

# 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

PORE PRESSURE BUILD-UP RESPONSE  
DUE TO CYCLIC LOADING OF PIPELINE

高谷富也<sup>1</sup>・小河史枝<sup>2</sup>

Tomiya TAKATANI, Fumie OGAWA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>学生員 岐阜大学工学部 社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

An advanced finite element analysis for liquefaction process is carried out in order to simulate pore pressure accumulation in seabed around a pipeline due to horizontal cyclic loading. Pore pressure build up response in seabed due to horizontal cyclic loading of a pipeline is numerically investigated through some examples from the viewpoint of the horizontal cyclic displacement and the stiffness of joint element between the pipeline and seabed. The displacement behavior of the pipeline, the effective stress path and the shear stress-strain relationship in the seabed around the pipeline are obtained by this numerical analysis. Pore pressure build up response greatly depends on not only the horizontal cyclic displacement but also the stiffness of joint element.

**Key Words :** *Cyclic loading of pipeline, displacement behavior, pore water pressure accumulation, effective stress path, liquefaction analysis*

## 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、パイプライン周辺地盤において間隙水圧の上昇が生じる。その結果、間隙水圧の上昇は地盤剛性の低下をもたらす。この地盤剛性の低下により、パイプラインには局所的な大きな沈下や水平移動が生じ、とく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、その機能が麻痺することになる。このため、パイプライン直下の地盤に発生する間隙水圧上昇を評価することが設計上重要な課題と言えよう。そこで、パイプラインが敷設される現地地盤と同じ応力状態を模擬できる遠心载荷実験装置を用いて、繰り返し水平载荷を受けるパイプラインの変位挙動のみならずパイプライン直下の海底地盤の間隙水圧応答を求めた実験結果<sup>1)</sup>より、筆者は繰り返し水平载荷を受ける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を行うために、その予測評価式の提案を行った<sup>2), 3)</sup>。

本研究は、遠心载荷実験結果を模擬するために、第1段階として構造物-地盤系の液状化解析プログラムを用いて、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、間隙水圧上昇および地盤剛性の低下に影響を及ぼす要因について調べたものである。

## 2. 間隙水圧応答解析について

本研究では、有効応力に基づいた構造物-地盤系の液状化解析プログラム<sup>4)</sup>を用いて、繰り返し水平载荷を受けるパイプライン直下周辺地盤内部の間隙水圧応答を求める。図-1は、パイプラインの初期埋設深さを $z_0 = 0.25$  mとした場合における解析領域 $3.5$  m $\times$  $5.0$  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 $1.0$  m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、地盤は砂質地盤としている。また、パイプラインに与える载荷条件としては、正弦波形の強制水平変位振幅 $H_d = 0.5, 1.0, 2.0, 5.0$  mmおよび繰り返し周波数 $f = 0.5, 1.0, 2.0$  Hzの組み合わせとしている。なお、パイプラインの鉛直方向には常に一定荷重として $V = 2$  kN/mを節点 $o$ に強制水平変位 $H_d$ と同時に作用させている。

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強制変位の変位振幅、载荷周波数およびジョイント要素の剛性条件の影響を調べる。

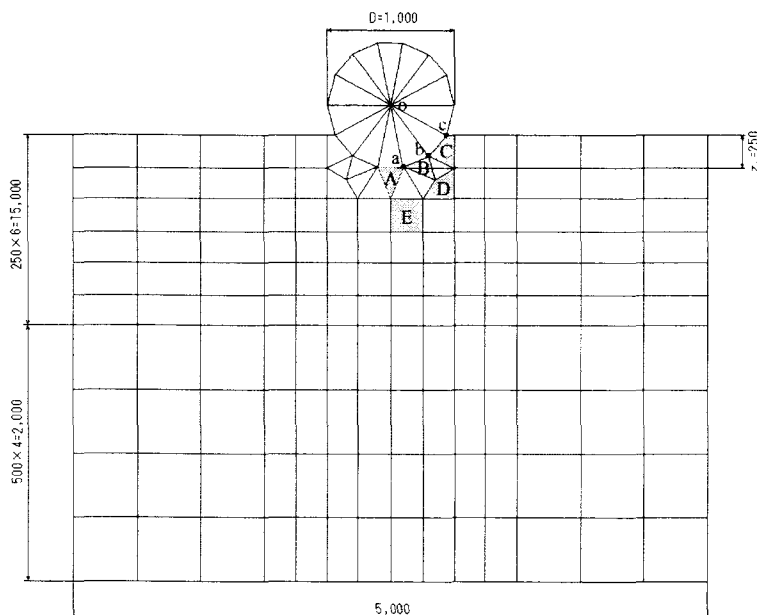


図-1 解析用メッシュ図 (単位: mm)

表-1 地盤モデルの諸定係数

平均有効拘束圧に対応する初期せん断剛性 $G_{ma}$ (kPa)	112,400	
平均有効拘束圧に対応する体積弾性係数 $K_{ma}$ (kPa)	299,700	
間隙水の体積弾性係数 $K_f$ (kPa)	$2.2 \times 10^6$	
間隙率 $n$	0.45	
質量密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.95	
ポアソン比 $\nu$	0.33	
減衰係数 $H_m$	0.3	
摩擦角 $\phi$ (度)	35	
液状化フロントパラメータ <sup>4)</sup>	$p_1$	0.5
	$p_2$	1.3
	$w_1$	7.0
	$S_1$	0.005
	$c_1$	1.5

表-1は本解析に用いた砂質地盤の諸定数を示したものである。液状化を考慮する地盤要素にはマルチスプリングモデル<sup>5)</sup>を用いる。また、表-2はパイプラインと地盤の接触面に設置したジョイント要素の剛性を示したものである。ジョイント要素の導入は、パイプラインと地盤の接触面における滑りや摩擦等が地盤の変形や間隙水圧応答に及ぼす影響を考慮したものである。ジョイント要素の剛性を小さくすれば、強制変位を受けるパイプラインの挙動を緩和した状態で地盤に伝達することになる。

### 3. 数値結果とその考察

本章では、変位振幅、載荷周波数およびジョイント要素の剛性の違いがパイプラインと地盤のジョイ

表-2 ジョイント要素の剛性

	垂直方向 接線剛性 $K_n$ (kN/m)	せん断方向 接線剛性 $K_s$ (kN/m)
Type 1	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^3$
Type 2	$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^5$
Type 3	$1.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^7$

ント要素節点変位および地盤内要素の応力、ひずみ履歴や間隙水圧応答に及ぼす影響について述べる。

図-2は、 $H_d = 5$  mm,  $f = 0.5$  Hzにおける地盤要素Aの応力-ひずみ関係、平均有効応力経路、過剰間隙水圧比  $P_{ex}$  を示したものである。なお、ジョイント要素剛性はType 1としている。この図から明らかのように、初期の繰り返し5回付近では、せん断応力が減少し、せん断ひずみが増加しているものの、その後せん断ひずみは減少して定常な正弦値となっている。このため、過剰間隙水圧比  $P_{ex}$  の応答においても顕著な上昇が見られず、液状化に至っていないことがわかる。なお、図-2(c)の過剰間隙水圧比  $P_{ex}$  は次式で定義される。

$$P_{ex} = 1 - \frac{\sigma_m'}{\sigma_{msl}'} \quad (1)$$

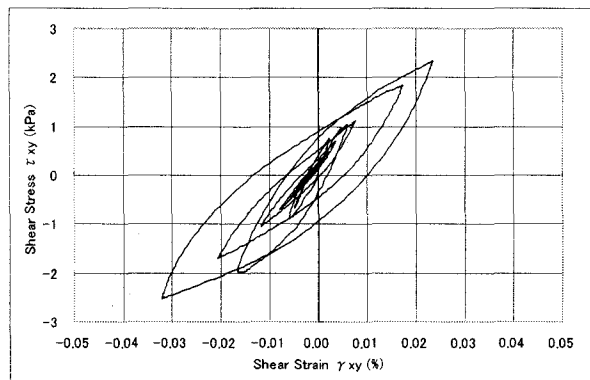
ここに、 $\sigma_{msl}'$ は初期の自重解析時における平均有効応力である。

図-3は、ジョイント要素剛性がType 2の場合に対する  $H_d = 5$  mm,  $f = 0.5$  Hzにおける地盤要素Aの応力-ひずみ関係、平均有効応力経路、過剰間隙水圧比を示したものである。この図より、体積圧縮による過剰間隙水圧の上昇とともに、繰り返しによるせん断ひずみの増加、せん断応力の減少が見られる。また、平均有効応力が繰り返しとともに減少し、地盤剛性が低下し、液状化に至っていることがわかる。なお、紙面の都合上、ジョイント要素の剛性がType 3の場合については示していないが、ジョイント要素の剛性が大きくなるにつれて、地盤剛性が低下し、せん断ひずみがより大きくなり、顕著な液状化傾向を示している。また、繰り返し載荷周波数  $f$  が高くなるにつれて少ない繰り返し回数で早期に液状化に至る傾向を示すことが分かった。

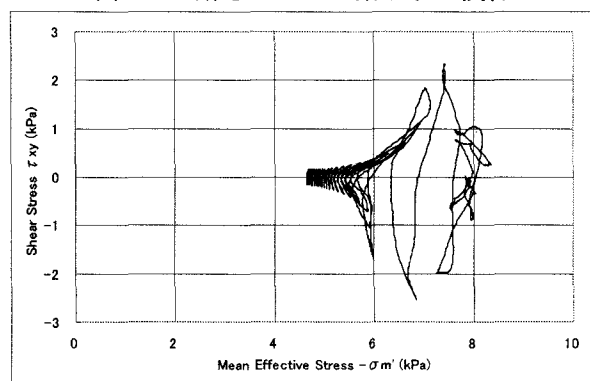
図-4は、ジョイント要素剛性がType 2の場合における強制変位振幅  $H_d$  の違いによるパイプライン

周辺地盤内要素A～Eにおける間隙水圧応答を図示したものである。なお、繰り返し载荷周波数  $f$  は 0.5 Hz としている。この図より、繰り返し初期においてパイプライン直下の要素Aよりも底面側方に位

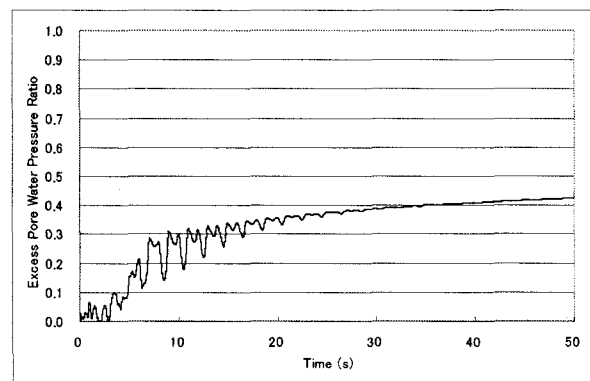
置する要素Bの間隙水圧の方が大きくなっており、繰り返し回数が増えるにつれて、パイプライン底面直下の地盤内要素AやEの間隙水圧の方が大きくなっていく。とくに、パイプラインに作用する変位



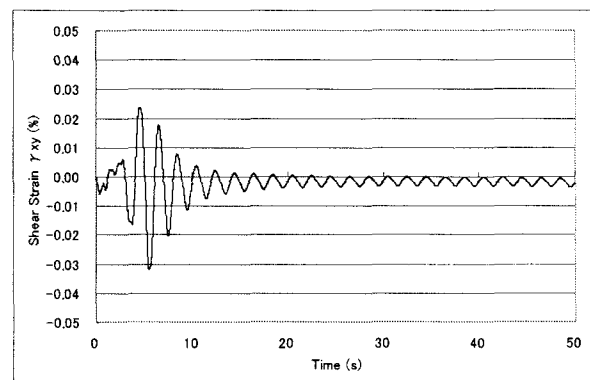
(a) せん断応力-せん断ひずみ関係



(b) 有効応力経路

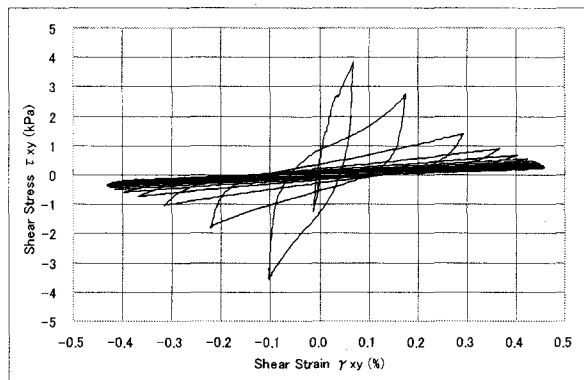


(c) 過剰間隙水圧比

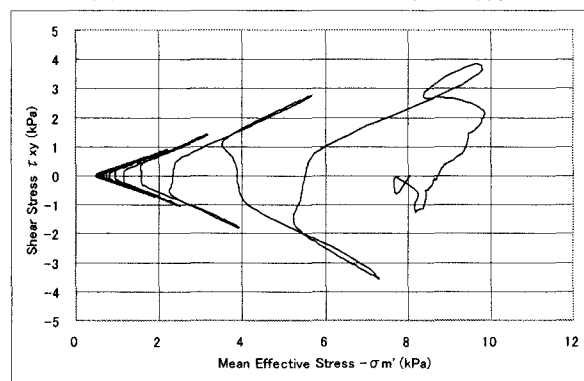


(d) せん断ひずみ履歴

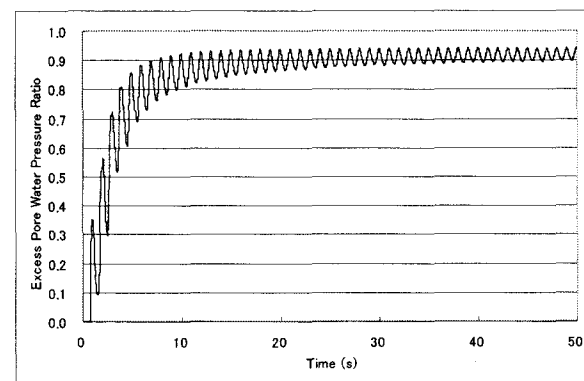
図-2 要素Aの応答履歴結果  
(Type 1,  $H_d = 5$  mm,  $f = 0.5$  Hz)



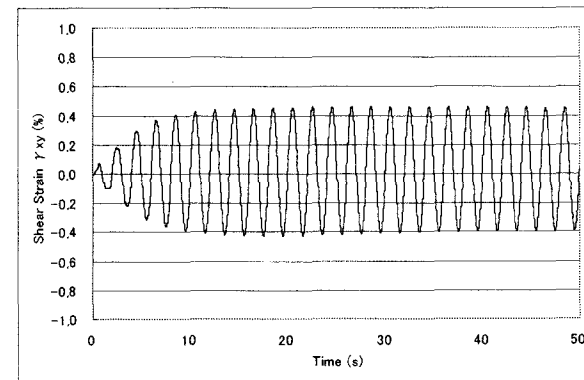
(a) せん断応力-せん断ひずみ関係



(b) 有効応力経路

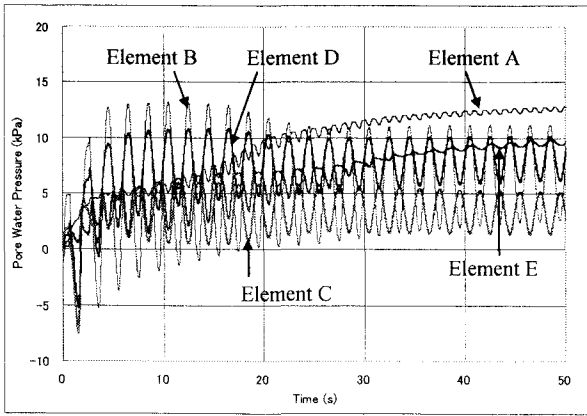


(c) 過剰間隙水圧比

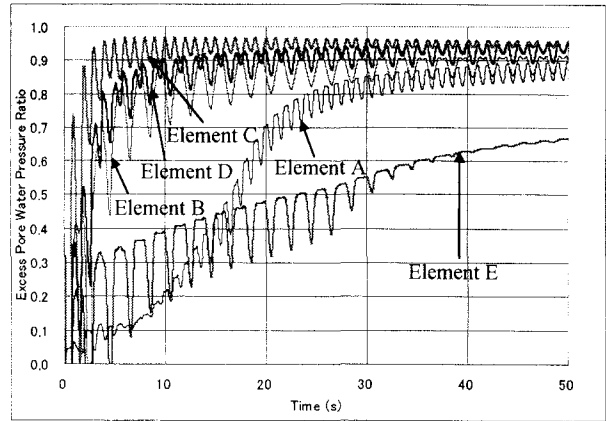


(d) せん断ひずみ履歴

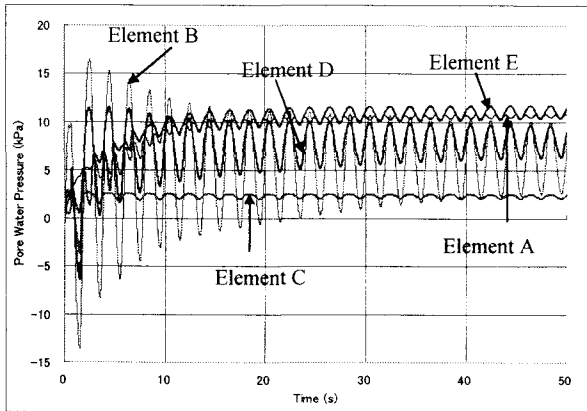
図-3 要素Aの応答履歴結果  
(Type 2,  $H_d = 5$  mm,  $f = 0.5$  Hz)



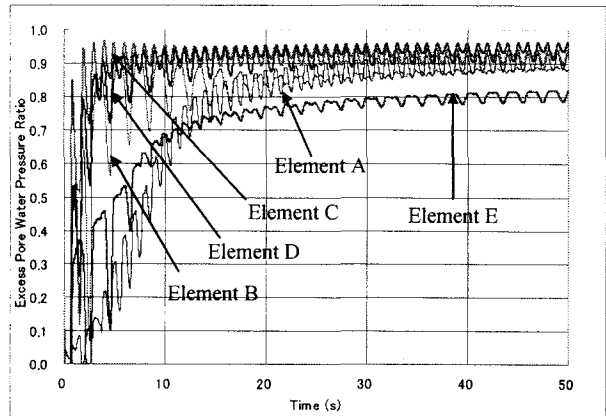
(a)  $H_d = 0.5$  mm



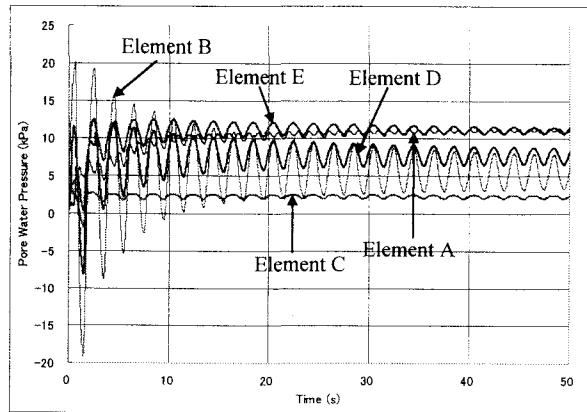
(a)  $H_d = 0.5$  mm



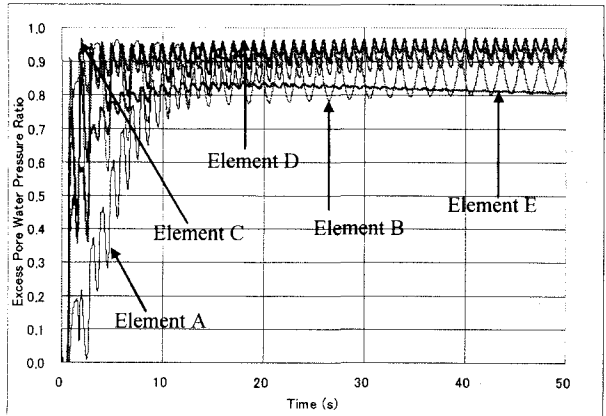
(b)  $H_d = 1$  mm



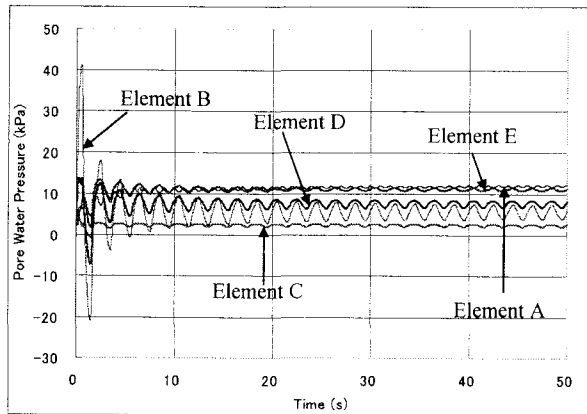
(b)  $H_d = 1$  mm



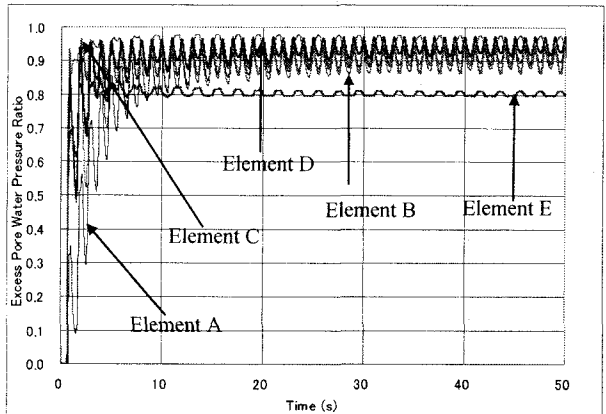
(c)  $H_d = 2$  mm



(c)  $H_d = 2$  mm



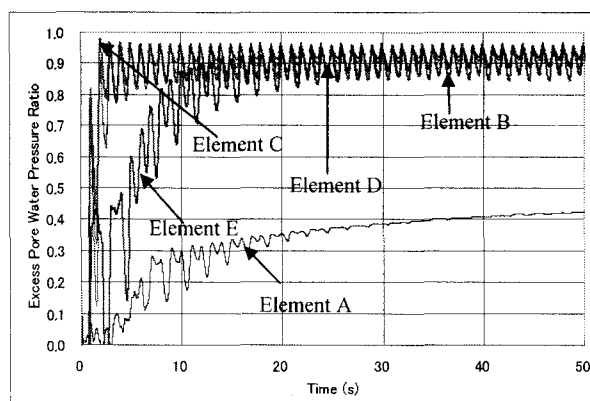
(d)  $H_d = 5$  mm



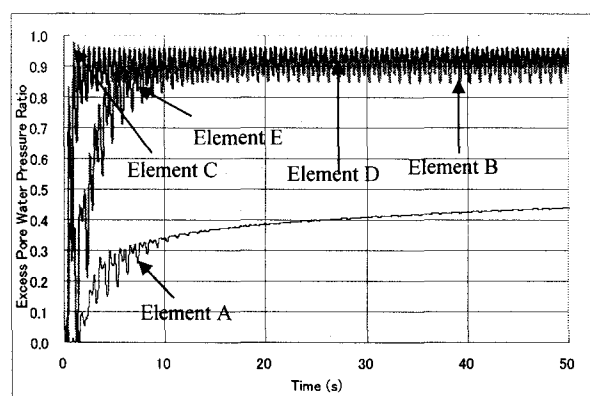
(d)  $H_d = 5$  mm

図-4 間隙水圧応答  
(Type 2,  $f = 0.5$  Hz)

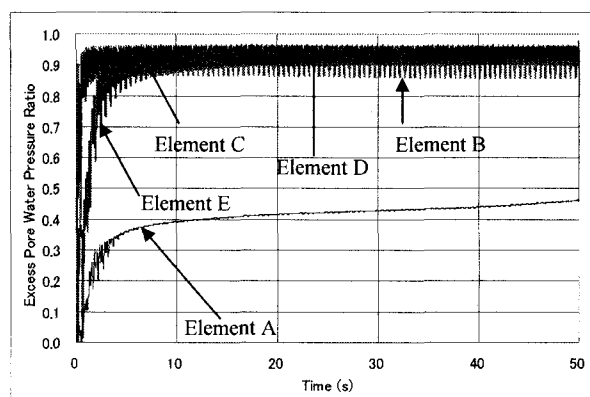
図-5 過剰間隙水圧比  
(Type 2,  $f = 0.5$  Hz)



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



(b)  $f = 1 \text{ Hz}$



(c)  $f = 2 \text{ Hz}$

図-6 間隙水圧応答  
(Type 1,  $H_d = 5 \text{ mm}$ )

振幅  $H_d$  が大きくなるにつれて、繰り返し初期において要素Bには非常に大きな間隙水圧が発生していることがわかる。これは、パイプラインによる地盤内要素における体積圧縮の増加傾向がパイプライン底面直下の要素Aよりも底面側方に位置する要素Bの方が大きいためであり、またパイプライン底面直下での要素Aの上載圧に比べて要素Bの方が小さいためと考えられる。

一方、図-5は図-4の場合と同じ条件のもとでのパイプライン直下地盤内要素A~Eにおける過剰間隙水圧比  $P_{ex}$  を図示したものである。図-4に示されている間隙水圧応答からでは判断しにくい液状

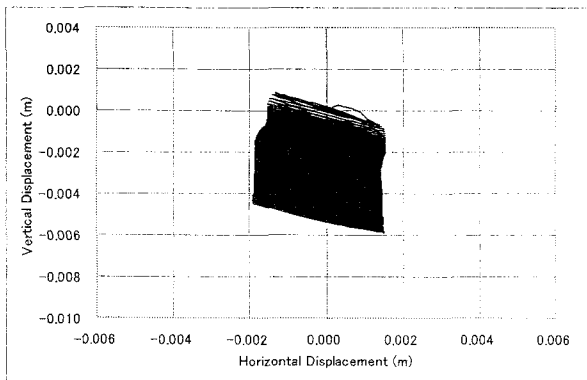
化の判定が、図-5に示されている過剰間隙水圧比  $P_{ex}$  から容易にできる。この図より、要素Bの過剰間隙水圧比  $P_{ex}$  は他の要素よりも繰り返し载荷早期に0.9以上になっており、液状化に至っていることがわかる。また、変位振幅  $H_d$  が小さい0.5 mmの場合には、パイプライン底面直下の要素Aや要素Eは他の要素に比べて载荷周波数  $f$  が低い場合には液状化しにくいことがわかる。さらに、変位振幅  $H_d$  が大きくなるにつれて、要素Aや要素Eは繰り返し回数少ない早期に液状化する傾向を示すことがわかる。

図-6は、ジョイント要素剛性がType 1の場合における繰り返し载荷周波数  $f$  の違いによるパイプライン直下地盤内要素A~Eにおける過剰間隙水圧比を図示したものである。なお、変位振幅  $H_d$  は5 mmとしている。この図より、繰り返し载荷周波数  $f$  が低い場合にはパイプライン底面直下の要素Aは他の要素に比べて液状化しにくいことがわかる。また、载荷周波数  $f$  が高くなるにつれて、要素Eは早期に液状化する傾向を示すことがわかる。なお、ジョイント要素の剛性が小さいので、パイプライン底面直下の要素Aは液状化に至っていないことがわかる。紙面の都合上ここには図示していないが、ジョイント要素の剛性が大きくなれば、パイプライン底面直下に位置する要素Aや要素Eも早期に液状化に至ることが容易に想像できよう。

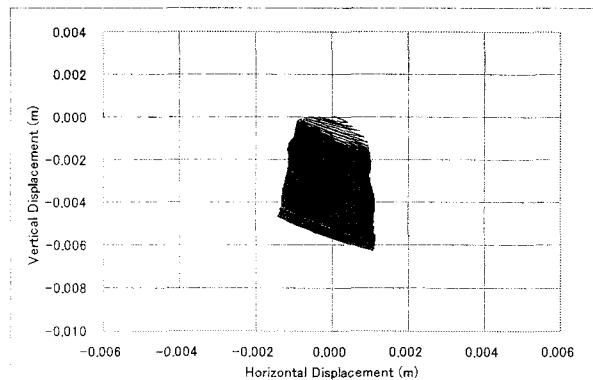
図-7は、繰り返し载荷周波数  $f = 2 \text{ Hz}$  におけるパイプライン側と地盤側のジョイント要素を挟んだ節点における変位応答を比較したものである。なお、ジョイント要素剛性はType 1、変位振幅  $H_d$  は5 mmとしている。また、下添字の  $p$  および  $s$  はそれぞれパイプライン側および地盤側を意味する。この図より、ジョイント要素の剛性が小さいため、パイプライン底面直下に位置する節点  $a_p$  および  $a_s$  における変位には顕著な差異が見られるが、図-7(e), (f) から明らかなように、底面から離れるにつれて両者の差異は小さくなっていることがわかる。このため、ジョイント要素の剛性が大きいType 3では両者の差異がほとんど現れないと考えられる。

#### 4. おわりに

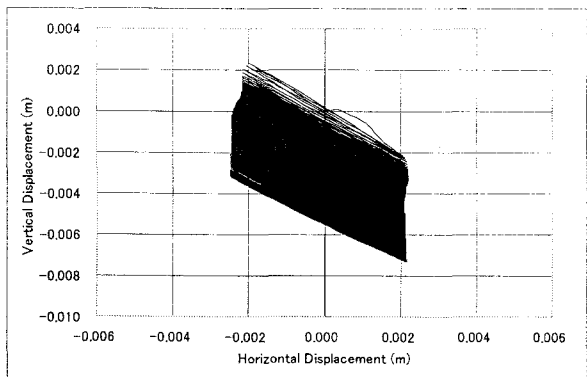
本研究は、有効応力に基づいた構造物-地盤系の液状化解析プログラムを用いて、パイプラインに繰り返しの強制水平変位を与えた場合の地盤内部の変位、応力、ひずみおよび間隙水圧応答を求めた。なお、パイプラインと地盤との接触面にはジョイント要素を配置した。その結果、繰り返し载荷周波数  $f$  が高くなるにつれて間隙水圧の上昇が少ない繰り返し回数で生じる傾向にあることがわかった。また、同じ繰り返し载荷周波数  $f$  による強制変位をパイプラインに载荷した場合、水平変位振幅  $H_d$  が小さくなるにつれて間隙水圧の上昇は遅くなる傾向にあった。さらに、繰り返し载荷の回数が少ない時点において、水平変位振幅  $H_d$  が大きい場合には、せん断



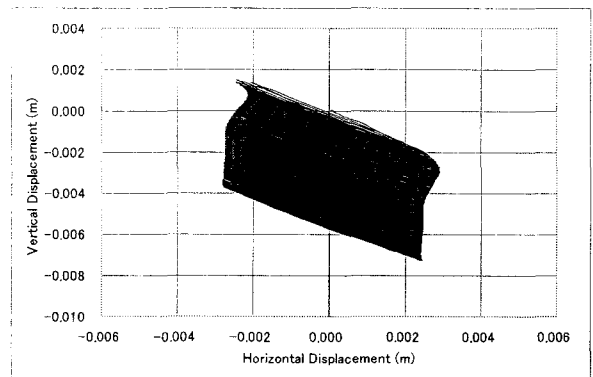
(a) 節点  $a_p$



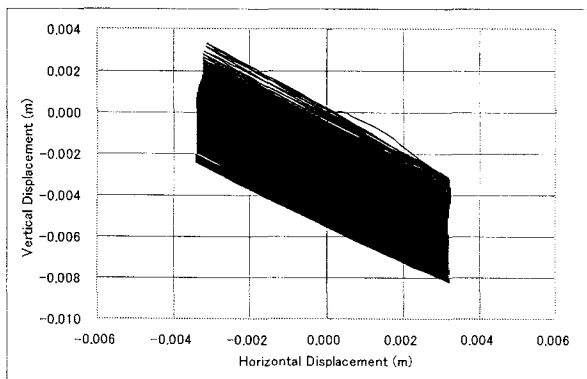
(b) 節点  $a_s$



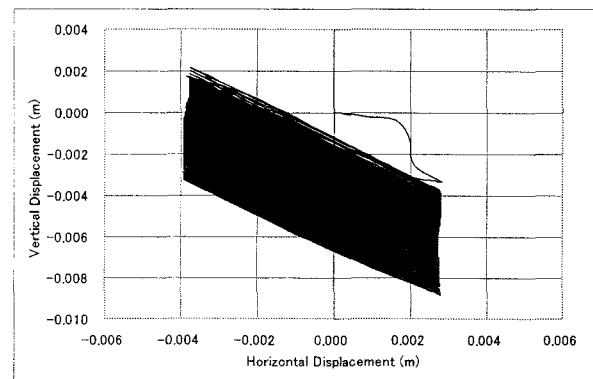
(c) 節点  $b_p$



(d) 節点  $b_s$



(e) 節点  $c_p$



(f) 節点  $c_s$

図-7 ジョイント要素の節点変位応答 (Type 1,  $H_d = 5\text{ mm}$ ,  $f = 2\text{ Hz}$ )

応力が急激に小さくなり、せん断ひずみが大きくなる液状化の傾向を示すことが明らかとなった。

ところで、本研究は地盤モデルとして表-1に示した土質定数を用いて応答解析を実施し、応答結果に対する考察を行ったものである。しかしながら、土質定数の違いによる応答解析結果への影響を考えれば、いくつかのパラメータ・スタディが必要であると考えられよう。これについては今後の課題としたい。

#### 参考文献

1) 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.

2) 高谷富也, M.F. Randolph : 繰り返し水平荷重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.

3) 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.

4) 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.

5) 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.