

文章编号: 1000-5013(2011)04-0427-06

圆形土楼屋盖风荷载的数值模拟分析

吴仁伟, 彭兴黔

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用数值模拟方法,在具有不同坡角和高径比情况下,对圆形土楼的屋盖极值风压系数和净风压系数进行参数分析,探讨屋面坡角和高径比对客家圆形土楼屋盖风荷载的影响. 采用剪切应力输运(SST) $k-\omega$ 湍流模型,建立具有代表性的单体圆楼振福楼的数值风洞模型,得到屋盖极值风压系数和净风压系数随坡角、高径比变化的分布曲线. 结果表明,综合考虑两种风压系数和风流场的影响,圆形土楼抗风效果较好的坡角为 45° ,而高径比是 0.24.

关键词: 圆形土楼; 风压系数; 数值模拟; 屋盖; 坡角; 高径比

中图分类号: TU 312.1 **文献标志码:** A

我国东南沿海地区台风活动频繁,造成了大量建筑物,尤其是量大面广的低矮房屋的损坏甚至倒塌^[1]. 分布在沿海地区的客家土楼也不可避免地遭到了台风的侵袭. 2006 年,有着 400 多年历史的八角土楼“道韵楼”遭到了第 4 号强热带风暴“碧利斯”的侵袭,楼体受到了严重的破坏,楼内共有 6 间房子倒塌,还有多处瓦片被风吹掉,一些房子的屋顶已经不见,受损的房屋达到 10 多间. 另据介绍,由于年久失修及台风的影响,还有许多间的楼体严重倾斜,顶端侧移最大达到 0.5 m,而顶端侧移在 0.3 m 左右的倾斜楼体随处可见,对整个道韵楼彻底修复的资金需要 980 万元以上. “福建土楼”具有极高的历史价值、艺术价值和科学价值,因此,对土楼这种低矮异型建筑的保护至关重要^[2]. 本文采用数值模拟方法^[3-4]对土楼的风荷载特性和风流场进行分析,提出适合于客家土楼的抗风措施.

1 数值风洞模拟

1.1 数值风洞与计算模型的选择

以入选“世遗”的闽西永定圆形土楼——振福楼为建筑模型. 振福楼由^[5]内外两环同心圆建筑组成,外环直径为 45 m,3 层,高 11 m,墙厚 1.6 m,悬挑垂檐滴水 2.5 m,坡角为 25° ,土木内通廊式结构;内环单层,高 7 m,砖木结构;二环均采用两面坡瓦屋顶,穿斗、台梁混合式木构架.

在数值风洞中建立足尺度模型,忽略内部的门厅、祖堂等附属结构. 由于土楼空间的内向性和向心性,内环屋盖较外环屋盖受风荷载影响为小,因此数值模拟重点分析外环屋盖风荷载特性. 数值风洞采用 CFX-10.0 中对分离流的效果比较好的 SST $k-\omega$ ^[6]湍流物理模型. 由于圆形土楼屋盖体型复杂,采用具有良好适应性的四面体网格划分建筑模型^[7-8],如图 1 所示.

1.2 数据处理方法

为了便于比较分析,采用数值模拟方法,对在高径比为 0.24,屋盖坡角分别为 $15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和在屋盖坡角为 25° ,高径比分别

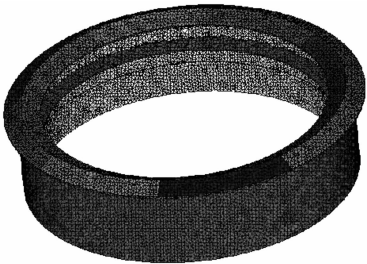


图 1 圆楼四面体网格图
Fig.1 Tetrahedral mesh diagram for circular earth building

收稿日期: 2011-02-11

通信作者: 彭兴黔(1959-),男,教授,主要从事结构风工程的研究. E-mail:pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708040);福建省自然科学基金资助项目(2009J01255);福建省厦门市科技计划项目(3502Z20083039)

为 0.12,0.24,0.36,0.48,0.60 的模型进行数值模拟分析.

客家土楼墙体较厚,一般在 1~2 m 左右,受风影响小,而屋盖挑檐悬挑过长,故台风首先破坏的是土楼的挑檐部分.双坡屋盖分为外挑檐和内挑檐,外檐分区以 $W_i(i=1\sim8)$ 表示,内檐分区以 $N_i(i=1\sim8)$ 表示,对屋面风荷载进行数值模拟计算.图 2 为圆楼屋面分区.

1.3 基本方程及湍流模型的选择

1.3.1 控制方程选择 采用由湍流模型封闭控制方程进行求解的时均模拟方法,气流流动控制方程^[9]的通用形式为

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \varphi) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \varphi) + S. \tag{1}$$

式(1)中:各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项; ρ 为空气的质量密度; \mathbf{u} 为速度矢量; φ 为通用变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项.

1.3.2 湍流模型和边界条件 湍流模型采用剪切应力输运模型(SST $k-\omega$ 模型),在分离流场可以给出较高精度,而且收敛性好.在任一高度处,平均风速的计算式为 $\bar{u}(z) = \bar{u}_b \times (z/z_b)^\alpha$. 上式中:地面粗糙度指数 α 为 0.16; $\bar{u}_b = 5.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $z_b = 10 \text{ m}$.

入口湍流剖面按湍动能 $k(z)$ 和耗散率 $\epsilon(z)$ 的形式输入,其表达式^[10]为

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

式(2)中:系数 $C_\mu = 0.09, \gamma = 1.2, \beta = 1, k = 0.4; L_u$ 为湍流积分尺度,按经验式 $L_u = 100(z/30)^{0.5}$ ^[11];湍流强度 $I(z)$ 选用经验式 $I(z) = 0.1 \times (z/z_G)^{-\alpha-0.05}$ ^[12]. 地面建筑物表面采用非滑移壁面,数值风洞的两侧面和顶面采用自由滑移壁面,出口采用开放式的压力出口,湍流已经充分发展(静压为零).

1.4 风速矢量模拟结果

顺风向圆形土楼中心竖直剖面和背风面的局部风速矢量(流线)图,如图 3,4 所示.图 3,4 中:各线段的长度表示该处平均速度的相对大小;箭头方向表示该处速度的方向.从图 3 中可以看出,迎风面土楼内部回流强度较小,屋盖挑檐处气流较多,气流的扰动也较为剧烈,表现出强烈的分离,流态也更趋复杂.从图 4 中可以看出,在背风面后部出现了明显的一大一小的涡流,它的长度较大,而强度却较小.

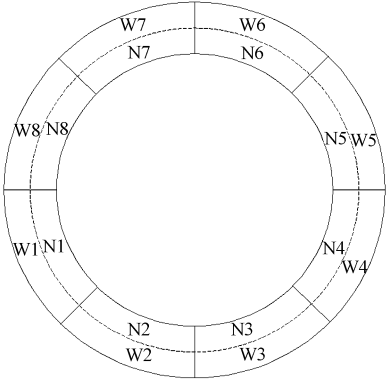


图 2 圆楼屋面分区

Fig. 2 Roof division of circular earth building

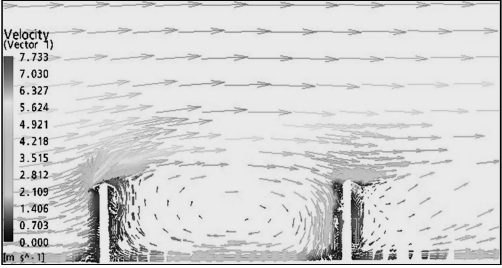


图 3 中心顺风向竖直剖面的风速矢量图
Fig. 3 Wind velocity vector of center along-wind vertical profile

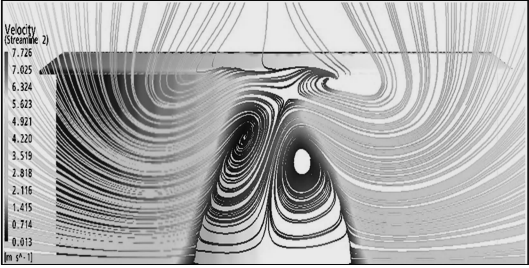


图 4 顺风向的背风面流线图
Fig. 4 Along-wind Leeward stream diagram

2 坡角和高径比影响的数值分析

定义屋盖平均风压系数为 C_p ,即将各计算点的风压系数 $C_{p,i} = \frac{p_i}{(1/2)\rho u^2}$ ^[13],按该点所属面积 A_i 作加权平均后得到的. 其计算式^[14]为

$$C_p = \frac{\sum C_{p,i} A_i}{\sum A_i}. \tag{3}$$

式(3)中: $C_{p,i}$ 为建筑物表面某测点*i*的风压系数; p_i 为测点*i*的净风压力; \bar{u} 为参考高度的平均风速; ρ 为空气质量密度.

通过将屋面上、下表面分区,用上、下表面平均风压的差值来表征屋盖的净风压系数 ΔC_p ,即有

$$\Delta C_p = C_{p,a} - C_{p,u}. \tag{4}$$

式(4)中: $C_{p,a}$, $C_{p,u}$ 分别为上、下表面平均风压.

2.1 屋盖净风压系数和极值风压系数随坡角变化

在高径比为 0.24 时,考察不同屋面坡角(θ)下各分区静风压系数和屋面极值风压系数的变化,分别如图 5,6 所示.

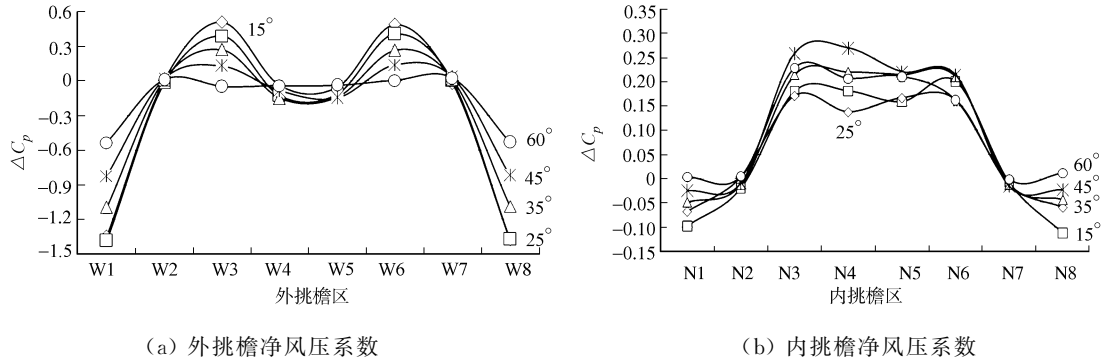


图 5 屋盖净风压系数随坡角变化曲线

Fig. 5 Curves of net wind pressure coefficient to different roof gradients

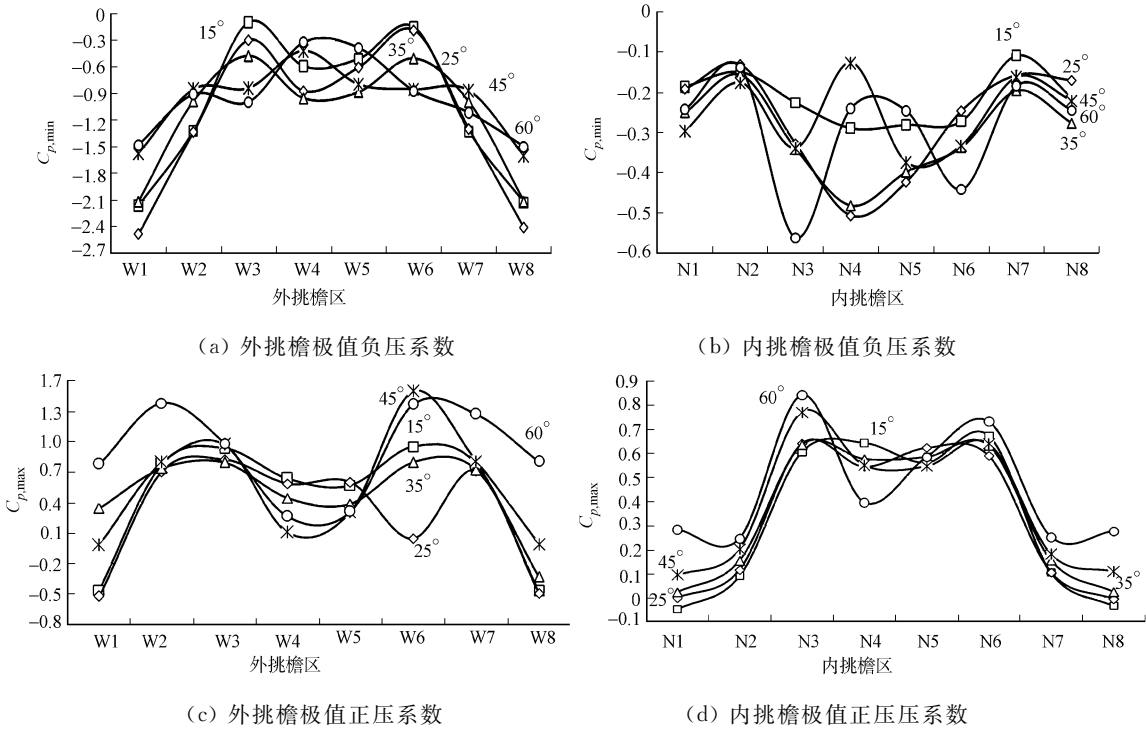


图 6 屋盖极值风压系数随坡角变化曲线

Fig. 6 Curves of extreme pressure coefficient to different roof gradients

由图 5(a)可见,外挑檐区的净风压系数沿顺风向中心线对称分布,变化梯度较大.坡角的增大主要影响迎风面和侧风面的体型系数变化.在迎风面 W1 区与 W8 区,坡角从 15°增大到 25°时,净风压系数基本没变化,但坡角从 25°增至 60°时,其绝对值逐渐减小(从-1.35 到 0.53);而 W3 区与 W6 区与迎风区类似,坡角的增大导致净风压系数从+0.5 逐渐减小至趋于零值.其余各区随坡角的增大变化比较平缓,趋于零值.

由图 5(b)可知,内挑檐区 N1 区与 N8 区的净风压系数随坡角增大负压逐渐减小到 0;N3 区、N6 区及 N4 区和 N5 区均是在坡角为 45°时达到了最大净风压系数,在 0.2~0.3 之间变化,有利于抗风.整体

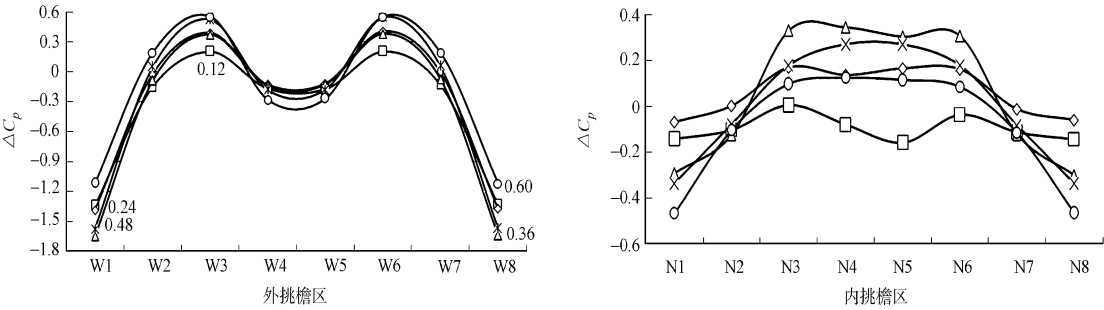
坡角对外挑檐和内挑檐的影响相似,迎风面绝对值减小,侧风面在外挑檐区由正向负过渡,内挑檐是逐渐正向增大,背风面外挑檐区净风压系数接近于 0,而内挑檐区则先变大后减小.

从图 6 可以发现,随着屋盖坡角的增大,屋盖极值负压总体逐渐减少,极值正压逐渐增大. 在 15° 变化到 60° 时,外挑檐区 W1 区与 W8 区负值变化幅度达到 $+1.0$,正压值变化达到 $+1.3$;W3 区与 W6 区负压随着坡角增大反而增大,从 -0.09 增大到 -1.0 ;正压在坡角为 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 时减小,坡角大于 35° 后,到 45° 时出现极值正压,为 $+1.50$;W4 区与 W5 区在坡角为 35° 时达到最大负压值,为 -0.95 ,在 45° 坡角是出现极小正压值,为 $+0.1$.

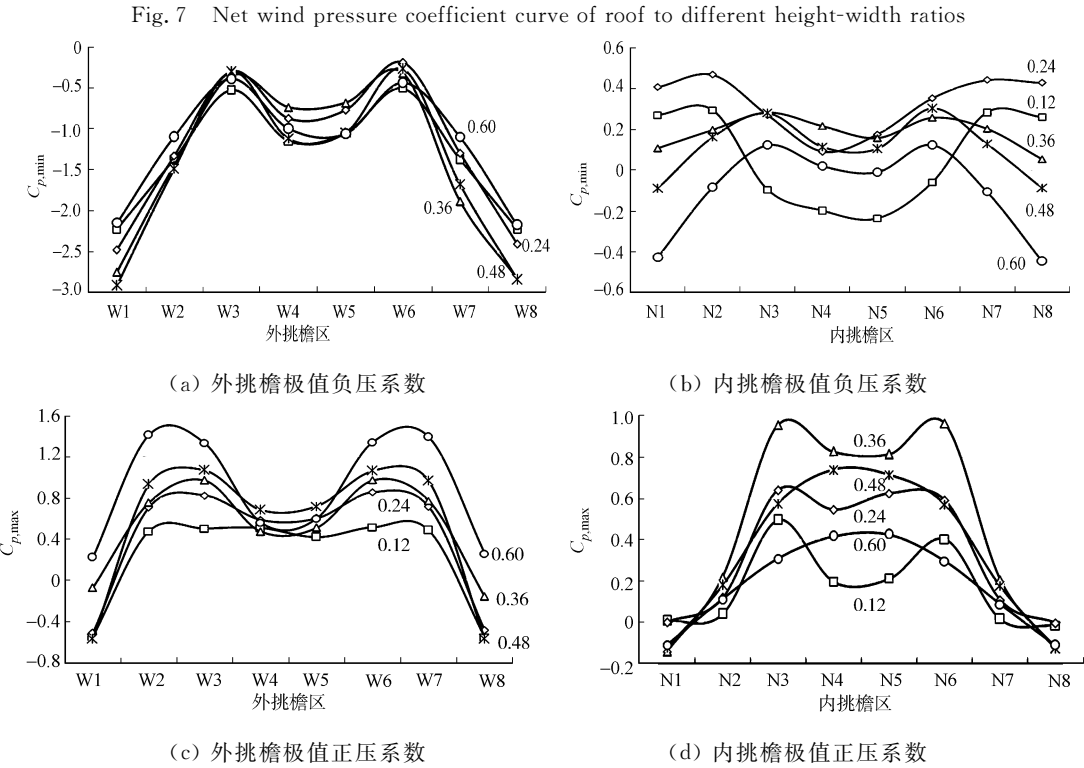
在内挑檐区,坡角的改变并未影响极值风压的分布. 其中:W3 区变化最明显,极值负压增大,极值正压减小,表明极值区的风压与屋盖坡角的增大呈现相反的变化趋势. 由于台风的随机性,极值风压有时伴随着极大负压和极大正压交替出现,对于屋盖结构应考虑两者的不利组合.

2.2 屋盖净风压系数和极值风压系数随高径比变化

在坡角为 25° 时,考察不同高径比(H/D)下各分区静风压系数和屋面极值风压系数的变化,分别如图 7,8 所示.



(a) 外挑檐净风压系数 (b) 内挑檐净风压系数
图 7 屋盖净风压系数随高径比变化曲线



(a) 外挑檐极值负压系数 (b) 内挑檐极值负压系数
(c) 外挑檐极值正压系数 (d) 内挑檐极值正压系数
图 8 屋盖极值风压系数随高径比变化曲线

Fig. 8 Extreme wind pressure coefficient curve of roof to different height-width ratios

由图 7(a)可知,在迎风区域和侧风区域,净风压随着高径比的增大,负值区的逐渐减小,正值区逐渐增大. W1 区与 W8 区在高径比为 0.36 时取得净风压系数最大负值 -1.65 ;在 W2 区与 W7 区,净风

压系数以坐标横轴上下对称分布,其值在 $-0.15\sim+0.20$ 之间变化;而 W4 区与 W5 区的变化范围在 $-0.28\sim-0.12$,幅度较小,在高径比为 0.60 是取得最小值。

由图 7(b)可知,内挑檐 N1 区与 N8 区随着高径比的增大,净风压系数绝对值先减小后增大,在 $-0.47\sim-0.07$ 之间变化;N3 区、N6 区及 N4 区和 N5 区的体型系数在高径比为 0.36 时最大,是正值,而在高径比为 0.12 时最小,是负值;N2 区与 N7 区在高径比为 0.24 时值趋于 0,受高径比影响很小。

从图 8 可知,负压系数在迎风区 W1 区与 W8 区取得极值,达 -2.92 。此时的高径比为 0.48,随着高径比的增大,极值负压系数减小到 -2.5 ,W4 区与 W5 区极值主要分布在 $-1.1\sim-0.8$ 之间,变化梯度很小;内挑檐区的极值主要分布在 $-1\sim0$ 范围内,N1 区与 N8 区及 N2 区与 N7 区随着高径比增大而增大,而其余的区域随高径比渐渐减小,趋于 -0.5 。极值负压系数变化最大的区域为内挑檐的 N8 区,变化梯度为 $+0.87$ 。

正压系数区域处于迎风挑檐处的 W1 区与 W2 区,其余外挑檐区随着高径比增大逐渐增大,W2 与 W7 达到最大正压值,为 $+1.42$,背风区域的正压极值较小,高径比影响不大;而内挑檐区均在高径比为 0.36 时取得极值正压,而后渐渐减小,在高径比为 0.60 时大多数均为最小正压区,除了 N4 区与 N5 区在高径比为初始值 0.12 时取得。

总体上极值负压在内挑檐的分布,高径比影响较明显;极值正压系数在外挑檐分布,有正有负,高径比影响较大。

2.3 高径比对圆形土楼风流场的影响

不同高径比的中心顺风向竖直剖面风速矢量图,如图 9 所示。从图 9 可以看出,高径比对圆形土楼风流场的影响主要集中在屋盖和内部区域。高径比较小时,圆形土楼的直径很大,内部的湍流没有强烈扰动,未形成明显的环形涡流,屋盖的挑檐处分离比较均匀稳定;当高径比逐渐变大时,檐口高度增大,圆形土楼直径渐渐变小,土楼内部的环形涡流越来越明显,表现出了较强的湍流非各向同性。

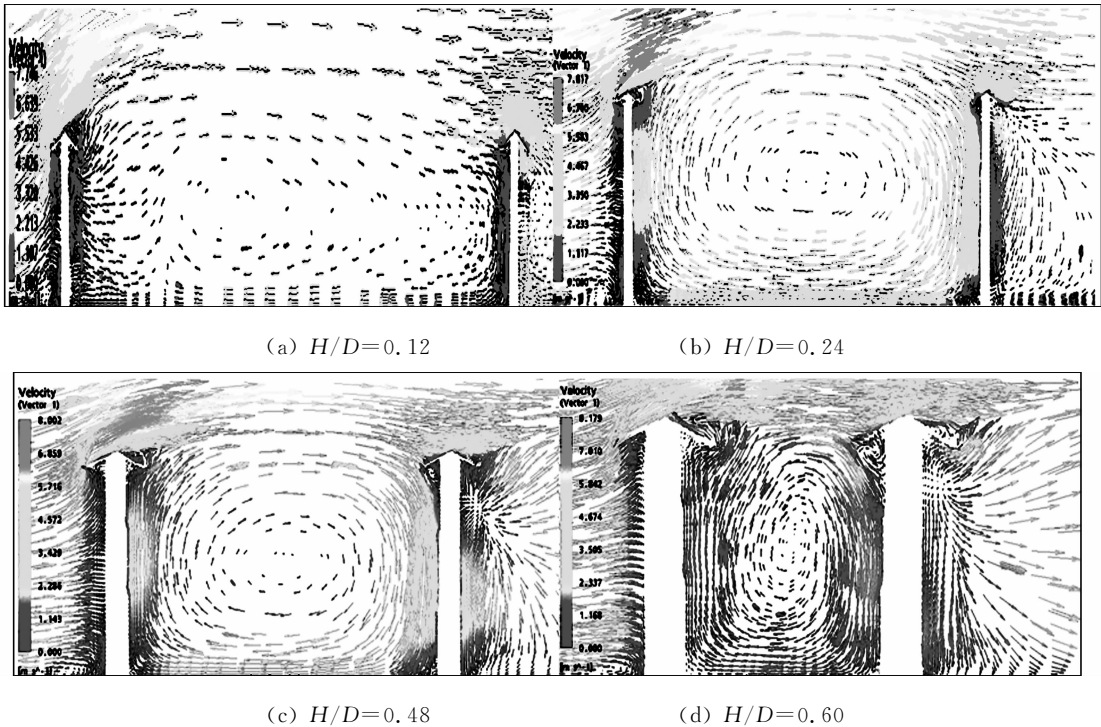


图 9 不同高径比的中心顺风向竖直剖面风速矢量图

Fig. 9 Velocity vector diagram of center along-wind vertical profile for different height-diameter ratios

3 结论

(1) 屋盖坡角对土楼的内部的流场影响较小,但对迎风的外挑檐区,随着坡角的增大,其净风压系数和极值风压系数的负压绝对值减小,甚至出现正压;内挑檐区只有静风压系数随坡角增大变化明显。

综合考虑这两种风压系数对屋盖挑檐的影响,坡角取为 45° 对屋盖抗风比较有利。

(2) 土楼的高径比不仅影响屋盖表面风压系数的分布,且改变了土楼内部和挑檐附加的流场。随着高径比增大,两种风压系数的变化没有一致的趋势。根据减压的原则,既要考虑来流处外挑檐区和内挑檐区的负压减小,也要考虑流场的改变好坏,所以建议最优高径比为 0.24。

(3) 文中仅对具有代表性的圆楼在建筑体型确定的情况下进行数值模拟分析,对其他形式的土楼和土楼群体以及周围的场地环境尚未开展研究。

参考文献:

- [1] 孙炳楠,傅国宏,陈明,等. 1994 年 17 号台风对温州民房破坏的调查[J]. 浙江建筑, 1995(4):19-23.
- [2] 韩振华,赵娟. 走向未来的客家土楼[J]. 福建建设科技, 2009(1):53-56.
- [3] TAMURA T. Reliability on CFD estimation for wind-structure interaction problems[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81(1/2/3):117-143.
- [4] MURAKAMI S. Current status and future trends in computational wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67/68:3-34.
- [5] 黄汉民. 福建土楼[M]. 北京:三联书店, 2003.
- [6] GRAG V K, AMERI A A. Two-equation turbulence models for prediction of heat transfer on a transonic turbine blade[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001, 22(6):593-602.
- [7] STATHOPOULOS T, BASKARAN A. Computer simulation of wind environmental conditions around buildings[J]. Engineering Structures, 1996, 18(11):876-885.
- [8] BASKARAN A, STATHOPOULOS T. Computational evaluation of wind effects on buildings[J]. Bldg Environ, 1989, 24(4):325-333.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [10] RICHARDS P J, HOXEY R P, SHORT L J. Wind pressures on a 6 m cube[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14/15):1553-1564.
- [11] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 2 版. 上海:同济大学出版社, 2008.
- [12] Architectural Institute of Japan, AIJ recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo: AIJ, 2004.
- [13] 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.
- [14] 周暄毅. 大跨度屋盖结构的风荷载及风致响应研究[D]. 上海:同济大学, 2004.

Numerical Simulation of Wind Pressure on the Roof of Circular Earth Building

WU Ren-wei, PENG Xing-qian

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: To investigate effects of roof gradient and height-diameter ratio upon the wind loads on the roofs of Hakka circular earth building, a series of parametric analyses were carried out on the roof extreme wind pressure coefficient and net wind pressure coefficient by means of numerical simulation. Using SST $k-\omega$ turbulence model, a typical model of single circular earth building “Zhen-fu building” is established. The roof extreme wind pressure coefficient and net wind pressure coefficient distribution curves for circular earth buildings with various roof gradients and height-diameter ratios were obtained. It's indicated that the optimal roof gradient of circular earth building to resist wind load is 45° , and the optimal height-width ratio is 0.24.

Keywords: circular earth building; wind pressure coefficient; numerical simulation; roof; gradient; height-diameter ratio

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)