

方形土楼夯土墙的风驱雨量分布

梁兰娣, 彭兴黔, 花长城

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 对方形土楼进行风洞试验和数值模拟,在数值模拟风场和试验风场达到较好一致性时引入降雨过程的计算模型.采用该方法研究方形土楼在不同风速、不同降雨量,以及不同屋檐悬挑长度下迎风墙面风驱雨量的分布特征.研究表明:风驱雨侵蚀因子与风速和降雨量有关,并随风速及雨强的增加而增加;悬挑屋盖对屋盖附近区域的墙面形成有效的遮蔽作用.

关键词: 方形土楼; 风洞试验; 数值模拟; 风驱雨; 风速; 降雨量; 墙面

中图分类号: TU 360.2 **文献标志码:** A

福建永定土楼于 2008 年被正式列入《世界文化遗产名录》.土楼用夯土作为整个建筑的承重结构,具有和其他夯土结构民居房屋的如下 3 个共性优点^[1]:1) 结构稳定性好,抗震性能好;2) 夯土墙体材料具有较大的蓄热性,可保证房屋冬暖夏凉;3) 夯土墙体材料具有吸放湿作用,可调节室内湿度.然而,夯土墙怕水,不耐雨水侵蚀,在风驱雨作用下易受到较大的损害.因此,对土楼夯土墙风驱雨量分布研究所得的结论,将对土楼的后续保护工作有着重要的指导意义,对土楼的保护至关重要.基于此,本文对方形土楼夯土墙的风驱雨量分布进行研究.

1 方形土楼风洞试验

风洞试验在湖南大学风洞试验室进行.根据土楼所在地的地貌特征及国家标准 GB 50009—2006《建筑结构荷载规范》的规定^[2],确定土楼为 B 类地貌,其地貌的粗糙度指数 $\alpha=0.16$.

为验证模拟风场与实际风场的吻合性,首先对该模拟地貌风速、湍流强度等相关参数进行试验测定.试验测得的顺风向脉动风速谱及风洞模拟 B 类风场理论值与实际测值比较示意图,如图 1,2 所示.从图 2 可以看出:在低矮建筑中风场的理论风速值与实测风速值非常接近.由于土楼是低矮建筑,所以试验的准确性可以得到充分的保证.

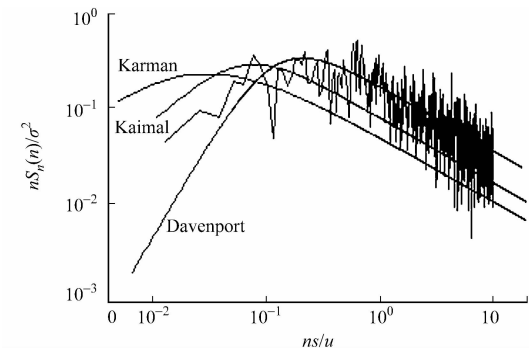


图 1 顺风向脉动风谱图
Fig. 1 Pulsating wind spectrum
in along-wind direction

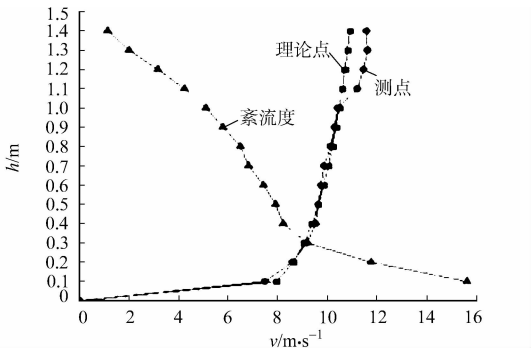


图 2 风场理论值与实际测值比较
Fig. 2 Comparison between the tested
values and theoretical values of wind field

选取的方形土楼尺寸:土楼横向长 32 m,竖向长 26 m,外墙和内墙之间的距离为 5.5 m,挑檐为 2 m,坡角为 25°,土楼分为 3 层,总高为 11 m.考虑到试验条件和准确性,试验模型采用 1/40 的几何缩尺比例.土楼是双轴对称结构,所以在土楼的 1/4 墙面布置测点,沿着土楼竖向方向布置 6 个测点,每个测点的间距为 1.5 m;迎风墙面沿长度方向布置 12 个测点,测点的间距为 1.5 m,最后一个测点作为加密测点,间距为 0.8 m.墙面的压力系数用 $C_{p,i}$ (第 i 测点的平均风压系数)表示.土楼迎风墙面平均风压系数 $C_p^{[3]} = (\sum_i C_{p,i} A_i) / A$. 其中: A_i 为测点 i 所属表面面积; A 为最大迎风面面积.

2 方形土楼数值模拟

2.1 计算域设置和网格划分

在数值风洞计算时,数值风洞的大小又称计算域.数值模拟中,计算域的影响大小可以用阻塞率来衡量.阻塞率指建筑物最大的迎风面积 A 与计算域界面的面积 A_1 之比.文献[4-5]认为阻塞率应不大于 3%,经计算本例的阻塞率为 1.8%.综合考虑模型尺寸等情况后确定计算域的长、宽、高分别为 900, 200, 96 m.

采用 CFD 软件对方形土楼进行网格划分,最终生成网格数量为 94 万左右.将迎风墙均分成 16 个单元,分别记为 $\sum_{i=1}^4 SL_i, \sum_{i=1}^4 ML_i, \sum_{i=1}^4 MR_i, \sum_{i=1}^4 SR_i$, 最终得到 16 个计算面域,具体编号如图 3 所示.

2.2 计算模型的选取和入口边界条件的确定

计算域入口处风速采用指数率风剖面,即 $v(z) = v_0 (Z/Z_0)^\alpha$. 其中: Z_0, v_0 分别为标准高度 10 m 和在标准高度的基本风速,取 $v_0 = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \alpha = 0.16$,以便计算结果与上述试验结果比较.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^[6-7]为

$$k(z) = 1.2 [I(z) \cdot \bar{u}(z)]^2, \quad \epsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k(z)^{3/2}}{KL_u}.$$

(1)

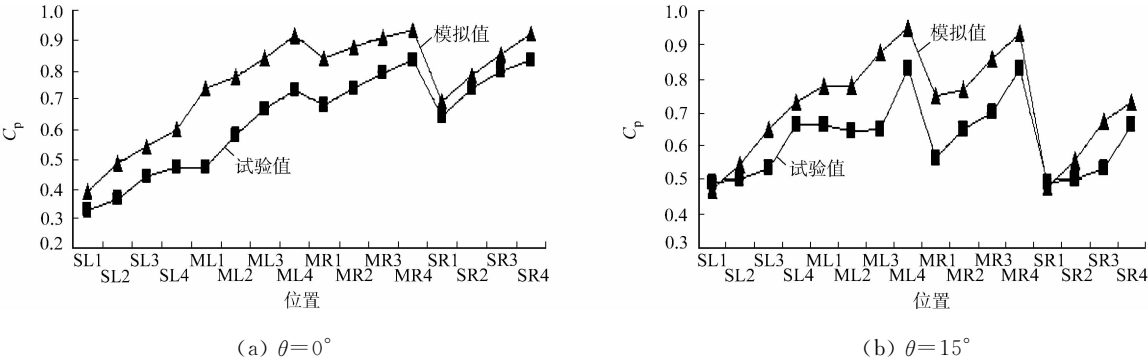
式(1)中: $C_\mu = 0.09; K = 0.4; L_u$ 为湍流积分尺度,按风洞截面尺寸估算,取 30 m;湍流强度 I 采用文献[8]中的定义,其表达式为 $I = 0.1 \times (z/350)^{(-\alpha-0.05)}$;入口风速和湍流的分布通过自行编写的 C 语言程序在边界中实现.近壁面的流动采用标准的壁面函数法处理,其边界条件入口设为速度入口,出口设为压力出口,房屋和风洞边界设为壁面.

3 数值模拟与风洞试验结果比较

把迎风墙面 16 块计算域的数值模拟风压系数数据与风洞试验值进行比较,各风向角 θ 下的比较结果如图 4 所示.由图 4 可知:两者变化趋势基本一致,数值也比较接近平均误差在 20% 以内,最大的误差一般出现在悬挑屋檐的附近,但总体上吻合较好;数值模拟得到的风压系数值比风洞试验得到的结果要大些,说明数值所选用的湍流模型及参数设置对方形土楼的风场模拟基本是合适的.

SL4	ML4	MR4	SR4	11 m
SL3	ML3	MR3	SR3	
SL2	ML2	MR2	SR2	
SL1	ML1	MR1	SR1	
32 m				

图 3 土楼迎风面分区图
Fig. 3 Zones of earth building's windward side



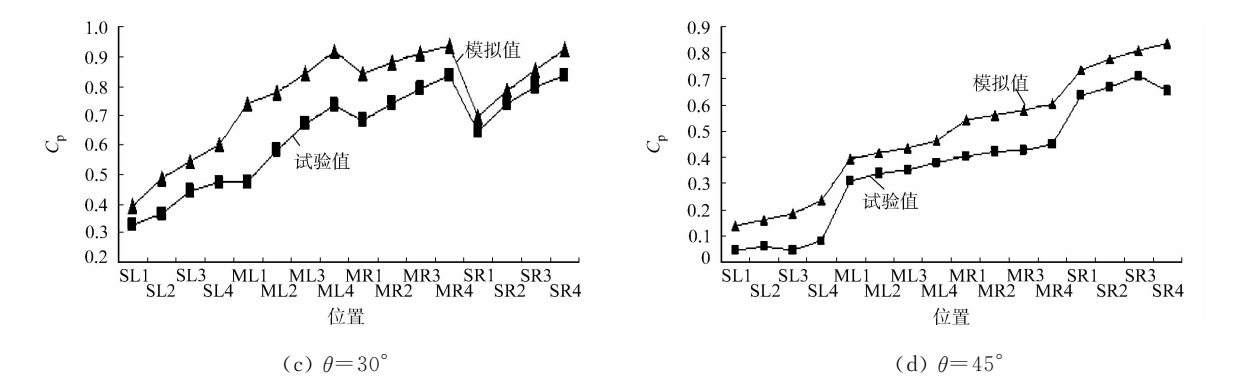


图 4 数值模拟结果与风洞试验结果比较

Fig. 4 Compare between simulation results and wind-experimental results

4 风驱雨作用效应对土楼墙面分布的影响

4.1 雨滴在风场运动中的描述

通过数值模拟得到不同风速(v)入口的风场,在计算域中加入 BEST 雨滴尺寸分布模型,雨滴在计算域中的运动轨迹如图 5 所示.

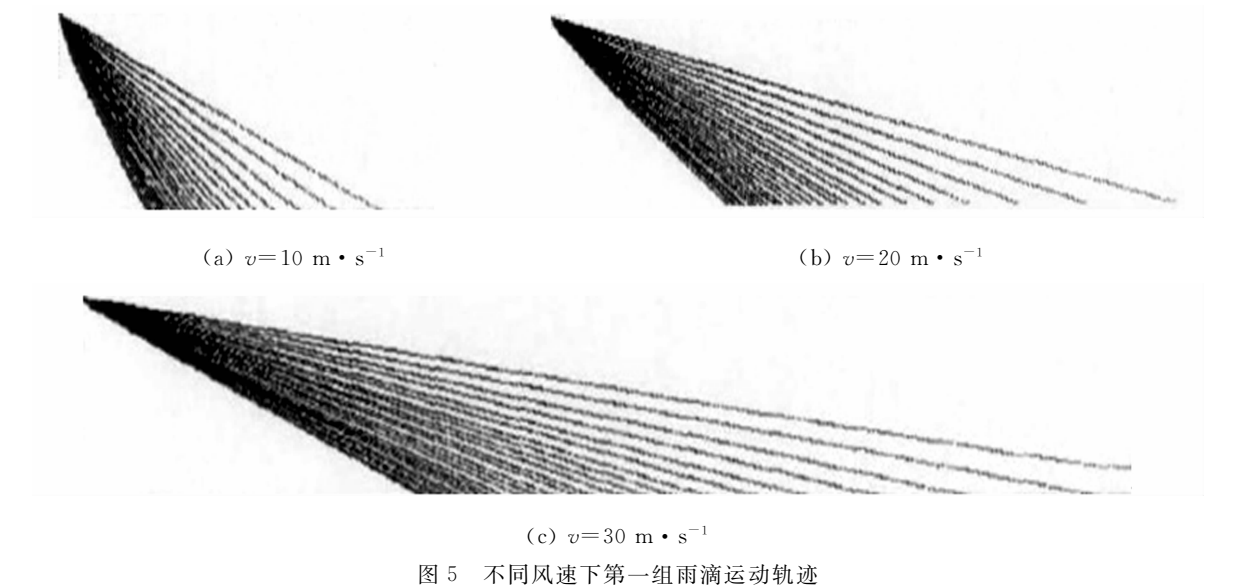


图 5 不同风速下第一组雨滴运动轨迹

Fig. 5 Trajectory of the first group raindrop under different wind speeds

4.2 方形土楼迎风墙面风驱雨量分布

雨滴在风中的运动矢量分解,参见文献[9]. 进行定量分析单位时间降雨量时,土楼墙面在风流谱和建筑物形状因素影响下收集到的雨量,用风驱雨侵蚀因子 η 来描述, $\eta=R_{\text{wdr}}(t)/R_{\text{h}}(t)$. 其中, $R_{\text{wdr}}(t)$ 为单位时间内土楼迎风墙面单位面积上所吸收的雨量($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$); $R_{\text{h}}(t)$ 为单位时间内无风干扰时单位面积上的雨强($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$). 通过 Fluent 软件对降雨量的模拟,得到雨滴在风场中运动的结果. 在不同风速和降雨强度组合下,土楼迎风墙面的 η 计算结果如表 1~4 所示.

表 1 降雨量为 $32\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时各分区在不同风速时的 η 值

编号	$v=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$v=30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			
	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR
4	0.110	0.090	0.040	0.101	0.673	0.571	0.551	0.720	1.210	1.460	0.951	1.250
3	0.589	0.569	0.579	0.608	1.300	0.996	1.181	1.360	2.560	2.410	2.090	2.100
2	0.650	0.622	0.608	0.673	1.040	1.080	0.851	1.250	4.830	4.550	4.350	4.620
1	0.369	0.282	0.411	0.364	0.662	0.482	0.369	0.760	0.996	0.666	0.806	0.950

表 2 降雨量为 $64\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时各分区在不同风速时的 η 值

Tab. 2 η value of each zone in different wind speeds for $64\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ rainfall

编号	$v=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$v=30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			
	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR
4	0.107	0.141	0.074	0.042	0.694	0.515	0.626	0.746	1.300	1.120	1.060	1.230
3	0.602	0.438	0.473	0.645	1.181	1.530	1.420	1.460	1.900	1.730	1.610	1.770
2	0.664	0.684	0.487	0.586	1.180	1.010	0.856	1.098	3.520	2.390	2.360	3.070
1	0.484	0.350	0.317	0.606	0.739	0.651	0.668	1.070	1.220	1.030	1.320	1.080

表 3 降雨量为 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时各分区在不同风速时的 η 值

Tab. 3 η value of each zone in different wind speeds for $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ rainfall

编号	$v=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$v=30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			
	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR
4	0.140	0.009	0.082	0.172	0.583	0.536	0.577	0.495	1.550	1.040	1.170	1.060
3	0.727	0.621	0.525	0.663	1.400	0.927	0.945	1.100	1.590	1.510	1.500	1.710
2	0.568	0.467	0.414	0.477	0.986	0.733	0.934	1.110	1.690	1.360	1.210	1.720
1	0.645	0.411	0.517	0.514	1.090	0.726	0.695	0.803	1.490	1.000	1.130	1.640

表 4 降雨量为 $200\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时各分区在不同风速时的 η 值

Tab. 4 η value of each zone in different wind speeds for $200\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ rainfall

编号	$v=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$v=30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			
	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR
4	0.130	0.044	0.089	0.122	0.968	0.623	0.728	0.919	0.938	1.140	0.976	1.010
3	0.585	0.519	0.460	0.545	1.020	0.834	0.813	0.913	1.710	1.600	1.640	1.790
2	0.649	0.471	0.487	0.572	1.080	0.845	0.913	0.907	2.210	1.760	1.640	2.010
1	0.506	0.389	0.372	0.470	0.968	0.583	0.629	0.740	1.140	0.937	0.669	1.080

从表 1~4 可知:随着风速及雨强的增加而增加,但是风速对 η 的影响较降雨量更明显;在风速达到 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,土楼迎风墙面的 η 基本都大于 1,即说明土楼迎风墙面的降雨强度已经达到甚至超过无风干扰时地面的降雨强度. 因此,相比其他因素,风速可能成为土楼侵蚀破坏的关键因素.

4.3 屋盖悬挑长度对方形土楼墙面风驱雨量分布影响

Blocken 等^[10-11]对 VLIENT 足尺试验楼的实测表明,屋盖的挑檐对风雨作用具有一定遮挡效应,但其没有给出这种遮挡效应的具体值和遮挡范围. 在固定风向角和选取 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速的基础上,通过数值模拟研究不同降雨量(R)及不同悬挑长度下的风驱雨侵蚀因子,结果如表 5~6 所示.

表 5 悬挑为 1 m 时不同降雨量的 η 值

Tab. 5 η value in different rainfalls for 1 m cantilever span

编号	$R=32\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$				$R=64\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$				$R=100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$			
	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR
4	0.602	0.466	0.410	0.669	0.500	0.489	0.484	0.625	0.426	0.408	0.424	0.401
3	0.569	0.588	0.628	0.656	0.566	0.497	0.572	0.595	0.644	0.676	0.663	0.714
2	0.646	0.578	0.493	0.719	0.771	0.689	0.415	0.605	0.548	0.598	0.613	0.600
1	0.444	0.223	0.358	0.471	0.238	0.237	0.464	0.580	0.575	0.453	0.516	0.592

表 6 悬挑为 2.5 m 时不同降雨量的 η 值

Tab. 6 η value in different rainfalls for 2.5 m cantilever span

编号	$R=32\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$				$R=64\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$				$R=100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$			
	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR	SL	ML	MR	SR
4	0.102	0.083	0.080	0.095	0.082	0.103	0.110	0.071	0.101	0.011	0.090	0.090
3	0.560	0.565	0.570	0.579	0.580	0.427	0.501	0.595	0.706	0.576	0.563	0.695
2	0.640	0.623	0.600	0.626	0.615	0.689	0.701	0.605	0.554	0.438	0.413	0.573
1	0.352	0.280	0.311	0.350	0.472	0.476	0.452	0.580	0.630	0.413	0.426	0.614

5 结 论

- 1) 在不同风向角情况下,通过数值模拟和风洞试验的比较,结果表明两者变化趋势一致,平均误差在 20%内.
- 2) 通过数值模拟,计算出各个分区在不同风速和雨强下组合下的侵蚀因子的值. 可以发现: η 随着风速及雨强的增加而增加.
- 3) 挑檐长度的变化对第 4 分区的影响比第 1,2,3 风区明显,表明大悬挑对屋盖附近区域的墙面形成有效的遮蔽作用.

参考文献:

[1] 褚俊英,刘智. 生土墙体材料研究[J]. 现代商贸工业,2009(5):264-265.

[2] 中华人民共和国建设部. GB 50009—2006 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:56.

[3] 付国宏. 低层房屋风荷载特性及抗台风设计研究[D]. 杭州:浙江大学,2002:8-10.

[4] QUINN A D,RICHARD P J. A 6 m cube in an atmosphere boundary layer flow Part 2: Computational solution[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2002,5(2/3/4):177-192.

[5] KATO M,LAUNDER B. Modeling flow-induced osillations in turbulent flow around a square cylinder[J]. ASME Fluid Eng,1993:16279.

[6] GLÜCK M,BREUER M,DURST F,et al. Computation of fluid-structure interaction on light weight structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2001,89(14/15):1351-1368.

[7] 杨伟. 基于 RANS 的结构风荷载和响应的数值模拟研究[D]. 上海:同济大学,2004:30-32.

[8] 周大伟. 高层建筑风压风流场稳态与大涡模拟研究[D]. 上海:同济大学,2005:3-5.

[9] BLOCKEN B,CARMELIET J. On the errors associated with the use of hourly data in wind-driven rain calculations on building facades[J]. Atmospheric Environment,2007,41(11):2335-2343.

[10] BEST A C. The size distribution of raindrops[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1950,76(327):16-36.

[11] ABUKU M,BLOCKEN B,NORE K. On the validity of numerical wind-driven rain simulation on a rectangular low-rise building under various oblique winds[J]. Building and Environment,2009,44(3):621-632.

[12] BLOCKEN B,CANNELIET J. On the accuracy of wind-driven rain measurements on buildings[J]. Building and Environment,2006,41(12):1798-1810.

Rainfall of the Rammed Earth Wall of Square Earth
Buildings Caused by the Wind-Driven Rain

LIANG Lan-di, PENG Xing-qian, HUA Chang-cheng

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

Abstract: The wind tunnel experiment of square earth buildings was tested, and calculation model of rainfall process was introduced when wind Fields of numerical simulation was well consistent with the test wind field. The distribution characteristics of wind-driven rainfall of earth buildings' windward surface for different wind speeds, different rainfalls and different cantilever spans of eaves was discussed by this method. The results show that the erosion factor η of wind-driven rain is related to the wind speed and rainfall, and η increases with the increase of the wind speed and rainfall; the cantilevered roof forms shelter effectively the wall surface near the roof.

Keywords: square earth buildings; wind tunnel experiment; numerical simulation; wind-driven rain; wind speed; rainfall; wall surface