

液状化による地盤変状を受ける地中 パイプラインの挙動と対策

淵田邦彦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)

液状化時の地盤の側方流動変位を弾性体の非線形なせん断変形より算定する解析プログラム「FLOW」を、2次元有効応力解析プログラム「NUW2」及びサンドコンパクションパイル(SCP)の打設締固め過程シミュレーションプログラム「WAP3」と結合して、SCP による改良地盤の側方流動解析及び沈下解析を行った。さらに、側方流動変位及び地盤沈下量を入力とする管路の応答について解析した。振動締固め地盤改良を含めた、モデル地盤の液状化解析、側方流動・沈下量及び管路応答の数値計算の結果、SCP 工法が地盤の側方流動・沈下量及び地中管路の応答を抑制する効果について明らかとした。

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

1. まえがき

液状化時の地盤変状による地中管路の被害例は数多いが、地盤変状の管路破損メカニズムには不明な点もあり、その有効な対策手法が確立されるまでには到っていない。本研究では、前報と同様^{1),2)}、液状化防止工法として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)工法を取り上げ、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、地盤沈下量解析にまで拡張し、これと管路の解析手法とを結合して、対策工法が側方流動・地盤沈下量及び地中管路応答の抑制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^{1),2)}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、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³⁾。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」⁴⁾及び 2 次元液状化解析プログラム「NUW2」⁵⁾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⁶⁾。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、Fig.1 のような解析フローとする。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^{1),2)}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 Fig.2 示す。図中、 G_1 、 G_2 はそれぞれバイリニア型特性の降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。

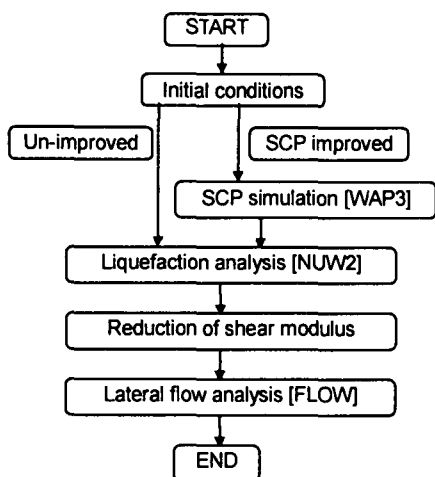


Fig.1 Flow of analysis

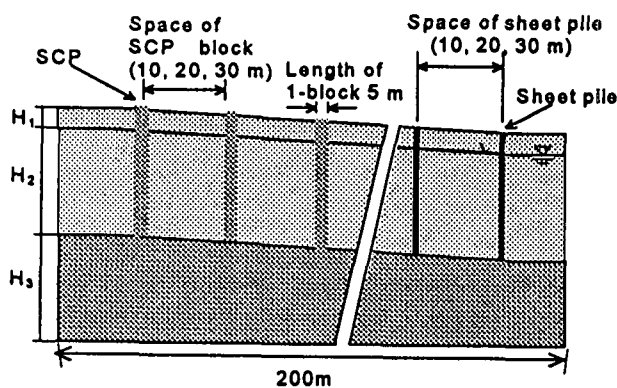


Fig.3 Ground layer model

3. 側方流動・沈下解析及び管路の応答解析

Fig.3 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、Table1 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幅の多連ブロックとして行うものとし、その施工条件としてはTable2に示すようなものとした。また沈下解析では、Table1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、最上層の非液化化層厚3mを固定し、Table3のような液化化層の厚さ(H2)の異なる5つのモデル地盤とした。

Fig.1の解析フローに従っ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。管路は地表面から深さ2mの位置に埋設されているものとし、これを弾性床土のはりとして

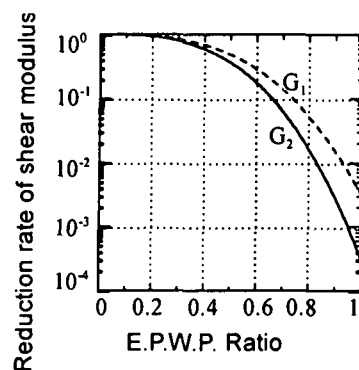


Fig.2 Reduction rate of shear modulus

Table 1 Thickness of layers (Lateral flow analysis)

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

Table2 Conditions of SCP method

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

Table2 Thickness of layers (Subsidence analysis)

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

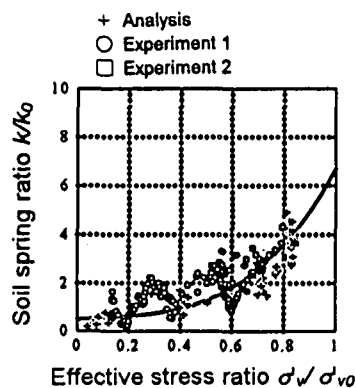


Fig.4 Soil spring ratio versus effective stress ratio

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の特性は文献1),3)と同様とするが、地盤ばねは、有効応力

Table4 Reference pipe parameters

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)

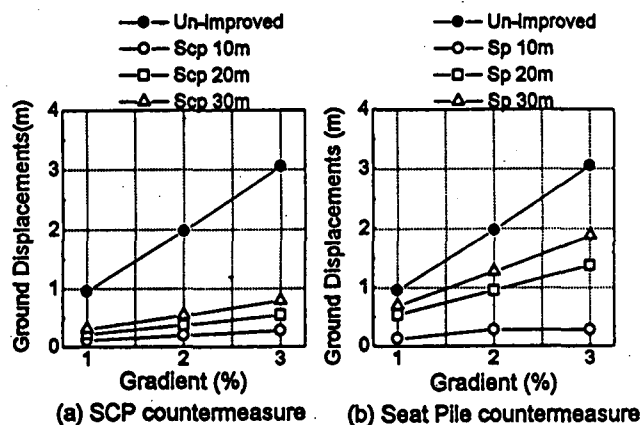


Fig.5 Ground displacement versus gradient

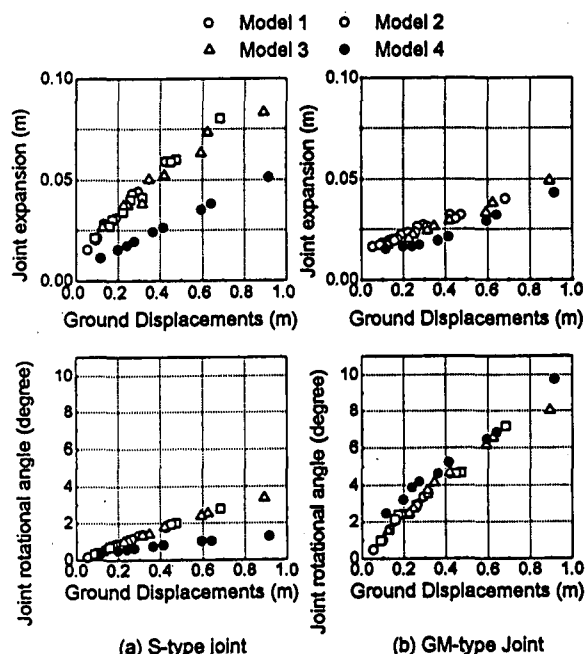


Fig.6 Joint displacement versus ground displacement

比に対して Fig.4 のような関係とした。これは、文献 1),3) で用いている完全液状化時の地盤ばねの標準値を基準として液状化前の初期の地盤ばね定数 k_0 とし、これに対する液状化中の地盤ばね定数 k との比として実験より算定したものである。この液状化中の地盤ばねは、文献 7) に示した等価係数による地盤剛性評価手法を用いて、実験結果より求めている。ここでは、地盤ばね定数の基準値として、 $k_0=291.8\text{kN/m}^2$ を用いている。解析に用いた管路の諸量を Table4 に示す。

Fig.5 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 以下に低下できることがわかる。また同図中にはシートパイル対

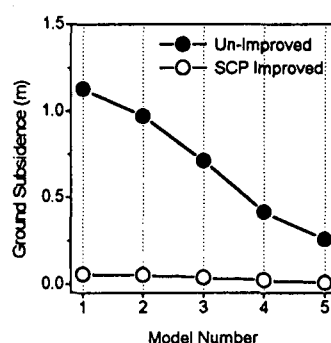


Fig.7 Maximum ground subsidence

策を施した場合の結果も示しており、シートパイルの場合も側方流動変位の抑制効果が示されている。

Fig.6 は、Table1 の 4 つの各地盤モデルに対して、管路の継手伸縮量・継手回転角と最大地盤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。

次に Fig.7 は、Table3 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。

Fig.8 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

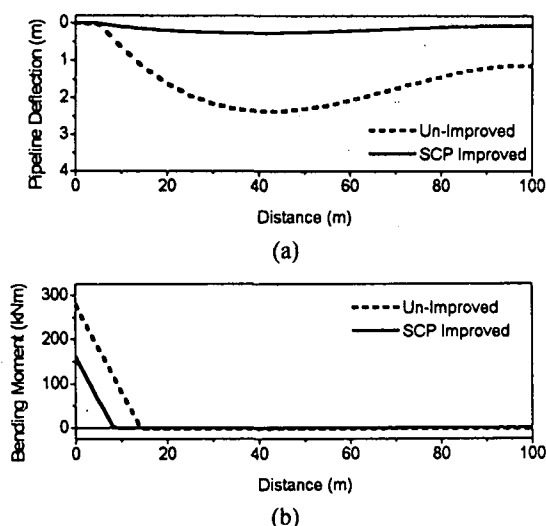


Fig.8 Distribution of pipeline response

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。

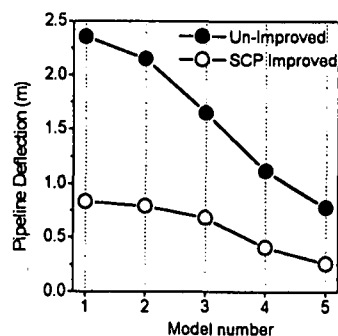
Fig.9 は、Fig.7 の地盤沈下量を入力として管路の変位、継手回転角及び曲げモーメントの最大値を地盤モデルに対して図示したもので、●及び○印はそれぞれ無対策及び SCP 対策の場合の結果である。地盤モデル 1 及び 2 では、無対策の場合、管路変位は最大2m 以上、継手回転角は許容値の5度以上となり破損の可能性もあるが、SCP 改良の場合には、沈下量そのものが抑制されて両応答とも軽減されることが示されている

4. まとめ

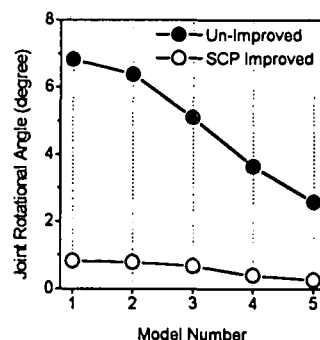
本研究では、SCP 改良地盤における側方流動・地盤沈下解析と、側方流動変位・沈下変位に対する管路の解析より、地盤改良が、側方流動・沈下防止および管路応答に及ぼす効果について検討した。数値解析の結果、SCP 地盤改良が側方流動・沈下変位及び管路の応答低減に効果的であることを示した。

参考文献

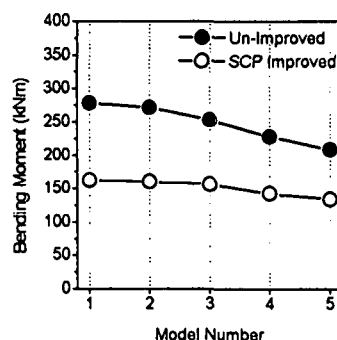
- 1) 澁田邦彦, 秋吉 卓, 高畑浩二: 地中管路の液化化時大変形防止のための対策工法の効果, 第24回地震工学研究発表会講演概要, pp.1349-1352, 1997.
- 2) 秋吉 卓, 尻無濱昭三, 澁田邦彦, 松本英敏: 液化化土の自重による側方流動の解析について, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1509-1514, 1998.
- 3) Fuchida, K. and Wang, L.R.L.: Parametric study of buried



(a)



(b)



(c)

Fig.9 Maximum pipeline response

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

- 4) Akiyosi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Hyodo, T. and Fang, H.L.: Simulation of sand compaction pile method, *Proc. 9th JEEES*, pp.949-954, 1994.
- 5) 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, No.5, pp.299-307, 1993.
- 6) Akiyosi, T., Fuchida, K., Fang, H.L., Tamaki, T. and Kato, M.: Anti-liquefaction effect of improved ground by SCP, *Proc. 9th JEEES*, pp.955-960, 1994.
- 7) 秋吉 卓, 澁田邦彦, 松本英敏: 等価係数による液化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.