

(102) 側方流動による埋設管の変形と対策

(株) 富士総合研究所 大谷 泰昭 ○李 銀生

早稲田大学 理工学部 濱田 政則

1. はじめに

1月17日に発生した兵庫県南部地震は、六甲アイランドやポートアイランドの二つの人工島や本土側埋立地の広範囲な地域において液状化を引き起こし、岸壁、建築物およびライフライン施設などに極めて甚大な被害を生じさせた。ライフラインの埋設管路の被害原因については現在関係の各機関で調査中であり、詳細についてはこれらの調査結果を待たなければならないが、地盤の液状化が大きな被害原因の一つになったことは明らかである。中でも液状化に起因した地盤の水平移動、すなわち側方流動が埋設管被害の直接的要因になったと考えられる。

側方流動によるライフライン埋設管路の被害は1964年新潟地震をはじめとして既往の多くの地震で報告されている。側方流動による地盤の水平変位が一般に数メートルにも達することから、建設年代が古く、強度が比較的低い埋設管はもとより、可撓性を有するダクタイル管や溶接鋼管などの埋設管にも重大な影響を与えると考えられる。

溶接鋼管を例にとれば、既往の地震で側方流動により直管部の座屈や曲管部での破断が生じている。本文では溶接鋼管曲管部の変形とひずみに対する側方流動の影響を数値解析により検証し、問題点を明らかにしてその対策工法について考察を行った。

2. 側方流動による曲管部のひずみと考察

液状化による地盤の側方流動が埋設管や杭などの地中構造物に及ぼす外力については、すでに幾つかの実験的研究が行なわれている。これらの研究結果によれば、側方流動中の地盤内に埋設された構造物には流体的な外力が作用することが明らかにされている。しかしながら、多くの埋設管の場合は埋設深さが浅いため、地下水位以上の非液状化層に位置することが多いと考えられる。このような場合には地盤の拘束力が残っているため、側方流動による地盤変位の影響を直接的に受けることになり、埋設管にとっては最も厳しい条件となる。本解析ではこのような条件を中心に、側方流動による地盤変位を入力として検討を行なった。

2.1 埋設管および地盤のモデル化と入力地盤変位

埋設管をはり、地盤をばねでモデル化し、地盤変位を地盤ばねを介して入力する、いわゆる応答変位法によったが、地盤ばねおよび埋設管とも以下に述べるような弾塑性モデルで評価した。

(1) 埋設管のモデル化 溶接鋼管(750A)について解析を行なった。その外径は762.0mm、肉厚は12.7mm、曲管部の曲率半径は外径の3倍である。管の材質はAPI-5L-XS2で、降伏応力は36.6kg/mm²、ひずみ硬化率はヤング率の0.007倍である。埋設管の曲管部は応力(ひずみ)集中が発生しやすく、側方流動による影響の最も大きい部位の1つであると考えられる。このため、本解析では曲管部を有する管路に注目し、90°曲り管について検討を行なった。埋設管の曲管部の弾塑性挙動を解析するため、シェル要素解析から得られた曲管部の変形特性をはり要素に代入する手法を用いた¹⁾。この手法では、シェル要素を用いて曲管部に関する弾塑性大変形解析を行ない、曲管部の変形特性曲線M(モーメント) - K(曲率)を求め、これをはり要素に導入する。このようなはり要素置換による埋設管の解析結果は、シェル要素による解析結果を模擬できることが明らかにされている。

(2) 地盤ばねの評価 基準となる地盤反力係数 k_0 を0.6/cm³とした。ただし、液状化による地盤剛性の低下を考慮し、地盤ばね定数を1/10に低下させた場合についても併せて検討を行った。地盤ばねを完全弾塑性型でモデル化し、軸方向と軸直角方向の降伏変位を各種の実験結果を参考にそれぞれ0.17cmと1.5cmとし

た。

(3) 入力地盤変位 液状化に起因した側方流動変位の分布は本来地形・地質条件によって支配されるものであり、一律に設定することはできない。本検討の目的が曲管部の変形特性を究明することにあることから、ここでは地盤のひずみを一様、すなわち図2.1に示すように地盤の変位分布を直線と仮定した²⁾。

2.2 解析結果と考察

(1) 一様なせん断ひずみ場における変形 側方流動領域の長さによる影響を考察するために、地盤のせん断ひずみを1.0%として、側方流動領域の長ささと埋設管の最大ひずみの関係を求めた。この結果を図2.2に示す。図の縦軸に示す最大ひずみは曲がり管の周方向のひずみである。図2.2から側方流動領域の増大に対して、管の最大ひずみの増大は一定値に漸近する傾向があり、曲管部における管の変形がごく近傍の地盤変位に支配されていることが分かる。図2.1(a)に示すような地盤のせん断変形は曲管部に曲げ変形を生じさせる。側方流動領域が広がり地盤変位の分布長が増大しても、直管部の横方向変形によって地盤変位が吸収できるため、曲管部のひずみは増大しない。これが管の最大ひずみが一定値に漸近する理由と考えられる。

図2.3は側方流動領域の長さを50mとしたときの地盤のせん断ひずみと管の最大ひずみの関係を示す。地盤ひずみの増大に伴い、管の最大ひずみも増大し、一定値に漸近する傾向が見られない。これは、地盤せん断ひずみが増大するほど直管部の回転角およびそれに対応する曲管部の曲げ変形が大きくなることによるものと考えられる。また、図2.3から外曲げ（曲管部が開く方向の曲げ）より内曲げ（曲管部が閉じる方向の曲げ）が曲がり管の変形に対する影響が大きいことが分かる。

(2) 一様な垂直ひずみ場における変形 地盤ひずみを1.0%、地盤反力係数 k を $k_0/10$ とした場合の側方流動領域の長ささと管の最大ひずみの関係を図2.4に示す。地盤の垂直ひずみの場合は、せん断ひずみの場合と異なり、側方流動の領域が増大するにつれて管の最大ひずみが増大している。これは側方流動領域の増大とともに直管部の軸力が増大し、この軸力が曲管部に曲げ変形を生じさせるためと考えられる。

一方、図2.5に示すように、地盤の垂直ひずみが増大しても、管の最大ひずみはそれほど増大せず、一定値に近づく傾向を示している。これは地盤ばねを完全弾塑性型としているので、地盤ひずみが増大しても直管部の軸力が一定値に近づくためと解釈される。

以上の結果から、地盤の管軸方向の地盤の垂直ひずみにより直管部に軸力が作用し、曲管部が内曲げ状態になることが埋設管にとって最も厳しい条件になることが明らかにされた。

(3) 地盤条件の影響 図2.6、2.7に地盤反力係数が曲管部の最大ひずみに与える影響を示す。地盤反力係数は前述した標準値およびこれの1/10とした。液状化地盤のばね定数についてはすでに多くの実験があるが、完全液状化時のばね定数は非液状化地盤のばね定数の1/2～1/10との報告がある。図示した結果から、地盤反力係数は管のひずみに大きな影響を与えることが分かる。液状化地盤の反力係数については実験の難

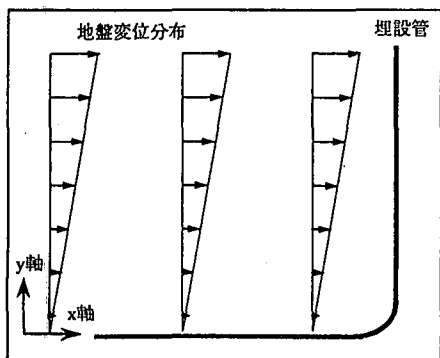


図2.1(a) せん断ひずみ場とみなした地盤変位分布

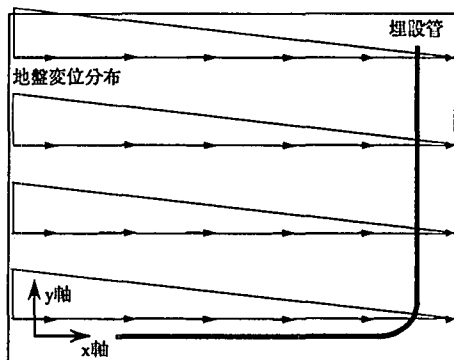


図2.1(b) 垂直ひずみ場とみなした地盤変位分布

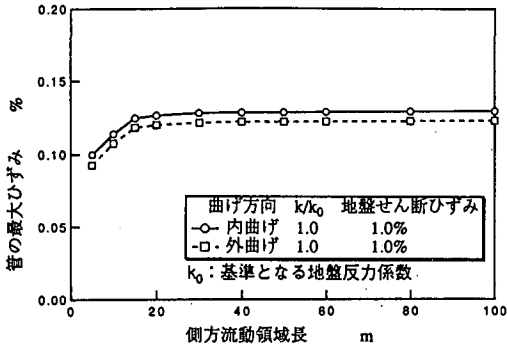


図2.2 地盤せん断ひずみ場領域長の影響

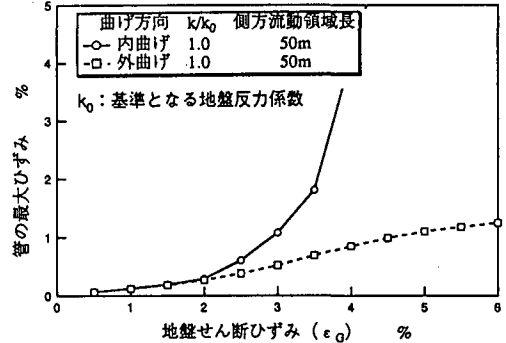


図2.3 地盤せん断ひずみの大きさの影響

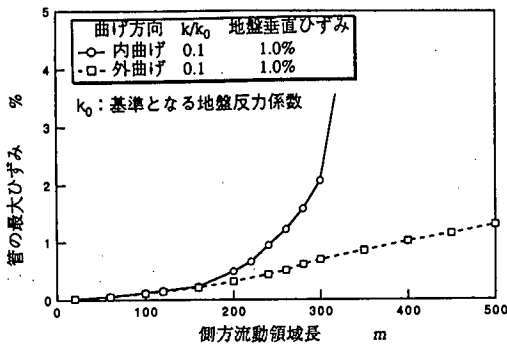


図2.4 地盤垂直ひずみ場領域長の影響

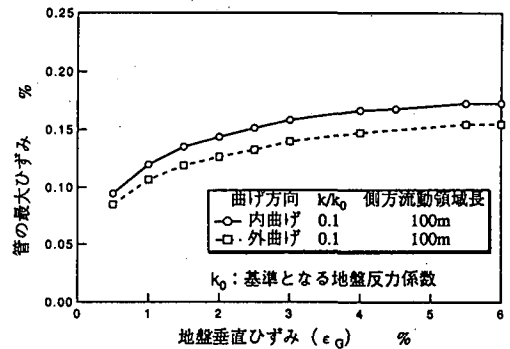


図2.5 地盤垂直ひずみの大きさの影響

しさもあって、設計用の値を決めることは容易ではないが、実務的には安全側を考慮した割り切りが必要であろう。今後さらに検討を進めることが重要である。

3. 対策工法に関する検討

前述した解析により、地盤の垂直ひずみが直管部に軸力を発生させ、これが曲管部に大きなひずみを生じさせることが明らかにされた。特に内曲げ状態が埋設管路の耐震設計上大きな問題となることが分かった。このため、その対策工法を考えることは重要である。ここでは、①埋設管肉厚の増大、②曲率半径の増大、③曲管部地盤の締固め、の3種類の対策の効果を数値解析により検討した。

①と③を考慮した場合の側方流動領域長さと管の最大ひずみの関係を図4.1に示した。肉厚を2倍に、曲管部地盤の地盤反力係数を5倍にすることによって、1.0%の管の最大ひずみに対応する側方流動領域の長さはそれぞれ約1.5倍、2.5倍までに増大した。一方、②と③を考慮した場合の側方流動領域長さと管の最大ひずみの関係を図4.2に示した。曲管部の曲率半径を外径の5倍に、曲管部地盤の地盤反力係数を5倍にすることによって、1.0%の管の最大ひずみに対応する側方流動領域の長さはそれぞれ約1.2倍、2.7倍までに増大した。

このような解析結果から、①～③の3つの対策工法はそれぞれ埋設管の弾塑性変形を緩和するには有効であることが分かった。中でも、施工の容易さおよび経済的な観点から考えて、地盤の改良による曲管部地盤ばね定数の増大は最も効果的なものであると判断される。

4. あとがき

以上述べたように、管軸に沿った軸方向の地盤ひずみにより直管部に軸力が発生し、これが曲管部に大きなひずみを生じさせることが明らかになった。特に直管部の圧縮力による曲管部の内曲状態が問題になることが示された。さらにこの場合、側方流動が発生する領域の長さが直管部の軸力の大きさに影響を与え、曲管部のひずみを支配していることが明らかにされた。

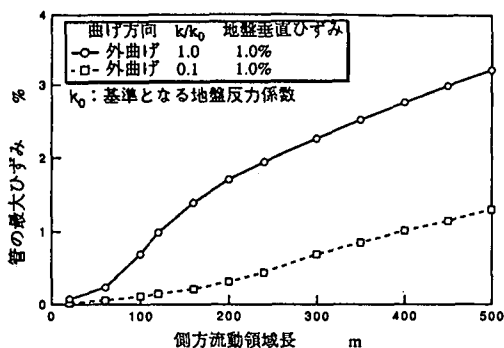


図2.6 地盤条件の影響

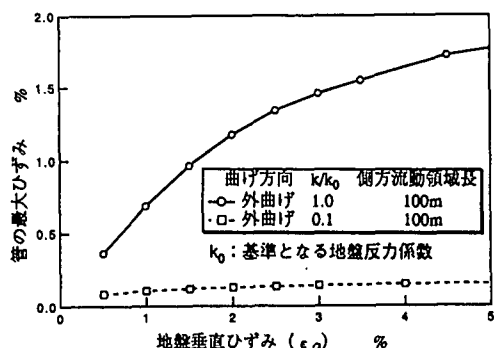


図2.7 地盤条件の影響

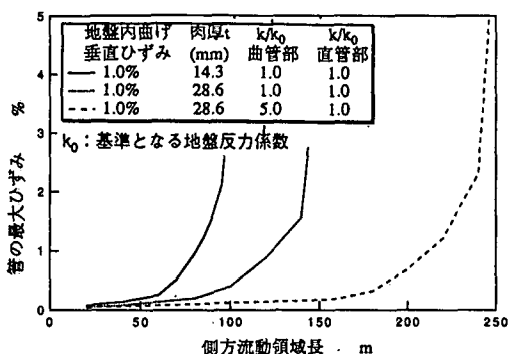


図3.1 管の肉厚及び地盤条件による影響

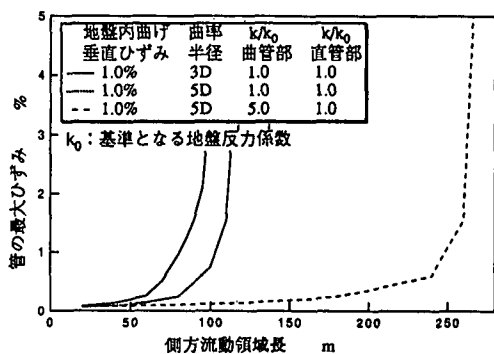


図3.2 管の曲率半径及び地盤条件による影響

地盤のひずみが発生する領域は本来、その地点の地形・土質条件によって決まるものであり、側方流動の可能性のある地域に管路を埋設する場合には十分な調査の上、領域の大きさを決定する必要があると考えられる。しかしながら、一般的には調査の難しさもあって埋設管の耐震設計のためには標準的な領域の長さを定める必要が生じる。この場合に参考となるのは新潟地震、日本海中部地震および今回の兵庫県南部地震などによる事例である。これらの事例を分析することによって標準的な側方流動の領域の大きさを決定する必要がある。この場合、地盤変位分布中における曲管部の位置を最も危険側な位置に設定するのではなく、確率論的な検討を踏まえて設計値を決める必要がある。

本検討では、曲管部の側方流動対策として ①管厚の増加、②曲率半径の増大、および③地盤改良等による曲管部の地盤ばねの増加、などを考えて試算を行った。この結果、曲管部の地盤ばねの増大が最も効果が大きく、現実的な方法であることが示された。この対策工法については実物管路での載荷試験を行って効果を確認して行くとともに、曲管部における具体的な地盤改良の方法やその必要領域についても検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) Suzuki, N., Nasu, M.: Non-linear Analysis of Welded Elbows Subjected to In-plane Bending, Computer & Structures, Vol.32, No.3, 871(1989).
- 2) Satoh, M., Isoyama, R., Hamada, M., Hatakeyama, A.: A Procedure to Assess the Stability of Buried Structures against Liquefaction-induced Ground Deformations, 3th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol.1, April 2-7, 1995, St. Louis, Missouri.