

暴風時における海底パイプラインの 耐波安定性評価に関する一考察

CONSIDERATION OF UNBURIED OFFSHORE PIPELINE STABILITY UNDER SEVERE STORM CONDITION

高谷 富也¹
Tomiya TAKATANI

¹正会員 学博 舞鶴工業高等専門学校教授 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

The purpose of this paper is to estimate the stability of an unburied offshore pipeline under severe storm condition. Pore pressure accumulation and pipeline movement during cyclic loading on pipeline are numerically investigated from the view points of the stiffness of seabed and the fine grained soil content in seabed. Both drag and lift forces are numerically obtained for 100 years return period storm condition using the Fourier decomposition method. Pipeline movement strongly depends on the seabed characteristics as well as the cyclic loadings estimated from storm condition. When the stiffness of seabed and the fine grained soil content are large, not only the pipeline movement but also the pore pressure response in seabed beneath the pipeline increases with the number of cycles.

Key Words : Unburied offshore pipeline stability, cyclic loading, Fourier decomposition method, pipeline movement, pore water pressure accumulation, stress-strain paths

1. はじめに

日本近海における天然ガスや石油などの海洋資源の利用を考えた場合、天候や経済性の面から海底パイプラインによる輸送形態が望ましい。この場合、海底に設置されるパイプラインの耐波・耐震安全性の評価が設計を行う上で非常に重要な課題と言える。海底に設置されたパイプラインが台風などの暴風雨時における波浪や潮流などの影響を受ける場合、パイプラインには繰り返しの抗力や揚力が作用する。この繰り返し荷重のもとで、パイプラインは沈下や水平に移動する。この場合、海底地盤の条件によっては、パイプライン周辺地盤に間隙水圧の上昇あるいは蓄積が生じ、地盤剛性の低下をもたらす¹⁾。そこで、筆者はパイプラインの遠心力模型載荷実験²⁾に基づいて、既に繰り返し水平載荷を受けるパイプラインの変位挙動およびその周辺地盤の応力-ひずみ関係や間隙水圧応答を求めてきている³⁾⁻⁹⁾。

これまでの研究成果を踏まえて、本研究は輸送流体の自重の影響が少ない天然ガスの海底パイプラインに作用する暴風雨時の波浪や潮流による抗力や揚力を算定し、繰り返し荷重下でのパイプラインの耐波安定性評価を行うことを目的としている。

本研究では、水深60mにおける直径1mの海底パイプラインを想定し、100年の再現期間を有する暴風雨時における波浪として最大有義波高13.2m、周期13.5sの規則

波とした。Sorensenら¹⁰⁾の手法を用いて、これらの条件下においてパイプライン周辺の流速を評価することで海底パイプラインに作用する抗力や揚力を算定している。これらの繰り返し荷重に対して、有効応力に基づいたパイプライン-地盤系の動的応答解析では、パイプラインの初期埋設深さを考慮してパイプラインに揚力として鉛直荷重を載荷した状態で繰り返し水平荷重となる抗力を与えて、パイプラインの移動量、地盤の変形、応力、ひずみおよび間隙水圧を求めている。また、海底地盤条件の違いがパイプラインや地盤の応答特性に及ぼす影響について検討する。

2. 解析方法

本研究では、土の応力-ひずみの非線形関係¹¹⁾を考慮した有効応力に基づいたパイプライン-地盤系の液状化解析¹²⁾を行い、暴風雨時における波浪や潮流による繰り返し載荷を受けるパイプラインの移動挙動、その周辺地盤内部の応力・ひずみの応答履歴および間隙水圧応答を求める。この応答解析を通じて、パイプラインの移動量、周辺地盤内部の応力、ひずみおよび間隙水圧応答に及ぼす地盤特性の影響を調べる。

図-1に示すように、パイプライン-地盤系の動的応答解析では、パイプライン周辺の流速より求められた揚力を鉛直荷重 V として、また抗力を水平荷重 H として

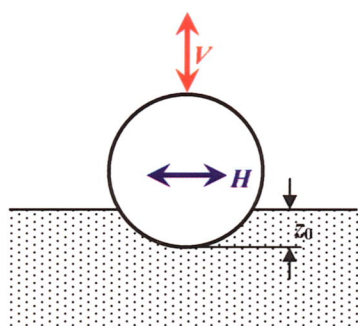


図-1 パイプラインの载荷状態

与えることにより、パイプラインの移動量、地盤の変形、応力、ひずみおよび間隙水圧を求める。なお、地盤は砂質地盤とし、地盤特性の影響を調べるために N 値および細粒分含有率 F_c の観点より、パイプラインおよびその周辺地盤の動的応答解析を行っている。 N 値は地盤の初期せん断剛性や体積弾性係数に大きく関係し、細粒分含有率 F_c は過剰間隙水圧の発生の抑制に関与することになる。なお、地盤の力学的諸定数および液化化に関する解析パラメータ等の設定方法や詳細な説明は、紙面の都合上文献8)および13)に譲る。

図-2は、パイプラインの初期埋設深さ z_0 を0.25mとした場合における解析領域 $3.5\text{m} \times 10\text{m}$ の有限要素メッシュを示したものである。同図において、パイプライン直径 D は1mとし、パイプラインと地盤との接触面にはすべりを考慮してジョイント要素を配置している。これまでの研究成果^{5), 6)}を踏まえて、ジョイント要素の垂直方向接線剛性 K_n を $1.0 \times 10^6 \text{kN/m}$ 、せん断方向接線剛性 K_s を $1.0 \times 10^5 \text{kN/m}$ としている。

次に、本研究で用いた100年の再現期間を有する暴風雨時における最大有義波高13.2m、周期13.5sの規則波による海底パイプラインに作用する抗力や揚力の算定方法について述べる。

一般に、海底パイプラインに作用する抗力および揚力は、Morison Force Model, Peak Force Model, Wake ModelおよびFourier Force Model等によって求めることが

できる¹⁴⁾。本研究では、Sorensenら¹⁰⁾の手法を用いて、直径1mの海底パイプラインに作用する抗力および揚力を算定する。この算定手法は、規則波によりパイプラインに作用する荷重を次式に示すようにフーリエ級数で表示するものである¹⁴⁾。

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^N F_n \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (1)$$

ここに、 ω は規則波の周波数である。

一方、パイプラインに作用するフーリエ級数による荷重係数は、 $1/2\rho D U_{wave}^2$ で正規化された実験データを用いて次式によって計算される。

$$C_H(t) = \frac{F_D(t)}{1/2\rho D U_{wave}^2} = C_{H0} + \sum_{n=1}^9 C_{Hn} \cos(n\omega t - \phi_{Hn}) \quad (2)$$

$$C_V(t) = \frac{F_L(t)}{1/2\rho D U_{wave}^2} = C_{V0} + \sum_{n=1}^9 C_{Vn} \cos(n\omega t - \phi_{Vn}) \quad (3)$$

ここに、 ρ は流体密度、 U_{wave} は水平方向の最大速度振幅である。

上式に見られるフーリエの荷重係数(C_{Hn} , C_{Vn})および偏角(ϕ_{Hn} , ϕ_{Vn})は、フーリエ変換と最小自乗法によって決定され、 K_c (Keulegan-Carpenter Number)または α (Current Ratio)の関数として表される。ここに、 $K_c = U_{wave} T / D$ 、 $\alpha = U_{current} / U_{wave}$ 、 $U_{current}$ はパイプライン上における定常状態の潮流速度、 T は規則波の周期である。

3. 数値計算結果と考察

本研究では、図-2に示す水平および鉛直方向の繰り返し荷重 H および V として、図-3に示す抗力および揚力を用いて有効応力に基づいた海底パイプライン-地盤系の動的応答解析を行う。図-3に示すパイプラインに作用する抗力および揚力は、前節で述べたSorensenら¹⁰⁾の手法を用いて、水深60mにおける直径1mの海底パイプラインに対してパイプライン周辺の流速を評価することで得られたもので、JONSWAPスペクトル¹⁵⁾を基にしてLewisら¹⁶⁾が求めた100年の再現期間を有する暴風雨時

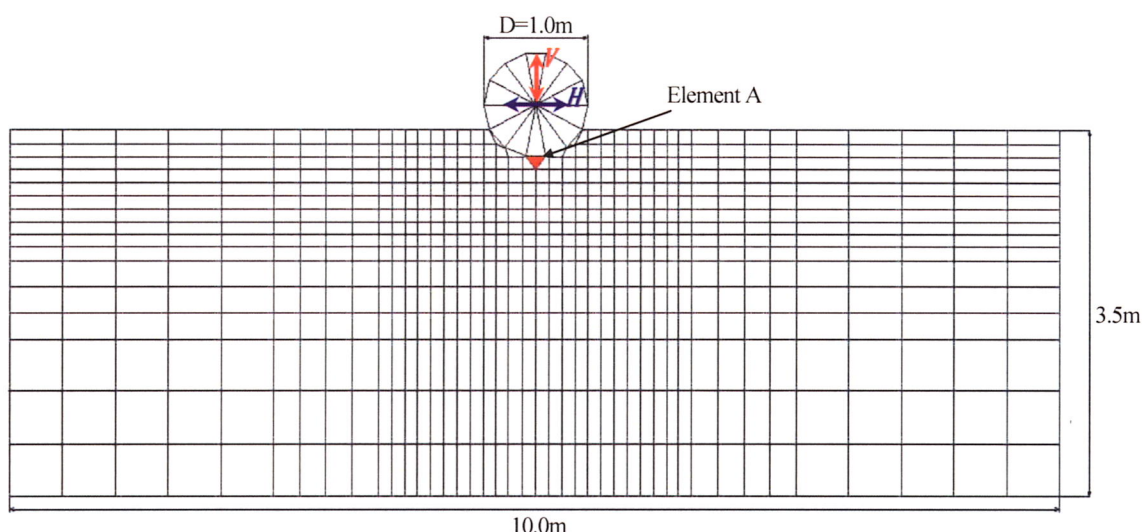


図-2 FEM解析メッシュ

表－１ 抗力・揚力の算定条件（規則波）

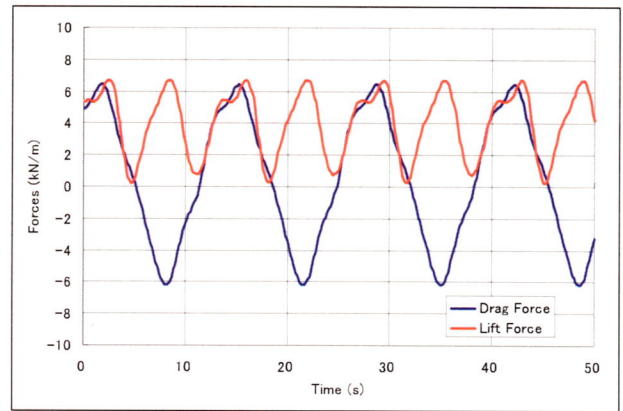
Maximum Wave Velocity, U_{wave} (m/s)	2.55
Steady Current Velocity, $U_{current}$ (m/s)	0.58
Wave Frequency (Hz)	0.47
Keulegan-Carpenter Number, K_c	34.34
Current Ratio, α	0.23

における波浪として最大有義波高13.2mおよび周期13.5sの規則波の条件としている。なお、表－１に抗力および揚力を算定した場合の条件を示しておく。図－３に示すパイプラインに作用する揚力については、パイプライン周辺の流速による揚力とパイプラインの自重との釣り合い関係によって約3kN/mほどプラス側にずれていることがわかる。

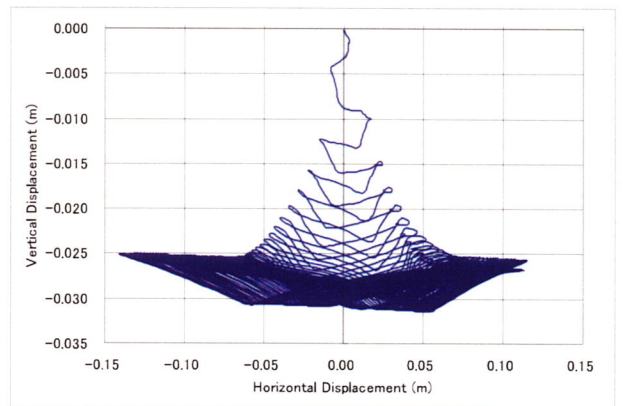
図－４は N 値(N_{65})=5および細粒分含有率 $F_c < 5\%$ の場合について、1000s間の繰り返し载荷中におけるパイプライン挙動を示したものである。この図より、地盤剛性と細粒分含有率が小さいため、図－４(a)に示すパイプラインの水平変位と鉛直変位関係においては、载荷後5回程度の繰り返しによりパイプラインの沈下はほぼ0.025mになっており、収束沈下量となる0.03mに近づいていることがわかる。図－４(b)に示す水平変位と水平荷重関係においては、繰り返し载荷回数が多くなるにつれて水平変位量が増加し、ある荷重－変位ループに収束する傾向を示しており、地盤剛性の低下が見られることがわかる。一方、図－４(c)に示す鉛直変位と鉛直荷重関係においては、10回程度の繰り返し载荷にてパイプラインは急激な沈下傾向を示しているが、その後の繰り返し载荷回数の増加とともに徐々に最終沈下量となる0.03mに近づいていることがわかる。

図－５は N 値(N_{65})=5および細粒分含有率 $F_c = 10\%$ の場合について、1000s間の繰り返し载荷中におけるパイプライン挙動を示したものである。図－４の場合に比べて N 値は同じであるが、細粒分含有率 F_c が大きくなっているため、図－５(a)に示すパイプラインの水平変位と鉛直変位関係においては、繰り返し载荷中におけるパイプラインの水平移動および沈下量が図－４に比べて小さな値となっていることがわかる。また、図－５(b)に示す水平変位と水平荷重関係では、図－４と同様に繰り返し载荷回数が多くなるにつれて水平変位量が増加し、ある荷重－変位ループに収束する傾向を示しており、地盤剛性の低下が見られることがわかる。一方、図－５(c)に示す鉛直変位と鉛直荷重関係においては、繰り返し载荷回数の増加とともに徐々にパイプラインは沈下し、ある荷重－変位ループに収束する傾向を示していることがわかる。

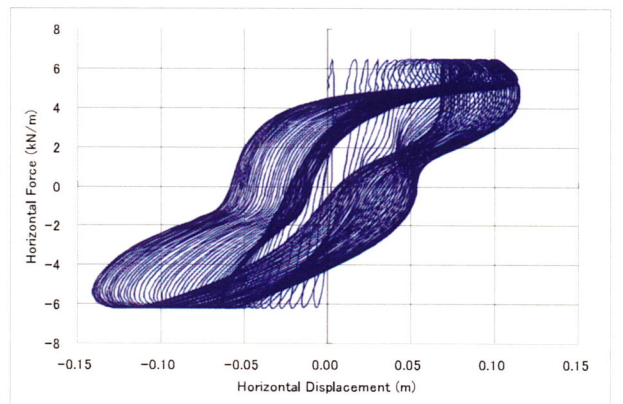
一方、図－６は N 値(N_{65})=10および細粒分含有率 $F_c < 5\%$ の場合について、1000s間の繰り返し载荷中におけるパイプライン挙動を示したものである。図－４の場合に比べて細粒分含有率 F_c は同じであるが、等価 N 値(N_{65})が大きくなっているため、図－６(a)に示すパイプラインの水平変位と鉛直変位関係においては、繰り返し



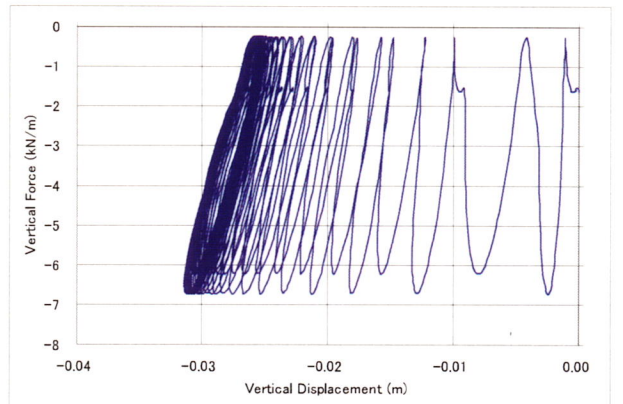
図－３ パイプラインの作用荷重



(a) 水平変位 Vs. 鉛直変位



(b) 水平変位 Vs. 水平荷重



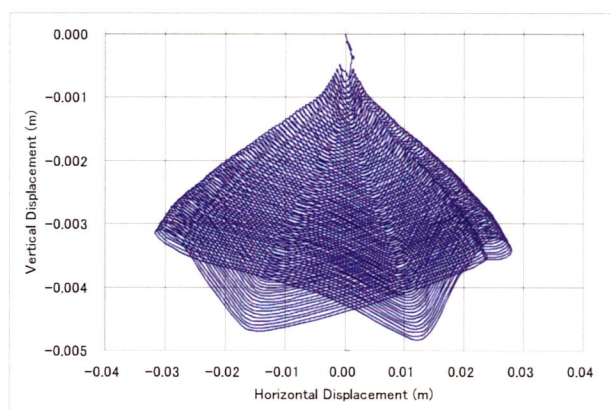
(c) 鉛直変位 Vs. 鉛直荷重

図－４ 繰り返し载荷中のパイプライン挙動
(1000s間, (N_{65})=5, $F_c < 5\%$)

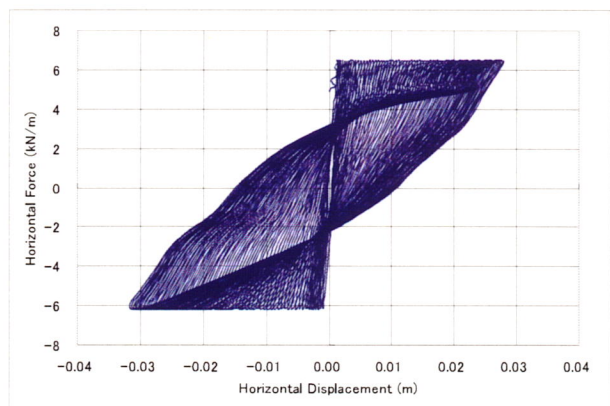
載荷中におけるパイプラインの水平移動および沈下量が図-4に比べて小さな値となっていることがわかる。また、図-5と図-6の比較より繰り返し載荷中におけるパイプラインの水平移動は小さくなるものの、パイプラインの沈下量はほぼ同じ値となっていることがわかる。

図-7は、 N 値(N_{65})=5および細粒分含有率 F_c =10%の場合について、図-2に示すパイプライン直下における地盤要素Aの1000s間の繰り返し載荷中の応力とひずみの履歴応答および間隙水圧応答を示したものである。応力-ひずみ履歴応答において、繰り返し載荷回数が多くなると、せん断応力が低下しせん断ひずみが大きくなっている。また、繰り返し載荷回数とともに平均有

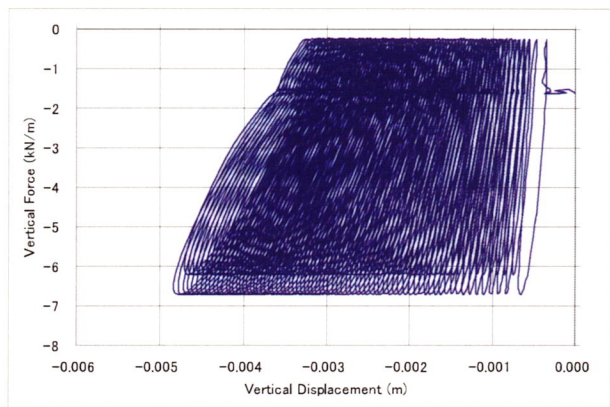
効応力は小さく、せん断ひずみは大きくなっており、液状化の傾向を示していることがわかる。一方、間隙水圧応答については、繰り返し載荷回数とともに徐々に間隙水圧の蓄積が行われ間隙水圧応答が大きくなる傾向を示していることがわかる。このため、パイプラインの繰り返し移動による間隙水圧の上昇によりパイプライン直下の地盤においては地盤剛性の低下が見られるものと考えられる。なお、紙面の都合上図示していないが、図-7に比べて地盤剛性が小さい(N_{65} =5および F_c <5%)の場合における間隙水圧応答については、繰り返し載荷回数に関係なく間隙水圧応答はほぼ一定の値となっている。これは地盤剛性が小さいため、数回の繰り返し載荷回数で



(a) 水平変位 Vs. 鉛直変位

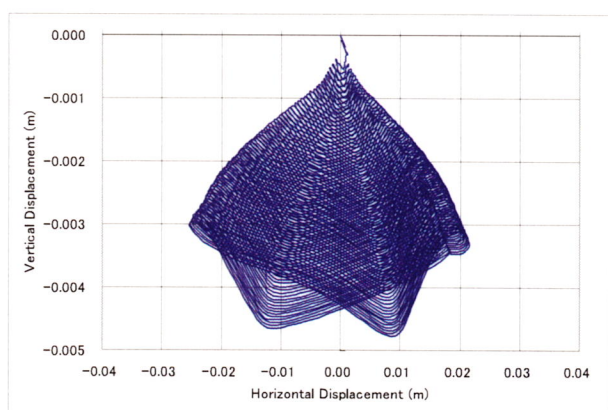


(b) 水平変位 Vs. 水平荷重

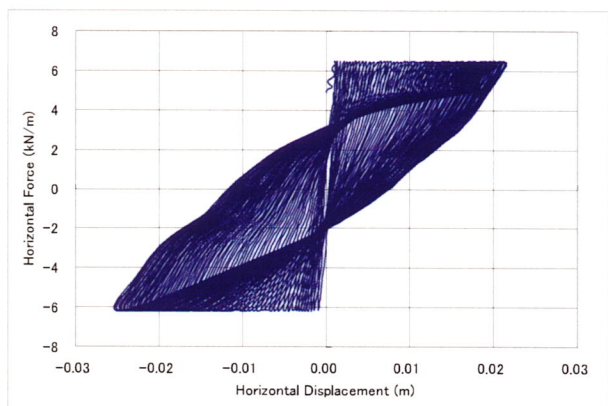


(c) 鉛直変位 Vs. 鉛直荷重

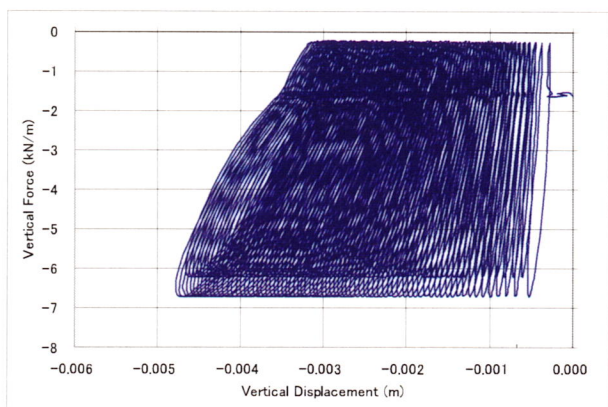
図-5 繰り返し載荷中のパイプライン挙動
(1000s間, (N_{65})=5, F_c =10%)



(a) 水平変位 Vs. 鉛直変位

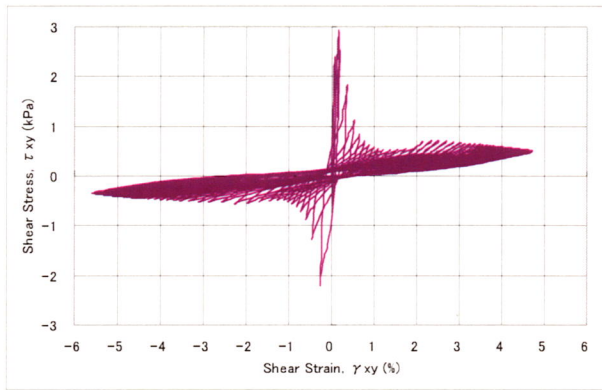


(b) 水平変位 Vs. 水平荷重

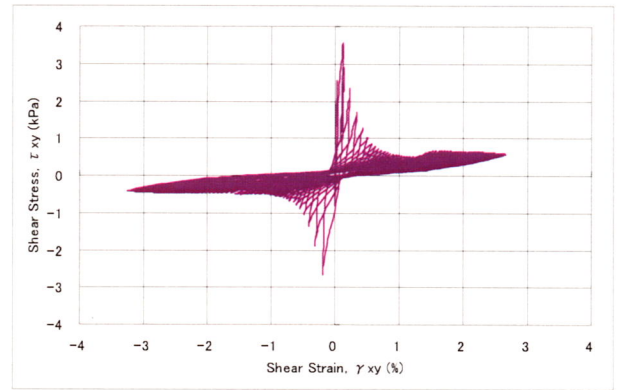


(c) 鉛直変位 Vs. 鉛直荷重

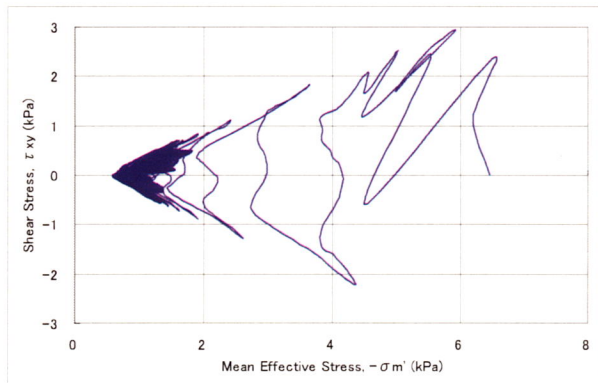
図-6 繰り返し載荷中のパイプライン挙動
(1000s間, (N_{65})=10, F_c <5%)



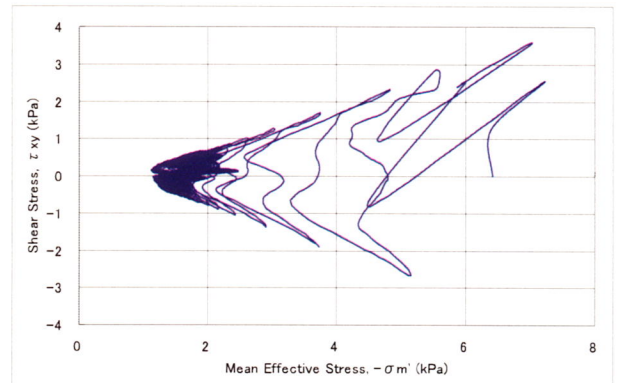
(a) せん断応力-せん断ひずみ



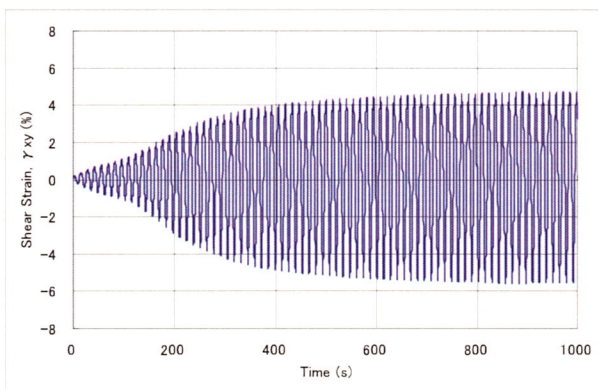
(a) せん断応力-せん断ひずみ



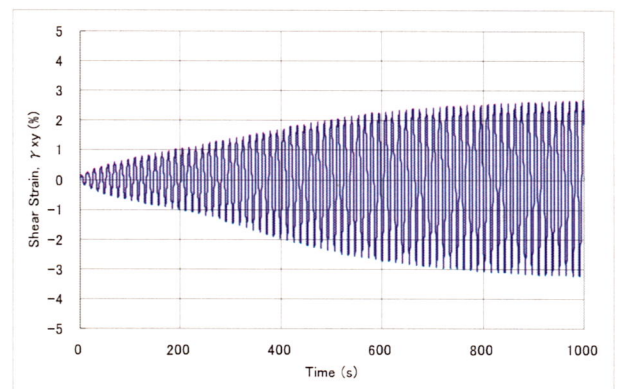
(b) せん断応力-平均有効応力



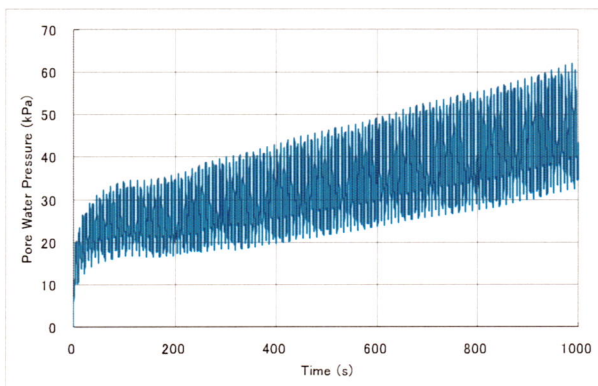
(b) せん断応力-平均有効応力



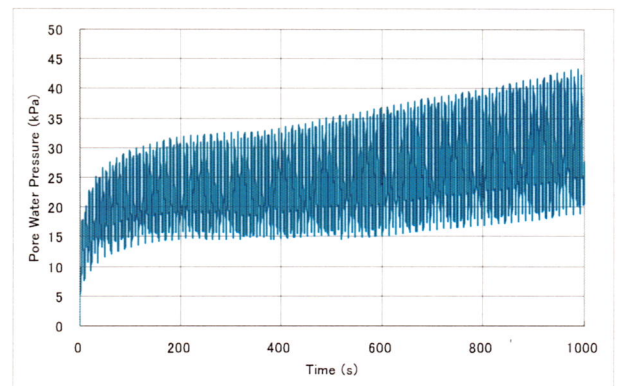
(c) せん断ひずみ



(c) せん断ひずみ



(d) 間隙水圧



(d) 間隙水圧

図-7 地盤内部の応力, ひずみ, 間隙水圧応答
(Element A, 1000s間, $(N)_{65}=5$, $F_c=10\%$)

図-8 地盤内部の応力, ひずみ, 間隙水圧応答
(Element A, 1000s間, $(N)_{65}=15$, $F_c<5\%$)

パイプラインの最終沈下量に収束するためと考えられる。

一方、図-7に比べて地盤剛性が大きい場合に対する地盤要素Aの1000s間の繰り返し载荷中の応力とひずみの履歴応答および間隙水圧応答を図-8に示す。なお、地盤条件は N 値(N_{65})=15および細粒分含有率 $F_c < 5\%$ としている。この図より、図-7に比べて地盤剛性が大きい場合、図-8(a)に見られるように繰り返し载荷回数とともに応力-ひずみ履歴応答はあるループに収束していることがわかる。また、図-8(c)に見られるようにせん断ひずみの増加率は繰り返し载荷回数にほぼ比例している。一方、図-8(d)に示す間隙水圧応答値は図-7に比べて小さな値となるものの、繰り返し载荷回数が多くなるとともに徐々に間隙水圧応答が大きくなる傾向を示すことがわかる。このことは、暴風雨時における繰り返し荷重が N 値や細粒分含有率 F_c が大きい地盤上に設置されたパイプラインに長時間作用した場合には、大きな沈下量や水平移動量となるとともに、間隙水圧が徐々に蓄積され、地盤剛性が低下することを示唆しているものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、海底パイプラインに作用する暴風雨時の波浪や潮流による抗力や揚力を算定し、繰り返し荷重下でのパイプラインの耐波安定性評価として、有効応力に基づいたパイプライン-地盤系の動的応答解析を行い、海底地盤条件の違いがパイプラインや地盤の応答特性に及ぼす影響についても検討したものである。本研究で得られた結果を以下に示しておく。

- 1) N 値および細粒分含有率 F_c が小さい地盤上に設置された海底パイプラインについては、パイプラインの沈下量および水平移動の振幅量は大きいものの、繰り返し回数が大きくなるにつれてある範囲内の値に収束し、その後の繰り返し荷重に対してはその範囲内での応答となる。また、パイプライン直下地盤内部のせん断ひずみや間隙水圧は一定の範囲内の値となる。
- 2) N 値や細粒分含有率 F_c が大きい地盤について、パイプラインの沈下や水平移動の振幅は次第に大きくなる傾向を示す。また、繰り返し回数が大きくなるにつれてパイプライン直下地盤の応力-ひずみ履歴応答はあるループに収束するが、間隙水圧は徐々に大きくなる傾向を示す。
- 3) 暴風雨時における繰り返し荷重が N 値や細粒分含有率 F_c が大きい地盤上に設置されたパイプラインに長時間作用した場合には、大きな沈下量や水平移動量となる。また、パイプライン直下地盤内部の応力-ひずみ履歴応答やせん断ひずみはある値に収束するが、間隙水圧は徐々に蓄積される傾向を示す。

謝辞：この研究の遂行に当たり、西オーストラリア大学 School of Oil and Gas EngineeringのDaniel Brooker博士によ

る資料、貴重なコメントや助言等を戴いたことを付記し、ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) PRCI : Submarine Pipeline On-Bottom Stability – Volume 1, Pipeline Research Council International Inc., 2002.
- 2) Zhang, J. and Randolph, M.F. : North West Shelf Trunkline System Expansion Project, Cyclic Loading of Pipelines - Centrifuge Modelling, GEO: 01257, The University of Western Australia, 2001.
- 3) 高谷富也, M.F. Randolph : 繰り返し水平载荷を受けるパイプライン直下地盤内の間隙水圧応答について, 海洋開発論文集, Vol.19, pp.505-510, 2003.
- 4) Takatani, T. and Randolph, M.F. : Experimental Study of Pore Pressure Build Up Due to Horizontal Cyclic Loading of Pipeline, Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.31-37, 2003.
- 5) 高谷富也, 小河史枝 : 繰り返し载荷を受けるパイプライン周辺地盤の間隙水圧応答について, 海洋開発論文集, Vol.20, pp.449-454, 2004.
- 6) Takatani, T. and Ogawa, F. : Pore Pressure Build Up Response Due to Horizontal Cyclic Loading of Pipeline, Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, S6C, 2004.
- 7) Takatani, T. : Pipeline-Seabed Interaction Analysis for Horizontal Cyclic Loading of Pipeline, Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Vol.2, pp.115-122, 2005.
- 8) 高谷富也 : 繰り返し载荷を受けるパイプライン挙動と地盤特性の関係について, 海洋開発論文集, Vol.21, pp.957-962, 2005.
- 9) Takatani, T. : Pipeline-Seabed Interaction Analysis Subjected to Horizontal Cyclic Loading, Proceedings of International Symposium on Frontiers in Offshore Geomechanics, Perth, pp.629-635, 2005.
- 10) Sorenson, T., Bryndum, M. B. and Jacobsen, V.: Hydrodynamic Forces on Pipelines – Model Tests, Pipeline Research Council International Inc., 1986.
- 11) Towhata, I. and Ishihara, K. : Modeling Soil Behavior Under Principal Stress Axes Rotation, Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, pp.523-530, 1985.
- 12) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 13) 森田年一, 井合 進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博 : 液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメータの簡易推定法, 港湾技術研究所資料, No.869, 1997.
- 14) Neill, I.A.R. and Hinwood, J.B. : Wave and Wave-Current Loading on a Bottom-Mounted Circular Cylinder, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.8, No.2, pp.122-129, 1998.
- 15) Hasselmann, K., Barneft, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olders, D.J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. : Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsche Hydr. Zeit., No.12, pp.9-95, 1973.
- 16) Lewis, A.W. and Allos, R.N. : JONSWAP's Parameters : Sorting Out the Inconsistencies, Journal of Ocean Engineering, Vol.17, No.4, pp.409-415, 1990.