

カーボネイト系地盤上に設置された 海底パイプラインの耐波安定性解析について

STABILITY ANALYSIS OF PIPELINE RESTING ON CALCAREOUS SOIL UNDER SEVERE STORM CONDITION

高谷富也¹・加舎孝典²

Tomiya TAKATANI and Takanori KAYA

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)

²非会員 舞鶴工業高等専門学校 建設・生産システム工学専攻 (〒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 resting on a calcareous sand under severe storm condition. Pore pressure accumulation and pipeline movement during cyclic loading of pipeline have been numerically investigated from a view point of a non-linear relationship between pipeline and seabed. Both drag and lift forces acting on the pipeline are evaluated for 100 years return period storm condition using the Fourier decomposition method. Pipeline movement during cyclic loading greatly depends on the stiffness of non-linear spring element, and pore water pressure response as well as shear strain are more sensitive to the initial unit tangential stiffness of non-linear spring element.

Key Words : *Unburied offshore pipeline stability, calcareous sand, cyclic loading, pipeline movement, pore water pressure response, non-linear spring element*

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安定性評価が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荷重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とで、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、筆者は繰り返し水平荷重を受けるパイプラインー地盤系の室内載荷実験や応答解析を通じて、パイプラインの変位挙動およびその周辺地盤の応力ーひずみ関係や間隙水圧応答を求めてきた^{2)~8)}。特に、パイプラインと地盤との滑りを考慮するために、ジョイント要素を用いて動的応答解析を行っており、ジョイント要素の剛性がパイプラインー地盤系の応答特性に大きく影響することを明らかにした。ところで、Barbosa-Cruzら⁹⁾はパイプの粘性土地盤への貫入抵抗の大変形FEM解析を通じて、パイプの支持力特性はパイプと地盤間の接触面の条件と地盤の強度特性の組合せに大きく依存することを示し、またVerleyら¹⁰⁾は室内実験に基づいてパイプラインに対する砂質地盤の非線形抵抗モデルを提案している。

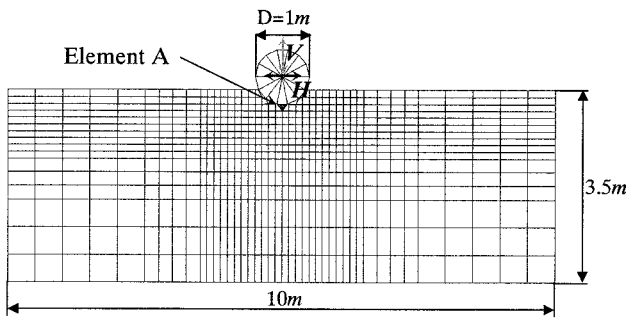
これまでの研究成果を踏まえて、本研究はカーボネイト系砂質地盤上に設置されたパイプラインが暴風時の波浪によって繰り返し荷重を受ける場合の耐波安定性評価を行うことを目的としている。

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波高 13.2m、周期 13.5s の規則波とした。また、Sorensen ら¹¹⁾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ー地盤系の動的応答解析¹²⁾では、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。また同時に、海底地盤とパイプラインの接触面に設置した非線形バネの荷重ー変形特性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

本研究ではパイプラインー地盤間の非線形抵抗関係を模擬する非線形バネを用いて、土の応力ーひずみの非線形関係を考慮したパイプラインー地盤系の動的応答解析を行う。

パイプラインー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



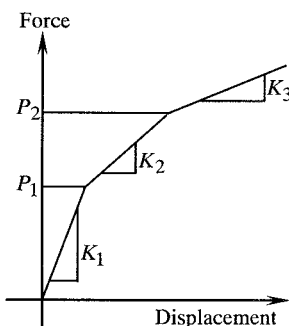
図－１ パイプライン－地盤系のFEMメッシュ

表－１ カーボネイト地盤の力学諸定数

Initial shear modulus, G_{ma} (kPa)	48,395	
Elastic tangent bulk modulus of soil skeleton, K_{ma} (kPa)	126,207	
Friction angle, ϕ_f (degree)	38.16	
Phase transformation line angle, ϕ_p (degree)	28	
Material parameters for dilatancy	S_1	0.005
	w_1	4.634
	c_1	1.548
	p_1	0.500
	p_2	1.037

V として、また抗力を水平荷重 H として与えることにより、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、海底地盤は世界に広く分布しているカーボネイト系砂質地盤とし、その力学的諸定数を表－１に示しておく。この表中の力学諸定数はカーボネイト系砂質地盤の液化化強度曲線¹³⁾を同定することにより得られたものである。

図－１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3.5m×10m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いる。本研究では、Verleyら¹⁰⁾が実験で求めたパイプラインと砂質地盤の非線形関係をモデル化するために、図－２に示す荷重－変位関係を有する非線形バネ要素を配置した。 K_1 、 K_2 および K_3 は第1、第2および第3接線剛性であり、本研究ではそれぞれ $K_1=1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 、 $K_2=1.0 \times 10^3 \text{ kN/m}$ および $K_3=1.0 \times 10 \text{ kN/m}$ を用いている。



図－２ 非線形バネの荷重－変位関係

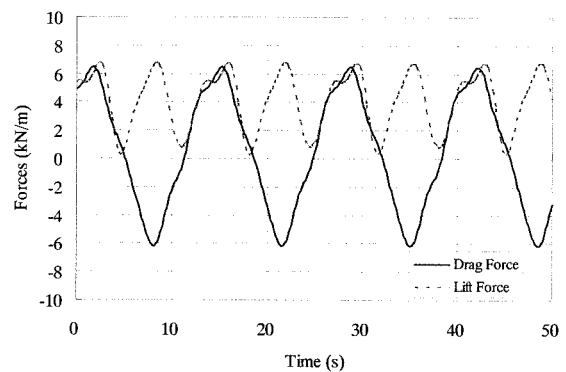
表－２ 非線形バネの荷重値組合せ

Case	Type	P_1 (kN)	P_2 (kN)
1	Bi-linear	1.0×10^{-3}	-
2	Bi-linear	1.0×10^{-1}	-
3	Tri-linear	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-1}
4	Tri-linear	1.0×10^{-1}	1.0×10^1

また、表－２は非線形バネをバイリニアおよびトリリニアに想定した場合の荷重値 P_1 と P_2 の組合せを示したものである。

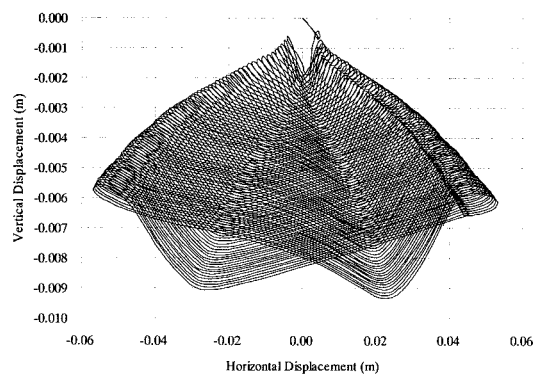
３．数値計算結果と考察

本研究では、図－１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。パイプラインに作用する抗力および揚力を示した図－３は、Sorensenら¹¹⁾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¹⁴⁾を基にしてLewisら¹⁵⁾が求めた100年の再現期間を有する暴風雨時における波浪として、最大波高13.2mおよび周期13.5sの規則波の条件を用いて算定している。また、図－３に示す揚力にはパイプラインの自重が考慮されたものとなっている。なお、こ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は紙面の都合上文献8)に譲る。

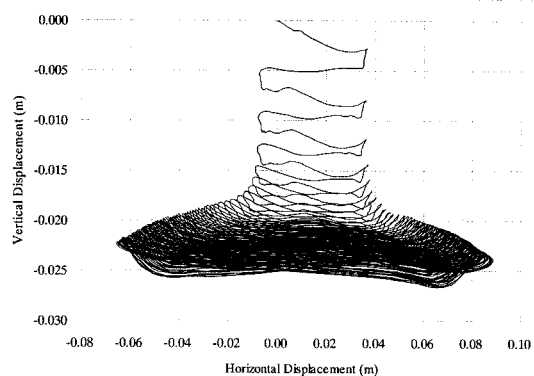


図－３ パイプラインの作用荷重

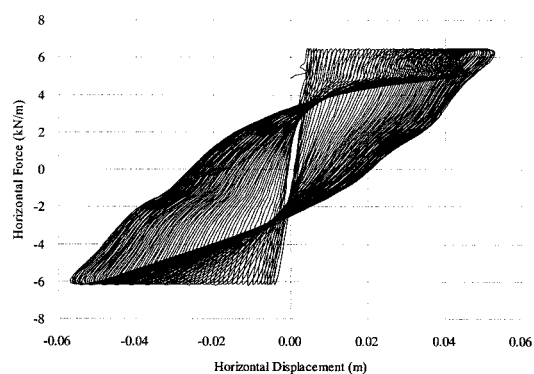
図－４および図－５は、パイプラインと地盤との接触面に設置した非線形バネをバイリニア型と想定した表－２に示すそれぞれCase 1およびCase 2の条件に対して求められた1,000s間の繰り返し载荷中のパイプラインの変位応答を示したものである。パイプラインは、1,000s間に約74回の繰り返し载荷を受けたことになる。これらの図より明らかなように、図－４に示されているバイリニア型の非線形バネの荷重－変位関係を規定する荷重値 P_1 が小さいCase 1におけるパイプラインの変位挙動は、荷重値 P_1 が



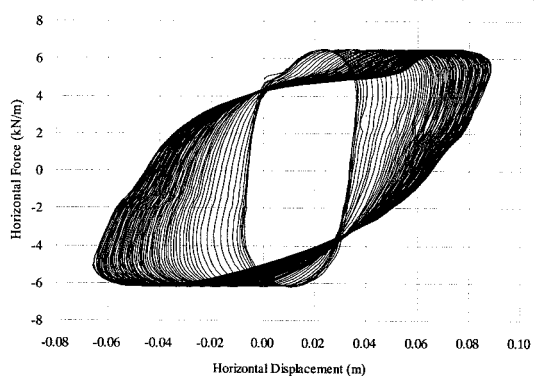
(a) 鉛直変位 vs. 水平変位



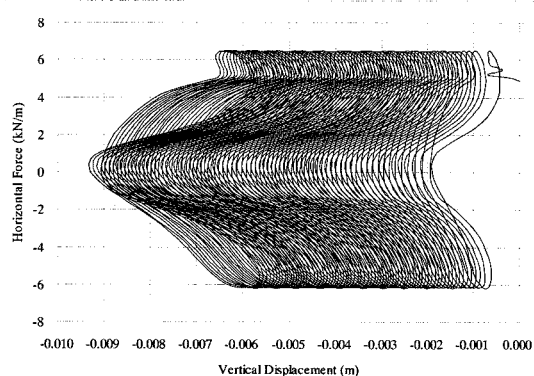
(a) 鉛直変位 vs. 水平変位



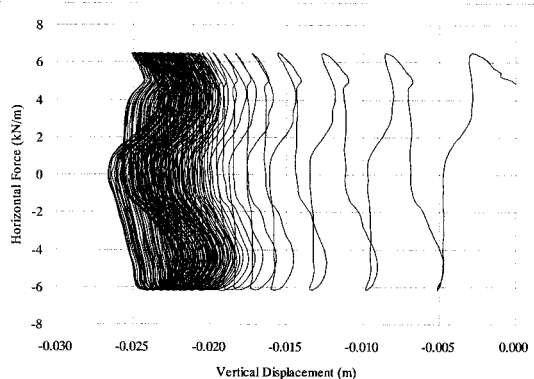
(b) 水平荷重 vs. 水平変位



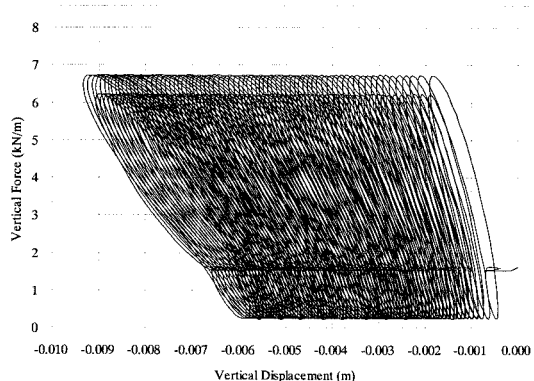
(b) 水平荷重 vs. 水平変位



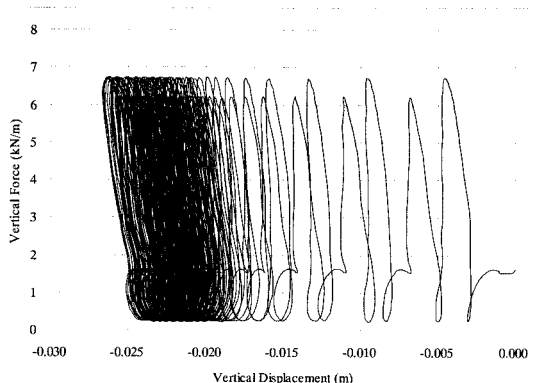
(c) 水平荷重 vs. 鉛直変位



(c) 水平荷重 vs. 鉛直変位



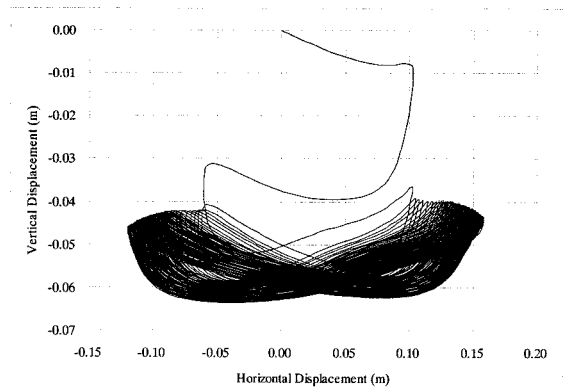
(d) 鉛直荷重 vs. 鉛直変位



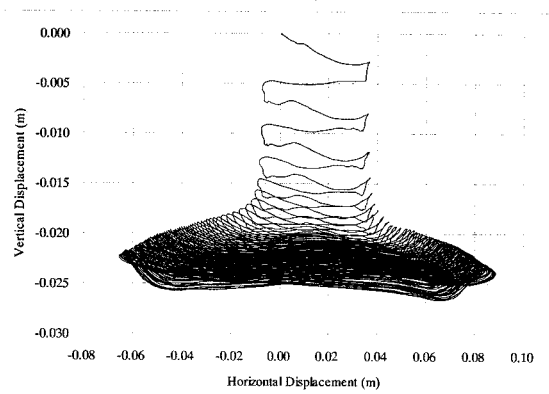
(d) 鉛直荷重 vs. 鉛直変位

図-4 繰り返し載荷中のパイプライン挙動 (1,000s, Case 1)

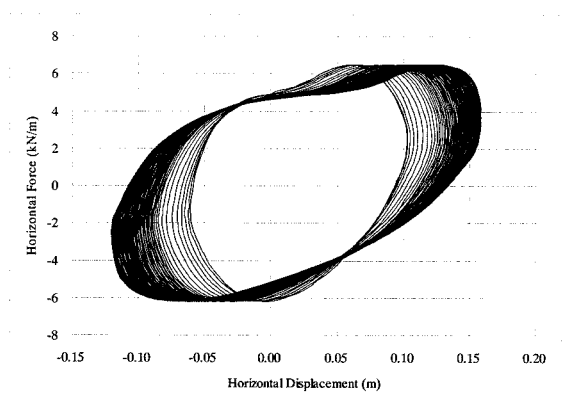
図-5 繰り返し載荷中のパイプライン挙動 (1,000s, Case 2)



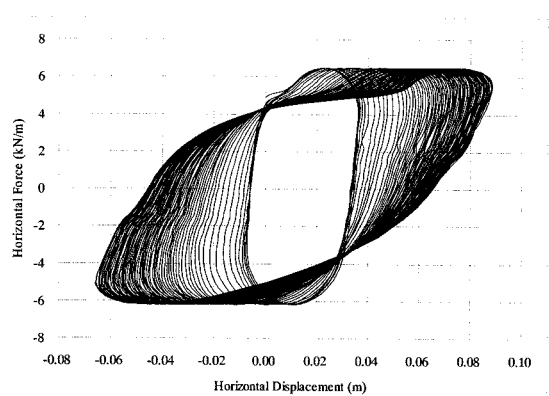
(a) 鉛直変位 vs. 水平変位



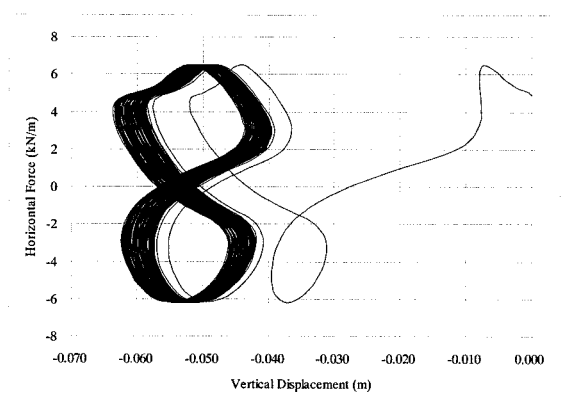
(a) 鉛直変位 vs. 水平変位



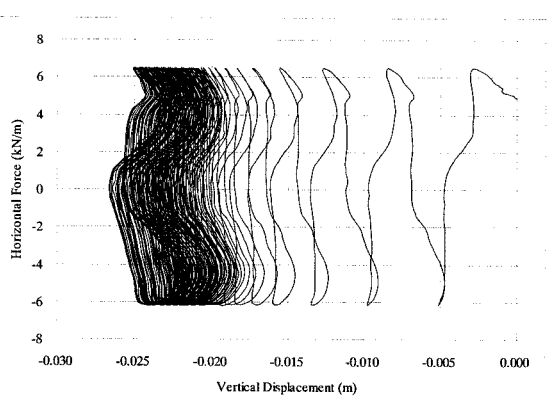
(b) 水平荷重 vs. 水平変位



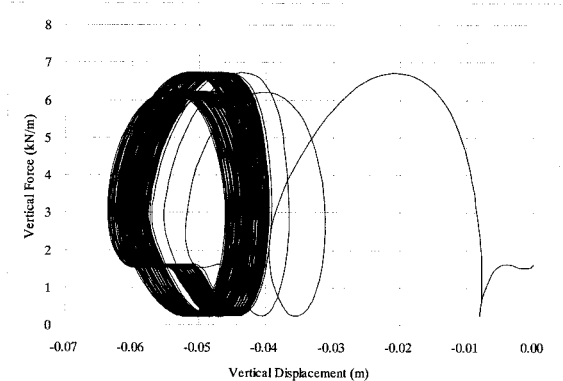
(b) 水平荷重 vs. 水平変位



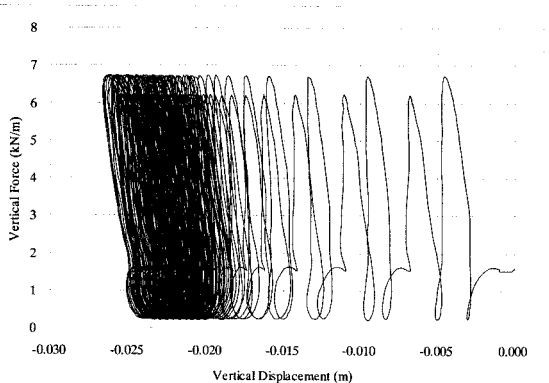
(c) 水平荷重 vs. 鉛直変位



(c) 水平荷重 vs. 鉛直変位



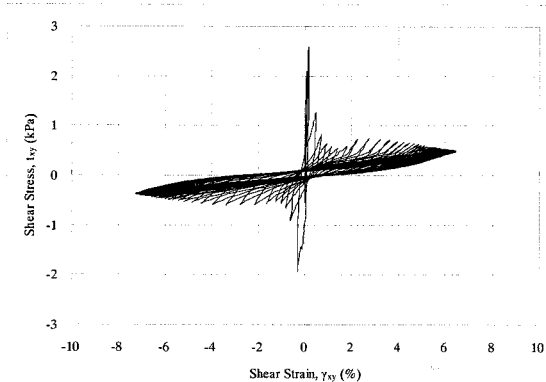
(d) 鉛直荷重 vs. 鉛直変位
図-6 繰り返し载荷中のパイプライン挙動 (1,000s, Case 3)



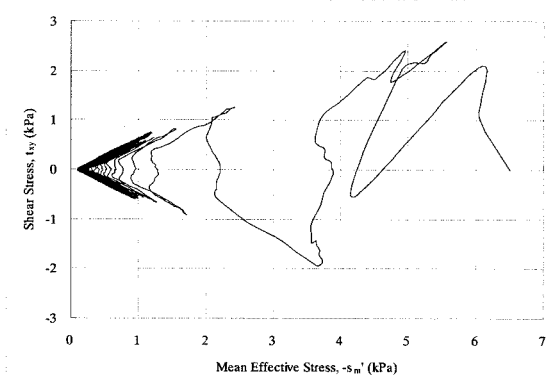
(d) 鉛直荷重 vs. 鉛直変位
図-7 繰り返し载荷中のパイプライン挙動 (1,000s, Case 4)

大きいCase 2に対する図-5の場合と比べて大きな違いが見られる。図-4の場合は、荷重値 P_1 が小

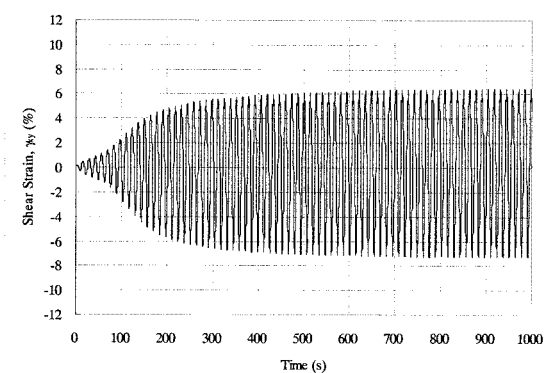
さいことにより図-2に示す第2接線剛性 K_2 の影響を大きく受けるため、1,000s間の繰り返し载荷中の



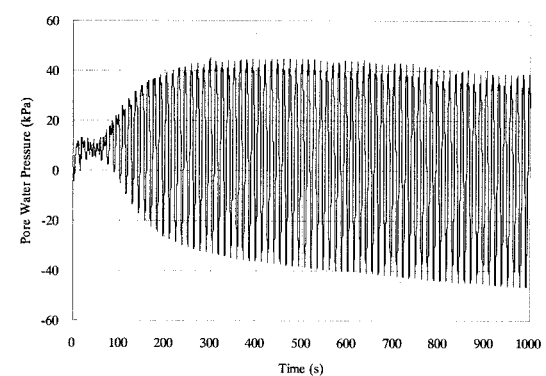
(a) せん断応力 vs. せん断ひずみ



(b) せん断応力 vs. 平均有効応力

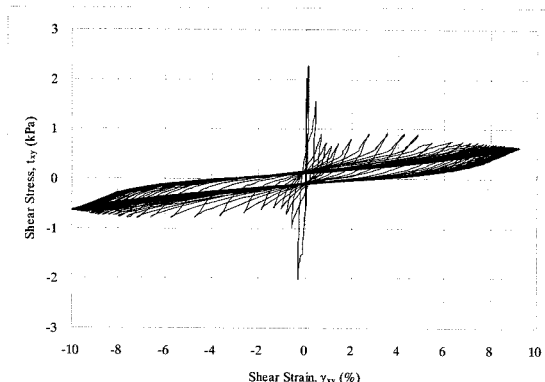


(c) せん断ひずみ応答

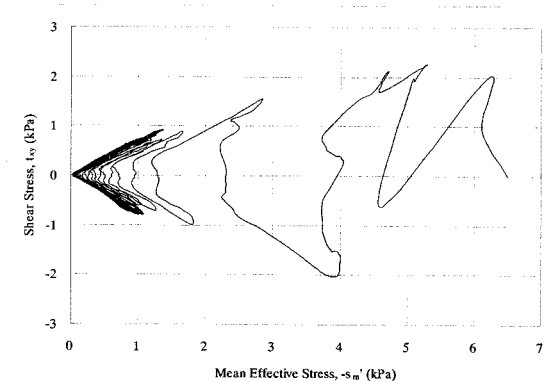


(d) 間隙水圧応答

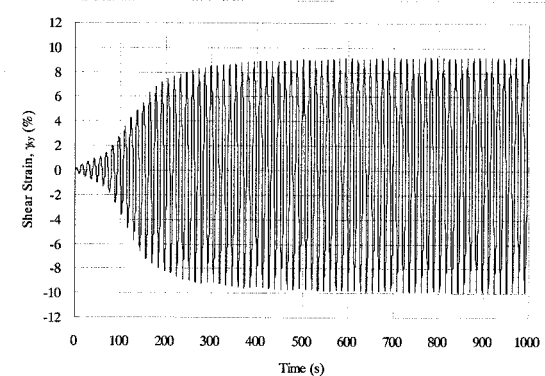
図-8 地盤内部の応力、ひずみ、間隙水圧応答 (1,000s, Element A, Case 2)



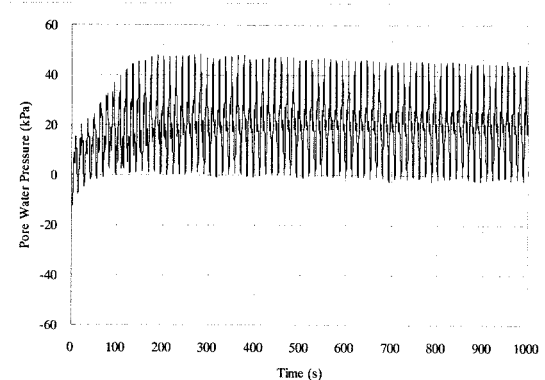
(a) せん断応力 vs. せん断ひずみ



(b) せん断応力 vs. 平均有効応力



(c) せん断ひずみ応答



(d) 間隙水圧応答

図-9 地盤内部の応力、ひずみ、間隙水圧応答 (1,000s, Element A, Case 4)

パイプラインの変位挙動は荷重ごとに変位が大きくなっており、収束する傾向がないことがわかる。一方、図-5の場合は荷重値 P_1 が大きいことにより第1接線剛性 K_1 の影響を受けるため、繰り返し荷重中のパイプライン挙動は繰り返し荷重回数が増えるにつれてある値に収束する傾向を示している。

図-6および図-7は、非線形バネをトリリニア型と想定した表-2に示すそれぞれ Case 3 および Case 4 の条件に対して求められた繰り返し荷重中のパイプラインの変位応答を示したものである。これらの図より、いずれの場合も繰り返し荷重中のパイプライン挙動は繰り返し荷重回数が増えるにつれてある荷重-変位関係の軌跡に収束する傾向を示していることがわかる。しかしながら、図-6の場合は、荷重値 P_1 が小さいことにより第2接線剛性 K_2 の影響を大きく受けるため、パイプラインの変位挙動は図-7の場合とは異なる荷重-変位の軌跡を描いていることがわかる。また、図-7の場合は荷重値 P_1 が大きいことにより第1接線剛性 K_1 の影響を受けるため、非線形バネをバイリニア型とした図-5の場合と同じ荷重-変位の軌跡となっているものと考えられる。これらのことより、図-2に示す荷重-変位関係を規定する荷重値 P_1 がパイプラインの変位挙動に大きく影響することがわかった。

図-8および図-9は、図-1に示すパイプライン直下の地盤要素である Element A の繰り返し荷重中の応力、ひずみおよび間隙水圧応答をそれぞれ Case 2 および Case 4 について示したものである。これらの図より、図-8は非線形バネの第2接線剛性 K_2 の影響を、また図-9は第3接線剛性 K_3 の影響を大きく受けるため、図-9に示すせん断ひずみは図-8に比べて大きくなっていることがわかる。一方、図-8(d)に示す繰り返し荷重に伴う間隙水圧応答の振幅は図-9に比べて大きなものとなっていることがわかる。これは、バイリニアおよびトリリニア型の非線形バネの力学特性を規定する接線剛性の影響を大きく受けたものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、カーボネイト系砂質地盤上に設置されたパイプラインが暴風時の波浪によって繰り返し荷重を受ける場合の耐波安定性評価を行ったもので、海底地盤とパイプラインの接触面に設置した非線形バネの荷重-変形特性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した。本研究で得られた結果を以下に示しておく。

- 1) パイプラインと地盤の間に設置された非線形バネの力学特性の違いによる繰り返し荷重中のパイプラインの変位挙動への影響は顕著なものとなる。また、パイプラインの変位挙動は、図-2に示す非線形バネの力学モデルにおける P_1 値に大きく依存する。
- 2) パイプライン直下における地盤内部の応力-

ひずみ関係において、せん断応力に比べてせん断ひずみ振幅は非線形バネの力学特性に大きく依存する。また、非線形バネの力学特性の違いによる影響は間隙水圧応答において顕著なものとなって現れる。

参考文献

- 1) PRCI : Submarine Pipeline On-Bottom Stability - Volume 1, Pipeline Research Council International Inc., 2002.
- 2) 高谷富也：繰り返し荷重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.
- 3) 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.
- 4) Takatani, T. : Pipeline-Seabed Interaction Analysis Subjected to Horizontal Cyclic Loading, *Proceedings of International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, pp.629-635, 2005.
- 5) 高谷富也：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，海洋開発論文集，Vol.22，pp.769-774，2006.
- 6) Takatani, T.: Numerical Simulation of Unburied Pipeline Stability under Horizontal Cyclic Loading, *Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, pp.76-85, 2006.
- 7) Takatani, T.: Unburied Offshore Pipeline-Seabed Interaction Analysis Subjected to Horizontal Cyclic Loading, *Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG-2006)*, Hong Kong, Vol.2, pp.1559-1565, 2006.
- 8) 高谷富也・Daniel Brooker：海底パイプラインの暴風時耐波安定性に関する一考察，海岸工学論文集，第53巻，pp.771-775，2006.
- 9) Barbosa-Cruz, E.R. and Randolph, M.F.: Bearing Capacity and Large Penetration of a Cylindrical Object at Shallow Embedment, *Proceedings of International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, pp.615-621, 2005.
- 10) Verley, R.L.P. and Sotberg, T.: A Soil Resistance Model for Pipelines Placed on Sandy Soils, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 116, pp.145-153, 1994.
- 11) Sorenson, T., Bryndum, M. B. and Jacobsen, V.: Hydrodynamic Forces on Pipelines - Model Tests, *Pipeline Research Council International Inc.*, 1986.
- 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) 荒牧憲隆：破碎性土の非排水単調および繰返しせん断特性と粒子破碎の評価に関する研究，山口大学博士論文，1997.
- 14) 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.
- 15) 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.