

文章编号:1000-582X(2011)08-024-07

## 山地风场中圆形截面超高层建筑风荷载谱

孙毅<sup>1</sup>,李正良<sup>1</sup>,黄汉杰<sup>2</sup>,陈朝晖<sup>1</sup>,魏奇科<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045;

2. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力研究所,四川 绵阳 621000)

**摘要:**为了研究山地风场中超高层建筑的风荷载和风振响应特性,必须了解复杂湍流变化对建筑风荷载的影响。在风洞中模拟了 4 种湍流度,通过 3 个不同高宽比圆形截面超高层建筑模型,考察了来流湍流度、建筑高宽比、层高度等因素对顺风向和横风向风荷载功率谱影响规律。针对 2 个方向风荷载功率谱的特点分别采用不同荷载谱模型进行了参数拟合,再以湍流度、建筑高宽比为基础变量对荷载谱模型参数进行二次拟合,初步建立了复杂山地圆形截面超高层建筑风荷载功率谱的数学模型。最后给出一个实例,通过具体山地风速和湍流度剖面,根据提出的建筑风荷载功率谱数学模型,比较了山地和平地圆形截面超高层建筑的风振响应。

**关键词:**山地风场;圆形截面;超高层建筑;风荷载;风洞试验;数学模型;风振响应

**中图分类号:**V211.7;TU312

**文献标志码:**A

## Analysis of wind load spectrum of super tall buildings with round section in hilly terrain wind field

SUN Yi<sup>1</sup>, LI Zheng-liang<sup>1</sup>, HUANG Han-jie<sup>2</sup>, CHEN Zhao-hui<sup>1</sup>, WEI Qi-ke<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** In order to get wind load and wind induced response of super tall buildings in hilly terrain wind field, effect of changing of turbulent intensity on wind loads must be known. 4 kinds of turbulent wind field are simulated, and 3 super tall building models with round section of different aspect ratio are manufactured. Effects of turbulent intensity, aspect ratio and layer height on along-wind and across-wind load are discussed. Different models are used in fitting of wind load spectrum on each direction. Parameters of load spectrum models are secondary fitted based on turbulent intensity and aspect ratio. Mathematical models of wind load spectrum of super tall buildings with round section in hilly terrain are preliminarily established. At last, an example is provided. According to vertical profile of mean velocity, turbulent intensity and mathematical model of wind load spectrum, wind induced dynamic response of super tall buildings in hilly terrain and flat terrain are compared.

**Key words:** hilly terrain wind field; round section; super tall building; wind load; wind tunnel test; mathematical model; wind induced response

收稿日期:2011-02-13

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(90715024);重庆大学研究生创新团队建设项目(200909C1017)

作者简介:孙毅(1980-),男,重庆大学博士研究生,主要从事结构风工程研究,(E-mail)sunyi0712@vip.sina.com。

李正良(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)lizhengl@hotmail.com。

圆形截面是一种比较常见的超高层建筑截面形式,对其风荷载功率谱气动特性的研究是一项具有现实工程意义的工作。为了计算圆形截面超高层建筑的风振响应,风荷载功率谱的特性研究是必不可少的一个环节。

近年来,随着超高层建筑的大量兴建,国内外学者进行了各种超高层建筑风荷载特性风洞试验研究。Davenport<sup>[1-3]</sup>基于一系列假设,发展并完善了顺风向风荷载和风致响应的计算方法,建立了影响深远的阵风荷载因子法;Solari<sup>[4-6]</sup>进行了大量的研究工作,把 Davenport 的顺风向计算概念推广到了横、扭方向振动,利用统一的方法计算顺、横和扭转方向荷载。后续研究大多在其基础之上开展,梁枢果<sup>[7]</sup>、全涌<sup>[8]</sup>、叶丰<sup>[9]</sup>、燕辉<sup>[10]</sup>、Lin<sup>[11]</sup>、唐意<sup>[12]</sup>、金虎<sup>[13]</sup>、张建国<sup>[14]</sup>等均针对矩形、三角形、多边形等各种截面形式超高层建筑进行了大量风洞试验研究,基于平地风场的标准风速和湍流度剖面进行了脉动风荷载研究工作,在试验基础上发展了频域风致响应计算理论和等效静力设计方法。近年来,随着超高层建筑高度的不断发展,风工程领域研究受到了新的挑战<sup>[15]</sup>, Kataoka<sup>[16]</sup>、Wu<sup>[17]</sup>、kikitsu<sup>[18]</sup>、Kenny<sup>[19]</sup>等人的研究均代表了最近研究的新动向。

然而大量的风洞试验中,针对圆形截面的超高层建筑试验较少,且几乎所有试验均在标准平地边界层中进行,无法适用于复杂山地风场中的超高层建筑风荷载和风致响应计算。

笔者在风洞中模拟了 4 种不同的湍流风场,制作了 3 个不同高宽比的圆形截面超高层建筑刚性测压模型,通过测压孔同步采集建筑表面脉动风压时程,采用表面压力积分法获得不同层高度风荷载功率谱特性随湍流度、高宽比变化规律。根据顺风向和横风向荷载谱形状和形成机理,分别采用不同的功率谱模型进行参数拟合,建立了以湍流度和高宽比为基本变量的圆形截面超高层建筑层荷载谱模型。最后通过一算例,运用文中提出的模型,计算了山地和平地风场中圆形截面超高层建筑风振响应。

## 1 风洞试验概况

试验在中国空气动力研究与发展中心低速所 FL-11 风洞中进行,截面尺寸 1.4 m×1.4 m,试验段长度 6.3 m。采用美国 Scanivalve 公司生产的 DSM3400 电子扫描阀系统进行数据采集,采样频率 156 Hz,每个测点采样长度 4 096 点。

试验中采用尖劈和粗糙元组合,模拟了 4 种不同的湍流风场,湍流度最低为 3%,最高超过 40%。

在山地风场中,山体引起的湍流度变化主要集中在近地面,如山顶高度以下,而在较高高度处则与平地风场相差不多。因此在模拟不同湍流度时,重点考察 300 mm 以下高度区域,由图 1 中可见该部分湍流度差别明显,代表了复杂山地中山顶附近、背风面山腰到山脚的回流区、背风面山脚之后的遮挡区等不同位置的各种湍流度水平。图 2 为风洞中来流脉动风速功率谱,与 Davenport 谱较吻合。

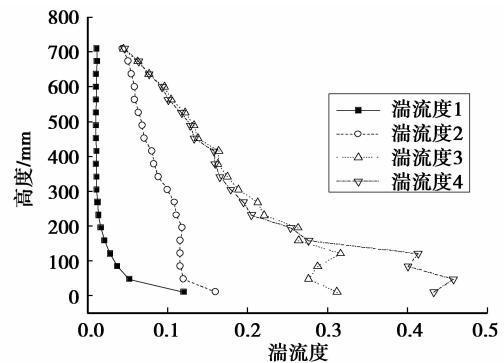


图 1 4 种不同湍流度

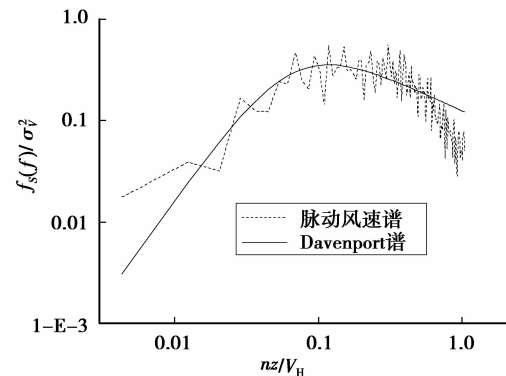


图 2 脉动风速功率谱

3 个圆形截面超高层建筑模型采用 PVC 管制作(如图 3 所示),几何缩尺比为 1:500,高度均为 600 mm,其他具体尺寸见表 1。模型表面测压孔沿竖向划分 11 层网格(模型底部为第 1 层),每层横向沿圆周均匀划分 20 列网格,在每个网格形心位置布置测压孔。在建筑顶部、底部等处压力变化可能较剧烈,因此测点布置要密集一些,以准确获得这些部位的压力分布特性,如图 4 所示。将测压孔所测得风压沿表面积分,则可得各层顺风向和横风向风荷载。

表 1 试验模型参数

表 1 试验模型参数				mm
模型编号	高度 $H$	直径 $D$	高宽比 $H/D$	
C1	600	80	7.5	
C2	600	100	6.0	
C3	600	150	4.0	



图 3 建筑模型

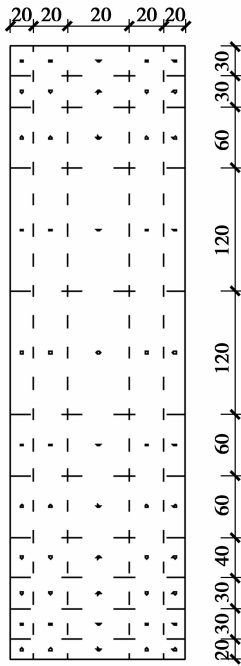


图 4 测压孔布置

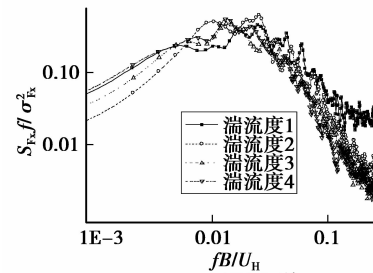
## 2 风荷载功率谱特性

在超高层建筑中部,空气绕流主要体现为二维形式,沿竖向的流动相对较少;但在底部和顶部,由于受到地面和屋顶部分的影响,则较多呈现出三维绕流特点,层气动力特性与中部区别较大。因此用 3 层、6 层和 10 层代表建筑底部、中部和顶部分别考察顺风向和横风向风荷载谱。

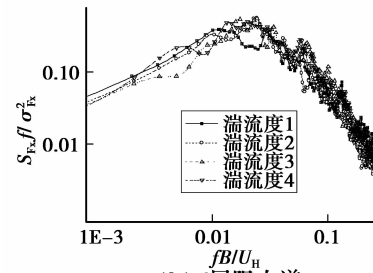
### 2.1 湍流度的影响

湍流度的影响如图 5 所示,可看出在较小的湍流度中(湍流度 1),阻力谱峰及其相邻频率范围内谱值稍小,远离谱峰的低频和高频部分谱值则较大。代表建筑底部的 3 层和代表建筑中部的 6 层阻力谱接近来流脉动风速谱的形式,而 10 层阻力谱由于建筑顶部三维绕流的影响,导致谱峰值较底部和中部小,形状上则更为平坦。

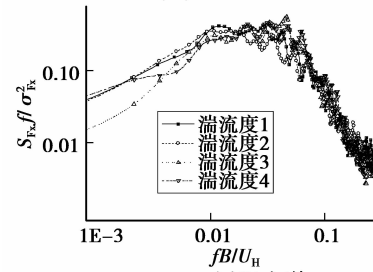
建筑表面横风向荷载一部分由来流风压直接造成,荷载谱应与来流脉动风谱相似;另一部分由建筑侧面空气流动分离和旋涡脱落造成,荷载功率谱应



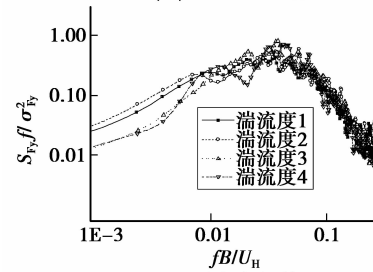
(a) 3层阻力谱



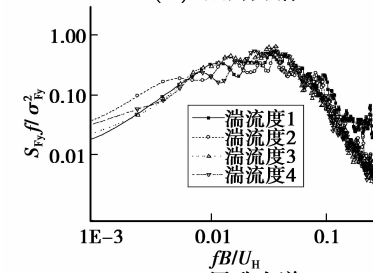
(b) 6层阻力谱



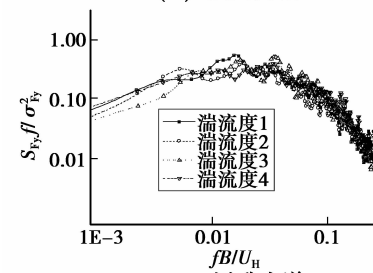
(c) 10层阻力谱



(d) 3层升力谱



(e) 6层升力谱



(f) 10层升力谱

图 5 模型 C2 湍流度对各层功率谱的影响

为峰值折减频率在圆形 Strouhal 数附近的单峰窄带功率谱形式。该 2 部分风荷载的结合,就形成了图 5(d)~(f)那样峰值频率大于阻力谱的升力谱形式。湍流度对升力谱的影响较阻力谱小,3 层和 6 层较小湍流度的升力谱峰值稍小,高频和低频部分谱值则稍大。顶部升力谱同样受到三维绕流影响,谱峰平缓,谱值较小。

### 2.2 高宽比的影响

建筑高宽比对阻力谱的影响较明显,如图 6(a)~(c),随着高宽比的增大,荷载谱形状基本不变,但整体往高频方向移动。模型顶部均表现出三维绕流特性,使阻力谱峰平缓,峰值减小。

升力谱如图 5(d)~(f),可见峰值频率大于阻力谱峰值频率,高宽比的影响与阻力谱类似,随高宽比的增大而整体往高频方向移动。顶部的三维绕流效应同样使升力谱峰值变得平缓,谱值减小。

## 3 层风荷载谱模型

从 2 节分析可知,来流湍流度和建筑高宽比对层荷载谱有显著影响,因此在建立层风荷载功率谱数学模型时,以湍流度和建筑高宽比为拟合参数。

此外,不同层高度的荷载功率谱由于相对位置不同,体现出了较大差异。通过比较分析,将超高层建筑层风荷载功率谱沿竖向分 3 部分拟合,相对高度  $z/H$  分别为  $0\sim 0.3, 0.3\sim 0.8, 0.8\sim 1$ 。

### 3.1 阻力谱模型

顺风向脉动荷载主要以湍流激励为主,因此选取与脉动风速谱类似的阻力功率谱 5 参数模型进行数据拟合<sup>[12]</sup>,如式(1)所示。

$$\frac{fS_D(f)}{\sigma_D^2} = \frac{A_1(n/k)^\gamma}{[1 + \xi(n/k)^{1.5}]^\beta}, n = \frac{fB}{v_H} \quad (1)$$

由于湍流度和高宽比对阻力谱均有显著影响,因此以这 2 个参数为基本变量,沿建筑高度分 3 部分对顺风向风荷载功率谱的 5 参数进行二次拟合,参数拟合公式如式(2),系数取值见表 2。

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= (a_1 + a_2 \ln + a_3 \ln^2) \left( a_4 + a_5 \left( \frac{H}{B} \right) + a_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \\ \gamma &= (b_1 + b_2 \ln + b_3 \ln^2) \left( b_4 + b_5 \left( \frac{H}{B} \right) + b_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \\ \xi &= (c_1 + c_2 \ln + c_3 \ln^2) \left( c_4 + c_5 \left( \frac{H}{B} \right) + c_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \\ k &= (d_1 + d_2 \ln + d_3 \ln^2) \left( d_4 + d_5 \left( \frac{H}{B} \right) + d_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \\ \beta &= (e_1 + e_2 \ln + e_3 \ln^2) \left( e_4 + e_5 \left( \frac{H}{B} \right) + e_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

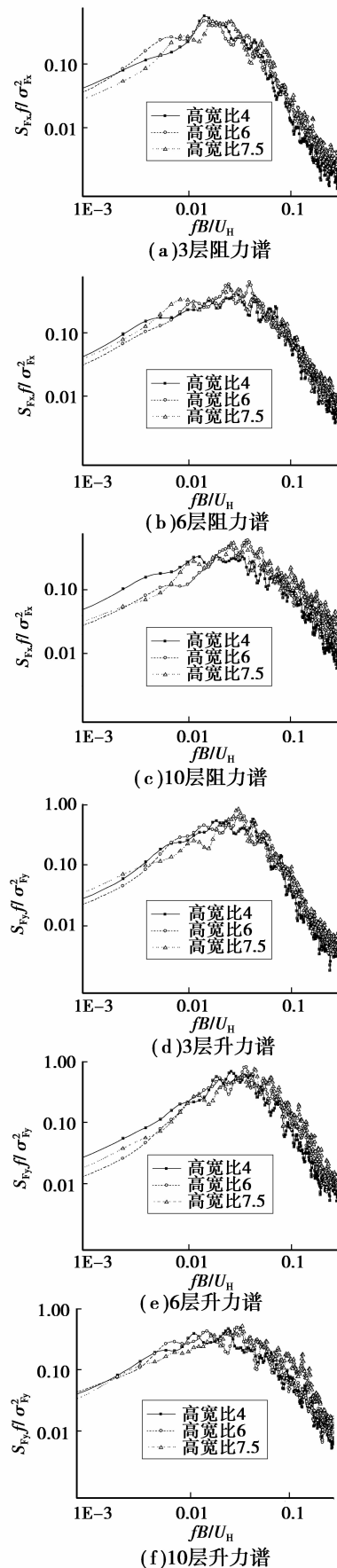


图 6 高宽比对圆形截面模型各层功率谱的影响

表2 阻力谱参数拟合结果

$z/H$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	
$0\sim 0.3$	0.78	-1.96	3.93	5.86	-1.43	0.189	
$a_i$	$0.3\sim 0.8$	0.080 7	-0.628	1.39	24	-7.7	0.625
	$0.8\sim 1$	1.1	-6.41	113	0.65	-0.192	0.014 3
$0\sim 0.3$	1.2	2.8	-5.18	18.8	-5.69	0.449	
$b_i$	$0.3\sim 0.8$	0.702	18.3	-38.6	-2.12	0.906	-0.077
	$0.8\sim 1$	1.02	2.52	-15.2	-18.9	6.89	-0.5
$0\sim 0.3$	0.352	-1.19	1.78	-18.2	8.03	-0.673	
$c_i$	$0.3\sim 0.8$	0.015 9	0.116	-0.165	-0.09 3	0.043 1	-0.004
	$0.8\sim 1$	0.141	18.1	-122	0.672	-0.156	0.034 4
$0\sim 0.3$	0.020 2	-0.09	0.148	-16.9	6.6	-0.527	
$d_i$	$0.3\sim 0.8$	0.001 6	0.008 6	-0.034	0.285	0.052 2	-0.009
	$0.8\sim 1$	0.029 8	-0.548	6.37	0.242	-0.034	0.001 4
$0\sim 0.3$	2.68	2	0.4	7.08	-2.01	0.163	
$e_i$	$0.3\sim 0.8$	1.58	27.6	-83.4	-0.719	0.716	-0.069
	$0.8\sim 1$	4.14	-81.6	810	-1.71	0.697	-0.055

3.2 升力谱模型

横风向脉动荷载主要以涡旋脱落激励为主,因此升力谱模型选取涡旋脱落谱类似的单峰4参数模型<sup>[8]</sup>,如式(3)所示。

$$\frac{fS_L(f)}{\sigma_L^2} = \frac{S_p\beta(n/f_p)^a}{[1 - (n/f_p)^2]^2 + \beta(n/f_p)^2},$$

$$n = \frac{fB}{v_H} \quad (3)$$

湍流度和建筑高宽比均显著影响层升力谱,因此以来流湍流度和建筑高宽比为基本变量,沿建筑高度分3部分对横风向风荷载功率谱的4参数进行二次拟合,参数拟合公式如式(4),系数取值见表3。

$$\left\{ \begin{aligned} S_p &= (a_1 + a_2 \ln + a_3 \ln^2) \left( a_4 + a_5 \left( \frac{H}{B} \right) + a_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \\ f_p &= (b_1 + b_2 \ln + b_3 \ln^2) \left( b_4 + b_5 \left( \frac{H}{B} \right) + b_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \\ \alpha &= (c_1 + c_2 \ln + c_3 \ln^2) \left( c_4 + c_5 \left( \frac{H}{B} \right) + c_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \\ \beta &= (d_1 + d_2 \ln + d_3 \ln^2) \left( d_4 + d_5 \left( \frac{H}{B} \right) + d_6 \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

表3 升力谱参数拟合结果

$z/H$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	
$0\sim 0.3$	0.488	-0.885	2.16	2.62	-0.759	0.080 1	
$a_i$	$0.3\sim 0.8$	0.264	-1.87	10.5	2.92	-0.51	0.038 6
	$0.8\sim 1$	0.31	-6.18	33.9	2.97	-0.606	0.056 8
$0\sim 0.3$	0.051 2	0.022 3	-0.077	0.419	0.186	-0.022	
$b_i$	$0.3\sim 0.8$	0.064 5	0.062	-0.659	0.277	0.122	0
	$0.8\sim 1$	0.016 5	2.25	-11.9	0.447	0.006	0.005 6
$0\sim 0.3$	1.14	-0.597	1.88	3.35	-1.16	0.123	
$c_i$	$0.3\sim 0.8$	0.922	-6.27	26.6	2.4	-0.252	0.015
	$0.8\sim 1$	1.37	-20.6	103	5.71	-1.56	0.136
$0\sim 0.3$	1.41	16.8	-35.8	-0.693	0.589	-0.058	
$d_i$	$0.3\sim 0.8$	5.16	-10.3	-8.95	-1.92	1.05	-0.086

3.3 数学模型与试验数据的对比

为了验证数学模型的正确性,选取了2种试验工况进行对比,可看出吻合情况较好如图7所示,说明拟合公式和参数具有较高精度。

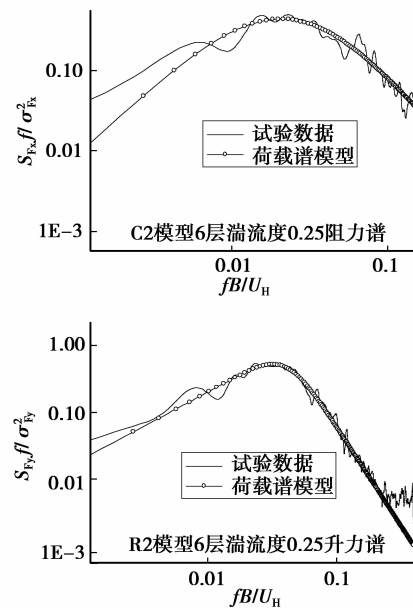


图7 试验数据与荷载谱模型的对比

4 计算实例

给出1个利用该数学模型计算山地圆形截面超高层建筑风振响应的实例,并与同样条件下的平地风场计算结果进行了对比。

4.1 风致响应频域计算方法

Kareem<sup>[20]</sup>基于准定常理论和片条假设讨论了顺

风向气动荷载并与试验结果进行了比较,他指出脉动风压相关性高于脉动风速相关性,但如果实际计算时同时采用迎、背风面全相关假定以及脉动风速和脉动风压的相干函数相同的假定,则产生的误差可以在一定程度上互相抵消。因此采用 Davenport<sup>[1]</sup>提出的脉动风速相干函数代替不同高度处层风荷载相干函数:

$$coh_D(f, z_i, z_j) = \exp\left(-\frac{fC_{Dz} |z_i - z_j|}{\bar{u}_{zizj}}\right), \quad (5)$$

式中:  $coh_D$  为顺风向脉动风速相干函数,与频率  $f$  及两点高度  $z_i, z_j$  有关;  $C_{Dz}$  为阻力竖向相干函数衰减指数;  $\bar{u}_{zizj}$  为  $z_i$  和  $z_j$  高度处平均风速的平均值。

结合文中所提出的无量纲层荷载谱模型和试验所获得的层风荷载均方根值,运用脉动风速相干函数,可获得顺风向层风荷载互功率谱:

$$S_D(f, z_1, z_2) = \sqrt{S_D(f, z_1)S_D(f, z_2)}coh_D(f, z_1, z_2), \quad (6)$$

式中:  $S_D(f, z_i, z_j)$  为  $i, j$  两层顺风向风荷载的互功率谱;  $S_D(f, z_i)$  为  $i$  层顺风向风荷载的自功率谱。

将层风荷载互功率谱沿高度积分,即可得到代表一阶广义荷载谱的基底弯矩功率谱:

$$S_{P1}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_D(f, z_i, z_j)\varphi_{1i}\varphi_{1j}, \quad (7)$$

式中:  $S_{P1}(f)$  为基底弯矩谱;  $n$  为竖向分层总数;  $\varphi_{1i}$  和  $\varphi_{1j}$  为  $i$  层和  $j$  层的一阶模态位移。再根据式(8)可计算超高层建筑的位移动力响应,其中  $M_1$  为结构广义质量,  $H_1(f)$  为传递函数。

$$\sigma_1(z) = \sqrt{\int_0^\infty \varphi_1^2(z) \frac{S_{P1}(f)}{M_1^2} |H_1(f)|^2 df}. \quad (8)$$

### 4.2 山地风场试验

为了获得圆形截面超高层建筑风荷载,必须通过山地风场试验确定山地中具体位置的平均风速和湍流度剖面。试验仍在中国空气动力研究与发展中心低速所 1.4 m × 1.4 m 风洞中进行,模型几何缩尺比为 1 : 1 000,采用聚氯乙烯泡沫制作,采用排管和电子扫描阀采集脉动风速信号。图 8 所示为某山体试验图片。



图 8 山体模型

图 9 为一山地风场中圆形截面超高层建筑实例,高 300 m,截面直径 50 m,单位高度质量  $5 \times 10^5$  kg/m,仅计算一阶线性模态响应,频率 0.15 Hz,阻尼比 1.5%,基本风压 0.3 kPa。该建筑位于背风面山脚,通过山地风场风洞试验可得此处平均风速和湍流度剖面如图 10 所示。

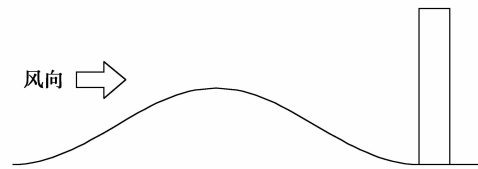


图 9 山地风场中的超高层建筑实例

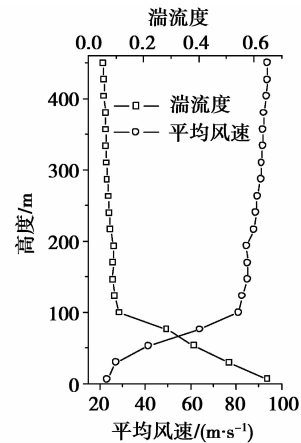


图 10 平均风速和湍流度剖面

### 4.3 动力响应计算结果

山地风场中超高层建筑脉动风荷载均方根值特性也可通过风洞试验确定,具体计算模型见文献[21],取相干函数衰减指数  $C_{Dz} = 7$ 。根据式(5)到式(8),采用一阶线性模态假定,可计算出结构动力响应。为了方便比较,同时计算了同等条件下平地超高层建筑的位移动力响应,结果显示本例背风面山脚建筑顶部水平位移响应均方根值比平地大 18%,如图 11 所示。

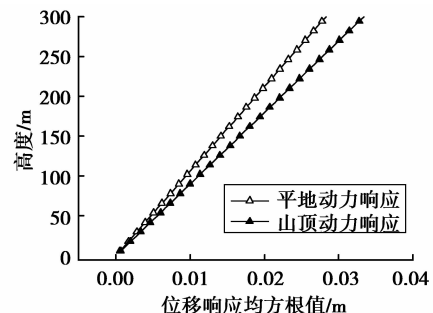


图 11 平地与山顶超高层建筑位移响应

## 5 结 论

1) 圆形截面超高层建筑顶部、中部和底部层风荷载功率谱体现出不同的特征,顶部明显受到三维绕流的影响,顺风向和横风向谱峰值均明显减小,谱峰带宽增大。

2) 高宽比对荷载谱的影响比较明显,顺风向和横风向荷载谱随高宽比的增大整体往高频方向移动。

3) 针对顺横两方向荷载谱的形成机理和谱形特征,分别用2种不同的荷载谱模型进行参数拟合;再以湍流度、建筑高宽比为基本变量对荷载谱模型的参数进行二次拟合,建立了复杂山地超高层建筑风荷载功率谱的数学模型。

4) 给出了一个山地风场圆形截面超高层建筑实例,根据山地中具体风速和湍流度剖面,运用文中提出的数学模型,比较了平地 and 山地圆形截面超高层建筑的风振响应。

### 参考文献:

- [1] DAVENPORT A G. Gust loading factors[J]. Journal of Structural Division, 1967, 93(3):11-34.
- [2] DAVENPORT A G. The generalization and simplification of wind loads and implications for computational methods[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46/47:409-417.
- [3] DAVENPORT A G. How can we simplify and generalize wind loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54/55:657-669.
- [4] SOLARI G. Along-wind response estimation: closed form solution[J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(1): 225-243.
- [5] SOLARI G. Mathematical model to predict 3-D wind loading on buildings [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(2):254-276.
- [6] SOLARI G. A generalized definition of gust factor[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36:539-548.
- [7] LIANG S G, LIU S, LI Q S, et al. Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2002, 90(12/15):1757-1770.
- [8] 全涌. 超高层建筑横风向风荷载及响应研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- [9] 叶丰. 高层建筑顺、横风向和扭转方向风致响应及静力等效风荷载研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [10] 燕辉. 复杂体型高层建筑风荷载及风振响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [11] LIN N, LETCHFORD C, TAMURA Y, et al. Characteristics of wind forces acting on tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(3):217-242.
- [12] 唐毅. 高层建筑弯扭耦合风致振动及静力等效风荷载研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [13] 金虎. X型超高层建筑三维风荷载及风致响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [14] 张建国. 高层建筑抗风若干基础问题及数据库研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [15] IRWIN P A. Wind engineering challenges of the new generation of super-tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(7/8): 328-334.
- [16] KATAOKA H. Numerical simulations of a wind-induced vibrating square cylinder within turbulent boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11):1985-1997.
- [17] WU Y, SUN X Y, SHEN S Z. Computation of wind-structure interaction on tension structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11):2019-2032.
- [18] KIKITSU H, OKUDA Y, OHASHI M, et al. POD analysis of wind velocity field in the wake region behind vibration three-dimensional square prism[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11): 2093-2103.
- [19] KWOK K C S, HITCHCOCK P A, BRUTON M D. Perception of vibration and occupant comfort in wind-excited tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(7/8): 368-380.
- [20] KAREEM A. Synthesis of fluctuating along wind loads on buildings [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(1):121-125.
- [21] 李正良, 孙毅, 黄汉杰, 等. 山地风场中超高层建筑风荷载幅值特性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 13-20.
- LI ZHENG-LIANG, SUN YI, HUANG HAN-JIE, et al. Experimental research on amplitude characteristics of wind loads of super tall buildings in hilly terrain field[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6):13-20.

(编辑 陈移峰)