

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15088

研究課題名（和文）地下水位以浅に埋設されたパイプラインの新たな液状化被害メカニズムの解明と評価

研究課題名（英文）Evaluation of new liquefaction damage mechanism for pipelines buried above ground water level

研究代表者

小野 耕平（Ono, Kohei）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・講師

研究者番号：30804166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、地下水位以浅に埋設されたパイプラインの地震時変位特性に焦点を当てたものである。液状化時のパイプラインの浮上、および液状化発生後の地盤の体積圧縮に伴うパイプラインの沈下挙動について、模型実験により検証することを目的とした。遠心力場において地下水位を制御し、振動台を用いて水平一次元の振動を与えることで、埋設管以深の砂層が液状化した際における埋設管の鉛直変位メカニズムを検討した。また、液状化発生後の水圧消散過程における上層の不飽和地盤の振る舞いが埋設管の変位挙動に与える影響について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、地下水位以浅に埋設された管路は液状化対策の検討を必要としなかったが、近年、埋戻し土より下層が液状化したことに伴い浮上や不同沈下を起こす事例が相次いで報告されており、埋設管路の新たな液状化被害メカニズムの存在が浮き彫りとなっている。本研究課題は、遠心力場において原型スケールの応力状態を再現した振動模型実験を実施することで、上記の被害メカニズムの一端を明らかにしたものである。今後、より定量的な検討を進めていくことで、合理的な耐震設計手法の確立、および対策手法の充実が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on the seismic displacement behaviors of a pipeline buried above the groundwater level. The purpose of the study is to verify the flotation of the buried pipe during liquefaction and following its settlement due to the volume compression of the liquefied sand layer by a series of centrifuge experiments. The vertical displacement mechanism of the buried pipe during liquefaction was investigated by controlling the groundwater level and applying horizontal one-dimensional excitation using a shaking table. The influence of the behavior of the upper unsaturated sand layer on the displacement of the buried pipe during the dissipation process of the pore pressure after liquefaction was also clarified.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 パイプライン 耐震

### 1. 研究開始当初の背景

埋設パイプラインの一般的な地震時被害として、液状化の発生に伴う管体の浮上がある。管体の見かけの比重は一般に液状化地盤の比重より軽いため、管体を浮上させる浮力が作用することがその原因とされる。浮上した管路は通水性能が低下するとともに、場合によっては継手部での抜け出し被害が生じ、周辺に2次被害を起こす可能性がある。

その一方で、近年の大地震では液状化が発生することのない地下水位以浅の不飽和層に埋設されたパイプラインが地震時に変位して破損することが相次いで報告<sup>2)</sup>されており、より下層の地盤で発生した液状化がその原因の一つとして考えられている。現行の各種設計基準では地下水位以浅に埋設された管路は液状化対策の要否の検討外となっており、詳細な被害メカニズムの解明が求められているところである。そこで本研究では、非液状化層に埋設された管路の鉛直変位挙動について遠心力場での振動実験により調べた。

### 2. 研究の目的

本研究課題は、地下水位以浅に埋設されたパイプラインの地震時変位特性に焦点を当てたものである。液状化時のパイプラインの浮上、および液状化発生後の地盤の体積圧縮に伴うパイプラインの沈下挙動について、模型実験により検証することを目的とする。遠心力場において地下水位を制御し、振動台による水平次元加振を行うことで、埋設管以深の砂層が液状化した際における埋設管の鉛直変位メカニズムを検討する。また、液状化発生後の水圧消散過程における上部の不飽和地盤の振る舞いが埋設管の変位挙動に与える影響について明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、愛媛大学の遠心载荷実験装置(図1)を使用し、実大スケールの応力レベルを再現した小型の縮尺模型実験により、現象の解明を試みた。

模型地盤の概要図の一例を図2に示す。実験には、内寸が幅510mm、高さ230mm、奥行き120mmの剛土槽を使用した。前面壁はアクリル製であり、アクリル板越しに高速度カメラでフレームレート30枚/秒の連続撮影を行うことで地盤内の変形挙動を観察した。



図1 遠心载荷装置

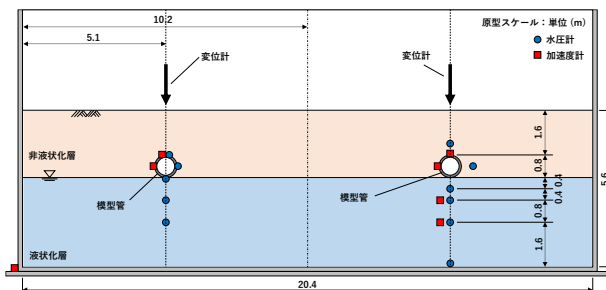


図2 実験模型立面図

地盤材料には体積圧縮特性の異なる豊浦硅砂と宇部硅砂7号の2種類を使用した。砂の材料特性を表1に示す。図2に示したように、地盤内に間隙水圧計、加速度計、模型管を設置しながら、空中落下法で目標とする相対密度の地盤を作製した。

表1 砂の物性

物性	単位	豊浦硅砂	宇部硅砂7号
目標相対密度 $D_r$	(%)	40	60
土粒子密度 $\rho_s$	(g/cm <sup>3</sup> )	2.66	2.63
最大間隙比 $e_{max}$	(-)	0.977	1.14
最小間隙比 $e_{min}$	(-)	0.605	0.657
飽和密度 $\rho_{sat}$	(g/cm <sup>3</sup> )	1.93	1.88

模型管として、直径20mm、長さ118mmで、見かけの密度の異なる計3種類の模型(比重:0.5,1.1,1.8)を作製した。いずれの模型管も地盤の飽和密度に対して軽く、液状化時には浮力が作用する条件である。長さ方向の中央部には鉛直変位計測用ターゲットの固定用アルミ棒を取り付け(図3)、鉛直変位はポテンショメータで計測した。模型管の両端には不織布を貼り付け、壁面摩擦の軽減を図った。模型管は互いに影響を及ぼさないよう距離を取って2本並列に同じ

深さに埋設した。

模型の作製後、土槽を真空槽内に移動し、地盤内の空気を二酸化炭素に置換した。その後、真空層内を $-95\text{ kPa}$ に保った状態で注水を行い、地表面まで飽和させた。間隙流体には、透水現象に関する時間の縮尺を振動現象の縮尺に整合させるために、粘性流体（メトロゾ水溶液）を使用した。粘性は遠心加速度に合わせて $40$ 倍（ $40\text{ cSt}$ ）に調整した。

全ての実験は、遠心加速度 $40\text{ g}$ 場で実施した。地下水位を低下させた実験では、遠心加速度を $40\text{ g}$ まで上昇させた後、土槽の両側面に接続した電磁弁を遠隔操作で開放することで、地表面から所定の深さまで水位を低下させた。遠心力場で水位を調整することで毛管上昇高さを $1/40$ に減じることができ、均一な地下水位を再現することができる。地下水位の判断には地盤底部に設置した間隙水圧計の計測値を活用した。地下水位低下後の地盤側面の一例を図4に示す。

模型への1次元の水平振動は、電気式メカニカル振動台で与えた。水平方向の変位振幅は偏心距離 $1\text{ mm}$ の偏心カムシャフトにより制御し、加速度はドライビングモーターの回転速度により調整した。加振前後半にテーパ部を設けた正弦波（図5参照）を原型スケールで $40\text{ s}$ 間入力した。卓越振動数は約 $0.75\text{ Hz}$ である。

本研究では、模型管の見かけの比重、地下水位の位置、液状化層の厚さ、地盤材料、相対密度を変えた複数の実験を実施した。ここでは主に模型管の比重に着目した実験結果を中心に示す。以降、実験結果は原型スケールで示す。

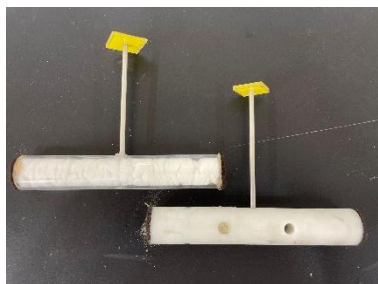


図3 模型管



図4 地下水位低下後の様子

#### 4. 研究成果

図5に振動台加速度、過剰間隙水圧比、埋設管の鉛直絶対変位量、地下水位上昇量の時刻歴の代表例を示す。過剰間隙水圧比は計測した過剰間隙水圧の変動を初期鉛直有効応力で除すことで求めた土槽底面での値である。模型管の鉛直変位量のグラフに関しては、異なる実験ケースの実験結果を、加振時間を調整した上で重ねて示している。

計測開始後 $10\text{ s}$ で振動台加速度の入力を開始し、加振開始から約 $10\text{ s}$  ( $t_1$ )で土槽底面の過剰間隙水圧比は $1.0$ に達している。過剰間隙水圧比は入力加速度の影響を受けて上昇と下降を繰り返しながら概ね $1.0$ を保って推移しており、振動継続中は地盤全体が液状化状態にあると判断できる。加振終了後 ( $t_2$ ) 即座に過剰間隙水圧は消散を開始し、地盤底部の過剰間隙水圧が完全に消散するまでには加振終了から $140\text{ s}$ 程度を要した。地下水位は地盤の液状化に伴い上昇を開始し、加振終了後にも一定の傾きで上昇を続けている。

液状化に達した $t_1$ を境に、比重 $0.5$ を除く模型管は沈下方向に変位を開始する。自重の大きい管は、液状化し強度が低下した地盤内に自重の影響で沈下したものと判断できる。その後、過剰間隙水圧の消散が開始されたことに伴い ( $t_2$ )、いずれの模型管も継続的に沈下する。模型管の沈下は加振終了から $50\text{ s}$ 程度 ( $t_3$ )で停止しており、これは地下水位の上昇が停止する時間と概ね一致している。すなわち、加振終了後の管の沈下挙動は、液状化発生後の過剰間隙水圧の消散過程における地盤の圧密沈下に伴うものであることが推察される。

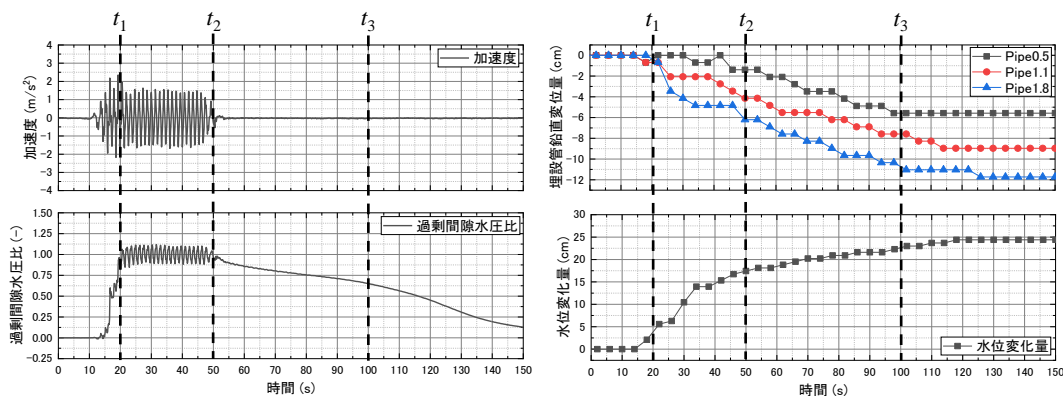


図5 代表的な計測結果の時刻歴

図 6 に連続写真に対する画像解析から求めた地盤の変位ベクトルの分布を示す。液状化過程の変動は図 5 に示した  $t_1$  と  $t_2$  を, 圧密過程の変動は  $t_2$  と  $t_3$  で撮影された画像をそれぞれ比較し, PIV 解析によりベクトルを求めた。液状化過程において, 液状化層の変位量は非液状化層の変位量よりも大きく, 加振加速度が作用する水平方向にも地盤は大きく移動している。一方, 圧密過程においては, 非液状化層は鉛直下向きに一樣に変位しており, 液状化層は地盤深部ほど変位量が小さいことがわかる。このことから, 図 5 で示された圧密過程の模型管の沈下挙動は, 加振時にも剛性を維持する非液状化層の動きに追従したものであると考えられる。

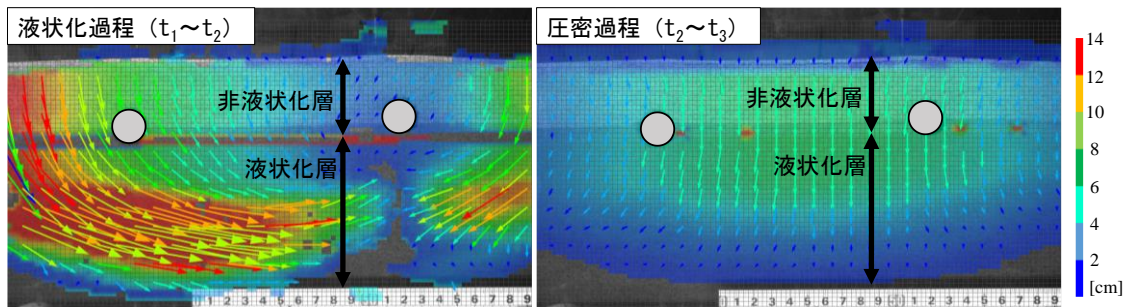


図 6 地盤の変位ベクトル分布

図 7 に模型管の見かけの単位体積重量と鉛直絶対変位量の関係を示す。ここでは変位量を液状化過程と圧密過程に分けてプロットしている。液状化過程の管の沈下量は見かけの単位体積重量に概ね比例して増加している一方で, 圧密過程の沈下量は単位体積重量との相関が小さいことがわかる。図 6 の結果とも併せて, 液状化発生後においては埋設管の沈下量は管の重量に依存せず, 圧密に伴う地盤の体積変化に大きく支配されることが示唆され (図 8), 液状化層の厚さや体積圧縮量によっては埋設管を破損させ得るような大変形を引き起こす可能性があることが示された。

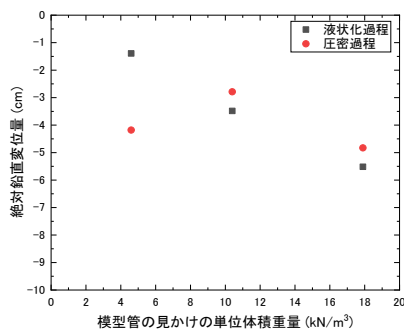


図 7 管の単位体積重量と絶対変位量の関係

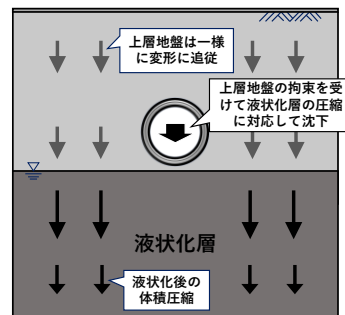


図 8 圧密過程時の変形模式図

#### 参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局整備部設計課：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」, 農業農村工学会, 2009.
- 2) 宮本勝ら：液状化に起因する上水道管路の被害特性などに関する調査, 土木学会論文集 A1, Vol.71 (4), 983-994, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本太一朗
2. 発表標題 地下水位以浅に埋設された管路の液状化時鉛直変位挙動
3. 学会等名 令和2年度土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濱田倫平
2. 発表標題 液状化地盤における水平荷重を受ける埋設管の動的挙動に関する遠心模型実験
3. 学会等名 令和3年度土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------