

上水道埋設管の動的信頼性評価に関する基礎的研究

日本鋪道株式会社 正会員 ○小野貴信
広島工業大学工学部 正会員 中山隆弘

1. はじめに

ライフラインの地震防災において、物理的被害の波及に大きな影響力を持つ上水道の被害想定は現状では簡便な予測式によって行われている。しかし、コンピュータや汎用 FEM 解析用ソフトの発達により、近年、振動解析が比較的簡単に、しかも精度良く行えるようになってきた。本研究ではそのような状況を踏まえて、シミュレーションによって発生させた模擬地震動に対する埋設管の最大応答変位を振動解析によって算定し、その確率分布をベースにして埋設管の信頼度を評価し、上述の予測式による被害想定結果との比較を試みた。

2. 解析モデルと模擬地震動のシミュレーション

解析においては、2 層からなる成層地盤を平面要素でモデル化した。解析地盤モデルと自由地盤の境界には粘性境界に相当するダンパーと自由地盤応力に相当する切り欠き力を考慮した 2 次元側方境界要素を、また底面境界には粘性要素を設けた。管路は梁要素でモデル化し、継手部（S II 形）は管軸、軸直角、回転方向のばねでモデル化した。

地盤については比較的軟らかい地盤（CASE-1： $T=0.766\text{sec}$ ）と硬い地盤（CASE-2： $T=0.504\text{sec}$ ）の 2 種類を想定し、マンホールによる水平方向の拘束効果は、今回は、自由地盤と管路モデルを水平ばね要素で接続することによって考慮した。地盤ばね定数は埋設管の断面条件、埋設位置、地盤剛性、地層構成によって決定される算定式¹⁾に依った。地盤や管路の物理特性値を表 1~4 に示す。

模擬地震動は、金井・多治見によるパワースペクトルと疑似乱数を用いて、最大地震動加速度の期待値が 100, 300, 500gal 程度となるような 1000 波をまず作成し、その中から、最大加速度値の期待値が各目標値と同程度になるような各 20 波を抽出した。

なお、今回は地盤の液状化については考慮していない。

3. 振動解析結果と継手部の破壊確率

汎用ソフトである TDAPⅢによる解析により、軟らかい地盤中に埋設された管継手部の軸方向変位が硬い地盤中のその数倍程度の大きさになる結果が得られた。

(1) Gumbel 分布による破壊確率の算定

継手部の軸方向の最大変位が Gumbel 分布に従うとし、Gumbel 確率紙を用いて各ケースの母数を求め、継手部の最大変位 $X_{\max}$ が設計照査用最大伸縮量（±63mm）を超える場合に破壊に至るものと仮定した。それによって求めた破壊確率を表 5 に示す。

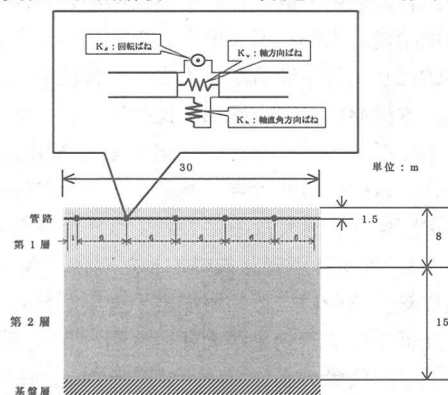


図 1 解析モデル

表 1 地盤の特性値

	層厚 (m)	単位体積重量 γ (tf/m ³)	せん断剛性 G (tf/m ²)	ポアソン比 ν	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h	N値
CASE-1 第1層(沖積砂質土層)	8	1.95	3.30E+03	0.493	130	0.018	7
第2層(沖積粘性土層)	15	1.80	2.80E+03	0.498	130	0.023	3
CASE-2 第1層(沖積砂質土層)	—	2.10	2.30E+04	0.488	340	0.015	50以上
第2層(沖積粘性土層)	15	1.95	7.80E+03	0.492	200	0.030	10
基礎層(沖積砂質土層)	15	1.90	6.90E+03	0.493	190	0.015	23
基礎層(沖積砂質土層)	—	2.10	2.30E+04	0.488	340	0.015	50以上

表 2 管路の特性値

管種	呼び径 (mm)	管長 (m)	外径 b (mm)	管厚 t (mm)	断面面積 A (mm ²)	断面2次 モーメント I (mm ⁴)	単位体積重量 γ (tf/m ³)	弾性係数 E (tf/m ²)	ポアソン比 ν
ダクタイル 鋳鉄管	400	6.00	426E-01	8.50E-03	1.11E-02	2.42E-04	7.15	1.6E+07	0.28

表 3 継手のばね定数 (S II 形継手)

軸方向ばね K_x (tf/m)	軸直角方向ばね K_y (tf-mv/deg)	回転ばね K_θ (tf-m)	設計照査用 最大伸縮量 δ (mm)
2560	4.0×10^3	250	±63

表 4 地盤ばね定数

	外径 b (mm)	土被り D_0 (mm)	底面高さ H_b (mm)	地盤剛性 (せん断剛性) G (tf/m ²)	軸方向 地盤ばね K_x (tf/m)	軸直角方向 地盤ばね K_y (tf/m)
CASE-1	4.26E-01	1.29	21.29	3.30E+03	4.35E+03	8.17E+03
CASE-2	4.26E-01	1.29	21.29	7.80E+03	1.03E+04	1.94E+04

表 5 Gumbel 分布による破壊確率

	CASE-1 設計照査用最大伸縮量 (63mm)	CASE-2 設計照査用最大伸縮量 (63mm)
100gal	5.48E-09	0.00
300gal	4.77E-01	8.90E-14
500gal	1.68E+01	9.14E-07

注1) 単位 %

注2) 設計照査用最大伸縮量とは、施工時の誤差等により真直配管ができなかった場合を考慮した許容最大伸縮量

(2) 1次 Gauss 近似法による破壊確率の算定

継手部の軸方向の最大変位量を荷重効果 S 、設計照査用最大伸縮量を抵抗 R とみなし、1 次 Gauss 近似法によって破壊確率を算定した。 R は真直配管時最大伸縮量の許容量であるが、施工誤差や耐用年間の上乗荷重による地盤変状の可能性を考慮し、

前述の±63mm が非超過確率 5% に相当する値であるとし、確率分布も簡単のために正規分布であると仮定した。破壊確率の算定結果を表 5 の結果と共に表 6 に示す。表 6 より、1 次 Gauss 近似法により求めた破壊確率が R の変動係数が 0.05 の場合でも、Gumbel 分布から求めた破壊確率と大きな差異がないことが分かる。したがって、以降の検討は Gumbel 分布により求めた破壊確率を用いて行う。

4. 破壊確率と被害想定算定式による被害確率との比較・検討

解析モデルを地震被害想定支援マニュアル²⁾、広島県地震被害想定調査³⁾ の上水道被害箇所率および供給支障率の予測式にをあてはめ、それぞれを算出した。また、簡易地震被害予測法⁴⁾ にも解析モデルをあてはめ、耐震評価を行った。これらの結果と 3. で示した破壊確率を比較したものが、それぞれを表 7、8 である。

表 7 供給支障率と破壊確率の比較 単位 (%)

	地震被害想定支援マニュアルによる供給支障率		広島県地震被害想定調査による供給支障率		Gumbel 分布より求めた破壊確率	
	CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2
100gal	*	*	1.95358	1.68936	5.48E-09	0.00
300gal	0.89673	0.67015	13.03903	6.46693	0.47722	8.90E-14
500gal	57.11558	30.37723	86.97335	42.33608	16.77101	9.14E-07

注1) *: 評価式の対象外

表 8 簡易地震被害予測法による耐震評価と破壊確率の比較

	簡易地震被害予測法による耐震評価		Gumbel 分布より求めた破壊確率	
	CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2
100gal	*	*	5.48E-09	0.00
300gal	4.0(高い)	2.5(高い)	0.47722	8.90E-14
500gal	8.8(高い)	5.5(高い)	16.77101	9.14E-07

注1) *: 耐震診断表は震度5以上の地震が対象

注2) 破壊確率の単位は%

破壊確率と供給支障率では尺度が違うのでそれらを一概に比較することはできないが、最も大きな特徴は CASE-2 の埋設管の破壊確率は極めて小さいものの、供給支障率ではかなり大きな値となる結果が得られたことである。この理由としては、振動解析では地盤は液状化しないものと仮定していることや、地盤・管体・継手部・地盤ばねのいずれの要素も線形要素でモデル化していることなどが考えられるが、これらは今後の検討課題である。

また、簡易地震被害予測法による耐震評価と継手部の破壊確率を比較した結果、破壊確率が 17% 弱の場合でも前者による判定では、安全性は高いという評価になる。現時点で結論を述べることはできないが、今後、アカウンタビリティに優れた埋設管の耐震信頼性の評価法や予測法が開発されなければならないと考える。

5. おわりに

本研究では線形解析の範囲であるが、上水道埋設管の地震に対する損傷評価を模擬地震動に対する振動解析と構造信頼性理論によって行った。上水道の埋設管に地震時被害予測は、被害例による従来の評価法と併せて、今回のようなアプローチによって、より定量的な被害想定を行うことが必要であると思われる。

参考文献

- 1) 星隅順一・運上茂樹・村井和彦：梁ばねモデルによる地下構造物縦断方向の耐震設計に用いる地盤ばね定数，土木学会第 53 回年次学術講演会，I-B388，1998. 10.
- 2) 国土庁：地震被害想定支援マニュアル，1997. 8.
- 3) 広島県：広島県地震被害想定調査報告書（平成 7・8 年度調査），1996.
- 4) 千葉利晃・寺田淳・三木康弘：上水道施設の地震時被害予測に関する一考察，第 48 回土木学会中国支部研究発表会概要集，I-48，1996. 5.