

令和元年6月3日現在

機関番号：16301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06917

研究課題名（和文）液状化時における埋設管路の水平変位特性の解明ならびに限界状態設計法の提案

研究課題名（英文）Mechanism of lateral displacement behavior of buried pipeline during liquefaction and its limit state design

研究代表者

小野 耕平（Ono, Kohei）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・助教

研究者番号：30804166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、スラスト力が作用する埋設パイプラインの屈曲部を対象として、その液状化時挙動、特に水平変位特性を遠心模型実験により検討したものである。模型管に対してスラスト力を模した水平荷重を与えた条件下で振動実験を行い、液状化時に埋設管が水平変位するメカニズム、および周辺の液状化地盤と埋設管の相互作用を明らかにした。また、パイプラインを砕石で埋め戻す対策を施すことにより、周辺地盤の液状化の発生が抑制され、埋設管の水平変位量が低減されることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

埋設管路の屈曲部では液状化の発生に伴う継手の抜け出し被害が頻発しているものの、その詳細な被害メカニズムはこれまで十分に明らかとなっていなかった。本研究課題は、液状化時の埋設管の変位挙動を模型実験によって再現することで、その被害メカニズムの一端を解明したものである。本研究結果を基に今後より定量的な検討を積み重ねていくことで、埋設管路の将来的な耐震設計の充実に繋がるとともに、有効な液状化対策手法の考案へと発展していくことが期待される。

研究成果の概要（英文）：A series of centrifuge tests was conducted to examine the lateral displacement behavior of buried pipelines subjected to unbalanced thrust force during liquefaction. The lateral displacement mechanism of buried pipeline and the pipe-soil interaction were clarified by lateral loading tests of a model pipe. It was also confirmed that displacement of pipeline during liquefaction could be suppressed by taking measures to backfill the pipeline with gravel.

研究分野：地盤工学

キーワード：埋設管路 液状化 スラスト力 耐震 遠心模型実験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

過去の被災調査から、地震時における埋設管路の被害率は液状化等の地盤変状の発生に伴い大きく増加することが明らかとなっている。広範囲に甚大な液状化被害をもたらした東北地方太平洋沖地震では、液状化発生地域における埋設管路の被害率が非液状化地域の約 11 倍にも達したことが明らかとなっている（更生労働省，2014）。

中でも、圧力管路の屈曲部は被害率が非常に高い管路系最大の弱点とされており、屈曲部の水平変位に伴う継手部の抜け出し被害がこれまで頻発している。その原因として、管路内の水流による遠心力や内水圧の不均衡等によって発生するスラスト力と呼ばれる外力の存在が指摘されている。常時の設計では、管路背面の受働土圧をスラスト力に対する水平抵抗力として見込んでいるものの、地震外力を受けた地盤が液状化し水平抵抗力が低下することで、被害が発生しているものと考えられている。しかしながら、その具体的な被害メカニズムは明らかにされておらず、それゆえ、効果的な対策手法の確立にも至っていない。

2. 研究の目的

本研究課題は、液状化時における埋設管路の水平変位挙動を実験的に再現し、その被害メカニズムを解明することを目的とする。埋設管の水平変位量と地盤からの水平抵抗力の関係に着目し、水平載荷条件、加振条件、埋設条件を変化させた模型管の水平載荷実験を行う。また、管路を砕石で埋め戻すことによる液状化対策効果および水平変位抑制効果についても模型実験により評価する。

3. 研究の方法

本研究では、次のような遠心模型実験により現象の解明を試みた。

図 1 に模型の断面図を示す。実験には、模型スケールで幅 430mm、高さ 230mm、奥行き 120mm の剛土槽を使用した。土槽の側壁はアクリルガラス製となっており、実験時における模型断面の様子を高速度カメラで撮影し、画像解析を行った。

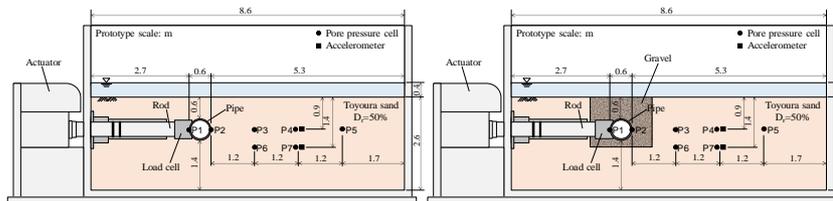


図 1 実験模型断面図

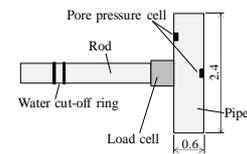


図 2 模型管の平面図

模型管には、直径 30mm のアルミニウム製丸棒を使用した。ここで、スラスト力は圧力管路の屈曲部に作用する外力であるものの、本実験では簡易な 2 次元モデルとして扱うために、模型管として丸棒を使用した（図 2）。液状化時の浮上や沈下を防ぐため、模型管の比重は飽和砂の比重と等しく調整した。模型管の中央には載荷用に直径 20mm のアルミニウム製ロッドを管に対して直角方向に取り付け、載荷ロッドの先端は土槽側面の止水カラーを介して土槽外部に設置した電動アクチュエータに接続した。模型管とロッドの連結部に荷重計を取り付け、水平変位時に管に加わる抵抗力を直接計測した。壁面のロッド貫通部の止水処理によって載荷時には相当の摩擦がロッドに加わるものの、管に隣接する位置で荷重を計測しているため、この摩擦の影響は無視することができる。模型管の両端には不織布を貼付し、壁面摩擦の軽減を図った。

地盤材料には、豊浦砂を使用した。図 1 に示す位置に計測器と模型管を設置しながら、空中落下法によって相対密度 50% の中密地盤を作製した。管の土被り厚は、口径に等しい 30mm とした。砕石によるスラスト防護対策を行ったケースでは、原型スケールで 1.7m の幅を掘削し、砕石を想定した宇部珪砂 1 号（平均粒径 2.4mm）で模型管を埋め戻した。改良幅は農業用管路の設計基準で規定されている管の標準溝幅を参照した。模型の作製後、真空槽内で二酸化炭素置換を行なった後、-95kPa の負圧下において 20cSt のメトローズ水溶液で飽和させた。

作製した模型を愛媛大学所有の遠心載荷装置に搭載し、遠心加速度を 20g まで上昇させた後、実験を行った。模型管の水平載荷には、変位制御と荷重制御の 2 種類の異なる載荷方法を採用した。変位制御実験では、一定の速度で模型管を水平方向に強制的に押し出し、水平載荷の開始と同時に振動台を用いて加振を行った。原型スケールで約 100gal の正弦波を 100s 入力した。一方、荷重制御実験では、はじめにスラスト力を模擬した一定の水平荷重（先行荷重）をアクチュエータによって模型管に載荷し、先行荷重と飽和地盤の水平抵抗力が釣り合い、安定したことを確認した後、先行荷重を与えた状態のまま加振を行った。原型スケールで約 150gal の正弦波を 40s 与えた。

表 1 に示す全 10 ケースの実験を行った．実験結果はすべて原型スケールで示す．

表 1 実験ケース

Case	载荷条件	载荷速度 or 先行荷重	加振条件	地盤条件
1	--	--	150gal, 40s	飽和
2	変位制御	5.0mm/s	--	乾燥
3	変位制御	5.0mm/s	--	飽和
4	変位制御	5.0mm/s	100gal, 100s	飽和
5	変位制御	2.5mm/s	100gal, 100s	飽和
6	変位制御	10.0mm/s	100gal, 100s	飽和
7	荷重制御	28kN/m	150gal, 40s	飽和
8	荷重制御	36kN/m	150gal, 40s	飽和
9	--	--	150gal, 40s	飽和・液状化対策
10	荷重制御	36kN/m	150gal, 40s	飽和・液状化対策

4. 研究成果

(1) 変位制御実験

図 3 に Case4 における入力加速度，受働側管側部 (P2) の過剰間隙水圧比 (以下，水圧比)，水平抵抗力，水平変位量の時刻歴を示す．水平抵抗力，水平変位量はそれぞれ無次元化しており，水圧比は過剰間隙水圧を初期有効土被り圧で除して求めた．加振開始直後 ($t=23s$)，管側部で計測された水圧比は即座に 1.0 に達しており，受働側の地盤が液状化することで水平抵抗力が発揮されていないことがわかる．このとき，変位制御実験であるため，管の移動速度は等速である．抵抗力は加振終了前 ($t=110s$) から回復を始め，同時に過剰間隙水圧の消散が確認される．その後，抵抗力は単調に増加し，ピークに達しているものの，水圧比はその間単調に低下を続けており，負圧が発生している．一定速度で水平変位する管が受働側地盤にせん断変形を生じさせたことにより，正のダイレイタンスが生じる見返りとして間隙水圧が低下したものと考えられる．現実的には，スラスト力が地盤の抵抗力と平衡した段階で管の変位は停止すると考えられるため，このような負圧の発生は考え難く，本実験で得られた最大抵抗力は過大であるといえる．

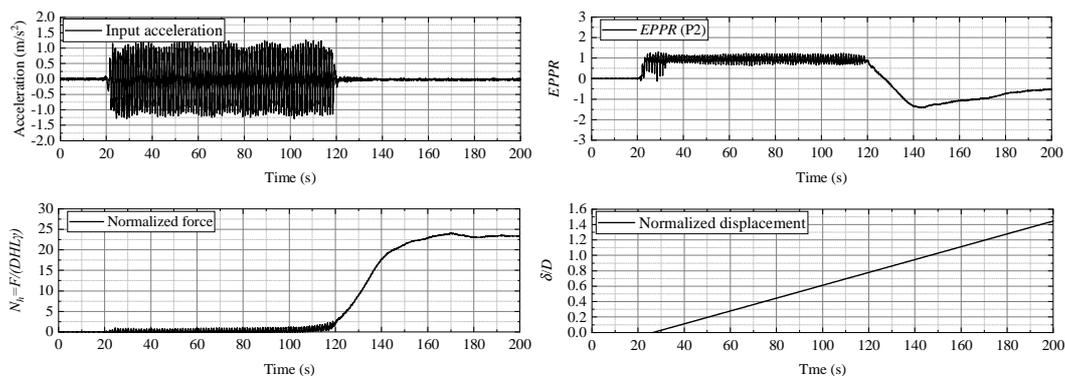


図 3 各時刻歴 (Case4)

(2) 荷重制御実験

同様に，図 4 に Case8 における入力加速度，水圧比 (P2)，水平抵抗力，水平変位量の時刻歴を示す．本ケースでは，先行荷重を与えた状態のまま，入力加速度 60gal, 80gal, 150gal で段階荷重を実施し，管の動きを詳細に調べた．

まず，埋設管に水平方向の先行荷重が加えられたことにより，地盤から $N_h=6$ 程度の水平抵抗力を受けていることがわかる．このとき，管はわずかに変位した後に移動を停止しており，先行荷重が地盤からの水平抵抗力と釣り合った状態である．その後，60gal で 1 回目の加振を行った．水平抵抗力は慣性力の影響を受けて変動し，管はわずかに移動しているものの，加振に伴う過剰間隙水圧の蓄積は確認できない．続いて，80gal で 2 回目の加振を行った．水圧比は最大で 0.3 程度まで上昇し，それに伴い水平抵抗力が一時的に低下したことで，管が変位していることがわかる．このときの管の最終変位量は 1 回目の加振時よりも大きい．続いて，150gal で 3 回目の加振を行った．加振開始直後，水圧比は 1.0 に達していることから地盤は液状化した状態であると判断される．スラスト力 (先行荷重) を支える水平抵抗力は急激に低下し，それに伴って管は 15mm/s 程度の等速度で移動していることがわかる．

図 5 に，加振 3 回目における埋設管の水平変位量と水圧比の関係を示す．グラフから，水圧比の上昇に応じて管は即座に変位を開始しており，水圧比と変位量は概ね比例関係にあることがわかる．水圧比が 1.0 に達した後も管は変位を続けている．図 6 には，加振毎の最終変位量

と最大過剰間隙水圧比の関係をプロットした。グラフから、液状化に至らないほどの水圧比の上昇であっても埋設管は変位しており、水圧比の上昇と管の水平変位量には正の相関があることがわかる。

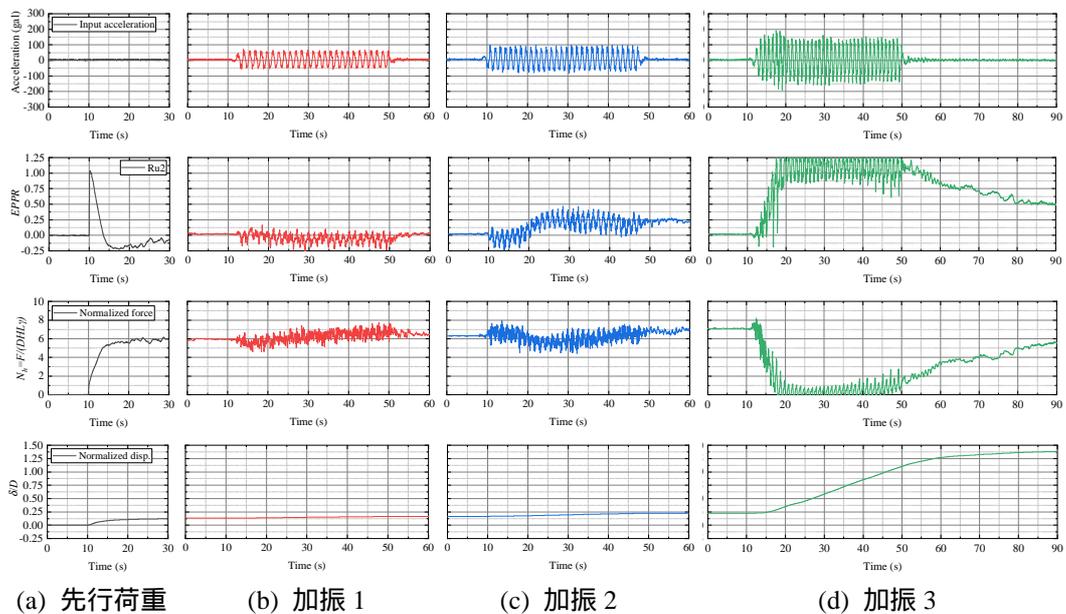


図 4 各時刻歴 (Case8)

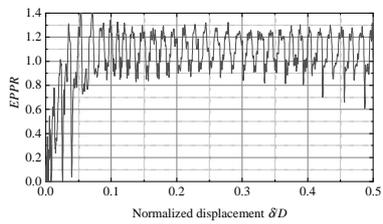


図 5 水平変位量と水圧比の関係

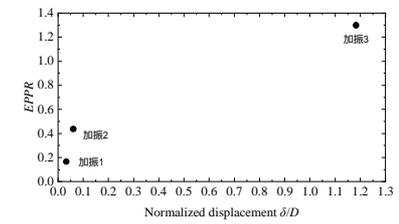


図 6 最終変位量と最大水圧比の関係

図 7 に、PIV 解析により求めた速度ベクトルの分布図 (Case8 加振 3 回目) を示す。変位開始直後 ($t=16s$) には、地盤がある程度剛性を保っているため、受働側では地表面に向かって遠方まで変形が伝わっている様子が見られる。一方、液状化発生後 ($t=32s$) には、管上下部の地盤が管の背面側に回り込んでおり、非液状化時とは全く異なる挙動が捉えられている。管の移動により押し出された地盤は管の上側を通過し、背面へ移動している。進行方向側の地盤の移動範囲は管の口径に概ね等しい。液状化後の水圧消散過程 ($t=57s$) では、剛性の回復に伴い液状化発生前と同様に受働側の一方に変位する様子を確認できる。以上の挙動の観察と、図 5、6 に示した関係から、地震時におけるスラスト力による埋設管の水平変位を効果的に抑制するためには、管底より上部かつ変位方向側の管近傍地盤の過剰間隙水圧上昇を少しでも低下させ、地盤のせん断抵抗を確保することが重要であることがわかる。

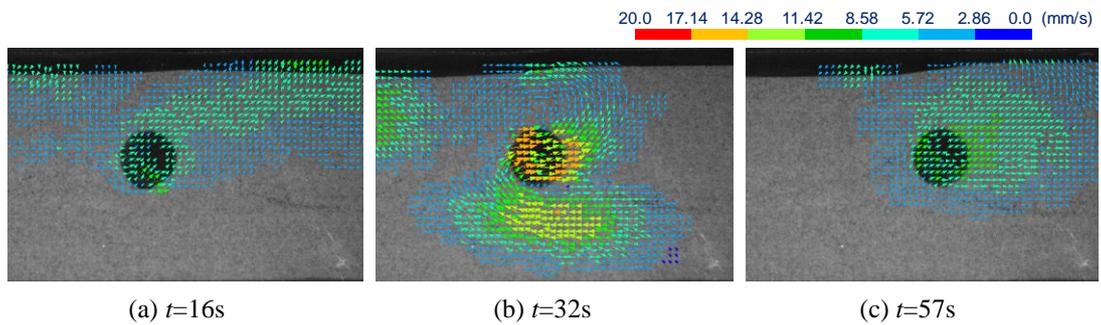


図 7 速度ベクトル分布 (Case8)

(3) 砕石を用いた液状化対策
上記の結果を踏まえ、模型管の周囲を砕石で埋め戻すことで、液状化の発生および管の水平

変位の抑制を狙った。はじめに、碎石による過剰間隙水圧の消散効果を加振実験により検証した (Case9)。図 8 に、加振開始後 ($t=10s$) からの対策地盤の水圧比分布の変化を示す。横軸は管心からの水平距離を碎石幅の半分の長さで除している。水圧比は加振に伴って徐々に上昇するものの、碎石層内部の水圧比は最大でも 0.1 程度までしか上昇しておらず、碎石層に向かって水圧が消散することで、碎石層に近い砂層では水圧比の上昇が大幅に抑制されている。水圧比分布は加振開始後 9s 程度で定常となっており、碎石幅の 2.5 倍程度の範囲までは碎石層による過剰間隙水圧の消散効果が確認できる。

図 9 に、対策地盤に対して荷重制御条件で水平荷重を行った Case10 における変位量と水平抵抗力の関係を示し、Case8 と比較する。碎石で埋め戻した Case10 では、碎石による水圧消散効果によって抵抗力の低下がほとんど見られず、それゆえ管の変位量は大幅に低減されている。加振終了後の変位の進行も見られず、本実験条件においては、最終的な管の変位量を 76% 程度抑制することができた。

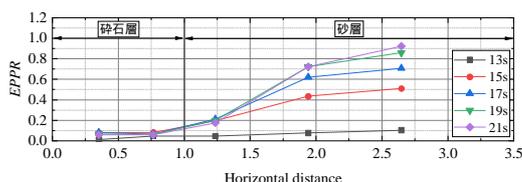


図 8 過剰間隙水圧比分布の変化

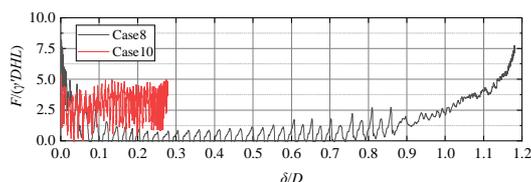


図 9 変位量と水平抵抗力の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件：査読有り)

- 1) Kohei Ono, Mitsu Okamura, Centrifuge modeling on lateral force-displacement behavior of buried pipes in liquefied sand, Proceedings of 7th international conference on earthquake geotechnical engineering, 2019 (in print)

〔学会発表〕(計 5 件)

- 1) 馬場口哲也, 小野耕平, 岡村未対, 碎石を用いた埋設管路のスラスト防護対策効果に関する動的遠心模型実験, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019.7.18, CD-ROM, 埼玉
- 2) 星川拓也, 小野耕平, 岡村未対, 液状化時における埋設パイプラインの水平変位メカニズムの検証, 2019 年度土木学会四国支部第 25 回技術研究発表会, 2019.6.1, CD-ROM, 高知
- 3) 星川拓也, 小野耕平, 岡村未対, スラスト力を受ける埋設管の液状化時変位挙動の実験的検討, 平成 30 年度地盤工学学会四国支部技術研究発表会, 2018.11.9, CD-ROM, 徳島
- 4) 小野耕平, 岡村未対, PIV 解析による埋設管周辺地盤の液状化時挙動の観察, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018.8.31, CD-ROM, 北海道
- 5) 小野耕平, 窪内将吾, 岡村未対, 液状化地盤の抵抗力に関する遠心力場での埋設管の水平荷重実験, 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018.7.25, CD-ROM, 香川