

液状化時の地盤変状に対する 地中パイプラインの挙動と対策

澗田邦彦¹・秋吉 卓²・尻無濱昭三³

¹正会員 工博 八代工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒866-8501 八代市平山新町2627)

²正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

³工修 鉄建建設(株) 技術研究所 (〒286-0825 成田市新泉9-1)

To investigate the response behavior of buried pipelines subjected to the ground displacement of liquefied surface layers, the authors develop the 2D FE analysis program for evaluating the ground subsidence during liquefaction. Combining the programs for the liquefaction analysis, the simulation of the compacting method and the ground subsidence analysis, the responses of the pipeline subjected to such ground displacements are analyzed. The numerical computational results for the liquefied ground and the pipeline show that the compacting improvement method is effective to reduce the responses of the surface ground and the pipeline.

Key Words : *buried pipeline, liquefaction, lateral flow, ground subsidence, effective stress analysis, ground improvement*

1. まえがき

液状化に伴う地盤流動^{1),2)}によって埋設管が被災する事例は数多く生じている。このような地盤変状に対する管路破損メカニズムについては、液状化地盤が流体力として管路に作用するものや、地盤ばねによる管路への作用外力を考えるなどの方法によって評価する機会が多いが、管体及び継手の破壊状態までを完全に解明し、その合理的かつ有効な対策手法を確立するまでには到っていないと考えられる。

著者らはこれまで側方流動変位を地盤の自重による非線形なせん断変形より算定する解析手法を提案し³⁾、管路を弾性床の上のはりとした解析手法と結合して、液状化地盤の大変形に対する管路の応答解析手法を開発している⁴⁾。また液状化防止工法としての効果が高いとされているサンドコンパクションパイル(SCP)工法のシミュレーション手法を開発し、その有効性を確認するとともに改良効果についても検討している⁵⁾。本研究では、上記の側方流動変位解析を地盤沈下量解析に適用し、これと管路の解析手法及びSCP工法のシミュレーション手法とを結合して、対策工法が側方流動・地盤沈下量及び地中管路応答に与える効果について検討する。

2. 解析手法の概要

本研究では、前報³⁾で示した、側方流動変位を液状化に伴う地盤の剛性の低減に起因したせん断変形と考え²⁾、外力として各節点にポテンシャルヘッド(位置水頭)を与える2次元FEM解析プログラム「FLOW」を、地盤沈下量解析へも適用しうるように拡張した。次に、側方流動変位を受ける管路の応答解析は修正伝達マトリックス法に基づく解析プログラム「PIPE」を用いて行うものとした⁴⁾。一方、著者らは、SCPの打設締固め過程をシミュレートするプログラム「WAP3」⁵⁾及び2次元液状化解析プログラム「NUW2」⁶⁾を用いて、SCPによる改良地盤の液状化評価システムを構築している。ここでは、上記の側方流動解析プログラムFLOWと管路応答解析プログラムPIPEにWAP3とNUW2とを組み込み、SCP改良地盤における液状化解析、側方流動・沈下量解析を経て管路の応答を解析する。ただし、液状化時の側方流動変位及び沈下量の解析では、対象地盤の初期剛性を、前報³⁾と同様、液状化解析後の最大過剰間隙水圧比に応じて低減させて、FLOWによる側方流動・沈下解析を行うものとする。このせん断弾性係数の低減率と過剰間隙水圧比との関係を図-1に示す。図中、 G_1 、 G_2 はそれぞれバイリニア型特性の降

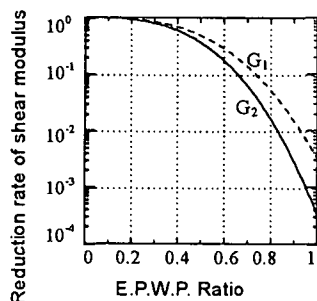


図-1 せん断弾性係数の低減率

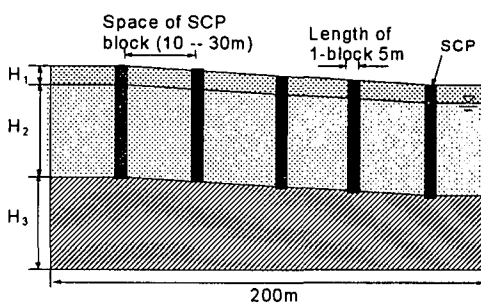


図-2 解析対象地盤モデル

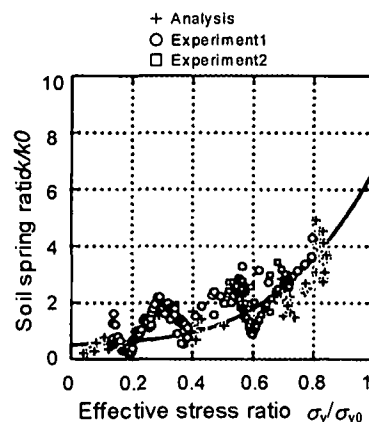


図-3 地盤ばね比と有効応力比との関係

表-1 地盤の層厚 (流動解析モデル)

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
H1	3m	3m	3m	1m
H2	8m	10m	12m	10m
H3	10m	10m	10m	10m

表-2 SCP工法の施工条件

Term	Conditions
Array	Rectangular
Space of piles (m)	2.0
Compacting force(kN)	591.9
Radius of sand pile (m)	0.4
Frequency (Hz)	9.3
Compacting time per 1 stage (sec)	100

表-3 地盤の層厚 (沈下解析モデル)

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
H2	16m	14m	12m	10m	8m

伏前及び降伏後のせん断弾性係数の低減率を示している。

3. 側方流動・沈下解析及び管路の応答解析

図-2は側方流動解析に用いた地盤モデルの概略を示したもので、傾斜した基盤層の上にN値7程度の軟らかい表層地盤を考え、表-1に示すような厚さの異なる4つのモデル地盤を想定し、無対策及びSCP改良した場合について解析を行った。このとき入力加速度としてEL Centro強震記録(1940, NS成分)を用い、震度5強を想定して、その最大加速度を250galに調整して用いた。SCP改良は、1ブロック5m幅の多連ブロック施工とし、その施工条件として表-2に示すようなものとした。また沈下解析では、表-1と同様の表層地盤で傾斜のない水平な成層地盤を想定し、最上層の非液状化層厚3mを固定し、表-3のような液状化層の厚さ(H2)の異なる5つのモデル地盤とした。

以上のようなモデルとその諸量を用いて、側方流動解析及び沈下解析を行い、得られた地盤変位を入力として管路の応答を解析した。管路は地表面から

表-4 パイプラインモデルの諸元

Physical items	Values(unit)
Material of segment	Ductile cast iron
Nominal diameter	500 (mm)
Thickness	9.5 (mm)
Total length	100 (m)
Buried depth	2 (m)
Young modulus	1.57×10^8 (kN/m ²)
Specific gravity	7.15
Tensile strength	3.92×10^5 (kN/m ²)
Bending strength	5.59×10^5 (kN/m ²)
Allowable joint expansion	50 (mm)
Allowable joint rot. angle	5 (degree)

深さ2mの位置に埋設されているものとし、これを弾性床の上のりとみなして、側方流動変位及び地盤沈下量が地盤ばねを介して入力するときの管路の応答について検討した。ただし沈下に対する解析では、1端部は沈下のない構造物に固定されているものとして沈下量を0とし、それ以外の部分では一様な沈下量を入力として与えた。

管路の解析に用いる地盤ばね及び継手ばね特性は文献4)と同様とし、地盤ばねは有効応力比に対して図-3のような関係とした。図中の地盤ばね比は、文献4)で用いている完全液状化時の地盤ばね標準値を液状化前の地盤ばね定数 k_0 とし、これに対する液状化中の地盤ばね定数 k との比をとったもので、液状化中の地盤ばねは、文献7)に示した等価係数による評価手法より求めている。ここでは地盤ばね定数の基準値 $k_0=291.8\text{kN/m}^2$ を用いている。解析に用いた管路の諸量は表-4に示す。

図-4は地盤勾配と側方流動変位最大値との関係であり、●印は無対策の場合、○、□及び△印はそれぞれSCPブロック間隔10、20及び30mで対策を行った場合の結果である。SCP対策を行うと無対策地盤に比べて側方流動変位を約3分の1以下に低下させることがわかる。図-5は地盤沈下量の最大値を表-

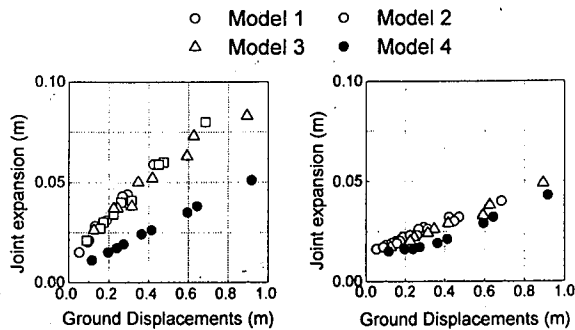
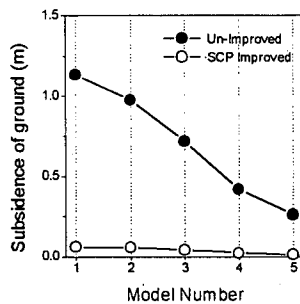
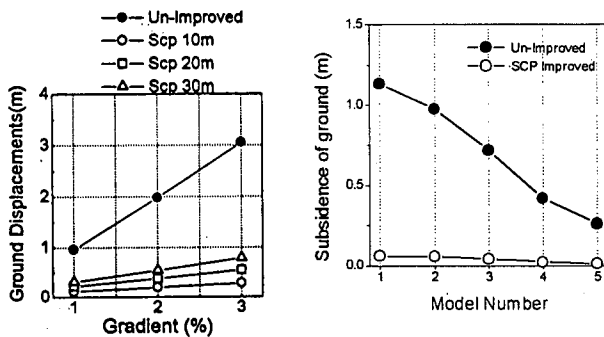


図-4 流動変位と勾配との関係 図-5 地盤沈下量の最大値

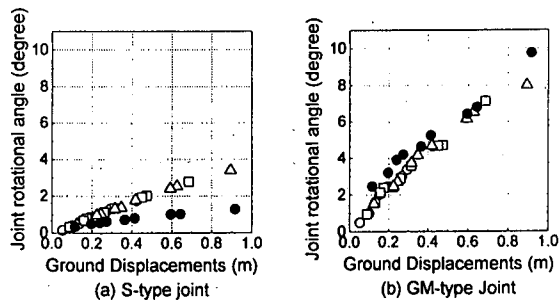
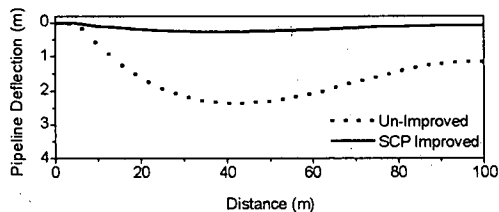


図-6 継手変位と地盤流動変位との関係

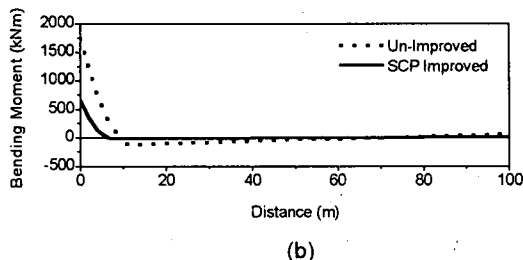


図-7 パイプ応答の分布

3の各地盤モデルに対して沈下解析を行い、最大沈下量をプロットしたものである。●及び○印はそれぞれ無対策及びSCP対策の場合の結果であり、液状化層の厚さが最も厚いModel1の無対策地盤では最大約1.2mの沈下量が生じるのに対して、SCP対策を行った場合には、これらは0.1m以下に抑制されている。

図-6は、表-1の4つの各地盤モデルに対して、管路の継手伸縮量・継手回転角と地盤の最大流動変位量との関係を示したものである。図より、継手伸縮量及び回転角は側方流動変位と概ね比例関係にあり、側方流動変位の最大値から継手変位最大値を推定できる可能性がある。同図には地盤改良を行った場合の結果も含まれているが、このような解析結果を蓄積することにより、継手変位を許容値内に抑制するための地盤改良の条件を推定することも可能と考えられる。

図-7は、沈下解析Model1の地盤沈下を受けるS型継手管路の変位及び曲げモーメント分布の一例を示したものであり、実線及び点線はそれぞれSCP対策及び無対策の場合を示している。無対策地盤では最

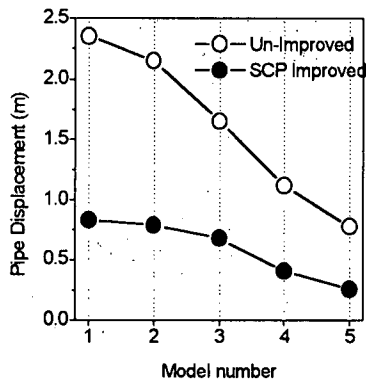
大約2.5mの管路変位と固定端に大きな曲げモーメントが生じているが、SCP対策によってこれらの応答が軽減されることがわかる。

図-8、9は、図-5の地盤沈下量を入力として、それぞれS型、GM型継手管路の、管路変位、継手回転角及び曲げモーメントの最大値を地盤モデルに対して図示したもので、●及び○印はそれぞれ無対策及びSCP対策の場合の結果である。地盤モデル1及び2では、無対策の場合、管路変位は最大2m以上、継手回転角は許容値の5度以上となり破損の可能性もあるが、SCP改良の場合には、沈下量そのものが抑制されて両応答とも軽減されることが示されている。

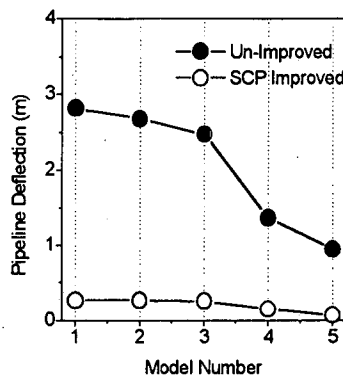
図-10は、管路の固定端から液状化領域までの距離を横軸にとり、図-8、9と同様に管路応答の最大値を図示したものである。液状化の範囲が固定端から離れるほど、液状化地盤の沈下による影響が小さくなり、各応答値が減少することがわかる。図中の例では、液状化範囲が20mほど離れると継手回転角が許容値に収まることが示されている。

4. まとめ

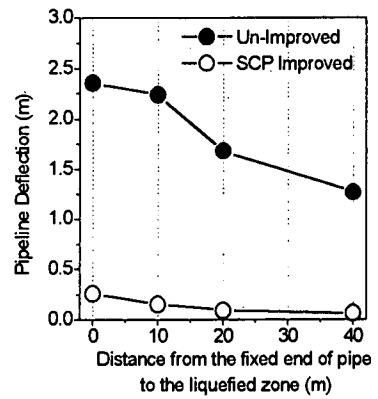
本研究では、SCP改良地盤における側方流動・地盤沈下解析と、側方流動変位・沈下変位に対する管路の解析より、地盤改良が、側方流動・沈下防止および管路応答に及ぼす効果について検討した。数値解析の結果、SCP地盤改良が側方流動・沈下変位及



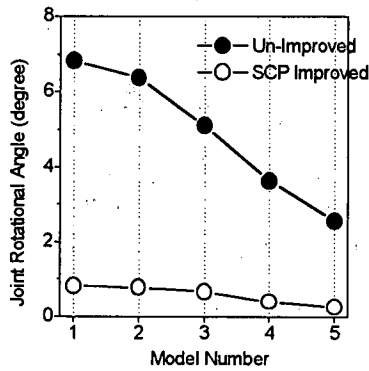
(a)



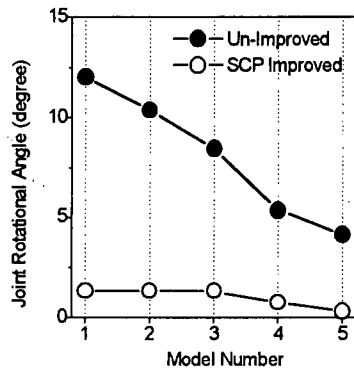
(a)



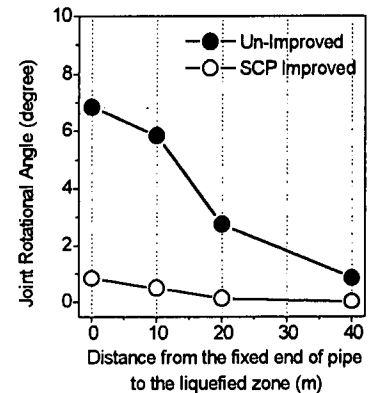
(a)



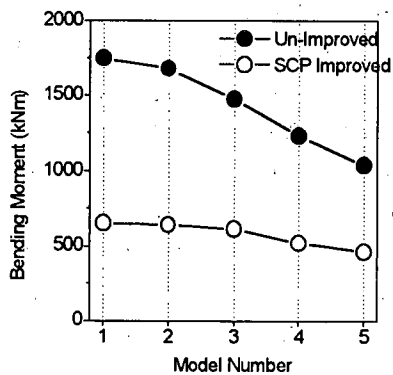
(b)



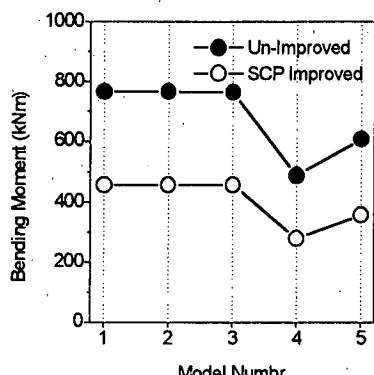
(b)



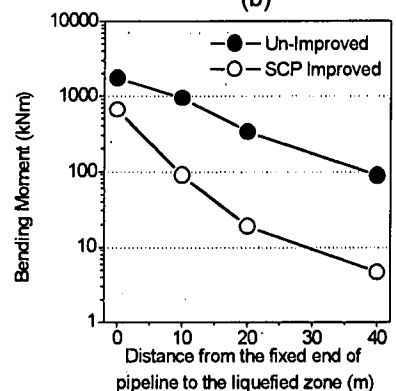
(b)



(c)



(c)



(c)

図-8 パイプの最大応答値 (S-type joint)

図-9 パイプの最大応答値 (GM type joint)

図-10 パイプの最大応答値 (S-type joint)

び管路の応答低減に効果的であることを示した。

参考文献

- 1) Hamada, M. et al.: *Study on liquefaction induced permanent ground displacement*, Association for the Development of Earthquake Prediction, pp.1-87, 1986.
- 2) Yasuda, S. et al.: The mechanism and a simplified procedure for the analysis of permanent ground displacement due to liquefaction, *Soils and Foundations*, JSSMFE, 32, 1, pp.149-160, 1992.
- 3) 秋吉 卓, 尻無濱昭三, 澁田邦彦, 松本英敏: 液状化土の自重による側方流動の解析について, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1509-1514, 1998.
- 4) Fuchida, K. and Wang, L.R.L.: Parametric study of buried

pipelines subjected to liquefied ground movements, *Technical Report*, ODU, 1993.

- 5) Akiyosi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Hyodo, T. and Fang, H.L.: Simulation of sand compaction pile method, *Proc. of 9JEEES*, pp.949-954, 1994.
- 6) Akiyosi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Hyodo, T. and Fang, H.L.: Liquefaction analyses of sandy ground improved by sand compaction piles, *Int. J. Soil Dynamics and Earthquake Engg.*, Vol.12, No5, pp.299-307, 1993.
- 7) 秋吉 卓, 澁田邦彦, 松本英敏: 等価係数による液状化地盤中管路の復元力特性の評価, 土木構造・材料論文集, 第5号, pp.39-46, 1990.