

城市供水管网抗震功能评估与指标对比

钟紫蓝^{1,2}, 韦 杰^{1,2}, 缪惠全^{1,2}, 侯本伟^{1,2}, 韩俊艳^{1,2}, 杜修力^{1,2}

(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了对城市供水管网抗震功能作出合理评估, 从居民日常生活和城市火场消防两个角度, 建立了城市供水管网抗震功能评估方法。该方法首先根据设定的场地峰值加速度并基于管线的地震易损性模型和用户节点的火灾风险模型生成供水管网地震灾害物理破坏情景, 然后据此修改供水管网水力模型并利用压力驱动下的节点配水量模型进行管网水力平差, 最后根据水力平差结果进行了供水管网震后生活需水功能评估和消防需水功能评估, 探讨了消防需水对生活需水的影响; 同时, 揭示了不同峰值地面加速度作用下服务性指标与可靠度指标之间的关系。研究结果表明: 在相同峰值地面加速度作用下, 基于服务性指标的评估数值均要大于基于可靠度指标的评估数值。在较小峰值地面加速度(0.2 g、0.25 g)作用下, 震后生活需水和消防需水均可同时得到满足, 消防需水对生活需水影响不大; 在较大峰值地面加速度(0.40 g、0.45 g)作用下, 由于管网破坏比较严重, 震后生活需水和消防需水均不能得到较好的满足, 消防需水对生活需水影响也不大; 而在中等峰值地面加速度(0.30 g、0.35 g)作用下, 消防需水对生活需水有较大影响, 约 7 % 左右。

关键词: 生命线系统; 供水管网; 震后功能; 震后火灾; Monte Carlo 模拟

中图分类号: TU991.3; X43

文献标志码: A

Seismic Function Evaluation of Urban Water Supply Network and Comparison of Evaluation Indexes

ZHONG Zilan^{1,2}, WEI Jie^{1,2}, MIAO Huiquan^{1,2}, HOU Benwei^{1,2}, HAN Junyan^{1,2}, DU Xiuli^{1,2}

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

收稿日期: 2023-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(52108427, 52220105011); 北京市自然科学基金项目(8222008); 中国博士后科学基金(2021M690278)

第一作者: 钟紫蓝, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为基础设施抗震。

E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn

通信作者: 缪惠全, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为生命线工程与韧性城市。

E-mail: miaohq@bjut.edu.cn

Abstract: A novel methodology is established for the reasonable seismic function evaluation of urban water supply network from the perspectives of supplying water for daily living and firefighting. First, based on the seismic fragility model of pipelines and the fire risk model of user nodes, the physical seismic damage scenario of water supply network is generated for the target peak ground acceleration. Next, the hydraulic model is modified according to the physical seismic damage scenario of water supply network while the hydraulic adjustment of water flow in the water supply network is performed based on the pressure-dependent demand model. Afterwards, the function of water supply network for post-earthquake daily living and firefighting is evaluated, and the influence of firefighting water demand on daily living water demand is discussed. Finally, the relationship between serviceability indexes and reliability indexes at different peak ground acceleration is revealed. The numerical results show that at the same peak ground acceleration, the evaluation values based on serviceability indexes are greater than those based on reliability indexes. Under the action of small peak ground acceleration (0.2 g and 0.25 g), both daily living and firefighting water demand can be met at the same time, and firefighting water demand has little effect on daily living water demand. Under the action of large peak ground acceleration (0.40 g and 0.45 g), due to the serious damage of the water supply network, both daily living and firefighting water demand can not be well satisfied, and firefighting water demand has little impact on daily living water demand. Under the action of medium peak ground acceleration (0.30 g and 0.35 g), firefighting water demand has a great influence on daily living water demand, about 7 %.

Key words: lifeline system; water supply network; post-earthquake functionality; post-earthquake fire hazard;



论文
拓展
介绍

Monte Carlo simulation

作为城市生命线系统的重要组成部分,城市供水管网对于保障地震灾后紧急救援、火场控制具有重要意义。然而,在自然灾害特别是地震作用下,供水管网所遭受的破坏和由此产生的次生灾害(如火场失控、传染病等)对人民生命财产的威胁仍非常显著,1906年的美国旧金山地震^[1]造成市区范围内300多处水管破裂,在震后第一个小时内,消防队发现城内任何地方的水管都没有压力,地震引发了60多次火灾,由于缺乏足够的水源来灭火,大火最终摧毁了490个街区、30所学校和80个教堂。1995年的日本神户地震^[2]造成293处水管破裂、908处水管接头开裂、238处水阀和消防栓被震坏,震后出现的大片火灾有170多处,由于供水管网的破坏阻碍了消防救援行动的开展,导致了整个神户市区火灾完全失控。因此,研究城市供水管网的抗震功能,提高管网系统的抗震性能,对现代城市的发展具有重要意义。

针对供水管网的抗震功能评估,目前的研究方法主要可以分为4类:第一类是问卷式或者指标式的评估方法,代表性的工作如文献[3]以无自来水家庭比例作为指标;而文献[4]则以人均供水管线长度、人均用水量等指标衡量供水管网的抗震功能。该类方法简便易行,但是强烈地依赖于研究者的经验。第二类方法是能量分析法,其本质是对管网冗余性的度量,管网能量储备越多,冗余性越大,则抗震功能越强,代表性的工作如文献[5-7]。这类方法避免了对各种不确定性因素的统计分析,但通常只考虑管网中节点冗余性,而忽略了管线的影响。第三类方法是图论分析法,主要是以复杂网络指标来评估供水管网的抗震功能,代表性的工作如文献[8-9]。考虑到单纯的图论指标不能反映管网的水力性质,有学者^[10-11]提出将图论和水力分析方法相结合,从而对供水管网的抗震功能进行更合理的评估。这类方法计算比较简便,但是模型高度抽象化,而且难以具体考虑事故的表现形式,事故类型是抽象的、虚拟的。第四类方法是Monte Carlo模拟法,典型的代表如供水管网韧性分析领域的软件REVAS.NET^[12]、WNTR^[13]等。这类方法的计算原理比较清晰,可以对供水管网在灾害事故前后全过程的性能变化情况进行表示,但通常计算效率比较低。

对供水管网抗震功能的考察可以从多个功能维

度采用多类指标开展,代表性的工作如韩朝等^[14]基于服务能力指标对管网震后供应生活需水的功能进行了评估;缪惠全等^[15-18]基于概率密度演化方法,从供水管网的物理机制出发,分别建立了基于稳态流和瞬变流理论的供水管网抗震可靠性评估方法。但是上述代表工作由于未考虑次生火灾的影响,可能导致高估管网震后服务能力的情况。Hou等^[19]在基于Monte Carlo模拟法生成管网震害情景的同时考虑了震后同时出现多场火灾的情况,并以概率的方式对管网的消防能力进行了评估;Li等^[20]考虑了震后次生火灾发生的时空分布情况,并基于服务能力指标对管网的消防功能进行了评估。但是,上述研究工作在评估供水管网的抗震功能时,并未对服务性指标和概率性指标的关系进行过探讨。因此,本文在上述代表性工作的基础之上,一方面从居民日常生活和城市火场消防两个角度,建立了供水管网震后功能评估方法,量化分析了火场不确定性对生活需水功能的影响;另一方面系统分析了管网服务性指标和可靠度指标之间的关系,揭示了不同峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)作用下的两类管网性能评价指标之间的关系。

1 研究概述

本研究所提出的城市供水管网抗震功能评估的基本流程如图1所示。首先是确定地震情景,即确定场地峰值地面加速度,为简化研究,本研究忽略地震动场的空间非一致性;其次,生成管网地震灾害物理破坏情景,包括基于管线的地震易损性模型生成管网震害情景和基于节点的震后火灾风险模型生成震后火灾情景;然后,进行管网水力分析,根据生成的管网震害情景和火灾情景修改震前管网水力模型形成震后管网水力模型,并利用压力驱动节点配水量(pressure-dependent demand, PDD)模型进行管网平差;最后,进行供水管网抗震功能评估,包括管网震后生活需水功能评估和消防需水功能评估两方面,并进行两类管网性能评价指标的对比分析。

2 模型与方法

2.1 管网震害情景生成方法

2.1.1 管线的地震易损性模型

管线的地震易损性模型通常是对历史震害数据进行拟合得到的,一般采用管线的修复率,即每千米

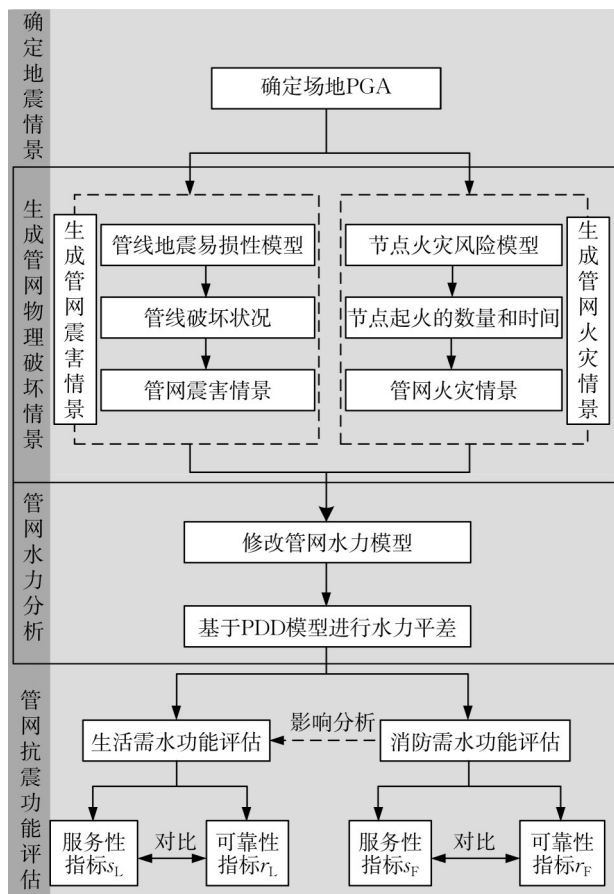


图1 城市供水管网抗震功能评估流程

Fig. 1 Flowchart of seismic function assessment of urban water supply networks

管线的破坏数来表示在某一地震烈度下管线的破坏情况。本研究采用 Isoyama 等^[21]提出的计算公式:

$$R_{R0} = 2.88 \times 10^{-6} \times (980 \times a_g - 100)^{1.97} \quad (1)$$

$$R_R = C_p \cdot C_m \cdot C_t \cdot C_l \cdot R_{R0} \quad (2)$$

式中: R_R 为管线的修复率, 处 $\cdot \text{km}^{-1}$; C_p 、 C_m 、 C_t 、 C_l 分别为与管径、管材、地形、场地液化程度有关的修正系数, 取值如表 1 所示, 表中 D 为管线的直径, mm; a_g 为场地的 PGA, g 。

假定震后单根管线发生破坏的数量沿管线长度 L 服从泊松分布^[22], 则管线发生 n 处破坏的概率为

$$P(N_d = n) = \frac{(R_R \cdot L)^n}{n!} \cdot e^{-R_R \cdot L} \quad (3)$$

式中: N_d 为管线发生破坏的数量; L 为管线的长度, km。基于公式 (3) 可求得震后管线发生破坏的概率为

$$P_d = 1 - P(N_d = 0) = 1 - e^{-R_R \cdot L} \quad (4)$$

2.1.2 管线破坏点的数量和位置

以图 2 所示的管线为例说明管线破坏点位置。图中 ΔL_1 为破坏点 1 与管线起点 A 的距离, ΔL_k ($k=2, 3,$

表 1 管线地震修复率修正系数

Tab. 1 Correction factors of seismic repair rate of pipelines

类别	子类	修正系数
C_p	$D < 100$	1.6
	$100 \leq D < 200$	1.0
	$200 \leq D < 500$	0.8
	$500 \leq D$	0.5
C_m	灰口铸铁	1.0
	聚氯乙烯	1.0
	球墨铸铁	0.3
C_t	峡谷	3.2
	丘陵	1.5
	山地	1.1
	冲积平原	1.0
	坚硬的冲积平原	0.4
C_l	全部液化	2.4
	部分液化	2.0
	没有液化	1.0

4, ...) 为第 k 个破坏点与第 $k-1$ 个破坏点之间的距离。

当 $\sum_{k=1}^n \Delta L_k > L$ 时, 停止生成管线破坏点, 此时管线破坏点的数量为 $n-1$ 个, 因此, 图 2 中管线的破坏点数量为 3 个。相邻两破坏点之间的距离 ΔL 为

$$\Delta L = -\frac{L}{R_R} \ln(1 - \mu_r) \quad (5)$$

式中: ΔL 为相邻两个破坏点之间的距离, km; μ_r 为 0~1 之间均匀分布的随机数。

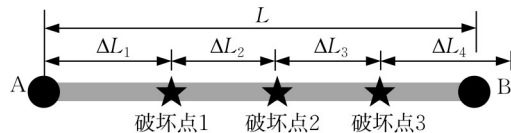


图2 确定管线破坏位置

Fig. 2 Determining locations of pipe damage

2.1.3 管线破坏点的类型

美国生命线协会 (ALA)^[23] 将管线破坏分为两种: 渗漏和断开。断开为管线从中间完全分离, 管线丧失全部输水能力; 渗漏为管线破口, 管线丧失部分输水能力。美国建筑科学协会 (NIBS)^[24] 的调查表明, 地震后管线破坏 80 % 为渗漏破坏, 20 % 为断开破坏, 因此, 对于每一个随机生成的破坏点, 假定 80 % 的概率为断开点, 20 % 的概率为渗漏点。

2.1.4 管线渗漏点的渗漏形式及渗漏面积

Shi 和 O'Rourke^[25] 依据不同管材与接头形式将管线渗漏分为 5 种形式: 接头环向松动、横向裂缝、纵向裂缝、管壁破损、管壁撕裂, 并给出了不同形式的发生概率及对应的渗漏开口面积计算公式。以灰口铸铁管为例, 表 2 给出了灰口铸铁管的 4 种渗漏形

式发生概率及相应渗漏面积计算公式,表中 D 为管线的直径,mm; L_c 为纵向裂缝的长度,mm。

表 2 灰口铸铁管不同渗漏形式概率及开口面积

Tab. 2 Probability of different leakage forms and corresponding leakage area of cast-iron pipelines

渗漏形式	发生概率	渗漏开口面积/(mm ²)
环向松动	0.3	$3\pi \cdot D$
横向裂缝	0.5	$0.25\pi \cdot D^2$
纵向裂缝	0.1	$0.1L_c \cdot D$
管壁破损	0.1	$0.0025\pi \cdot D^2$

2.1.5 管网震害情景生成

单次 Monte Carlo 模拟生成管网震害情景的过程如下:①确定场地 PGA。②基于场地 PGA,根据公式(1)~(2)计算每根管线的修复率 R_R 。③基于管线 R_R ,根据式(4)计算管线震后发生破坏的概率 P_d 。④对于每一根管线,生成 0~1 之间均匀分布的随机数 μ_1 ,若 μ_1 处于区间 $(0, P_d)$,则认为该管线在震后会破坏;否则,管线处于正常状态。⑤对于震后发生破坏的管线,基于式(5)确定管线破坏点的位置和数量,具体过程参见 2.1.2 节。⑥对于每一个破坏点,随机生成 0~1 之间均匀分布的随机数 μ_2 ,若 $\mu_2 < 0.2$,则破坏点为断开点;否则,即为渗漏点。⑦对于每一个渗漏点,基于管线发生各种渗漏形式破坏的概率,通过随机抽样确定该渗漏点的渗漏形式并计算相应的渗漏开口面积。

2.2 管网震后火灾情景生成方法

2.2.1 震后火灾风险模型

美国联邦应急管理局(FEMA)^[24]建立了震后每百万平方英尺建筑面积的区域平均发生的火场数量 R_1 与 PGA 的关系:

$$R_1 = 0.581895 \cdot a_g^2 - 0.02944 \cdot a_g \quad (6)$$

式中: R_1 为每百万平方英尺建筑面积的区域平均发生的火场数量。

2.2.2 节点发生的火场数量

李杰等^[26]引入随机过程理论描述灾后火场的情况,供水管网中任一节点的服务区域发生 y ($y=0, 1, 2, 3, \dots$) 场火灾的概率为

$$P(n_i=y) = \frac{(R_1 \cdot A_F)^y}{y!} \cdot e^{-R_1 \cdot A_F} \quad (7)$$

式中: n_i 为节点的服务区域出现的火场数量; A_F 为节点所服务区域的建筑面积。

2.2.3 节点火场发生时间

Zhao 等^[27]采用韦布尔分布模型来分析震后火灾发生时间,并基于日本历史震害数据进行回归分析

得到了节点服务区域在震后 t 小时发生火灾的概率:

$$P(t) = 1 - e^{-(t/15)^{0.7}}, t \geq 0 \quad (8)$$

通过对公式(8)进行逆变换即可得到:

$$t = 15(-\ln \mu_r)^{1/0.7}, t \geq 0 \quad (9)$$

2.2.4 管网震后火灾情景的生成过程

单次 Monte Carlo 模拟生成管网火灾情景的具体过程如下:①确定场地 PGA。②基于场地 PGA,根据式(6)计算每个节点 R_1 。③基于节点 R_1 ,根据式(7)分别计算节点的服务区域在震后发生 y 场火灾的概率 P_y 。④对于每一个节点,随机生成 0~1 之间均匀分布的随机数 μ_3 ,若 μ_3 位于区间 $(0, P_0)$,则认为该节点的服务区域在震后不发生火灾,若 μ_3 位于区间 (P_y, P_y+1) ,则认为该节点的服务区域在震后发生 $y+1$ 场火灾。⑤若节点的服务区域在震后出现 n_i ($n_i > 0$) 场火灾,则随机生成 n_i 个 0~1 之间均匀分布的随机数,并将这 n_i 个随机数分别代入公式(9)中,从而可以求得每场火灾在震后的发生时间。

2.3 管网水力分析方法

2.3.1 破坏管线的力学模型

(1) 渗漏管线力学模型

对于发生渗漏的供水管线(图 3a),假定破坏点发生在管线的中点,对应的渗漏力学模型如图 3b 所示,在破坏位置增加一个带止回阀的虚拟管线,该管线两端分别和一个虚拟节点以及一个虚拟蓄水池相连。虚拟节点分别与节点 A 和 B 连接,连接的管线长度均为 $L/2$,其他如管径、管材等参数均与图 3a 中的管线 AB 相同。虚拟节点和虚拟蓄水池的高程与渗漏点位置处的高程相同。虚拟管线的参数设置见文献[28]。

(2) 断开管线力学模型

对于发生断开的供水管线(图 3c),假定断开点发生在管线中点,对应的力学模型如图 3d 所示,在管线断开点处增加两个虚拟蓄水池,分别与用户节点 A 和 B 通过带止回阀的管线相连,连接的管线长度均为 $L/2$,其他如管径、管材等参数均与图 3c 中的管线 AB 相同。虚拟蓄水池的高程与管线断开位置处的高程相同。图 3 中, Q_A 、 Q_B 分别为节点 A 和 B 的需水量; Q_{leak} 为管线渗漏点的流量; Q_{break1} 和 Q_{break2} 分别为管线断开处两端的流量。

2.3.2 火场节点的消防模型

当节点 A 的服务区域出现火灾时,除了需要保证生活需水供应以外,该节点还需要额外的消防流量来灭火,对应的消防模型如图 4 所示,图中 Q_A 为节点 A 的需水量; Q_F 为消防流量。带流量控制阀的虚拟管线两

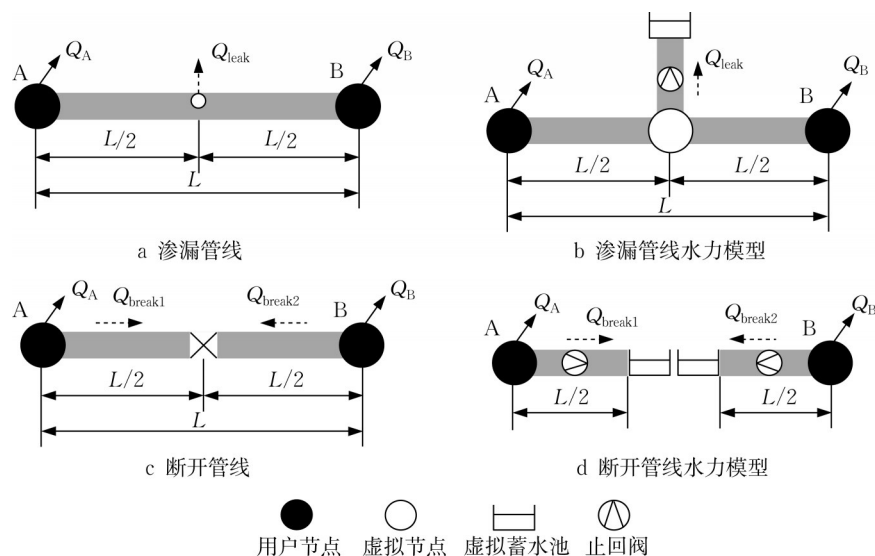


图3 破坏管线水力模型

Fig. 3 Hydraulic model of damaged pipes

端分别与节点A和虚拟节点相连,带止回阀的虚拟管线两端分别与虚拟节点和虚拟扩散器相连。为了避免多余水头损失,将通过流量控制阀的最大流量限定为该节点灭火所需的消防流量,一起火灾灭火设计流量以及火灾延续时间分别参考规范《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB 50974—2014)和《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)来确定。为了保证通过虚拟扩散器的流量为实际可用的消防流量,将虚拟扩散器的扩散系数设置为1 000。虚拟节点的高程与节点A的高程相同,根据《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB 50974—2014),本研究将虚拟扩散器高程设置为10 m。

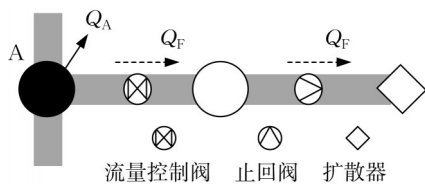


图4 火灾节点的消防模型

Fig. 4 Firefighting model of node with fire outbreaks

2.3.3 基于PDD模型的水力平差计算

传统的供水管网水力分析假设管网压力可以满足用户需求,即每个节点的需水量均能得到满足。然而,事实上地震破坏后供水管网处于多点漏水、低压运行状态,部分节点的需水量不能全部得到满足,此时节点的实际配水量是与节点压力相关的。

PDD模型考虑了节点配水量与节点水压的关系,更适合低压状态下的水力分析。许多学者对PDD模型在供水管网震后水力分析中的应用进行了探索^[29-33]。Wagner等^[32]提出的PDD模型,如式

(10)所示:

$$Q_i^* = \begin{cases} 0, & H_i < H_i^{\min} \\ Q_i \cdot \sqrt{\frac{H_i - H_i^{\min}}{H_i^{\text{des}} - H_i^{\min}}}, & H_i^{\min} \leq H_i < H_i^{\text{des}} \\ Q_i, & H_i^{\text{des}} \leq H_i \end{cases} \quad (10)$$

式中: Q_i 为节点*i*的需水量, $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$; Q_i^* 为考虑节点水压和配水量关系后求出的节点*i*的配水量, $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$; H_i 为节点*i*的实际水压,m; $H_i^{\min}$ 为节点*i*的最小供水水压,m; H_i^{des} 为节点*i*的服务水压,m。本研究将所有节点的最小供水水压设为0。

基于生成的管网震害情景和火灾情景,修改震前管网水力模型,生成震后管网水力模型,在Matlab软件中调用EPANET toolkit中的epanet2.dll函数进行水力平差,在水力平差的过程中,基于PDD模型采用迭代的方法逐步调整节点配水量以消除节点负压。

2.4 管网抗震服务能力评估指标

震后供水管网服务区发生火灾时,管网除了要满足生活需水外,还需满足灭火所需消防需水,本研究采用生活需水满足率均值 s_L 来评估管网震后满足生活需水的功能,表示为

$$s_L = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_L^{(k)} \quad (11)$$

式中: s_L 为震后生活需水满足率均值; N 为Monte Carlo模拟的次数,本研究中的 N 取为1 000次; $S_L^{(k)}$ 为第*k*次Monte Carlo模拟计算出的震后生活需水满足率:

$$S_L = \frac{\sum_{i=1}^m Q_{i,avl}}{\sum_{i=1}^m Q_{i,req}} \quad (12)$$

式中: $Q_{i,avl}$ 为第 i 个节点在震后的生活配水量, $L \cdot s^{-1}$; $Q_{i,req}$ 为第 i 个节点在震后的生活需水量, $L \cdot s^{-1}$; m 为节点的数量。

采用震后消防需水满足率均值 s_F 来评估管网震后的消防功能, 表示为

$$s_F = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_F^{(k)} \quad (13)$$

式中: s_F 为震后消防需水满足率均值; $S_F^{(k)}$ 为第 k 次 Monte Carlo 模拟计算出的震后消防需水满足率

$$S_F = \frac{\sum_{j=1}^{N_f} Q_{j,avl}^{fire}}{\sum_{j=1}^{N_f} Q_{j,req}^{fire}} \quad (14)$$

式中: $Q_{j,avl}^{fire}$ 为第 j 个起火节点的实际消防配水量, $L \cdot s^{-1}$; $Q_{j,req}^{fire}$ 为第 j 个起火节点的消防需水量, $L \cdot s^{-1}$; N_f 为供水管网中起火节点的数量。

2.5 管网抗震可靠度评估指标

供水管网抗震服务能力评估指标主要是从满足节点需水量的角度来评估管网震后的服务能力, 但无法实现基于概率的管网抗震性能评估, 因此, 生命线工程的许多研究者提出了基于节点压力需求标准的可靠度评估指标^[15, 34]。基于这一思想, 本文将震后生活需水可靠度指标定义为

$$r_L = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_L^{(k)} \quad (15)$$

式中: r_L 为震后生活需水可靠度均值; $R_L^{(k)}$ 为第 k 次 Monte Carlo 模拟计算出的震后生活需水可靠度。

$$R_L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{i,L} \quad (16)$$

式中: $R_{i,L}$ 为第 i 个节点的震后生活需水可靠度。

$$R_{i,L} = \begin{cases} 1 & H_i \geq H_{i,L}^{des} \\ 0 & H_i < H_{i,L}^{des} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $H_{i,L}^{des}$ 为第 i 个节点在震后的生活服务水压, m 。本研究将 $H_{i,L}^{des}$ 统一取为 10 m。

管网消防功能基于可靠度的评估指标为

$$r_F = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_F^{(k)} \quad (18)$$

式中: r_F 震后消防需水可靠度均值; $R_F^{(k)}$ 为第 k 次 Monte Carlo 模拟计算出的震后消防需水可靠度。

$$R_F = \frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} R_{j,F} \quad (19)$$

式中: $R_{j,F}$ 为第 j 个起火节点的震后消防需水可靠度。

$$R_{j,F} = \begin{cases} 1 & H_j \geq H_{j,F}^{des} \\ 0 & H_j < H_{j,F}^{des} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $H_{j,F}^{des}$ 为第 j 个起火节点的消防服务水压, m ; $H_{j,F}^{des}$ 的取值与虚拟扩散器的高程相同, 即统一取为 10 m。

3 算例分析

3.1 管网概况

本文以绵竹市城区供水管网为例说明本文的分析方法。绵竹供水管网服务区域总建筑面积约 800 万 m^2 , 用水人口约 11 万人, 主干管线(直径大于 150 mm)总里程约 79 km, 简化后供水管网共包含 100 条管线、74 个需水节点和 1 个位于城区北部的水厂, 供水能力为 $3 t \cdot d^{-1}$, 如图 5 所示。该供水管网服务区地形为平原且忽略液化、断层等场地永久变形的风险, 所有的管线均为浅埋灰口铸铁管, 因此, 参数 C_t 、 C_1 、 C_m 均为 1.0。根据《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB50974—2014), 管网日常运维工况下应在同一时间内至少同时满足发生 2 起火灾的消防需水量, 并且基于该管网所服务区域的人口数, 可求得一起火灾消防流量设计值为 $45 L \cdot s^{-1}$, 水厂出水水压为 41 m。根据《建筑设计防火规范》(GB50016—2014), 每场火灾燃烧持续时间统一取为 2 h。

根据以往的震害经验^[35], 在地震发生后的短时间内, 居民会因恐慌而外出避难, 而公共应急避难场所一般有备用水源, 因此会造成节点的生活需水量产生下降。本文此处没有考虑各个节点服务区域的差异, 而是将震后各个节点的生活需水量取为震前的一半来考虑居民外出避难对节点生活需水量的影响。

3.2 震后火场分析

从表 3 中可以看出, PGA 越大, 管网的服务区在震后发生的火场数就越多。从图 6 中可以看出, 相同 PGA 作用下, 震后不同时刻平均新增火场数随着时间的增长呈现指数型递减, 即火场较为集中地出现于震后前几个小时, 震后 8 h 内出现的火场数量超过震后火场总数的 50 %。

由于每场火灾燃烧的持续时间为 2 h, 因此, 基于震后不同时刻新增火场数可以得到管网服务区在震后不同时刻存在的火场数, 如图 7a 所示。可以看出, 在不同 PGA 作用下, 管网服务区在震后第 3 个小时存在的火场数为震后所有时刻火场数的最大值,

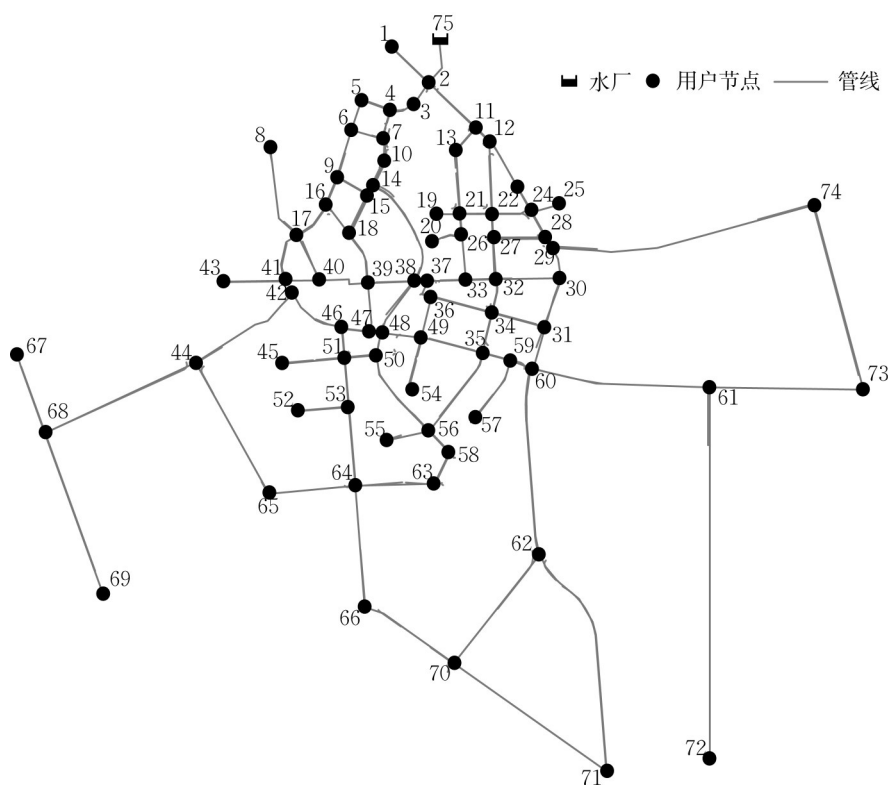


图5 绵竹市供水管网

Fig. 5 Water supply network in Mianzhu City

表3 震后火场数和震后8个小时火场数

Tab. 3 Total number of post-earthquake fires and number of fires in the first eight hours

PGA/g	N_{tot} /场	N_8 /场	$\frac{N_8}{N_{\text{tot}}}/\%$
0.20	5.7	3.0	52.6
0.25	9.4	5.0	53.4
0.30	14.4	7.6	52.8
0.35	20.0	10.7	53.4
0.40	26.8	14.4	53.6
0.45	35.2	19.3	54.8

注: N_{tot} 为管网的服务区在震后发生的火场总数; N_8 为管网的服务区在震后8 h发生的火场数。

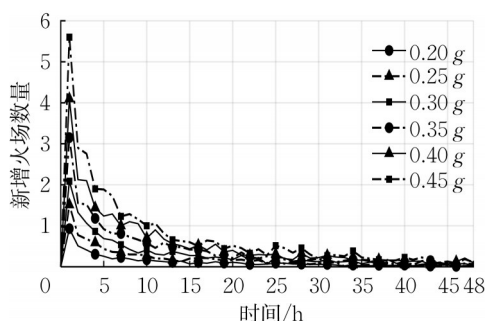


图6 震后不同时刻平均新增火场数量

Fig. 6 Average number of post-earthquake new fires at different moments

这是因为震后前3 h新增的火场数量最多,而前2 h新增火场燃烧时间要持续到第3 h,因此震后第3 h的火场数最多。

震后不同时刻存在的火场数乘以每起火灾的消防流量设计值可以得到震后不同时刻的消防需水量,如图7b所示。

3.3 管网震后生活需水功能评估

从已有的震害资料来看^[36],供水管网的修复一般在震后的几个小时内就已经开始了,但管线的维修需要经过探漏、开挖等步骤,Paez等^[37]通过对历史震害数据进行分析给出了基于破坏形式的管线修复时间计算公式。由于震后一般优先修复发生断开破坏的干管,因此,以400 mm的干管为例,基于Paez等^[37]提出的公式可以估计该管线的修复需要12 h以上。本文假定地震发生时管线的破坏是瞬间完成的,且不考虑水厂、泵站等的破坏,即认为它们在震后是可以正常运行的,在不考虑修复活动的情况下,基于破坏时的初始状态研究震后12 h内的管网生活需水功能和消防需水功能是合理的。

基于两类指标所计算得到的管网震后生活需水功能评估的结果如图8所示,在不同PGA作用下, s_L 和 r_L 在震后均随时间变化不大,但均表现出PGA越

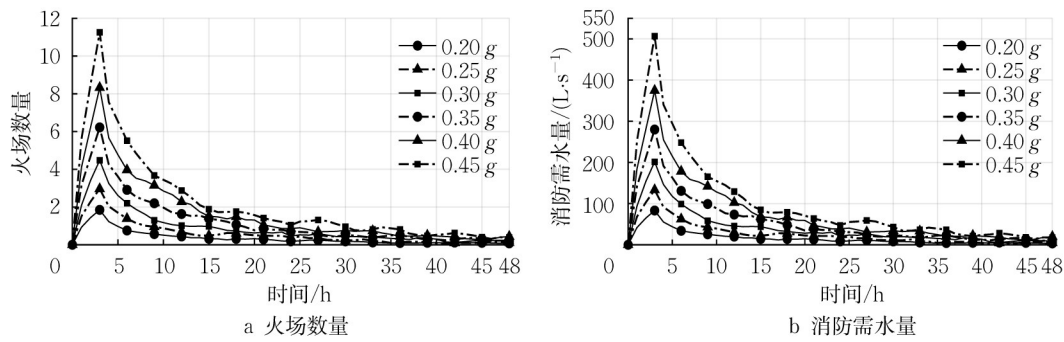


图 7 震后不同时刻火场数量和消防需水量

Fig. 7 Number of post-earthquake fires and firefighting water demand at different moments

大,数值越小的特点。以震后初始时刻为例,在 0.20 g、0.25 g、0.30 g、0.35 g、0.40 g、0.45 g 的地震动作用下, s_L 和 r_L 的值分别为 0.944、0.860、0.670、0.518、0.342、0.243 和 0.857、0.701、0.385、0.251、

0.116、0.086。从表 4 中可以看出,不同 PGA 作用下,由于 s_L 和 r_L 的标准差的最大值分别为 0.003 2 和 0.004 8,因此,仅基于震后初始时刻的 s_L 和 r_L 值来评估管网震后的生活需水功能是合理的。

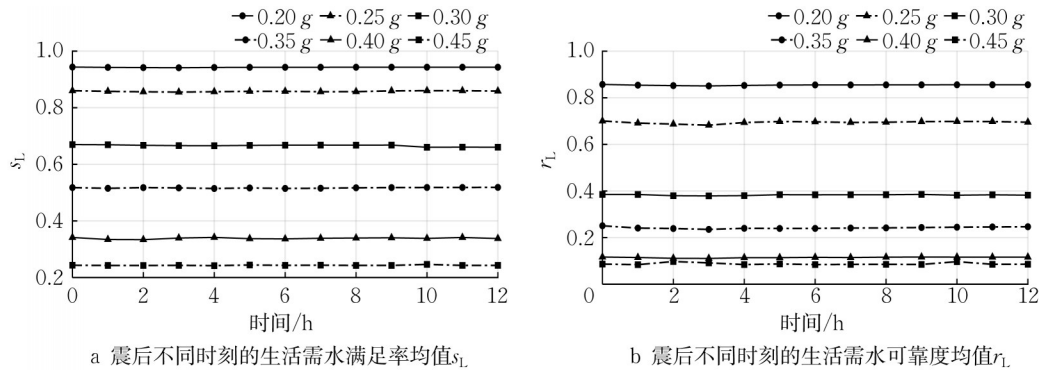


图 8 供水管网震后生活需水功能评估结果

Fig. 8 Assessment results of post-earthquake domestic water demand function of water supply network

从图 8 和表 4 可以看出,在同一 PGA 作用下, r_L 的值均小于 s_L ,其主要原因在于:从式(10)和(17)中可以看出,只有当节点的水压达到 H_L^{des} 及以上时,该节点的震后生活需水可靠度才为 1,否则即为 0,此时该节点的震后生活需水满足率也为 1;而当节点的

水压介于 H_L^{min} 与 H_L^{des} 之间时,基于 PDD 模型所计算出的该节点的实际配水量并不为 0,因而该节点的震后生活需水满足率也不为 0(为大于 0 小于 1 的一个数值),因此 r_L 的计算结果要小于 s_L 。

表 4 供水管网抗震功能评估指标在震后所有时刻的平均值和标准差

Tab. 4 Mean values and standard deviations of post-earthquake seismic function assessment indexes of water supply network at all moments

PGA/g	s_L		r_L		θ_L	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
0.20	0.943	0.000 6	0.857	0.001 7	0.088	0.001 1
0.25	0.852	0.001 6	0.698	0.004 8	0.163	0.003 8
0.30	0.664	0.003 2	0.385	0.002 1	0.283	0.003 3
0.35	0.514	0.001 3	0.248	0.003 9	0.275	0.003 4
0.40	0.331	0.002 5	0.116	0.001 9	0.224	0.002 6
0.45	0.243	0.001 1	0.082	0.004 5	0.156	0.004 2

为进一步探明两种指标之间的关系,定义 s_L 和 r_L 之间的差值为 θ_L ,其在震后不同时刻的计算结果和不同 PGA 作用下的震后所有时刻的平均值和标

准差分别如图 9 和表 4 所示,可以看出,相同 PGA 作用下, θ_L 在震后随时间基本保持不变,如 PGA 为 0.20 g 时,其均值为 0.088,而方差仅有 0.001 1。另

一方面,随着PGA的增加, θ_L 呈现出先增加后减小的趋势。

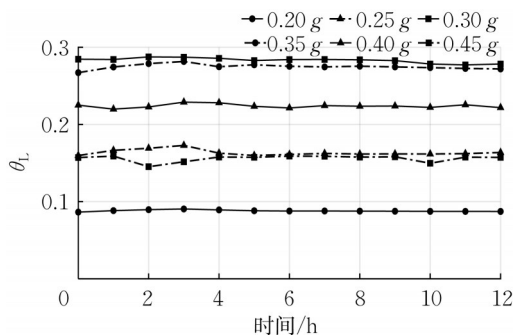


图9 震后不同时刻的 s_L 与 r_L 的差值 θ_L

Fig. 9 Post-earthquake difference θ_L between s_L and r_L at different moments

3.4 管网震后消防需水功能评估

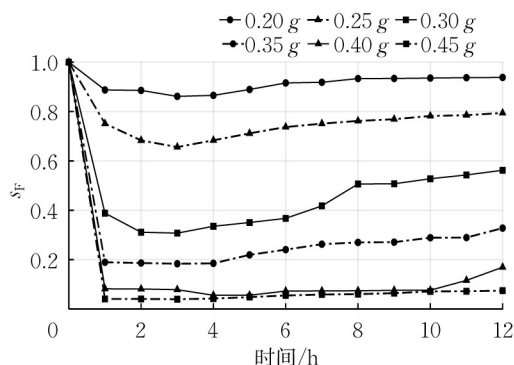
管网消防功能评估指标 s_F 和 r_F 的计算结果如图10所示,可以发现,两类指标在震后随着时间的增长均表现出先减小后增加的趋势,这在本质上是由震

后如图7a所示的火场数量所决定的。指标 r_F 是一个偏于保守的评估指标,因此, s_F 始终表现的比 r_F 的值大一些。

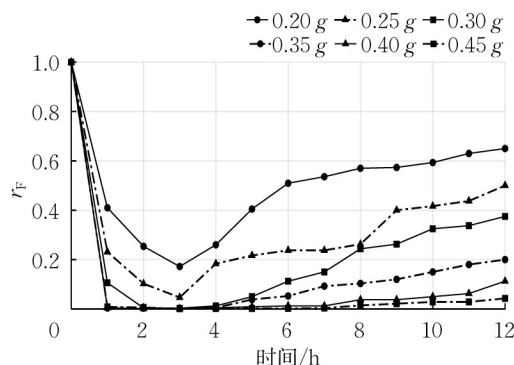
类似地,定义二者之间的差值为 θ_F ,其计算结果如图11所示,可以看出,震后随着时间的增长, θ_F 呈现出先增加后减小的趋势,且在PGA较小的情况下, θ_F 的值比较大,而随着火场数量的逐渐减少,其值逐渐趋近于0。

3.5 震后消防需水对生活需水的影响

图12给出了管网在不同的PGA作用下当处于消防流量峰值状态时的各个节点的平均水压,同时也给出了在每一次的模拟中当管网的破坏状况相同但未出现次生火灾时的各个节点的平均水压,可以看出,当PGA为0.20g和0.25g时,尽管由于消防流量所造成的额外的水头损失会导致各个节点的水压出现不同程度的下降,但是在该地震烈度下各个节点在震后的平均水压均能保持在 H_L^{des} 以上,震后生活需水和消防需水均可同时满足,因此消防需水对管网生活需水功能的影响不大。



a 震后不同时刻的消防需水满足率均值 s_F



b 震后不同时刻的消防需水可靠度均值 r_F

图10 供水管网震后消防需水功能评估结果

Fig. 10 Assessment results of post-earthquake firefighting water supply demand function of water supply network

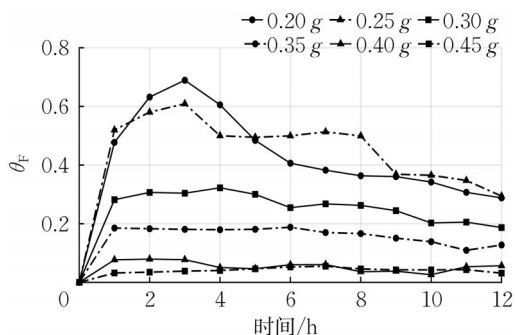


图11 震后不同时刻的 s_F 与 r_F 的差值 θ_F

Fig. 11 Post-earthquake difference θ_F between s_F and r_F at different moments

当PGA为0.30g和0.35g时,震后未出现火灾时平均水压低于 H_L^{des} 的节点数量分别占管网节点总数的63%和85%,也即这些节点在震后的配水量是由节点的水压所决定的,由消防流量所造成的水头损失而引起上述节点的水压较未发生火灾时的水压平均分别降低7.4%和6.7%,消防需水对生活需水有较大的影响。

当PGA为0.40g和0.45g时,震后未出现火灾时平均水压低于 H_L^{des} 的节点数量均占管网节点总数的96%,此时由于管网破坏比较严重,震后生活需水和消防需水需求均不能得到较好的满足。

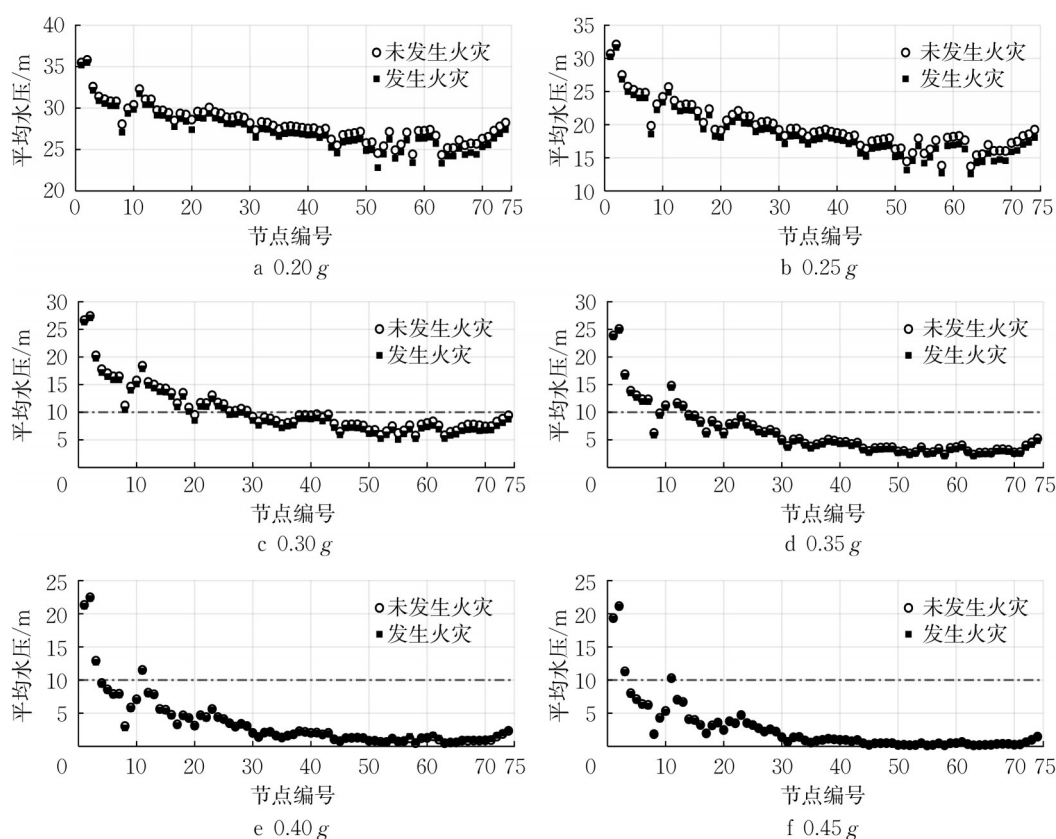


图12 不同PGA供水管网处于消防流量峰值时节点水压

Fig. 12 Nodal water pressure of water supply network at peak state of firefighting flow of different PGAs

4 结论

本研究从居民日常生活和城市火场消防两个功能维度建立了城市供水管网抗震功能评估模型,量化分析了火场不确定性对震后生活需水的影响,揭示了不同PGA作用下管网服务性指标与可靠度指标之间的关系。通过对绵竹市城区供水管网进行分析,验证了本文建模方法的实用性,研究结果表明:

(1)在相同PGA作用下,针对供水管网震后生活需水和消防需水功能的评估,基于服务性指标的评估数值均要大于基于可靠度指标的评估数值。

(2)在相同PGA作用下,生活需水满足率均值 s_L 与生活需水可靠度均值 r_L 的差值 θ_L 在震后随时间变化不大,但是 θ_L 随着PGA的增大会先增大,然后减小。

(3)在相同PGA作用下,消防需水满足率均值 s_F 与消防需水可靠度均值 r_F 的差值 θ_F 在震后随着时间的增长呈现出先增加后减小的趋势,且PGA较小时, θ_F 的值比较大,而随着火场数量的逐渐减少,其值逐渐趋近于0。

(4)在较小PGA(0.2 g、0.25 g)作用下,震后生活需水和消防需水均可同时得到满足,消防需水对

生活需水影响不大;而在较大PGA(0.40 g、0.45 g)作用下,由于管网破坏比较严重,震后生活需水和消防需水均不能得到较好的满足,因此,消防需水对生活需水影响也不大,而在中等PGA(0.30 g、0.35 g)作用下,消防需水对生活需水有较大的影响,约7%左右。

作者贡献声明:

钟紫蓝:研究思路制定与论文修订。

韦杰:程序撰写,数据处理与分析,论文撰写。

缪惠全:研究思路制定与论文修订。

侯本伟:论文修订。

韩俊艳:论文修订。

杜修力:论文修订。

参考文献:

- [1] SCAWTHORN C, O'ROURKE T D, BLACKBURN F T. The 1906 San Francisco earthquake and fire-enduring lessons for fire protection and water supply [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 135.
- [2] KURAOKA S, RAINIER J H. Damage to water distribution system caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23(3): 665.

- [3] CIMELLARO G P, RENSCHLER C, REINHORN A M, *et al.* PEOPLES: A framework for evaluating resilience [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(10): 13.
- [4] 缪惠全, 王乃玉, 汪英俊, 等. 基于灾后恢复过程解析的城市韧性评价体系[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(1): 10.
MIAO Huiquan, WANG Naiyu, WANG Yingjun, *et al.* An urban resilience measurement system based on decomposing post-disaster recovery process [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(1): 10.
- [5] TODINI E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach [J]. *Urban Water*, 2000, 2(2): 115.
- [6] PRASAD T D, PARK N S. Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004, 130(1): 73.
- [7] CREACO E, FRANCHINI M, TODINI E. The combined use of resilience and loop diameter uniformity as a good indirect measure of network reliability [J]. *Urban Water Journal*, 2016, 13(2): 167.
- [8] PAGANO A, PLUCHINOTTA I, GIORDANO R, *et al.* Integrating “hard” and “soft” infrastructural resilience assessment for water distribution systems [J]. *Complexity*, 2018(2018): 3074791.
- [9] POLJANSEK K, BONO F, GUTIÉRREZ E. Seismic risk assessment of interdependent critical infrastructure systems: The case of European gas and electricity networks [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2012, 41: 61.
- [10] HERRERA M, ABRAHAM E, STOIANOV I. A graph-theoretic framework for assessing the resilience of sectorised water distribution networks [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(5): 1685.
- [11] SOLDI D, CANDELIERI A, ARCHETTI F. Resilience and vulnerability in urban water distribution networks through network theory and hydraulic simulation [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 119(1): 1259.
- [12] YOO D G, JUNG D, KANG D, *et al.* Seismic hazard assessment model for urban water supply networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 142(2): 04015055.
- [13] KLISE K A, BYNUM M, MORIARTY D, *et al.* A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2017, 95: 420.
- [14] 韩朝, 马东辉, 侯本伟, 等. 基于压力驱动节点配水量模型的供水管网震后水力分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(3): 351.
HAN Zhao, MA Donghui, HOU Benwei, *et al.* Post-earthquake hydraulic analyses of urban water supply network based on pressure drive demand model [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, 49(3): 351.
- [15] MIAO H Q, LIU W, LI J. Seismic reliability analysis of water distribution networks on the basis of the probability density evolution method [J]. *Structural Safety*, 2020, 86: 101960.
- [16] MIAO H Q, LI J. Serviceability evaluation of water supply networks under seismic loads utilizing their operational physical mechanism [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2022, 21(1): 283.
- [17] 缪惠全, 李杰. 基于物理机制的供水管网抗震功能实时动态分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(3): 20.
MIAO Huiquan, LI Jie. Seismic design of underground pipe networks on the basis of system reliability [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2018, 38(3): 20.
- [18] 缪惠全, 李杰. 基于物理机制的随机地震动场中供水管网抗震功能反应分析[J]. *工程力学*, 2022, 39(7): 108.
MIAO Huiquan, LI Jie. The seismic response of water supply networks in random seismic fields based on physical mechanisms [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(7): 108.
- [19] HOU G J, LI Q W. Firefighting capacity evaluation of water distribution system subjected to multi-ignitions of post-earthquake fires [J]. *Structural Safety*, 2021, 88: 102035.
- [20] LI Y Z, GAO J L, ZHANG H Y, *et al.* Reliability assessment model of water distribution networks against fire following earthquake (FFE) [J]. *Water*, 2019, 11(12): 2536.
- [21] ISOYAMA R, ISHIDA E, YUNE K, *et al.* Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines [C]// *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000: 8-15.
- [22] HOWARD B, MEMBER H M H, LIN H. Seismic performance assessment of water delivery systems [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 1998, 4(9): 118.
- [23] ALA. Seismic guidelines for water pipelines [M]. Washington D C: American Lifelines Alliance, 2005.
- [24] FEMA. HAZUS-MH 2.1 technical manual [M]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [25] SHI P X, O'ROURKE T D. Seismic response modeling of water supply systems [M]. New York: Cornell University, 2008.
- [26] 李杰, 江建华. 城市地震次生火灾危险性分析[J]. *自然灾害学报*, 2000, 9(2): 87.
LI Jie, JIANG Jianhua. Hazus analysis of urban post-earthquake fire [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(2): 87.
- [27] ZHAO S J, XIONG L Y, REN A Z. A spatial-temporal stochastic simulation of fire outbreaks following earthquake based on GIS [J]. *Journal of Fire Sciences*, 2006, 24(4): 330.
- [28] 侯本伟, 杜修力. 地震破坏管线漏损分析模型对比研究[J].

- 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 67.
- HOU Benwei, DU Xiuli. Comparative study on hydraulic simulation of earthquake-damaged water supply pipelines [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 67.
- [29] GIUSTOLISI O, WALSKI T M. Demand components in water distribution network analysis [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012, 138(4): 356.
- [30] JUN L, GUOPING Y. Iterative methodology of pressure-dependent demand based on EPANET for pressure-deficient water distribution analysis [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2013, 139(1): 34.
- [31] TABESH M, SHIRZAD A, AREFKHANI V, *et al.* A comparative study between the modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks [J]. Urban Water Journal, 2014, 11(3): 221.
- [32] WAGNER B J M, SHAMIR U, MARKS D H. Water distribution reliability: simulation methods[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(3): 276.
- [33] WU Z Y, WANG R H, WALSKI T M, *et al.* Extended global-gradient algorithm for pressure-dependent water distribution analysis [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009, 135(1): 13.
- [34] LIU W, SONG Z Y, OUYANG M, *et al.* Recovery-based seismic resilience enhancement strategies of water distribution networks [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2020, 203: 107088.
- [35] 李惠永. 考虑避难需求变化的城市应急避难场所布局规划模型研究[D]. 上海: 上海大学, 2018.
- LI Huiyong. Research on urban emergency shelter planning models with consideration of varying shelter demand [D]. Shanghai: Shanghai University, 2018.
- [36] 刘遂庆, 郑小明, 李伟, 等. 汶川特大地震中城镇供水系统地震灾害与抗震救灾调查报告[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.
- LIU Suiqing, ZHENG Xiaoming, LI Wei, *et al.* Investigation report on earthquake disaster and relief of urban water supply system in Wenchuan earthquake [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013.
- [37] PAEZ D, FILLION Y, HULLEY M, *et al.* Battle of post-disaster response and restoration [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146(8): 04020067.