

文章编号:1673-2049(2008)03-0022-04

中、美、澳荷载规范关于脉动风特征的规定

李 波, 杨庆山, 黄韬颖

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:结合中国、美国、澳大利亚三国规范中的相关规定,对脉动风湍流强度、湍流积分长度以及脉动风速功率谱进行了比较。对比分析表明:由中国规范推导出的湍流强度远远小于美国、澳大利亚规范的相关规定;中国规范选取的湍流积分长度不随高度变化,而美国、澳大利亚规范选取的湍流积分长度随高度的增加而增加,在相同高度处,中国规范所选取的湍流积分长度值介于美国、澳大利亚规范之间;在一般建筑物自振频率范围内,中国规范所采用的脉动风速功率谱谱值比美国、澳大利亚规范规定的谱值大。

关键词:风荷载;脉动风;湍流强度;湍流积分长度;脉动风速功率谱

中图分类号:TU202

文献标志码:A

Prescript of Wind Turbulence Characteristics in Chinese, American and Australian Load Codes

LI Bo, YANG Qing-shan, HUANG Tao-ying

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Combining the relevant regulation in Chinese, American and Australian load code, the turbulence intensity of wind turbulence, turbulence integral length and turbulence spectra of wind turbulence were compared. The comparative analysis shows that the turbulence intensity deduced from Chinese load code is smaller than that specified in American and Australian load codes. Turbulence integral length adopted in Chinese load code is constant, while that will increase with height increases in American and Australian load code. In the same height, turbulence integral length values in Chinese code intervene in American and Australian codes. In the range of building's natural frequency, turbulence wind velocity spectrum value in Chinese load code is the largest one.

Key words: wind load; wind turbulence; turbulence intensity; turbulence integral length; turbulence wind velocity spectrum

0 引 言

风是空气从气压大的地方向气压小的地方流动而形成的。根据风速实测记录,大气边界层中的自然风包含两部分:长周期的平均风和短周期的脉动风。平均风周期远离一般结构物的自振周期,其作

用属于静力性质;而脉动风则与结构物的自振周期较为接近,因而其作用属于动力性质,是随机的动荷载。据此,在工程实际应用中,通常将风荷载视为静力风(平均风)与动力风(脉动风)的共同作用。

平均风可以从空间特征(高度分布规律)、时间特征(时距)和统计特征(重现期和概率密度函数)³

收稿日期:2008-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(50725826)

作者简介:李 波(1978-),男,湖北武汉人,讲师,工学博士,E-mail:libo_77@163.com。

个方面来描述,文献[1]中对此做了详细介绍。脉动风反映了大气边界层中自然风的紊流特性,是结构风致效应分析的重点^[2-5]。一般来说,结构刚度较大(刚性结构)时,需要考虑脉动风所产生的瞬时阵风效应;而结构刚度较小(柔性结构)时,需要考虑脉动风作用下发生的动力放大效应,即风振效应。无论是采用随机振动的分析方法,还是采用风洞试验或计算流体动力学(CFD)的方法来确定结构的脉动风效应,都需要描述脉动风特性。中国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2002,以下简称中国规范)^[6]对平均风特征做了详细的规定,但是对脉动风则涉及较少,给实际应用带来了很大困难。本文中笔者将结合澳大利亚/新西兰规范 AS/NZ 1170. 2: 2002 (以下简称澳大利亚规范)^[7-8]和美国规范 ASNI/ASCE 7—02(以下简称美国规范)^[9]对脉动风速的相关规定进行分析和比较,以供参考使用。

1 脉动风特性

脉动风是由风的不规则性引起的,其强度随时间随机变化。反映脉动风性质的特征参数有湍流强度、湍流积分长度和脉动风速功率谱。

1.1 湍流强度

湍流强度是描述脉动风强度的重要参数,是衡量脉动风能量大小的标志。通常将某一离地高度 z 的顺风向湍流强度 $I(z)$ 定义为脉动风速的均方根 $\sigma_u(z)$ 与平均风速 $\bar{v}(z)$ 的比值,即

$$I(z)=\sigma_u(z)/\bar{v}(z) \tag{1}$$

一般情况下,湍流强度与地面粗糙程度以及离地高度 z 有关,大小随着离地高度的增加而降低。

1.2 湍流积分长度

湍流积分长度是湍流中湍流涡旋平均尺寸的量度。通过某一点气流中的速度脉动可以认为是由平均风所输运的一系列理想涡旋叠加而引起的,若定义涡旋的波长就是涡旋大小的量度,湍流积分长度 L_u 则是湍流中湍流涡旋平均尺寸的量度,在数学上可将其定义为

$$L_u=\frac{1}{\sigma_u^2}\int_0^{+\infty}R_{u_1u_2}(r)dr \tag{2}$$

式中: $R_{u_1u_2}(r)$ 为不同两点的脉动风速 u_1 和 u_2 的空间相关函数; σ_u 为脉动风速的均方根值。湍流积分长度与脉动风速功率谱是密切相关的,其均方根 σ_u 即对应脉动风速功率谱的均方根。

1.3 脉动风速功率谱

脉动风速功率谱表现了脉动风能量在整个频率

范围内的分布特征。将实测的强风记录通过超低频滤波器可直接测得脉动风速的功率谱曲线,并拟合出其数学表达式。结构风工程中通常采用 Kolmogrov 给出的表达式来描述脉动风速功率谱。根据 Kolmogrov 理论,脉动风功率谱密度 $S(n)$ 的统一表达式为

$$\frac{nS(n)}{u_*^2}=\frac{Af^\gamma}{(1+Bf^\alpha)^\beta} \tag{3}$$

式中: n 为主频; u_*^2 为摩擦速度; f 为量纲一的频率,称为相似律坐标或 Monin 坐标; A 、 B 为系数;根据归一化的要求,参数 α 、 β 、 γ 需满足 $\gamma-\alpha\beta=-\frac{2}{3}$ 。

2 规范关于脉动风特性的规定与比较

2.1 中国规范

中国规范中没有明确地给出湍流强度的概念,但给出了脉动风压与平均风压的比值,即脉动系数 $\mu_f(z)$,据此可以得到对应的湍流强度 $I(z)$

$$\mu_f(z)=\frac{\mu\sigma_{wf}(z)}{\bar{w}} \tag{4}$$

式中: μ 为保证系数; $\sigma_{wf}(z)$ 为脉动风压的均方根; \bar{w} 为平均风压。由式(4)可得

$$\begin{aligned}\mu_f(z)&=\frac{\mu\sigma_{wf}(z)}{\bar{w}}=\frac{2(\bar{w}/\bar{v})\mu\sigma_{vf}(z)}{\bar{w}}=\\&2\frac{\mu\sigma_{vf}(z)}{\bar{v}}=2\mu I(z)\end{aligned} \tag{5}$$

式中: $\sigma_{vf}(z)$ 为脉动风速的均方根。

中国规范是根据实测数据并参考了国外的一些资料,在保证率为 98.61%,即 $\mu=2.2$ 的情况下取

$$\begin{aligned}\mu_f(z)&=0.5\times35^{1.8(a-0.16)}\mu_z^{-\frac{1}{2}}(z)=\\&0.5\times35^{1.8(a-0.16)}\left(\frac{z}{10}\right)^{-a}\end{aligned} \tag{6}$$

$$I(z)=\frac{\mu_f(z)}{2\mu}=0.1\times35^{1.8(a-0.16)}\left(\frac{10}{z}\right)^a \tag{7}$$

式中: μ_z 为高度系数; a 为反映地面粗糙程度的参数,见表 1。

表 1 中国规范相关参数

Tab. 1 Relevant Parameters in Chinese Code

地形类别	A	B	C	D
α	0.11	0.16	0.22	0.30

中国规范中采用的是 Davenport 于 1961 年提出的脉动风速功率谱,其中,湍流积分长度 L_u 与高度无关,恒定为 1 200 m,其公式为

$$\frac{nS(n)}{K\bar{v}_{10}^2}=\frac{4x^2}{(1+x^2)^{4/3}},x=\frac{1\ 200n}{\bar{v}_{10}}\quad n\geqslant0 \tag{8}$$

式中: K 为反映地面粗糙度的系数,地面越粗糙 K

值就越大,范围在 0.003~0.03 之间; \bar{v}_{10} 为离地 10 m高处平均时距为 10 min 的平均风速。

主频和峰值是频谱函数的 2 个控制参数,Davenport 谱的主频及峰值分别为

$$n=6.455\,0\bar{v}_{10}\times10^{-4}$$

(9)

$$S(n)_{\max}=1\,987K\bar{v}_{10}$$

(10)

式(9)、(10)表明,中国规范中脉动风速功率谱主频为平均风速的函数,峰值则与平均风速和地形条件有关。

2.2 美国规范

美国规范中规定的湍流强度 $I(z)$ 为

$$I(z)=c(\frac{10}{z})^{1/6}$$

(11)

式中: c 为与地形有关的参数。

美国规范中采用的是 Solari 于 1987 年提出的脉动风速功率谱,其中,湍流积分长度 L_u 随着离地高度 z 的变化而不同,即

$$\frac{nS(n)}{\sigma_v^2}=\frac{6.868x}{(1+10.302x)^{5/3}},x=\frac{nL_u}{v_z}$$

(12)

式中: σ_v 为脉动风速根方差; \bar{v}_z 为高度 z 处的平均风速; $L_u=l(\frac{z}{10})^\epsilon$, l,ϵ 为与地面粗糙程度有关的参数,见表 2。需要注意的是,美国规范中地形类别的 A、B、C、D 分别对应中国规范中的 D、C、B、A。

表 2 美国规范相关参数

Tab. 2 Relevant Parameters in American Code				
地形类别	A	B	C	D
c	0.45	0.30	0.20	0.15
l/m	54.864	97.536	152.400	198.120
ϵ/m	1/0.609 6	1/0.914 4	1/1.524 0	1/2.438 4

显然,美国规范中的脉动风速功率谱主频为 $n=0\text{ Hz}$,对应峰值为

$$S(0)_{\max}=\frac{6.868\sigma_v^2L_u}{v_z}$$

(13)

式(13)表明,脉动风速功率谱的峰值与湍流积分长度、平均风速有关。

表 4 规定条件下的脉动风速特征参数

特征参数	脉动风速功率谱密度		湍流积分长度/m		湍流强度	
	$z=100\text{ m}$	$z=200\text{ m}$	$z=100\text{ m}$	$z=200\text{ m}$	$z=100\text{ m}$	$z=200\text{ m}$
中国规范	$S(n)=\frac{28\,800n}{(1+1\,600n^2)^{4/3}}$		1 200.00		0.07	0.06
美国规范	$S(n)=\frac{800.49}{(1+59.41n)^{5/3}}$	$S(n)=\frac{922.02}{(1+58.89n)^{5/3}}$	217.98	250.39	0.14	0.12
澳大利亚规范	$S(n)=\frac{552.34}{(2+2\,285.15n^2)^{5/6}}$	$S(n)=\frac{616.92}{(2+2\,986.02n^2)^{5/6}}$	1 778.28	2 114.74	0.13	0.11

2.3 澳大利亚规范

澳大利亚规范中规定的湍流强度 $I(z)$ 为

$$I(z)=c(\frac{10}{z})^{0.3}$$

(14)

式(14)中 c 的取值见表 3。需要注意的是,澳大利亚规范中地形类别的 1、2、3、4 分别对应了中国规范中的 A、B、C、D。

表 3 澳大利亚规范相关参数

Tab. 3 Relevant Parameters in Australian Code				
地形类别	1	2	3	4
c	0.194	0.259	0.323	0.450

澳大利亚规范中采用 Harris 提出的脉动风速功率谱,但做了一定改进,其中,湍流积分长度 L_u 考虑了高度的影响,其公式为

$$\frac{nS(n)}{\sigma_v^2}=\frac{4x}{6.677\times(2+x^2)^{5/6}},x=\frac{nL_u}{v_z}$$

(15)

式中: $L_u=1\,000\times(z/10)^{0.25}$ 。

显然,澳大利亚规范中的脉动风速功率谱主频为 $n=0\text{ Hz}$,对应峰值为

$$S(0)_{\max}=0.34\frac{\sigma_v^2L_u}{v_z}$$

(16)

式(16)表明,脉动风速功率谱的峰值与湍流积分长度、平均风速有关。

2.4 规范比较

综上所述,脉动风速功率谱和湍流强度一般与离地高度、地形条件以及平均风速有关。表 4 给出了高度分别为 100、200 m,平均风速为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,宽阔平坦地形的条件下中国、美国、澳大利亚三国规范所规定的脉动风速功率谱、湍流积分长度和湍流强度;图 1 为脉动风速功率谱随频率变化的曲线。

由表 4 可以看出,各国规范给出的湍流积分长度差别很大,美国规范最小,澳大利亚规范最大,中国规范介于两者之间。值得注意的是,美国规范与澳大利亚规范中给出的湍流强度大致相同,而中

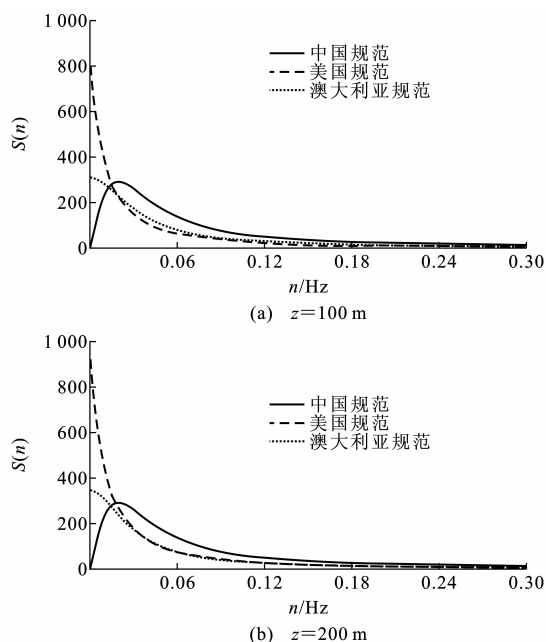


图1 各规范脉动风速功率谱比较

Fig. 1 Comparisons of Turbulence Wind Velocity Spectra in Different Codes

国规范明显偏小。其主要原因是中国规范中并没有直接给出湍流强度,脉动系数换算为湍流强度的过程中采用了拟定常假定,并且没有考虑结构体系对平均风压的影响,所以得出的湍流强度可能失真。

由图1可以看出,美国和澳大利亚规范中规定脉动风速功率谱在 $n=0$ Hz时达到峰值,并随着主频增大而单调递减,美国规范的脉动风速功率谱峰值明显大于澳大利亚规范。中国规范的脉动风速功率谱在 $n=0$ Hz时,谱值为0; $n=0.02$ Hz时,谱值达到峰值; $n<0.02$ Hz时,谱值随着频率的增大而增加;而当 $n>0.02$ Hz时,谱值随着主频的增加而减小。在低频区,中国规范的谱值小于美国和澳大利亚的规范的功率谱密度;而高频区,中国规范规定的谱值高于美国和澳大利亚规范。建筑物自振频率一般在 $0.10\sim 5.0$ Hz之间,在该频率范围内中国规范中采用的Davenport谱给出了较大的脉动响应值。

自振频率较高的刚性结构体系,脉动响应将以背景分量为主,其大小与脉动风速功率谱的积分有关。中国与美国规范中所采用的脉动风速功率谱与坐标轴所围成的面积近似相等,澳大利亚规范则较小。因此,对于刚性结构体系,按中国与美国规范计算的脉动响应会比较接近,而按澳大利亚规范计算的结果会比两者的小。

自振频率较低的柔性结构体系,脉动响应中共振分量将起控制作用,其大小主要与有效频率段的

脉动风速功率谱谱值有关。美国和澳大利亚规范中在有效频率段所规定的脉动风速功率谱的谱值约为中国规范的0.6倍,因此,按中国规范的计算结果会偏于安全。

3 结 语

(1)中国规范中没有直接给定湍流强度,但可以通过脉动系数推导出湍流强度的表达式,但是,按此方式得到的湍流强度远远小于美国、澳大利亚规范的相关规定,偏于不安全。主要原因是,在脉动系数到湍流强度的转化过程中,引入了拟定常假定,并且平均风压没有考虑结构体系的影响。

(2)中国规范中所采用的湍流积分长度恒定为1 200 m,不随高度变化;而美国和澳大利亚规范中所采用的湍流积分长度均随高度变化。在同一高度处,各国规范中规定的湍流积分长度相差较大,其中美国规范最小,澳大利亚规范最大,中国规范介于两者之间。

(3)中国与美国、澳大利亚规范在脉动风速功率谱上最大的区别在于,中国规范中采用的Davenport谱与高度无关,而美国、澳大利亚规范中所采用的功率谱随着高度的改变而改变。中国规范中采用的Davenport谱在主频小于0.02 Hz的区域谱值较低,而在主频大于0.02 Hz的区域,谱值明显高于美国、澳大利亚规范中采用的脉动风速功率谱。对于刚性结构,脉动响应将以背景分量为主,其大小主要与脉动风速功率谱的积分有关,按中国与美国规范计算的脉动响应会比较接近,而按澳大利亚规范计算的结果比前两者的小。对于柔性结构,脉动响应中共振分量将起控制作用,其大小主要与有效频率段的脉动风速功率谱的谱值有关,按中国规范的计算结果会比按美国、澳大利亚规范的计算结果大,偏于安全。

参考文献:

References:

- [1] 张相庭. 结构风工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
ZHANG Xiang-ting. Wind Engineering of Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2006.
- [2] HOLMES J D. Wind Loading of Structures[M]. London: Spon Press,2001.
- [3] 希缪 埃米尔,斯坎伦 罗伯特. 风对结构的作用——风工程导论[M]. 刘尚培,项海帆,谢黎明,译. 上海:同

(下转第72页)

- Quality Recycled Aggregate Concrete (HiRCA) Processed by Decompression and Rapid Release [C]//MALHOTRA V M. Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Singapore: ASI, 2001: 491-502.
- [10] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- NIU Di-tao. Durability and Life Forecast of Reinforced Concrete Structure [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [11] 张 誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, 28(1): 16-19.
- ZHANG Yu, JIANG Li-xue. A Practical Mathematical Model of Concrete Carbonation Depth Based on the Mechanism [J]. Industrial Construction, 1998, 28(1): 16-19.
- [12] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [13] 牛荻涛, 董振平, 浦聿修. 预测混凝土碳化深度的随机模型[J]. 工业建筑, 1999, 29(9): 41-45.
- NIU Di-tao, DONG Zhen-ping, PU Yu-xiu. Random Model of Predicting the Carbonated Concrete Depth [J]. Industrial Construction, 1999, 29(9): 41-45.
- [14] CCES 01—2004, 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S].
- CCES 01—2004, Guidelines for the Durability Design and Construction of Concrete Structures[S].
- [15] GB 50068—2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S].
- GB 50068—2001, Unified Standard for Reliability Design of Building Structures[S].
- [16] SARJA A, VESIKARI E. Durability Design of Concrete Structures [M]. London: E & FN Spon, 1996: 165.
- [17] 金伟良, 朱平华. 混凝土结构耐久性的修复性等级划分[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 64-70.
- JIN Wei-liang, ZHU Ping-hua. Restorability Class Partition for Durability of Concrete Structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 64-70.
- [18] 贺拴海, 吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 71-75.
- HE Shuan-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 71-75.
- [19] 李建波, 林 皋, 陈健云, 等. 混凝土损伤演化的随机力学参数细观数值影响分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 7-12.
- LI Jian-bo, LIN Gao, CHEN Jian-yun, et al. Mesoscopic Numerical Influence Analysis of Random Mechanical Parameter of Concrete Damage Evolution [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 7-12.
- ~~~~~
- (上接第 25 页)
- 济大学出版社, 1992.
- SIMIUI E, SCANLAN R. Effect of Wind on Structure; Introduction of Wind Engineering [M]. Translated by LIU Shang-pei, XIANG Hai-fan, XIE Ji-ming. Shanghai: Tongji University Press, 1992.
- [4] ZHOU Y, KIJIEWSKI T, KAREEEM A. Along-wind Load Effects on Tall Buildings; Comparative Study of Major International Codes and Standards [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(6): 788-796.
- [5] 张琳琳, 李 杰. 脉动风速互随机 Fourier 谱函数[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 57-61.
- ZHANG Lin-lin, LI Jie. Cross Stochastic Fourier Spectrum Function of Turbulence Wind Velocity [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 57-61.
- [6] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].
- GB 50009—2001, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [7] AS/NZ 1170. 2: 2002, Structural Design Actions Part 2: Wind Actions [S].
- [8] AS/NZS 1170. 2: 2002, Structural Design Actions Part 2: Wind Actions—Commentary [S].
- [9] ASNI/ASCE 7-02, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures [S].