

# 上水道管路の兵庫県南部地震における 被害と応答解析結果の比較検討

宮島昌克<sup>1</sup>・生田目尚美<sup>2</sup>・北浦 勝<sup>3</sup>・中道佳彦<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 金沢大学助教授 大学院自然科学研究科 (〒920 石川県金沢市小立野2丁目40-20)

<sup>2</sup>金沢大学大学院工学研究科 (〒920 石川県金沢市小立野2丁目40-20)

<sup>3</sup>正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 石川県金沢市小立野2丁目40-20)

<sup>4</sup>三谷商事(株) (〒910 福井県福井市豊島1丁目3-1)

1995年兵庫県南部地震においては、多数の上水道管路に被害が生じ、復旧までに多くの日数を要した。管路被害は、液状化が大規模に発生した臨海埋立地や震災の帯と言われる激震地域に多く発生している。本研究では、液状化が顕著に発生したポートアイランドと激震地域に含まれている東灘区を取り上げ、修正伝達マトリックス法を用いた管路の応答解析を実施し、実被害との対応について検討した。その結果、液状化による地盤ばね定数の低減係数や管路のネットワーク形状と被害発生個所との関連について基礎的な知見を得ることができた。

**Key Words:** buried pipeline, liquefaction, lateral ground displacement, earthquake damage

## 1. はじめに

昨今、大地震が相次ぎ、その度に水道管路などの地中埋設管の被害が報じられている。水道管路の破壊は直接人命を奪うことはないが、火災などの二次災害の拡大を招くと共に飲料水の断絶が地震後の生活を困難なものとする。

水道管路の被害は、主に地震動によって振動中に直接引き起こされるものと、液状化などの地盤変状によるものに大別される。

地盤の液状化による側方流動が地中埋設管に及ぼす外力荷重の評価を行った研究として、地盤ばね定数の低減を考慮した応答変位法に基づくものや、側方流動地盤を粘性流体として取り扱うものがある。本研究では、液状化による地盤の永久変位と地盤ばね定数の低減を考慮した水道管路の応答解析を、液状化による被害が顕著に発生したポートアイランドの上水道管路を対象として行った。

一方、兵庫県南部地震において激震地域に含まれている東灘区の一部の管路網を取り上げ、地震動による管路の挙動について解析し、管路のネットワーク形状と被害発生個所との関連について考察した。

## 2. 解析手法

上水道管路の解析には応答変位法を用い、その際

の計算方法として修正伝達マトリックス法<sup>1)</sup>を用いた。修正伝達マトリックス法は伝達マトリックス法を精度的に改善したものである。入力変位については後に詳しく述べるが、液状化による影響を考慮する場合には地盤変状図<sup>2)</sup>から読み取った地震後に観測された地盤の永久変位量を、地震動による影響を考慮した場合には算出された地表面の変位波形を用いた。

## 3. 液状化による地盤ばね定数の低減を考慮した 管路の応答解析

### (1)地盤の永久変位<sup>2)</sup>と地中埋設管の被害<sup>3)</sup>

図-1にポートアイランドの上水道管路の被害地点を示す。ポートアイランドの上水道管路の被害はすべて一般継手A、K、T型を有するダクタイル管であり、その被害形態のほとんどが継手の抜けによる漏水であった。耐震継手であるS、S-II型を有する管路においては被害が発生しなかった。また、この辺りの地盤は埋め立て地であるため、液状化による被害が激しく、地盤の永久変位や填砂がポートアイランドのほぼ全域にわたって観測された。全体的に内陸部から護岸に向かって地盤が変形しており、護岸付近では2~3mにも及ぶ永久変位が生じていた。上水道管路は液状化による地盤の変形に追随しようとして破壊したものと思われる。

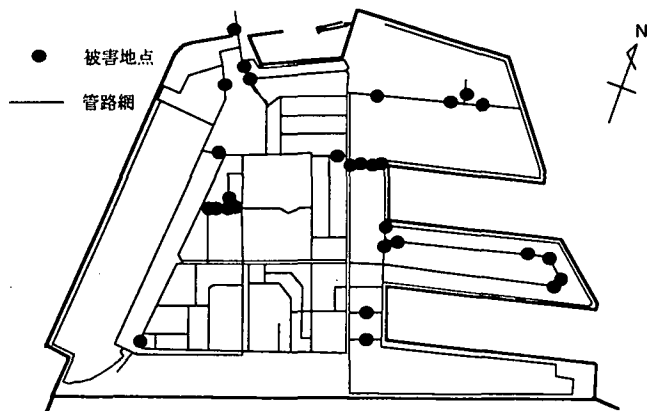


図-1 ポートアイランド管路被害地点

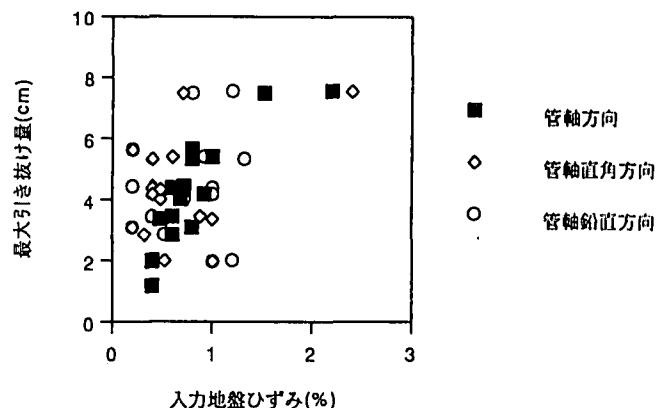
(2)入力地盤変位

ポートアイランドの地盤変状図<sup>2)</sup>から解析対象管路周辺の水平変位量、地盤沈下量を読み取り、Kriging法<sup>4)</sup>を用いて補間したものを管路に作用する入力地盤変位量とした。

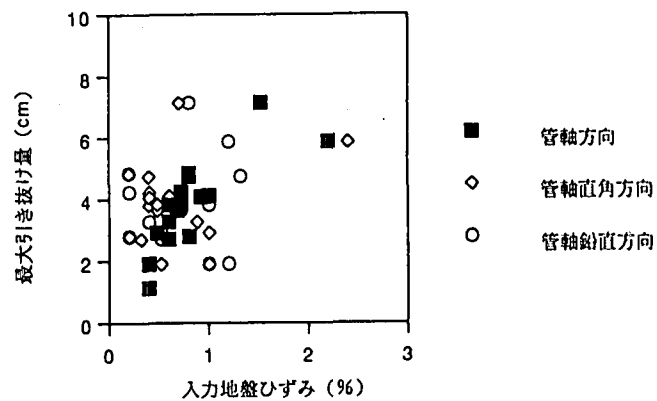
(3)解析結果

ポートアイランドの上水道配管図において、管路が交差する点と点の間の直線部分で管の破壊が確認されている場合、その区間をひとつの解析対象地点とした。それぞれの解析地点について管路に永久変位量を作用させ、その応答値について検討した。その際、地盤ばね定数の低減係数として1.0、0.1、0.01の3種類の値を用いて解析を行った。また、ポートアイランドではほぼ全域にわたって填砂や永久変位の被害が見られているので、地中埋設管周辺地盤はすべて液状化しているものと考えた。

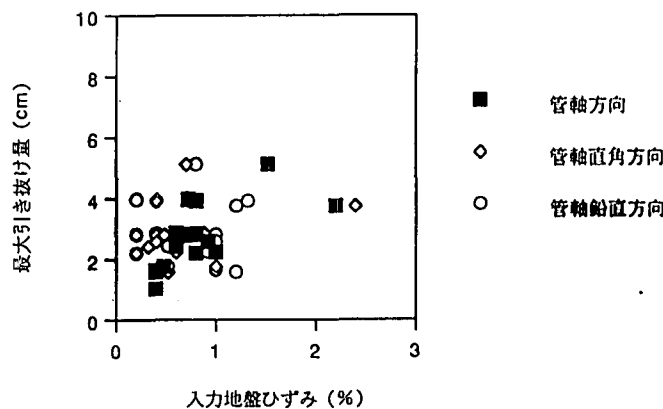
図-2(a)、(b)、(c)は管路に作用させた地盤の永久変位量から算出した、管軸直角方向、管軸方向、管軸鉛直方向の地盤最大ひずみと管路継手部分での最大引き抜け量との関係を示したものである。ポートアイランドで破壊した管路の継手種類はすべてA、K型であり、これらの許容引き抜け量は38mmである。図-2より、低減係数に関係なく、引き抜け量と管軸方向ひずみとの間に比例関係の傾向がみられるが、その他の方向の最大ひずみと引き抜け量の間にはあまり相関は見られない。継手部の破壊は管軸方向の地盤ひずみと関係が深く、管軸方向の地盤ひずみから継手部の破壊を推定することができると思われる。しかしその場合には、液状化した地盤を表現するための地盤ばね定数の低減係数を考慮しなければならない。図-2(a)、(b)、(c)を比較すると、地盤ばね定数の低減係数が小さくなるに従って、応答値である継手の引き抜け量が小さくなっていることが分かる。



(a) 低減係数 1.0



(b) 低減係数 0.1



(c) 低減係数 0.01

図-2 地盤最大ひずみと継手引き抜け量の関係

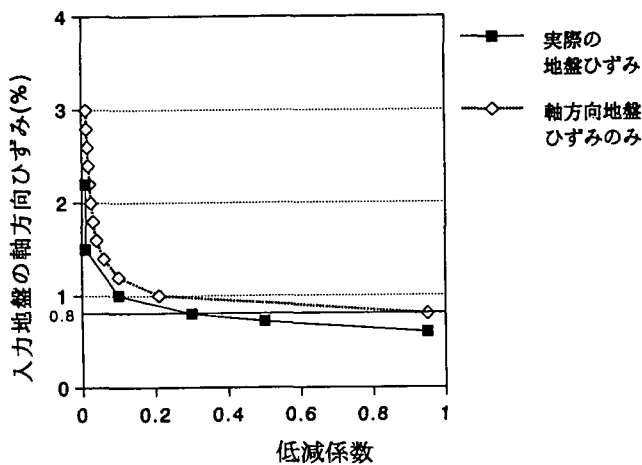


図-3 地盤ひずみと低減係数

図-2より、管路の破壊は軸方向の最大地盤ひずみと関係が深いことがわかった。そこで、管路に軸方向のみの地盤ひずみを与えて、ばね定数を低減させていき、その時の引き抜け量が許容引き抜け量と同じ値になったときの低減係数を求めた。また一方で、実際に観測された地盤のひずみを管路に与え、同様にしてばね定数を低減させた。その両者を比較した結果が図-3であり、軸方向最大地盤ひずみと低減係数の関係を示している。図中の点線が前者の軸方向のみの結果、実線がポートアイランドでの実際のひずみを与えた結果を表している。図-2(a)、(b)、(c)より、同じ最大地盤ひずみが作用した管路では、低減係数が低いほど管路の応答値が低くなることがわかったので、図-3の任意の低減係数において、図中の線より大きい軸方向ひずみが管路に与えられれば、管路に破壊が生じることを表している。同図より、軸方向にのみひずみを与えた場合と、実際の観測されたひずみを与えた場合の結果は、ほぼ同じ傾向を表す曲線であることがわかる。したがって地盤の軸方向ひずみと破壊の関係が強いことがここでもわかる。

ポートアイランドで破壊が確認された管路における軸方向の地盤最大ひずみの平均値は0.8%であった。図-3における実線でこの値に対応する低減係数を調べると0.3になり、本解析の結果によれば、低減係数0.3以下の値では管路は破壊に至らず、0.3以上では破壊に至ることを示している。したがって、平均的には管路周辺の地盤ばね定数の低減係数は0.3以上であったと考えられる。

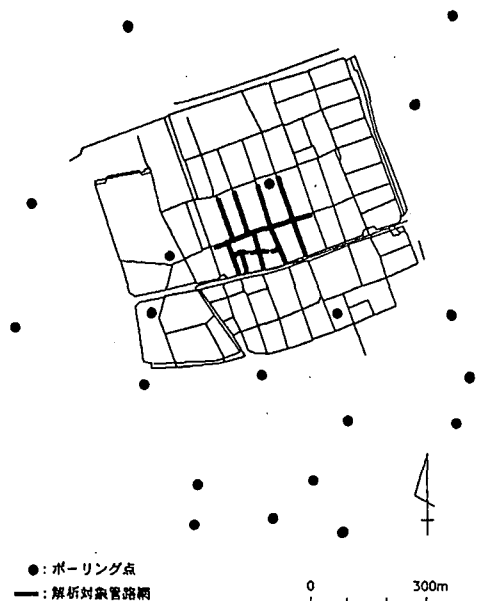


図-4 東灘区解析対象管路とボーリング地点図

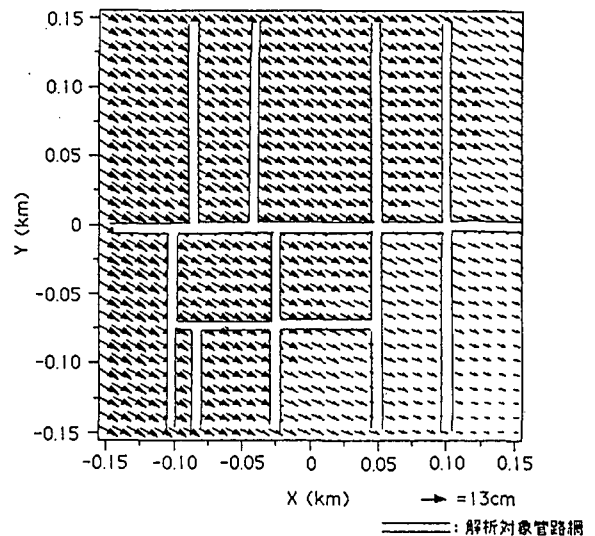


図-5 入力地盤変位

#### 4. 管路のネットワーク形状と被害個所の関連

##### (1) 地中埋設管の被害

図-4に東灘区の解析対象管路網を示す。管路はA、K型継手で連結されたダクタイル管である。管路の被害は属具施設破損、管体破損、継手の抜けなどの被害が主に異形管付近で発生していた。この辺りは激震地域であると言われており、管路は地震動による地盤の変位に追随しようとして破壊したものと思われる。

##### (2) 入力地盤変位

入力地盤変位は以下のようにして算出した。まず、想定断層からそれに伴う基盤面加速度を設定し、重複反射理論を用いてボーリング地点ごとにおける地

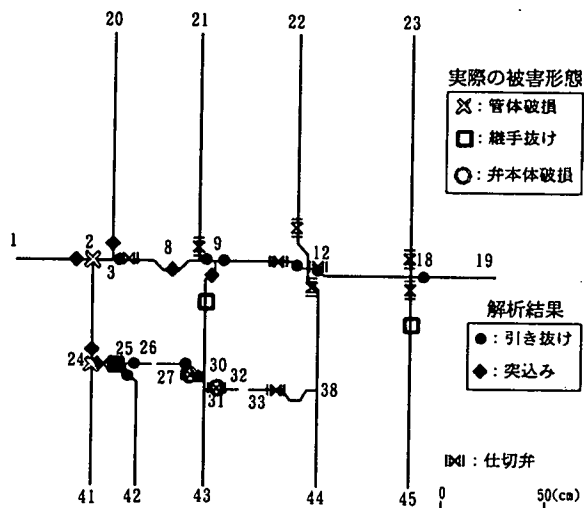


図-6 実被害と解析結果の比較

表面加速度を算出する。それを2回積分することによってボーリング地点ごとの地表面変位を求める。つぎに、各ボーリング地点のある時刻における地盤変位量を取り上げ、それらを補間して解析管路網に沿った地盤変位分布を求めた。ここでは管路網に最も近いボーリング地点での変位が最大値になる時刻における各ボーリング地点での変位をとりあげ、それらを補間し、解析対象管路網に沿った地盤の変位を求めた。なお、補間の方法としてはKriging法を用いた。図-4に解析対象管路網と周辺におけるボーリング点を、図-5に解析に用いた入力地盤変位を示した。

### (3)解析結果

(2)で算出された地盤変位を図-4の解析対象管路網に作用させ、その応答値について検討した。

図-6は解析対象管路網において実際に確認された管路網の被害形態とその被害位置、解析結果による被害形態とその被害位置をまとめたものである。なお、図中の番号は、管路が交差する部分の節点番号である。

図-6の解析結果より、管路の破壊はT字や十字管などの異形管付近で発生しており、実際の被害個所と良い対応を示している。しかし、各々の破壊形態について見ていくと実際のものと解析の結果によるものに食い違いがある。

節点番号2、3付近の管路では実際の被害形態は管体破損であるが、解析結果は継手の突っ込みとなっている。これは解析で継手特性をばねでモデル化した際、線形ばねとしたのでどこまでも突っ込みを起

こすことが可能となり、管体の応力は継手部で逃され、管体破損が表現されなかったものと思われる。継手部のばねのモデル化に工夫を加えれば、管体破損が表現できたものと思われる。また、仕切り弁周辺で継手の突っ込み破壊が解析結果として表現されているが、実際の被害調査では、仕切り弁周辺の継手の破壊も仕切り弁の破損と表記される場合もあるので、破壊をある程度は表現することができているものと考えられる。

## 5. まとめ

液状化による地盤の永久変位と地盤ばね定数の低減を考慮した水道管路の応答解析と、地震動による管路網の応答解析を行った結果、以下のことがわかった。

液状化を対象とした解析では、

- (1) 管路の破壊は軸方向の最大地盤ひずみと関係が深い。
- (2) 地盤ばね定数の低減係数が小さくなるに従って、管路の応答値は小さくなる。
- (3) 本解析によれば、ポートアイランドにおいては管路周辺の地盤ばね定数の低減係数は、平均的には0.3以上であろうと考えられる。  
地震動による管路の影響を検討した結果より、
- (4) 管路の破壊はT字や十字管などの異形管付近で発生しており、本解析によって、破壊をある程度表現することができる。

謝辞：管路網の解析にあたり、金沢大学大学院修士課程2年 深谷正俊氏の全面的協力を得ました。記して感謝の意を表します。

また、本研究の一部が文部省科学研究費(基礎研究(C)代表 宮島昌克)の補助によって行われたことを記し、感謝します。

### 参考文献

- 1) 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, 土木学会論文集, No. 289, pp. 43-53, 1979. 9.
- 2) 濱田政則, 磯山龍司, 若松加寿江: 1995年兵庫県南部地震液状化、地盤変位および地盤条件, (財)地震予知総合研究振興会, 1995. 9. 1.
- 3) (社)日本水道協会: 1995年兵庫県南部地震における水道管路の被害と分析, (社)日本水道協会, 1996. 5. 10.
- 4) Edward H. Isaaks and R. Mohan Srivastava: An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 1989.