

和丽荣, 杜坤, 宋志刚, 等. 基于 GIRAFFE 软件的丽江大研古镇供水管网抗震可靠性评估[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 98–101, 145. [HE Lirong, DU Kun, SONG Zhigang, et al. Seismic Reliability Evaluation of Water Distribution System of Lijiang Ancient Town Using GIRAFFE Software[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 98–101, 145. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2017.04.017.]

## 基于 GIRAFFE 软件的云南丽江大研古镇供水管网 抗震可靠性评估\*

和丽荣<sup>1</sup>, 杜坤<sup>1</sup>, 宋志刚<sup>1</sup>, 周明<sup>1</sup>, 徐冰峰<sup>1</sup>, 杜雨<sup>2</sup>

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

**摘 要:** GIRAFFE 是由美国康奈尔大学开发的一款非商业软件, 也是目前世界范围内唯一一款广泛用于评估供水管网抗震可靠性的软件。鉴于国内学者对该软件的研究及应用尚未见报道, 该文介绍了该软件的功能及优点、使用时应注意的问题与存在不足, 这对相关研究的开展具有促进作用。丽江大研古镇是我国著名旅游景点且处于地震频发区, 应用 GIRAFFE 软件评估了 VII 度、VIII 度地震烈度下大研古镇管网供水可靠性, 其中包括 7 个社区、4 个重要旅游景点及二所学校, 所得结果对管网抗震设计、震后救灾工作开展具有一定指导意义。

**关键词:** 供水管网; 地震; 可靠性评估; GIRAFFE 软件; 云南丽江古镇

**中图分类号:** TU99.32; X43; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2017)04–0098–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2017.04.017

城市供水管网为人们的日常生活、生产及消防提供用水, 是生命线工程的重要组成部分<sup>[1]</sup>。历次震害表明, 地震会造成埋地管道不同程度破坏<sup>[2]</sup>, 导致管网供水能力下降, 这不仅影响人们日常生活及生产, 还会削弱消防救援能力, 加剧地震后火灾次生灾害<sup>[3]</sup>。供水管网可靠性指在规定使用状态下, 规定时间内管网达成预定输水功能的能力。开展供水管网抗震可靠性评估, 不仅能使震后恢复重建工作具有针对性, 还有助于优化供水管网抗震设计, 具有重要的研究意义及实用价值<sup>[4–6]</sup>。

针对地震时供水管网可靠性评估, 李杰、陈玲俐<sup>[7]</sup>等提出了基于一次二阶矩的评估法, 该方法假定漏损点位于管网节点, 利用功能函数展开式的线性部分简化计算。符圣聪等<sup>[8]</sup>通过假定渗漏点位于管道中间位置, 采用管线震损概率的反正弦函数计算地震时管道可能渗漏面积, 对震损管网进行水力分析。基于同样假设, 杜坤<sup>[9]</sup>等提出适用于低压供水管网“分步迭代”的水力计算方法, 提高了水力计算结果精度。值得注意的是,

上述研究都假定管道漏损点位于管网节点或中间位置, 而实际中管网震损具有明显的随机特征, 无论是管道破损位置、破损形式及破损口面积都具有极大不确定性, 因此基于上述方法的评估结果值得考证。

针对地震时管网破损的随机特征, 国外学者 Hwang<sup>[10]</sup>最早引入蒙特卡洛模拟, 通过泊松随机数确定各管道漏点个数。美国康奈尔大学 Rourke<sup>[11–13]</sup>耗时 10 年, 累计投入 4 500 万美元开发了 GIRAFFE 软件用于震后供水管网功能评价。该软件具有确定性和随机性模拟两大功能, 其中随机性模拟通过产生足够数量的随机场景评估不同地震烈度下管网供水可靠性。在该软件中, 由于管道破损位置、破损形式及破损口面积的随机特征被充分考虑, 使其评估结果比 Hwang 等所得结果更可靠。例如, Liu<sup>[14]</sup>等利用 GIRAFFE 软件评估了 1994 年洛杉矶地震后供水系统服务性能, Javanbarg<sup>[15]</sup>利用该软件评估了日本大阪市供水管网在 1995 年阪神地震作用下供水性能, 均表明评估结果与实际情况基本相符。此外, Wang<sup>[16]</sup>利用

\* 收稿日期: 2017–03–07 修回日期: 2017–05–04

基金项目: 国家自然科学基金(51608242); 云南省应用基础研究青年项目(2017FD094); 云南省教育厅基金项目(2015Y077)

第一作者简介: 和丽荣(1988–), 女, 纳西族, 云南丽江人, 硕士研究生, 主要从事生命线工程抗震研究。

E-mail: 641435783@qq.com

通讯作者: 杜坤(1986–), 男, 湖北仙桃人, 博士, 讲师, 主要从事市政工程研究。E-mail: 250977426@qq.com

GIRAFFE 软件评估了重建后的洛杉矶供水系统在 58 种场景下服务性能, Bonneau<sup>[17]</sup>、Romero<sup>[18]</sup> 等学者也将该软件应用于其它一些城市的供水管网可靠性评估。

虽然 GIRAFFE 软件在世界范围被广泛应用, 但目前国内学者针对该软件的研究及应用尚未见报道。鉴于此, 利用 GIRAFFE 软件评估了云南丽江大研古镇在不同地震烈度下供水管网可靠性, 研究内容及意义包括三个方面: ①介绍了 GIRAFFE 软件功能及其优点, 说明了该软件使用时应该注意的问题, 这对国内学者使用该软件具有一定指导意义; ②指出了该软件存在的不足, 这对完善 GIRAFFE 软件, 促进相关研究开展具有积极意义; ③云南丽江属环太平洋地震带、欧亚地震带的组成部分, 是我国破坏性地震较多、受灾特别频繁和严重的地区之一。本文构建了丽江大研古镇供水管网水力模型, 应用 GIRAFFE 软件评估该管网在不同地震烈度下的可靠性, 评估结果有助于震后应急措施的制定, 具有一定现实意义。

## 1 GIRAFFE 软件功能及其优点

如前述, GIRAFFE 软件包括确定性与随机性模拟两大功能, 确定性模拟针对的是地震后特定场景下管网服务性能评价, 需要收集地震后管网破损资料并构建该场景下管网水力模型。随机性模拟用于评估可能地震烈度下管网服务性能, 由于地震源、场地条件等不确定因素, 地震时管网破损口形式、位置, 甚至管网拓扑结构都具有较大随机性, 因此需要产生足够数量的随机场景以获得准确的统计特性。图 1 给出了 GIRAFFE 软件随机模拟流程图, 其中第 III 部分通过蒙特卡洛模拟产生震损管网场景是 GIRAFFE 软件的最大创新。在执行蒙特卡洛模拟产生震损管网场景时, GIRAFFE 软件首先产生泊松随机数确定管道上破损点位置, 然后产生两组均匀随机数判定破损状态及渗漏类型, 最后排除负压点并检查管网连通性。

此外, 相对于以往研究, GIRAFFE 软件的优点还体现在如下几个方面: ①GIRAFFE 软件采用 EPANET 这一最广泛使用的管网计算引擎, 保证了管网水力计算结果的准确性; ②在进行破损管网水力分析时, GIRAFFE 软件首次提出应区分渗漏点与爆管点, 并指出渗漏管道仍具有一定输水能力, 而爆管管道则完全断裂, 使得爆管状态下的

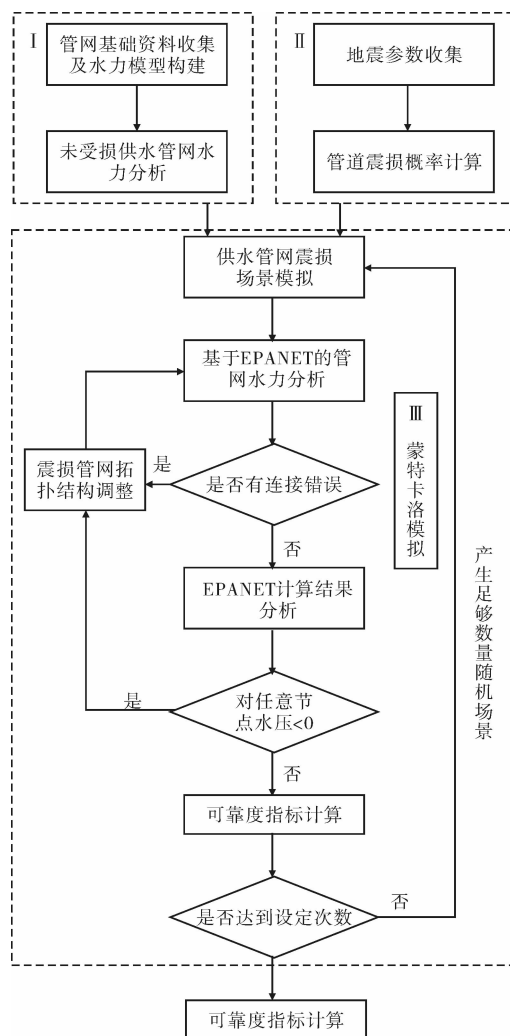


图 1 GIRAFFE 软件随机模拟流程图

管网水力模拟结果更符合实际; ③收集了大量管网震损资料, 将管道漏损细分为 5 类并给出各类漏点渗漏面积计算公式, 使漏损管网水力模拟结果更符合实际。

## 2 GIRAFFE 软件使用中应注意的问题

相较于以往研究, 虽然 GIRAFFE 软件克服了许多难题, 但作为一款开源的非商业软件, 其兼容性欠佳, 在使用中应注意如下问题: ①构建管网水力模型时, 应按英制单位定义管长、管径及节点标高等参数单位, 否则会导致计算结果错误; ②必须严格按说明书修改管网 INP 文件, 直接采用 EPAENT 导出的 INP 文件, 会导致 GIRAFFE 程序锁死错误; ③输入文件中的所有节点流量不能赋予零值, 否则程序会提示计算溢出错误。

### 3 GIRAFFE 软件存在不足

作为一款非商业软件, GIRAFFE 还存在如下不足值得进一步完善。

(1) GIRAFFE 软件通过添加空水池和虚拟管段模拟管网爆管与漏损, 这需要改变原始管网拓扑结构, 增大了计算量。此外, 笔者还发现, 由于需要通过反复修改管网 INP 文件以改变管网拓扑结构, 在对大型管网进行可靠性评估时, 程序经常报错, 需要多次尝试才能得到最终结果。

(2) 爆管及渗漏可能使供水管网处于低压运行状态, 实际中管网节点流量受水压的降低会减小, 而 GIRAFFE 软件未考虑低压运行状态下管网节点流量的变化, 使得管网水力模拟结果可能与实际不符。

### 4 案例分析——以丽江大研古镇供水管网为例

#### 4.1 可靠度指标 SI 值计算

GIRAFFE 软件随机模拟功能通过蒙特卡洛模拟产生足够数量管网震损场景, 以统计平均值评估管网各节点及管网整体供水可靠性。对一次蒙特卡洛模拟或确定性模拟, 当单个节点因出现负压或连通性问题被隔离时, 该节点震后节点流量为 0, 此时节点供水可靠度  $SI = 0$ ; 相反, 当震后节点流量能满足时,  $SI = 1$ ; 管网整体可靠度指标为节点流量满足数与总节点数的比值。若执行  $n$  次蒙特卡洛模拟, 则将  $n$  次的统计平均值作为可靠度计算值。

#### 4.2 研究对象

大研古镇位于云南省西北部丽江市, 城区中心拔高度为 2 418 m, 是中国保存最为完好的古镇之一。大研古镇北倚象山、金虹山、西枕狮子山, 呈北高南底, 西陡东缓地势。大研古镇采用高位水池分区供水, 供水管网覆盖面积为 3.8 km<sup>2</sup>, 服务人口约 2.5 万人。该区非河道段管材采用 K9 级球墨铸铁管 T 型接口, 位于河道中管段采用 K9 级球墨铸铁管 TF 自锚式接口。

供水管网水力模型如图 2 所示, 其中管线总长约 58.6 km, 包括 612 个用水节点、777 节管段, 管道直径在 150 mm 至 400 mm 范围内。在计算管道平均震害率时, 本文采用了美国生命线协会

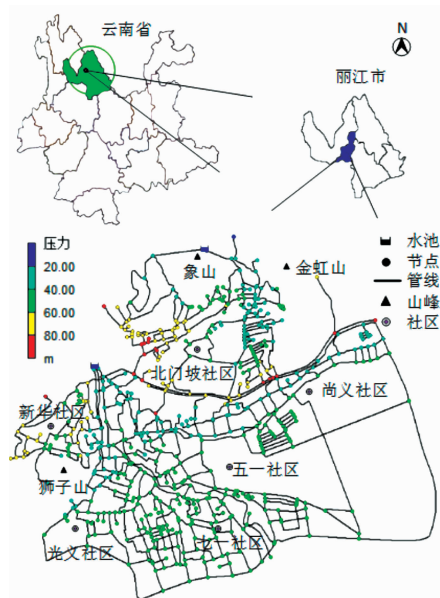


图2 丽江大研古镇供水管网水力模型

(ALA) 的统计的计算式, 具体可参见文献<sup>[19]</sup>。

#### 4.3 评估结果

本次研究采用 GIRAFFE 软件随机模拟功能评估了丽江大研古镇市政管网在地震烈度 VII、VIII 度时供水可靠性, 评估结果见图 3、图 4。总体来说, 地震烈度越大, 管网供水可靠性越低; 地形标高越大或离水源越远, 地震时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高于末端或支管服务区域, 上述结论与预期相符, 表明 GIRAFFE 软件的随机模拟评估功能可行。

具体而言, 在地震烈度 VII 度时, 该区域的平均供水可靠性下降至 0.87, 最不利区域为地势较高的新华社区, 供水可靠性下降至 0.44; 其次是离水源较远的北门坡社区、尚义社区金虹路沿线区域, 供水可靠性下降到 0.68。地震烈度 VIII 度时, 区域的平均供水可靠性下降至 0.75, 新华社区供水可靠性为 0.23, 北门坡社区、尚义社区金虹路沿线供水可靠性下降至 0.45。

表 1 给出了该区域中 6 个重点单位供水可靠度, 其中位于新华社区的万古楼供水可靠度最低, VIII 度烈度时其供水可靠度仅为 0.19; 位于水源、主干管附近的四方街, VIII 度地震烈度时的供水可靠度仍高达 0.96; 位于地形较低的丽江市一中、金虹学校、忠义市场、木府供水可靠性均在 0.7 ~ 0.9 之间。上述评估结果对地震后的抗震抢险、防止火灾次生灾害具有一定指导意义。

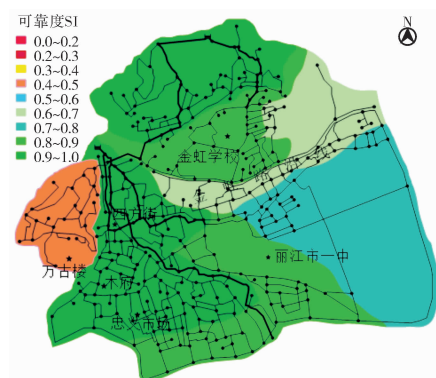


图3 地震烈度 VII 度时管网供水可靠度染色图

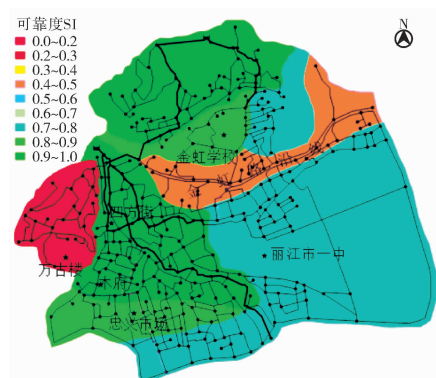


图4 地震烈度 VIII 度时管网供水可靠度染色图

表1 VII、VIII 度地震烈度下重点单位供水可靠度

重点单位	节点	正常时节点 流量/(L/s)	地震后节点 流量/(L/s)		可靠度	
			VII 度	VIII 度	VII 度	VIII 度
古楼	578	3.68	1.39	0.70	0.38	0.19
丽江一中	603	9.35	7.67	7.29	0.82	0.78
金虹学校	534	6.57	5.65	5.32	0.86	0.81
忠义市场	544	6.90	6.42	5.80	0.93	0.84
木府	564	7.69	7.38	6.92	0.96	0.90
四方街	443	11.01	10.79	10.57	0.98	0.96

## 5 结论

介绍了 GIRAFFE 软件基本功能、优点及存在问题与不足。与以往研究相比, GIRAFFE 软件采用 EPANET 计算引擎, 保证了管网水力计算结果可靠性; 再者, 明确指出爆管会改变管网拓扑结构, 提出采用随机模拟法产生震损场景, 以统计量形式计算管网抗震可靠度; 但 GIRAFFE 软件存在计算量大、兼容性差等问题。此外, 在进行低压供水管网水力分析时, GIRAFFE 软件未考虑节点流量随水压变化, 导致计算结果可能与实际不符。

应用 GIRAFFE 软件评估了丽江大研古镇 VII、

VIII 度地震烈度时管网供水可靠性, 结果表明, GIRAFFE 软件所得结果与预期相符, 其随机模拟功能可行。地震烈度为 VII 度时, 区域平均供水可靠性为 0.87; VIII 度时, 区域平均供水可靠性为 0.75。此外, 不同片区供水可靠性差异较大, 地势较高新华社片区供水可靠性最低, VIII 度地震烈度时供水可靠性仅为 0.23; 位于水源及供水干管附近的四方街供水可靠性最高, VIII 度地震烈度时供水可靠性高达 0.96。上述结果表明, 除地震烈度因素外, 管网水力条件对供水可靠性影响较大。对地势较高、水力条件较差的片区, 可考虑适当放大配水管管径提高供水可靠性。结合随机模拟评估法, 将抗震可靠性纳入管网优化设计仍值得进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 杨丹. 供水系统震害与功能失效模式分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
- [2] 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( s2 ): 278 - 281.
- [3] Fragiadakis M, Christodoulou S E. Seismic reliability assessment of urban water networks[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(3): 357 - 374.
- [4] 杨超. 城市供水管网震害评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [5] 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.
- [6] Mani A, Tabesh M, Zolfaghari M R. Hydraulic performance of post - earthquake water distribution networks based on head driven simulation method[J]. Water Science & Technology Water Supply, 2013, 13(5): 1281 - 1288.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] O'Rourke T D. Seismic hazards and water supply performance[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2010, 14(7): 1022 - 1043.
- [12] O'Rourke T D, Jeon S S, Toprak S, et al. Earthquake response of underground pipeline networks in christchurch, NZ[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(1): 183 - 204.

(下转第 145 页)