

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

PORE PRESSURE BUILD UP RESPONSE IN THE SEABED AROUND A PIPELINE
SUBJECTED TO HORIZONTAL CYCLIC LOADING

高谷富也¹・Mark F. RANDOLPH²
Tomiya TAKATANI and Mark F. RANDOLPH

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)

² Ph.D., The University of Western Australia, Centre for Offshore Foundation Systems

A numerical model is proposed for the pore pressure build up in soil around a pipeline subjected to horizontal cyclic loading. The model is based on results of centrifuge tests, and the effect of various factors on the pore pressure build up is investigated through some examples using the proposed numerical model. It is found that the pore pressure build up component due to horizontal cyclic loading depends significantly on the initial settlement ratio as well as the ratio of horizontal to vertical load. It is also shown that a peak appears in the pore pressure build up response when the initial settlement ratio is larger than about 0.2.

Key Words: Pore pressure build up, horizontal cyclic loading, pipeline, numerical modeling, centrifuge modeling test

1. はじめに

海底地盤に敷設されたパイプラインが波浪や潮流などの影響を受けて繰り返し水平载荷を受ける場合、パイプラインの繰り返し水平移動によりパイプライン周辺地盤の間隙水圧の上昇により地盤剛性が低下する。この地盤剛性の低下はパイプラインの局所的な大きな沈下や水平移動をもたらす。特に、急激な変形はパイプラインの破壊を引き起こすとともに、その機能を麻痺させることになる。このため、パイプライン直下の地盤に発生する間隙水圧の上昇およびそれに伴う地盤剛性の低下を定量的に評価することはパイプラインの設計上重要な課題となる。この間隙水圧応答は数値解析や模型実験から得られた間隙水圧応答に基づいたシミュレーションから評価することは可能である¹⁾。一方、遠心力载荷模型実験においては現場での応力レベルを忠実に実現できる利点²⁾を有しているため、海洋・海岸工学の分野における遠心力载荷実験はさまざまな海洋基礎構造物の挙動を調べるために広く用いられてきている³⁾⁻⁶⁾。

そこで、本研究は繰り返し水平载荷を受けるパイプラインの変位挙動およびパイプライン直下の海底地盤の間隙水圧応答を求めた遠心力载荷模型実験結果を用いて、繰り返し水平载荷を受けるパイプライン直下地盤内部の定量的な間隙水圧応答を求めるために、その予測評価式の提案を行ったものである。なお、この遠心力载荷模型実験では、波浪や潮流な

どによる不規則な外力をある周期を有する定常的な繰り返し水平荷重として考えて、飽和した石灰質の砂地盤 (uncemented calcareous sand) 表面に設置されたパイプライン直下の間隙水圧応答の定量的な評価を行うために、パイプラインに繰り返し水平荷重が作用した場合を想定した実験となっている。本研究では、パイプライン直下の地盤内部における間隙水圧応答が、繰り返し水平荷重による間隙水圧上昇成分と一定に作用する鉛直荷重による上昇成分で構成されるものと仮定して、パイプラインの初期沈下量や载荷条件などを考慮することにより、繰り返し水平载荷によるパイプライン直下の地盤に発生する間隙水圧応答の推定を行う評価式となっている。

2. 遠心力载荷実験について

図-1はパイプラインの敷設状態を示したもので、

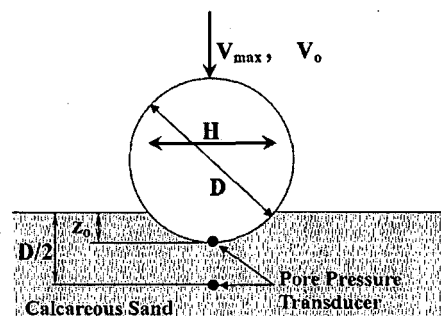
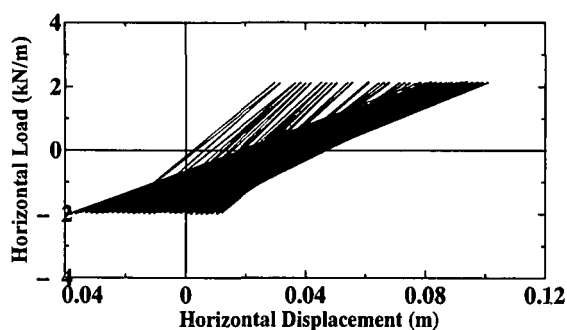


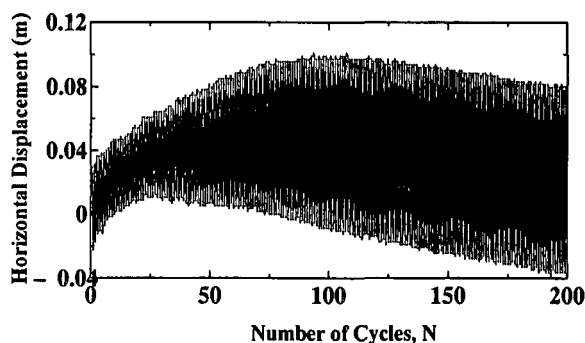
図-1 パイプラインの設置と载荷状態

表-1 遠心載荷実験における載荷条件⁷⁾

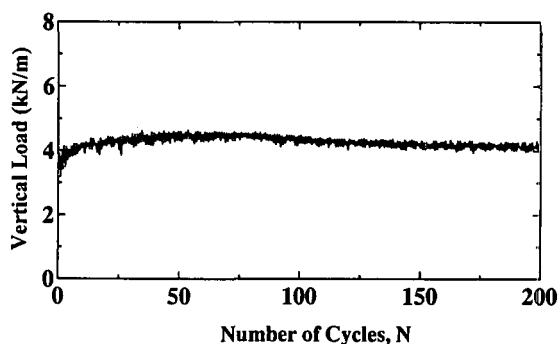
Sample	Test	Initial Settlement, z_o (m)	Vertical Load, V_{max}, V_o (kN/m)	Horizontal Load, H (kN/m)	Number of Cycles, N	Cyclic Frequency, f (Hz)	Final Horizontal Movement, Δh (m)	Maximum Excess Pore Pressure, p (kPa)
1	C-1-1	0.18	4, 4	± 1	200	1.61	0.005	2.5
	C-1-3	0.22	4, 4	± 2	200	0.63	0.03	4.1
	C-1-5	0.19	4, 4	± 0.5	200	8.13	0.005	1.4
	C-1-7	0.10	4, 4	± 2	200	1.36	0.28	2.6
2	C-2-1	0.27	4, 4	± 2	200	0.74	0.10	4.9
	C-2-3	0.31	4, 4	± 2.6	200	0.49	0.05	5.5
	C-2-5	0.28	2, 2	± 1	200	0.57	0.25	3.0
	C-2-7	0.20	6, 6	± 3	200	0.50	0.20	7.7
3	C-3-1	0.21	4, 4	± 2	200	0.88	0.12	4.4
	C-3-3	0.18	10, 4	± 2	200	0.76	0.05	2.5
	C-3-5	0.30	25, 4	± 2	200	0.68	0.05	3.5
	C-3-7	0.26	25, 4	± 3	166	0.37	0.45	3.1



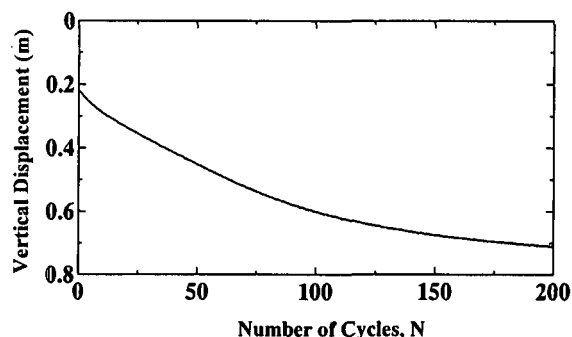
(a) 水平荷重



(b) 水平変位



(c) 鉛直荷重



(d) 鉛直変位

図-2 荷重-変位応答 (C-1-3)

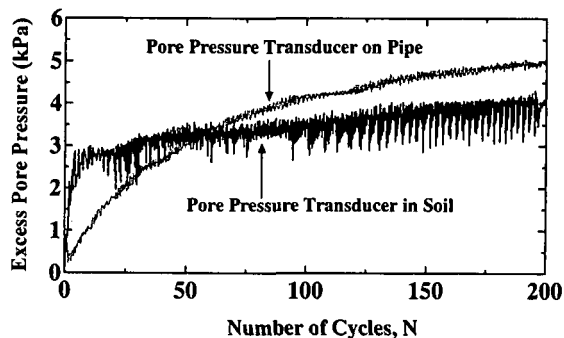


図-3 間隙水圧応答 (C-1-3)

パイプラインの初期沈下量や載荷条件などを考慮して、遠心力載荷実験は1/18のモデルを用いて12ケース行われた⁷⁾。表-1は水平載荷実験における載荷条件および載荷実験結果を示したものである。なお、

各ケースとも200回の繰り返し水平載荷を行ったが、C-3-7においては166回を過ぎて水平方向の移動限界量に達したため、以後の繰り返し水平載荷実験を打ち切った。なお、遠心力載荷実験に用いたモデルは直径70mm、厚さ2mm、長さ350mmのアルミニウム製のパイプで、地盤は石灰質の砂質土である。また、パイプは表-1に示す最大鉛直荷重 V_{max} に達するまで0.005mm/sの変位速度で設置された。また、3種類の地盤について、それぞれの地盤に対してC-1-3、C-2-1、C-3-1に見られるように、繰り返し水平荷重 ± 2 kN/mおよび鉛直荷重 $V_{max} = V_o = 4$ kN/mの同じ載荷条件の実験を行った。なお、3種類の地盤の平均単位体積重量は、 15.9 kN/m³となっている。この表には、パイプの最終沈下量、水平移動量およびパイプ直下地盤内に設置された間隙水圧計によ

る最大間隙水圧値が示されている。また、繰り返し
 載荷回数を全載荷時間で除して得られた繰り返し水
 平載荷の平均周波数を示しておいた。

図-2 および 3 は、C-1-3 ケースにおける荷重-変
 位応答と間隙水圧応答結果を示したものである。繰
 り返し載荷に伴い、次第に鉛直変位の増分量は減少
 し、パイプの水平移動量は載荷初期の段階では増加
 しており、載荷による水平方向の地盤剛性の低下を
 示していることがわかる。一方、図-3 は 2 つの間
 隙水圧計による計測結果を示したものである。図-
 1 に示されているパイプと間隙水圧計の設置図より
 明らかなように、1 つの間隙水圧計はパイプと地盤
 の接触面での間隙水圧応答を測定するためにパイプ
 底面に取り付けられており、もう一つの間隙水圧計
 は地盤表面より約 35 mm の地盤内部に設置されてい
 る。パイプに取り付けられた間隙水圧計による測定
 値は地盤内部へのパイプの貫入中は 5 kPa まで増加
 したが、載荷実験終了後においても消散しなかった。
 これは、過剰間隙水圧がパイプ-地盤の接触面にお
 いて観測されなかったことを示している。5 kPa の間
 隙水圧値は静水圧に相当する値と考えられる。一方、
 地盤に設置された間隙水圧計においては、連続的な
 過剰間隙水圧の上昇が繰り返し載荷中に観測されて
 いる。この過剰間隙水圧応答は載荷実験後徐々に消
 散した。表-1 には、この間隙水圧計で測定された
 最大の過剰間隙水圧値が示されており、鉛直荷重に
 対する水平荷重の比 H/V_o が大きくなるにつれて間
 隙水圧値が大きくなっていることがわかる。

3. 間隙水圧応答の推定式について

本研究では、繰り返し水平載荷を受けるパイプ
 ライン直下地盤における間隙水圧応答 $p(t)$ の予測式と
 して次式を提案する。

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) \quad (1)$$

ここに、 $p_1(t)$ は主に繰り返し水平載荷による間隙水
 圧上昇成分であり、 $p_2(t)$ は鉛直載荷による上昇成分
 である。また、時刻 t は次式のように書き表される。

$$t = T \cdot N = \frac{1}{f} N \quad (2)$$

ここに、 T および f は繰り返し水平載荷の周期と周
 波数であり、 N は繰り返し回数である。

式(1)および(2)より、間隙水圧応答は繰り返し回数
 N の関数として、次式のように書き表される。

$$p(N) = p_1(N) + p_2(N) \quad (3)$$

本研究では、間隙水圧応答の発生と消散過程に基
 づいて、式(3)に見られる $p_1(N)$ および $p_2(N)$ を次式
 のように表されると仮定する。

$$p_1(N) = a_1 U_h \sum_i^N e^{-\xi_1(N-N_i)} \quad (4a)$$

$$p_2(N) = a_2 U_v \sum_i^N e^{-\xi_2(N-N_i)} \quad (4b)$$

$$U_h = d + \frac{1-d}{1+0.000015N^3} \quad (5)$$

$$U_v = 1 \quad (6)$$

$$\xi_1 = 0.05, \quad \xi_2 = 0.01 \quad (7)$$

$$d = 0.3 \left\{ 1.5 - 2.1 \left(\frac{z_o}{D} \right) \right\} \left\{ 1.67 - 1.33 \left(\frac{H}{V_o} \right)^{0.5} \right\} \left(\frac{V_o}{4} \right)^{0.2} \left(\frac{V_o}{V_{\max}} \right)^{0.2} \quad (8)$$

ここに、 N_i は繰り返し載荷 i 番目を意味する。 z_o は
 パイプの初期沈下量、 D はパイプの直径(=1.26 m)、
 H は繰り返し水平荷重、 V_o および V_{\max} は鉛直荷重
 およびパイプに載荷された最大鉛直荷重である。また、
 a_1 および a_2 は実験データから求められる定数で
 あり、初期載荷条件に大きく依存するものである。
 U_h および U_v は繰り返し回数 N の関数であり、 U_h は
 水平方向の地盤剛性に関係があり、 U_v は鉛直支持力
 に大きく依存する。 ξ_1 および ξ_2 は実験から求められ
 る定数であり、地盤の透水係数に大きく依存する。
 本研究では、これらの ξ_1 および ξ_2 の値として、それ
 ぞれ 0.05 および 0.01 とした。

ところで、水平方向の地盤剛性に関する低下率 K_h
 は繰り返し水平載荷における荷重-変位応答から得
 ることができる。本研究では地盤剛性の低下率 K_h を
 次式で表されるものと仮定する。

$$K_h = a + \frac{1-a}{1+bN+0.000015N^c} \quad (9)$$

ここに、 a は最終的な地盤剛性の低下率であり、 b お
 よび c は曲率に関する定数である。また、これらは
 繰り返し水平載荷におけるパイプラインの水平変位
 応答およびパイプライン直下地盤の間隙水圧応答に
 依存する。表-2 は、12 ケースの遠心載荷実験結果
 から求められた a 、 b および c を示したものである。

図-4 は、C-1-5 と C-3-5 の 2 ケースにおける地盤
 剛性の低下率 K_h を示したものである。この図より、
 繰り返し載荷の回数が増えるにつれて地盤剛性の低
 下率 K_h が小さくなっており、各ケースとも最終的な
 地盤剛性の低下率 a に近づいていることがわかる。
 式(4a)で与えられる $p_1(N)$ 中に見られる U_h が式(9)で
 表される地盤剛性の低下率 K_h と同じような関数と

表-2 地盤剛性に関する低下率 K_h

Sample	Test	K_h		
		a	b	c
1	C-1-1	0.44	0.000	2.70
	C-1-3	0.42	0.000	2.90
	C-1-5	0.46	0.000	2.50
	C-1-7	0.28	0.030	2.80
2	C-2-1	0.28	0.005	2.50
	C-2-3	0.40	0.000	2.55
	C-2-5	0.18	0.020	2.80
	C-2-7	0.18	0.012	2.70
3	C-3-1	0.28	0.007	2.50
	C-3-3	0.27	0.006	2.70
	C-3-5	0.15	0.090	2.70
	C-3-7	0.37	0.090	2.70

なるという仮定に基づいて、本研究では $p_1(N)$ 中の U_h を式(5)で表されるものとしている。

式(5)の U_h は繰り返し水平載荷におけるパイプラインの水平変位挙動に大きく依存しており、一方水平変位挙動は間隙水圧応答の影響を強く受けるものと考えられる。式(5)で表される U_h 中の係数 d は水平載荷中はその値自体が変動すると考えられるため、載荷前に係数 d の値を決定することは容易ではない。しかしながら、パイプラインに対する初期載荷条件を考慮することで、水平載荷前にある程度間隙水圧応答を推定することが可能であると思われる。

12 ケースの遠心載荷実験結果における水平載荷変位応答に関する種々の検討の結果、本研究では係数 d を式(8)で表されるものと仮定した。式(8)から明らかのように、係数 d は水平荷重 $H = \pm 2 \text{ kN/m}$ および鉛直荷重 $V_{\max} = V_o = 4 \text{ kN/m}$ の載荷条件の下で初期沈下量 $z_o = 0.0 \sim 0.3 \text{ m}$ に対して $0.3 \sim 0.45$ の値となる。また、初期沈下比 z_o/D と鉛直荷重に対する水平荷重の比 H/V_o が大きくなるにつれて係数 d は小さくなり、鉛直荷重 V_o の最大鉛直荷重に対する荷重比 V_o/V_{\max} と鉛直荷重 V_o が大きくなるにつれて係数 d は大きくなる傾向を示す。

式(4b)中の U_v は繰り返し水平載荷中は鉛直荷重が一定であるため、式(6)で表されるものと仮定した。

一方、式(8)で表される係数 d を用いれば、式(4)に見られる係数 a_1 および a_2 は 12 ケースの遠心載荷実験結果より得られる。表-3 はそれらの値を示したものである。この表より、初期沈下量 z_o 、鉛直荷重

V_o および鉛直荷重に対する水平荷重の比 H/V_o が大きくなるにつれて、係数 a_1 および a_2 は大きな値となっていることがわかる。

12 ケースの遠心載荷実験において得られた間隙水圧応答に基づいて、本研究では、式(4)に見られる係数 a_1 および a_2 は次式で表されると仮定する。

$$a_1 = (1.5 - 0.42T) \left\{ 0.09 + 85 \left(\frac{z_o}{D} \right)^4 \right\} \left\{ 0.29 + 1.42 \left(\frac{H}{V_o} \right)^{1.5} \right\} \left(\frac{V_o}{4} \right) \left(\frac{V_o}{V_{\max}} \right)^{0.12} \quad (10a)$$

$$a_2 = (0.82 + 0.17T) \left\{ 0.0165 + 0.09 \left(\frac{z_o}{D} \right) \right\} \left\{ 0.71 + 0.58 \left(\frac{H}{V_o} \right)^2 \right\} \left\{ 0.79 + 0.21 \left(\frac{V_o}{4} \right)^5 \right\} \left(\frac{V_o}{V_{\max}} \right)^{0.35} \quad (10b)$$

式(10)は、繰り返し水平荷重 $H = \pm 2 \text{ kN/m}$ および鉛直荷重 $V_{\max} = V_o = 4 \text{ kN/m}$ の載荷条件を基準とし、パイプラインの初期沈下比 z_o/D と繰り返し水平載荷の周期 T の関数となっている。式(10a)で表される係数 a_1 は初期沈下比 z_o/D に敏感であり、式(10b)で表される係数 a_2 は鉛直荷重 V_o に敏感なものとなっている。なお、初期沈下比 z_o/D が 0.3 および $V_o/4$ の値が 1.5 より大きくなる場合には注意を要する。

4. 結果と考察

(1) 実験結果とシミュレーション結果との比較

パイプライン直下地盤における間隙水圧応答は、初期水平載荷条件の下で式(8)および(10)を用いれば推定することができる。式(10)で表される係数 a_1 および a_2 はパイプラインの繰り返し水平載荷中の間隙水圧応答において非常に重要な役割を有する。

図-5 は、C-1-3 の遠心載荷実験で得られた間隙水圧応答結果とシミュレーション結果との比較を示したものである。この図より、繰り返し水平載荷の初期段階においては、実験結果と式(8)および(10)を用いたシミュレーション結果の間には差異が見られるものの、載荷段階が進むにつれて次第に両者の差異

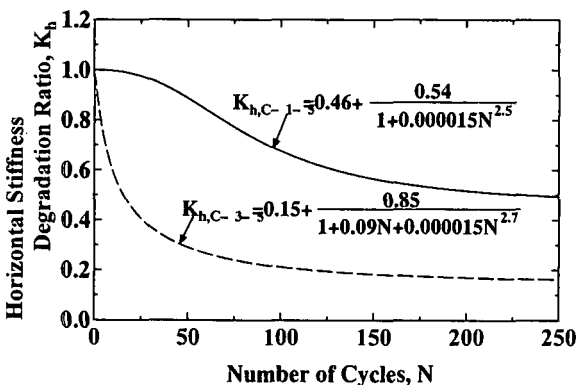


図-4 剛性低下率 K_h と繰り返し回数 N の関係

表-3 遠心載荷実験における係数 a_1 、 a_2 および d

Sample	Test	a_1 in $p_1(N)$	a_2 in $p_2(N)$	d in U_h
1	C-1-1	0.10	0.019	0.42
	C-1-3	0.17	0.033	0.34
	C-1-5	0.02	0.013	0.44
	C-1-7	0.10	0.023	0.40
2	C-2-1	0.29	0.034	0.32
	C-2-3	0.36	0.037	0.26
	C-2-5	0.06	0.032	0.27
	C-2-7	0.05	0.085	0.38
3	C-3-1	0.15	0.038	0.35
	C-3-3	0.13	0.017	0.30
	C-3-5	0.26	0.021	0.21
	C-3-7	0.09	0.032	0.18

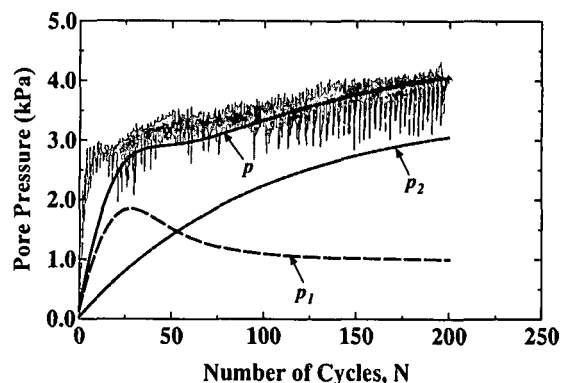


図-5 実験結果とシミュレーションの比較 (C-1-3)

は無くなり、シミュレーション結果が実験結果に近いことがわかる。

(2) 間隙水圧応答の推定

繰り返し水平荷重 $H = \pm 2 \text{ kN/m}$ および鉛直荷重 $V_{\max} = V_o = 4 \text{ kN/m}$ の载荷条件において、パイプラインの初期沈下量 z_o に対する間隙水圧応答が図-6に示されている。この図より、パイプラインの初期沈下量 z_o が大きくなり、また繰り返し水平荷重の周期 T が短くなるにつれて間隙水圧応答が大きくなっていることがわかる。また、周期 T が短くかつ初期沈下量 z_o が 0.25 m より大きくなる場合（初期沈下比 $z_o/D \approx 0.2$ に相当）には、繰り返し回数 $N < 50$ において間隙水圧応答にピークが見られる。これは、初期沈下量が増加し、水平荷重の繰り返し周期 T が短くなるにつれて、間隙水圧応答は鉛直荷重による

間隙水圧上昇成分 p_2 に比べて、水平荷重による間隙水圧上昇成分 p_1 がより増大するためと考えられる。

図-7は、3つの初期沈下量 z_o に対して繰り返し水平荷重 H の間隙水圧応答に及ぼす影響を図示したものである。この図より明らかなように、水平荷重 H と初期沈下量 z_o が大きくなるにつれて、間隙水圧応答は大きくなっている。したがって、水平荷重 H による間隙水圧上昇成分 p_1 はパイプラインの初期沈下量 z_o のみならず水平荷重と鉛直荷重の比 H/V_o に強く依存し、水平荷重の繰り返し周期 T が長くなるにつれて間隙水圧上昇成分 p_1 は減少する傾向を示すことがわかる。

図-8は、水平荷重と鉛直荷重の比 $H/V_o = 0.5$ について鉛直荷重 V_o の間隙水圧応答に及ぼす影響を図示したものである。この図より、鉛直荷重 V_o および初期沈下量 z_o が大きくなるにつれて、間隙水圧応

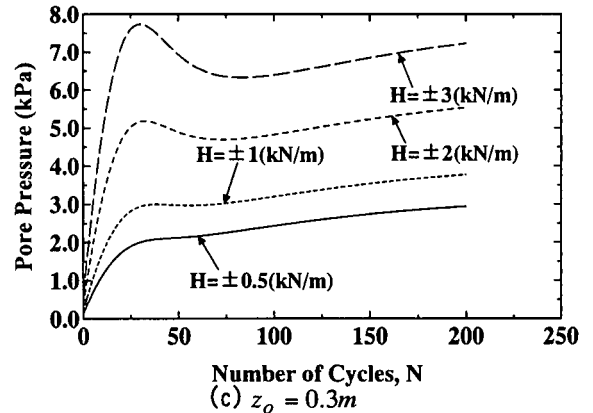
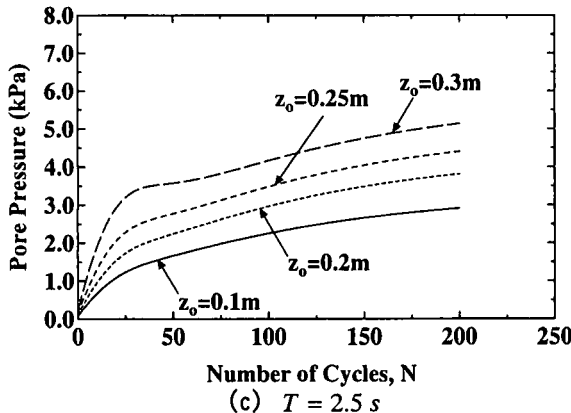
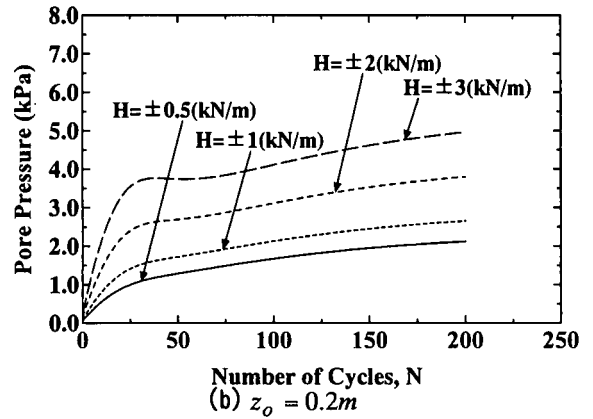
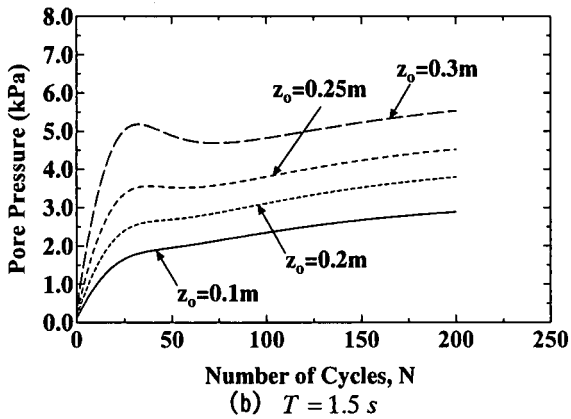
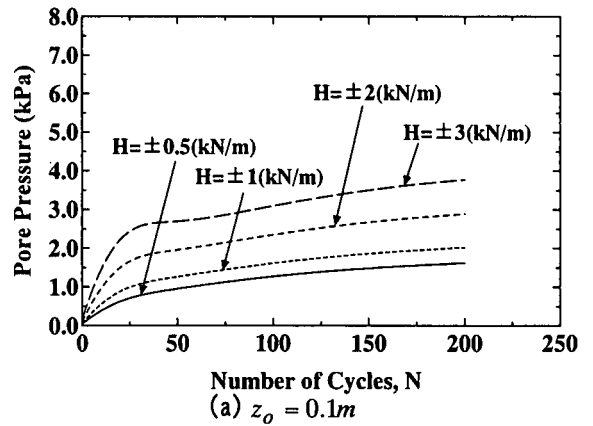
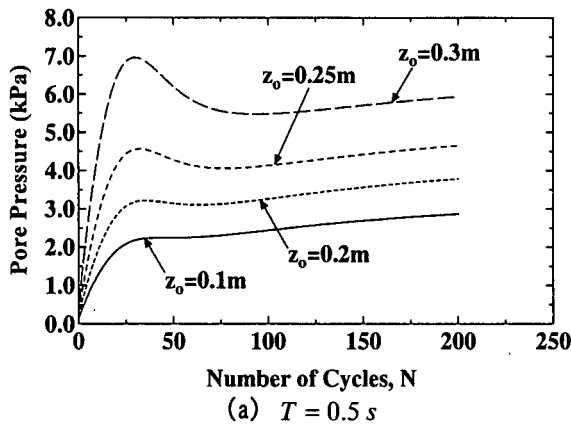


図-6 間隙水圧応答

($V_{\max} = V_o = 4 \text{ kN/m}$, $H = \pm 2 \text{ kN/m}$)

図-7 間隙水圧応答

($V_{\max} = V_o = 4 \text{ kN/m}$, $T = 1.5 \text{ s}$)

答が大きくなっていることがわかる。また、初期沈下量 z_o が $0.3m$ になれば、間隙水圧応答には鉛直荷重 V_o における間隙水圧上昇成分 p_1 によるピークが見られる。これは、初期沈下量 z_o が大きく、水平荷重の繰り返し周期 T が短くなるにつれて、水平荷重による間隙水圧上昇成分 p_1 がより顕著なものとなって現れるためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、繰り返し水平荷重を受けるパイプラインに関する一連の遠心模型実験結果より、パイプライン直下地盤の間隙水圧応答に及ぼす諸要因を取りまとめることにより、間隙水圧上昇に影響を及ぼす因子より構成される間隙水圧の推定を行う予測評価式の提案を行った。特に、繰り返し载荷中のパイプライン直下における地盤剛性の低下については間

隙水圧の上昇が強く影響するものと考えられるため、予め地盤剛性の低下に関する諸要因を考慮した「地盤剛性の低下率 K_h 」を導入した。この地盤の剛性低下率 K_h については、パイプラインの初期沈下量や载荷条件を考慮に入れた繰り返し水平载荷中のパイプラインの鉛直および水平変位挙動より評価を行った。なお、紙面の都合上、水平荷重の繰り返し周期 T および最大鉛直荷重に対する鉛直荷重の比 V_o/V_{max} の間隙水圧応答に及ぼす影響について調べた図は示していないが、本研究で得られた結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) 水平荷重 H による間隙水圧上昇成分 p_1 はパイプラインの初期沈下量 z_o のみならず水平荷重と鉛直荷重の比 V_o/H に強く依存し、水平荷重 H の繰り返し周期 T が長くなるにつれて間隙水圧上昇成分 p_1 は減少する傾向を示す。
- 2) 鉛直荷重 V_o による間隙水圧上昇成分 p_2 は、水平荷重と鉛直荷重の比 V_o/H のみならず、鉛直荷重値 V_o の影響を受けて、水平荷重の繰り返し周期 T が長くなるにつれて間隙水圧上昇成分 p_2 はわずかに増加する傾向を示す。
- 3) パイプライン直径に対するパイプラインの初期沈下量の比 z_o/D が約 0.2 以上になると、間隙水圧応答に見られる間隙水圧上昇成分 p_1 によるピークは水平荷重の繰り返しサイクル 50 回以内に現れる。
- 4) 初期沈下量 z_o が増加し、水平荷重の繰り返し周期 T が短くなるにつれて、間隙水圧応答は水平荷重 H による間隙水圧上昇成分 p_1 に支配される。

参考文献

- 1) Taiebat, H., and Carter, J. P.: A Semi-empirical Method for the Liquefaction Analysis of Offshore Foundations, *Int. J. for Num. and Anal. Methods in Geomech.* Vol.24, pp.991-1011, 2000.
- 2) Murff, J. D. : The Geotechnical Centrifuge in Offshore Engineering, *Offshore Technology Conference 8265*, Houston, Texas, 1996.
- 3) Stewart, D. P., Zhang, J. and Randolph, M. F.: North West Shelf Second Trunkline Project: Soil Response Modelling, GEO: 97193, *The University of Western Australia*, 1998.
- 4) Blinco, J. : Pipeline Modelling in Silica Sand, Honours Thesis, *The University of Western Australia*, 2000.
- 5) Zhang, J., Stewart, D. P. and Randolph, M. F.: Centrifuge Modelling of Drained Behaviour for Pipelines Shallowly Embedded in Calcareous Sand, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol.1, No.1, pp.25-39, 2001.
- 6) Zhang, J., Stewart, D. P. and Randolph, M. F.: Vertical Load-Displacement Response of Untrenched Pipelines, *Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.12, No.1, pp.74-80, 2002.
- 7) 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.

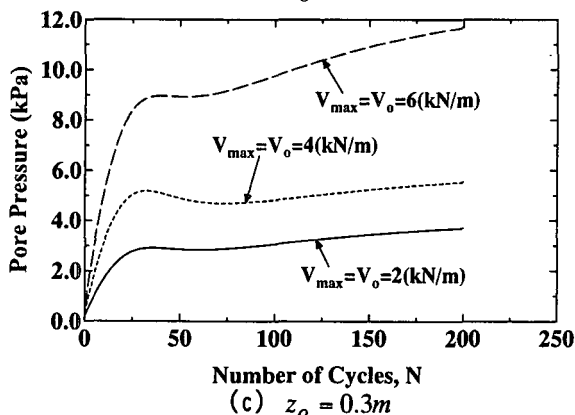
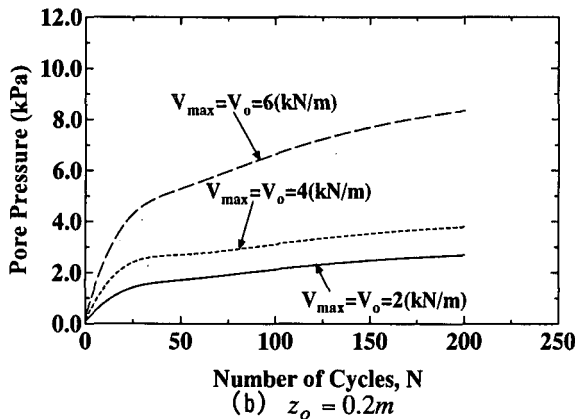
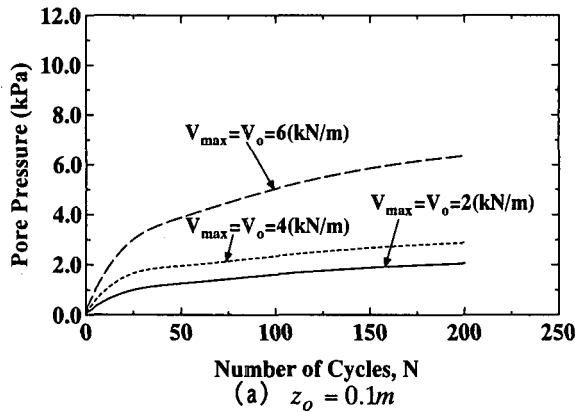


図-8 間隙水圧応答 ($H/V_o = 0.5, T = 1.5s$)