

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221102002

福建圆形土楼悬挑屋盖风荷载特性及气动抗风措施研究*

李玉学^{1,2,3}, 郑千慧¹, 李海云^{1,2,3}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省风工程与风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄, 050043)

摘要: 福建圆形土楼悬挑屋盖属于风敏感结构, 且处于我国台风多发区, 为提升结构的风灾防御水平, 保障其抗风安全, 采用CFD数值模拟方法对屋盖表面风荷载分布特性进行研究, 同时提出了增强其抗风性能的气动抗风措施。研究表明: 圆形土楼悬挑屋盖迎风面风压较大, 其中, 内、外悬挑屋盖端部风压系数绝对值最大, 分别达到1.5和0.75, 属于风荷载敏感部位; 在外悬挑屋盖端部加设竖直挡风板和波纹挡风板均可以一定程度地卸载上述风荷载敏感部位的风压值, 综合比较, 设置波纹挡风板较竖直挡风板对风压卸载效果更好; 对于设置波纹挡风板, 当其相对高度 $h/H_1=0.05$ (h 为波纹挡风板高度, H_1 为地面到屋脊处距离)、倾角 $\theta=-45^\circ$ 、波纹圆弧半径 $R=5.5$ m时整体对屋盖表面风压卸载效果最优, 其内、外悬挑屋盖端部风压系数卸载率分别达到40.1%和54%, 原因在于倾斜布置的波纹挡风板对悬挑屋盖表面来流起到阻挡作用, 使得气流撞击形成的漩涡从屋盖悬挑端转移到挡风板表面, 同时波纹的存在降低了内、外悬挑屋盖表面气流漩涡强度, 从而达到卸载屋面风荷载的效果。

关键词: 福建圆形土楼; 悬挑屋盖; 风荷载特性; 抗风措施; 卸载机理

中图分类号: TU312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0333-10

Study on Wind Load Characteristics and Aerodynamic Measures for Wind Resistance of Cantilevered Roofs of Fujian Circular Tulou

LI Yuxue^{1,2,3}, ZHENG Qianhui¹, LI Haiyun^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;
3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of China Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The cantilevered roofs of Fujian circular Tulou are structures that are sensitive to winds, located in China's typhoon-prone areas. In order to improve the structures' resistance to wind disasters and ensure its wind-resistant safety, CFD numerical simulation was conducted to study the wind load distribution characteristics on the roofs. Aerodynamic measures to enhance wind resistance were proposed. The results showed that wind pressure on the windward side of the roofs was relatively large, and the absolute wind pressure coefficients at the ends of both the inner and outer cantilevered roofs,

* 收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2023-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(51278314, 51878040)、河北省自然科学基金(E2019210031)、中央引导地方科技发展资金项目(206Z5401G)资助

作者简介: 李玉学(1978—), 男, 副教授, 博士。主要从事结构工程抗风设计方面的研究。E-mail: liyuxue2000@163.com

which were sensitive to wind loads, were the largest, reaching 1.5 and 0.75, respectively. The addition of vertical or corrugated wind deflectors at the ends of the outer cantilevered roofs could mitigate the wind pressure on these sensitive parts to a certain extent. Generally, corrugated wind deflectors had a better effect on unloading wind pressure than their vertical counterpart. For corrugated wind deflectors, when their relative height $h/H_j=0.05$ (h being the height of the wind deflector and H_j being the distance from the ground to the roof ridge), inclination angle $\theta=45^\circ$, and corrugated arc radius $R=5.5$ m, the wind pressure unloading effect on the roof surface was the best. The wind pressure coefficients at the ends of both the inner and outer cantilevered roofs were reduced by 40.1% and 54%, respectively. The corrugated design of the wind deflectors effectively blocked incoming wind flow to the cantilevered roofs, causing vortices formed by air flow impact to shift from the roof ends to the deflector surface. Furthermore, the corrugations reduced the intensity of air flow vortices on the surfaces of both inner and outer cantilevered roofs, thereby efficiently unloading the wind load.

Keywords: Fujian circular Tulou; cantilevered roof; wind load characteristics; measures for wind resistance; unloading mechanism

0 引言

福建土楼被称为“东方文明的一颗璀璨明珠”，通常由大跨屋盖、中央庭院及公共空间组成，属于由夯土墙和木梁柱共同承重的多层住宅建筑^[1-2]。为保护夯土墙免受风雨冲刷，屋盖出檐一般在2 m左右，部分可长达3 m，为满足排水需要，通常设置25°~50°的陡坡，其建筑材料主要为木材和瓦片，属于典型的风敏感大跨悬挑屋盖。福建省位于我国东南沿海地区，属于台风多发地区，针对风敏感的福建土楼悬挑屋盖，深入研究风荷载特性并提升其风灾防御水平成为不少学者关注的热点。

彭兴黔等^[3]借助数值模拟方法，针对福建土楼中的单体圆形振幅楼和方形奎聚楼挑檐屋盖风荷载进行研究，发现其屋盖主要受负压作用，数值较大的风荷载主要集中在屋盖前缘悬挑端，并指出屋面形式和几何尺寸的改变引起的风效应变化成为此类结构风荷载特性研究的重点之一。朱海等^[4]针对圆形、日字形和双环形福建土楼的风环境进行分析，通过数值模拟得到了土楼自身体型、周围建筑以及风向等因素对土楼各个区域风环境的影响规律。高志飞^[5]借助风洞试验研究福建圆形土楼的风荷载分布特性，发现来流在土楼迎风面檐口处产生强烈的流动分离，挑檐下表面出现较大正风压，与彭兴黔等^[3]数值模拟所得结论基本一致。吴仁伟等^[6]借助数值模拟方法研究了圆形福建土楼的高径比和屋面坡角等因素对屋盖表面风荷载特性的影

响，发现屋面坡角对土楼内部流场影响较小，但对迎风的外挑檐区影响显著，且随着坡角增大，屋面负压绝对值减小，而高径比对土楼内部以及挑檐区风压分布均影响显著，据此得出较理想的屋面坡角为45°，较优的高径比为0.24。Y. M. Su等^[7]借助数值模拟方法对设有连接通道的双环形福建土楼周围风场特性进行研究，发现连接通道位于迎风面时，在通道入口处形成了较明显的气流漩涡，且通道的存在加大了内环土楼的风压值。林俊龙等^[8]针对福建圆形土楼屋盖结构，研究了风向角、高宽比、屋面坡角对结构风致损伤率的影响，发现屋面坡角、高宽比的增大均会增大屋盖结构的风致损伤率，外挑檐和屋脊处的风灾损伤率在整个屋盖结构中最为严重。严彪等^[9]采用数值模拟方法，研究了圆形和方形土楼屋盖的风压分布特性，发现土楼的大悬挑轻质木屋盖对结构抗风不利，易发生风致损坏，并据此提出了以“疏导”风压为目的的气动抗风措施。

本文以福建圆形土楼的典型代表怀远楼为工程背景，从提升结构抗风能力的角度，在准确把握其悬挑屋盖表面风压分布特性的基础上，提出在外悬挑屋盖端部增设挡风板的气动抗风措施，借助数值模拟方法系统研究不同形式的挡风板(包括挡风板类型、挡风板几何尺寸)对悬挑屋盖表面风压分布特性的影响，并对其影响机理进行探讨，据此给出较优的挡风板设置建议，为类似既有土楼屋盖结构抗风措施设计提供借鉴和参考。

1 圆形土楼结构形式

本文选取的福建圆形土楼的典型代表怀远楼外半径 $R_w=22\text{ m}$, 内半径 $R_n=19\text{ m}$, 外墙平均厚度 $d_w=1.2\text{ m}$, 内、外墙高 $H_q=13.4\text{ m}$, 墙底砌石基础高 $H_q=2.5\text{ m}$, 内、外墙间隔 $D=3\text{ m}$, 内、外墙上部为双挑檐悬挑屋盖, 挑檐长度 $L=2\text{ m}$, 为排水需要, 从屋脊到悬挑端设置 25° 斜坡, 屋脊处高度 $H_t=17\text{ m}$, 如图 1 所示。

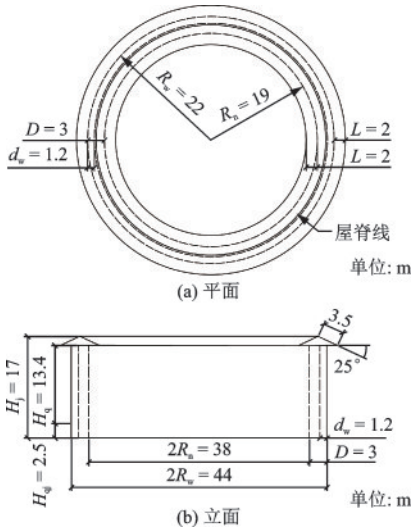


图 1 圆形土楼怀远楼结构布置
Fig.1 Structural arrangement of Huaiyuan circular Tulou

2 圆形土楼悬挑屋盖风压分布特性

2.1 结构数值分析模型建立

本文采用 ANSYS Fluent 软件对圆形土楼屋盖风压分布特性进行分析。按照第 1 节所述土楼结构实际尺寸建立几何模型, 并将几何模型置于长 $700\text{ m} \times$ 宽 $322\text{ m} \times$ 高 170 m 的三维流场计算域中, 模型位于三维流场计算域上游 $1/3$ 处, 满足阻塞率小于 3% 的要求。采用适应性较好的四面体网格对几何模型及计算域进行网格划分, 经过网格无关性验证, 当网格数约为 200 万, 第一层网格高度为 0.8 mm 时, 此时 $y+$ 值能够较好满足计算精度和计算效率的要求, 网格划分结果如图 2 所示。

采用雷诺平均(RANS)方法处理流动控制方程, 湍流选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 模型中湍动能 k

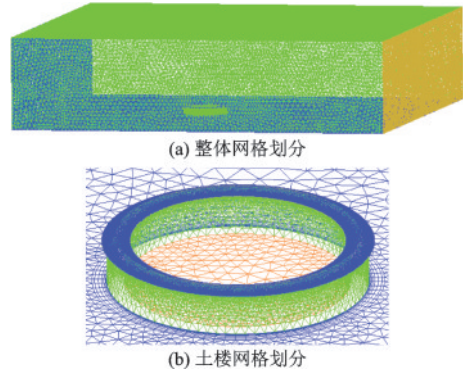


图 2 网格划分结果

Fig.2 Grid partition result of computational model

和耗散率 ϵ 控制方程分别为^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho\epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v\epsilon}} \quad (2)$$

式中, G_k 是由平均速度梯度引起的湍动能生成项;

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \text{ 其中 } \eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); C_2 = 1.9; \sigma_k = 1.0; \sigma_\epsilon = 1.2.$$

入口边界条件 $\bar{u}(z)$ 选取为^[11]:

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_b \times (z/z_b)^\alpha \quad (3)$$

式中, 按照 B 类地貌考虑, 粗糙度指数 α 取 0.15 ; \bar{u}_b 为平均风速, 取 20 m/s ; z 为流域内任意高度; z_b 为参考高度, 取 10 m 。

入口处湍流剖面湍动能 $k(z)$ 和耗散率 $\epsilon(z)$ 选取为:

$$\begin{cases} k(z) = \gamma [I(z)\bar{u}(z)]^2 \\ \epsilon(z) = \frac{\beta C_\mu^{3/4} k(z)^{3/2}}{KL_u} \end{cases} \quad (4)$$

式中, 系数 $C_\mu=0.09$; $\gamma=1.2$; $\beta=1$; $K=0.4$; 湍流强度 $I(z)$ 和湍流积分尺度 L_u 分别选取^[12-13]:

$$I(z) = 0.1 \left(\frac{z}{z_G} \right)^{-\alpha-0.05} \quad (5)$$

$$L_u = 100(z/30)^{0.5} \quad (6)$$

式中, $z_G=350\text{ m}$ 。

地面及建筑物表面采用无滑移壁面,流域顶部及两侧采用自由滑移壁面,出口采用开放式压力出口,湍流已充分发展(静压为零)。

迭代收敛标准为所有控制方程的相对迭代残余量均小于 10^{-3} ,认为所得流场进入稳态。

2.2 测点布置及计算结果数据处理

在土楼内、外悬挑屋盖上沿环向每间隔 45° 布置 1 排测点,沿径向非等间距布置 7 排测点,考虑到屋盖悬挑端部属于风荷载敏感区域,该区域测点间距加密,间距为 1 m ,悬挑屋盖中部区域测点间距为 1.5 m ,共布置 56 个测点,其中内、外悬挑屋盖上测点分别命名为 N_{ij} 、 W_{ij} (下标 i 、 j 分别表示环向、径向排次),测点布置及风向角定义(考虑到圆形土楼中心对称,仅取一个 0° 风向角分析)如图 3 所示。

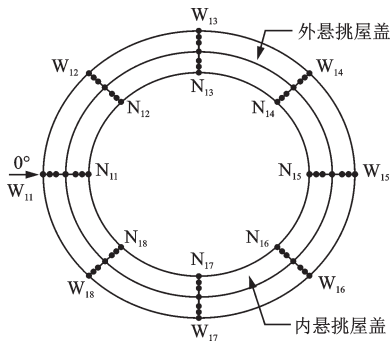


图 3 测点布置及风向角定义
Fig.3 Locations of measuring points and wind directions

为表示方便,将计算所得屋盖表面风压由公式(7)转换为相对于参考点(参考点选取屋脊最高点)高度处无量纲的风压系数 C_{p_i} [14]。其中,定义风压远离结构表面为正压,表现为压力,指向结构表面为负压,表现为吸力。

$$C_{p_i} = \frac{p_i - p_0}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (7)$$

式中, p_i 为屋盖表面第 i 测点的风压值; p_0 为参考点高度处的静压; v_0 为参考点高度处的平均风速; ρ 为空气密度。

2.3 计算结果分析

根据计算结果,提取了圆形土楼屋盖上、下表面风压值,并根据公式(7)计算得到了相应的风压

系数分布,选取 0° 风向角(风向角定义如图 3 所示)下屋盖上、下表面风压系数分布,如图 4 所示。

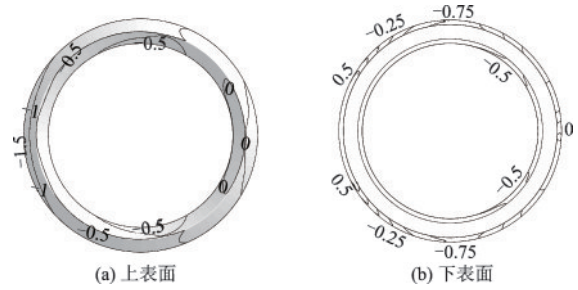


图 4 屋盖上、下表面风压系数分布图
Fig.4 Wind pressure coefficient distribution on the upper and lower roof surfaces

由图 4(a)可见,在 0° 风向角下,悬挑屋盖上表面风压系数基本沿 0° 风向中心线呈对称分布,以负压为主,其中,最大负风压系数绝对值为 1.5,位于外悬挑屋盖迎风面端部,背风面风压系数接近于 0。另外,内悬挑屋盖负风压系数绝对值均比外悬挑屋盖小,内悬挑屋盖最大负风压系数绝对值出现在垂直于来流方向两侧,绝对值为 0.5,是外悬挑屋盖最大负风压系数绝对值的 0.33 倍。

由图 4(b)可见,在 0° 风向角下,外悬挑屋盖下表面风压系数在迎风面处为正,最大正风压系数为 0.5,位于外悬挑屋盖下表面迎风面边缘处。来流方向两侧风压系数均为负,且在悬挑端部其绝对值达到最大,为 0.75,背风面风压系数接近于 0。内悬挑屋盖下表面风压系数在迎风面、侧面以及背风面均为负,且数值变化不大,为 -0.5 。

整体来看,无论屋盖上表面和下表面的正、负风压系数绝对值最大值均出现在外悬挑屋盖的迎风面端部,由此推断外悬挑屋盖迎风面的端部为该屋盖风荷载敏感部位。

3 挡风板对土楼悬挑屋盖表面风压影响分析

根据第 2 节对圆形土楼悬挑屋盖表面风压分布特性研究结果,针对其风压数值较大的悬挑屋盖端部,即风敏感薄弱部位,通过加设挡风板的气动抗风措施实现其抗风能力提升,重点研究挡风板形式和几何尺寸参数等对屋盖表面风压的影响。共设计了竖直形和波纹形两种挡风板, h 为挡风板高度,

其中,波纹挡风板由波纹圆弧半径 $R=10\text{ m}$,圆心角 $\theta=10^\circ$ 的系列圆弧间隔布置而成。此两种形式的挡风板具体形式及安装位置如图5所示。

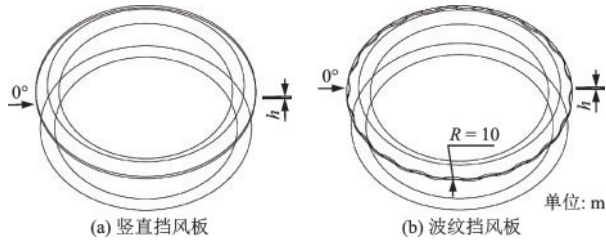


图5 挡风板形式及安装位置

Fig.5 Types and installation positions of wind deflectors

3.1 挡风板形式对土楼屋面风压影响分析

针对图5所示安装竖直形和波纹形两种形式挡风板的圆形土楼屋盖,设定挡风板相对高度均为 $h/H_j=0.03$,分别计算得到了屋盖表面的风荷载。其中,模型建立、网格划分、边界条件设置、数据处理等均采用2.1~2.3所述方法。根据计算结果,同样提取了加设两种挡风板后, 0° 风向角下,屋盖上、下表面的风压系数分布,如图6所示。

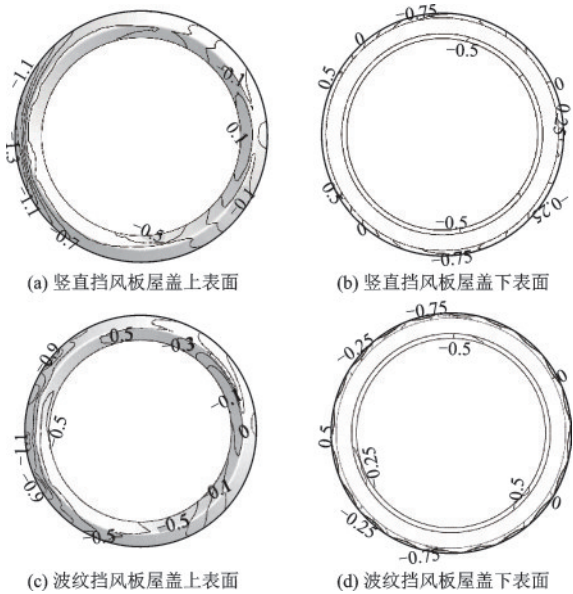


图6 设置两种形式挡风板屋盖上、下表面风压系数分布

Fig.6 Wind pressure coefficient distribution on the upper and lower roof surfaces with two types of wind deflectors

由图6(a)可见,加设竖直挡风板后,屋盖上表面风压系数沿 0° 风向来流中心线呈对称分布。其中,外悬挑屋盖上表面风压以负压为主,最大负压系数绝对值为1.3,位于迎风面外悬挑屋盖端部,

背风面风压系数绝对值接近于0。另外,与外悬挑屋盖相比,内悬挑屋盖正、负风压系数绝对值较小,且波动不大,最大负压系数绝对值为0.5,位于侧风面。由图6(b)可见,加设竖直挡风板后,外悬挑屋盖下表面风压系数在迎风面为正,风压系数沿 0° 风向来流中心线呈对称分布,最大正风压系数为0.5,位于迎风面外悬挑屋盖端部,来流方向中心线两侧风压系数均为负,且在悬挑端部绝对值最大,为0.75。内悬挑屋盖下表面风压系数在迎风面、侧风面以及背风面均为负,且数值基本不变,约为-0.5。

由图6(c)可见,加设波纹挡风板后,屋盖上表面风压系数基本沿 0° 风向来流中心线呈对称分布,且以负压为主。其中,最大负压系数绝对值为1.1,位于迎风面外悬挑屋盖端部,背风面风压系数绝对值最小,接近于0。内悬挑屋盖风压系数较小,迎风面风压系数绝对值比背风面大,最大负压系数绝对值为0.5,整体风压系数波动不大。由图6(d)可见加设波纹挡风板后,屋盖下表面风压系数沿 0° 风向来流中心线呈对称分布,其中,外悬挑屋盖最大正风压系数为0.5,位于迎风面外悬挑屋盖端部,来流方向两侧风压系数均为负,且在悬挑端部绝对值达到最大,为0.75,背风面风压系数接近于0。内悬挑屋盖下表面风压系数为负,其中负压系数绝对值最大值出现在背风面及侧面风,为0.5。

综合来看,土楼外悬挑屋盖端部加设挡风板后,由于改变了悬挑端部风场绕流,使得屋盖表面风压分布发生变化,一定程度地降低了外悬挑屋盖最大负压系数极值。相对来说,波纹挡风板对外悬挑屋盖最大负压系数绝对值降低效果要优于竖直挡风板,最大分别降低13.3%和26.7%,但对内悬挑屋盖及外悬挑屋盖下表面风压系数的减小效果不明显。可见,竖直挡风板和波纹挡风板对屋盖风敏感部位外悬挑屋盖风压系数均有一定的降低效果,但波纹挡风板的降低效果更好。

为了进一步定量分析两种形式挡风板对屋盖表面风压的影响,定义屋盖表面测点的风压系数卸载率 ω ,由此可以定量表示设置挡风板后对屋盖表面风压系数的改变程度。

$$\omega = \frac{C_{p_{\text{原}}} - C_{p_{\text{新}}}}{C_{p_{\text{原}}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中, $C_{p_{j\text{后}}}$ 为加设挡风板后屋盖表面第 j 测点风压系数; $C_{p_{j\text{原}}}$ 为未设挡风板的原型屋盖表面第 j 测点风压系数。

根据公式(8)计算得到了屋盖表面测点风压系数的卸载率 ω , 篇幅限制, 选取内悬挑屋盖迎风面端部5个代表性测点和外悬挑屋盖迎风面端部5个代表性测点风压系数卸载率计算结果如图7所示, 其中测点位置及编号参如图3所示。

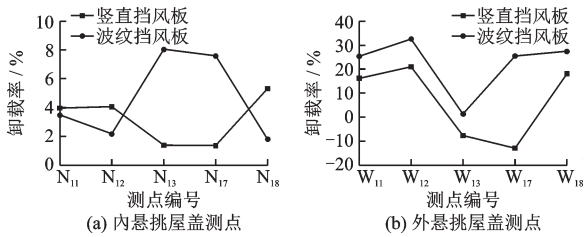


图7 屋盖代表性测点风压系数卸载率($h/H_j=0.03$)

Fig.7 Unloading rate of wind pressure coefficients at representative measurement points ($h/H_j=0.03$)

由图7(a)可见, 0° 风向角下, 内悬挑屋盖端部迎风面测点风压系数在加设挡风板后均有所减小。竖直挡风板最大风压系数卸载率位于测点 N_{18} , 为5.3%, 波纹挡风板对该测点的风压系数卸载率为1.8%, 是竖直挡风板的0.34倍; 波纹挡风板的最大风压系数卸载率位于测点 N_{13} , 为8.0%, 竖直挡风板对该点的风压系数卸载率为1.4%, 是波纹挡风板的0.175倍。对于测点 N_{11} 、 N_{12} , 竖直挡风板比波纹挡风板的卸载效果好, 二者分别相差0.4%和1.9%; 对于测点 N_{13} 和 N_{17} , 同一挡风板对该两测点风压系数卸载率基本相同, 分别为1.4%以及8%, 竖直挡风板比波纹挡风板的风压系数卸载率低6.6%; 综合来看, 竖直挡风板和波纹挡风板对内悬挑屋盖迎风面风压系数的卸载效果相差不大。

由图7(b)可见, 0° 风向角下, 波纹挡风板对外悬挑屋盖迎风面端部代表性测点风压系数的卸载效果明显好于竖直挡风板, 竖直挡风板和波纹挡风板的最大风压系数卸载率均位于测点 W_{12} , 分别为21%和32.5%, 二者相差11.5%; 对于迎风面测点 W_{11} , 竖直挡风板和波纹挡风板的风压系数卸载率分别为16.2%和25.4%, 二者相差11.2%。

综合来看, 波纹挡风板对圆形土楼屋盖迎风面风压系数的卸载效果更好。

3.2 波纹挡风板几何参数对土楼屋盖风压影响分析

由3.1节的分析, 发现波纹挡风板对于土楼悬挑屋盖迎风面风压系数具有较好的卸载效果。据此, 以波纹挡风板为对象, 进一步优化其几何参数, 以实现更优的抗风效果。

3.2.1 波纹挡风板高度对土楼屋盖风压影响分析

综合考虑土楼屋脊处高度 $H_j=17\text{ m}$, 及挡风板设置不会影响土楼窗口采光等正常使用功能, 共设置了5种高度 h 的波纹挡风板 (波纹圆弧半径 $R=10\text{ m}$), 具体相对高度 h/H_j 分别为0.01、0.02、0.03、0.04和0.05, 计算得到此五种高度下屋盖表面风荷载, 并选取内悬挑屋盖迎风面端部5个代表性测点和外悬挑屋盖迎风面端部5个代表性测点风压系数卸载率计算结果如图8所示, 其中测点位置及编号如图3所示。

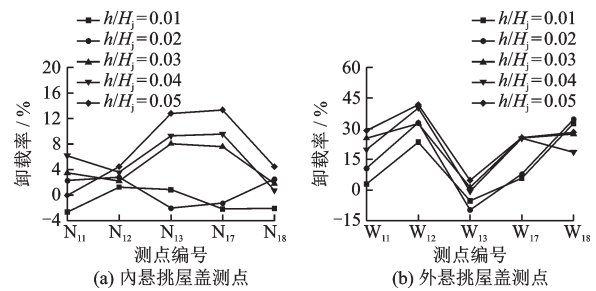


图8 屋盖代表性测点风压系数卸载率

Fig.8 Unloading rate of wind pressure coefficients at representative measurement points

由图8(a)可见, 0° 风向角下, 加设波纹挡风板后, 挡风板相对高度 h/H_j 分别为0.01和0.02时, 内悬挑屋盖迎风面端部测点风压系数卸载率呈无规律变化, 且卸载效果不好; 波纹挡风板相对高度 h/H_j 分别为0.03、0.04和0.05时, 所选屋盖表面大部分测点风压系数卸载率随着挡风板相对高度的增加而呈现增大的趋势, 具有一定的卸载效果。其中, 不同相对高度挡风板的最大风压系数卸载率均出现在测点 N_{13} 和 N_{17} , 波纹挡风板相对高度 $h/H_j=0.05$ 时测点 N_{17} 风压系数卸载率达到最大, 为13.3%。

由图8(b)可见, 0° 风向角下, 外悬挑屋盖迎风面端部测点风压系数在加设波纹挡风板后有所减小, 且随着挡风板相对高度的增加, 所选屋盖表面大部分测点风压系数卸载率呈现增大的趋势, 最大卸载

率为42.7%，出现在挡风板相对高度 $h/H_j=0.05$ 时，对应测点编号为 W_{12} 。

综合来看，当挡风板相对高度 $h/H_j=0.05$ 时波纹挡风板对圆形土楼屋盖迎风面风压的整体卸载效果更好。

3.2.2 波纹挡风板倾角对土楼屋盖风压影响分析

为了研究挡风板倾角对土楼屋盖风压的影响，针对相对高度 h/H_j 分别为0.01、0.02、0.03、0.04和0.05的波纹挡风板，计算得到了波纹挡风板与外悬挑屋盖端部倾角 θ 分别为 45° 、 90° 、 -45° 、 -90° 和 -135° 下(定义挡风板朝上 θ 为正，朝下 θ 为负)，波纹圆弧半径 $R=13.5$ m时屋盖表面风荷载，并选取 h/H_j 分别为0.01、0.03和0.05时内悬挑屋盖迎风面端部5个代表性测点和外悬挑屋盖迎风面端部5个代表性测点风压系数卸载率计算结果如图9所示，其中测点位置及编号如图3所示。

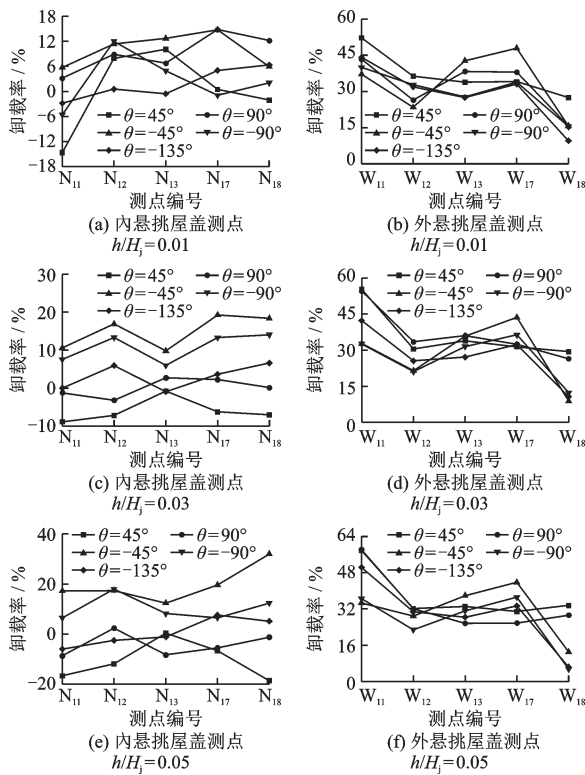


图9 屋盖代表性测点风压系数卸载率

Fig.9 Unloading rate of wind pressure coefficients at representative measurement points

由图9(a)可见，波纹挡风板相对高度 $h/H=0.01$ 时，在外悬挑屋盖端部加设不同倾角的挡风板后，对内悬挑屋盖端部迎风面测点风压系数均起到了一定的卸载效果，其中挡风板倾角 θ 为 90° 和 -45°

时，测点风压系数卸载率最大值为14.7%，对应测点为 N_{17} ，但对于测点 N_{11} 和 N_{13} ，加设倾角 θ 为 -45° 波纹挡风板对测点风压系数的卸载效果较其它倾角的波纹挡风板更好。

由图9(b)可见，波纹挡风板相对高度 $h/H=0.01$ 时，外悬挑屋盖端部在加设不同倾角的波纹挡风板后，对外悬挑屋盖端部迎风面测点风压系数卸载效果较好，测点风压系数卸载率最大值为52.2%，对应测点为 W_{11} ，倾角 θ 为 45° 。当倾角 θ 为 -45° 时，测点 W_{13} 、 W_{17} 和 W_{18} 的测点风压系数的卸载效果较其它倾角的波纹挡风板更好，测点风压系数卸载率最大值为47.9%，对应测点为 W_{17} 。

由图9(c)可见，波纹挡风板相对高度 $h/H=0.03$ 时，在外悬挑屋盖端部加设倾角 θ 为 90° 和 -135° 波纹挡风板后，对内悬挑屋盖端部迎风面测点风压系数卸载效果不明显，测点风压系数卸载率最大值仅为6.5%，对应测点为 N_{18} ，倾角 θ 为 -135° ；相对而言，加设倾角 θ 为 -45° 和 -90° 波纹挡风板后，卸载效果较好，测点风压系数卸载率最大值为19.2%，对应测点 N_{17} ，倾角 θ 为 -45° 。

由图9(d)可见，波纹挡风板相对高度 $h/H=0.03$ 时，加设不同倾角挡风板均对外悬挑屋盖迎风面测点风压系数卸载效果显著，其中测点风压系数卸载率最大值为55.3%，对应测点为 W_{11} ，倾角 θ 为 45° 。当倾角 θ 为 -45° 时，测点 W_{12} 和 W_{13} 的测点风压系数的卸载效果较其它倾角的波纹挡风板更好，其风压系数卸载率最大值为43.6%，对应测点为 W_{17} 。

由图9(e)可见，波纹挡风板相对高度 $h/H=0.05$ 时，在外悬挑屋盖端加设 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 波纹挡风板后，内悬挑屋盖迎风面端部大部分测点风压系数卸载率呈现负值，即对风压系数没有起到卸载效果；加设倾角 $\theta=-45^\circ$ 波纹挡风板对屋盖表面测点风压系数卸载效果较好，最大风压系数卸载率为31.9%，对应测点编号为 N_{18} ，且对于迎风面测点 N_{11} ，卸载效果也较好，其风压系数卸载率为17.2%，比加设倾角 $\theta=-90^\circ$ 波纹挡风板时其风压系数卸载率增大了10.8%。

由图9(f)可见，波纹挡风板相对高度 $h/H=0.05$ 时，加设倾角 $\theta=45^\circ$ 、 90° 和加设倾角 $\theta=-45^\circ$ 、 -90° 、 -135° 的波纹挡风板对外悬挑屋盖迎风面端部测点风压系数均起到了一定程度的卸载作用。

加设倾角 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 的波纹挡风板的测点风压系数的最大卸载率均为58%，但对于测点 W_{13} 、 W_{17} 和 W_{18} 来说，加设倾角 $\theta=45^\circ$ 波纹挡风板比加设倾角 $\theta=90^\circ$ 波纹挡风板的风压系数卸载效果更好。加设倾角 θ 分别为 -45° 、 -90° 和 -135° 的波纹挡风板测点风压系数最大卸载率为50.4%，对应挡风板倾角 $\theta=-135^\circ$ ，测点编号为 W_{11} 。对于测点 W_{13} 、 W_{17} 和 W_{18} ，加设倾角 $\theta=-45^\circ$ 波纹挡风板对测点风压系数的卸载效果较其它倾角的波纹挡风板更好。

综合来看，当波纹挡风板倾角 $\theta=-45^\circ$ ，相对高度 $h/H=0.05$ 时，对圆形土楼屋盖迎风面测点风压系数的卸载效果最优。

3.2.3 波纹挡风板波纹圆弧半径对土楼屋盖风压影响分析

根据3.2.2节所得结论，选取相对高度 $h/H_j=0.05$ ，倾角 $\theta=-45^\circ$ 的波纹挡风板（此情况下测点风压系数卸载效果最优），计算得到了波纹圆弧半径 R 分别为5.5、8.5、13.5 m时屋盖结构表面风荷载，选取内悬挑屋盖迎风面端部5个代表性测点和外悬挑屋盖迎风面端部5个代表性测点风压系数卸载率计算结果如图10所示，其中测点位置及编号参看图3所示。

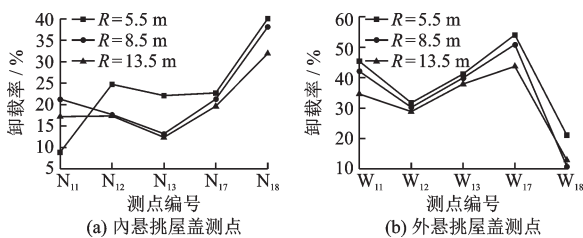


图10 屋盖代表性测点风压系数卸载率

Fig.10 Unloading rate of wind pressure coefficients at representative measurement points

由图10(a)可见， 0° 风向角下，在外悬挑屋盖端部加设不同波纹圆弧半径的挡风板后，对内悬挑屋盖端部迎风面测点风压系数均起到了卸载效果，其中，挡风板波纹圆弧半径 $R=5.5$ m时，卸载效果更好，除测点 N_{11} 外，所选其余测点风压系数卸载率均优于波纹圆弧半径 $R=8.5$ m和 $R=13.5$ m的挡风板，其最大卸载率为40.1%，对应测点编号为 N_{18} 。

由图10(b)可见， 0° 风向角下，在外悬挑屋盖端部加设不同波纹圆弧半径的挡风板后，对外悬挑屋盖端部迎风面测点均起到了卸载效果，其中，挡风板波纹圆弧半径 $R=5.5$ m时，所有测点风压系数卸

载率均优于波纹圆弧半径 $R=8.5$ m和 $R=13.5$ m的挡风板，其最大风压系数卸载率为54%，对应测点编号 W_{17} 。

综合来看，挡风板波纹圆弧半径 $R=5.5$ m时，对圆形土楼屋盖迎风面测点风压系数的卸载效果更好。

3.3 较优几何尺寸的波纹挡风板对土楼屋盖风压卸载机理探讨

为了进一步探讨加设挡风板对土楼悬挑屋盖表面风压系数的卸载机理，根据3.2节的研究结论，选取波纹挡风板的相对高度、倾角、波纹圆弧半径三个较优的几何参数，即对悬挑屋盖端部迎风面测点风压系数卸载效果较优的3种工况（具体工况设置见表1），分析讨论悬挑屋盖表面流场特征，并与不加挡风板的原型屋盖进行对比分析。同时，考虑到挡风板自身可能对风荷载较敏感，还对挡风板风压分布进行探讨。

表1 原型工况及波纹挡风板较优几何参数设置工况

Table 1 Original conditions and optimized geometric parameters for wind deflectors

工况	相对高度	倾角/ $^\circ$	波纹圆弧半径/m
1	0	0	0
2	0.05	-90	13.5
3	0.05	-45	13.5
4	0.05	-45	5.5

根据表1所列4种工况，计算并提取了 0° 风向角下结构迎风面中心竖直剖面流场分布，如图11所示。

由图11(a)可见，原型工况下，来流撞击到外悬挑屋盖迎风面，气流发生流动分离现象，在外悬挑屋盖上形成了较大尺寸的漩涡，漩涡中心位于外悬挑屋盖靠近端部的位置，此外，内悬挑屋盖端部也有小型漩涡产生。由图11(b)可见，加设倾角 $\theta=-90^\circ$ 的波纹挡风板后，一定程度上改变了来流方向，来流仍会在外悬挑屋盖迎风面上形成漩涡，但与图11(a)原型工况对比发现，外悬挑屋盖上的漩涡尺寸有所减小，且漩涡中心上移到了外悬挑屋盖靠近中部的的位置，此外，内悬挑屋盖未产生漩涡，这也印证了该工况一定程度地减小了悬挑屋盖表面的风压系数。由图11(c)可见，改变波纹挡风板倾角 $\theta=-45^\circ$ 后，由于挡风板突出外悬挑屋盖端部，

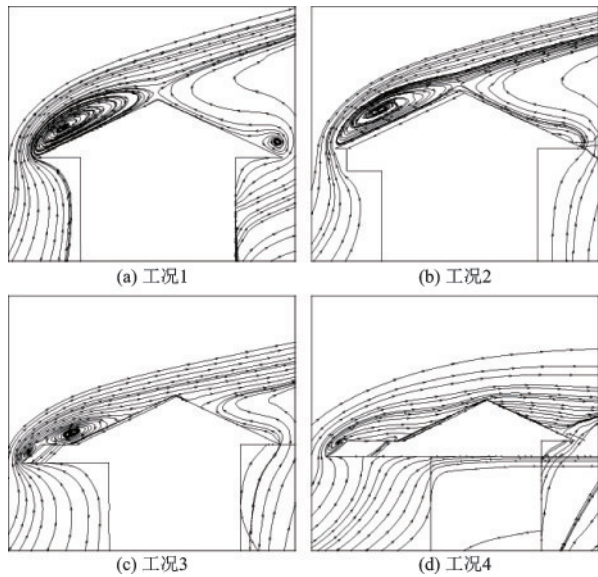


图 11 屋盖结构迎风面中心竖直剖面流场分布

Fig.11 Flow distribution in the vertical cross-section at the center of the windward side

来流在波纹挡风板迎风面倾斜表面上发生撞击,并在挡风板斜面上形成了漩涡,与图 11(a)原型工况对比发现,部分来流漩涡转移到了波纹挡风板斜面上,外悬挑屋盖迎风面处形成漩涡的尺寸明显减小,此外,内悬挑屋盖也未产生漩涡,使得此工况下悬挑屋盖表面的风压系数明显减小。由图 11(d)可见,改变波纹挡风板波纹圆弧半径 $R=5.5$ m后,由于波纹圆弧半径变小,波纹挡风板形状起伏较明显,使得来流撞击到波纹挡风板迎风面倾斜的表面上后,在挡风板斜面上产生了尺寸较小且破碎的漩涡,且来流方向改变明显,此综合作用的影响,可能是造成此工况对屋盖表面风压系数卸载更加显著的原因。

另外,考虑到挡风板自身可能对风荷载较敏感,针对卸载效果最好的工况 4 挡风板形式,计算得到其表面风压系数分布如图 12 所示。

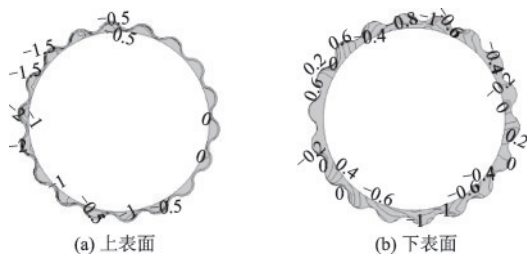


图 12 挡风板表面风压系数分布

Fig.12 Wind pressure coefficient distribution on wind deflector surfaces

由图 12(a)可见,挡风板上表面风压以负为主,迎风区域最大负风压系数绝对值为 2,沿侧风处至背风处负风压系数绝对值逐渐减小,背风处较大区域风压系数基本为 0。由图 12(b)可见,挡风板下表面负风压系数绝对值较上表面降低,其绝对值最大为 1,出现在侧风处。

综合来看,挡风板表面风荷载数值较大,其自身为风敏感结构,据此建议挡风板应采用高强材料且与主体屋盖结构牢固安装,以充分发挥其作用。

4 结 论

(1) 来流作用下,圆形土楼外悬挑屋盖端部风压数值较大,其最大负风压系数绝对值达到 1.5,属于对风荷载敏感部位,更易发生风致破坏。

(2) 在外悬挑屋盖端部加设竖直挡风板和波纹挡风板均对屋盖表面风荷载具有一定的卸载作用,对于外悬挑屋盖迎风面端部风荷载而言,波纹挡风板较竖直挡风板对其卸载作用更明显。

(3) 波纹挡风板相对高度 $h/H_1=0.05$,倾角 $\theta=-45^\circ$,波纹圆弧半径 $R=5.5$ m时对外悬挑屋盖迎风面端部风荷载的卸载效果最好。

(4) 倾角 $\theta=-45^\circ$ 布置的波纹挡风板对悬挑屋盖表面来流起的阻挡作用,使得气流撞击形成的漩涡从屋盖悬挑端转移到挡风板表面,同时波纹圆弧的存在降低了内、外悬挑屋盖表面气流漩涡强度,能够较好实现卸载屋盖表面风压的目的。

参考文献:

- [1] 黄汉民. 福建土楼[M]. 北京:生活·读书·新知三联书店,2009.
Huang H M. Tulou in Fujian[M]. Beijing: SDX Joint Publishing Company,2009. (in Chinese)
- [2] Colafranceschi E, Pallottino E, Porretta P. Tulou: The rammed earth dwellings of Fujian (China). Functional, typological and constructive features [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 44: 937-944.
- [3] 彭兴黔,徐刚,刘春艳,等. 客家土楼的屋盖表面风压分布规律研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增 2): 193-196.

- Peng X Q, Xu G, Liu C Y, et al. Study on wind pressure on roof of Hakka Earth Buildings [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Sup2): 193-196. (in Chinese)
- [4] 朱海, 彭兴黔, 高志飞, 等. 低矮异型建筑风环境的数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增2): 187-192, 219. Zhu H, Peng X Q, Gao Z F, et al. Numerical simulation of wind environment around low-rise specially shaped buildings [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Sup2): 187-192, 219. (in Chinese)
- [5] 高志飞. 客家土楼风荷载特性风洞实验研究[D]. 福建: 华侨大学, 2011. Gao Z F. Studies of wind load characteristics for Hakka Earth Building of wind Tunnel [D]. Fujian: Huaqiao University, 2011. (in Chinese)
- [6] 吴仁伟, 彭兴黔. 圆形土楼屋盖风荷载的数值模拟分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 427-432. Wu R W, Peng X Q. Numerical simulation of wind pressure on the roof of circular Earth Building [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2011, 32(4): 427-432. (in Chinese)
- [7] Su Y M, Wu Y C. Wind field analysis for a Tulou (Earthen Building) in Fujian, China — a case study of Eryi Lou [J]. Advanced Materials Research, 2014, 933: 335-340.
- [8] 林俊龙, 彭兴黔, 吴桢. 福建圆形土楼屋盖结构的风灾损伤分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 320-323. Lin J L, Peng X Q, Wu Z. Research on windstorm damage to the roof structure of Fujian round Tulou [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2013, 34(3): 320-323. (in Chinese)
- [9] 严彪, 彭兴黔, 施维娟, 等. 福建土楼屋盖风压气动抗风措施研究[J]. 青岛理工大学学报, 2017, 38(3): 17-22, 27. Yan B, Peng X Q, Shi W J, et al. Research of aerodynamic wind-resistant measures for Fujian Tulou roof [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2017, 38(3): 17-22, 27. (in Chinese)
- [10] 郭栋鹏. 计算流体力学及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020. Guo D P. Computational fluid dynamics and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [11] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] AIJ recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [13] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 第二版. 上海: 同济大学出版社, 2008. Huang B C. Principles and applications of structural wind resistance analysis [M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 张相庭. 工程抗风设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. Zhang X T. Calculation handbook of wind resistance in engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)