



埋地管道震害预测方法简述

裴宗广^{1,2}, 刘尧兴², 王晓青³, 刘鹏²

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2. 河南省地震局, 河南 郑州 450000;
3. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘 要:埋地管道是城市生命线工程的重要组成部分, 在地震时较易发生震害。影响埋地管道在地震中破坏特点的因素, 主要是强烈的地面运动或场地失效以及管材、管径等因素。研究方法以基于经验统计的方法在实际应用中比较多。本文分别对基于理论计算和经验统计的震害预测方法进行了简述和比较, 最后提出了基于综合概率的埋地管道分析预测模型。

关键词:生命线系统; 埋地管道; 震害预测; 模型

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)02-0186-04

Method of Earthquake Damage Prediction of Pipeline

PEI Zong-chang^{1,2}, LIU Yao-xing², WANG Xiao-qing³, LIU Peng²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Earthquake Administration of Henan Province, Zhengzhou 450000, China; 3. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract: The earthquake damage prediction of pipeline has heavy proportion in the earthquake damage prediction of lifeline system, and the pipeline is the brittle unit of lifeline when earthquake occurs. The earthquake damage to water supply pipeline is affected by the seismic motion and the site liquefaction, material and diameter of the pipes etc. The methods of earthquake damage prediction of pipeline which based on experience statistics are more practicality. In this paper the methods which based on theories account and experience statistics are introduced and compared respectively, and a new prediction model for pipeline according to comprehensive probability is put forward finally.

Key word: Lifeline systems; Burying pipeline; Earthquake damage prediction; Model

0 引言

埋地管道作为城市生命线工程的一种重要组成单元, 在整个生命线系统的五个子系统中都有使用, 对人们的正常生活和工作起着非常关键的作用。破坏性历史地震资料显示管道破坏比较严重, 因此造成的次生灾害也十分严重^[1]。所以, 有必要对埋地管道进行专门的研究, 总结它们在地震中破坏的一致性特点, 进而对它们作预测, 找出薄弱环节, 提出

针对性的改善措施, 为减轻管道在未来破坏性地震中的损失服务。对于管道震害的研究主要基于理论计算或经验统计方法。本文对几种比较成熟的方法进行了简述。综合概率预测模型是选择地震地面运动强度和场地地震液化作为影响管道震害的因素, 采用综合概率预测方法, 同时考虑管道本身的性质(管材、管径、接口类型等)在地震中对管道失效的“贡献”, 建立供水管道震害分析预测模型。

收稿日期: 2005-01-28

基金项目: 江西省赣南地震重点监视防御区震害预测项目(JX105-07)

作者简介: 裴宗广(1973-), 男(汉族), 河南商丘人, 工程师, 在读硕士, 主要从事地震安全性评价, 生命线系统震害预测等工作。

1 方法简述

将埋地管线震后状态划分为三种:基本完好、中等破坏和严重破坏。设基本完好的概率为 P_1 ,中等破坏的概率为 P_2 ,严重破坏的概率为 P_3 ,则 P_1 、 P_2 、 P_3 满足 $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ 。

1.1 理论分析法

如果假定管线在地震下的破坏集中在管线的接头处,则当管道变形 U_s 小于管道接头允许开裂变形 R_1 时,管道处于基本完好状态;如果 U_s 大于 R_1 ,同时小于管道接头的渗漏位移极限 R_2 ,则认为管道处于中等破坏状态;否则认为管道处于严重破坏状态。部分管线接头形式的 R_1 、 R_2 见表 1^[2-3]。以上关系可以表示为

$$P_1 = P(U_s \leq R_1) = \Phi \left(\frac{\mu_{R_1} - \mu_s}{\sqrt{\sigma_{R_1}^2 + \sigma_s^2}} \right) \quad (1)$$

$$P_2 = P(R_1 \leq U_s \leq R_2) = 1 - P_1 - P_3 \quad (2)$$

$$P_3 = P(U_s > R_2) = 1 - \Phi \left(\frac{\mu_{R_2} - \mu_s}{\sqrt{\sigma_{R_2}^2 + \sigma_s^2}} \right) \quad (3)$$

表 1 单个管线接头的允许变形和极限变形值

管材	接头形式	接头允许变形 R_1/cm		接头渗漏位移极限 R_2/cm	
		均值	标准差	均值	标准差
铸铁管	石棉水泥	0.02	0.016	0.2	0.11
钢筋混凝土管	水泥砂浆	0.042	0.029	0.3	0.14
预应力混凝土管	橡胶圈	0.5	0.2	3.14	0.38
石棉水泥管	水泥砂浆	0.02	0.016	0.15	0.1

基于理论分析的震害预测方法就是通过力学分析得到地震作用下埋地管线的应力或应变,并与管线的允许应力或应变比较,最终确定管线破坏与否或破坏状态。包括多种计算方法:简化算法、有限元分析法、多质点模型分析法、弹性地基梁法等。无论是哪种方法,最终目的是求出管道变形 U_s ,再利用以上关系式判断管道的破坏状态。这里仅对两种应用较为广泛的简化算法作简述。

1.1.1 基于共同变形理论的简化算法^[2]

管道变形 U_s 的计算是基于假定管线与周围地基土在地震中变形一致,即地基土在地震中的水平位移等于管道变形 U_s ,用下式求解:

$$U_s = 2S_v T_m K_h / \pi^2 \quad (4)$$

式中 U_s 为表层地基土的水平变形(cm); S_v 为速度反应谱值(cm/s); T_m 为场地土(表层地基土)的卓越周期(s),参考表 2 中的值; K_h 为作用于基岩上的水平方向地震系数,按当地抗震设防要求确定,参考取值见表 3。根据公式(1)~(3)判断管道破坏状态。

表 2 土卓越周期 T_m 参考值

地震烈度	I 类土	II 类土	III 类土	IV 类土
VI	0.12	0.3	0.4	0.65
VII	0.15	0.35	0.5	0.75
IX	0.2	0.4	0.6	0.85

表 3 水平方向地震系数 K_h 的参考值

地震烈度	VI	VII	VIII	IX
水平方向地震系数 K_h	0.05	0.1	0.2	0.4

1.1.2 基于相对变形理论的简化算法^[3]

该方法考虑了管道与周围土壤的相互作用,根据波动理论求出地震时埋管土壤的场地应变,再结合管、土间的相互关系得到管道的轴向位移,与管道的允许变形比较,判断管线在地震中的破坏状态。因此该法称为波动法。1978 年 Shinozuka 等在美国 Los Angeles 的城区供水管网的抗震分析中使用的就是这种方法。

设土壤的位移反应为 u ,根据波动理论,土壤的自由场地应变为

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{V}{V_s} \quad (5)$$

式中 V 为土壤振动速度幅值,一般应取地震动小区划给出的地震动速度峰值,参考取值见表 4; V_s 为表层土中剪切波的传播速度,参考取值见表 5。

表 4 中国地震烈度对应的土壤振动速度幅值

烈度	VI	VII	VIII	IX	X
水平向加速度	63	125	250	500	1 000
/[cm·s ⁻²]	(45~89)(90~177)	(178~353)	(354~707)	(708~1 414)	
水平向速度	6	13	25	50	100
/[cm·s ⁻¹]	(5~9)	(10~18)	(19~35)	(36~71)	(72~141)

表 5 表层土中剪切波的传播速度

场地土类别	一类土	二类土	三类土	四类土
V_s /[cm·s ⁻²]	700	380	200	100

在管轴方向上土壤应变为

$$\epsilon' = \frac{1}{2} \epsilon \cdot \sin 2\theta \quad (6)$$

θ 为管线与地震波传播方向的夹角。当 $\theta = 45^\circ$ 时, ϵ' 达到最大值,为土壤的自由场地应变的 1/2。

根据 1983 年清华大学的实验,由于管、土刚度差异,造成二者在振动过程中存在一定的相对滑动。考虑管、土相对变形,引入管土相对滑动系数 ξ

$$\xi = 1 / \left(1 + \frac{E_p \cdot A_p \cdot d}{2v_s^2} \right) \quad (7)$$

式中 A_p 为管道的横截面积(cm²): $A_p = \pi \cdot d \cdot t$, (d 为管道平均直径(cm), t 为管壁厚(cm)); E_p 为管材弹性模量(kg/cm²); v_s 为土体平均剪切波速(cm/s)。则管道的轴向应变 ϵ_p

$$\epsilon_p = \xi \cdot \epsilon' \tag{8}$$

由此可以得到延性接头管段的接头位移 U_s

$$U_s = \epsilon_p l \tag{9}$$

l 为管线的长度(cm)。管线在地震作用下破坏概率可以用式(1、2、3)得到。

1.2 经验统计法

经验统计方法是基于历史震害资料的统计总结出管线的震害估算公式,它区别于理论计算法的最大特点是更能接近震害的真实考虑影响因素,而且计算量较小,方便实用,更适宜于区域性的埋地管道的震害预测。以 Shinozuka 估算模型^[4-6]为例介绍。

20 世纪 80 年代末,Shinozuka 等在对美国 Memphis 市的供水管网进行抗震分析时,采用了一种结合专家意见和历史震害得到的震害率简化计算公式,避免了繁琐的埋地管线在地震作用下的力学分析。该经验方法选取地震烈度、管径及场地条件等三个影响因素进行其管段震害率 R_f 的计算

$$R_f = C_d C_g 10^{0.8(MMI-9)} \tag{10}$$

式中 MMI 为修正的 Mercalli 烈度(即参照意大利麦卡尼 Mercalli 制订地震烈度表); C_d 为管径影响系数; C_g 为场地土影响系数(表 6)。

表 6 震害率影响系数

因素	类别	系数
管道直径/mm	$D < 250$	1.0
	$250 \leq D \leq 500$	C_d 0.525
	$500 \leq D \leq 1\ 000$	0.25
	$D \geq 1\ 000$	0.01
场地土类	一类场地土	5.0
别	二类场地土	C_g 1.0
	三类场地土	2.0
	四类场地土	5.0

假定管线在地震中发生严重破坏事件服从泊松分布,则管线发生严重破坏(管线断裂,传输流量完全流失)的概率为

$$P_3 = 1 - e^{-R_f L} \tag{11}$$

管线发生中等破坏的概率为

$$P_2 = 5P_3 \tag{12}$$

目前,有不少学者建立了震害率与烈度、震害率与地运动参数等近似公式。也有学者对中国、日本、美国、墨西哥等国震害调查资料平差得到管道震害率 R_f 值(表 7)。

为了尽量排除环境破坏、严重锈蚀等因素所造成的 R_f 值的离散性,规定对严重锈蚀的管道, R_f 加一级(即取表 7 中相应数据的右侧值);对延性接头的管道, R_f 则减一级(即取表 7 中相应数据的左侧

值)。

表 7 震害率 R_f 数值表

场地	管径/mm	烈度				
		Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
Ⅱ类	> 500	0.00 01	0.00 1	0.01	0.1	0.5
	200~500	0.001	0.01	0.1	0.7	1.6
	75~150	0.003	0.02	0.2	1.5	3.0
Ⅲ类(液化概率很小地区)	> 500	0.005	0.05	0.2	0.6	0.8
	200~500	0.01	0.15	0.8	1.8	3.0
	75~150	0.02	0.3	1.6	3.0	5.0

假设地震时沿管段 L 其震害发生是随机独立的,地下管线的破坏概率可以假定为服从泊松分布。则埋地管道的破坏概率 P_f 就可以表示为

$$P_f = 1 - \exp(-R_f L) \tag{13}$$

式中 L (km) 为同一场地上某种类型的管线长度。

综合比较上述方法可以发现,在管线的抗震分析中,直接估算法形式简单,考虑了影响管线震害率的主要因素如地震动参数、管材、管径、场地土条件等。当然,还有一些影响管线震害率的因素没有考虑,如施工质量、铺设年代等,但是与建立在理想环境下的理论分析法相比,经验估算法的精度不一定低。

2 综合失效概率模型

本模型选择地震地面运动强度和场地地震液化作为影响管道震害的因素,采用综合概率预测方法^[7],同时考虑管道本身的性质(管材、管径、接口类型等)在地震中对管道失效的“贡献”,建立供水管道震害分析预测模型。该模型也是基于经验统计方法,是在前者的基础上,作者增加一些影响因素的考虑,力图更加接近实际震害情况。

2.1 管道单元的综合失效概率

综合考虑地震作用和场地地震液化对管道单元的失效影响,管道单元 k 的震害失效概率 $P_f(k)$

$$P_f(k) = 1 - (1 - P_{kf}(E))(1 - P_{kf}(L)) \tag{14}$$

式中 $P_{kf}(E)$ 是地震作用造成管道单元 k 的失效概率; $P_{kf}(L)$ 是场地地震液化作用造成管道单元 k 的失效概率。

2.2 地震动作用管段的失效概率

$$P_{kf}(E) = \sum_I P_{kf}(E | I) \cdot P_k(I) \tag{15}$$

式中 $P_{kf}(E)$ 是地震作用下管段的失效概率; $P_k(I)$ 是管道单元 k 在预测时间尺度内地震烈度为 I 的概率,可由场地地震危险性小区划得到,或由设定地震确定性地得到; $P_{kf}(E | I)$ 是在烈度 I 时地震动作用

影响下管道单元 k 的失效概率,由下式求得:

$$P_{kf}(E|I) = 1 - \exp(-R_{kf}(E|I)L_k) \quad (16)$$

式中 L_k 是管道单元 k 的长度(单位:km); $R_{kf}(E|I)$ 是地震动作用下的修正震害率

$$R_{kf}(E|I) = \eta C_d C_g C_p R_{fw}(I) \quad (17)$$

式中 η 是接头元件影响调整系数; C_g 为场地分类影响调整系数; C_p 为管材影响调整系数; $R_{fw}(I)$ 为给

定烈度下地下管道的震害率(影响因素调整系数见表7); C_d 是结构种类的影响系数

$$C_d = 0.3a_D + 0.7a_J \quad (18)$$

式中 $a_D = 30/D$, $D(>30 \text{ mm})$ 是管道直径(mm), a_J 是接口构造范数(表8)^[8-9]。

2.3 场地液化作用管段的失效概率

表8 影响因素调整系数

管材		接头元件		接口构造		场地		震害率	
类型	C_p	类型	η	类型	a_J	类别	C_g	地震烈度	$R_{fw}(I)$
钢筋混凝土管	2.9	直管道	1.0	波纹管	0.10	硬	0.4	Ⅶ	0.16
铸铁管	1.0	弯头	1.5	橡胶圈	0.25	中	0.9	Ⅷ	0.45
石棉水泥管	0.3	三通	1.8	丝口焊接	0.35	软	2.0	Ⅸ	1.3
有延性接头的铸铁管	0.2	四通(十字交叉管)	2.0	青铅	0.70			X	4.0
焊接钢管	0.1	一段固定管	2.5	石棉水泥	0.80				

液化场地条件下的修正震害率 $R_{kf}(L|I)$

$$R_{kf}(L|I) = C_L C_p R_{fl}(I) \quad (19)$$

式中 C_p 为管材影响系数(见表8); C_L 为液化影响系数:

$$C_L = \begin{cases} I_{LE}/12, & (I_{LE} \leq 24) \\ 2, & (I_{LE} > 24) \end{cases} \quad (20)$$

I_{LE} 为液化指数,可以通过标贯试验获得; R_{fl} 为液化区中地下管道的震害率(见表8)。

表8 液化区中地下管道的震害率

地震烈度	Ⅶ X	Ⅷ	Ⅸ
R_{fl}	1.5	4.0	10

管段在地震时的液化作用所产生的失效概率 $P_{kf}(L)$

$$P_{kf}(L) = \sum_i P_{kf}(L|I) \cdot P_i(I) \quad (21)$$

2.4 整体管道体系的失效概率的确定

将供水管道系统视为串并联的复合体系,最简单的形式为串联体系,则串联系统的失效概率为

$$P_{f,s} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_f(k)) \quad (22)$$

式中 m 是管道单元个数。

并联体系的失效概率为

$$P_{f,p} = \prod_{k=1}^m P_f(k) \quad (23)$$

至于更为复杂的串并联复合系统,可以把它所包含的简单的串联子系统和并联子系统分别当作一个元素,然后再分析整个系统的可靠性。

3 讨论

无论是基于理论的简化计算法,还是基于历史震害资料的统计经验法,都考虑了影响管道震害

率因素的不完整性或资料获取的有限性,所以得到的都是尽可能接近真实震害的近似值。作者参考国内外的研究成果,结合国内实际获取资料程度的现实,给出综合概率失效模型对埋地管道进行震害率预测,以及管道失效概率的确定。值得一提的是,随着3S(GIS、GPS、RS)技术的日益发展和成熟,将其引进到震害预测中来,可以更大程度地提高预测效率和精确度。3S技术与震害预测技术很好的结合应用是地震工程界的新增长点。

【参考文献】

- [1] 赵成钢,冯启民. 生命线地震工程[M]. 北京:地震出版社,1994.
- [2] 孙绍平. 中国地下管道的震害[A]. 侯忠良主编. 地下管线抗震[C]. 北京:学术书刊出版社,1990.
- [3] 李杰,李国强. 地震工程学导论[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [4] Shinozuka M, Tan R, Koike I. Lifeline earthquake engineering, The current state of knowledge[J], ASCE, 1981, 97-110.
- [5] Shinozuka M, Kameda H. Reliability and risk assessment of lifeline system[A]. in: Proceeding of US-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems [C]. Tsukuba, Japan, 1989.
- [6] Hwang H, Lin H, Shinozuka M. Seismic Performance Assessment of Water Delivery System. J. Infrastructure System[J], ASCE, 1998, 14(3), 118-125.
- [7] 麻水岐,王小军,王峰. 管道系统综合概率震害预测方法[J]. 灾害学,1993,8(2):33-37.
- [8] A C 格赫曼, X X 扎伊涅特季诺夫. 刘昆,张宗理译. 管道的抗震设计施工与监护[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [9] 邓民宪,高晓康,张永凯. 地下管道震害预测实用方法的研究[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(1):94-98.