

液状化による側方流動を受ける埋設鋼管の 塑性ヒンジ解析

鈴木崇伸¹・高田至郎²・小池武³・小川安雄⁴・松本真明⁵

¹正会員 博(工) 東洋大学助教授 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

²フェロー 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1)

³正会員 工博 川鉄エンジニアリング(株) 土木事業部 (〒112-0004 東京都文京区後楽 1-1-5)

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

⁵正会員 博(工) 住友金属工業(株) エネルギーエンジニアリング事業部 (〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11)

本研究は液状化による地盤変位が作用する埋設管の簡易な変形計算法を提案している。兵庫県南部地震の溶接鋼管の被災例に注目して、地盤変位による過大な外力が加わる場合には、塑性ヒンジが形成されるとして変形の定式化をした。配管系を剛塑性モデルで表現し、地盤変位の影響を軸直角方向の等分布荷重と、2点間の相対変位で表現した結果、簡易な計算式が求められた。また曲管部は大変形時には複雑な挙動となるが、シェル解析結果を管の形状特性値であるパイプファクターで整理したところ、最大曲げ抵抗力はおおよそパイプファクターで推定可能なことが明らかになった。曲げ変形の方法と管厚の変化の有無により4とおりの推定式を提案している。本研究で提案する簡易な計算式は液状化による地盤変位を受ける埋設管の基本的な変形メカニズムを表現できており、設計実務に有効な手法と考えられる。

Key Words : plastic hinge analysis, lateral displacement, steel pipeline, liquefaction, large deformation

1. はじめに

地盤の液状化が構造物、とりわけ埋設管に大きな影響を与えることが過去の地震より明らかになっている。濱田ら¹⁾によって液状化による地盤の流動は数mのオーダーになることが指摘されて以降、こうした大きな地盤変位を受ける埋設管の挙動の解明が望まれている。さてガス導管は、内圧により種類が分けられているが、内圧が大きい場合には溶接鋼管が主に用いられており、大きな地盤変位は鋼管を塑性域まで変形させるものである。液状化のような地盤の大変形に対しても、ガス供給ルートの安全性は確保される必要があり、液状化による地盤変位を見込んだ耐震設計が必要とされる²⁾。筆者らの研究グループ³⁾はこれまで鋼管の大変形問題を有限要素法によるシェル解析で扱ってきたが、基本的な変形メカニズムを取り込んだ簡易な計算式も設計実務には望まれる。

さて鋼材は延性に富む材料であり、大きな塑性変形に耐えることが利点となっている。Miki et al.⁴⁾のガス管の大変形実験結果によれば、数10%のひずみに対しても、ガス漏洩しないことが確認されている。降伏が十分に進行した極限状態では弾性変形の影響は相対的に小さく、塑性変形が支配的になると考えられる。鋼材を組み合わせた骨組み構造物の極限解析では弾性変形を無視して、剛塑性体で構造物をモデル化して崩壊にいたる荷重条件を検討することが行われている。すなわち、塑性ヒンジ

が発生する位置と崩壊メカニズムの問題を解くことにより、構造的な安全性を検討する手法である。さて、兵庫県南部地震の中圧導管の被災例²⁾において特定個所の屈曲がみられたことに加えて、佐藤他⁵⁾の遠心実験装置を用いた側方流動の影響を再現する研究においても特定個所が屈曲することが確認されている。本研究では剛塑性モデルを埋設鋼管の側方流動解析に応用して変形計算式を導いている⁶⁾。塑性ヒンジ解析においては、ヒンジ部のモーメントをどのように設定するかが重要な課題となる。とりわけ、曲管部は剛性が急に变化する部位であり、適切な推定式が必要とされる。本研究ではFEM解析結果を詳細に分析して、パイプファクターによる推定式を見出している。

以上の塑性ヒンジ解析結果を、実被害や大変形の実験結果をよく説明できるFEM解析(シェルモデル)と比較したところ、よい一致が確認された。本論文で提案する塑性ヒンジ解析法は、液状化による側方流動を受ける埋設鋼管の基本的な変形メカニズムをとらえており、液状化地盤における埋設鋼管の設計実務に役立つ手法である。

2. 塑性ヒンジ解析の適用の検討

(1) 液状化による外力

地中埋設管の耐震設計においては、周辺地盤はバネでモデル化されるのが一般的であり、埋設実験等からバネ

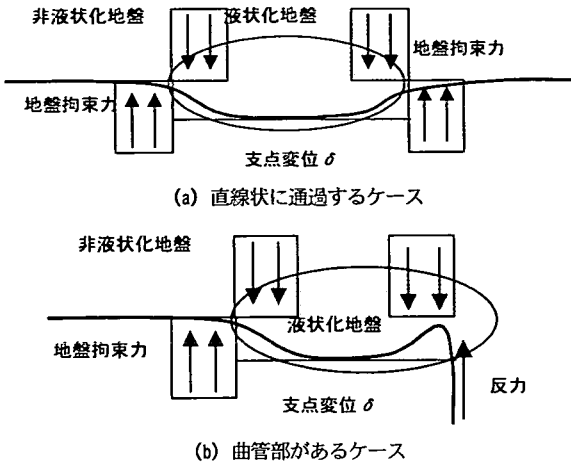


図-1 液化化地盤の解析イメージ

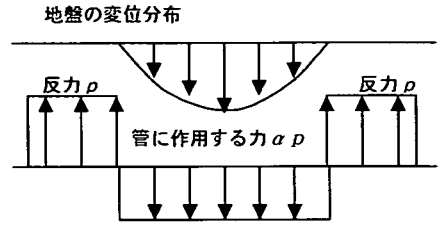


図-2 非線形ばねで支持されたはりの荷重

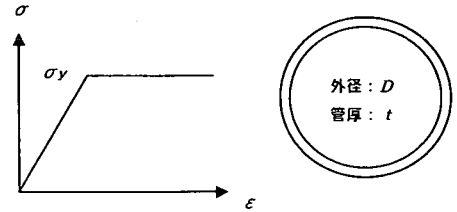


図-3 はりの材料と形状モデル

係数が決められているが、液化化のように地盤が大きく変形する場合には、地盤からの反力は管と地盤の相対変位に比例しなくなる。遠心実験により液化化時の埋設管の地盤反力を測定した Shimamura et al.⁷⁾の実験によれば、管と地盤の相対変位量が一定の値以上になると、地盤反力が一定の値となることが確認されている。こうした実験結果から地盤の大変形を受ける埋設管は非線形なばねで支持されたはりモデルで表されることが多く、本研究では完全弾塑性型の地盤バネを仮定して解析法の検討を行なう。

さて鈴木の研究⁸⁾によれば、完全弾塑性型の地盤バネで支持されたはりに支点変位が加わる場合には、バネ支持の影響は無視でき、等分布荷重と支点変位のはり解析に置き換えられる。単位面積あたりの地盤反力の上限値を σ_c とすると、 σ_c に外径をかけた等分布荷重と地盤変位による支点の変位が作用することになる。

図-1 に液化化側方流動を受ける埋設鋼管の解析イメージを示すが、(a)のように液化化地盤を直線状に通過する場合には非液化化地盤との境界部分で管と地盤の相対変位が大きくなり、等分布荷重と支点変位により管は曲げ変形すると考えられる。境界部からある程度離れると管と地盤の相対変位は小さくなり、埋設管は地盤に追隨して移動する。一方(b)のように曲管部がある場合には、軸力の影響により管の動きは拘束され、みかけ上固定点とみなすことができる。図の右側に作用する力を示しているが、支点変位と等分布荷重、さらに折れ曲がった管の軸力でつりあい関係となる。

(2) 簡単な解析モデル

兵庫県南部地震では、大蔵谷の法面崩壊や地下鉄大開駅の崩壊により、ガス導管に大きな変形があったことが報告されている²⁾。参考文献2)に2箇所の被害写真と被害状況のスケッチが掲載されている。塑性ヒンジモデルでこれらの被害を説明できるか検討してみる。

管と地盤の相対変位が大きい場合に一定の地盤抵抗力になると仮定すると、地盤変位の分布に関わらず等分布荷重が作用するモデルで近似ができる。地盤変位が生じる区間(2L)に等分布力が作用するモデルとする。埋設管の外径をDとしてはり単位長さあたりの分布力は $p = \sigma_y D$ となる。地盤変位による等分布力を受ける区間の両側では等分布力につりあうだけの反力が等分布に作用する。地盤変位を受ける区間の等分布荷重を αp 、地盤変位を受けない区間の等分布荷重をpとする。係数 α は荷重の低減係数である。図-2に地盤変位の分布と導管に作用する力を示す。鈴木⁸⁾によれば、パイリニア型のバネが降伏する区間の境界では、固定条件で近似が可能である。そこで、力のつりあいから、変状区間の両側の αL の区間に反力が作用するものとし、両端では固定条件であるはりモデルを考える。解析モデル図を図-4の上段に示している。

導管は図-3に示すように外径D、管厚tの円環とし、降伏応力 σ_y で降伏以降は一定応力となる完全弾塑性型の材料とする。降伏モーメントは

$$M_y = \frac{\pi(D^4 - (D-2t)^4)}{32D} \sigma_y \quad (1)$$

で表される。一方、全断面が塑性化する塑性モーメントは

$$M_p = \frac{4}{\pi} M_y \quad (2)$$

となる。

(3) 塑性ヒンジ解析

簡略化したモデルであるが、荷重pを徐々に増加させたときの曲げモーメント分布を計算して、塑性ヒンジを

表-1 等分布荷重を受けるはりの曲げモーメント

荷重条件	曲げモーメント ($0 < x < \alpha L$)	曲げモーメント ($\alpha L < x < (\alpha + 1)L$)
$\alpha p \leq \frac{6M_p}{L^2} \frac{1}{\alpha + 2}$	$M(x) = \frac{p}{6} \{3x^2 - (\alpha^2 + 2\alpha)L^2\}$	$M(x) = -\frac{\alpha p}{6} \{3x^2 - 6(\alpha + 1)Lx + (3\alpha^2 + 4\alpha + 2)L^2\}$
$\alpha p \geq \frac{6M_p}{L^2} \frac{1}{\alpha + 2}$	$M(x) = \frac{p}{2} x^2 - M_p$	$M(x) = -\frac{\alpha p}{2} \{x^2 - 2(\alpha + 1)Lx + (\alpha^2 + \alpha)L^2\} - M_p$

加えていく。左固定端を x 軸原点にとり、対称性を考慮して $0 \leq x \leq (1 + \alpha)L$ の区間で微分方程式を解く。微分方程式は

$$0 \leq x \leq \alpha L \quad EI \frac{d^4 w}{dx^4} = -p \quad (3)$$

$$\alpha L \leq x \leq (\alpha + 1)L \quad EI \frac{d^4 w}{dx^4} = \alpha p \quad (4)$$

である。境界条件は $x = 0$ で

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

が成り立ち、 $x = \alpha L$ では関数になめらかに連続する条件 (3 階微分まで等しい) が成立する。さらに対称性より、 $x = (\alpha + 1)L$ で

$$\frac{dw}{dx}((\alpha + 1)L) = 0 \quad \frac{d^3 w}{dx^3}((\alpha + 1)L) = 0 \quad (6)$$

の 8 条件である。計算結果を表-1 に示しているが、固定端の曲げモーメントは

$$M(0) = -\frac{pL^2}{6} (\alpha^2 + 2\alpha) \quad (7)$$

はり中央の曲げモーメントは

$$M((\alpha + 1)L) = \frac{pL^2}{6} (2\alpha^2 + \alpha) \quad (8)$$

となる。変状区間の分布力の方が小さいと仮定して、 $0 < \alpha < 1$ のとき

$$|M(0)| > |M((\alpha + 1)L)| \quad (9)$$

となる。荷重の増加にともなって両端の固定端がヒンジとなり、変形が進んでいく。このときの液状化地盤の等分布外力は、比率 α と液状化区間の距離 L と塑性モーメントによって決められる。

次に両端ヒンジの条件で、同じ荷重条件の問題を解く。計算結果を表-1 の下段に示している。はり中央の曲げモーメントは、

$$M((\alpha + 1)L) = \frac{pL^2}{2} (\alpha^2 + \alpha) - M_p \quad (10)$$

であり、はり中央の曲げモーメントが塑性モーメントに達するとき、液状化地盤の等分布荷重は

$$\alpha p = \frac{4M_p}{L^2} \frac{1}{\alpha + 1} \quad (11)$$

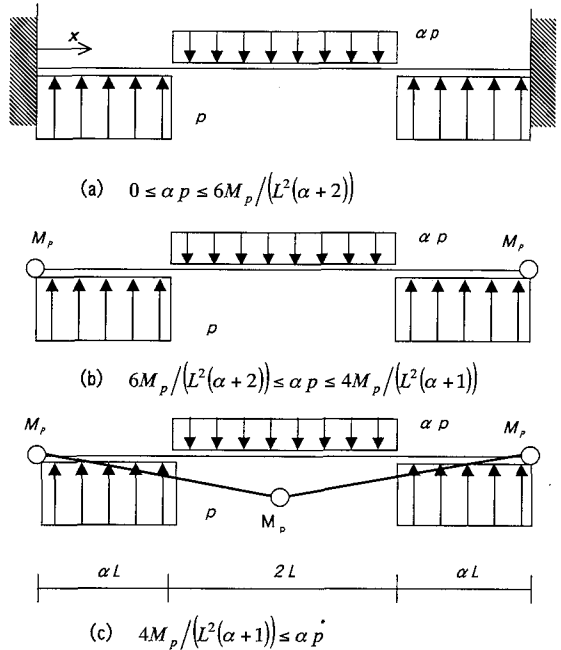


図-4 塑性ヒンジ解析のモデル図

となる。この荷重は塑性メカニズムからも簡単に計算できる。図-4 の中段と下段に変形の進行の様子を示すが、荷重の増加に伴って、2 個あるいは 3 個のヒンジが形成される。ヒンジが 3 個になると系は不安定となり、地盤変位に追従して大きく変形する。

(4) ヒンジモデルの適合性

以上まとめると、荷重の漸増にともなって曲げモーメントも徐々に増加し、塑性ヒンジが形成される条件にいたる。塑性ヒンジが形成される部位では、支持条件が変化するために、たわみあるいは勾配といった変形の進行度合いが変化し最終的に塑性流れの状態にいたる。今回の簡単な計算では曲げ変形のみを考え、またバネ支持部分を無視して両端固定におきかえて計算しているため、地盤変位と管の変形にはなっていない。しかしながら大きな地盤変位が作用する埋設管変形の基本メカニズムは今回解析で用いた剛塑性体的と考えられ、ヒンジ化した複数の箇所の変形が卓越していると考えられる。

兵庫県南部地震のガス管被災事例に照らせば、大蔵谷の斜面崩壊は荷重があまり大きくなかったために両端固定から両端ヒンジ程度の変形となり、中央部が大きくた

表-2 曲げ抵抗力の計算範囲

項目	範囲
導管の呼び径	100A, 150A, 200A, 300A, 400A, 600A, 750A
外径管厚比 (D/t)	15~60
曲管の曲がり角度 (θ)	45°, 90°
曲率半径 (R)	1.5· D , 3.0· D

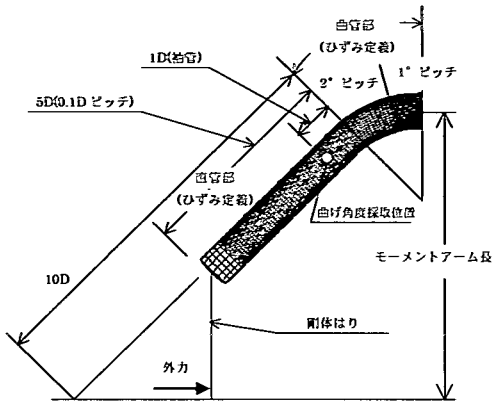


図-5 解析モデル (600A 90° 曲管)

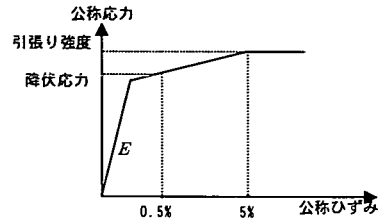
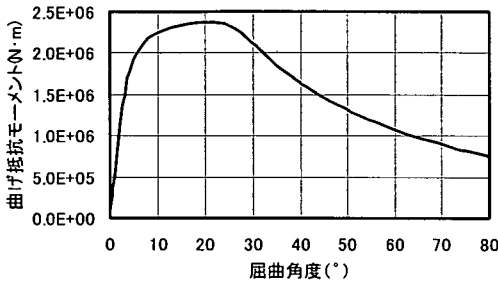
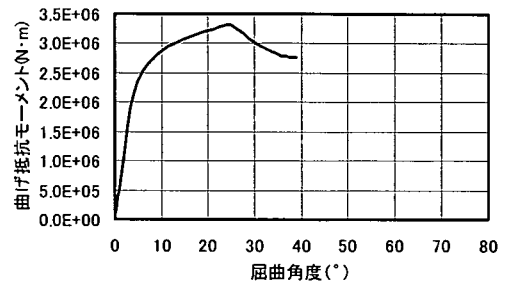


図-6 FEM解析に用いた材料特性



(a) 内曲げ



(b) 外曲げ

図-7 曲げ抵抗モーメントと屈曲角の計算例

(600A90° 高周波曲管)

わんで耐えたと考えられる。また大開の地下鉄駅崩壊による陥没では荷重が3ヒンジ条件に達して塑性流れ状態に入っていたが、駅舎崩壊の影響が数mの陥没量ですんだためにそこまでの変形で止まったと考えられる。

3. ヒンジの曲げ抵抗力

(1) シェル解析による算定

直管部の塑性モーメントは断面の形状と降伏応力から決まる式(2)で定義できる。しかしながらガス導管は曲がり部のある複雑な配管系であり、曲管部の大変形時における曲げ抵抗力の評価が必要とされる。曲管部が塑性域に達して、大きな変形を生じるときに、曲げモーメントと曲率あるいは屈曲角は、材料の非線形な変形特性に加えて、断面の偏平や局部座屈などが生じて、複雑な挙動となる。塑性ヒンジ解析をガス導管に適用するにあたり、ヒンジ部の曲げ抵抗を適切に見積もる必要がある。

一般に曲管部の曲げ剛性は、材料特性のほか、外径 D 、管厚 t 、軸中心線における曲率半径 R 、曲がり角 θ によって変化する。さらに曲管の製造法により、管厚 t が微妙に変化する影響もある。そこでシェル解析により、曲管

の大変形状態のシミュレーションを行なった。解析モデルの一例を図-5に示す。計算量を節約するために、曲管部付近だけをシェル要素とし、曲管部からある程度離れた直管部は剛体はり要素とするハイブリッド解析を行なっている³⁾。モデルの管厚分布はマンドレル管については周方向に均一とし、高周波曲げ管については腹側を+20%、背側を-15%偏肉させたモデルとした。解析は全部で43ケース行なったが、計算条件の範囲を表-2に示す。なお図-6に示すように、材料特性は呼び径ごとのヤング率、降伏応力、引張り強度から設定した3直線で近似している。

解析結果の一例として、図-5に示した600A90°曲管の曲げ抵抗モーメントと屈曲角の関係を図-7に示す。曲げ抵抗モーメントは図-5に示している外力とモーメントアーム長の積である。管が閉じる方向に変形する内曲げの場合には、曲げ抵抗モーメントはピークをもち、屈曲の進行にともなって、抵抗モーメントは増加の後、減少していく。管が開く方向に変形する外曲げの場合にも、同様の挙動となるが、曲げ抵抗モーメントは内曲げに比べて大きくなる。この曲げ抵抗モーメントの最大値を曲管の特性値として分析する。

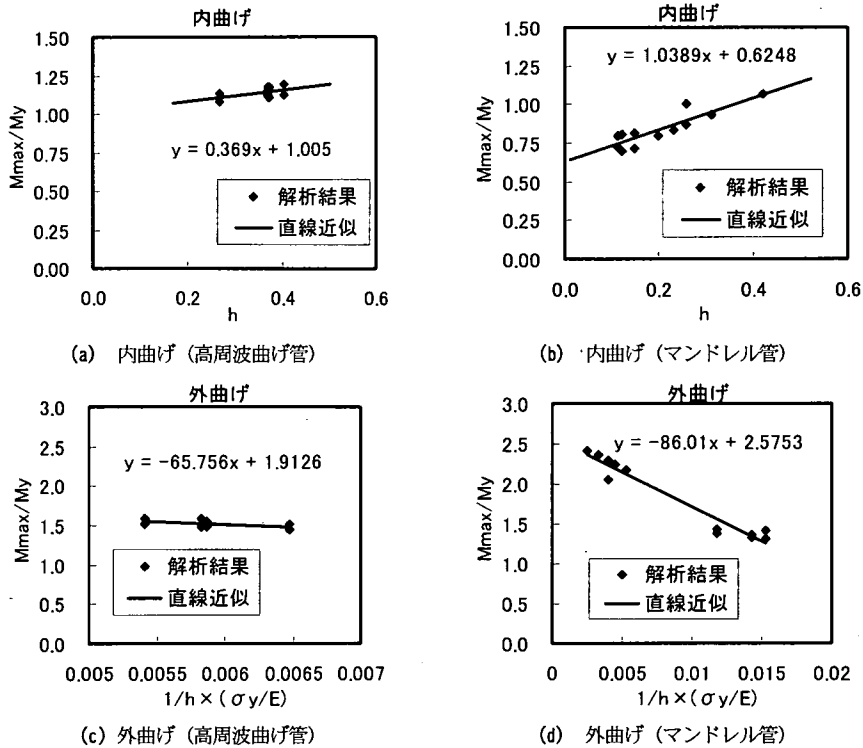


図-8 パイプファクターと最大曲げ抵抗モーメント

(2)パイプファクターによる推定式

曲管のたわみ特性についてはパイプファクター h で整理できるといわれている⁹⁾。パイプファクターは式(12)に示す形状の特性値であり、平均半径 r_m 、管厚 t 、曲率半径 R によって変化する。

$$h = \frac{tR}{r_m^2} \quad (12)$$

ただし、管厚が周方向に一樣なマンドレル管は公称管厚とする。また前述のように、管厚が周方向に変化する高周波曲げ管では、公称管厚を0.85で割った厚めの直管を曲げ加工しているので、この直管の値を管厚とする。

塑性ヒンジの形成に影響するのは、曲げ抵抗モーメントの最大値である。そこでFEM解析によって得られた曲管の最大曲げ抵抗モーメント M_{max} をパイプファクター h と式(1)に示した降伏モーメント M_y で整理した結果を図-8に示す。同図(a)、(b)に示した高周波曲げ管、マンドレル管の内曲げのケースについては、パイプファクターで整理すると直線近似が可能であり、管の幾何形状により最大曲げ抵抗モーメントを評価できる。

しかし、高周波曲げ管及びマンドレル管の外曲げのケースではパイプファクターとの相関は明確な比例関係にならない。この原因として曲管部以外に、直管部での変形形状の影響が考えられる。このことから座屈の発生に

表-3 最大曲げ抵抗モーメントの推定式

		推定式
内 曲 げ	高周波曲 げ管	$M_{max} = M_y (0.369h + 1.005)$
	マンドレ ル管	$M_{max} = M_y (1.039h + 0.625)$
外 曲 げ	高周波曲 げ管	$M_{max} = M_y \left(-65.76 \frac{1}{h} \frac{\sigma_y}{E} + 1.913 \right)$
	マンドレ ル管	$M_{max} = M_y \left(-86.01 \frac{1}{h} \frac{\sigma_y}{E} + 2.575 \right)$

影響すると考えられる降伏ひずみの影響を考慮して、 $(1/h * \sigma_y / E)$ を用いて整理した結果を図-8(c)、(d)に示す。降伏ひずみを組み合わせることにより直線近似が可能である。

以上に示した最大曲げ抵抗モーメントの分析結果を整理したのが表-3である。曲管の大変形時の特性値である最大曲げ抵抗モーメント M_{max} は降伏モーメント M_y 、パイプファクター h 、降伏ひずみ σ_y / E により簡単に推定できる¹⁰⁾。

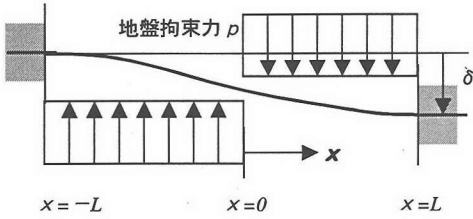


図-9 曲げを受ける直管の解析モデル

4. 直管部の塑性ヒンジ解析

(1) 解析モデル

図-1(a)に示した液状化地盤を直線上に通過するケースの解析を行なう。左側の境界部付近をとりだして矩形の地盤変位を与える解析を行なう。 $x = 0$ を液状化地盤と非液状化地盤の境界にとると、非液状化地盤では管の変位は0に漸近し、液状化地盤では地盤の流動変位 δ に漸近する。鈴木の研究⁹⁾にもとづいて、変形の大きい境界部付近をとりだして、両端の支点変位と分布荷重が作用するはりモデルを考える。図-9にモデル図を示しているが、等分布荷重が作用する長さ L は、力のつりあいによってきまる未知量である。

(2) 塑性ヒンジ解析

$x = 0$ において回転対称になることを用いて、 $(0, L)$ 区間で微分方程式を解く。方程式は

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = p \quad 0 \leq x \leq L \quad (13)$$

であり、境界条件は

$$x = 0 \quad w(0) = \frac{\delta}{2} \quad \frac{d^2 w}{dx^2}(0) = 0 \quad (14)$$

$$x = L \quad w(L) = \delta \quad \frac{dw}{dx}(L) = 0 \quad (15)$$

である。変位と曲げモーメントの計算結果を示すと、

$$w = \frac{pL^4}{48EI} \left\{ 2 \left(\frac{x}{L} \right)^4 - 3 \left(\frac{x}{L} \right)^3 + \left(\frac{x}{L} \right) \right\} + \frac{\delta}{4} \left\{ - \left(\frac{x}{L} \right)^3 + 3 \left(\frac{x}{L} \right) + 2 \right\}$$

$$M = \frac{pL^2}{8} \left\{ -4 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + 3 \left(\frac{x}{L} \right) \right\} + \frac{3EI\delta}{2L^2} \left(\frac{x}{L} \right) \quad (16)(17)$$

となる。 $x = L$ の境界はばね支持区間に連続する条件であり、曲げモーメントが0の条件で近似される。方程式を解くことにより、降伏したばねによる分布力が作用する区間長が定まる。

$$L = \sqrt[4]{\frac{12EI\delta}{p}} \quad (18)$$

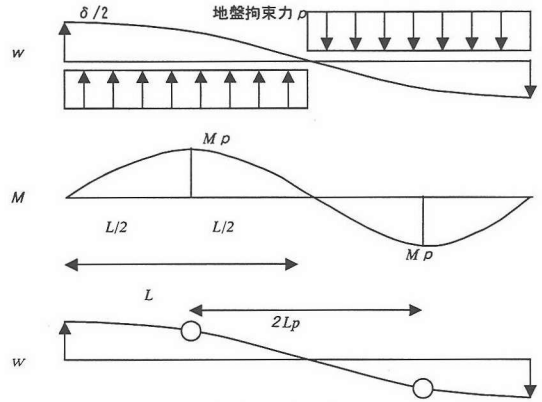


図-10 直管部の変形の進行イメージ

曲げモーメントが最大となるのは、 $Q(x) = M'(x) = 0$ の位置であり、計算すると、

$$\frac{x}{L} = \frac{3}{8} + \frac{3EI\delta}{2L^4} = \frac{1}{2} \quad (19)$$

最大曲げモーメント M_{\max} は

$$M_{\max} = \frac{pL^2}{16} + \frac{3}{4} \frac{EI\delta}{L^2} = \frac{\sqrt{3}}{4} \sqrt{EI p \delta} \quad (20)$$

となる。最大曲げモーメントは支点変位の平方根に比例して増加する。この曲げモーメントが塑性ヒンジに達するときの支点変位を δ_p 、はりの長さを L_p とおくと

$$\delta_p = \frac{16}{3} \left(\frac{M_p^2}{EI p} \right), \quad L_p = 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_p}{p}} \quad (21)$$

よって支点変位 δ_p 以上では $x = L_p$ の位置で塑性ヒンジが形成されて、曲げに対して不安定な構造となり、地盤変位の増加にともないヒンジの回転が進んでいく。解析モデルと変形の様子を図-10にしている。

5. 曲管部を含む配管の塑性ヒンジ解析

(1) 解析モデル

次に図-1(b)に示した液状化地盤に曲管部があるケースの解析を行なう。同図の右側に示したように異なる方向に配管された影響により変形が拘束され、曲管部はみかけ上、固定点のようにふるまうと考えられる。曲管部からある程度はなれた位置では地盤の流動変位に追随するが、曲管部付近は抵抗して動かないと考えて、図-11の解析モデルを考える。固定端であるB点が曲管部を表している。またA点も固定条件となるが、こちらは地盤バネで支持された条件を近似した結果である。4章と同様に支点変位と分布荷重が作用するモデルとなるが、分布荷重が1方向になっているのが異なっている。はり長さは、4章と同様に力のつりあいによってきまる未知量である。微分方程式は

表-4 曲管を含む配管のたわみと曲げモーメント

地盤の変位量	境界条件	計算結果
$0 \leq \delta \leq \delta_1$	$w(0) = \delta, \quad \frac{dw}{dx}(0) = 0$ $w(L) = 0, \quad \frac{dw}{dx}(L) = 0$	$w = \frac{pL^4}{24EI} \left\{ \left(\frac{x}{L}\right)^4 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 + \left(\frac{x}{L}\right)^2 \right\} + \delta \left\{ 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 1 \right\}$ $M = \frac{pL^2}{12} \left\{ -6\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 6\left(\frac{x}{L}\right) - 1 \right\} + \frac{6EI\delta}{L^2} \left\{ -2\left(\frac{x}{L}\right) + 1 \right\}$
$\delta_1 \leq \delta \leq \delta_2$	$w(0) = \delta, \quad \frac{dw}{dx}(0) = 0$ $w(L) = 0, \quad \frac{d^2w}{dx^2}(L) = 0$	$w = \frac{pL^4}{48EI} \left\{ 2\left(\frac{x}{L}\right)^4 - 5\left(\frac{x}{L}\right)^3 + 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 \right\} + \frac{\delta}{2} \left\{ -\left(\frac{x}{L}\right)^3 + 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 \right\}$ $M = \frac{pL^2}{16} \left\{ -8\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 5\left(\frac{x}{L}\right) - 2 \right\} + \frac{3EI\delta}{L^2} \left\{ -\left(\frac{x}{L}\right) + 1 \right\} + M_{pb} \left\{ -\frac{3}{2}\left(\frac{x}{L}\right) + \frac{1}{2} \right\}$

はり長さは、

$$L = \sqrt{6} \sqrt{\frac{M_{pb}}{p}} \quad (26)$$

となり、塑性モーメントと分布力から決まる長さとなる。地盤変位 δ_1 以上では曲管部がヒンジとなり、変形が進んでいく。

(3) 第2 ヒンジの形成

曲管部にヒンジが形成された以降も支点変位が増加する場合、解析モデルは分布力と支点変位による外力が加わるモデルとなる。第2のヒンジが形成されるまでの境界条件と、微分方程式の解を表-4 下段に示す。ただし曲げモーメントの計算結果においては塑性ヒンジ化した $x=L$ に塑性モーメント $-M_{pb}$ を作用させている。 $x=0$ はばね支持区間につながる境界であり、曲げモーメントのつりあい式は

$$\frac{1}{8} pL^2 = \frac{3EI\delta}{L^2} + \frac{1}{2} M_{pb} \quad (27)$$

となる。 L について方程式を解いて

$$L = \sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{pb}}{p} + \sqrt{\left(\frac{M_{pb}}{p}\right)^2 + \frac{6EI\delta}{p}}} \quad (28)$$

が得られる。地盤変位が与えられれば、はり長さ L が計算でき、曲げモーメントの分布が計算できる。

地盤の変位量を増加させていき、直管部の最大曲げモーメントが M_{ps} に達する条件を計算する。このときの地盤変位は

$$\delta_2 = \frac{-M_{pb}^2 + 4M_{ps} \left(\sqrt{M_{pb} + M_{ps}} + \sqrt{M_{ps}} \right)^2}{6EI p} \quad (29)$$

となり、このときのはり長さは

$$L = \sqrt{2} \frac{\sqrt{M_{pb} + M_{ps}} + \sqrt{M_{ps}}}{\sqrt{p}} \quad (30)$$

となる。曲管部の塑性ヒンジと直管部のヒンジの距離は

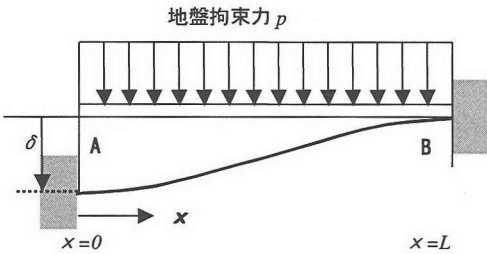


図-11 曲管部を含む配管の解析モデル

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = p \quad (0 \leq x \leq L) \quad (22)$$

である。

(2) 第1 ヒンジの形成

第1ヒンジが形成されるまでの境界条件は両端固定の条件であり、微分方程式を解いた結果を変位と曲げモーメントについて表-4 上段に示す。直線ばりの場合と同様に $x=0$ (A点) はばね支持区間につながる境界であり、曲げモーメントが0となることより、はり長さを決めることができる。はり長さは、

$$L = \sqrt[4]{\frac{72EI\delta}{p}} \quad (23)$$

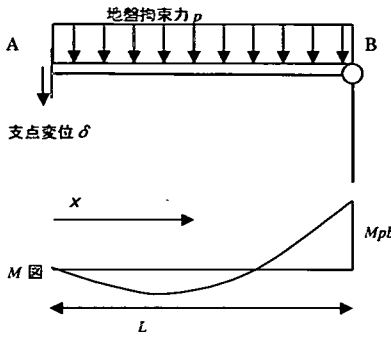
となり、 δ の増加にともなって大きくなる関係式が得られる。このとき曲げモーメントの極値は $x=L/3$ と $x=L$ で発生するが、その値は

$$M\left(\frac{L}{3}\right) = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{EI p \delta} ; M(L) = -\sqrt{2} \sqrt{EI p \delta} \quad (24)$$

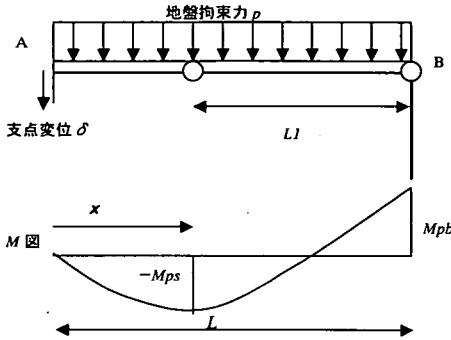
となり、曲管部 ($x=L$) の方がつねに大きくなる。よって曲管部の塑性モーメントを M_{pb} とすると

$$\delta_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{M_{pb}^2}{EI p} \right) \quad (25)$$

のときに塑性ヒンジが曲管部に形成される。このときの



(a) 曲管部をヒンジとした解析モデルと曲げモーメント



(b) 直管部がヒンジ化した状態

図-12 曲管部の変形の進行イメージ

$$L_1 = \sqrt{2} \frac{\sqrt{M_{pb} + M_{ps}}}{\sqrt{p}} \quad (31)$$

と計算できる。これはヒンジ点に作用する塑性モーメントと分布荷重による回転力が釣りあうことを意味しており、 δ_2 以上の強制変位に対しては2つのヒンジの回転により地盤変位に追従していく。以上の解析モデルと変形の進行の様子を図-12に示している。

(4) 地盤変位と曲管部の屈曲角

以上の計算にもとづいて地盤流動による強制変位と流動力を受けるはりの最大屈曲角を計算することができる。変形の進行と曲げモーメントの変化の様子を図-13に示す。曲管部の回転角 θ_B は曲管部にヒンジが形成される地盤変位量 δ_1 から徐々に増加し始め、直管部にもヒンジが形成される δ_2 以上の地盤変位では、急激に変形が大きくなる。曲げモーメントは曲管部が先行して増大し、曲管部が塑性ヒンジ化してからは直管部のモーメントが急激に増大する変化となる。表-2に示したガス管について δ_1 、 δ_2 を計算した結果、数10cm程度以下となり、液状化による地盤変位に比べてかなり小さな値となる。すなわち、地盤変位がある程度大きい、 $\delta > \delta_2$ の条件では最大屈曲角はヒンジ部で発生し

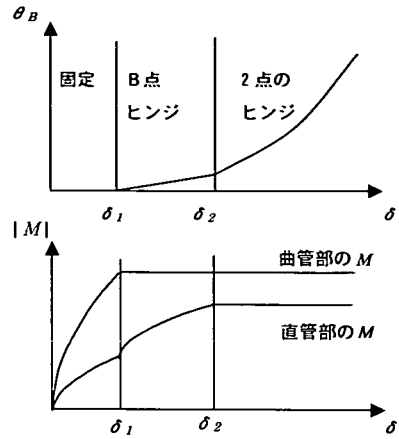


図-13 地盤変位と屈曲角、曲げモーメントの関係

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\delta}{L_1} \right) \quad (32)$$

と簡単に計算できる。液状化地盤変位を受ける埋設鋼管の変形解析は2点のヒンジで折れ曲がるモデルで整理できる。

6. 内曲げと外曲げの計算式

(1) 3点ヒンジモデルによる曲がり角の計算

5章で述べた2点ヒンジモデルを、曲管部で折れ曲がった実際の配管系に適用する。地盤変位がある程度大きくなると曲管部と両側の直管部の3個所に塑性ヒンジが形成され、ヒンジ接合された2本の剛体棒の変形で近似が可能である。この剛体棒の長さは、5章で示したように両端の塑性モーメントと地盤反力の上限値 σ_c から決まる等分布荷重から計算できる。

図-14(a)に内曲げのFEMシェル解析結果の一例を示している。3章で例示した600A管であり、屈曲変形の集中個所があらわれている。この変形を剛体棒が3点のヒンジで接合された配管が、流動変位を受ける問題として考える。図-15に解析モデルを示す。曲管部の開き角 2α の曲がり管に、中心線からの傾き角 β で地盤変位 δ が作用する条件で剛体棒の移動を計算する。 β は中心軸から図-15の角度ではかるものとする。内曲げ、左右対称では $\beta = 0$ 、内曲げ、軸直角では $\beta = \pi/2 - \alpha$ となる。また外曲げ、左右対称では $\beta = \pi$ 、外曲げ、軸直角では $\beta = 3\pi/2 - \alpha$ となる。

曲管部(C点)から L_1 だけ離れたヒンジ点をそれぞれA点、B点とする。この2点は、地盤変位の軸線の移動に追従して動くと考え。地盤変位の軸線直角方向の変位量を計算すると、それぞれ

$$\begin{aligned} \delta_A &= \delta \sin(\alpha + \beta) \\ \delta_B &= \delta \sin(\alpha - \beta) \end{aligned} \quad (33)$$

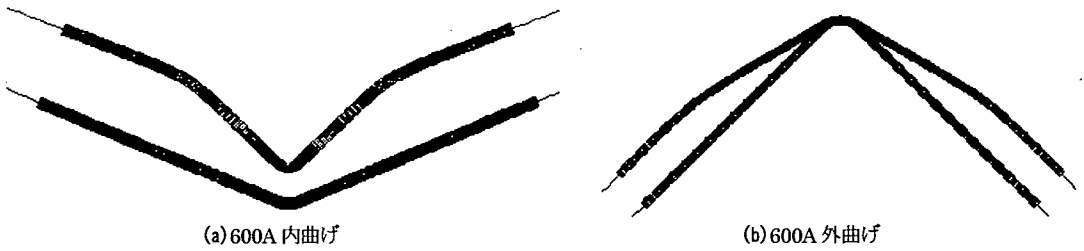


図-14 内曲げ, 外曲げのFEM計算結果

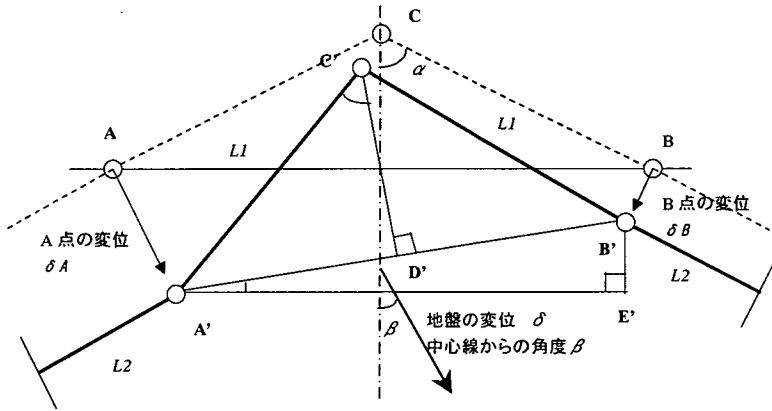


図-15 3点ヒンジによる変形メカニズム

で求められる。2点の位置と2辺の長さが与えられれば、三角形 $A'C'B'$ の形状が決まる。図-15 に示した幾何学条件より、二等辺三角形の底辺 $A'B'$ 、底辺の傾き $\angle B'A'E'$ 、頂角の $1/2$ の角度 $\angle A'C'D'$ を求めると、

$$\begin{aligned} \overline{A'B'} &= \sqrt{(\delta_A - \delta_B)^2 \sin^2 \alpha + (2L_1 \sin \alpha - (\delta_A + \delta_B) \cos \alpha)^2} \\ \tan \angle B'A'E' &= \frac{(\delta_A - \delta_B) \sin \alpha}{2L_1 \sin \alpha - (\delta_A + \delta_B) \cos \alpha} \\ \sin \angle A'C'D' &= \frac{\overline{A'B'}}{2L_1} \end{aligned} \quad (34) \sim (36)$$

となり、曲管部の屈曲角は

$$\theta_C = |2\angle A'C'D' - 2\alpha| \quad (37)$$

で求められる。

(2) 軸変形を考慮する場合

図-15 に示した内曲げの場合にはやはり全体に圧縮力が作用して構造は縮小するように変形していく。この場合にはヒンジに変化するとみなした点において変形が集中するために、軸変形を考慮しない前項で示した計算式でおよそ変形が追跡できると考えられる。一方地盤変位が逆向きに作用する外曲げの場合には、引張り力が卓越することになり、やはり全体が伸び変形をする。図-14(b)に外曲げの場合の FEM 解析結果を示す。直管部の屈曲は内曲げに比べて緩やかになっている。この傾向は軸力が

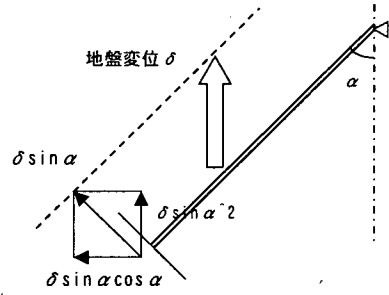


図-16 外曲げの解析モデル

相対的に卓越してくる小径管においていっそう顕著である。金属材料は伸びやすい特性を有するため、引張力が大きくなると特定個所に変形が集中するモデルでは現象をよくあわせないことになる。

(6)では曲げ力のみが影響するとして定式化を行ったが、引張力の影響を考慮する。FEM 解析結果によれば、液状化による地盤変位が作用する場合には、曲管部の屈曲角が変化する。そこで曲管部は塑性ヒンジになるものとする。引張力がはたらく外曲げの場合には、直管部ではヒンジが形成されないと考えて、片端固定、片端ヒンジのよりモデルを仮定する。図-16 にモデル図を示す。地盤変位 δ が作用して外曲げ変形する場合には、曲管からある程度はなれた部位は、軸線のずれ量 $\delta \sin \alpha$ だけ移動する。この変位量を配管の対称線に平行な方向と直

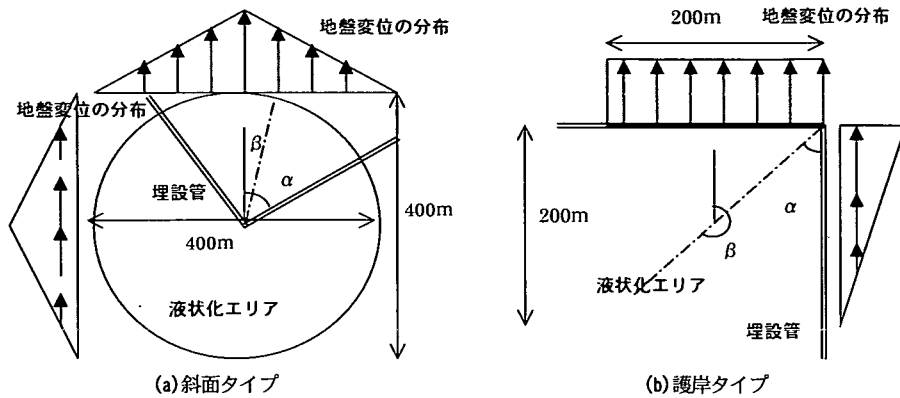


図-17 側方流動による地盤変位のパターン

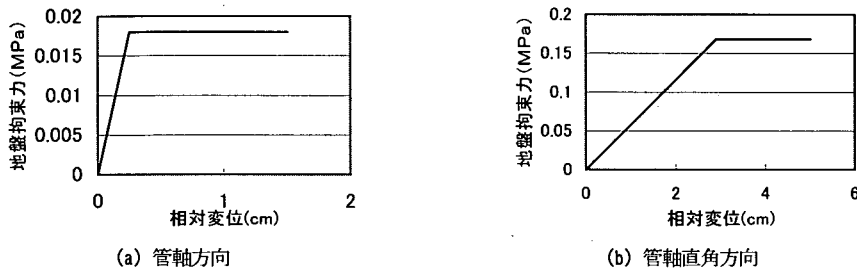


図-18 単位面積あたりの地盤抵抗力

交する方向に分解する。対称線に直交する方向は、折れ曲がった配管系を押し開く実効的な変位成分であり、曲がり角が浅くなれば、引張力を卓越させる。

そこで対称線に直交する変位成分を地盤変位とし、はり長さ L を式 (28) から次式で求める。

$$L = \sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{Pb}}{P} + \sqrt{\left(\frac{M_{Pb}}{P}\right)^2 + \frac{6EI\delta \sin \alpha \cos \alpha}{P}}} \quad (38)$$

両側の影響を考慮して曲管部の屈曲角を求めると

$$\theta_c = \frac{3\delta \sin \alpha \cos \alpha}{L} \quad (39)$$

となる。地盤変位の方向を変化させた FEM 解析結果によれば、両側から引張力が加わるために曲管部の位置はずれて、対称な変形になることから、地盤変位の方向 β は考慮せず、曲角 α だけをパラメータとする。

7. FEM 解析結果との対比

曲管部を含む配管系が液状化による地盤変位を受ける場合の変形について、3点ヒンジモデルと FEM によるシェル解析の比較をした例を示す。

(1) FEM の解析条件

3 章で述べたシェル要素とはり要素を混合したハイブ

リッドモデルに管軸方向および管軸直角 2 方向に地盤ばねをとりつけたモデルで解析を行なう。液状化による地盤変位は傾斜面で起こる変位分布を図-17(a)、護岸近傍で起こる変位分布を図-17(b)のように設定した。斜面においては三角形分布を基本と考え、また護岸近傍においては長方形分布を基本としている。それぞれ、地盤変位の方向を 180° 変えたケースも考えて 4 ケースとする。図-17(a)のケースを斜面内曲げ、地盤変位の方向を変えたケースを斜面外曲げと呼ぶ。図-17(b)のケースを護岸外曲げ、地盤変位の方向を変えたケースを護岸内曲げと呼ぶ。

地盤抵抗力に関しては、いろいろな研究者により実験的検討がなされているが、ここでは FEM 解析結果とヒンジモデルの適合性をみることに重点をおく。高圧ガス導管液状化耐震設計指針¹¹⁾にしたがって管軸方向の単位面積あたりの地盤抵抗力を図-18(a)、管軸直角方向の地盤抵抗力を同図(b)のように設定した。地盤変位が数 m にもおよぶのに比べると、一定値に達する相対変位は小さく、管軸方向で 0.25cm、管軸直角方向で 2.9cm の設定としている。また管軸直角方向の拘束力は管軸方向に比べて約 10 倍ほどになっている。

(2) ヒンジモデルの解析条件

FEM シェル解析の 4 ケースに対応させて、ヒンジモデルの諸数値を設定する。FEM 解析では詳細なモデル化が

表-5 3点ヒンジモデルの諸数値

項目	記号	単位	斜面内曲げ	斜面外曲げ	護岸内曲げ	護岸外曲げ
曲がり角	α	rad	1.178	0.785	1.178	0.785
流動方向	β	rad	0	3.142	0.393	3.927
地盤抵抗力	p	N/m	1.02E+05	1.02E+05	1.02E+05	1.02E+05
曲げ剛性	EI	Nm ²	2.58E+08	2.58E+08	2.58E+08	2.58E+08
直管の塑性モーメント	Mps	Nm	2.13E+06	2.13E+06	2.13E+06	2.13E+06
曲管の塑性モーメント	Mpb	Nm	2.43E+06	3.24E+06	2.43E+06	3.24E+06
ヒンジ間距離	$L1$	m	9.43	10.24	9.43	10.24

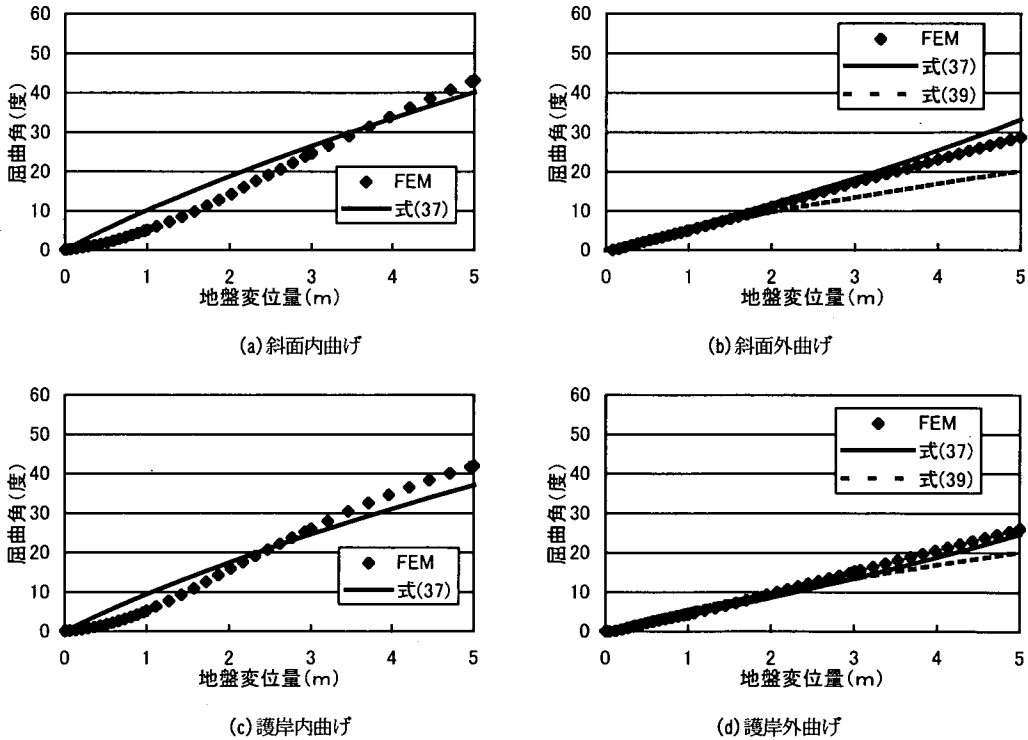


図-19 提案式とFEM解析結果の比較

必要とされるのに対して、塑性ヒンジ解析は主要な変形パラメータだけに限定しているのが特徴である。6章までで述べた表記にしたがってヒンジモデルの諸数値を設定した結果を表-5に示している。

FEM解析では4とおりの配管と地盤変位のパターンを設定しているのに対して、ヒンジモデルでは曲がり角 α と、地盤の流動方向 β だけで表現している。またFEM解析では図-18のように地盤抵抗力をモデル化しているのに対して、ヒンジモデルでは管軸直角方向の地盤抵抗力 p だけになっている。埋設鋼管の剛性も、弾性範囲の曲げ剛性 EI と直管の塑性モーメント、曲管の塑性モーメントだけで表現をしている。ただし3章でも述べたように曲管の塑性モーメントはシェル解析により大変形時の曲げ抵抗の最大値を計算した結果にもとづいている。

(3) 解析結果の比較

地盤変位を徐々に増加させたときに曲管部に発生する屈曲角の変化を計算する。FEM解析による計算結果とヒンジモデルによる計算結果を比較したグラフを図-19に示す。地盤変位量は図-17に示した地盤変位分布の最大値としている。内曲げの計算は式(37)によるヒンジモデルの計算結果であり、外曲げの計算は、6(2)の考察にもとづいて地盤変位量を $\cos\alpha$ 倍している。

内曲げの計算をした同図(a)と(c)において、地盤変位量が小さい場合には3点ヒンジモデルはやや小さく、地盤変位量が大きい場合にはやや大きくなっているが、シェル解析結果による屈曲をよく表現できている。一方外曲げの場合の計算結果を図-19(b)と(d)に示しているが、地盤変位を実効成分に置き換えた3点ヒンジモデルの計算

結果はFEMの結果と概ね合っている。

図-19(b)と(d)には曲管部をヒンジとした式(39)による計算結果も示している。式(37)による屈曲角よりも小さな値となっており、FEM計算結果の比べて過小となっている。ただし、軸力の影響が大きくなる小径管では、3点ヒンジモデルでは過大となる傾向が確認されており、式(39)の方がよく適合する。軸力の影響を含めた定式化は今後の課題であるが、3点ヒンジのモデルと曲管部をヒンジとするモデルは鋼管の基本的な変形メカニズムをとらえていると考えられる。

8. おわりに

本研究は液状化による地盤変位が作用する埋設管の簡易な変形計算法を提案している。兵庫県南部地震の溶接鋼管の被災例に注目して、地盤変位による過大な外力が加わる場合には、塑性ヒンジが形成されるとして変形の定式化をした。配管系を剛塑性モデルで表現し、作用する地盤変位の影響を軸直角方向の等分布力と、2点間の相対変位で表現した結果、簡易な計算式が求められた。また曲管部は大変形時には複雑な挙動となるが、シェル解析結果を管の形状特性値であるパイプファクターで整理したところ、最大曲げ抵抗力はおおよそパイプファクターと降伏モーメントで推定可能なことが明らかになった。ヒンジモデルによる簡易な計算式とFEM解析を比較した結果、内曲げに関してはよい一致が見られた。また外曲げに関しては、軸力の影響を考慮していないことから若干の補正が必要となることが明らかになった。本研究で提案した簡易な計算式は液状化による地盤変位を受ける埋設管の基本的な変形メカニズムを表現できており、設計実務に有効な手法と考えられる。

謝辞：本研究は、(社)日本ガス協会が通商産業省(現経済産業省)資源エネルギー庁より委託を受け、平成8年度から平成12年度まで行った「ガス導管液状化対策調査」の成果の一部をまとめたものであり、ガス導管液状化対策調査研究特別委員会(委員長：片山恒雄防災科学技術研究所理事長)の各委員ならびに調査事業に関連した

各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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形の測定と考察, 土木学会論文集, No. 376/III-56, pp. 211-220, 1986.
- 2) 日本ガス協会: 兵庫県南部地震ガス地震対策検討委員会報告, 1996.
- 3) 高田至郎, 小川安雄, 吉崎浩司, 北野哲史, 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, pp.61-66, 1998.
- 4) Miki C., Kobayashi T., Oguchi N., Uchida T., Suganuma A. and Katoh A.: Deformation and fracture properties of steel pipe bend with internal pressure subjected to in-plane bending, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, 2000.
- 5) 佐藤清, 松本真明, 高田至郎, 小川安雄: 側方流動による地盤変位を受ける埋設鋼管の大変形挙動, 土木学会論文集, No.710/I-60, 2002.
- 6) 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, pp.947-956, 2000.
- 7) Shimamura K., Hamada M., Yasuda S., Ohtomo K., Fujita Y., Kojima S. and Taji Y.: Load on pipes buried in a non-liquefaction layer due to liquefaction-induced ground displacement, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, 2000.
- 8) 鈴木崇伸: 非線形なばねで支持されたはりの近似解析法, 土木学会論文集 No.689/I-57, pp.109-116, 2001.
- 9) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A.: Limit loads for pipe elbows with internal pressure under in-plane closing bending moment, *ASME J. Pressure Vessel Technology*, 120, pp.35-42, 1998.
- 10) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲史, 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, 2001.
- 11) 日本ガス協会: 高圧ガス導管液状化耐震設計指針, 2001. (2001. 6. 5 受付)

PLASTIC HINGE ANALYSIS FOR BURIED PIPELINE UNDER LATERAL DISPLACEMENT CAUSED BY SUBSOIL LIQUEFACTION

Takanobu SUZUKI, Shiro TAKADA, Takeshi KOIKE, Yasuo OGAWA and Masaaki MATSUMOTO

This report proposes a practical method to calculate the structural deformation of buried pipelines under lateral displacement in the liquefied ground. Based on many cases of FEM analysis using shell/beam hybrid model, plastic hinge model is adopted to deal with the inelastic behavior of pipelines. Also, formula to estimate plastic moment of curved pipes, are proposed. The relationship between plastic hinge model and FEM is shown in some cases, these are nearly same. This proposed method is useful in practical design formula to calculate large deformation of pipelines, such as the deflection angle of the bend corner.