

海底パイプラインの液状化対策工法に関する一考察

NUMERICAL STUDY ON THE EFFECTIVENESS OF STABILIZATION TECHNIQUES OF OFFSHORE PIPELINES AGAINST LIQUEFACTION

関口宏二*・大石 博**

By Koji SEKIGUCHI and Hiroshi OISHI

Designing an offshore pipeline for installation in an area subjected to earthquake activity requires an investigation of potential effects of seismic shocks. If the seabed or the filling material along a pipeline route consists of cohesionless soils likely to liquefy under the influence of seismic shocks, a pipeline buried in such soils may lose stability and float to the surface of the seabed. This paper describes the effectiveness of three types of stabilization techniques, 1) Anchoring the pipeline, 2) Increasing the weight of the pipeline, and 3) New stabilization technique which has been proposed by the authors. In order to simulate the behavior of pipeline under liquefaction, we used finite element model which was proposed by Minami, Kiyomiya and Tsuchida.

Keywords: offshore, pipeline, liquefaction, stabilization, FEM

1. まえがき

わが国では、臨海地域の発達に伴って、数多くの海底パイプラインが、原油・水・ガスなどの効率的輸送手段として建設されてきている。海底パイプラインは、投錨や波浪の影響を避けるために、海底面下2~3mの深さに掘削されたトレンチ内に設置され、砂にて埋め戻される場合が多い (Fig.3参照)。埋め戻された砂 (以下、周辺地盤とよぶ) は、①水中に完全に没しているために有効上載圧が小さい、②締め固めることができないので緩く堆積している、などの理由により地震時に液状化する可能性があるといえよう。この場合、2つの技術的課題が挙げられる。1つは、液状化時に海底パイプラインがどのような影響を受けるかであり、他の1つは、いかにして安全かつ経済的に液状化対策を行うかである。

陸上の埋設管路の液状化時被害事例や模型振動実験の結果から推定すると、液状化時には海底パイプラインには次のような要因が影響を与えるものと考えられる。

① 不完全液状化時 (地盤の過剰間隙水圧が上昇しつ

つある状態) における地盤の不規則な振動^{1),2)}

- ② 完全液状化時 (地盤の過剰間隙水圧が初期の有効上載圧と等しくなり、地盤が液状化した状態) において、管体に作用する浮力^{3),4)}
- ③ 地盤の過剰間隙水圧の消散時に生ずる地盤沈下^{1),2)}
- ④ 過剰間隙水圧の発生に起因する地盤の側方移動^{5)~7)}

上記の諸要因のうち、海底パイプラインのように構造が直線的であり、周辺地盤の剛性に対して管体の剛性が比較的高い場合には、主として浮力の影響が大きいと考えられる。南・清宮・土田⁸⁾は、浮力が海底パイプラインに及ぼす影響に関して先駆的な研究を行った。すなわち解析手法を体系化し、有限要素法による数値解析により種々の有用な情報を提供した。著者ら⁹⁾は、地盤の液状化は許すが管体の浮上を防止する工法として、①アースアンカーなどにより管体を固定する方法、②コンクリートコーティングなどにより管体を重量化する方法、の2工法の有効性を定性的ではあるが実験的に確認した。また、著者ら¹²⁾は海底パイプラインを液状化防止区域と液状化許容区域を交互に設けて埋め戻すという新しい液状化対策工法を提案した。

本論文は、南らの提案した解析手法に基づいて、以上

* 正会員 工修 日本鋼管(株)中央研究所
(〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)

** 正会員 工博 日本鋼管(株)エンジニアリング事業部
(〒230 横浜市鶴見区末広町2-1)

に述べた3種類の液状化対策工法の有効性に関して定量的な検討を行った結果をとりまとめたものである。

2. 解析手法

本研究で用いた解析手法は、基本的に南ら⁸⁾の提案しているものと同様であり、詳細は文献8)を参照されたい。ここでは、解析手法の概略を説明することとする。

Fig. 1に周辺地盤の一部が液状化する場合の説明図を示す。同図において、液状化区域では、液状化した砂の単位重量 γ_s と海底パイプラインの見掛けの単位重量 γ_u との差に相当する上向きの力が働くと考えられる。一方非液状化区域では、海底パイプラインは地盤により弾塑性的に支持されていると考える。Fig. 2に解析モデルを示す。海底パイプラインは同図に示すように、ばね支持のはりとして解析する。同図中に示す“ K_s ばね”および“ K_f ばね”に関しては、以下に説明する。

(1) K_s ばね

K_s ばねは、非液状化区域の地盤のパイプラインに対する拘束力を考慮するためのものであり、弾塑性ばねでモデル化する。 K_s ばねの第1勾配は、杭の横抵抗力の実験などを参考に決めることもできるが、この値は海底パイプラインの変位・曲げモーメントなどの解析結果にあまり影響しない。 K_s ばねの最大抵抗力すなわち周辺地盤の最大抵抗力は以下のように考える。Fig. 3に示すように海底パイプラインが鉛直上向に移動する場合、周辺地盤の全抵抗力は、次式で計算できる¹⁰⁾。

$$P = q_0 D_0 + W \dots\dots\dots (1)$$

$$q_0 = CF_c + \gamma HF_q \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- q_0 : 極限方射方向圧力
- D_0 : コーティングも含めた海底パイプラインの全外径
- W : 海底パイプラインの水中重量
- γ : 周辺地盤の有効単位重量
- H : 海底パイプラインの埋設深さ
- C : 周辺地盤の粘着力
- ϕ : 周辺地盤の内部摩擦角
- F_c : 係数
- F_q : 係数 (Fig. 4 参照)

(2) K_f ばね

K_f ばねは、海底パイプラインの上端が海底面よりも上に浮上したときの、海底パイプラインに働く下向き(または上向き)の力と、海底パイプラインの変位の非線形な関係を考慮するためのものである。海底パイプラインが液状化している地盤内を浮上し、一部分が海底面に露出すると、海底パイプラインに作用する上向きの力は次式で示される (Fig. 5 参照)。

$$Q = A_1(\gamma_s - \gamma_u) + A_w(\gamma_w - \gamma_u) \dots\dots\dots (3)$$

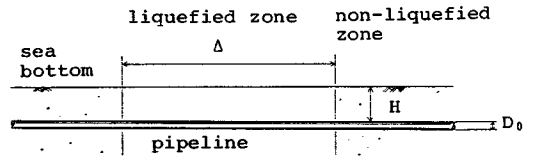


Fig. 1 Illustration of Non-liquefied and Liquefied Zones.

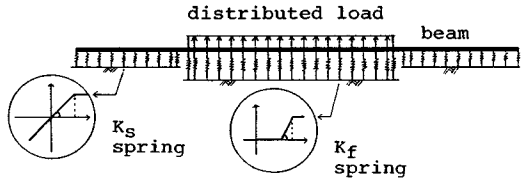


Fig. 2 Finite Element Model for Numerical Simulation.

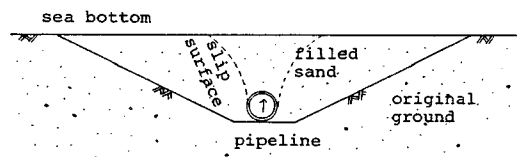


Fig. 3 The Cross-section of Offshore Pipeline and Shape of Slip Surface.

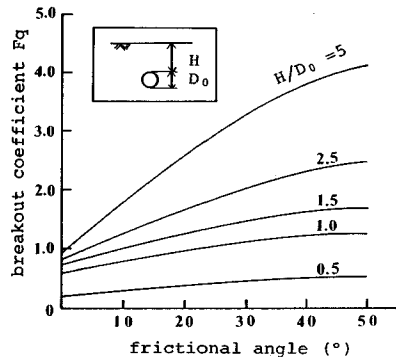


Fig. 4 The Relation between the Frictional Angle and the Breakout Coefficient^{8), 10)}.

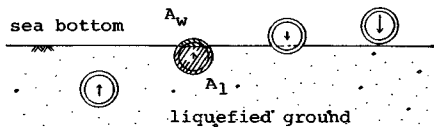


Fig. 5 Illustration of Offshore Pipeline and Sea Bottom.

ここに、

- γ_w : 海水の単位重量
- γ_s : 液状化した砂の単位重量
- γ_u : 海底パイプラインの見掛けの単位重量
- A_1 : 液状化している地盤中に没している部分の海底パイプラインの断面積

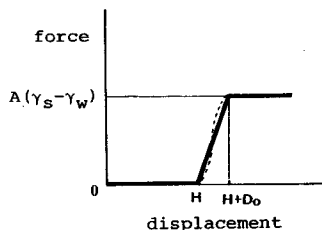


Fig. 6 The Characteristics of K_s Spring.

A_w : 海水中の海底パイプラインの断面積

A : 海底パイプラインの全断面積 ($A = A_s + A_w$)

すなわち、海底パイプラインの一部分が海底面上に浮上する場合も考慮すると、海底パイプラインに作用する力と変位の関係は、Fig. 6の点線で示すような非線形性を示す。本解析では、簡単のために実線で示す3本の直線で近似し、これを K_s ばねとする。

3. 浮力が海底パイプラインに及ぼす影響

ここでは、Fig. 1に示すように、周辺地盤の一部分が液状化した場合の海底パイプラインの挙動について述べる。Table 1に、計算に用いた海底パイプラインの諸元を示す。呼び径10B, 20B, 40Bは、石油パイプラインを、また呼び径20B*は、気体輸送用パイプラインを想定している。 K_s ばねは、周辺地盤の単位面積当たりの反力を 1.0 kgf/cm^3 (9.81 MN/m^3)として定めた。また、海底パイプラインの埋設深さは、いずれも3mとした。液状化した砂の単位重量は、解析結果に大きく影響する¹¹⁾ので、安全側をとって 2.0 gf/cm^3 (19.6 kN/m^3)とした。なお、海底パイプラインは弾性範囲にあるものとした。

液状化区間長 Δ (Fig. 1参照) が、海底パイプラインに及ぼす影響を調べるために、液状化区間長を変化させて解析を行った。Fig. 7に、呼び径40Bの海底パイプラインの変位と曲げモーメントの分布図を示す。ただし、解析モデルが左右対称なので、液状化区域の中央より右半分のみを表示している。同図によれば、液状化区域の中央部で最大浮上量が発生し、非液状化区域内の液状化区域との境界に近いところに最大曲げモーメントが発生している。なお、呼び径40B以外の海底パイプラインについても傾向は同様であった。

Fig. 8(a)に、液状化区間長と最大浮上量の関係を、またFig. 8(b)に、液状化区間長と最大曲げ応力の関係を示す。Fig. 8(a)より、最大浮上量は、液状化区間長が長くなると二次曲線的に増大するが、ある液状化区間長(海底パイプラインの一部が海底面上に露出するときの液状化区間長)よりも長くなると、ほぼ一定値に収束することがわかる。また、Fig. 8(b)より、最大曲げ応

Table 1 Dimensions and Sectional Properties of Offshore Pipelines.

Pipe type	10B	20B	40B	20B*
diameter D (cm)	26.74	50.8	101.6	50.8
wall thickness t (cm)	0.93	1.27	1.6	1.8
coating thickness t_c (cm)	1.73	3.33	7.57	4.26
outside diameter D_o (cm)	30.2	57.5	116.7	59.3
sectional area (cm ²)	75.4	197.6	502.7	277.1
total sectional area A (cm ²)	716.3	2592.2	10701.8	2762.8
moment of inertia I (cm ⁴)	6290	606x10 ²	628x10 ³	833x10 ²
section modulus Z (cm ³)	470	2390	124x10 ²	3280
weight per length (gf/cm)	592	1550	3950	2175
unit weight γ_u (gf/cm ³)	1.9	1.7	1.7	1.4

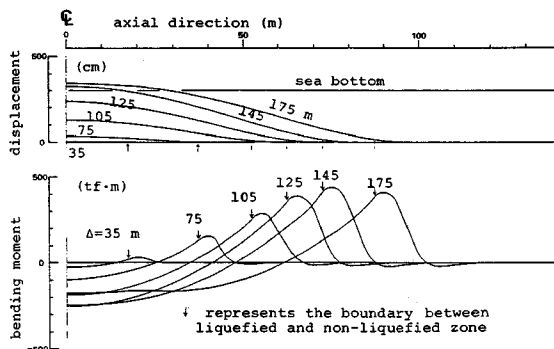


Fig. 7 Displacement and Bending Moment Calculated for Various Lengths of Liquefied Zone (40B, $H=3 \text{ m}$, $\gamma_s=2.0 \text{ gf/cm}^3$, $\gamma_u=1.7 \text{ gf/cm}^3$).

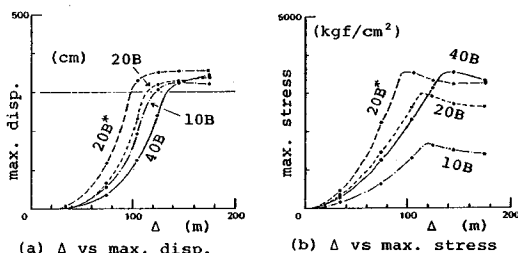


Fig. 8 The Relation between the Length of Liquefied Zone, Maximum Displacement and Maximum Bending Stress ($H=3 \text{ m}$, $\gamma_s=2.0 \text{ gf/cm}^3$).

力は、液状化区間長が長くなると二次曲線的に増大するが、ある液状化区間長でピークをとることがわかる。両図より、海底パイプラインの一部が海底面上に露出する液状化区間長のときに、最大曲げ応力は、ピークを示すといえる。

さて、液状化に関する対策という観点より、Fig. 8(a), (b)をみると、液状化区間長を人為的にコントロールして短くすることができれば、液状化時の浮力による海底パイプラインへの影響を著しく軽減できると考えられる。5.で述べる新しい海底パイプラインの液状化対策工法は、この点に着目して考案したものである。

4. 従来の海底パイプラインの液状化対策工法^{2),9)}

著者ら²⁾は、周辺地盤の液状化は許すが、管体の浮上を防止する工法として、以下の工法を提案し、定性的ではあるがその有効性を実験的に確認した。

- ① アースアンカーまたは杭にて海底パイプラインを固定する方法。
- ② コンクリートコーティングなどにより管体を重量化する方法。

本章では、上記①、②の対策工法の有効性を数値解析により定量的に検討する。また、次章では、より実用的な液状化対策工法（液状化防止区域と液状化許容区域を交互に設けて埋め戻す工法）を提案し、その有効性について述べる。

(1) アースアンカーまたは杭による液状化対策¹⁾

Fig. 9 は、アースアンカーを、30、40、50 m の各間隔で設置した場合の、呼び径 40 B の海底パイプラインの変位と曲げモーメントの分布図である。ただし、液状化区間長は 175 m、液状化した砂の単位重量は 2.0 gf/cm³ とした。アースアンカーは、弾性ばねでモデル化した。同図によれば、最大曲げモーメントはアンカー取付け点で発生しているが、その値は非常に小さい。Fig. 10(a) にアースアンカーの設置間隔と最大浮上量の関係を示す。また、Fig. 10(b) に、アースアンカーの設置間隔と最大曲げ応力の関係を示す。両図より、アースアンカーを用いることにより、何も対策をしない場合 (Fig. 8) に比べて、最大浮上量、最大曲げ応力を著しく低減できることがわかる。本工法は、液状化対策として非常に効果的であるが、海中施工となるため施工費用が高くなる場合がある。

(2) コンクリートコーティングによる液状化対策

ここでは、呼び径 40 B の海底パイプラインを例にとり海底パイプラインの見掛けの単位重量を 1.7、1.8、1.9、2.0 gf/cm³ とした場合について検討する。ただし、液状化区間長は 145 m、液状化した砂の単位重量は 2.0 gf/cm³ とした。Fig. 11(a) に、海底パイプラインの単位重量と最大浮上量の関係を、また Fig. 11(b) に、海底パイプラインの単位重量と最大曲げ応力の関係を示す。両図より海底パイプラインを重量化することにより最大浮上量、最大曲げ応力が低減できることがわかる。Fig. 11(a) には必要とされるコンクリートコーティング厚も示した。本工法では、管体が重量化するために、陸上部でのハンドリングが難しくなる場合がある。しかし、Table 1 の呼び径 10 B の海底パイプラインのように、それ自体の単位重量と液状化した砂の単位重量との差が小さい場合には効果的であろう。

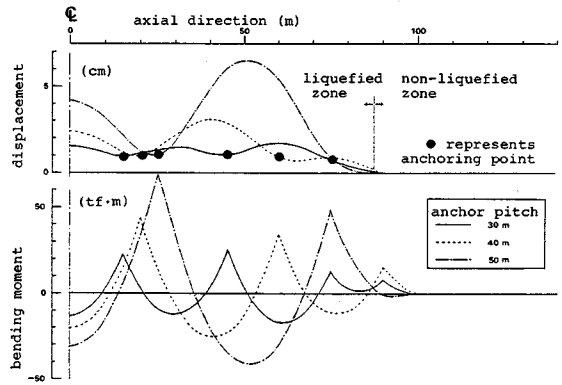


Fig. 9 Displacement and Bending Moment Calculated for Various Anchor Pitches (40 B, $H=3$ m, $\gamma_s=2.0$ gf/cm³, $\gamma_u=1.7$ gf/cm³, $\Delta=175$ m).

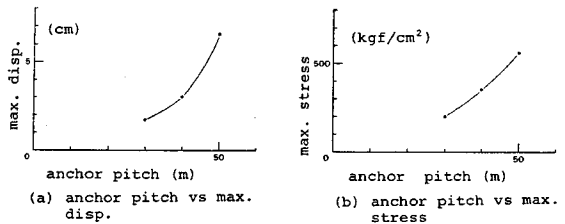


Fig. 10 The Relation between the Anchor Pitches, Maximum Displacement and Maximum Bending Stress (40 B, $H=3$ m, $\gamma_s=2.0$ gf/cm³, $\gamma_u=1.7$ gf/cm³, $\Delta=175$ m).

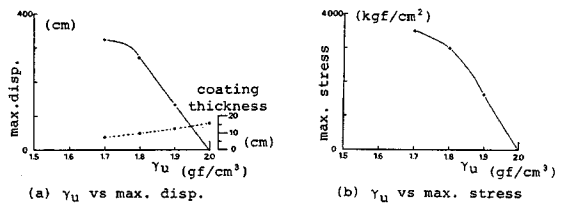


Fig. 11 The Relation between the Unit Weight of Offshore Pipeline, Maximum Displacement and Maximum Bending Stress (40 B, $H=3$ m, $\gamma_s=2.0$ gf/cm³, $\Delta=145$ m).

5. 新しい海底パイプラインの液状化対策工法

(1) 新しい液状化対策工法の概要

本工法は、Fig. 12 に示すように、液状化防止区域と液状化許容区域を交互に設けて、海底パイプラインの埋め戻しを行う工法である。液状化防止区域は砕石などの液状化しない材料で埋め戻すものとし、液状化許容区域は砂などの液状化の可能性のある材料で埋め戻してもよいものとする。液状化許容区域が液状化しても液状化防止区域は安定を保つように、両区域の境界には、Fig. 12 に示すような傾斜をつける。液状化防止区域および液状化許容区域の長さは、液状化許容区域がすべて液状化す

る場合を想定して計算し、海底パイプラインの最大浮上量、あるいは最大曲げ応力が許容値以内に収まるように決める。なお、本工法の施工は、①トレンチの掘削、②海底パイプラインの設置、③液状化防止区域の埋め戻し、④液状化許容区域の埋め戻し、の手順で行う。

(2) 新しい液状化対策工法の適用例と有効性

Table 1 に示す呼び径 40 B の海底パイプラインを例にとり、本液状化対策工法の適用例と有効性について以下に述べる。最大曲げ応力の許容値を、仮に 1500 kgf/cm² (147 MPa) とすれば、Fig. 8(b) を参考にして、液状化許容区域の長さは 78 m になる。ここで Fig. 8(b) を利用した理由は、本工法のように非液状化区域 (液状化防止区域) と液状化区域 (液状化許容区域) が交互に存在する場合でも、海底パイプラインの最大浮上量や最大曲げ応力は、液状化区域が単一の場合とあまり変わらないからである (Fig. 7 中の Δ=75 m と Fig. 13 を比較参照)。

次に、液状化防止区域の長さ Δ_g を決めるために、液状化許容区域の長さ Δ は 78 m に固定したまま、液状化防止区域の長さを変化させて計算を行う。Fig. 13 に、液状化防止区域の長さを種々に変化させた場合の、海底パイプラインに発生する曲げモーメントの分布図を示す。同図によれば、液状化防止区域の長さが短くなると、液状化防止区域内での曲げモーメントの分布形状はピークが重なり合ったような形状を示すが、最大曲げモーメントの値は、どのケースもあまり変わらない。

Fig. 14(a) に、液状化防止区域の長さ と最大浮上量の関係を、また Fig. 14(b) に、液状化防止区域の長さ と最大曲げ応力の関係を示す。両図より、最大浮上量、最大曲げ応力は、液状化防止区域の長さ にあまり影響されないといえる。ただし、図には示していないが、液状化防止区域の長さが非常に小さい場合には、海底パイプラインに働く浮力に抵抗する地盤反力が不足するので、海底パイプラインの最大浮上量は非常に大きくなる。地盤反力が不足する場合の条件は、液状化許容区域一區間に働く全浮力 Δ・A・(γ_s-γ_w) と、液状化防止区域一區間における地盤の全抵抗力 Δ_g・P を等置することにより、次式のように求まる。

$$\Delta_g = \frac{A(\gamma_s - \gamma_w)}{P} \cdot \Delta \dots \dots \dots (4)$$

式 (4) に、式 (1)、式 (2) および A=πD_o²/4、W=A(γ_u-γ_w) の関係を代入すれば、次式が得られる。

$$\Delta_g = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)}{\frac{4}{\pi D_o} [cF_c + \gamma HF_d(\phi, H/D_o)] + (\gamma_u - \gamma_w)} \cdot \Delta \dots \dots \dots (5)$$

ただし、式 (5) より得られる Δ_g は、海底パイプライン

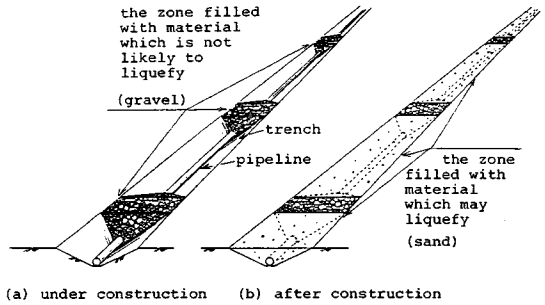


Fig. 12 Illustration of New Stabilization Technique of Offshore Pipeline against Liquefaction.

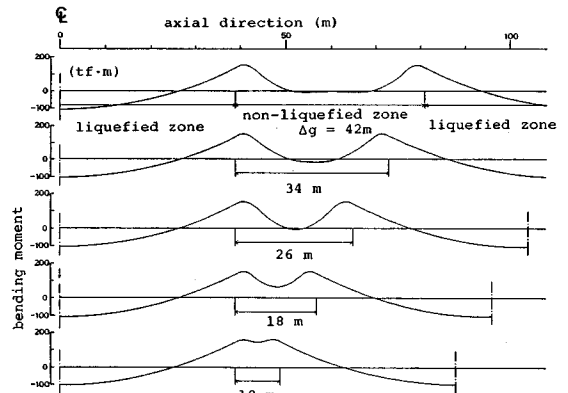


Fig. 13 Bending Moment Calculated for Various Lengths of Non-liquefied Zone (40 B, γ_s=2.0 gf/cm³, γ_u=1.7 gf/cm³, Δ=78 m).

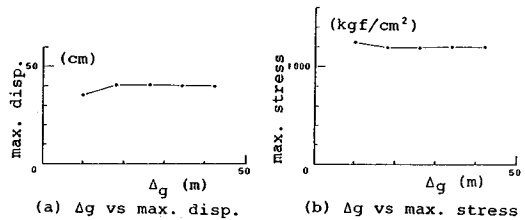


Fig. 14 The Relation between the Length of Non-liquefied Zone, Maximum Displacement and Maximum Bending Stress (40 B, γ_s=2.0 gf/cm³, γ_u=1.7 gf/cm³, Δ=78 m).

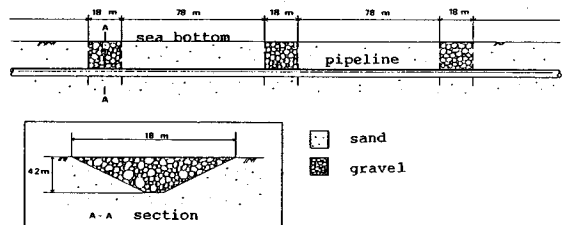


Fig. 15 A Feasible Example of New Stabilization Technique of Offshore Pipeline Against Liquefaction (40 B, γ_s=2.0 gf/cm³, γ_u=1.7 gf/cm³).

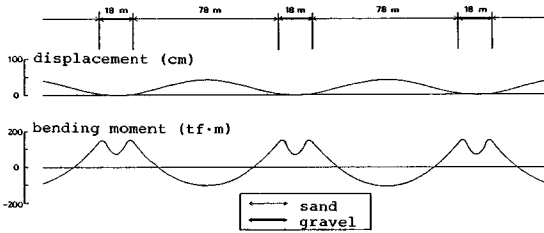


Fig. 16 Displacement and Bending Moment of Offshore Pipeline which Corresponds to Fig. 15.

が海底面上に浮上しないために最低限必要な液状化防止区域の長さを表わしているのであって、海底パイプラインに発生する応力や施工性などの観点からは、必ずしも設計上最適の値とはいえないことに注意する必要がある。

Fig. 13 に示した 6 ケースは、いずれも実施可能であるが、Fig. 15 に液状化対策の一例として、液状化防止区域の長さが 18 m の場合を示す。この例において、液状化許容区域が液状化した場合、海底パイプラインの変位と曲げモーメントの分布図を Fig. 16 に示す。無対策で液状化区間長が 100 m 以上の場合 (Fig. 7 参照) と比べると変位、曲げモーメントは小さく、本液状化対策工法は非常に有効であるといえる。

6. 結 論

海底パイプラインの周辺地盤が液状化した場合に浮力が海底パイプラインに及ぼす影響、および液状化対策工法の有効性に関して、有限要素法による数値解析³⁾によって検討を行い、次のような結論を得た。

(1) 周辺地盤の一部分が液状化する場合、海底パイプラインの最大浮上量は、液状化区間長が長くなると二次曲線的に増大するが、海底パイプラインの一部が海底面上に露出すると、ほぼ一定値に収束する。また最大曲げ応力は、液状化区間長が長くなると二次曲線的に増大するが、海底パイプラインの一部が海底面上に露出する液状化区間長のときにピークを示す。

(2) アースアンカーまたは杭によって海底パイプラインを固定する工法は、液状化対策として非常に効果的である。また、コンクリートコーティングなどにより管体を重量化させる工法も効果的である。ただし、前者は施工費用、後者は陸上でのハンドリングに問題がある場合がある。

(3) 新たに提案した海底パイプラインの液状化対策工法は、非常に効果的であり、かつ施工の容易な工法である。本工法は、液状化防止区域と液状化許容区域を交互に設けて海底パイプラインを埋め戻すことを特色としており、液状化防止区域は砕石などの液状化しない材料

で埋め戻すものとし、液状化許容区域は砂などの液状化の可能性のある材料で埋め戻してもよいものとしている。

今後の課題としては、実ラインに新たに提案した海底パイプラインの液状化対策工法を適用し、その有効性を実証していきたいと考えている。なお本研究では、解析手法として有限要素法を用いたが、解析の対象とする範囲を限定すれば、解析解を利用した方が実用上便利なことも多い。付録に掲げた式・表を何らかの形で利用していただければ幸いである。最後に、本研究の実施にあたりご討議いただいた、運輸省港湾技術研究所 清宮 埋沈埋構造研究室長に記して謝意を表する。

付 録

Fig. 1 に示すように、地盤の一部分が液状化する場合には、弾性支承上 (地盤ばねは等価線形を仮定する) のはりの問題として微分方程式を解き、解析解を得ることができる。ただし、解の適用範囲は、変形後の海底パイプラインが海底面以下にとどまる場合に限るものとする。解析解によると変位、曲げモーメントの分布は Fig. A-1 のようになる。また、同図中に示す変位、曲げモーメントは次式で与えられる。

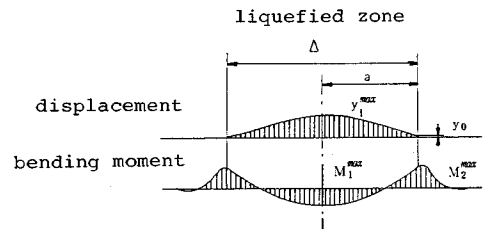


Fig. A-1 Displacement and Bending Moment Calculated from Analytical Solutions.

$$y_1^{\max} = \frac{Sa^4}{24EI} \cdot \frac{(a^4\beta^4 + a^3\beta^3 + 10a^2\beta^2 + 12a\beta + 6)}{a^3\beta^2(\alpha\beta + 1)} = \frac{Sa^4}{24EI} \cdot \varphi_1(\alpha\beta) \dots \dots \dots (A \cdot 1)$$

$$y_0 = \frac{Sa^4}{24EI} \cdot \frac{2(2a^2\beta^2 + 6a\beta + 3)}{a^3\beta^2(\alpha\beta + 1)} = \frac{Sa^4}{24EI} \cdot \varphi_2(\alpha\beta) \dots \dots \dots (A \cdot 2)$$

$$M_1^{\max} = \frac{Sa^2}{6} \cdot \frac{(a^2\beta^2 + 3a\beta + 3)}{\alpha\beta(\alpha\beta + 1)} = \frac{Sa^2}{6} \cdot \varphi_3(\alpha\beta) \dots \dots \dots (A \cdot 3)$$

$$M_2^{\max} = \frac{Sa^2}{6} \cdot \frac{\sqrt{a^2\beta^2(2\alpha\beta + 3)^2 + 9(\alpha\beta + 1)^2}}{\alpha\beta(\alpha\beta + 1)} \cdot \exp\left[-\tan^{-1} \frac{3(\alpha\beta + 1)}{\alpha\beta(2\alpha\beta + 3)}\right] = \frac{Sa^2}{6} \cdot \varphi_4(\alpha\beta) \dots \dots \dots (A \cdot 4)$$

Table A-1 Values of Dimensionless Functions.

x	$\varphi_1(x)$	$\varphi_2(x)$	$\varphi_3(x)$	$\varphi_4(x)$
0.1	6637.363	6581.816	30.091	6.902
0.2	917.667	891.667	15.167	3.825
0.3	300.146	283.761	10.231	2.826
0.4	139.393	127.679	7.786	2.346
0.5	78.333	69.333	6.333	2.074
0.6	49.611	42.361	5.375	1.904
0.7	34.099	28.057	4.697	1.792
0.8	24.872	19.705	4.194	1.716
0.9	18.977	14.468	3.807	1.663
1.0	15.000	11.000	3.500	1.626
2.0	3.917	1.917	2.167	1.567
3.0	2.222	0.722	1.750	1.621
4.0	1.669	0.369	1.550	1.673
5.0	1.421	0.221	1.433	1.716
6.0	1.290	0.147	1.357	1.750
7.0	1.211	0.104	1.304	1.777
8.0	1.161	0.078	1.264	1.798
9.0	1.127	0.060	1.233	1.817
10.0	1.102	0.048	1.209	1.832
20.0	1.025	0.011	1.102	1.908
30.0	1.011	0.005	1.068	1.937
40.0	1.006	0.003	1.051	1.952
50.0	1.004	0.002	1.040	1.961
60.0	1.003	0.001	1.034	1.968
70.0	1.002	0.001	1.029	1.972
80.0	1.002	0.001	1.025	1.976
90.0	1.001	0.001	1.022	1.978
100.0	1.001	0.000	1.020	1.980
200.0	1.000	0.000	1.010	1.990
300.0	1.000	0.000	1.007	1.993
400.0	1.000	0.000	1.005	1.995
500.0	1.000	0.000	1.004	1.996

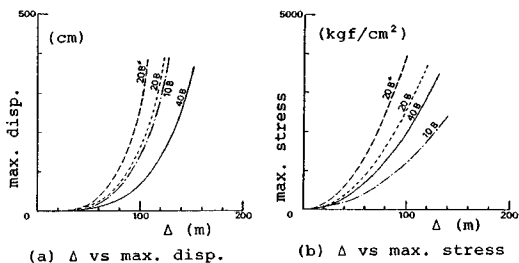


Fig. A-2 The Relation between the Length of Liquefied Zone, Maximum Displacement and Maximum Bending Stress (Calculated from Analytical Solutions).

ここに、

$$S = (\gamma_s - \gamma_w)A, \quad a = \Delta/2$$

$$\beta = \{K_n D_0 / (4 EI)\}^{1/4}$$

A: 海底パイプラインの全断面積

EI: 海底パイプラインの曲げ剛性

K_n : 地盤反力係数

Δ : 液状化区間長

上式中の無次元関数 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ の値を Table A-1 に示す。式 (A-1)、式 (A-4) を用いて、Table 1 に示す海底パイプラインの最大浮上量、最大曲げ応力を計算

し、Fig. A-2 に示す。同図と Fig. 8 とを比較すると、最大曲げ応力は非常によく一致しているのがわかる。最大浮上量に関しては、Fig. 8(a) の方が大きいのは、地盤ばね (K_n ばね) を弾塑性としているためである。

式 (A-1)~式 (A-4) および Table A-1 を用いれば、計算機を用いなくとも、簡単に Fig. 8 のような関係を得ることができ、実用上便利である。

参考文献

- 1) 北浦 勝・宮島昌克・松村祐二: 液状化時の地中埋設管の応答解析, 第17回地震工学研究発表会, pp. 303~306, 1983. 7.
- 2) 大石 博・関口宏二: 埋設管路の液状化対策工法に関する実験的考察, 第17回地震工学研究発表会, pp. 295~298, 1983. 7.
- 3) 土木学会: 王子製紙(株) 専用工業用水道の被害, 1968年十勝沖地震調査報告, pp. 565~569, 1969. 3.
- 4) 佐々木康・吉見吉昭・土田 肇: 地盤の液状化, 土と基礎, Vol. 29, No. 9, pp. 60~61, 1981. 8.
- 5) Morgenstern, N. R.: Submarine Slumping and the Initiation of Turbidity Currents, Marine Geotechnique, Part 2, Submarine Slides, Slumps and Slope Stability, Univ. of Illinois Press, pp. 187~220, 1976.
- 6) Swanson, R. C. and Jones, W. T.: Mudslide Effects on Offshore Pipelines, ASCE, Vol. 108, No. TE6, pp. 585~600, 1982. 11.
- 7) 浜田政則・恵本克利・磯山龍二・安田 進: 地盤の永久変位と地震被害について, 第18回地震工学研究発表会, pp. 349~352, 1985. 7.
- 8) 南兼一郎・清宮 理・土田 肇: 液状化が海底パイプラインの応力度に及ぼす影響, 港湾技研資料, No. 441, 1983. 5.
- 9) 清宮 理・横田 弘: 液状化地盤中での海底パイプラインの応力度の低減に関する検討, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp. 651~652, 1984. 10.
- 10) Vesic, A. S.: Breakout Resistance of Objects Embedded in Ocean Bottom, ASCE, SM9, pp. 1183~1205, 1971. 9.
- 11) 関口宏二・大石 博: 液状化時の浮力による海底パイプラインの挙動解析, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp. 383~384, 1985. 9.
- 12) 大石 博・関口宏二: 海底パイプラインの液状化対策工法に関する一提案, 第18回地震工学研究発表会, pp. 237~240, 1985. 7.

(1986. 10. 8・受付)