

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560182

研究課題名(和文) 地下水位を低下・回復させるだけで地盤を不飽和化する液状化抑止工法の実現

研究課題名(英文) A Feasibility Study of Dewatering and Recovering as a Liquefaction Countermeasure for Existing Residential Areas

研究代表者

中井 正一 (Nakai, Shoichi)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90292664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震では、既存宅地において広範囲に液状化被害が発生した。本研究では、地下水位を一旦低下させた後に回復するという単純な方法により地盤を不飽和化させ、液状化抑止効果を得る方法の定量的評価を目的とし、遠心模型実験および現場観測を行った。まず、遠心模型実験により、地下水位低下回復によって飽和度が低下するとともに液状化抵抗が増大することを確認した。しかしながら、当初目標としたP波速度による飽和度の測定は必ずしもうまく行かないことが分かった。また、千葉市が実施した現場での地下水位低下実験敷地での計測によれば、原位置においても地下水位低下回復後に砂層の飽和度が回復しないことが確認できた。

研究成果の概要(英文)：The 2011 Tohoku Earthquake caused extensive liquefaction damage over a wide area. A combined process of lowering and subsequent restoring the groundwater level can be used as a countermeasure against liquefaction, since this process is believed to create an unsaturated soil layer. The authors have conducted centrifuge shaking table tests in order to examine this idea by building a special test apparatus for this purpose. From the tests, it was found that the lowering and recovering process actually creates a layer of unsaturated soil and the thickness of liquefied soil is greatly decreased because of this process. In addition to the laboratory tests, the authors have also conducted various in-situ soil investigations including measurement of degree of saturation during a field demonstration experiment of dewatering. According to the results, it was confirmed that the lowering and recovering process of groundwater can create a layer of unsaturated soil also in an actual ground.

研究分野：地震工学・地盤工学

キーワード：液状化 不飽和化 既存宅地

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震により、東京湾岸の埋立地では広範囲に液状化が発生し、戸建て住宅等に甚大な被害をもたらした。

液状化は、「緩い飽和砂」、すなわち、(a)ゆる詰め、(b)砂で、(c)土粒子のすき間が水で飽和している(地下水位以下)ような地盤に、(d)強い地震動が作用することによって発生する。従って、これらの条件のうちの一つを外すことが液状化対策となる。多数存在する対策工法の中で、既存宅地に適用可能な代表的工法は「地下水位低下工法」、すなわち条件(c)を外すことである。しかしながら、この工法では汲み上げる地下水を制限するため、周囲および液状化層下部を止水する。地中深くを人工的に止水することはできないため、透水性の低い粘土層を利用するのが一般的である。逆に、地中の適当な深さに粘土層が無い場合、この工法の適用は難しい。

千葉市では、東北地方太平洋沖地震時の美浜区における液状化被害を踏まえ、将来の地震に備えた既存宅地の液状化対策を計画し、準備を進めている<sup>1)</sup>。最初のモデル地区には「適当な深度に適当な層厚のシルト層」が存在するため、この層による止水が可能である。しかしながら、他の地区では必ずしもこのような粘性土層が存在しない場合も多い。

千葉市美浜区のように、地層構成が複雑で、上記のような条件を満たすことができない場合でも地下水位低下工法を使いたい、と言うのが発想の発端である。

### 2. 研究の目的

液状化抑止のための地下水位低下工法は、方法が単純であり、メカニズムも明快であるため、既存施設・既存宅地に最も適した方法であるが、副作用として地盤沈下を生じる。これに対して、液状化層に何らかの方法で空気を送り込むことによって飽和度を下げ、液状化を抑止するという不飽和化工法が提案されている<sup>2)</sup>。この方法は、地下水位低下工法の欠点を補う方法として注目されている工法であるが、不飽和の範囲・程度や液状化抑止効果の評価法が確立されておらず、一般化するには至っていない。

本研究では、地下水位低下と不飽和化の双方を組み合わせることを考える。当研究グループのこれまでの模型実験での経験では、完全飽和地盤の作成には多大な労力を要することから、逆に、単に地盤に通水するだけであれば地盤は不飽和状態にとどまるとの仮説に立ち、「地下水位を一旦低下させた後、自然に回復するに任せる」ことによって砂地盤を不飽和化し液状化を抑制する方法(図1参照)の実現可能性を、模型実験および現場での観測により探らうとするものである。

また、実地盤におけるPS検層(弾性波速度の計測)では、地下水位以深のP波速度は土質によらず1,500~1,600m/s程度となるのに対

し、地下水位より上の不飽和土では400m/s~800m/s程度の値を示すという観測事実がある。このことから、不飽和度の定量的評価の指標としてP波速度を取り上げ、この値の変化によって飽和度を推定することが可能であるかどうかについても検討を行う。

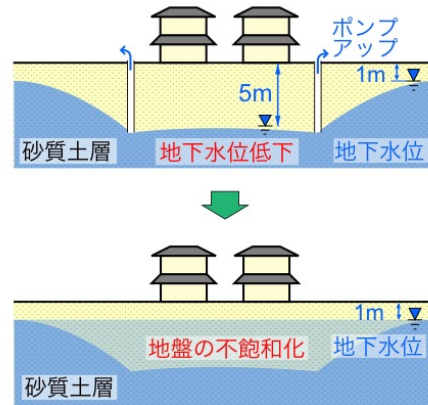


図1 提案工法(地下水位低下回復工法)

### 3. 研究の方法

地下水位低下・回復過程を利用した不飽和化による液状化抑止工法の実現可能性を検討するに当たり、以下を実施する。

- [A] 遠心模型実験による不飽和化の評価
- [B] 現場実験による不飽和化の評価

模型実験にあたり、P波速度 $V_p$ を計測するためのセンサー(以下、ベンダーエレメント)を開発する。現場においては、表面波探査手法の適用を試みる。

なお、[A]では、水位低下・回復後に地震動入力による震動実験を行い、液状化抑止効果を確認する。また、[B]は、千葉市が進めている地下水位低下による液状化対策実証実験に参画する形で実施する。

### 4. 研究成果

#### (1) 遠心模型実験

##### ① はじめに

遠心載荷装置を用い、模型地盤の地下水位を一時的に低下・保持・回復することにより、水位の変動履歴を受けた地盤が不飽和化され、結果として当該地盤の液状化抵抗が増大することを確認する。さらに、変動履歴を受けた地盤の飽和度とP波速度の関係を調べる。

##### ② 実験条件

図2に、試験装置の概要を示す。模型地盤は、幅740mm×奥行き480mmのせん断土槽を長手方向に分割し、一方の水位を変動させた。諸量を計測するためのセンサーとして、両サイドに水圧計(P2,4,6,9)、加速度計(A0,4)、レーザー変位計(L0)を、水位変動側に飽和度計測用の誘電率計(E2,4,6)、P波速度計測用のベンダーエレメント(B2,4)を設置した。なお、P2など記号数字は1g換算の設置深度

を示している。また、Uは水位変動側、Sは水位固定側を示している。

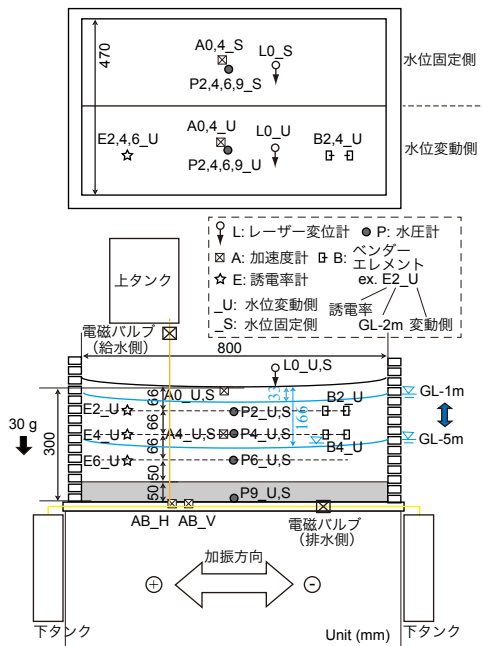


図2 遠心模型実験の試験装置

図3に液状化層として用いた8号珪砂とカオリン粘土の混合砂の粒度分布を示す。混合砂は8号珪砂にカオリン粘土を乾燥重量比で5%添加し、ホバートミキサーにより十分に混合して作成した。 $D_r=50\%$ の8号珪砂の間隙にカオリン粘土が入った状態を模擬するため、混合砂の乾燥密度は8号珪砂の乾燥密度 $\gamma_d=1.326\text{g/cm}^3$ より5%多い $\gamma_d=1.392\text{g/cm}^3$ とした。変水位透水試験による混合砂の透水係数は $3.3 \times 10^{-6}\text{m/s}$ であり、8号珪砂と比べて約1/10であった。

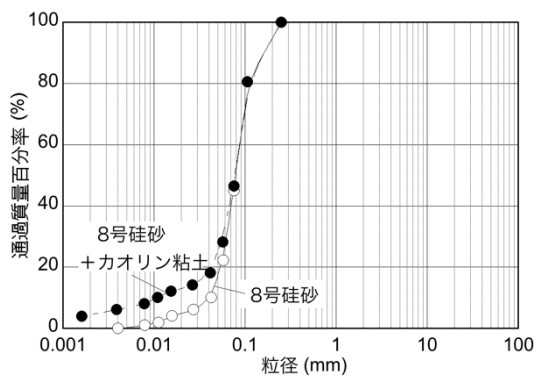


図3 模型地盤の粒度分布

模型地盤の高さは30cmとした。まず、透水層として3号珪砂を土槽底面から5cmの高さで敷き固めた。次に混合砂をステンレス製の容器で密度調整しながら厚さ2.5cmずつ10層にわたって撒き、厚さ25cmの地盤を作成した。その後、真空槽の中にせん断土槽を入れ、脱気した水道水を2日間かけて土槽底面から

ゆっくり通水して飽和させた。間隙水として水道水を用いた理由は、粘性の高いシリコンオイルを用いた場合の不飽和帯の水分特性への影響を懸念したためである。

試験は30gの遠心場で排水側の電磁バルブを開き、間隙水を遠心力で下タンクに落とすことで、水位を地表面から33mmから166mmまで(1g換算で約GL-1mからGL-5mまで)低下させた。その後、バルブを閉じて水位低下を継続させ、一定時間経過後に上タンクにつながる給水側の電磁バルブを開いてもとの水位まで回復させた。回復から一定時間後に加振を行った。

表1に実験ケースを示す。

表1 実験ケース

実験ケース	使用する砂	水位低下の持続時間	水位回復後の経過時間	加振力 (cm/s <sup>2</sup> )
S-1	8号珪砂	直後に回復	直後に載荷	150
S-2	8号珪砂	1日	1週間	150
S-2L	8号珪砂	1日	1週間	200
K-2	8号珪砂 +カオリン 5%	1日	1週間	150
K-3	8号珪砂 +カオリン 5%	4日	4日	150

### ③ 実験結果：水圧および地盤沈下量

ここではCase K-3の実験結果を示す。なお数値は全て実大換算した値である。また、地下水位の変動履歴を与えた地盤を「対策地盤」、地下水位を一定に保った地盤を「無体策地盤」と称する。

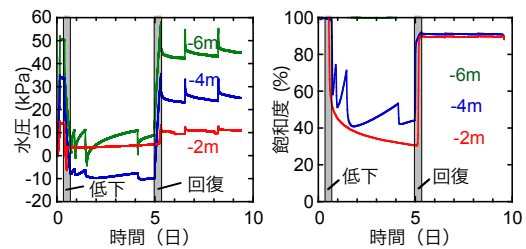


図4 地下水位低下・保持・回復過程における水圧と飽和度の変化 (Case K-3)

図4に対策地盤での水位低下・回復時の水圧と飽和度の変化を示す。GL-2m,4mでは水位の低下とともに飽和度が低下し、水位回復後も90%前後になり不飽和化することができた。一度水位を低下させることで間隙水の一部が空気に置き換わり、水位回復後もその空気が残留することで飽和度を下げることができたと考えられる。また、地下水位を回復させてから4日以上経過しても飽和度の変化はなく、不飽和状態を長期間持続することが期待できる。地下水位は、GL-6mに設置した水圧計の値より判断し、GL-1mからGL-5mまで低下させたが、水位低下を止めた後も水圧が上昇していることが見受けられ、何度か水位を調整

した。これは、不飽和化したとはいえ完全に水がなくなった訳ではなく、不飽和化した層の中で、浅い層からより深い層に水が移動したことによるものと考えられる。

図 5 に加振時の加速度、過剰間隙水圧、過剰間隙水圧比を対策地盤、無対策地盤ごとに示す。無対策地盤では、初期有効応力が小さい浅い層から順に GL-2m,4m,6m と過剰間隙水圧比が 1 に近づき、液状化が発生している。一方、対策地盤では、GL-6m において液状化が発生したと見なせる。しかし GL-2m,4m では過剰間隙水圧比が上がりきっておらず液状化が発生していない。以上より不飽和化することができた GL-2m,4m において液状化対策の効果があるといえる。

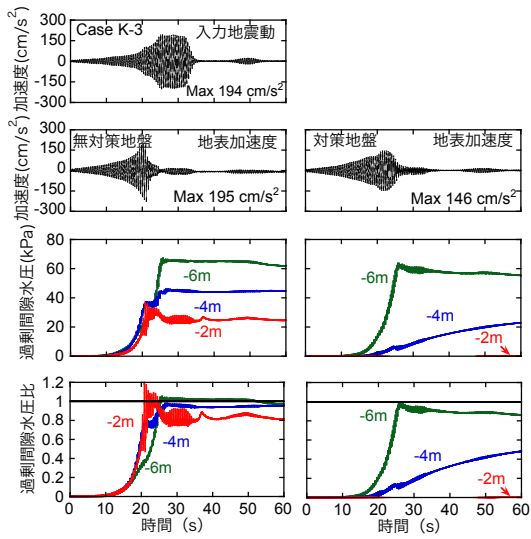


図 5 加振時の地表加速度および過剰間隙水圧の変化 (Case K-3)

図 6 に加振開始から 1500 秒までの加速度、過剰間隙水圧、過剰間隙水圧比、地盤沈下量の時刻歴を示す。対策地盤の液状化していない GL-2m,4m では、加振が終了してからもわずかに間隙水圧が上昇している。これは液状化した深い層からの間隙水の浸透によるものと考えられる。その後は深い層から時間の経過とともに間隙水が消散している。地盤沈下量を比較すると 1/3~1/4 程度に抑えることができています。

#### ⑤ 実験結果：P 波速度

一般に、小型模型地盤中の S 波速度  $V_s$  の計測には、バンダーエレメントと呼ばれるセンサーが使用される。2 枚の圧電素子を貼り合わせた板状の振動子に電圧を加えて S 波を発生させ、受信側の振動子により両振動子間の  $V_s$  を計測する。研究グループでは、すでに  $V_s$  に加えて  $V_p$  も計測できるセンサーを開発している。今回、これに改良を加え、遠心模型実験中に  $V_p$  および  $V_s$  の計測を行った (図 2 中の「バンダーエレメント」) GL-2m における P 波速度の変化を図 7 に示す

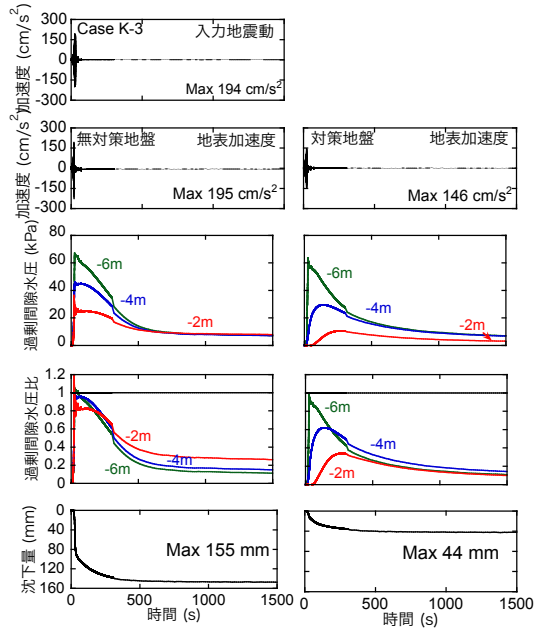


図 6 加振時および加振後の過剰間隙水圧・地盤沈下量の変化 (Case K-3)

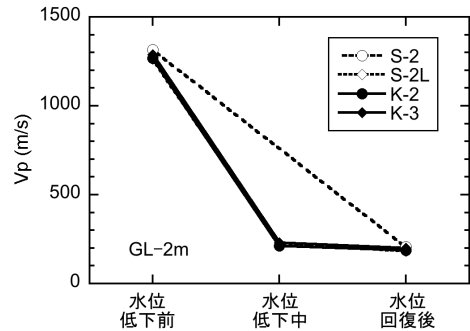


図 7 P 波速度の変化 (GL-2m 地点 ; GL-4m 地点もほぼ同様)

図 4 で見たように、地盤中の飽和度は、いずれのケースにおいても水位低下前は 100% であったものが水位の低下により 40% 程度に減少し、水位回復後には約 90% になっている。すなわち、水位の変動履歴を与えることにより、地下水位以深であっても飽和度は 100% に戻っていないことが分かる。一方、図 7 の P 波速度について見ると、水位低下前には 1200~1300m/s であったものが、水位の低下により 200m/s 程度に減少している。しかも、水位回復後もその値はほとんど変化しないことが分かる。水位低下中よりもさらに P 波速度が若干減少するのは、水位回復時に地盤の拘束圧がやや減少したことによるものと考えられる。

既往の研究<sup>3)</sup>によれば、P 波速度と飽和度の間には一定の関係が存在し、飽和度 100% では  $V_p=1500\text{m/s}$  程度であるが、飽和度の低下とともに  $V_p$  の値も急激に低下し、飽和度約 90% でほぼ一定値となることが分かっている。図 4 および図 7 に示す結果はこのような関係と調

和的であることが分かる。しかしながら、P波速度を計測することにより地盤の飽和・不飽和を判断することはできるものの、P波速度の値から飽和度を算出し、地盤の液化強度を求めることは困難であると言えよう。

## (2) 現場観測

千葉市では次なる地震に備え、街区一体型の地下水位低下工法の実証実験を行った。実験では、敷地の一部を鋼矢板で囲み、内部の地下水位をGL-1mからGL-3mへと低下させ、1年後にGL-1mへと戻している。研究グループではこの実証実験に参画し、現地における各種の計測を行った。図8に、地下水位低下実証実験の平面図と、筆者らが実施した試験・計測項目を示す。このうち、RIコーン試験は、表層地盤の密度と含水比から地盤中の飽和度を求めるためのものである。図8に示す試験のうちのいくつかについては、地下水位低下前、低下時および回復後に実施している。

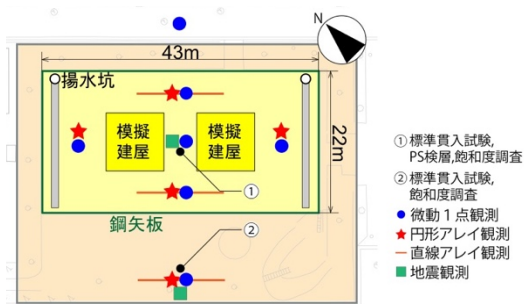


図8 千葉市による地下水位低下工法の実証実験地での現場観測

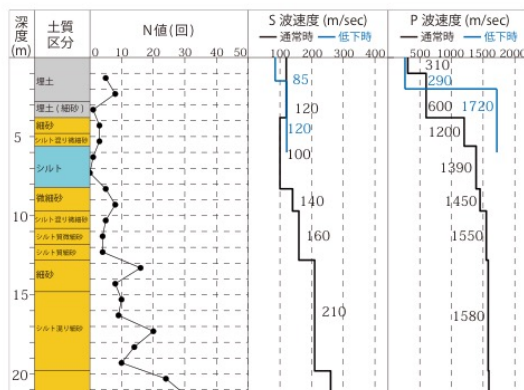


図9 実証実験現場での地盤調査結果

図9に、標準貫入試験およびPS検層結果を示す。図から分かるとおり、現地の地盤は地表から埋土、細砂、シルト、細砂と続く。このうち、地表からシルトまでが浚渫埋立による造成地盤、それ以深が自然堆積地盤である。図9には、地下水位低下前の $N$ 値・ $V_S$ ・ $V_P$ 、低下時の $V_S$ ・ $V_P$ が示されている。図から、水位低下にともなって $V_S$ ・ $V_P$ の値が地表付近で若干低下すること、それより以深では逆に増加していることが分かる。なお、水位回復後

に実施したPS検層によれば、 $V_S$ は低下時に比べてほとんど変化がなかったが、GL~GL-3m間の $V_P$ は520m/sへと上昇した。

図10に、地下水位低下時に実施した微動アレイ観測による位相速度分散曲線を示す。図中の「低下前」は、実際には図8の鋼矢板外での結果を表している。図から、短周期域における位相速度が水位低下にともなって上昇していることが分かる。これは、図9に示した、ある深さ以深での $V_S$ ・ $V_P$ の増加と対応するものと考えられる。地下水位の低下によって剛性( $V_S$ ・ $V_P$ )が増加するのは、地盤が砂質土であることから、水位低下にともなう有効応力の増大に起因するものと考えられる。

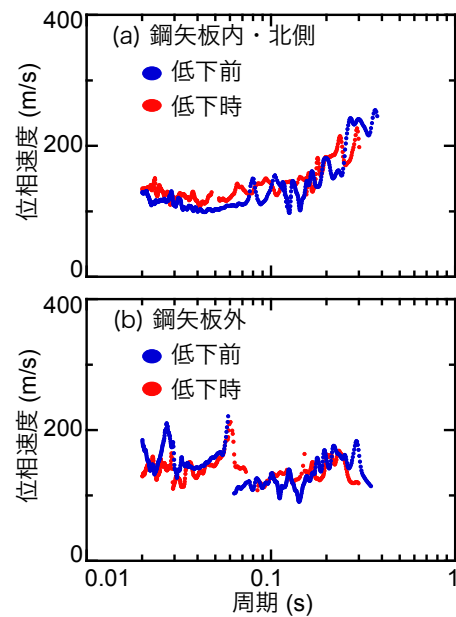


図10 微動アレイ観測による分散曲線

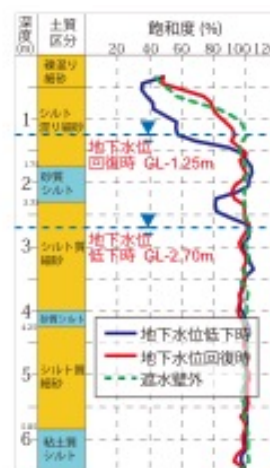


図11 RIコーン試験による飽和度の変化

図11に、RIコーン試験結果を示す。図から、水位低下時には、砂質土において飽和度の低下が顕著に認められる。また、標準貫入試験では把握できなかった薄い砂質シルト層

(GL-1.75~2.35m)が確認でき、その直上の砂層 (GL-1.5~1.75m) では、砂質シルト層による止水効果の影響と思われる滞水効果 (高い飽和度)も確認できる。水位回復時には、粘性土以深 (GL-2.35~2.7m) の砂質土は飽和状態にあると判断されるが、地下水位以深~粘性土以浅 (GL-1.25~1.75m) の砂質土は不飽和状態と推定される。すなわち、水位低下・回復過程を経た砂質地盤は、地下水位以深であっても飽和状態には戻らない可能性が高いと言える。このことは、水位回復後の  $V_p$  が比較的小さな値 (500~600m/s) を示すことと調和的である。

### (3) 研究成果のまとめ

本研究では、地下水位低下と不飽和化の双方を組み合わせ、地下水位を一旦低下させた後に自然に回復させることによって、砂地盤を不飽和化し液状化を抑制する方法の実現可能性を、模型実験および現場観測により検証した。

以下に得られた知見を列挙する。

- ① 一時的に水位を低下させた後に回復させると、地盤の間隙中に空気が閉じ込められ不飽和状態となることが分かった。本実験では、誘電率計により測定された飽和度は約 90%であった。この飽和度 (不飽和度) は水位回復後も保持されることが分かった。
- ② 水位変動により飽和度を低下させた模型地盤は最大入力加速度  $\alpha_{max} = 200\text{Gal}$  の地震波に対して液状化しなかった。このことから、本工法は少なくともこのレベルの地震動に対して液状化抑止効果があると言える。
- ③ 地下水位低下実証実験にともなう現場での観測により、地下水位の変動履歴 (低下、保持、回復) による砂質地盤の飽和度と P 波速度の関係を検証した。その結果、P 波速度の変化により地盤の飽和・不飽和を判断できることを確認した。また、地下水位低下にともなって地盤剛性が増加することも確認することができた。

#### <引用文献>

- 1) <https://www.city.chiba.jp/toshi/toshi/shigaichi/ekijoukaiinnkai.html> (2016年5月18日アクセス)
- 2) 三宅、社本、後藤：不飽和化による液状化対策-その1 対策の考え方と不攪乱試料での検証-、第38回地盤工学研究発表会、pp.1975-1976、2003
- 3) 畑中、増田：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74巻、第645号、pp.2029-2037、2009

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Shoichi Nakai, Toru Sekiguchi, Akira Ishikawa and Hideyuki Mano: A Feasibility Study of Dewatering and Recovering as a Liquefaction Countermeasure for Existing Residential Areas, Proc. 10th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Sydney, Australia, Nov. 6-8, 2015, Paper No. 30 (8 pp.) (査読有)
- ② S. Nakai, T. Sekiguchi and H. Mano: A Study on Dewatering Effect as a Liquefaction Countermeasure for Existing Residential Areas by Centrifuge Shaking Table Tests, Proc. 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand, Nov. 1-4, 2015, Paper No. 555 (9 pp.) (査読有)

[学会発表] (計5件)

- ① 石川明、関口徹、中井正一：地下水位低下回復による不飽和液状化対策と地震後の構造物傾斜、地盤工学会 第51回地盤工学研究発表会、岡山県・岡山市、2016.9.13-15 (投稿済み)
- ② 中井正一、関口徹：現場計測に基づく地下水位低下による液状化抑止効果の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、神奈川県・平塚市、論文番号20285、pp.569-570、2015.9.4-6
- ③ 石川明、眞野英之、社本康広、関口徹、中井正一：地下水位低下回復後の砂地盤の飽和度、日本建築学会大会学術講演梗概集、神奈川県・平塚市、論文番号20286、pp.571-572、2015.9.4-6
- ④ 石川明、眞野英之、関口徹、中井正一：地下水位低下回復による液状化抑止工法の検討 (その1)遠心模型実験、第50回地盤工学会研究発表会、北海道・札幌市、論文番号885、pp.1769-1770、2015.9.1-4
- ⑤ 中井正一、関口徹、石川明、眞野英之：地下水位低下回復による液状化抑止工法の検討 (その2)評価指標、第50回地盤工学会研究発表会、北海道・札幌市、論文番号886、pp.1771-1772、2015.9.1-4

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中井 正一 (NAKAI SHOICHI)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90292664

##### (2) 研究分担者

関口 徹 (SEKIGUCHI TORU)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50451753

##### (3) 連携研究者

なし