

(78) 液状化時の地中埋設管の応答解析

金沢大学工学部 正員 北浦 勝
 金沢大学工学部 正員 ○宮島 昌克
 中央コンサルタント(株) 松村 裕二

1. はじめに

日本海中部地震(1983, M7.7)においては、地盤液状化が建物や地中埋設管に多大な被害を与えた。若美町、男鹿市、能代市をはじめとし、各地で液状化による被害が報告されている。秋田市でも雄物川の旧河川敷にあたる新屋元町で大規模な液状化が発生し、上水道管やガス管が壊滅的に破壊した。この地区に布設されていた ACPφ100mm 管は各所で寸断され、全面布設替えを余儀なくされた。そのため、この地区の住民は地震発生以来3日間にわたり断水を強いられている。このように新潟地震の際にも明らかであったように、地震時には地震波動そのものよりも地盤破壊によって地中埋設管が破壊するケースが多く見られる。したがって、液状化時の地中埋設管の破壊のメカニズムを明らかにすることは非常に重要なことである。

このような観点から本研究では、地中埋設管を弾性床上的の梁としてモデル化し、地盤液状化時には地盤ばね定数が低下するとともに浮力が地中埋設管に作用するという簡単な液状化モデルを用いて、地盤液状化時の地中埋設管の挙動を明らかにしようとした。

2. 基礎運動方程式

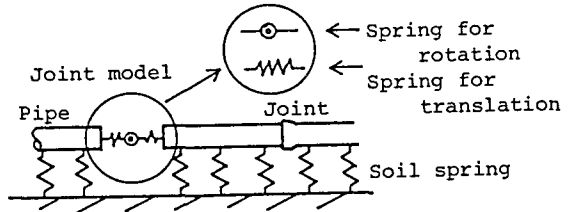
解析モデルをFig. 1に示す。つまり地中埋設管を弾性床上的の梁とみなし、それぞれの埋設管は伸縮ばねと回転ばねで連結されているものとする。¹⁾管路の慣性力、減衰力の影響は小さいものとみなして無視すると、埋設管の基礎運動方程式が以下のように得られる。

1) 管軸方向

$$-EA \frac{d^2 u}{dx^2} = K_u (U - u) \quad (1)$$

2) 管軸直角方向

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = K_v (V - v) + F \quad (2)$$



ここに、 E = 管体の弾性係数、 I = 管体の断面 2次モーメント、 A = 管体の断面積、 K_u 、 K_v = 地盤の管軸方向、管軸直角方向の単位長さ当りのばね定数、 U 、 V = 管軸方向、管軸直角方向の地盤変位、 F = 液状化時に浮力や浸透流などによって管に作用する力。

なおここでは、地盤の運動は強制変形として作用すると考えている。また、管体は変形後も弾性範囲内にあるものとする。

3. 解析手法

本研究では、中村によって提案されている数値誤差の改善を考慮した伝達マトリックス法²⁾を用いる。この手法は、各格点の物理量を伝達するのではなく、各格点物理量の間関係式を伝達するというものである。Eq.1を、 $' = \frac{d}{dx}$ として正規常微分方程式に書き改めると、

$$\frac{d}{dx} \begin{Bmatrix} u \\ u' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_u/EA & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ u' \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -K_u \cdot U/EA \end{Bmatrix} \quad (3)$$

となる。この式を漸化式表示すると、

$$\begin{Bmatrix} u \\ u' \end{Bmatrix}_{x+\Delta x} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta x \\ K_u \cdot \Delta x / EA & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ u' \end{Bmatrix}_x + \int_0^{\Delta x} \begin{bmatrix} 1 & s \\ -K_u \cdot s / EA & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ -K_u \cdot U / EA \end{Bmatrix} ds \quad (4)$$

を得る。同様にEq.2を漸化式表示すると、

$$\begin{Bmatrix} v \\ v' \\ v'' \\ v''' \end{Bmatrix}_{x+\Delta x} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta x & \Delta x^2/2 & \Delta x^3/6 \\ 0 & 1 & \Delta x & \Delta x^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta x \\ -K_v \cdot \Delta x / EI & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ v' \\ v'' \\ v''' \end{Bmatrix}_x + \int_0^{\Delta x} \begin{bmatrix} 1 & -s & s/2 & -s/6 \\ 0 & 1 & -s & -s/2 \\ 0 & 0 & 1 & -s \\ K_v \cdot s / EI & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ (K_v \cdot V + F) / EI \end{Bmatrix} ds \quad (5)$$

となる。Eqs.4.5を基準定数 $l_0, F_0, E_0 I_0, E_0 A_0$ を用いて無次元化し整理すると、結局、次のような格間伝達マトリックス F が得られる。

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -D \cdot C & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -D & 0 & D^2 \cdot B / 2 & D^3 \cdot B / 6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -D \cdot B & -D^2 \cdot B / 2 \\ -D \cdot \bar{K}_v & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & D \\ 0 & -D \cdot \bar{K}_u & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここに、 $B = EI / E_0 I_0$ 、 $C = EA / E_0 A_0$ 、
 $D = \Delta x / l_0$ であり、 \bar{K}_v, \bar{K}_u はそれぞれ無次元化された K_v, K_u である。

一方、継手においては管軸方向ばねと回転ばねによって連結されているものとし、Fig.2で示されるような継手における断面力、変形量の釣合い関係を仮定した¹⁾。この連結条件をマトリックス表示すると、格点伝達マトリックス P が次のように得られる。

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1/K_t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1/K_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Fig. 2 Equilibrium equation at joint¹⁾

格間伝達法、格点伝達法の詳細は文献2)に述べられているので省略するが、伝達過程においてマトリックスのノルムをチェックし、ノルムがある基準値を越えた時にそれを下げるといった操作によって、桁落ちによる誤差の発生を防いでいる。

4. 液状化モデル

地盤液状化時に地中埋設管に作用する力としては、地震波動のほかに浮力や浸透流による力などが考えられる。しかし、周辺地盤が液状化するとせん断波はほとんど伝播されなくなるので、地震波動による影響は他に比べて小さいと考えられる。また、浸透流による力は、噴砂噴水現象が生ずる地点では非常に大きくなると予想されるが、このような現象はクラックなどに沿った表層地盤の比較的弱い部分で生じており、局地的な現象であるのでここでは考えないことにする。したがって本解析においては、管路に与える影響が最も大きい浮力のみを取り出して解析を行う。ここでは、周辺地盤の単位体積重量と地中埋設管のみかけのそれとの差により生ずる力を、分布荷重として鉛直上向きに管路に作用させた。また、本解析は完全液状化時の

みを取り出して管路の挙動を明らかにしようとしたものであり、完全液状化の継続時間は十分に長いものと仮定し、擬似静的な解析を行った。この時の地盤ばね定数はまだ定量的に明らかにされていないので、ひとつのパラメータとして取り扱い、管路の挙動の定性的な傾向を明らかにした。

5. 解析例

比較的重要度が高く実際にも上水道管としてよく用いられている呼び径 500mmのダクタイル鋳鉄管における解析例を示す。Table 1に解析に用いた管路の諸数値を示す。管路は、一端が構造物に固定されており他端が自由とした。また、管路長は100mとし、1本5mの管体20本が継手にて連結されているものとした。これは、管路長を100m以上とした場合でも固定端付近の管路の応答が管路長にかかわらず等しかったことによる。管路に浮力と自重との差に相当する分布荷重を与えると管路は浮上し、地表面以上にまで達することになる。そこで本解析では、分割荷重を順次作用させ、地表面以上に達した管は解析の対象外とし、地中にある管路のみに分割荷重を作用させた。そして最終的には、地表面に達した位置でたわみ角をゼロとし、地表面に管路が延びている状態で地中の管路の応答を解析した。Fig. 3は、このように分割荷重を与えた時の管路の浮上の様子を示している。

Fig. 4は、地盤ばね定数をパラメータとして解析した時の管路の応答を示している。それぞれ、管体の曲げモーメント、継手の回転角、継手の引き抜け量の最大値を示している。ここでは継手の引き抜け量を以下のようにして求めた。つまり、管路の浮上に伴い管体と継手は伸長する。Fig. 5より、工学的に考えられる管1本当りの最大の伸び Δ は

$$\Delta = \sqrt{(v_2 - v_1)^2 + L^2} - L \quad (8)$$

となる。本解析では、管路の伸びはすべて管の両側の継手で 1/2 ずつ均等に受け持たれると仮定し、継手の引き抜け量とした。Fig. 4によれば、当然のことながら地盤ばね定数が小さいほど、つまり液状化の程度が大きい程管路の応答は大きくなっている。同図にはそれぞれの許容値も示されているが、地盤ばね定数が小さくなっていくと最初に継手の回転角が許容値を越えることになる。すなわち、浮上によって管路が破壊する場合は、継手部の屈曲によって破壊する可能性が最も大きいと考えられる。この時の管路の浮上の様子をFig. 6に示すが、管体の剛性が大きいため管体自身が大きくたわむことはなく、継

Table 1 Dimensions of pipe

	Ductile cast iron
Outside diameter (cm)	52.9
Thickness (cm)	0.95
Young's modulus (kg/cm ²)	1.6 x 10 ⁶
Length (cm)	500
Specific gravity	7.15

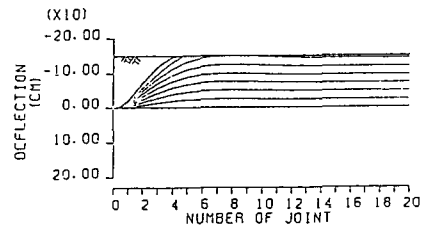


Fig. 3 Floating of pipe

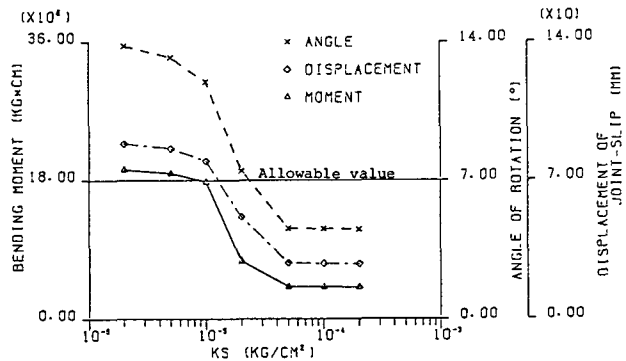


Fig. 4 Relationships between equivalent spring constant of soil and response of buried pipe.

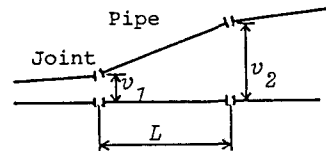


Fig. 5 Schematic diagram of buried pipes.

継手部の屈曲によって破壊する可能性が最も大きいと考えられる。この時の管路の浮上の様子をFig. 6に示すが、管体の剛性が大きいため管体自身が大きくたわむことはなく、継

手で折れ曲がるような形状となっている。

Fig. 7 は、継手の回転ばね定数を変化させた場合の管体の曲げモーメント、継手の回転角、継手の引き抜け量の最大値を示している。継手の回転ばね定数を大きくすることは、管路を柔から剛にすることであるから、管路の浮上量は軽減される。しかし一方では、継手で曲げモーメントを吸収するという効果が減少される。同図によれば、回転ばね定数を大きくすると、継手の回転角と継手の引き抜け量は許容値内であるのに対し、曲げモーメントが許容値を越える。すなわち、管体が曲げで破壊する可能性がある。管路の破壊を考えると、管体自身よりも継手で破壊した方が復旧などの点で有利であると考えられるので、継手ばね定数を大きくすることによって管路の浮上量を軽減することは、復旧を考慮すると有利な対策とは言い難い。

この他、外径11.4cmの硬質塩化ビニール管についても同様の解析を行った。その結果を呼び径 500mmのダクタイル鋳鉄管の解析結果と比較すると、管径の小さな硬質塩化ビニール管の方が剛性が小さくても液状化時に受ける浮力も小さいので、液状化に対しては比較的安全であることが明らかになった。

しかし、ここでは動的な挙動は考慮されていないので、当然のことではあるが液状化過程を通して硬質塩化ビニール管の方が安全であるとは言いきれない。

6. まとめ

本研究は、液状化地盤を超軟弱地盤としてとらえ、液状化時の地中埋設管を弾性床土上の梁としてモデル化し、地盤ばね定数を極端に低下させることによりその挙動を明らかにしようとしたものである。地盤液状化時には、浮力と自重の差より生ずる鉛直上向きの分布荷重が埋設管に作用するという簡単なモデルによって継手と管体の応答の定性的な傾向を明らかにすることができた。つまり、地盤ばね定数が低下すると、継手の屈曲によって破壊する可能性が大きいこと、回転ばね定数を大きくすると継手の回転角、引き抜け量は減少するが管体部で破壊する可能性が大きくなり、これは復旧の点から考えると不利であること、などであるしかし、液状化過程のすべてをこのような簡単なモデルで表現できるものではなく、たとえば、不完全液状化時の動的な挙動、上向きの浸透流の影響、過剰間隙水圧の消散時に生ずる地盤の沈下による影響、など残されている問題点も多い。今後は、液状化の発生メカニズムが十分に反映される地盤応答解析と埋設管の応答解析を結びつけ、上述した問題点を解決していく必要がある。

最後に、本解析はすべて金沢大学計算機センターのFACOM M170F を使用したことを付記する。

参考文献 1) 高田至郎, 高橋俊二, 山部泰男; 硬質塩化ビニール管の地震時挙動シミュレーション, 水道協会雑誌, 第 547号, 1980. 2) 中村秀治; 数値誤差の改善を考慮した伝達マトリックス法の提案, 土木学会論文報告集, 第 289号, 1979.

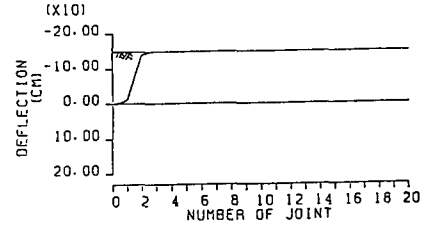


Fig.6 Final deflection of pipe.

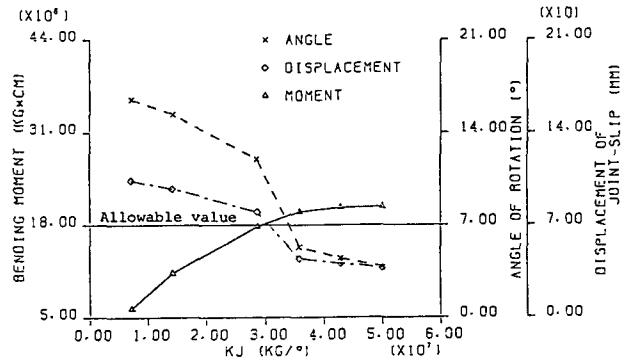


Fig.7 Relationships between spring constant for rotation and response of buried pipe.