

埋設パイプラインの地震時挙動と浮上対策

毛利 栄征¹・河端 俊典²・湯浅明³・Hoe I.Ling⁴

1 農業工学研究所 土質研究室長 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

2 神戸大学 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

3 (株) 解析技術サービス (〒104-0051 東京都中央区佃3-2-10 オークンビル)

4 Columbia University, Civil Engineering (632 Mudd 500 West 120th Street New York, NY10027)

地中に埋設されるパイプラインは地震時に地盤が液状化することによって、浮上や蛇行を生じて大きな被災を受けることがある。本報告では3次元振動台による模型振動実験を実施し、地中に埋設されたパイプラインの地震時挙動を確認した。その結果、水平1方向だけに加振した場合に比べて、鉛直動が入力されると地盤の過剰間隙水圧の応答は増幅され、液状化が発生してパイプの水平加速度応答が減少した状態でもパイプは鉛直方向に大きな振動を受けており、パイプの浮上速度は2倍以上になることが分かった。さらに、ジオグリッドと碎石によってパイプ周辺部分の埋戻し地盤を一体化することによって、パイプの浮上抵抗力を高めることができることが分かった。

Key Words: Buried pipe, earthquake, liquefaction, shaking table test, floatation, geogrid, FEM

1. はじめに

埋設管は周辺地盤や埋戻し砂の液状化に伴って大きな浮力を受けるために、浮上や蛇行を生じて地震時に大きな被害が発生することが報告されている。本報告では3次元振動実験を実施し鉛直方向の振動が埋設管や周辺地盤の挙動に与える影響を調べ、埋設管の浮上防止のための対策工法の効果について検討した。

2. 埋設実験の概要

実験は、鋼製の土槽(幅4.6m、高さ1.8m、奥行き1m)に飽和した水平地盤を作成し、模型パイプ(硬質塩化ビニル管、直径420mm、長さ970mm)を深さ40cmに埋設した。土槽は加振方向に平行に3つに分割(WEST, CENTER, EAST)し、同時に3つのタイプモデルを実験できるようにした。模型パイプの埋設は地盤作成と同時にを行った。土槽は3次元振動台によって水平方向あるいは水平鉛直方向同時に加振した。実験に用いた砂は平均粒径 D_{50} が0.30、均等係数 U_c が2.49の均一な砂である。地盤の作成は砂を水中落下して緩い飽和した堆積状態を作る方法を採用し、地盤の深さ毎の相対密度 Dr は56%から61%であった。

実験モデルの断面と計測センサーの位置を

図-1に示す。パイプの浮上量はパイプ本体に取り付けたワイヤーを用いてプーリー式変位計によって計測した。実験の条件を表1に示す。MODEL_1は緩い地盤だけのもので、MODEL_2はパイプを所定の位置に設置した無補強の場合である。MODEL_3はパイプ上半分の埋戻し材(6号碎石)をジオグリッドで包み込んで一体化したものである。MODEL_5はパイプの全周を碎石で埋戻したもので、MODEL_6は管底部とパイプの両サイドに鉛直ドレーン柱(6号碎石、幅15cm)を設置したものである。パイプの見かけの単位体積重量は 2.4kN/m^3 である。碎石は6号碎石(粒径5mmから13mm)を用いたが、グリッドのメッシュの開きは5mmであるから、ほとんどの碎石粒子はグリッドから流出することはない。碎石部分の密度は 18.6 から 19.8kN/m^3 であった。振動台は全ケースともsine波5.0Hzで管軸直角方向に、最大加速度 300gal で水平方向に加振した。鉛直方向の振動を入力する場合は最大加速度 150gal とした。

振動台で計測された加速度波形を図-2に示す。振動台の加速度波形はテーパー部分で若干乱れているが目標波形をほぼ再現している。

3. 結果と考察

3.1 鉛直動の影響

図-3に、パイプの浮上量を示す。水平加振だけのTEST_1の場合には加振直後から緩やかに浮上し始め、150mm～200mm程度の浮上が加振中に観測されている。補強のMODEL_3は加振停止と同時に浮上も停止し、その有効性が現れている。無補強のMODEL_2は、加振停止後も浮上はおさまらず、停止から2分後に地表面まで浮上している。水平動と同時に鉛直方向にも加振したTEST_2では水平加振のみに比べて2倍以上の浮上速度で挙動している。無補強モデルは加振中に地表面まで浮上しているが、補強モデルの場合には地表面までの大きな浮上は発生していない。この場合も補強モデルの最終浮上量は小さく、有効性を確認することができる。図-4には間隙水圧応答を示す。地表面近く(No. 20)に比べて深い位置(No. 23)では過剰間隙水圧の発生が遅れており、液状化領域が地表面から深部に拡大していつていることが分かる。鉛直動を入力したモデルでは波形振幅が大きく、地盤の鉛直方向の慣性力の影響によって、大きな過剰間隙水圧が発生しやすいことが分かる。図-5には補強モデル(MODEL-3)の場合のパイプ周辺部の間隙水圧応答を示す。無補強の場合と基本的な挙動は同様であるが碎石に近

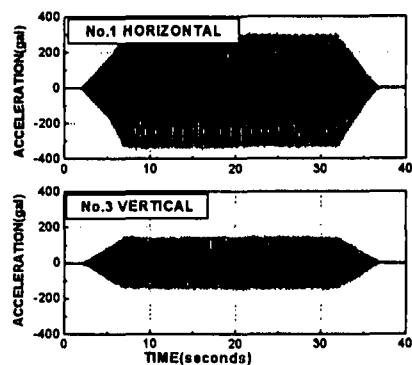


図-2 入力波

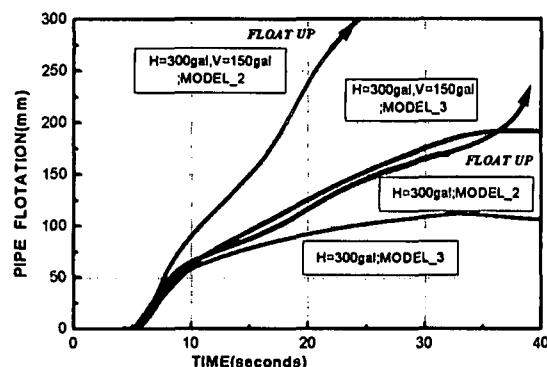


図-3 パイプの浮上

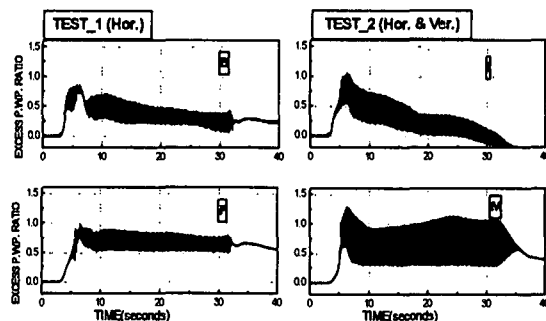


図-4 過剰間隙水圧の応答 (MODEL_1)

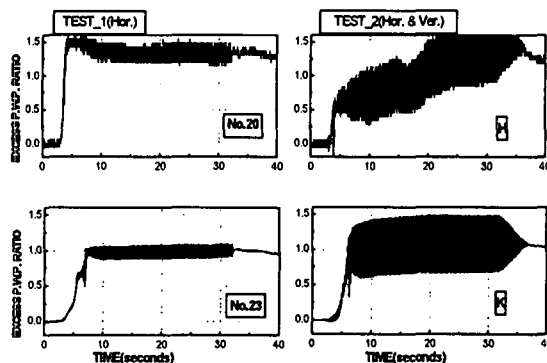


図-5 過剰間隙水圧の応答 (MODEL_3)

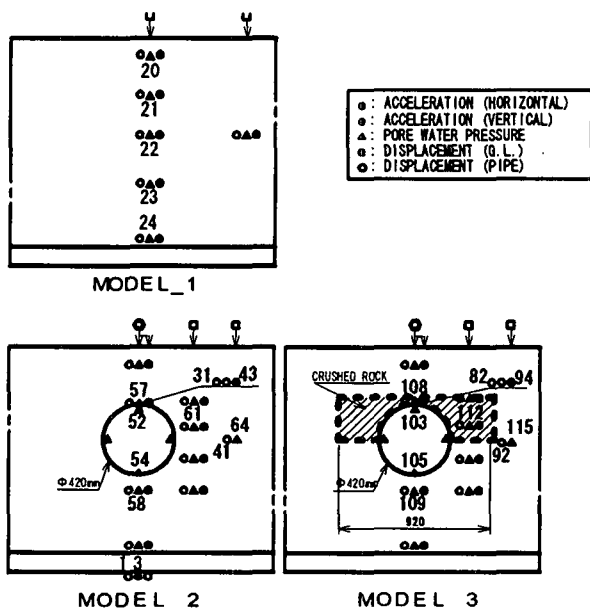


図-1 モデルの概要

表-1 モデルの条件

	INPUT ACCELERATION	CENTER	WEST	EAST
TEST_1	H=300gal	MODEL_1	MODEL_2	MODEL_3
TEST_2	H=300gal V=150gal	MODEL_1	MODEL_2	MODEL_3

い部分の地盤 (No. 115, 112) の間隙水圧の上昇は低くなっている。鉛直動を入力した場合には応答振幅が大きくなっているが、基本的な傾向は全く同様である。図-6 は加速度応答を示す。何れのモデルでも周辺地盤の間隙水圧の波形からも明かなように、地盤の液状化直後から急激にパイプの加速度が小さくなる。鉛直動を入力した場合には地盤が液状化しパイプの水平加速度が小さくなっている状態でも、パイプには入力加速度以上の大きな鉛直加速度が発生している。すなわち、パイプの浮上については鉛直動がパイプの振動に与える影響とともに、地盤中の大きな間隙水圧上昇の影響を考慮する必要があることが分かる。

3.2 浮上対策の効果

図-7 に実験後のパイプの状況を示す。碎石層も含めて測量したものであるが、MODEL_3 の場合にはパイプの上半分に埋戻した碎石をジオグリッドで包み込んでいるために、この部分が一体となってパイプの浮上に抵抗しカウンターウェイトとしての機能を発揮している。

4. 解析結果

Towhata らによって提案されている応力ひずみモデル (図-8) を用いて有効応力解析を実施した。過剰間隙水圧の評価は Iai らによるモデルを用いて FLIP を用いて地盤の液状化とパイプ挙動解析を実施した。MODEL_1 の実験結果の逆解析からダイレタンシー定数などを求めた。図-9 a にパイプ側部の地盤の過剰間隙水圧の応答を示す。

図-9 b, c は MODEL_2 の過剰間隙水圧とパイプの浮上を表している。間隙水圧の応答は消散過程で差異が認められるものの、傾向をよく表している。パイプの浮上量は実験結果 17cm に対して 13cm であった。

図-10 には MODEL_3 の挙動を示す。過剰間隙水圧とパイプの浮上については MODEL_2 の場合と同じ傾向を示している。パイプの浮上量は実験結果 10cm に対して、解析結果は 6cm であった。これらの結果から、碎石をパイプの上部に設置した MODEL_3 はパイプの浮上を防止する効果を有していることが確認される。図-11 にはパイプと周辺地盤の変状の様子を示す。MODEL_2 はパイプの両サイドから鉛直上向きにせん断面が発達しているのに対して、MODEL_3 は碎石層が一体となって挙動しているためにパイプの下部に回りこむような地盤の変形が抑制されていることがわかる。

5. まとめ

鉛直方向の入力振動が埋設管の浮上に与える影響について模型振動実験を実施した。その結果、鉛直動が入力されることによって、地盤中に発生する過剰間隙水圧の応答の振幅が大きくなることが確認された。また、地盤の液状化の発生に伴ってパイプの水平方向の加速度応答が減衰しても、鉛直方向の応答は液状化前よりも大きくなる傾向が見られ、浮上の評価には鉛直動の影響を考慮しなければならないことがわかる。さらに、ジオグリッドをパイプの上部から敷設し、パイプの周辺の埋戻し材を補強 (拘束)

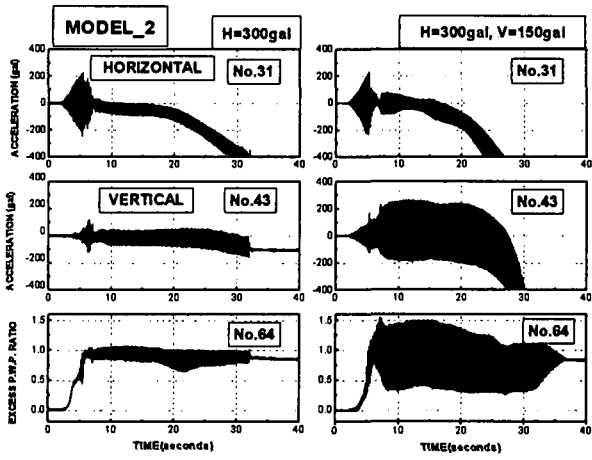


図-6 パイプの加速度応答 (MODEL_2)

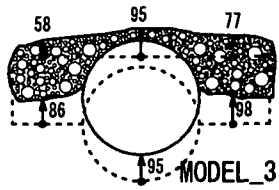


図-7 パイプと周辺地盤の変状 (MODEL_3)

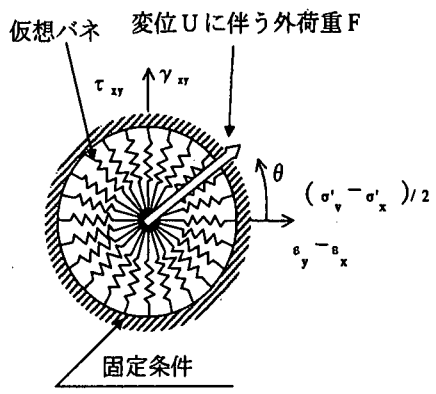


図-8 応力-ひずみモデル (Towhata et al., 1985)

するモデルは浮上抑制効果が大きく、ジオグリッドによって碎石層を一体化しているために大きな地盤変状を生じる場合にも浮上防止効果を期待することができることが明らかとなった。

参考文献

- 1)Junichi KOSEKI et all:Uplift Behavior of Under ground Structures Caused by Lilquefaction of Surrounding Soil During Earthquake. S&F, Vol. 37, 1997
- 2)関口宏二 他：埋設管路の液状化対策工法に関する実験的考察、土木学会論文集、第382号、Ⅲ-7、1987
- 3)片田敏行 他：液状化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究、土木学会論文集、第306号、1981
- 4)Iai, S. & Matsunaga, Y. & Kameoka, T. 1992. Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation. Soils and Foundations. Vol.32. No.2. 16-20.
- 5)Iwasaki, T. & Tatsuoka, F. & Takagi, Y. 1978. Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. Soils and Foundations. Vol.18. No.1. 39-56.
- 6)Koseki, J. & Koga, Y. 1990. Uplift of Semi-buried Structures in Liquefiable Sands during Earthquake. Proceedings of 8 th Japan Earthquake Engineering Symposium. Vol.1. 933-938.
- 7)Mohri, Y. & Kawabata, T. & Ling, H. I. 1999. Experimental study on the Effects of Vertical Shaking on the Behavior of Underground Pipelines. Second International Conference On Earthquake Geotechnical Engineering. June. Lisboa. Portugal.
- 8)Towhata, I. & Ishihara, K. 1985. Shear Work And Pore Water Pressure In Undrained Shear. Soils and Foundations. Vol.25. No.3. 73-84. Sept.

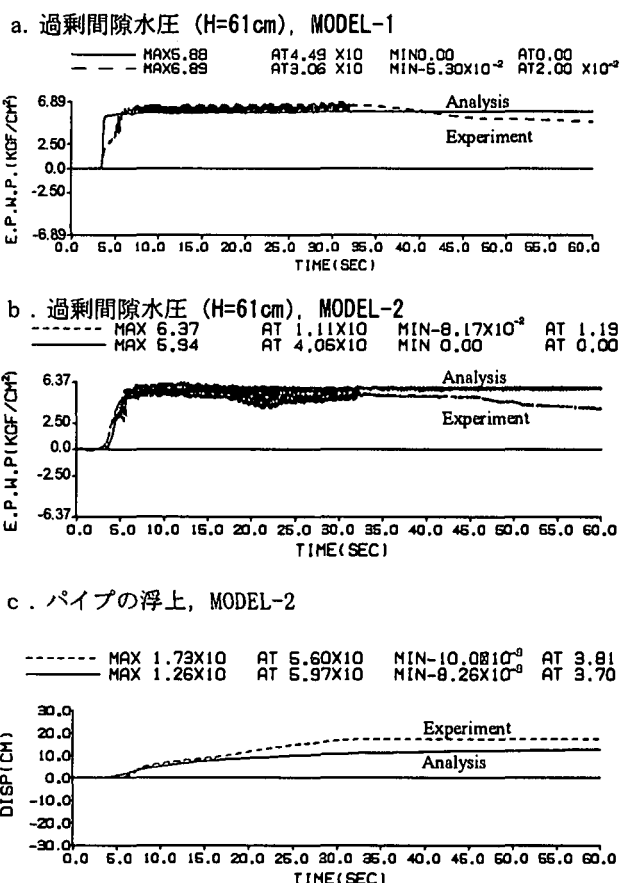


図-9 過剰間隙水圧の挙動とパイプの浮上 (MODEL_2)

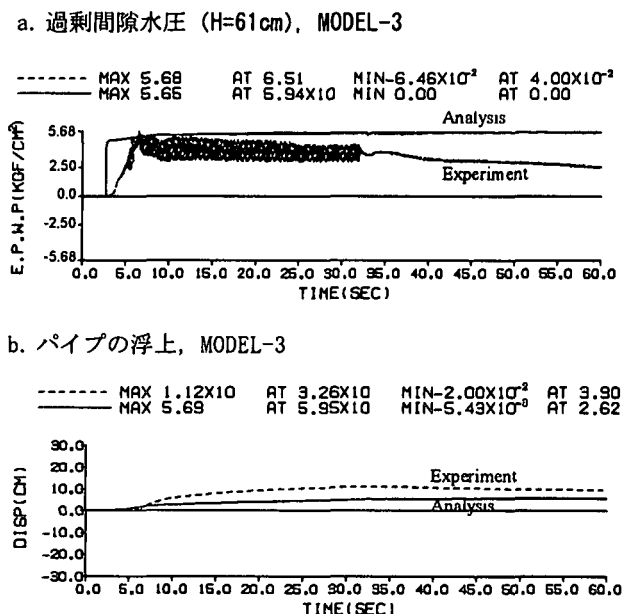


図-10 パイプと周辺地盤の変状 (MODEL_3)

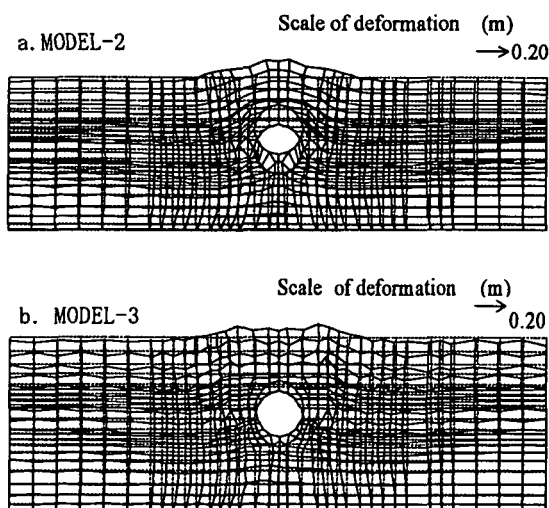


図-11 パイプと周辺地盤の変状 (MODEL_3)