

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2 : FEM解析手法の検証)

高田至郎¹・小川安雄²・小口憲武³・北野哲司⁴・松本真明⁵・岡村一男⁶・佐藤 清⁷

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

²正会員 大阪ガス株式会社 技術部 (〒541-0046 大阪市中央区平野町4-1-2)

³正会員 工修 東京ガス株式会社 導管部 (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

⁴工修 東邦ガス株式会社 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 住友金属工業株式会社 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)

⁶工博 住友金属工業株式会社 総合技術研究所 (〒660-0891 尼崎市扶桑町1-8)

⁷正会員 工修 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-0004 東京都清瀬市下清戸4-640)

液状化による側方流動が作用した場合の埋設管の変形を評価する手法として、埋設管と地盤との相互作用に非線形ばねを導入した解析モデルによる有限要素法(FEM)解析手法が考えられる。本研究では、遠心振動実験とFEM解析を用いて、一方向地盤変状を受ける鋼管の変形を調査し、このFEM解析手法の妥当性を検討した。まず、遠心振動実験に用いた縮尺1/30の鋼管と実寸法の鋼管について、変形と外力に関して相似則が成立することを、曲管の曲げ解析により確認した。次に、遠心実験に用いる曲管を30倍に拡大したFEMモデルを用いて、側方流動による埋設管の内曲げならびに外曲げ変形を解析した。解析結果は実験結果と良い一致を示し、埋設管の変形挙動を評価する上でこの解析手法が有効であることを明らかにした。

Key Words : Liquefaction, lateral flow, buried pipe, finite element method, centrifugal force

1. 緒 言

液状化による地盤変状を受ける埋設管の耐震設計方法を構築するためには、まず、地盤変状が作用したときの管の変形挙動について解析可能な手法を確立する必要がある。埋設管の変形を解析するモデルとして、有限要素法を用いて管体をはり要素あるいはシェル要素で表現し、これらの要素の節点に地盤との相互作用力を模擬する非線形ばねを結合した解析手法が提案されている^{1),2)}。しかし、この解析手法の妥当性について、十分な検証はなされていない。

そこで本研究では、遠心力を利用した縮小モデルでの実験結果³⁾との比較によって、解析手法の妥当性を検討した。遠心模型では、遠心力によって重力のN倍の物体力を与えることによって、評価対象の大きさを1/Nに縮小している。この相似則は微小変形範囲であれば厳密に成り立つが⁴⁾、幾何学的非線形性を無視できない大変形領域においても、相似則が成立することを確認する必要がある。そこで縮小モデルと実寸法モデルとの間で、変形量と荷重について相似則が成立することを明らかにする。つぎに、埋設管をシェル要素、地盤と管の間の拘束力を非線形ばね要素でモデル化し、遠心模型振動実験条件と同一条件での埋設管の変形を解析した。得られた管の変形状態について、実験結果と比較することによって用いた解析手法の妥当性を検証した。

2. 相似則の検証

(1) 検証方法

600A90° 曲管とその寸法を1/N倍 (N=30) した曲管について、内曲げ変形と外曲げ変形の有限要素解析を実施し、以下の相似則の成立を検証する。

$$P = N^2 \cdot P_e \quad (1)$$

$$\delta = N \cdot \delta_e \quad (2)$$

$$M = N^3 \cdot M_e \quad (3)$$

$$\omega = \omega_e \quad (4)$$

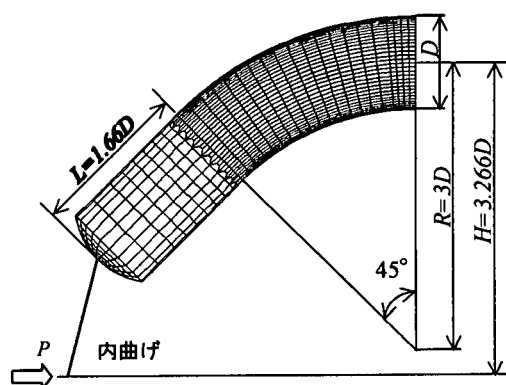


図-1 相似則の確認に用いた有限要素モデル(内曲げ)

ここで、 P , δ , M , ω はそれぞれ、600A90° 曲管に負荷する荷重、発生する変位量、曲げモーメント、曲げ角度を表し、添え字_eは1/Nの縮小モデルにおける諸量である。内曲げ解析の有限要素モデルを図-1に示す。外曲げの場合には、 $H=7.945D$, $L=5.0D$ とした。材料定数は、ヤング率206GPa, ポアソン比0.3, 降伏応力532.5MPa, 加工硬化係数2060MPaを用いた。管には内圧を作用させ、その値は実物大モデルならびに縮小モデルにおいて共通であり、8.92MPaとした。実物大と縮小の2つのモデルでの計算結果に対して、式(1)～式(4)が成立することを明らかにすることで、相似則が検証できる。

(2)解析結果

内曲げについて荷重-変位関係を図-2に、外曲げについてモーメント-曲げ角度関係を図-3にそれぞれ示す。縮小モデルの結果を式(1)～式(4)の右边を用いて変換した結果は、実寸法モデルの結果と一致し、相似則が成立することが確認された。外曲げの場合、図-4に示すように、直管部で背側に座屈変形が生じるが、この変形状況についても縮小モデルの結果と実寸法モデルの結果は完全な相似形であった。

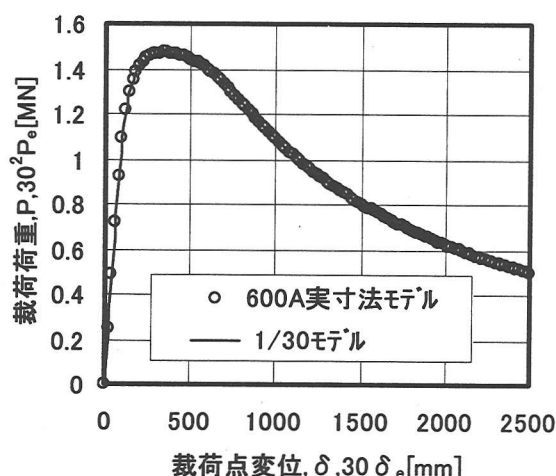


図-2 曲管内曲げにおける荷重-変位関係

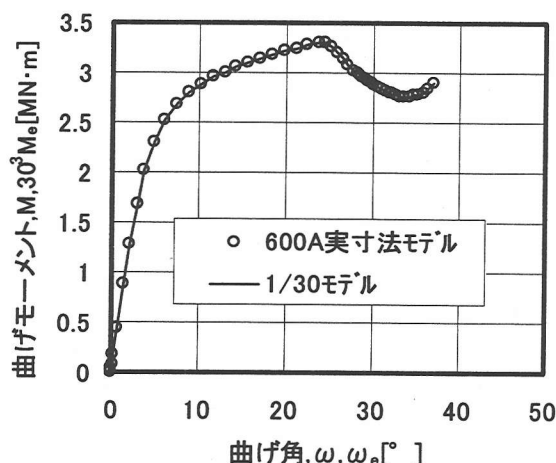


図-3 曲管外曲げにおけるモーメント-曲げ角関係

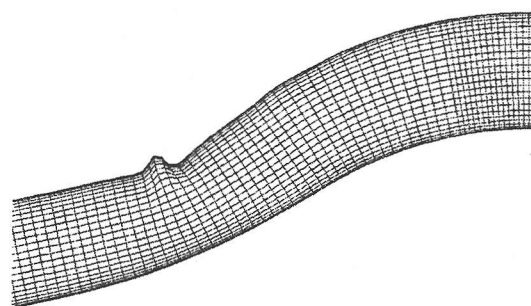


図-4 外曲げによる曲管ならびに直管の変形状況

3. 遠心振動実験条件での解析

(1)遠心振動実験条件のモデル化

別報³⁾において報告する模型実験では、遠心力によって30Gの加速度に相当する環境下で液状化による側方流動を生じさせた。図-5に内曲げ実験時の土槽の状況を示す。

鋼管には、内径19mm、管厚1.5mmの機械構造用炭素鋼鋼管(STKM11A)を素材にして、切削加工によって外径20mm、管厚0.5mmに仕上げたものを用い、半径3DR、90°の曲管部を含むL字状に曲加工した。重力加速度に対して $N=30$ であるので、外径600mm、肉厚15mmの鋼管を模擬していることになる。導管モデルの応力-ひずみ関係は、切削加工前の素管から試験片を採取し、引張試験を行って採取した。曲管部は冷間曲げ加工を行っているために加工硬化している。そこで曲管部については、幾何学的に算出される曲げ加工ひずみの分だけ鋼管の各部が加工硬化していると考えて修正した応力-ひずみ関係を与えた。

L字状の導管模型の短辺部端部は土槽壁面に治具を介してボルト締結されており、固定治具の端部以後の部分をシェル要素を用いてモデル化し、固定治具端部に完全固定の境界条件を与えた。導管模型に

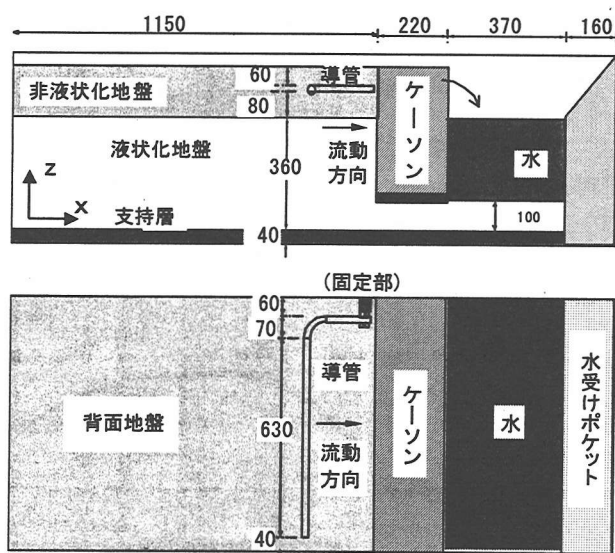


図-5 遠心模型実験の土槽(内曲げ実験時)

については、試験前に水中超音波による管肉厚測定(管周方向45°ピッチ、管軸方向11箇所)と、3次元形状測定器による外形状の測定を行い、その結果を用いて形状モデルを構築した。

遠心振動装置で実施した模型実験結果における、鋼管埋設部の地盤流動量(直管630mm部分の平均値)を抽出し、モデル全体に同一量の地盤変位が作用するものとして解析した。地盤ばねモデルとして図-6に示すものを用いた。地盤変位量をこの地盤ばねを介して埋設管モデルに強制変位として与えた。なお、地盤流動はx方向だけではなく、z方向にも若干生じているが、解析モデルではz方向の流動は無視し、x方向の流動のみを考慮した。また、解析モデルは模型実験サイズではなく、30倍した実規模サイズで構築した。

解析コードはABAQUSを使用し埋設管路モデルのメッシュは円周方向48分割とし、1積分点、7積分層数の4節点非線形シェル要素を採用して解析を行った。

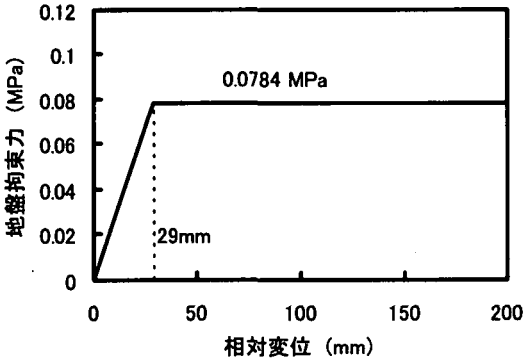


図-6 非線形地盤ばねモデル

(2)解析結果

遠心模型実験は外曲げおよび内曲げについてそれぞれ2条件づつ実施されたことを受けて、解析も全4条件について実施した。外曲げをCase-A, B、内曲げをCase-C, Dと表すことにする。

a)外曲げ

外曲げモードで地盤を流動させたときの結果を図-7～図-9に示す。図-7は管自由端部の変位の測定結果と計算結果を比較したものである。なお、図-7については、相似則に基づいて実規模に換算した結果を示している。

外曲げの場合、計算結果は実験結果よりも管端部変位をやや小さめに予測しているが、概ね、計算結果と良い一致を示した。計算結果において、Case-Aの場合は地盤変位2.4m、Case-Bの場合は地盤変位3mにおいて、管端変位が急激に減少している部分は、地中から掘出したときのスプリングバックの計算結果を示している。この計算は地盤を流動させた後、地盤ばねを消去することによって行っている。

図-8には、曲管部の変形を管外径の変化で示している。外曲げであるために管は地盤流動方向が長軸となるように楕円化している。Case-Aの計算結果は実験結果よりもやや大きめの楕円化を示している

が、Case-Bでは非常に良い一致を得た。
図-9は地盤から掘出した後の管形状を計算と実験とで比較したものであり、この結果についても実験と解析で良い一致を見た。図-7に示したように管端部の変位は地盤変位よりも大きい。このことは管端部においては地盤流動方向とは逆方向の力を受けることになる。このため、直管部に折曲がりが生じ、その位置も実験結果と良く一致した。

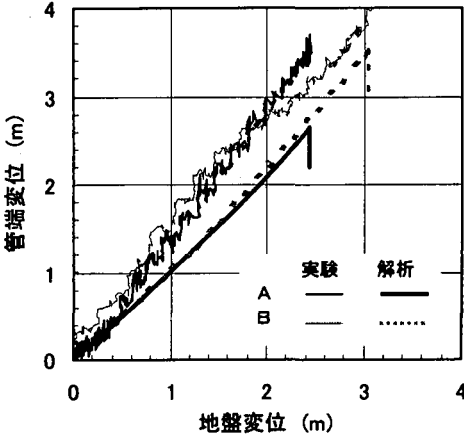


図-7 地盤変位と管端部変位との関係 (外曲げ)

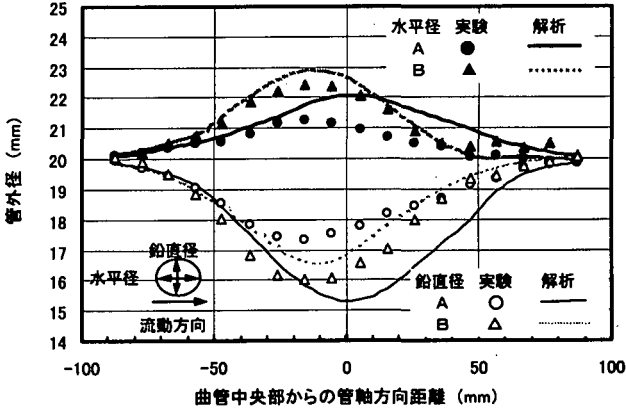


図-8 曲管部の断面変形 (外曲げ)

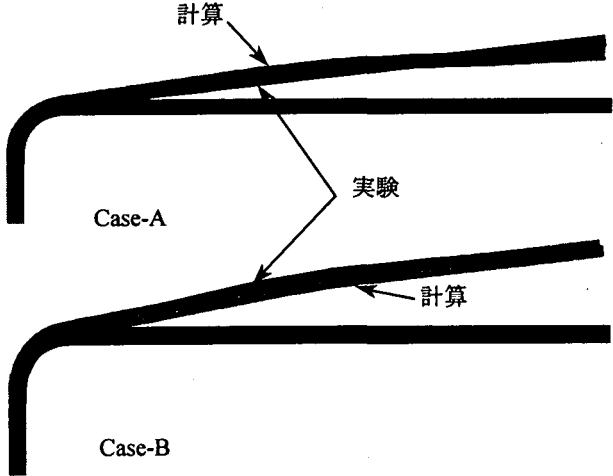


図-9 掘出し後の管の変形状況 (外曲げ)

b)内曲げ

内曲げモードで地盤を流動させたときの結果を図-10～図-12に示す。なお、図-10については、相似則に基づいて実規模に換算した結果を示している。

内曲げの場合、管端部の変位は、実験では地盤変位よりもやや大きく、計算結果では地盤変位とほぼ同様となったものの、曲管の変形状況は計算と実験とではほぼ一致した。計算において管端部変位が実験結果よりも小さくなった理由は、図-12からわかるように、計算結果では実験結果にはない明瞭な折れ曲がり、直管部に生じたためである。このことは、計算モデルの曲管部の内曲げ剛性を、高めに見積もりすぎたためと考えられる。これは、図-11に示すように、解析における曲管の扁平量が、実験結果に比べ小さいことから明らかである。これらから、曲げ加工による加工硬化の近似精度を向上することで、解析の精度はさらに向上できると考えられる。

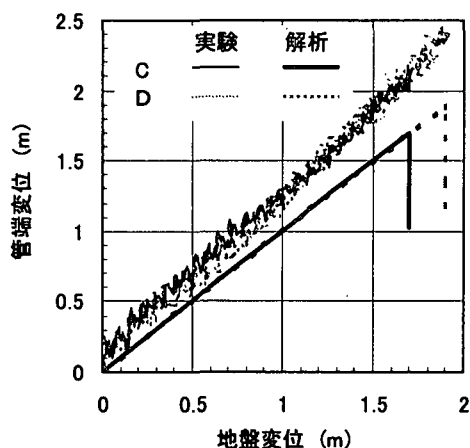


図-10 地盤変位と管端部変位との関係 (内曲げ)

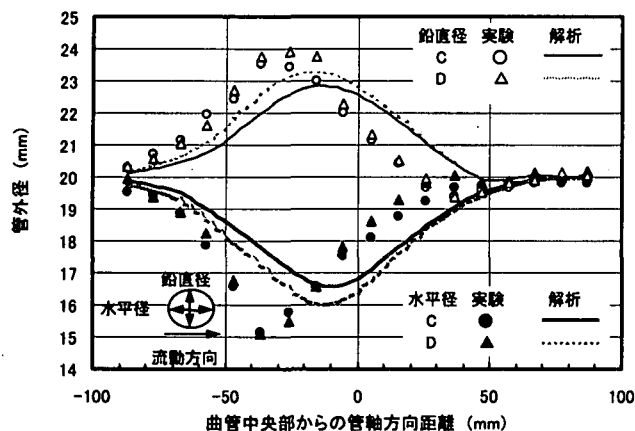


図-11 曲管部の断面変形 (内曲げ)

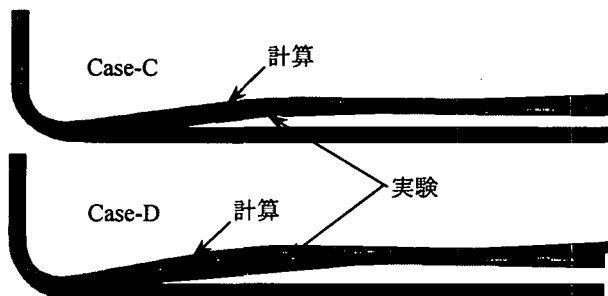


図-12 掘出し後の管の変形状況 (内曲げ)

4. 結 言

液状化による側方流動によって埋設管に生じる変形の解析手法について検討し、以下の知見を得た。

- 1) 遠心模型実験結果を用いて計算結果の妥当性を評価するに先立ち、実験模型と実規模構造の相似則を調査し、幾何学的非線形領域においても遠心模型実験における相似則が成立することを明らかにした。
- 2) 埋設管と地盤との相互作用に非線形ばねを導入した解析モデルによって、側方流動による埋設管の変形を解析した。解析結果は遠心模型実験による管の変形状態と良く一致し、非線形ばねを用いた解析モデルによるFEM解析手法の妥当性を明らかにした。

謝辞：本研究は経済産業省資源エネルギー庁が(社)日本ガス協会に委託し、平成8年度から12年度の間に実施した「ガス導管液状化対策調査」の平成12年度の成果の一部をまとめたものである。経済産業省をはじめガス導管液状化対策調査研究特別委員会の関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) K.Yoshizaki and N.Oguchi: Estimation of the deformation behavior of elbows for an earthquake-resistant design, 11th World Conf. on Earthquake Eng., (1996)
- 2) 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論文集, pp.61-66, 1998
- 3) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 佐藤 浩, 松田 隆, 松本真明: 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), 第26回地震工学研究発表会にて発表予定
- 4) 風間基樹, 稲富隆昌: ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験, 土木学会論文集, No.416/I-13, pp.419-428, 1990