

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.02.010



城市供水管网抗震可靠性评估的 随机模拟方法

和丽荣¹, 杜坤¹, 宋志刚¹, 周明¹, 徐冰峰¹, 杜雨²

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650500; 2. 中建二局第三建筑工程有限公司, 武汉 430022)

摘要:在进行管网抗震可靠性评估时, 现有方法大多采用相同方式进行管道的渗漏与爆管水力模拟, 这会导致管网水力模拟及可靠性评估结果的不准确。考虑到地震时管道破损具有很大的随机性, 对城市供水管网抗震可靠性评估的随机模拟方法进行研究。应用蒙特卡洛模拟产生管网震损场景, 用泊松随机数与均匀随机数判定管道工作状态, 用正态随机数确定管道渗漏系数; 利用 EPANET 软件中喷嘴及管道关闭功能实现管道渗漏及爆管等效模拟, 提出将长管道分段并应用“分步迭代”法求解低压管网水力方程, 提高震损管网水力模拟精度。以震损场景下节点流量统计平均值与正常时节点流量的比值作为可靠度指标, 分别采用所提出算法及 GIRAFFE 软件对云南某古镇供水管网在 VIII、IV 烈度时抗震可靠性进行评估, 评估结果证明了所提出算法的可行性。评估结果还表明, 除地震烈度外, 管网本身水力条件对供水可靠性影响较大, 管网末端、支管服务区域及地势较高区域供水可靠性远低于干管服务区。

关键词:地震; 供水管网; 随机模拟; 可靠性评估

中图分类号: TU991.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)02-0062-08

Stochastic simulation method for seismic reliability assessment of urban water distribution system

He Lirong¹, Du Kun¹, Song Zhigang¹, Zhou Ming¹, Xu Bingfeng¹, Du Yu²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China;
2. The Third Construction Engineer Company LTD of China Construction Second Engineer Bureau, Wuhan 430022, P. R. China)

Abstract: When evaluating the seismic reliability of urban WDSs, most of traditional methods use the same approach to simulate the leakage and burst, which leads to inaccurate results of simulation and reliability evaluation. Considering pipe damages due to earthquake are random, this paper proposed a stochastic simulation method for seismic reliability assessment of WDSs. Specifically, the seismic damage scenarios are generated using Monte Carlo simulation, in which Poisson and uniform random number are used for determining pipe working status, and normal random numbers are used for pipe leakage coefficient

收稿日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(51608242); 云南省人才培养计划(14118943); 云南省教育厅基金(2015Y077)

作者简介: 和丽荣(1988-), 女, 主要从事结构工程研究, E-mail: 641435783@qq.com。

杜坤(通信作者), 男, 博士, E-mail: 250977426@qq.com。

Received: 2017-04-13

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51608242); Personnel Training Program of Yunnan Province (No. 14118943); Yunnan Provincial Department of Education Fund Project (No. 2015Y077)

Author brief: He Lirong(1988-), main research interest: structural engineering, E-mail: 641435783@qq.com.

Du Kun(corresponding author), PhD, E-mail: 250977426@qq.com.

generation. Pipe leakage and burst are simulated based on the emitter and pipe close function in EPANET. To improve hydraulic simulation accuracy of the damaged WDSs, the long pipes are segmented and “two-step iteration” method is introduced to solve the network in low pressure condition. The ratio of the statistical average values to normal values of nodal demand in seismic damage scenarios is used as reliability index. The proposed algorithm and GIRAFFE software are used to evaluate the performance of WDSs of an ancient town in Yunnan under VIII and IV seismic intensity, and the feasibility of the proposed algorithm is demonstrated by analyzing and comparing the evaluating results. Evaluation results indicate that, in addition to seismic intensity factor, the hydraulic condition has great influence on the seismic reliability of WDS. Under the same seismic intensity, the water supply reliability for areas located in high terrain or far from water resource is considerably lower than that of areas closed to the water source with main pipe being serviced.

Keywords: earthquake; water distribution system; stochastic simulation; reliability evaluation

供水管网是生命线工程的重要组成部分,历次震害资料表明,地震会造成埋地管道不同程度破损^[1]。供水管网抗震可靠性是指在可能地震烈度下的管网服务性能,一般采用震损状态下管网节点流量或水压进行量化。供水管网抗震可靠性评估不仅有助于优化管网设计,还有助于地震后救灾、修复工作的开展,因此,具有重要意义^[2-4]。

陈玲俐等^[5]等提出利用一次二阶矩法评估地震后带渗漏管网的供水可靠性,该方法利用功能函数展开式的线性部分简化计算,具有计算效率高的优点。符胜聪等^[6]提出采用管线震损概率的反正弦函数计算管道的可能渗漏面积,并假定渗漏点位于各管道中间位置。考虑到地震后漏损管网可能处于低压运行状态,杜坤等^[7]等提出适用于低压供水管网“分步迭代”的水力计算方法,提高了震损管网水力模拟精度。Hwang^[8]最早引入蒙特卡洛模拟,通过产生泊松随机数确定各管道漏点个数,并在管道中间位置设定相同累加面积漏点进行管网水力分析,其中,每单个漏点面积为管道截面面积的 0.03 倍,爆管面积设定为管道横截面积的 1 倍。值得注意的是,上述研究都未区分管道的爆管与渗漏,认为爆管即管道的严重渗漏,采用相同的方式进行爆管水力模拟。然而,美国生命线协会调查表明^[9],渗漏管道通常破损轻微,仍具有一定输水能力,而爆管会导致管道断裂。

由此可见,爆管会改变管网拓扑结构,通过简单在管道中间或节点位置添加漏点不能反映爆管时管网水力状态。而地震发生初期,爆管是导致管网丧失供水能力的主要原因,故在开展供水管网抗震可靠性评估时必须予以考虑。鉴于地震对管道的破坏具有很大随机性,笔者开展了基于随机模拟的供水

管网抗震可靠性评估研究,所提出方法应用蒙特卡洛模拟产生足够数量的随机震损场景,在 MATLAB 环境下调用 EPANET 工具箱实现带渗漏及爆管管网水力模拟,以随机震损场景下节点流量统计平均值与正常时节点流量的比值作为可靠度指标,评估了云南某古镇在 VIII、IX 度地震烈度下管网服务性能。所提出随机模拟算法是对现有 GIRAFFE 软件算法的改进。

1 GIRAFFE 软件简介及存在问题

GIRAFFE 软件是由康奈尔大学 Rourke^[10-13]开发的一款非商业软件,具有确定性和随机性模拟两大功能,其中,确定性模拟用于评估特定场景下管网供水服务性能,随机模拟通过产生足够数量的随机场景评估可能地震烈度下管网的供水可靠性。相对于以往研究,GIRAFFE 软件明确指出,爆管会改变管网拓扑结构,提出了较为完善的随机模拟方法生成管网震损场景,并采用 EPANET 计算引擎进行管网水力分析。其中,EPANET 是由美国环保局开发的一款用于管网水力分析的开源软件,其稳定性极佳并提供了程序员工具箱,很多商业软件都是在其基础上二次开发所得。

在应用 GIRAFFE 软件对大型供水管网进行抗震可靠性分析时发现,GIRAFFE 软件存在运算时间长、极易报错的问题,主要原因是由于 GIRAFFE 软件采用添加水池和虚拟管段模拟管道渗漏与爆管(如图 1 所示),这需要改变管网拓扑结构并修改管网系统文件,导致极大运算量及程序运行不稳定。此外,管网因爆管或漏损可能处于低压运行状态,节点流量会因供水压力不足而减小,而当前 GIRAFFE 软件仍采用传统的基于节点流量驱动水

力计算法,即认为节点流量是与压力无关的变量,这使得管网水力计算结果与实际不符。

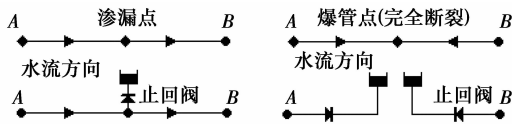


图 1 GIRAFFE 软件中渗漏与爆管模拟

Fig. 1 Simulation the leakage and burst in GIRAFFE software

除了上述两方面问题外, GIRAFFE 软件还存在如下不足: 1) 构建管网水力模型时, 必须按英制单位定义管长、管径及节点标高等参数; 2) 必须严格按照说明书修改管网系统文件, 直接采用原始 INP 文件会导致程序锁死错误; 3) 管网系统文件中的所有节点流量不能赋予零值, 否则, 程序出现计算溢出错误。

2 随机模拟算法

GIRAFFE 软件主要存在两方面问题:

1) 由于需要修改管网系统(INP)文件, 导致运算量大、程序运行不稳定。GIRAFFE 软件对震损管网的随机模拟通过修改管网 INP 文件完成, 例如, 进行 10 000 次随机模拟, 需要产生 10 000 个 INP 文件, 这是导致 GIRAFFE 软件运行耗时长、不稳定的主要原因。针对该问题, Yoo 等^[14]假定漏损点及爆管点都位于管道节点位置, 以简化计算、避免管网拓扑结构修改。然而, Shi^[11]指出, 对长距离输水管道, 假设渗漏点或爆管点在管道节点位置会导致较大的模拟误差。针对该问题, 笔者提出, 在长距离管道中间位置增加虚拟节点, 以减小模拟误差, 详见 2.2.2 节。

2) 未考虑低压水力状态下节点流量随压力动态变化, 导致震损管网水力计算结果不准确。爆管及渗漏可能使管网处于低压运行状态, 实际中管网节点流量受水压降低的影响会减小, 而 GIRAFFE 软件采用传统的水力计算方法, 未考虑低压运行状态下节点流量的变化, 使得管网水力模拟结果可能与实际不符。

针对问题 1), 尝试利用 EPANET 软件自带函数功能实现管道渗漏与爆管模拟, 以避免管网系统文件修改。针对问题 2), 引入适用于低压管网的“分步迭代法”进行水力计算, 提高震损管网水力模拟精度。与 GIRAFFE 软件相比, 所提出算法均是

基于 EPANET 软件内置函数完成, 无需修改管网系统文件或编写额外代码进行低压管网水力分析, 故具有计算效率高及稳定性好的优点。

算法流程如图 2 所示, 其中包括: “管道震损概率计算”、“基于蒙特卡洛模拟的供水管网震损场景生成”及“低压供水管网水力分析”3 部分。

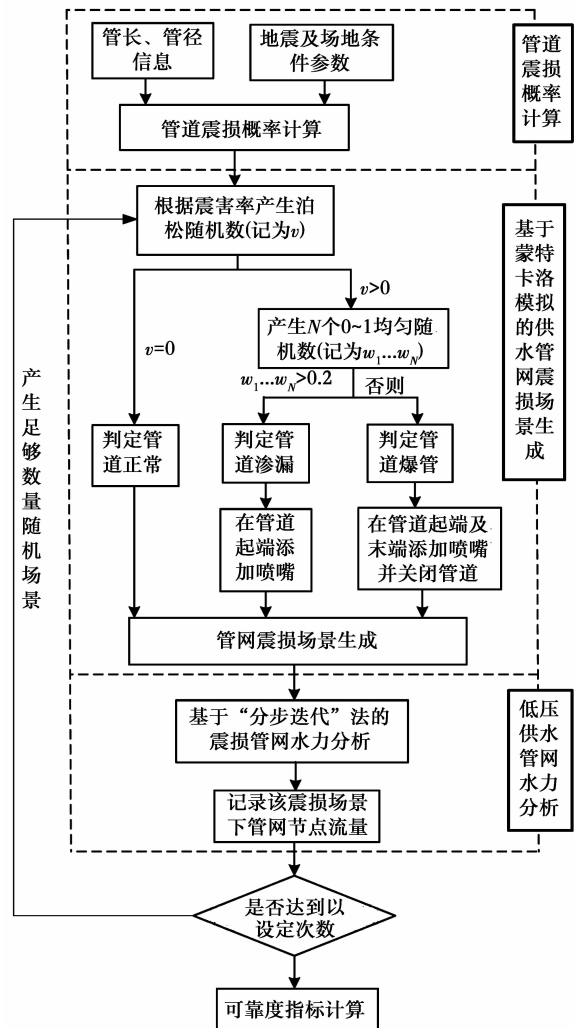


图 2 随机模拟算法流程图

Fig. 2 The flow chart of the stochastic simulation algorithm

2.1 管道震害率计算

管道震害率(RR)是指地震中单位管道长度(每 km)破损次数。由于埋地管道在地震中的破损具有极大随机性, 导致很难通过试验或从理论上推求管道震害率。目前, 多以历史震害资料为依据对管道震害率进行估算。采用 Isoyama 等^[15]提出的经验式计算管道震害率。

$$RR = C_g \times C_p \times C_d \times C_y \times R \quad (1)$$

式中: C_g 、 C_p 、 C_d 、 C_y 分别为地形地质、管材、管径、液化影响修正系数, 各修正系数取值参见表 1。

表 1 修正系数表

Table 1 List of correction factors

影响因素	类别	修正系数
管材 C_p	石棉水泥管 (ACP)	1.2
	聚氯乙烯管 (PVC)	1.0
	铸铁管 (CIP)	1.0
	聚乙烯管 (PE)	0.8
	钢管 (SP)	0.3
	球墨铸铁管 (DCIP)	0.3
管径 C_d	$D < 100$ mm	1.6
	$100 \text{ mm} \leq D < 200$ mm	1.0
	$200 \text{ mm} \leq D < 500$ mm	0.8
	$D \geq 500$ mm	0.5
地形地质 C_g	山地	1.1
	丘陵	1.5
	旧河道	3.2
	冲积平原	1.0
	地质良好	0.4
土壤液化 C_y	无液化	1.0
	部分液化	2.0
	完全液化	2.4

R 为标准震害率,其取值与震动峰值加速度 (PGA) 相关,可采用式 (2) 计算。

$$R = 2.88 \times 10^{-6} \times (\text{PGA} - 100)^{1.97} \quad (2)$$

2.2 基于蒙特卡洛模拟的管网震损场景生成

2.2.1 管道工作状态判定 地震后,管道存在正常、渗漏及爆管 3 种工作状态,采用泊松随机数与均匀随机数判定管道工作状态。首先,根据计算所得的管道平均震害率 RR ,设置泊松分布期望 $\lambda = RR \cdot L$,产生泊松随机数 v 。 $v=0$ 表明管道上无破损点,判定管道正常; $N>0$ 表明管道上存在漏损或爆管点。然后,产生 N 个均匀随机数 w_1, w_2, \dots, w_N ,分别考察其落入区间,当所有随机数均不落入爆管区间,判定管道处于渗漏状态;反之,判定管道发生爆管。根据 Hunter^[16] 的研究,地震后 80% 管道破损为渗漏,20% 为爆管,即当 w_1, w_2, \dots, w_N 均大于 0.2 时,判定管道漏损;否则,判定管道为爆管。

2.2.2 基于 EPANET 喷嘴功能的管道渗漏模拟

GIRAFFE 软件通过添加短管及水池模拟管道渗漏,这需要改变管网拓扑结构。事实上,EPANET 自带的喷嘴功能就能模拟管道渗漏,EPANET 中喷嘴流量计算式为

$$Q = C \cdot \sqrt{H} \quad (3)$$

式中: Q 为喷嘴流量, L/s; C 为喷嘴射流系数, H 为节点水压, m。基于自动喷淋系统中喷头流量实测数据, GIRAFFE 软件推荐采用式 (4) 计算管道渗漏量。

$$Q = A \cdot \sqrt{2gH} \times 10^{-3} = 4.43 \cdot A \cdot \sqrt{H} \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: A 为渗漏面积, mm^2 ; Q 为管道渗漏量, L/s; H 为渗漏处压力水头, m。根据式 (3) 和式 (4), 可得渗漏面积与射流系数的换算式

$$C = 4.43 \cdot A \times 10^{-3} \quad (5)$$

由于 EPANET 只能在节点处添加喷嘴,将管道上渗漏点的射流系数叠加到节点进行等效模拟,如图 3 所示。

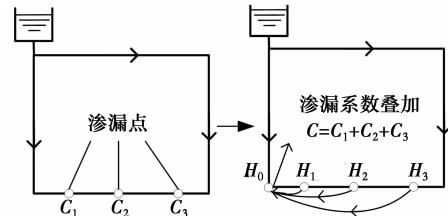


图 3 基于喷嘴功能的管道渗漏等效模拟

Fig. 3 Equivalent simulation of pipeline leakage based on emitter function

对长距离输水管,由于管道沿程水头损失较大, H_0, H_1, H_2, H_3 间会有较大差异,导致等效模拟结果与实际情况有较大出入。针对该问题,添加虚拟节点将长管道分段以减小模拟误差,如图 4 所示。

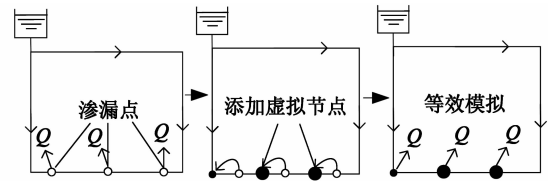


图 4 基于管道分段的管道渗漏等效模拟

Fig. 4 Leakage equivalent simulation based on pipeline segmentation

理论上,管道分段长度越短,等效模拟精度越高,但添加过多的额外节点会增加计算量。值得注意的是,由于管网水力模型只是实际管网的简化,即便经过校核的水力模型也无法准确反映真实管网水力状态,因此,没有必要过分强调模拟精度。考虑到实际中经过校核的管网模型压力计算精度在 1 m 左右,而未经校核的模型精度甚至大于 3 m,故在对长距离输水管道进行分段时,控制两端节点水压在 1~3 m 是合理的^[17]。值得说明的是,增加虚拟节点在随机模拟前进行,在随机模拟过程中无需修改管网 INP 文件,管道的漏损及爆管均通过 EPANET 内置函数完成。

2.2.3 基于 EPANET 管道关闭功能的爆管模拟

如图 5 所示,爆管时,管道断裂并出现两个渗漏点。以 EPANET 为基础,可调用其内置函数将管道关闭,并在两端节点添加相应的射流系数进行等效模拟,其中,射流系数可按 1 倍管道截面面积确定,即 $C=4.43 \cdot A \times 10^{-3}$ 。

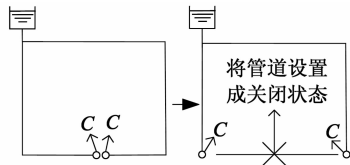


图 5 基于管道关闭功能的爆管等效模拟

Fig. 5 Equivalent simulation of pipeline breakage based on pipe close function

对长距离输水管道,由于两端节点与爆管处水压相差较大,上述等效方法会导致较大模拟误差。同样,可通过添加虚拟节点,将管道分段减小模拟误差,如图 6 所示。

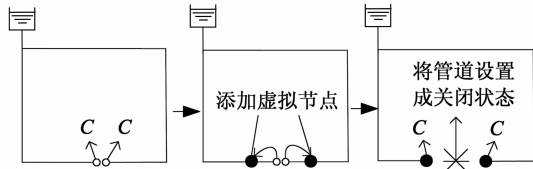


图 6 基于管道分段的爆管等效模拟

Fig. 6 Breakage equivalent simulation based on pipeline segmentation

2.2.4 渗漏点渗漏面积确定 在进行震损管网水力模拟时,Hwang 假定单个漏点面积为 0.03 倍管道截面面积。事实上,管道破损口渗漏面积与破损类型相关,上述假设显得过于随意。为确定渗漏点面积,GIRAFFE 软件将管道破损分为 5 种类型:管道接头环状松动、管道横向拉裂、管道局部拉裂、管道纵向拉裂、管身局部破损,如图 7 所示。

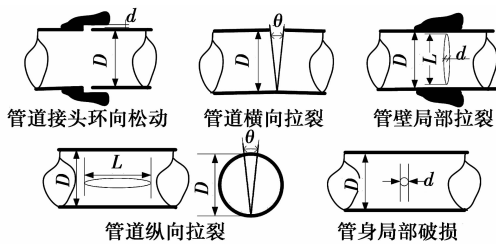


图 7 管道破损类型

Fig. 7 Damage types of pipelines

基于大量实地调研数据,GIRAFFE 软件给出了不同破损形式的渗漏面积计算公式、参数取值及发生概率,如表 2、表 3 所示。

表 2 不同形式破损渗漏面积计算公式及参数取值
Table 2 Calculation of leakage area and parameters value for different damage types

破损形式	渗漏面积	参数取值
环向松动	$A_1 = 0.3\pi dD$	$d = 10 \text{ mm}$ (D 为管道直径)
横向拉裂	$A_2 = 0.5\pi\theta D^2$	$\theta = 0.5^\circ$
纵向拉裂	$A_3 = L\theta D$	$\theta = 0.1^\circ, L = 12 \text{ m}$
局部破损	$A_4 = \pi d^2 / 4$	$d = 0.1D$
局部拉裂	$A_5 = LW$	$L = 0.3\pi D, W = 12 \text{ mm}$

表 3 不同形式破损发生概率

Table 3 Probability of damage types for different pipelines

管材	接头环向松动	横向拉裂	纵向拉裂	局部破损	局部拉裂
铸铁管	0.3	0.5	0.1	0.1	—
球磨铸铁管	0.8	—	0.1	0.1	—
铆接钢管	0.6	—	0.3	0.1	—
焊接钢管	—	—	—	—	1
混凝土管	1	—	—	—	—

表 3 中的数据是根据地震后统计资料所得,例如,对铸铁管,接头环向松动所占比例为 30%、横向拉裂所占比例为 50%、纵向拉裂及局部破损所占比例则分别为 10%;而对焊接钢管,所有破损均为局部拉裂。考虑到地震时管道破损具有较大随机性,采用正态随机数 $N(\mu, \sigma^2)$ 确定渗漏面积,其中, μ 采用加权平均法进行计算, $\sigma = 0.1\mu$ 。例如,对铸铁管, $\mu = 0.3A_1 + 0.5A_2 + 0.1A_3 + 0.1A_4$,其中, A_1, A_2, A_3, A_4 采用表 2 中的计算式确定。

2.3 基于“分步迭代”法的低压供水管网水力分析

地震后,带渗漏工作的供水管网可能处于低压运行状态,可认为节点流量与压力满足式(6)所示函数关系^[18]。

$$Q_i = \begin{cases} Q_i^{nor} & H_i \geq H^{des} \\ S_i \cdot \sqrt{H_i} & 0 < H_i < H^{des} \\ 0 & H_i \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: H_i 为节点 i 水压, m; H^{des} 为保证正常用水量的最小水压,且 $S_i = \frac{Q_i^{nor}}{\sqrt{H^{des}}}$ 。根据 Liu 等^[19]、周建华等^[20]的研究,选取 $H^{des} = 20 \text{ m}$ 。针对低压供水管网水力方程求解,应用了“分步迭代”法^[7],其基本思路是:首先,假设所有用水节点都处于低压状态,并利用 EPANET 的喷嘴功能进行出流模拟;然后,根据前一轮节点水压计算值修正节点出流类型,直到所有节点满足式(6)的约束,具体步骤为:

- 1) 假设所有用水节点为低压用水点,将其替换为喷嘴出流类型,并定义扩散系数 $C_i = S_i$ 。
- 2) 调用 EPANET 求解管网水力方程。
- 3) 校核节点水压,若 $H_i \geq H^{des}$ 则将该节点修改为正常出流类型;若 $H_i \leq 0$,将节点流量及渗漏系数设置为零。
- 4) 再次调用 EPANET 求解管网水力方程,若计算结果中所有节点的出流状态都满足式(6)的约束,则完成水力计算,否则转入第 3) 步。

2.4 抗震可靠性指标

以随机震损场景下节点流量统计平均值与正常

时节点流量的比值作为可靠度指标。对管网中单个节点,可靠度计算式为

$$SI_i = \frac{\sum_{j=1}^k Q_j^i}{k \cdot Q_i^{nor}} \quad (7)$$

管网整体抗震可靠度计算式为

$$SI = \frac{\sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^n Q_j^i)}{k \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^{nor}} \quad (8)$$

式中: SI_i 为节点 i 的可靠度; k 为蒙特卡洛模拟次数; Q_j^i 为第 j 次蒙特卡洛模拟时节点 i 的流量; Q_i^{nor} 为正常时的节点 i 的流量。

3 案例分析

3.1 研究对象

图 8 所示为云南某古镇供水管网,该管网采用两个高位水池分高区和低区供水。高区水源为 X 山山顶高位水池,供水范围为 A 社区及 B 社区,其中,A 社区管网节点平均高程为 2 430 m,B 社区管网节点平均高程为 2 400 m;低区水源亦为高位水池,供水范围为 C、D、E、F、G5 个社区,其中 C 社区管网节点平均高程为 2 385 m,D 社区管网节点平均高程为 2 390 m,E 社区管网节点平均高程为 2 392 m,F 社区管网节点平均高程为 2 392 m,G 社区管网节点平均高程为 2 398 m。该供水管网覆盖面积为 3.8 km²,服务人口约 2.5 万人,其中,管线总长约 58.6 km,共计 612 个用水节点、777 节管段。管道均采用球墨铸铁管,管径在 150~400 mm 范围内。

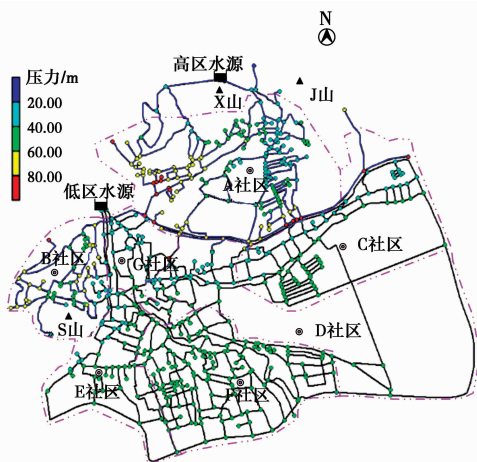


图 8 丽江大研古城供水管网

Fig. 8 Water distribution system of Lijiang ancient town

3.2 评估结果

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),该古镇位于 VIII 度设防区。应用所提出算法评估地震烈度为 VIII 和 IX 度时管网供水可靠性,地震动峰值加速度分别为 300、700 cm/s²。用 MATLAB 编程执行蒙特卡洛模拟 10 000 次,评估结果如图 9、图 10 所示。

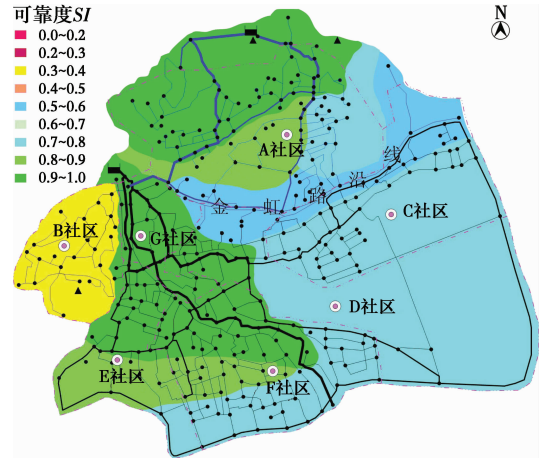


图 9 地震烈度为 VIII 度时管网供水可靠度染色图

Fig. 9 The reliability coloring graph of WDS of Lijiang ancient town in VIII earthquake intensity

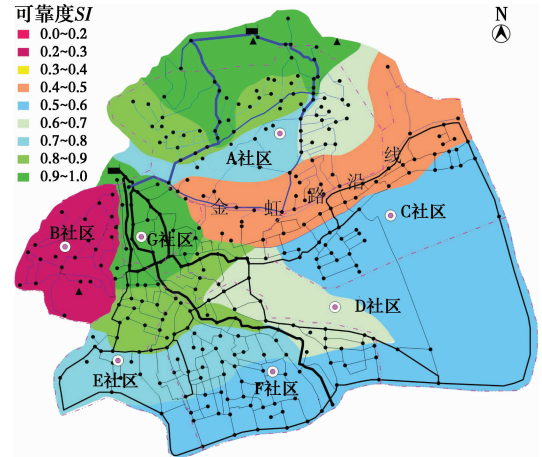


图 10 地震烈度为 IX 度时管网供水可靠度染色图

Fig. 10 The reliability coloring graph of WDS of Lijiang ancient town in IX earthquake intensity

由图 9、图 10 可知,地震烈度越大,管网供水可靠性越低。除地震烈度因素外,管网本身水力条件对地震时供水可靠性影响较大。在相同地震烈度下,管网节点离水源越远或所在地形标高越大,该区域的供水可靠性越低;再者,供水干管服务区域的可靠性远高于支管服务区域。具体而言,在地震烈度 VIII 度时,服务区域平均供水可靠性为 0.79,最不利区域为地势较高的 B 社区,供水可靠性下降至

0.36;其次是离水源较远的金虹路沿线区域(该区域为 A 社区、G 社区、D 社区及 C 社区交界狭长区域,管网节点平均高程 2 415 m,距离高区水源 1.9~2.0 km),供水可靠性下降到 0.57。地震烈度为 IX 度时,区域平均供水可靠性下降至 0.51,B 社区供水可靠性为 0.21。

为验证所提出的算法,应用 GIRAFFE 软件评估管网在 VIII 和 IX 度地震烈度下供水可靠性,结果如图 11、图 12 所示。地震烈度为 VIII 度时,区域平均供水可靠度为 0.75,B 社区供水可靠度为 0.23,金虹路沿线区域供水可靠度为 0.45;地震烈度为 IX 度,区域平均供水可靠度为 0.43,B 社区供水可靠度仅为 0.11,金虹路沿线区域供水可靠度为 0.33。对比图 9、图 10、图 11 及图 12 可知,除地势较高、远离水源及支管供水区域外,所提出算法评估结果与 GIRAFFE 软件评估结果基本相当。

通过分析,GIRAFFE 软件所得抗震可靠度较低的原因为:1)GIRAFFE 软件采用传统的基于节点流量驱动的水力计算方法,忽略了节点流量随供水压力降低而减小的事实,导致管网末端及地势较高区域出现不合理的负压计算结果;2)在计算管网抗震可靠度时,为简化分析,GIRAFFE 软件认为当压力低于设定值(如 10 m)时,实际需水量完全不能满足并设定其可靠度为 0,忽略了低压供水时节点流量能部分满足的情况。相较而言,算法引入“分步迭代法”求解低压供水管网,并考虑节点用水量随水压的动态变化,所得可靠性评估结果更符合实际。因此,可以认为该算法能用于实际供水管网抗震可靠性评估。

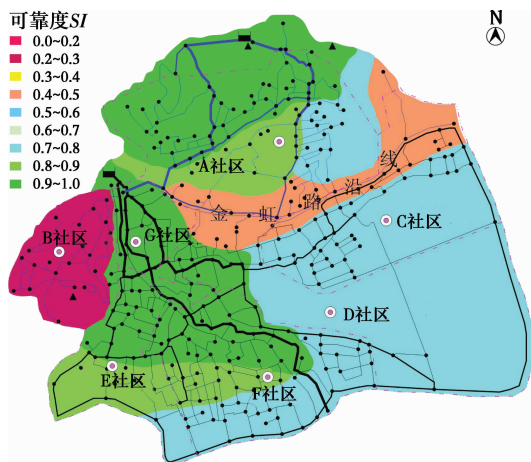


图 11 地震烈度为 VIII 度时管网供水可靠度染色图
Fig. 11 The reliability coloring graph of WDS of Lijiang ancient town in VIII earthquake intensity

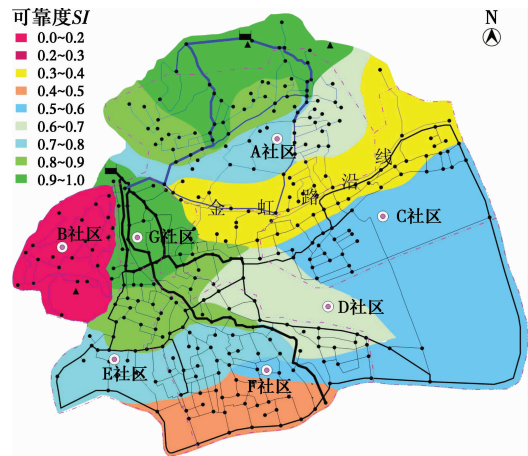


图 12 地震烈度为 IX 度时管网供水可靠度染色图
Fig. 12 The reliability coloring graph of WDS of Lijiang ancient town in IX earthquake intensity

4 结论

开展了供水管网抗震可靠性评估的随机模拟算法研究,评估了云南某古镇供水管网抗震可靠性。与目前广泛使用的 GIRAFFE 软件算法相比,提出的算法利用 EPANET 软件中喷嘴及管道关闭功能实现管道渗漏及爆管模拟,避免了管网系统文件的修改,提高了程序计算效率及运算稳定性。引入“分步迭代”法求解低压管网水力方程,提高了震损管网水力模拟精度。采用泊松随机数与均匀随机数判定管道工作状态,正态随机数确定管道渗漏系数,并提出将长管道分段减小模拟误差。

分别采用所提出算法及 GIRAFFE 软件对该古镇供水管网在 VIII、IV 烈度时抗震可靠性进行评估。对比评估结果发现,除地势较高、远离水源及支管供水区域外,所提出算法评估结果与 GIRAFFE 软件基本相当。其原因是 GIRAFFE 软件未考虑节点流量随水压动态变化及低压供水时节点流量能部分满足的情况,导致管网末端或地势较高区域可靠度评估结果偏低。此外,所得结果还表明,除地震烈度外,管网本身水力条件对供水可靠性影响较大,除管网末端及支管服务区域外,地势较高区域供水可靠性也远低于其他区域,主要原因是,该区域富裕水头较低,一旦地震时管网中出现爆管或漏损,这些区域节点水压相对压降较大。值得说明的是,为便于震损管网水力分析,在一定程度上简化了管道爆管及渗漏模拟,如何更准确地模拟管道爆管及渗漏仍值得进一步研究。此外,随机模拟中参数(如 σ 、 H^{des})等对模拟结果的影响也值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 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. Lifeline earthquake engineering: Basic theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [2] JAVANBARG M B, TAKADA S. Seismic reliability assessment of water supply systems [J]. British Corrosion Journal, 2013, 25(2): 108-114.
- [3] 王威, 候本伟, 田杰, 等. 城市供水管网抗震安全性模糊-随机模拟评价[J]. 土木工程学报, 2013, 46(Sup2): 278-281.
WANG W, HOU B W, TIAN J, et al. Assessment method for seismic safety of urban water distribution system using stochastic simulation and triangular fuzzy numbers [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Sup2): 278-281. (in Chinese)
- [4] YOO D G, JUNG D, KANG D, et al. Seismic hazard assessment model for urban water supply networks [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2015, 142(2): 04015055.
- [5] 陈玲俐, 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. Aseismatic serviceability analysis of water supply network [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 45-50. (in Chinese)
- [6] 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(上)[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(2): 98-102.
FU S C, JIANG J B, HUANG S M. Reliability and function analysis of water supply networks post-earthquake (I) [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(2): 98-102. (in Chinese)
- [7] 杜坤, 龙天渝, 郭劲松, 等. 地震导致渗漏的供水管网水力模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 126-130.
DU K, LONG T Y, GUO J S, et al. Simulation for leaky water distribution system caused by earthquake [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(3): 126-130. (in Chinese)
- [8] HWANG H H M, LIN H, SHINOZUKA M. Seismic performance assessment of water delivery systems [J]. Journal of Infrastructure Systems, 1998, 4(3): 118-125.
- [9] American Lifelines Alliance. Seismic for water systems part 1-Guideline [R]. ACSE, 2001.
- [10] SHI P, O'ROURKE T D, WANG Y. Simulation of earthquake water supply performance [C] // Proceedings of the 8th National Conference on Earthquake Engineering, Oakland, CA, USA, 2006: 18-22.
- [11] SHI P. Seismic response modeling of water supply systems [D]. Ithaca: Cornell University, 2006.
- [12] OROURKE T D. Seismic hazards and water supply performance [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2010, 14(7): 1022-1043.
- [13] GIRAFFE user's manual (Version 4.2) [CP]. School of Civil & Environmental Engineering, Cornell University, 2008.
- [14] YOO D G, JUNG D, KANG D, et al. Seismic hazard assessment model for urban water supply networks [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2015, 142(2): 162-175.
- [15] ISOYAMA R, ISHIDA E, YUNE K, et al. Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines [J]. Water Supply, 2000, 22(10): 31-39.
- [16] HUNTER P R. Waterborne disease: epidemiology and ecology [J]. Public Health, 1998, 112(3): 203-209.
- [17] 何芳, 何志勋, 林国乐. 供水管网水力模型模拟精度变化分析研究实例[C]// 中国水协设备材料委调度监测、自动控制设备技术应用研讨会, 2007: 36-39.
HE F, HE Z X, LIN G L. A case study on accuracy change of water distribution hydraulic model [C] // China Association of Water Resources Equipment Materials Committee Scheduling Monitoring and Automatic Control Equipment Technology Symposium, 2007: 36-39. (in Chinese)
- [18] PATHIRANA A. EPANET2 desktop application for pressure driven demand modeling [C] // Water Distribution Systems Analysis, USA, 2010: 65-74.
- [19] LIU J, YU G. Iterative methodology of pressure-dependent demand based on EPANET for pressure-deficient water distribution analysis [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2013, 139(1): 34-44.
- [20] 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. The study of calculation for pressure driven modeling of water distribution [J]. China Water and Wastewater, 2003, 19(3): 43-45. (in Chinese)