

福建圆形土楼屋盖结构的风灾损伤分析

林俊龙, 彭兴黔, 吴桢

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 分析基于构件计算屋盖结构损伤率的计算方法,建立功能函数,并对用于功能函数的结构构件承载力进行计算.研究瓦片掀翻和椽条破坏两种破坏形式下的屋盖的损伤率,和风向角、高宽比、坡角对损伤率的影响作用.研究表明:圆形土楼屋盖的弹性极限风速约为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,塑性极限风速约为 $45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,使用功能极限风速约为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;屋面坡角、高宽比的增大均会增大屋盖结构的损伤率;二次损伤率很大,基本上达到一次损伤率的一半.此外,外挑檐和屋脊外的灾损情况在整个屋盖结构中最严重.

关键词: 圆形土楼; 风荷载; 功能函数; 风灾损伤率; 风损函数; 福建省

中图分类号: TU 360.2 **文献标志码:** A

据统计,从 1988 年到 2004 年,中国每年因台风造成的直接经济损失高达 233.5 亿元,死亡人数达 440 人,农作物受灾面积达 $2.9\times10^{10}\text{ m}^2$,倒塌房屋 30.7 万间^[1].2003 年 6 月,“飞燕”台风造成福建省宁德市房屋倒塌 6 100 间,损坏 32.14 万间^[2];2004 年 8 月,“云娜”台风造成浙江省 4 万多间房屋倒塌,受灾人数近千万^[3].历史上客家土楼屋盖受台风破坏的例子屡见不鲜.因此,对福建土楼屋盖在台风作用下的损伤研究及抗台风措施的提出已经刻不容缓.基于此,本文对福建圆形土楼屋盖结构的风灾损伤进行研究.

1 模型简介

选择振福楼作为基本的建筑模型.屋盖结构按本身的特点可以分为 4 个区域:外挑檐区域、屋脊外区域、屋脊内区,域和内挑檐区域.所以,屋盖结构被分为 240 个小块,如图 1 所示.其内环单层,高 7 m;外环 3 层,高 11 m,直径 45 m,墙厚 1.6 m,外挑檐 2.5 m,内挑檐 2 m,屋面坡角 25° .经调研,内环屋盖受风荷载影响很小可忽略,只分析外环屋盖的风荷载特性.据实测,影响屋盖风荷载的主要因素为屋顶坡度和外环圆楼高径比.利用 J. Holmes 提出的结构风损计算理论:若假定组成结构的构件失效是相互独立的事件并且抵抗相同的风荷载,则整个结构的损伤率就是各个失效构件的百分比^[4].

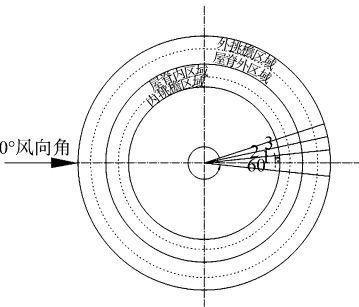


图 1 圆形土楼屋盖分区图
Fig. 1 Zoning of round
Tulou roof

2 结构损伤率计算

结构损伤率可以定义为所包含的平行构件(构件的作用是一样的)破坏的面积或者数量占总构件面积或者数量的比例.关于开洞结构的抗风设计,文中仅考虑内外风压的荷载,不考虑风振作用.影响风致内压大小主要是风致内压系数和风致内压的阵风因子.我国荷载规范^[5]规定对封闭式建筑物,按外表面风压和正负情况取 -0.2 或 0.2 ,并没有提出风致内压的阵风因子的概念^[6].内压系数值按规范选取,但是考虑阵风因子的影响.根据前人的

研究,内压阵风因子的取值方法为当屋盖开洞率 $\Sigma \leq 0.1\%$ 时,取内压阵风因子 $\beta_i = 1.3$; 当 $\Sigma = 0.5$ 时,取 $\beta_i = \beta$; 当 $\Sigma \geq 10\%$ 时,取 $\beta_i = 1.5\beta$,中间均插值取值^[7].

土楼屋盖在风灾下最常见的破坏形态有瓦片的破坏和椽条的受弯破坏. 将这两种破坏的功能函数分别定义为 Z_1 和 Z_2 , 则一次损伤的功能函数 Z_{11}, Z_{22} 为

$$Z_{11} = R - S = W_a \times \cos \alpha - \beta \times C_{p,n} \times 0.5 \times \rho v^2, \tag{1}$$

$$Z_{21} = R - S = f_m \times W_n - (W_a \times \cos \alpha - \beta \times C_{p,n} \times 0.5 \times \rho v^2) \times M_1 \times \Delta. \tag{2}$$

屋脊外和屋脊内开始破坏后还应计算风致内压的作用,则结构总损伤的功能函数为

$$Z_1 = R - S = W_a \times \cos \alpha - (\beta \times C_{p,n} - \beta_i \times C_{p,i}) \times 0.5 \times \rho v^2, \tag{3}$$

$$Z_2 = R - S = f_m \times W_n - [W_a \times \cos \alpha - (\beta \times C_{p,n} - \beta_i \times C_{p,i}) \times 0.5 \times \rho v^2] \times M_1 \times \Delta. \tag{4}$$

式(1)~(4)中: W_a 为屋面覆材单位面积质量; α 为屋檐的坡度角; $C_{p,n}$ 为屋面分块上的净风压系数; $C_{p,i}$ 为第 i 测点的风压系数; β 为阵风因子; ρ 为空气密度; f_m 为截面抗弯抵抗矩; v 为设定的风速; M_1 为椽条受单位线荷载作用下的最大弯矩; Δ 为椽条的间距,取 240 mm.

3 屋盖的承载力分析

土楼屋盖验算的重点是屋面瓦片和椽条的自身承载力,以及椽条和檩木之间的连接承载力.

3.1 瓦片的承载力计算

在风灾中破坏时,其承载力 $R = G \times \cos \alpha$. 其中: α 为屋面坡角; G 为瓦片单位面积自质量,取较危险值(在验算瓦片受风倾覆时取 $63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,在验算椽条强度时取 $73.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). 瓦片的覆盖单位面积质量约为 $63 \sim 73.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.2 椽条的承载力计算

屋盖受风时,木椽条受瓦质量和风压的影响,可能受弯破坏,所以仅研究风压为正压时的破坏. 其截面尺寸 $b \times h = 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,采用力学性能好的杉木. 根据荷载规范可知,其受弯强度设计值 $f_m = 15 \text{ Pa}$. 偏安全考虑,将 f_m 乘以折减系数 0.9,则木椽条的抗弯承载力为

$$R = W_m \times f_m \times \eta = (bh^2/6) \times 15 \times 0.9 \times 0.9 = 0.182 \text{ 25 kN} \cdot \text{m}^{-1}. \tag{5}$$

连接材料是炒制过的竹钉,本来易虫蛀、易腐烂的竹材变得异常坚硬,几乎不朽,比铁钉更耐用^[8-10]. 所以,椽条的连接被近似看做稳定的铰接支座,不考虑连接破坏.

4 不同坡角下圆形土楼屋盖的风灾损伤

屋盖在风灾中,外挑檐首先遭到破坏,接下来是屋脊外和屋脊内区域,最后是内挑檐. 屋盖破坏始于瓦片破坏. 因此,设定瓦片开始破坏为屋盖达到弹性极限的标志,设定椽条的破坏为屋盖达到塑性极限的标志. 屋脊外和屋脊内区域屋盖起到遮蔽的主要作用,所以设定屋脊外和屋脊内屋盖损坏率达到 80% 时(相对整个屋盖为 40%),为屋盖使用功能失效的标志.

4.1 风灾损伤率

通过统计计算,得出高径比(H/d)为 0.12 时,各屋面坡角下的一次损伤率、二次损伤率、总损伤率和屋脊内外损伤率,计算结果如表 1 所示. 由表 1 可知:屋面坡角(θ)为 $15^\circ, 25^\circ$ 和 35° 的屋盖分别在风速为 20, 20 和 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到弹性极限;在 50, 50 和 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到塑性极限;在 35, 30, $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,使用功能失效.

一次损伤率基本是随着坡角的增大而增大,且坡角越大,达到一定风速后的损伤速度加快. 坡角为 35° 时,风速达到 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 才开始有破坏情况,但是损坏发展最快. 最先开始出现损伤的是外挑檐的迎风面区域. 随着风速增大,背风向也开始损坏;接着是屋脊外和屋脊内,内挑檐保持完好. 损伤破坏基本上是瓦片受风吸力破坏,椽条的受弯破坏只在外挑檐区侧风向受压区极小的范围内出现. 随着坡角的变大,二次损伤量减小. 风速达到 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 前,二次损伤量增加速度随风速增大而增大,风速大于 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后,二次损伤量增加的速度随风速的增加而减缓. 由此可见,二次损伤只出现在屋脊外和屋脊内,屋脊外几乎全部破坏,屋脊内相对损伤小.

总体来说,坡角变大会使屋盖的风灾易损性变大,且受损速度也变大. 风速达到 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,屋脊内外屋盖瓦片几乎全部被吹掉,屋盖使用功能失效. 对于屋盖的抗台风措施中,应加强外挑檐和屋脊外的瓦片的抗风,若能估计风向,则在迎风向重点加强.

表 1 高径比为 0.12 时圆形土楼屋盖的风灾损伤率

Tab. 1 Round Tulou roof's windstorm damage rate under 0.12 ratio of height to diameter

$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	一次损伤率			二次损伤率			总损伤率			屋脊内外屋盖受损率		
	$\theta=15^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=35^\circ$
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0.02	0.04	0	0	0	0	0.02	0.04	0	0	0	0
25	0.05	0.07	0	0.04	0.07	0	0.09	0.14	0	0.04	0.08	0
30	0.12	0.15	0.09	0.21	0.31	0.36	0.33	0.46	0.44	0.26	0.40	0.43
35	0.18	0.28	0.28	0.31	0.25	0.21	0.49	0.53	0.49	0.42	0.46	0.46
40	0.28	0.40	0.40	0.28	0.15	0.12	0.55	0.56	0.52	0.47	0.48	0.48
45	0.38	0.46	0.47	0.19	0.10	0.07	0.56	0.56	0.54	0.48	0.48	0.48
50	0.43	0.50	0.53	0.14	0.06	0.04	0.56	0.57	0.56	0.48	0.48	0.48

4.2 损伤函数

根据表 1 的数据,利用 Origin 软件将损伤率拟合成损伤函数

$$f_1 = 0.018v - 0.0198\tan\alpha - 0.22.$$
(6)

式(6)中: f_1 为圆形土楼屋盖关于坡角的损伤函数; v 为风速; α 为屋面坡角.

5 不同高径比下圆形土楼屋盖的风灾损伤

5.1 风灾损伤率

通过统计计算得出坡角为 15° 时,各高径比(H/d)下的一次损伤率、二次损伤率、总损伤率和屋脊内外损伤率,计算结果如表 2 所示.

表 2 屋面坡角为 15° 时圆形土楼屋盖的风灾损伤率

Tab. 2 Round Tulou roof's windstorm damage rate under 15° roof slope angle

$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	一次损伤率			二次损伤率			总损伤率			屋脊内外屋盖受损率		
	$H/d=0.12$	$H/d=0.24$	$H/d=0.36$	$H/d=0.12$	$H/d=0.24$	$H/d=0.36$	$H/d=0.12$	$H/d=0.24$	$H/d=0.36$	$H/d=0.12$	$H/d=0.24$	$H/d=0.36$
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0.02	0.03	0.04	0	0	0
25	0.05	0.05	0.05	0.04	0	0	0.09	0.05	0.05	0.04	0	0
30	0.12	0.12	0.13	0.21	0.27	0.30	0.33	0.39	0.43	0.26	0.33	0.37
35	0.18	0.23	0.27	0.31	0.27	0.25	0.49	0.50	0.52	0.42	0.43	0.45
40	0.28	0.35	0.42	0.28	0.20	0.15	0.55	0.55	0.57	0.47	0.48	0.49
45	0.38	0.43	0.49	0.19	0.14	0.09	0.56	0.56	0.58	0.48	0.48	0.50
50	0.43	0.48	0.52	0.14	0.09	0.07	0.56	0.57	0.59	0.48	0.48	0.50

从表 2 中看出:各高径比的屋盖弹性极限风速均为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,塑性极限风速均为 $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风速达到 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,各高径比的土楼屋盖使用功能失效. 随着高径比的增大,屋盖的一次损伤量增大,但损伤量增大速度有减小的趋势. 此外,一次损伤是从外挑檐的迎风向区域开始向两侧扩大范围,随后屋脊外,屋脊内和背风向外挑檐也开始出现损伤.

随着高径比的变大,二次损伤量减小. 在风速达到 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 前,二次损伤量增加速度随风速增大而增大,且高宽比越大,增加速度越大;风速大于 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,二次损伤量增加的速度随风速的增加而减缓. 由此可见,二次损伤只出现在屋脊外和屋脊内,屋脊外几乎全部破坏,屋脊内相对损伤小.

总体来说,房屋高径比变大会使屋盖结构的风灾易损性变大,且受损速度变大. 风速达到 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,屋脊内外屋盖瓦片几乎全部被吹掉,屋盖使用功能失效. 对于圆形土楼屋盖的抗台风措施中,应加强外挑檐和屋脊外的瓦片的抗风,若能估计风向,则在迎风向重点加强.

5.2 损伤函数

根据表 2 的数据,利用 origin 软件将损伤率拟合成损伤函数

$$f_2 = 0.018v + 0.097\ 8H/B - 0.227. \tag{7}$$

式(7)中: f_2 为圆形土楼屋盖关于高径比的损伤函数; v 为风速; H/B 为土楼高宽比.

6 结束语

通过对福建圆形土楼屋盖结构的风灾损伤研究,可以清楚知道土楼屋盖在台风作用下的薄弱部位,借此有效指导风灾前的预防准备工作和风灾后的损失评估工作.

参考文献:

[1] 丁一汇. 中国气象灾害大典:综合卷[M]. 北京:气象出版社,2008:200-250.

[2] 魏应植,吴陈锋,孙旭光. 福建台风灾害特征及其防御对策研究[J]. 研究报告,2006,30(10):7-14.

[3] 施素芬,赵利刚. 强台风“云娜”灾害特征及其评估[J]. 气象科技,2006,34(3):315-318.

[4] BASKARAN A, DUTT O. Performance of roof fasteners under simulated loading conditions[J]. Wind Eng Ind Aerodyn,72(1/2/3):389-400.

[5] 中华人民共和国建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:57.

[6] 卢旦,楼文娟,唐锦春. 开孔结构风致内压研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2005,39(9):1388-1392.

[7] 卢旦. 风致内压特性及其对建筑物作用的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006:28-48.

[8] 赖惟永,苏秀琴,林乙煌. 福建土楼木结构材料现状的初步研究:以永定客家土楼民俗文化村景区的部分土楼为例[J]. 海峡科学,2010(10):88-90.

[9] VICKERY P J, TWISDALE L A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions[J]. Journal of Structural Engineering,1995,121(11):1700-1709.

[10] 廖冬,唐奇. 解读土楼:福建土楼的历史和建筑[M]. 北京:当代中国出版社,2009:16.

Research on Windstorm Damage to the Roof Structure of
Fujian Round Tulou

LIN Jun-long, PENG Xing-qian, WU Zhen

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the method to evaluate the damage rate of roof structure by analyzing the roof structural member, a performance function was established to calculate the bearing capacity of structural members. The roof structure damage rate was studied under two conditions: damage by tiles’ overturning and rafters’ breaking. The effects of wind angle, the ratio of height to width and slope angle on the damage rate were also studied. The research shows: the elastic limit wind speed on round Tulou roof is about $20\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the plastic limit wind speed is about $45\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the extreme wind speed for the function usage is about $30\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; the roof structure damage rate increases with the increase of the roof slope angle and the ratio of height to width; the secondary damage rate is approximately as high as the half of the first damage rate. The disaster losses of the outer cornice and the roof outside are the most severe in the entire roof structure.

Keywords: round Tulou; wind load; performance function; windstorm rate damage; wind damage function; Fujian Province

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)