

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240619002

# 基于拓扑的多龄期埋地腐蚀供水管网 抗震韧性评估\*

龙立<sup>1</sup>, 杨华平<sup>1</sup>, 郑山锁<sup>2</sup>, 蔡永龙<sup>2</sup>, 刘巍<sup>3</sup>

(1. 成都大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;  
3. 同圆设计集团股份有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 为考虑土壤腐蚀环境与管线服役龄期对供水管网系统抗震韧性影响, 提出了一种基于拓扑指标的多龄期埋地腐蚀管网抗震韧性评估方法。首先基于齐次马尔可夫过程建立酸性、碱性和近中性土壤环境中埋地钢管时变本构模型, 进而基于增量动力时程分析方法建立不同土壤腐蚀环境、不同服役龄期下不同管径埋地管道的解析地震易损性模型。最后以连接密度表征供水管网抗震性能指标, 采用性能影响函数法量化供水管网抗震韧性, 基于随机模拟思想, 取一支抢修队伍逐一修复和所有破坏管线同时修复2种工况下抗震韧性均值表征系统抗震韧性。分析结果表明, 罕遇地震作用下, 供水管网平均抗震性能较设防地震作用下降低31.85%, 但整体抗震韧性均保持较高水平, 分别为0.942 2、0.999 5。传统不考虑供水管网腐蚀环境与服役龄期的评估方法计算所得供水管网抗震性能与抗震韧性均偏于乐观。该研究成果可为准确提升城市供水管网系统抗震韧性提供理论参考。

**关键词:** 供水管网; 抗震韧性; 土壤腐蚀环境; 服役龄期; 解析地震易损性

**中图分类号:** TU990 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0390-10

## Topology-based Seismic Resilience Assessment of Buried Corroded Water Supply Networks with Multiple Service Ages

LONG Li<sup>1</sup>, YANG Huaping<sup>1</sup>, ZHENG Shansuo<sup>2</sup>, CAI Yonglong<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>3</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. Tong Yuan Design Group Co., Ltd., Ji'nan 250101, China)

**Abstract:** To consider the influence of soil corrosion environments and pipeline service ages on the seismic resilience of water supply networks (WSNs), a topology-based seismic resilience assessment method for multi-age corroded buried WSNs was proposed. Firstly, a time-varying constitutive model of buried steel pipes in acidic, alkaline, and near-neutral soil environments was established based on a homogeneous Markov process. Then, analytical seismic vulnerability models of buried pipelines with different diameters under different soil corrosion environments and service ages were established based on incremental dynamic analysis. Finally, connection density was used to characterize the seismic performance indicator of the WSNs, and the performance response function (PRF) method was used to quantify the seismic resilience of the WSNs. Based on stochastic simulation, the system's seismic resili-

\* 收稿日期: 2024-06-19; 修回日期: 2024-08-28

基金项目: 成都大学引进人才科研启动经费项目(2081923062)资助

作者简介: 龙立(1992—), 男, 讲师, 博士。主要从事城市生命线工程抗震研究。E-mail: longli@cdu.edu.cn

ience was represented by the average seismic resilience under two scenarios: sequential repair by a single repair crew and simultaneous repair of all damaged pipelines. The analysis results showed that under rare earthquakes, the average seismic performance of the WSNs decreased by 31.85% compared with that under fortification earthquakes, but the overall seismic resilience remained at a high level, with values of 0.942 2 and 0.999 5, respectively. The seismic performance and seismic resilience of WSNs calculated by traditional assessment methods that did not consider corrosion environments and service ages were overly optimistic. The findings provide a theoretical reference for accurately improving the seismic resilience of urban WSNs.

**Keywords:** water supply networks; seismic resilience; soil corrosion environment; service age; analytical seismic vulnerability

## 0 引言

近年来,“抗震韧性”成为地震工程领域的热门话题,许多国家包括我国相继提出要建设抗震韧性城市。“抗震韧性”的核心在于“韧性”<sup>[1]</sup>,韧性这一概念最早起源于心理学或生态学领域<sup>[2]</sup>。M. Bruneau等<sup>[3]</sup>则最早将其引入到抗震研究领域,并提出韧性是指地震发生时工程系统减少遭受破坏的概率、地震发生后降低工程系统破坏程度,并及时采取措施使工程系统功能快速恢复的能力。抗震韧性城市则被定义为“面临地震灾害冲击时,城市作为一个有机体能够保障居民基本生活的需求并迅速恢复其功能的城市”<sup>[4-5]</sup>。供水管网作为城市生命线工程系统之一,是抗震韧性城市建设的主要内容。因此,有必要从地震损伤、功能损失、可恢复性等方面对现有的供水管网系统进行评价<sup>[6-7]</sup>,确定其抗震韧性水平,明确其抗震薄弱环节,为实施韧性提升方案提供数据支撑和决策支持。

目前,供水管网抗震韧性评估方法大致可以分为代理方法、模拟方法和网络理论方法三类。代理方法是基于代理指标,起初用于分析管网可靠性,如采用供水管网系统的剩余能量、冗余和灵活性等替代指标来评价可靠性<sup>[8]</sup>。模拟方法可有效模拟多种变化下的不确定性事件,如时间、多故障场景和需求变化等,通常将正常状态的水力性能作为基准,用于分析故障状态时系统性能<sup>[9-10]</sup>。网络理论方法基于图论知识,将供水基础管网抽象为节点和边组成的图,通过图论或复杂网络理论方法分析供水管网的拓扑性能<sup>[11-12]</sup>,其由于能够处理大规模的供水管网而备受关注。龙立等<sup>[13-14]</sup>、W. Liu等<sup>[9]</sup>以供水节点压力作为韧性指标评估管网抗震韧性。缪

惠全等<sup>[15]</sup>针对应急阶段和抢险阶段,提出了一种基于系统动力学理论的供水管网动态抗震韧性评估方法。侯本伟等<sup>[16-17]</sup>提出了耦合水力与水质模拟的供水管网抗震韧性评估模型。

尽管国内外学者针对供水管网抗震韧性开展了大量研究,但这些研究未考虑既有管线本身老化或腐蚀问题导致性能的差异性。由于地质环境复杂,埋地供水管线不可避免的会出现不同程度的腐蚀,且随着服役龄期的不断增长,腐蚀不断加重,导致其力学与抗震性能不断退化。如何合理的评估腐蚀及龄期等因素对埋地管网抗震韧性的影响是本文研究的重点。

本文结合齐次马尔可夫过程与增量动力分析方法建立不同腐蚀环境、不同服役龄期埋地管线解析地震易损性模型;基于网络理论方法,以连接密度表征供水管网系统抗震性能,采用性能影响函数法量化供水管网抗震韧性。利用MATLAB编程实现上述理论方法,通过算例进一步分析土壤腐蚀环境与管线服役龄期对管网抗震韧性的影响。

## 1 多龄期埋地腐蚀管网抗震韧性评估方法

本文多龄期埋地腐蚀管网抗震韧性评估框架如图1所示。(1)根据多龄期埋地腐蚀管道力学性能参数,采用基于增量动力分析(Incremental dynamic analysis, IDA)的地震易损性分析方法建立不同土壤腐蚀环境、不同服役龄期下不同管径埋地管道的地震易损性模型;(2)根据供水管网物理、拓扑等信息及所处土壤环境,结合管道地震易损性模型,计算设定地震作用下供水管线处于不同破坏状态的概率;(3)采用随机模拟方法确定供水管网各管线

破坏状态,选取拓扑指标表征管网抗震性能,结合宽度优先搜索算法确定供水管网抗震性能;(4)采用性能影响函数(Performance response function method,PRF)表征供水管网抗震韧性,绘制设定抢修资源下管网功能恢复进程曲线,并计算单次模拟时供水管网抗震韧性;(5)基于蒙特卡洛模拟思想,产生多种供水管网震损场景并开展韧性评估,取多次模拟结果的平均值表征该供水管网最终抗震韧性。

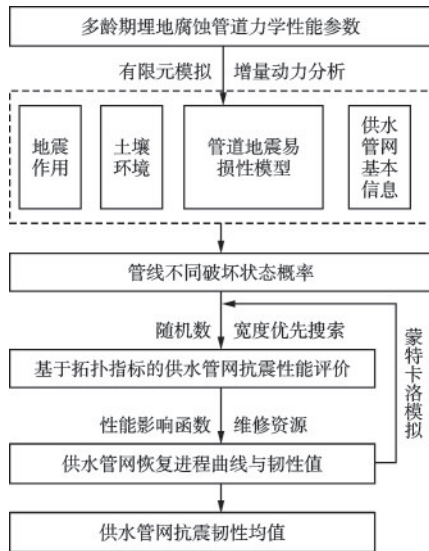


图1 供水管网抗震韧性评估框架

Fig.1 Seismic resilience assessment framework for water supply networks

### 1.1 多龄期埋地腐蚀钢管地震响应规律

本文仅考虑埋地钢管的腐蚀规律。根据土壤pH值的不同,本文将土壤环境分为酸性( $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ )、近中性( $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ )及碱性( $7.5 < \text{pH} \leq 8.5$ )三种。酸性环境中,管线腐蚀类型为均匀腐蚀,腐蚀发展模型为线性发展模型<sup>[18]</sup>;近中性及碱性环境中,管线腐蚀类型为多点局部腐蚀,且假设管道腐蚀同时独立发生在管道截面4个方向,缺陷深度剖面形状为抛物线型<sup>[19]</sup>。考虑管线腐蚀发生的随机性,采用齐次马尔可夫过程模拟地下管线的随机腐蚀。则酸性环境中埋地管线腐蚀率 $\eta$ 的均值 $E(\eta)$ 可按式计算:

$$E(\eta) = E(\eta(t)) = \int_0^T \eta(t) e^{-qt} \cdot q dt = \int_0^T \frac{v_d(T-t)}{d} e^{-qt} \cdot q dt \quad (1)$$

式中, $t$ 为腐蚀发生时刻; $T$ 为管线服役时间(年); $q$

为管线由未腐蚀状态转移到腐蚀状态的概率; $d$ 为管壁厚度(mm); $v_d$ 为管线在深度方向的腐蚀速率(mm/a),按文献[20]取值。

近中性及碱性环境中埋地管线腐蚀率 $\gamma$ 的均值 $E(\gamma)$ 可按式计算:

$$E(\gamma) = E(\gamma(t)) = \int_0^T \gamma(t) e^{-qt} \cdot q dt = \int_0^T \frac{8v_d v_b (T-t)^2}{3\pi D_p d} e^{-qt} \cdot q dt \quad (2)$$

式中, $D_p$ 为管线直径(mm); $v_b$ 为管线在径向宽度方向的腐蚀速率(mm/a);其他参数同式(1)。

钢材的腐蚀不仅会减少埋地钢管的有效截面积,也会削弱其力学性能。文献[21]通过锈蚀钢材拉伸试验获得了钢材力学性能指标随失重率 $D_w$ 变化的退化模型。

$$\begin{cases} f'_y/f_y = 1 - 0.767D_w \\ f'_u/f_u = 1 - 0.842D_w \\ \delta'/\delta = 1 - 1.363D_w \\ E'_s/E_s = 1 - 0.932D_w \end{cases} \quad (3)$$

式中, $f_y$ 、 $f_u$ 、 $\delta$ 、 $E_s$ 分别为钢材腐蚀前的屈服强度、极限强度、伸长率与弹性模量; $f'_y$ 、 $f'_u$ 、 $\delta'$ 、 $E'_s$ 分别为钢材腐蚀后的屈服强度、极限强度、伸长率与弹性模量; $D_w$ 取值近似等于管线腐蚀率<sup>[22-23]</sup>。

结合式(1)~(3),即可建立三种土壤环境中钢管力学性能与服役龄期的对应关系。

### 1.2 多龄期埋地腐蚀钢管地震易损性

解析地震易损性可反映管道结构在不同强度地震作用下发生不同破坏状态的条件概率,从概率的意义上定量刻画了管道结构的抗震性能,从宏观的角度描述了地震动强度与管道结构破坏程度之间的关系<sup>[24]</sup>。通常采用对数正态累积分布函数的形式进行表达,其表达式为:

$$F_R(x) = P[D \geq C | IM = x] = \Phi\left[\frac{\ln x - \ln m_e}{\beta}\right] \quad (4)$$

式中, $F_R(x)$ 为地震易损性函数; $D$ 为地震需求; $C$ 为抗震能力; $IM$ 为地震动强度参数; $m_e$ 为地震易损性函数的中位值; $\beta$ 为地震易损性函数的对数标准差。

由于假设结构地震需求 $D$ 及结构抗震能力 $C$ 均服从正态分布,结合结构易损性函数的不确定性,可得结构解析地震易损性模型如下:

$$F_R(x) = \Phi \left[ \frac{\ln(m_{DIM}) - \ln(m_C)}{\sqrt{\beta_{DIM}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}} \right] \quad (5)$$

式中,  $m_{DIM}$  和  $m_C$  分别为结构地震需求和抗震能力的中位值;  $\beta_{DIM}$ 、 $\beta_C$  和  $\beta_M$  分别为结构地震需求、抗震能力及建模的不确定性量化值。

基于 1.1 节建立的不同腐蚀环境中钢材的力学性能指标与服役龄期之间的关系, 采用解析易损性分析方法, 分别以地震动峰值加速度 (Peak ground acceleration, PGA) 及管道最大等效应力  $\rho_{max}$  作为地震动强度指标和管道结构地震响应指标, 对地下管线进行了增量动力分析 (Incremental dynamic analysis, IDA) [22-23], 可得到不同土壤腐蚀环境 (酸性、碱性、近中性)、不同服役龄期 (10 年、20 年、30 年、40 年) 不同管径 ( $D_p < 250$  mm、 $250$  mm  $\leq D_p < 500$  mm、 $D_p \geq 500$  mm) 的管道地震易损性曲线, 其中三种环境中 4 种服役龄期管径大于等于 500 mm 的管道地震易损性曲线如图 2 所示。相同管径、服役龄期下, 酸性环境中管道各极限状态超越概率最大, 碱性环境次之, 近中性环境最小, 随着服役龄期的不断增加, 各极限状态超越概率均有所增加。相同情况下, 管径区间越小, 各极限状态超越概率越大。

基于管道地震易损性曲线, 进一步确定管线破坏概率。通常把管线视为由不同管道单元串联而成, 进而通过分析管道单元间的失效相关性计算管线破坏概率 [25-26]。本文把场地条件一致且管道直径、管材和接头类型相同的相邻管道单元作为一完全相关集  $U_j$ , 按失效完全相关处理, 则该单元集的三态破坏概率为 [27]:

$$P_1\{U_j\} = \min P_1\{L_i\} | L_i \in U_j \quad (6)$$

$$P_3\{U_j\} = \max P_3\{L_i\} | L_i \in U_j \quad (7)$$

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

式中,  $L_i$  为第  $i$  段管道单元, 管道单元长度等于典型管道单元的长度;  $P_1\{L_i\}$ 、 $P_3\{L_i\}$  分别为管道单元  $L_i$  基本完好及严重破坏的概率;  $P_1\{U_j\}$ 、 $P_2\{U_j\}$ 、 $P_3\{U_j\}$  分别为管道单元集  $U_j$  处于基本完好、中等破坏和严重破坏的概率。

对于任一管线, 由  $m$  个管道单元组成, 总可以分解为  $n$  ( $1 \leq n \leq m$ ) 个包含一个或多个管道单元的完全相关集, 假设完全相关集之间失效独立, 则这些完全相关集构成一失效独立集  $U$ , 则管线的三态破坏概率为:

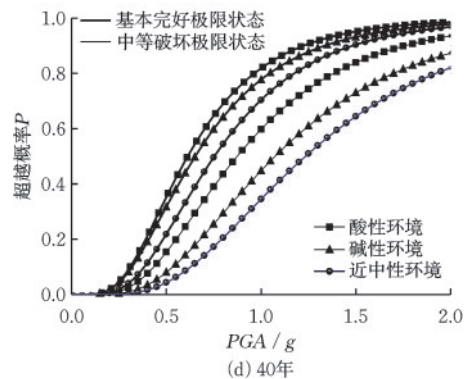
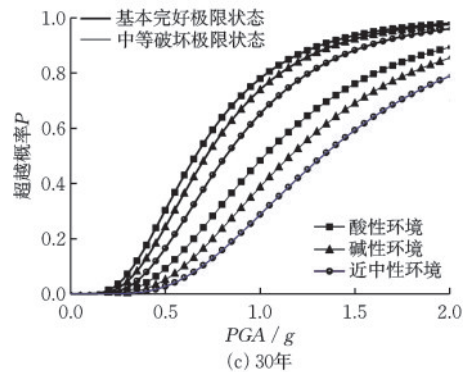
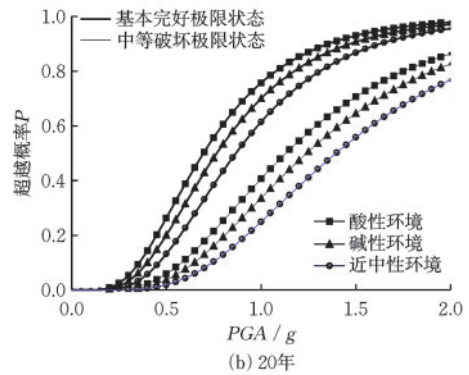
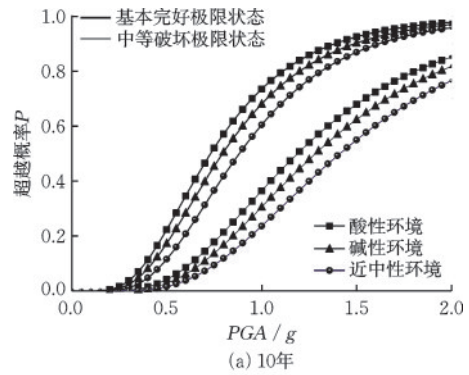


图 2 不同土壤腐蚀环境、不同服役龄期管径  $\geq 500$  mm 的管道单元解析地震易损性曲线

Fig.2 Analytical seismic fragility curves of pipeline units with diameters  $\geq 500$  mm under different soil corrosion environments and service ages

$$P_1 = \prod_{i=1}^n P_1 \{U_i\} \quad (9)$$

$$P_3 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_3 \{U_i\}) \quad (10)$$

$$P_2 = 1 - P_1 - P_3 \quad (11)$$

式中,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 分别为管线基本完好、中等破坏和严重破坏的概率。

### 1.3 基于拓扑指标的供水管网抗震性能评价

文献[28]表明供水管网连接密度与基于水力特征的抗震韧性评估结果相关性较强。供水管网连接密度(Connection density, CD)反映一个网络中各个节点之间联系的紧密程度,是供水管网总体连通度或稀疏度的最基本指标,按如下公式计算:

$$CD = \frac{m_w}{n_w(n_w - 1)} \quad (12)$$

式中,  $m_w$ 为供水管网中的连接数;  $n_w$ 供水管网中的节点数。

本文中,定义供水管网抗震性能评价指标(Seismic performance, SP)为震前与震后供水管网连接密度的比值,即:

$$SP = \frac{CD_t}{CD} \quad (13)$$

式中, CD为震前供水管网连接密度;  $CD_t$ 为震后供水管网连接密度。

### 1.4 供水管网抗震韧性评估

基于1.3节建立的供水管网抗震性能评价指标,本文采用性能影响函数法量化供水管网抗震韧性,供水系统震后韧性曲线如图3所示,供水系统功能  $SP(t)$  采用无量纲的百分比来量化,100%代表供水系统管线无破坏,满足日常用水需求;当供水系统在  $t_0$ 时刻遭受地震作用后,供水管线会遭受一定程度的地震损伤,由此导致震后系统功能下降;震后逐渐修复受损管线,供水系统功能逐渐提升恢复到震前水平,若供水系统遭受了无法修复的损伤,系统功能则会低于100%。 $t_c$ 为控制时间。

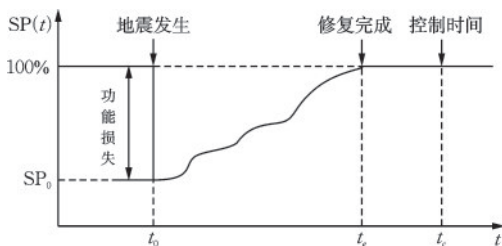


图3 韧性曲线

Fig.3 Resilience curve

供水系统抗震韧性  $R$  采用公式(14)量化计算,其与城市储备的维修资源密切相关,修复资源越多,供水管网完全修复所需时间越短。考虑修复资源与修复时间的随机性,本文考虑仅派一支抢修队伍逐一修复和所有破坏管线均派一支队伍同时修复,各条破损管线抢修顺序是随机生成的,并假设震后管线修复时间服从正态分布,根据HAZUS-MH-MR4设定:某工作队震后修复断裂破坏类型的破裂点时间服从  $T \sim (12 \text{ h}, 6 \text{ h})$ ,修复渗漏、接口破坏类型的破裂点时间服从  $T \sim (6 \text{ h}, 3 \text{ h})$ ,依据设定将修复时间采取随机抽样模拟,从而求得供水系统抗震韧性最大值与最小值,取两者平均值,表征系统最终抗震韧性。

$$R = \frac{1}{t_c - t_0} \int_{t_0}^{t_c} SP(t) dt \quad (14)$$

## 2 算例分析

本文以文献[29]中给定的供水管网拓扑为基础,设定管网基本信息(图4),验证本文抗震韧性评估方法的适用性。该供水管网共40个节点(水厂、泵站、用户等),64根埋地管线,节点40为水厂,管材均采用钢材。该管网所处场地为II类场地,抗震设防烈度为八度。本文分别计算设防烈度地震(0.2g)与罕遇地震作用(0.4g)下供水管网抗震韧性。

### 2.1 管网破坏概率

基于管道地震易损性模型,计算得到该供水管网在设防地震与罕遇地震作用下各管线处于基本完好、中等破坏和严重破坏状态的概率,如图5所示。总体上,基本完好概率占比最大,中等破坏概率次之,严重破坏概率占比最小。设防地震作用下,各管线基本完好概率几乎接近100%,最低基本完好概率为96.45%。随着地震强度增加,罕遇地震作用下各管线基本完好概率均有不同程度下降,最大下降程度达到33.42%,最低基本完好概率为64.22%,各管线中等破坏概率与严重破坏概率均有不同程度增加,特别地,罕遇地震作用下管线严重破坏概率超过了设防地震作用下中等破坏概率。由于腐蚀环境、龄期及管径等因素的差异,供水管网内各管线的破坏概率存在一定差异,其中59号管线由于管径较小、服役龄限较长等因素影响,其破坏概率最大。

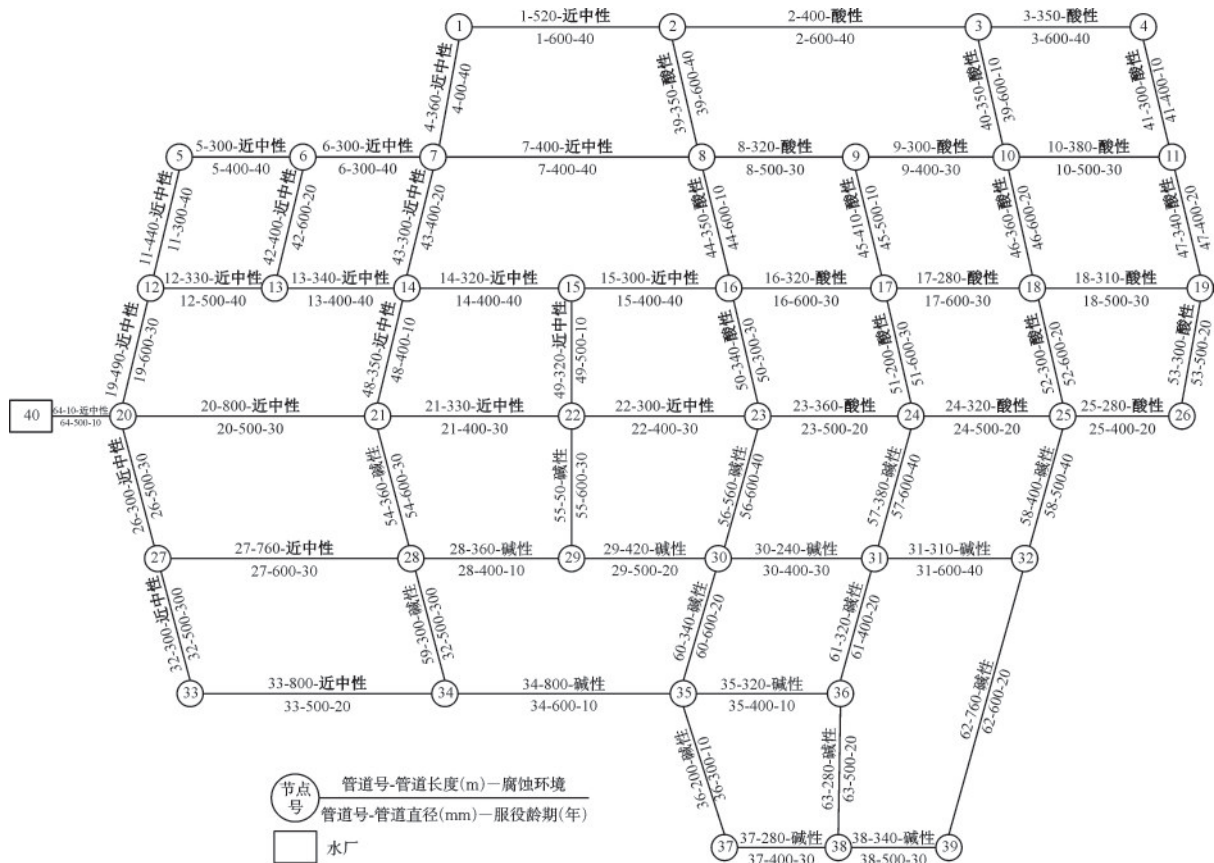


图4 供水管网基本信息

Fig.4 Basic information of water supply networks

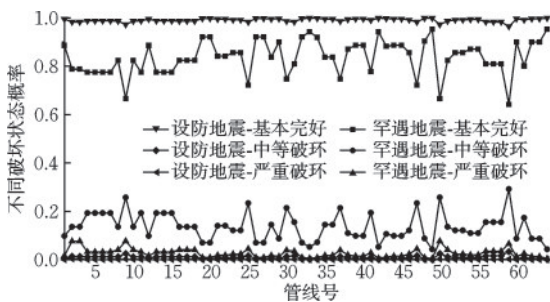


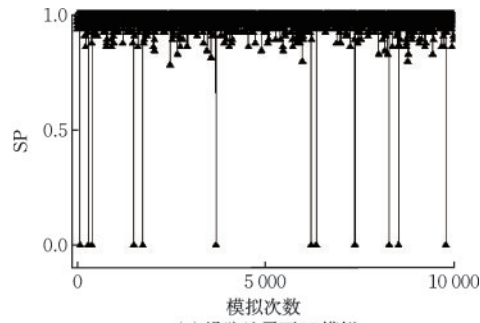
图5 设防地震与罕遇地震作用下管线三态破坏概率

Fig.5 Three-state damage probabilities of pipelines under fortification earthquakes and rare earthquakes

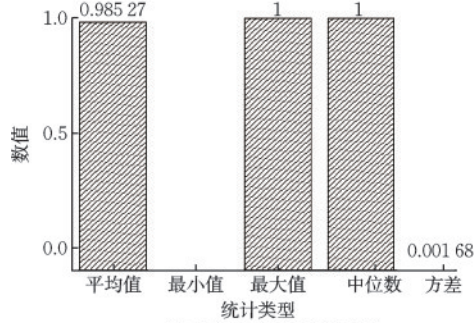
## 2.2 管网抗震可靠性

基于管线三态破坏概率,在MATLAB软件中产生与管线数量相同的0~1的随机数,如随机数小于管线基本完好概率,则认为管线处于完好状态,反之则认为管线处于破坏状态(包括中等破坏与严重破坏),不再具备输水能力,从而确定了一次地震作用下供水管网震损场景。本文针对设防地震与罕遇地震作用下管网震损场景进行了10 000次模拟,模拟结果如图6所示。

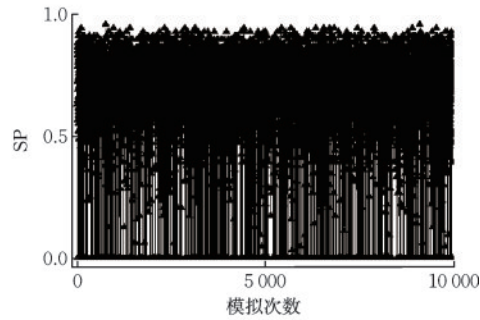
由图6可知,设防地震作用下,10 000次模拟结果中,供水管网系统震后抗震性能最小值为0,最大值为1,平均值为0.985,中位数为1,方差为1.679E-3,表明供水管网震后整体抗震性能较好。罕遇地震作用下,10 000次模拟结果中,供水管网系统震后抗震性能最小值、最大值、平均值、中位数和方差分别为0、0.953、0.671、0.719、3.872E-2,平均抗震性能较设防地震下管网抗震性能下降31.85%,供水管网抗震性能偏低。值得注意的是,该管网案例中,64号管线是水厂与其他用户节点连通的必经路径,一旦64号管线在地震中处于破损状态,无论其他管线是否破损,供水管网都将丧失供水能力。因此在进行供水管网管线布局设计时,应该考虑管网系统的冗余性,尽量避免上述情况的发生。基于日本水道协会提出的管线震害率经验计算公式<sup>[30]</sup>计算得到设防地震与罕遇地震作用下供水管网系统抗震性能分别为0.996 37、0.970 72,较本文方法计算结果分别高出1.1%、44.6%。表明腐蚀环境与服役龄期等因素对供水管网整体抗震性能影响较大,尤其是遭遇罕遇地震时,传统基于经验的抗震性能评估方法评估结果往往偏于乐观。



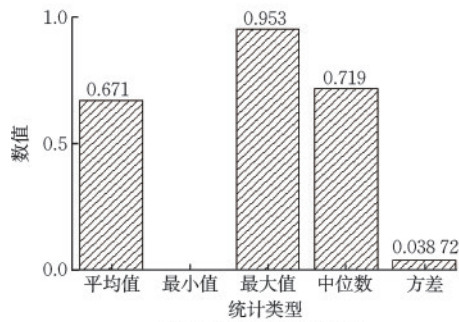
(a) 设防地震下SP模拟



(b) 设防地震下SP结果统计



(c) 罕遇地震下SP模拟



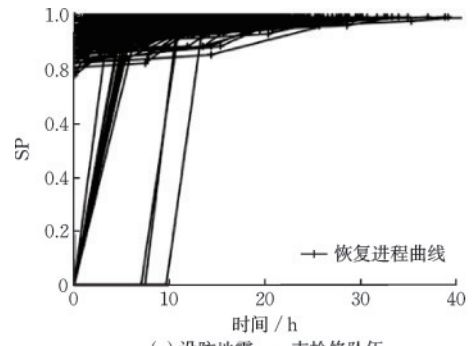
(d) 罕遇地震下SP结果统计

图6 供水管网系统抗震可靠性模拟结果

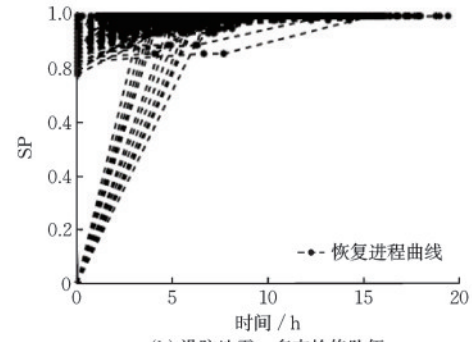
Fig.6 Seismic reliability simulation results of water supply networks

### 2.3 管网恢复进程与抗震韧性

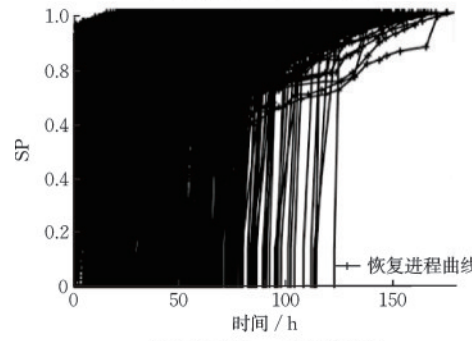
对于一次确定的供水管网震损场景,本文采用两种修复方式进行抢修,第一种是仅派一支队伍进行逐一修复,修复顺序随机确定;第二种是针对所有破坏管线各派一支队伍进行同时修复。针对10 000种供水管网震损场景,管网修复进程曲线如图7所示。



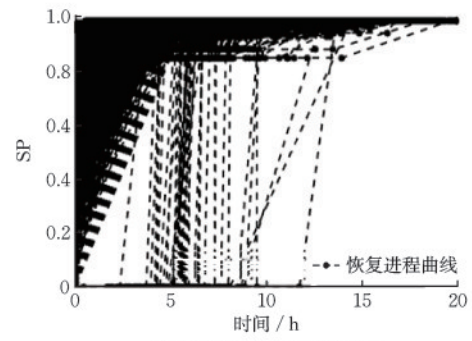
(a) 设防地震,一支抢修队伍



(b) 设防地震,多支抢修队伍



(c) 罕遇地震,一支抢修队伍



(d) 罕遇地震,多支抢修队伍

图7 设防地震与罕遇地震作用下供水管网恢复进程曲线

Fig.7 Restoration process curves of water supply networks under fortification earthquakes and rare earthquakes

示。设防地震作用下,由于中等破坏和严重破坏管线数量较少,仅派一支队伍逐一修复时,花费40 h就能修复全部破损管线,使供水管网系统性能恢复至100%。罕遇地震作用下,仅派一支队伍逐一修复时,最长需要花费180 h才能使管网性能完全恢

复至震前水平。第二种修复方式下,由于修复资源充足,遭遇设防地震与罕遇地震时,供水管网性能均能在 20 h 内恢复至震前水平。当 64 号管线破损时,管网系统性能瞬间降为 0,第一种修复方式下,由于破损管线抢修顺序是随机产生的,导致 64 号管线没有第一时间被修复,系统会持续一段时间失去供水功能;第二种修复方式下,尽管所有破损管线是同时修复,但每根管线所需修复时间是随机产生的,会存在 64 号管线所需修复时间不是最短,管网系统仍会持续一段时间失去供水功能,系统性能为 0。在实际抢修过程中,应尽量避免该情况出现,及时保障管网供水功能。

以两种修复方式计算所得抗震韧性平均值表示供水管网最终抗震韧性,本文控制时间  $t_c$  设置为 120 h,则设防地震与罕遇地震作用下供水管网抗震韧性如图 8 所示。设防地震作用下,指派一支队伍

抢修时,供水管网系统抗震韧性平均值为 0.999 4,每个破坏点各指派一支队伍抢修时,抗震韧性平均值为 0.999 6,最终抗震韧性值为 0.999 5;罕遇地震作用下,两种修复方式下供水管网抗震韧性平均值分别为 0.889 8、0.994 5,最终抗震韧性值为 0.942 15,需说明的是,由于修复顺序是随机确定的,会存在 64 号管线破坏后未得到及时修复,导致控制时间内供水管网系统抗震韧性偏低甚至为 0。尽管罕遇地震作用下供水管网系统抗震性能下降较为严重,但整体抗震韧性仍保持较高水准,这与该城市抢修资源储备数量及供水管网系统自身冗余性密切相关。基于经验易损性模型得到供水管网系统在设防地震与罕遇地震作用下的最终抗震韧性值分别为 0.999 9、0.998 7,均高于本文方法计算结果,表明传统不考虑供水管网腐蚀环境与服役龄期的评估方法,高估了管网系统抗震韧性。

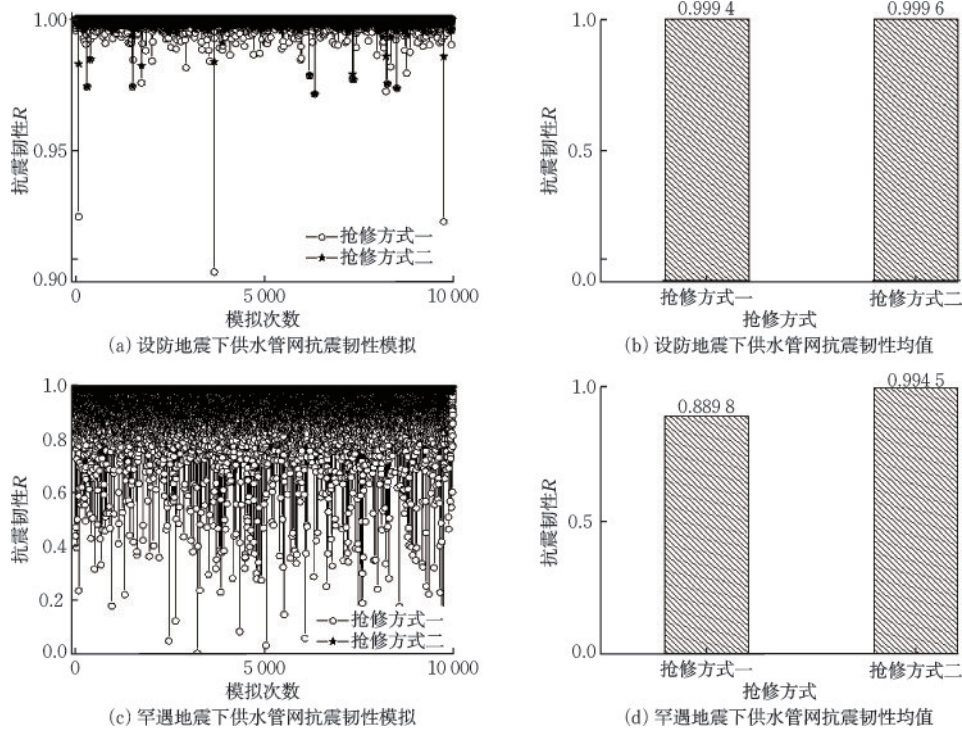


图 8 供水管网抗震韧性模拟结果

Fig.8 Seismic resilience simulation results of water supply networks

### 3 结 论

(1) 提出了一种基于拓扑指标的城市多龄期埋地腐蚀供水管网抗震韧性评估框架,考虑了土壤腐蚀环境与管道服役年期对供水管网整体抗震韧性的影响,并通过管网案例验证了所提抗震韧性评估

框架的可用性。

(2) 算例分析表明:传统不考虑供水管网土壤腐蚀环境与管道服役龄期的评估方法计算所得供水管网抗震性能与抗震韧性均偏于乐观。罕遇地震作用下,本文方法与传统经验方法计算所得管网抗震韧性分别为 0.671、0.970 72,传统经验方法计算所得供水管网抗震性能较本文方法高出 44.6%,

管网整体抗震韧性分别为0.942 15、0.998 7,仍保持较高水平,这与抢修资源储备数量及供水管网系统自身冗余性等密切相关。

## 参考文献:

- [1] 薄景山,段玉石,王玉婷,等.“韧性”的词义解析及其应用[J].世界地震工程,2023,39(1):38-48.  
Bo J S, Duan Y S, Wang Y T, et al. Meaning analysis and application of "resilience" [J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39(1): 38-48. (in Chinese)
- [2] Manyena S B. The concept of resilience revisited [J]. Disasters, 2006, 30(4): 433-450.
- [3] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [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):10-27.  
Miao H Q, Wang N Y, Wang Y J, et al. An urban resilience measurement system based on decomposing post-disaster recovery process [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 10-27. (in Chinese)
- [5] 缪惠全,钟紫蓝,侯本伟,等.中国特色韧性城市的经验探索与未来趋势——从唐山地震到汶川地震[J].北京工业大学学报,2023,49(7):810-832.  
Miao H Q, Zhong Z L, Hou B W, et al. Experience exploration and future trend of resilient cities with Chinese characteristics: From Tangshan earthquake to Wenchuan earthquake [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2023, 49(7): 810-832. (in Chinese)
- [6] 贾睿,杜坤,宋志刚.基于场景缩减法的供水管网抗震可靠性评估[J].防灾减灾工程学报,2023,43(2):286-293.  
Jia R, Du K, Song Z G. Seismic reliability assessment of water supply pipeline networks based on scenario reduction method [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 286-293. (in Chinese)
- [7] 王丽萍,张宛静,赵帅,等.竖向荷载作用下承插式球墨铸铁供水管道接口破损试验与数值模拟研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(2):232-239.  
Wang L P, Zhang W J, Zhao S, et al. Experiment and numerical simulation study on socket and spigot joint damage of ductile iron water supply pipeline under vertical loading [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 232-239. (in Chinese)
- [8] Jeong G, Wicaksono A, Kang D. Revisiting the resilience index for water distribution networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(8): 04017035.
- [9] Liu W, Song Z Y, Ouyang M. Lifecycle operational resilience assessment of urban water distribution networks [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 198: 106859.
- [10] Song Z Y, Liu W, Shu S H. Resilience-based post-earthquake recovery optimization of water distribution networks [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 74: 102934.
- [11] Yazdani A, Otoo R A, Jeffrey P. Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(12): 1574-1582.
- [12] Li W N, Mazumder R K, Li Y. Topology-based resilience metrics for seismic performance evaluation and recovery analysis of water distribution systems [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2023, 14: 04022070.
- [13] Long L, Yang H P, Zheng S S, et al. Seismic resilience evaluation of urban multi-age water distribution systems considering soil corrosive environments [J]. Sustainability, 2024, 16: 5126.
- [14] 龙立,郑山锁,杨勇,等.城市供水管网震后修复策略研究[J].地震研究,2022,45(3):352-361.  
Long L, Zheng S S, Yang Y, et al. Research on the recovery strategy of the urban water supply networks after an earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45(3): 352-361. (in Chinese)
- [15] 缪惠全,钟紫蓝,侯本伟,等.基于系统动力学的城市供水管网动态抗震韧性评估方法[J].工程力学,2023,40(12):99-112.  
Miao H Q, Zhong Z L, Hou B W, et al. Dynamic seismic resilience assessment method for water distribution networks based on system dynamics [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(12): 99-112. (in Chinese)
- [16] 侯本伟,黄金美,韩朝,等.考虑水质因素的供水管网抗震韧性评估[J].地震工程与工程振动,2024,44(2):19-29.  
Hou B W, Huang J M, Han Z, et al. Seismic resilience evaluation of water supply network considering water quality factors [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(2): 19-29. (in Chinese)
- [17] Hou B W, Huang J M, Miao H Q, et al. Seismic resili-

- ience evaluation of water distribution systems considering hydraulic and water quality performance [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 93: 103756.
- [18] Ahammed M. Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998, 75(4): 321-329.
- [19] 周方勤. 在役输气管道腐蚀剩余寿命预测技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2006.  
Zhou F Q. Study on prediction technology for residual lifetime of corroded gas pipeline in service[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006. (in Chinese)
- [20] 黄涛, 陈小平, 王向东, 等. pH值对Q235钢在模拟土壤中腐蚀行为的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(1): 31-38.  
Huang T, Chen X P, Wang X D, et al. Effect of pH value on corrosion behavior of Q235 steel in an artificial soil [J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2016, 36(1): 31-38. (in Chinese)
- [21] 蔡永龙. 城市供水系统地震易损性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.  
Cai Y L. Seismic vulnerability analysis of water supply system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] 谢孝奎, 贺金川, 郑山锁, 等. 碱性及近中性土壤环境中埋地钢管时变地震易损性分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(12): 1254-1263.  
Xie X K, He J C, Zheng S S, et al. Time-varying seismic fragility analysis of buried steel pipes in alkaline and near-neutral soil environments [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2020, 53(12): 1254-1263. (in Chinese)
- [23] 贺金川, 韩峰, 郑山锁, 等. 酸性土壤环境中多龄期埋地钢管地震易损性分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(9): 881-889.  
He J C, Han F, Zheng S S, et al. Seismic vulnerability analysis of multi-age buried steel pipes in an acidic soil environment [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2020, 53(9): 881-889. (in Chinese)
- [24] 于晓辉, 吕大刚, 王光远. 土木工程结构地震易损性分析的研究进展[C]//第二届结构工程新进展国际论坛论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 763-774.  
Yu X H, Lyu D G, Wang G Y. Seismic fragility analysis of civil engineering structures: state-of-the-art[C]//Proceedings of the Second International Forum on New Advances in Structural Engineering. Beijing: China Construction Industry Press, 2008: 763-774. (in Chinese)
- [25] Ang A H, Tang W H. Probability concepts in engineering planning and design[M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [26] 李桂青, 霍达, 干东炜. 城市建筑网络系统的抗震可靠性分析[M]. 北京: 地震出版社, 1993.  
Li G Q, Huo D, Gan D W. Seismic reliability analysis of urban building network system [M]. Beijing: Seismological Press, 1993. (in Chinese)
- [27] 龙立. 城市供水管网抗震可靠性分析及系统开发研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.  
Long L. Research on the seismic reliability analysis method of urban water supply network and system development[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese)
- [28] 刘慧洁. 基于能量和拓扑的城市供水管网韧性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.  
Liu H J. Research on the resilience of urban water distribution networks based on energy and topology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [29] Long L, Yang H P, Zhou Y, et al. Research on seismic connectivity reliability analysis of water distribution system based on CUDA [J]. *Water*, 2023, 15(11): 2087.
- [30] Creaco E, Franchini M, Todini E. Generalized resilience and failure indices for use with pressure-driven modeling and leakage [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 142(8): 04016019.  
(本文编辑: 池营营)