

文章编号: 1002-0268 (2011) 07-0084-06

山区峡谷大跨度桥梁桥址风场试验

徐洪涛¹, 何勇¹, 廖海黎², 马存明², 鲜荣³

(1. 北京交科公路勘察设计研究院, 北京 100088; 2. 西南交通大学风工程试验研究中心, 四川 成都 610031;
3. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510600)

摘要: 坝陵河特大桥位于地形特殊的山区, 桥址风环境非常复杂, 是我国西部山区桥址的典型代表, 为了正反映桥址处风的实际状况, 探索通过地形模拟风洞试验来确定桥梁设计基准风速和相关的风特性参数的方法和可靠性, 为将来类似桥梁提供参考。试验研究结果表明: 坝陵河特大桥在横桥向来流作用下, 跨中桥面高度处风速受到“峡管效应”的增速作用; 峡谷内平均风剖面的分布具有明显的不均匀性, 桥面高度处平均攻角范围为 $\pm 4.7^\circ$, 高于规范要求的 $\pm 3^\circ$; 桥面高度处的水平和竖向脉动风速功率谱与规范谱在高频区吻合较好, 在低频区有较大差别, 本文采用较为接近的 Von Karman 脉动风速功率谱。

关键词: 桥梁工程; 风场; 地形风洞试验; 山区峡谷; 桥址; 风荷载

中图分类号: O35; U44

文献标识码: A

Experiment of Wind Field in Long-span Bridge Site Located in Mountainous Valley Terrain

XU Hongtao¹, HE Yong¹, LIAO Haili², MA Cunming², XIAN Rong³

(1. Beijing Jiaoke Highway Survey, Design and Research Institute, Beijing 100088, China;
2. Wind Engineering Test & Research Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
3. Guangdong Road Construction Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510600, China)

Abstract: Baling river grand bridge is located in special mountainous area with very complicated wind field which is the representative case in west China. The particular terrain model, which can simulate the practical status of wind field in bridge site, was tested in wind tunnel to confirm the design norm wind speed and the related wind characteristic parameters to give reference to future similar bridge designation, and the test method was researched to identify the correctness and reliability at the same time. The test result shows that (1) the wind speed increases obviously at the height of mid-span girder because of the effect of narrow under cross wind; (2) the distribution of wind profile is nonuniform, the average attack angle range is $\pm 4.7^\circ$ degree, obviously larger than the required $\pm 3^\circ$ in criterion; (3) the power spectra of lateral and vertical fluctuant wind speeds at the high frequency part are close to those listed in criterion, while there exists clear difference at low frequency part. The Von Karman fluctuant wind speed power spectrum was used in this research.

Key words: bridge engineering; wind field; landform wind tunnel test; mountainous vally; bridge site; wind load

收稿日期: 2010-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50808148)

作者简介: 徐洪涛 (1978-), 男, 河北邢台人, 博士, 工程师. (xht1978@163.com)

0 引言

随着山区兴建大跨桥梁日益增加,山区风特性成为风工程关心的问题。山区的风特性与平坦地区差别很大,现有规范对山区风特性也描述极少。对位于山区地形的大跨度桥梁,桥址风环境非常复杂,并具有小气候特性^[1]。附近地区大的气象站资料一般也不能完全反映桥址风场特点。地势多变的山区地形无法归类于风工程规范定义的任何一类地貌,现有的风特性参数模型可能不适用于山区大桥的抗风设计。

目前人们山区峡谷地形的风环境的认识远远不够,针对山区风场特性的研究仅仅局限于山体在来流作用下,山顶风速加速效应以及山体背风区紊流特性的研究^[2-3],或者多重山脉风场的研究^[4-5],然而对桥梁跨越峡谷时桥位所在的峡谷隘口或者紧缩段的风场特性却鲜有研究。尽管山区峡谷地形中平均风速特性,数值风洞的结果已经达到足够的精度,能够达到工程实际的要求。但是,对于脉动风速,比如紊流度,紊流积分尺度以及空间相关特性,数值风洞已经无能为力了。现场实测是最为精确的方法,由于风场紊流特性现场实测的费用大、周期长、难度大,以及过去风速监测仪器的发展水平所限,很难得到系统的实测结果。而风洞试验可以根据试验目的进行多次重复试验,有利于展开深入细致的研究山区峡谷区地形的紊流风环境。

本文贵州省坝陵河特大桥为例,利用大比例尺地形模拟的风洞试验,通过对桥址的风场特性的分析,确定了坝陵河大桥设计基准风速和相关的风特性参数,为进一步研究坝陵河特大桥抗风性能提供依据。

1 工程简况

坝陵河大桥是上海至瑞丽主干线贵州境内镇宁至胜境关高速公路上的一座特大型桥梁。坝陵河大桥为主跨1 088 m的单跨简支钢桁加劲梁悬索桥,主缆分跨为(248+1 088+228) m,是目前国内最大的钢桁加劲梁悬索桥。大桥横跨坝陵河大峡谷,桥面与谷底高差375 m,为亚洲同类型桥梁之最。桥址处谷宽约为1 000 m,桥轴线垂直方向即坝陵河峡谷走向为WN15°,图1为桥位地形采用25 m等高线的平面图。

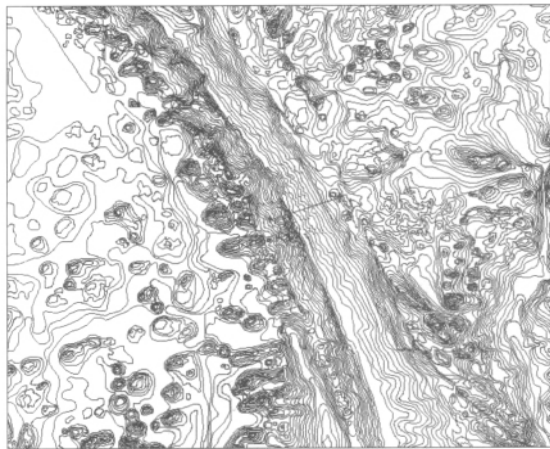


图1 桥位地形等高线平面图

Fig. 1 Contour of terrain at the bridge site

2 桥址区域风场概况

2.1 地形地貌

坝陵河大桥位于关岭布依族苗族自治县城东北4 km,距黄果树景区6 km。关岭布依族苗族自治县座落于云贵高原东部脊状斜坡南侧向广西丘陵倾斜的斜坡地带,地势西北高、东南低,大部分地区海拔高度在800~1 500 m之间。县城海拔为1 025 m,境内山脉属乌蒙山系,山体多起伏绵延。地貌为中至强切割的中山地区,具有高低起伏大,类型复杂多样的特征,山高谷深,相对高差1 480 m。坝陵河起源于六枝特区中寨乡,于关岭断桥镇汇入北盘江支流打邦河,属于珠江水系。坝陵河两岸,大坡顶和关索岭相对峙,山势极为险峻,关索岭主峰海拔1 500 m,河谷深切达700 m。

2.2 风环境概况

坝陵河大桥所处贵州省,地理位置我国西南部,受青藏高原和秦岭的屏障地形影响,西伯利亚寒流引起强冷空气活动,难以涉及该区域。与青藏高原隆升直接相关联的横断山及毗邻的南北走向山系,阻隔了来自印度洋的西南季风。该区域夏季主要受太平洋东南季风影响,但是处于我国内陆,离海较远,且为多山地区,台风很难到达,气流易受阻挡,风力削弱较快,造成全省普遍风速较小,为我国风压最小的区域之一,大部分地区风压在 0.4 kN/m^2 (25 m/s)以下,主导风向为东南风。贵州省山地环境气候研究所对桥区周边8个气象台站的风资料进行统计和推算,百年一遇10 min平均最大风速在21.53~25.19 m/s以内。关岭县多河流峡谷,山高谷深。北盘江、打邦河、坝陵河,这些西北东南走

向的峡谷,可以使广西的东南季风沿峡谷通道进入关岭县。当气流通过山川峡谷时,因地形对气流产生的压缩便产成了狭管增速效应。贵州省山地环境气候研究所风资料表明,关岭全年平均大风日数明显多与其他气象台站,可能是坝陵河峡谷风“狭管效应”造成的影响^[6]。

3 桥址风场试验

3.1 试验方法与内容

桥址风环境模型试验在中国空气动力学研究中心低速所的 FL-13 风洞的第 1 试验段中进行(如图 2 所示),该试验段长 25 m,宽 12 m,高 16 m。试验模拟范围取以东侧桥塔为圆心,半径 $R=6$ km 的圆形区域,采用 1:1 000 的几何缩尺比制作模型,并对影响来流的不足的地方采用补偿模型模拟,进行风洞试验研究。模型底部以河谷水面为基准,山形地貌的模拟采用 1 cm(相当足尺模型 10 m)的高密度泡沫塑料根据等高线形状逐层堆积而成。

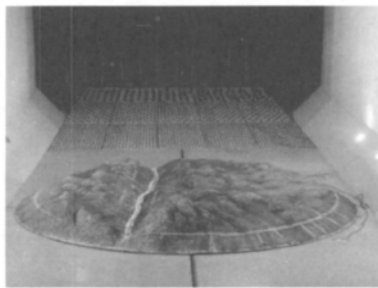


图 2 风洞中的地形模型图

Fig. 2 The terrain model in wind tunnel

为准确反映坝陵河桥址地区的风场特性,对来流风也进行了模拟,复现了谷口前开阔地带的大气边界层特性。根据当地的地形和气象资料,山谷谷口前开阔地带的风场特性可按 II 类地表选用,本文利用尖劈和粗糙元的被动模拟方法,按照地形模型的缩尺比 1:1 000 模拟了山谷谷口开阔地带的 II 类地表的风场特性,测得未放入地形模型前峡谷口桥面高度处风速为 4.8 m/s。

(根据当地气象资料)在地形模拟试验之前,利用 CFD 对坝陵河桥址区域风场特性进行了分析,根据分析结果确定了对桥梁危害较大的来流方向位于坝陵河峡谷走向即桥轴线垂直方向的 $\pm 30^\circ$ 偏角范围内。来流方向以垂直于桥轴线的桥位上游方向为 0° 偏角,下游方向为 180° 偏角,规定逆时针方向为正方向,以 $\Delta\beta=15^\circ$ 为增量,测试了上下游 $\pm 30^\circ$ 偏角范围内共 10 个风偏角工况,见图 3。试验在桥面

高程处沿顺桥向每间隔 108.8 m 依次布置了 11 个测点,测点布置示意图见图 4,其中 6 号测点为跨中位置。

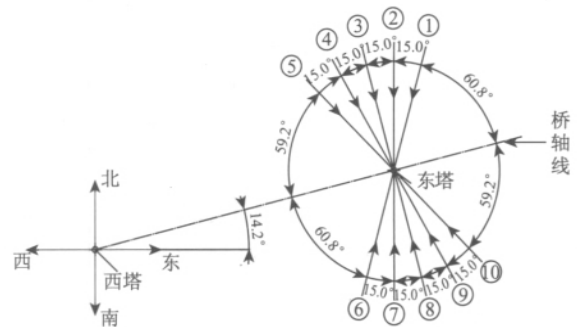


图 3 测点位置及来流方向位置图

Fig. 3 Location of measuring points and wind direction



图 4 测点位置(单位: m)

Fig. 4 Location of measuring points (unit: m)

各测点风速采用丹麦 DANTEC 公司生产的 Stream Line4 通道热线风速仪测量,使用十字形二维探针测量水平脉动风速 u 和侧向脉动风速 w ,然后旋转 90° 以测量竖向脉动风速 v 。

3.2 试验结果与分析

表 1 和表 2 为桥面高处各测点在横桥向及其他来流风偏角作用下的水平顺风向平均风速 U ,水平

表 1 横桥向来流风作用下桥面高处测点试验结果

Tab. 1 Experimental result of measuring points on bridge deck under cross wind

来流风方 向/ $^\circ$	测点 编号	$u/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$I_u/\%$	$I_v/\%$	$I_w/\%$	平均攻角/ ($^\circ$)	风剖面 指数 α
0	2	4.5	16.5	18.3	16.4	4.5	0.22
	4	4.5	15.5	17.0	16.0	2.0	0.17
	6	4.9	12.8	13.9	13.5	-3.3	0.20
	8	3.8	16.2	21.6	16.9	-4.0	0.29
	10	3.1	21.5	23.1	25.7	-4.7	0.28
180	2	4.5	18.2	15.1	15.1	-4.1	0.23
	4	5.0	14.1	10.1	10.1	3.1	0.22
	6	5.1	12.4	10.1	10.0	2.8	0.19
	8	4.8	15.0	9.9	11.6	4.7	0.25
	10	3.4	17.1	18.1	18.1	4.5	0.27

表 2 各方向来流风作用下桥面高处测点试验结果

Tab. 2 Experimental result of measuring points on the bridge deck under wind from different directions

来流风方向/(°)	测点编号	$u/(m \cdot s^{-1})$	$I_u/\%$	$I_v/\%$	$I_w/\%$	平均攻角/(°)	风剖面指数 α
30	2	3.0	29.5	24.3	23.8	-3.1	0.30
	6	3.4	20.6	22.5	20.1	0.1	0.29
	10	2.9	32.1	32.6	28.6	4.8	0.33
150	2	4.1	21.8	15.1	15.4	-0.5	0.26
	6	4.8	19.9	11.8	11.8	5.1	0.21
	10	3.8	26.6	18.7	16.3	5.9	0.25
210	2	3.9	20.9	26.8	25.9	3.2	0.28
	6	4.3	19.4	23.3	22.8	-0.1	0.23
	10	2.7	20.8	30.4	30.4	-3.1	0.30
330	2	3.2	25.2	23.2	26.2	-1.1	0.29
	6	3.7	22.5	20.8	23.4	4.2	0.28
	10	2.7	32.4	33.9	29.2	-5.8	0.32

顺风向紊流强度 I_u , 水平横风向紊流强度 I_v , 竖向紊流强度 I_w , 平均攻角和拟合平均风剖面指数 α 等试验结果。

3.2.1 平均风特性分析

由表 1 和表 2 可以看出, 平均风剖面指数 α 随来流方向及测点位置不同具有较大差异, 主要分布在 0.20 ~ 0.32 之间, 分析其主要原因是峡谷两侧山体起伏不定, 不同偏角下对峡谷内风场起到了不同程度的干扰和遮挡作用^[7], 这就为山区桥梁抗风设计带来不确定因素。在峡谷地形内, 参考规范规定的四类地形采用统一的指数模拟其风剖面形式是不合适的。

由图 5 看到, 各测点位置的平均风速和来流风偏角有较大关系, 来流风方向与峡谷走向夹角越小, 各测点位置的平均风速就越大, 特别当来流风方向为 180° 偏角时, 各测点的平均风速达到了最大。这是由于桥址处周围山岭的屏障作用的结果, 当顺峡谷方向即横桥向来流时, 来流风平均风速几乎不受峡谷两侧山体的影响, 而在其他风偏角下, 显然会受到周围山岭的干扰和遮挡, 使得各测点平均风速明显减弱。在相同的风偏角下, 沿桥跨方向各测点平均风速是不均匀的, 靠近跨中附近测点风速明显高于靠近桥塔位置测点的风速, 这是由于桥塔位置测点靠近两侧山坡, 受到山坡地势起伏影响明显。从图 5 中看出, 由峡谷下游方向来流各测点风速显然高于反方向来流时的风速, 这是因为桥位上游的地形起伏较大, 对风速减弱作用较下游大。除此之

外, 还注意到西塔附近的测点风速普遍要比东塔附近测点风速高 10% ~ 20%, 个别风偏角下甚至比跨中附近的风速还要高, 分析认为峡谷西岸地势起伏相对平缓, 东岸则起伏剧烈。

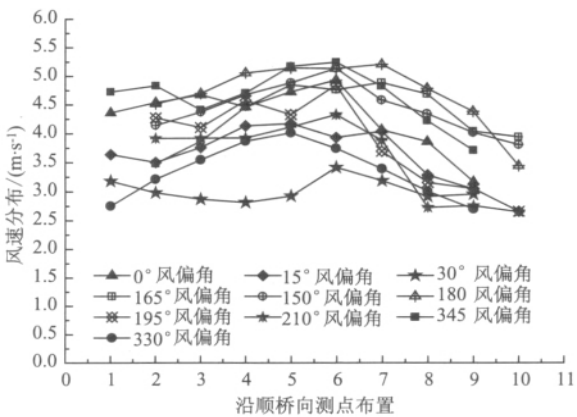


图 5 风速沿测点的分布曲线

Fig. 5 Distribution of wind speed along measuring points

风攻角测量结果表明, 在横桥向来流风作用下, 桥面高度处平均攻角可达 $\pm 4.7^\circ$, 在其他来流风偏角作用下攻角甚至超过了 5° , 特别是 150° 风偏角下, 靠近东塔位置的测点风攻角达到了所有测量值的最大值 5.9° 。试验发现, 靠近桥塔附近测点的平均攻角比跨中附近测点平均攻角大一些, 分析其主要原因可能是桥塔附近测点距离山坡较近, 受地形起伏影响更为明显。

试验结果表明, 在桥面高度处, 在横桥向来流风作用下, 跨中点实测风速比谷口前试验风场相同高度处风速增大 4% ~ 6%, 这是由于山谷的“峡管效应”增速作用。针对山区桥梁的设计基准风速可以引入地形修正系数 K_1 , 即测点高度处实测平均风速与试验风速的比值, 根据试验分析结果, 结合文献^[8-9], K_1 取 1.1。

3.2.2 紊流强度分析

在各方向来流风作用下, 桥址处紊流强度试验结果随来流方向与测点位置不同有显著变化。在横桥向来流风作用下, 靠近两侧山坡的桥面测点 2 和测点 10 的紊流强度, 明显比远离山坡的测点, 尤其是桥面中心测点 6 的相应的紊流强度大。分析认为, 两侧山体起伏不定, 地势复杂多变, 由此形成的山体边界层会对峡谷内风场产生强烈干扰作用, 距离山坡越近, 这种干扰作用就越明显。对于其他方向来流风作用下, 无论是顺风向紊流强度 I_u , 还是竖向紊流强度 I_w 及横向紊流强度 I_v 相比横桥向来流风作用下要大的多, 这充分说明山区地形的复杂。

3.3.3 脉动风功率谱分析

脉动风速功率谱是表征风的脉动分量的一个重要特征参数,它表示了紊流中各频率成分所作贡献的大小。目前桥梁抗风规范^[5]建议的水平顺风向脉动风速谱为卡曼(Kaimal)于1972年提出了Kaimal谱^[10],竖风向风谱为Panofsky在1959年提出了随高度变化的Panofsky谱^[11]表达式:

$$\begin{cases} \frac{nS_u(f)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \\ \frac{nS_w(f)}{u_*^2} = \frac{6f}{(1+4f)^2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $S_u(n)$ 、 $S_w(n)$ 分别为脉动风水平顺风向及竖直方向的功率谱密度函数; n 为脉动风频率; f 为莫宁坐标, $f = nz/U$; $u_* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$ 为气流剪切摩阻速度。

将风洞实测跨中桥面高度处水平顺风向和竖风向风谱同规范谱以及 Von Karman 谱^[12]进行比较(见图6、图7), Von Karman 谱表达式:

$$\begin{cases} \frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4X_u}{(1+70.8X_u^2)^{5/6}} \\ \frac{nS_w(n)}{\sigma_w^2} = \frac{2X_w(1+188.8X_w)^2}{(1+70.8X_w^2)^{11/6}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $X_i = \frac{nL_i^x}{U}$, ($i = u, w$); L_u^x 、 L_w^x 为各脉动分量在纵向上的紊流尺度; σ_u 、 σ_w 为脉动风的纵向和竖向均方根值,其他符号同式(1)。

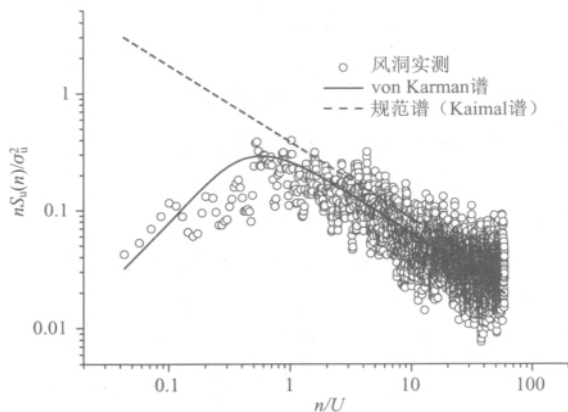


图6 跨中桥面高度处水平顺风向脉动风谱

Fig. 6 Horizontal wind spectrum along wind direction at bridge deck of mid-span

试验结果表明,桥位处的实测风速谱与规范建议的谱曲线在低频范围内相差太大,而在高频范围较为吻合。相比较而言,桥位处的风速谱与 Von

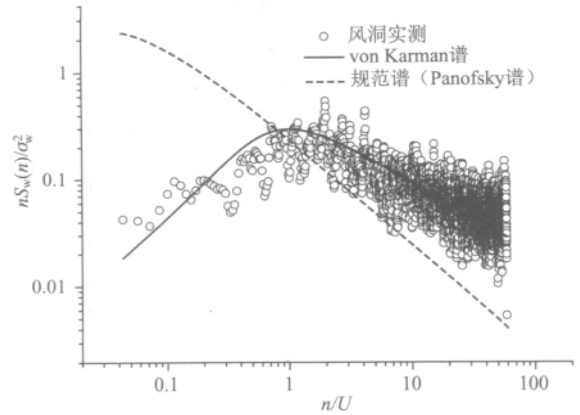


图7 跨中桥面高度处竖向脉动风脉动风谱

Fig. 7 Vertical wind spectrum along wind direction at bridge deck of mid-span

Karman 谱更为接近。

4 桥面设计基准风速和颤振检验风速

根据贵州省气象台提供的坝陵河特大桥桥址附近关岭、镇宁、六枝气象站的原始风速资料(风速记录资料为1961年至2000年)的统计结果,将各测站基本风速按桥位现场与风速测站之间的距离反比进行加权平均,推算出桥位10 m高度处100 a重现期10 min年最大风速 U_{10} 为21.6 m/s。

由《公路桥涵设计通用规范》全国基本风压区分布图知,云贵高原大部分地区风压在400 Pa以下,取 $W_0 = 400$ Pa,得到桥位10 m高度处100 a一遇的10 min年平均最大风速 U_{10} :

$$U_{10} = 0.836 \sqrt{1.6w_0} = 0.836 \times \sqrt{1.6 \times 400} = 21.1.$$

考虑到前者利用了气象站的风速观测资料,并根据桥址局部风特性与气象站之间的相关关系,数据更具针对性,且风速值略大,故取21.6 m/s作为该桥的基本风速。

坝陵河特大桥桥址位于地形复杂的山区峡谷,根据前面分析结果,桥面设计基准风速应考虑峡谷风放大效应,故桥面设计基准风速计算公式:

$$U_d = K_1 K_2 U_{10}, \quad (3)$$

式中, K_1 取1.1, K_2 为场地修正系数,参考《公路桥梁抗风设计指南》^[13]表3.3.3取值。坝陵河大桥主梁的平均高度约为375 m,桥面高度处设计基准风速:

$$U_d = 1.1 \times 1.31 \times 21.6 = 31.1,$$

坝陵河特大桥的颤振检验风速:

$$U_{cr} = K\mu_f V_d = 1.2 \times 1.33 \times 25.9 = 41.3,$$

式中, K 为综合安全系数, $K = 1.2$; μ_f 为考虑风速

脉动的修正系数。

5 结论

针对现有的风特性参数模型可能不适用于地势复杂多变的山区大桥抗风设计这一状况,本文以位于山区的贵州坝陵河特大桥桥位周围地形按一定相似比例缩尺的地形模型为研究对象,通过风洞试验,获得桥址风环境参数。试验研究主要结论如下:

(1) 在横桥向(0° 和 180° 来流方向)风作用下,桥面高度处平均风攻角范围为 $\pm 4.7^\circ$,其他来流风偏角下,攻角范围甚至达到了 $\pm 5.9^\circ$,超出规范规定的 $-3^\circ \sim +3^\circ$ 近一倍左右。

(2) 峡谷内风场紊流强度受峡谷两侧山势起伏、地表植被影响很大,与来流方向有关,并且在沿桥跨方向分布也不均匀。在横桥向来流下的紊流强度明显低于其他风偏角下的紊流强度,并且具有越靠近跨中,紊流强度越小的趋势。

(3) 桥面高度处水平方向和竖直方向脉动风速功率谱曲线与规范^[5]建议的理论曲线相比具有一定程度偏差,在低频区远远低于理论谱,而比较接近Von Karman谱曲线,因此在峡谷内风谱可以选择用Von Karman谱代替规范谱。

参考文献:

References:

- [1] 傅抱璞. 山地气候 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
FU Baopu. Mountain Climate [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [2] KOSSMANN M, VOEGTLIN R, CORSMEIER U, et al. Aspects of the Convective Boundary Layer Structure Over Complex Terrain [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32 (7): 1323–1348.
- [3] RAUPACH M R, FINNINGAN J J. The Influence of Topography on Meteorological Variables and Surface-atmosphere Interaction [J]. Journal of Hydrology, 1997, 190: 182–213.
- [4] CARPENTER P, LOCKE N. Investigation of Wind Speeds over Multiple Two-dimensional Hills [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83 (1/3): 109–120.
- [5] JTG/T D60-01-2004, 公路桥梁抗风设计规范 [S].
- [6] JTG/T D60-01-2004, Wind Resistant Design Specification for Highway Bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [6] 帅士章, 吴战平, 刘清. 坝陵河大桥桥区风参数初步分析与设计风速的确定 [J]. 贵州气象, 2005, 29 (2): 12–15.
SHUAI Shizhang, WU Zhanping, LIU Qing. The Primary Analysis of Wind Parameters and Determine of the Wind Speed in the Spot of Balinghe Bridge [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2005, 29 (2): 12–15.
- [7] 陈政清, 李春光, 张志田, 等. 山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性试验 [J]. 实验流体力学, 2008, 22 (3): 54–59.
CHEN Zhengqing, LI Chunguang, ZHANG Zhitian, et al. Model Test Study of Wind Field Characteristics of Long-span Bridge Site in Mountainous Valley Terrain [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22 (3): 54–59.
- [8] 庞佳斌. 沿海和山区强风特性的观测分析与风洞模拟研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
PANG Jiabin. Field Investigation and Wind Tunnel Simulation of Strong Wind Characteristics in Coastal and Mountainous Regions [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [9] 陈英俊, 于希哲. 风荷载计算 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
CHEN Yingjun, YU Xizhe. Calculation of Wind Load [M]. Beijing: China Railway Press, 1998.
- [10] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98: 563–589.
- [11] PANOFISKY H A, MCCORMICK R A. The Spectrum of Vertical Velocity Near the Surface [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1960, 86: 546–564.
- [12] VON KARMAN T. Progress in the Statistical Theory of Turbulence [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 1948, 34 (11): 530–539.
- [13] 项海帆. 公路桥梁抗风设计指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
XIANG Haifan. Wind Resistant Design Guide for Highway Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 1996.