

液状化側方流動を受ける埋設管の非線形挙動解析

Analysis for non-linear behavior of buried pipeline due to liquefaction with lateral spreading

高田至郎¹⁾、鈴木崇伸²⁾、小池武³⁾、小川安雄⁴⁾、細川直行⁵⁾、北野哲司⁶⁾、岡村一男⁷⁾、桑嶋健⁸⁾

Shiro TAKADA, Takanobu SUZUKI, Takeshi KOIKE, Yasuo OGAWA, Naoyuki HOSOKAWA, Tetsuji KITANO, Kazuo OKAMURA, Takeshi KUWAJIMA

- 1) 工博、神戸大学工学部建設学科 教授(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)
- 2) 工博、東洋大学工学部環境建設学科 助教授(〒350-0815 川崎市鯨井2100)
- 3) 工博、川崎製鉄(株) 建材センター 鋼構造研究所 所長(〒263-0005 千葉市稲毛区長沼町351)
- 4) 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)
- 5) 東京ガス(株) 基礎技術研究所 パイプライン技術チーム(〒105-0023 東京都港区芝浦1-16-25)
- 6) 東邦ガス(株) 供給管理部 保安推進グループ(〒456-0004 名古屋市熱田区桜田町19-18)
- 7) 住友金属工業(株) 総合技術研究所 基盤技術研究部 グループ長(〒660-0041 尼崎市扶桑町1-8)
- 8) 住友金属工業(株) エネルギープラント技術部 副長(〒541-0041 大阪市中央区北浜4-5-33)

Inelastic deformations of buried pipelines under lateral ground displacements during the liquefaction are discussed. Two different patterns of ground deformations at slope and revetment are selected as the typical lateral spreading modes. The shell/beam hybrid model is used to analyze the inelastic behaviour of buried pipes, using the FEM code of ABAQUS, while the applicability of modeling and its analytical technique was verified with the full-scale test results of bent pipes. For the practical formulation conforming to those FEM results, the plastic limit analysis method is adopted to deal with the plastic behaviors of pipeline systems. Finally, a simplified design formula is developed to evaluate the deflection angle of the bend corner.

Key words : liquefaction, FEM analysis, bend, buried pipeline, simplified design formula

1. はじめに

1995年1月の兵庫県南部地震では埋立地を中心に大規模な地盤液状化が発生し、地中構造物にも多大な被害が発生した。そして最大数メートルにも及ぶ液状化側方流動はガス管をはじめとする溶接鋼管に塑性変形に至る大変形を生じさせることとなった。一方、既往の耐震設計は地盤震動に対する耐震安全性確保を目的としたものであり、液状化による地盤変状とそれによる埋設管の塑性変形を想定した設計指針は完全に確立されていないのが現状である。水道施設耐震工法指針・解説(1997年版)では直管の管軸方向に液状化による地盤変状が作用した場合の設計方法が記載されている。しかし、管軸直角方向に地盤変状が作用した場合、曲管部を含む配管系の設計方法については未だ指針化されていない。

本研究は液状化地盤変状に対するガス管路の液状化耐震設計手法の開発を目的とし、特に地盤変状による変形が集中しやすい曲管を中心に以下の手順で研究開発を実施した。すなわち、

- 1) 実大曲管曲げ試験に適合するFEM解析手法の適用性を確認する。
- 2) FEM解析により、液状化側方流動を受ける埋設管の変形挙動特性を把握する。
- 3) 液状化側方流動を受ける埋設管の変形挙動を推定する実用耐震設計法としてFEM解析結果に適合する簡易計算手法を開発する。

本研究は平成8年度～12年度の5ヶ年計画で通産省の委託研究として(社)日本ガス協会が実施している調査研究の一部を報告するものである。

2. 液状化側方流動を受ける埋設管の非線形挙動

2.1 液状化側方流動に伴う地盤変状のモデル化

液状化に伴う側方流動は緩やかな傾斜地形と護岸の背面において発生する事例がしばしば見られる。イメージ図を図1に示す。前者を斜面モデル、後者を護岸モデルと称する。ガス管路は一般に土被り1～2mの表層地盤に埋設されており、液状化側方流動を受ける場合としては液状化地盤

に埋設されているケースと液状化地盤の上層の非液状化地盤に埋設されているケースが考えられる。ここではガス管の変形が大きいと考えられる後者を対象とした。

液状化による地盤変位のモデル化については現地での実測データをもとにいくつかのモデルが提案されているが、濱田ら^{11)・2)}のモデルに基づいて次のように設定した。

すなわち、液状化地盤変動は直径 L (以降地盤変動範囲幅と呼ぶ)の円内で発生し、この円内に埋設された管が側方流動の影響を受けるものと考え、側方流動による地盤変位分布は斜面タイプで三角形、護岸タイプで矩形の分布をするものとした。図2にモデル図およびパラメータを示す。

地盤変位については現地の被害事例をもとに最大5mmまでを考慮した。

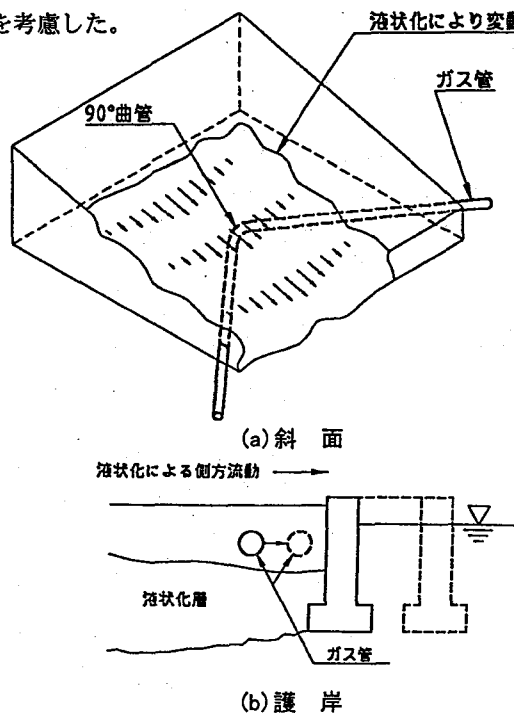


図1 液状化側方流動のイメージ

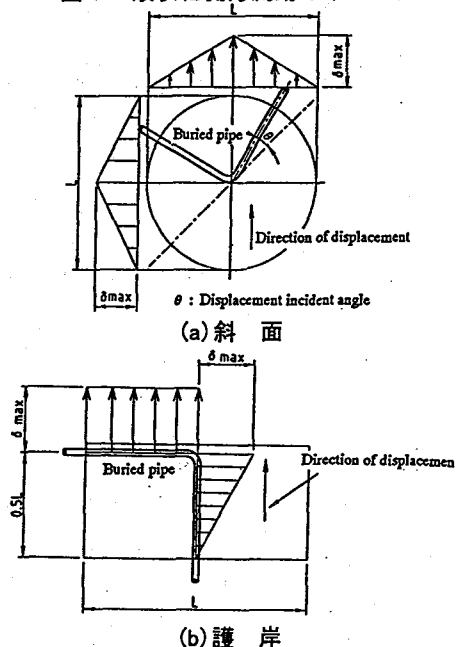


図2 液状化側方流動モデル

2. 2 埋設管モデル

図3に曲管部のFEM解析モデルを示す。FEM解析コードはABAQUS Ver5. 8を使用した。

まずはじめにFEM解析モデルの検証を行うため、曲管の実管曲げ試験とFEM曲げ解析の結果比較を行った。ここでは600A×90°曲管の内曲げについて結果を示す。

実管曲げ試験は図4に示す装置により実施した。表1に試験条件を示す。最大荷重は300t、最大ストロークは3300mmであった。FEM解析は表2に示す解析条件にて行った。解析モデルを図5に、応力-ひずみ曲線、曲管の管厚分布を図6、図7に示す。

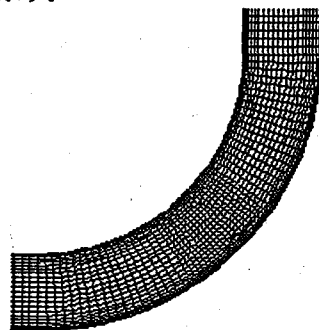


図3 曲管部のFEM解析モデル (90° 曲管)

表1 試験条件 (600A×90° 曲管、内曲げ)

管径×管厚(mm)	φ610×t15.1
材質	API 5L X65
曲率半径(mm)	1830
直管寸法(mm)	910
内圧(kg/cm ²)	91
荷重の載荷	弾性範囲まで荷重制御、その後は変位制御
測定項目	載荷荷重、変位(荷重載荷方向、鉛直方向)、曲げ角度(曲管部、直管部の回転角を測定)、ひずみ(9断面において計測)

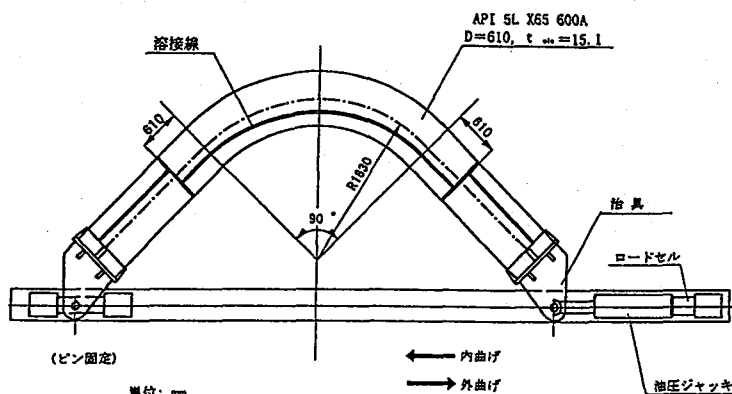


図4 実管曲げ試験装置 (600A×90° 曲管)

表2 解析条件(600A×90°曲管内曲げ)

解析モデル	1/4モデル(半割り、左右対称) 試験装置の治具をモデル化した
使用要素	4節点厚肉シェル要素
要素分割 (曲管部)	管周方向: 48分割 管軸方向: 15分割
材料モデル	応力-ひずみ曲線、管厚分布: 試験結果をもとに図6、図7の ように設定した

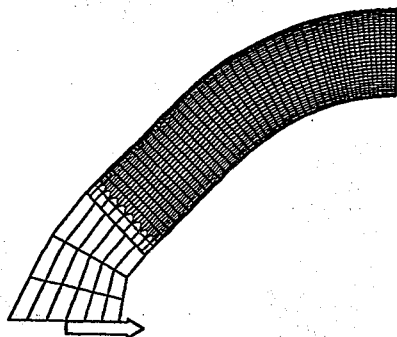


図5 曲管のFEM解析モデル(600A×90°曲管内曲げ)

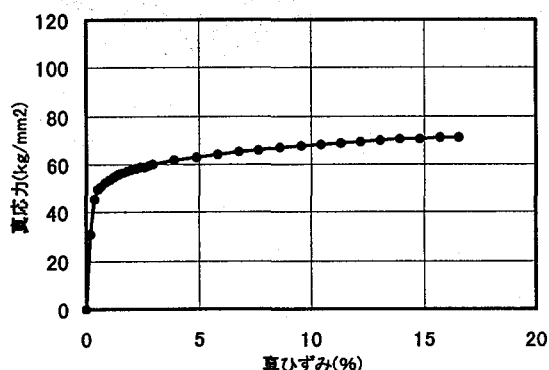


図6 応力-ひずみ曲線(600A×90°曲管)

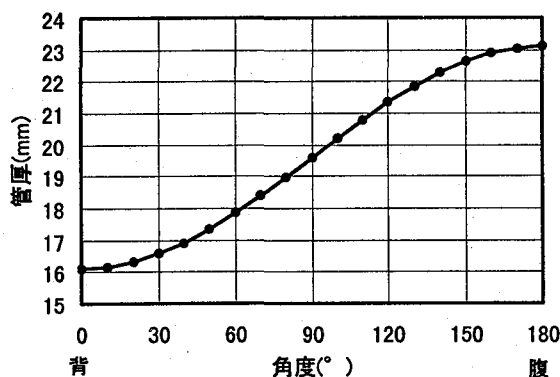


図7 曲管の管厚分布(600A×90°曲管)

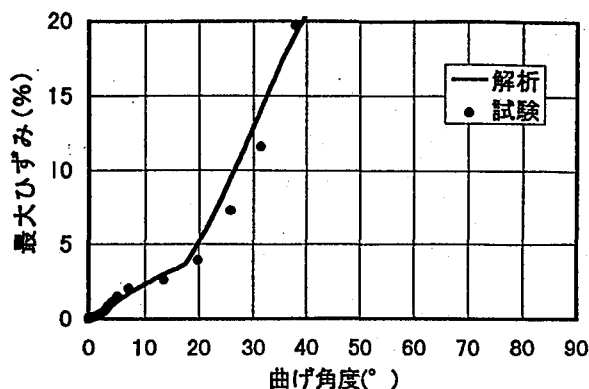


図8 FEM解析と実管試験の結果比較⁴⁾

地盤のモデル化については地盤大変形下での地盤の非線形特性を表現できるようにバイリニア特性をもつ地盤ばねを導入し、図9に示すように配置した。

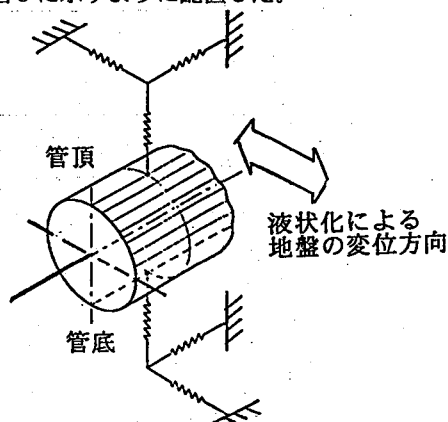


図9 地盤ばねモデル

なお、直管部については吉崎ら³⁾が提案した方法によりはり要素によりモデル化し、解析モデルの簡素化を図った。

2. 3 解析条件

表3に解析条件を示す。地盤変状範囲幅については過去の被害事例をもとに400mを上限とした。

表3 解析条件

	600A	400A	150A
管径(mm)	610	406.4	165.2
管厚(mm)	15.1	7.9	7.1
材質	API 5L X65	API 5L X52	STPG370
曲管角度(°)	90, 45, 22.5		
曲率半径(mm)	1829	609.6	228.6
内圧(kg/cm ²)	91	76	57
地形	斜面、護岸		
地盤変状分布	斜面: 三角形、護岸: 矩形		
地盤ばねモデル	非線形を考慮する		
地盤変状範囲幅	最大400mを考慮		
最大地盤変位(m)	5		

また、液状化が発生した場合、液状化地盤の地盤拘束力が低減することがいわれているが、本研究では液状化地盤の影響を受けてガス管周辺の地盤の地盤拘束力が低減される場合と低減されない場合の両方を考慮した。すなわち、ガス管の変形に大きく影響する管軸直角方向の最大地盤拘束力の値kを2種類設定した。600Aについて低減を考慮しない場合は安藤ら⁵⁾の試験結果による値を用い、低減を考慮する場合は(社)日本ガス協会調査研究「ガス導管液状化

図8に600A×90°曲管の内曲げ変形におけるFEM解析と実管試験の結果のうち曲管の最大引張りひずみと曲管曲げ角度の関係の比較を示す。内曲げの場合、曲管部の周方向ひずみが卓越する。両者は比較的よく一致しており、FEM解析の精度に問題がないことが確認された。

対策調査事業」の研究成果を参照して値を設定した。150A、400Aについては600Aの結果を参考に表4のように値を設定した。なお、管軸方向についてはガス導管耐震設計指針⁶⁾の値を使用した。図10に600A埋設管の地盤特性を示す。

表4 地盤特性値k 単位(MPa)

	600A	400A	150A
地盤拘束力の低減を考慮しない場合	0.25	—	0.25
地盤拘束力の低減を考慮する場合	0.08	0.09	0.12

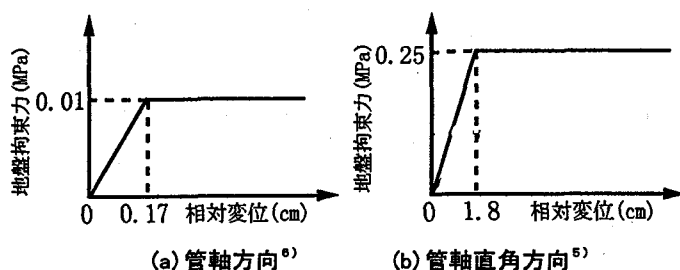


図10 地盤特性(600A地盤拘束力を低減しない場合)

2. 4 解析結果

本研究では150A、400A、600Aの3種類の管径について解析を実施したが、そのうち高圧ガス導管によく用いられている600Aの結果を示す。曲管部の全体挙動は曲げ角度により代表させ、曲管部に発生する局所ひずみは曲管およびその隣接部における最大引張りひずみにより代表させて評価を行った。

2. 4. 1 斜面モデルの結果

斜面モデルでは曲管が内曲げ変形する場合と外曲げ変形する場合で埋設管の変形挙動に相違が見られた。

(1) 内曲げモデルの挙動

600A×90° 曲管内曲げモデルで地盤拘束力を低減させない場合($k=0.25\text{MPa}$)の曲管部周辺の変形状況図を図11に、ひずみの分布図を図12に示す。曲管が内曲げ変形する場合、まず、曲管中央部で局部座屈が発生し、曲管の内曲げ変形が進行する。その後、直管部に2箇所においてもたわみ変形が発生しながら埋設管が変形する。地盤変位と最大ひずみの関係、地盤変位と曲管曲げ角度の関係を図13、図14にそれぞれ示す。最大ひずみは曲管部中央で発生し、地盤変位約2.3mあたりから曲管の局部座屈の影響を受けて、ひずみが急激に増加し、その値は地盤変位5mに対して約22%であった。また、曲管の曲げ角度は曲管中央部がヒンジとなって直線的に増加する傾向が見られた。

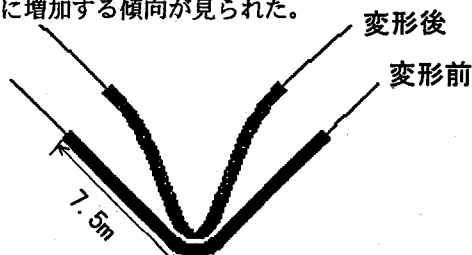
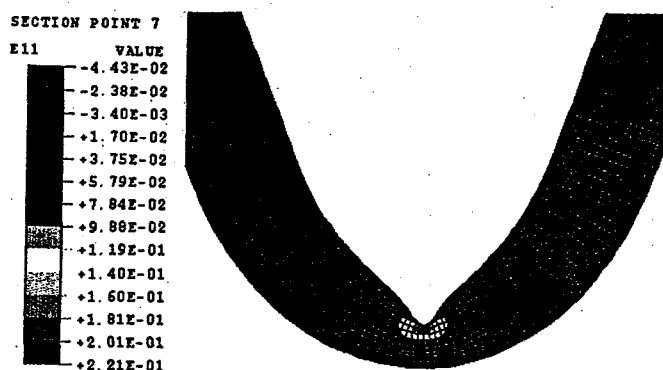
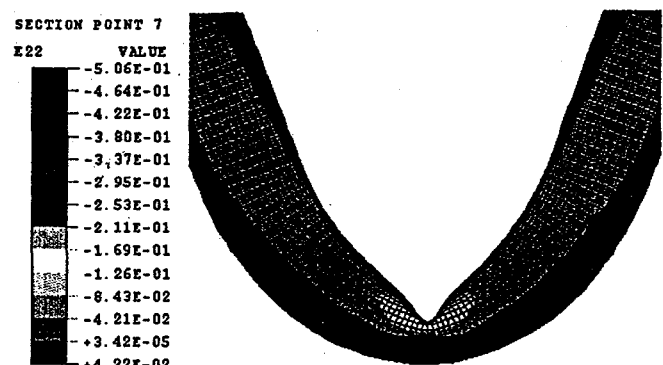


図11 変形状況図(600A×90°曲管、地盤変位5m)



(a) 周方向ひずみ分布



(b) 軸方向ひずみ分布

図12 ひずみ分布図(600A×90°曲管、地盤変位5m)

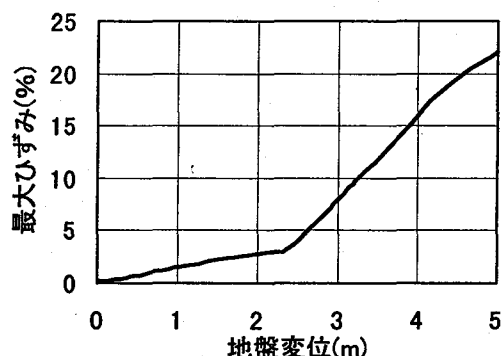


図13 地盤変位と最大ひずみの関係($k=0.25$)

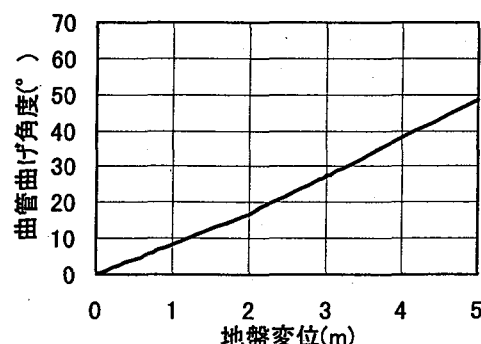


図14 地盤変位と曲管曲げ角度の関係($k=0.25$)

同じモデルで地盤拘束力を低減させた場合($k=0.08$)の地

盤変位と最大ひずみの関係、地盤変位と曲管曲げ角度の関係を図15、図16にそれぞれ示す。最大ひずみは同様に曲管部で発生するが、地盤変位5mまでは局部座屈が発生するだけの土圧が作用していないため、最大ひずみは約3%と大幅に低減される。曲管の曲げ角度も大幅に低減される結果となった。

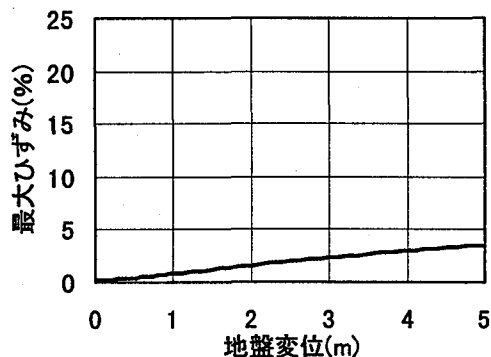


図15 地盤変位と最大ひずみの関係(k=0.08)

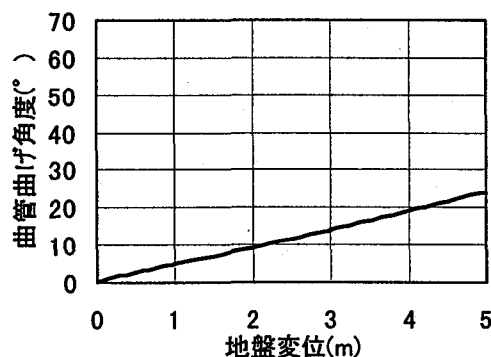


図16 地盤変位と曲管曲げ角度の関係(k=0.08)

(2) 外曲げモデルの挙動

600A×90° 曲管外曲げモデルで地盤拘束力を低減させない場合(k=0.25MPa)の曲管部周辺の変形状況図を図17に、ひずみの分布図を図18に示す。曲管が外曲げ変形する場合、内曲げ変形の場合と比較して曲管部での局部座屈は見られず、最大ひずみ、曲管の曲げ変形は小さい。地盤変位と最大ひずみの関係、地盤変位と曲管曲げ角度の関係を図19、図20にそれぞれ示す。最大ひずみは曲管部で発生し、その値は地盤変位5mに対して約9%と内曲げに比べてかなり小さい値であった。曲管の曲げ角度は内曲げと同様に直線的に増加する傾向が見られた。

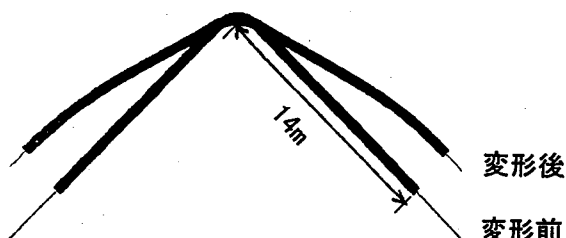
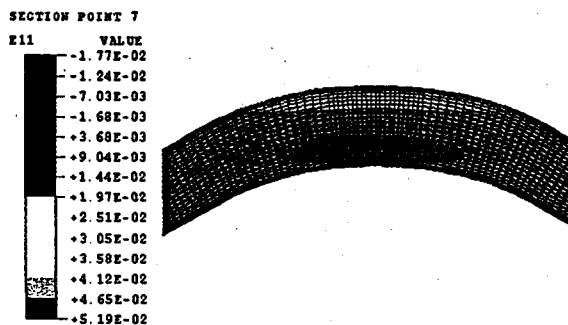
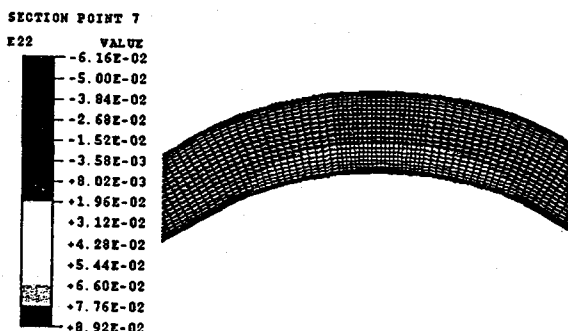


図17 変形状況図(600A×90° 曲管、地盤変位5m)



(a) 周方向ひずみ分布



(b) 軸方向ひずみ分布

図18 ひずみ分布図(600A×90° 曲管、地盤変位5m)

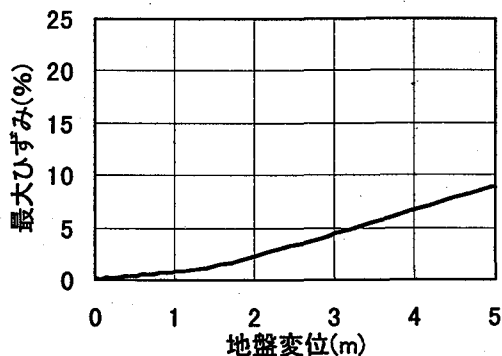


図19 地盤変位と最大ひずみの関係(k=0.25)

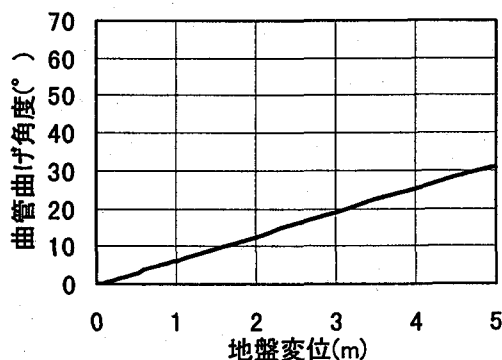


図20 地盤変位と曲管曲げ角度の関係(k=0.25)

2. 4. 2 護岸モデルの結果

ここでは600A×90° 外曲げモデルで地盤拘束力を低減させない場合($k=0.25\text{MPa}$)の曲管部周辺の変形状況図を図21にひずみの分布図を図22に示す。曲管の変形挙動は斜面の外曲げモデルとほぼ同じであるが、図21に示すように直管部に2箇所において大きくたわみ変形を起こしているのが特徴である。直管の管軸直角方向に側方流動が作用するため、このような変形挙動になっている。

地盤変位と最大ひずみの関係、地盤変位と曲管曲げ角度の関係を図23、図24にそれぞれ示す。最大ひずみは曲管部で発生し、その値は地盤変位5mに対して約7%程度である。

曲管の曲げ角度は斜面モデルと同様に直線的に増加する傾向が見られた。

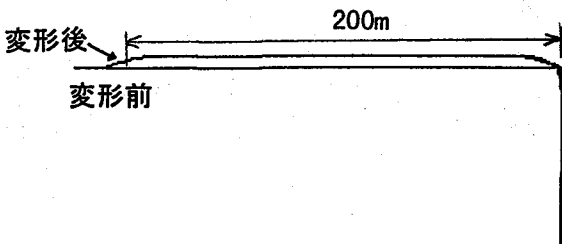
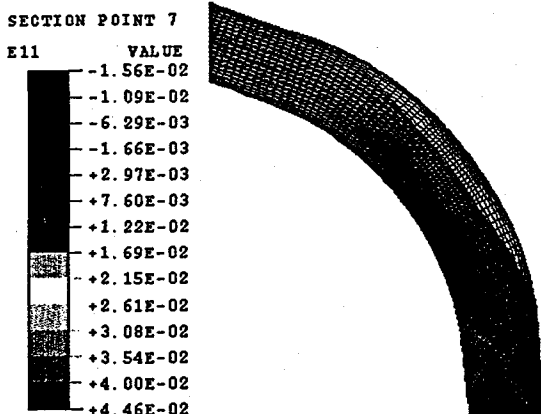
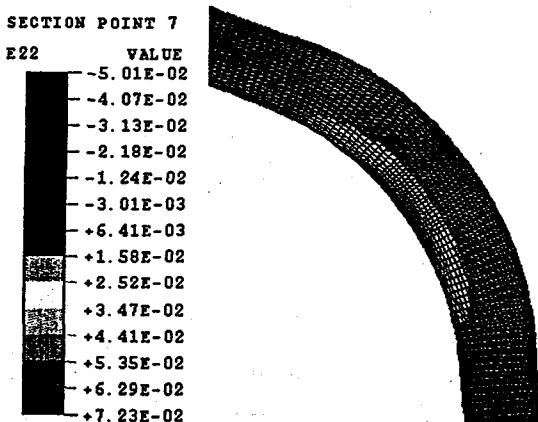


図 2 1 変形状況図 (600A×90° 曲管、地盤変位5m)



(a) 周方向ひずみ分布



(b) 軸方向ひずみ分布

図 2 2 ひずみ分布図 (600A×90° 曲管、地盤変位5m)

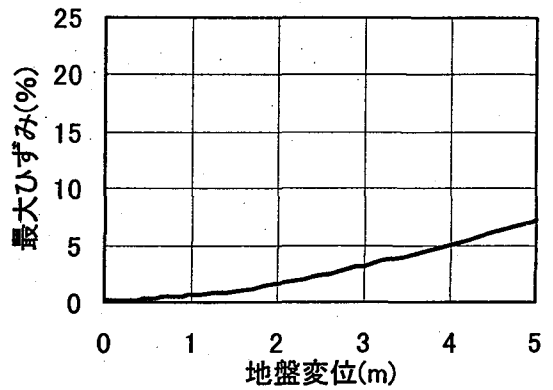


図 2 3 地盤変位と最大ひずみの関係 ($k=0.25$)

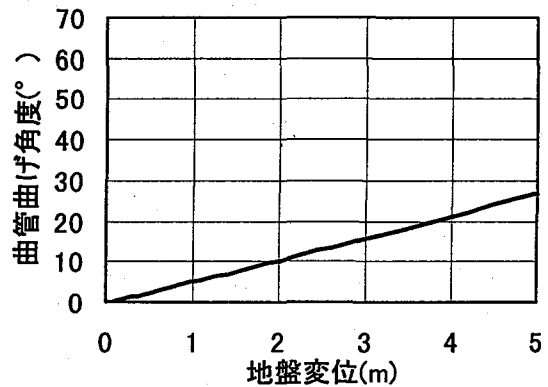


図 2 4 地盤変位と曲管曲げ角度の関係 ($k=0.25$)

3. 塑性ヒンジモデルによる埋設管の簡易理論式

埋設管の解析結果から管の変形モードを分析し、これをもとに液状化側方流動を受ける埋設管の挙動を計算できる簡易計算式を定式化する。

3. 1 埋設管の変形挙動のモデル化

ここでは埋設管の変形挙動のモデル化検討を行う。

(1) 斜面モデル

内曲げ、外曲げ対称モデルの解析結果をそれぞれ図25、図26に示す。埋設管の変形が進むにつれて曲管の中心部および直管部分の塑性変形が進み、ヒンジのような挙動を示す。

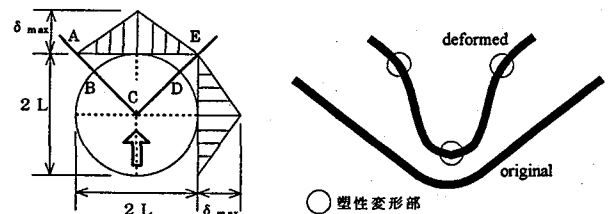


図 2 5 埋設管の変形挙動 (内曲げ対称モデル)

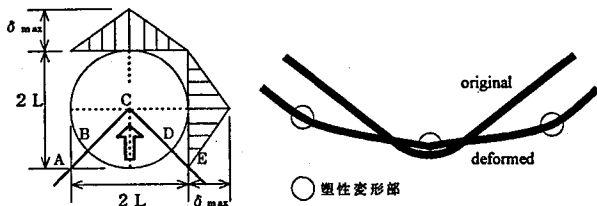


図 2 6 埋設管の変形挙動(外曲げ対称モデル)

図25、図26を参考にして作成したモデルを図27、図28に示す。液状化発生領域と非液状化領域の境界部の管をピン支点、塑性変形が進む箇所を塑性ヒンジでモデル化することができる。

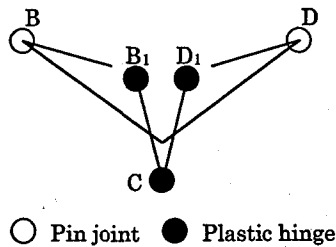


図 2 7 埋設管の塑性ヒンジモデル(内曲げ対称モデル)

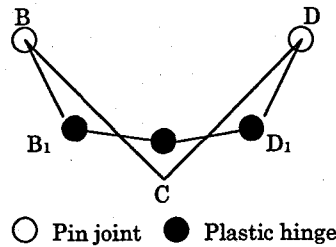


図 2 8 埋設管の塑性ヒンジモデル(外曲げ対称モデル)

(2) 護岸モデル

解析結果を図29、図30に、これを参考にして作成した塑性ヒンジモデルを図31、図32に示す。

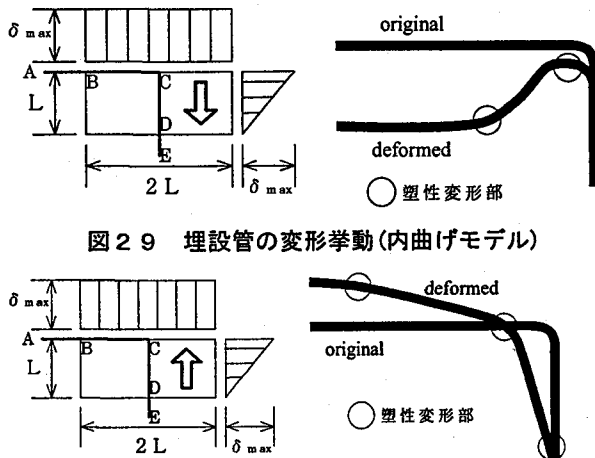


図 2 9 埋設管の変形挙動(内曲げモデル)

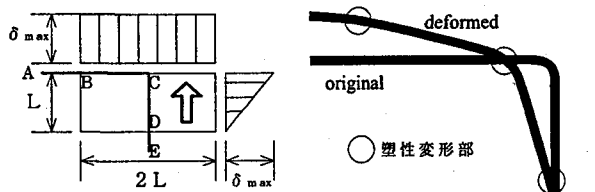


図 3 0 埋設管の変形挙動(外曲げモデル)

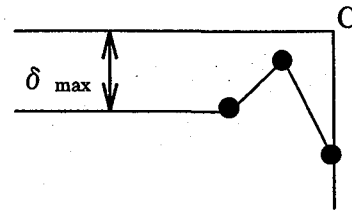


図 3 1 埋設管の塑性ヒンジモデル(内曲げモデル)

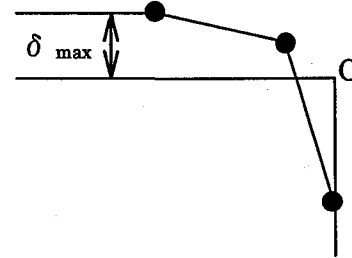


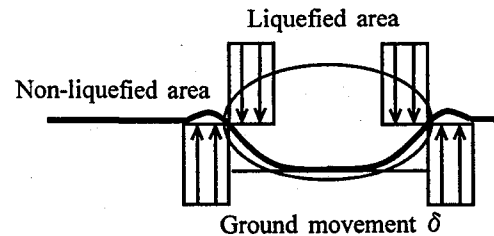
図 3 2 埋設管の塑性ヒンジモデル(外曲げモデル)

3. 2 埋設管の簡易計算式の定式化

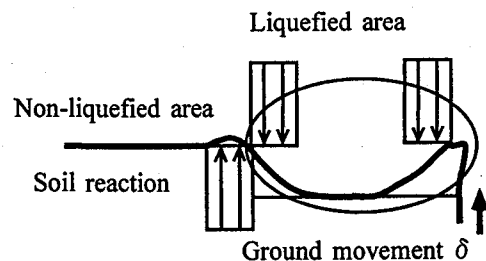
(1) 基本モデルの検討

液状化領域内に埋設された管の変形挙動のイメージを図33に示す。液状化領域に直管のみが埋設されている場合、非液状化地盤と液状化地盤の境界部において管と地盤の相対変位が大きくなり、地盤変位と支点変位によって管の曲げ変形が進行する。

これに対して、曲管が含まれる場合は曲管部が変位拘束点になり、管の曲げ変形が進行する。



(a) 直管モデル



(b) 曲管モデル

図 3 3 液状化領域を横断する埋設管の変形イメージ

管材料の応力ひずみ関係は図34に示すようにモデル化し、埋設管は塑性化すると塑性モーメント M_p の塑性ヒンジを含むはり要素でモデル化できる。

一方、地盤については図35に示すような地盤反力特性を持つものと仮定する。この場合、液状化側方流動が発生すると埋設管と地盤の相対変位 Δu は弾性範囲を超え、地盤は受動土圧状態になると考えられる。埋設管に作用する単位長さあたりの土圧 p は次式で与えられる。

$$p = D \times S_{cr} \quad (1)$$

ただし D : 管径

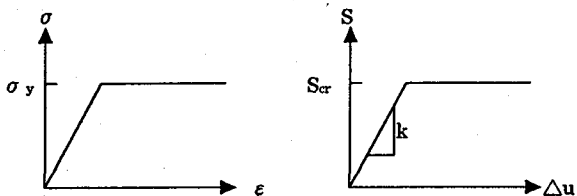
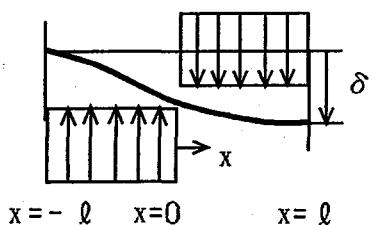
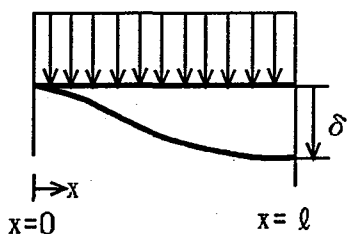


図34 応力-ひずみ関係 図35 地盤反力特性

ここでは、液状化領域と非液状化領域の境界部、曲管部周辺を対象としたモデルを基本モデルとして検討を行う。基本モデルを図36に示す。



(a) 液状化境界部の基本モデル



(b) 曲管部周辺基本モデル

図36 基本モデル

1) 液状化境界部の基本モデル

埋設管のたわみ w は以下の微分方程式で表される。ここで E 、 I は管の断面二次モーメントとヤング係数である。

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = p, \quad 0 \leq x \leq l \quad (2)$$

但し、境界条件は

$$x=0, w(0) = \frac{\delta}{2}, \quad \frac{d^2 w(0)}{dx^2} = 0$$

$$x=l, w(l) = \delta, \quad \frac{d^2 w(l)}{dx^2} = 0$$

式(2)を解くと固定端曲げモーメントが塑性ヒンジに達する時の支点変位 δ_{p1} およびはり長さ l_{p1} は次式となる。

$$\delta_{p1} = \frac{5}{3} \left[\frac{M_p^2}{EI p} \right], \quad l_{p1} = 2l = 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_p}{p}} \quad (4)$$

支点変位が δ_{p1} を超えると両端の固定端がヒンジとなって変形が進む。

2) 曲管部周辺基本モデル

基礎方程式は式(2)で表される。第1ヒンジが形成されるまでの境界条件は式(5)のようになる。

$$x=0, w(0) = 0, \quad \frac{dw(0)}{dx} = 0 \quad (5)$$

$$x=l, w(l) = \delta, \quad \frac{dw(l)}{dx} = 0$$

これに $x=0$ で曲げモーメントが最大になることを考慮して解くと、塑性ヒンジが発生する時の支点変位 δ_{p2} およびはり長さ l_{p2} は式(6)のようになる。

$$\delta_{p2} = \frac{3}{8} \left[\frac{M_p^2}{EI p} \right], \quad l_{p2} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{M_p}{p}} \quad (6)$$

支点変位 δ_{p2} 以上では $x=0$ の固定端がヒンジになり、変形が進んでいく。次に $x=l$ が塑性ヒンジになる時の支点変位 δ_{p3} およびはり長さ l_{p3} は式(7)で示される境界条件を用いて式(8)のように求められる。

$$x=0, w(0) = 0, \quad M(0) = -M_p \quad (7)$$

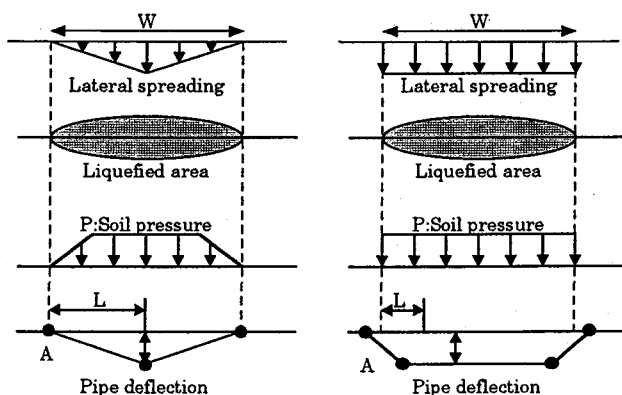
$$x=l, w(l) = \delta, \quad \frac{dw(l)}{dx} = 0$$

$$\delta_{p3} = \frac{10}{3} \left[\frac{(\gamma M_p)^2}{EI p} \right], \quad l_{p3} = 2\sqrt{\frac{\gamma M_p}{p}} \quad (8)$$

支点変位 δ_{p3} を超えると2ヶ所の塑性ヒンジで管の変形が進むことになる。 γ は曲管に対する塑性モーメント補正係数である。

(2) 直管モデルの定式化

(1)の結果を用いて液状化領域を直管が横切る場合の定式化を行う。図37にモデルを示す。ここでは地盤側方流動分布を三角形と矩形の2ケースを検討する。



(a) 三角形分布

(b) 矩形分布

図37 直管モデル

- 1) 弾性変形の場合（塑性ヒンジが形成されていない場合）
管の変形角は次式で表される。

$$\theta_c = \delta \cdot \lambda \quad (\delta \leq \Delta_{cr}) \quad (9)$$

ここで

$$\Delta_{cr} = \frac{5}{3} \left[\frac{M_p^2}{EI p} \right], \quad \lambda = \sqrt{\frac{4K}{4EI}} \quad (10)$$

- 2) 塑性変形の場合（塑性ヒンジが形成されている場合）

$$\theta_c = \arctan(\delta/L) \quad (\delta \geq \Delta_{cr}) \quad (11)$$

ここで $L=W/2$ （地盤変位分布：三角形分布）

$$L = 2 \sqrt{\frac{2M_p}{p}} \quad (\text{地盤変位分布：矩形分布})$$

(3) 曲管モデルの定式化

3.1 で曲管部周辺の管の変形挙動は3点塑性ヒンジモデルにより表せることを示した。ここではこのモデルに基づいて曲管を含むモデルの定式化を行う。図38に曲管部周辺のヒンジモデルを示す。曲管の変形角は変形前後の曲管の開き角度をそれぞれ $2\theta_y$ 、 2α とすると曲管の変形角度 θ_c は次式で表される。

$$\theta_c = 2 |\theta_y - \alpha| \quad (12)$$

曲管の中心線と地盤側方流動方向との傾きを β とすると図38中の塑性ヒンジが形成されるA点、B点の変位は次式で表される。

$$\delta_A = \delta \sin(\alpha + \beta), \quad \delta_B = \delta \sin(\alpha - \beta) \quad (13)$$

曲管の変形角度 θ_x 、 θ_y は幾何学的に次のように表される。

$$\tan \theta_x = \frac{(\delta_A - \delta_B) \sin \alpha}{2L_1 \sin \alpha - (\delta_A + \delta_B) \cos \alpha}$$

$$\sin \theta_y = \frac{A'B'}{2L_1} \quad (14)$$

$$\frac{1}{2L_1} \sqrt{(\delta_A - \delta_B)^2 \sin^2 \alpha + [2L_1 \sin \alpha - (\delta_A + \delta_B) \cos \alpha]^2}$$

$$L_1 = 2 \sqrt{\frac{\gamma M_p}{p}}$$

- 3.1 で示した斜面内曲げ、外曲げ、護岸モデルについて β の値を以下に示す。

斜面：内曲げ $\beta = 0$ ，外曲げ $\beta = \pi$

護岸：内曲げ $\beta = \pi/2 - \alpha$ ，外曲げ $\beta = 3\pi/2 - \alpha$

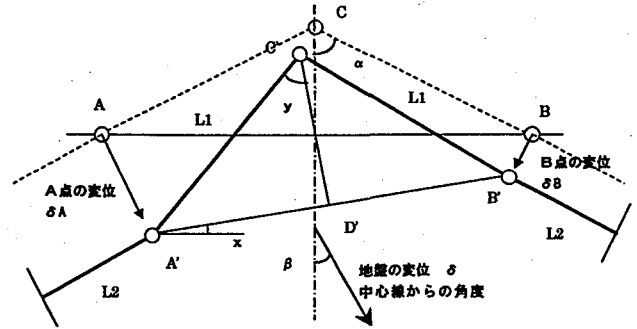


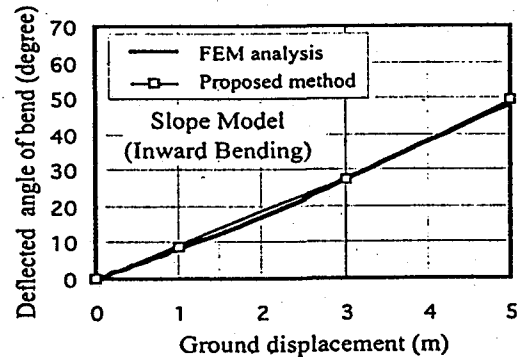
図38 曲管部周辺のヒンジモデル

4. 検討事例

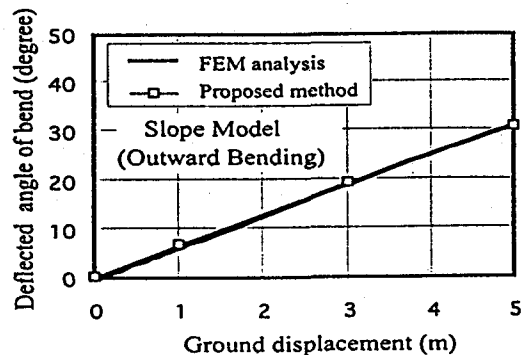
本研究では3. で誘導した簡易計算式の適用性をFEM解析結果との比較により検討する。

3.1 で検討を行ったモデルについて地盤変位と曲管の曲げ角度の関係を比較した結果を図39、図40に示す。

簡易計算式による結果は解析結果とかなりよく一致しており、設計に用いる簡易計算式として適用可能であることが明らかになった。

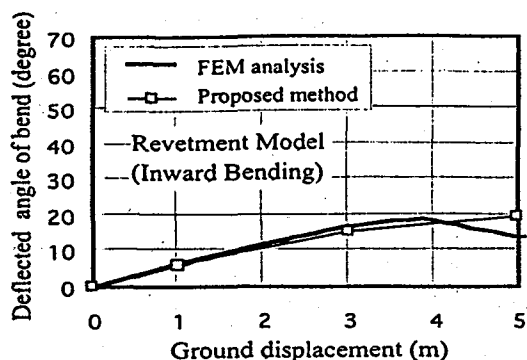


(a) 内曲げモデル

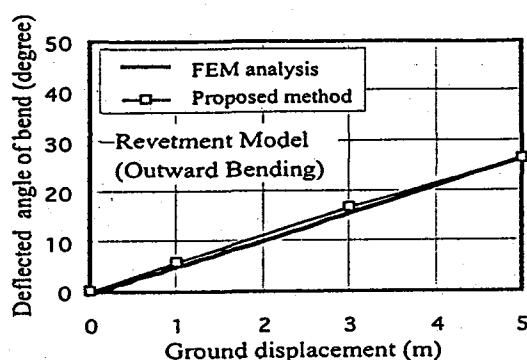


(b) 外曲げモデル

図39 地盤変位と曲管曲げ角度の関係(斜面モデル)



(a) 内曲げモデル



(b) 外曲げモデル

図40 地盤変位と曲管曲げ角度の関係(護岸モデル)

5. おわりに

本研究では液状化側方流動の影響を受ける埋設管の解析を行い、この結果をもとに設計実務で使用する簡易計算式を定式化した。次に簡易計算式の適用性を検討したところ、解析結果とよい一致が見られた。このことから、この簡易計算式が設計実務に適用できることが確認された。

今後は、設計指針を策定するなかで、具体的に設計指針に用いる簡易式として完成させる予定である。

謝辞

本研究は通商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～12年度の予定で調査研究を進めている、「ガス導管液状化対策調査」の平成9年度および平成10年度の成果の一部をまとめたものである。通商産業省をはじめとする関係各位およびガス導管液状化対策調査研究特別委員会(委員長：片山恒雄科学技術庁防災科学技術研究所長)の各委員に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) (財)地震予知総合研究振興会：液状化を考慮した埋設ガス導管の耐震設計法と対策工法に関する調査研究, (1994)
- 2) M. Satoh, R. Isoyama, M. Hamada, A. Hatakeyama:
A procedure to assess the stability of buried structures against liquefaction-induced ground deformation, Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, April 2-7, (1995)
- 3) K. Yoshizaki and N. Oguchi: Estimation of the deformation behavior of elbows for an earthquake-resistant design, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, (1996)
- 4) ガス導管液状化対策調査事業平成9年度成果報告書, (社)日本ガス協会, (1998)
- 5) 安藤広和, 小林実央, 小口憲武：地震時地盤の側方変位により埋設管に作用する拘束力の検討, 第23回地震工学研究発表会, (1995), pp. 409-412
- 6) ガス工作物設置基準調査委員会, ガス導管耐震設計指針, (社)日本ガス協会, (1982)

1999年 9月17日