

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201910025

洪水冲刷和地震联合作用下砌体结构的失效风险评估*

吕光辉¹, 李 钢¹, 董志骞¹, 李宏男^{1,2}

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 基于风险理论, 提出一种用概率方法来考虑洪水和地震作用下砌体结构的失效风险评估方法。根据村镇建筑结构在灾害作用下的性能要求, 量化结构的性能指标, 分析村镇建筑结构在洪水冲刷和地震联合作用下的易损性, 综合考虑洪水冲刷、地震的灾害危险性和结构易损性, 通过易损性函数与联合灾害概率密度函数在灾害域上积分, 获得结构在不同破坏状态下的超越概率, 引入损失比和结构累计失效概率, 进而获得全性能状态下的可靠度指标, 并与目标可靠度指标对比, 进行结构性能评估。算例展示了本文方法的建立过程, 结果表明: 冲刷对结构轻微破坏和中度破坏的易损性影响较小, 对严重破坏和倒塌状态的易损性影响较大; 洪水冲刷对结构抗震性能具有较大的影响, 相比于仅考虑地震作用下, 同时考虑洪水冲刷和地震联合作用时, 结构各种破坏状态下的失效概率均有所增加, 且随着破坏程度的加剧, 冲刷对结构失效概率的影响越来越大。

关键词: 冲刷; 地震; 多灾害; 可靠度指标; 风险评估

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0294-09

Failure Risk Assessment of Masonry Structures under Flood Scouring and Earthquakes

LYU Guanghui¹, LI Gang¹, DONG Zhiqian¹, LI Hongnan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. College of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Based on the risk theory, a probabilistic method for considering the failure risk assessment of masonry structures under flood and earthquake is proposed. According to the performance requirements of the building structure in villages and towns under the action of disasters, the performance index of the structure is quantified, and the structural vulnerability of the building structure in villages and towns under the combined action of flood scouring and earthquake is analyzed. Considering scouring hazard, earthquake hazard and structural fragility, the probability of exceedance of the structure under different failure states is obtained by integrating of the fragility function and the joint disaster probability density function in the disaster domain. Furthermore, the loss ratio and the cumulative failure probability of the structure are introduced to obtain the reliability index under the full operation state.

* 收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2020-01-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100404)、大连高层次人才创新支持计划项目(2017RD04)资助

作者简介: 吕光辉(1993—), 男, 硕士研究生。主要从事村镇建筑结构抗多灾害设计研究。E-mail: 1052555181@qq.com

通讯作者: 李钢(1979—), 男, 教授, 博士。主要从事工程防灾减灾研究。E-mail: gli@dlut.edu.cn

Finally, structural assessment is performed in comparison with target reliability indicators. The example illustrates the establishment process of the method. The results show that the scouring has little effect on the fragility of structural minor damage and moderate damage, and has a great influence on the severe damage and collapse. The flood scouring has a great influence on the seismic performance of structures. When considering the combined effect of flood scouring and earthquake, compared with single earthquake effect, the failure probability in each failure state of the structure greatly increases, and as the degree of damage increasing, the impact of scouring on the probability of structural failure is getting bigger and bigger.

Keywords: scouring; earthquake; multiple disasters; reliability index; risk assessment

引言

近年来,洪水、地震等灾害在全球范围内频发。据统计^[1-2],每年因洪水和地震灾害造成的经济损失和房屋倒塌数量超过所有自然灾害造成损失的一半以上。在我国西南山区,洪水和地震灾害发生十分频繁,且历史上在地震发生前后曾多次发生洪水。例如,2008年5月12日汶川发生8.0级地震,造成69 227人遇难,直接经济损失8 452.15亿元;同年9月22日,四川绵阳突发大暴雨,引发洪灾,导致房屋损坏42 000余间,倒塌房屋16 000余间,直接经济损失15.86亿元。2013年4月20日四川省雅安市芦山县发生7.0级地震,造成建筑物大规模破坏,受灾人数1 044.6万,经济损失176.1亿元;同年7月8日雅安等地区发生了50年一遇的特大洪灾,灾害造成农房倒塌2 000余户、6 000余间,350万人受灾,直接经济损失203亿元。

目前我国村镇建筑的结构类型包括木结构、生土结构、砌体结构等,其中砌体结构占比最大。在结构的设计周期内,砌体结构在洪水、长期降雨等引起的冲刷作用下,导致其结构基础裸露,使得村镇建筑结构的整体刚度降低,从而降低结构的抗震性能。然而,在传统的砌体结构设计中,对单种灾害作用下结构抗灾性能评估方法的研究比较充分,对多种灾害作用下结构抗多灾性能评估方法的研究较少,尤其是村镇砌体结构在洪水冲刷和地震联合作用下的评估方法更为缺乏。因此开展对村镇砌体结构在洪水和地震联合作用下的风险评估对提升村镇建筑的防灾减灾能力具有重要意义。

在多种灾害作用下结构性能评估与设计方法的研究中,主要有灾害荷载组合法^[3-5]、基于性能的抗多灾设计与评估^[6-8]、基于全寿命周期的结构设

计与评估^[9-10]。孙得璋^[4]研究了地震和重卡车共同作用下的桥梁结构多灾害设计方法,提出了荷载组合系数的计算公式,该方法主要适用于静力荷载或者拟静力荷载;F.Petrini等^[8]提出新一代基于性能的抗多灾设计与评估框架,将分析过程划分为灾害分析、结构特性分析、相互作用分析、结果响应分析、损伤分析和损失分析六个阶段,该方法求解较为复杂,在实际研究中很少采用;基于全寿命周期的结构评估与设计主要研究全寿命期内性能退化对结构抗震性能影响和全寿命周期损失成本分析,李宏男等^[11]总结了多种环境腐蚀对结构构件在生命周期内性能退化的影响,以及全寿命周期损失成本的评估方法。在洪水冲刷和地震联合作用的研究中,刘兵等^[12]研究了地震和洪水作用下桥墩基础的易损性曲线和回归分析,获得了连续冲刷深度下桥梁的地震易损性曲线;杨延凯等^[13]提出了基于风险的桥梁在地震和冲刷作用下合理冲刷深度的研究,提出一种桥梁合理冲刷深度的计算方法。在上述研究中,研究对象多数是桥梁结构,而村镇砌体结构与桥梁结构的受力机制与灾变机理差异较大,相关成果难以直接应用于指导砌体结构的设计。

本文提出一种洪水冲刷和地震联合作用下砌体结构的失效风险评估方法,该评估方法综合考虑了灾害危险性和结构易损性。依据建筑物所处的环境,确定洪水冲刷和地震灾害危险性模型;依据最大层间位移将砌体结构的破坏状态划分为五种破坏状态,对建筑物进行冲刷和地震联合作用下的结构易损性分析;根据风险评估理论,获得结构不同性能状态下的失效概率和全性能状态下的累计失效概率,依据可靠度指标对结构进行风险评估。最后,以两层砌体结构为例,对比分析其在考虑冲刷条件下失效概率与不考虑冲刷条件下的失效概率,阐述考虑冲刷对结构抗震性能影响研究的必

要性。

1 灾害危险性

灾害危险性指在一定时间内,结构所处位置发生超过某一灾害强度的可能性。本文研究在洪水冲刷和地震联合作用下村镇砌体结构的性能评估,需要研究洪水冲刷和地震的灾害危险性。

1.1 冲刷危险性模型

冲刷危险性模型指在一定时间内,结构发生超过某一冲刷深度概率的曲线。洪水冲刷指洪水对结构基础周围土体的侵蚀,目前国内外针对冲刷的研究局限于桥梁桥墩的冲刷,更多的是对冲刷深度的研究,对冲刷深度危险性的研究较为缺乏,J.L. Briaud等^[14]提出了一种计算桥梁在使用寿命中超过一定冲刷深度的概率的方法,该方法需要计算水力参数、几何参数和土壤侵蚀参数,提出了一个概率框架,认为冲刷深度危险性符合对数正态分布;杨延凯等^[13]针对美国联邦公路局的HEC NO.18^[15]中关于桥梁冲刷深度的计算公式,利用公式中各参数的概率模型,拟合出冲刷深度概率模型,认为冲刷危险性符合对数正态分布,其概率密度函数可表示为:

$$f_H(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma h} \exp \left[-\frac{(\ln h - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

式中, h 为冲刷深度; μ 为冲刷深度的对数平均值; σ 为冲刷深度的对数标准差,文中以 $\mu = -1.3734$ 和 $\sigma = 1.812$ 为例。冲刷深度危险性模型如图1所示。

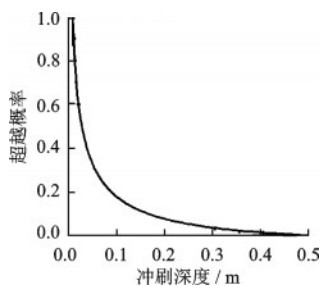


图1 冲刷危险性曲线

Fig.1 Scouring hazard curve

1.2 地震灾害危险性模型

地震灾害危险性模型用来描述在一定时间内,

结构所在位置发生超过某一地震强度概率的曲线。李宏男等^[11]总结了多种地震灾害危险性模型;本文采用高小旺等^[16]建立的地震灾害危险性模型,即按照50年设计基准期,对多个地区的地震危险性进行了统计分析与检验,认为地震烈度的概率分布符合极值Ⅲ型分布,表达式如下:

$$F_S(im) = \exp \left[-\left(\frac{\omega - im}{\omega - \epsilon} \right)^k \right] \quad (2)$$

对分布函数进行求导,获得其概率密度函数为:

$$f_S(im) = \frac{k(\omega - im)^{k-1}}{(\omega - \epsilon)^k} \exp \left[-\left(\frac{\omega - im}{\omega - \epsilon} \right)^k \right] \quad (3)$$

式中, im 为地震烈度; ω 为地震烈度的上限值,一般取 $\omega = 12$ 度; ϵ 为众值烈度,基本烈度与众值烈度相差约为1.55度^[16],本文设防烈度以7度为例,一般认为基本烈度取值与设防烈度相同,所以 $\epsilon = 5.45$; k 为形状参数,依据我国抗震设防思想,设防烈度为50年内超越概率为10%地震烈度,所以:

$$1 - 0.1 = \exp \left[-\left(\frac{12 - 7}{12 - 5.45} \right)^k \right] \quad (4)$$

求得 $k = 8.33$,式(3)最终可表示为:

$$f_S(im) = \frac{8.33(12 - im)^{8.33-1}}{(12 - 5.45)^{8.33}} \exp \left[-\left(\frac{12 - im}{12 - 5.45} \right)^{8.33} \right] \quad (5)$$

地震烈度与PGA的关系^[17]如下所示:

$$im = 3.73 \lg(PGA) - 1.23 \quad (6)$$

式中,PGA为地震峰值加速度,单位为gal,1gal = 1cm/s²,为了使全文PGA单位统一,运用公式(6)后,将PGA单位转化成g,地震危险性模型如图2所示。

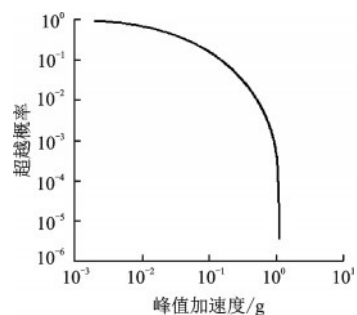


图2 地震危险性曲线

Fig.2 Seismic hazard curve

2 结构易损性分析

结构易损性指建筑在不同灾害强度下,发生某种损伤程度的条件超越概率。对两种灾害作用下结构易损性的研究中,通常先确定一种灾害作用,再考虑另外一种灾害作用下的结构易损性;本文中先确定洪水冲刷深度,再考虑结构地震易损性。结构地震易损性的研究方法^[18-19]有经验分析法和理论分析法,经验分析法基于实际灾害破坏状态的频数统计而建立,而理论分析法基于回归概率需求模型而建立;本文采用理论分析法。

2.1 结构性能指标

对结构进行易损性分析之前,需要先明确结构破坏状态,并对每种破坏状态进行指标量化,本文采用最大层间位移作为结构的性能指标,根据文献[20-22]等的建议,将结构的破坏状态分为完好、轻微破坏、中度破坏、严重破坏、倒塌。表1总结了砌体结构的破坏指标,其中 θ 为层间位移角, H_0 为结构层高。

表1 建筑结构破坏指标

Table1 Damage index of building structures

破坏状态	层间位移角限值	最大层间位移
完好	$\theta < 1/1400$	—
轻微破坏	$1/1400 \leq \theta < 1/700$	$1/1400H_0$
中等破坏	$1/700 \leq \theta < 1/200$	$1/700H_0$
严重破坏	$1/200 \leq \theta < 1/100$	$1/200H_0$
倒塌	$\theta \geq 1/100$	$1/100H_0$

2.2 易损性曲线

根据C.A.Cornell等^[23]的建议,采用地震峰值加速度作为地震强度参数,结构的抗震性能需求 D 与地震强度参数之间符合下列关系式:

$$\ln(D) = a + b \ln(PGA) \quad (7)$$

式中, a, b 为系数,可以通过回归分析得到; PGA 为地震峰值加速度。

结构的抗震性能需求 D 对数正态分布的标准差 β_d 估计值采用下式估算:

$$\beta_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(D_i) - a - b \ln(PGA_i)]^2}{n-2}} \quad (8)$$

式中, D_i 为第 i 条地震动的抗震性能需求; n 为数据量; PGA_i 为第 i 条地震动峰值加速度。

地震易损性给出了确定地震动强度下,结构达到或者超越某种破坏极限状态的条件超越概率。易损性可表示为:

$$P(F|PGA) = \Phi \left[\frac{\ln(D) - \ln(C)}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right] \\ = \Phi \left[\frac{b \times \ln(PGA) + a - \ln(C)}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right] \quad (9)$$

式中, $P(F|PGA)$ 为结构在某一地震强度作用下的条件超越概率; F 表示结构的抗震需求超过结构的抗震能力; C 为结构的抗震能力; β_c 为抗震能力对数标准差,本文取 $\beta_c = 0.3$; Φ 为标准正态分布函数。

3 风险评估理论

对结构进行失效风险评估,需要综合考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体。致灾因子一般指灾害的种类,文中主要研究灾害危险性;孕灾环境指灾害发生的环境,其决定了灾害危险性模型中的参数;承灾体指承受灾害作用的主体,决定了结构承受灾害的能力,文中研究结构易损性。

结构易损性是条件超越概率,并没有考虑灾害强度发生的概率,对结构的失效评估除了考虑结构易损性外,还应考虑灾害发生的概率;当仅考虑地震作用时,结构失效的超越概率可以由条件概率公式求得:

$$P_b = \sum_{i=0}^{+\infty} P(F|PGA_i) P(PGA_i) \quad (10)$$

式中, P_b 为结构失效的超越概率; $P(PGA_i)$ 为发生地震强度为 PGA_i 的概率; $P(F|PGA_i)$ 由式(9)确定。考虑地震强度为连续时,上式可表示为:

$$P_b = \int_0^{+\infty} F_R(PGA) f_s(PGA) dPGA \quad (11)$$

式中, $F_R(PGA)$ 为结构的地震易损性函数; $f_s(PGA)$ 为地震灾害概率密度函数,由式(5)、(6)求得;考虑结构在第 j 冲刷深度 h_j 下,达到某一种破坏状态下的超越概率可表示为:

$$P_b = \int_0^{+\infty} F_R(PGA, h_j) f(PGA, h_j) dPGA \quad (12)$$

基于此,考虑结构在连续冲刷深度作用下,结构失效的超越概率可表示为:

$$P_b = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} F_R(PGA, h) f(PGA, h) dPGA dh \quad (13)$$

式中, $F_R(PGA, h)$ 为洪水冲刷和地震联合作用下易损性曲面函数, $f(PGA, h)$ 为洪水冲刷和地震的联合概率密度函数。本研究中, 认为冲刷与地震作用相互独立, 所以: $f(PGA, h) = f_s(PGA) f_h(h)$, 其中 $f_s(PGA)$ 由式(5)、(6)确定, $f_h(h)$ 由式(1)确定。所以结构失效的超越概率可以表示为:

$$P_b = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} F_R(PGA, h) f_s(PGA) f_h(h) dPGA dh \quad (14)$$

洪水冲刷和地震联合作用下的易损性曲面是由多条不同冲刷深度下地震易损性曲线利用线性插值的方法获得的, 实际的易损性曲面函数不易求解, 因此可利用离散型概率求解式(14):

$$P_b = \sum_{i=0}^{+\infty} \sum_{j=0}^{+\infty} P(PGA_i, h_j) P(PGA_i) P(h_j) \quad (15)$$

式中, $P(PGA_i, h_j)$ 表示易损性曲面上对应 PGA_i 和 h_j 下的条件超越概率; $P(PGA_i), P(h_j)$ 分别为对应强度下的灾害概率密度函数。按照上述理论可以求得对应结构完好、轻微破坏、中度破坏、严重破坏、倒塌五种性能状态下的失效概率, 为了便于区分, 分别记做符号 $P_{f1}, P_{f2}, P_{f3}, P_{f4}, P_{f5}$ 。

风险等于风险发生的概率与风险发生之后造成损失的乘积。每种破坏状态的失效概率即为发生每种破坏状态风险的概率, 并且引入结构的损失比 c_i 作为风险发生之后造成的损失, 尹之潜^[24]给出不同类型结构的损失比, 本文中采取砖砌体结构, 损失比取值为完好状态 0, 轻微破坏 5%, 中等破坏 10%; 严重破坏 40%, 倒塌 70%。因此可以获得结构累计失效风险概率为:

$$P_f = \sum_{i=1}^5 c_i P_{fi} \quad (16)$$

由式(16)获得结构在全部性能状态下的失效概率, 由可靠度理论中失效概率与可靠度指标的关系, 获得结构可靠度指标, 检验是否满足规定的目标可靠度指标, 从而对结构进行评价; 在《工程结构可靠性设计统一标准》^[25]中规定房屋建筑结构在不同安全等级的目标可靠度。例如安全等级为二级的房屋建筑, 发生延性破坏的目标可靠度指标为 3.2。当按照理论求得的可靠度指标大于目标可靠度时说明设计的结构满足按照可靠度设计的要求, 反之, 结构不满足可靠度设计的要求, 需要重新设计。

4 评估方法流程

该评估方法包括洪水冲刷和地震危险性、结构易损性和风险评估理论三部分, 其建立过程如图 3 所示。

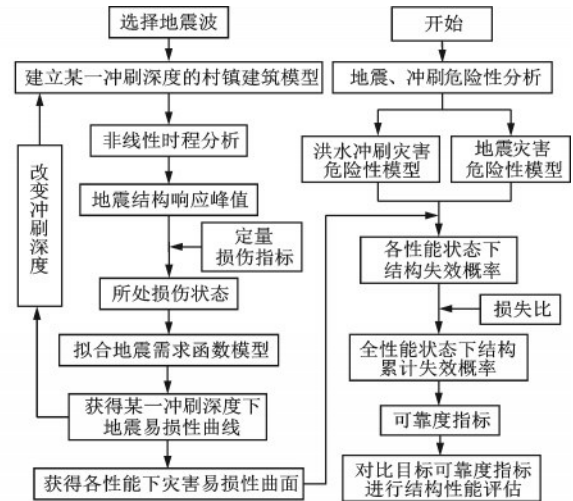


图 3 失效风险评估方法建立过程

Fig.3 Establishment process of failure risk assessment method

5 算例分析

5.1 模型设计

本文以两层砖砌体结构为研究对象, 介绍提出的洪水冲刷和地震联合作用下村镇砌体结构的多灾害风险评估方法。结构层高均为 3.3 m, 长 11.4 m, 宽 6 m, 如图 4、图 5 所示。考虑门窗洞口, 现浇混凝土楼盖, 其中: 砌体材料为 MU10—M5, 混凝土强度为 C30, 钢筋等级为 HRB335。结构位于成都地区, 抗震设防烈度为 7 度, II 类场地, 抗震等级为三级, 设计地震分组为第三组, 场地特征周期为 0.45 s, 结构安全等级为二级。

采用土弹簧层模拟洪水冲刷深度, 结构基础采用宽为 0.24 m、高为 0.5 m 的地梁, 每 0.1 m 深度布置一层弹簧, 通过去除冲刷面以上的土弹簧层来模拟冲刷, 例如: 冲刷深度为 0.1 m, 去掉土体表面以下 0.1 m 范围内的土弹簧, 并修改剩余土弹簧的参数, 进而模拟村镇建筑结构的冲刷现象^[12]。弹簧刚度采用 m 法, 弹簧层布置如图 6 所示, 地基对结构侧

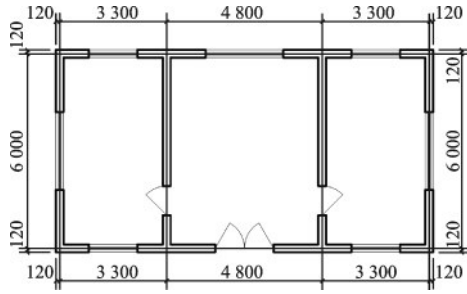


图4 一层房屋平面布置

Fig.4 Floor plan of one-story building

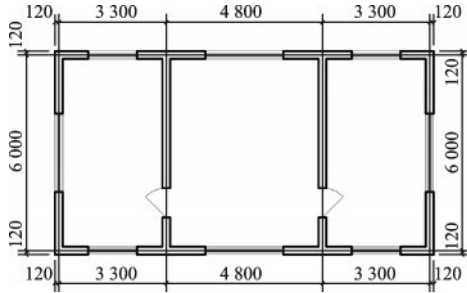


图5 二层房屋平面布置

Fig.5 Floor plan of two-story building

面的地基系数随深度 H_i 成正比例增长,每个集中弹簧的刚度可以按照下式计算。

$$K_i = ABmH_i \quad (17)$$

顶部集中弹簧的刚度为:

$$K_0 = \omega_0 B \quad (18)$$

式中, A 为弹簧层之间的间距; B 为弹簧层的计算宽度,为模型划分单元的尺寸; m 为比例系数; H_i 为自地面至集中弹簧层的距离; ω_0 为室外地坪处集中弹簧在一侧 $A/2$ 深度内的地基系数分布面积。

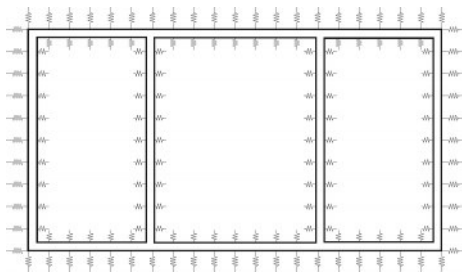


图6 弹簧层布置平面

Fig.6 Ground beam spring layer layout plan

5.2 计算结果与分析

5.2.1 易损性分析

选取35条II类场地的实测地震动,对结构进行

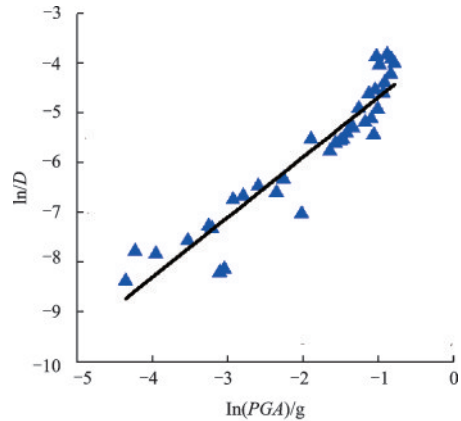
易损性分析,地震峰值加速度范围为 $0.01g \sim 0.5g$ 。计算过程中需要考虑6种冲刷深度,共需要计算 $35 \times 6 = 210$ 种工况。

利用公式(7)分别对冲刷深度为0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m进行地震需求函数拟合。拟合的结果见表2, a 、 b 为拟合参数,见公式(7);限于篇幅问题,文中只给出了冲刷深度为0 m和0.3 m的拟合曲线(图7)和易损性曲线(图8),其他四种冲刷深度条件下的易损性利用公式(9)容易获得。

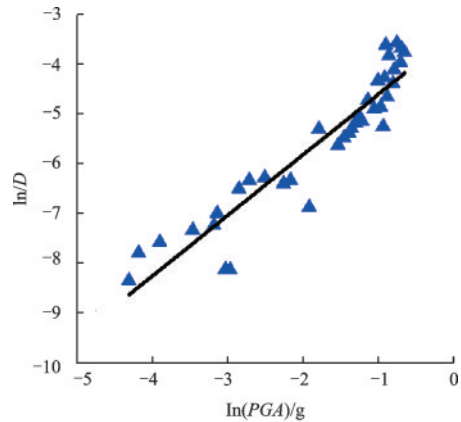
表2 结构地震需求模型

Table 2 Structural seismic demand model

冲刷深度/m	a	b	相关系数
0	-3.514	1.198	0.883 6
0.1	-3.482	1.204	0.882 6
0.2	-3.462	1.209	0.879 2
0.3	3.393	1.211	0.878 9
0.4	-3.069	1.256	0.869 3
0.5	-2.795	1.263	0.845 6



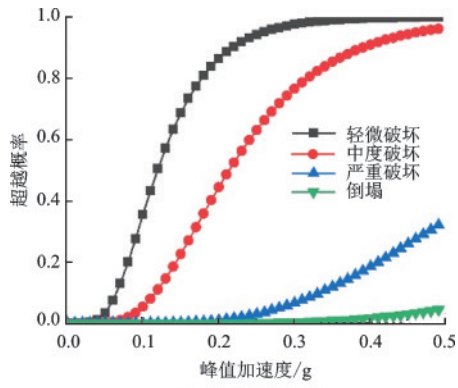
(a) 冲刷深度为0 m



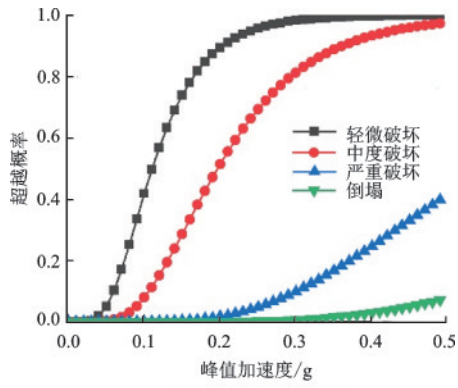
(b) 冲刷深度为0.3 m

图7 需求拟合曲线

Fig.7 Demand fitting curve



(a) 冲刷深度为 0 m



(b) 冲刷深度为 0.3 m

图8 地震易损性曲线

Fig.8 Seismic fragility curves

5.2.2 联合易损性曲面

由以上6种冲刷深度的地震易损性曲线,通过MATLAB线性插值,获得结构在不同冲刷深度和PGA条件下的易损性曲面,如图9~12所示。

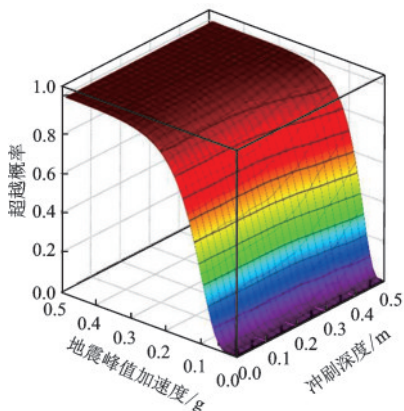


图9 轻微破坏状态下易损性曲面

Fig.9 Fragility surface under slight damage

由图9~12可知,随着冲刷深度的增加,村镇砌体结构的地震易损性逐渐增加,但是,冲刷深度对结构轻微破坏和中度破坏状态地震易损性影响程度较轻,对于严重破坏和倒塌状态影响显著;另外,

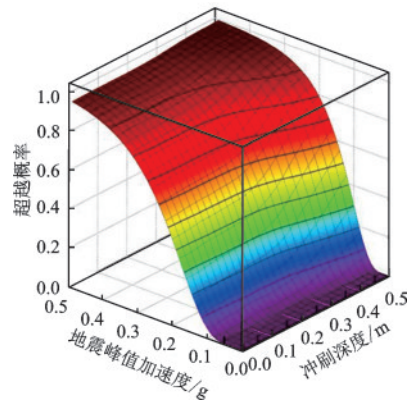


图10 中度破坏状态下易损性曲面

Fig.10 Fragility surface under moderately damage

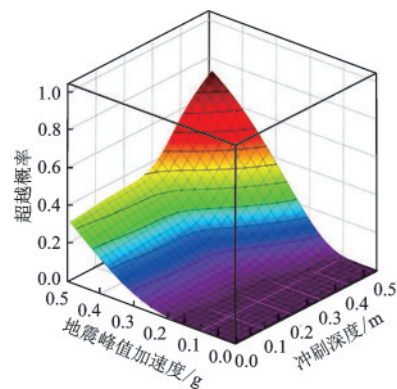


图11 严重破坏状态下易损性曲面

Fig.11 Fragility surface under severe damage

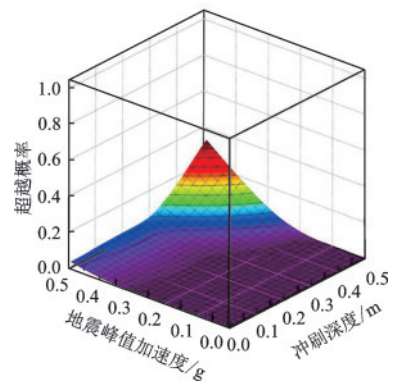


图12 倒塌状态下易损性曲面

Fig.12 Fragility surface under collapse

冲刷深度对严重破坏和倒塌状态地震易损性的影响存在明显的极速上升临界值,当冲刷深度超过某一临界值后,冲刷对结构地震易损性的影响迅速增强,对于本模型临界值为0.2~0.3 m。

考虑地震危险性和冲刷危险性模型,按照式(15)计算,求得村镇建筑结构在50年设计基准期内每种破坏状态的失效超越概率,相减得到每种性能

的失效概率,结果见图13、表3。结果表明,50年设计基准期内,结构四种破坏状态下的失效概率依次减小;结构发生轻微破坏的概率为1.5631%,中度破坏的概率为1.1058%,严重破坏的概率为0.0737%,倒塌的概率为0.0067%。结构的累计失效概率为0.2229%,可靠度指标为3.221,大于目标可靠度指标3.2,因此本文所采用的砌体结构满足可靠度的要求。

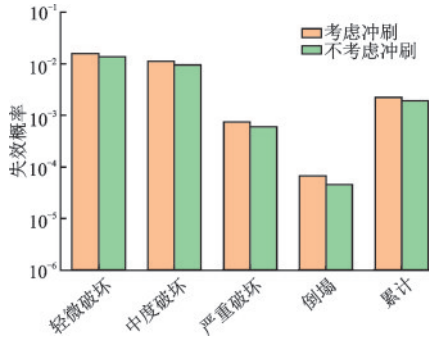


图13 失效概率

Fig.13 Failure probability

表3 失效概率数值对比

Table 3 Comparison of failure probability values

性能	单位: %				
	轻微破坏	中度破坏	严重破坏	倒塌	累计
考虑冲刷	1.5631	1.1058	0.0737	0.0067	0.2229
不考虑冲刷	1.3623	0.9478	0.0595	0.0046	0.1899
增长率	15.8	17.2	25.4	45.4	17.4

当仅考虑地震作用时,由式(11)求得结构在每种破坏状态下的失效概率及累计失效概率,结果见图13、表3。结构发生轻微破坏的概率为1.3623%,中度破坏的概率为0.9478%,严重破坏的概率为0.0595%,倒塌的概率为0.0046%。结构的累计失效概率为0.1899%。经对比发现,当考虑冲刷时,结构在轻微破坏、中度破坏、严重破坏、倒塌四种破坏状态下的失效概率分别增加了15.8%、17.2%、25.4%、45.4%,显然,冲刷对结构性能的影响随着破坏程度的加剧而越来越大;此外,结构的累计失效概率增加了17.4%,见表3。因此,洪水冲刷对村镇砌体结构性能的影响不容忽视。

6 结 语

本文提出了一种在洪水冲刷和地震联合作用下村镇建筑结构的失效风险评估方法,由于村镇结构遭受灾害的不确定性,在对结构进行风险评估时,除了考虑确定灾害强度下的失效超越概率,还需要全面考虑灾害发生的不确定性;通过风险评估理论,求得每种性能状态的失效概率和考虑全性能状态的累计失效概率,可以与可靠度标准联系在一起,实现了多灾害作用下典型村镇建筑结构的性能评估;并用该方法对某村镇砌体结构进行了多灾害失效风险分析。研究表明:

(1)冲刷对结构轻微破坏和中度破坏的易损性影响较小,对严重破坏和倒塌的易损性影响较大。

(2)冲刷深度对严重破坏和倒塌状态地震易损性的影响存在明显的临界冲刷深度值,当冲刷深度小于临界值时,冲刷对结构地震易损性影响程度较小,当冲刷深度超过临界值时,冲刷深度对结构地震易损性的影响迅速增大。

(3)同时考虑洪水冲刷和地震联合作用与仅考虑地震作用相比,结构在每种破坏状态下的失效概率均有较大提升,且随着破坏程度的加剧,冲刷对结构失效概率的影响随之增大,洪水冲刷对结构抗震性能的影响不可忽略。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国民政部. 中国民政统计年鉴—2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China. China civil affairs statistical yearbook—2017 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese)
- [2] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报—2017 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
National Flood Control and Drought Relief Headquarters, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water and drought disaster bulletin—2017 [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2017. (in Chinese)
- [3] Hong X J, Gu M. Probability model and solution on earthquake effects combination in along wind resistant design of tall-flexible buildings[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(5): 627-636.

- [4] 孙得璋.地震和重卡车荷载作用下桥梁多灾害设计理论研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2012.
- Sun D Z. Study on multiple hazards design theory for bridge under earthquakes and heavy truck loads [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)
- [5] Wang Y, Lin F, Gu X L. Load and resistance factors for progressive collapse resistance design of reinforced concrete building structures[J].Advanced Materials Research, 2011, 255-260:338-344.
- [6] Unnikrishnan V U, Barbato M. Performance-based hurricane engineering: A multi-hazard approach[M]. Switzerland: Springer, 2016.
- [7] Attary N, Unnikrishnan V U, Van d L J W, et al. Performance-based tsunami engineering methodology for risk assessment of structures [J]. Engineering Structures, 2017, 141:676-686.
- [8] Petriani F, Palmeri A. Performance-based design of bridge structures subjected to multiple hazards: A review [C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. London: Taylor & Francis Group, 2012: 2040-2047.
- [9] Wen Y K. Minimum lifecycle cost design under multiple hazards[J].Reliability Engineering & System Safety, 2001, 73(3):223-231.
- [10] Ghosh J, Padgett J E. Aging considerations in the development of time-dependent Seismic Fragility Curves[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136 (12) : 1497-1511.
- [11] 李宏男,郑晓伟,李超.高性能结构抗多次多种灾害全寿命性能分析与设计理论研究进展[J].建筑结构学报, 2019, 40(2):60-73.
- Li H N, Zheng X W, Li C. Research progress on life-cycle multihazard-based design theory for high-performance structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 60-73. (in Chinese)
- [12] 刘兵,梁发云,彭君.地震与洪水作用下桥墩基础易损性曲线与回归分析[J].结构工程师, 2016, 32(6): 155-161.
- Liu B, Liang F Y, Peng J. Fragility analysis and parameters regression of bridge foundation under the combined action of earthquake and flood[J].Structural Engineers, 2016, 32(6): 155-161. (in Chinese)
- [13] 杨延凯,马如进,陈艾荣.基于风险的桥梁多灾害下合理冲刷深度研究[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(3):103-109.
- Yang Y K, Ma R J, Chen A R. Research on reasonable scouring depth of bridges based on risk [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(3): 103-109. (in Chinese)
- [14] Briaud J L, Brandimarte L, Wang J, et al. Probability of scour depth exceedance owing to hydrologic uncertainty [J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2007, 1(2):77-88.
- [15] Arnesol A, Zevenbergen L W, Lagasse P F. Evaluating scour at bridges [R]. Washington D C: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2012.
- [16] 高小旺,鲍霁斌.用概率方法确定抗震设防标准[J].建筑结构学报, 1986, 7(2):55-63.
- Gao X W, Bao Y B. Determination of seismic fortification standards by probability method [J]. Journal of Building Structures, 1986, 7(2): 55-63. (in Chinese)
- [17] 丁宝荣,孙景江,杜轲,等.地震烈度与峰值加速度、峰值速度相关性研究[J].地震工程与工程振动, 2017 (2):28-38.
- Ding B R, Sun J J, Du Wei, et al. Study on relationships between seismic intensity and peak ground acceleration, peak ground velocity [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017(2): 28-38. (in Chinese)
- [18] 陈力波.汶川地区公路桥梁地震易损性分析研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- Cheng L B. Seismic fragility analysis and research of highway bridges in Wenchuan area [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [19] 赵文哲.砌体结构地震易损性研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2018.
- Zhao W Z. Seismic fragility analysis of masonry building[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2018.(in Chinese)
- [20] 苏启旺,许浒,吴昊,等.砖砌体结构层间位移角的探讨[J].土木工程学报, 2013(增1):111-116.
- Su Q W, Xu H, Wu H, et al. Research on inter-story displacement angle of brick masonry structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2013(Sup1): 111-116. (in Chinese)
- [21] 屈成忠,谢礼立.中高层砌块砌体结构性态水平分析[J].结构工程师, 2005, 21(4): 37-40.
- Qu C Z, Xie L L. Analysis of performance levels of high-rise concrete block masonry structures [J]. Structural Engineers, 2005, 21(4): 37-40. (in Chinese)
- [22] 熊立红.多层混凝土砌块结构性态抗震研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2004.

(本文责编:周小潭)

(下转第 309 页)