

(189) 液状化地盤の大変形を受ける管路挙動のパラメータ解析

八代工業高等専門学校 正員 瀧田邦彦
 Old Dominion University Wang, L. R. L.
 熊本大学工学部 正員 秋吉卓

1. まえがき 近年、海岸部などの軟弱な低湿地へと都市域が広がるにつれて、ライフライン建造物の安全性確保が重要な課題になりつつある。とくに地震時の地盤液状化による、数mにも及ぶ地盤の流動は、埋設管路に多くの被害をもたらす。都市機能を著しく低下させるため、何らかの事前の対策が望まれている。著者らは、地盤改良が困難な場合の補助的な手段として管体補強工法を提案し、いくつか報告してきたが^{1), 2)}、そのような対策を構ずるためには、液状化地盤の大変形に対する管路挙動を調べておくことも重要と考えられる。そこで本研究では、埋設管路の液状化対策の前提となる、地盤大変形を受ける管路挙動に関する検討を行ったので報告する³⁾。

2. 解析手法の概要と解析モデル 解析においては、埋設管の慣性力や減衰力の影響は小さいものとして無視し、外力は液状化時の側方流動による地盤の強制変形とし、管体は変形後も弾性範囲内にあるものとする。管路は、伸縮ばねと回転ばねによる継手で連結され、かつ各管体は地盤ばねにより支持される、弾性床上の梁でモデル化する(図1)。このような管路モデルにおいて、管軸方向および管軸直角方向の基礎方程式を解くことにより、側方流動に対する管路の応答を得るが、ここでは省略する³⁾。なお長い管路について数値誤差の累積を妨ぐため、修正伝達マトリックス法⁴⁾を用いている。

解析用モデルは、地盤の一部区間(100m)が液状化・流動化による大変位をすところ、直線管路が水平に埋設されているものである。管路は、口径500mmの鋼管(継手のない連続管)あるいはダクタイル铸铁管とし、その標準値を表1に掲げた。液状化時の地盤ばね定数は、室内実験の結果等^{5), 6)}を参考にして平常時の1%程度とし、図2のようにバイリニア形の非線形特性を持たせ、降伏時の相対変位を1mmとしたが、管軸直角方向の場合には、土の引張り抵抗が無視できる程度に十分小さなものとした。継手はS型(耐震継手)を標準とし、図3のようなバイリニア形の特性とした。外力は液状化土の側方流動が管軸直角水平方向に作用するものとし、図4のような台形分布を与える。数値解析では、荷重増分法の考え方を用いて外力である地盤変位を細かく分割し、各荷重ステップごとに線形解析を行ったが、地盤ばね及び継手ばねは前荷重ステップにおける相対変位をもとに図2, 3の非線形特性より決定した。ただし降伏点近傍及び圧縮・引張変化部付近では、それらの特性を正しく捉えるように各荷重ステップごとに入力変位を調整している。

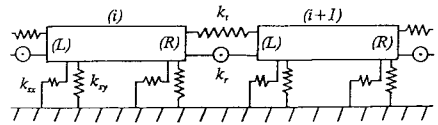
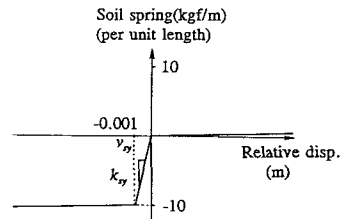


図1 埋設管路のモデル化

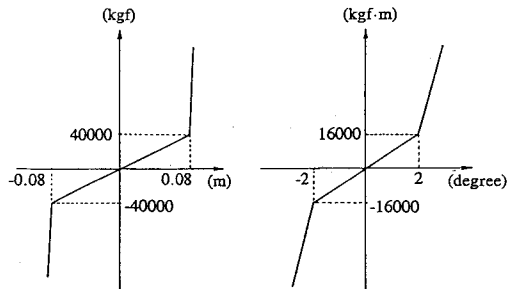
表1 管路モデルの標準値

Physical items(unit)	Values
Nominal diameter(mm)	500
Outside diameter(mm)	528
Thickness(mm)	9.5
Total length(m)	100
Young's modulus(kgf/mm ²)	1.6 × 10 ⁴
Specific gravity	7.15



(a) Lateral Soil Spring (tension positive)

図2 地盤ばねの特性



(a) Axial Joint Spring

(b) Rotational Joint Spring

図3 継手ばねの特性 (S型継手)

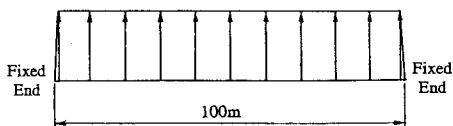


図4 入力地盤変位分布 (管軸直角方向)

3. 解析結果と考察 標準モデルである連続鋼管の数値解析の結果、地盤変位入力荷重増分過程において以下のような管路挙動を得た。まず入力地盤変位が数cm程度のごく小さい初期の段階では、管路両端付近の地盤ばねが降伏するが、管路中央部では管路変位が地盤変位を上廻り地盤ばねが引張特性となるため、地盤ばね圧縮となる部分を除いて管路には地盤の外力が作用しない状態となる。地盤変位増加につれて地盤ばねの降伏する範囲が広がり、逆に地盤ばねが引張となる部分は次第に中央部付近へと狭められ、さらに地盤変位が増加して全地盤ばねが圧縮特性となった後、降伏にまで至ると、それ以上の荷重が管路に伝わらなくなり、管路の変形は一定となる。図5は、入力地盤変位0.4mの場合の、標準モデル管路の応答変位分布を示したもので、太い実線、点線はそれぞれ管路変位、地盤と管路の相対変位を、また細い実線は入力地盤変位を表わしている。

この図では管路変位は中央部で最大0.3683mであり、全地盤ばねは降伏しているため0.4m以上の地盤変位に対して一定となる。このように、液状化地盤においては、数mにも及ぶ大きな側方流動変位に対して地盤ばねの降伏によって、管路の変位が有限値に留まることも考えられるので、耐震設計等においてこの点に配慮しておくことが重要であろう。図5の全地盤ばねが降伏した状態の管路には、図2の地盤ばね特性より単位長さ当り10kgfの一定外力が作用していることになる。そこで同じヤング係数、断面2次モーメント、管長を用いて等分布荷重を受ける両端固定の弾性梁より最大変位の理論解を求めると0.3699mとなり、図5の結果との誤差がわずかに0.4%程度であることから、本研究の解析手法はきわめて正確といえる。

図6は、管路中央部の変位と図5の管路最大変位0.3683m(基準値)との比をとり、横軸の入力地盤変位に対してプロットしたもので、無次元地盤ばね比をパラメータとしている。横軸の地盤変位は、図2の非線形特性の降伏点における相対変位1mmに対する比で表わしている。また地盤ばねは、地盤ばね標準値の無次元量を基準にとり正規化している。図より、各無次元地盤ばねパラメータにおける、管路応答変位と地盤変位との関係が、明白な降伏点を有するバイリニア形の特徴で示されている。また地盤ばね比が増加するほど管路の応答変位も増大することがわかる。

図5, 6より、地盤大変形に対する管路の応答は全地盤ばねの降伏した限界状態が重要といえる。そこで図7は、この限界状態の管路最大応答変位(以後、“限界変位”と呼び、以下ではこの限界状態の応答量を“限界”を付けて用いる)と、図5の最大変位0.3683mを基準値としてこれとの比をとり、無次元地盤ばね比に対して図示したものである。管路変位と地盤ばね比との関係は大略線形関係で表わされている。

次に、一端固定、他端自由の境界条件の管路応答について考える。図8は、右端自由の片持ち梁形式の管路の応答変位分布を図示したもので、太い実線が管路変位、点線が管路-地盤間の相対変位、点線が入力の地盤変位を表わしている。この図の入力地盤変位20mの状態では、地盤ばねは全て降伏しており、管路変位は自由端において最大の、17.5mとなる。図5の場合と同様、梁理論より等分布荷重を受ける片持ち梁の自由端におけるたわみを求めると17.8mであり、本研

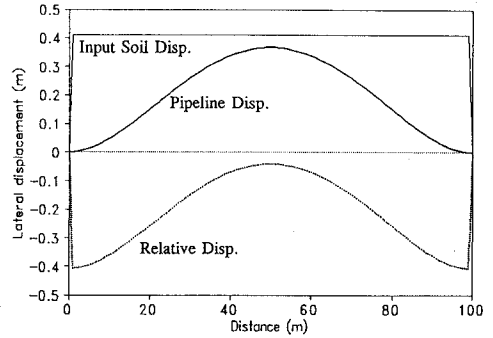


図5 管路の応答変位分布 (連続管路標準モデル, 入力変位 0.4m)

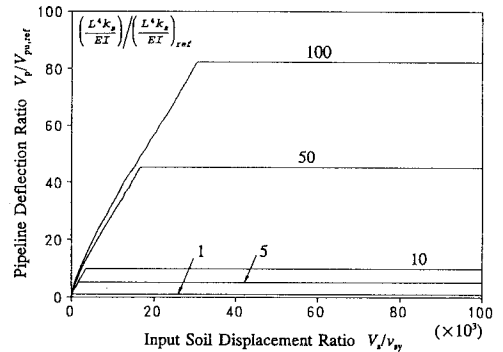


図6 管路応答変位比と入力地盤変位比との関係 (連続管標準モデル)

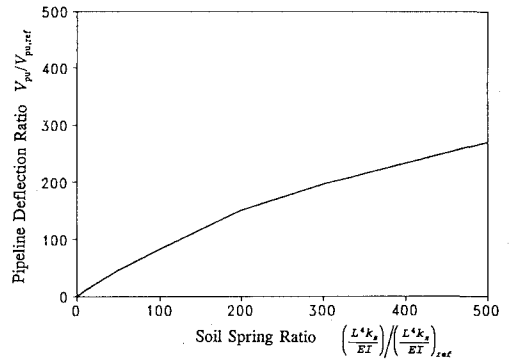


図7 管路の限界変位比と地盤ばね比との関係 (連続管標準モデル)

究の結果の誤差は約 1.3% となる。一端自由の境界条件では管路は変形しやすくなるので、図5の両端固定の場合よりも誤差が大きくなったものと考えられるが、この程度の誤差であれば、解析結果は概ね妥当といつてよいであろう。

図9は、自由端における管路の限界変位比と無次元地盤ばね比との関係である。限界変位比は図8の標準モデルにおいて自由端の最大変位 17.5m を基準値として正規化している。図より、管路変位比は無次元地盤ばね比に対して非線形な関係であり、無次元地盤ばね比が 300 以上の場合にほぼ一定となっている。

実際の管路は、一般に継手で結合されている。以下では継手を持つ管路が上記と同様の地盤の大変形を受ける場合の挙動について考察する。図10は、入力地盤変位比に対する両端固定の管路応答変位比を、無次元地盤ばね比をパラメータとして図示したものである。この図では、管路は図3の特性を持つ S 型継手で結合されており、管路中央における変位は図5に示された連続管路標準モデルの最大限界変位 0.3683m を基準値として正規化されている。全地盤ばねが降伏するときの管路応答変位比と入力地盤変位比は、図5の場合より大きくなり、S 型継手を持つ管路の変位は連続管路変位の場合の 3 倍以上になるといえる。

図11は、両端固定 S 型継手管路の限界変位比を無次元地盤ばね比に対して図示したものである。限界変位比は無次元地盤ばね比 300 以下でこれにほぼ比例している。無次元地盤ばね比 10 以下の小さな場合には S 型継手管路は地盤の変形に抵抗できるが、無次元地盤ばね比が大きくなると、管路変位は地盤変位に追従しやすくなり、また図7の連続管路の約 3 倍にまで増大するので、S 型継手は地盤の大変形に抵抗できない場合もあると考えられる。

図12は、両端固定 S 型継手管路の限界継手回転角比と無次元地盤ばね比との関係を図示したもので、継手回転角は、S 型継手管路の標準地盤ばねの場合の継手回転角 0.781° を基準値として正規化されている。継手の最大回転角は両端部から数えて 1 番目または 2 番目の継手で生じており、それらは無次元地盤ばね比に対して非線形な関係をもつが、S 型継手の許容回転角を 5° 程度とすれば、これは継手回転角の基準値の約 7 倍であることから、図12の無次元地盤ばね比 10 以下の場合を除くほぼ全域において、継手は回転による破損を生ずるものと考えられる。

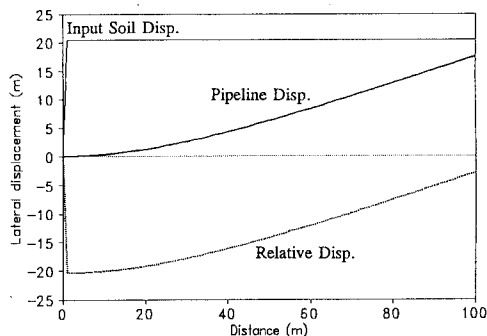


図8 管路の応答変位分布 (連続管路, 一端自由モデル, 入力変位 20m)

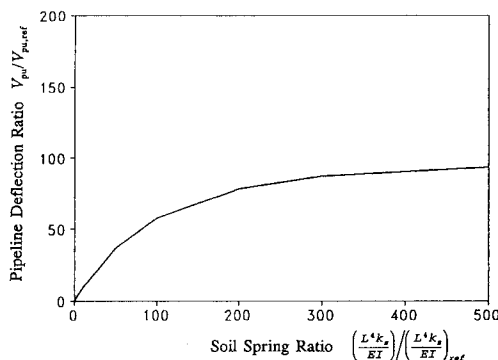


図9 管路の限界変位比と地盤ばね比との関係 (連続管, 一端自由モデル)

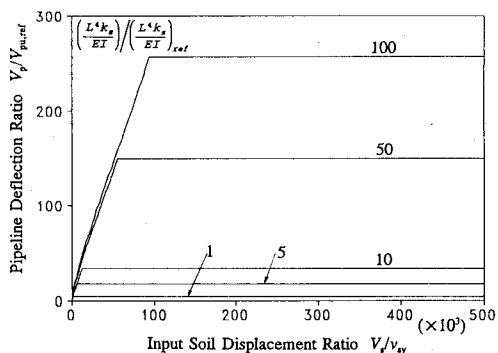


図10 管路応答変位比と入力地盤変位比との関係 (S型継手管, 標準モデル)

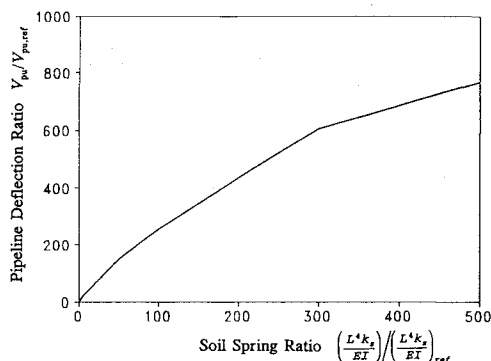


図11 管路の限界変位比と地盤ばね比との関係 (S型継手管, 標準モデル)

図13は、継手の最大相対変位比と無次元地盤ばね比との関係を表わしたものである。この図の継手変位は隣合う管体間の相対運動で定義したもので、地盤ばねが標準値の場合の最大継手変位0.817mmを基準値として正規化されている。相対継手変位比は無次元地盤ばね比と非線形な関係を持つが、無次元地盤ばね比10以上の図中のほぼ全域で、継手変位は許容値80mmより大きくなるのがわかる。これより、無次元地盤ばね比が大きい、すなわち地盤の剛性が管路の剛性に比べて相対的に大きくなる場合には、継手の変位量に十分な注意を払う必要があるといえよう。

図14は、管路の限界応答変位比と無次元地盤ばね比との関係であり、継手ばねを3種類変えた場合を図示している。継手ばねはS型継手を標準として、降伏変位を固定して継手ばねを変化させ、無次元継手ばね比が0.1, 1, 10の3つのケースを図示している。図より、無次元継手ばね比10の場合は連続管の結果にほぼ等しくなり、無次元継手ばね比が小さくなると、限界変位比は同じ傾向のまま図中の上方すなわち限界変位比が大きくなる方へと移動している。

図15は、継手の限界回転角比と無次元地盤ばね比との関係を前図15と同様3種類の無次元継手ばね比の場合に図示したものである。図中の継手回転角はS型継手の標準地盤ばねの場合の0.781°を基準として正規化されている。無次元継手ばね比の各ケースとも限界回転角比と無次元地盤ばね比との関係はほぼ同様の傾向であるが、継手ばねが小さな軟らかい継手ほど継手の回転変位が増大することがわかる。

4. まとめ 以上のように本研究では、液状化地盤の大変形に対する管路および継手の応答を、地盤ばね、継手ばねなど設計上重要なパラメータと関連づけて検討した。

参考文献 1)秋吉 卓他：第8回日本地震工学シンポジウム論文集，1990。 2)Akiyoshi, T. et al: Proc. of 10WCEE, Vol. 9, 1992。 3)Fuchida, K. & Wang, L. R. L. : Technical Report ODU LEE No. 8, 1993。 4)中村秀治：土木学会論文報告集，第289号，1979。 5)高田至郎：S62年度科研費報告書(総合A, 代表 土岐憲三)，1988。 6)秋吉 卓・他：土木構造・材料論文集，第5号，KABSE, 1990。

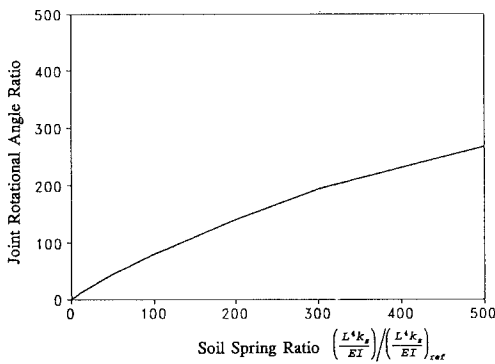


図12 限界継手回転角比と地盤ばね比との関係 (S型継手管, 標準モデル)

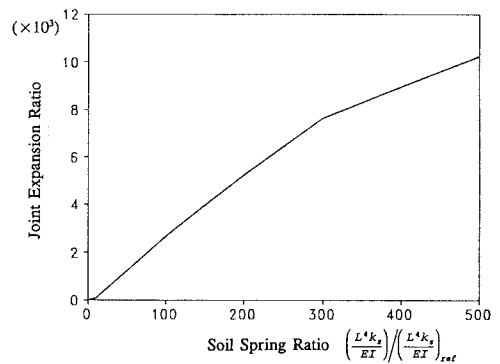


図13 限界継手相対変位比と地盤ばね比との関係 (S型継手管, 標準モデル)

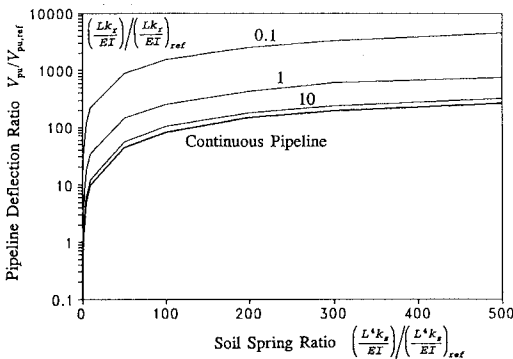


図14 管路の限界変位比と地盤ばね比との関係 (S型継手管, 継手ばね変化)

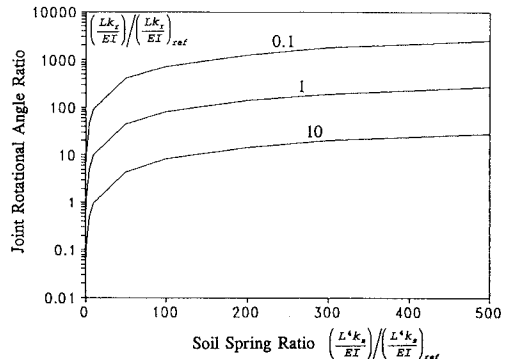


図15 限界継手回転角比と地盤ばね比との関係 (S型継手管, 継手ばね変化)