

(100) 液状化による地盤の側方流動を受ける埋設管路の挙動解析

金沢大学工学部 正会員 宮島 昌克  
 金沢大学工学部 正会員 北浦 勝  
 新潟県 正会員 長谷川正道  
 福井工業高等専門学校 正会員 吉田 雅穂

1. はじめに

近年、液状化による地盤の側方流動に関する研究が活発に行われている。地盤の側方流動は地盤が完全液状化に達した後に生じ始めること、完全液状化した地盤は流体としての取り扱いが可能であること、などが指摘されている<sup>1)・2)</sup>。このような液状化地盤の側方流動が地中埋設構造物に与える影響を明らかにするために、著者らは液状化地盤中での鋼球の自由落下実験および引き上げ実験を行い、液状化地盤の粘性係数を評価してきた<sup>3)</sup>。本研究では、側方流動を生ずる液状化地盤を流体と仮定した場合の、側方流動を受ける地中埋設管の挙動を、これまでの研究成果を用いて解析し、考察する。

2. 解析手法

解析の対象とした管路は呼び径400mmのダクタイル鋳鉄管であり、GM-II継手で連結されているものとした。管路の物理定数を表1に示す。ここでは、側方流動地盤を粘性流体と仮定するが、その粘性係数として、振動台実験から著者らが求めた値である2.2gf/cm<sup>2</sup>を用いた<sup>4)</sup>。側方流動が管路に及ぼす力は、一定の流速の流体中に存在する円柱が流体から受ける抗力を評価する次式を用いて算出した。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot V^2 \cdot D \quad (1)$$

ここで、

$F_D$ : 抗力 (gf/cm),  $\rho$ : 液状化地盤の密度 (gf · s<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>),  $C_d$ : 抗力係数,  
 $V$ : 地中埋設管と側方流動の相対速度 (cm/s),  $D$ : 地中埋設管の外径 (cm)

また、抗力係数はReynolds数の関数であり、Reynolds数が非常に小さい範囲において構造物の形状が円柱であれば次式のように与えられる。

$$C_d = \frac{8\pi}{Re \left( 0.5 - \alpha - \ln \left( \frac{Re}{8} \right) \right)} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ はEulerの定数であり、0.5772である。

さらに、Reynolds数は以下のように表せる。

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (3)$$

ここで、

$\nu$ : 動粘性係数 (cm<sup>2</sup>/s)  
 $\mu$ : 粘性係数 (gf · s/cm<sup>2</sup>)

表1 ダクタイル鋳鉄管路の物理定数

外径 (mm)	425.6
内径 (mm)	408.6
ヤング率 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.6 × 10 <sup>6</sup>
管体 (m)	5
全長 (m)	500

図1に示すような側方流動の平面的形状については、調和波の半波長状のものや、等分布形状、三角形分布など様々なものが提案され、研究されている<sup>5)</sup>。本解析では、完全液状化した地盤が粘性流

体的性質を持つことから、粘性流体の流動分布を求めることによって、その形状を決定した。すなわち、図1のように2次元xy座標を考え、2平面に囲まれた粘性流体が流動するときの流動速度分布を求める。2次元xy座標系におけるNavier-Stokesの方程式は以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + \rho g_y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

速度 $v$ は $y$ 方向以外には無く、その $y$ 方向成分の $v_y$ も $y$ 方向に分布せず、 $x$ 方向のみに分布を持つ場合を考える。定常状態で静圧の分布はなく、流動の起因为力が $y$ 方向の重力 $g_y$ のみとすると、式(4)は次式のようなになる。

$$0 = \mu \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \rho g_y \quad (5)$$

粘性流体と平面との境界における速度がゼロであるという境界条件を用いると、図1に示す条件では粘性流体の流動分布が次式のように2次曲線で表現される。

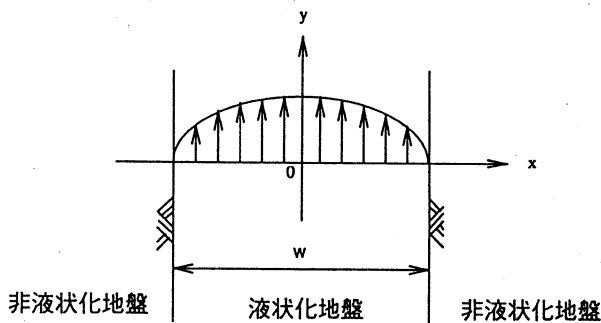


図1 地盤の側方流動の平面分布モデル

$$v_y = -\frac{\rho g_y}{2\mu} \left\{ x^2 - \left( \frac{W}{2} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

ここで、

$v_y$ :  $y$ 方向の流動速度 (cm/s),  $g_y$ :  $y$ 方向の重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>)

$\rho$ : 側方流動地盤の密度 (gf · s<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>),  $\mu$ : 側方流動地盤の粘性係数 (gf · s/cm<sup>2</sup>)

$W$ : 側方流動の生ずる地盤幅 (cm)

以上の考察によると、側方流動の平面形状を2次曲線で表現することが適当であると考えられる。そこで、側方流動による抗力分布を2次曲線の分布であると、次式のようにモデル化した。

$$F = F_{\max} \left\{ 1 - \left( \frac{2x}{W} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

ここに、

$F_{\max}$ : 最大抗力,  $W$ : 側方流動の生ずる地盤幅

埋設管路の解析には修正伝達マトリックス法を用いた。解析対象範囲を500mとし、側方流動の生ずる地盤幅をパラメタとして解析を行った。なお、側方流動を受けない管路は地盤ばねで支持されるものとするが、側方流動を受ける管路については、地盤ばねによる地盤反力を考慮しなかった。

### 3. 解析結果

側方流動地盤を粘性流体とみなすと、式(1)で示されるように、流動速度が管路の応答に影響を及ぼす重要なパラメタとなる。これまでの被害地震において、残留変形量は航空写真測量などによって明らかにされているので<sup>6)</sup>、変形時間で残留変形量を割れば、平均流動速度を求めることができる。しかし、実際の変形時間も明確にされていない。聞き取り調査においても、地震後数時間は地面が流動しているようであったとか、一晩中家がガタガタしていたので地面が流動していたのかも知れないなど、不確かな情報しか得られていない。一方、砂箱を用いた振動実験によれば、流動速度は0.1cm/sから数cm/sのオーダーである<sup>7)</sup>。ここでは、式(4)における最大抗力を算出するための最大流動速度をパラメタとして解析を行った。

解析の対象としたGM-II継手の許容継手回転角を $7^\circ$ 、許容継手引き抜け量を5cmであると考え、ここでは、継手の応答が許容値を超えるときの最大側方流動速度と側方流動が生ずる地盤幅の関係を求めた。図2、3は、それぞれ継手の応答が許容回転角、許容引き抜け量に達するときの最大側方流動速度と側方流動地盤幅の関係を示している。同図より、許容継手回転角および許容継手引き抜け量に達する側方流動速度は、側方流動地盤幅が広がるにしたがい小さくなるのがわかる。

また、同じ側方流動地盤幅において許容継手回転角と許容継手引き抜け量に達する側方流動速度を比較すると、許容継手引き抜け量に達する側方流動速度の方が小さいことがわかる。すなわち、管路は継手部において回転角ではなく引き抜けによって破損する可能性が高いと言える。これは、側方流動地盤を粘性流体と仮定したとき、管路は地盤ばねで支持されていないので、管路に地盤反力が作用せず、管路が全体的に大きく変形するためであると考えられる。

図4、5は、図2、3に対する管路の最大変位量を示している。側方流動地盤幅が広がるほど、継手の応答量が許容値に達するときの管路の最大変位量は大きくなる結果となっている。

前述したように、実際の液状化による地盤の流動速度の観測値は現在得られていないが、最

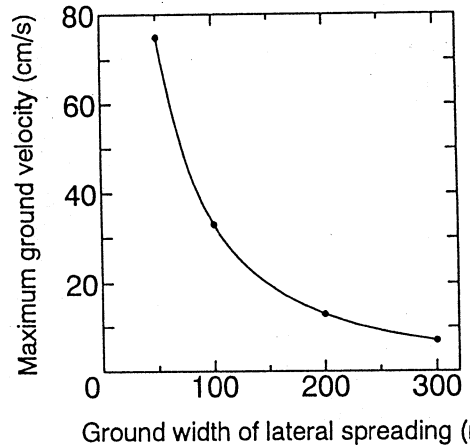


図2 継手の応答が許容回転角に達するときの側方流動地盤幅と流動速度との関係

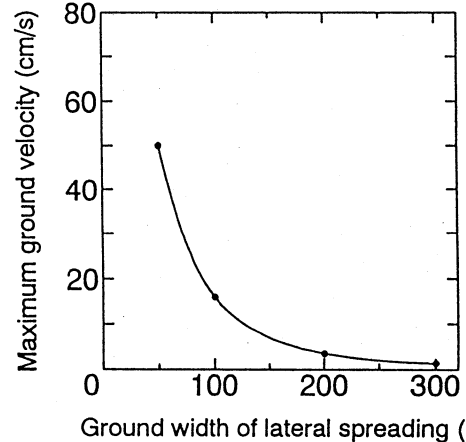


図3 継手の応答が許容引き抜け量に達するときの側方流動地盤幅と流動速度との関係

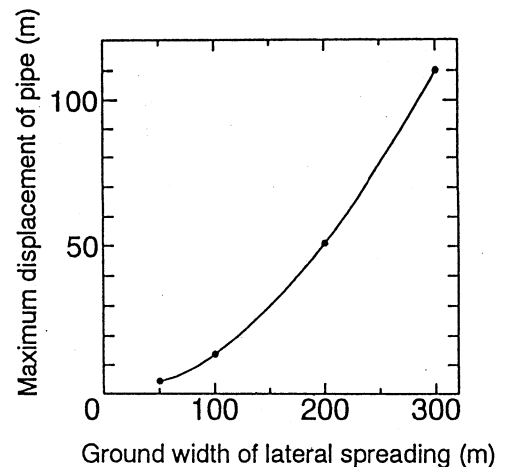


図4 継手の応答が許容回転角に達するときの側方流動地盤幅と最大地盤変位との関係

大でも数cm/sであると想定すると、側方流動地盤幅が50mのように狭いときには、非現実的な流動速度にならない限り継手の応答が許容値に達することはない。一方、継手の応答が許容引き抜け量に達するときを考えると、側方流動地盤幅が約150m以上になると、現実的な流動速度のもとで継手の応答が許容値に達することがわかる。また、このときの管路の最大変位量に注目すると、図5に示すように数mのオーダーであるので、現実的な値となっている。

#### 4. まとめ

本研究は、液状化による地盤の側方流動が地中埋設管に及ぼす影響について検討したものである。ここでは、流動地盤を粘性流体と仮定し、地中埋設管が流体力のみによって挙動するものとして解析を行った。GM-II継手で連結されたダクトイル鑄鉄管を対象とした応答解析の結果をまとめると以下のようである。

継手の応答が許容引き抜け量あるいは許容回転角に達するときの流動速度を側方流動地盤幅の関係で求めると、側方流動地盤幅が150m以下の場合には、流動速度が10cm/sをはるかに越えなければ継手の応答は許容値に達しないという結果が得られた。また、流動速度が数cm/sの場合には、側方流動地盤幅が150m以上とならなければ継手の応答が許容値を越えないことも示された。さらに、側方流動地盤幅が一定の場合、管路は継手部において回転角ではなく引き抜けによって破損する可能性が高いことが明らかとなった。

ここでは、完全液状化地盤だけを対象とし、それを粘性流体と仮定し、定常状態における流体力による管路の挙動を解析した。今後は、得られた結果を実際の被害状況と比較するとともに、不完全液状化状態における地盤の挙動、およびそれが地中埋設管に及ぼす影響を考慮した解析方法をさらに検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 大友敬三・浜田政則・岩楯敏広・清水幹夫・朱牟田善治：杭基礎に作用する側方流動の荷重特性，第22回土木学会地震工学研究発表会講演概要，pp.95～98，1993。
- 2) 浜田友康・大塚久哲・二宮嘉朗：液状化に伴う流動地盤中の杭に作用する流動力特性，第22回土木学会地震工学研究発表会講演概要，pp.99～102，1993。
- 3) Miyajima, M. and Kitaura M.: Experiments on Force Acting on Underground Structures in Liquefaction-induced Ground Flow, Proc. of the 5th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, ADEP, NCEER, 1995 (in Press).
- 4) 長谷川正道：液状化地盤の側方流動に対する地中埋設管の応答解析に関する研究，金沢大学修士論文，1995。
- 5) Miyajima, M., Kitaura, M. and Nomura, Y.: Study on Response of Buried Pipelines Subjected to Liquefaction-Induced Permanent Ground Displacement, Proc. of JSCE, No. 404, pp. 163-172, 1989.
- 6) 浜田政則・安田進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察，土木学会論文集，第376号，pp.211～220，1986。
- 7) 宮島昌克・北浦勝・安藤康二：液状化地盤の永久変位に関する実験的研究，第8回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1，pp.939～944，1990。

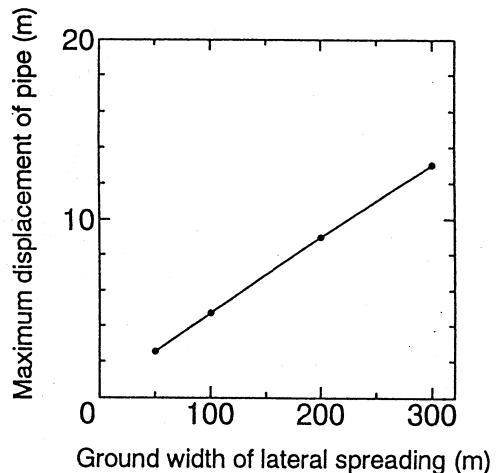


図5 継手の応答が許容引き抜け量に達するときの側方流動地盤幅と最大地盤変位との関係