

波浪下の液状化海底地盤中の埋設パイプラインの浮上過程

原田 英 治* ・後 藤 仁 志**・田 中 秀 範***
大 野 正 博****・酒 井 哲 郎*****

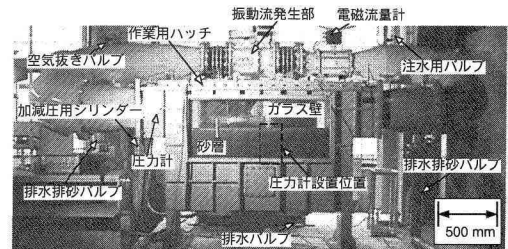
石油産出国沿岸域では、高波浪による海底地盤の液状化によって海底に埋設されたパイプラインが浮上して水中に露出し、船舶のアンカーと衝突して破断する事故例が報告されている。パイプラインは石油・天然ガスの主要な輸送手段であることに加えて、破断パイプラインからの石油の流出は環境破壊を招くため、パイプライン浮上機構は経済上だけでなく環境保全上も重要検討課題である。本稿では、耐圧式砂層水槽を用いた室内実験および 3 次元個別要素法型の数値シミュレーションによって、液状化地盤におけるパイプの浮上過程を検討し、その浮上メカニズムを論じる。

1. 緒 言

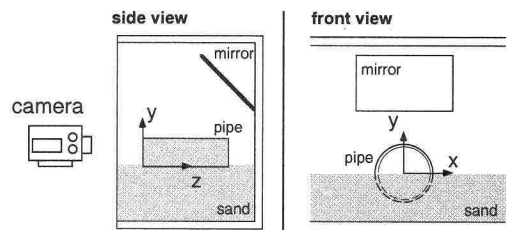
海底埋設パイプラインは、石油・天然ガスの主要な輸送手段である。一般的に高波浪が来襲する外洋の海底地盤では、この種の埋設パイプラインの海底地盤表層への浮上の事例が報告されている。浮上のメカニズムの主要部を担うのが波浪による海底地盤の液状化である。海底地盤面への作用水圧と海底地盤内間隙水圧の位相差の存在が、地盤表面付近の砂層に見かけの揚力を作用させ、砂層を流動化させる。見かけの揚力の発生は短時間現象であるが、反復的に生じるので砂地盤と比較して比重の小さいパイプラインは徐々に浮上する。浮上したパイプラインが、係留船舶のアンカーの衝突によって破断すると石油の流出など環境面で甚大なインパクトをもたらすこととなるため、パイプライン浮上メカニズムの詳細な検討は重要課題であることには疑念がない。

これまでも活発に地盤埋設パイプラインの浮上過程の研究が実施されている。例えば、前野ら (1997) は、砂地盤埋設パイプラインに作用する変動間隙水圧特性および変動流体特性を実験的に検討し、パイプ周辺に作用する水圧が、振幅減衰および位相遅れを伴い伝播することを示し、パイプに作用する周期的な変動流体力がパイプ浮上の駆動力となっていることを明らかにしている。さらに、前野ら (1998) は、2 次元個別要素法による数値シミュレーションによってパイプ浮上過程の再現を試みている。しかしながら、計算機の性能の制約上、2 次元の配列と実現象の 3 次元の配列における噛み合わせ効果の相違等の、解決すべき検討課題が残されていた。

本研究では、3 次元個別要素法に基づく数値シミュレーションによって、波浪による液状化に起因する砂地盤の支持力低下と流動化がもたらす地盤埋設パイプの浮上過程を計算力学的に検討する。さらに、耐圧式砂層水槽による作用水圧の変動下における水理実験との比較を



図—1 実験装置



図—2 実験領域

通じて、パイプ浮上過程を詳細に検討する。

2. 実験概要

図—1 に示す実験装置 (酒井ら, 1994) は、砂層水槽の両端に連結されたプロペラ式の流量制御系と油圧シリンダー式の水圧制御系を有し、流速・水圧を任意に制御できるが、本稿では水圧制御シリンダーのみを使用して、耐圧砂層水槽内に配置したパイプの浮上過程の実験を実施した。粒径 $d=0.25$ mm, 比重 $\sigma=2.65$ の均一砂を敷きならした砂面上に直径 $D=10.0$ cm (パイプの厚さ約 0.3 cm), 全長 $L=20.0$ cm, 比重 1.02 の塩化ビニル製のパイプを半埋没するように設置し、周期 4.0 秒, 全振幅 0.3 mAq の水圧変動を繰り返し作用させて、パイプの浮上過程をデジタルビデオカメラで撮影した (図—2 参照)。パイプの上部には、45°に傾斜した鏡を設置して、パイプ浮上過程を正面から撮影し、正面および上方からのパイプの運動を同時に記録した。なお、パイプの両端はアクリル板で塞ぎ、パイプの内部は満水状態である。また、

* 正 会 員 工博 豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科
** 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻
*** 正 会 員 工修 竹中土木
**** 正 会 員 工修 国土環境
***** フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻

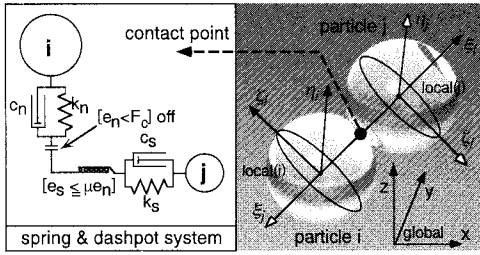


図-3 ローカル座標系

砂層の側壁に埋め込んだ間隙水圧計を用いて計測した地盤間隙水圧分布によって減圧位相で瞬間的液状化が発生することは、別途確認している。

3. シミュレーションモデル

(1) 固体要素のモデル

計算に用いたモデルは、剛体連結モジュール(Koshizuka ら, 1998)を組み込んだ拡張型の3次元個別要素法(後藤ら, 2002)である。モデルの概略を以下に示す。

個々の要素の運動は、隣接粒子との接触力に起因する並進および回転の運動方程式

$$\ddot{x}_i = \frac{F_{\text{pint}}}{M_i} - \alpha \cdot g \quad (1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{T_{\text{pint}}}{I_i} \quad (2)$$

$$M_i = \frac{\sigma \pi d_i^3}{6}; \quad I_i = \frac{\sigma \pi d_i^5}{60} \quad (3)$$

で記述される。ここに、 x_i , ϕ_i : グローバル座標系 x 上での要素 i の位置と回転角, F_{pint} : グローバル座標系 x 上での要素間接触力, M_i : 要素 i の質量, T_{pint} : グローバル座標系 x 上での要素間作用モーメント, I_i : 要素 i の慣性モーメント, d_i : 要素 i の直径, g : 重力加速度ベクトル, σ : 要素の密度, α : 液状化による見かけの揚力の作用を規定する係数であり、通常は $\alpha=1.0$ である(後述する液状化モデルを参照)。

要素間接触力に関しては、2要素間接平面の法線方向および接平面内に採ったローカル座標系において、弾性スプリング(バネ定数 k_n , k_s) およびダッシュポット(粘性定数 c_n , c_s) を配置してモデル化する(図-3参照)。要素運動はグローバル座標系で追跡され、要素間接触が生じると接触力の評価がローカル座標系で行われる。個別要素法で使用したモデル定数は、後藤ら(2001)の設定法に準じて、個別要素法で用いる計算時間ステップ $\Delta t=0.0001$ s に対して、法線および接線方向のバネ定数および粘性定数をそれぞれ $k_n=40.70$ N/m, $k_s=15.65$ N/m, $c_n=0.18$ Ns/m, $c_s=0.11$ Ns/m に設定した。なお、本計算では要素間の接触面に生じる法線方向まわり

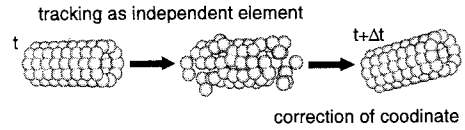


図-4 剛体連結モジュール

の回転に対するねじりモーメントは考慮していない。

パイプは、複数の要素を剛体連結して表現した。剛体を構成する個々の要素は、Koshizuka ら(1998)の Passively moving solid model を準用し、剛体の重心回りの角運動量が保存されるように相対回転角を算定して、要素間の相対位置が保存されるように座標修正を施し剛体挙動をさせている。シミュレーションでは、最初にパイプ構成要素間の連結はないものとして、全要素を個別要素法で追跡する。その結果、パイプ構成要素は初期の相対位置関係が崩れ変形するが、ブロック構成要素間の初期の相対位置を変化させないように直後に座標修正計算を施す(図-4参照)。座標修正計算は以下の通りである。まず、パイプ構成要素の時刻 $t+\Delta t$ での仮速度と仮座標より重心座標 r_g と重心座標での並進速度ベクトル T 、重心回りでの角速度ベクトル R を算定する。

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N u_i \times (r_i - r_g) \quad (5)$$

$$r_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i; \quad I = \sum_{i=1}^N |r_i - r_g|^2 \quad (6)$$

ここに、 I : パイプ構成要素の重心回りの慣性モーメント, N : パイプ構成要素の総数である。次に、並進速度ベクトル、角速度ベクトルを用いて、剛体的挙動を満足するためのパイプ構成要素 i の移動速度

$$\tilde{u}_i = T + (r_i - r_g) \times R \quad (7)$$

を求める。そして、これを用いてパイプ構成要素 i の座標は、

$$r_i(t+\Delta t) = r_i(t) + \tilde{u}_i \Delta t \quad (8)$$

と修正される。このように、個別要素法による全要素の座標の更新が行われる度に、パイプ構成要素に座標修正を施すといった一連のプロセスが計算時間毎に行われ、パイプと砂要素の相互作用を考慮したパイプの浮上過程が追跡される。

(2) 液状化のモデル化

パイプの有意な浮上の発生は、地盤の液状化が生じる位相近傍に限定される。ここでは、計算の効率化のため、図-5に示す表層近傍の砂要素(ハッチングした領域)に対して地盤の液状化による有効応力の急減を意味する見かけの揚力を反復して作用させて、地盤流動化を表現した。さらに、地盤間隙水圧による変動流体力のパイプ

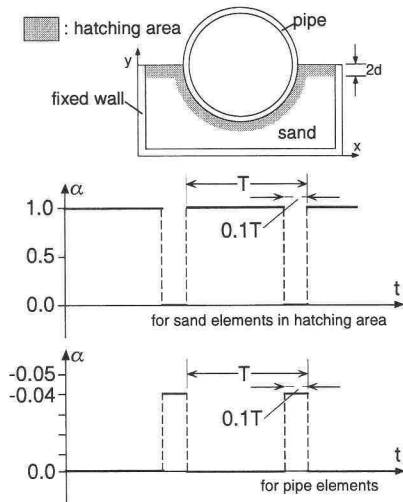


図-5 地表表層砂要素およびパイプ要素の駆動力

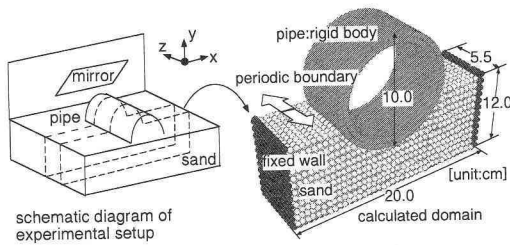


図-6 計算領域

への作用を表すために、パイプ要素にも付加的な揚力を繰り返し与えた。砂要素に作用する見かけの揚力およびパイプに作用する変動流体力は、式(1)中の係数 α を各々図-5に示す様な波形で変動させて与えた。なお、載荷・除荷の作用周期の設定については、個々の除荷によるパイプ浮上過程に及ぼす影響が、相互に独立になるように十分な長さの除荷位相を確保した。

(3) 計算条件

図-6に示すように、対象計算領域は、計算負荷を考慮して実験領域の一部とした。パイプ側面側(z 軸方向)は周期境界としたので、十分に長い様な長さのパイプの一部を模擬することに相当する。なお、要素径 $d=0.5$ cm, 比重2.65の球要素10,560個を用いて固定壁および砂地盤が構成され、パイプは実験におけるパイプの重量(内部に水を充填)と同一にするため、要素径 $d=0.5$ cm, 比重2.55の要素2,560個を剛体連結して構成した。

4. 実験とシミュレーション結果の比較

(1) 実験結果

図-7に実験における半埋設パイプの浮上過程の画像を示す。画像には、パイプ断面および鏡に映したパイプ

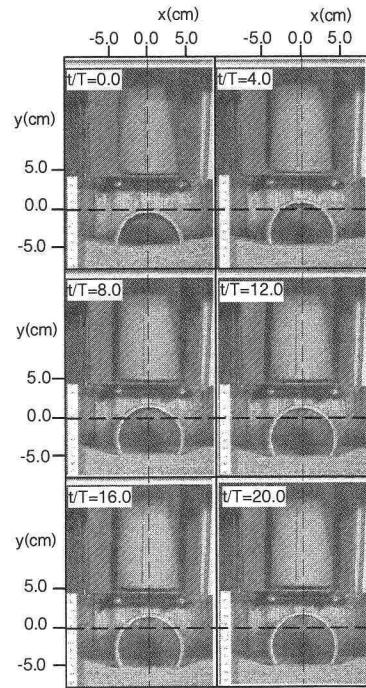


図-7 パイプ浮上過程(実験)

上面がそれぞれの周期毎にセットで示されており、パイプの空間的挙動(鉛直・水平および奥行き方向)が観察できる。なお、図中では、初期におけるパイプ頂部の高さを y 軸の基準($y=0.0$)として破線で示した。鉛直(y 軸)方向では、初期から8周期目までの間において明瞭にパイプの浮上が確認できるが、8周期以降では、僅かな変動を示すものの概ね一定レベルを保持する様子が伺える。一方、水平(x 軸)方向には、僅かに負の方向へ移動するが、顕著な運動は示さない。また、パイプの奥行き(z 軸)方向の挙動を検討するために、目印としてパイプの上側面中心軸に黒色マーカーでラインを付し、初期に z 軸と平行を成すようにパイプを配置したが、実験の全時間を通して黒線が図中の y 軸と平行を保っており、 x - z 平面においてパイプの回転や傾きが僅かであることが理解できる。総じて、本実験ではパイプは初期設置位置から偏心することなく概ね y 軸方向に単純に浮上する結果となった。

次に、パイプ浮上によるパイプ近傍砂地盤の挙動を詳細に検討するため、パイプを可能な限り耐圧式砂層水槽に近接するように砂地盤に設置して、変動水圧作用下での砂地盤の運動を記録した。図-8にパイプ浮上過程でのパイプ近接砂地盤の挙動を $t/T=0.3$ から $t/T=3.0$ の区間を0.3周期毎に示す。パイプ側方近傍の砂粒子のパイプ底部への潜り込みによってパイプ底部の砂地盤高さが次第に上昇し、パイプが徐々に浮上する過程が、既

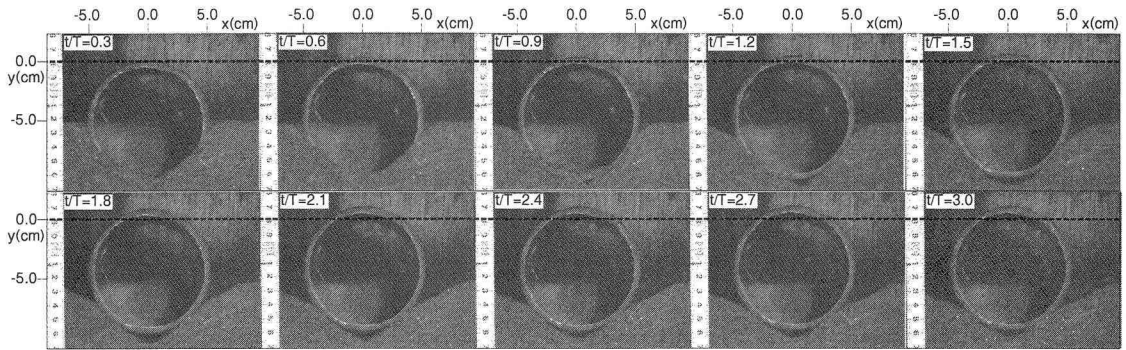


図-8 パイプ浮上過程 (クローズアップ)

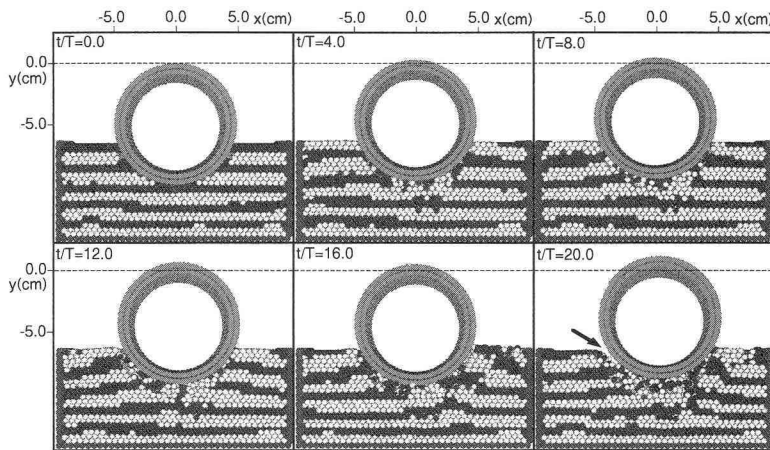


図-9 パイプ浮上過程 (シミュレーション)

往の研究(前野ら, 1998)の実験結果から確認されているが, 本研究の実験結果からも同様の結果が得られた。詳細にビデオ画像を観察すると, 減圧位相付近(例えば, $t/T=1.8$ および $t/T=2.7$) でパイプ自体の浮上によって, パイプ底部と砂地盤の間の隙間にパイプの側方から砂が潜り込み, 次第に砂地盤表層へと砂粒子が流動する範囲が広がる過程が, 地盤表層の傾斜角から明瞭に理解できる。また, この潜り込み過程は, 実験開始直後から $t/T=3.0$ の区間に顕著に現れ, パイプの速やかな浮上が確認されたが, その後, 実験終了まで, 地盤表層の傾斜角に明瞭な変化は無く, パイプは緩やかな浮上を示した。これは, $t/T=3.0$ 以降は, 砂地盤のパイプに対する傾斜角がほぼ安息角を呈し, 砂地盤が流動化し難い状態にあるためと考えられる。

(2) シミュレーション結果

図-9 にシミュレーション結果のスナップショットを示す。実験と同様にパイプ浮上量を明確にするために, 初期のパイプ頂部の高さを y 軸の基準 ($y=0.0$) とし破線で示した。なお, 実験ではパイプの埋設に伴ってパイ

プ周辺の地盤が緩くなるので, 計測開始以前に予備的な水圧増減の負荷をかけて地盤を締め固めている。この際に僅かながらパイプ周辺が沈下するが, 図-9 に示す y 座標の原点はこの点を考慮に入れて修正しているため, 図-7 および図-8 で示した実験画像と比較して砂地盤表層座標が異なっている。パイプが浮上する過程が, 図中の破線に対するパイプの相対位置から確認できる。また, シミュレーションでは砂地盤の流動過程を可視化するために, 砂要素を2色の層状に着色したが, パイプの浮上が進むに連れて, パイプ底部近傍からパイプ側方に向かって徐々に砂地盤が流動化し ($t/T=0.0\sim 8.0$), 砂地盤表層に流動化が及ぶ様子 ($t/T=8.0\sim 20.0$) が, 着色砂要素の移動状況から理解できる。また, パイプ側方の砂要素がパイプ底部に潜り込む過程や, 砂地盤表層の砂要素がパイプ浮上によって生じたパイプと砂地盤の隙間に崩れ落ちる過程(図中の矢印に注目)も確認され, 本シミュレーションの砂要素の流動過程の傾向は, 実験と概ね対応していると言えるだろう。

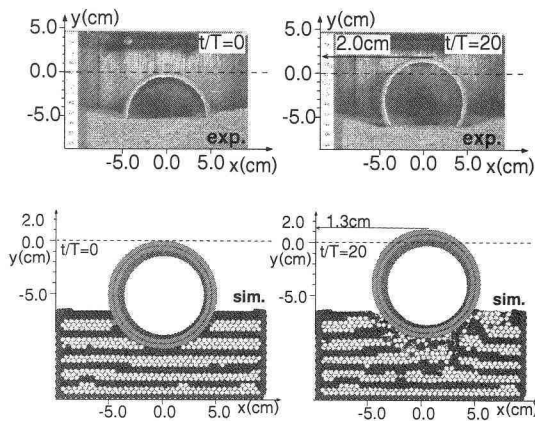


図-10 実験 vs シミュレーション

(3) パイプ浮上過程

パイプの浮上量を明確にするため、図-10に実験とシミュレーションの初期 ($t/T=0.0$) および最終 ($t/T=20.0$) の画像およびスナップショットを併示する。シミュレーションでのパイプの浮上量が実験と比較して小さい。これは、シミュレーションで設定した砂要素径が実際の砂粒子径と比較して大きく、砂地盤の安息角が大きくなるので、砂要素粒子が潜り込み難いためであると考えられる。この改善策として砂要素径を小さくすることが容易に考えられるが、計算機能力および計算時間の制約から設定可能な砂要素径に制限があり、現時点では要素径をここで設定した程度に大きくせざるを得ない。

図-11にパイプ浮上量の時系列を示す。初期に速やかに立ち上がった後に定常状態に移行する浮上量の実験結果がシミュレーションによって少なくとも定性的には再現されている。

5. 結 語

本研究では、波浪による液状化に起因する砂地盤の支持力低下と流動化がもたらす地盤埋設パイプラインの浮

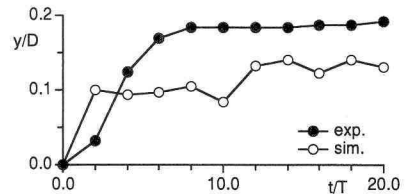


図-11 パイプ浮上量の時系列

上過程を、耐圧式砂層水槽による作用水圧の周期的変動下における水理実験と、3次元個別要素法に基づいた粒状体モデルを用いた数値シミュレーションによって検討した。シミュレーションでは、砂要素径が実際の砂粒子径と比較して大きいため、定量的な面では実験の再現に不十分な点があったが、パイプ浮上過程の砂地盤の挙動に関しては少なくとも定性的には実験と良好な一致が確認できた。今後は、地盤内間隙水圧モデルの詳細化と変動流体力の表現に関して混相流モデルの導入を視野に入れて、シミュレーションモデルの改良を検討したい。

参 考 文 献

- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2001): 個別要素法に基づく移動床シミュレーターのモデル定数の最適化, 土木学会論文集, No. 691/II-57, pp. 159-164.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2002): 三次元個別要素法による数値移動床の一般化, 水工学論文集, 第46巻, pp. 613-618.
- 酒井哲郎・後藤仁志・森川 淳 (1994): 海底面における排水条件の非一様性が地盤内間隙水圧分布に与える影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 911-915.
- 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特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 796-800.
- 前野詩朗・猿木広一郎・星山知恵 (1998): 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, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 906-910.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka (1998): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 26, pp. 751-769.