

文章编号: 1000-4750(2013)07-0091-09

稳态冲击风作用下拱形屋面风压分布试验研究

陈 勇¹, 崔碧琪², 余世策¹, 关士杰¹, 楼文娟¹

(1. 浙江大学土木工程学系, 浙江, 杭州 310058; 2. 浙江绿城东方建筑设计有限公司, 浙江, 杭州 310012)

摘 要: 为研究雷暴冲击风对拱形屋面的作用, 基于相似准则进行了拱形屋面模型制作和雷暴风场物理模拟, 并完成了相应的冲击风风洞试验。通过改变矢跨比、高跨比及跨度, 进行屋面风压的参数敏感性研究。通过改变屋面中心位置, 研究竖向风场的作用。研究表明: 屋面位于冲击风极值水平风速附近时, 垂直于屋脊方向风压分布与矢跨比密切相关, 屋面越靠近冲击风中心则升力越小; 当屋面位于冲击风中心时, 整个屋面均出现较大的正风压。

关键词: 拱形屋面; 风压系数; 风洞试验; 雷暴冲击风; 矢跨比

中图分类号: TU973.32 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.02.0137

EXPERIMENTAL STUDY ON THE PRESSURE DISTRIBUTION OVER ARCH-ROOF SUBJECTED TO STATIONARY DOWNBURSTS

CHEN Yong¹, CUI Bi-qi², YU Shi-ce¹, GUAN Shi-jie¹, LOU Wen-juan¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 2. Greentown Oriental Architects, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract: For the purpose of investigating the effects on the arch-roof caused by thunderstorm downburst wind, the model fabrication of arch-roofs, and the physical simulation of wind field of thunderstorm downbursts are conducted based on the similarity criterion. And corresponding wind tunnel tests are completed. The parametric sensitive studies are conducted through varying the span, ration of rise to span and ration of height to span. The effects of the vertical wind field are also investigated by placing the building on different positions. It is found that the pressure distribution along the direction perpendicular to the ridge is closely linked with the ratio of rise to span, in case of that the center of an arch-roof is located at where the horizontal wind reaches its peak value. It is also revealed that the closer the roof is to the center of the downburst, and consequently the smaller the lift force is. Furthermore, the whole roof would be subjected to a rather heavy positive wind pressure in case of that the centers of the roof and downbursts coincide.

Key words: arch-roof; wind pressure coefficient; wind tunnel test; thunderstorm downbursts; ratio of rise to span

拱形屋面是工程中常用的一种屋面形式, 其受大气边界层风的作用已有较为丰富的研究成果^[1-3], 我国规范给出了相应的体型系数取值方法^[4]。但有研究表明, 大气边界层风属于低速风, 而在极端气候条件下产生的包括台风(飓风)、龙卷风、雷暴风

等均具有与其不同的风场特征^[5]。大跨屋面通常具有低矮特性^[6-7], 因此常见的在近地面会引起极高风速且具有竖向风风场的雷暴冲击风(下击暴流)对其作用相对较为显著。

然而, 目前雷暴冲击风下的大跨屋面风效应研

收稿日期: 2012-02-29; 修改日期: 2012-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50708096); 浙江省自然科学基金项目(Y11110143)

通讯作者: 陈 勇(1974—), 男, 浙江台州人, 副教授, 博士, 主要从事风工程、振动控制等方面研究(E-mail: cecheny@zju.edu.cn).

作者简介: 崔碧琪(1986—), 女, 浙江人, 助理工程师, 硕士, 主要从事风工程方面研究(E-mail: shirley185@163.com);

余世策(1979—), 男, 浙江人, 高工, 博士, 主要从事风工程方面研究(E-mail: yusc@zju.edu.cn);

关士杰(1988—), 男, 辽宁人, 硕士生, 主要从事结构工程方面研究(E-mail: guanshijie@zju.edu.cn);

楼文娟(1963—), 女, 浙江人, 教授, 博士, 博导, 主要从事风工程、结构工程等方面研究(E-mail: louwj@zju.edu.cn).

究相对缺乏, 针对拱形屋面的研究尚未见报道。雷暴冲击风下的屋面风效应研究包括 Letchford 研究小组通过研制竖向反向放置的冲击风射流装置来研究稳态冲击风和非稳态冲击风对低矮矩形屋面的作用^[8-9]。Sengupta 等^[10]研制了正向放置的冲击风射流装置, 然后利用该试验装置研究了冲击风对具有立方体形式建筑的作用, 并将试验结果与数值模拟结果进行了比较。这些研究都是针对单个小体量矩形平屋面, 测点数目较少, 无法得到屋面风压分布规律, 对实际屋面抗冲击风设计指导意义较小。崔碧琪等^[11]对大跨度鞍形屋面在冲击风三维风场中所受到的风压进行了较为细致的基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的数值模拟。Zhou 等^[12]则采用 CFD 数值模拟方法, 对雷暴风作用下的太阳能塔表面风压分布进行了研究。陈勇等^[13]按照流体相似准则进行了球壳型屋面的冲击风风洞试验研究, 并分析了不同结构参数对风压分布规律的影响。考虑采用多风扇风洞进行水平风速剖面模拟以构造风场, 基于此的屋面风压试验研究未见报道, 而相关的高层建筑风效应试验则有: 赵扬等完成了 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 425\text{mm}$ 矩形截面高层建筑模型的风压测试^[14], Butler 等进行了 3 个具有 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 截面尺寸但高度分别为高于、接近及低于峰值风速高度的高层建筑模型表面风压研究^[15]。

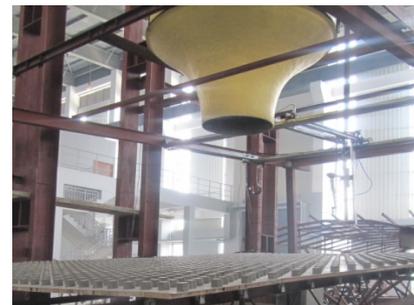
本文根据实际雷暴冲击风的风场参数和相似准则进行了雷暴冲击风下拱形屋面的风压分布研究。采用大射流直径的壁面射流冲击风模拟试验装置, 通过变化拱形屋面的矢跨比、高跨比及跨度, 研究其对风压分布的影响; 通过改变屋面中心与冲击风中心的相对位置, 研究其对风压分布的影响。将相关试验曲线无量纲化便于获得稳态冲击风下该类型结构的风效应。

1 试验概况

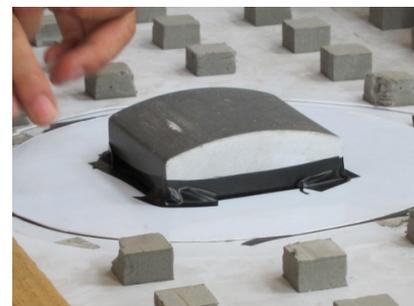
拱形屋面的冲击风风洞试验在浙江大学的冲击风射流装置中完成, 该装置如图 1(a)所示, 其详细资料见文献[13]及文献[16]。试验采用的射流直径 $D_{\text{jet}}=500\text{mm}$, 射流速度 $V_{\text{jet}}=10\text{m/s}$, 入射角 $\theta_{\text{jet}}=0^\circ$, 射流高度 $H_{\text{jet}}=1.0D_{\text{jet}}$ 。根据规范对各类地貌建筑物平均高度的定义, 在射流平板上铺设了尺寸为 $25\text{mm}\times 25\text{mm}\times 15\text{mm}$ 的粗糙元用于模拟 B 类地貌。

拱形屋面原型的标准尺寸为 $L=200\text{m}$,

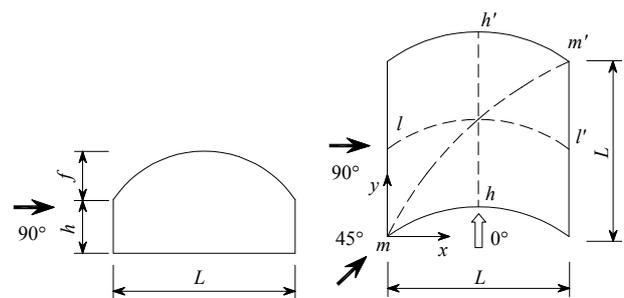
$h=f=20\text{m}$, $f/L=h/L=1/10$ 。在下面的图中, 未列出的参数的取值按照该标准尺寸取值。模型缩尺比为 $1:1000$, 模型及风向角的定义如图 1(b)、图 1(c)所示, 风向角主要为 0° 、 45° 和 90° 。 $h-h'$ 、 $l-l'$ 、 $m-m'$ 为屋面中心特征线。测点布置如图 1(d)所示。为便于描述屋面上测点位置, 在图 1(c)中还定义了 x 方向为径向坐标, y 方向为纵向坐标。将坐标值除以 L , 则获得无量纲化坐标。



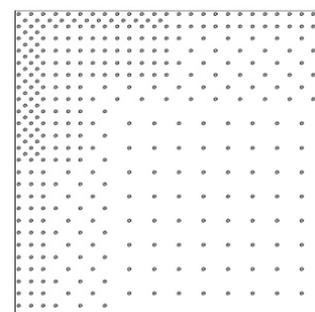
(a) 冲击风风场模拟装置



(b) 拱形屋面



(c) 拱形屋盖尺寸定义



(d) 测点布置

图 1 拱形屋面冲击风风洞试验

Fig.1 Wind tunnel test of arch-roof subjected to downburst

屋面表面风压为同步采集，采用美国 Scanivalve 的电子扫描阀获取。采样频率为 625Hz，采样时间为 20s。风压系数采用与大气边界层风洞类似计算方法，即：

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_\infty}{0.5\rho V_{jet}^2} \quad (1)$$

式中： C_{pi} 为冲击风作用下建筑物表面某测点*i*的风压系数； P_i 为测点*i*的风压值；参考点设在射流面上， P_∞ 为参考点静压力值； V_{jet} 为射流速度。

为全面了解屋面在冲击风风场中的风效应，一方面改变屋面在冲击风风场中的位置，另一方面在各个位置工况下对不同高跨比、矢跨比的屋盖模型进行风洞试验，各个位置下的风洞试验工况均如表 1 所示。

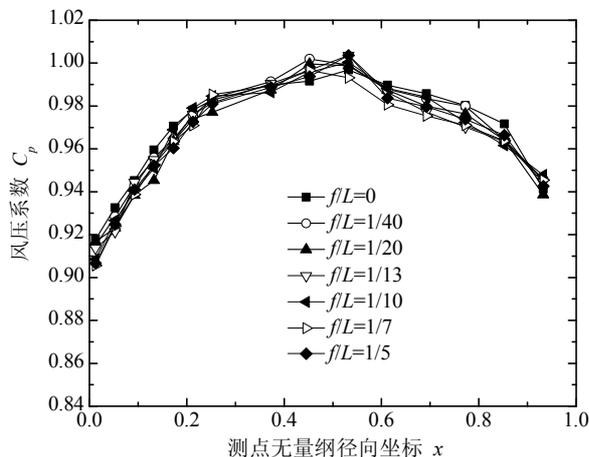
表 1 风洞试验工况

Table 1 Wind tunnel test cases

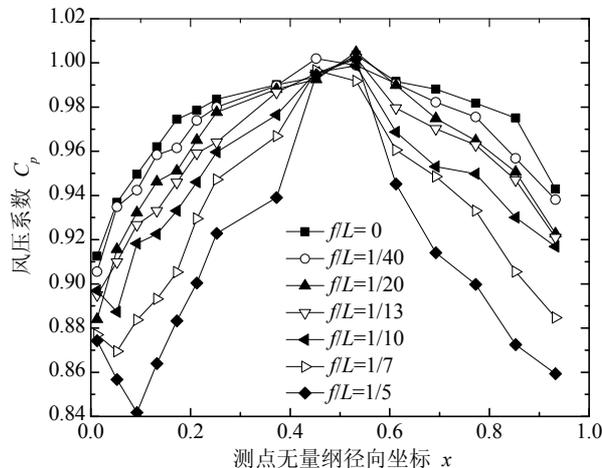
试验工况	f/L	h/L	L/m
变化矢跨比	0,1/40,1/20,1/13,1/10,1/7,1/5	1/10	200
变化高跨比	1/10	1/20,1/10,1/7,1/5	200
变化跨度	1/10	1/10	100,150,200

2 屋面中心位于冲击风正下方

与大气边界层风场不同，建筑在冲击风风场中的位置对其风效应具有显著的影响。首先考虑屋面位于冲击风正下方的情形，此时屋面中心与冲击风中心(风眼)的水平位置相重合。定义 r 为屋面中心离冲击风中心线的距离，因此 $r=0.0D_{jet}$ 。图 2~图 4 分别给出了拱形屋面位于射流面正下方时屋面特征线 $h-h'$ 和 $l-l'$ 随矢跨比、高跨比及跨度变化的风压系数变化曲线。由于气流的直射作用，其表面风压都为正值且风压系数在 0.8~1.0。各种工况下的屋面



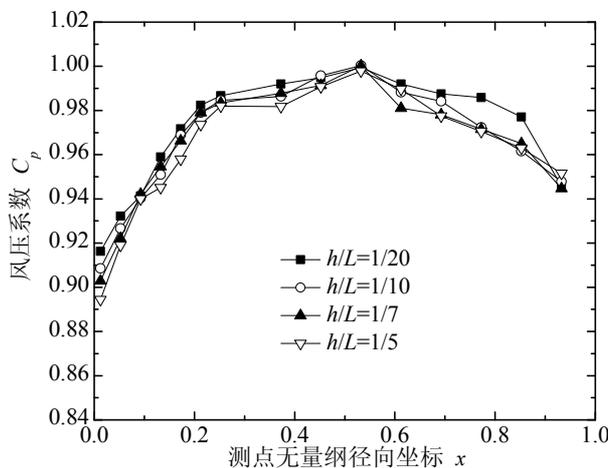
(a) $h-h'$



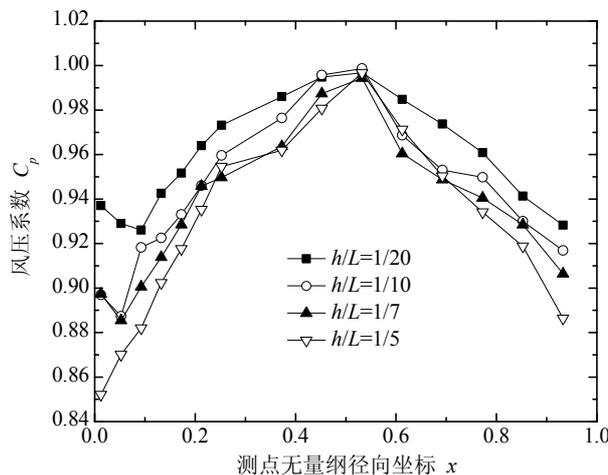
(b) $l-l'$

图 2 屋面特征线风压系数随矢跨比变化曲线($r=0.0D_{jet}$)

Fig.2 Wind pressure coefficient on characteristic line varied with ratio of rise to span ($r=0.0D_{jet}$)



(a) $h-h'$



(b) $l-l'$

图 3 屋面特征线风压系数随高跨比变化曲线($r=0.0D_{jet}$)

Fig.3 Wind pressure coefficient on characteristic line varied with ratio of height to span ($r=0.0D_{jet}$)

中心风压系数值基本不变约为 1.0, 屋面两侧所受风压则稍小。

由图 2 及图 3 可见, 屋脊线方向的风压分布对拱形屋面体型参数的变化并不是很敏感, 特别是矢跨比和高跨比变化时各曲线重合度较高。而垂直于屋脊线方向的参数敏感性较强: 矢跨比较小的屋面表面风压分布相对均匀, 随着矢跨比的增加, 屋面所受到的正压减少, 而当矢跨比增大至 $f/L=1/10$ 后, 从屋面边缘至屋面中心, 风压分布呈现先下降再增大的规律; 高跨比的增加也会导致屋面风压值的减小, 在屋面靠近外边沿的 1/4 跨内较为明显。由图 4 可见, 较小跨度的屋面表面风压较为均匀。随着屋面跨度增大, 屋面表面风压变化梯度增大。

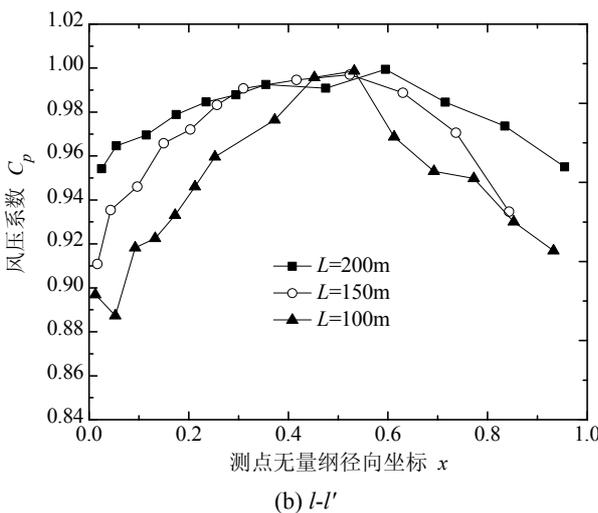
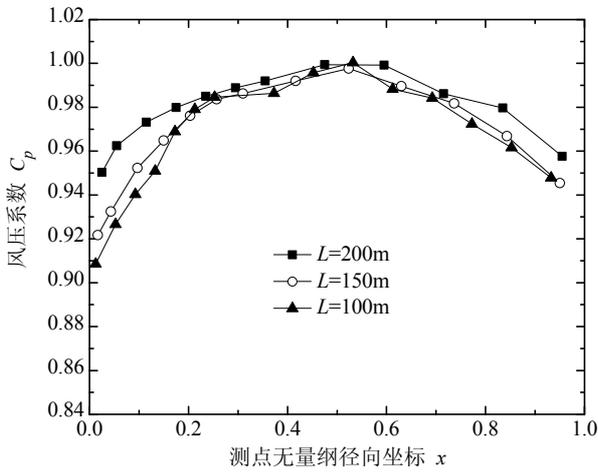


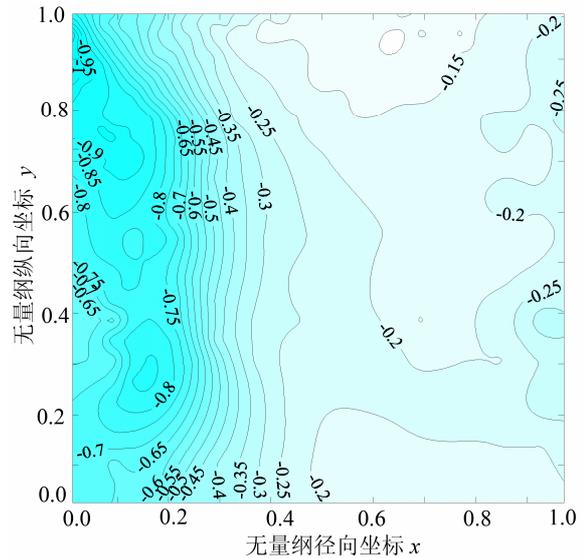
图 4 屋面特征线风压系数随跨度变化曲线($r=0.0D_{jet}$)

Fig.4 Wind pressure coefficient on characteristic line varied with span ($r=0.0D_{jet}$)

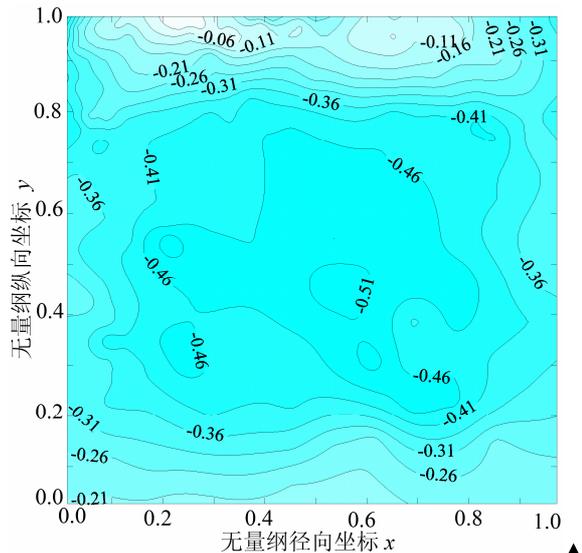
3 屋面中心位于极值水平风速附近

屋面位于极值水平风速附近时和屋面位于冲

击风中心区域时的屋面风压分布具有显著的不同, 需分别进行研究。前者竖向风速相对较小, 后者竖向风速起主要作用。图 5 给出了当 $r=1.2D_{jet}$ 时各个风向角下的屋面风压系数等值线图。可见: 在 0° 风向角下风压分布基本关于特征线 $h-h'$ 对称; 而在 90° 风向角下关于特征性 $l-l'$ 对称; 垂直于特征线方向上的分布则相对较为均匀。为便于探讨规律, 以下针对各个风向角工况将仅采用相应的特征线上的风压分布进行分析。



(a) 0° 风向角下



(b) 90° 风向角下

图 5 屋面风压系数分布图

($L=200mm, f/L=h/L=1/10, r=1.2D_{jet}$)

Fig.5 Contour map of the wind pressure coefficient ($L=200mm, f/L=h/L=1/10, r=1.2D_{jet}$)

3.1 矢跨比、位置对屋面风压分布的影响

图 6(a)给出了 $r=1.2D_{jet}$ 0° 风向角下各个矢跨比 (0~1/5) 屋面的特征线上风压系数随曲线。在试验所研究的矢跨比范围内, 屋面表面均为负风压。背风区 ($x>0.5$) 的负风压随矢跨比变化较小, 风压系数约在 -0.2 到 -0.35 之间波动, 而迎风区 ($x<0.5$) 的负风压则随矢跨比变化较为剧烈。与平屋面比较, 矢跨比较小时 (1/40、1/20), 迎风面前沿的负风压增大; 矢跨比较大时 (1/10 或更大), 气流分离点随着矢跨比的增大而向屋面中心靠近, 且对应的最大负风压相应减少。

图 6(b)给出了 90° 风向角下各个矢跨比 (0~1/5) 屋面的特征线上风压系数曲线。在试验所研究的矢跨比范围内, 屋面的背风面 ($y>0.5$) 均表现为负风压。而且随着矢跨比的增大, 背风面负风压最值将接近屋面中心并相应增大, 从 -0.2 变化为 -0.8 左右。

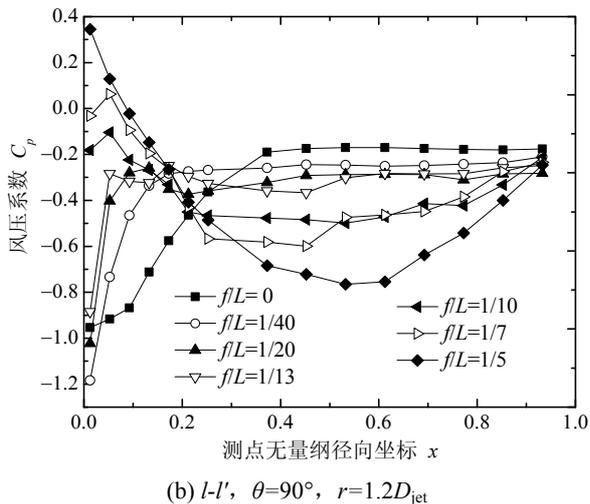
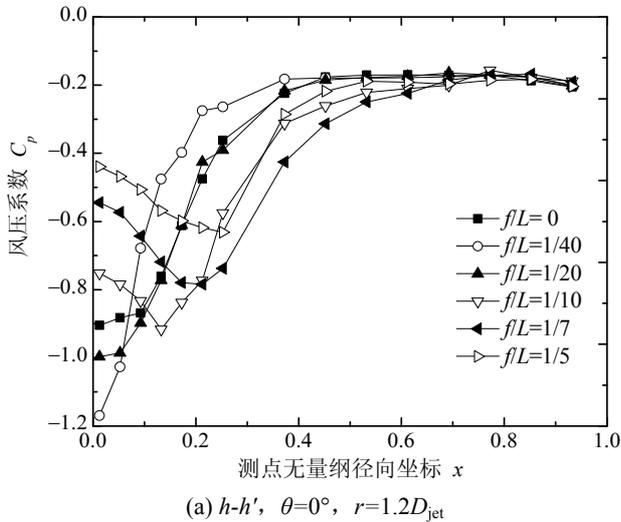
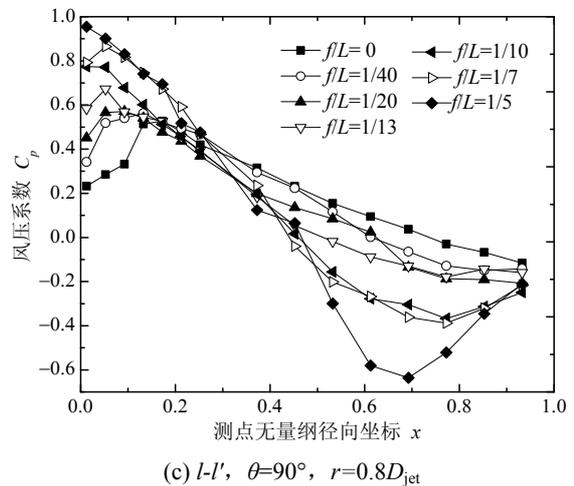
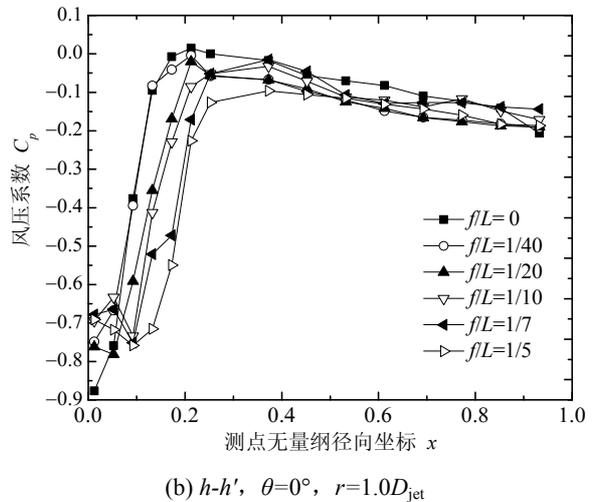
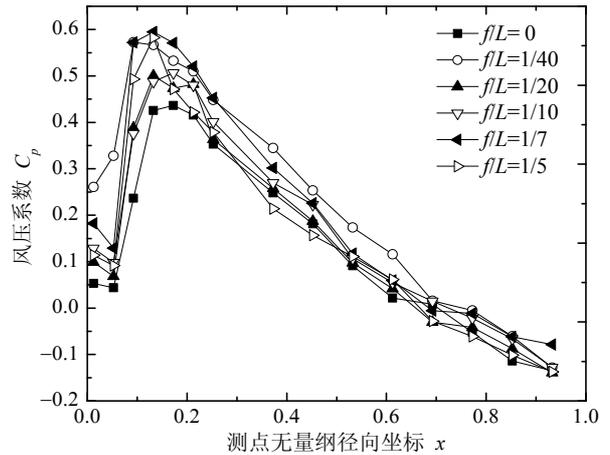
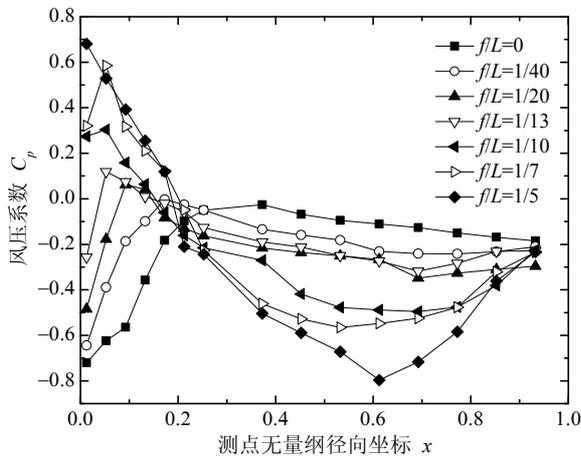


图 6 $r=1.2D_{jet}$ 时各个特征线上风压系数随矢跨比变化
Fig.6 Wind pressure coefficient on characteristic line varied with ratio of rise to span in case of $r=1.2D_{jet}$

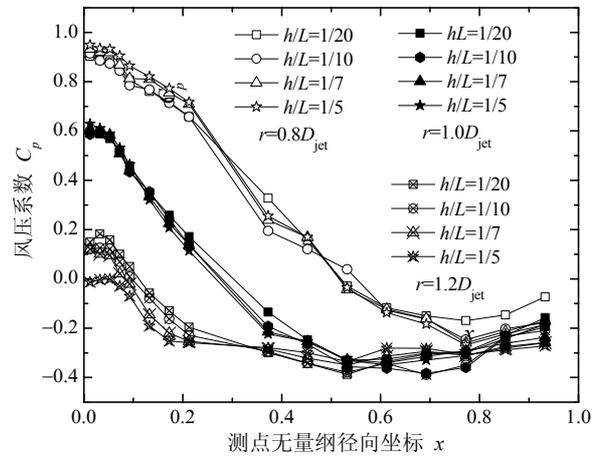
背风面后沿的值则较为接近, 约在 $-0.2 \sim -0.3$ 。屋面前半区域的风压表明, 随着矢跨比增大的屋面前沿负压区逐渐消失, 直至变为正压, 而相应的屋面后方则出现新的气流分离, 这与大气边界层风下的变化规律相近。

图 7 给出了在 0° 及 90° 风向角下各个矢跨比 (0~1/5) 屋面的相应特征线上风压系数。结果表明:





(d) $l-l'$, $\theta=90^\circ$, $r=1.0D_{jet}$



(b) $m-m'$, $\theta=45^\circ$

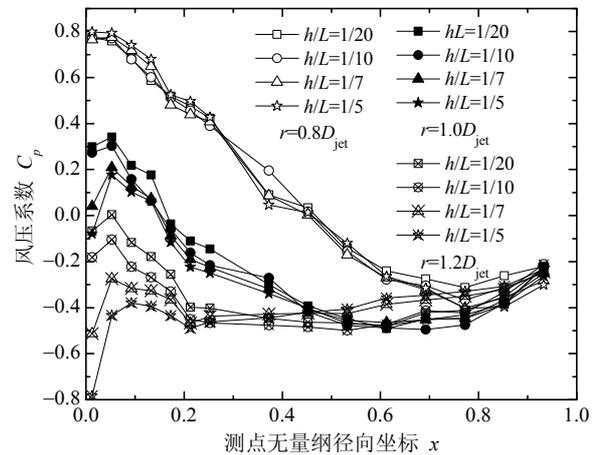
图7 特征线风压系数随矢跨比及屋面位置变化

Fig.7 Wind pressure coefficient on characteristic line varied with roof location and ratio of rise to span

当 r 相对较小时($r=0.8D_{jet}$), 屋面同时受到水平风和竖向风的作用, 且竖向风为主要作用, 因此屋面矢跨比的变化对其影响较小; 而当 r 相对较大时($r=1.2D_{jet}$), 水平风起主要作用, 矢跨比对屋面风压分布的影响明显。 0° 风向角时, $r=1.0D_{jet}$ 及 $r=0.8D_{jet}$ 工况下的结果均表明此时拱形屋面的负风压值小于平屋面的结果。 $r=0.8D_{jet}$ 时各个矢跨比下的屋面风压分布相近, 屋面前半部分为正压, 最大值在 0.4~0.6, 后半部风压则从 0.1 呈线性变化到 -0.1。

3.2 高跨比对屋面风压分布的影响

图 8 给出了高跨比对屋面表面风压分布的影响。可以发现高跨比对 45° 风向角下的屋面表面风压影响甚微。 0° 风向角下, 只对屋面中心处于 $1.0D_{jet}$ 和 $1.2D_{jet}$ 下的风压分布有影响: 当屋面中心位于 $1.0D_{jet}$ 时, 此时高跨比增大的影响主要发生在屋面迎风的前半跨, 前 1/10 跨的负风压接近, 1/10 跨到



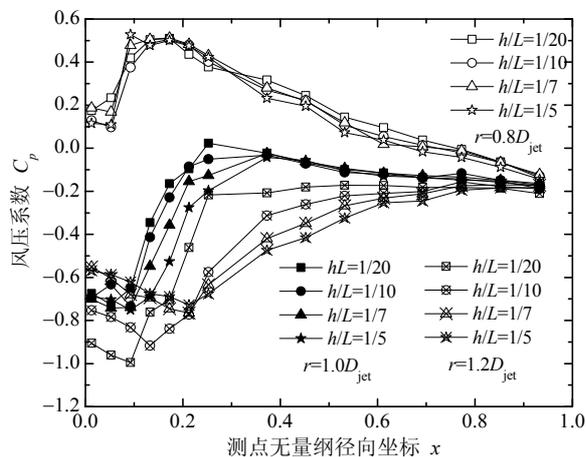
(c) $l-l'$, $\theta=90^\circ$

图8 特征线上风压系数随高跨比、位置及风向角变化
Fig.8 Wind pressure coefficient on characteristic line varied with roof location, wind direction and ratio of height to span

$1/2$ 跨之间区域的负风压值增大; 而当屋面中心位于 $1.2D_{jet}$ 时, 前 1/5 跨的负风压峰值出现位置后移且各个测点的负风压减少, 其他区域的负风压值则随着高跨比的增大而增大。 90° 风向角下, 只对屋面中心处于 $1.2D_{jet}$ 下的风压分布有较大影响: 前 1/5 跨内的负风压随高跨比增大而增大, 而其他区域的负风压值变化则减少。

3.3 跨度对屋面风压分布的影响

图 9 给出了多个不同跨度的屋面在各个风向角下其相应特征线上的风压分布图。结果表明, 随着屋面跨度的增大, 屋面表面受到的负风压相应减少, 甚至转为正风压, 这些影响主要体现在前半跨。这主要是由于跨度增大后, 屋面边缘离冲击风中心的距离减少引起的。



(a) $h-h'$, $\theta=0^\circ$

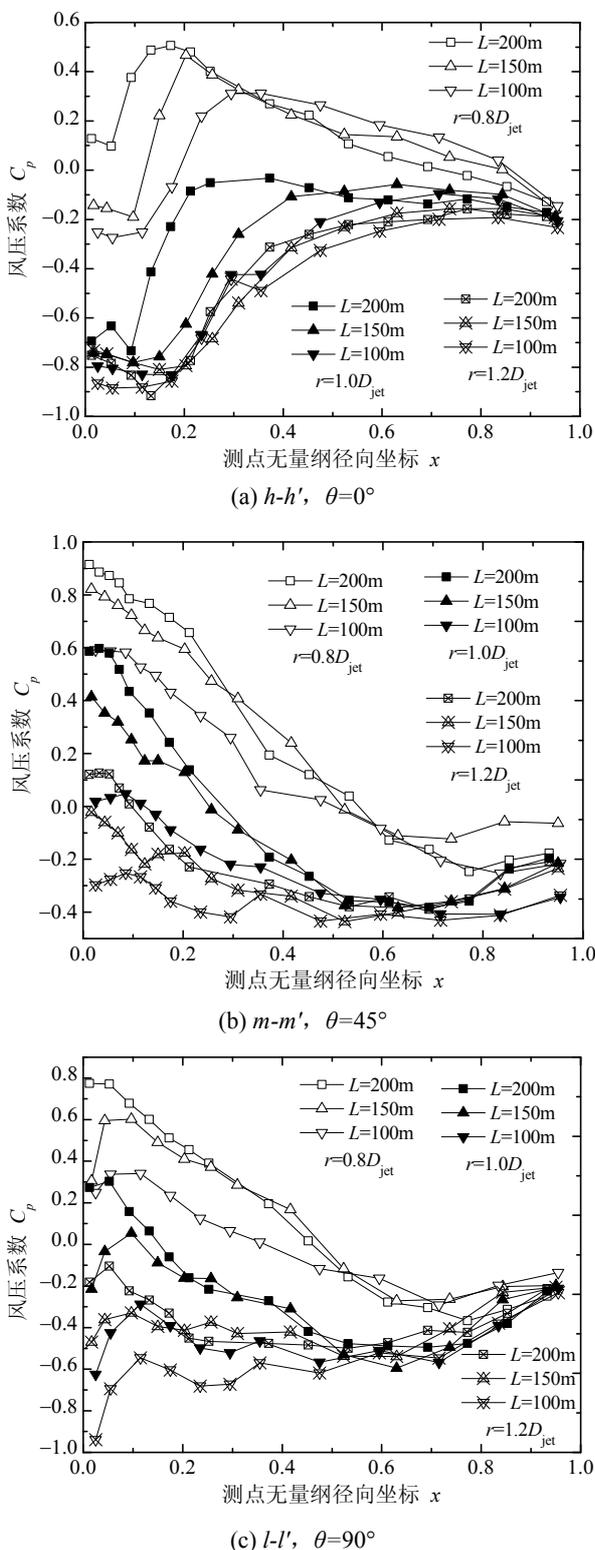


图9 特征线上风压系数随跨度、位置及风向角变化
Fig.9 Wind pressure coefficient on characteristic line varied with roof location, wind direction and span

4 CFD 结果与试验结果比较

这里将 CFD 数值模拟结果与试验进行比较，并分析缩尺物理模型引起的三维流效应对试验结

果的影响。采用 FLUENT 流体计算软件构建基于壁面射流模型的冲击风三维足尺流场，流场中冲击风参数及屋面尺寸均按照原型尺寸设定。湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型，计算域断面为 $6000\text{m}\times 1000\text{m}$ ，长为 9000m 。建立的三维流场及近壁面网格如图 10 所示，采用压力入口和压力出口，壁面为加强壁面，网格采用了混合网格技术，即近壁面采用非结构化网格而其他区域则采用结构网格，近壁面的无量纲网格间距 $y^+\approx 30$ 。

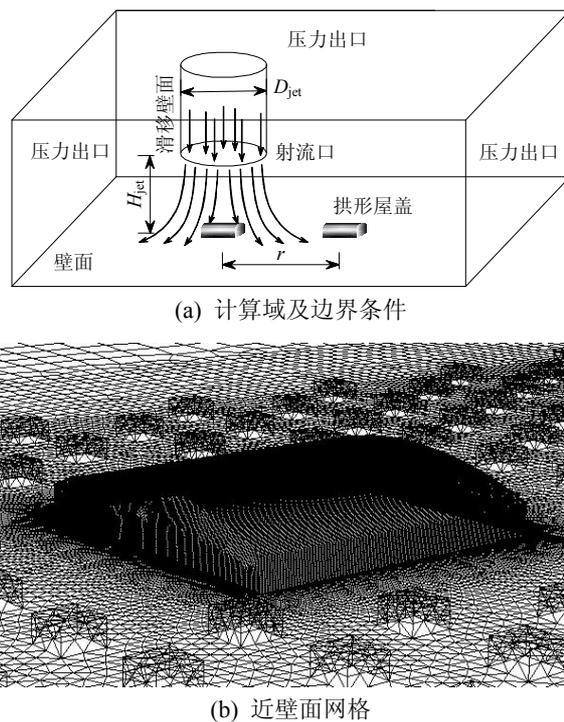
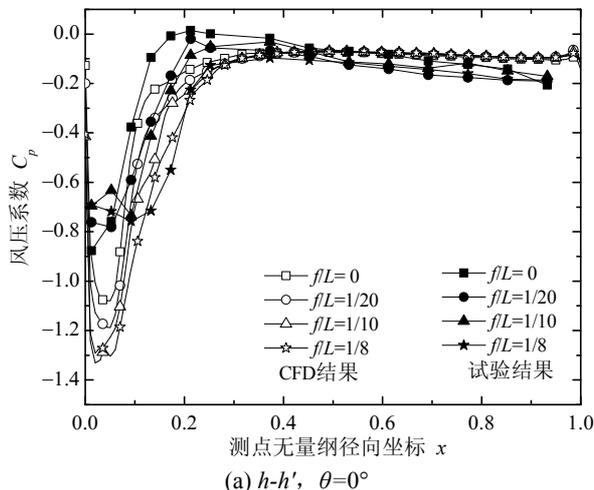


图 10 CFD 计算域及网格

Fig.10 Grids and computational field for CFD

图 11 及图 12 分别给出了屋面中心分别位于 $1.0D_{jet}$ 及 $0.0D_{jet}$ 位置时，屋脊线方向及垂直于屋脊线方向的风压分布情况。可以发现，足尺模型数值



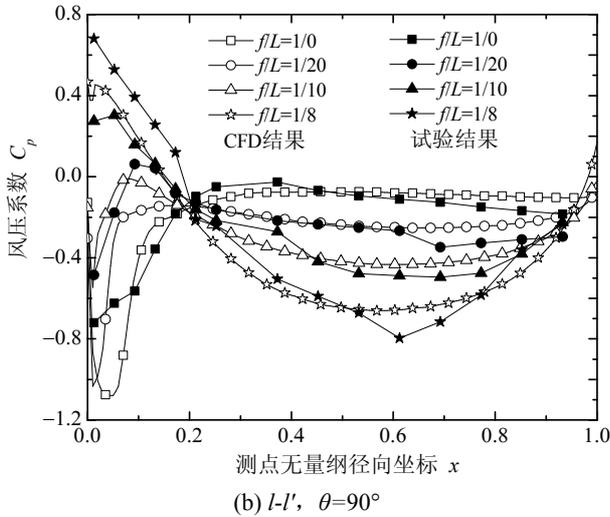
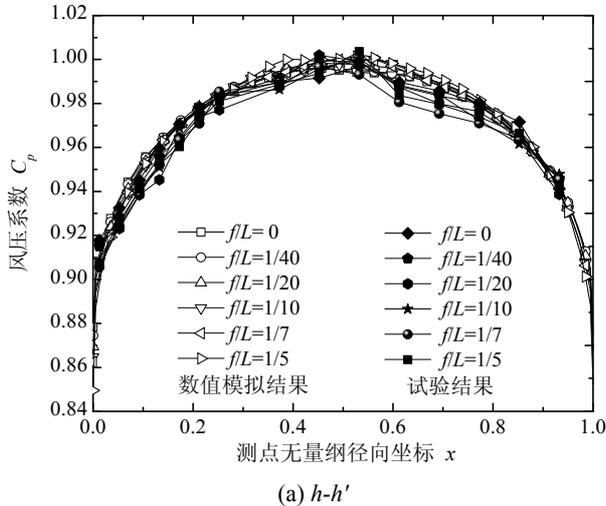
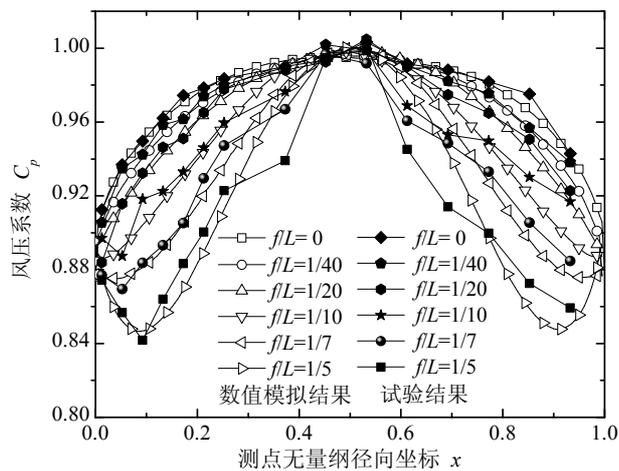


图 11 $r=1.0D_{jet}$ 时数值模拟结果与试验结果的比较
($h/L=1/10$)

Fig.11 Comparison of numerical simulation and experimental results in case of $r=1.0D_{jet}$ and $h/L=1/10$



(a) $h-h'$



(b) $l-l'$

图 12 $r=0.0D_{jet}$ 时数值模拟结果与试验结果的比较
($h/L=1/10$)

Fig.12 Comparison of numerical simulation and experimental results in case of $r=0.0D_{jet}$ and $h/L=1/10$

模拟的结果与缩尺物理模型试验获得的结果较为接近,变化规律也相同。但在屋面中心位于 $1.0D_{jet}$ 时,对于气流分离产生的负风压,足尺模型的 CFD 处理结果大于缩尺模型通过试验获得的结果。这与文献[13]对球壳型大跨屋面受冲击风作用时所进行的两种模型对比获得结果相一致。

5 结论

基于壁面射流装置,对拱形屋面进行了雷暴冲击风风洞试验,研究了包括矢跨比、高跨比、跨度、位置等参数对屋面表面风压的影响,并与数值模拟进行了比较。研究表明:

(1) 在屋面位于雷暴冲击风极值风速发生的位置附近时($r=1.2D_{jet}$), 0° 风向角下平行于屋脊线方向的风压为负风压,并且随矢跨比、高跨比增大屋面前沿的负风压增大。 90° 风向角下垂直于屋脊线方向屋面前沿的负风压随矢跨比的增大减少,随高跨比的增大而增大。

(2) 随着屋面中心与冲击风中心之间距离的缩短,屋面风压分布趋于均匀,受结构参数变化的影响减少,屋面的正风压区域逐渐增大。当屋面中心与冲击风中心重合后,整个屋面表面均为正风压,风压系数在 $0.8\sim 1.0$ 。平行于屋脊线方向的风压分布与结构参数基本无关。垂直于屋脊线方向的风压则与结构参数有一定的相关,随着矢跨比、高跨比的增大及跨度的减少,屋面正风压减少。

(3) 足尺 CFD 分析与缩尺冲击风风洞试验的比较表明,两者基本吻合。仅当在屋面位于雷暴冲击风极值风速发生的位置附近时,屋面前沿负风压较大区域由足尺 CFD 模拟分析得到的结果略大于缩尺冲击风风洞试验结果。

参考文献:

[1] Paluch M J, Loredou-Souza A M. Wind loads on attached canopies and their effect on the pressure distribution over arch-roof industrial building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 975-994.

[2] Blackmore P A, Tsokri E. Wind loads on curved roofs [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94: 833-844.

[3] 李元齐, Tamura Yukio, 沈祖炎. 柱面壳体表面风压分布特性风洞试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(11): 1457-1463.

Li Yuanqi, Tamura Yukio, Shen Zuyan. Wind tunnel tests for wind pressure distribution characteristics on cylindrical shells [J]. Journal of Tongji University

- (Natural Science), 2006, 34(11): 1457—1463. (in Chinese)
- [4] GB 50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
GB 50009-2001, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [5] Letchford C W, Mans C M, Chay M T. Thunderstorms—their importance in wind engineering (a case for the next generation wind tunnel) [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12/13/14/15): 1415—1433.
- [6] 孙五一, 周晷毅, 顾明. 基于本征模态补偿的大跨屋盖脉动风等效静力风荷载[J]. *工程力学*, 2011, 28(4): 96—101.
Sun Wuyi, Zhou Xuanyi, Gu Ming. Equivalent static wind loads of fluctuating wind on large-span roofs based on eigen-mode compensation [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(4): 96—101. (in Chinese)
- [7] 李玉学, 杨庆山, 田玉基. 基于应变能等效的大跨屋盖结构背景响应等效静力风荷载[J]. *工程力学*, 2011, 28(5): 166—171.
Li Yuxue, Yang Qingshan, Tian Yuji. Equivalent static wind load of large-span roofs based on energy equation [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5): 166—171. (in Chinese)
- [8] Chay M T, Letchford C W. Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst, Part A: Stationary downburst observations [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(7): 711—732.
- [9] Letchford C W, Chay M T. Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst, Part B: Moving downburst observations [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(7): 733—753.
- [10] Sengupta A, Haan F L, Sarkar P P, Balaramudu V. Transient loads on buildings in microburst and tornado winds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 2173—2187.
- [11] 崔碧琪, 陈勇, 徐挺, 楼文娟, 孙炳楠. 雷暴冲击风对鞍形屋盖作用的数值模拟[C]// 工业空气动力学进展. 长沙: 中南大学出版社, 2009: 166—172.
Cui Biqu, Chen Yong, Xu Ting, Lou Wenjuan, Sun Bingnan. The numerical simulations of wind-field characteristics about thunderstorm downbursts on saddle-shaped roof [C]// *Advances in Industrial Aerodynamics*. Changsha: Central South University Press, 2009, 166—172. (in Chinese)
- [12] Zhou X, Wang F, Liu C. Wind pressure on a solar updraft tower in a simulated stationary thunderstorm downburst [J]. *Wind and Structures*, 2012, 15(4): 331—343.
- [13] 陈勇, 崔碧琪, 余世策, 楼文娟, 孙炳楠. 雷暴冲击风作用下球壳型屋面模型风压特性试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(8): 26—33.
Chen Yong, Cui Biqu, Yu Shice, Lou Wenjuan, Sun Bingnan. Experimental investigation of spherical roof subjected to thunderstorm downbursts [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(8): 26—33. (in Chinese)
- [14] 赵杨, 曹曙阳, Tamura Y, 段忠东, Ozono S. 雷暴冲击风模拟及其荷载的风洞试验研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(4): 1—3.
Zhao Yang, Cao Shuyang, Tamura Y, Duan Zhongdong, Ozono S. Simulation of downburst and its loads with wind tunnel test [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(4): 1—3. (in Chinese)
- [15] Butler K, Cao S, Kareem A, Tamura Y, Ozono S. Surface pressure and wind load characteristics on prisms immersed in a simulated transient gust front flow field [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98: 299—316.
- [16] 徐挺, 陈勇, 彭志伟, 楼文娟, 孙炳楠. 雷暴冲击风风洞设计及流场测试[J]. *实验力学*, 2009, 24(6): 1—8.
Xu Ting, Chen Yong, Peng Zhiwei, Lou Wenjuan, Sun Bingnan. Design of wind tunnel for thunderstorm downburst and steady wind field test [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(6): 1—8. (in Chinese)

(上接第 83 页)

- [21] 刘齐建, 杨林德. 桩基荷载传递函数扰动状态模型及应用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(2): 165—169.
Liu Qijian, Yang Linde. New model of load transfer function for pile analysis based on disturbed state model [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2006, 34(2): 165—169. (in Chinese)
- [22] 王传文, 梅国雄, 宋林辉, 宰金珉. 广义荷载传递函数及其应用[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1217—1220.
Wang Chuanwen, Mei Guoxiong, Song Linhui, Zai Jinmin. Generalized load transfer function and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1217—1220. (in Chinese)
- [23] 洪毓康, 陈强华. 钻孔灌注桩的荷载传递性能[J]. *岩土工程学报*, 1985, 7(5): 22—24.
Hong Yukang, Chen Qianghua. Load transfer performance of bored pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 7(5): 22—24. (in Chinese)
- [24] 董金荣, 林胜天, 戴一鸣. 大口径钻孔灌注桩荷载传递性状[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(6): 123—131.
Dong Jinrong, Lin Shengtian, Dai Yiming. Load transfer of cast-in-place pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(6): 123—131. (in Chinese)