

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

ON RELATIONSHIP BETWEEN PIPELINE BEHAVIOUR AND SEABED CHARACTERISTICS UNDER HORIZONTAL CYCLIC LOADING

高谷 富也¹

Tomiya TAKATANI

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

A finite element analysis for the pipeline-seabed interaction problem is carried out in order to simulate both the pipeline movement and the pore water pressure accumulation in seabed due to the horizontal cyclic loading of pipeline. The cyclic movement behaviour of pipeline, the effective stress path and the shear stress-strain relationship in seabed during horizontal cyclic loading of pipeline are numerically investigated through some examples from the viewpoint of the ratio of horizontal load to vertical one and the seabed characteristics. Pipeline movement during horizontal cyclic loading greatly depends on not only the frequency of horizontal cyclic load but also the seabed characteristics around the pipeline.

Key Words : Horizontal cyclic loading, pipeline movement, pore water pressure accumulation, effective stress path, liquefaction analysis, seabed characteristics

1. はじめに

極東アジアをはじめとして日本近海における天然ガスやその他の海洋資源の開発や利用を考えた場合、海底地盤上のパイプラインの耐波・耐震性の評価がパイプライン設計を行う上で非常に重要な課題となる。一方、メキシコ湾や北海ではパイプラインがハリケーンや暴風などの影響を受けて、比較的深い海底地盤に設置されたパイプライン上を通過する激しい流れによってパイプラインは繰り返し荷重や変位を受けて破壊に至る事例が数多く報告されている¹⁾。これは、パイプラインが繰り返し水平载荷を受ける場合、パイプライン周辺地盤において間隙水圧の上昇が生じ、地盤剛性の低下に結びつく²⁾と考えられる。さらに、局所的な地盤剛性の低下はパイプラインに大きな沈下や水平移動をもたらし、最終的にパイプラインの破壊を引き起こすことが推察できる。筆者は、繰り返し水平载荷を受けるパイプラインの遠心载荷実験³⁾を通じて、パイプライン直下における地盤内部の間隙水圧応答の予測評価式の提案を行った^{4), 5)}。また、パイプライン-地盤系の応答解析を行うことで、繰り返し载荷を受けるパイプライン周辺地盤における変位、応力、ひずみおよび間隙水圧の応答を求めて、間隙水圧上昇に影響を及ぼす要因について調べた^{6), 7)}。

これまでの研究成果を踏まえて、本研究はパイプラインが設置される比較的深い海底における地盤条件の違い

がパイプラインの応答にどのような影響を及ぼすかについて明らかにすることを目的とし、暴風時に想定される波浪により繰り返し水平载荷を受けるパイプライン-地盤系の非線形応答解析を行ったものである。

2. 解析手法

本研究では、土の応力-ひずみの非線形関係⁸⁾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⁹⁾を行い、繰り返し水平载荷を受けるパイプラインの変位および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、変位、応力、ひずみおよび間隙水圧応答に及ぼす繰り返し水平荷重 H 、水平载荷周波数 f および地盤特性の影響を調べる。パイプライン-地盤系の応答解析では、パ

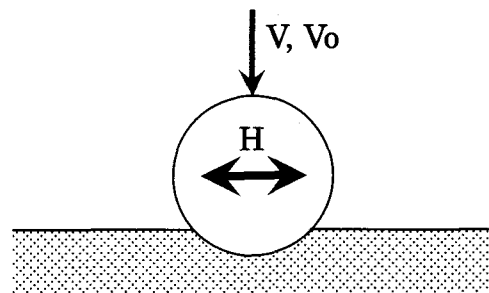


図-1 パイプラインの载荷状態

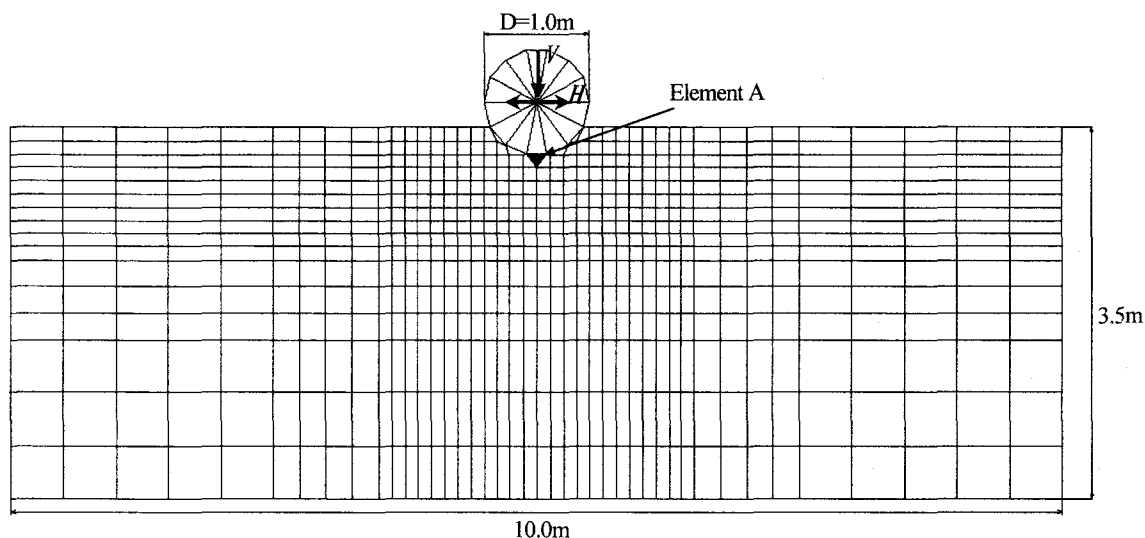


図-2 FEM解析メッシュ

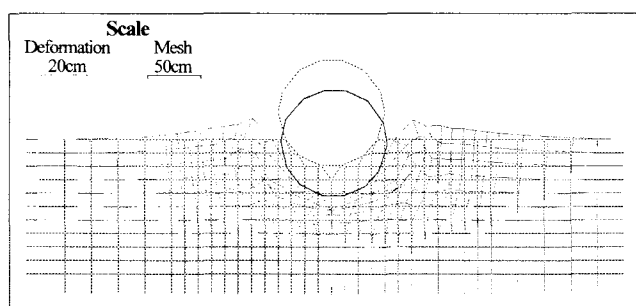
パイプラインに一定の鉛直荷重 V を荷重した状態で繰り返し水平荷重 H を与えて、パイプラインの移動量、地盤の変形、応力、ひずみおよび間隙水圧を求める。また、繰り返し水平荷重時の応答に影響を及ぼすと考えられるパイプラインの初期設置条件が応答に及ぼす影響等を明らかにする。これは、パイプライン敷設による地盤に対する荷重履歴の影響を考慮したものである³⁾。このため、図-1に示すように H/V の比のみならずパイプライン設置時の鉛直荷重 V_0 に対する繰り返し水平荷重時の鉛直荷重 V の比 V/V_0 が変位、応力、ひずみおよび間隙水圧応答に及ぼす影響について調べる。なお、地盤は砂質地盤とし、 N 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状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6)および10)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1.0mとし、パイプラインと地盤との接触面にはジョイント要素を配置している。また、パイプラインに与える荷重条件としては、繰り返し水平荷重 $H = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4\text{kN/m}$ および荷重周波数 $f = 0.5, 1.0, 2.0\text{Hz}$ の組み合わせとしている。なお、繰り返し水平荷重 H と同時に、パイプラインの鉛直方向には常に一定荷重として $V = 4, 6$ または 8kN/m を作用させる。

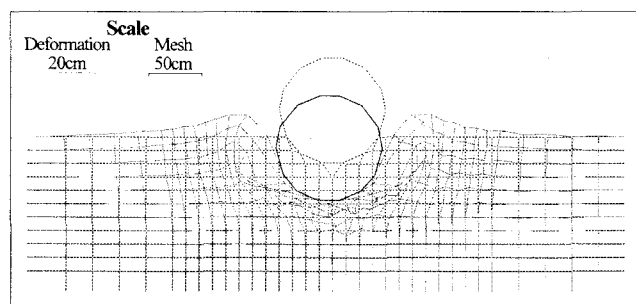
3. 数値計算結果と考察

図-3はパイプラインに作用させる繰り返し荷重 H の周波数 f の違いによる繰り返し200回後における地盤変形を示したものである。なお、地盤の N 値、細粒分

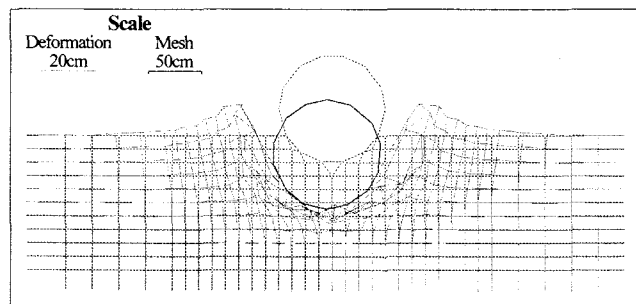
含有率および荷重条件は $(N)_{65} = 10$ 、 $F_C < 5\%$ および $H = \pm 2\text{ kN/m}$ 、 $V = 4\text{ kN/m}$ 、 $V_0 = 4\text{ kN/m}$ である。これら



(a) $f=0.5\text{Hz}$

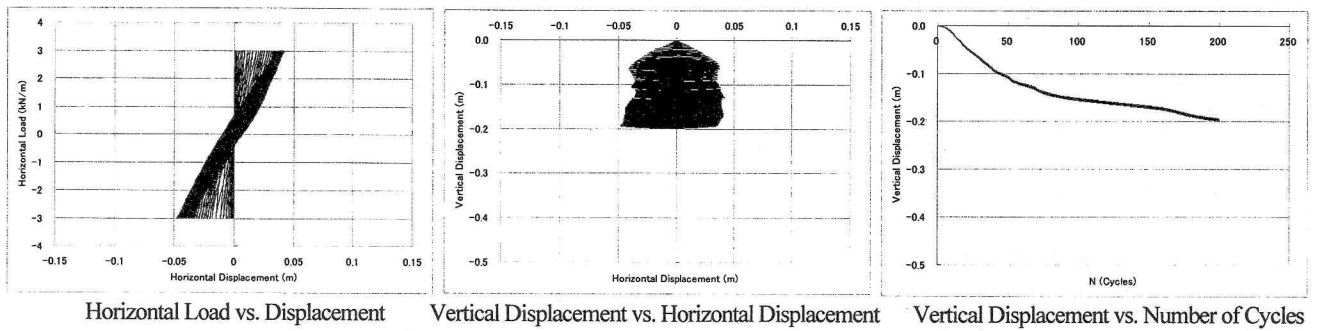


(b) $f=1.0\text{Hz}$

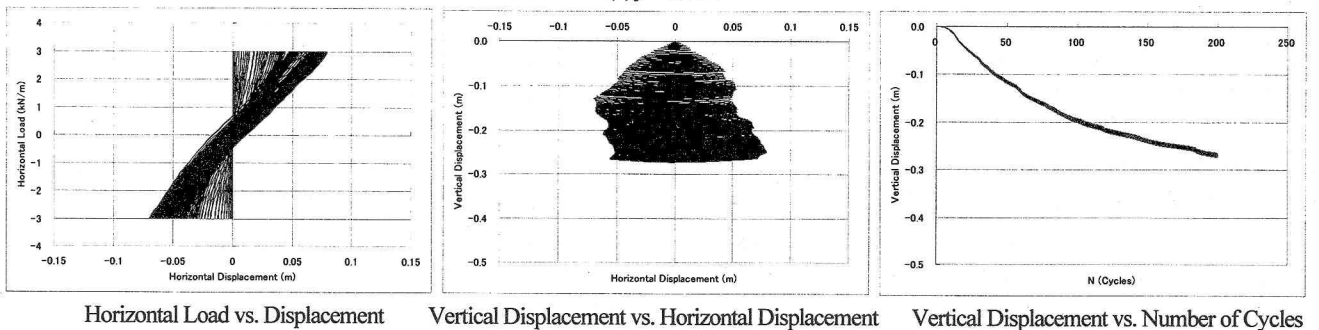


(c) $f=2.0\text{Hz}$

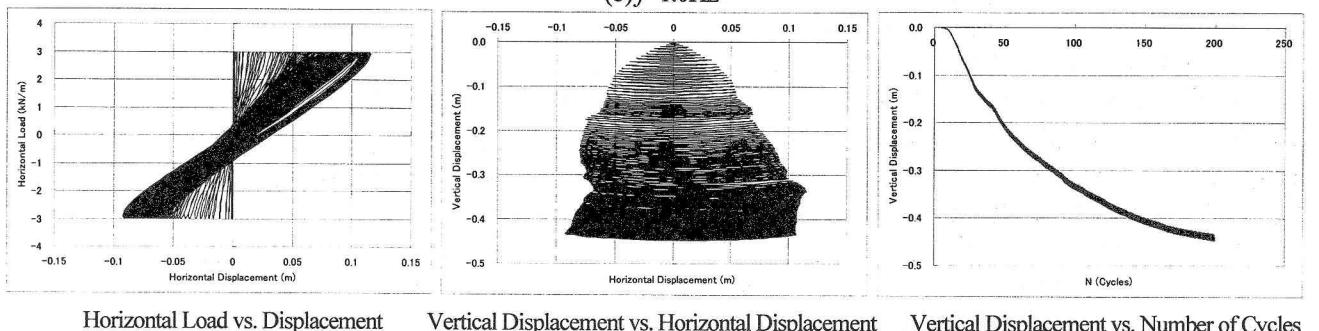
図-3 パイプライン周辺地盤の変形
($(N)_{65} = 10$, $F_C < 5\%$, $H = \pm 2\text{kN/m}$, $V = 4\text{kN/m}$, $V_0 = 4\text{kN/m}$)



(a) $f=0.5\text{Hz}$

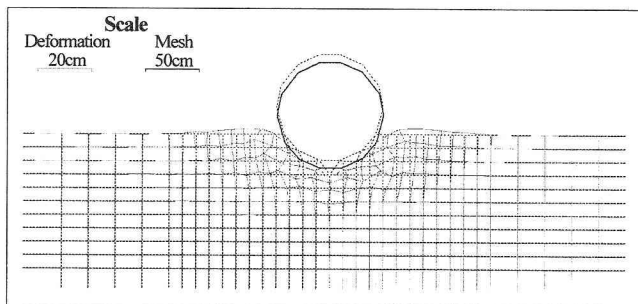


(b) $f=1.0\text{Hz}$

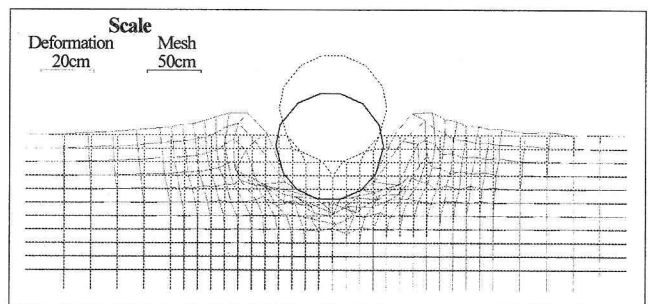


(c) $f=2.0\text{Hz}$

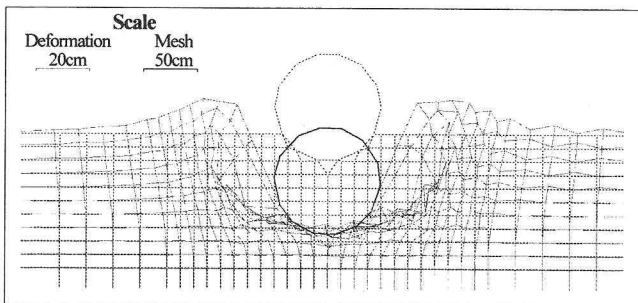
図-4 繰り返し载荷中のパイプライン挙動 ($(N)_{65}=10, F_c<5\%, H=\pm 3\text{kN/m}, V=4\text{kN/m}, V_o=4\text{kN/m}$)



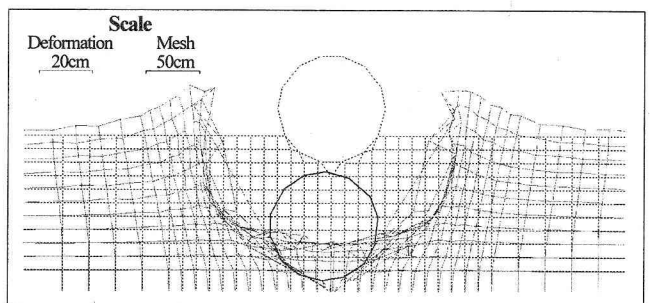
(a) $H=\pm 1\text{kN/m}$



(b) $H=\pm 2\text{kN/m}$



(c) $H=\pm 3\text{kN/m}$



(d) $H=\pm 4\text{kN/m}$

図-5 パイプライン周辺地盤の変形 ($(N)_{65}=10, f=1.0\text{Hz}, F_c<5\%, V=4\text{kN/m}, V_o=4\text{kN/m}$)

kN/m, $V=4\text{kN/m}$, $V_0=4\text{kN/m}$ である。これらの図から明らかなように、繰り返し载荷の周波数 f が高くなるにつれてパイプラインの繰り返し水平移動により地盤が側方へ大きく移動し、深く掘削された変形となっている。これは、パイプラインの繰り返し水平移動によって周辺地盤の間隙水圧が上昇し、それによって有効応力の減少に伴い地盤剛性の低下が見られたためと考えられる。紙面の都合上ここには図示していないが、繰り返し载荷の周波数 f が高くなるにつれて、周辺地盤の間隙水圧の上昇が急激に起きている。

図-4は、図-3と同じ地盤および鉛直荷重条件のもとで繰り返し载荷 H を $\pm 3\text{kN/m}$ とした場合における周波数 f の違いによる繰り返し水平载荷中のパイプラインに対する水平荷重と水平変位および鉛直変位の挙動を示したものである。図-3に見られたように、繰り返し载荷 H の周波数 f が高くなるにつれてパイプラインの水平移動量や沈下量が大きくなっている様子がわかる。とくに、周波数 f が高くなれば、パイプライン周辺地盤の間隙水圧上昇による地盤剛性の低下が進み、パイプラインの水平移動振幅が大きくなるとともに沈下量も大きくなっている様子が見て取れる。また、繰り返し载荷 H が大きくなればパイプラインの水平移動量や沈下量が大きくなっていることがわかる。

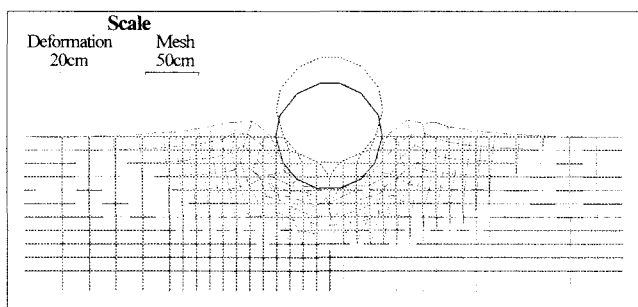
図-5は、繰り返し载荷 H の違いによる繰り返し200回後における地盤変形を示したものである。なお、地盤および鉛直载荷条件は図-3と同じものとし、繰り返し载荷の周波数 f は 1.0Hz としている。当然のことながら、パイプラインに作用する繰り返し载荷 H が大きくなるにつれて、パイプラインの水平移動の振幅が

大きくなり、地盤がより深く掘削されて側方への地盤変形も大きくなっていることがわかる。これは、繰り返し载荷 H が大きくなれば、パイプライン周辺地盤の間隙水圧の上昇も大きくなるためである。

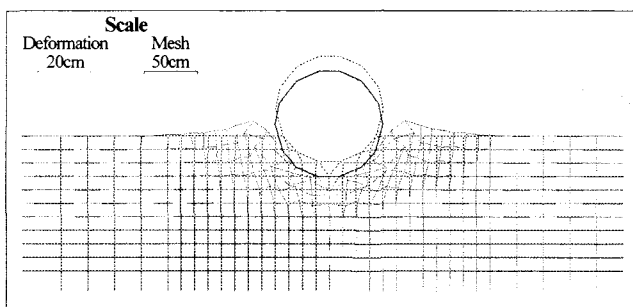
図-6は、図-3と同じ地盤および载荷条件のもとでパイプライン設置時の初期上乗荷重 V_0 の違いによる地盤変形を示したものである。上乗荷重 $V_0=6, 8\text{kN/m}$ に対するパイプラインの沈下量はそれぞれ 9.7cm および 10.8cm であり、図-5 (b)に示す $V_0=4\text{kN/m}$ の沈下量 14cm と比べると、上乗荷重 V_0 が大きくなるとパイプラインの沈下量は小さくなっていることがわかる。これは、上乗荷重 V_0 が大きくなるとパイプライン周辺地盤の初期有効圧が大きくなるためと考えられる。このことは、パイプライン設置時の鉛直载荷による地盤への载荷履歴の重要性を示唆しているものと考えられる。

図-7は、図-3と同じ N 値の地盤および载荷条件のもとで細粒分含有率 F_C の違いによる地盤変形を示したものである。図-5 (b)に示す $F_C < 5\%$ の地盤変形と比べると、細粒分含有率 F_C が大きくなるとパイプラインの水平移動量および沈下量は小さくなる傾向を示しており、パイプラインの繰り返し水平移動による地盤変形は小さくなっている。

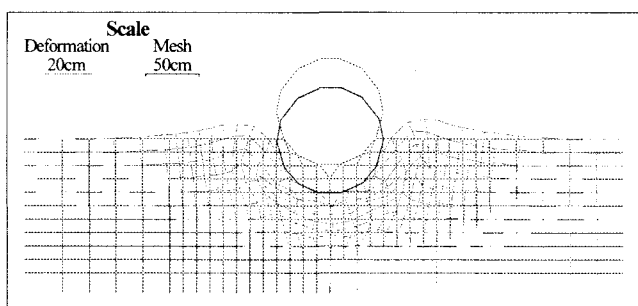
図-8および9は、図-3と同じ载荷条件のもとでそれぞれ細粒分含有率 F_C および N 値の違いによるパイプライン直下に位置する地盤要素 A の繰り返し载荷中の応力-ひずみ履歴を示したものである。これらの図より、細粒分含有率 F_C および N 値が大きくなれば、せん断応力-ひずみ関係ではせん断応力の値はほぼ同じであるが、せん断ひずみは小さくなる傾向にあるこ



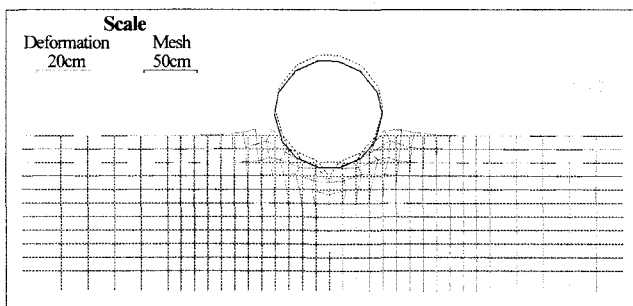
(a) $V_0=6\text{kN/m}$



(a) $F_C=10\%$



(b) $V_0=8\text{kN/m}$



(b) $F_C=40\%$

図-6 パイプライン周辺地盤の変形
 $((N)_{65}=10, F_C < 5\%, f=1.0\text{Hz}, H=\pm 2\text{kN/m}, V=4\text{kN/m})$

図-7 パイプライン周辺地盤の変形
 $((N)_{65}=10, f=1.0\text{Hz}, H=\pm 2\text{kN/m}, V=4\text{kN/m}, V_0=4\text{kN/m})$

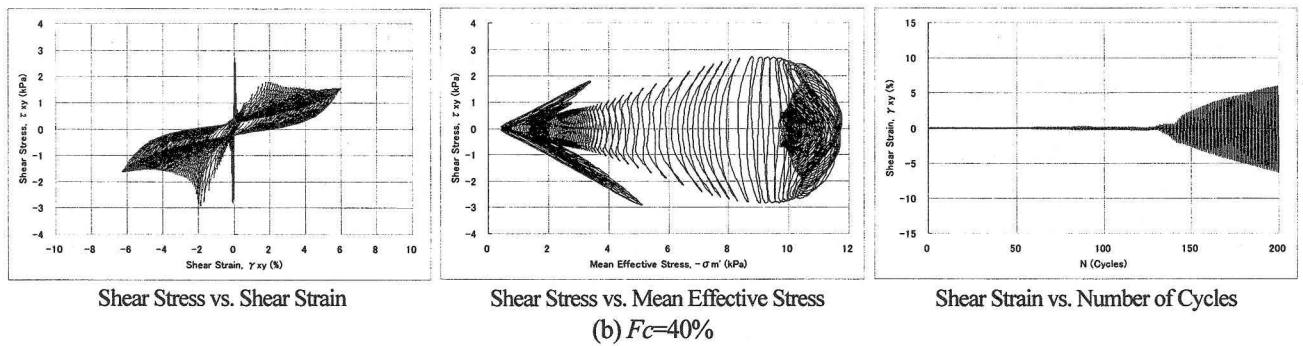
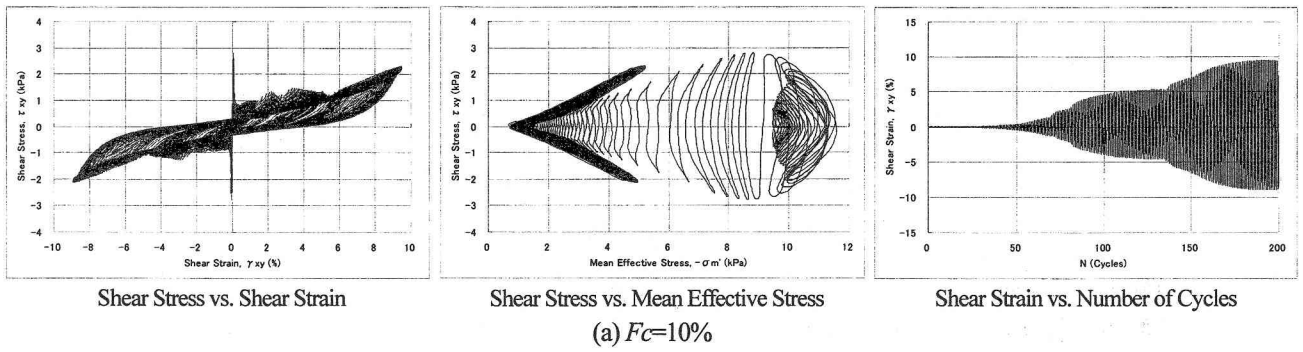


図-8 繰り返し载荷中の応力-ひずみ履歴挙動 ($(N)_{65}=10, f=1.0\text{Hz}, H=\pm 2\text{kN/m}, V=4\text{kN/m}, V_0=4\text{kN/m}$)

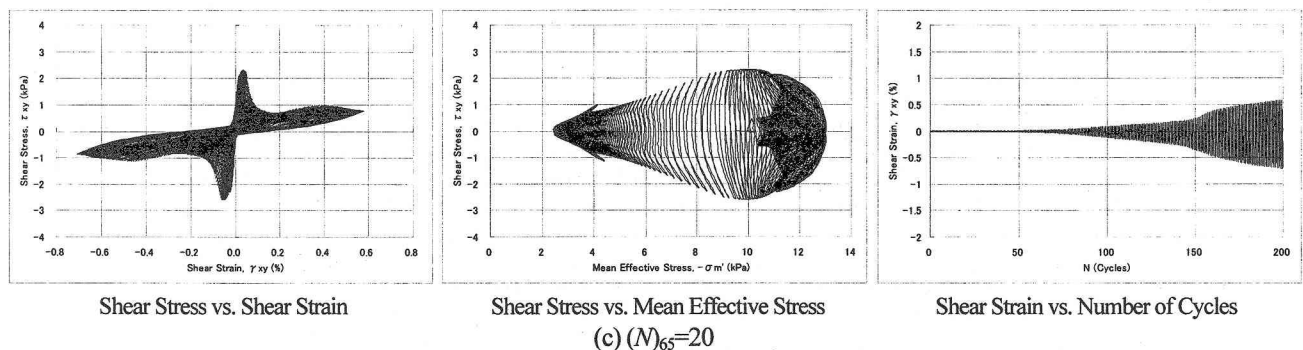
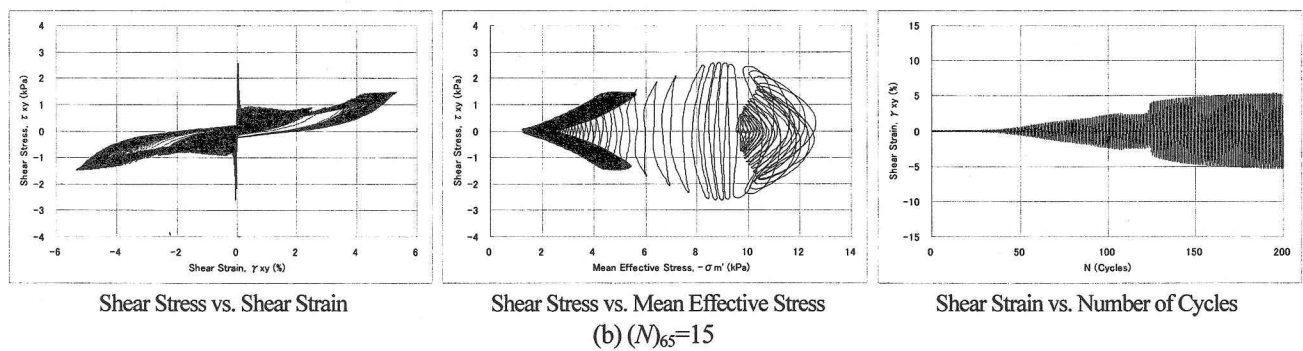
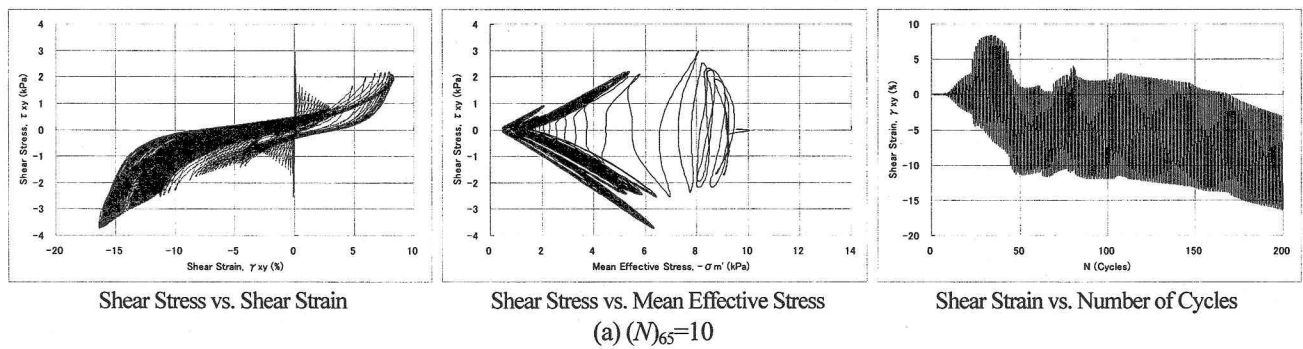


図-9 繰り返し载荷中の応力-ひずみ履歴 ($F_c < 5\%, f=1.0\text{Hz}, H=\pm 2\text{kN/m}, V=4\text{kN/m}, V_0=4\text{kN/m}$)

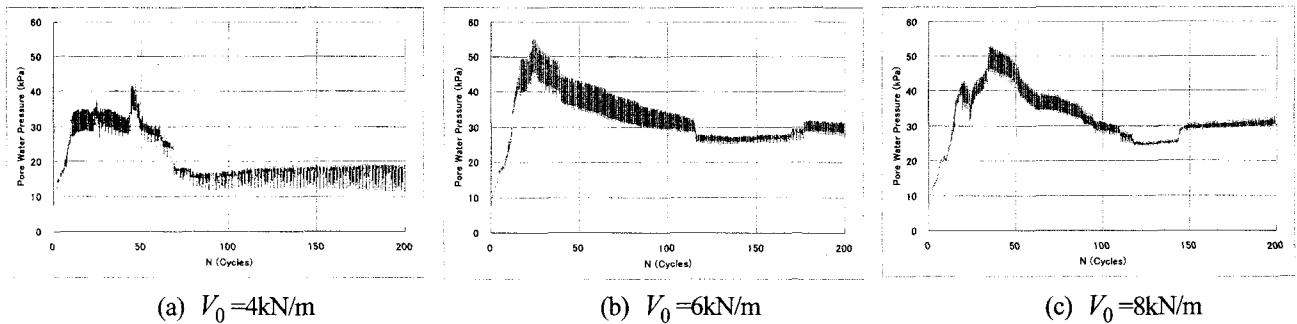


図-10 繰り返し载荷中の間隙水圧応答 ($(N)_{65}=10, F_c<5\%, f=1.0\text{Hz}, H=\pm 2\text{kN/m}, V=4\text{kN/m}$)

とがわかる。また、有効応力履歴からは徐々に液状化傾向を示しているが、細粒分含有率 F_c または N 値が大きくなるにつれて、せん断ひずみの増加には多くの繰り返し回数が必要となることがわかる。図-6と同じ地盤および载荷条件のもとでパイプライン設置時の鉛直荷重 V_0 の違いによるパイプライン直下に位置する地盤要素 A の繰り返し载荷中の間隙水圧応答を図-10に示しておく。図-9 (a)のせん断ひずみ応答からも明らかのように、繰り返し回数25回付近を境にして鉛直荷重 $V_0=4\text{kN/m}$ に対するせん断ひずみ振幅が急激に大きくなっており、間隙水圧応答のピーク値が45回付近に見られるものの、鉛直荷重 $V_0=6, 8\text{kN/m}$ ではそれぞれ繰り返し回数25回および35回付近で間隙水圧応答にピーク値が見られる。このことより、鉛直荷重 V_0 が大きくなれば間隙水圧応答のピーク値に至るまでのせん断ひずみの振幅も小さくなっていることがわかる。

4. おわりに

本研究は、繰り返し水平载荷を受ける場合のパイプラインの移動挙動、周辺地盤の応力-ひずみ履歴応答および間隙水圧応答を求め、パイプライン設置時の鉛直荷重 V_0 や地盤条件の違いが繰り返し载荷中のパイプラインの応答に影響を及ぼす要因について明らかにしたものである。以下に、本研究で得られた結果をまとめておく。

- 1) パイプラインの設置地盤の N 値または細粒分含有率 F_c が大きくなるとパイプラインの水平移動量および沈下量は小さくなる傾向にある。また、繰り返し水平载荷の周波数 f が高くなれば、パイプラインの水平移動の振幅および沈下量が大きくなる。
- 2) パイプライン設置時の鉛直荷重 V_0 が大きくなれば、パイプライン周辺地盤の初期有効圧が大きくなるため、同じ H, V の载荷状態において、 V/V_0 の比が小さくなればパイプラインの沈下量は小さくなる傾向を示す。
- 3) N 値または細粒分含有率 F_c が大きくなるにつれて、せん断ひずみは小さくなる傾向にあるため、せん断ひずみの増加には多くの繰り返し回数が必要となる。また、有効応力履歴の観点からも繰り返し载荷回数

が多くなるにつれて徐々に液状化傾向を示す。

- 4) パイプライン設置時の鉛直荷重 V_0 が大きくなれば間隙水圧応答に見られるピーク値発生までの繰り返し回数が多くなり、せん断ひずみの振幅も小さくなる傾向にある。このため、 V/V_0 の比が小さくなれば、液状化に至るまでの繰り返し回数が増える。ところで、本研究は豪州近海における石油や天然ガスの海底輸送のパイプライン設計を踏まえた位置づけとなっている。豪州近海域におけるサイクロンや台風は非常に大型であるため、パイプライン設置後の長期の再現期間を考えた波浪や潮流に対する設計条件はかなり厳しいものとなる。本研究で用いた荷重条件は上述の状況を念頭に入れたものとなっている。

謝辞：この研究は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号：16560441）に基づいて行われたことを付記し、関係各位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) Wagner, D.A., Murff, J.D., Brennodden, H. and Sveggren, O. : Pipe-Soil Interaction Model, OTC 5504, Houston, Texas, 1987.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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, Honolulu, Vol.2, pp.31-37, 2003.
- 6) 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.
- 7) T. Takatani, F. Ogawa : 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, Seoul, S6C, 2004.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Parameter identification for a cyclic mobility model, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990.