

軟弱地盤を有する不整形地盤内の 水道管の地震応答に関する基礎的検討

梶田 幸秀¹・佐藤 麻衣子²

¹正会員 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744）

E-mail: ykajita@doc.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程
（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744）

E-mail: sato@doc.kyushu-u.ac.jp

本研究では、不整形地盤が水道管の応答に与える影響について着目し、工学的基盤面が傾いている不整形地盤と成層である整形地盤について解析を行い、水道管の応答を比較した。その際、液状化層の深度、工学的基盤面の傾きを変更し、その影響についても検討した。水道管の鉛直変位については、いずれのケースでもほとんど変化しなかった。しかし、水道管の水平変位については、工学的基盤面の傾斜が緩やかな場合は整形地盤とほとんど同じ変位であったのに対し、工学的基盤面の傾きが大きくなると整形地盤の場合と差が生じ、水道管の変位が大きくなることが分かった。

Key Words : Liquefaction, irregularity of base surface, water pipeline

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方だけでなく、震源から離れた関東地方の広い範囲でも液状化が発生した。表-1に、2011年東北地方太平洋沖地震による都道府県別の断水戸数を示す¹⁾。津波や地震動による被害が著しいとされる岩手県、宮城県、福島県の他、液状化による被害が甚大であった茨城県、千葉県がそれぞれ30万戸を越え、突出した被害状況であった。特に茨城県での断水率は80.5%となっており、最も高くなっている。破損した水道管の多くは、ダクタイル鋳鉄管の耐震継手が用いられていないものなど、耐震化が行われていない水道管であった。しかし、平成18年度管路の耐震化に関する検討会報告書²⁾では、硬質塩化ビニル管のRRロング継手においては、使用期間が短く、基幹管路が備えるべき耐震性能を判断する被災経験はないとしながらも、各水道事業者の判断により耐震管路として採用することは可能であるとしていたが、2011年東北地方太平洋沖地震

表-1 東日本大震災における都道府県別断水戸数

都道府県	断水発生事業体の 行政区域内戸数	総断水戸数 (最大断水戸数)
北海道	6,100	40
青森県	295,700	3,988
岩手県	485,000	195,640
宮城県	906,100	643,441
秋田県	345,700	58,515
山形県	265,700	9,866
福島県	654,800	420,606
茨城県	995,200	801,018
栃木県	257,700	54,861
群馬県	379,800	2,530
埼玉県	149,100	42,309
千葉県	2,141,000	300,778
東京都	6,105,600	21,000
神奈川県	3,644,500	2,794
新潟県	130,000	2,852
山梨県	68,300	4,320
長野県	56,400	1,488
岐阜県	64,300	325
静岡県	364,900	839
計	17,315,900	2,567,210

では、10箇所で被害が発生しているおり、その被害原因のすべてが液状化によるものであった¹⁾。

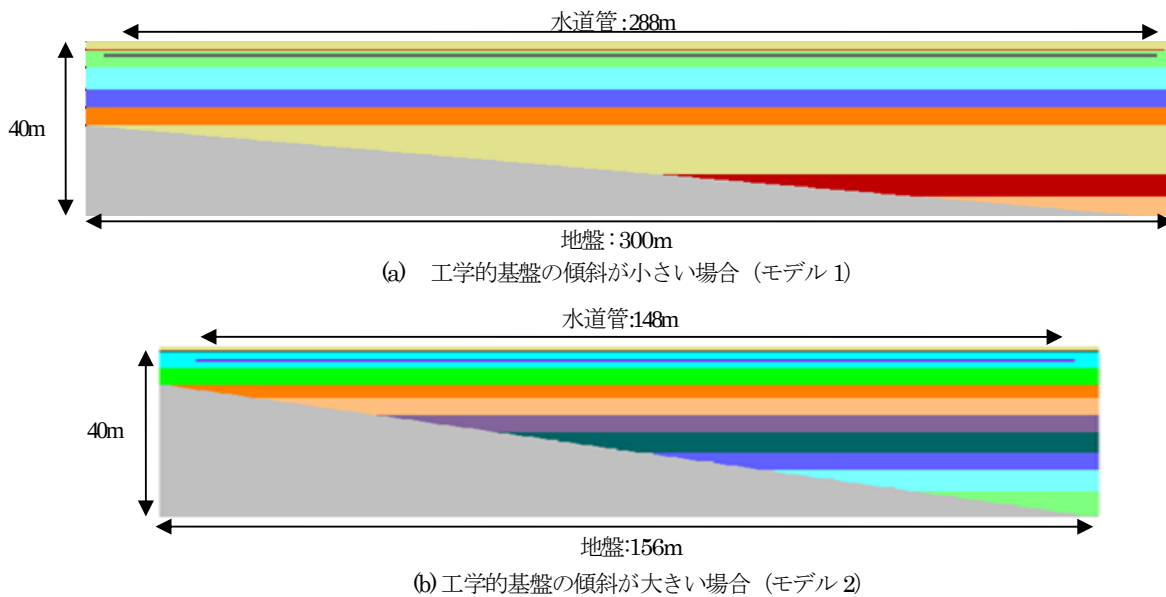


図-1 地盤モデル

水道施設耐震工法指針・解説³⁾では、不整形地盤である場合、地盤ひずみの増幅が指摘されており、層厚の変化がある沖積地盤、河川流域、大規模な盛土・切土の造成地などでは、基準の地盤歪みに不均一度係数を乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮することとされている。また、液状化が発生すると考えられる場合、耐震設計上の地盤定数を液状化の程度に応じ低減させること、液状化対策を講じることなどが定められているが、液状化した際に不整形地盤が整形地盤に対して、地盤定数の低減にどの程度影響を与えるのかについては特筆されていない。しかし、上記のように被災経験はなかったものの、耐震性を有するとして用いられた硬質塩化ビニル管のRRロング継手に破損が生じていることから、液状化した際に、設計基準より大きな地盤変位が生じている可能性があり、現在の耐震基準の見直しが必要であると考えられる。

井上らの研究⁴⁾では、工学的基盤面が成層でない地盤において埋設管等を設けず、地盤のみの解析を行うことで地盤特性を明らかにしている。井上らは、水平方向の地盤の軸ひずみが大きくなることから、埋設管が長柱座屈を起こすなどの影響が出ることを指摘している。相原らの研究⁵⁾では、溺れ谷のような液状化層がかなり厚く、工学的基盤面の傾斜も大きな地点での水道管の地震応答解析を行っている。液状化により埋設管が大きく変形することが示されている。相原らは、はじめに有効応力解析プログラムFLIP[®]で解析を行う際には水道管をモデル化させず、地盤のみで解析を行っている。その後ABAQUSを用いるという二段階の方法で解析を行ってい

る。この解析で液状化による地盤のせん断剛性の程度を調べ、その結果をABAQUSを用いた解析に用いることで液状化による水道管の応答について検討している。しかし、工学的基盤面の傾斜が地盤に大きな相対変位を与えるか検討している事例は少ない。このような背景をふまえ、著者らは、不整形地盤が水道管に及ぼす影響を調べるため、工学的基盤面が傾斜している不整形地盤内の水道管の挙動について、実地盤データをもとに2次元有効応力解析を実施し、整形地盤内の水道管の挙動との比較検討を行った。また、その際液状化層の深度を変更して解析を行うことで液状化層の存在位置が不整形地盤内の水道管の挙動に影響を及ぼすか検討することとした。

2. 解析条件

福岡市中央区の実地盤データを元に地盤モデルを作成した。地盤データは、公益社団法人地盤工学会の全国地盤図によるデータである。図-1に示すとおり、工学的基盤面の傾斜が約8%と小さい場合と、傾斜が約20%の大きい場合の2種類のモデル地盤を作成した。この地盤モデルの土層パラメータの設定値を表-2に示す。モデル1の場合はlayer 9、モデル2の場合はlayer 11が工学的基盤を表す。また、土層の種類や厚さは変更せず工学的基盤面を地表面から深さ37mのところに設定したモデルを整形地盤モデルとして作成した。つまり整形地盤モデルは、工学的基盤が3m存在するモデルである。整形地盤と不整形地盤の水道管の応答の違いに加えて、液状化層の有無や、液状化層の深度の違いによる水道管の変位の違い

表-2 土層パラメータ

(a) モデル 1				(b) モデル 2			
土層区分	ρ_t	N値	φ_f	土層区分	ρ_t	N値	φ_f
	(t/m^3)		($^{\circ}$)		(t/m^3)		($^{\circ}$)
layer1	1.8	5	39	layer1	1.8	4	39
layer2	2.0	15	42	layer2	2.0	12	40
layer3	1.8	23	42	layer3	2.0	21	43
layer4	1.4	8	37	layer4	2.0	18	40
layer5	1.4	14	38	layer5	2.0	8	37
layer6	2.0	23	39	layer6	2.0	15	38
layer7	2.0	26	38	layer7	2.0	23	39
layer8	2.0	27	38	layer8	2.0	22	38
layer9	2.0	50	39	layer9	2.0	26	38
				layer10	2.0	27	38
				layer11	2.0	50	40

表-3 検討ケース

(a) モデル 1		(b) モデル 2	
	液状化層位置		液状化層位置
case1	深さ2m～11m	case1	深さ1m～9m
case2	深さ11m～19m	case2	なし
case3	なし		

表-4 ジョイント要素設定値

	自重解析			動的解析		
	Kn(kPa)	Ks(kPa)	$\varphi_j(^{\circ})$	Kn(kPa)	Ks(kPa)	$\varphi_j(^{\circ})$
水道管側面	1000000	0	15	1000000	1000000	15
水道管底面	1000000	1000000	31	1000000	1000000	31

を調べるため、表-3に示す3ケースを整形地盤、不整形地盤とともに解析を行った。液状化層のN値はいずれも2とした。液状化パラメータは簡易設定法を用いて設定している^{6) 7)}。また、入力波として図-2に示す最大加速度600gal, 周期0.8秒の正弦波の前後にテーパをかけたものを工学的基盤の下面（地表面から深さ40mのところ）に入力している。水道管と地盤との間のジョイント要素の設定値は文献8)を参考にし定めた。設定値を表-4に示す。地下水位については、モデル1では地表面から2m, モデル2では地表面から1mの位置とした。解析上の条件としてwilson θ 法において $\theta=1.4$, Rayleigh減衰において $\alpha=0$, $\beta=0.002$ で計算を行った。水道管は線形平面要素として定義した。土層はマルチスプリング要素⁹⁾としてモデル化した。水道管は水道用硬質塩化ビニル管を対象とした。水道管のモデル化については2次元解析では円筒を再現することは困難であるため、正四角柱としてモデルを作

成している。その際、浮力による水道管の浮き上りを考慮できるように水道管の密度、体積が実際のものと同程度となるようにしており、断面二次モーメントに関しては、実際の水道管断面とは異なっている。実際の水道管では、継手やマンホールが水道管の挙動に影響を及ぼすと考えられるが今回は省略している。モデルの側面を粘性境界、底面を固定境界として、介せ積を行った。また、FLIP Ver. 6では排水条件を考慮できないため、解析においては非排水条件とした。

3. 解析結果

(1) 工学的基盤面の傾きが8%の場合

図-3 にモデル 1 の水道管の鉛直変位を示す。水道管の最終的な鉛直変位に関しては、液状化層の深度を変えても変位の違いは大きくないことがわかる。加えて、整

表-4 水道管物性値

ヤング率(kN/m^2)	2.85×10^6
ポアソン比	0.38
幅(m)	0.558
密度(t/m^3)	0.168

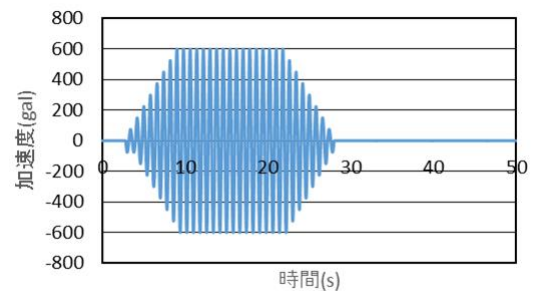
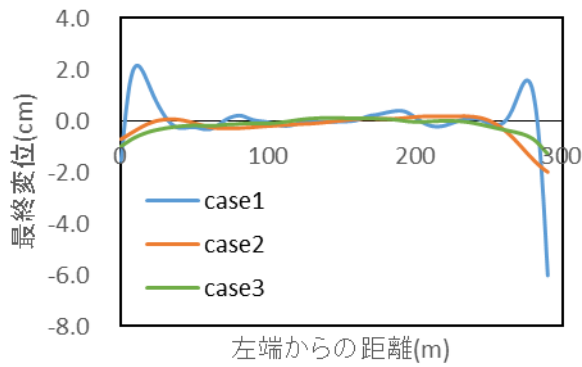
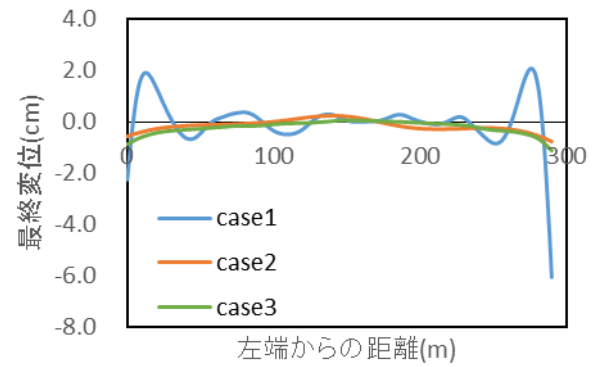


図-2 入力波加速度時刻歴

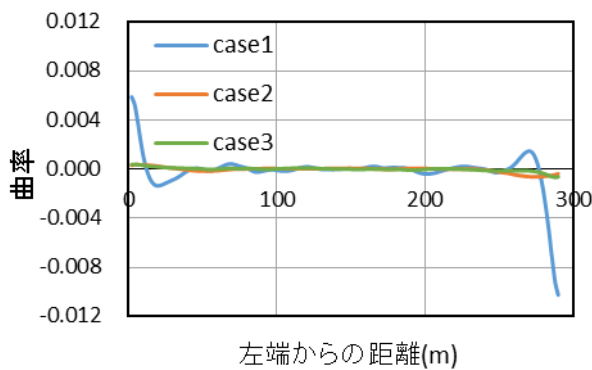


(a) 整形地盤

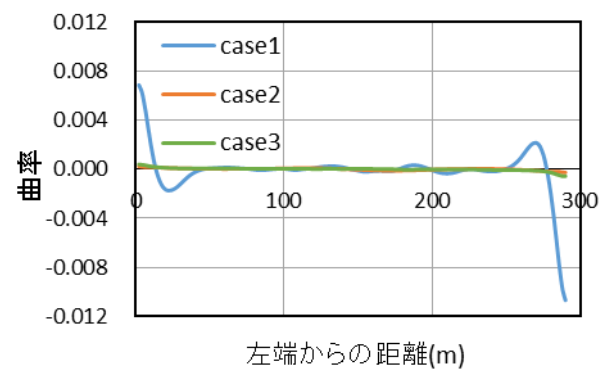


(b) 不整形地盤

図-3 モデル1水道管鉛直変位

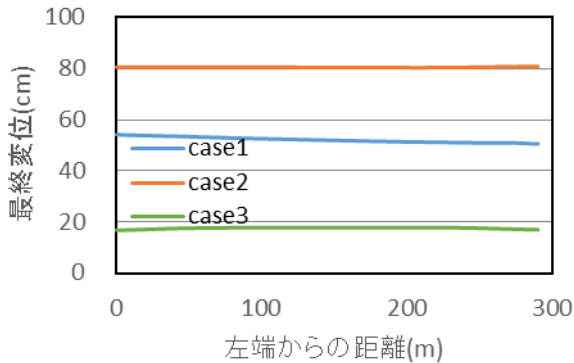


(a) 整形地盤

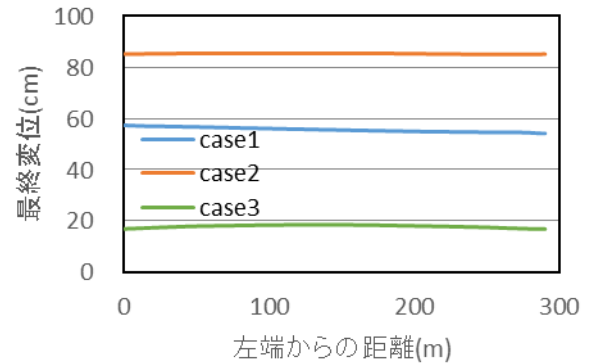


(b) 不整形地盤

図-4 モデル1水道管曲率分布



(a) 整形地盤



(b) 不整形地盤

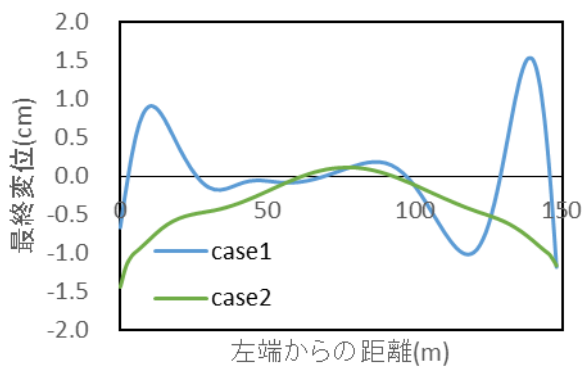
図-5 モデル1水道管水平変位

形地盤と不整形地盤の解析結果を比べても変位に差は見られない。図-4 に水道管の曲率分布を示す。変位の大きい case1 の水道管端部では曲率が大きくなったが、そのほかに関しては曲率は小さくなった。図-5 に水道管の最大水平変位を示す。液状化層が存在する case1 および case2 で大きな変位が起こっていることがわかる。この水平方向における大きな変位は、整形地盤、不整形地盤ともに起きており変位差も大きくないことがわかる。したがって、この大変形は工学的基盤面が傾斜していることによる影響ではなく、液状化層の流動化が起きたことによるものである。また、水平変位に関しては、液状

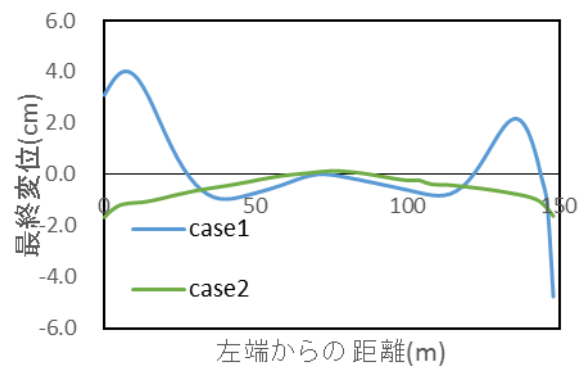
化層の位置が深いときの方が、水平応答変位が大きくなることが分かる。これは、加振中に液状化層が変位した際に液状化層に引きずられる形で上部の土層が変位するため、液状化層から離れる程地盤の変位量が大きくなる。したがって、液状化層の位置が深いときの方が水平応答変位が大きくなると考えられる。

(2) 工学的基盤面の傾きが 20% の場合

図-6 に水道管の最終的な鉛直変位を示す。モデル 1 と同様、液状化層の深度を変えても変位の違いは大きくなく、最終変位の整形地盤と不整形地盤の解析結果を比

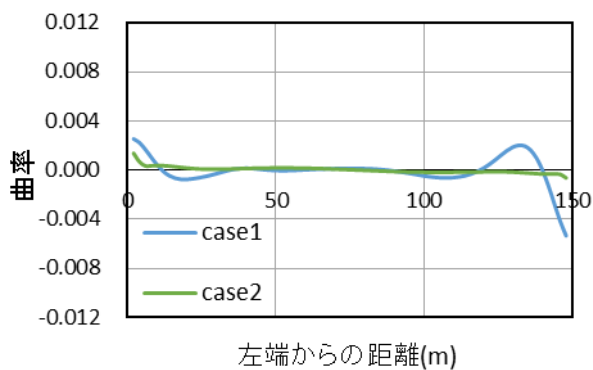


(a)整形地盤

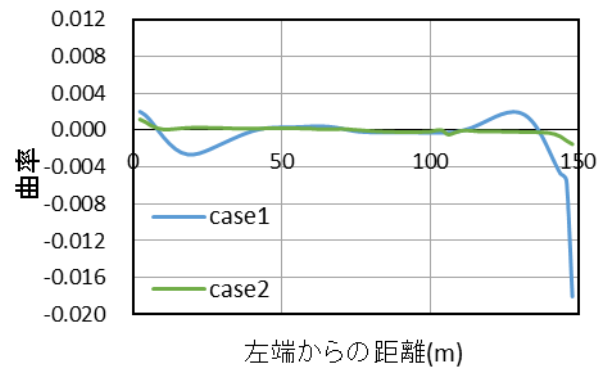


(b)不整形地盤

図-6 モデル2水道管鉛直変位

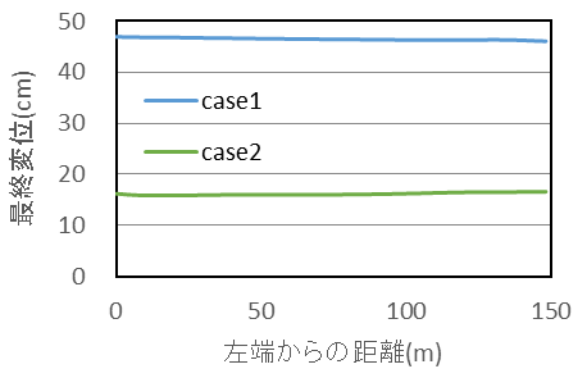


(a)整形地盤

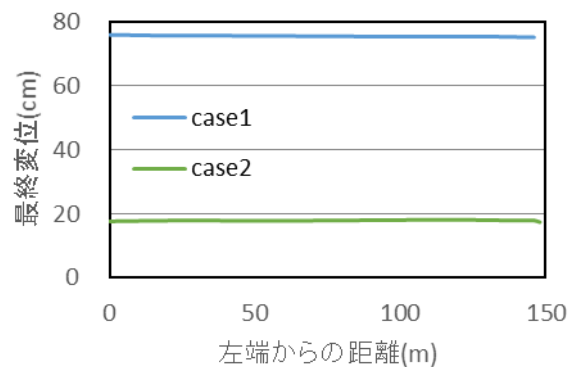


(b)不整形地盤

図-7 モデル2水道管鉛直方向曲率



(a)整形地盤



(b)不整形地盤

図-8 モデル2水道管水平変位

べても変位に差は見られない。図-7 に水道管の曲率分布を示す。モデル 1 と同様に、変位の大きい case1 の水道管端部では曲率が大きくなったが、そのほかに関しては曲率は小さくなった。次に図-8 に水道管の水平変位を示す。液状化層が存在する case1 で大きな変位が起きていることがわかる。この水平方向における大きな変位は、整形地盤、不整形地盤ともに起きているが、不整形地盤の場合の方が大きくなっており、工学的基盤面の傾斜が影響を与えていると考えられる。水平変位に関しては、80cm 程度の変位が見られモデル 1 の case1 よりも大きくなっている。このことより、工学的基盤面の傾斜

が大きくなると水道管の水平変位が、大きくなると考えられる。

4. 結論

本研究では、不整形地盤内で液状化が発生することで、水道管に影響を及ぼすと考え二次元有効応力解析による不整形地盤内の水道管の地震応答解析を行った。その際、工学的基盤面の傾斜角と液状化層の深度を変化させ検討した。その結果として得た知見について以下に記す。

- (1) 水道管の鉛直変位に関しては、水道管が液状化層内にある場合は水道管端部での変位は見られたものの、そのほかに大きな変位は見られなかった。
- (2) 水道管の水平変位に関しては、工学的基盤面が比較的緩やかな8%とした場合では、液状化層が地盤内に存在する場合水平変位が大きくなったが、整形地盤、不整形地盤とも同程度の変位となっており、工学的基盤面の傾斜の影響が見られなかった。
- (3) 工学的基盤面を急な20%とした場合では整形地盤の場合より不整形地盤の場合に水平変位が大きくなった。また、傾斜8%の場合と20%の場合の不整形地盤での水平変位を比較すると、工学的基盤面の傾斜が大きい20%の場合で水平変位が大きくなった。このことから、水平変位に関しては、工学的基盤面の傾斜の影響を受けると考えられる。
- 参考文献**
- 1) 厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書（平成 25 年 3 月），2013
 - 2) 厚生労働省：平成 18 年度管路の耐震化に関する検討会報告書，p.19，2007
 - 3) （公社）日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説（2009 年版），2009
 - 4) 井上佳樹，清野純史，清水謙司：地震時における埋設管の被害に及ぼす不整形地盤の影響に関する研究，土木学会論文集 A1，Vol.65，No.1，pp.214-221，2009
 - 5) （社）土木学会：地下構造物の耐震性能照査と地震対策ガイドライン(案)，pp.185-195，2011.
 - 6) 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タの簡易設定法，港湾技研資料，No.869，1997.
 - 7) Susumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEOKA : ANALYSIS OF UNDRAINED CYCLIC BEHAVIOR OF SAND UNDER ANISOTROPIC CONSOLIDATION, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.
 - 8) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集(平成 19 年改訂版)上巻，pp.1-68，2007.
 - 9) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling Soil Behavior under Principal Stress Axes Rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp. 523-530, 1985.

(2016. 9. 2 受付)

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS FOR UNDERGROUND PIPE IN SOFT GROUND CONSIDERING IRREGULARITY OF BASE SURFACE

Yukihide KAJITA, Maiko SATO

The purpose of this study is to confirm the ground response when the soft ground is stratification and engineering base surface tilts. From the calculation results, it is shown that the vertical displacement of the pipeline does not substantially change when the depth of liquefaction layers or the inclination angle of the engineering base are varied. But the horizontal displacement of the pipeline is larger as the engineering base surface tilt of the engineering base surface is large. Especially, the horizontal displacement is large when the pipeline is in the soft ground.