

# 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

前野 詩朗\*・Waldemar Magda\*\*・名合 宏之\*\*\*

## 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るようになってきている。これらの海域に設置されるパイプラインのうち、とくに、沿岸の浅海域(水深にして約 60 m 以下)では、漁網や船のアンカー等によるパイプラインの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 Mazurkiewicz, 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。

海底砂地盤上に高波浪による変動水圧が作用すると、地盤上に作用する変動水圧が地盤内に振幅の減衰と位相の遅れを伴って伝播することが明らかにされている (大草他, 1976; 名合, 1982; 善他, 1987)。また、著者らは、このような波浪場に設置される海岸構造物の動的挙動に関する具体的な問題として、海岸ブロックが変動水圧の影響により徐々に沈下する現象を実験的に明らかにしている (名合・前野他, 1990, 1991, 1993, 1994)。これらの研究成果を踏まえ、本研究では、波-地盤-構造物系の動的応答問題の一つとして海底埋設パイプラインの動的応答問題を取り上げる。すなわち、波により海底地盤上には周期的な変動水圧が作用し、海底地盤上に作用する変動水圧は地盤内に振幅減衰および位相の遅れを伴って伝播する。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力が作用する。このような変動流体力の作用により天然資源輸送用のパイプラインが浮上したりして崩壊すると、壊滅的な環境破壊を引き起こすのみなら

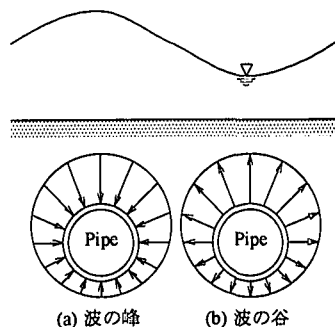


図-1 変動流体力の発生機構

ず、その復旧に莫大な費用と労力を要し。しかも、失われた自然環境の復元には相当な年月を要することになる。したがって、海底埋設パイプラインには非常に高い安全性が要求されており、波による埋設パイプラインの動的挙動を究明することは重要な課題である。

以上のような背景のもと、波による海底パイプラインの動的応答問題を取り扱った研究が進められてきている。すなわち、MacPherson (1978), Monkmeyer et al. (1983) や Lennon (1985) らは、海底埋設パイプライン周囲の間隙水圧を解析的に求めている。しかし、これらの研究は海底地盤や間隙水の圧縮性を無視し、地盤の挙動を表す基礎式がラプラスの式に帰するとして取り扱った研究であり、変動水圧場における地盤の動的挙動に大きな影響を与える因子である地盤や間隙水の圧縮性を考慮していないという点であまり実用的でないと考えられる。海底地盤を固液 2 相の圧縮性地盤として取り扱った研究としては、Bobby et al. (1979) や Cheng and Liu (1986) らが有限要素法や境界積分法を用いてパイプ周囲の間隙水圧を求めているが、限られた条件下での取り扱いに限られている。Magda (1996) は有限要素法を用いて広範な条件下で埋設パイプに作用する揚圧力を求めている。Monkmeyer et al. (1983) や Macdougall et al. (1988) らは、解析結果の妥当性を検討するためにパイプ周囲の間隙水圧分布を計測しているが、計測点が少なく、パイプに作用する変動流体力を実験的に示すまでには至っていない。

\* 正会員 工博 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科講師

\*\* Ph.D. Marine Civil Engineering Department, Technical University of Gdansk, Poland

\*\*\* 正会員 工博 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科教授

前にも述べたように海底埋設パイプラインには高い安全性が要求されているにも拘わらず、海底面下どの程度の深さにパイプラインを埋設すれば安全であるか等の技術的な指針についてはこれまでのところ示されていないが現状である。今後、海底埋設パイプラインを設置するための技術的な指針を確立するためには、波浪による変動流体力を考慮したパイプラインの動的な安定性を明らかにしておく必要がある。本研究では、変動水圧場におけるパイプライン周囲の圧力を計測し、間隙水圧変動に伴いパイプにどのような変動流体力が作用するのかを示すとともに、変動流体力の発生を防止するための一つの方策として、パイプ周辺砂層を透水係数の大きな砂で置き換える工法の効果についても検討するものである。

## 2. 実験方法

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。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 のアクリル製のパイプを土かぶり厚さが 5 cm となるように設置した。また、パイプは容器の前後の側面で固定している。砂層の設置方法は、試料容器に適量の水を張り、乾燥させた標準砂を所定の間隙率 0.4 になるように水中自由落下させ、その後バイブレーターを用いてできる限り均質に締め固めた。間隙水圧は、水中の Pt. 1 (試料容器側面) と図-3 に示すパイプ周囲の Pt. 2~Pt. 6 (パイプ奥行き方向の中央部) の合計 6 点で圧力変換器を用いて計測した。Pt. 2~Pt. 6 ではパイプ内に直接圧力変換器を設置することができなかったため、パイプ内の測点から硬質のシンフレックスチューブを試料容器の外まで配置し、これに間隙水を満たして圧力変換器に接続することにより間隙水圧を測定した。なお、シンフレックスチューブ内における圧力減衰が無視しうことは、試料容器に水を満たして実験を行った結果より、あらかじめ確かめられている。

実験条件は、表-1 に示す通りである。Case 1 から Case 4 は、試料容器に標準砂を満たした場合である。変動流体力特性を検討するために、Case 1 および Case 2 については、実験開始時と変動水圧 1000 分載荷後に間隙水圧測定を行った。また、Case 3 および Case 4 については、砂層形成後周波数を 0.5, 1.0, 2.0 Hz の 3 種類変化させて実験を行った。変動水圧振幅は 40 cm 程度としているが、実験装置の性能上、周波数が 0.5 Hz の時には振幅がやや小さくなり、周波数が 2.0 Hz のケースでは変動水圧振幅がやや大きくなった。Case 5 は、変動流体力の発生を防止するためにパイプ周辺砂層 (図-2 の破線で囲まれた部分) を透水係数の大きな砂層 ( $d = 2.83 \sim 3.36$

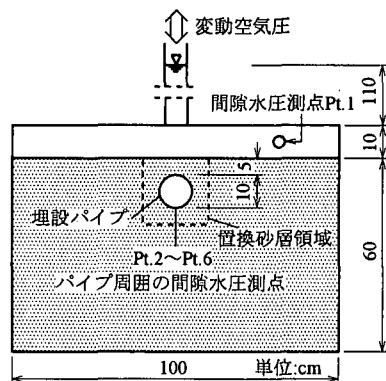


図-2 実験装置

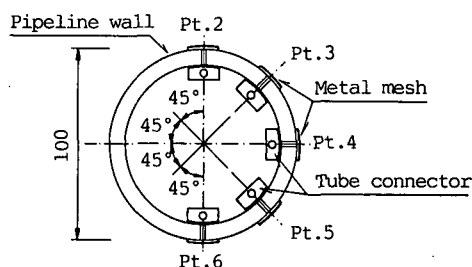


図-3 パイプ周囲の測点

表-1 実験条件

| Case | 周波数 (Hz) | 変動振幅 (cm) | 置換砂層 |
|------|----------|-----------|------|
| 1-S  | 1.0      | 40        | 無    |
| 1-E  | 1.0      | 39        | 無    |
| 2-S  | 0.5      | 37        | 無    |
| 2-E  | 0.5      | 39        | 無    |
| 3-1  | 0.5      | 32        | 無    |
| 3-2  | 1.0      | 38        | 無    |
| 3-3  | 2.0      | 59        | 無    |
| 4-1  | 0.5      | 35        | 無    |
| 4-2  | 1.0      | 39        | 無    |
| 4-3  | 2.0      | 59        | 無    |
| 5    | 1.0      | 38        | 有    |

注) 1-S, 2-S は実験開始時, 1-E, 2-E は 1000 分載荷後の計測

mm,  $k = 2.045$  cm/s) に置き換えた場合である。砂層間隙率はいずれの場合も約 0.4 である。なお、パイプに作用する変動流体力は、図-4 に示すように各測点で得られた変動間隙水圧を直線内挿し、パイプ周囲で積分することにより算出した。本研究では、実験装置の対称性を考慮して、次式により算出した。なお、 $\Delta\theta_i$  は 5 度とした。

$$F_z = 2 \sum p_i d l_i \cos \theta_i, \quad (0 < \theta_i < \pi),$$

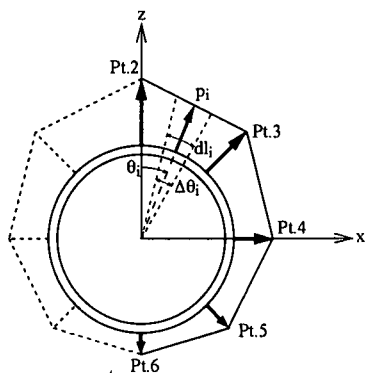


図-4 変動流体力算出説明図

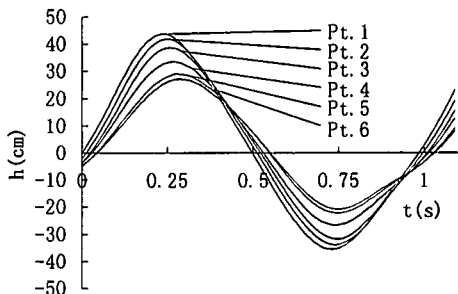
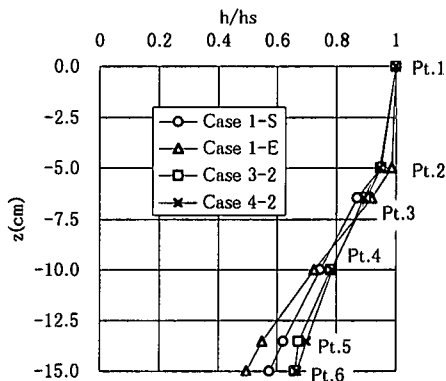
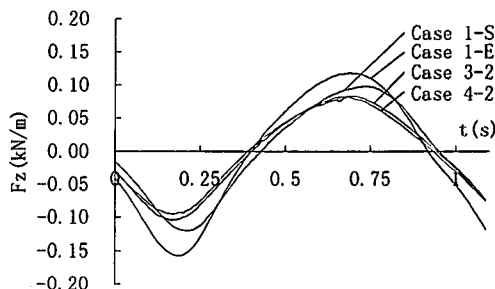
### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 変動間隙水圧および変動流体力特性

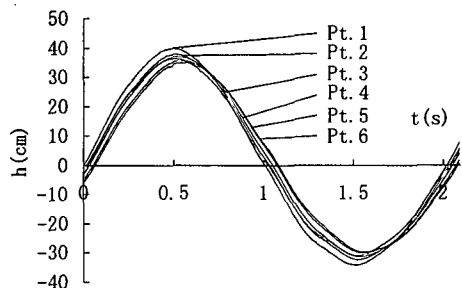
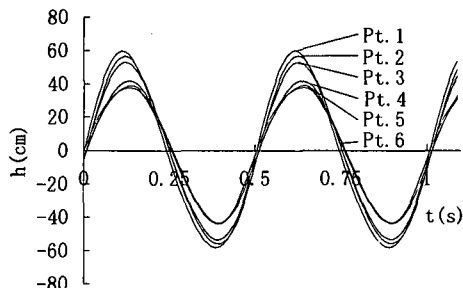
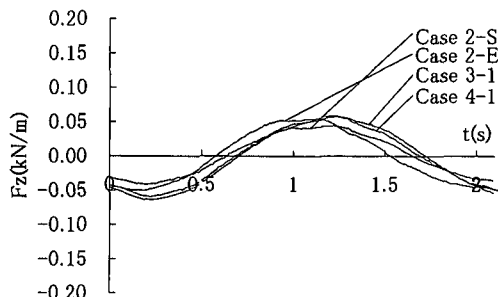
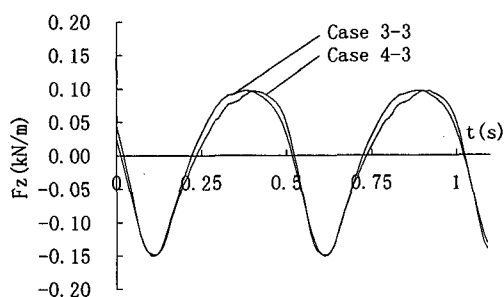
図-5 は Case 1-S の変動間隙水圧分布を示したものである。この図より、砂層面上に作用する水圧は振幅減衰および位相の遅れを伴ってパイプ周囲に伝播することがわかる。振幅減衰についてみると、Pt. 2~Pt. 3 および Pt. 5~Pt. 6 のそれぞれの測点間での振幅減衰よりも Pt. 3~Pt. 5 の測点間での減衰が大きいことがわかる。このことより、パイプ周囲の間隙水圧は、主に鉛直位置に依存していると考えられる。紙面の都合上掲載していないが、1000 分載荷後の変動間隙水圧分布は、振幅減衰が実験開始時よりもやや大きくなっていたが、その他の傾向は実験開始時とほぼ同様であった。

図-6 は砂層面上の変動水圧が正のピークの時の各測点の間隙水圧の振幅減衰率  $h/h_s$  ( $h$ : 間隙水圧水頭,  $h_s$ : 砂層面上の変動水圧水頭) を示したものである。Case 1-S 以外の周波数 1 Hz の実験結果も併せて示している。この図より、砂層面からパイプ上面の Pt. 2 までの振幅減衰よりも、Pt. 2~Pt. 6 までの振幅減衰の方が減衰率の勾配が大きいことがわかる。このことより、パイプの存在により間隙水圧の伝播が妨げられ、パイプがない状態よりも振幅減衰が大きくなっていることがわかる。MacPherson (1978) や Magda (1996) らは理論解析により、パイプの存在により水圧伝播形態が変化し、パイプがない場合に比べて、パイプ上面では水圧が伝わり易くなり、逆にパイプ下面では水圧が伝わり難くなることを示している。このことは、パイプ周囲での振幅減衰は、パイプがない場合よりも大きくなることを意味しており、本実験結果と一致する。

図-7 はパイプに作用する変動流体力を示したものである。この図より、パイプには周期的な変動流体力が作用し、砂層面上の変動水圧が上昇した時にパイプには下向きの力が作用し、逆に、下降したときに上向きの力が

図-5 パイプ周囲の変動間隙水圧 (Case 1-S,  $f=1.0$  Hz)図-6 振幅減衰率 (Case 1-S,  $f=1.0$  Hz)図-7 パイプに作用する変動流体力 ( $f=1.0$  Hz)

作用することがわかる。Case 1-E の実験終了時の変動流体力は他のケースよりもやや大きくなっている。これは、長時間載荷したため、パイプ周囲の砂層の状況が変化したためと考えられる。実験ケースにより若干のばらつきはあるものの、変動流体力の振幅は 0.1 (kN/m) 程度のオーダーであることがわかる。仮に、実物の鉄パイプのサイズが直径 1 m で肉厚 2 cm であるものとして、パイプが油で満たされている状況を想定して 1/10 縮尺模型を考えると、模型の自重は 0.11 (kN/m) となる。本実験で得られた変動流体力の振幅はパイプの自重より若干小さいオーダーの振幅となり、パイプにはかなり大きな

図-8 パイプ周囲の変動間隙水圧 (Case 2-S,  $f=0.5$  Hz)図-10 パイプ周囲の変動間隙水圧 (Case 3-3,  $f=2.0$  Hz)図-9 パイプに作用する変動流体力 ( $f=0.5$  Hz)図-11 パイプに作用する変動流体力 ( $f=2.0$  Hz)

変動流体力が作用することがわかる。

### 3.2 変動流体力に与える周波数の影響

図-8 および図-10 は変動水圧周波数が 0.5 Hz (Case 2-S) および 2.0 Hz (Case 3-3) の場合の変動間隙水圧を示している。また、図-9 および図-11 は、それぞれの周波数に対する変動流体力を示している。これらの図より、以下のことがわかる。

周波数 0.5 Hz についてみると、周波数が小さくなったことにより変動間隙水圧の振幅減衰および位相の遅れともに小さくなることがわかる。また、それに伴って変動流体力も小さくなっている。変動流体力の振幅の大きさは、周波数 1.0 Hz の半分程度である。

周波数 2.0 Hz の場合には、周波数が大きくなることにより振幅減衰量は大きくなることがわかる。変動流体力をみると、下向きの変動流体力の振幅は周波数 1.0 Hz の場合よりも大きくなっているが、上向きの変動流体力は周波数 1.0 Hz の場合とほぼ同程度であることがわかる。また、上向きの変動流体力の波形は扁平な形状を示しており、変動水圧による砂層表面付近の応力変化（現時点では明らかではないが、砂層表面近傍の液状化などが原因ではないかと考えられる）が何らかの影響を及ぼしていると考えられる。

### 3.3 置換法の効果の検討

図-12 はパイプ周辺砂層を透水係数の大きな砂層で置き換えた場合の変動間隙水圧および変動流体力を示し

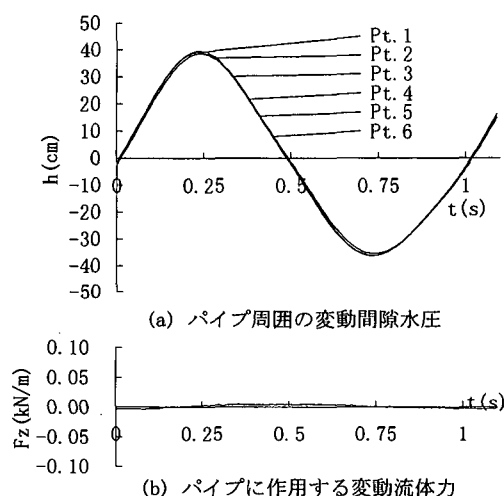


図-12 変動間隙水圧および変動流体力 (Case 5)

ている。この図より、パイプ周囲の変動間隙水圧は振幅減衰および位相の遅れとも殆ど発生しなくなり、変動流体力も殆ど発生しなくなることがわかる。このことより、置換法の効果は非常に大きいことがわかる。

## 4. 結 論

本研究は、波浪下における海底埋設パイプラインに作用する変動間隙水圧特性並びに変動流体力特性を実験的

に検討した。得られた主要な結論は以下のようである。

(1) 砂層面上に作用する水圧は振幅減衰および位相の遅れを伴ってパイプ周囲に伝播し、それに伴って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った。

(2) 周波数が小さくなると変動流体力は小さくなり、逆に周波数が大きくなると変動流体力は大きくなる。ことがわかった。しかし、上向きの変動流体力には限界値が存在し、周波数がある程度以上大きくなると変動流体力はそれ以上大きくならないようである。

(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変動流体力防止法の効果は非常に大きいことが明らかにされた。

以上の研究により、パイプに作用する変動流体力の基本的な特性が明らかにされたが、パイプは側壁に固定された特殊な条件であった。今後は、移動可能なパイプを用いて実際にパイプがどのような挙動を示すのかについて検討していく予定である。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費基盤研究(C) No. 08650609 (代表者：前野詩朗) およびウエスコ土木技術振興基金 (代表者：前野詩朗) の補助を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表する。また、本研究を遂行するにあたり、実験および資料整理に協力された岡山大学里本公明技官、岡山大学大学院生川浪祐介君並びに猿木広一郎君に謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 大草重康・中村隆昭・内田篤志 (1976): 波による海底地盤中の間隙水圧の変化, 第11回土質工学研究発表会, pp. 781-784.
- 普 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液化化および高密度化, 港湾技術研究所報告第26巻, 第4号, pp. 125-180.
- 名合宏之 (1982): 変動水圧による砂層の液化化に関する研究, 第26回水理講演会論文集, pp. 589-594.
- 名合宏之・前野詩朗・佐々原秀史・西岡 操 (1990): 海岸ブロックの沈下防止法に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 229-234.
- 名合宏之・前野詩朗・西岡 操 (1991): 変動水圧による構造物の沈下機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 826-830.
- 名合宏之・前野詩朗・清水雄一 (1993): 変動水圧によるブロックの沈下にとりまう周辺砂地盤の流動の可視化, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 516-520.
- 名合宏之・前野詩朗・清水雄一・山本哲雄 (1994): 変動水圧場におけるブロックの沈下防止に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 601-605.
- Bobby, W., Arockiasamy, M., Haldar, A. K. and Reddy, D. V., (1979): Finite element analysis of pipe-soil-wave interaction, Proc. of the 2nd International Conference on Behavior of Off-Shore Structures (BOSS'79), pp. 503-506.
- Cheng A. H-D. and Liu, P. L-F., (1986): Seepage force on a pipeline buried in a poroelastic seabed under wave loadings, Appl. Ocean Res., Vol. 8, No. 1, pp. 22-32.
- 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.
- Lennon, G. P. (1985): Wave-induced forces on buried pipelines, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 511-524.
- MacPherson, H. (1978): Wave forces on pipeline buried in permeable seabed, J. Waterway Port Coast. Ocean Eng., ASCE, Vol. 104, No. WW 4, pp. 704-419.
- Magda, W. (1996): Wave-induced uplift force acting on a submarine buried pipeline. Finite element formulation and verification of computations. Computers and Geotechnics, Vol. 19, No. 1, pp. 47-73.
- McDougal, W. G. and Monkmeyer, P. L. (1988): Wave-induced forces on buried pipelines, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 114, No. 2, pp. 220-230.
- Monkmeyer, P. L., Mantovani, P. d Vincent, H. (1983): Wave-induced seepage effects on a buried pipeline. Proc. of the Coastal Structures '83 Conference, pp. 519-531.