

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210307002

地震与洪水作用下结构风险分析与设计研究进展*

李 钢¹, 秦佩瑶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: 我国是世界上地震与洪水灾害最为严重的国家之一, 两种灾害影响范围广泛, 且很多地区为两种灾害的双易发地区, 同时考虑地震与洪水作用的结构风险分析与设计是防灾减灾领域研究的重要问题。综述了国内外地震与洪水易发区结构性能分析与设计理论的研究进展, 统计分析了地震与洪水的历史数据, 根据洪水成因将地震-洪水灾害划分为地震伴随暴雨洪水、地震引发溃坝洪水两类, 明确了地震与洪水的联合成灾机制和不同概率模型。总结归纳了地震-洪水灾害的不同表现形式, 包括地震-洪水冲击接续作用、洪水冲刷-地震接续作用、洪水浸泡-地震接续作用, 论述了地震与洪水作用下结构响应分析及易损性分析的研究现状, 着重介绍了洪水冲刷-地震接续作用下结构全寿命风险评估和设计方法的研究进展, 为进一步开展地震-洪水灾害的其他表现形式研究提供了新的思路。总结分析表明, 地震与洪水接续作用加重了致灾程度, 增大了结构失效风险, 基于全寿命周期的结构抗多灾设计方法, 能够有效减少灾害影响和损失, 对于工程防灾减灾具有重要意义。

关键词: 地震; 洪水; 多灾害; 风险分析; 全寿命设计

中图分类号: TU318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0237-14

Research Progress on Risk Analysis and Design for Structures under Multiple Hazards of Earthquake and Flood

LI Gang¹, QIN Peiyao¹, 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: China is one of the few countries in the world most severely suffered from earthquake and flood disasters. The two kinds of disasters distribute widely in our country, and many areas are prone to both disasters. Risk analysis and design for structures under multiple hazards of earthquake and flood are important issues in the field of disaster prevention and mitigation. The research progress on performance analysis and design theory for structures in earthquake and flood susceptible areas is reviewed. First, the historical data of earthquake and flood is statistically analyzed. On the basis of flood causes, the multiple hazards of earthquake and flood are classified into two types: earthquake accompanied with storm flood, and earthquake triggering dam-break flood. The hazard-forming mechanisms and probabilistic models of earthquake and flood are specified. Moreover, the different forms of earth-

* 收稿日期: 2021-03-07; 修回日期: 2021-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100404)、辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902043)、大连市高层次人才创新支持计划项目(2017RD04)资助

作者简介: 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

quake and flood disasters are summarized, including earthquake-flood impact consecutive effect, flood scour-earthquake consecutive effect, and flood soak-earthquake consecutive effect. The researches on response analysis and vulnerability analysis for structures under earthquake and flood are reviewed. The researches on life-cycle risk assessment and design method for structures under flood scour-earthquake consecutive effect are particularly addressed, which provided a new direction for researches on other forms of earthquake and flood multi-disasters. The summary and analysis show that the consecutive effect of earthquake and flood will increase the extent of disasters and the failure risk of structures. The life-cycle-based structure design method of multi-disasters can reduce the impact and destruction of disasters effectively, which is of great significance for disaster prevention and mitigation in engineering.

Keywords: earthquake; flood; multiple hazards; risk analysis; life cycle design

引言

伴随着全球气候与环境变化,各种自然灾害频繁发生,结构在其服役期内不可避免地遭受多种灾害作用,工程防灾减灾领域的抗多灾问题引起了我国政府的高度关注。2017年,中共中央、国务院出台意见推进防灾救灾减灾体制机制改革,提出了“从应对单一灾种向综合减灾转变”。2020年,国家自然科学基金委工程与材料科学部公布了“多种灾害作用下的结构全寿命整体可靠性”优先发展领域。此外,学术界也针对多灾害作用下的结构性能分析与设计开展了大量研究,已有研究对多灾害理解各有不同,如S. Kameshwar等^[1]将多灾害理解为特定区域内的多种单一灾害,未考虑灾害之间的关联性,并针对地震与飓风作用提出了桥梁结构的抗多灾设计框架。S. Park等^[2]将灾害相继发生的情形定义为多灾害,并考虑了灾害链式效应,分析了建筑结构在地震与海啸作用下的抗多灾性能。

我国是世界上遭受自然灾害最为严重的国家之一,其中尤以地震与洪水灾害造成的人员伤亡和财产损失最为惨重。据统计,1949年以来,地震灾害中死亡人数占各类自然灾害造成死亡人数的54%^[3],洪水灾害直接经济损失占全部自然灾害直接经济总损失的40%以上^[4]。此外,我国幅员辽阔,部分地区地质构造活跃,雨季降水丰富,是地震与洪水灾害的双重多发区,在结构全寿命周期内,洪水出现的频率远高于地震,地震前后短期内发生洪水的可能性较大,两种灾害更符合后一种相继发生的定义,即地震与洪水的持续影响效应对结构安全构成了严重威胁。由于灾害程度受致灾因子危险性和承灾体易损性两方面影响,在进行地震-洪水

灾害分析时,不仅需要分析地震与洪水危险性,还需要考虑结构易损性的动态变化,而传统的工程结构设计方法中,往往仅针对地震或洪水作用进行独立验算,极少考虑地震与洪水接续作用,设计的结构偏于不安全。因此,开展地震与洪水作用下工程结构风险分析与抗多灾设计研究,是提升我国自然灾害防治能力的迫切需要。

目前,地震与洪水作用下结构全寿命设计方法的理论框架尚未完全建立,对于地震与洪水的联合致灾机理没有给予足够关注,特别是如何识别二者之间的相关关系,以及如何构建联合概率分布模型;对于地震-洪水灾害的具体表现形式也缺乏全面概括,结构抗多灾设计的目标及实现方式还不够清晰。对已有相关研究成果进行系统梳理,可为地震与洪水作用下结构风险分析与抗多灾设计提供具有普适性的研究框架,对提升工程结构的综合防灾减灾能力具有重要意义。

1 历史数据统计与分析

我国地震与洪水灾害频发且分布较广,地震多发区集中于西南、西北、华北及台湾地区,洪灾主要分布于东南沿海、长江中下游以及西南地区。特殊的地理位置使得我国西南特别是川滇地区成为地震与洪水灾害的双频发地区。历史上曾有很多地震伴随雨涝及地震引发次生水灾而形成多灾害的现象^[5-10],见表1。

从我国水文区划来看,部分地区属于丰水带和多水带^[11],雨季长、降水多、洪水多发。如果地震发生时正值雨季,发震前后遇到洪水的可能性较大。图1给出了川滇地区近30年间(1990~2019)破坏性地震($M \geq 4.5$ 级)的时空分布^[12],通过统计分析可以

表1 地震伴随雨涝及地震引发次生水灾

Table 1 Earthquake accompanied with waterlogging and earthquake triggering flooding

日期	地震	雨涝及次生水灾记录
1668.07.25	山东郯城 8.5 级	地震后连降大雨,“震后大雨五十余日,城内大水行舟”
1786.06.01	四川康定 7.5 级	“山崩后,壅塞泸河……泸水忽决,高数十丈,一涌而下”
1830.06.12	河北磁县 7.5 级	地震前降水不断,“四月大雨连旬,河水暴涨”
1933.08.25	四川叠溪 7.5 级	地震诱发滑坡与崩塌,堵塞岷江形成 10 多处堰塞湖,淹没岷江上游地区;地震发生后 45 天,余震引发坝体崩溃,对下游地区造成毁灭性破坏
1959.08.17	美国蒙大拿州 7.3 级	地震诱发赫布根湖下游山体发生滑坡崩塌,堵塞麦迪逊河,形成深 58 m 的堰塞湖
1960.05.22	智利 9.5 级	地震引发特拉孔山滑坡,堵塞里尼韦湖,蓄水后水位上涨,对下游地区构成威胁
2008.05.12	四川汶川 8.0 级	地震后形成 33 处堰塞湖,北川多个乡镇被堰塞湖淹没;同年四川省洪涝灾害造成 3.7 万间房屋倒塌,直接经济损失 37 亿元
2013.04.20	四川芦山 7.0 级	同年 7 月,雅安、绵阳等 12 市出现暴雨,引发洪涝灾害,直接经济损失 71.92 亿元
2014.08.03	云南鲁甸 6.5 级	地震后形成红石岩堰塞湖,淹没田地千余亩;同年云南省共发生洪涝灾害 223 次,直接经济损失 23.6 亿元

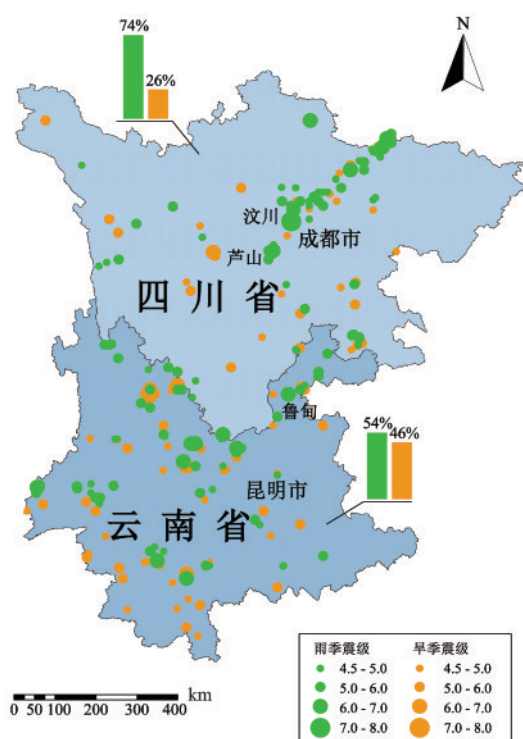


图1 1990—2019年川滇地区地震时空分布

Fig.1 Spatial and temporal distribution of earthquake in Sichuan and Yunnan from 1990 to 2019

看出:发生在雨季的地震占一半以上,地震与洪水伴随发生的概率较高。汶川、芦山及鲁甸地震均发生于雨季,图2所示为地震发生前后20天内各震中区域逐日降水量随时间的变化规律^[13],发震前后均出现中雨以上量级(≥ 10 mm)降水。鲁甸地震发生前20天内震中区域累计降水量和历年同期的降水数据如图3所示,可见发震年降水量与历年平均降

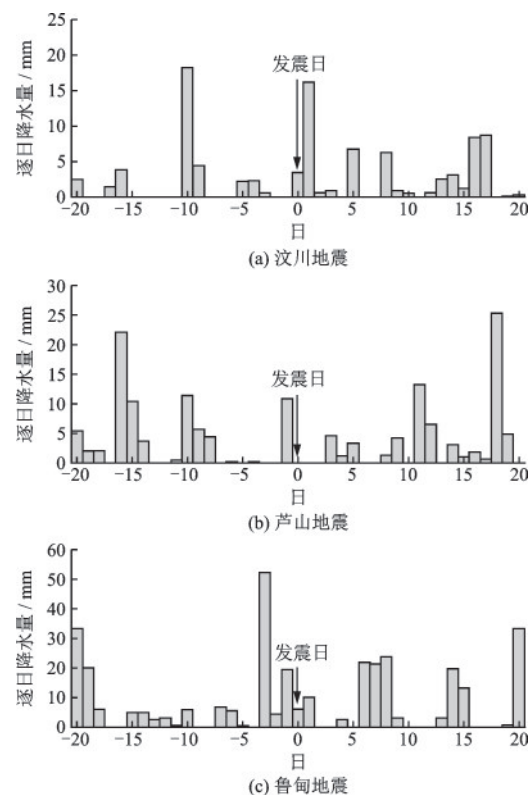


图2 3次地震事件发生前后20天内逐日降水量的时间分布
Fig.2 Temporal distribution of daily rainfall within 20 days before and after the three earthquake events

水量相比,偏高约83%,表明地震与降水及由降水引发的洪水之间存在显著关联。

此外,西部山区地势崎岖,山高谷深,强烈地震后易形成堰塞湖,溃决后引发洪水,极端条件下次生水灾的致灾危险性不亚于地震,如汶川地震后形成的唐家山堰塞湖,最大库容达3.2亿立方米,对下

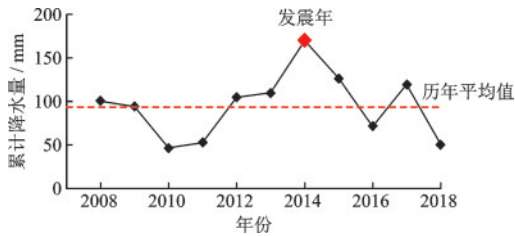


图3 鲁甸地震发生前20天内累计降水量及历年同期值
Fig.3 Total rainfall in 20 days before Ludian earthquake and corresponding period value

游地区的威胁极大。

通过以上数据统计分析可以看出,在地震与洪水灾害的双频发地区,地震前后短期内发生洪水的可能性较大,两者之间相互关联所形成的灾害放大效应需要考虑。

2 地震与洪水危险性分析

厘清地震与洪水危险性,揭示地震与洪水联合成灾机制,可科学地确定结构全寿命服役期内可能遭受的不同强度地震与洪水作用的联合概率分布。

2.1 联合致灾机理

已有研究通常依据致灾机理将多灾害分为并行和链式两类^[14-15],并从不同角度对多灾害类型进行了定义。其中,并行灾害^[16]和灾害遭遇^[17]被描述为“一种灾害导致另一种灾害状态改变”的现象;灾害链^[18]和连锁反应^[19]被描述为“一种灾害引发另一种灾害”的现象。

根据洪水成因条件,本文将地震-洪水灾害划分为地震伴随暴雨洪水、地震引发溃坝洪水两类。暴雨洪水是由较大强度的降雨形成的,主要出现在雨季,是发生频率最高、影响范围最广的洪水;溃坝洪水是蓄水坝体突然溃决而引发的洪水,因地震堰塞湖瞬时崩溃而形成的洪水也被称为溃坝洪水。

地震伴随暴雨洪水发生属于并行灾害,地震与暴雨洪水之间并没有直接的因果关系,但地震过程中释放的水汽会增加雨季降水量,进而加重或引发暴雨洪水,导致暴雨洪水的强度与频次增大。气象学研究揭示了地震与暴雨洪水的联合成灾机制,强祖基等^[20]通过卫星热红外图像观测到地震发生前,震中附近区域热辐射温度升高,地壳释放携热水汽易形成降水。王涌泉等^[21]对12次西江洪水前期的地震进行了详细考证,认为地震发生后,地下水汽

沿地表断裂带向空中释放,强化了雨季降水,而强降水是引发暴雨洪水的最主要因素,由此揭示了地震对暴雨洪水状态的影响。

地震引发溃坝洪水为典型的灾害链效应,强烈地震诱发大量山体滑坡,滑坡体堵塞河道形成堰塞湖,蓄水后引发溃决,形成溃坝洪水,导致灾害的数量及影响范围增大。国内外学者从地质学和水力学的角度对地震-滑坡-堰塞湖-溃坝洪水灾害链的具体演化过程进行了分析。陈晓利等^[22]基于汶川地震滑坡的分布规律进行了分析,认为地震强度、斜坡坡度及地层岩性会影响地震滑坡的形成。陈语等^[23]依据滑坡堵江的特征,提出堰塞湖的形成与滑坡体积、滑动速度及距离密切相关。J. E. Costa等^[24]对国外73处堰塞湖崩溃进行了统计分析,发现约50%的堰塞湖在形成后10天内发生溃决,溃决的主要形式为漫顶溢流。在溃坝洪水致灾特征方面,F. G. Yang等^[25]通过模型试验研究了唐家山堰塞湖溃坝水流的冲刷特性。胡桂胜等^[26]以宗渠堰塞湖为例,采用模型试验观测了坝口下游水位及流量变化,分析了漫顶溃坝洪水动态演进过程。

可见,地震与洪水并发或链发会增大致灾综合强度,若忽略它们之间的相关关系,会低估其危险性。

2.2 灾害概率模型

2.2.1 地震概率模型

地震概率模型是对不同强度地震的概率分布进行预测。C. A. Cornell^[27]于1968年率先提出了地震危险性概率分析方法,假定震级-频度分布服从G-R模型^[28],将地震的发生看作随机事件,并假定其服从均匀Poisson分布,在 t 年内发生 n 次地震的概率为:

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中, λ 为地震年平均发生率,可根据地震活动性资料确定。结合地震动参数和烈度随震级的衰减关系,即可获得地震动参数和烈度的超越概率。

在缺乏地震活动性资料的情况下,国外学者广泛采用年平均超越概率 ν 与地震动参数 IM 的幂律关系式来表征地震危险性^[29-30],即:

$$\nu(IM) = k_0 \cdot IM^{-k} \quad (2)$$

式中, k_0 和 k 为形状参数,可通过50年超越概率10%和2%的地震动参数来确定。

《建筑抗震设计规范》^[31]明确规定了我国主要

城镇抗震设防烈度取值。高小旺等^[32]对我国华北、西北、西南三个地区45个城镇进行了地震危险性分析,认为极值Ⅲ型分布对地震烈度的拟合程度最好,表示为:

$$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{\omega - x}{\omega - \varepsilon}\right)^k\right] \quad (3)$$

式中, x 为地震烈度; ω 为烈度上限值12度; ε 为众值烈度; k 为形状参数,可通过设防烈度来确定。

2.2.2 洪水概率模型

洪水概率模型是根据水文观测资料建立水文变量与发生概率之间的统计关系。在暴雨洪水方面,随着水文站网的逐步建设,我国积累了较为丰富的水位、流量等数据资料,为各流域暴雨洪水危险性评估发挥了重要作用。在暴雨洪水概率分析中,我国普遍采用Pearson-Ⅲ型分布模型^[33],其概率密度函数表示为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-\alpha_0)} \quad (4)$$

式中, α 、 β 、 α_0 分别为形状参数、尺度参数和位置参数。

在溃坝洪水方面,崔鹏等^[34]通过卫星遥感和实地考察,收集了汶川地震诱发的33处堰塞湖的基本信息,包括堰塞坝几何尺寸及堰塞湖库容。石振明等^[35]以鲁甸地震后形成的红石岩堰塞湖为例,基于坝型参数及河道地形数据,模拟了溃坝洪水的演进过程,计算出溃坝洪水的峰值流量。目前溃坝洪水的概率模型较为匮乏,已有的关于地震堰塞湖信息获取、溃坝洪水预测分析的研究^[36]为溃坝洪水危险性评估提供了良好的理论基础,但结合统计方法建立溃坝洪水概率模型有待深入研究。此外,洪水水深、流速等水文资料也较为匮乏,在洪水多发区实测数据的采集方面还需进一步完善。

2.2.3 地震与洪水联合概率模型

国内外现行的工程设计规范往往采用荷载组合模型来预测多灾害事件的发生,常用的荷载组合模型有Turkstra组合模型^[37]和Ferry-Borges组合模型^[38]。这些荷载组合模型虽然简单实用,但忽略了不同灾害之间的相关性,且不适用于非荷载形式的灾害作用,而建立联合分布模型是从概率统计层面上分析地震-洪水灾害危险性的基础。

目前,多维极值理论与Copula理论已被广泛应用于描述并行灾害的联合概率分布^[39-40]。多维极值分布要求各变量服从同类型的边缘分布,只能表达

变量间的线性相关关系。Copula分布不限制变量边缘分布的类型,且可以描述变量间的非线性相关关系,适用范围更为广泛。吕光辉^[41]基于四川地区近50年间的42次地震-暴雨洪水灾害事件,利用AHM Copula函数描述地震与暴雨洪水之间的相关性,构建了地震峰值加速度和累计降水量的联合概率分布,并获得其同现重现期,为四川地区抗多灾设防提供了参考依据。但目前地震与暴雨洪水实测数据较为匮乏,造成已有的地震与暴雨洪水联合分布模型还缺少进一步的验证与完善。

对于地震-滑坡-堰塞湖-溃坝洪水灾害链危险性评估的研究多集中于定性描述^[42],少数研究分析了灾害链中某一节点的触发概率,如刘甲美等^[43]依据Newmark模型分析了地震诱发滑坡的条件概率。刘洋等^[44]基于FTA模型推导了堰塞湖溃决的情景概率。因地震和溃坝洪水联合概率分布模型较为匮乏,上述研究通过物理模型和数学模型对灾害链中某一节点的演化过程进行了模拟,为地震-溃坝洪水灾害的危险性分析提供了重要的理论依据,但结合统计方法分析完整的链式过程,获得该灾害链中所有次生灾害受原生灾害影响的致灾强度及发生概率有待深入研究。

3 承灾体易损性分析

3.1 灾害作用

3.1.1 地震作用

地震是地壳运动引发的自然现象,工程设计中认为地震是一种能够使结构产生效应的作用,可基于简化方法计算地震作用效应。如对于地上结构,可将地震作用等效为惯性力,采用加速度或荷载形式施加到结构上;对于地下结构,由于其地震反应主要受周围土层变形所控制,可将地震作用简化为强制位移施加于结构上,因这方面研究成果相对成熟,本文不再赘述。

3.1.2 洪水作用

按照洪水过程的作用时段及特点,可将洪水对工程结构的作用形式分为冲击、水动力、冲刷和浸泡四种。国内外学者围绕工程结构的水毁破坏形式开展了相关研究。

(1)冲击作用。溃坝洪水侵袭时,结构遭受猛烈的瞬时冲击。王晓庆^[45]基于圣维南方程组提出了洪水演进数学模型,并在此基础上推导了洪水冲

击荷载的计算公式,冲击荷载的大小与上游水位、距溃口距离相关。肖诗云等^[46]通过模型试验研究了迎流墙面冲击压力的大小及分布规律,结果表明冲击压力可达14 kPa,最大冲击压力出现在墙体的最底部。孙云飞^[47]将洪水冲击作用简化为静力荷载,基于砌体结构的分离式数值模型研究了溃坝洪水的冲击效应,结果表明洪水冲击作用下墙体的门窗洞口处最先发生破坏。

(2)水流力作用。暴雨洪水来袭时,水流力作用导致的结构损毁不容小觑。我国现行《洪泛区和蓄滞洪区建筑工程技术标准》^[48]中给出了洪水水流荷载的计算方法,水流荷载的大小与墙面开洞率、洪水流速相关。于文等^[49]通过水槽试验研究了迎流墙面水流荷载的大小及分布规律,试验结果表明,水流荷载随墙体开洞率的增大而减小,水流压力随墙体高度的增大而减小。

(3)冲刷作用。冲刷是造成洪水多发区工程结构,特别是桥梁结构垮塌的主要原因,据统计,超过50%的桥梁毁坏是由洪水冲刷所致^[50]。在冲刷深度研究方面,B. W. Melville等^[51-52]提出了桥墩局部冲刷深度的计算公式,并研究了冲刷深度随时间的变化规律。FEMA修正了CSU对桥墩冲刷深度的计算,并在此基础上提出了建筑物墙角处地基冲刷深度的计算方法^[53]。在试验研究方面,Y. N. Kishore等^[54]通过模型试验研究了洪水冲刷对桥梁桩基水平承载性能的影响,结果表明冲刷造成桩基埋深减小,导致桩基水平承载能力下降。孙永梅^[55]通过模型试验观测了砌体房屋在洪水冲刷作用下的破坏过程,结果表明随着水深和流速的增大,地基土的流失越来越严重,最终地基局部淘空,模型随之破坏。在数值模型方面,梁锴等^[56]通过改变支承方式,模拟了桥墩底部遭受洪水冲刷局部淘空的现象。刘兵等^[57]采用弹簧单元模拟土体对桥梁桩基的侧向支撑作用,基于 p - y 曲线定义土弹簧刚度,并通过移除冲刷深度范围内的土弹簧模拟了冲刷效应。

(4)浸泡作用。洪水浸泡引起的结构毁坏分为两种类型,一种是洪水浸泡作用下材料力学性能劣化引起的结构破坏,生土墙体在洪水浸泡下软化而丧失承载力,粘土砂浆在洪水浸泡下强度和粘结力大幅下降。王莉等^[58]研究了砂浆和砖块受水浸泡后的力学性能,结果表明粘土白灰砂浆浸泡后性能劣化严重,抗压强度降低约38%、抗剪强度降低约

50%,相比于砂浆,砖块性能变化较小,强度降低约5%。陈红^[59]对比研究了受水浸泡砖砌体在风干和潮湿状态下的力学性能,结果表明受水浸泡的混合砂浆和砖块风干后强度有所回升,但仍低于未浸泡时的强度;而受水浸泡的石灰砂浆,当风干时间足够长时其强度可以完全恢复。另一种是洪水浸泡作用下地基土承载力下降,产生不均匀沉降引起的结构破坏,对含水率变化较为敏感的地基土,如膨胀土,在洪水浸泡下承载力会显著下降^[60]。

目前,洪水冲刷对工程结构作用机理及作用效应的研究相对成熟,在洪水冲击及水流力作用方面,主要是通过模型试验分析冲击荷载及水流荷载特性,数值分析方法存在一定的局限性,在洪水浸泡作用方面,主要关注的是材料及地基浸泡后的性能退化,结构整体性能影响方面的研究相对较少。

3.1.3 地震与洪水接续作用

地震与洪水在短期内相继发生,会对结构产生持续性作用效应,由于洪灾破坏类型、地震与洪水发生先后次序的不同,结构在全寿命周期内遭受的地震-洪水灾害的表现形式也具有多样性。国内外学者针对不同表现形式开展了相关研究。

(1)地震-洪水冲击/水流力接续作用。当地震后伴随暴雨洪水或地震引发溃坝洪水时,地震中损伤的结构来不及修复,洪水冲击与水流力作用会对结构造成二次损伤。李臣勋^[61]以山区梁式桥为研究对象,基于数值模拟研究了桥梁结构在地震-洪水水流力接续作用下的破坏机理,结果表明结构在强震下发生弹塑性变形,当再次遭受水流力作用时,结构响应大于地震和洪水单独作用时结构响应的总和,墩顶位移增幅超出一倍。P. A. Korswagen等^[62]针对砌体结构房屋,分析了砌体砖墙在地震-洪水水流力接续作用下的损伤累积,结果表明地震作用造成墙体开裂受损,导致墙体在后续水流力作用下失效概率显著增大,尤其是严重损伤状态的失效概率。

(2)洪水冲刷-地震接续作用。当地震前短期内发生暴雨洪水时,洪水冲刷作用造成结构基础裸露,导致结构动力特性发生变化,进而降低了结构抵御后续地震作用的能力。商宇等^[63]通过振动台试验研究了洪水冲刷对桥梁地震响应的影响,结果表明随着冲刷深度的增大,结构刚度减小,自振周期增大,易损部位从桥墩转移至桩基。吕光辉等^[64]考虑了土-基础相互作用,基于数值模拟研究了洪水

冲刷-地震接续作用下砌体结构的动力响应,结果表明洪水冲刷减弱了土体对基础的约束作用,导致结构响应及失效概率增大。

(3)洪水冲击/水流力/浸泡-地震接续作用。当发震前伴随有暴雨洪水时,洪水冲击与水流力作用造成结构损伤,洪水浸泡作用引起结构性能退化,将导致结构在后续地震作用下更易于损毁。目前,关于此类问题的研究十分有限,然而大量的实地调研与试验研究^[65-66]已经查明了结构水毁破坏机理,洪水冲击与水流力作用造成桥梁桥台、建筑墙体等构件开裂,洪水浸泡作用导致砌体、砂浆等材料劣化及地基破坏,洪水冲击、水流力及浸泡作用引起的结构损伤与性能退化,会造成结构在后续地震作用下的动力响应呈现放大效应。

可见地震与洪水接续作用分析更为复杂,并不能作为地震和洪水单独作用效应的简单叠加。一方面,地震与洪水对结构的作用效应是完全不同的,分析模型必须能够同时反映地震与洪水的作用机理;另一方面,对于接连发生的地震与洪水,分析时须考虑先发灾害作用效应对后发灾害作用效应的影响,这也造成了分析方法的显著差异,如对于地震-洪水冲击接续作用须考虑地震作用下结构抗力的退化,之后在震损结构上施加洪水冲击荷载;对于洪水冲刷-地震接续作用分析,数值模型不仅要反映结构的动力特性,还需要考虑地基土对基础的侧向约束作用以模拟洪水冲刷的影响。此外,地震与洪水接续作用效应与灾害发生的间隔时间也密切相关,对于洪水浸泡-地震接续作用问题,洪水和地震的间隔时间越长,意味着风干时间越长,材料力学性能与结构抗震性能将逐渐恢复,间隔时间对地震与洪水接续作用效应影响的量化也需进一步深入研究。

3.2 结构易损性分析

3.2.1 地震灾害易损性

地震易损性分析是对结构在地震作用下的损伤程度进行评估,表示为在不同强度地震作用下结构发生不同程度损伤的概率。常用的地震易损性分析方法包括经验分析方法和理论分析方法。经验分析方法依据历史震害调查资料,结合专家经验来评估工程结构的地震易损性,能够较为真实地反映群体结构的抗震性能,但仅适用于具有丰富震害资料的地区。N. Basoz等^[67]和M. Shinozuka等^[68]分

别基于美国北岭地震和日本神户地震的桥梁震害数据,建立了桥梁结构的经验易损性曲线。

在缺少震害资料的情况下,通常采用理论分析方法建立单体结构的地震易损性曲线。易损性理论分析方法由抗震需求分析和抗震能力分析两部分构成,抗震需求分析是指基于地震反应计算,建立结构的抗震需求参数与地震动参数之间的定量关系,C. A. Cornell等^[30]建议结构的抗震需求 S_D 与地震动强度 IM 之间服从如下关系:

$$S_D = aIM^b \quad (5)$$

式中, a 、 b 为回归系数。抗震能力分析是指依据结构损伤准则,选取性能指标对结构损伤极限状态进行合理量化,以确定结构的抗震能力 S_C 。在给定的地震作用下,结构失效概率即为抗震需求超过抗震能力的概率,通常认为结构的抗震需求和能力均服从对数正态分布,易损性函数可表示为:

$$P_f = P[S_D \geq S_C | IM] = \Phi \left[\frac{\ln S_D - \ln S_C}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (6)$$

式中, Φ 为标准正态分布函数; S_D 和 β_D 分别为抗震需求的均值和对数标准差; S_C 和 β_C 分别为抗震能力的均值和对数标准差。

基于上述理论,建立地震强度与结构各级损伤状态之间的对应关系,获得结构在不同损伤状态下的地震易损性曲线。

3.2.2 洪水灾害易损性

洪灾易损性分析是对不同强度洪水作用下结构遭受的损伤程度进行评估。目前多数研究以区域为研究对象分析了洪水灾害的经济易损性,以反映洪灾发生在该区域时可能造成的经济损失,如S. Das等^[69]提出了洪水变量与洪灾损失的关系曲线,由淹没水深可直接估算区域洪灾经济损失。D. I. Smith等^[70]根据历史洪灾调查数据,针对区域内各类结构,建立了其基于淹没水深和历时的洪灾损失率曲线,基于洪灾损失率可计算出区域经济损失^[71]为:

$$S_D = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \beta_{ijk}(h, t) V_{ijk} \quad (7)$$

式中, N 为分区数; M 为分区内结构类别; L 为洪水等级; β 为洪灾损失率; V 为结构价值。

也有学者研究了单体结构在洪水作用下的失效概率,如彭子祥^[72]借鉴了地震易损性的分析思路,以遭受洪水冲刷及水流力作用的桥梁结构为研究对象,分析了结构的抗洪需求与抗洪能力,并假

设抗洪需求和能力均服从对数正态分布,进而计算桥梁结构在不同冲刷深度条件下,遭受给定流速洪水时的失效概率为:

$$P_f = P[S_D \geq S_C | H] = \Phi \left[\frac{\ln S_D - \ln S_C}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (8)$$

式中, S_D 和 β_D 分别为抗洪需求的均值和对数标准差; S_C 和 β_C 分别为抗洪能力的均值和对数标准差; H 为冲刷深度。通过与洪灾实际情况对比,验证了将理论分析易损性方法应用于桥梁结构抗洪性能评估的可行性。目前针对单体结构的洪灾易损性研究相对匮乏,对于洪水冲击、浸泡等作用形式下各类工程结构的易损性分析,有待进一步深入探讨。

3.2.3 地震-洪水灾害易损性

易损性曲线已被广泛应用于结构抗震安全性能评估,有学者在建立地震易损性曲线时考虑了洪水冲刷对结构动力特性的影响,如Y. Dong等^[73]对比分析了桥梁结构在洪水冲刷前后的地震易损性,结果表明,洪水冲刷导致结构的地震易损性增大,当地震峰值加速度达到0.5g时,结构在未冲刷条件下超过中等损伤状态的概率为0.48,在冲刷条件下该概率增大为0.56。梁发云等^[74]研究了桥梁桩基在不同冲刷深度下的地震易损性,结果表明桥梁桩基的失效概率随着冲刷深度的增大而大幅增大,当地震峰值加速度为0.6g时,桩基在未冲刷条件下发生轻微损伤的超越概率为0.03,而在2 m冲刷深度条件下,该概率增大为0.47。

由于易损性曲线只能反映给定冲刷条件下地震强度对结构失效概率的影响,国内外学者将易损性曲线扩展为易损性曲面,以表示结构在不同强度洪水冲刷-地震接续作用下的失效概率^[64,75]。Z. Q. Wang等^[76]将洪水冲刷深度划分为若干等级,逐级增加冲刷深度,循环计算得到桥墩和桩基在不同冲刷深度下的地震易损性曲线,再将其延伸为易损性曲面,结果表明,在未冲刷情况下桥墩的失效概率远大于桩基的失效概率,随着冲刷深度的增大,桩基的失效概率大幅增加,超出了桥墩的失效概率,结构的失效模式由此发生了变迁。Z. Wang等^[77]采用多项式对桥梁结构的抗震需求进行修正,提出洪水冲刷-地震接续作用下结构的联合需求模型,表示为:

$$S_D = aIM^b(1 + cH + dH^2) \quad (9)$$

式中, IM 为地震强度; H 为洪水冲刷深度; a 、 b 、 c 、 d 为回归系数。在此基础上计算洪水冲刷-地震接续

作用下的结构易损性,表达式为:

$$P_f = P[S_D \geq S_C | H, IM] = \Phi \left[\frac{\ln S_D - \ln S_C}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (10)$$

式中, S_D 和 β_D 分别为结构联合需求的均值和对数标准差; S_C 和 β_C 分别为结构抗力的均值和对数标准差。同理,在对结构开展地震-洪水冲击接续作用、洪水冲刷-地震接续作用下的易损性评价时,可基于式(10)采用相应的联合需求模型进行计算。

综上所述,与地震或洪水灾害易损性分析相比,地震-洪水灾害易损性分析的关键在于明确地震与洪水接续作用下的结构性能评价指标,并建立结构的联合需求模型。

4 结构抗多灾设计与风险评估

4.1 风险评估

致灾因子在一定的孕灾环境下作用于承灾体而形成灾害,综合考虑致灾因子危险性与承灾体易损性,可对结构全寿命周期灾害风险进行评估^[78]。目前,地震和洪水灾害的风险评估已取得较为丰富的研究成果,J. H. Danumah等^[79]综合考虑洪灾危险性与易损性,基于层次分析法绘制了洪水风险地图。张云霞^[80]在地震易损性分析的基础上考虑地震作用的随机性,引入地震危险性函数,计算给定冲刷深度下桥梁结构发生某一等级损伤的地震风险概率为:

$$MAFP_h = \int_{im=0}^{\infty} F(im) f_{IM}(im) dim \quad (11)$$

式中, $F(im)$ 为给定冲刷深度下桥梁结构的地震易损性函数; $f_{IM}(im)$ 为地震作用的概率密度函数。结果表明桥梁结构的地震风险概率基本随着冲刷深度的增大而增大。

随着灾害风险研究的不断深入,国内外学者开始关注地震与洪水接续作用下工程结构失效风险,S. A. Banerjee等^[81]建立了桥梁结构在洪水冲刷-地震接续作用下全寿命周期损失成本模型,表示为:

$$C_{Rm} = \sum_k p_m(DS=k) Cr_k \quad (12)$$

式中, $p_m(DS=k)$ 为给定冲刷深度下桥梁的地震易损性函数,表示第 k 个损伤状态下桥梁的条件失效概率; C 为桥梁的重建费用; r_k 为第 k 个损伤状态对应的损失比。基于地震危险性分析结果,并结合式(12),可建立给定冲刷深度下桥梁结构的地震风险

曲线,获得不同损失成本的超越概率。G. G. Prasad等^[82]对比分析了桥梁结构在地震单独作用及洪水冲刷-地震接续作用下的损失成本,结果表明,在未冲刷条件下桥梁结构的地震损失成本达到50万美元的概率为0.055,当冲刷深度为3 m时,该概率增加至0.1,近似增大一倍。Z. Wang等^[77]在式(11)的基础上考虑洪水冲刷的不确定性,引入洪水冲刷危险性函数,提出了洪水冲刷-地震接续作用下桥梁结构全寿命周期风险概率计算方法,表示为:

$$JMAFP = \int_{im=0}^{\infty} \int_{h=0}^{\infty} F(im, h) f_{IM}(im) f_H(h) dimdh \quad (13)$$

式中, $F(im, h)$ 为洪水冲刷-地震接续作用下桥梁结构的易损性曲面函数; $f_{IM}(im)$ 为地震作用的概率密度函数; $f_H(h)$ 为洪水冲刷作用的概率密度函数。吕光辉等^[64]以二层砌体房屋为研究对象,分析了结构在洪水冲刷-地震接续作用下的风险概率,结果表明与地震单独作用相比,结构倒塌风险概率增加了45.4%,洪水冲刷对结构风险评估的影响不可忽略。

地震与洪水接续作用下结构全寿命风险评估主要针对洪水冲刷-地震接续作用问题,为地震-洪水灾害的其他表现形式研究提供了可借鉴的思路。与地震单独作用相比,地震与洪水接续作用下结构全寿命周期损失成本和风险概率显著增大,风险评估结果对于地震与洪水双重多发区既有结构的修复加固与重建决策具有重要意义。

4.2 全寿命抗多灾设计

在工程结构全寿命周期内,地震与洪水作用均是与时间相关的随机过程,二者以最大值在短期内相继出现的概率极低。因此,如果同时取地震与洪水作用的最大值作为设防参数,被认为偏于保守。为了合理考虑地震与洪水接续作用的设计值,国内外学者基于概率理论引入组合系数,建立了结构全寿命抗多灾设计框架。如A. Alipour等^[83]依据目标可靠指标确定了组合系数的取值,首先通过下式计算桥梁结构在洪水冲刷-地震接续作用下的联合失效概率:

$$(P_1)_{ijk} = P(SC_i)P(EQ_j)P(DK_k) \quad (14)$$

式中, $P(SC_i)$ 为某一冲刷深度的发生概率; $P(EQ_j)$ 为某一地震强度的发生概率; $P(DK_k)$ 为某一损伤状态下桥梁结构的条件失效概率。基于式(14)计算出设防地震(重现期475年的地震)作用下桥梁结构的联合失效概率,将其与目标可靠指标对应的失效

概率对比,获得对应的合理冲刷深度 H_r , 组合系数取值为

$$\gamma = \frac{H_r}{H_d} \quad (15)$$

式中, H_d 为设防洪水(重现期100年的洪水)条件下的冲刷深度。此外,周救等^[84]基于风险一致原则确定了组合系数的取值,首先基于式(11)计算出不同冲刷深度下桥梁结构的地震风险概率,再依据式(13)获得联合风险概率,通过对比确定合理冲刷深度的取值,再基于式(15)计算出组合系数为0.795。结果表明,对于地震和洪水灾害双重多发区的桥梁结构,如果在百年一遇洪水冲刷条件下进行结构抗震设计,结果将偏于保守。

上述研究综合考虑了地震-洪水灾害危险性和易损性,依据概率理论获得地震与洪水接续作用下结构全寿命周期失效风险,实现了对结构抗多灾性能的准确评估;基于风险思想确定了洪水作用的组合系数,合理提出了基于全寿命周期的结构抗多灾设防标准。尽管已有研究考虑了地震与洪水接续作用对结构易损性的影响,然而在地震-洪水灾害危险性分析方面,常假设结构服役期间地震与洪水灾害相互独立,以单一灾害发生概率的乘积作为其联合发生概率,未充分考虑二者之间的相关关系对风险概率及设防参数的影响,后续研究可结合地震与洪水联合分布模型进一步完善。

5 结 论

本文对地震与洪水作用模型和结构抗多灾设计理论的研究进展进行了总结与分析,揭示了地震伴随暴雨洪水、地震引发溃坝洪水两类多灾害的联合致灾机理,概述了地震与洪水危险性概率分析方法,详细介绍了地震与洪水作用下结构响应分析及易损性分析的研究现状,并总结了地震与洪水作用下结构全寿命风险分析与抗多灾设计方法,得到以下结论:

(1)已有历史数据和致灾机理分析表明,地震与洪水在短期内相继发生形成多灾害的可能性较大,地震与洪水间的相关性致使致灾综合强度增大,地震与洪水并发或链发对灾害危险性评估的影响不容忽视。

(2)地震与洪水接续作用效应远大于两种灾害单独作用效应的简单加和,有必要考虑地震与洪水

接续作用下结构抗灾性能退化。与地震或洪水单独作用相比,结构在地震与洪水接续作用下的损失成本与风险概率显著增大,对于地震与洪水双重多发区的工程结构全寿命设计,须考虑地震与洪水接续作用下结构抗多灾性能,明确地震与洪水作用联合概率模型。

(3)开展地震与洪水灾害数据的监测与统计工作,完善地震与洪水灾害联合分布模型,基于数值分析方法对结构抗多灾性能做进一步研究,对于地震与洪水作用下结构全寿命抗多灾设计理论的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] Kameshwar S, Padgett J E. Multi-hazard risk assessment of highway bridges subjected to earthquake and hurricane hazards[J].Engineering Structures, 2014, 78(1): 154-166.
- [2] Park S, Lindt J W V D, Cox D, et al. Successive earthquake-tsunami analysis to develop collapse fragilities[J].Journal of Earthquake Engineering, 2012, 16(5-6): 851-863.
- [3] 蔡鉴明.地震灾害应急物流时变性及可靠性相关问题研究[D].长沙:中南大学,2012.
Cui J M. Research on the emergency logistics considering the reliability and time-varying in the earthquake disasters[D].Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [4] 万新宇,王光谦.近60年中国典型洪水灾害与防洪减灾对策[J].人民黄河,2011,33(8):1-4.
Wan X Y, Wang G Q. Typical flood disasters during last sixty years and strategies of flood control and disaster mitigation in China[J].Yellow River, 2011, 33(8): 1-4. (in Chinese)
- [5] 周魁一,苏克忠,贾振文,等.十四世纪以来我国地震次生水灾的研究[J].自然灾害学报,1992,1(3):83-91.
Zhou K Y, Su K Z, Jia Z W, et al. Study on the secondary flood disasters caused by strong earthquakes since the 14th century in China[J].Journal of Natural Disasters, 1992, 1(3): 83-91. (in Chinese)
- [6] 苏刚,胡维民,付彬,等.强震前后短期内的异常天气及灾害叠加[J].灾害学,1997,12(1):34-37.
Su G, Hu W M, Fu B, et al. Superposition of abnormal weather and disasters occurring shortly before and after strong earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 1997, 12(1): 34-37. (in Chinese)
- [7] 徐方军,韩丽宇.部分国家和地区地震诱发堰塞湖及其抢险概况[J].水利发展研究,2008,8(6):7-9.
Xu F J, Han L Y. Earthquake-induced barrier lake and rescue overview in some countries and regions[J].Water Resources Development Research, 2008, 8(6): 7-9. (in Chinese)
- [8] 闫淑春.2008年全国洪涝灾情[J].中国防汛抗旱,2009,19(1):60-67.
Yan S C. National flood disaster in 2008 [J]. China Flood & Drought Management, 2009, 19(1): 60-67. (in Chinese)
- [9] 宋连春.中国气象灾害年鉴(2014)[M].北京:气象出版社,2015.
Song L C. China meteorological disaster yearbook (2014) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015. (in Chinese)
- [10] 宋连春.中国气象灾害年鉴(2015)[M].北京:气象出版社,2016.
Song L C. China meteorological disaster yearbook (2015) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016. (in Chinese)
- [11] 熊怡.中国水文区划[M].北京:科学出版社,1995.
Xiong Y. China hydrology regionalization[M].Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
- [12] 国家地震科学数据中心 [EB/OL]. [http://data.earthquake.cn] National Earthquake Data Center of China [EB/OL]. [http://data.earthquake.cn]
- [13] 中国气象数据网[EB/OL]. [http://data.cma.cn] Meteorological Data Service Center of China [EB/OL]. [http://data.cma.cn]
- [14] Kappes M S, Keiler M, Elverfeldt K V, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review[J].Natural Hazards, 2012, 64(2): 1925-1958.
- [15] Li Y, Ahuja A, Padgett J E. Review of methods to assess, design for, and mitigate multiple hazards[J].Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(1): 104-117.
- [16] 汪嘉俊,翁文国.多灾种概念辨析及灾害事故关系研究综述[J].中国安全生产科学技术,2019,15(11):57-64.
Wang J J, Weng W G. Discrimination on concept of multi-hazard and review of research on relationship between disasters and accidents[J].Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(11): 57-64. (in Chinese)
- [17] 史培军,吕丽莉,汪明,等.灾害系统:灾害群、灾害链、灾害遭遇[J].自然灾害学报,2014,23(6):1-12.
Shi P J, Lyu L L, Wang M, et al. Disaster system: di-

- saster cluster, disaster chain and disaster compound[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 1-12. (in Chinese)
- [18] 郭增建,秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987, 2(2): 25-33.
Guo Z J, Qin B Y. Brief discussion on disaster physics [J]. Journal of Catastrophology, 1987, 2(2): 25-33. (in Chinese)
- [19] Petrini 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(IABMAS 2012). London: Taylor and Francis Group, 2012: 2040-2047.
- [20] 强祖基,马嵩乃,曾佐勋,等. 卫星热红外地震短临预测方法研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 254-262.
Qiang Z J, Ma A N, Zeng Z X, et al. A study of the method of satellite thermal infrared earthquake prediction in imminence[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(5): 254-262. (in Chinese)
- [21] 王涌泉,侯琴. 震洪灾害链——近500年西江特大洪水前期地震考证[C]//2010天灾预测总结学术研讨会论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2010: 69-74.
Wang Y Q, Hou Q. Earthquake and flood disaster chain—a textual research on the pre-earthquake of Xijiang floods[C]//Proceedings of the 2010 Academic Conference on Natural Disaster Prediction. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2010: 69-74. (in Chinese)
- [22] 陈晓利,邓俭良,冉洪流. 汶川地震滑坡崩塌的空间分布特征[J]. 地震地质, 2011, 33(1): 191-202.
Chen X L, Deng J L, Ran H L. Analysis of landslides triggered by Wenchuan earthquake [J]. Seismology and Geology, 2011, 33(1): 191-202. (in Chinese)
- [23] 陈语,李天斌,魏永幸,等. 沟谷型滑坡灾害链成灾机制及堵江危险性判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 4073-4081.
Chen Y, Li T B, Wei Y X, et al. Mechanism of gorge-type landslide disaster chain and its hazard evaluation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup2): 4073-4081. (in Chinese)
- [24] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams[J]. GSA Bulletin, 1988, 100(7): 1054-1068.
- [25] Yang F G, Zhou X Q, Liu X N, et al. Experimental study of breach growth processes in sand dams of quake lakes[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2012, 5(5): 445-459.
- [26] 胡桂胜,陈宁生,邓明枫,等. 茂县宗渠堰塞湖漫顶溃决洪水演进规律模型试验研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 172-176.
Hu G S, Chen N S, Deng M F, et al. Model experiment study of evolution of overtopping outburst flood for Zongqu landslide lake in Mao County [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 172-176. (in Chinese)
- [27] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Ssmological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [28] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Nature, 1944, 34(4): 185-188.
- [29] Kennedy R C, Short S A. Basis for seismic provisions of DOE-STD-1020 [R]. Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1994.
- [30] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526-533.
- [31] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [32] 高小旺,鲍霁斌. 地震作用的概率模型及其统计参数[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(1): 13-22.
Gao X W, Bao A B. Probabilistic model and statistical parameters for seismic load[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1985, 5(1): 13-22. (in Chinese)
- [33] 郭生练,刘章君,熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314.
Guo S L, Liu Z J, Xiong L H. Advances and assessment on design flood estimation methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314. (in Chinese)
- [34] 崔鹏,韩用顺,陈晓清. 汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 35-42.
Cui P, Han Y S, Chen X Q. Distribution and risk analysis of dammed lakes reduced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 35-42. (in Chinese)
- [35] 石振明,熊永峰,彭铭,等. 堰塞湖溃坝快速定量风险评估方法——以2014年鲁甸地震形成的红石岩堰塞湖为例[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 742-751.
Shi Z M, Xiong Y F, Peng M, et al. An efficient risk assessment method for landslide dam breach: Taking the Hongshiyuan Landslide Dam formed by the 2014 Ludian Earthquake as an example[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 742-751. (in Chinese)

- [36] 黄艳, 马强, 吴家阳, 等. 堰塞湖信息获取与溃坝洪水预测[J]. 人民长江, 2019, 50(4): 12-19.
Huang Y, Ma Q, Wu J Y, et al. Dammed lake information acquisition and dam breaking flood forecasting [J]. Yangtze River, 2019, 50(4): 12-19. (in Chinese)
- [37] Turkstra C, Madsen H O. Load combinations in codified structural design[J]. Journal of the Structural Division, Proc, ASCE, 1980, 106(12): 2527-2543.
- [38] Borges J F, Castanheta M. Structural safety [M]. Paris: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1971.
- [39] 陈立华, 吕淑婷, 黄荣华, 等. 钦州市台风影响下风雨联合概率分布模型研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 1184-1194.
Chen L H, Lyu S T, Huang R H, et al. Research on the probability distribution model of wind and rain under typhoon influence in Qinzhou City [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(4): 1184-1194. (in Chinese)
- [40] Yang X Ch, Zhang Q H. Joint probability distribution of winds and waves from wave simulation of 20 years (1989-2008) in Bohai Bay[J]. Water and Engineering, 2013(3): 296-307.
- [41] 吕光辉. 洪水和地震联合作用下村镇砌体结构的失效风险评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Lyu G H. Failure risk assessment of masonry structures in villages and towns under the combined action of flood and earthquake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [42] 乔路, 杨兴国, 周宏伟, 等. 模糊层次分析法的堰塞湖危险度判定——以杨家沟堰塞湖危险度综合评价为例[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 51-53.
Qiao L, Yang X G, Zhou H W, et al. Decision of risk degrees of dammed lakes using fuzzy analytic hierarchy process[J]. Yangtze River, 2009, 40(22): 51-53. (in Chinese)
- [43] 刘甲美, 高孟潭, 吴树仁. 概率性地震滑坡危险性区划方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增1): 3100-3110.
Liu J M, Gao M T, Wu S R. Probabilistic seismic landslide hazard zonation method and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup1): 3100-3110. (in Chinese)
- [44] 刘洋, 樊治平, 尤天慧, 等. 基于故障树分析的堰塞湖溃坝概率估计方法[J]. 运筹与管理, 2017, 26(7): 138-146.
Liu Y, Fan Z P, You T H, et al. A FTA-based method for estimating the failure probability of barrier lake dam [J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(7): 138-146. (in Chinese)
- [45] 王晓庆. 洪水演进模型及冲击荷载研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
Wang X Q. Study on routing model and impact loading of flood[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [46] 肖诗云, 岳斌, 杨留娟, 等. 不同水头高度洪水冲击乡村建筑模型试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(5): 696-700.
Xiao S Y, Yue B, Yang L J, et al. Model experimental study of impact of flood with different heights of water on rural buildings [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(5): 696-700. (in Chinese)
- [47] 孙云飞. 山区乡村建筑洪水冲击破坏数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
Sun Y F. Numerical simulation study on mountain rural buildings due to flood impact[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [48] 洪泛区和蓄滞洪区建筑工程技术标准: GB/T50181—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [49] 于文, 葛学礼, 朱立新, 等. 山区乡村房屋模型水流作用试验[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(1): 24-27.
Yu W, Ge X L, Zhu L X, et al. Simulated experimental study on model of buildings in mountain area under flow action [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(1): 24-27. (in Chinese)
- [50] Lagasse P F, Clopper P E, Zevenbergen L W, et al. National cooperative highway research program (NCHRP report 593): countermeasures to protect bridge piers from Scour[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2007.
- [51] Melville B W, Sutherland A J. Design method for local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(10): 1210-1226.
- [52] Melville B W, Chiew Y M. Time scale for local scour at bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(1): 59-65.
- [53] Nadal N C, Zapata R E, Pagán I, et al. Building damage due to riverine and coastal floods[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2010, 136(3): 327-336.
- [54] Kishore Y N, Rao S N, Mani J S. The behavior of laterally loaded piles subjected to scour in marine environment[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2009, 13(6): 403-408.
- [55] 孙永梅. 村镇建筑抗洪性能试验研究及数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
Sun Y M. Experimental study and numerical simulation

- of rural buildings under flood actions [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012. (in Chinese)
- [56] 梁锴,方理刚,段靓靓.冲刷对桥墩稳定性影响的有限元分析[J].岩土力学,2006,27(9):1643-1645.
Liang K, Fang L G, Duan L L. Finite element analysis of influence of scour on stability of piers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1643-1645. (in Chinese)
- [57] 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)
- [58] 王莉,赵考重,孙晓波.砖砌体材料受水浸泡后的性能试验研究[J].山东建筑工程学院学报,1997,12(1):59-61.
Wang L, Zhao K Z, Sun X B. Experimenton performances of soaking brick masonry [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 1997, 12(1): 59-61. (in Chinese)
- [59] 陈红.受浸泡砖砌体力学性能及加固修复方法的研究[D].南京:东南大学,2015.
Chen H. Research on mechanical properties and repaired method of soaked masonry [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [60] 缪林昌,仲晓晨,殷宗泽.膨胀土的强度与含水量的关系[J].岩土力学,1999,20(2):71-75.
Miao L C, Zhong X C, Yin Z Z. The relationship between strength and water content of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 71-75. (in Chinese)
- [61] 李臣勋.山区梁式桥灾害接续作用机理研究[D].绵阳:西南科技大学,2018.
Li C X. Study on the mechanism of mountain girder bridge under sequence disasters [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [62] Korswagen P A, Jonkman S N, Terwel K C. Probabilistic assessment of structural damage from coupled multi-hazards [J]. Structural Safety, 2019, 76: 135-148.
- [63] 商宇,叶爱君,王晓伟.冲刷条件下的桩基桥梁振动台试验[J].中国公路学报,2017,30(12):280-289.
Shang Y, Ye A J, Wang X W. Shake table test of pile supported bridge under scour condition [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 280-289. (in Chinese)
- [64] 吕光辉,李钢,董志骞,等.洪水冲刷和地震联合作用下砌体结构的失效风险评估[J/OL].防灾减灾工程学报:1-9[2021-03-05].https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.201910025.
Lyu G H, Li G, Dong Z Q, et al. Failure risk assessment of masonry structures under flood scouring and earthquakes [J/OL]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering: 1-9 [2021-03-05]. https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.201910025. (in Chinese)
- [65] 于文,葛学礼,朱立新.山区乡村房屋抗洪技术研究[C]//第一届全国村镇综合防灾与绿色建筑技术研讨会论文集.厦门:中国建筑协会,2013:211-217.
Yu W, Ge X L, Zhu L X. Study on flood resistance technology of rural buildings in mountain area [C]//Proceedings of the First National Seminar on Comprehensive Disaster Prevention and Green Building Technology for Villages and Towns. Xiamen: China Construction Industry Construction, 2013: 211-217. (in Chinese)
- [66] 葛学礼,朱立新,李永红,等.自然灾害对村镇建筑的破坏与防御[J].中国减灾,2001,11(1):38-42.
Ge X L, Zhu L X, Li Y H, et al. Destruction of natural disaster to rural buildings and some measures to defense [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2001, 11(1): 38-42. (in Chinese)
- [67] Basoz N, Kiremidjian A S. Risk assessment of bridges and highway systems from the Northridge earthquake [C]//Proceedings of the national seismic conference on bridges and highways. Sacramento, California: California Department of Transportation, 1997.
- [68] Shinozuka M, Feng M Q, Lee J, et al. Statistical analysis of fragility curves [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1224-1231.
- [69] Das S, Lee R. A non-traditional methodology for flood stage-damage calculations [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1988, 24(6): 1263-1272.
- [70] Smith D I. Flood damage estimation - A review of urban stage-damage curves and loss functions [J]. Water S A, 1994, 20(3): 231-238.
- [71] 王宝华,付强,谢永刚,等.国内外洪水灾害经济损失评估方法综述[J].灾害学,2007,22(3):95-99.
Wang B H, Fu Q, Xie Y G, et al. A review on evaluation method of economic loss of flood in the world [J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(3): 95-99. (in Chinese)
- [72] 彭子祥.洪水环境下群桩基础桥梁易损性分析与评估[D].成都:西南交通大学,2017.
Peng Z X. Fragility analysis and assessment for bridge

- supported on pile-group foundations under flood condition [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [73] Dong Y, Frangopol D M, Saydam D. Time-variant sustainability assessment of seismically vulnerable bridges subjected to multiple hazards [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(10): 1451-1467.
- [74] 梁发云, 刘兵, 李静茹. 考虑冲刷作用效应桥梁桩基地震易损性分析 [J]. *地震工程学报*, 2017, 39(1): 13-19.
Liang F Y, Liu B, Li J R. Seismic fragility analysis of bridge pile foundation considering scour effect [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(1): 13-19. (in Chinese)
- [75] 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)
- [76] Wang Z Q, Song W, Li T T. Combined fragility surface analysis of earthquake and scour hazards for bridge [C] // *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal: [s. n.], 2012: 24-28.
- [77] Wang Z, Padgett J E, Duenas-Osorio L. Risk-consistent calibration of load factors for the design of reinforced concrete bridges under the combined effects of earthquake and scour hazards [J]. *Engineering Structures*, 2014, 79(15): 86-95.
- [78] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践 [J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(5): 1-9.
- Shi P J. Theory and practice on disaster system research in a fifth time [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(5): 1-9. (in Chinese)
- [79] Danumah J H, Odai S N, Saley B M, et al. Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (cote d'ivoire) [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2016, 3(1): 10.
- [80] 张云霞. 冲刷环境下连续梁桥的地震易损性分析 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
Zhang Y X. Seismic fragility analysis of continuous girder bridges under scour condition [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese)
- [81] Banerjee S A, Prasad G G. Seismic risk assessment of reinforced concrete bridges in flood-prone regions [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 9(9): 1-17.
- [82] Prasad G G, Banerjee S A. The impact of flood-induced scour on seismic fragility characteristics of bridges [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2013, 17(5-6): 803-828.
- [83] Alipour A, Shafei B, Shinozuka M. Reliability-based calibration of load and resistance factors for design of RC bridges under multiple extreme events: scour and earthquake [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(5): 362-371.
- [84] 周敕, 赵威, 石雄伟, 等. 高烈度软土地场地桥梁地震与冲刷联合作用效应研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(8): 88-98.
Zhou M, Zhao W, Shi X W, et al. A study on combined effect of earthquake and scour of bridge in high earthquake-intensity and soft soil site [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(8): 88-98. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)