

遠心模型実験による液状化地盤中の 管路の動的変形挙動

飛田哲男¹・楯田泰子²・佐藤清³・宮本勝利⁴・小西康彦⁵・砂坂善雄⁶

¹正会員 京都大学防災研究所准教授 (〒611-0011宇治市五ヶ庄)

Email: tobita.tetsuo.8e@kyoto-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻准教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

kuwata@kobe-u.ac.jp

³正会員 (株)大林組 東京本社 土木本部生産技術本部設計第二部設計第三課 (〒108-8502港区港南2-15-2品川インターシティB棟)

Email: sato.kiyo@obayashi.co.jp

⁴正会員 (株)日水コン 西部水道事業部 大阪水道部 第1技術課 (〒564-0063吹田市江坂町1-23-10大同生命江坂ビル)

Email: miyamoto_k@nissuicon.co.jp

⁵正会員 (株)日水コン 下水道事業部東部マネジメント部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1 新宿スクエアタワー)

Email: konisi_y@nissuicon.co.jp

⁶正会員 鹿島建設(株) 構造設計部 土木設計本部 (〒107-8502港区赤坂6-5-30)

Email: sunasaka@kajima.com

本研究では、液状化時の管路の耐震性を評価するため、液状化地盤中、不飽和地盤中、地下水面付近に設置した管路に対し遠心模型実験(40g場)を行う。管路模型は、自重と曲げモーメントを実物に合わせた、長さ18.5mの片持ち梁形式とし、その動的挙動について考察する。実験の結果、1)もともと自重でたわんでいた管路は、加振により一度浮上するが、その後周辺地盤の沈下と共に大きく沈下した。地下水面付近に設置した管路の沈下量が最大となった。2)管路の変形抑制工法として、管路頂部に山形部材を取付けた工法の有効性を調べたところ、管路の沈下量は約20%抑制された。3)液状化時に管体に作用する力は主として曲げのみであったが、その大きさは無視できず、外力として照査される軸方向の離脱阻止力だけでなく、曲げモーメントに対する照査基準を設ける必要がある。

Key Words : *liquefaction, pipes, dynamic, centrifuge modeling*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、広い範囲で液状化被害が発生した。特に、上下水道等の地中埋設管に、抜けや破断等の被害が多数報告されている。例えば、茨城県鰯川浄水場では、場内で発生した液状化により、構造物周辺の埋め戻し地盤が沈下したために、建屋との取り付け部の伸縮可撓管が伸縮余裕を超えて脱管するといった被害が発生した。その他にも、共同溝の継ぎ目から砂が侵入するなどの被害が発生し、施設の完全復旧までに一ヶ月以上を要した^{1,3)}。

液状化地盤中の管路の動的挙動や管路に作用する力、またその変形メカニズムを解明するにあたっては、揺す

りこみ沈下の影響、液状化時の上載荷重、地盤反力、管体の弾塑性挙動等を適切に評価する必要がある。このように、現象が極めて複雑なため未解明な点が多く、これらを明らかにした上で管路の耐震性を合理的に評価する手法の構築が課題となっている。液状化地盤中の埋設管路の耐震性に関する既往の研究では、管路周辺地盤での水平ひずみに着目するなど地盤の変形に対する実験的検討や解析的検討が行われているが^{4,2)}、管体自体の挙動、管路に作用する力に着目した研究はあまり行われていない^{13, 14)}。上下水道の管路の照査基準には、管路縦断方向については、離脱防止力や許容曲げ角度等が設けられているが¹⁵⁾、液状化時の照査基準は必ずしも明確になっていないのが現状である。したがって、地震や液状化時の

地盤と管路の相互作用の影響を定量的に評価し、現行の設計基準の妥当性を確認することも必要である。

本研究では、液状化時の埋設管路の動的挙動と外力に焦点を当てた模型実験を行い、液状化地盤と管路の相互作用を定量的に評価し、管路の耐震性の向上につながる成果を得ることを目的とする。本研究では、特に管路縦断面（管路方向）の挙動に着目する。また、液状化対策の新たな工法として管路上部に三角形の屋根をとりつけたもの（アングル）を提案し、その効果と適用性について検討する。

2. 遠心模型実験の方法

本実験には、(株)大林組技術研究所の遠心力载荷装置を使用した。アームの回転軸から土槽の中心までの長さである有効回転半径は7.0m、最大遠心加速度は120G、最大加振力は120tf、载荷能力は700tf・Gと、既存の遠心力载荷装置の中で最も大型のものである¹⁶⁾。このような大型の遠心力载荷装置を用いることの利点として、相似則により模型のスケールが決定されるため、大型の構造物の挙動も再現可能となり、精度を確保できること、また複数の実験ケースを同時加振により行うことができることが挙げられる。

本実験では、内寸が1,950mm×585mm×800mm（幅×高さ×奥行き）のせん断土槽を使用した。本実験は40G場にて行うため、模型スケールは実物スケールの1/40となる。地盤材料は珪砂7号を用いた。一般に、飽和地盤の液状化現象について遠心場で実験する場合には、透水現象と振動現象の時間に関する相似則の整合を図るために、間隙流体の粘性を変えて実験を行う必要がある。このため、本実験では粘性流体としてメトロースを使用した。本実験は40G場で行うため、相似則に従い室温で水の40倍の粘度(40cSt)となるように調整して使用した。

管路模型は表-1と図-1に示す寸法のステンレス管（図-2）で製作した。管路模型の単位体積重量 γ と肉厚（曲げ剛性EI）は、実物の管路の満水時と等しくなるよう決定した。ただし、実験時には管路内は水ではなく空気で満たした。管路模型は、鉄製フランジ(継手)を介して角鋼管に回転および変位拘束条件の固定端（=片持ち梁）として接続した。

管体のひずみを計測するため、図-3に示すように管路内面の5断面の上下にひずみゲージを取り付けた。ただし、根元に最も近い1.28mの位置については、上下面と同様に左右にもひずみゲージを1対取り付け、4点でひずみを計測した。したがって、1本の管路模型に対して12枚のひずみゲージを設置した。固定端付近1.28mの位置では単軸ひずみ(曲げ応力+軸応力)、その他では曲げひ

ずみ(曲げ応力のみ)を測定することができる。後述する4ケースの実験を行うために上記の管路模型を4本準備した。

表-1 杭模型の諸元

	模型スケール(実物スケール)
材質	SUS304
長さ	462 mm (18.4 m)
外径	34 mm (1.36 m)
厚さ	1.65 mm (0.066 m)
ヤング係数E	$1.93 \times 10^8 \text{ kN/m}^2 (\mu)$
断面2次モーメントI	$2.20 \times 10^4 \text{ mm}^4 (5.63 \times 10^{-2} \text{ m}^2)$
曲げ剛性EI	$4.24 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{mm}^2 (1.09 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$
密度	$1500 \text{ kg/m}^3 (\mu)$

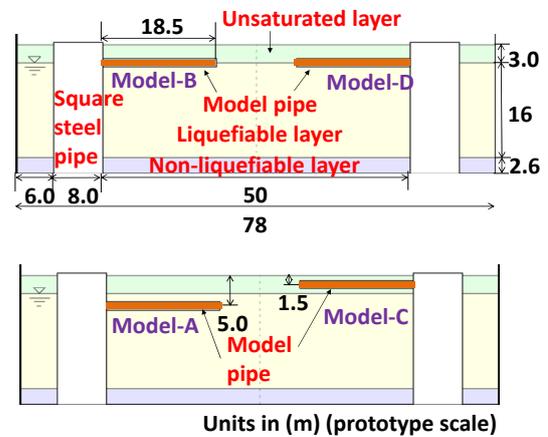


図-1 実験模型の断面図



図-2 管路模型

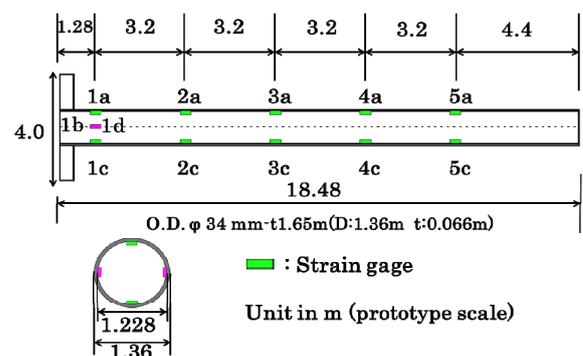


図-3 模型管路に添付したひずみゲージの位置

本実験において用いる計測機器は、土槽断面図(図-4)と平面図(図-5)に示すように、模型地盤内に間隙水圧計14台、鉛直加速度計7台、水平加速度計13台と地表面の変状をモニターする高速度カメラである。また、すべての管路先端にレーザー変位計のターゲットを設置し鉛直変位量を計測した。地中の変位は沈下盤の要領でレーザー変位計で計測した。データのサンプリング間隔はすべての計測機器において1/2,000秒とした。

本研究では、管路の深度を変えた4ケースについて加振実験を行った(表-2, 図-1)。地表面から5m(125mm)の液状化層内に設置した管路をModel A, 地表面から1.5m(37.5mm)の不飽和層内に設置した管路をModel C, 地表面から3.0m(75mm)の地下水面上に設置した管路をModel B, Model Dとした。Model BとDの違いは、液状化対策工法としてModel Dにはアルミニウム製のアングル(25mm×25mm, 厚さ1.0mm)(図-6)を管路模型の上に設置したことである。アングルを設置することで、流動化した液状化土を左右に分散し管路への被害が軽減されることを目的としている。管路模型の曲げ剛性EIが変化しないように、長さ40mmの10枚のアングルをシリコンシーラントで固定した。別途行った载荷試験より、アングルの有無に依らず曲げ剛性EIは変化していないことを確認した。アングルの質量は10枚で106g(モデルスケール)となり管路に比べて軽いため、管路模型の挙動に大きな影響はないと考えられる。

土槽底部から65mmの高さまでセメント改良土により非液状化層を作製し、その上部に相対密度が50%となるよう空中落下法により層厚400mmの砂地盤(硅砂7号)を作製した。間隙水圧計、加速度計、レーザー変位計で計測するターゲットは、図-4および図-5に示す所定の位置に設置した。

管路模型は、あらかじめ土槽に設置しておいた角鋼管に管路のフランジ部を固定し、隙間をシリコンシーラントで塞ぎ防水処理を行った。また、管路先端の開口部をシリコンシーラントで塞ぎ防水処理を施し、管路内部の気密性を確保した。また、管路先端にはレーザー変位計のターゲット板を受けるロッドを取付け、それを地表面上まで伸ばした。

乾燥砂地盤内の所定の位置にセンサーと管路模型を設置後、土槽を脱気槽に移動させ、脱気後、室温での粘度が40cStとなるように調整し脱気したメトロゾを土槽の下部から注水した。注水速度調整は水頭差と圧力差で行い、約3日かけて液状化層を飽和させた。その後、飽和砂層の上部に、同じ手順で層厚75mmの不飽和層を作った。給砂終了後、地表面の変位を測定するためのマーカーを10cm間隔で設置した。

本実験で用いた入力波は、実物スケールで最大200 gal,

1 Hz, 前後にテーパーをかけた継続時間60秒の正弦波とした(図-7)。なお、200 gal加振を行った後に、300 gal加振も同様に行った。加振方向は土槽の長手方向、つまり管軸方向である。以下、特に断りのない限り、実験値はプロトタイプスケールに換算したものである。また、1回目の加振である200 gal加振を中心に考察する。

表-2 モデルごとの管路模型の設置条件

Model	管路設置位置	管路設置深度	液状化対策工
A	液状化層	125 mm	無
B	地下水面上	75 mm	無
C	不飽和層	37.5 mm	無
D	地下水面上	75 mm	有

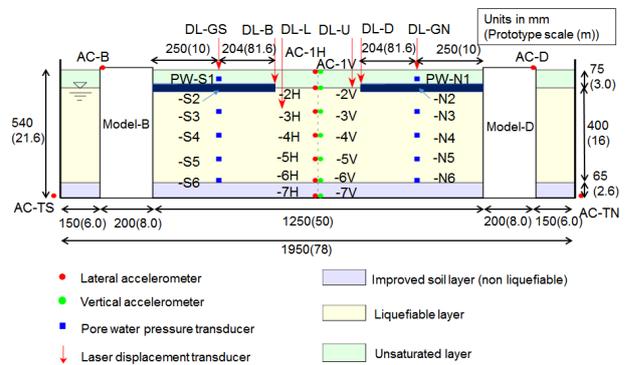


図-4 土槽断面図 (Model B, D 断面)

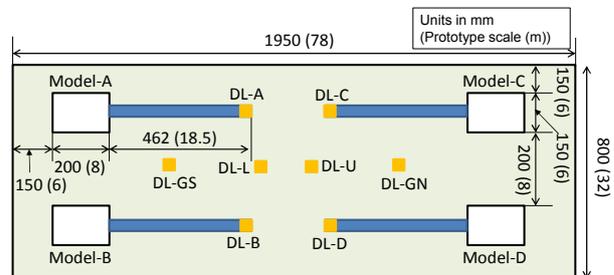


図-5 土槽平面図



図-6 山形部材 (アングル) を取り付けた模型管路(Model D)

3. 実験結果

(1) 加速度時刻歴

水平加速度時刻歴(図-7)より、入力とともに地盤内の水平加速度が増幅し始める。しかし、液状化層内に設置したAC-3H (GL-7.0m), AC-4H (GL-11.0m), AC-5H (GL-15.0m)では液状化が発生し地盤にせん断波が伝わらなくなるため加振開始から5秒から10秒ほどで振幅は大きく減衰している。このとき、より浅い位置に設置したAC-3Hの方が、深い位置のAC-5Hと比較して水平加速度の減衰が大きいことがわかる。また、図には示さないが角鋼管上に設置したAC-A~AC-Dについては入力波(振動台に設置したAC-TS, AC-TN)と同程度の加振振幅を示していることから、角鋼管を介して管路にも水平入力加速度が伝わっていたものと推察される。つまり、管路周辺地盤は、下方からの入射波だけでなく、接続する構造物の振動の影響も受けているといえる。これは実験に限らず、実現象としても同様のことが起きているものと思われる。

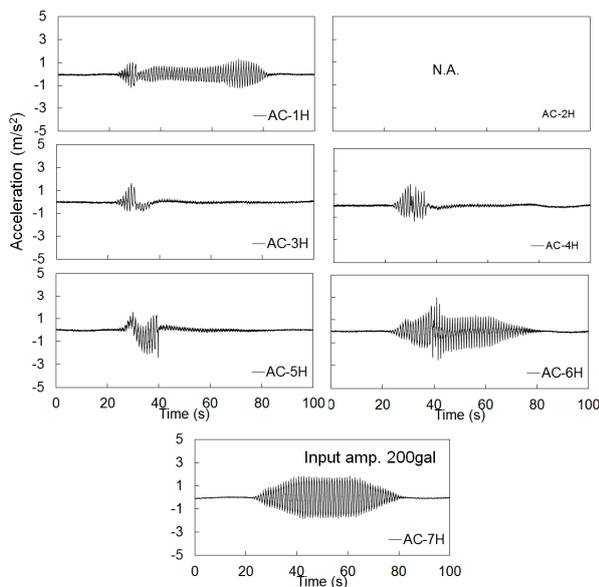


図-7 200 gal加振時の水平加速度時刻歴

(2) 過剰間隙水圧時刻歴

図-8に示す過剰間隙水圧比より、地下水面に近い位置ほど間隙水圧の上昇が早いことがわかる(PW-S3, PW-S4はおおよそ同じ)。約10秒で過剰間隙水圧比が約1.0に達しており、これは地盤水平加速度振幅が減衰する時間と一致する。つまり、過剰間隙水圧比が最大値に達し液状化が発生すると同時に水平加速度が地盤に伝わらなくなっている。

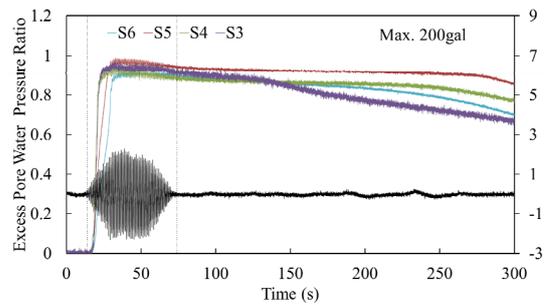


図-8 入力加速度と過剰間隙水圧時刻歴

(3) 管路の鉛直変位挙動

変位時刻歴(図-9(下))より、加振後DL-GS(地表面南側), DL-GN(地表面北側), DL-L(液状化層内), DL-U(地下水面)に設置したターゲットの変位が沈下している。一方、図-9(上)に示すように、管路先端に設置したDL-A, DL-B, DL-C, DL-Dの4つについては加振後に一度浮上した後に大きく沈下している。ただし、不飽和層に設置したDL-C(Model C管路)は、大きく浮上したあとわずかに沈下し、その後やや浮上している。また、地盤と管路の単位体積重量を比較すると、不飽和層が13.96 kN/m³, 液状化層が17.99 kN/m³, 管路模型が14.72 kN/m³であり、不飽和層に設置したModel Cと、液状化層内に設置したMode -Aでは浮上のメカニズムが異なる。すなわち、不飽和層に設置した管路Model Cの浮上は、加振により周辺地盤が緩んだため、管路に作用していた上載圧が除荷されたことによる。一方、液状化層に設置した管路Model Aの先端が水平位置付近まで浮上するのは、液状化時の有効拘束圧が低下したこと、ならびに管路に浮力が作用したこととの複合的な要因によると推察される。

遠心力載荷前の状態を鉛直変位のゼロ点とした管路模型先端の鉛直変位挙動の推移(図-10)は、初期状態から40gまで遠心力を載荷する過程での沈下、加振直後の浮上、液状化時の沈下、という一連の変位量がわかる。ここでMode -BとModel Dを比較する。先に述べたように両者は地下水面と同じ深度に位置し、Model Dには液状化対策工法として管路上部にアングルを取り付けてある。Model Dは、遠心力載荷により111.4 mm沈下し、加振によって90.56mm浮上、その後液状化によって247.9mm沈下した。Model Bと比較すると、アングルを用いたModel Dの方が沈下量、浮上量共に小さいことがわかる。特に沈下量は、約20%小さくなっており有意な差が得られている。この原因として、アングル頂部の鋭角部によって地盤内に応力が集中するため、局所的に地盤が破壊状態にあり、強度が低下していることが考えられる。つまり、鋭角部で軟化した土が周辺地盤の沈下とともにアングルの傾斜に沿って移動することで、あたかも管路が地盤を切り裂いているかのような現象が起きているものと思わ

れる。Model Bの管路では、管路頂部が曲面であり応力集中の度合いが小さく、地盤沈下に伴い管路に沿って土は移動するものの相対的に大きな強度を有するため、管路上面に作用する力が大きくその沈下量が大きくなるものと考えられる。一方、浮上量が小さくなった原因としては、アングルにより自重が大きくなったことが原因であると考えられる。ただし、加振前の遠心力载荷による沈下量はModel Bが109.6 mm、Model Dが111.4 mmであり、アングルを設置したことによる沈下量の差は1.788 mmと小さく、管路の沈下に対する自重増加の影響は少ない。

以上より、管路の浮上、沈下抑制工法として、管路頂部にアングルを設置することの効果を確認できた。これにより、地盤を局部的に破壊することで構造物の変形を抑制することができるという知見が得られた。

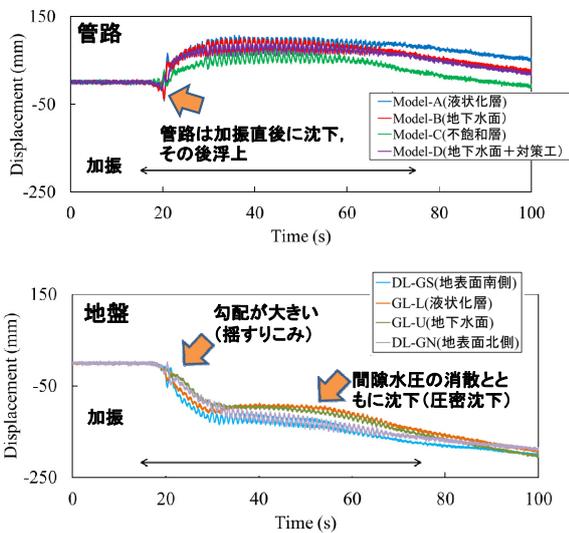


図-9 加振中の管路先端(上)と地盤(下)の鉛直変位時刻歴

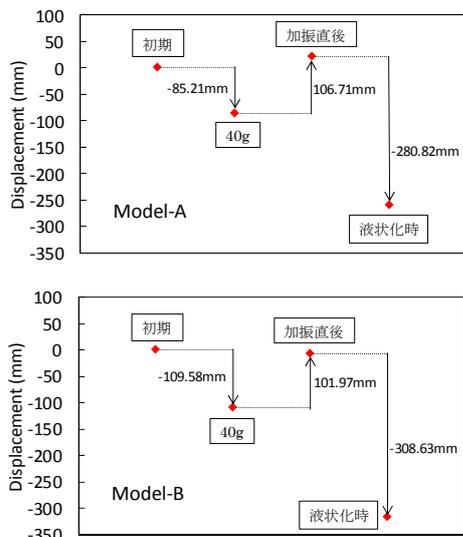


図-10 (右上に続く) 管路先端の鉛直変位の推移(Model A-B)

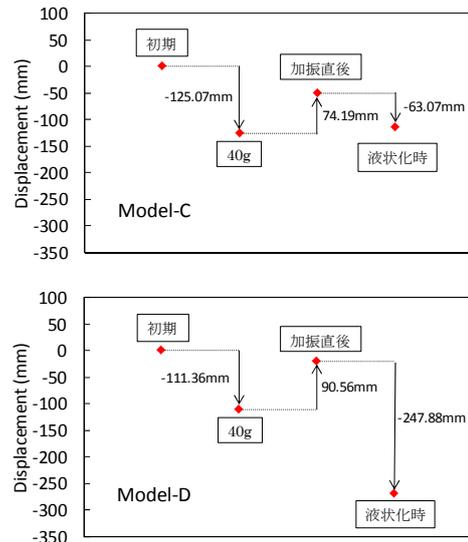


図-10 管路先端の鉛直変位の推移(Model C-D)

(4) 管体の曲げモーメント

図-11に示す管体の最大曲げモーメント図の比較では、管路の沈下量が小さいためModel Cは省略する。同図より、液状化地盤中に設置した管路(Model A)の固定端付近の残留モーメントは約20,000kNmであり、他のケースのほぼ2倍となっている。一方、管路先端の沈下量はModel Bの方が約28cm大きい(図-10)。このことから、管路に作用する外力が、管路が完全に液状化地盤中にある場合(Model A)と、上部に非液状化地盤が存在する場合(Model B)とで異なることが示唆される。

モーメント分布の形状(図-11)から、管路が完全に液状化地盤中にある場合には、固定端付近にモーメントが集中した状態に近く、一方、上部に非液状化地盤が存在する場合には、一様な荷重が載っている状態に近い。

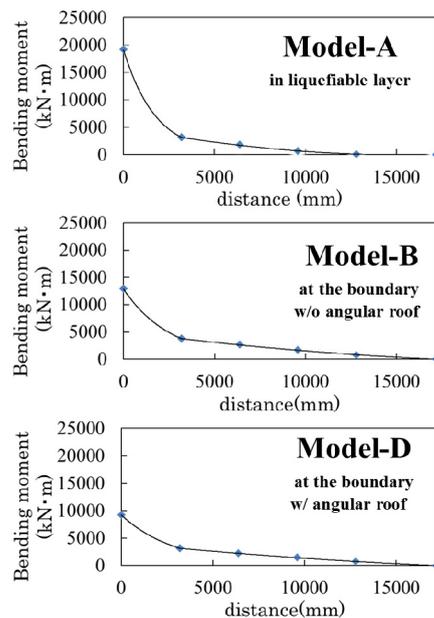


図-11 管体の最大ひずみ発生時の曲げモーメント図

また、アングルを設置したModel Dの最大曲げモーメントが最小となっていることは、残留沈下量(図-10)が三者のうちで最小となっていることと調和的である。このことから、液状化地盤中の管路について、アングルによる変形抑制効果が期待できるものと思われる。

4. まとめ

本研究では液状化時の管路の耐震性を評価するために、液状化地盤中、不飽和地盤中、地下水面上に設置した管路について遠心模型実験を行った。管路模型は、自重と曲げモーメントを一般的な管路に合わせた長さ18.5mの片持ち梁形式とし、液状化地盤中の管路の動的挙動について考察した。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 地震が発生すると、構造物と共に管路自身が揺れることにより自重と上載荷重によってたわんでいた管路がもとに戻るため浮上するが、その後液状化によって周辺地盤が沈下することで管路が大きく沈下する。本実験において、その沈下量は地下水面上、すなわち管路上部が非液状化層である場合が最大となった。一方、浮上量が最大となったのは、液状化層内に管路がある場合であった。
- 2) 液状化時の管路の変形を抑制する対策工法としてアングルを用いた工法の有効性を実験的に調べた。その結果、液状化後の地盤沈下に伴う管路の沈下量は、対策工のない場合に比べ約20%抑制され、管路の浮上、沈下抑制工法として、管路頂部にアングルを設置することの効果が確認できた。このメカニズムとしては、アングル頂部の鋭角部によって地盤内に応力が集中するため、地盤が破壊状態(強度低下)にあることが考えられる。つまり、鋭角部で軟化した土が周辺地盤の沈下とともにアングルの傾斜に沿って移動することで、あたかも管路が地盤を切り裂いているかのような現象が起きているものと思われる。本実験結果から、地盤を局所的に破壊することで構造物の変形を抑制することができるという知見が得られた。
- 3) 本実験条件下では、液状化時に管体に作用する力は曲げ方向のみであったが、その大きさは無視できない。本実験と同様の建屋との取り合い部の管路については、その設計照査基準として軸方向の離脱阻止力(3DkN)だけでなく、液状化時の曲げモーメントに起因する縁応力に対する照査基準を設ける必要がある。
本実験条件下では、地震直後に管路が一度浮上し、液状化時に地盤沈下と共に管路が沈下するといった動的挙動を確認したが、実被害に照らし合わせると、液状化時の沈下の際に大きな被害が生じる可能性があり、実設計においてはこのことを考慮することが望ましい。

謝辞: 本研究は、公益財団法人関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の助成を受けて行いました。また、本実験は、土木学会地震工学委員会水循環NW災害軽減対策研究小委員会WG2広域液状化対策の活動の一環として実施されました。実験においては、京都大学大学院社会基盤工学専攻の芦野貴之君と浦谷啓太君の協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鋏田泰子, 片桐信: 土木学会東日本大震災被害調査団, 緊急地震被害調査報告書第10章水道施設の被害, 土木学会, 2011.
- 2) 株式会社日水コン: 液状化現象による浄水場被害の状況分析事例の報告, 2013.
- 3) Yamaguchi, A., Mori, T., Kazama, M. and Yoshida, N.: Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Soils and Foundations*, Vol. 52, No. 5, 811-829, 2012.
- 4) Koseki, J., Matsuo, O. and Koga, Y.: Uplift behavior of underground structures caused by liquefaction of surrounding soil during earthquake. *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 37, No. 1, 97-108, 1997.
- 5) Ling, H. I., Mohri, Y., Kawabata, T., Liu, H., Burke, C. and Sun, L.: Centrifuge modeling of seismic behavior of large-diameter pipe in liquefiable soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 12, 1092-1101, 2003.
- 6) 渦岡 良介, 立石 章: 液状化地盤中の埋設管の浮上り挙動に関する2次元有効応力解析, 第48回地盤工学シンポジウム論文集, 239~246, 2003.
- 7) 1) 規矩大義, 安田進, 田中智宏, 伊藤忠: 2003年十勝沖地震における豊頃町の下水道被害, 第59回土木学会年次学術講演会, 423-424, 2004.
- 8) Cheuk, C. K., White, D. J. and Bolton, M. D.: Uplift mechanism of pipes buried in sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 2, 154-163, 2008.
- 9) Chou, J.C., Kutter, B. L., Travasarou, T. and Chacko, J. M.: Centrifuge modeling of seismically-induced uplift for the BART transbay tube, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 8, 754-765, 2008.
- 10) Tateishi, A., Oka, F., Kotani, Y. and Asai, R.: Numerical analysis of uplift behavior of an underground structure due to liquefaction using an effective stress analysis method. *Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, T. Kokusho, Y. Tsukamoto and M. Yoshimine (eds) Taylor and Francis Group, London, ISBN978-0-415-55614-9, 1071-1079, 2009.
- 11) Tobita, T., Iai, S., Kang, G.-C. and Konishi, Y.: Observed damage of wastewater pipelines and estimated manhole uplifts during the 2004 Niigata Chuetsu, Japan, earthquake. *Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, TCLEE2009, Oakland, California, USA: 791-802, 2009.
- 12) Uno, H., Oka, F., Tanizaki, S. and Tateishi, A.: Centrifuge

- model tests on the uplift behavior of an underground structure during liquefaction and its numerical modeling. Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, T. Kokusho, Y. Tsukamoto and M. Yoshimine (eds) Taylor and Francis Group, London, ISBN987-0-415-55614-9: 1041-1049, 2009.
- 13) 飛田哲男, 荒木恵徳, 鍛田泰子, 宮本勝利, 佐藤清, 小西康彦, 砂坂善雄: 建物近傍の地震時地盤ひずみに影響する埋戻し領域の形状, 第 34 回土木学会地震工学研究発表会, A13-693, 2014.
- 14) 佐藤清, 松田隆: 遠心模型実験による液状化地盤中のトンネル構造物の応答評価, 2006.
- 15) 社団法人日本水道協会: 水道施設設計指針 2000 年版, 2000.
- 16) 株式会社大林組技術研究所, (<http://www.obayashi.co.jp/tri/>) (閲覧日: 2015 年 2 月 3 日).

(2009.7.1 受付)

CENTIFUGE MODELING ON PIPES IN LIQUEFIABLE GROUND

Tetsuo TOBITA, Yasuko KUWATA, Kiyoshi SATO, Katsutoshi MIYAMATO,
Yasuhiko KONISHI and Yoshio SUNASAKA

Many pipes in the liquefied ground suffered serious damages due to large-scale liquefaction caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan, earthquake. One of the issues pointed out after the earthquake is the dynamic behavior and the mechanism of pipes near a structure in the liquefied ground. This study focuses on evaluating the dynamic behavior through centrifuge model test. Test results show that the uplift of pipes in the liquefied ground occurred during an earthquake and liquefaction happens at that time. After an earthquake, pipes start to settle with increasing effective stress. The characteristic of damage mechanism depends on the depth of pipes and the state of ground (in liquefiable layer, at ground water level, or in the unsaturated layer). The data also shows that the direction of force acting on pipes during liquefaction was only bending, which requires careful attention to reconsider the design criteria for pipes and joints in liquefiable ground.