

液状化および基盤不整形の影響を受ける 埋設管の応答に関する考察

高田至郎¹・小川安雄²・小口憲武³・北野哲司⁴・
松本真明⁵・上野淳一⁶・田島知治⁷

¹フェロー会員 工博 神戸大学 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

²正会員 大阪ガス(株) 技術部 (〒541-0046 大阪市中央区平野町4-1-2)

³工修 東京ガス(株) 導管部 (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

⁴工修 東邦ガス(株) 供給管理部 (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町19-18)

⁵正会員 工修 住友金属工業(株) エネキ・エンジ・エリソク 技術部 (〒104-6111 東京都中央区晴海1-8-11)

⁶正会員 工修 住友金属工業(株) エネキ・エンジ・エリソク 技術部 (〒541-0041 大阪市中央区北浜4-5-33)

⁷正会員 住友金属工業(株) エネキ・エンジ・エリソク 技術部 (〒541-0041 大阪市中央区北浜4-5-33)

工学的基盤面が傾斜し、表層地盤厚の変化しているいわゆる浅層不整形地盤においては埋設管の被害が増加した事例が既往の地震調査結果において報告されている。そのために、現行の埋設管設計指針においても浅層不整形地盤に発生する地盤ひずみが考慮されている。本文では、不整形に加えて埋設位置近傍での液状化の影響を受ける管路の応答についての検討を行った。計算は液状化層のサイズ・位置をパラメータとし複数のケースについて行った。

Key Words : liquefaction, FEM analysis, buried pipeline, irregular layering ground, effective stress

1. はじめに

地中管路が埋設される地表面附近の地盤の変位応答、増幅、減衰などに不整形地盤の影響が強く現れた観測事例は数多い¹⁾。本文では、不整形地盤のなかでも堆積盆地あるいは切盛り境界のように不整形な境界面を地中に含む地盤のうち、一般に浅層不整形と称される傾斜した工学的基盤面を含む地盤に埋設された管路を検討対象としている。地震時に盆地端部等で地盤の応答が大きくなる事例はよく知られているが²⁾、地震時の管路被害も表層地盤層厚の急変部などで多く見られる。そのため、高圧ガス導管耐震設計指針(2000)においても、基盤面が傾斜していることによって生じる導管埋設位置での地盤ひずみ増分として、全ての基盤傾斜角に対して0.3%を考慮している。本文では、浅層不整形地盤に埋設された管路の近傍で液状化が発生した場合の管路の軸方向歪みに与える影響について検討する。不整形基盤に加えて、管路近傍の液状化部分を含む地盤を2次元モデル化(1100要素)し、有効応力解析コード(LIQCA2D-95)を用いて時刻歴解析を行った。液状化層のサイズと管路との位置関係および入力をパラメータとして13ケースの解析を行った。なお検討に先立ち、基盤傾斜が地表面付近の地盤歪みに与える影響についての検討を本研究で使用した2次元有効応力解析コード(LIQCA2D-95)で行い、他コードを用いた既往の検討結果との整合性を確認した。ま

た同解析コードと他の代表的な有効応力解析コード³⁾を用いて液状化材料からなる簡易なモデルを作成し、同等の応答変位を示す場合の間隙水圧上昇の状況と比較しその整合性についても確認した。

2. 解析モデル

基盤の傾斜角度(30°)、基盤深さ(GL-5m~50m)等の想定地盤条件は既往の検討結果⁴⁾を参考に設定した。図-1には基本的なモデル構成を示す。境界条件としては、底面固定、側方は鉛直方向を固定とし、左右両端の要素の両側を水平方向の等変位境界としている。地下水位は地表面を仮定した。

3. 材料パラメータ

液状化部分のパラメータは実際の地盤調査・室内試験結果を基に決定した。表-1には非液状化部分のパラメータを示す。表中の地層1はGL-5mまでの表層地盤を、地層2は不整形境界より上部の地盤を、地層3は下部の基盤を表している。非液状化地盤は非線形(R-0モデル)とした。GL-1.5mにはφ600の鋼管をモデル化した梁要素を配している。なお、管路のすべりは考慮していない。

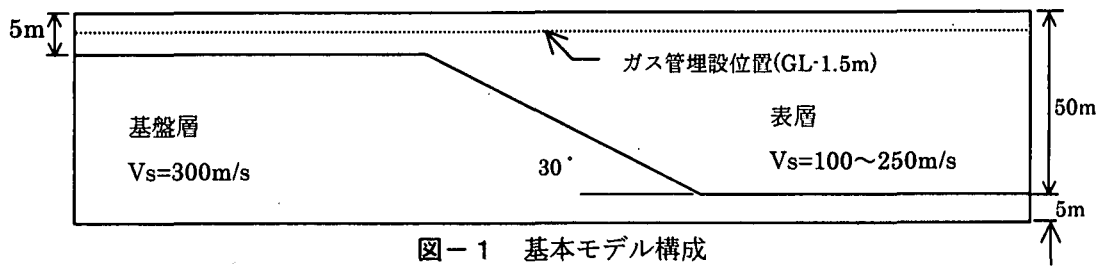
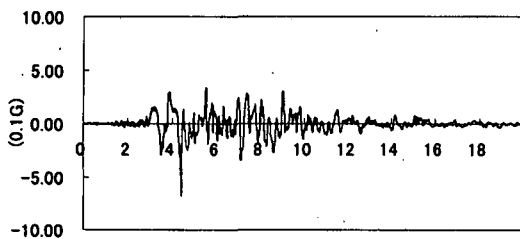


図-1 基本モデル構成

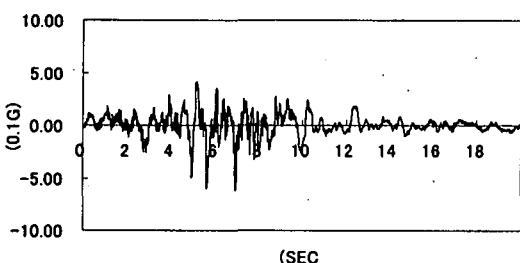
表-2 非液化化地盤パラメータ

	地層1	地層2	地層3
Vs	150m/s	225m/s	300m/s
MT	7 (R=0, 水中)	同左	同左
e0	0.8	0.75	0.7
vポアソン比	0.33	同左	同左
K/γw	1.0E-8	同左	同左
g	9.8	同左	同左
静止土圧係数	0.5	同左	同左
単重	1.8	1.8 - 2.0	2.0
ρ 密度	0.184	同左	0.204
Vp	300m/s	450m/s	600m/s
基準歪み	1.2E-03	1.0E-03	3E-04
hmax	0.30	0.30	0.20
C	10t/m ²	15t/m ²	20t/m ²
α=2Γ-1	3.48	同左	1.89
Γ = $\frac{(2+\pi h_{max})}{(2-\pi h_{max})}$	2.80	同左	1.92
Kf	0	0	0
α1	30000 - 500	500 - 450	18000
nl	1	1	0

4. 入力地震動



(a) ポートアイランド観測波 (Case10)



(b) 東神戸大橋観測波 (Case11~Case13)
図-2 入力地震動

入力地震動としては変調正弦波(最大 500gal、2Hz、10sec)および、図-2に示す実地震波を用いた。

5. 解析のケース

表-3には、解析ケースの一覧を示す。

6. 解析結果

以下、GL-1.5m に設置した梁要素の軸方向歪みに着目し考察を加える。各ケースの管軸方向歪みの最大値を表-4に示す。

表-4 梁要素軸方向歪みの最大値

	圧縮	引張
Case1	0.049%	0.044%
Case2	0.031%	0.032%
Case3	0.018%	0.018%
Case4	0.056%	0.052%
Case5	0.060%	0.059%
Case6	0.047%	0.044%
Case7	0.055%	0.051%
Case8	0.068%	0.068%
Case9	0.074%	0.079%
Case10	0.131%	0.107%
Case11	0.180%	0.148%
Case12	0.225%	0.197%
Case13	0.21%	0.07%

Case1 から Case5 において、傾斜のみの場合、液化化層のみの場合、傾斜+液化化層の場合の最大値を比較すれば、基盤傾斜+液化化層というケースで歪みが大きくなる結果となった。最大軸歪みの発生位置は、成層地盤に液化化層がある場合 (Case2、Case3) は、液化化層の両端部の直上であった。傾斜のみの場合 (Case1) は基盤傾斜部上、基盤傾斜区間の上部に液化化層が存在する場合 (Case4、Case5) は、法肩側の液化化層端部直上であった。Case6~Case9 では、液化化層の幅と深さを変えたケースの検討を行い液化化層の影響について検討を行った。歪みが最大となったのは Case9、すなわち幅・深さとも大きいケースであり、歪みが最大となる場所は、法肩から約 40m 右側の場所で、液化化層左端直上付近である。圧縮側と引っ張り側の分布に差はない。

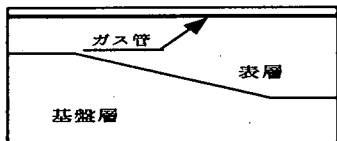
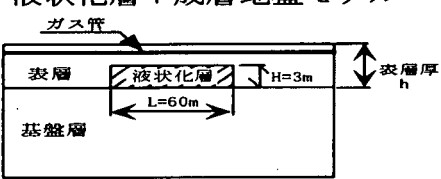
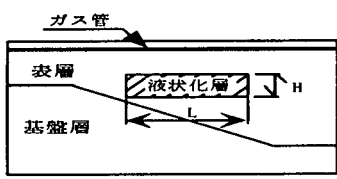
次に Case9 のモデルに、実地震波を入力したのが Case10 (図-3 参照) および Case11 (図-4 参照) である。入力波形は兵庫県南部地震時に観測されたポーアイ波および東神戸大橋波である。それぞれ最大の軸歪みが発生した場所はいずれも液状化層左端直上付近である。その最大値は長周期成分の卓越する東神戸大橋波のほうが歪みが大きくなった。Case1 から Case9 までは圧縮側と引張り側の歪みの最大値に明確な差はなかったが、Case10 および Case11 の場合は圧縮側のほうが約 20% 大きい結果となった。Case12 では、Case11 までの表層地盤のせん断剛性を 30% 低減するとともに、これまでの結果を参考にして液状化層の幅を法尻側に 200m まで拡張した (図-5 参照)。図-6 には軸歪みの最大値の分布を示す。最大値は、液状化層左端付近上の位置で発生した。図-7 には液状化層中央部の要素の間隙水圧比の時刻歴を示す。図-7 によれば、液状化層は約 6 秒で完全液状化した。それ以降、液状化層上部の地表面の変位振幅が大きくなり 10 秒以降も減衰しない傾向がみられたが、原因としてはモデル左右の応答の相違に起因する地表付近での変位が考えられる。このような表層の応答が液状化層の変形に影響し、ひいては間隙水圧の時刻歴に影響を及ぼしている可能性もある。Case13 では、地表面から GL-10m までを液状化層とし、管路が液状化層を貫通する位置関係とした。液状化層中において管路が液状化する地盤にどのように拘束されるかは、判

断の難しい問題であるが、解析上は液状化層中の節点変位の影響を受け大きな軸歪みを示す。そこで、液状化層中の軸歪みは、互いに 90m 離れた液状化層左右境界上の梁要素節点の相対変位から算出するとした場合には 0.21% となった。

7. まとめ

- Case1 から Case12 においては、管路を表現する梁要素軸歪みの最大値は約 0.2% (Case11) となった。表層の剛性を 30% 低減し、液状化層の幅を 200m まで広げた Case12 では 0.23% となった。
- 基盤傾斜のみの場合よりも、加えて液状化層が存在する場合の方が、梁要素軸歪みの最大値は大きくなる傾向が見られた。
- いずれのケースにおいても、液状化層両端の上部付近で軸歪みのピークが見られた。今回検討したモデルの構成においては、液状化層左端と基盤傾斜部の位置が近いため、この周辺で軸歪みの最大値がみられた。
- 液状化層の寸法に関しては、液状化層幅が長くなる場合の方が梁要素軸歪み最大値が大きくなる傾向が伺われた。
- 入力に関しては、固有周期の長い東神戸大橋波のほうが、ポーアイ波よりも約 40% 大きい梁要素軸歪みの最大値を示した。

表-3 解析のケース一覧

大分類	パラメータ			
基盤傾斜モデル 	CASE No.	入力		
	1	正弦波 max500gal 2Hz 10sec		
液状化層+成層地盤モデル 	CASE No.	入力	表層厚 h	
	2	正弦波 max500gal 2Hz 10sec	5m	
	3	同上	50m	
液状化層+基盤傾斜モデル 	CASE No.	入力	液状化層幅 L	液状化層高さ H
	4	正弦波 max500gal 2Hz 10sec	45m	3m (GL-2m~5m)
	5	同上	60m	3m (GL-2m~5m)
	6	同上	45m	8m (GL-2m~10m)
	7	同上	90m	8m (GL-2m~10m)
	8	同上	45m	10m (GL-5m~15m)
	9	同上	90m	10m (GL-5m~15m)
	10	ポーアイ波	90m	10m (GL-5m~15m)
	11	東神戸大橋波	90m	10m (GL-5m~15m)
	12	同上	200m	10m (GL-5m~15m)
13	同上	90m	10m (GL-0m~10m)	

注) CASE12, CASE13は表層地盤の剛性を 30% 低減

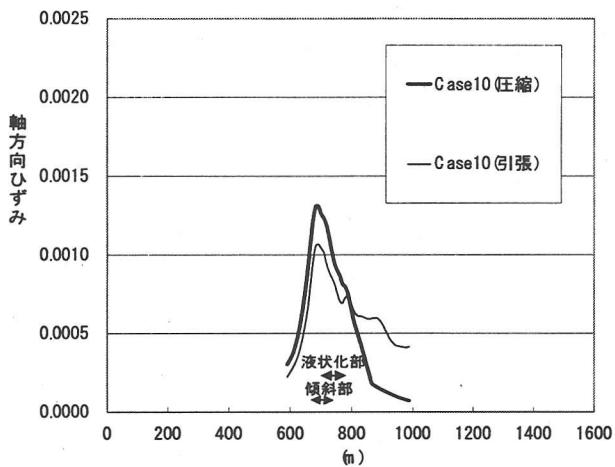


図-3 軸方向歪みの最大値の分布 (Case10)

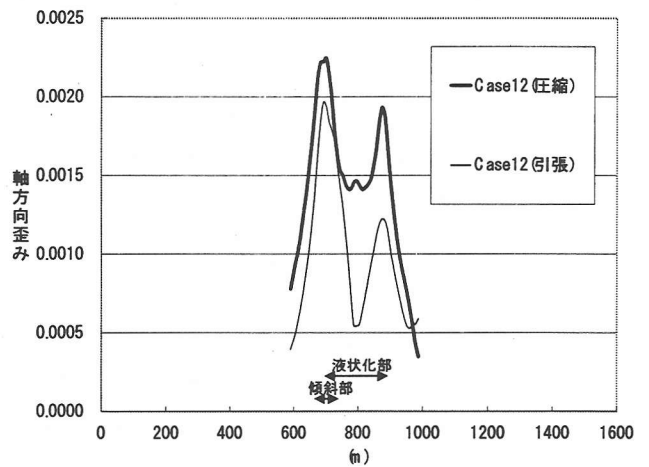


図-6 軸方向歪みの最大値の分布 (Case12)

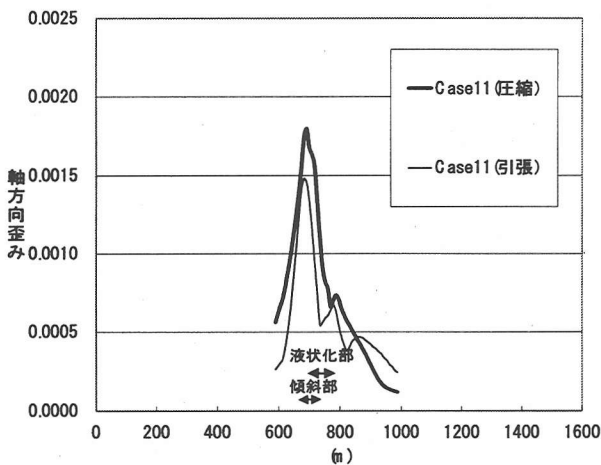


図-4 軸方向歪みの最大値の分布 (Case11)

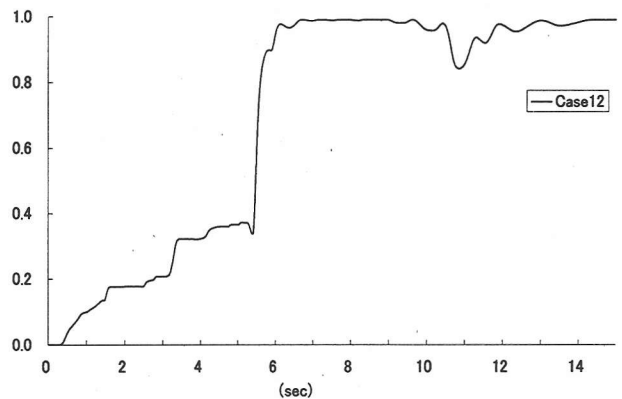


図-7 間隙水圧比時刻歴 (液化化層中央部)

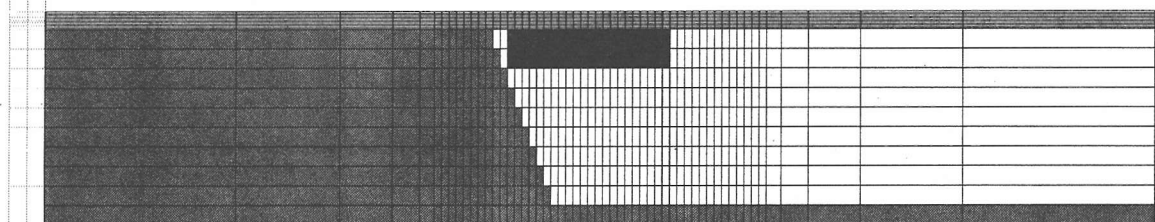


図-5 モデル構成 (Case12)

謝辞：本研究は通商産業省(現経済産業省)資源エネルギー庁が(社)日本ガス協会に委託し、平成8年度～平成12年度の5ヵ年で実施された「ガス導管液化化対策調査」の研究成果の一部をまとめたものであり関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

1) Jongmans, D and M. Campillo (1993): The response of the ubaye valley (France) for incident SH and SV waves: comparison between measurement and modeling. Bulletin of the Seismological Society of America, 83, pp. 907-924

2) Bard, P.-Y. et al. (1988) : The Mexico earthquake of September 19, 1985- A theoretical investigation of large- and small- scale amplification effects in Mexico City valley, Earthquake Spectra, Vol.4, pp. 609-633,
 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1990) : "Parameter Identification for a cyclic mobility Model," Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp. 57-83.
 4) (社)日本ガス協会(2000)：資料-6 浅層不整形地盤ひずみの算定、高圧ガス導管耐震設計指針、pp85-87.