

地盤変状を受ける埋設管の 弾塑性はり解析手法の検討

高田 至郎¹・小池 武²・小川 安雄³・小口 憲武⁴・
北野 哲司⁵・松本 真明⁶・田島 知治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 工博 川鉄エンジニアリング㈱ 土木事業部 (〒112-0004 東京都文京区後楽 1-1-5)

³正会員 大阪ガス㈱ 技術部 (〒541-0046 大阪市中央区平野町 4-1-2)

⁴工修 東京ガス㈱ 導管部 (〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20)

⁵工修 東邦ガス㈱ 供給管理部 (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町 19-18)

⁶正会員 工修 住友金属工業㈱ 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)

⁷正会員 住友金属工業㈱ エネルギーエンジニアリング 技術部 (〒541-0041 大阪市中央区北浜 4-5-33)

従来の弾塑性はり解析手法では曲管の大変形特性を精度よく解析するのが困難であった。本研究では、液状化に伴う側方流動を受ける埋設管の大変形挙動解析について、曲管が内曲げ変形する場合は曲管の曲げ特性を持った回転ばね要素を用いて曲管部をモデル化し、外曲げ変形する場合は曲管を直管はり要素で分割して曲管部のモデル化を行って弾塑性はり解析を行えばシェル解析とほぼ同等の精度で曲管を含む埋設管の大変形解析が可能であることを検証した。

Key Words : Liquefaction, buried pipeline, FEM analysis, beam analysis

1. はじめに

過去の地震での経験から、地盤が液状化した場合傾斜地盤部や護岸背後地盤部では、数 m におよぶ地盤の側方変位が発生することが知られている。このような地盤内にガス導管等が埋設されている場合には、その地盤変状により埋設管に大きな塑性変形が発生することが考えられる。この状況を FEM 解析手法を用いて精度よく解析するには、シェル要素を用いた 3 次元 FEM 解析を行う必要がある。しかし、シェル要素を用いた解析では、モデル作成が煩雑であり、また多くの計算時間を必要とする。一方、はり要素を用いた解析では、簡易ではあるが局部的に座屈を生ずるような大変形の状況を精度良く解析できない。そこで、本研究では、液状化による地盤の側方流動を受ける埋設管に対して、簡易に検討が可能であり、さらに大変形に対しても十分な精度で解析することが可能となる弾塑性はり解析手法についてのモデル化の一提案をする。

2. 検討概要

(1) 検討対象

本検討では、図-1 に示すような傾斜地盤に埋設された曲管を一つ含む埋設鋼管路が、液状化による地盤の側方変位を受ける場合を検討対象とする。なお、地盤変位と鋼管路の位置関係は、図-1(a)に示すように曲管が閉じる方向に変形する場合(以下内曲げ変形と呼ぶ)と図-1(b)に示す曲管が開く方向に変形する場合(以下外曲げ変形と呼ぶ)の 2 種類を対象に考える。

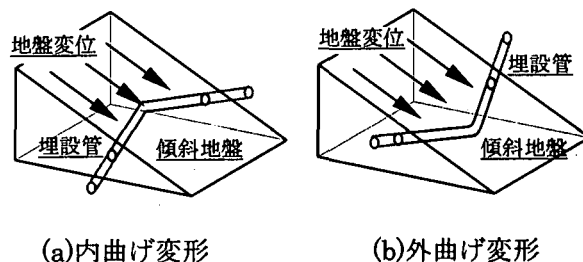


図-1 検討対象

(2) 解析モデル

図-1 に示す検討対象について高田ら¹⁾の研究成果に基づき解析モデルを構築することとし、解析モデルの概略を表-1 および図-2 に示す。なお、埋設鋼管の諸元については表-2 に示す。

表-1 解析モデル

地盤	非線形バネ要素
地盤変状	曲管部中心を最大とする三角形分布
埋設管路	非線形シェル要素／非線形はり要素
管材質	非線形（弾塑性）特性

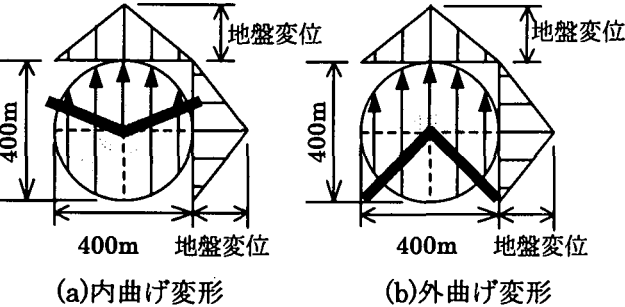


図-2 地盤変状分布図

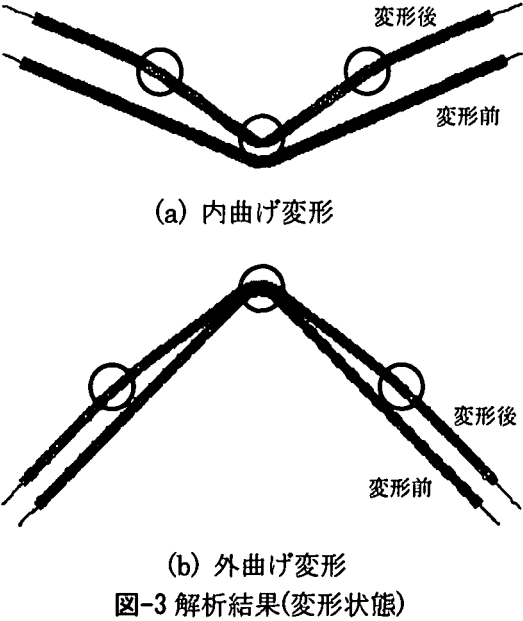
表-2 鋼管諸元

管径	管厚 (mm)	材質	曲管角度 (°)	曲率 半径
600A	15.1	API-5L X65	内曲げ	45
			外曲げ	90
150A	7.1	STPG 370	内曲げ	45
			外曲げ	90

(3) 地盤変位を受ける埋設管の挙動検討

弾塑性はり解析手法の検討に先立ち、液状化による地盤変位の影響を受ける埋設管路がどのような挙動を示すかについて、参考文献^{1),2)}で提案されているシェルはりハイブリッド解析手法(以下ハイブリッド解析と呼ぶ)を用いて上記(2)解析モデルの解析をFEMコードABAQUSを用いて行った。図-3に、解析により得られた変形状態を示す。ここに示すように、埋設管に発生する変形は、図-3 中○印で示す直管部と曲管部に集中する。

直管部については、通常の非線形はり要素でモデル化可能であるが変形が集中する曲管部については、内曲げ変形の場合は曲管中央部に大きな断面変形を伴う形で変形が集中し、外曲げ変形の場合は曲管全体がゆるやかに変形するという挙動を示し、この挙動を適切にモデル化する必要がある。以下、それぞれの曲管変形挙動に対し、非線形はり解析におけるモデル化手法の検討を行う。



3. 内曲げ変形時のはり解析手法の検討

(1) 解析モデルの検討

a) 概要

内曲げ変形時は、図-3 に示すように曲管中央部に変形が集中し断面の扁平化を伴う座屈が発生する。この曲管部の剛性低下を適切にモデル化することで、曲管の大変形時にも精度の高いはり解析モデルを作成することが可能と考えられる。このモデル化のため、シェル要素を用いた曲管曲げ解析により曲管の変形特性の検討を行い、その特性をはり解析モデルに組み込む手法について検討を行った。

b) 曲管変形特性の検討

曲管の変形特性を把握するため、シェル要素により3次元FEMモデルを作成し、曲管の内曲げ変形解析を行った。解析モデルを図-4に、解析より得られた変形状態を図-5に示す。また、鋼管諸元は表-2に示したものである。

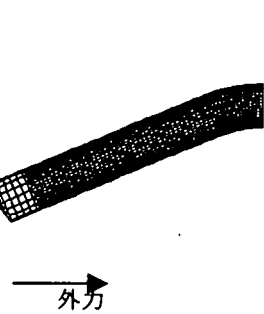


図-4 解析モデル

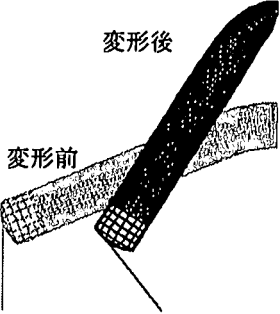


図-5 解析結果(変形状態)

この解析から曲管の変形特性を示す関係として、曲管部に発生する変形角度およびモーメントを算出（それぞれの定義については表-3、図-6 に示す）し、モーメント・曲げ角度関係（以下 $M\cdot\omega$ 関係と呼ぶ）として結果を整理したものを、図-7 に示す。

表-3 モーメント、曲げ角度の定義 (600A)

モーメント	$M=P\times L$ で算出。 (但し、 P, L の定義は図-6 に示すものとする。)
曲げ角度	曲管端部より 1D 離れた節点（図-6 に示す曲げ角度採取点）での回転角とする。

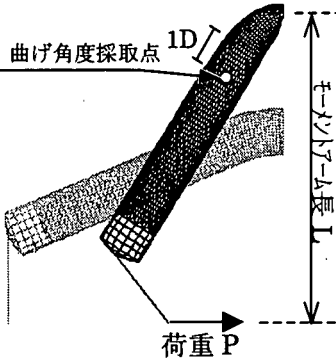


図-6 モーメント、曲げ角度の定義 (600A)

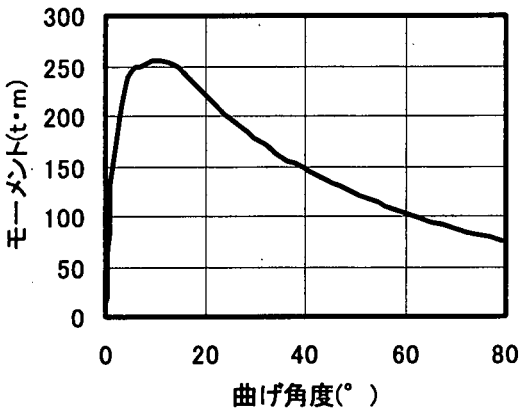


図-7 モーメント・曲げ角度関係 (600A)

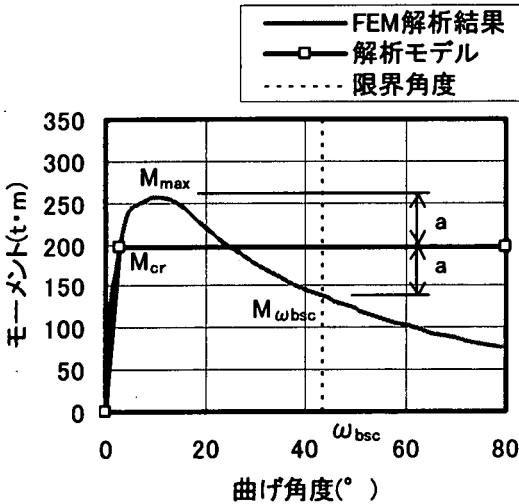


図-8 モーメント・曲げ角度関係のモデル化 (600A)

c) はり解析モデルの作成

内曲げ変形の非線形はり解析において配管系を図-9 に示したように直管部をはり要素とし、曲管部は回転ばね要素とするモデル化を考えた。大変形を生ずる曲管部の要素としては、曲管要素、直管要素の組み合わせ、回転ばね要素の 3 種類が考えられるが、各々の要素で解析検討した結果、回転ばね要素を採用した。

図-7 に示した曲管の曲げ特性値である $M\cdot\omega$ 関係を特性とした回転ばね要素を適用するに際し、図-8 に示した方法でその特性値を、バイリニアでモデル化した。すなわち、モーメントが最大になった後、低下する部分をそのままモデル化することができないので、限界曲げ角度 (ω_{bsc}) (三木らによる提案式³⁾ より算出) におけるモーメント値 ($M_{\omega_{bsc}}$) と最大モーメント値 (M_{max}) の平均値を最大モーメント値 (M_{cr}) としたバイリニアで $M\cdot\omega$ 関係をモデル化した (図-8 参照)。

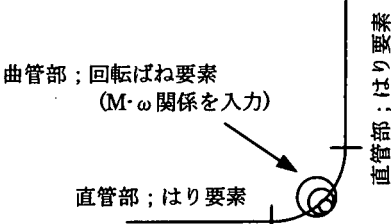


図-9 内曲げ解析モデル

(2) 解析結果比較

表-2 の 600A 埋設管について、ハイブリッド解析結果と上記モデル化による非線形はり解析結果の比較を図-10 に示す。このモデル化により、はり解析手法でも精度良く解析できることが明らかになった。

なお、曲管に発生する曲げ角度は、ハイブリッド解析、はり解析いずれの場合も曲管端部より 1D 離れた節点での回転角である。

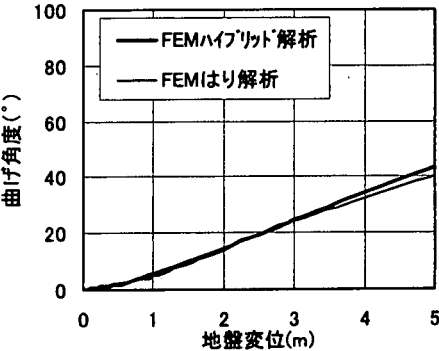


図-10 解析結果の比較 (600A 内曲げ)

同様のモデル化により表-2の150A埋設管についても検討を行った結果を図-11に示す。この場合も精度よく解析できることが明らかになった。

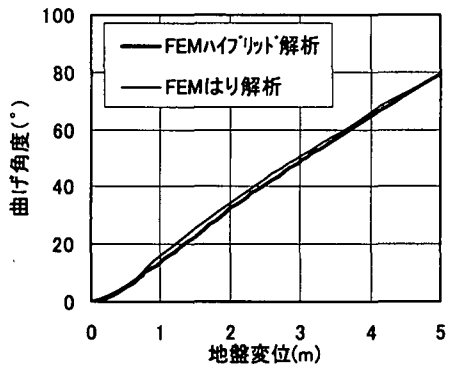


図-11 解析結果の比較 (150A 内曲げ)

4. 外曲げ変形時のはり解析手法の検討

(1) 解析モデルの検討

曲管部が外曲げ変形する場合には、図-3に示すように曲管全体で変形を受け持ち断面変形は大きくない。そのため、全体の変形形状を十分に模擬できる程度に曲管部を細かく分割し、その分割部を直管部と同じはり要素を用いてモデル化した(図-12参照)。

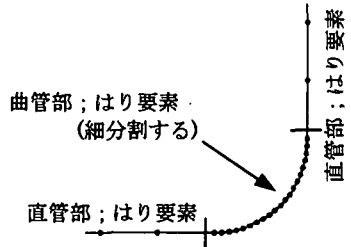


図-12 外曲げ解析モデル

(2) 解析結果比較

表-2の600A埋設管について、ハイブリッド解析結果と上記モデル化による非線形はり解析結果の比較を図-13に示す。このモデル化により、はり解析手法でも精度良く解析できることが明らかになった。

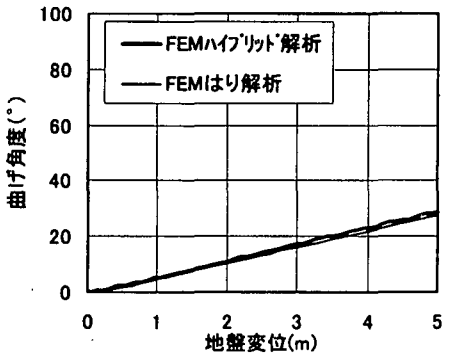


図-13 解析結果の比較 (600A 外曲げ)

なお、曲管に発生する曲げ角度は内曲げ変形時と同様の定義である。

同様のモデル化により表-2の150A埋設管についても検討を行った結果を図-14に示す。この場合もほぼ精度よく解析できることが明らかになった。

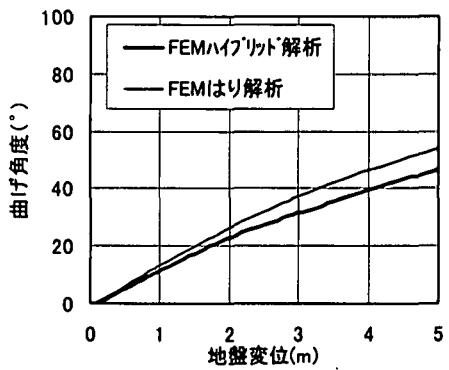


図-14 解析結果の比較 (150A 外曲げ)

5. まとめ

曲管を含む埋設管の大変形解析をはり解析手法で行う場合における曲管部の解析モデルについて提案した。すなわち、曲管の変形挙動に対して内曲げ変形の場合は、曲管部を回転ばね要素によりモデル化し、外曲げ変形の場合は曲管部をはり要素で細分割してモデル化する。

この解析手法を用いることにより非線形はり解析手法も液状化による側方変位を受ける埋設管の大変形挙動を簡易かつ精度良く解析可能であることが明らかになった。

謝辞：本研究は通商産業省(現経済産業省)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～平成12年度の5ヵ年で実施された「ガス導管液状化対策調査」の研究成果の一部をまとめたものであり、関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1)高田至郎, 鈴木崇伸, 小池武, 小川安雄, 細川直行, 北野哲司, 岡村一男, 桑嶋健: 液状化側方流動を受ける埋設管の非線形挙動解析, 構造工学論文集 Vol.46A, 2000.3
- 2)K.Yoshizaki and N.Oguchi :Estimation of the deformation behavior of elbows for an earthquake resistant design, 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996
- 3)三木千壽ほか: 高圧曲管の大変形特性に関する研究, 土木学会論文集投稿予定