

波浪作用下における海底埋設パイプラインの 浮上機構に関する研究

前 野 詩 朗*・猿 木 広 一 郎**・星 山 知 恵**

1. はじめに

近年, 石油や天然ガス等の海底天然資源の掘削後の輸送手段として, 数多くのパイプラインが世界各地の海域に設置されつつある。パイプラインは設置する際の水深が 60 m 程度以下の浅海域では, 漁網や船のアンカー等による崩壊を避けるために経験的に約 0.5 m~1.0 m の範囲の土かぶり厚で海底地盤内にパイプラインが埋設されている (Dursthoff and Mzurkiewicz, 1985)。ところが, 海底天然資源の存在する海域は非常に気象条件の厳しい地域であることが多く, 海底埋設パイプラインが設置される沿岸域は高波浪の影響を受ける場でもある。したがって, このような場にパイプラインを埋設する際には, 静的な安定性のみならず高波浪による動的な安定性も考慮する必要がある。

以上のような観点から, 著者らは, 従来より, 海底埋設パイプラインの波による動的挙動を検討してきた。その結果, 波浪場に設置される海底埋設パイプラインには, 図-1 に示すような変動間隙水圧が作用し, 波の峰の時にはパイプを下に押し下げようとする力が作用し, 逆に, 波の谷の時にはパイプを上を押し上げようとする変動流体力が作用することを実験的に明らかにしている。また, 波の変動周期が小さくなるほど変動流体力が大きくなることや, パイプ周辺砂層を透水係数の大きな砂層で置き換えることにより変動流体力の発生を防止することができることなどを明らかにしている (前野ら, 1997; Magda ら, 1998)。これらの実験では, パイプ周囲の変動間隙水圧分布を計測するためにパイプを砂地盤内に固定していたが, 現地では高波浪の影響を受けてパイプが徐々に浮上し破壊に至る事例も報告されている (Dursthoff and Mzurkiewicz, 1985)。そこで, 本研究は, 移動可能なパイプを砂地盤内に設置して, 各種条件下における埋設パイプの移動特性を検討し, パイプの浮上限界を明らかにするとともに, 個別要素法を用いた数値解析によりパイプの浮上過程を明らかにしようとするものである。

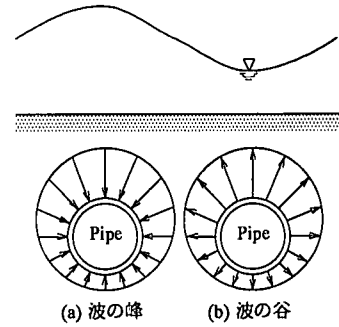


図-1 変動流体力の発生機構

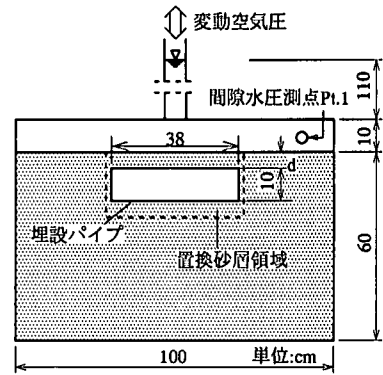


図-2 実験装置

2. 実験方法および解析方法

2.1 実験方法の概要および実験条件

実験には, 図-2 に示すような奥行き 40 cm の鉛直 2 次元の試料容器を用いた。砂層構成材料には, 高飽和状態の豊浦標準砂 ($d_{50} \approx 0.25$ mm, 透水係数 $k = 0.015$ cm/s) を用いた。埋設パイプラインの模型としては, 実物と模型との縮尺として約 1/10 程度を想定し, 外径 10 cm, 長さ 38 cm のアクリル製のパイプを用いた。パイプの比重はパイプ内に重りを取り付けることにより操作できるような仕組みになっている。パイプは試料容器奥行き方向の中央部の砂層表面からの土かぶり厚さ d の所に図-2 に示すように設置している。パイプの移動量は, パイプ

* 正 会 員 工 博 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科助教授
** 学生会員 岡山大学大学院工学研究科土木工学専攻

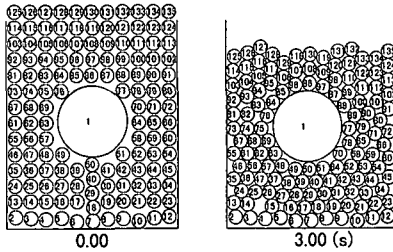


図-4 初期状態の設定状況

ここに、 $a(y)$, $\tau(y)$ は砂層表面からの深さ y における振幅および位相の遅れであり、次式のように表す。

$$a(y) = a_0 e^{-a_* y/D}, \quad \tau(y) = \tau_* y/Df \dots \dots \dots (4b)$$

a_0 は水中部 (Pt. 1) での水圧振幅、 f は変動水圧周波数、 D は砂層の高さ、 t は時間である。また、 a_* , τ_* は無次元定数である。式 (4) は、変動間隙水圧の振幅が指数関数的に減衰し、位相の遅れが直線的に増加するものと仮定したものであり、仮定の妥当性は名倉ら (1987) によって確認されている。本研究では、実験結果を考慮して a_* , τ_* の値として、それぞれ 1.50, 0.12 を採用した。

2.3 初期条件および計算条件

解析領域は、パイプ周囲の幅 24.4 cm、高さ約 25.0 cm の領域を対象とした。初期条件の設定は次のように設定した。図-4 に示すように、パイプ要素と 134 個の砂要素をパイプ周囲に非接触に配置した状態から計算を開始する。最下層にある 11 個の要素は固定要素とした。まず最初の 1 秒間はパイプを固定し、次の 1 秒間はパイプの比重を砂の比重と同じ大きさにしてパイプを移動可能な状況に設定した。さらに最後の 1 秒間はパイプの比重を実験で採用したパイプの比重に設定し、合計 3 秒間パッキングを行った。パネ定数等の計算条件は後藤ら (1994a; 1994b) の研究を参考にして以下の値を採用した。

$$\begin{aligned} k_n &= 9.45 \times 10^6 (\text{N/m}), & k_s &= 2.36 \times 10^6 (\text{N/m}), \\ \eta_n &= 0.4 (\text{Ns/m}), & \eta_s &= 0.2 (\text{Ns/m}), & \mu &= 0.577 \\ e_{n\max} &= 7.5 (\text{N}), & e_{s\max} &= 0.035 (\text{N}), & \Delta t &= 1.0 \times 10^{-5} (\text{s}) \end{aligned}$$

3. 結果および考察

3.1 変動間隙水圧および変動流体力特性

図-5 は Case 1 の場合の変動間隙水圧およびパイプに作用する変動流体力 F_z を示している (Pt. 1 は水中水圧測点、Pt. 2~Pt. 6 は、それぞれパイプ上部から 45 度置きにパイプ下部までの間隙水圧測点である)。この図より、砂層面上に作用する変動水圧は振幅減衰および位相の遅れを伴いながらパイプ周囲に伝播し、その結果として、パイプにはかなり大きな周期的な変動流体力が作用することがわかる。この変動流体力は、砂層面上の変動水圧が下降したときに上向きとなり、パイプを浮上させ

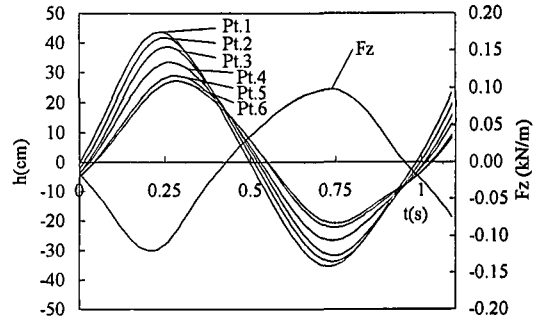


図-5 変動間隙水圧および変動流体力 (Case 1)

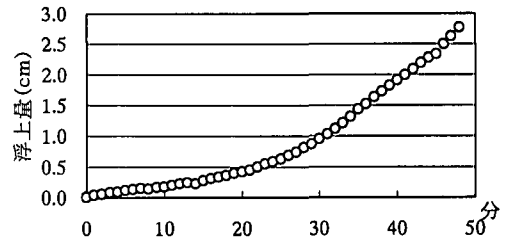


図-6 パイプの移動量 (Case 1)

ようとする外力としてパイプに作用することがわかる。

図-6 は Case 1 の場合のパイプの浮上量の時間変化を示している。この図より、パイプは実験開始後徐々に浮上し、約 30 分程度経過した時点から浮上速度を速めながら浮上することがわかる。このケースの場合、約 50 分経過した時点でパイプは完全に浮上した。

写真-1 は、パイプ周辺砂層の移動状況を可視化するためにパイプ周辺に着色砂を層状に配置し、実験開始後 40 分経過した時点で実験を中止し、その時のパイプ中央付近の砂層の断面を撮影したものである。実験条件は Case 1 と同一条件である。この写真より、パイプの浮上に伴いパイプ上部の砂層は上方向に持ち上げられ、逆に、パイプ側部の砂はパイプ下部方向へ移動していることがわかる。また、パイプ周辺砂層の移動は、パイプ周囲から 2~3 cm 程度の範囲に限定されていることもわかる。

3.2 砂置換法による浮上防止効果の検討

図-7 は、Case 1 および Case 2 の場合のパイプの移動量の時間変化を示している。パイプ周囲を透水係数の大きな砂で置換すると、パイプに作用する変動流体力の発生を抑制できることは前野ら (1997) により明らかにされているが、移動可能なパイプを用いた本実験結果より、変動流体力の発生防止のみならず、実際のパイプの浮上防止にもかなり効果があることがわかる。

3.3 土かぶり厚および比重の影響の検討

図-8 および図-9 は、パイプ上の土かぶり厚およびパイプの比重の変化によるパイプの移動量の時間的変化を

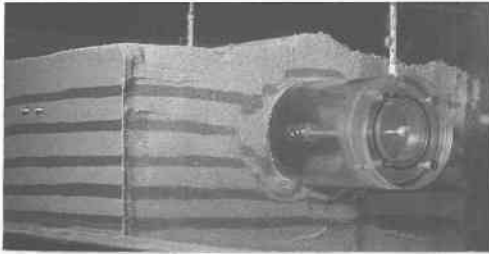


写真-1 パイプ周囲の砂の移動状況 (Case 1)

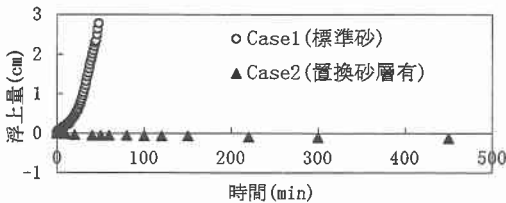


図-7 置換砂層の有無によるパイプの移動量

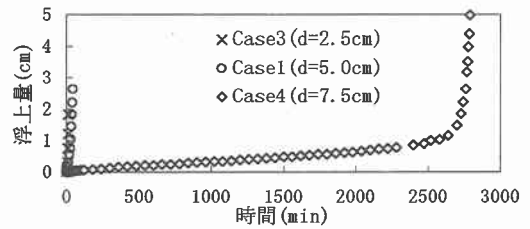


図-8 土かぶり厚の変化によるパイプの移動量

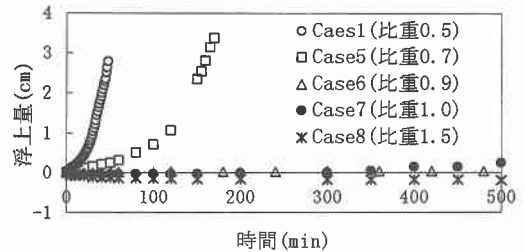


図-9 パイプの比重の変化によるパイプの移動量

示している。これらの図より以下のことがわかる。

土かぶり厚が2.5 cm の場合には、15 分程度と短時間で浮上しており、土かぶり厚が小さい場合にはパイプは急激に浮上することがわかる。土かぶり厚が大きくなるほどパイプは浮上しにくくなるが、土かぶり厚7.5 cm を想定した Case 4 の場合においても、長時間変動水压を作用させると (3000 分弱) パイプは完全に浮上した。つぎに、パイプの比重についてみると、比重が大きくなるほどパイプは浮上しにくくなるが、Case 6 (比重0.9) と Case 7 (比重1.0) の場合には、今回の実験では、完全には浮上しなかったが、実験終了時においてわずかながらパイプは上昇傾向にあり、さらに長時間変動水压が作用すると、いずれ浮上するものと考えられる。Case 8 の場合には、パイプは全く浮上しないでわずかに沈下した。

3.4 パイプの浮上限界の検討

以上の実験結果より、パイプの浮上には土かぶり厚やパイプの比重などが大きく影響することが明らかにされた。ここでは、パイプの浮上限界が図-10 に示すように変動流体力 F_z と、パイプの自重 W_p 、パイプ上部の砂層重量 W_s およびパイプ上部砂層の静的なせん断抵抗力 T_s との関係に依存するものとして、式 (5) で示す無次元量 F によりパイプの浮上限界を検討した。この無次元量 F が正の値をとるときには、パイプは浮上する危険性があり、負の値をとるときには、パイプは浮上しなくなる。なお、 η は静的なせん断抵抗力に対する低減率である。

$$F = \{F_z - (W_p + W_s + \eta T_s)\} / |W_p + W_s + W_s| \cdots \cdots (5)$$

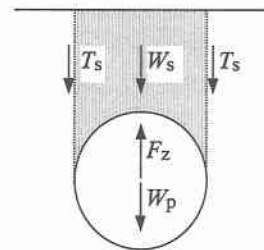
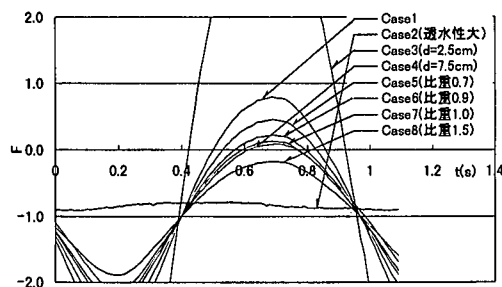


図-10 力のつり合い

図-11 は η の値を0.8とした場合の各ケースの F の時間変化を示したものである (紙面の都合上 ± 2 以上はカットしている)。この図より、パイプが比較的短時間で浮上した Case 1, Case 3 および Case 4 では F の値がかなり大きくなり、しかも、 F の値が大きくなるほど浮上に要する時間が短くなることがわかる。つぎに、パイプが全く浮上しなかった、Case 2 と Case 8 では、 F の値は正にならない。パイプの浮上に要する時間が2800分程度要した Case 4 および今回の実験の終了段階で、パイプは完全には浮上しなかったが、上昇傾向にあった Case 6 および Case 7 では、 F の値は正の値をとるもののその大きさは小さいことがわかる。

3.5 個別要素法によるパイプの浮上過程の検討

図-12 は、Case 1 の実験条件を適用した個別要素法による計算結果について、計算開始後偶数秒の周期について示したものである。左から2番目の列が変動水压の峰の時間帯であり、右端の列が変動水压の谷の時間帯である。この図より、計算開始後0.5秒まではパイプは殆ど移

図-11 パイプのつり合い条件 F の変化

動しないが、砂層面上に作用する変動水圧が谷の時間帯となる 0.75 秒のときには、パイプは若干浮上していることがわかる。しかし、パイプに作用する変動流体力は周期的に変化するため、変動流体力が下向きに作用している時間帯では、浮上しかけたパイプは下方に押し戻されることがわかる。例えば、計算開始後 2 秒経過した時点ではパイプは浮上しているが、2.25 秒および 2.5 秒のときには、浮上しかけたパイプは再び下方に押し戻され、2.75 秒のときには再度浮上する。このように、パイプに作用する変動流体力の影響を受けてパイプは周期的に上下しながら徐々に浮上することがわかる。とくに、パイプが浮上する時間帯にはパイプ周囲の砂要素がパイプ下部に移動するため、パイプは元の位置に戻ることができなくなり、その結果、徐々にパイプが浮上していく様子がわかる。また、パイプの浮上に伴う砂の移動範囲はパイプ周辺に限られており、写真-1 の可視化の結果とも一致する。しかし、解析ではパイプの浮上に要する時間が 7 秒程度と実験結果よりもかなり短かった。これは、本解析では、実際の砂粒子を直径 2 cm とかなり大きな要素に仮定したことや 3 次元的な粒子のかみ合いの効果が取り入れられていなかったことなどが原因であると考えられる。

4. 結 論

本研究では、波浪作用下における海底埋設パイプラインの浮上機構を模型実験および個別要素法による数値解析により検討した。主要な結論は以下のようである。

(1) 変動水圧作用下においてパイプに作用する周期的な変動流体力の影響により、パイプが徐々に浮上する場合がある。とくに、パイプ上の土かぶり厚が十分でない場合には短時間で浮上することが示された。

(2) パイプ上の土かぶり厚が大きくなるほど、また、パイプの比重が大きくなるほどパイプは浮上しにくくなることが明らかにされた。

(3) パイプ周辺砂層を透水係数の大きな砂層で置き換えることによるパイプ浮上防止効果は非常に大きいこ

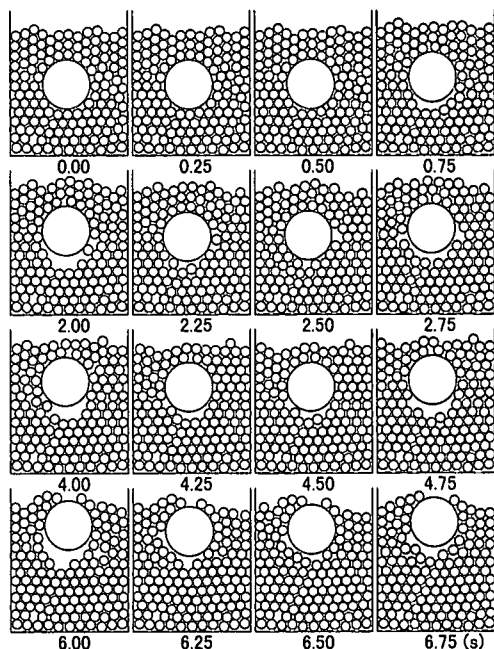


図-12 個別要素法によるシミュレーション結果

とが明らかにされた。

(4) パイプの浮上限界は、パイプを浮上させようとする変動流体力、パイプの自重、パイプ上部の砂層重量およびパイプ上部砂層の静的なせん断抵抗力との関係に依存することが示された。

(5) 個別要素法によりパイプの浮上過程を検討した結果、パイプは変動流体力の作用を受けて周期的に上下しながら徐々に浮上することが明らかにされた。

参 考 文 献

- 後藤仁志・酒井哲郎・富永圭司・豊田泰晴 (1994a): 変動波圧を受ける海底地盤の挙動の数値模擬への個別要素法の応用, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 596-600.
- 後藤仁志・酒井哲郎・富永圭司 (1994b): 粒状体モデルによるシートフローの流動過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 371-375.
- 前野詩朗・Waldemar Magda・名合宏之 (1997): 波浪下における海底埋設パイプラインに作用する変動流体力特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 796-800.
- 名合宏之・前野詩朗・平井康隆・西平福宏 (1997): 変動間隙水圧計測による地盤定数の推定, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 931-935.
- Dursthoff, W. and Mazurkiewicz, B. (1985): Problems related to subsea pipeline-seabed interaction. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 61, pp. 176-238.
- Magda, W., S. Maeno and H. Nago (1998): Wave-induced pore-pressure response on a submarine pipeline buried in seabed sediments, Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama Univ., Vol. 3, No. 1, pp. 75-95.