外の深度は概ね 90~95% の飽和度を示す。

$$S_{r0} = W_0 \cdot \rho_s / e_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$W_0 = W_F / 0.917 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_{t0} = \rho_{d0} \times (1 + W_0 / 100) \quad \dots\dots\dots (3)$$

- W_0 : 氷の密度を補正した含水比 (%)
- W_F : 氷の状態 で測定した含水比 (%)
- ρ_{t0} : 氷の密度を補正した湿潤密度 (g/cm^3)
- S_{r0} : 氷の密度を補正した飽和度 (%)
- ρ_s : 土粒子の密度 (g/cm^3)、凍結の状態によらず一定
- ρ_{d0} : 乾燥密度 (g/cm^3)、凍結の状態によらず一定
- e_0 : 間隙比、凍結の状態によらず一定

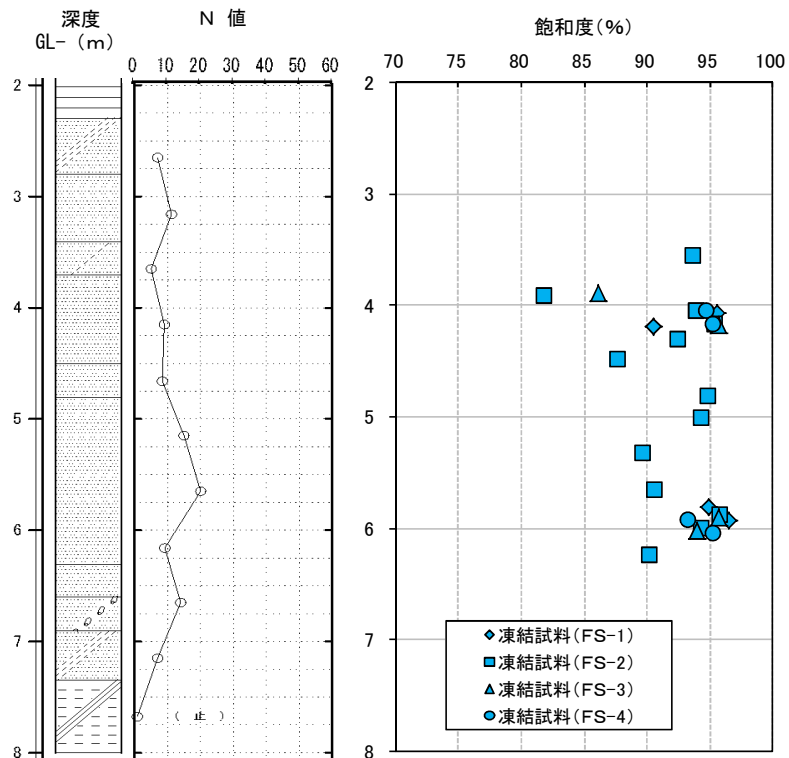


図-2.4.4 不攪乱試料による飽和度測定結果

(2) 比抵抗からの飽和度換算

比抵抗から飽和度へ換算は、アーチーの式 (4) 18)により、不飽和前後で間隙率、水の比抵抗に変化が無いと仮定した場合、不飽和化後の飽和度 S_{r2} は ρ_1 と ρ_2 を用いて (5) 式のように表される。

$$\rho = a\phi^{-m}S_r^{-n}\rho_w \quad \dots\dots (4)$$

a : 比例定数、 ϕ : 間隙率、 S_r : 飽和度、 ρ_w : 水の比抵抗
 a 、 m 、 n : 地盤に固有な係数
 砂の場合 $n=2$ が用いられる

$$S_{r2} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad \dots\dots (5)$$

時間 t_1 、 t_2 において、飽和状態が S_{r1} から S_{r2} に変化する場合、砂の比抵抗は ρ_1 から ρ_2 に変化する

今回 MB 水注入では、地下水の比抵抗と異なる水道水を使用しているため、注入前後の井戸内水の比抵抗変化を確認している (前述 2.3.3 (1) 参照)。MB 水注入前後で、注入井戸では変化が大きいものの、未注入井戸では変化は比較的小さかった。そこで参考までに比抵抗変化の少ない井戸間 (1→4 間) の比抵抗測定値を用いて、(B) 式による飽和度換算を行った。換算は、飽和状態 (11/21) に測定した比抵抗 ρ_1 と凍結採取時 (1/14) に測定した比抵抗 ρ_2 の変化の割合とした。比抵抗からの飽和度換算例を図-2.4.5 に示す。これによると、換算値は凍結試料と同等の値が得られており、水の比抵抗変化が少ない場合は飽和度への換算の可能性を示している。ただし、今回測定 of 比抵抗値には、注入井戸からの浸透水の影響も含まれるため、飽和度換算には、今後、補正方法の検討など、その精度を確認する必要がある。

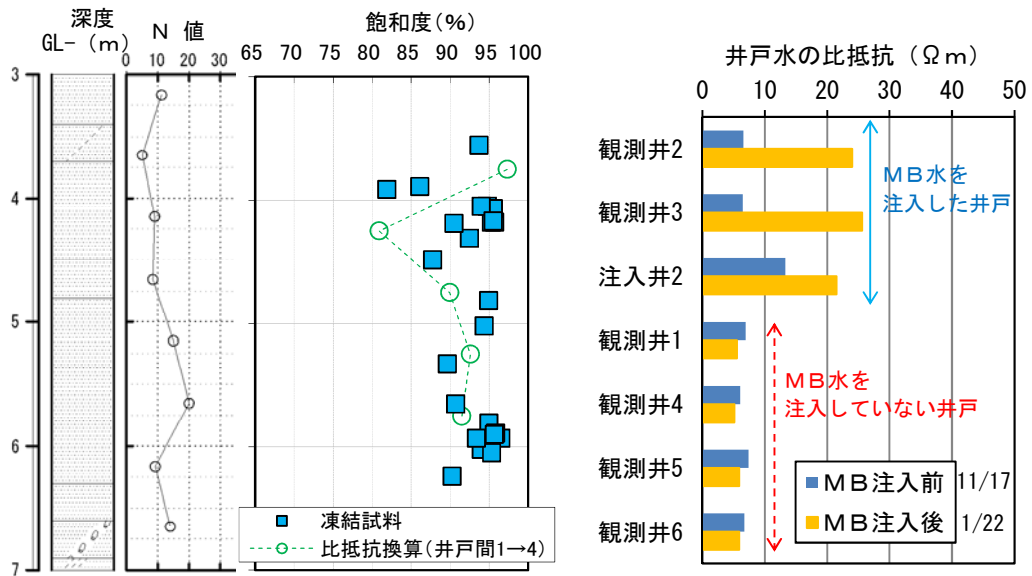
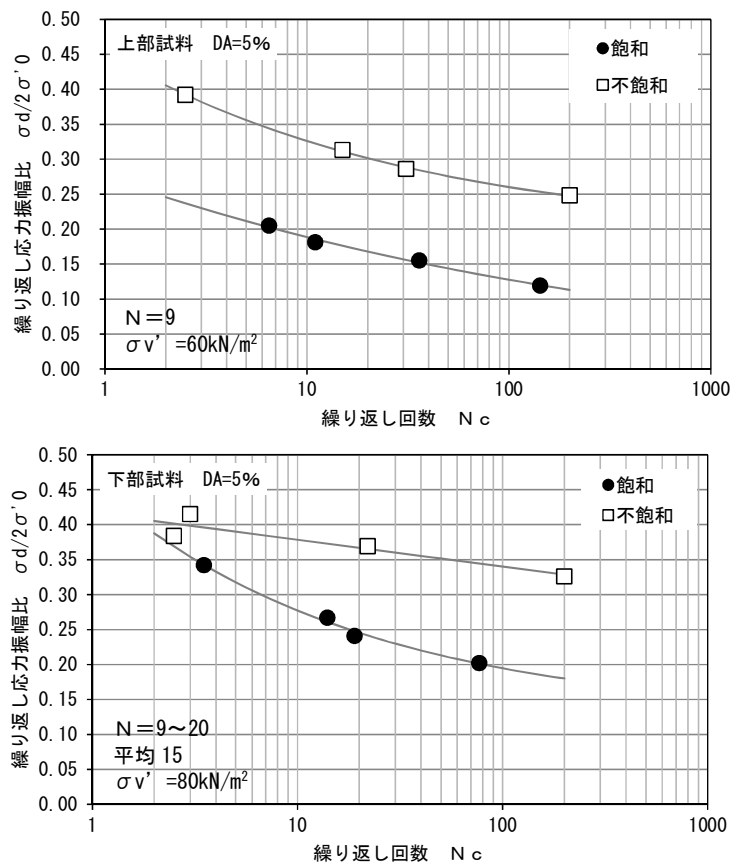


図-2.4.5 電気比抵抗からの飽和度換算例

2.4.3 液状化強度の評価結果

液状化試験は、上部試料（N 値がほぼ 9 前後の深さ 4.2m の試料）および下部試料（N 値がほぼ 15 前後で深さ 6.0m の試料）を用いて行った。採取された試料の飽和度は、前述図-2.4.4 に示すように概ね 90~95%の幅があるため、不飽和試料の液状化試験は、飽和度を 90%に揃えて実験を行った。また、飽和試料（B 値を 0.95 以上）でも液状化試験を行い、不飽和化の効果の比較を行った。

図-2.4.6 に飽和試料と不飽和試料の液状化強度試験結果を示す。飽和度が 10%低下することにより、繰り返し回数が 15 回での液状化強度は N 値が 9 の上部試料で 1.8 倍程度、N 値が約 15 の下部試料で約 1.4 倍の強度増加を確認できた。この結果は、既往⁹⁾の再調整試料および同様な原位置から採取した不攪乱試料の試験結果（2~2.2 倍）より小さめの値となっているが、地盤不飽和化による液状化強度の増加を確認できた。



| | 上部試料 | | 下部試料 | |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 飽和 | 不飽和 | 飽和 | 不飽和 |
| N_c | $\sigma_d/2\sigma'_0$ | $\sigma_d/2\sigma'_0$ | $\sigma_d/2\sigma'_0$ | $\sigma_d/2\sigma'_0$ |
| 15 | 0.176 | 0.311 | 0.258 | 0.372 |
| 20 | 0.168 | 0.301 | 0.245 | 0.367 |
| 不飽和/飽和(15) | 1.8 | | 1.4 | |
| 不飽和/飽和(20) | 1.8 | | 1.5 | |

図-2.4.6 液状化試験結果

図-2.4.7はN値と粒度特性を用いて建築基礎構造設計指針の液状化強度簡易判定法で推定した液状化強度と不攪乱試料で求めた液状化強度を比較したものである。Ko=0.5と仮定すると、飽和試料の15回の繰り返しせん断での液状化強度は、建築基礎構造設計指針の液状化強度（N値、有効上載圧および試料の細粒分含有率により推定）とほぼ同等である。これは、当該実験敷地が3/11の地震で液状化し、地盤沈下した観察事実とほぼ整合している。Ko=1.0と仮定した場合は、不攪乱試料の液状化強度は推定値よりも大きな値を与えている。

また、不飽和化による液状化強度の増加は、Na値相当で考えると、上部の緩い地盤で $\Delta Na=12$ 、下部の密な地盤で $\Delta Na=5$ 程度であり、緩い地盤で強度増加が顕著のようである。

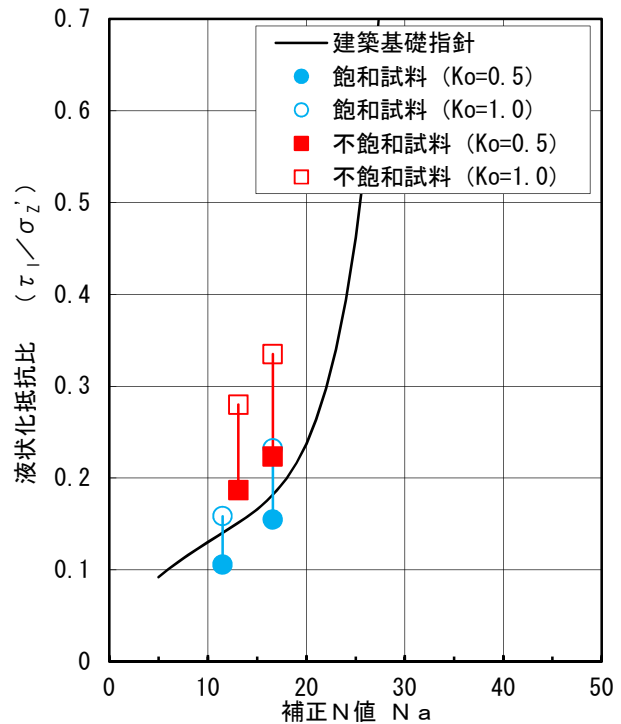


図-2.4.7 液状化試験結果

地盤不飽和化により対象地盤のP波速度は飽和状態の1500m/s～1600m/sから約1000m/sに低下した。既往研究⁹⁾で得られた液状化強度比（不飽和試料の液状化強度／飽和試料の液状化強度）とP波速度の関係に本研究結果を追加記入して示したのが図-2.4.8である。概ね、既往の結果と対応している。ばらつきはあるが、地盤の飽和度を推定する方法として、飽和度が90%程度の範囲ではP波速度にも有用性があるといえる。

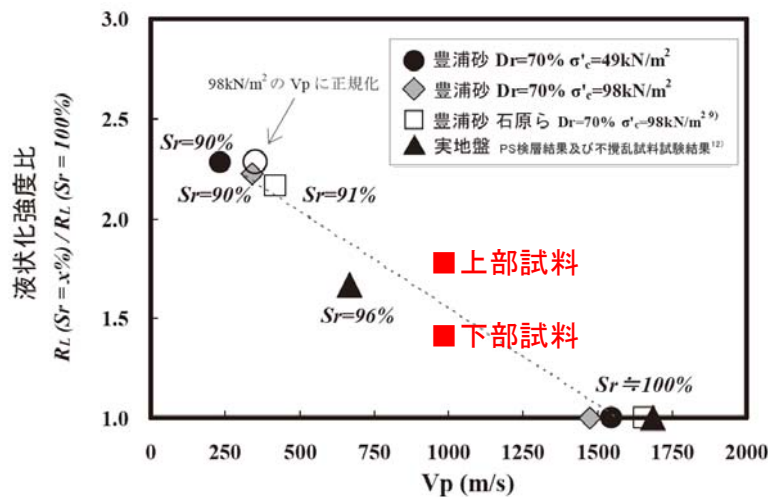


図-2.4.8 P波と液状化強度比の関係⁹⁾

3. 研究開発の成果

3.1 研究結果のまとめ

(1) 動的遠心載荷実験による不飽和化工法の液状化被害低減効果の確認

動的遠心載荷装置を用いて、実大規模の不飽和地盤の液状化被害低減効果を評価した。実験により得られた成果は以下の通りである。

①マイクロバブル水の注入により、飽和度を10%低下させた模型砂地盤は、飽和地盤に比べて、過剰間隙水圧の上昇速度がかなり小さくなり、かつ、最終的な上昇量も大幅に低下させることができた。その結果、不飽和地盤は液状化しなかった。

②不飽和地盤でも、過剰間隙水圧の上昇により、地盤の沈下はみられた。しかし、地盤の沈下量は飽和地盤の1/2から1/3に低下した。

上記の実験結果より、地盤不飽和化工法は液状化による被害の低減に有効であることが実地盤応力のもとでの振動実験結果で示された。

(2) 不飽和砂地盤の液状化強度の評価

原位置の不飽和化後地盤から凍結サンプリング法で採取した不攪乱試料を用いて、液状化実験を行った。得られた成果は以下の通りである。

①飽和度が10%低下した試料は飽和試料に比べて、15回の繰り返しせん断での液状化強度は1.4~1.8倍程度の強度増加を確認できた。この結果は、既往⁹⁾の再調整試料および同様な原位置から採取した不攪乱試料の試験結果と概ね対応している。

②P波速度の低下に伴う、液状化強度の増加を確認した。この結果は、ばらつきはあるものの、既往⁹⁾の再調整試料および同様な原位置から採取した不攪乱試料の試験結果と概ね対応している。よって、P波速度は液状化強度を評価する方法として有用であると考えられる。

(3) 不飽和化システムの確立

原位置の地盤調査と井戸設置および不飽和化実験により、不飽和化システムとして必要な項目を整理した。得られた知見は以下の通りである。

①不飽和化を行う対象層を決定するためには、地盤調査や情報収集を行い、地盤特性を正確に把握する必要がある。

②効率的に地盤不飽和化するには、井戸の材質や性能を適切に設定する必要がある。

③MB水および空気のどちらの注入方法でも、地盤を不飽和化できる可能性を確認した。なお、今回の実験では、MB水は深い層でより注入効果が表れやすく、空気注入では浅い層でより注入効果を表れやすい傾向があった。これは地盤条件や改良条件などにより適切な注入方法を選択する必要があることを示すものである。

④MB水の注入の場合、注入に伴い注入量が徐々に低下し、注入を継続すると注入可能エネルギーが少なくなる。地盤中の土粒子間にトラップされた気泡が、地盤の透水性を低下させている。

(4) 不飽和領域の評価法の確立

P波速度の変化測定と、井戸内の気泡確認、および地盤の電気抵抗を測定することで地盤の飽和度の変化を測定した。また、凍結サンプリング試料により直接地盤の飽和度を測定し、比較を行った。得られた知見は以下の通りである。

①P波速度の変化により、飽和度が低下している可能性を確認した。なお、今回は部分的な測定のため、不飽和領域を把握するためには、測定精度を含めた測定方法の検討が必要である。

②測井への気泡到達状況を井戸内カメラで直接目視することができた。なお、今回確認した気泡は、比較的浅い深度に限定されており、かつ一部の井戸では未確認であっ

た。気泡到達の確認のより不飽和領域の概要を把握できるが、飽和度を定量的に評価することは困難である。

③不飽和実験に伴い地盤の電気抵抗を三次元的な経時変化を計測することで、注入範囲や飽和度を概ね把握することができた。ただし、注入水の比抵抗などが影響する可能性があり、測定精度を上げるには、これらの影響を補正する方法の検討が必要である。

④凍結サンプリング試料を用いて、原地盤の飽和度を測定することができた。今後はより経済的な飽和度測定法の検討が必要である。

3.2 研究課題に対する成果

研究課題に対する成果（得られた知見）を表-3.2.1 にまとめた。

表-3.2.1 研究成果のまとめ

| 開発目標 | 課題 | 研究課題 | 具体的実験内容 | 研究成果（得られた知見） |
|------|----|--------------------|-----------------------|--|
| 設計法 | ① | 実大規模での液状化被害低減効果の確認 | 動的遠心载荷実験 | 地盤不飽和化工法は液状化による被害の低減に有効であることを、動的遠心载荷実験により示した。 |
| | ② | 不飽和砂地盤の液状化強度の評価 | 凍結サンプリング試料を用いた液状化強度試験 | 10%の飽和度低下により、液状化強度が1.4～1.8倍に増加したことは、本工法が液状化による被害の低減に有効であることを改めて、実地盤試料で示した。 |
| 施工法 | ③ | 不飽和化システムの確立 | 地盤調査、井戸設置と気泡注入実験 | 地盤の不飽和化には、井戸内へのマイクロバブル注入や空気注入による気泡注入が有効であることを示した。 |
| | ④ | 不飽和領域の評価法の確立 | モニタリングと原位置飽和度実測 | 地盤の電気抵抗の変化測定は、不飽和領域のモニタリングに有効であり、凍結サンプリングは原位置の飽和度実測に有効であることを示した。 |

3.3 今後の課題

砂地盤不飽和化による液状化対策工法の実用化に向けて、今後の課題を以下にまとめた。

(1) 設計法

- ・地盤特性に応じた、適切な注入井戸間隔および深さの設定法の開発
- ・本工法の適応地盤条件の検討

(2) 施工法

- ・地盤条件と改良条件に応じた適切な注入方法と注入量の検討
- ・地盤の飽和度の測定精度の向上
- ・不飽和性能の維持のための追加注入の時期の設定方法の検討

—以 上—

【引用出典】

- 1) 畑中宗憲,増田剛美 (2009) : 砂質土の P 波速度と液状化強度に及ぼす飽和度の影響, 日本建築学会構造系論文集,第 645 号,pp.2029-2037.
- 2) 曾我恭匡,岡村未対,矢田部龍一 (2005) : 不飽和土の液状化強度に及ぼす空気圧縮性の影響,, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.511-512.
- 3) 黄永男, 土谷尚, 石原研而 (1999) : P 波速度を用いた不飽和砂の液状化抵抗の評価, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, pp.431-434.
- 4) Tokimatsu, K. and Seed, H.B(1987): Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking, Journal of ASCE, Vol.113, GT8, pp.861-878.
- 5) Kenji Ishihara and Mitsutoshi Yoshimine(1992): Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.188.
- 6) 畑中宗憲, 内田明彦, 清水孝昭, 松木 卓, 菱沼洋光 (2010) : マイクロバブル水注入による砂地盤の不飽和化に関する模型砂地盤実験, 第 45 回地盤工学研究発表会, pp.1599-1600.
- 7) 畑中宗憲, 内田明彦, 清水孝昭, 松田裕樹, 池田達也 (2011) : マイクロバブル水注入による砂地盤の不飽和化に及ぼす透水特性の影響に関する基礎的研究, 日本建築学会年次学術講演梗概集, B-1, 構造 1 ,pp.501-502
- 8) Uchida Akihiko, Shimizu Takaaki, Omoto Satoshi and Hatanaka Munenori (2011): Model and field tests on unsaturation of sandy ground by injecting micro bubble(MB)water, The 3rd International Conference on Geotechnical Engineering and Disaster mitigation and Rehabilitation,
- 9) 畑中宗憲,増田剛美 (2010):砂地盤の飽和度と P 波速度及び液状化強度との関係についての一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 650 号, pp.817-823.
- 10) Munenori Hatanaka et al(2008): A study on the engineering properties of sand improved by sand compaction pile method, Soils and Foundations, Vol.48, No.1, pp.73-85.
- 11) 独立行政法人土木研究所 <http://www.pwri.go.jp/>
- 12) 国土交通省関東地方整備局, 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態調査結果, 2011 .
- 13) 株式会社ニクニ, <http://www.nikuni.co.jp/index.html>
- 14) レッキス工業株式会社, <http://www.rexind.co.jp/ip/>
- 15) 日置電機株式会社, <http://www.hioki.co.jp/>
- 16) ジオテクサービス株式会社, <http://www.geots.co.jp/>
- 17) 小峯・西・後藤, 比抵抗トモグラフィーを利用した薬液注入の改良範囲評価方法, 土木学会論文集 No.493III-27, pp.137-146, 1994.6
- 18) Archie, G.E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, 146, 54-62, 1942.

8. 研究成果の刊行に関する一覧表

| 刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名） | 刊行年月日 | 刊行書店名 | 執筆者氏名 |
|--|-------|---------------------|--|
| 基礎地盤不飽和化の実証的研究 その1 原位置実験 (投稿中) | 2013 | 日本建築学会年次 学術講演梗概集 | 安浩輝、吉田正 乾一幸 松田裕樹、畑中宗憲 鶴田壮広、内田明彦 |
| 基礎地盤不飽和化の実証的研究 その2 液状化強度特性 (投稿中) | 2013 | 日本建築学会年次 学術講演梗概集 | 畑中宗憲、松田裕樹 村田健司、安浩輝 |