

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211129002

台风-风暴潮下海南地区砌体房屋物理脆弱性分析*

赵开鹏^{1,2}, 李碧雄^{2,3}, 吴德民^{2,3}, 胡相鑫^{2,3}

(1. 四川大学-香港理工大学灾后重建与管理学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘要: 海南省是我国台风登陆数量最多的省份之一。台风不仅直接对房屋建筑造成严重破坏,还可能造成海面上涨引发风暴潮灾害,房屋在两种耦合灾害下易造成更加严重的损失。为探究台风-风暴潮作用下房屋的物理脆弱性,对海南省遭受台风灾害最严重的东海岸村镇砌体房屋进行了调研。首先基于受灾房屋资料的分析,确定了砌体房屋的建造特征和主要的破坏模式,并以风速和潮水淹没深度表征灾害强度,随后基于力学性能分析了砌体房屋的台风物理脆弱性,基于蒙特卡洛模拟建立了台风与台风风暴潮灾害之间的内在关系,基于定额清单法建立了台风-台风风暴潮灾害作用下房屋经济损失的计算方法。结果表明,砌体房屋在台风-风暴潮灾害下屋盖和墙体破坏严重,其中台风经济损失占主要部分,台风-风暴潮经济脆弱性曲线呈两段屈服平台分布。通过该地区砌体民房物理脆弱性分析,旨在为沿海地区防灾减灾工作提供一定的参考。

关键词: 台风; 风暴潮; 物理脆弱性; 经济脆弱性; 蒙特卡洛模拟; 砌体房屋

中图分类号: TU241.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0330-10

Analysis of Physical Vulnerability of Masonry Houses in Hainan Area under Typhoon-storm Surge

ZHAO Kaipeng^{1,2}, LI Bixiong^{2,3}, WU Demin^{2,3}, HU Xiangxin^{2,3}

(1. Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University-The Hong Kong Polytechnic University, Chengdu 610065, China; 2. Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Surrounded by the sea, Hainan is one of the provinces with the largest number of typhoon landing. Typhoon not only directly causes serious damage to houses and buildings, but also may cause sea level rise and storm surge disaster. Houses are prone to serious losses under this coupling disaster. In order to explore the physical vulnerability of houses under the action of typhoon storm surge, the masonry houses in villages on the east coast in Hainan Province were investigated. Firstly, based on the analysis of the data from the affected houses, the construction characteristics and main failure modes of masonry houses are determined, and the disaster intensity is characterized by wind speed and tide inundation depth. Then, the typhoon physical vulnerability of masonry houses is analyzed based on mechanical properties, and the internal relationship between typhoon and typhoon storm surge di-

* 收稿日期:2021-11-29;修回日期:2021-12-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508802)资助

作者简介:赵开鹏(1997—),男,硕士研究生。主要从事防灾减灾方面的研究。E-mail:2470404318@qq.com

saster is established using Monte Carlo simulation. Based on the quota list method, the calculation method of housing economic loss under the action of typhoon storm surge disaster is established. Results show that the roof and wall of masonry buildings are seriously damaged during typhoon storm surge disaster, in which the typhoon economic loss accounts for the main part. The typhoon storm surge economic vulnerability curve illustrates a two-stage yield platform. Through the physical vulnerability analysis of masonry civil houses in this area, this paper aims to provide some reference for disaster prevention and reduction in coastal areas.

Keywords: typhoon; storm surge; physical vulnerability; economic vulnerability; Monte Carlo simulation; masonry house

引言

中国海南省频繁遭受台风灾害,台风引起的风暴潮加重了损失程度。据统计^[1],自1982年以来,海南省台风和暴雨灾害所造成直接经济损失大约以每10年增加18.86亿元的速率在增加,仅2016年一年,海南省台风和风暴潮灾害造成房屋受损约一万间,受灾人口高达456.5万人次,造成直接经济损失就高达76.7亿元。历史灾害数据表明^[2],海南东海岸是海南省受台风灾害影响最为严重的地区,1949~2017年登陆海南东海岸的台风数量占全省73%,该地区大量房屋采用当地传统方式建造,抵抗台风和风暴潮灾害的能力有限。由于房屋建筑的物理脆弱性与建筑风貌、结构特征等密切相关,故有必要针对该地区房屋特点,进行台风-风暴潮灾害链下该类房屋的物理脆弱性分析。

目前国内外有关台风、风暴潮和台风-风暴潮灾害下房屋建筑物理脆弱性研究,主要包括构件、单体房屋和区域建筑群体等三个层面,大都围绕以下几方面:①基于历史数据研究两种灾害的时空变化规律^[3]及房屋整体的物理脆弱性^[4];②从成灾机理研究两个灾种之间的内在关系^[5]或耦合模型^[6];③从房屋构件层面研究承载体的致灾过程和物理脆弱性^[7];④探讨防灾减灾策略^[8]。极少从单体房屋的致灾机理来分析遭遇台风-风暴潮灾害时房屋整体的物理脆弱性,也未查阅到针对海南地区民房物理脆弱性研究成果。

已有的有关台风、风暴潮、台风-风暴潮下房屋建筑的物理脆弱性研究方法主要有蒙特卡洛模拟^[9-10]、GIS技术^[11]、数理统计分析^[4]以及数值模拟^[12]等。M. Baradaranshoraka等^[13]基于各灾害峰

值强度的时间次序用HAZUS-MH模型提出了一种评估多灾种脆弱性的方法,但是HAZUS-MH分析方法是基于GIS技术和灾害统计分析结果,其在单体房屋的脆弱性分析上有一定局限性;H. Massomi等^[14]基于统计分析和数值模型分析了多灾种台风-风暴潮作用下单体木结构建筑的脆弱性,采用了承载体“损害分配方法”,即将屋架结构破坏归因于台风,而地板和墙壁破坏则为风暴潮所致,并根据构件损伤情况划分房屋破坏状态,脆弱性考虑为达到各破坏状态时所对应的条件概率曲面。目前台风-风暴潮灾害脆弱性研究多侧重于灾害事件本身,对承载体的脆弱性分析相对较少。

本文针对海南地区传统砌体民房的建筑结构特点,通过分析台风和风暴潮下砌体民房脆弱性形成机制,基于力学性能和概率可靠度,对整体房屋在台风-风暴潮灾害遭遇下的脆弱性进行研究,服务于该地区民房减灾和风险管理,也为多灾种物理脆弱性的定量分析探索研究方法。

1 台风-风暴潮下砌体民房脆弱性形成机制

根据历史灾害资料^[15],台风直接作用下,屋盖体系和砌体墙是砌体结构房屋受损最严重的部位,在地势较低的地区,房屋还容易受到台风-风暴潮冲击和淹没的影响。砌体结构的脆弱性程度与房屋建造特征、建造材料及建筑物内部的家具用品等密切相关。

1.1 海南地区砌体结构房屋特征

现场调研发现,鉴于当地自然地理条件、历史建筑文化传统以及建筑材料生产条件,海南地区砌

体结构房屋主要有以下特征。

海南东海岸砌体结构民房屋面形式一般采用小青瓦双坡屋面。如图1所示,檩搁于砌体墙上,椽上架瓦,椽上布置小青瓦,有时会用混凝土或砂浆来加强檩与支承墙体间的联系。该种屋面体系中瓦片与屋架构件联系较弱,抗风能力较差。

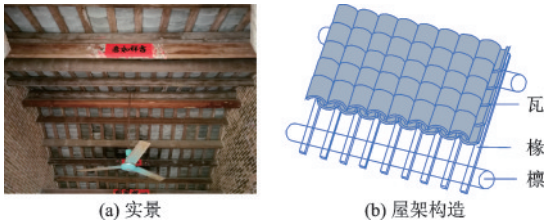


图1 砌体屋架结构

Fig.1 Structure diagram of masonry roof truss

民房体型通常比较规则,纵向较长,常见的长度有9 m、12 m,横向通常为—间房间的进深。主要采用石材、烧结砖砌筑,其中烧结砖应用最为广泛。除了标准尺寸(240 mm×115 mm×53 mm)的烧结砖,海南地区还会使用一种尺寸为240 mm×115 mm×25 mm的非标准砖,考虑隔热需求,常采用空斗砌筑方式(图2),空斗砌体的抗压、抗剪、抗拉能力均非常有限。



图2 砌体房屋砌体墙空心砌筑方式

Fig.2 Hollow constructed wall in masonry house

1.2 台风灾害中的民房受损特征及成害机制

1.2.1 屋盖体系破坏特点及原因分析

民房的屋盖一般自重较小,瓦片与椽的连接弱,强风中瓦片部分或全部刮落是屋面体系的主要破坏特征。台风“威马逊”发生时,由于屋檐区域、屋脊、屋面侧边和转角等几何突变处存在高压,瓦片被掀起,部分房屋屋面瓦片全部刮落,檩条和椽木基本完好,如图3(a)所示。强风下屋面各部分风压体型系数不同,故会存在部分屋面瓦片刮落的破坏现象,如图3(b)所示。



(a) 瓦片全部刮落(来源: blog.sina.com.cn) (b) 瓦片部分刮落

图3 “威马逊”台风灾后屋面破坏

Fig.3 Roof damage after the "Ramason" disaster

1.2.2 砌体墙的破坏特点及原因分析

砌体墙迎风面所受风荷载较大,其破坏成为砖砌房屋破坏的主要形式之一。“威马逊”台风导致墙体破坏显著,如图4所示。无论是实心墙还是空斗墙,由于砂浆与块体的界面是其受力薄弱面,大体都呈沿阶梯形灰缝发生破坏,导致部分倒塌,考虑到竖向灰缝的填实度低,砌体的抗力主要来自水平灰缝。



图4 “威马逊”台风灾后墙体破坏^①

Fig.4 Wall destruction after the "Ramason" disaster

1.2.3 台风-风暴潮成害机制

风暴潮是由于强风或风压骤变导致的大气剧烈扰动,引起海面异常升高或降低的现象。台风-风暴潮在海岸表现为风暴潮增水、潮位升高,一方面,海水在台风作用下冲击海岸建筑,导致建筑直接受损;另一方面,海水灌进或淹没房屋,造成房屋内部装修、家具、家电等受损,海水淹没深度越高,建筑经济损失越大。考虑到临河、临海建筑的实际情况,本文仅考虑后一种情况。

2 台风-风暴潮下砌体民房脆弱性分析

已有的研究表明^[4, 9, 11, 13],基于概率可靠度的方法能够实现台风和台风-风暴潮的脆弱性分析,故本文先考虑采用基于概率的蒙特卡洛模拟方法分析下台风典型砌体民房的物理脆弱性,每次计算模拟次数为750次,使其计算结果更逼近实际值。

^①该图源自新华社发布的蒙钟德拍摄作品

2.1 台风物理脆弱性分析

2.1.1 屋面损伤判定及失效数量

如上所述,台风造成的灾损主要是屋面瓦片刮落和墙体倒塌。钟兴春等^[10]认为,屋面不同区域承受风压作用不同,故将屋面划分为A、B、C和D 4个区域,每个区域又划分为数个屋面单元,如图5所示。每个屋面单元的可靠度功能函数可以用式(1)表示:

$$Z = R - S \quad (1)$$

式中, R 为结构抗力; S 为风荷载效应。当 $Z < 0$ 时,屋面单元内瓦片脱落失效;当 $Z \geq 0$,屋面单元内屋面材料安全可靠。

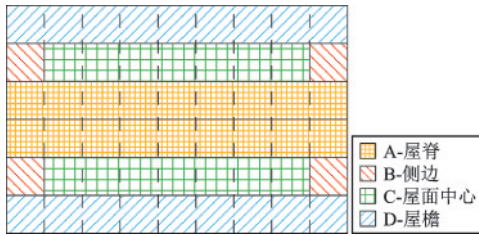


图5 双坡屋面单元划分

Fig.5 The division of double-slope roof units

单位面积小青瓦屋面的抗力按式(2)计算:

$$R = \gamma_{\text{小青瓦}} \lambda \cos \alpha \quad (2)$$

式中, $\gamma_{\text{小青瓦}}$ 为当地小青瓦屋面容重(kN/m^2),视为服从正态分布的随机变量; λ 为屋面抗力增大系数。

垂直于屋面的风荷载平均值根据《建筑结构荷载规范》^[16](下文中简称为荷载规范)中相关规定来计算,即单位面积上风荷载产生荷载效应 S :

$$S = w_m = \beta_{gz} \mu_{sl} \mu_z \frac{v^2}{1600} \quad (3)$$

式中, β_{gz} 为高度 z 处的阵风系数; μ_{sl} 为局部风压体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; v 为离地10 m高、10 min平均风速(m/s),根据实际离地面高度参照荷载规范^[16]取插值。需说明的是,在台风作用下,屋面的部分瓦片出现损坏,房屋成为“半封闭”状态,屋面局部风压体型系数骤变,此时参考已有实验结果和荷载规范^[16]对其取值。

式(1)作为判定每个屋面单元在一定风速下失效与否的标准,基于蒙特卡洛模拟,可得到每个屋面单元的失效概率,也可统计出整个屋面中屋面单元的失效数量 n 。根据屋面单元的失效数量划分整

体屋面的破坏等级,基于蒙特卡洛模拟所构建的样本库,可得到一定风速下各破坏等级的超越概率,进而绘制屋面的易损性曲线。

2.1.2 墙体失效判定方法

台风灾害下砌体墙破坏主要表现为沿灰缝发生平面外弯曲破坏,结构抗力受控于沿砂浆水平通缝截面的抗弯能力。当风荷载作用下在墙体中产生的荷载效应 S_w (弯矩值)超过墙体的抗力 R_w (抗弯承载力),即判定为墙体失效,如式(4)所示。

$$Z_w = R_w - S_w \quad (4)$$

对于海南地区使用较多的无眠空斗砌体墙,在垂直于墙面的台风作用下,若忽略其自重,不计入截面中间部位对抗弯的贡献,无眠空斗墙结构抗力可用式(5)计算:

$$R_w = \left(bc(h - 2c) + \frac{4bc^3}{3h} \right) \times \left(\frac{3a}{2a + 2c} \gamma_{\text{砌体}} H + f_{\text{砌体},m} \right) \quad (5)$$

式中, b 为单位墙宽; h 为墙厚; $\gamma_{\text{砌体}}$ 为砌体容重; H 为计算截面以上砌体的高度; $f_{\text{砌体},m}$ 为砌体弯曲抗拉强度平均值; a 为砌块长度; c 为砌块厚度。

风荷载在墙体内产生的最大弯矩按一边固定、两边简支、一边自由的双向板跨内弯矩来确定,即按式(6)计算:

$$S_w = \frac{\alpha \beta_{gz} \mu_s \mu_z v^2 l_x^2}{1600} \quad (6)$$

式中, S_w 为砌体墙墙体所受风荷载,取 M_y^0 值; α 为弯矩系数; l_x 为取墙宽; μ_s 为风荷载体型系数; β_{gz} 为高度 z 处阵风系数,取墙高的一半。

2.1.3 房屋整体物理脆弱性分析

(1) 破坏等级的划分和描述

为了描述砌体结构台风灾害下的受损程度,结合砌体墙和屋盖破坏情况对砌体结构房屋的破坏等级进行分类,见表1。对不同破坏程度下的破坏等级划分,进而计算不同破坏等级下砌体结构房屋的脆弱性。

(2) 蒙特卡洛模拟

依照上述方法,对海南地区典型砌体结构房屋进行模拟计算,如图6所示,屋面为村镇地区最常见的小青瓦,屋面坡度 30° 。墙体采用海南东海岸常见空心砌筑方式,墙体厚度为240 mm,窗洞尺寸为 $600 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,门洞高度为整个砌体墙的高度,门洞上方没有砌块。地面粗糙度为B类。

表1 砌体结构房屋破坏等级划分

Table 1 Classification of damage levels of masonry structure houses

砌体结构房屋破坏等级	屋面单元失效数量 n	砌体墙失效数量
轻微破坏	1	0
中等破坏	2~11(5%~20%)	0
严重破坏	12~27(20%~50%)	0
完全破坏	>27(50%)	0
结构倒塌	—	≥ 1

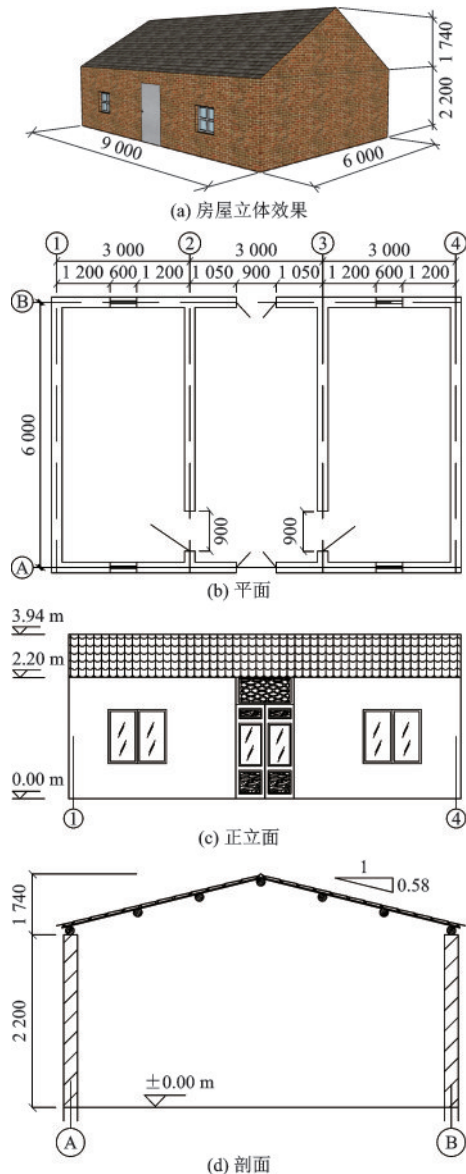


图6 典型砌体结构尺寸

Fig.6 Typical masonry structure size

各相关参数的取值为:屋面按坡度 30° 考虑,其抗力增大系数取 $1.2^{[10]}$;小青瓦屋面容重取

0.9 kN/m^2 ,变异系数取0.2;砌体墙容重按照荷载规范^[16]取值,变异系数按文献[10]取值;砌体弯曲抗拉强度平均值根据《砌体结构设计规范》^[17]计算取值,变异系数按文献[18]取值;弯矩系数按文献[19]插值计算取值;按照荷载规范^[16]取离地面高度5 m处阵风系数均值 $\bar{\beta}_{gz}^{5} = 1.88$,离地面高度10 m处阵风系数 $\bar{\beta}_{gz}^{10} = 1.78$,计算时根据实际的离地面高度采用线性插值,变异系数参考文献[10]取为0.22;风荷载体型系数按照荷载规范^[16]取值,变异系数参照文献[20]取值。结构屋面不同区域的局部风压体型系数不同,采用荷载规范^[16]规定的局部风压体型系数:屋脊和屋面周边(A和B区域)局部风压体型系数取为-2.2;屋檐、雨棚等突出构件(D区域)局部风压体型系数取为-2.0。屋面中心区域(C区域)按照文献[10]取为-1.2,局部风压体型系数变异系数参照文献[20]取值。风压高度变化系数 μ_z ,按照荷载规范^[16]按A类粗糙度离地面高小于5 m,取值为1.17。最终参数取值见表2。

特定风速下,经750次模拟后,可得750个屋面单元失效数量 n ,按表1所划分的破坏等级统计各等级下模拟次数所占比例,即为该风速下屋面各破坏等级的破坏概率。同理,750次模拟中砌体墙失效数量 ≥ 1 所占比例即为该风速下结构倒塌的概率。

根据采用蒙特卡洛模拟分析的计算结果,拟合可得易损性曲线如图7所示。

从图7可看出,以屋面单元失效数量作为易损性评价依据的4条曲线超越概率随台风风速呈“S”型增长,符合易损性曲线的增长趋势。以墙体倒塌作为评价依据的结构倒塌曲线,上升趋势与前者有显著差异,这与实际情况相符。通过易损性曲线的构建,既能直观体现台风风速增长对房屋的破坏趋势,也能得出特定风速下房屋的各破坏等级的概率,为台风经济损失计算提供基础。

2.2 台风-风暴潮的内在关系

综合风暴潮成害机制和文献[21]对台风-风暴潮等级及灾情的定量分析表明,台风-风暴潮增水高度最能反映台风风暴潮灾害下的灾害特征,故本文以淹没深度(即风暴潮高度与室内地面海拔高度之差)为风暴潮灾害强度指标。

基于文献[22]给出的台风风暴潮高度、台风中心气压差、台风最大风速、台风最大风速半径和海

表2 砌体结构脆弱性蒙特卡洛模拟参数

Table 2 Monte Carlo simulation parameters for vulnerability of masonry structure

变量名称	符号表示	单位	概率分布	平均值	变异系数
屋面坡度	α	$^{\circ}$	常数	30°	—
屋面抗力增大系数	λ	—	常数	$1.2^{[10]}$	—
小青瓦屋面容重	$\gamma_{\text{小青瓦}}$	$(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	正态分布	$0.9^{[16]}$	0.2
单位墙宽	b	m	常数	1	—
墙厚	h	m	常数	0.24	—
墙宽	l_x	m	常数	按具体墙宽确定	—
砌体容重	$\gamma_{\text{砌体}}$	$(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	正态分布	18	$0.20^{[10]}$
计算截面以上砌体的高度	H	m	常数	取墙高	—
砌体弯曲抗拉强度平均值	$f_{\text{tm},\text{m}}$	MPa	正态分布	0.34	$0.20^{[18]}$
弯矩系数	α	—	常数	参考文献[19]取值	—
高度 z 处的阵风系数	β_{gz}	—	正态分布	1.90~1.94	$0.22^{[10]}$
风荷载体型系数	μ_s	—	正态分布	查表确定	$0.12^{[20]}$
局部风压体型系数	μ_{sl}	—	正态分布	根据区域确定	$0.12^{[20]}$
风压高度变化系数	μ_z	—	常数	1.17	—
离地 10 m 高、10 min 平均风速	ν	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	—	—	—

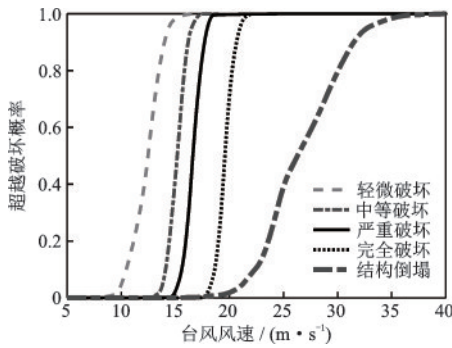


图7 最不利环境下砌体结构房屋易损性曲线

Fig.7 Fragility curve of masonry structure houses under the most unfavorable environment

岸岸坡关系模型,见下式:

$$\sqrt{\hat{\xi}} = \left[\sqrt{\widehat{R_{\max}}} \quad 1 \right] \left\{ C(S_0) \begin{bmatrix} \widehat{\Delta P^2} \\ \widehat{\Delta P} \\ 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (7)$$

$$\hat{\xi} = \frac{\zeta g}{V_{\max}^2} \quad (8)$$

$$\widehat{\Delta P} = \frac{\Delta P}{p_{\text{atm}}} \quad (9)$$

$$\widehat{R_{\max}} = \frac{R_{\max} g}{V_{\max}^2} \quad (10)$$

式中, $\hat{\xi}$ 为与台风风暴潮高度相关的无量纲的量; $\widehat{R_{\max}}$ 为与台风最大风速半径相关的无量纲的量; $C(S_0)$ 为与海岸岸坡相关的 2×3 拟合系数矩阵; $\widehat{\Delta P}$ 为与台风中心气压差相关的无量纲的量; ζ 为台风

风暴潮高度(m); V_{\max} 为台风最大风速(m/s); g 为重力加速度(m/s^2); ΔP 为台风中心气压差(hPa); p_{atm} 为标准大气压(hPa); R_{\max} 为台风最大风速半径(km)。

统计分析中国气象局热带气旋资料网 1980~2016 年登陆海南省的台风资料^[23]发现,台风最大风速与台风中心气压差线性相关性很高,可用式(11)来表示:

$$\Delta P = 1.5V_{\max} - 7.22 \quad (11)$$

式中, ΔP 为台风中心气压差(hPa); V_{\max} 为台风最大风速(m/s)。

提取最大风速半径数据,使用 MATLAB 进行对数正态分布拟合,结果显示:95% 置信区间内,均值上下限差值小于 0.01,方差下限为 0.26,由此推断台风最大风速半径具有较显著的对数正态分布特性。采用蒙特卡洛模拟方法计算台风风暴潮灾害,台风中心气压差变异系数、台风最大风速半径平均值和变异系数均根据 1980~2016 年登陆海南省的台风资料计算得到,标准大气压和重力加速度均参照当地标准取值,各参数取值见表 3。以部分岸坡为例取系数矩阵,计算结果取台风风暴潮高度最大值,如图 8 所示。

由图 8 可知,当台风风速不超过 30 m/s 时,风暴潮高度上升平缓且 3 种岸坡下并无显著差异;当台风风速超过 30 m/s 时,曲线上升趋势增大,客观上

表3 台风风暴潮蒙特卡洛模拟参数的取值

Table 3 Monte Carlo simulation parameters for typhoon storm surge

变量名称	变量符号	单位	概率分布	平均值	变异系数
台风中心气压差	ΔP	hPa	正态分布	按式(11)计算	0.29
重力加速度	g	($m \cdot s^{-2}$)	常数	9.806	—
标准大气压	p_{atm}	hPa	常数	1 013.25	—
台风最大风速半径	R_{max}	km	对数正态分布	108.10	0.05
系数矩阵	$C(S_0)$	—	系数矩阵	文献[22]	—
台风风暴潮高度	ζ	m	—	—	—

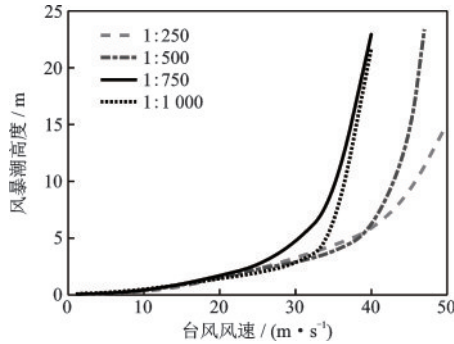


图8 台风-风暴潮内在关系曲线

Fig.8 Internal relation curves of typhoon storm surge

与沿海地区台风风暴潮灾害特征相符。风暴潮高度作为灾害强度的过渡性指标是进行经济损失计算的关键,并且构建台风风速-风暴潮高度对应关系曲线在一定条件下是可行的,最终可达到以台风风速表征灾害链强度计算经济损失的目的。

2.3 台风-风暴潮经济脆弱性分析

建筑单体因灾造成的建筑经济损失可用于表征建筑的物理脆弱性。计算灾后建筑经济损失,常采用的方法有定额清单法和智能化预测方法。本文采用定额清单法计算单体房屋灾后损失。

2.3.1 台风经济脆弱性

在前文对房屋不同物理破坏程度进行分类与量化的基础上,通过调查海南地区房屋的修缮措施,确定每一级破坏状态的修缮成本,结合达到每一级破坏状态的超越概率以计算房屋台风平均经济损失。

因此,在给定风速 v 台风作用下,砌体结构房屋平均经济损失可用式(12)计算:

$$V_A = (p_1 - p_2)V_1 + (p_2 - p_3)V_2 + (p_3 - p_4)V_3 + (p_4 - p_5)V_4 + p_5V_5 \quad (12)$$

式中, V_A 为风速 v 台风作用下对砌体结构房屋平均

经济损失; p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 分别表示风速 v 作用下砌体结构达轻微破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏和倒塌破坏的超越概率; $V_i (i=1\sim 5)$ 分别表示砌体结构轻微破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏和倒塌破坏对应的平均维修或重建成本。

与5个破坏等级对应的平均维修成本 V_i 见表4,基于维修或重建工程量 Q 和成本单价 C 来确定, Q 和 C 则依据《建设工程工程量清单项目计量规范》^[24]《海南省房屋修缮与抗震加固综合定额(2015)》^[25]以及海南省市场均价,利用广联达GCP云计价平台进行计价。需要说明的是,对于因墙体失效而导致倒塌破坏的情况,其重建成本包括拆除和重建两部分,拆除和重建工程量按上述规范或定额来计算。

表4 维修措施

Table 4 Maintenance measures

砌体结构房屋破坏等级	维修措施	平均维修成本/元
轻微破坏	查漏维修	891.52
中等破坏	屋面维修	2 426.63
严重破坏	屋面维修	6 055.06
完全破坏	屋面维修	12 055.92
结构倒塌	重建	101 313.92

2.3.2 风暴潮经济脆弱性

不同家电、家具和装修在不同风暴潮高度下对水敏感程度不同,故本文引入平均损失高度来量化淹没损失,以几种较为常见的生活用品为例,见表5。其平均单价参考中国产业信息网(www.chyxx.com)、海南省工程建设标准定额信息(zjt.hainan.gov.cn)、《中国电风扇产业市场分析报告》(www.docsj.com)和《2017年中国床垫行业市场发展现状与发展特点分析》(www.qianzhan.com)等对装修、家具和家电进行均价取值。

表5 装修、家具和家电价格

Table 5 Decoration, furniture and appliance prices		
品类	平均单价	平均损失高度/m
电风扇	150元/个	0.50
电视机	2 843元/个	0.80
洗衣机	2 925元/个	0.30
冰箱	4 175元/个	0.20
电热水壶	135元/个	0.40
墙面	34.28元/m ²	淹没高度+0.1
床垫	936元/个	0.45

2.3.3 台风-风暴潮灾害遭遇下经济脆弱性

结合上文台风经济脆弱性分析和台风风暴潮经济脆弱性分析,对台风-风暴潮灾害共同作用下砌体结构经济脆弱性进行评估。海口市位于海南省东部,市中心海拔10 m左右,海岸至市中心中点附近即海拔5 m处,砖混房屋较为普遍,故预设室内地坪海拔为5 m。

根据台风与台风风暴潮之间的内在关系,可以用台风风速表征台风-风暴潮共同作用下灾害强度,台风造成的损失为风荷载对结构构件的破坏,台风风暴潮造成的损失记为涨水淹没对房屋内容物的损坏。结合灾害物理脆弱性分析和造价信息可以得到某一特定风速下砌体结构经济损失,进而得到砌体结构房屋经济脆弱性曲线,以大陆架坡度1:250为例,计算结果如图9所示。

当风速小于38 m/s,此时引发风暴潮涨水还不足以淹没建筑物,经济损失是由于台风掀起屋面局部瓦片引起;随着风速增大,屋面破坏程度持续增加直到砌体墙出现损坏,此时台风引起的经济损失达到极值;当风速增大到38 m/s,风暴潮淹没高度达到室内地坪高度,房屋内家具、家电等受海水侵蚀产生损失,直到房屋内容物经济损失达到极值,此时台风-风暴潮灾害共同作用下砌体结构经济损失达到最大值。

需要指出的是,本次分析所选择的民居屋内设施简陋,故因风暴潮引起的经济损失相对于房屋建筑受损所造成的损失占比很小,该比重受屋内设施价值影响。总体而言,在整个灾害过程中台风造成的房屋经济损失是台风-风暴潮经济损失的主要部分。

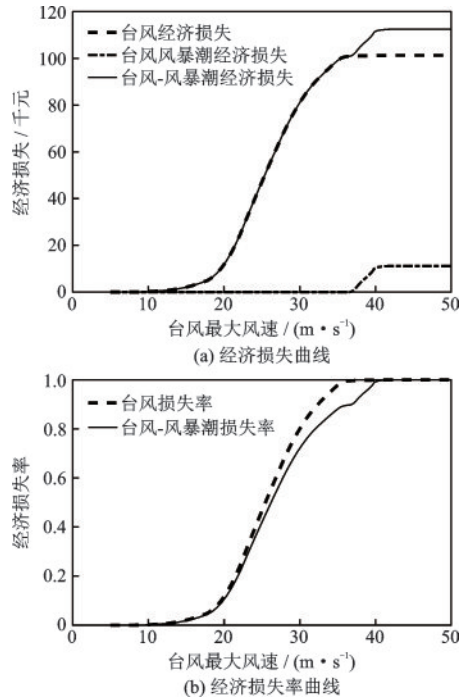


图9 典型砌体结构房屋经济脆弱性曲线

Fig.9 Economic vulnerability curves of typical masonry structure houses

3 结论

海南民房遭受台风、台风-风暴潮灾害严重,针对这个问题,本文对海南村镇房屋进行调查,并结合历史台风和台风-风暴潮灾害资料,确定了台风和台风-风暴潮灾害主要的破坏模式。基于蒙特卡洛模拟,分析村镇房屋台风物理脆弱性、台风风暴潮经济脆弱性以及台风-台风风暴潮共同作用经济脆弱性,得出以下主要结论:

(1)结合海南村镇房屋砌体结构特点和建筑特征,对海南村镇砌体房屋台风下的受损特征和成害机制进行分析。房屋台风灾害主要破坏模式为台风导致屋盖体系的屋面材料被掀起破坏和墙体在台风作用下沿底部砂浆水平通缝平面倒塌破坏;房屋台风风暴潮灾害损失表现为台风风暴潮涨水导致房屋内部装修、家具和家电等损失。

(2)对砌体民房进行台风物理脆弱性分析,建立了屋面损伤判定,墙体失效判定方法,得到了单层砌体结构易损性曲线。

(3)对台风风暴潮内在关系进行分析,在历史灾害数据统计分析下建立了以台风风暴潮高度表征灾害强度的蒙特卡洛模型,得出台风-风暴潮内在

关系曲线。

(4)建立了台风-风暴潮房屋经济脆弱性分析方法,基于定额清单法构建了在不同灾害强度下的维修成本计算。

(5)分析台风与台风-风暴潮灾害之间的关系,建立了台风-台风-风暴潮灾害共同作用的房屋经济损失的计算方法,绘制了房屋台风-台风-风暴潮灾害共同作用经济损失脆弱性曲线。分析结果表明台风导致的砌体结构房屋经济损失占主要部分。台风-风暴潮下砌体结构经济脆弱性曲线有两段屈服平台,第一段平台是由于当台风灾害对砌体房屋结构造成不可修复损坏,此时台风作用经济损失达到最大值,当风速增大,风暴潮对房屋内容物造成损坏达到最大,进而总损失达到第二段平台。

参考文献:

- [1] 吴慧,胡德强,朱晶晶.海南省台风和暴雨灾害年景评估及其变化分析[J].海南大学学报(自然科学版),2018,36(4):368-375.
Wu H, Hu D Q, Zhu J J. Annual assessment and variation analysis of typhoon and rainstorm disaster in Hainan Province[J]. Journal of Hainan University (Natural Science), 2018, 36(4):368-375. (in Chinese)
- [2] 隋意,石洪源,钟超,等.我国台风风暴潮灾害研究[J].海洋湖沼通报,2020(3):39-44.
Sui Y, Shi H Y, Zhong C H, et al. Research on typhoon storm surge disaster in China[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(3):39-44. (in Chinese)
- [3] Li X H, Han G Q, Yang J S, et al. Using satellite altimetry to calibrate the simulation of typhoon seth storm surge off Southeast China[J]. Remote Sensing, 2018, 10(4):657.
- [4] Massarra C C, Friedland C J, Marx B D, et al. Predictive multi-hazard hurricane data-based fragility model for residential homes[J]. Coastal Engineering, 2019, 151:10-21.
- [5] Li A L, Guan S D, Mo D X, et al. Modeling wave effects on storm surge from different typhoon intensities and sizes in the South China Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 235:106551.
- [6] Unnikrishnan V U, Barbato M. Multihazard interaction effects on the performance of low-rise wood-frame housing in hurricane-prone regions[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(8):4017076.
- [7] Hatzikyriakou A, Lin N, Gong J, et al. Component-based vulnerability analysis for residential structures subjected to storm surge impact from hurricane sandy[J]. Natural Hazards Review, 2016, 17(1):5015005.
- [8] Creach A, Bastidas-Arteaga E, Pardo S, et al. Vulnerability and costs of adaptation strategies for housing subjected to flood risks: Application to La Guérinière France[J]. Marine Policy, 2020, 117:103438.
- [9] Stewart M G, Ginger J D, Henderson D J, et al. Fragility and climate impact assessment of contemporary housing roof sheeting failure due to extreme wind[J]. Engineering Structures, 2018, 171:464-475.
- [10] 钟兴春,方伟华,曹诗嘉.基于构件损毁模拟仿真的沿海农村典型低矮房屋台风风灾易损性研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(1):51-59.
Zhong X C, Fang W H, Cao S J. Probabilistic component-based Monte Carlo simulation of vulnerability for a typical low-rise rural residential building in coastal China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(1):51-59. (in Chinese)
- [11] Kim J M, Woods P K, Park Y J, et al. Predicting hurricane wind damage by claim payout based on Hurricane Ike in Texas[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(5):1513-1525.
- [12] Islam M R, Takagi H. Typhoon parameter sensitivity of storm surge in the semi-enclosed Tokyo Bay[J]. Frontiers of Earth Science, 2020, 14(3):553-567.
- [13] Baradaranshoraka M, Pinelli J, Gurley K, et al. Hurricane wind versus storm surge damage in the context of a risk prediction model[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(9):4017101-4017103.
- [14] Masoomi H, van de Lindt J W, Ameri M R, et al. Combined wind-wave-surge hurricane-induced damage prediction for buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 145(1):4018221-4018227.
- [15] 周华,韩琴,花立春,等.2014年“威马逊”超强台风作用下建筑结构灾损调查与分析:砌体结构[J].建筑结构,2016,46(3):100-105.
Zhou H, Han Q, Hua L C, et al. Reconnaissance and analysis of damages of building structures caused by super typhoon Rammasun in 2014: masonry structures[J]. Building Structure, 2016, 46(3):100-105. (in Chinese)
- [16] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [17] 砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

- [18] 李章政. 建筑结构设计原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
Li Z Z. Principles of building structure design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [19] 《建筑结构静力计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
Compilation group of manual for static calculation of building structures. Manual for static calculation of building structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. (in Chinese)
- [20] Lee K H, Rosowsky D V. Fragility assessment for roof sheathing failure in high wind regions[J]. Engineering Structures, 2005, 27(6):857-868.
- [21] 丁越峰. 浅谈风暴潮灾害的现状与防御[J]. 地理教学, 2004(2):4-5.
Ding Y F. Present situation and prevention of storm surge disaster[J]. Geography Teaching, 2004(2):4-5. (in Chinese)
- [22] Irish J L, Resio D T, Ratcliff J J. The influence of storm size on hurricane surge[J]. Journal of Physical Oceanography, 2006, 38(9):2003-2013.
- [23] Lu X, Yu H, Yang X, et al. Estimating tropical cyclone size in the northwestern pacific from geostationary satellite infrared images[J]. Remote Sensing, 2017, 9(7):728.
- [24] 建设工程工程量清单计价规范: GB 50500—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [25] 海南省住房和城乡建设厅. 海南省房屋修缮与抗震加固综合定额(2015)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2015.
Hainan Provincial Department of housing and urban rural development. Comprehensive quota of house repair and seismic reinforcement in Hainan Province (2015) [M]. Wuhan: Huazhong University of science and Technology Press, 2015. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)



(上接第 319 页)

- [22] 张清华, 马燕, 王宝州. 高原环境新型组合桥塔温度场与温度应力特性分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 30-36.
Zhang Q H, Ma Y, Wang B Z. Analysis of temperature field and thermal stress characteristics for a novel composite bridge tower catering for plateau environment [J]. Bridge Construction, 2020, 50(5): 30-36. (in Chinese)
- [23] Liu H, Chen Z, Chen B, et al. Studies on the temperature distribution of steel plates with different paints under solar radiation [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(1): 342-354.