

## 液状化による側方流動を受ける埋設管のはり解析手法の検討

Beam Analysis method of buried pipeline due to liquefaction with lateral spreading

高田 至郎\*・小川 安雄\*\*・松本 真明\*\*\*・藤田 周亮\*\*\*

Shiro TAKADA, Yasuo OGAWA, Masaaki MATSUMOTO, Shusuke FUJITA

\*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)

\*\*大阪ガス(株) 技術部(〒541-0046 大阪市中央区平野町4-1-2)

\*\*\*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)

Large deformation of buried pipeline under lateral ground displacements during the liquefaction was analyzed by beam elements of the FEM code ABAQUS. Two types of buried pipeline were investigated. One is a pipeline including a pipe bend (Bending Type). The other is a straight pipeline (Straight Type). In case of Bend Type model, accurate analysis is possible by using elbow elements (ELBOW31), and improvements of the pipe-beam analysis method are proposed that a pipe bend is modeled by spring element of rotation for in-plane closing bending moment and pipe bend is modeled by many straight pipe elements for in-plane opening bending moment. In case of Straight Type, accurate analysis is possible by using beam elements (PIPE31) for large deformation of pipeline and the characteristics of occurring strain in pipeline are investigated

**Key Words :** liquefaction, pipeline, beam analysis, FEM analysis

## 1. はじめに

地震時の液状化に伴う側方流動による埋設管の被害は、既往の多くの地震で報告されている<sup>1),2)</sup>。埋設管が側方流動を受けると大きな塑性変形を生ずることが多く、液状化に対する埋設管の設計手法としては鋼管の塑性化を考慮できる手法が必要となる。

大変形を受ける埋設管の解析手法としては、変形が大きくなる領域をシェル要素で、変形が小さい領域をはり要素で、地盤特性を弾塑性ばね要素を用いてモデル化したFEM解析としてシェルはりハイブリッド解析(以下、ハイブリッド解析という)が提案されており<sup>3),4)</sup>、また、このハイブリッド解析手法は実験結果との整合性がよいことが著者らにより確認されている<sup>5),6),7)</sup>。ハイブリッド解析を用いれば、側方流動を受ける埋設管の挙動を詳細に把握することが可能である。しかし、ハイブリッド解析は解析が複雑であり解析時間もかかるため、通常の設計手法としては適用しにくい。

そこで本研究では、ハイブリッド解析手法より簡便に適用できるはり解析手法について検討を行った。

検討対象としては曲管を含む配管系と直管配管系の2種類とし、それぞれの埋設配管系について、ハ

イブリッド解析とほぼ同等な精度で地盤変状による埋設管の大変形解析ができる手法の検討をした。

曲管配管系では、曲管が閉じる方向に変形する場合(以下、内曲げという)と、曲管が開く方向に変形する場合(以下、外曲げという)での精度のよいはり解析手法を提案した。

直管配管系では曲げ変形と軸圧縮変形について、はり解析とハイブリッド解析との結果比較により精度の検証を行い、埋設管に発生するひずみ分布を明らかにした。

## 2. 曲管配管系のはり解析手法の検討

## 2.1 はり解析の検討対象について

液状化により発生する地盤変状の分布については、過去種々の研究がされている<sup>8),9)</sup>。これらの研究成果を受け、本研究では、液状化により発生する地盤変状の分布を図-1に示すように、直径を400mとする円内で液状化側方流動が発生し、その円の中心部で地盤変位が最も大きくなり、中心部から距離に比例して地盤変位量が小さくなる三角形分布でモデル化した。地盤変位量については、過去の研究<sup>10),11)</sup>を参考に地盤変状中心において最大5mとした。地盤変状

と曲管を含む配管系の位置関係については、既往の研究<sup>12),13),14)</sup>より、曲管を含む配管系が側方流動を受ける場合、地盤変状の中心に曲管がある場合に曲管の変形がもっとも大きくなるとが明らかになっており、このことから、図-1に示すように地盤変状の中心に曲管があり、その曲管の向きは、地盤変状により発生する変形が左右対称となるように配置した。曲管は、変形方向により変形特性が異なるため、図-1(a)に示す内曲げ変形となる場合と図-1(b)に示す外曲げ変形となる場合の両方について解析検討を行った。

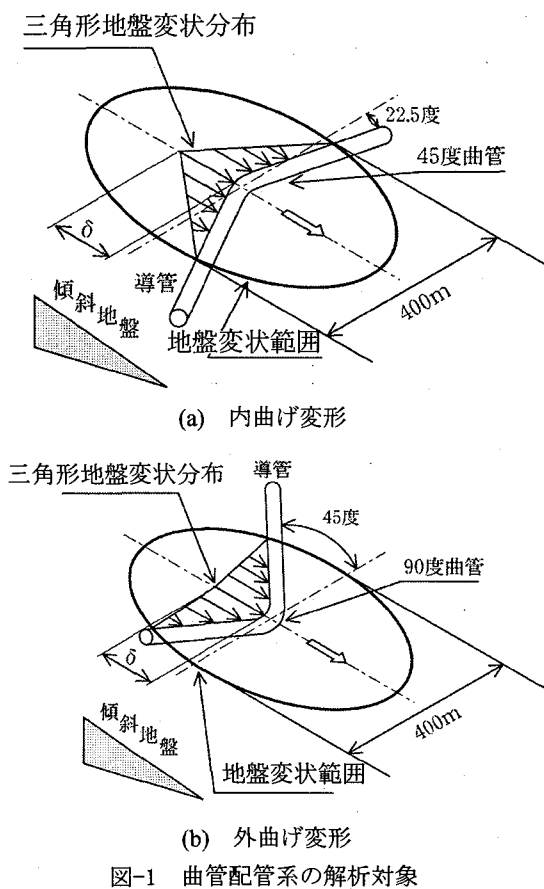


図-1 曲管配管系の解析対象

地盤のモデル化については、非線形ばねに、管軸方向および管軸直角方向にそれぞれ図-3に示す特性を与えてモデル化する手法がガス導管耐震設計指針<sup>17)</sup>等に示されており、本検討でもこのモデル化に準じた。この時の地盤拘束力について、一般的な地盤の場合については、ガス導管耐震設計指針<sup>17)</sup>等にその特性値が示されている。一方、液状化地盤における地盤の拘束力については、過去種々の研究が行われており<sup>15), 16)</sup>、一般的な地盤よりも拘束力は小さくなることが明らかになっており、その低減率についても提案がなされている。一般に埋設管は深さ1~2mの範囲の比較的浅い位置に埋設されており、液状

化層内に位置することは少なく、図-2に示すような埋設状態にあり、下層の液状化層の液状化による影響を受け、上層の非液状化層においても側方流動が発生するメカニズムとなる。この場合では、液状化層内に埋設管が存在すると想定した場合に比べ側方流動によって管に作用する土圧は大きく、埋設管の変形が大きくなることが予想される。そのため、図-2に示す液状化層上部にある非液状化層の地盤の拘束力を適切に評価する必要がある。このことから、本研究で用いる地盤の拘束力は、液状化層における地盤拘束力の低減率を適用するのではなく、図-2に示す状況と同様の地盤条件で遠心模型振動実験を行ったShimamuraら<sup>18)</sup>による研究成果を参考に、管軸方向の地盤拘束力の値は管径によらず  $\tau_c = 1.5\text{N/cm}^2$  ( $\delta_c = 0.25\text{cm}$ ) と、管軸直角方向の地盤拘束力は、400Aのとき  $\sigma_c = 19.2\text{N/cm}^2$  ( $\delta_c = 2.8\text{cm}$ )、150Aのとき  $\sigma_c = 24.0\text{N/cm}^2$  ( $\delta_c = 2.6\text{cm}$ ) とした。外力として与える地盤変位はこのばねを介して埋設管に強制変位として与えた。

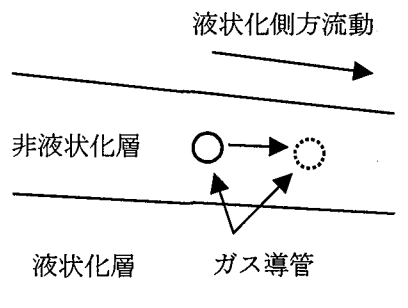


図-2 液状化側方流動のイメージ

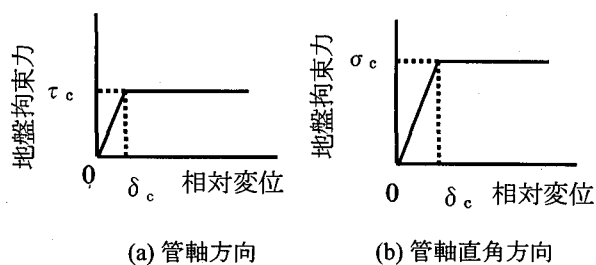


図-3 地盤ばねの特性

埋設配管諸元は400A(外径 $D=406.4\text{mm}$  管厚 $t=7.9\text{mm}$ , 材質API-5L X52)と150A(外径 $D=165.2\text{mm}$  管厚 $t=7.1\text{mm}$ , 材質JIS B2312 PG370)の2種類とし、曲管はロングエルボ(曲率 $R=1.5D$ )、内曲げの場合は45°曲管、外曲げの場合は90°曲管を対象とした。鋼管材料特性は実管の引張試験結果(一例を図-4に示す)から、引張強度は公称ひずみで約5~15%の範囲にあることから、解析ならびに設計上の安全性を考慮して5%ひずみのときに引張強度となるように

材料特性を定義した。降伏応力については一般的に規格で使われている0.5%とした。解析に用いた材料特性モデルを図-5に示す。

内圧は400Aでは内圧 $P=57\text{kg/cm}^2$ 、150Aでは内圧 $P=76\text{kg/cm}^2$ が負荷されている(設計係数=0.4)ものとした。

解析はFEM解析コードABAQUS Ver. 5.8を使用した。

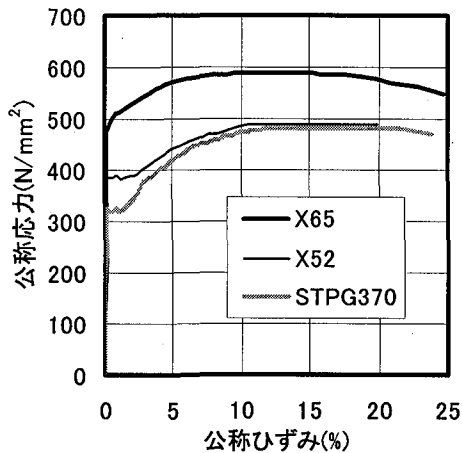


図-4 実管引張試験結果の一例

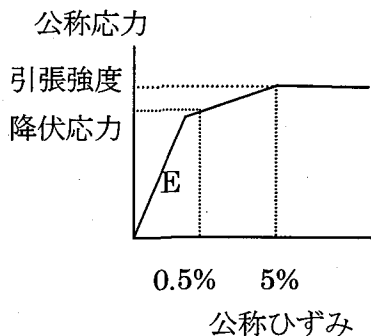


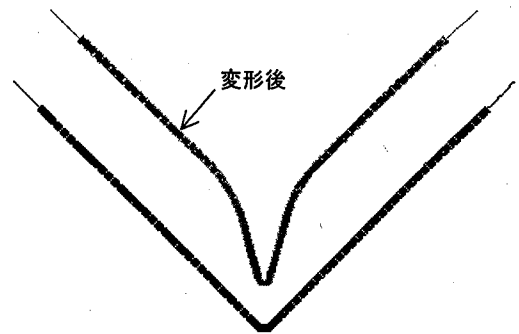
図-5 材料特性モデル

## 2.2 液状化側方流動を受ける埋設管の挙動

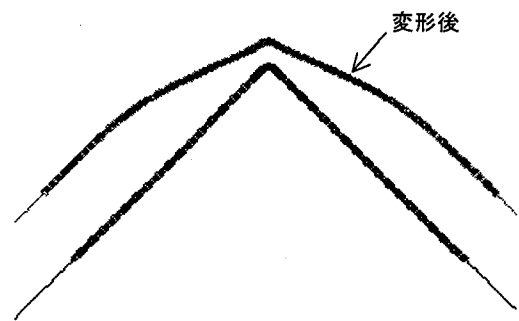
曲管を含む埋設配管系が地盤変状を受け内曲げあるいは外曲げ変形した場合のハイブリッド解析結果の一例を図-6に示す。

なお、この解析では、曲管部およびその曲管近傍30mの範囲の直管については大きな断面扁平を伴う大変形が発生するために、シェル要素を用いてモデル化し、その他の断面扁平がほとんど発生しない範囲については、はり要素を用いてモデル化した。

本研究ではこのような変形挙動に関して、はり解析手法による検討を行った。



(a) 内曲げ変形



(b) 外曲げ変形

図-6 ハイブリッド解析の一例

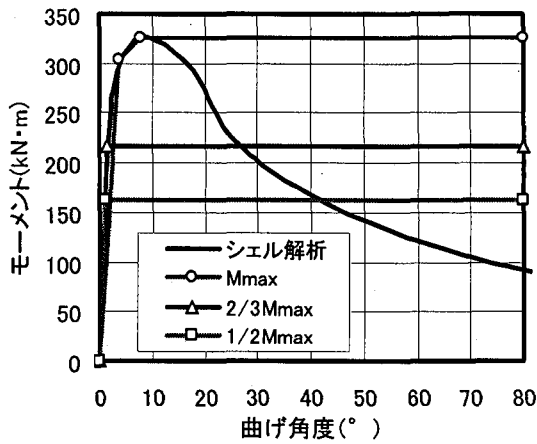
## 2.3 回転ばね要素を適用したはり解析

ここでは、曲管の大変形特性を回転ばね要素を用いてモデル化する手法について検討した。

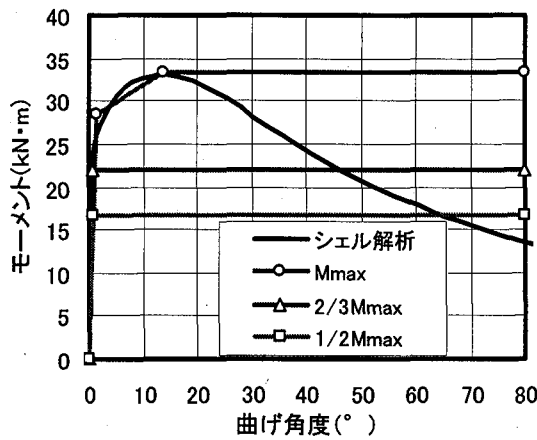
曲管を一つ含む配管系について、直管部は内圧や外圧の影響を考慮できる中空薄肉断面に使用されるはり要素 PIPE31 を用い、曲管部には非線形を考慮できるばね要素 SPRING2 を回転方向の自由度に対して使用することにより回転ばねとしてモデル化し、そのモデルにより解析を行った。

回転ばねを用いる場合は入力すべきその特性値の定義が重要となる。回転ばねに入力する特性としては図-7(内曲げ変形解析の結果)に示すように、曲管の面内曲げシェル解析を実施し、解析から求めたモーメント( $M$ )と曲管の発生曲げ角度( $\omega$ )の特性に関してここでは同図の  $M_{max}$  モデルに示したように三直線近似特性として用いた。

回転ばねを使用したはり解析結果を図-8に示す。同図には最大地盤変位量( $\delta$ )と曲管に発生した曲げ角度( $\omega$ )の解析結果を示してある。曲管部に回転ばね要素を用いたはり解析結果はハイブリッド解析結果とよく一致している。ただし外曲げ変形の場合ははり解析精度は悪くなる。



(a) 400A

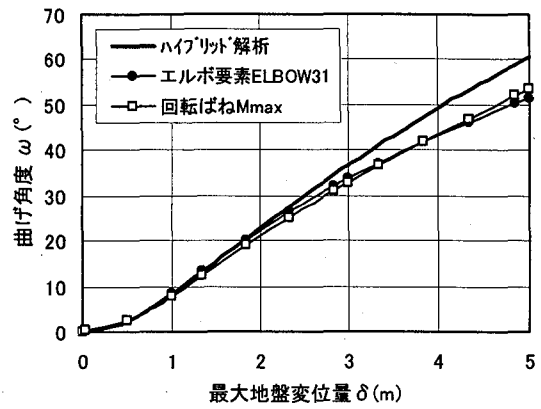


(b) 150A

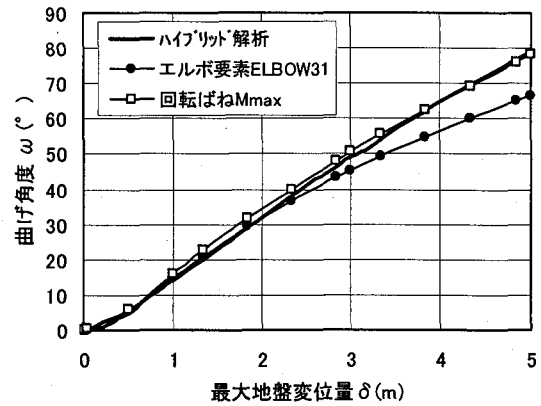
図-7 曲管のモーメント( $M$ )-曲げ角度( $\omega$ )特性

#### 2.4 エルボ要素を適用したはり解析

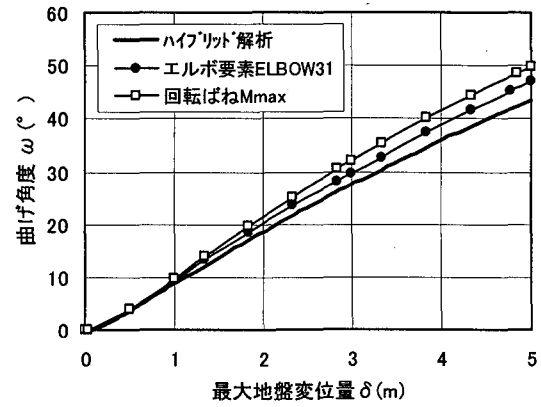
ABAQUS では曲管要素として楕円化や反りによる非線形応答を考慮できるエルボ要素 (内挿関数として、管軸方向の多項式と、周方向に断面の楕円化と反りをモデル化するための Fourier 級数が用いられている。挙動のモデル化にはシェル理論が用いられている。) が 4 種類準備されている。ここでは曲管を一つ含む配管系について直管部ははり要素 PIPE31 を用い、曲管部には断面の楕円化および反りの両方を考慮できるエルボ要素 ELBOW31 を用いてモデル化した場合と断面の楕円化のみを考慮し反りについては考慮しない簡易化されたエルボ要素 ELBOW31B を用いてモデル化した場合の解析を行った。エルボ要素を使用した解析結果とハイブリッド解析結果の比較を前節と同様に図-8に示す。



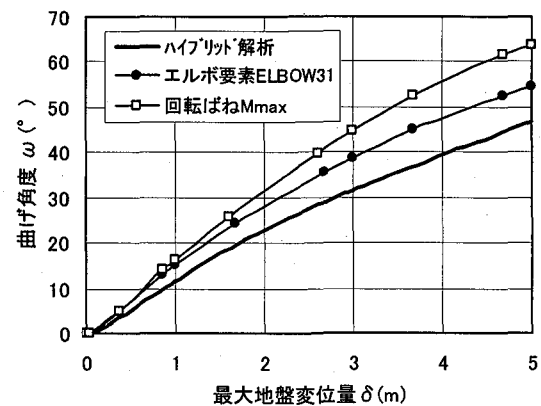
(a) 内曲げ 400A



(b) 内曲げ 150A



(c) 外曲げ 400A



(d) 外曲げ 150A

図-8 地盤変位量-曲管発生曲げ角度関係

解析を実施したところ、ELBOW31 要素では、地盤変位量 5m まで解析可能であったが、ELBOW31B 要素を用いた場合には、内曲げでは、発生曲げ角度が約 5°、外曲げでは、発生曲げ角度が約 10° で解析の収束性が悪くなり、それ以上の解析は不可能であった。これは、ELBOW31B 要素では、断面の楕円化に伴う管軸方向への変化（反りの影響）を無視しているため、管の断面変化が大きくなるに連れて楕円化のみでは、変形を表現することが困難になり解析の収束性が悪くなるという現象によるものと考えられる。一方で、ELBOW31 要素では、その反りの影響を考慮しているために、管の断面変化が大きくなっても、上記のような現象にはならず解析が可能であるという結果となっていると考えられる。解析の結果上記のようなことが明らかになったため、図-8には ELBOW31 要素を用いた場合の解析結果のみを表示した。ただし、計算可能であった範囲内で ELBOW31B 要素による結果を ELBOW31 要素による結果と比較したところ、値はほぼ同値であった。

図-8に示すように、ELBOW31 要素を用いた場合の結果を、ハイブリッド解析の結果と比較すると、400A、150A の内曲げ、外曲げいずれの結果もよく一致するという結果が得られた。

### 3. 曲管配管系のはり解析精度向上の検討

図-8に示すように曲管部に回転ばね要素あるいはエルボ要素を適用したはり解析結果はハイブリッド解析結果とほぼよく一致しているが、さらにはり解析の精度向上について内曲げの場合と外曲げの場合の検討をした。

#### 3.1 内曲げの場合の解析精度向上

ハイブリッド解析の結果から、内曲げ変形時には、曲管中心に大きな断面扁平を伴い変形が集中する。そのため、ここで検討した回転ばねによるモデル化は、曲管中心が塑性ヒンジ的な挙動を示す内曲げ変形時の変形特性を模擬するのに適したモデルと考えられる。このことから、内曲げの場合は回転ばね要素に入力した特性値に注目し、検討を行った。

回転ばね要素での解析は大変形まで解析可能であるが、ハイブリッド解析結果に比べ、発生曲げ角度が小さくなる傾向がある。この原因として、回転ばねの特性を、図-7に示した  $M-\omega$  特性においてモーメントが最大値に達した以降低下する部分をモデル化していないため、曲管の曲げ剛性を実際より大きく見積もっていることになり曲管の発生角度が小さくなると考えられる。そこで曲管の曲げ剛性をどの

程度低くすればハイブリッド解析に対する精度向上が計れるかを検討した。回転ばね要素に使用する  $M-\omega$  特性について下記ならびに図-7に示す 3 つのモデルを考えて各  $M-\omega$  特性によるはり解析を行った。

$M_{max}$  モデル : シェル解析得られた  $M-\omega$  関係の  $M$  の最大値でモデル化

2/3  $M_{max}$  モデル : シェル解析の  $M-\omega$  関係とひずみエネルギーがほぼ同等となるように、最大モーメントの 2/3 の値でモデル化

1/2  $M_{max}$  モデル : 地盤変位量 3~5m といった大きなレベルにおいて発生する曲げ角度 (40~80°) の時に発生するモーメントとほぼ同等となる最大モーメントの 1/2 の値でモデル化

ここで必要となる面内曲げの内曲げにおける任意の曲管の最大耐力モーメント ( $M_{max}$ ) の値は著者らの研究で、曲管寸法と材質から計算式にて求める下記の (1) 式および (2) 式が提案されており<sup>19)</sup>、曲管のシェル解析を実施しなくとも、最大耐力モーメント値を簡単に算出することができる。

高周波曲管の場合

$$M_{max} = M_y (0.369h + 1.005) \quad (1) \text{式}$$

マンドレル曲管の場合

$$M_{max} = M_y (1.039h + 0.625) \quad (2) \text{式}$$

ここで、 $M_y = \sigma_y \cdot Z$ 、 $h = \frac{t \times R}{r_m^2}$

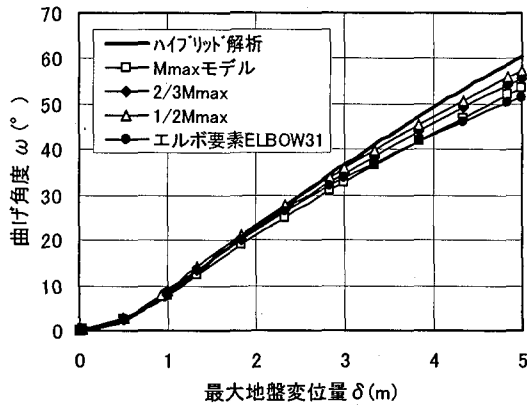
$\sigma_y$  : 降伏応力  $t$  : 管厚  
 $Z$  : 断面係数  $R$  : 曲管の曲率半径  
 $r_m$  : 管半径

内曲げのはり解析結果を図-9に示す。回転ばね要素の  $M-\omega$  特性として  $M_{max}$  モデルに比べ、曲管の剛性の低下を考慮した 1/2  $M_{max}$  モデルを採用することにより解析精度が向上している。

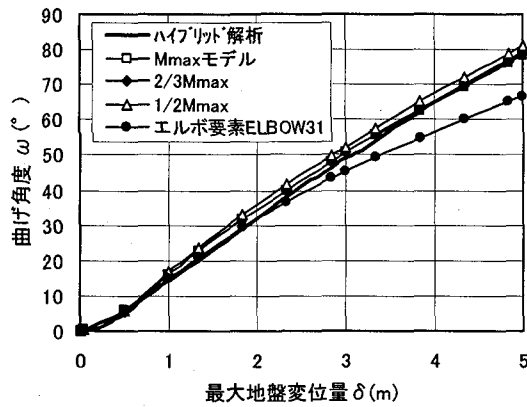
この理由としては、図-8(a) 400A の場合に最大地盤変位量が 3~5m あたりでハイブリッド解析値とはり解析値との差異があり、この領域は曲げ角度で見れば 40° ~ 60° 変形した状態である。この変形状態は曲管特性値を示した図-7(a) でみると、1/2  $M_{max}$  モデルで採用しているモーメント値の近傍にある。したがって 1/2  $M_{max}$  モデルが曲管の変形状態におけ

る実際の耐力モーメントにより近似しているために精度が向上しているものと考えられる。

曲管配管系の内曲げ変形についてのはり解析はエルボ要素、回転ばね要素 ( $M_{max}$  モデル)、回転ばね要素 ( $1/2M_{max}$  モデル)の順に解析精度がよくなることが判明した。



(a) 400A



(b) 150A

図-9 内曲げはり解析の精度向上

### 3.2 外曲げの場合の解析精度向上

ハイブリッド解析の結果から、外曲げ変形時では、断面扁平は発生するが、局部への集中ではなく、曲管全体で変形を受け持つという変形挙動を示す。このことから、外曲げ変形時の曲管部の変形特性は、内曲げ変形時のように曲管中心に変形が集中する場合に適切なモデルと考えられる回転ばねによるモデル化よりも、曲管全体の変形を適切に模擬できるモデル化が必要であると考えられる。

そこで、外曲げの場合は、回転ばね要素による解析モデルを改良するのではなく、図-10に示すように曲管部を直管要素 (PIPE31) を用いて 20 分割したモデルを新たに作成し、このモデルを用いてはり解析を行った。このときの外曲げのはり解析結果を図-11に示す。

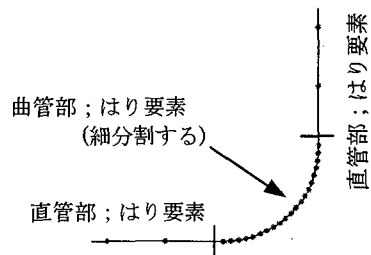
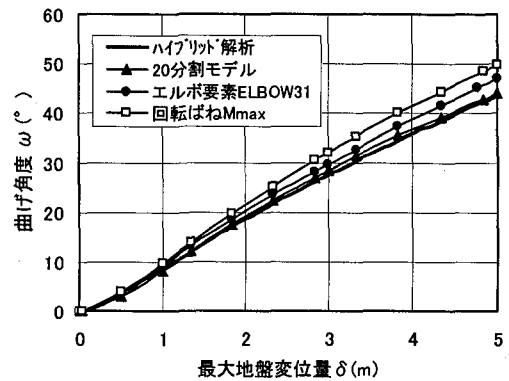
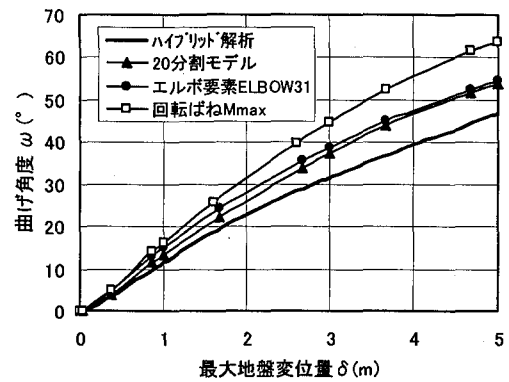


図-10 20分割モデル (外曲げ)

曲管の外曲げ変形の場合、曲管部を直管要素で細かく分割したモデル (20 分割モデル) を適用することによりはり解析精度が向上できることが明らかとなった。曲管配管系の外曲げ変形についてのはり解析は回転ばね要素、エルボ要素、直管要素 (20 分割)の順に解析精度がよくなることが判明した。



(a) 400A



(b) 150A

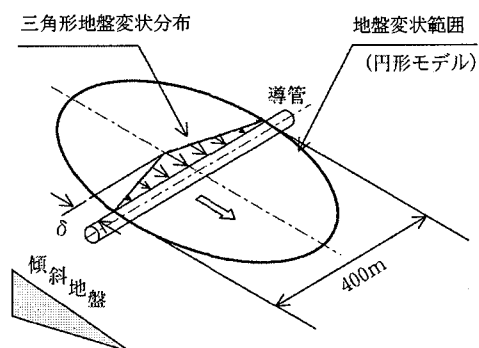
図-11 外曲げはり解析の精度向上

## 4. 直管配管系のはり解析

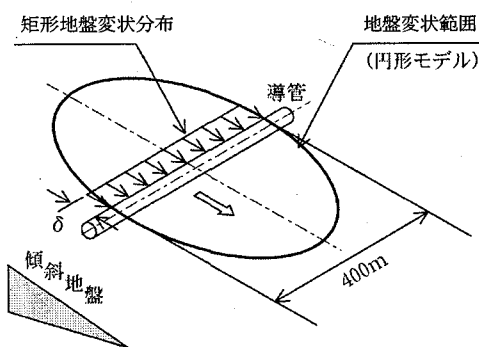
### 4.1 はり解析の検討対象について

直管のみで構成される直管配管系が地盤の側方流動を受ける場合として直管管軸直角方向に側方流動を受け曲げ変形する場合と、直管管軸方向に側方流動を受けて軸引張/軸圧縮変形する場合を考える。

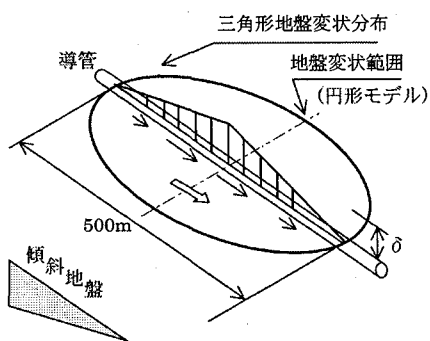
側方流動の地盤変状分布としては三角形分布と矩形分布の2種類とした。図-12に解析対象の模式図を示す。埋設配管の諸元および地盤拘束力条件は曲管配管系の場合と同じである。



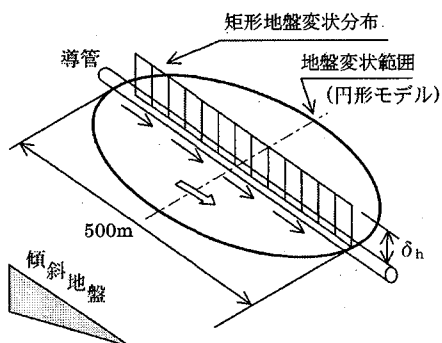
(a) 管軸直角方向入射 三角形地盤変状分布



(b) 管軸直角方向入射 矩形地盤変状分布



(c) 管軸方向入射 三角形地盤変状分布



(d) 管軸方向入射 矩形地盤変状分布

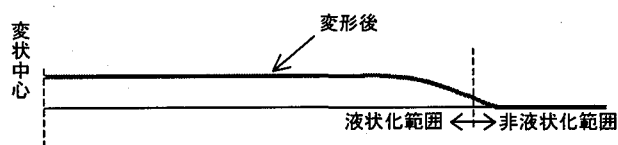
図-12 直管配管系の解析対象

## 4.2 直管配管系の曲げ変形はり解析

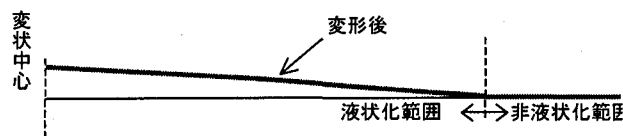
ABAQUS の直管要素 PIPE31 を使って埋設直管配管系が曲げ変形を受ける場合のはり解析を行った結果を以下に示す。

### 4.2.1 地盤変状分布の違いによる配管系挙動

地盤変状分布が矩形分布および三角形分布の場合の最大地盤変位量  $\delta=3\text{m}$  のときの直管配管系の変形図を図-13に示す。矩形分布の場合は液状化範囲と非液状化範囲の境界付近で大きく変形するが、三角形分布の場合はなだらかに変形しており、大きく変形している箇所は見られない。



(a) 矩形地盤変状分布

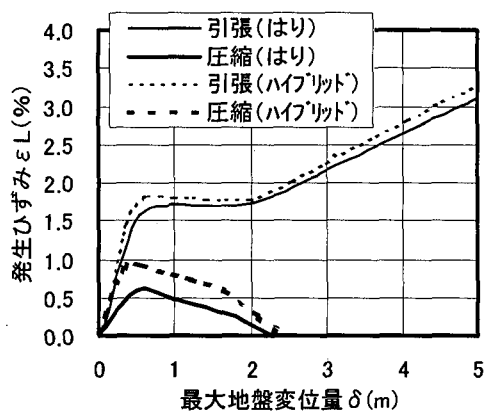


(b) 三角形地盤変状分布

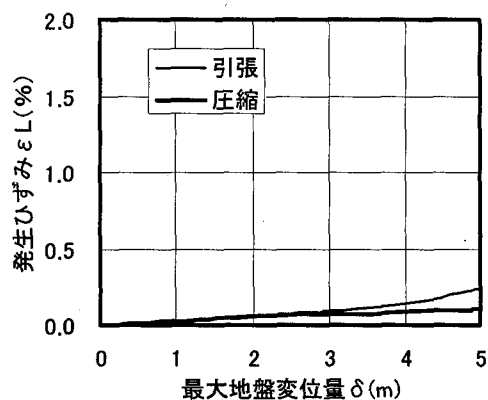
図-13 変形図 (直管軸直角方向入射)

次に最大地盤変位量  $\delta$  と埋設管の管軸方向の最大ひずみ  $\epsilon_L$  の関係を図-14に示す。三角形分布に比べ矩形分布の方がかなり大きな軸方向ひずみが発生する。また、矩形分布の結果をみると地盤変位が小さい範囲では埋設管の曲げ変形による圧縮ひずみが生じているが、最大地盤変位量が  $2.5\text{m}$  以上の大きな値になると、この圧縮ひずみは消滅し曲げ変形ではなく配管系全体が引張変形状態に移行していきことがわかる。

なお、三角形分布の場合では、図-14(b)に示す歪み分布を見ても明らかのように、発生する変形が非常に小さい。そのため、図-13では変形を拡大して表示している。このため、図中では、液状化範囲と非液状化範囲の境界部および変状中心位置にて、変形形状が折れているように見えるが、実際にはなだらかな変形を示しており、これらの位置でひずみが大きく出るとい現象は発生していない。



(a) 矩形地盤変状分布



(b) 三角形地盤変状分布

図-14 地盤変位-最大ひずみ関係 (管軸直角方向)

#### 4.2.2 はり解析とハイブリッド解析の比較

ひずみが大きく発生する矩形分布について、はり解析とハイブリッド解析の管軸方向最大ひずみの比較を図-14(a)に示す。引張ひずみ、圧縮ひずみともはり解析結果とハイブリッド解析の結果はよく一致しており、通常のはり解析手法は十分精度よく大変形解析を行うことが可能である。

#### 4.3 直管配管系の軸引張/軸圧縮変形はり解析

ABAQUS の直管要素 PIPE31 を使って埋設直管配管系が管軸方向に地盤変状を受ける(軸引張/軸圧縮)場合のはり解析を行った結果を以下に示す。

##### 4.3.1 地盤変状分布の違いによる配管系挙動

地盤変状分布が矩形分布と三角形分布の場合の最大地盤変位  $\delta$  と埋設管の管軸方向の最大ひずみ  $\epsilon_L$  の関係についてのはり解析結果を図-15に示す。

ここで、図-15において、地盤変位  $\delta$  が 3m 以上になると急にひずみが大きくなっているが、これは材料特性に図-5で示した弾塑性モデルを使用しているため、ひずみが 5%以上の領域で急激にひずみの増加が起こるためである。

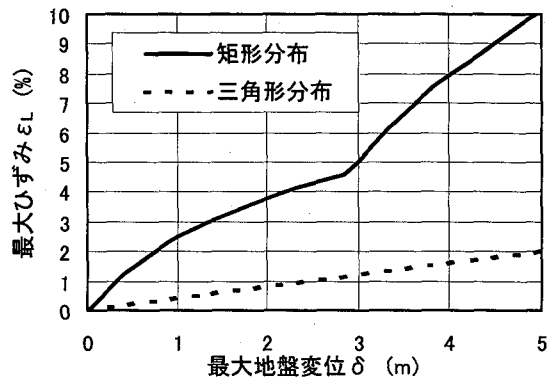
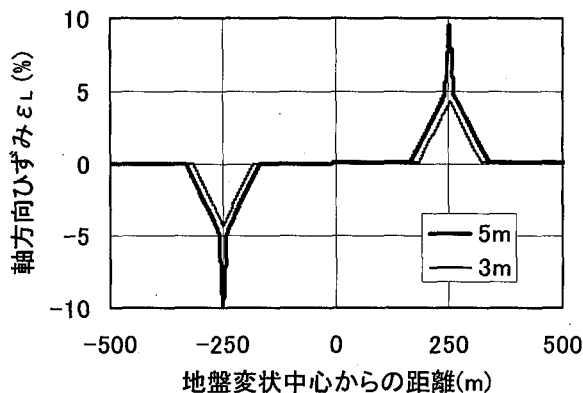
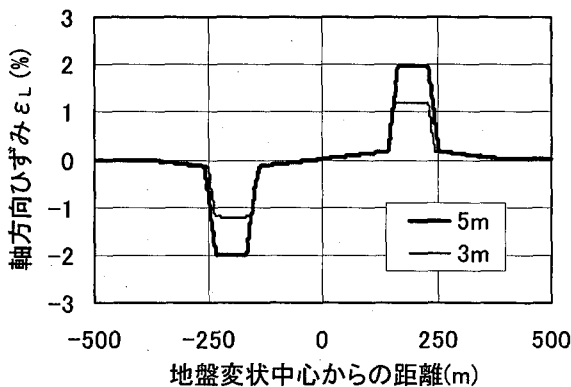


図-15 地盤変位-最大ひずみ関係 (管軸方向)

矩形分布の方が三角形分布に比べ 3 倍以上大きな軸方向ひずみが発生する。また、最大地盤変位量  $\delta = 3\text{m}$  と  $5\text{m}$  のときの直管配管系の管軸方向各位置での管軸方向ひずみ  $\epsilon_L$  の値を図-16に示した。



(a) 矩形地盤変状分布



(b) 三角形地盤変状分布

図-16 直管ひずみ分布



矩形分布の場合は地盤変状範囲(500m)の境界部において管軸方向の引張りひずみと圧縮ひずみが最大となる。三角形分布の場合は地盤変状範囲のかなり内側で管軸方向ひずみが最大となる。この三角形分布の場合の最大軸方向ひずみは地盤変位量に比例しており、この値は地盤ひずみと同等である。これは埋設管の軸方向変位が地盤変位に追随している区間があり、この区間でのひずみが最大になっている。

## 5. まとめ

曲管を含む配管系と直管配管系を対象に FEM 解析コード ABAQUS を用いてはり解析を実施し、側方流動を受ける埋設管の大変形挙動の解析が可能な手法についてシェルはりハイブリッド解析結果と比較検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 曲管埋設配管系の解析においてエルボ要素 ELBOW31 を用いた場合、内曲げ、外曲げともほぼよい精度での解析が可能であることがわかった。
- (2) 曲管配管系の内曲げ変形の場合、曲管の曲げ特性をもつ回転ばね要素で曲管部をモデル化することによりさらに精度のよい解析が可能である。回転ばね特性は曲管の曲げ剛性の低下を考慮して曲管の最大耐力モーメント  $M_{max}$  の 1/2 の値とすることにより、さらに解析精度が向上する。
- (3) 曲管配管系の外曲げ変形の場合、曲管部の曲げ剛性が大きくなることを考慮し、曲管部を直管要素で細分化したモデルで解析することにより解析精度の向上が計れる。
- (4) 直管配管系の解析では、通常のはり解析で十分精度のよい大変形解析を行うことが可能であることが判明した。
- (5) 直管配管系で管軸直角方向に地盤変状がある場合、矩形分布が埋設管の変形に対してもっとも厳しい地盤変状分布であった。
- (6) 直管配管系で管軸方向に地盤変状がある場合、地盤変状が三角形分布より矩形分布の方が埋設管の発生ひずみが大きくなる。三角形分布では埋設管の最大ひずみの値は地盤ひずみと一致するが、矩形分布では地盤変状の境界部に変形(引張り/圧縮)が集中し三角形分布の場合の数倍以上の大きなひずみが発生することがわかった。

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, 前田俊宏, 辻野洋慶: 地中埋設物の被害と特徴, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.283-288, 1996.1.
- 2) 日本ガス協会: 日本海中部地震と都市ガス, 1984.
- 3) K.Yoshizaki and N.Oguchi: Estimation of the deformation behavior of elbows for an earthquake resistant design, 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996.
- 4) 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, 1998.11.
- 5) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 佐藤清, 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(その1: 遠心模型振動実験), 第26回地震工学研究発表会, pp.1301-1304, 2001.8.
- 6) 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(その2: FEM解析手法の検証), 第26回地震工学研究発表会, pp.1305-1308, 2001.8.
- 7) 佐藤清, 松本真明, 高田至郎, 小川安雄: 液状化による側方流動を受ける埋設鋼管の大変形挙動, 土木学会論文集, 投稿中
- 8) M.Satoh, R.Isoyama, M.Hmada and A.Hatakeyama: A Procedure to Assess the Stability of Buried Structures Against Liquefaction-Induced Ground Deformations, Third International Conference on Recent Advances in GEESD, Vol.I, pp.221-228, 1995
- 9) 鈴木信久, 中根宏行: 埋設パイプラインの耐震性評価における地盤の永久変位分布のモデル化, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.1365-1376, 1990
- 10) 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集, No. 376, III-6, pp. 211-220, 1986
- 11) 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究, 土木学会論文集, No. 376, III-6, pp. 221-229, 1986
- 12) S.Takada, Y.Ogawa, N.Hosokawa, T.Kitano, K.Okamura and T.Kuwajima: Analysis of causal factors generating large-scale deformation patterns in buried pipeline under the influence of lateral flows by liquefaction, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000
- 13) 高田至郎, 小川安雄, 吉崎浩司, 北野哲司, 桑嶋健: 液状化側方流動を受ける埋設管の大変形挙動に関する影響要因分析, 第10回日本地震工学シンポジウム, 1998.11.

- 14) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 田島知治: 液状化側方流動を受ける曲管を含むガス導管の大変形FEM解析, 第56回年次学術講演会, 2001.10.
- 15) 常田賢一, 木全俊雄, 吉田精一: 地盤の流動化特性およびその影響に関する実験的検討, 第16回土質工学研究発表会, pp.629-632, 1981
- 16) 規矩大義, 安田進, 吉田剛: 液状化により埋設管の直角方向地盤反力の減少, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集 第3部, Vol.44, pp.620-621, 1989
- 17) 日本ガス協会: 高圧ガス導管液状化耐震設計指針
- 18) K.Shimamura,M.Hamada,S.Yasuda,K.Ohtomo,Y.Fujita,S.Kojima and Y.Taji: Load on pipes buried in a non-liquefaction layer due to liquefaction-induced ground displacement,12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 2000
- 19) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 岡村一男, 藤田周亮: 曲管の大変形特性のパイプファクターによる定式化, 第26回地震工学研究発表会, pp.1317-1320, 2001.8.

(2001年9月14日受付)