

液状化に伴う側方流動による埋設管の変形挙動 について (その1: 遠心模型振動実験)

高田至郎¹・小川安雄²・小口憲武³・北野哲司⁴・佐藤清⁵・松田隆⁶・松本真明⁷

¹フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

²正会員 大阪ガス (株) 技術部 土木建築技術チーム (〒541-0046 大阪市中央区平野町4-1-2)

³工修 東京ガス (株) 導管部 幹線メンテナンス技術グループ (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

⁴工修 東邦ガス (株) 供給管理部 (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町19-18)

⁵正会員 工修 (株) 大林組 技術研究所 (〒204-0004 東京都清瀬市下清戸4-640)

⁶正会員 工博 (株) 大林組 技術研究所 (〒204-0004 東京都清瀬市下清戸4-640)

⁷正会員 工修 住友金属工業 (株) エネルギーエンジニアリング 技術部 (〒104-6111 東京都中央区晴海1-8-11)

地震時の地盤液状化に伴う側方流動が埋設配管に与える影響を把握するために、遠心模型振動実験を実施した。遠心重力場 $30g$ での模型実験は、ケーソン護岸と上部非液状化および下部液状化層からなる背後地盤によって構成され、加振時の背後地盤液状化と護岸変位により側方流動を発生させた。配管構造物は外径 600mm 、肉厚 15mm の高圧ガス導管を対象として、 90° 曲部を含む構造とし、上部非液状化層に埋設した。実験の結果、側方流動により模型管に塑性変形が生じるまでの変位が生じ、地盤変位と管変位の関係や管の変形形状などが把握できた。

Key Words : Liquefaction, Lateral Flow, Underground Pipe, Centrifuge Model Test, Large Deformation

1. はじめに

地震時の液状化にともなう側方流動により地盤に大規模な変位が発生すると、そこに埋設された管路等には大きな変形が生じる。埋設管の被害は周辺地盤の残留変位と密接に関係しており、埋設管の耐震性評価において、側方流動による地盤の大規模変位を反映することは重要な課題の一つである^{1), 2)}。

本研究では実測されている $3\sim 4\text{m}$ 規模の側方流動量による埋設管の損傷メカニズムを直接再現することを目的として、遠心模型振動実験³⁾により、液状化による地盤の側方流動と、それに伴う埋設管の大変形挙動の再現を試みた。

2. 実験概要

(1) 実験模型

実験は可能な限り大きな側方流動を発生させ、埋設管を塑性変形させることを目標とした。側方流動の発生機構は、比較的大きな側方流動を発生させることが出来る護岸タイプとし、護岸の高さは井合らの研究⁴⁾を参考にして決定した。埋設する模型管は高圧ガス導管のうち大口径となる、外径 600mm 、肉厚

15mm のガス導管を対象とし、縮小模型の作製精度を考慮して、遠心重力場を $30g$ に設定した。

図-1に実験模型(縮小率 $1/30$)の断面図および平面図を示す。使用土槽は、内寸法で長さ $190\text{cm}\times$ 幅 $80\text{cm}\times$ 高さ 60cm の鋼製剛土槽である。模型はケーソン護岸、上部非液状化層と下部液状化層による護岸背後地盤、上部非液状化層の埋設管(以後、模型管と呼ぶ)によって構成される。地下水位面は非液状化層と液状化層の境界 $GL-16\text{cm}$ (実寸法 4.8m :以後、()内に実寸法を示す)である。側方流動は液状化層によって引き起こされ、模型管の変形は非液状化層によって生じる。ケーソン護岸はモルタル製で高さ 40cm (12m)、幅 22cm (6.6m)とした。地盤材料には8号硅砂を用い、厚さ 16cm (4.8m)の上部非液状化層は相対密度 70% に調整し、下部液状化層は遠心場で相対密度 40% になるよう、 $1g$ 場での作製時には相対密度 26% に調整した。地下水には脱気水を用いたが、これは $30g$ 場での下部液状化層の透水係数が $8.1\times 10^{-2}\text{cm/s}$ であり、通常の砂地盤が示す透水係数の範囲内であることによる。表-1に模型地盤の諸元を示す。

模型管は外径 $D=20\text{mm}$ (600mm)、肉厚 0.5mm (15mm)で、 63cm (18.9m)の直管部と 90° 曲管部(管軸曲げ半径 $R=3D$)を有するL字型とした。模型管は外径 22mm 、肉厚 1.5mm の機械構造用炭素鋼管(STKM11A)を原管

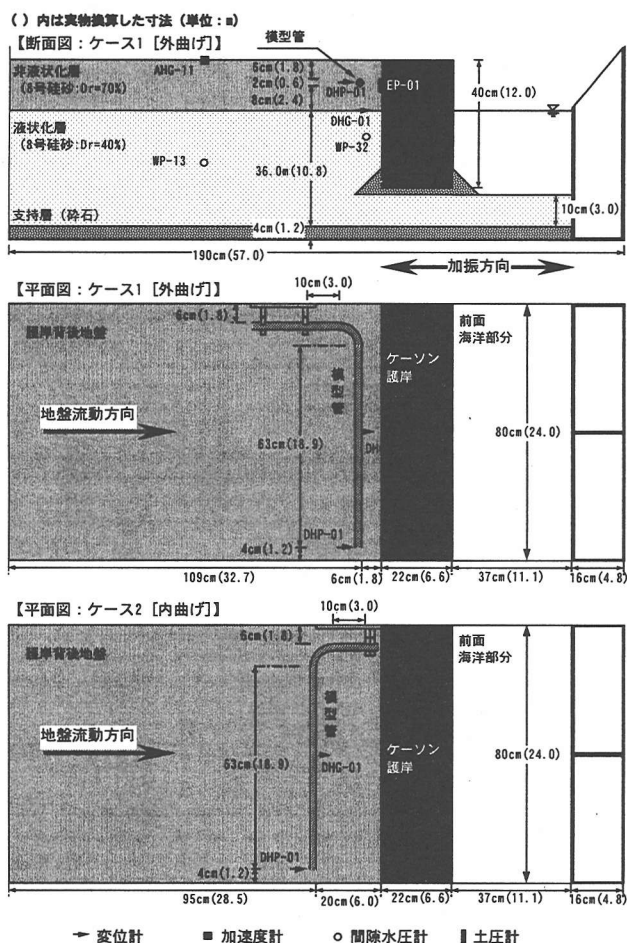


図-1 実験模型と計器配置

表-1 模型地盤の諸元

項目	密度 (t/m ³)	相対密度 (%)	間隙比	透水係数 (cm/s)
上部非液状化層	1.38 (乾燥)	70	0.92	—
下部液状化層	1.74 (飽和)	26	1.22	8.1×10^{-2}
ケーソン護岸	2.16	—	—	—

※) 透水係数は 30g 場に換算した値

として、機械切削により肉厚を0.5mm に加工したのち、マンドレルにより冷間曲げ加工した。模型管は上部非液状化層の土被り6cm(1.8m)の深さに埋設し、63cm の直管部が地盤流動方向に直交するように配置した。また、図-1に示すように、曲管部から10cm離れた位置で、アルミ製治具により模型管を土槽に固定した。模型管内部は中空とし、シリコンにより端部に薄く蓋をして砂と水の浸入を防いだ。模型管の配置は、地盤流動により曲管部が90度より開く方向に変形するケース1[外曲げ]と、閉じる方向に変形するケース2[内曲げ]とした。

(2) 加振および計測方法

加振は60Hz (2Hz) 30波の正弦波とし、振幅は12.2g (400Gal) を目標とした (図-2)。各ケースの最大振

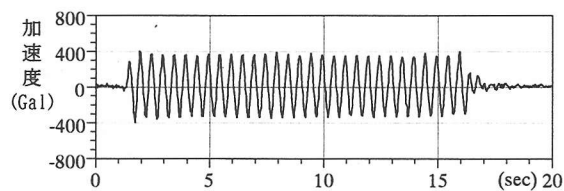


図-2 入力加速度 (ケース1)

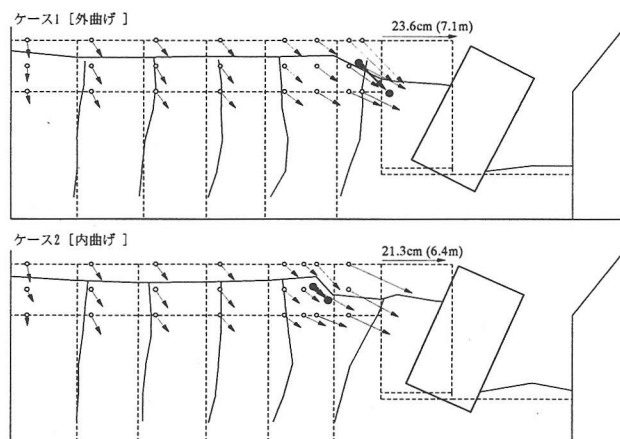


図-3 模型の最終変形断面

幅はケース1が403Gal, ケース2が442Gal であった。計測項目は護岸・模型管の水平変位、地盤の水平変位および沈下、加速度、間隙水圧、護岸の壁面土圧等とした。図-1に主な計器配置を示す。護岸および地盤の水平変位はレーザー式変位計を用い、専用の治具により水平成分のみを計測した。模型管端部の水平変位はワイヤー式変位計を用いて計測した。

3. 実験結果

(1) 護岸および地盤の残留変形

図-3は模型の最終変形断面を示しており、点線が初期状態、実線が実験終了後の状態である。黒丸は模型管端部の位置を示す。図より、護岸が大きく海側へ変位し、背後地盤が側方流動した様子がわかる。ただし、図に示す護岸の変位は実験終了後に実測した結果なので、遠心力除荷時の地盤拘束圧の低下によって進行した変位も含まれている。加振直後の護岸天端の水平変位は図中に矢印および変位量 (ケース1: 7.1m, ケース2: 6.4m) で示した。

非液状化層のうち模型管前面側では、護岸の移動に伴い、地盤が崩れるように変状している。模型管背面側の地盤は管により流動が妨げられ、その結果大きな土圧が発生し、管に大きな塑性変形が生じた。

(2) 護岸背後地盤の液状化と側方流動

図-4はケース1における背後地盤の過剰間隙水圧

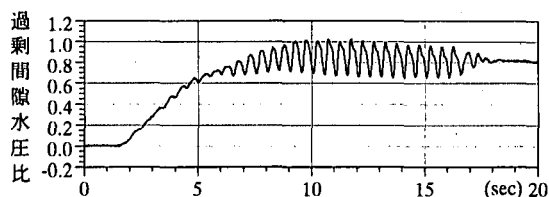


図-4 過剰間隙水圧比 (ケース1: WP-13)

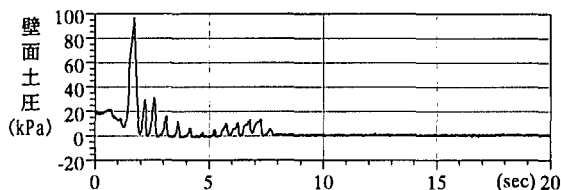


図-5 壁面土圧 (ケース1: EP-01)

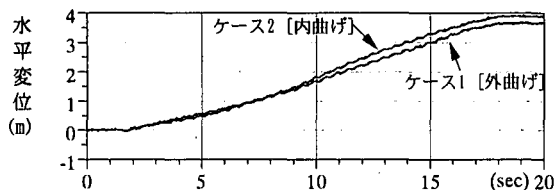


図-6 地盤流動 (DHG-01)

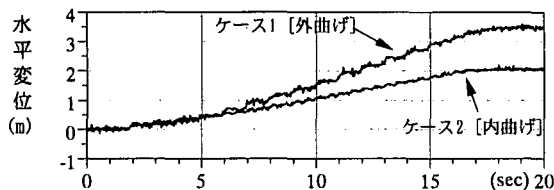


図-7 模型管端部の水平変位 (DHP-01)

比[WP-13]を示しているが、その最大値は1.0に達しており、背後地盤の液状化が確認できる。図-5は、ケース1における護岸背面の壁面土圧[EP-01]を示している。護岸上部に設置した[EP-01]では加振1波目にピークがあり、その後、土圧はほとんど作用していない。最初のピークは護岸が慣性力によって内陸方向へ変位するために生じる地盤圧縮応力であり、その後、護岸が先行して海側へ移動するため、地盤との接触による土圧が低減したと考えられる。

(3) 模型管の変位と地盤流動量

図-6に地盤水平変位[DHG-01]を示す。計測位置は、上部非液状化層と下部液状化層の境界で、模型管の直下から3cm 護岸側である(図-1参照)。ケース1, 2ともに水平変位量は3~4mに達している。ただし、各ケースともターゲットの設置が模型管からやや護岸よりなので、図-3に示すようなクラックを伴う地盤崩壊の影響を含んでいる。図-7は模型管端部の水平変位[DHP-01]を示している。最終変位量はケース1[外曲げ]が3.8m、ケース2[内曲げ]が2.2mである。

別途実施された模型管の変形解析⁵⁾では、入力として管周辺の地盤拘束力の他、管背面での地盤変位量を用いる。そこで、地盤の残留変位分布から、模

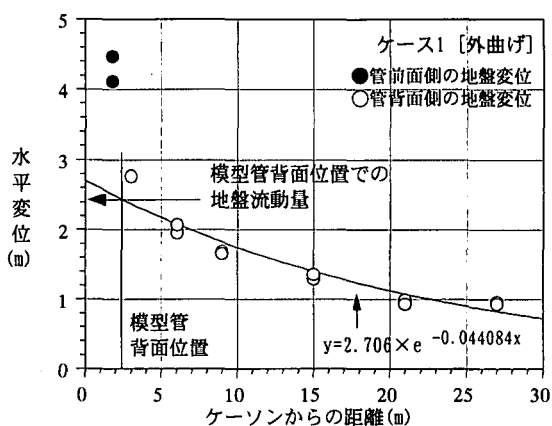


図-8 模型管背面での地盤流動量の推定

表-2 模型管背面位置での地盤流動量

	護岸から管背面までの距離	管背面での地盤流動量
ケース1(外曲げ)	2.4m	2.45m
ケース2(内曲げ)	6.6m	1.70m

型管背面位置での地盤変位量を推定した。図-8は模型管と同じ深さに設置した地中ターゲットによる地盤の残留水平変位分布を示しており、横軸は護岸背面からの距離、縦軸が地盤の水平変位量である。●は模型管前面側、○は模型管背面側での測定結果である。管前面側では地盤崩壊の影響を含んでいるので、管背面側での記録のみを対象として指数関数による回帰分析を行い(図中の実線および数式)、模型管背面位置での地盤変位量を推定した(表-2)。

(4) 模型管の変形

図-9に側方流動による模型管の自由端側の変形量を示す。曲終位置(曲管部と直管部との境界)からの距離を横軸、側方流動による直管部の水平変位量を縦軸とし、いずれも実物換算した値である。ここでの模型管の変形量は、管を地盤から掘り出して計測しているので、地盤拘束力から開放されることにより弾性変形成分が回復した後の状態を示している。

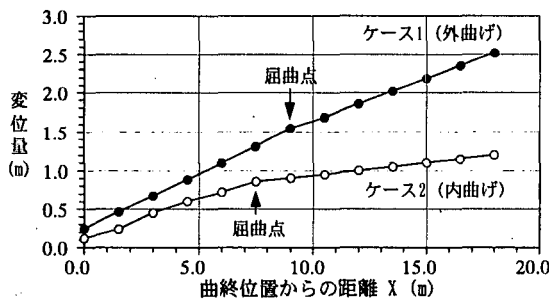
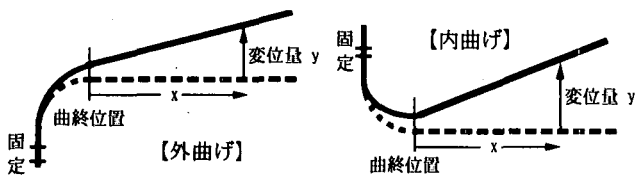


図-9 模型管（直管部）の変形

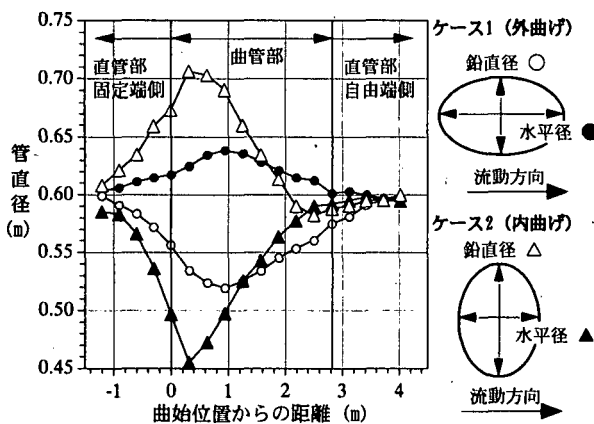


図-10 模型管（曲管部）の変形

図より、ケース1、2ともに直管部の中央付近に屈曲点が生じ、曲管部とともに変形が集中していることがわかる。このような変形モードになるのは、周辺地盤の剛性が大きく、比較的大きな等分布荷重が作用する場合であり、周辺地盤の剛性が小さい場合や、液状化した地盤が管周辺をすり抜ける場合は屈曲しないか、屈曲してもその角度は小さいと考えられる。

屈曲点とともに変形が集中する曲管部では、外曲げ・内曲げともに、本来真円である断面が扁平に変形する。図-10は実験後の曲管部における、鉛直方向の外径と水平方向の外径を示している。ケース1[外曲げ]では、鉛直方向につぶれ、ケース2[内曲げ]では、水平方向につぶれた形状となるが、この変形モードは、気中で載荷試験をした場合と同様である。

4. まとめ

本研究では、遠心模型振動実験により地震時にケーソン護岸の背後に発生する地盤の側方流動と、そ

れに伴う埋設管の変形の再現を試みた。以下に結果をまとめる。

- ①護岸モデルによる遠心模型振動実験の結果、約4.0mの側方流動が発生し、埋設管端部では外曲げ3.8m、内曲げ2.2mの水平変位が記録された。
- ②このとき、模型管背面の地盤変位量は外曲げ2.45m、内曲げ1.70mと推定された。
- ③実験において、模型管の変形は塑性領域に達し、直管部に屈曲点が生じて、曲管部とともに変形が集中した。
- ④曲管部の断面扁平は、外曲げと内曲げで方向が異なり、外曲げでは上下方向から、内曲げでは水平方向から潰された形状となった。

謝辞：本研究における実験結果は（社）日本ガス協会が経済産業省資源エネルギー庁からの委託により、平成8年度から調査研究を進めてきた「ガス導管液状化対策調査」における平成12年度の成果の一部である。経済産業省をはじめとする関係各位、「ガス導管液状化対策調査研究特別委員会（委員長：片山恒雄 文部科学省防災科学技術研究所長）」の各委員に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 高田至郎，小川安雄，吉崎浩司，北野哲司，岡村一男：液状化側方流動を受ける埋設管の大変形挙動に関するハイブリッド弾塑性解析手法，第10回日本地震工学シンポジウム，1998年11月。
- 2) K. Shimamura, M. Hamada, S. Yasuda, K. Ohtomo, Y. Fujita, S. Kojima, Y. Taji: Load on pipes buried in a non-liquefaction layer due to liquefaction induced ground displacement, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000.1.
- 3) 佐藤清，松田隆，高田至郎，小川安雄，小口憲武，北野哲司，松本真明：遠心模型振動実験を用いた地盤側方流動による埋設ガス導管の変形特性の考察，第36回地盤工学研究発表会（2001）投稿中。
- 4) 井合進，一井康二，森田年一，佐藤幸博：既往の地震事例に見られる液状化時の護岸変形量について，第2回阪神・淡路大震災に関する學術講演会論文集，1997.1, pp259-264.
- 5) 高田至郎，小川安雄，小口憲武，北野哲司，松本真明，岡村一男，佐藤清：液状化に伴う側方流動による埋設管の変形挙動について，第26回地震工学研究発表会（2001）投稿中。