

加振方向による液状化時の埋設管浮き上がりへの影響

八上 晃¹・楢田 泰子²・大室 秀樹³

¹非会員 神戸大学 工学部市民工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: 1994223t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: 175t753t@stu.kobe-u.ac.jp

埋設管の液状化時の浮き上がりに関して、模型実験や解析を用いた既往研究から、液状化による浮力がトリガーになり、管周辺の地盤が管底部へ回り込むことによって浮上が継続するメカニズムが明らかにされている。数値解析技術が進展しているものの、地盤の回り込み現象を精度良く評価できる方法は限られている。また、既往の模型実験は、管断面に対して水平加振している場合がほとんどである。本研究は、液状化時に地盤が管路下へ回り込むことによる浮き上がりへの影響を評価するため、管路模型の埋設条件を同じにして管断面と管軸面のそれぞれの方向に水平加振実験を行い、加振方向による埋設管の浮き上がりの差異を明らかにした。地表面近くの揺動の影響を受けない場合には、管断面に水平加振した時の浮き上がり量よりも管軸方向に水平加振した浮き上がり量の方が0.5~0.87倍小さくなった。

Key Words: *liquefaction, buried pipe, lifting, direction of excitation*

1. はじめに

埋設管や地下構造物の液状化時の浮上りに関する研究は、1964年の新潟地震以降着目され、模型実験・数値解析によって、浮上メカニズムについては明らかにされるとともに、その液状化対策工が提案されてきた。とくに、地盤工学会の「液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する研究委員会」では、浮き上がりの被害分析、浮き上がりのメカニズムと設計法、対策工など様々な項目について研究成果が挙げられてきた^{例えば 1),2),3)}。これらの成果によって、埋設管の浮上メカニズムとして、発生要因は液状化による浮力の増大であり、浮き上がりの継続については、構造物側面地盤が構造物下へ回り込むことによるものであると学術的なコンセンサスが得られている。

近年、高度な数値計算環境が整い、解析技術が向上し、液状化解析では一般的に有効応力解析が行われるようになってきた^{4),5)}。その一方で、地下構造物の側面地盤の土粒子が構造物下に回り込む動きを有効応力解析では追従することは難しく、DEM解析で補完的に挙動を把握

することが行われている⁶⁾。また、これまでの模型振動実験を俯瞰的にみると、地下構造物の円形もしくは矩形の断面に対して水平方向に加振して地盤の回り込みに着目した研究がほとんどである^{7),8)}。一方で、管路やトンネルのような長尺構造物の軸方向に対して鉛直の変位差が生じる場合には、軸方向で構造物の安全照査をする必要があり、地盤の回り込みを考慮するには3次元での検討が必要となる。こうした状況を踏まえると、従来の構造物断面方向の加振に加えて、地盤の回り込みの影響が起こりにくい条件(管軸方向への加振)によって地下構造物の浮き上がり量に差異があるのか、確認しておく余地がある。

本研究は、水道用管路を対象として、加振方向によって、液状化時に地盤が埋設管下へ回り込み、管が浮き上がることへの影響を明らかにするために振動実験を行った。具体的には、埋設管の管断面と管軸面のそれぞれの方向に同埋設条件で水平加振実験を行い、埋設管の浮き上がりの差異を比較した。

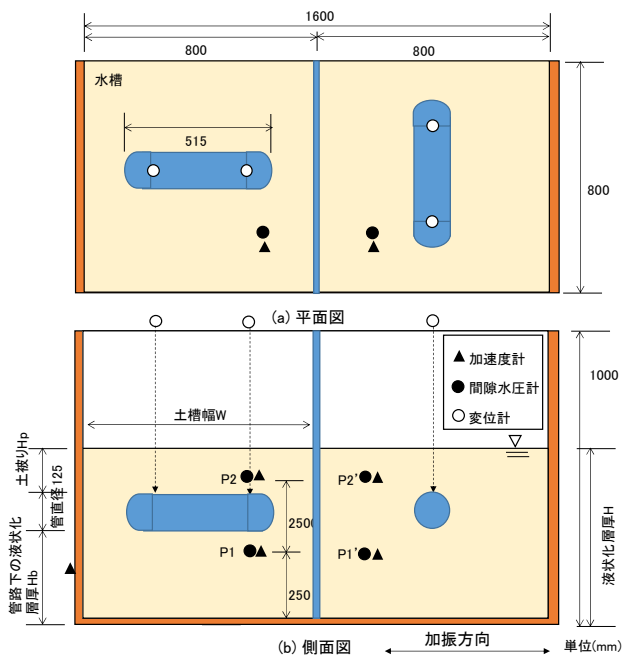


図-1 実験土槽と主な計測位置 (800mm 土槽の場合)

表-1 地盤材料の諸元

最大間隙比 e_{max}	0.92
最小間隙比 e_{min}	0.62
最大粒径 D_{max} (mm)	4.25
50%粒径 D_{50} (mm)	3.1
均等係数 U_c	1.6
曲率係数 U_c'	1.23

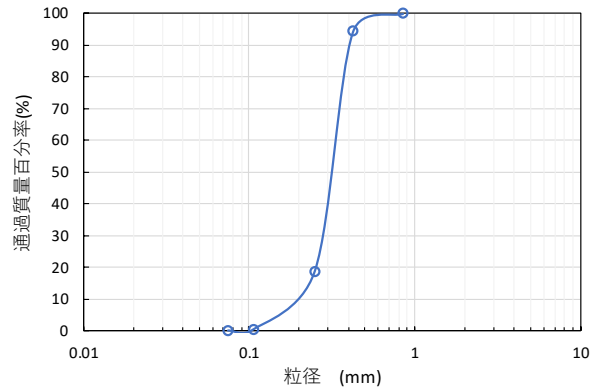


図-2 粒径加積曲線

2. 実験方法

(1) 実験装置

本研究では、神戸大学工学部構造実験室にある一軸水平加振装置を使用した。土槽には、内寸幅 1,600mm×奥行き 800mm×深さ 1,000mm の剛土槽を使用した。図-1 に示すように、土槽長手方向の中央に厚さ 10mm の内壁を挿入し、800mm 四方の土槽を 2 つを同時に加振できる環境を設定した。実験ケースは後述するが、埋設管に側壁が近く地盤の回り込みに対して拘束が大きいケース（土槽幅 800mm）と拘束が小さいケース（土槽幅 1600mm）を比較できるようにしている。

地盤には珪砂 6号を用いた。砂の諸元を表-1 に示す。また、粒径加積曲線を図-2 に示す。飽和地盤を水中落下法で作製して、相対密度は $Dr=71.5\%$ になった。

供試管には水道配水用ポリエチレン管呼び径 100mm（外径 125mm，厚さ 11.4mm）を使用し、供試管の両端はポリエチレンキャップを熱融着した。供試管の長さは 515mm である。さらに、管路端部に注水のためのボルト穴を空け、実験ケースによって満水、空水状態の供試管を準備した。埋設管の諸元を表-2 に示す。見かけの比重は空水状態で 0.36，満水状態で 0.95 となった。

(2) 加振条件

加振波は土槽に対して振幅 300 cm/s^2 (300 gal)，振動数 4 Hz，加振回数 30 回（主要 20 回，前後テーパー 5 回）の正弦波である。図-3 に入力波形を示す。加振方向は図-1 に示す土槽の長手方向への水平加振である。

表-2 埋設管の諸元

	見かけの比重	質量(kg)	体積(cm^3)
空水状態	0.36	2.2	6194
満水状態	0.95	5.9	

注：配水用ポリエチレン管呼び径 100mm ($\phi 125$) の両端にキャップで融着し、長さ 515mm にしたもの

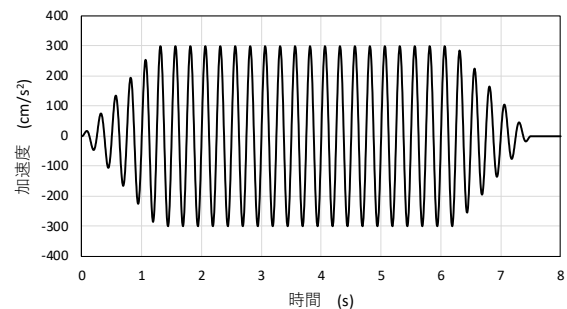


図-3 入力加速度

(3) 計測項目

計測項目は、地盤の間隙水圧、加速度、供試管の浮き上がり量である。管路の浮き上がり量は、土槽上のフレームに固定した巻取り式変位計を一供試管あたり 2 箇所計測した。供試管両端のキャップの目地に沿ってワイヤーを張わせ、その先に変位計のワイヤーと接続した。以降の分析では、2 箇所を平均値を用いて実験結果を整理した。間隙水圧計と加速度計は土槽の底部からそれぞれ 250mm，500mm の位置に計 2 箇所設置し、さらに土

表-3 実験ケース

ケース	液状化層厚H(mm)	土被りHp(mm)	管路下液状化層厚Hb(mm)	土槽幅W(mm)	加振方向	管路の状態
case1-A	700	375	200	800	管軸	満水
case2-A	700	375	200			空水
case3-A	550	225	200			空水
case4-A	550	25	400			空水
case5-A	600	25	450			1600
case1-T	700	375	200	800	管断面	満水
case2-T	700	375	200			空水
case3-T	550	225	200			空水
case4-T	550	25	400			空水
case5-T	600	25	450			1600

槽外部にも加速度計を設置した。土槽を二つに分割する場合には、それぞれの区画において同様な計測装置を構築した。間隙水圧計と加速度計は土槽の上下に位置決め用のワイヤーを張り、計器を固定した。この固定により埋め戻し時の回転やズレを抑えた。なお、加速度計のみ実験前にワイヤーを切断して加振した。

(4) 実験ケース

本研究では、加振方向による浮き上がり量の差異をみるために、液状化層厚や土被り厚、土槽幅を変化させながら同一埋設条件で管軸方向と管断面方向のそれぞれに実験ケースを設定した。表-3に実験ケースの諸元を示す。同一の実験条件は5ケースあり、それぞれに管軸方向(A)と管断面方向(T)の実験を行っている。管路は土層幅に対して中央になるように設置した。なお、土槽幅 W = 1600 mm の実験では、図-1に示す土槽中央の内壁を外して実験を実施した。

3. 実験結果と考察

(1) 加振方向による浮き上がり量の差異

5つの実験ケースにおける管軸方向(A)と管断面方向(T)に加振した場合の浮き上がり量の推移について図-4にまとめて示す。なお、時間は図中の(f)に示す土槽外面で計測した加速度記録で各実験ケースを同期させている。実験ケースの多くは加速度のテーパ部では管は浮き上がりせず、300 galが入力されると同時に浮き上がり始め、時間にほぼ比例しながら浮き上がり量が増加している。また、加振終了とともに浮き上がり量は一定値に収束することがわかる。5つの実験ケースの中で、case 5を除いた case 1 から case 4 では、管断面に加振した方が管軸方向に加振するよりも浮き上がり量が大きくなった。なお、case 5で浮き上がり量が逆転したことは

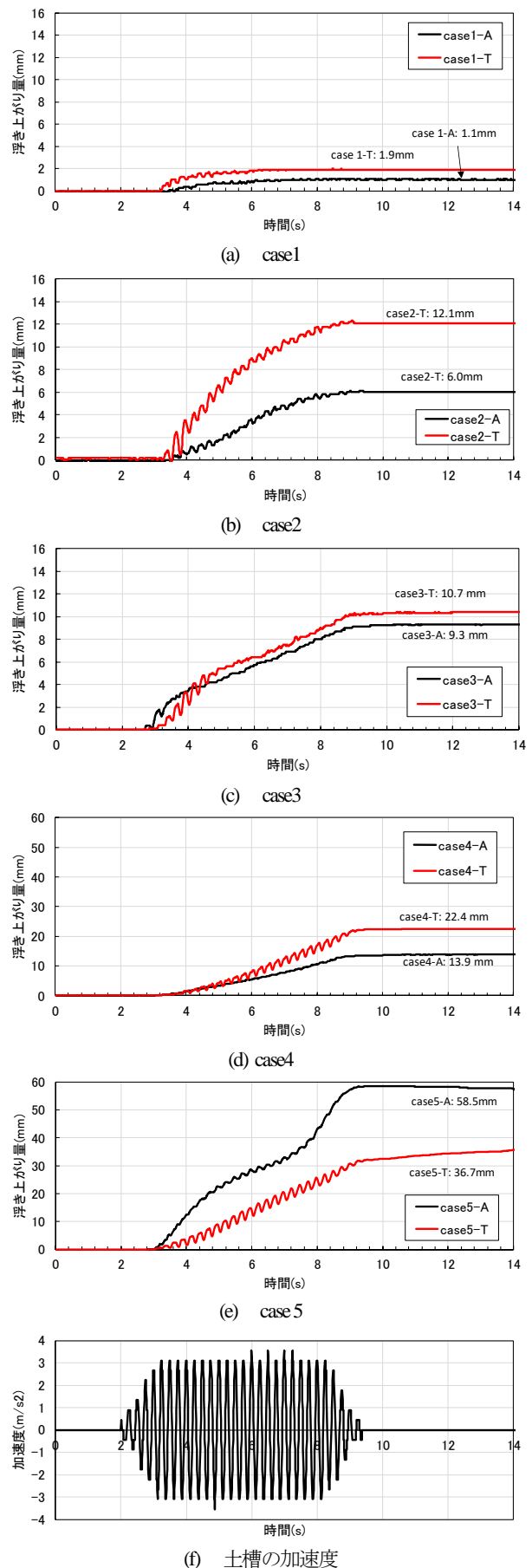
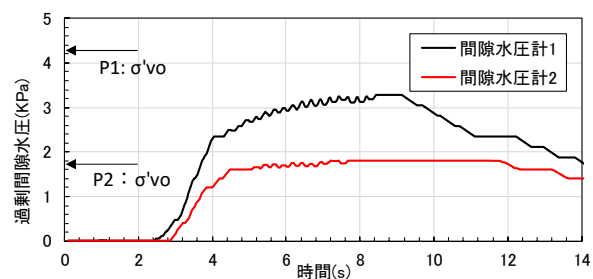
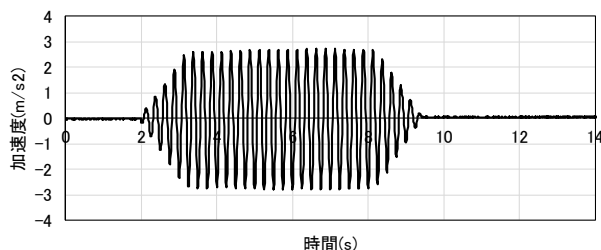


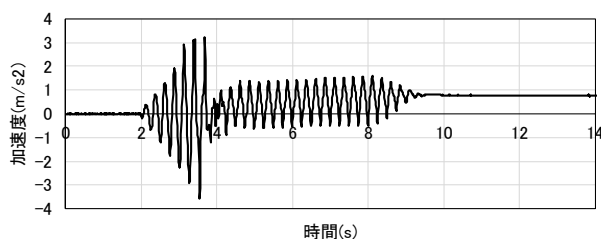
図-4 浮き上がり量の時刻歴



(a) 間隙水圧 (case1の場合)



(b) 加速計 P1 (case1-T, 底面から 250mm)



(c) 加速計 P2 (case1-T, 底面から 500mm)

図-5 過剰間隙水圧と加速度の継時変化

後述で考察する。4 ケースの浮き上がり量は 1 mm から 22 mm まで範囲はあるものの、管断面方向加振の浮き上がり量に対して、管軸方向加振の浮き上がり量の比は 0.50~0.87 であった。この比が管軸方向に加振したことによって地盤が管路下に回り込みにくくなったことへの浮き上がり低減の影響といえる。地中構造物の浮き上がりに関する予測式や解析的検討は多々行われているが、管軸方向に加振する場合には回り込みによる影響が減るために浮き上がり量は小さくなる。ただし、本実験で用いた供試管は無限に管路長があるわけではなく、両側の壁による拘束の影響を加味してそれぞれ約 130 mm 離して設置している。したがって、管軸方向加振のケースでも地盤の回り込み現象は少なからずあり、浮き上がり量の低減は、管路から側壁までの距離による低減とも考えられる。これらについては、今後、解析等でも明らかに検討する必要がある。

(2) 管路比重による浮き上がり (case1 と case2)

実験ケース case 1 と case 2 の管路比重による浮き上がりの差について検討する。管路位置の過剰間隙計 P2 の初期有効上載圧 σ'_{vo} を有効土被り圧として求めると約 4.23 kPa であり、過剰間隙水圧がこの値に達した時点

地盤の液状化と定義している。図-5 は P1, P2 の加速度と過剰間隙水圧の継時変化を示している。過剰間隙水圧の値からは、管路上部の P2 の地点では有効上載圧を過剰間隙水圧は超えており液状化していると考えられる。加速度波形からもテーパ部分が終了した後に、振幅が低減している。一方、管路位置では液状化に達しておらず、加速度波形もほぼ入力加速度のまま応答している。つまり、管よりも上側の地盤は液状化していたが、管路位置では液状化の状況に達していなかった。ただし、管路は case 1 の満水状態では僅かに浮き上がり、case 2 の空水状態では 12 mm 近く浮き上がった。みかけの管の密度によって浮上速度に差異が出たものといえる。

液状化の程度に影響を与える有効上載圧は実地盤において 100~200 kN/m² といわれ、1G の重力場の加振実験で土槽高さが 1m 程度であれば有効上載圧は 10 kN/m² 程度であり、実有効上載圧下での実験を行うことは難しい。しかし、小口径の埋設管の場合、土被り厚は 600 mm 以上となっており実埋設環境に近い状況である。また、土槽の幅 800 mm は一般的な管路施工で用いられる掘削幅に近い。つまり、埋め戻し土が液状化しても、周辺の原土が液状化しなければ case 1 に近い状況で管路も浮き上がり量はごく僅かであるといえる。

(3) 浮き上がり要因と浮き上がり量

加振加速度が同じで、空水状態で管のみかけの密度が小さい case 2 から case 5 を中心に浮き上がり要因とその浮き上がり量との関係について考察する。ちなみに、それぞれの実験ケースにおいて、有効上載圧と過剰間隙水圧との関係から、液状化の有無を確認したところ、case 2 では過剰間隙水圧比は 1 以下で液状化に至っておらず、case 3 では管路位置でほぼ 1 に近く、case 4 と case 5 は液状化に達していた。また、管軸方向と管断面方向のそれぞれの土槽で確認される加速度や過剰間隙水圧は、ほぼ同じであり、実験土槽による地盤の応答差はほとんどないと見なせられる。

図-6 は土被り厚と浮き上がり量の関係を、図-7 は管直径と管路下液状化層厚の比と浮き上がり量との関係をそれぞれ示す。case 5 を除いて case 2~case 4 において、土被り厚が小さくなれば浮き上がり量がやや大きくなる。浮き上がりの抵抗として、上載圧のせん断抵抗はそれほど大きくないことが推測される。一方、管直径/管路下液状化層厚が大きいほど浮き上がり量が小さくなっている。この比が大きいほど、地盤が回り込みにくくなるのが要因として考えられる。これらは過去の実験結果とも整合的であった⁸⁾。

(4) Case5 の揺動の可能性

本研究の実験ケース case 5 は土槽幅による地盤の管路

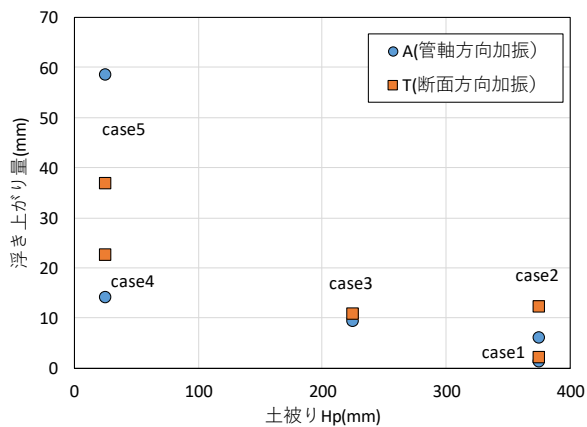


図-6 土被りと浮き上がり量との関係

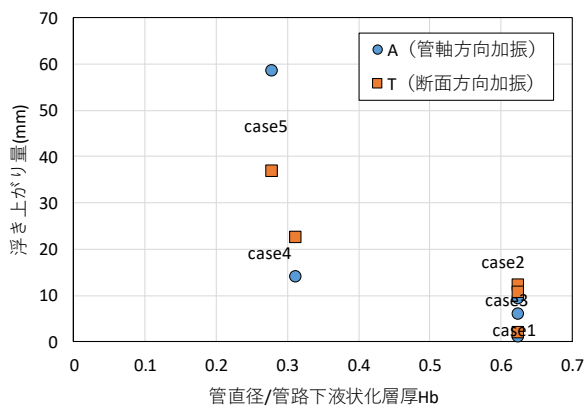


図-7 管路直径と管路下の液状化層厚 H_b のと浮き上がり量との関係

下への回り込みの影響を case 4 と比較できるように設定したものである。本来であれば、管から側壁までの距離が長い case 5 の方が地盤が管路下へ回り込みやすくなるために、管断面方向に水平加振した方が浮き上がり量が大きくなると推定していた。しかし、実験では管軸方向加振の方が浮き上がり量が大きくなった。加振方向による浮き上がり量の傾向が逆になった理由として、埋設管の土被りが浅かったために液状化によって液面揺動（スロッシング）が励起され、加振方向に対して管路長が長い方が両端の鉛直変位差が生じやすく管軸が傾くため、管路下に地盤がに回り込みやすくなったと考えられる。地盤表面のビデオ画像からも液面揺動を確認した。

6. 結論

本研究は、埋設管の管断面と管軸面のそれぞれの方向に同埋設条件で水平加振実験を行い、埋設管の浮き上がりの差異を比較した。本研究で得られた結論を以下にまとめて示す。

- 管断面に水平加振した浮き上がり量よりも管軸方向に水平加振した浮き上がり量の方が0.5~0.87倍小さくなった。なお、実験に用いた供試管は管長手方向に無限大ではなく、端部で少なからず砂の回り込みは生じている。実験で用いた模型形状と合わせて加振方向による影響を検討する必要がある。
- 本実験で用いた満水状態の埋設管を用いた実験（case 1）は、小口径水道管の実施工環境に近い状況である。この場合、埋め戻し土が液状化したとしても、原土が液状化しなければ管路下にも液状化層はほとんどないために浮き上がり量は僅かになると考えられ、加振方向による浮き上がり量の差異も僅かである。
- 側壁による拘束条件が緩く、地表浅くに設置した埋設管の場合（case 5）のみ、管断面方向よりも管軸方向の加振の方が浮き上がり量は大きくなった。このケースについては、液状化によって液面揺動（スロッシング）が励起され、地表面の上下振動によって管軸が傾き、より土が管路下に回り込みやすくなったと考えられる。
- 今後は、2次元解析、3次元解析によって加振方向による管路の浮き上り量の差異を確認するため、再現解析するための実験データを整理する必要がある。

REFERENCES

- 1) 安田 進, 田中 宏征, 龍田 昌毅, 山下 丈二: 地中構造物の浮上りに伴う液状化砂の回り込みに関する振動台実験, 第30回土質工学会研究発表会, pp. 1043-1044, 1995.
- 2) 中瀬 仁, 毛利 栄征, 安田 進, 末広 俊夫: 大型振動台による地中埋設構造物の浮上実験と浮上予測解析, 第38回地盤工学研究発表会, pp. 1847-1848, 2003. [Nakase, H., Mohri, Y., Yasuda, S., Suehiro, T.: Uplift test and prediction analysis of the uplift of underground structures using a large shaking table, The 38th JGS Conference on Geotechnical Engineering, 2003]
- 3) 田中 宏征, 日下 裕貴, 安田 進, 飯田 毅: 鋼矢板締切りによる地中構造物の液状化対策に関する実験的研究, 土木学会論文集 792号・III-2, pp. 792_87-792_102, 2005 [Tanaka, H., Kusaka, H., Yasuda, S., Iida, T.: An experimental study on the cut-off sheet pile method as for a liquefaction countermeasure for underground structures, Doboku Gakkai Ronbunshu, Vol.792, pp.792_87-792_102, 2005]
- 4) 毛利 栄征, 河端 俊典, 湯 浅明, Hoe I. Ling: 埋設パイプラインの地震時挙動と浮上対策, 地震工学研究発表会講演論文集, 26巻, pp. 773-776, 2001 [Mohri, Y., Kawabata, T., Yuasa, A.: Seismic behavior of buried pipelines and uplift countermeasures, Proc. of JSCE Earthquake Engineering Symposium, Vol.26, pp. , pp. 773-776, 2001]
- 5) 湯 浅明, 川上 哲太郎, 矢尾 板 啓: 埋設管路の地震時浮

- 上りに関する基礎的研究, 農業土木学会論文集 208号 p. 515-521,a2, 2000 [Yuarsa, A., Kawakami, T., Yaoita, A.: Fundamental study on flotation of underground structure during earthquake, Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, Vol. 208, pp.515-521,a2, 2000]
- 6) 本田中, 中瀬仁, 末広 俊夫: 大型振動台による地中埋設構造物の浮上実験に対する DEM 解析, 第 38 回地盤工学研究発表会, [Honda, A., Nakase,H., Suehiro, T.: A simulation study on shaking table test to underground structure using DEM, The 38th JGS Conference on Geotechnical Engineering, 2003]
- 7) 仙頭紀明, 齋藤和寿, 平山拓海: 液状化した地盤中の埋設管浮上メカニズムに着目した模型振動実験, 土木学会論文集 C (地圏工学) 74 巻 3 号 p. 332-341, 2018 [Sento, N., Saito, K., Hirayama, T. : Shaking model tests focused on the mechanism of the pipe uplift buried in the liquefied ground, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering) Vol. 74, Issue 3, pp. 332-341, 2018]
- 8) 佐々木哲也, 田村敬一: 地中構造物の浮き上がり予測手法に関する検討, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.1765-1766, 2002 [Sasaki, T., Tamura, K.: Simplified method to predict liquefaction-induced plift displacement of underground structures, The 37th JGS conference on Geotechnical Engineering, pp.1765-1766, 2002]

INFLUENCE OF EXCITATION DIRECTION ON UPLIFT OF BURIED PIPES DURING LIQUEFACTION

Kou YAGAMI, Yasuko KUWATA and Hideki OMURO

Previous studies using model tests and analyses have revealed that the buoyancy force triggered by liquefaction causes the ground around the pipe to move to the bottom of the pipe, which in turn causes the pipe to continue to lift. Despite advances in numerical analysis technology, there are limited methods to accurately evaluate the soil particle moving phenomenon. In addition, most of the existing model tests are conducted with horizontal excitation to the pipe cross section. In this study, horizontal excitation tests were conducted in both the pipe cross section and the pipe axis plane under the same underground conditions, in order to evaluate the effect of ground movement under liquefaction on the uplift of buried pipes. When the pipe was not affected by near-surface sloshing, the amount of lifting was 0.5 to 0.87 times smaller when the pipe was horizontally excited in the axial direction than when it was horizontally excited in the pipe cross section.