

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.02.013



供水管网地震漏损蒙特卡洛模拟分析

邹日青, 郭恩栋, 于天洋, 李倩, 李红旭

(中国地震局工程力学研究所; 地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘要:为研究供水管网在不同地震烈度下的漏损情况和水力特性,基于管道地震破坏评估模型和概率分析方法,对不同地震烈度下管线的破坏概率和渗漏状态进行了计算分析,引入折减系数对管段抗震可靠度分析方法进行改进,并与传统计算方法比较,验证了其合理性。发展了 Monte Carlo 模拟技术在供水管网流分析方面的应用,并考虑带渗漏和爆管两种出流方式。编制程序对一大型管网进行了模拟分析,给出了震后带漏损情况下管网的漏失率和破坏情况,结果与实际地震灾害情况相符。

关键词:供水管网;地震破坏;漏损;蒙特卡洛模拟;水力模拟

中图分类号:TU991.33;P315.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)02-0083-05

Earthquake leakage analysis of the water supply pipeline network based on Monte Carlo simulation

Zou Riqing, Guo Endong, Yu Tianyang, Li Qian, Li Hongxu

(Institute of Engineering Mechanics; Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, P. R. China)

Abstract: The damage probability and the leakage level of pipelines in different earthquake intensity were calculated according to earthquake damage evaluation model and probability theory for the reason of studying the leakage and hydraulic characteristics of water supply network in ground motion. The reduction coefficient was introduced to improve the seismic reliability analysis of the pipe section, by means of comparing with the traditional calculation method, the rationality was verified. Monte Carlo simulation technology application in the service of water supply network was developed, with considering leakage and burst of pipes as well as compiling the program, the earthquake leakage of a large-scale water supply pipeline network had been calculated. The result is consistent with those of the actual earthquake disasters and provides an effective means for evaluating the failure state of the seismic function of the water supply pipeline network.

Keywords: water supply network; earthquake damage; leakage; monte carlo simulation; hydraulic simulation

收稿日期:2017-06-28

基金项目:中国地震局工程力学研究所中央级公益性研究所基本科研业务费专项(2014A01);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAK17B05);中国地震局创新团队发展计划(中国大陆地区地震灾害模拟与评估)

作者简介:邹日青(1991-),男,主要从事生命线工程抗震研究,E-mail:zou372484675@163.com。

郭恩栋(通信作者),男,研究员,博士生导师,E-mail:iemged@263.net。

Received:2017-06-28

Foundation item: Special Fund for Basic Scientific Research Expenses of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (No. 2014A01); National Sci-Tech Support Plan (No. 2015BAK17B05); Innovation Team Development Plan of China Earthquake Administration (Simulation and Evaluation of Earthquake Disaster in China)

Author brief: Zou Riqing (1991-), main research interest; being engaged in seismic research on lifeline engineering, E-mail: zou372484675@163.com.

Guo Endong (correspondent author), professor, doctoral supervisor, E-mail: iemged@263.net.

供水系统作为生命线工程的重要组成部分是社会生产和人民生活不可或缺的,但供水管网地震破坏后漏点定位及修复难度大,且震后常处于带渗漏低压供水状态。如 2008 年汶川地震,地震波及大半个中国及多个亚洲国家和地区,造成了四川省 20 余个市县供水系统各类工程结构的破坏。绵竹市供水系统全部瘫痪,供水管网破损严重,初步估计供水管网 80% 破裂,城市管网漏失率达 85%,2010 年玉树地震,玉树州结古镇经过水利部门全力抢修并建立了 58 个应急供水点,但日供水量也不到震前供水量的 40%。供水管网地震破坏与功能失效状态分析,是了解供水管网抗震性能及薄弱环节、估计震后功能失效影响程度的有效途径,对于地下管网抗震设计、加固与改造建设以及灾害应急评估均具有现实意义,长期以来学者们在供水管网地震漏损研究方面开展了卓有成效的研究,并取得了一系列研究成果。

在管网震后漏损研究方面,陈伶俐等^[1-2]给出了不同模型用于流分析的实施步骤,采用中国点式渗漏模型(以下简称 C 模型),结合水力分析方法并引入一次二阶矩法计算了管网的抗震可靠度。周建华等^[3]引入管网节点压力与流量之间的关系曲线,迭代中考考虑流量随压力的动态变化提出了低压供水时的平差计算方法。柳春光等^[4]同样考虑节点流量的动态变化,利用不同节点流量压力关系进行了震后水力分析。符圣聪等^[5]提出用管线损坏的反正弦函数来表示渗漏面积,实现对震后供水管网的水力计算。上述研究中,用统计的方法计算管网漏损,体现了地震随机性,但该统计方法只能计算管线漏损面积的平均值,所以,漏损形式只有渗漏,无法考虑管线爆管断开出流状态。侯本伟等^[6-7]通过管线破坏处的水流形态分析,得到了管网渗漏点和爆管点流出量表达式,并建立了渗漏点与爆管点出流模型的转化关系。杜坤等^[8]考虑爆管和渗漏两种不同情况,引入短管出流模型进行不同程度渗漏和爆管的水力模拟,但研究中忽略了地震随机性影响。Monte Carlo 模拟在管网连通性分析中是一种有效且发展成熟的方法,鉴于上述研究的经验和不足,引用 Monte Carlo 模拟方法,结合渗漏和爆管两种漏损方式考虑出流量和水压的动态变化,给出了一种实用的供水管网地震漏损分析方法,并对一大型供水管网进行了震后漏损分析。

1 管道地震破坏状态分析

管道地震破坏状态分析是管网漏损分析的基础,通过管道的抗震可靠性分析可以判断管线的漏

损出流形式和状态,进而结合渗漏和爆管模型进行水力分析。以承插式管道为例,在管道的抗震可靠性分析中,一般将管道接头的破坏状态假设为三态破坏,即:1)基本完好,接口变形总量小于开裂变形极限 R_1 。2)中等破坏,接口变形大于开裂变形极限 R_1 但小于允许变形极限 R_2 。3)严重破坏,接口变形大于允许变形极限 R_2 。

在传统的管段破坏概率计算方法中,假设接头变形 S 、接口变形极限 R_1 和 R_2 均服从正态分布,其均值方差用 μ 和 σ 表示,则给出管道接头的破坏概率^[9]

$$P_{S1} = \Phi\left(\frac{\mu_{R1} - \mu_S}{\sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_S^2}}\right) \quad (1)$$

$$P_{S3} = \Phi\left(\frac{\mu_S - \mu_{R2}}{\sqrt{\sigma_{R2}^2 + \sigma_S^2}}\right) \quad (2)$$

$$P_{S2} = 1 - P_{S1} - P_{S3} \quad (3)$$

式中: P_{S1} 为接头完好概率; P_{S2} 为接头中等破坏概率; P_{S3} 为接头严重破坏概率。

此公式存在一个统计上的误差,特别是在地震烈度较小的情况下,误差扩大从而对结果产生了很大影响。例如:在地震烈度为 6 度的区域,接口位移的平均值和标准差比 R_1 的平均值和标准差小一个量级,使得正态函数中分母 $\sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_S^2} \approx \sigma_{R1}$,而分子 $\mu_{R1} - \mu_S \approx \mu_{R1}$,得到的计算结果受到 R_1 的输入参数影响很大,而与需要计算的接口位移参数关系性不强。

为减小上述误差,引入折减系数 ω (建议取 0.85~0.95)对正态函数中的分母进行修正,并给出新的接口破坏概率计算方法

$$P_{S1} = \Phi\left(\frac{\mu_{R1} - \mu_S}{\sqrt{(\omega \cdot \sigma_{R1})^2 + \sigma_S^2}}\right) \quad (4)$$

$$P_{S3} = \Phi\left(\frac{\mu_S - \mu_{R2}}{\sqrt{(\omega \cdot \sigma_{R2})^2 + \sigma_S^2}}\right) \quad (5)$$

同样,管道的破坏状态也假设为三态破坏,分别为:完好、中等破坏、毁坏。由于在一个视波长内,管道在前半个视波长内共同受拉然后在后半视波长内共同受压,所有接头共同工作,所以假设在一个视波长内所有的管线接头破坏完全统计相关,而在两个不同视波长内的接头由于受力方向改变,认为它们相互独立,则管段不同破坏状态的概率为

$$P_1 = \prod_{i=1}^n \min_j (P_{S1ij}) \quad (6)$$

$$P_3 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \min_j P_{S3ij}) \quad (7)$$

$$P_2 = 1 - P_1 - P_3 \quad (8)$$

式中: P_{S1ij} 为第 i 个视波长内的接口完好概率; P_{S3ij} 为第 i 个视波长内的接口严重破坏概率; j 为一个视波长内接口个数; n 为管线长度 L 与视波长的比值取整数。由此,可以计算得到各管道震后处于不同破坏状态的概率。

2 漏损节点出流模型

大部分震后管网的漏损水力分析中,将所有漏损节点出流形式都看作渗漏出流,取管段渗漏面积的平均值作为管段渗漏程度的估计,采用点式出流模型进行流量计算。但在实际地震灾害中,供水管网的破坏除了渗漏还有爆管,当管线处于爆管状态时管线流量全由爆管点流失,而点式渗漏模型并不能很好地表现这种状态下的漏损流失量,所以,在震后漏损分析中必须将渗漏和爆管两种状态分开考虑。

通过与管线单体元件地震破坏评估模型相对应,结合渗漏与爆管两种出流方式模拟震后管网漏损分析。管线处于毁坏状态采用爆管出流模型,处于轻微破坏或中等破坏状态采用点式渗漏模型(C模型)^[10],其计算公式为

$$Q_L = 0.421 \cdot A \cdot \sqrt{H} \quad (9)$$

式中: A 为渗漏面积; H 为渗漏点水压。除 C 模型外, Hwang 等^[11]、AWWA^[12]、Shi^[13]、Tabesh 等^[14]、刘威^[15]等提出的渗漏模型均适用于本研究方法。

爆管点漏损流量计算方法如下:通过将爆管点假设为虚拟负水源点,爆管点的虚拟节点水头设置为该爆管点处的标高,使得爆管点水压不受管网内部水压影响,处于自由出水状态。由爆管虚拟节点的水头与管网中其他节点的水头差,通过 Hazen-Williams 公式可以计算得到与爆管节点相连接的管线流量

$$Q_P = 0.27853 \cdot C \cdot D^{2.63} \cdot L^{-0.54} \cdot (H_i - H_j)^{0.54} \quad (10)$$

式中: C 为管道粗糙度; D 为管径, m; L 为管长, m; H_i 、 H_j 分别为管线连接的两节点水压, m。

而与爆管节点相连接的管线流量均从爆管点流失,由此可以计算爆管节点的出流量

$$Q_{burst} = \sum_{i=1}^n Q_{Pi} \quad (11)$$

式中: Q_{burst} 为爆管点流量, L/s; n 为与该点连接的管线数; Q_{Pi} 为与该点连接的管线流量, L/s。

3 供水管网地震漏损分析

已有考虑了渗漏和爆管状态的漏损分析方法

中,渗漏点和爆管点都是人为预先设定的,对于地震的随机性影响考虑不足,无法给出有效的管网震后漏损状态。所以,利用 Monte Carlo 模拟,考虑带渗漏和爆管两种出流方式进行管网地震漏损分析。

3.1 Monte Carlo 模拟进行供水管网漏损分析方法

根据改进的管道地震破坏状态分析得到了管道的破坏概率,并利用 Monte Carlo 模拟进行供水管网漏损分析,编制算法程序得到了管网的漏损结果,其步骤如下:

1) 利用随机数发生器产生 n 个 (n 为管网中管线数) $[0,1]$ 内的随机数,并给管网中每根管线分配一个随机数。

2) 比较随机数与管线的地震破坏概率,分析三态破坏,若随机数 $r < P_1$,则管线在震后处于完好状态;若随机数 $P_1 < r < 1 - P_3$,则管线在震后处于中等破坏状态;若随机数 $r > 1 - P_3$,则管线处于毁坏状态。

3) 在原管网系统基础上,自动生成带渗漏和爆管的漏损状态管网。

4) 计算管网震前水力状态,将震前水压作为漏损状态水力分析的初始值。

5) 利用 Newton-Raphson 迭代进行管网水力分析,并计算管网总体漏失率。

$$C_L = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Li}}{\sum_{j=1}^k Q_{Sj}}$$

式中: C_L 为漏失率; Q_{Li} 为虚拟节点的渗漏流量, L/s; Q_{Sj} 为水源点和清水池的供水流量, L/s; n 为虚拟节点个数; k 为水源点和清水池总数。

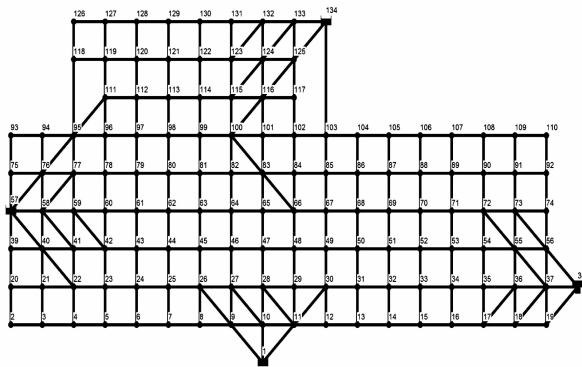
6) 重复步骤 1)~5),进行大量计算分析,取平均值即为管网震后漏失率。

通过上述分析,还可以估计不同地震烈度下的管网破坏处数。

4 大型管网地震功能失效分析实例

如图 1 所示的某供水管网,其场地条件为 II 类场地,无液化,管材为铸铁管, Hazen-Williams 系数取 110,刚性接头。其中,节点 1、57、134 为水源点,水头均为 50 m,节点 38 为清水池总水头为 40 m,其他各节点的标高均为 5 m,最小允许水压为 20 m。

以地震影响烈度 8 度为例,图 2 为管网中 16 段典型管段震后破坏概率。图中, P_1 为基本完好概率, P_2 为中等破坏概率, P_3 为毁坏概率。 P_3 的值非常小,似乎可以忽略,但是,由于供水系统网络比较

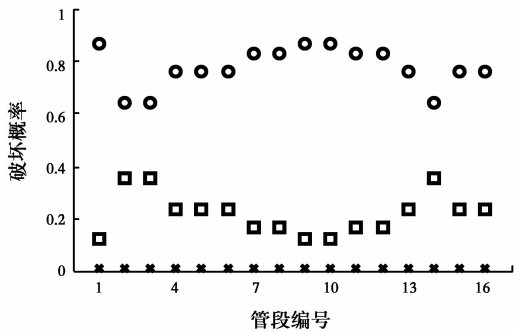


注：· 用户节点 — 供水管线 ■ 水源点 ▽ 清水池

图 1 供水管网

Fig. 1 The water supply pipeline network

大,管段数量多,所以,在进行计算的时候会有少数管段处于爆管状态,而部分管段处于中等破坏,与实际地震中破坏情况相似。



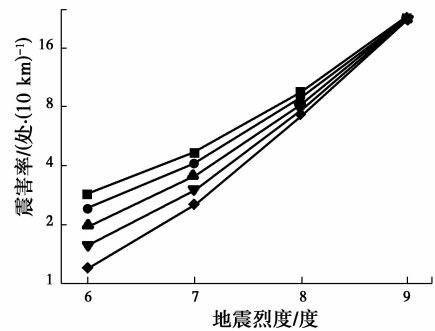
注：○ P₁ ■ P₂ * P₃

图 2 管线处于不同破坏状态的概率

Fig. 2 Probabilities of pipelines in different failure states

图 3 为算例供水管网在折减系数 ω 取值不同的情况下震害率随烈度变化情况。当 $\omega=1$ 时,即为传统的管段破坏概率计算方法,该方法在地震烈度为 6 度下得到的管网震害率为 2.85 处/10 km。历史震害经验显示,6 度下管网破坏形式以轻微破坏为主,其震害率应小于 2 处/10 km。当 $\omega=0.85$ 时,计算结果为 1.57 处/10 km, $\omega=0.9$ 时,结果为 1.97 处/10 km,与实际地震灾害较符,而 $\omega=0.8$ 时,其结果偏于保守。从图 3 可以看出,随着烈度增高,本文计算方法与传统计算方法结果越接近,在 9 度时两种方法结果几乎一样。说明在低烈度情况下本文方法更为合理,而在高烈度区两种方法结果相似。根据不同情况,建议 ω 的取值在 0.85~0.9 之间。

通过对如图 1 所示的管网随机采用 10 次模拟以确定发生渗漏和爆管的管道,由于每次模拟生成的随机数不同,故同一烈度下每次模拟产生的渗漏和爆管管道的数量亦有所差异,如表 1 所示。



注：■ $\omega=1$ ● $\omega=0.95$ ▲ $\omega=0.9$ ▼ $\omega=0.85$ ◆ $\omega=0.8$

图 3 不同烈度的震害率

Fig. 3 Earthquake damage rates of different intensities

表 1 供水管网渗漏和爆管管道的数量

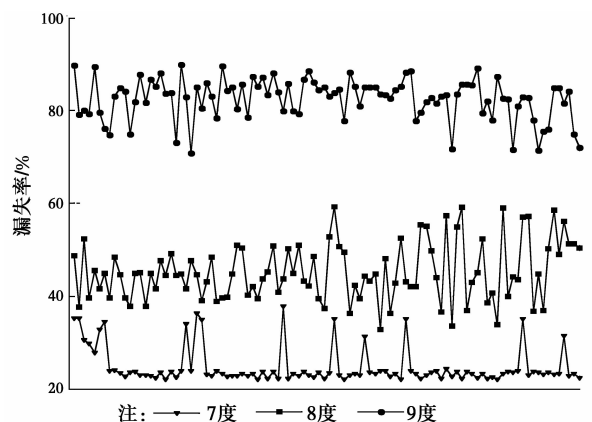
Table 1 The number of leakages and pipe bursts

in water supply network

根

6 度		7 度		8 度		9 度	
渗漏	爆管	渗漏	爆管	渗漏	爆管	渗漏	爆管
0	0	0	0	77	0	187	9
0	0	1	0	91	3	196	3
0	0	1	0	85	1	211	5
0	0	0	0	80	0	190	6
0	0	1	0	65	2	201	2
0	0	0	0	79	1	203	5
0	0	1	0	67	0	208	2
0	0	0	0	88	2	205	5
0	0	1	0	85	1	203	8
0	0	1	0	83	2	196	8

图 4 为采用本文方法计算得到的算例管网不同地震烈度下漏失率结果(一个点代表一次模拟漏失率计算结果)。



注：○ 7 度 ■ 8 度 ▽ 9 度

图 4 管网漏失率计算结果

Fig. 4 Calculation results of leakage rate of pipeline network

由图 4 可见,7 度烈度下管网的漏失率最小值为 22.00%,最大值为 37.85%,平均值为 24.76%,

处于中等破坏状态;8度时管网的漏失率最小值为32.82%,最大值为59.32%,平均值为45.22%,处于严重破坏状态;9度时管网的漏失率最小值为70.84%,最大值为89.94%,平均值为82.60%,处于毁坏状态。

7度下管网漏失率与8度下漏失率相差比较小,只有20%左右,而8度与9度下漏失率相差很大。这是由于低烈度下管网漏损点多以渗漏形式出流,爆管出流较少。而爆管流失的流量相对渗漏流失量要大很多,所以低烈度区管网漏失率较低。但随着烈度增高,爆管点的数量增多,特别在高烈度如9度情况下,管网中将近1/5的漏损点都是爆管,所以,在高烈度区管网漏失率相对低烈度区上升很快。

5 结论

引入折减系数,修正了管道的抗震可靠性分析方法,得到了较为准确的管段破坏概率。在此基础上,考虑渗漏和爆管两种出流形式,发展了Monte Carlo模拟在管网流分析方面的应用,并编制Monte Carlo流分析程序对一大型管网进行了模拟分析,给出了震后带漏损情况下管网的漏失率和破坏情况。

参考文献:

- [1] 陈伶俐,李杰.供水管网渗漏分析研究[J].地震工程与工程振动,2003,23(1):115-121.
CHEN L L, LI J. Leakage analysis of water supplying networks [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003,23(1):115-121. (in Chinese)
- [2] 陈伶俐,李杰.城市供水管网系统抗震功能可靠度分析[J].工程力学,2004,21(4):45-50.
CHEN L L, LI J. A seismic service-ability analysis of water supply network [J]. Engineering Mechanics, 2004,21(4):45-50. (in Chinese)
- [3] 周建华,赵洪宾.低水压供水时的管网平差计算方法[J].中国给水排水,2003,19(3):43-45.
ZHOU J H, ZHAO H B. Calculation method of pipe network adjustment in low pressure water supply [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(3): 43-45. (in Chinese)
- [4] 柳春光,何双华.城市供水管网地震时的水利分析研究[J].世界地震工程,2010,26(2):25-29.
LIU C G, HE S H. Hydraulic analysis of urban water supply network after strong earthquakes [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 25-29. (in Chinese)
- [5] 符圣聪,江静贝,黄世敏.地震时供水管网的可靠性和功能分析[J].工程抗震与加固改造,2007,29(2):95-102.
FU S C, JIANG J B, HUANG S M. Reliability and function analysis of water supply networks postearthquake [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007,29(2):95-102. (in Chinese)
- [6] 侯本伟,杜修力.地震破坏管线漏损分析模对比研究[J].地震工程与工程震动,2013,33(5):67-75.
HOU B W, DU X L. Comparative study on hydraulic simulation of earthquake damaged water supply pipelines [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013,33(5):67-75. (in Chinese)
- [7] 侯本伟,杜修力.地震破坏供水管网低压水力分析[J].土木建筑与环境工程,2013,35(5):36-44.
HOU B W, DU X L. Pressure-dependent analysis of water supply network damaged by earthquake based on emitter model [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(5): 36-44. (in Chinese)
- [8] 杜坤,龙天渝.渗漏供水管网水力特性研究[J].给水排水,2014,40(1):152-156.
DU K, LONG T Y. Hydraulic characteristics of leakage water supply network [J]. Water and Wastewater, 2014,40(1):152-156. (in Chinese)
- [9] 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.
LI J. Life line earthquake engineering basic theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 宋仁元.怎样防止给水系统的漏损[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.
SONG R Y. How to prevent the leakage of the water distribution system[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1988. (in Chinese)
- [11] HWANG H, LIN H, SHINOZUKA M. Seismic performance assessment of water delivery systems [J]. Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 1998, 4(3): 118-125.
- [12] American Water Works Association. Water audit and leak detection [M]. AWWA Manual M36, 1999.
- [13] SHI P. Seismic response modeling of water supply systems [D]. New York: Cornell University, 2006.
- [14] TABESH M, ASADIYANI-YEKTA A H, BURROWS R. An integrated model to evaluate losses in water distribution systems [J]. Water Resources Management, 2009, 23(3): 477-492.
- [15] 刘威,黄鹭娜,李杰.供水管线渗漏试验研究[J].地震工程与工程振动,2011,31(4):167-173.
LIU W, HUANG L N, LI J. Experiment on leakage of water pipelines [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(4): 167-173. (in Chinese)