

(60) 海底パイプラインの液状化対策工法に関する一提案

日本鋼管㈱中央研究所 正員 大石 博
 日本鋼管㈱中央研究所 正員 ○関 口 宏 二
 日本鋼管㈱海洋プロジェクト室 正員 尾 形 賢

1. はじめに

我が国では、海底パイプラインは、海底面下2～3mの位置に設置され、砂にて埋め戻される場合が多い。埋め戻された砂は、①有効上載圧が小さい、②ゆるく堆積している、などの理由により、地震時に液状化する可能性がある。液状化が一般の埋設管路に被害を与える要因としては、①不完全液状化時の動的な挙動^{1),2)}、②完全液状化時に埋設管路に働く浮力³⁾、③過剰間げき水圧の消散時に生ずる地盤沈下^{1),2)}、④液状化に伴う地すべり（地盤が傾斜している場合）、などが挙げられる。海底パイプラインのように、構造が直線的であり剛性が高い場合には、主として上記②の浮力による影響が大きいと考えられる。そこで本報告では、液状化時に浮力が海底パイプラインに及ぼす影響について、数値解析によって考察するとともに、新しい液状化対策工法を提案し、その有効性について述べる。なお、本報告における解析手法は、南ら⁴⁾の提案している手法とほぼ同様の手法である。

2. 解析手法

図1に、埋め戻し地盤の一部分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とパイプラインのみかけの単位重量との差に相当する、上向きの力が働くと考えられる。一方、非液状化区域では、パイプラインは地盤により弾性的に支持されていると考える。

図2に解析モデルを示す。パイプラインは同図に示すように、ばね支承上の梁として解析する。同図中に示す“ K_s ばね”は、地盤の拘束力を考慮するためのものであり、“ K_f ばね”は、パイプライン上端が海底面よりも上に浮上したときの、パイプラインに働く下向き（または上向き）の力と、パイプラインの変位の非線形な関係⁴⁾を考慮するためのものである。なお、解析にあたっては、荷重増分法を用いている。

3. 浮力が海底パイプラインに及ぼす影響

ここでは、図1に示すように、埋め戻し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。表1に、計算に用いた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、地盤の単位

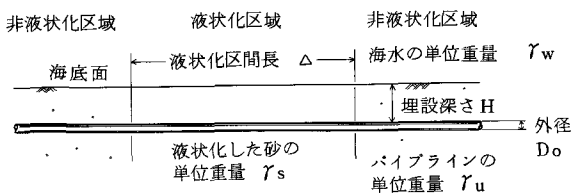


図1 埋め戻し地盤の一部分が液状化する場合の説明図

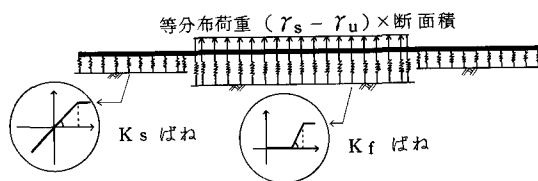


図2 解析モデル

表1 計算に用いたパイプラインの諸元

呼び径	10B	20B	40B	20B [*]
外径 D (cm)	26.74	50.8	101.6	50.8
管厚 t (cm)	0.93	1.27	1.6	1.8
コーティング厚 t _c (cm)	1.73	3.33	7.57	4.26
全外径 D _o (cm)	30.2	57.5	116.7	59.3
断面積 A _p (cm ²)	75.4	197.6	502.7	277.1
全断面積 A (cm ²)	716.3	2592.2	10701.8	2762.8
2次モーメント I (cm ⁴)	6290	606×10 ²	628×10 ²	833×10 ²
断面係数 Z (cm ³)	470	2390	124×10 ²	3280
単位長重量 γ _p A _p (g/cm)	592	1550	3950	2175
単位重量 γ _u (g/cm ³)	1.9	1.7	1.7	1.4

面積あたりの反力を $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ として定めた。また、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⁵⁾ので、安全側をとって $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ とした。なお、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(図1参照)が、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。図3に、呼び径 40B の

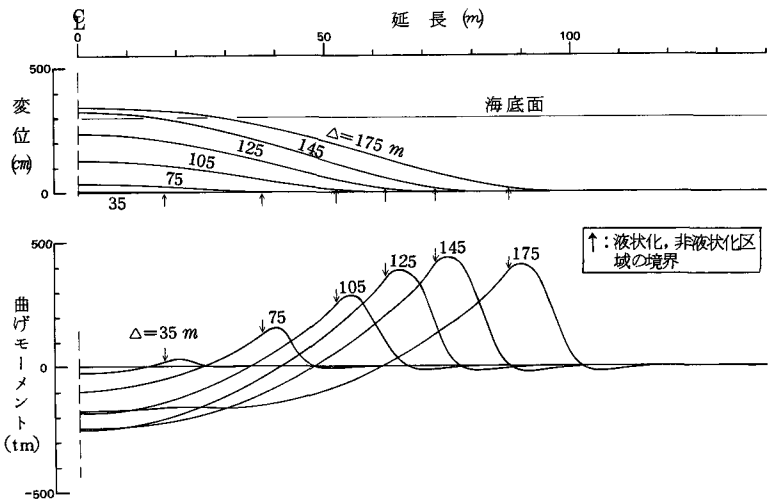


図3 液状化区間長が変位、曲げモーメントに及ぼす影響(40B)

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 以外のパイプラインについても傾向は同様であった。

図4(a)に、液状化区間長と最大浮上量の関係を、また図4(b)に液状化区間長と最大曲げ応力の関係を示す。図4(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(パイプラインが海底面上に現われる液状化区間長)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、図4(b)より、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、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、最大曲げ応力がピークを示すのは、パイプラインの一部が海底面上に現われる液状化区間長のときであると言える。

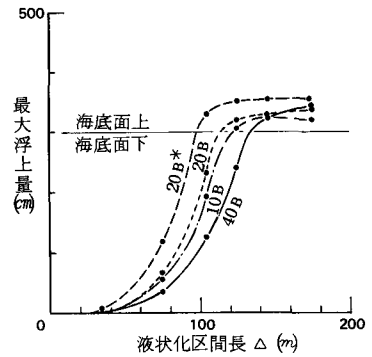
さて、液状化に関する対策という観点より、図4(a),(b)を見ると、液状化区間長を人為的にコントロールして短くすることができれば、液状化時の浮力によるパイプラインへの影響を著しく軽減できると考えられる。4で述べる海底パイプラインの液状化対策工法は、この点に着目して考案したものである。

4 海底パイプラインの新しい液状化対策工法

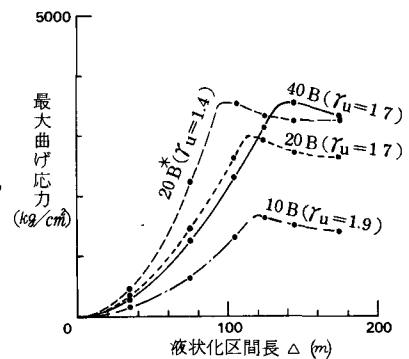
海底パイプラインは、海底面下に埋設されているという特殊性により、一旦被災(管体の塑性変形や、海底面上への浮上など)すると、復旧に多額の日時と費用を要する。そのため、経済的に信頼性の高い、海底パイプラインの液状化対策工法の開発が望まれている。以下に、実用的な液状化対策工法を提案し、その有効性について述べる。

4.1 新しい液状化対策工法

本工法は、図5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



(a) 最大浮上量～液状化区間長



(b) 最大曲げ応力～液状化区間長

図4 液状化区間長の影響

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、図5に示すように傾斜をつける。

液状化防止区域および液状化許容区域の長さは、液状化許容区域が全て液状化する場合を想定して計算し、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。

本工法の施工は、①トレンチの掘削、②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、の手順で行なう。

4.2 本工法の適用例と有効性

表1に示す40Bの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述べる。

最大曲げ応力の許容値を、仮りに $1500\text{kg}/\text{cm}^2$ とすれば、図4(b)を参考にして、液状化許容区域の長さは、78mになる。ここで、図4(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のパイプラインの最大浮上量や最大曲げ応力は、液状化区域が一ヶ所のみの場合とあまり変化がないからである。(図6参照)

液状化防止区域の長さを決めるため、液状化許容区域の長さを固定したまま、液状化防止区域の長さを変化させて計算を行う。図6に、液状化防止区域の長さを種々に変化させた場合の、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。図6の横軸の原点は、図5の液状化許容区域の中央部にとっている。図6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。

図7(a)に、液状化防止区域の長さと最大浮上量との関係を、また、図7(b)に、液状化防止区域の長さと最大曲げ応力との関係を示す。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よりあまり影響されないと見える。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、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、パイプラインの最大浮上量は非常に大きくなる。

図6に示した6ケースは、いずれも実施可能であるが、図8に液状化

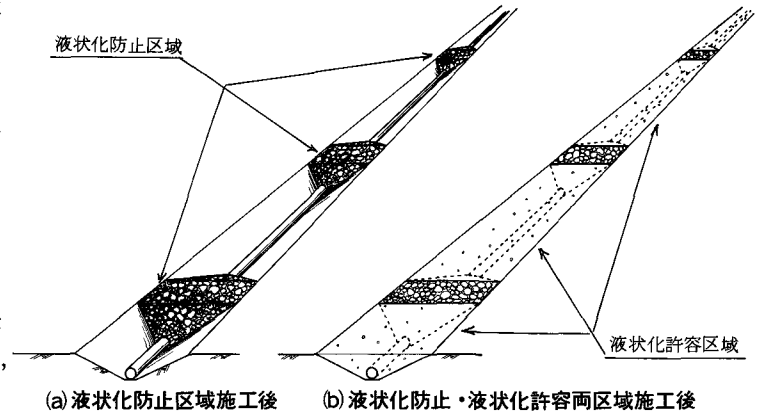


図5 海底パイプラインの液状化対策工法の概念図

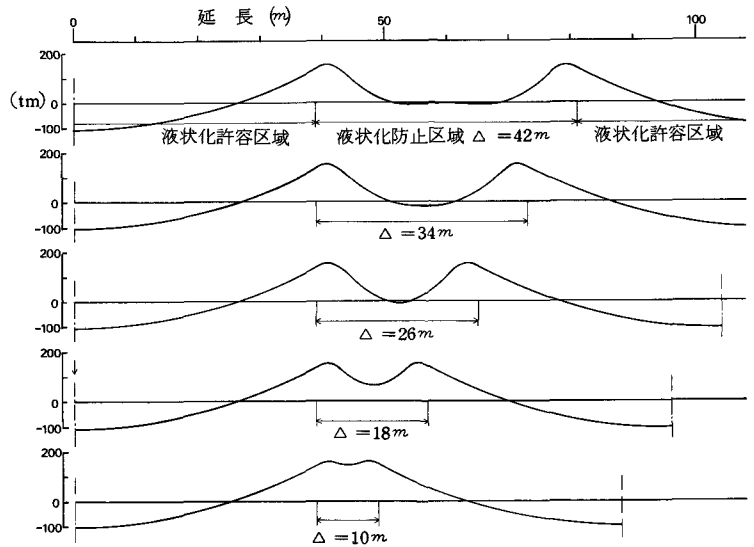


図6 液状化防止区域の長さが曲げモーメントに及ぼす影響 (40B)

対策の一例として、液状化防止区域の長さが18mの場合を示す。本例では、上方より見おろすと液状化防止区域は一边が18mの正形状を示している。

図8の例において、液状化許容区域が液状化した場合の、パイプラインの変位と曲げモーメントの分布図を、図9に示す。

無対策で、液状化区間長が100m以上の場合(図3参照)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言える。

5. むすび

ここに提案した海底パイプラインの液状化対策工法(液状化防止区域と液状化許容区域を交互に設けてパイプラインを埋め戻す工法)は、数値解析の結果より有効性が確認された。今後は、実ラインにおいて、その有効性を確認することも必要と考えている。

また、まえがきでも述べたように、液状化がパイプラインに影響を及ぼす要因としては、浮力以外に種々のものがある。海底パイプラインの路線の環境条件によっては、浮力以外の要因が大きく影響する場合もあると考えられるので、今後そうした要因に関して、より定量的な研究をすすめることも考えている。

6. 参考文献

- 1)北浦・宮島・松村; 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, 1983.7, pp.303-306.
- 2)大石・関口; 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, 1983.7, pp.295-298.
- 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, 1969.3, pp.565-569.
- 4)南・清宮・土田; 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, №441, 1983.5
- 5)関口・大石; 液状化時の浮力による海底パイプラインの挙動解析, 土木学会年講, 1985.9. 発表予定

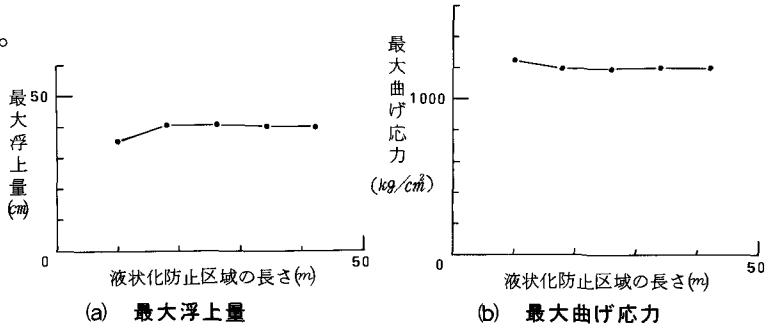


図7 液状化防止区域の長さの影響(40B, 液状化許容区域の長さ = 78m)

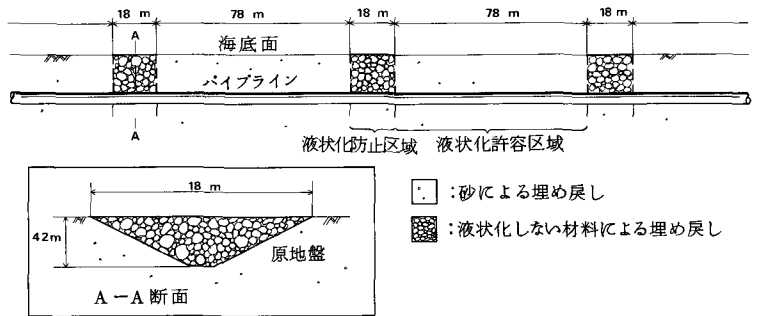


図8 海底パイプラインの液状化対策の一例(40B)

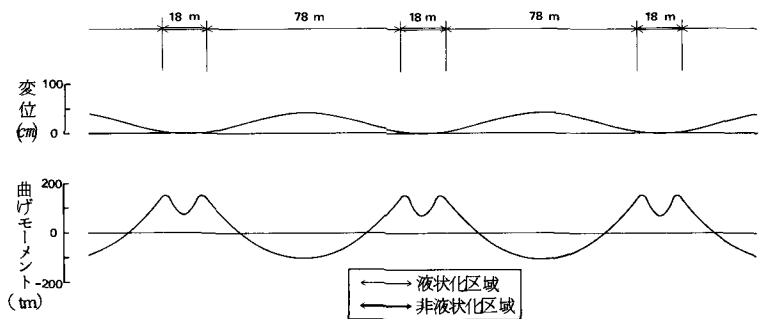


図9 変位と曲げモーメントの分布図
(40B, 図8において液状化許容区域が液状化した場合)