

## 典型拱形壳体风荷载分布规律

马文勇, 刘庆宽, 肖彬

(石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

**摘要:**进行了2种典型拱形壳体结构刚性模型内外表面同步测压风洞试验,分析了拱形壳体结构体型系数与脉动风压系数的分布规律,比较了底部开口/闭口和两端封闭/开放不同状态对风压分布的影响。结果表明:底部开口与端部条件对结构风压分布影响很大,采用弧面封闭两端可以有效的降低结构端部的风压同时使得结构表面风压分布更加均匀,当底部开口较小时,结构内部的稳定负压可以抵消外表面负压,从而降低了结构承受的风吸力,同时也扩大了结构的正压区并增加了结构表面的风压力。最后给出了该类结构的风荷载建议。

**关键词:**拱形壳体;风洞;风压;体型系数;风荷载分布

**中图分类号:**TU312.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)05-0063-06

## Wind Loads Distribution on Typical Vaulted Shells

MA Wen-yong, LIU Qing-kuan, XIAO Bin

(Shijiazhuang TieDao University, Shijiazhuang, Hebei, 050043, P. R. China)

**Abstract:** The distribution characteristics of shape factors and fluctuating wind pressure coefficients on two vaulted shells were investigated by simultaneous measurement of external and internal wind pressures on static models in wind tunnel. The effects of orifices on bottom and blocking at ends on wind loads distribution are discussed. It is shown that the wind pressure distribution is significantly affected by changes on orifices at bottom and blocking at ends. Wind pressure on ends decrease effectively and wind pressure on surface is distributed smoothly by blocking ends with highly curved surface shell. Small orifices at bottom not only contribute to degreasing negative pressure because of count acting effects of internal and external pressures, but also to extending the positive pressures region and increasing positive pressures. Wind loads suggestions on these structures are described at end.

**Key words:** vaulted shell; wind tunnels; wind pressure; shape factor; wind loads distribution

柱面网壳被广泛地应用于各种大跨度空间结构。这种曲面结构的风荷载作用机理复杂,风压分布与雷诺数、紊流度、结构表面粗糙度等关系密切<sup>[1-4]</sup>。由于工程中采用的曲面结构多数采用不同基本形状组合而成,因此很难将大量的基本形状研究成果<sup>[5-7]</sup>直接应用于实际工程。半球面<sup>[8-9]</sup>、抛物面<sup>[10]</sup>、以及圆柱面<sup>[11-12]</sup>大跨结构的风荷载分布规律研究已经取得了一定的进展,但是由于该种结构曲

面形状、底部支撑条件、结构表面开孔等因素的影响复杂多样,大跨度曲面结构风荷载分布仍然需要进一步的研究。

通过2种典型柱面壳体结构刚性模型内外表面同步测压风洞试验,分析了柱面壳体结构体型系数与脉动风压系数的分布规律,比较了底部开口/闭口和两端封闭/开放不同状态对风压分布的影响,为类似结构抗风设计提出了建议。

**收稿日期:**2011-04-02

**基金项目:**国家自然科学基金项目(50878135);河北省自然科学基金项目(E2008000442);河北省科技支撑计划项目(09215626D)

**作者简介:**马文勇(1981-),博士,主要从事结构抗风研究,(E-mail)mawenyong@126.com。

1 试验概况

1.1 模型简介

图 1 为 2 种柱面网壳结构示意图。图 1(a)和图 1(b)分别为两端开口、底部柱支撑的柱面网壳结构示意图,下文称为开口柱面网壳,横向跨度 125 m,纵向长度 134 m,结构总高 47.5 m,网壳面由半径为 80 m 和半径为 40 m 2 种圆弧组成,矢高 41.5 m,矢

跨比 1 : 3,模型缩尺比为 1 : 125。图 1(c)和图 1(d)分别为两端封闭、底部开洞墙体支撑的柱面网壳结构示意图,下文称为闭口柱面网壳结构,横向跨度 120 m,纵向长度 380 m,结构总高度 40.4 m,其中纵向中间平直柱面段长度 260 m,两端分别由半径为 60 m 的 1/4 球面封闭,矢高 38.6 m,矢跨比 1 : 3.11,模型缩尺比 1 : 200。模型内外表面对应布置风压测点。

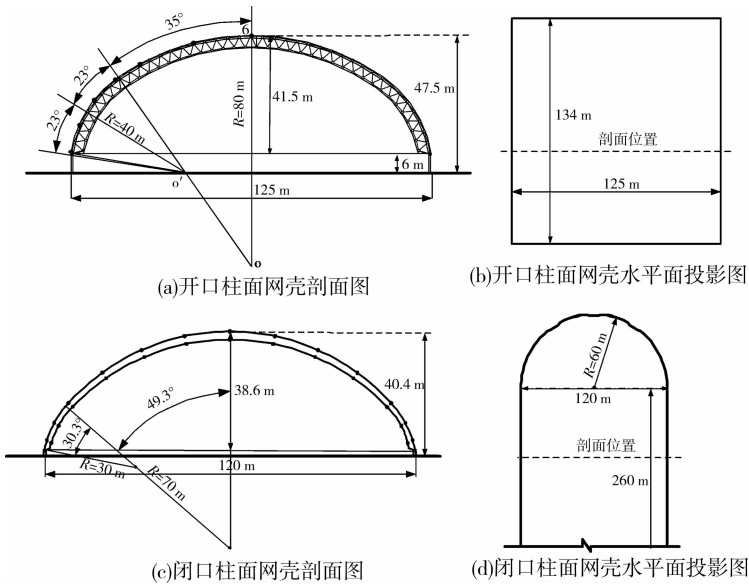


图 1 结构示意图

1.2 风场及试验参数

试验在石家庄铁道大学风工程研究中心 STY-1 风洞低速试验段中进行。试验中用粗糙元和尖劈模拟大气边界层风场,试验结果与中国《建筑荷载规范》中 A 类地貌吻合,图 2 为试验模拟的平均风剖面、紊流度剖面及结构顶部附近顺风向脉动风功率谱及顺风向湍流积分尺度。其中  $U$  为顺风向平均

风速、由于 2 种结构模型缩尺比不同,采用  $Z_1$ 、 $Z_2$  表示开口网壳结构与闭口网壳结构的高度参数,  $n$  为频率,  $S_u$  为顺风向脉动风功率谱、 $\sigma_u$  为脉动风速均方根值、 $L_u$  为顺风向湍流积分尺度。

风洞测压试验的自由来流风速为 16 m/s,采样频率为 312.5 Hz,采样点数为 6 000 点。

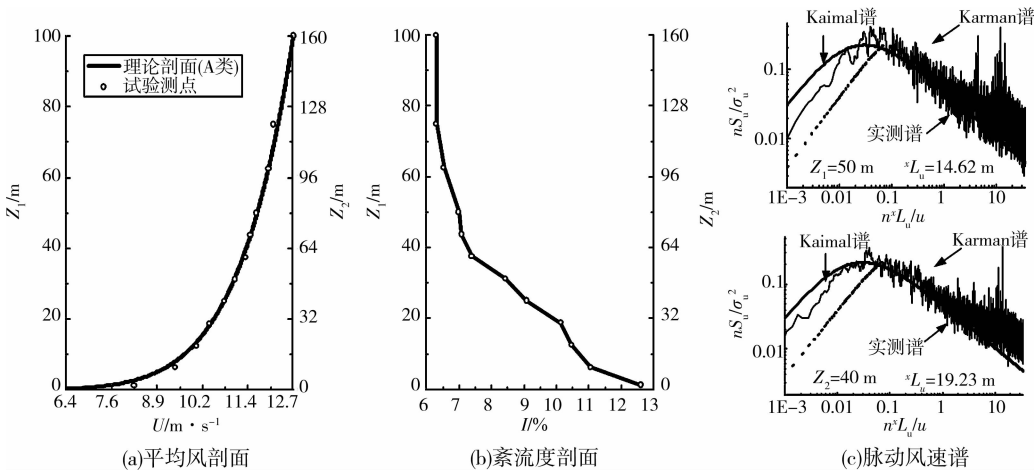


图 2 平均风剖面、紊流度剖面及脉动风功率谱

### 1.3 试验数据基本规定

对于外表面测点,压力正向表示沿外表面法线方向指向结构内部,内表面压力正向表示沿内表面法线方向指向结构外部。对于作用在结构表面上的整体风压,风压正向为结构表面承受压力,风压负向表示结构表面承受吸力。

定义为风压系数、体型系数为

$$C_{pi} = \frac{P_i}{0.5\rho U_{10}^2}, u_{si} = \frac{\bar{P}_i}{0.5\rho \bar{U}_i^2} \quad (1)$$

其中  $P_i$  为作用在测点  $i$  的净风压(内外表面风压之差),  $C_{pi}$  为对应  $i$  点的风压系数,  $\rho$  为空气密度,为实际 10 m 高度对应的模型高度处的来流风速平均值,  $u_{si}$  为  $i$  点体型系数,为作用在  $i$  点的净风压平均值,为  $i$  点高度处来流平均风速,下文中用  $C_{prms}$  代表  $C_{pi}$  均方根值,作为脉动风压系数的量化参数。

## 2 风压分布基本规律

### 2.1 开口柱面网壳风压分布规律

图 3 为开口柱面网壳结构横截面顺风向体型系数及脉动风压系数,其中图 3(a)中包含了开口柱面网壳结构纵向测点行编号  $Ln$  与表示横向测点位置参数  $\alpha$  的定义。

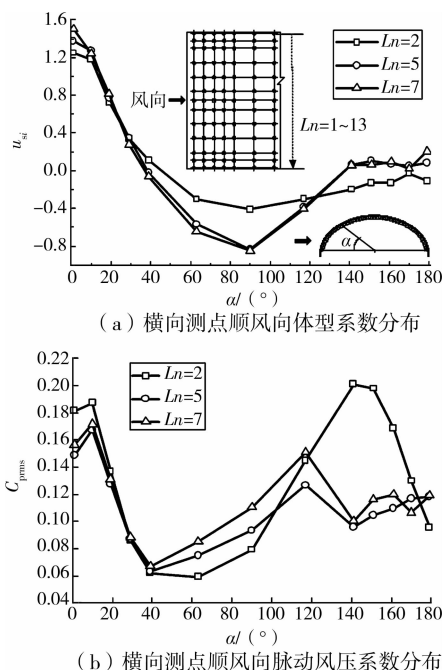


图 3 开口柱面网壳横截面顺风向风压分布

由图 3 可知,当来流垂直于结构纵向轴线时,随着  $\alpha$  的增大体型系数逐渐减小,在  $\alpha=39^\circ$  左右时体型系数由正值变为负值,作用在结构表面的风压由正压变为负压,  $\alpha=90^\circ$  时(结构顶部)体型系数达到最小值,风压表现为最大吸力,  $\alpha>140^\circ$  时,体型系数

值变化很小。不同横截面(用不同  $Ln$  值表示)上测点,体型系数随  $\alpha$  的变化规律相同,但不同截面在同一  $\alpha$  值对应的体型系数有差别,纵向中心位置附近截面差异较小。对于纵向中心位置附近横截面,脉动风压系数在结构迎风向底部( $\alpha$  值较小)较大,而在结构两端,除迎风向底部外,背风面尾流区的脉动风压系数也较大。

$\alpha=39^\circ, 90^\circ$  和  $151^\circ$  3 个纵截面上各点在来流垂直于结构纵轴时的风压分布见图 4。

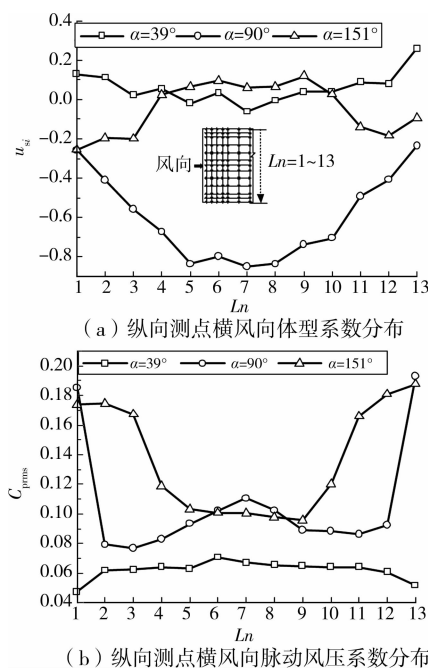


图 4 开口柱面网壳纵截面横风向风压分布

图 4 中体型系数分布表明,当来流垂直于结构纵轴时,结构顶部( $\alpha=90^\circ$ )纵向轴线上  $Ln=5\sim 9$  范围内,体型系数接近,结构中( $\alpha=39^\circ$  和  $\alpha=151^\circ$ )纵向轴线上  $Ln=4\sim 10$  范围内体型系数值差别不大。图 4 工况下,结构顶部及背风面两端脉动风压系数较大,迎风向脉动系数整体较小。

当来流与结构纵向平行时,开口的柱面网壳结构纵向测点风压分布如图 5 所示。

不同  $\alpha$  值对应的体型系数以及脉动风压系数随纵向位置的变化规律基本相同,即除了迎风端部分测点外,其他测点平均风压和脉动风压都很小,对于本例,迎风端前 3 排测点风压值较大。

### 2.2 封闭柱面网壳结构风压分布规律

与开口柱面网壳不同,闭口柱面网壳结构两端由 1/4 球面封闭,同时相对于柱体支撑,开洞墙体支撑底部气流会受到开洞位置的影响<sup>[4]</sup>。

图 6 给出了不同横截面上结构横向测点的风压分布规律,其中图 6(a)中给出了横截面编号  $Hn$  和

测点横向位置参数  $\beta$  的定义。

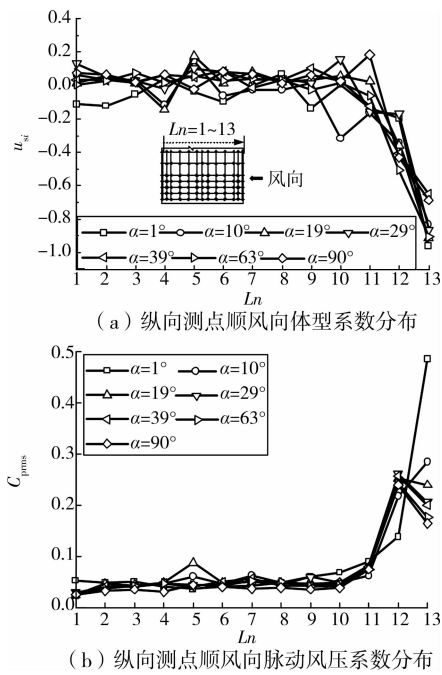


图 5 开口柱面网壳纵截面顺风向风压分布

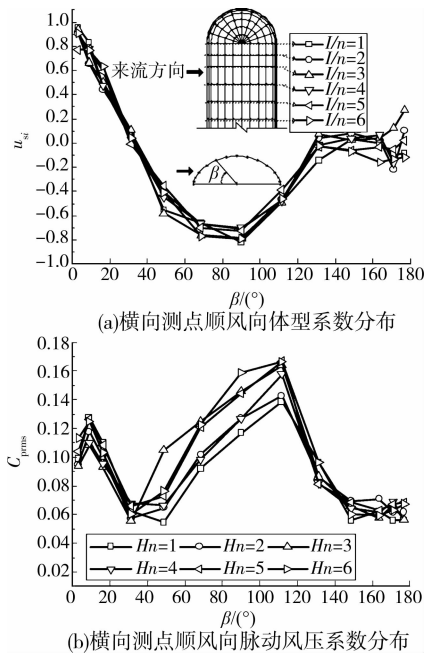


图 6 闭口柱面网壳横截面顺风向风压分布

随着  $\beta$  的增大体型系数逐渐减小,在  $\beta=32^\circ$  左右,作用在结构表面的风压由正压变为负压,结构顶部风压吸力最大, $\beta>130^\circ$  时,体型系数值变化很小。不同横截面上的测点体型系数和脉动风压系数随  $\beta$  变化的规律基本相同,脉动值在  $\beta=110^\circ$  左右最大。

来流垂直于网壳纵向轴线时,网壳顶部纵向测点风压分布见图 7。图中横坐标按照测点布置位置等比例绘制。

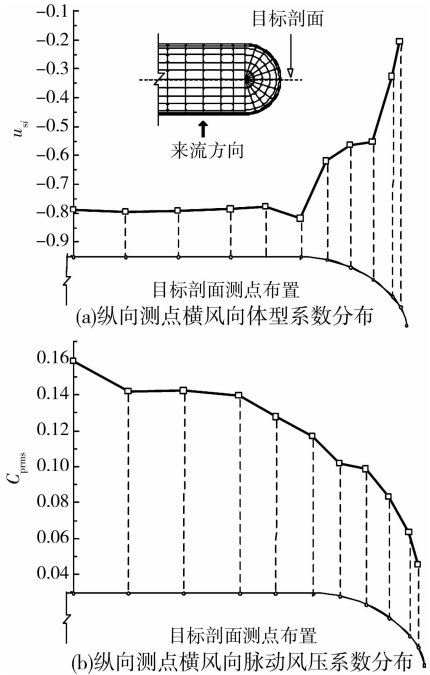


图 7 闭口柱面网壳纵截面横风向风压分布

图 7 中的风压分布规律说明,当来流来流垂直于网壳纵向轴线时,闭口柱面网壳顶部负压最大值发生在结构顶部直线段端点处( $\beta=90^\circ$ ,  $H_n=1$ ),顶部直线段其他体型系数与该点处体型系数差别不大。脉动风压系数在结构顶部中心点最大,随着测点距离中心点越远,脉动风压系数均方根值越小。

当来流平行于封闭网壳的纵向轴线时,网壳顶部纵向测点的风压分布见图 8。

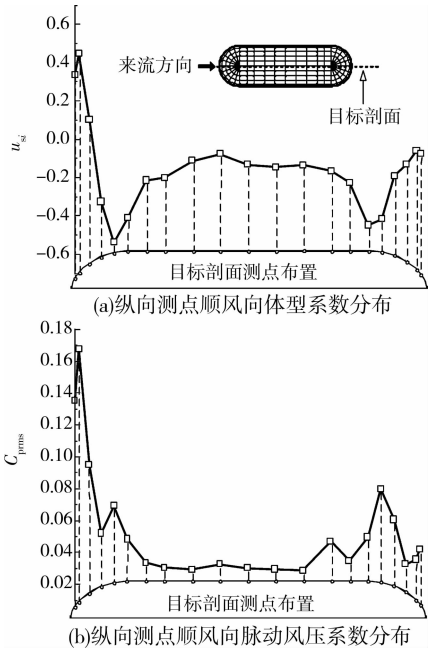


图 8 闭口柱面网壳纵截面顺风向风压分布

由图 8 可知,顶部纵向两端测点风吸力较大,中间测点体型吸力较小且测点间差别不大,脉动风压

系数均方根最大值发生在迎风向 1/4 球壳段底部,球壳与柱面交接处风压脉动值较大。

2.3 2 种网壳结构风压分布对比

分析 2.1 和 2.2 节风压分布的基本规律,闭口网壳结构两端有效的消除了来流作用在结构上的端部效应,使得结构顶部的平均风压和脉动风压沿纵向的变化幅度更小,尤其当来流平行于结构纵向时,闭口网壳结构的脉动风压系数均方根值远小于开口网壳端部对应值。

为了对比底部柱与底部开口墙体 2 种支撑形式对壳内外压的影响,图 9 给出了 2 种结构中心横截面测点顺风向外压体型系数和净压体型系数,其中外压体型系数为外表面测点对应的体型系数,即将公式(1)中测点的净风压平均值换为外表面测点风压的平均值计算得到的体型系数。

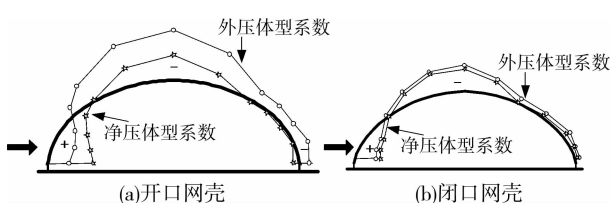


图 9 网壳中心横截面测点顺风向风压分布

图 9 可以看出,考虑网壳结构底部开口引起的结构内压使得壳体结构迎风向正压区范围扩大,且该范围内测点正压增大,负压区的负压值减小,这主要因为这里的内压为负压,与外压相互抵消。对于不同的底部开口状况,对结构内压是有影响的,如本文底部柱支撑的开口网壳结构,内压表现为较大的负压力,因此结构正压区的范围更大,且较大程度的抵消了结构外表面的负压。对于底部开有少量门洞的墙体支撑,文中的闭口结构内部负压值相对较小,且沿横向跨度变化不大,因此外压与净压差别较小(见图 9(b))。

3 风荷载建议

文献[13-16]对柱面壳体结构风荷载的规定主要是基于圆形弧面,与该文采用的弧面形式有一定差别。

对于底部开洞率较小的结构,内压主要在结构外压基础上叠加一常值内压,如日本规范<sup>[15]</sup>规定对于没有明显优势开口的情况下,内压系数取 0 或者 -0.4,中国规范<sup>[13]</sup>规定取 -0.2,欧洲规范<sup>[14]</sup>规定 -0.4。闭口结构属于此种类型其内压均为负值,最小值为 -0.16。

类似于文中开口网壳结构的风荷载,底部较大

开口对内压值及内压分布影响较大,文献并未给出具体的设计风荷载,表 1 给出了 2 种柱面网壳分块体型系数,其中闭口网壳结构并未包含两封闭端上的体型系数。

表 1 2 种柱面网壳分块体型系数

参数	开口网壳		闭口网壳	
	Case1	Case2	Case1	Case2
$\Phi_1$	40°	40°	30°	30°
$\Phi_2$	100°	100°	100°	120°
$\Phi_3$	40°	40°	50°	30°
$h_a$	1/4D	1/8D	0	1/6D
$h_b$	—	—	—	—
$h_c$	1/4D	1/8D	0	1/6D
$R_{a1}$	1.0	-1.0	0.8	-0.5
$R_{a2}$	-0.5	-1.0	-0.8	-0.5
$R_{a3}$	-0.1	-1.0	-0.2	-0.5
$R_{b1}$	1.0	0.0	0.8	-0.2
$R_{b2}$	-0.9	0.0	-0.8	-0.2
$R_{b3}$	0.0	0.0	-0.2	-0.2
$R_{c1}$	1.0	0.0	0.8	-0.5
$R_{c2}$	-0.5	0.0	-0.8	-0.5
$R_{c3}$	-0.1	0.0	-0.2	-0.5

根据表 1 的风荷载分布可以看出,闭口网壳结构承受风压小且分布均匀,比较有利于结构的抗风设计。若与文献[13]中提及的类似结构形状的推荐外压体型系数相比,该试验得到的风荷载较小。

4 结 论

结构外形、底部支撑开口状况、端部封闭情况等因素对柱面网壳结构风荷载分布有很大影响。针对文中涉及的开口和闭口柱面网壳结构而言,作用在结构表面上的净风压以吸力为主,最大吸力发生在结构顶部及两端,两端采用弧面结构封闭可以有效的减小端部风压,同时使得结构表面风压分布更加均匀。结构底部开口形成的负内压能有效的抵消结构表面的负压,但使得结构表面正压区扩大,且正压值增大,较小底部开口(本例为少量门洞)时,结构内压值分布均匀,结构内部可近似看做稳定的负压区。

参考文献:

[ 1 ] TOY N,MOSS W D,SAVORY E. Wind tunnel studies on a dome in turbulent boundary layers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1983, 11(1/2/3): 201-212.

[ 2 ] SAVORY E,TOY N. Hemispheres and hemisphere-cylinders in turbulent boundary layers[J]. Journal of

- Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 23:345-364.
- [3] TAYLOR T J. Wind pressures on a hemispherical dome [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991, 40(2): 199-213.
- [4] BLESSMANN J. Researches on wind effects on domes in brazil[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 65(1/2/3): 167-177.
- [5] Mean forces, pressures and flow field velocities for circular cylindrical structures; Single cylinder with two-dimensional flow[R]. 1980, ESDU: London.
- [6] Response of structures to vortex shedding; Structures of circular or polygonal cross section [R]. 1996, ESDU: London.
- [7] ZAN S J. Experiments on circular cylinders in crossflow at reynolds numbers up to 7 million [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6/7): 880.
- [8] CHENG C M, FU C L. Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6/7): 328-344.
- [9] FAGHIH A K, BAHADORI M N. Three dimensional numerical investigation of air flow over domed roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(3): 161-168.
- [10] LETCHFORD C W, SARKAR P P. Mean and fluctuating wind loads on rough and smooth parabolic domes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 88(1): 101-117.
- [11] LI Y Q, TAMURA Y, YOSHIDA A, et al. Wind loading and its effects on single-layer reticulated cylindrical shells[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(12): 949-973.
- [12] 周恒毅, 顾明, 米福生, 等. 干扰条件下煤棚结构风致干扰特性研究[J]. 振动工程学报. 2009, 22(6): 652-658.
- ZHOU XUAN-YI, GU MING, MI FU-SHENG, et al. Interference effects on wind-induced responses of dry coal sheds[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(6): 652-658.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 2006 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [14] CEN. Action on Structures, in General Actions-wind Actions[S]. Euopean committee for standaridization, 2004.
- [15] AIJ. Recommendations for Loads on Bulidings and Other Structures[S]. AIJ, 1996.
- [16] ASCE. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S]. 2006.
- (编辑 胡英奎)

(上接第 27 页)

- [7] 殷宗泽, 凌华. 非饱和土一维固结简化计算[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 633-637.
- YIN ZONG-ZE, LING HUA. Simplified computation of 1D consolidation for partially saturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 633-637.
- [8] SCOTT R F. Principles of soil mechanics[M]. Mass: Addison-Wesly Pub Company, Inc, 1963.
- [9] 张志红, 赵成刚, 邓敏. 非饱和土固结理论新进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 667-672.
- ZHANG ZHI-HONG, ZHAO CHENG-GANG, DENG MIN. Recent development of consolidaton theories of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 667-672.
- [10] 包承纲. 非饱和压实土的气相形态及孔隙压力消散问题[C]//第三届全国土力学和基础工程会议论文集, 1979: 129-135.
- [11] NUTH M, LALOUI L. Effective stress concept in unsaturated soils; Clarification and validation of a unified framework [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, 32(7): 771-801.
- [12] CHANG C S. Consolidation analysis for partly saturated clay by using an elastic-plastic effective stress-strain model [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1983, 7: 39-55.
- [13] SILLS G C, WHEELER S J, THOMAS S D, et al. Behavior of offshore soils containing gas-bubbles[J]. Geotechnique, 1991, 41(2): 227-241.
- [14] CONTE E, COSENTINI R M, TRONCONE A. Geotechnical parameters from V-P and V-S measurements in unsaturated soils[J]. Soils and Foundations, 2009, 49(5): 689-698.
- [15] FREDLUND D G. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐. 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [16] YOO C, KIM S. Three-dimensional numerical investigation of multifaced tunneling in water-bearing soft ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45: 1467-1486.
- (编辑 胡英奎)