

文章编号:1004-4574(2007)03-0148-06

## 煤气管道的震害率分析

金康锡,任爱珠

(清华大学 土木工程系防灾减灾工程研究所,北京 100084)

**摘要:**埋地管道的地震危险性分析方法可以分为理论分析法和经验统计法。震害率是经验统计法中常用的一个概念。埋地管道在地震中破坏的主要原因是地面运动和场地土液化等引起的场地土失效,另外管线的接口类型、管材、管径等也是决定其震害的因素。在查阅相关文献的基础上,对埋地管道的震害率分析方法进行了综述,并运用经验统计法提出了便于使用的煤气管道震害率估算表达式。

**关键词:**埋地管道;煤气管道;震害率

**中图分类号:**P315.9      **文献标识码:**A

### Analysis of earthquake damage ratio of buried gas pipe

KIM Kang-Suk, REN Ai-zhu

(Institute of Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The analysis methods of earthquake risk of buried pipeline could be divided into theoretical approach and empirical approach. Earthquake damage ratio is a usually used concept in empirical approach. The main factors that lead to damage to buried pipe in earthquakes are earthquake ground motions (wave propagations) and ground failure induced by liquefaction etc. In addition, there are other factors—such as joint, material, diameter of pipe and so on. In this paper, analysis methods of earthquake damage ratio of buried pipe are summarized, and damage ratio of gas pipe is put forward based on empirical approach.

**Keywords:** buried pipe; gas pipe; earthquake damage ratio rate

包括供水管和煤气管的埋地管道是生命线工程的重要组成部分。埋地管道的地震危险性分析受到了研究人员的广泛关注。迄今为止,埋地管道中供水管道的地震危险性研究比较多,所用的方法一般为理论分析法和经验统计法。埋地管道在地震中的破坏的主要原因是地面运动和以场地土的液化等因素造成的场地土失效。此外管道的接口类型、管材、管径等也是震害的影响因素。以往的研究多是通过各种地震能量的参数分析,来预测供水管道的震害率。Chen 等<sup>[1]</sup>和 Shimazu 等<sup>[2]</sup>研究了特定地震下煤气管道的震害,但是这类研究比供水管震害研究要少。本文通过对埋地管线的震害进行研究和分析,按照经验统计法分析了煤气管道的震害预测;提出了便于使用的震害率表达式,为城市地震危险性分析和地震预测时煤气管道震害率的计算提供了有效的手段。

## 1 理论分析

对于脆性材料的管体及刚性管单元接口,管体及管单元接口从损伤状态变化为破坏状态是一突发性过

收稿日期:2007-01-18; 修订日期:2007-03-20

基金项目:“十五”国家科技攻关项目(2001BA601B-04-01-02)

作者简介:金康锡(1973-),男,韩国人,博士研究生,主要从事生命线系统防灾减灾技术研究。E-mail:jinkx03@mails.thu.edu.cn

程,因此将管线的破坏状态分为基本完好,中等破坏及严重破坏3种比较合适。假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 $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ 。并且,假定管线在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极限位移 $R_1$ 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极限位移 $R_2$ ,则认为管道处于中等破坏状态;如果 $U_s$ 大于 $R_2$ ,则认为管道处于严重破坏状态。以上关系可以表示为

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

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

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

总起来说,理论分析的关键在于管道变形 $U_s$ 的计算。管道变形的计算方法有多种:有限元分析方法<sup>[3-4]</sup>,简化算法,弹性地基梁法等<sup>[5-6]</sup>。

## 2 经验统计法

### 2.1 基于地震烈度分析震害率

早期的分析采用基于地震烈度的分析方法,该方法计算量较小,且方便实用,适宜于区域性的埋地管道的震害预测。地震造成的埋地管道的安全问题和安全性评价的关键是震害率的确定。

早期 Bresko 等(1981)建立了震害率 $R_f$ 与烈度的近似公式<sup>[7]</sup>,

$$\left. \begin{aligned} \log R_f &= 3.65 + 6.39(-2.98 + 0.30I) \quad (7 < I < 8) \\ R_f &= 2.0 \quad (I = 9) \\ R_f &= 32.0 \quad (I \geq 10) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $I$ 为场地烈度。

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<sup>[8]</sup>。该经验方法选取地震烈度、管径及场地条件等3个影响因素进行其管段震害率 $R_f$ 的计算

$$R_f = C_d C_g 10^{0.8(I_{MM}-9)} \quad (5)$$

式中 $I_{MM}$ 为修正的 Mercalli 烈度; $C_d$ 为管径影响系数, $C_g$ 为场地土影响系数(见表1)。

表1 震害率影响系数  
Table 1 Influence factors of seismic damage ratio

因素	类型	系数
管道直径 $D/\text{mm}$	$D < 250$	$C_d = 1.0$
	$250 \leq D < 500$	$C_d = 0.525$
	$500 \leq D < 1000$	$C_d = 0.25$
	$D \geq 1000$	$C_d = 0.01$
场地土类别	S1	$C_g = 0.5$
	S2	$C_g = 1.0$
	S3	$C_g = 2.0$
	S4	$C_g = 5.0$

注:场地土类别是据美国统一建筑规范(Uniform Building Code)进行分类,S1是硬岩,S4是软土

一般埋地管线的反应破坏为 Poisson 分布或指数分布形式,则管线的破坏概率为

$$P_f = 1 - e^{-R_f L} \quad (6)$$

式中, $R_f$ 是震害率,用每 km 内的破坏处个数(次/km)表示, $L$ 为计算管线的长度。在没有充分资料的情况下王东伟建议采用表2来确定式(6)的震害率<sup>[8]</sup>。表2是根据中国,日本,美国,墨西哥等国震害资料平差得到的 $R_f$ 值,并尽量排除环境破坏、严重锈蚀等因素所造成的 $R_f$ 值的离散性<sup>[9]</sup>。

表2 震害率值  $R_f$   
Table 2 Values of seismic damage ratio,  $R_f$

场地	管径(mm)	烈度				
		VI	VII	VIII	IX	X
II类场地土	>500	0.0001	0.001	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类场地土	>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

对严重锈蚀的管道,  $R_f$  加一级(即取表中的相应数据的右侧值); 延性接头的管道,  $R_f$  减一级(即取表中的相应数据的左侧值)。

不少城市在震害预测中应用了考虑多种因素的修正震害率<sup>[10,11]</sup>, 将式(6)中的  $R_f$  用  $R_f'$  代替,  $R_f'$  为修正震害率。在地震波作用下修正震害率  $R_f'$  可以表示为:

$$R_f' = C_g C_p C_d R_f \quad (7)$$

式中  $C_g$  为场地分类影响系数, 对软, 中, 硬场地土分别采用  $C_g = 2.0, 0.9, 0.4$ ;  $C_p$  为管材影响系数, 一般铸铁管取 1.0, 有延性接头的铸铁管取 0.2, 焊接钢管取 0.1;  $C_d$  为管道埋深影响系数, 见表 3;  $R_f$  为确定烈度下地下管道的基本震害率(次/km), 当缺少实际震害资料时, 在地震波作用下, 地震烈度为 VII, VIII, IX, X 度时, 建议取  $R_f = 0.16, 0.45, 1.3, 4.0$ (次/km)。

表3 管道埋深影响系数  $C_d$   
Table 3 Influence factors of buried depth,  $C_d$

埋 深	管道埋深影响系数 $C_d$		
大于 5m	洪积层	$C_g = 0.4$	0.4
		$C_g = 0.9$	0.44
		$C_g = 2.0$	0.2
	冲积层	$0.0 \leq z < 0.3$	1.0
		$0.3 \leq z < 0.6$	0.7
		$0.6 \leq z < 1.0$	0.4
小于 5m		1.0	

上述内容可用图 1 来表示。从图 1 中可以看出, 相同烈度下的震害率相差很大, 有时甚至相差几百倍, 而且低烈度比高烈度时震害率相差更大。考虑场地土、管材和管道埋深等因素时的参考震害率(式(7))跟液化概率很小地区(III类场地土)的震害率相似。通过对式(7)的分析也得到了类似的结果: 在相同烈度下因各种因素的影响震害率有几百倍的差异。早期 Bresko 等(1981)的曲线也可以说明 II 类, III 类场地土的震害率的差异范围。

### 2.2 基于 PGV 和 PGD 分析震害率

相对于地震动的速度与位移峰值, 历史地震的地震烈度是一个过于粗略的参数。有时, 不同的专家或部门会对同一个地方评定出不同的地震烈度, 例如, 1983 年科林加( Coalinga)地震时, 科林加城就曾被给出 MMI-8 度和 MMI-10 度两种烈度<sup>[12]</sup>。所以基于地震动峰值加速度(PGV),  $V_{PG}$ , 和永久地面变形(PGD),  $D_{PG}$ , 分析震害率是很有用的办法。地震波的传播会引起瞬间震动性地面变形, 该变形影响到广泛的地质体和土地中的管道。震动性地面变形能通过  $V_{PG}$  测量, 所以  $V_{PG}$  是解释震害的必需项目。地震时场地失效(地面破坏)是因液化、摇动、山崩(泥石流)、局部地面上的上升、沉降等的现象造成的, 场地失效可用  $D_{PG}$  来解释。所以, 通过  $V_{PG}$  和  $D_{PG}$  可以有效地分析管道的震害。

基于 1995 年日本阪神大地震、1994 年 Northridge 地震、1989 年 Loma Prieta 地震、1971 年 San Fernando

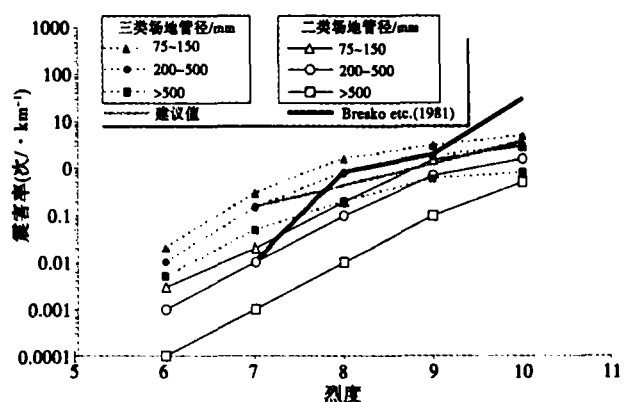


图1 地震烈度与震害率的关系

Fig. 1 Relationships between earthquake intensity and damage ratio

地震的  $V_{PG}$  和  $D_{PG}$  数据, Eidinger 调查研究了震害率, 而后美国生命线工程联合会 (ALA) 通过对各国近代地震中供水管线的震害数据的统计分析, 于 2001 年提出了如下的地下管线平均震害率推荐计算表达式<sup>[13]</sup>: 地震波引起的震害率 (backbone vulnerability function) 为  $R_f = 0.00187 \cdot V_{PG}$ , 地面永久变形引起的震害率为  $R_f = 1.06 \cdot D_{PG}^{0.319}$ 。式中  $V_{PG}$  单位是英寸/s、 $D_{PG}$  单位是英寸 (1 英寸 = 2.54 cm)、震害率  $R_f$  是每 1000 英尺 (1 英尺 = 0.3048 m) 管道的破坏数。

本文在对相关研究进行分析综合的基础上, 在分析中考虑了 SI 单位的转换, 提出了如下计算公式:

(1) 由地震波动引起的震害率 (次/km)

$$R_f = 0.00239 \cdot K_1 \cdot V_{PG} \tag{8}$$

式中,  $V_{PG}$  为地震动有效峰值速度 (cm/s);  $K_1$  为考虑各类影响因素的调整系数, 见表 4。

(2) 由永久地面变形引起的震害率 (次/km)

$$R_f = 2.577 \cdot K_2 \cdot D_{PG}^{0.32} \tag{9}$$

式中,  $D_{PG}$  为永久地面变形 (cm);  $K_2$  为考虑管材、接头形式的调整系数, 见表 5。

表 4 调整系数  $K_1$   
Table 4 Modified coefficients,  $K_1$

管材	接头形式	场岩土	管径/mm	$K_1$
铸铁管	水泥	不限制	100 ~ 300	1.0
		腐蚀性	100 ~ 300	1.4
		非腐蚀性	100 ~ 300	0.7
焊接钢管	橡胶圈	不限制	100 ~ 300	0.8
		电弧焊	100 ~ 300	0.6
	非腐蚀性	100 ~ 300	0.9	
		100 ~ 300	0.3	
		> 390	0.15	
	石棉水泥	橡胶圈	不限制	100 ~ 300
螺栓连接			100 ~ 300	1.3
铆接			100 ~ 300	1.3
混凝土外壁	水泥	不限制	100 ~ 300	0.5
		100 ~ 300	1.0	
钢内壁	电弧焊	不限制	> 390	0.7
		100 ~ 300	1.0	
聚乙烯管	橡胶圈	不限制	> 390	0.8
		100 ~ 300	0.5	
延性铸铁管	橡胶圈	不限制	100 ~ 300	0.5

表 5 调整系数  $K_2$   
Table 5 Modified coefficients,  $K_2$

管材	接头形式	$K_2$
铸铁管	水泥	1.0
	橡胶圈	0.8
	机械接头	0.7
焊接钢管	焊接 (无腐蚀)	0.15
	橡胶圈	0.7
石棉水泥	橡胶圈	0.8
	水泥	1.0
混凝土外壁	焊接	0.6
	钢内壁	水泥
聚乙烯管	橡胶圈	0.7
	橡胶圈	0.8
延性铸铁管	橡胶圈	0.5

### 3 煤气管道的震害率

#### 3.1 日本阪神地震 (Kobe earthquake)

日本阪神地震时有 85 万户煤气用户遭受了不同程度的损失, 经过 90 d 煤气设施才完全恢复。Shimazu 等<sup>[2]</sup> 将该次地震的煤气管道震害率 ( $R_m$ ) 和  $V_{PG}$  之间的关系用以下公式来表示:

$$R_m = C_g C_p C_l R_f \tag{10}$$

式中,  $C_g$  为场地土系数 (1.0 ~ 2.5);  $C_p$  为管形式影响系数 (0 ~ 1.0);  $C_l$  为场液化修正系数 (1.0 ~ 5.0);  $R_f$  是标准震害率 (次/km) 与  $V_{PG}$  的关系见表 6。

Shimazu 等的研究考虑了场地土的液化影响, 可以知道液化引起的震害率可以相差 5 倍。而且, 当管形式影响系数  $C_p = 0$  或者  $V_{PG} \leq 20$  时震害率就是零。这说明地震能量在一定值以下时, 在某些管材料或管道连接方式下某个区段内不发生震害。例如, 震害率 0.001 时 1000km 的管线内只有 1 个破坏点。其实许多城市的整个煤气管线的长度只达到几百公里, 或者在某些情况下甚至不到 100km, 在这种情

表 6 标准震害率与 PGV 的关系  
Table 6 Relationship between normal seismic damage ratio and  $V_{PG}$

$V_{PG} (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	标准震害率, $R_f$
$V_{PG} \leq 20$	0
$20 < V_{PG} \leq 90$	$0.025 \cdot V_{PG} - 0.5$
$V_{PG} > 90$	1.75

况下,一个破坏点也不会发生。足够小的震害率说明某条管线内地震只造成了1~2个破坏点。

### 3.2 台湾集集地震(Chi-Chi earthquake)

台湾集集地震有比较丰富的煤气管线震害方面的数据。Chen 等基于  $V_{PC}$ , PGA, SI 分析了煤气管线的震害率<sup>[1]</sup>。从图2可以看出,管径越大震害率越小。在图2中,本文作者将日本阪神地震的煤气管线震害率和美国生命线工程联合会(ALA)的供水管线震害资料放在一起进行了比较。在ALA的震害率数据中选取了钢管的震害率,因为煤气管的材料以焊接钢管为主。分析结果表明,在集集地震中煤气管线的震害率大于ALA供水钢管震害率,大管径煤气管的震害率与ALA供水钢管的震害率相对接近。

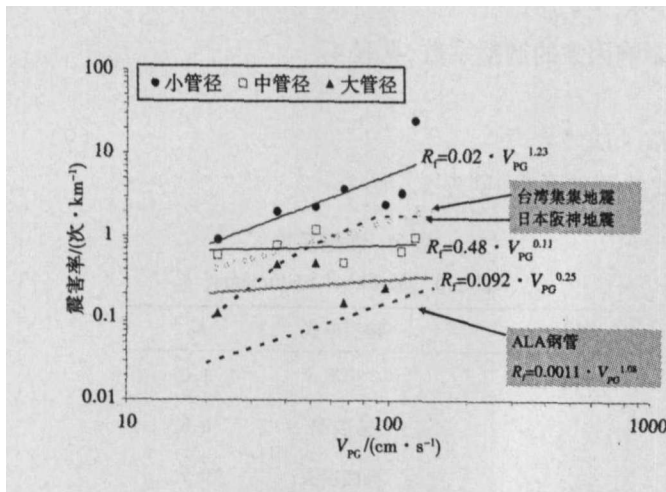


图2 震害率与  $V_{PC}$  的关系

Fig. 2 Relationships between  $V_{PC}$  ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) seismic damage ratio

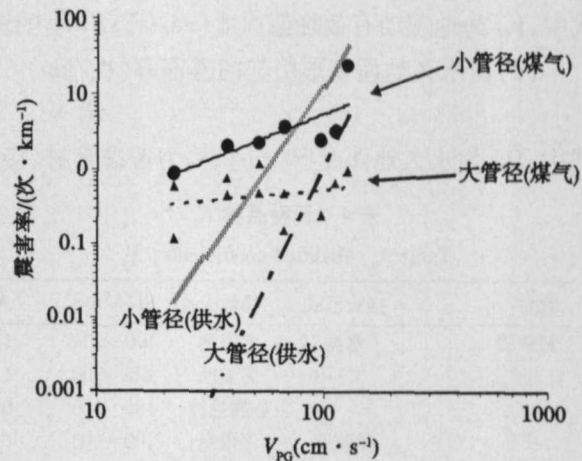


图3 煤气管和供水管的震害率

Fig. 3 Comparison of seismic damage ratio between gas pipeline and water pipeline

从图2中可以看出,台湾集集地震和日本阪神地震虽然是两个发生在不同地方,震级不同的地震,但是两者的震害率较为相似。阪神地震的煤气管线震害率大致在台湾集集地震震害率范围内。此外,虽然煤气管和供水管的管材相似,但是在震害率方面有较大差异。

对台湾集集地震中的煤气管和供水管的震害率进行分析(见图3)。供水管(见表7)和煤气管的震害率有相同的趋势,管径越小震害率越大。其中供水管与煤气管相比,其震害率的增加随着  $V_{PC}$  的增加而更加急剧。

从本文第3.1节分析可知,  $V_{PC} \leq 20$  时震害率  $R_f$  就是零。考虑管径的影响,本文提出了管径影响系数  $K_1$ 。设  $D \geq 150$  mm 时为大管径,  $65 \text{ mm} < D < 150$  mm 时为中管径,  $D \leq 65$  mm 时为小管径,分别对应取  $K_1 = 0.2, 0.5, 5.5$ 。煤气管道的震害率与  $V_{PC}$  的关系见表8。

表8 煤气管道的震害率与  $V_{PC}$  的关系

Table 8 Relationship between seismic damage ratio and  $V_{PC}$  for gas pipeline

$V_{PC}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	标准震害率, $R_f$
$\leq 20$	0
$> 20$	$0.016 \cdot K_1 \cdot V_{PC}$

表7 管径与的震害率的关系<sup>[1]</sup>

Table 7 Relationship of seismic damage ratio with diameter of pipe<sup>[1]</sup>

管径, $D/\text{mm}$	震害率, $R_f$
供水管 小管径, $20 \leq D \leq 50$	$R_f = 1.90 \cdot 10^{-8} \cdot V_{PC}^{4.42}$
供水管 大管径, $65 \leq D \leq 600$	$R_f = 2.26 \cdot 10^{-13} \cdot V_{PC}^{6.34}$
煤气管 小管径, $D \leq 65$	$R_f = 0.02 \cdot V_{PC}^{1.23}$
煤气管 大管径, $65 < D \leq 150$	$R_f = 0.13 \cdot V_{PC}^{0.31}$

表9 煤气管道的震害率与  $D_{PC}$  的关系

Table 9 Relationship between seismic damage ratio and  $D_{PC}$  for gas pipeline

管材料	震害率, $R_f$	$R^2$
铸铁管	$0.075 \cdot D_{PC}^{1.51}$	0.47
钢管	$0.12 \cdot D_{PC}^{1.04}$	0.73

### 3.3 $D_{PG}$ 与震害率

根据 1983 年发生的日本海中部(Nihonkai - chubu)地震资料,Eidinger 得出了煤气管的震害率数据,但他在  $D_{PG}$ 与震害率分析中没有加上这些数据<sup>[12]</sup>。本文经过分析得出了如表 9 所示的结果。当  $D_{PG}$  相对较大时,铸铁管的震害率比钢管的震害率要高。而  $D_{PG}$  较小时铸铁管的震害率会小一些。然而,考虑到近期铸铁煤气管道已经几乎不再使用<sup>[1]</sup>,本文只关注煤气钢管,可以得出随着  $D_{PG}$  的增加,煤气管的震害率的增加比供水管的震害率的增加更加急剧的结论。

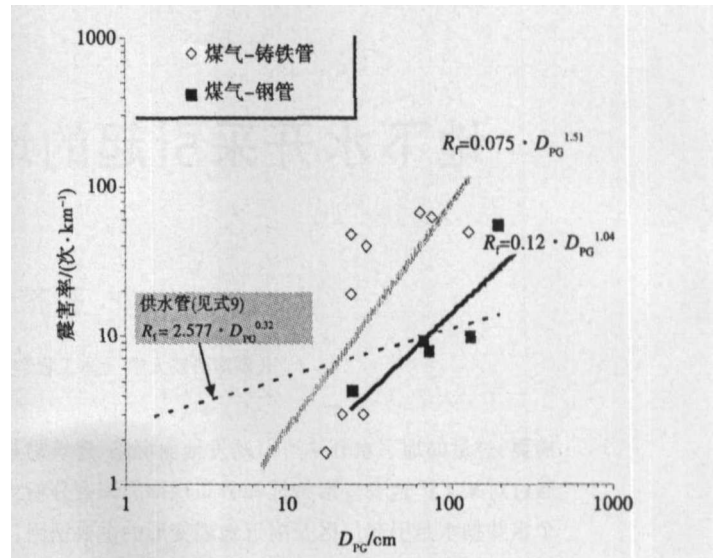


图 4 煤气管道震害率随  $D_{PG}$  的变化

Fig. 4 Variation of seismic damage ratio of gas pipeline with  $D_{PG}$

## 4 结语

本文给出了几次大地震中供水管线震害率与  $V_{PG}$ 、 $D_{PG}$  之间的关系式。综合考虑了管材、管径、场地土等因素的影响。比较了供水管与煤气管的震害率大小随  $V_{PG}$  变化的趋势,发现二者的震害率差别较大,供水管震害率随  $V_{PG}$  增加变化较为敏感。在  $D_{PG}$  分析中,随着  $D_{PG}$  的增加,煤气管震害率的增加比供水管震害率的增加更加急剧。

无论是基于  $V_{PG}$  分析还是  $D_{PG}$  分析,都存在资料获取有限性的问题。本文在分析时已考虑了管径对震害率的影响,但是煤气管的埋设深度和场地土的液化因素与震害率的关系没有考虑,还需要作进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] Chen W W, Shin B J, Chen Y C, et al. Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji - Ji earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(12) : 1209 - 1214.
- [2] Shimazu T, Shimazu N, Shimazu H. Regional assessment of Earthquake Hazard (Part2 Lifeline and Transportation) [C]//Earthquake Engineering. USA, ASCE, 2003: 819 - 828.
- [3] 艾晓秋,李杰. 地下管线的有效应力地震反应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(1): 1 - 7.
- [4] Ogawa Y, Koike T. Structural design of buried pipelines for severe earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(3) : 199 - 209.
- [5] 刘威,李杰,卫书麟,周静海. 供水管线抗震可靠性分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(6): 94 - 96.
- [6] 裴宗厂,刘尧兴,王晓青,刘鹏. 埋地管道震害预测方法简述[J]. 西北地震学报, 2005, 27(2): 186 - 189.
- [7] Bresko D, Hendrickson C, Oppenheim I. Seismic Risk Analysis of an Urban Water System [C]//Lifeline Earthquake Engineering, the Current State of Knowledge. New York: ASCE, 1981: 241 - 256.
- [8] 李杰. 生命线工程抗震 - 基础理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] 王东炜. 地下管线震害预测初探[J]. 郑州工学院学报, 1991, 12(1): 65 - 68.
- [10] 朱美珍. 给水管网的震害预测及可靠性评估[J]. 同济大学学报, 1994, 22(4): 463 - 468.
- [11] 李昕. 供水系统地震可靠性分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [12] Eidinger J. Seismic Fragility Formulations for Water Systems [M]. USA: G&E Report 47.01.01, 2001.
- [13] American Lifeline Alliance Eidinger J, Avila E A, Ballantye D. Seismic Fragility Formulations for Water Systems [M]. USA: ASCE, 2001.