

文章编号:1671-8879(2017)05-0056-09

# 山区峡谷风场分布特性及地形影响的数值模拟

洪新民, 郭文华, 熊安平

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:**为揭示山区峡谷风场的空间分布特性以及峡谷地形对谷内风场特性分布的影响,根据山区峡谷的地形特点,在 AutoCAD 中将峡谷的几何模型离散为高程点云,利用逆向工程软件 Imageware 将高程点云拟合成峡谷地形曲面,并导入 Gambit 中生成满足要求的计算模型;应用 FLUENT 软件选取适合山区风场的 Realizable 模型,采用稳定性好的 SIMPLE 算法对峡谷风场特性进行数值模拟;最后根据峡谷地形特点和其影响参数,提出峡谷风速放大系数计算公式,并采用多个算例验证其正确性。研究表明:山区峡谷风剖面的轮廓线可以分成 3 段,不能套用平原地区常用的幂函数模型,并且峡谷风剖面的轮廓线具有明显拐点,风速增大段的风剖面轮廓线应采用线性函数与幂函数共同模拟;峡谷内中间位置风剖面最大风速大于两侧风剖面最大风速,其相应的风速拐点高度也较大;峡谷内同一高度观测点的风速在峡谷横断面上成抛物线变化,距离两侧山体约 60 m 处风速达到最大值;峡谷越窄,两侧山峰越高,峡谷内风场的“峡谷效应”越明显;风剖面风速拐点高度与峡谷高宽比成反比,峡谷高宽比越大,风剖面风速拐点高度就越小;该公式可推算山区峡谷内任意高度的风速,可为跨越山区峡谷的桥梁抗风设计基准风速的计算提供简便方法。

**关键词:**桥梁工程;空间分布特性;峡谷地形;风速放大系数;计算流体动力学

**中图分类号:**U442.4

**文献标志码:**A

## Numerical simulation of distribution characteristic of wind fields and terrain's influence in mountain canyon

HONG Xin-min, GUO Wen-hua, XIONG An-ping

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** In order to reveal the spatial distribution characteristics of wind fields in mountain canyon and the effect of canyon topography on the distribution characteristics of wind field in valley, according to the topographic features of mountain valleys, the digital geometry of canyon was discretized into elevation points in AutoCAD, and the elevation points were used to synthesize the canyon terrain and surface by using reverse engineering software Imageware, which were imported into Gambit to generate computational models that meet the requirements. The Realizable model suitable for mountain wind field and the SIMPLE algorithm with good stability were selected to numerically simulate the wind field characteristics of canyon by FLUENT software. Finally, according to the characteristic of canyon topography and influencing parameter

收稿日期:2017-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51078356)

作者简介:洪新民(1984-),男,湖南衡阳人,工程师,工学博士研究生,E-mail:824334912@qq.com。

通讯作者:郭文华(1969-),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,E-mail:whguo@126.com。

velocity amplification coefficient mathematical formulas of canyon wind were put forward, and its validity was proved by multiple calculating examples. The results show that the contour line of canyon wind profiles can be divided into three segmentations, and it cannot be simulated by the power function model that is frequently used in plain area. Moreover, the contour of canyon wind profile has obvious inflection point, and the contours of wind profile in wind increasing section should be simulated by linear function and power function. The maximum wind velocity of wind profile in middle of the canyon is greater than the maximum wind speed at both sides of the canyon, and the corresponding wind speed inflection point's height is also higher. The wind speed at the same height observation point in the canyon is parabola in the cross section of canyon, and the wind speed reaches the maximum value at the distance of about 60 m between the two sides of the mountain. The smaller the canyon width, the higher the peak in both sides, and the more obvious the "valley effect" of wind fields in valley. The wind speed inflection point height of wind profile is inversely proportional to the canyon depth-width ratio, and the greater the depth-width ratio of the canyon, the smaller the inflection height. The formulas in this paper can be used to calculate the wind speed of any height point in mountain canyon, and it provides a simple method for calculating the wind-resistant design wind speed of bridge in mountain canyon. 5 tabs, 13 figs, 28 refs.

**Key words:** bridge engineering; spatial distribution characteristic; canyon terrain; wind speed magnification coefficient; computation fluid dynamics

## 0 引言

随着中国西部交通发展战略布局的不断深入,跨越山川峡谷的桥梁正大规模地修建,使得山区峡谷风场研究成为新的热点<sup>[1-5]</sup>。风荷载及风载内力逐渐成为控制此类桥梁设计的主要因素<sup>[6]</sup>,确定峡谷风特征参数已成为山区桥梁抗风研究需要解决的首要问题。平均风速随高度分布的风速轮廓线通常有2种描述方法:一种是自然对数描述;一种是应用幂函数描述。国内外通常采用后者<sup>[7-8]</sup>。山区峡谷周围地形特征随机多变,其地表粗糙度系数难以确定,山谷风剖面形状比平原地区复杂的多,不能简单地套用平原地区常用的风剖面幂函数模型<sup>[9-10]</sup>。

截至目前,在山区峡谷风特性和地形影响研究方面,国外研究者对某区域的风环境进行了数值模拟分析,研究了影响风场特性的地形因素<sup>[11-13]</sup>。文献[14]、[15]中通过桥位处峡谷地形模型的风场特性风洞试验,研究了山区风场的空间分布特性;文献[16]、[17]中通过对深切峡谷桥址区风场进行数值模拟,揭示了桥址区峡谷风场的空间分布特性;《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)中对处于峡谷口或隘口的桥梁,给出1.20~1.40的风速地形地理修正系

数<sup>[18]</sup>;《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1—2005)中建议的风速放大系数取值1.15~1.30<sup>[19]</sup>;文献[20]、[21]中分别采用海拔修正和虚拟气象站法确定山区桥梁设计基准风速;陈启新等根据山区峡谷风速的观测结果提出了峡谷风速放大系数与山谷宽度、深度及山谷长度的相关经验公式<sup>[22-23]</sup>。

上述修正系数和经验公式均有其适用范围及局限性,如陈启新提出的经验公式要求峡谷长度大于20 km,在工程应用中峡谷不满足该条件的就较难取值<sup>[22]</sup>。鉴于此,本文利用某山谷地形几何模型,采用数值风洞方法,对山谷风场进行模拟分析,研究峡谷风剖面沿峡谷长度和宽度方向的变化特征及峡谷外形对峡谷风特征参数的影响,并根据峡谷外形特点提出峡谷风速放大系数的相关公式,为计算峡谷内风速和获得跨越山川峡谷桥梁的抗风设计基准风速提供依据。

## 1 峡谷几何模型

针对峡谷地形特点,采用如下页图1所示的几何模形,两侧对称的山峰由3段组成,即长为 $2L_2$ 、高度为 $H$ 的中间等高段,两端长度为 $L_1$ 、高度为 $H'$ 的变化段。坐标原点 $O$ 设在谷底几何中心,两侧山脊线的间距为 $B$ ,山底轮廓线采用长、短轴分

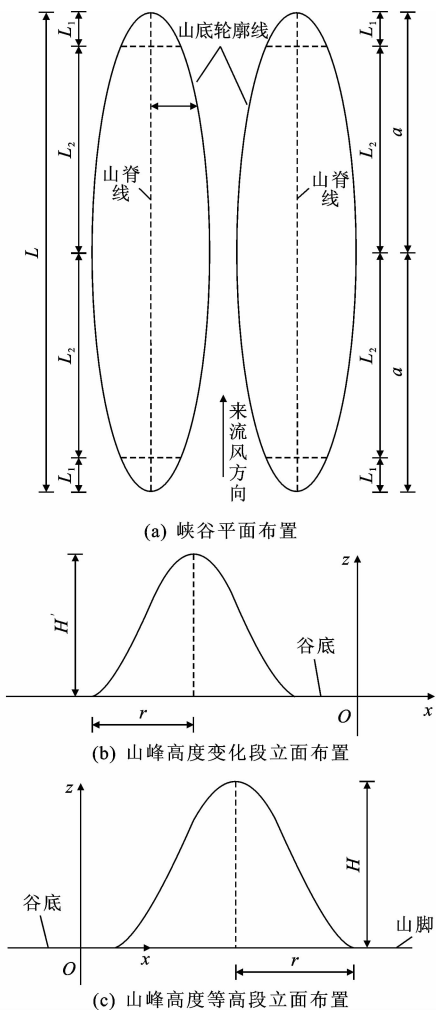


图 1 峡谷模型布置  
Fig. 1 Configuration of canyon model

别为  $a$ 、 $b$  的椭圆。峡谷山峰横截面外轮廓线上任一点距谷底的高度  $z$  采用余弦模型,其表达式为

$$z(x,y)=H'[1+\cos(r\pi/R)]/2 \tag{1}$$

其中

$$R=\frac{b}{a}\sqrt{a^2-y^2},|y|\leq a;r=||x|-B/2|,r\leq R$$

则

$$H'=\begin{cases} H & |y|\leq L_2 \\ H[1+\cos(\pi(|y|-L_2)/L_1)]/2 & L_2<|y|\leq a \end{cases} \tag{2}$$

式中: $R$  为山峰谷底轮廓线上一点至山脊线的距离; $r$  为山峰外轮廓线上一点至山脊线的距离; $x$ 、 $y$  分别为山峰上某点与山谷几何中心的横、纵向距离; $L$  为峡谷长度; $H$ 、 $H'$  分别为峡谷等高段和高度变化段距谷底的高度; $L_1$ 、 $L_2$  分别为峡谷等高段长度的一半和高度变化段的长度。

2 数值分析方法

根据山区峡谷地形特点,为避免计算区域过大以及计算网格数量巨大的问题,确定峡谷几何模型的基本参数为: $L=2a=3\,600\text{ m}$ , $L_2=1\,500\text{ m}$ , $L_1=0.5L-L_2$ , $H=400\text{ m}$ , $B=650\text{ m}$ , $b=300\text{ m}$ 。在 AutoCAD 中将峡谷几何模型离散为高程点云,利用逆向工程软件 Imageware 将高程点云拟合成峡谷地形曲面,曲面拟合点数为  $300\times 300$ ,拟合阶数为 2。数值风洞对阻塞率有严格的要求,一般要求控制在 5% 以下<sup>[24-28]</sup>,为满足这一要求,在 Gambit 中生成  $3\,700\text{ m}\times 2\,400\text{ m}\times 3\,200\text{ m}$  的计算域,阻塞率为 1.6%。计算域底面网格采用三角形单元划分,最小尺寸为 15 m。近地面第 1 层网格厚度为 5 m,由下往上网格增长因子为 1.1,增长层数为 23,总高度为 400 m,在这一高度内采用棱柱体网格;在该层以上采用四面体非结构网格,整个计算域单元总数约为 230 万。

计算域入口采用速度边界条件,入口风速  $V$  通过自定义函数 (UDF) 进行设置,梯度风高度取 400 m。在 400 m 以下,风剖面按照 C 类地表粗糙度的幂函数模型进行设置,即

$$V=\begin{cases} 20\left(\frac{h}{400}\right)^{0.22} & 0<h\leq 400 \\ 20 & h>400 \end{cases} \tag{3}$$

式中: $h$  为风速计算点相对于谷底的高度 (m)。

出口采用完全发展出流边界条件,地面采用粗糙壁面,粗糙厚度取值 0.3 m,摩擦因数取值 0.5,2 个侧面及顶面采用对称边界条件。空气选用理想的不可压缩气体;湍流模型采用较适合山区风场的 Realizable 模型;求解器选用适用于不可压缩及低速流动流体的隐式求解器;压强速度关联算法采用稳定性好的 SIMPLE 算法;对流项的离散采用 QUICK 格式;本文研究的是平均风,忽略脉动成份,选用 Laminar 层流模型模拟平均风场。计算收敛标准为流场中所有迭代物理量的残差小于 0.000 1,且关键点的风速基本不再变化。

3 峡谷风分布特性

按上述峡谷几何模型与 CFD 数值分析方法,在入口风速为 C 类地表指数规律的标准风速剖面条件下,模拟分析峡谷风场的空间分布特性。对于土木工程结构而言,工程界主要关心峡谷高度内及其上部一定高度内的风场,故本文只给出距谷底 0~

2 000 m高度范围内的风速剖面。本文研究的平均风速剖面除特别说明之外,均指峡谷坐标原点( $x=0, y=0$ )处的风剖面,峡谷入口风剖面与模拟计算得到峡谷原点处风剖面如图2所示。

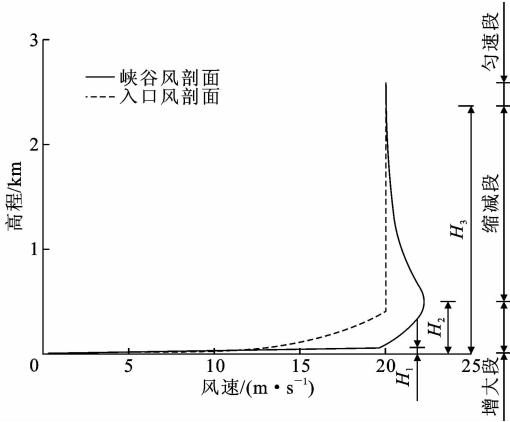


图2 峡谷中的风剖面

Fig. 2 Wind profile in canyon

### 3.1 峡谷风剖面的特点

由图2可知,峡谷中的风剖面随高度方向分布可分为3段,即增大段、缩减段、匀速段。目前风剖面中风速增大段与缩减段常用幂函数来拟合,在峡谷地形影响下,风速增大段若仅用幂函数拟合,则可能产生较大误差。

对风速增大段按如下2种情况拟合:

(1)按幂函数形式拟合,即

$$V_h = V_{H_2} (h/H_2)^\alpha \quad 0 \leq h \leq H_2 \quad (4)$$

(2)分段拟合,即

$$V_h = \begin{cases} kh & 0 \leq h \leq H_1 \\ V_{H_2} (h/H_2)^\alpha & H_1 < h \leq H_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $k$ 为线性函数的斜率; $\alpha$ 为风剖面幂函数的指数; $H_1$ 为风剖面线性函数段与幂函数段的分界点高度; $V_{H_2}$ 为风剖面的最大风速; $H_2$ 为风速拐点高度; $V_h$ 为高度 $h$ 处的风速。

对图2中风剖面的风速增大段分别按照式(4)和式(5)进行拟合,结果如图3所示。按照式(4)拟合,其表达式为  $V_h = 23.509(h/362.7)^{0.202}$ ,与实际结果偏离较大;按照式(5)拟合,其函数表达式为

$$V_h = \begin{cases} 0.357h & 0 \leq h \leq 59 \\ 23.509(h/362.7)^{0.05} & 59 < h \leq 362.7 \end{cases} \quad (6)$$

式(5)拟合的风剖面曲线基本与峡谷中实际风剖面重合,可见峡谷风速增大段的风剖面应该采用式(5)分段拟合,且风剖面幂函数的指数为0.05,远小于文献[18]中C类地表风剖面指数0.22。由此可知,峡谷中的风剖面可用分段函数式(7)来表示

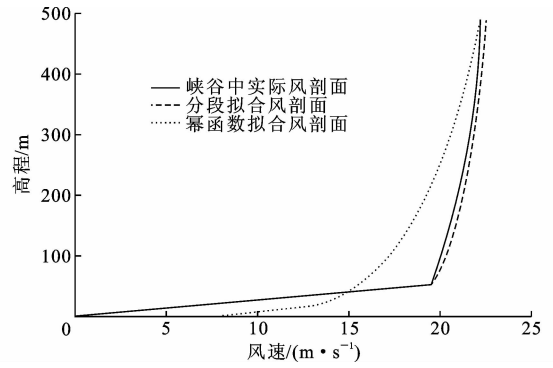


图3 拟合风剖面

Fig. 3 Fitting of wind profiles

$$V_h = \begin{cases} kh & 0 \leq h < H_1 \\ V_h(kH_1)(h/H_2)^\alpha & H_1 \leq h < H_2 \\ V_h(kH_1)(H_2/H_1)^\alpha(h/H_2)^\beta & H_2 \leq h < H_3 \\ V_h(kH_1)(H_2/H_1)^\alpha(H_3/H_2)^\beta & h \geq H_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\beta$ 为风剖面风速缩减段幂函数的指数; $H_3$ 为风速缩减段与匀速段的分界点高度。

### 3.2 风剖面沿峡谷长度与宽度方向的分布

为研究风剖面沿峡谷长度方向( $y$ 轴)与宽度方向( $x$ 轴)的变化特点,在峡谷坐标原点沿 $y$ 轴布置5个风剖面,间隔为750 m,在峡谷坐标原点沿 $x$ 轴布置3个风剖面,间距为100 m。风剖面沿峡谷长度方向分布如图4所示。由图4可知,沿峡谷长度方向风剖面的轮廓线形状基本相同。沿峡谷宽度方向分布的风剖面如下页图5所示,3个风剖面相应的特征值如下页表1所示。

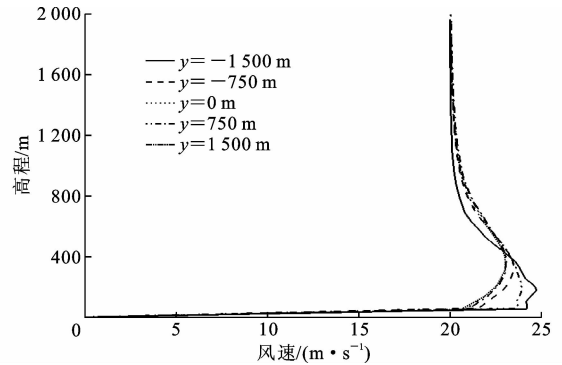


图4 沿峡谷长度方向的风剖面

Fig. 4 Wind profiles along the length direction of canyon

由表1可知:距离峡谷两侧山峰越近,风剖面线性函数段与幂函数段的分界点高度 $H_1$ 越高,对应的风速 $V_{H_1}$ 也越大;而距离峡谷中心点越近,风剖面的最大风速 $V_{H_2}$ 就越大,相应的风速拐点高度 $H_2$ 也越高。

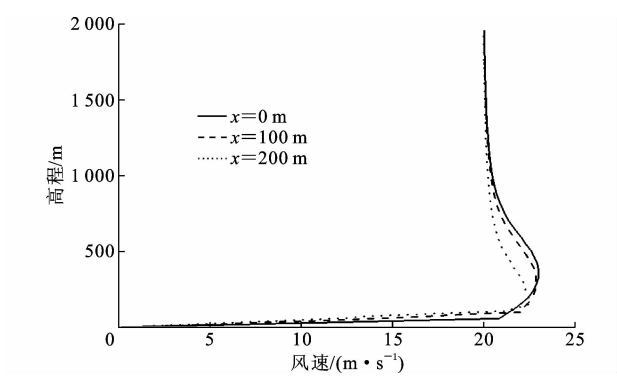


图 5 沿峡谷宽度方向的风剖面

Fig. 5 Wind profiles along the width direction of canyon

表 1 不同风剖面关键点的高程与风速

Tab. 1 Height and wind speed of key points of different wind profiles

风剖面 $x$ 坐标/m	$H_1$ /m	$V_{H_1}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$H_2$ /m	$V_{H_2}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0	54.8	20.9	362.7	23.06
100	93.9	21.9	266.7	22.92
200	131.7	22.4	183.6	22.54

3.3 峡谷风速在两侧山体附近的分布

在峡谷坐标  $y=0$  截面沿峡谷高度方向每隔 100 m 均匀布置 4 个风速观测层,每个观测层自谷中向两侧山体每隔 30 m 布置 1 个风速观测点,风速观测点的空间位置如图 6 所示。

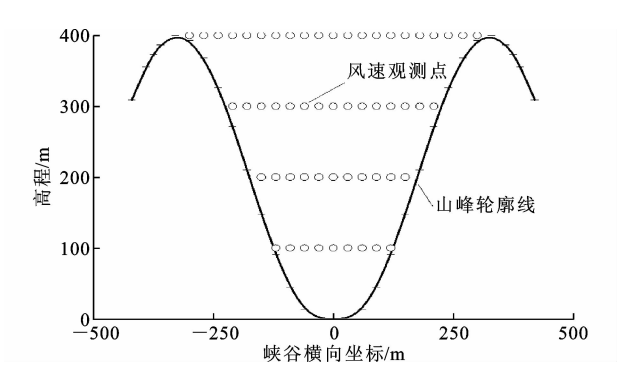


图 6 风速观测点位置

Fig. 6 Location of wind speed observation points

图 7 为峡谷内各观测点的风速分布。峡谷内各观测点的气流受到的压缩程度不同,摩擦作用由近山体向谷中迅速减小,峡谷内的风速由近山体向谷中心迅速增大,到达某一距离时,摩擦作用变得很小,但峡谷的压缩作用依然比较强,故风速出现最大值;超过这个距离再往谷中心走,由于压缩作用迅速减小,所以风速开始减小。从图 7 可知,峡谷内同一高度的风速呈现出由两侧山体向谷中先迅速增大再缓慢减小的抛物线变化,在距离两侧山体约 60 m 处风速达到最大值。

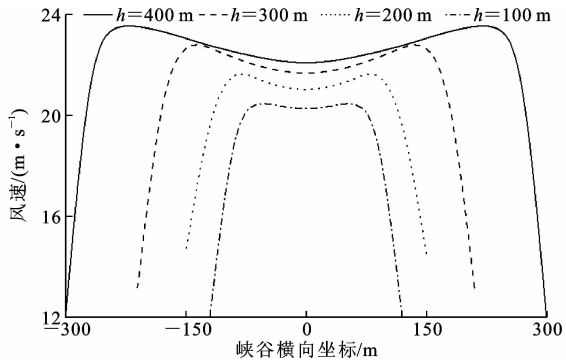


图 7 水平面上观测点风速

Fig. 7 Wind speed distribution of observation points on horizontal planes

4 峡谷外形参数的影响

4.1 山峰高度

为研究山峰高度对峡谷平均风特性的影响,在原峡谷几何外形参数基础上,增加考虑山峰高度为 200、300、500 m 这 3 种工况。图 8 为不同山峰高度的峡谷风剖面曲线。由图 8 可知:山峰越高,峡谷风受到的“峡谷效应”越大;山峰高 200 m 时,峡谷内的最大风速为 20.6 m/s;山峰高 500 m 时,峡谷内的最大风速达到 24.9 m/s。

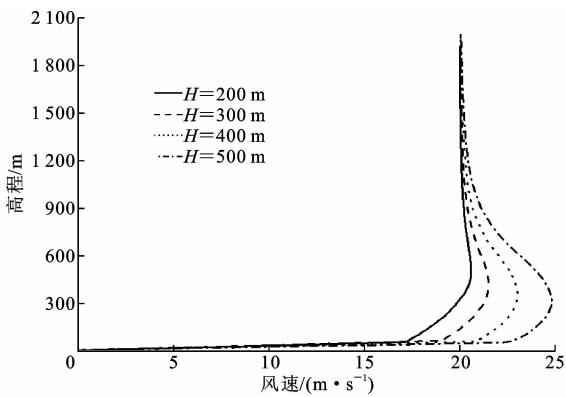


图 8 不同山峰高的峡谷风剖面

Fig. 8 Wind profiles of canyon with different peak heights

下页表 2 为不同山峰高度的峡谷风剖面函数的系数值。从表 2 可知:山峰高度越大,峡谷风剖面模型[式(7)]中的  $H_1$  和  $H_2$  就越小,而  $H_3$  越大;山峰高度越大,峡谷风剖面模型线性函数的斜率  $k$  越大,而幂函数的指数  $\alpha$  和  $\beta$  却越小。

4.2 峡谷宽度

为分析峡谷宽度对峡谷平均风特性的影响,在原峡谷宽度  $B=650$  m 的基础上,增加峡谷宽度  $B$  为 750、1 150、1 550 m 这 3 种工况。

下页图 9 为不同谷宽的峡谷风剖面曲线。由图

表 2 不同山峰高度的峡谷风剖面函数系数  
Tab. 2 Functional coefficients of wind profiles with different peak heights

$H/\text{m}$	$H_1/\text{m}$	$H_2/\text{m}$	$H_3/\text{m}$	$k$	$\alpha$	$\beta$
200	64	501	1 223	0.264	0.092	-0.034
300	62	432	1 526	0.302	0.069	-0.062
400	59	362	1 732	0.357	0.058	-0.099
500	56	296	1 899	0.403	0.057	-0.127

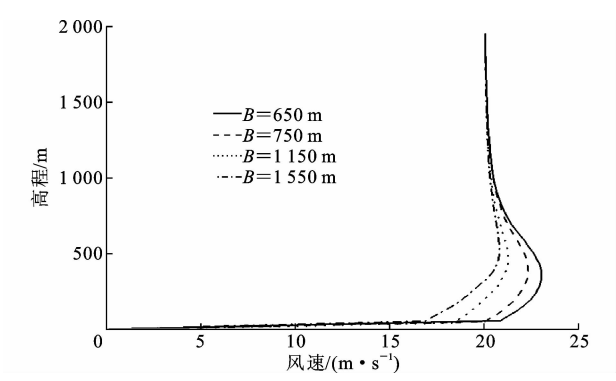


图 9 不同谷宽的峡谷风剖面

Fig. 9 Wind profiles of canyon with different widths

9 可知,峡谷越窄,峡谷内风场的“峡谷效应”越明显。

表 3 为不同谷宽的风剖面函数系数。从表 3 可知:峡谷宽度越大,峡谷风剖面模型[式(7)]中的  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  就越小;峡谷宽度越大,峡谷风剖面模型线性函数的斜率  $k$  越小,而幂函数的指数  $\alpha$  和  $\beta$  就越大。

表 3 不同谷宽的风剖面函数系数

Tab. 3 Functional coefficients of wind profiles with different canyon-widths

$B/\text{m}$	$H_1/\text{m}$	$H_2/\text{m}$	$H_3/\text{m}$	$k$	$\alpha$	$\beta$
650	59.0	362	1 732	0.357	0.058	-0.099
750	60.3	403	2 026	0.330	0.060	-0.081
1 150	61.4	482	2 034	0.300	0.068	-0.050
1 550	62.4	525	1 975	0.264	0.109	-0.035

### 4.3 峡谷长度

为考虑峡谷长度的影响,在原谷长  $L$  为 3 600 m 的基础上,增加谷长  $L$  为 5 600、7 600 m 这 2 种工况的峡谷风场。图 10 为不同谷长的峡谷风剖面曲线,表 4 为不同谷长的风剖面函数系数。由图 10 和表 4 可知:不同谷长的风剖面曲线基本重合;峡谷长度变化时,峡谷风剖面模型[式(7)]中的  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、斜率  $k$  以及幂函数的指数  $\alpha$  和  $\beta$  基本不发生改变。

综上所述,峡谷中心风剖面风速拐点高度  $H_2$  只与峡谷山峰高度、谷宽有关。根据表 2 和表 3 中

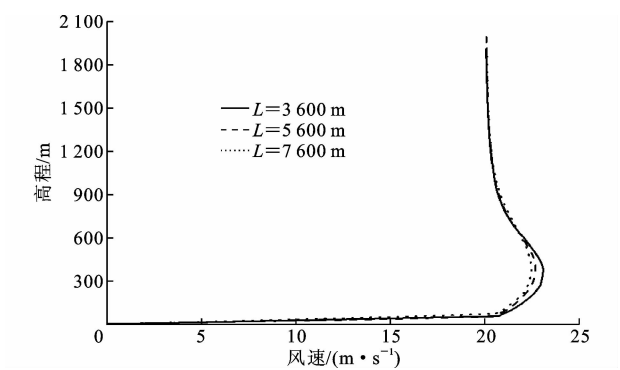


图 10 不同谷长的峡谷风剖面

Fig. 10 Wind profiles of canyon with different lengths

表 4 不同谷长的风剖面函数系数

Tab. 4 Functional coefficients of wind profiles with different canyon lengths

$L/\text{m}$	$H_1/\text{m}$	$H_2/\text{m}$	$H_3/\text{m}$	$k$	$\alpha$	$\beta$
3 600	59.0	362	1 732	0.357	0.058	-0.099
5 600	63.2	359	2 407	0.323	0.055	-0.092
7 600	70.6	354	2 778	0.292	0.058	-0.072

的数据可以得到风剖面最大风速对应的高程  $H_2$  和峡谷山峰高度  $H$  与谷宽的比值( $H/B$ )关系,如表 5 所示。峡谷高宽比为 0.258 1 时,风剖面最大风速对应的高程  $H_2$  为 525 m;高宽比为 0.615 4 时,最大风速对应的高程  $H_2$  为 362 m。由此可知,风剖面最大风速对应的高程  $H_2$  与峡谷高宽比( $H/B$ )呈线性函数关系,峡谷高宽比越大,剖面风速拐点高度  $H_2$  越小。

表 5 峡谷高宽比与风剖面最大风速对应的高程关系

Tab. 5 Relationships between high-width ratio of canyon and height of the maximum wind speeds of wind profiles

$H/\text{m}$	$B/\text{m}$	$H_2/\text{m}$	$H/B$
400	1 550	525	0.258 1
200	650	501	0.307 7
400	1 150	482	0.347 8
300	650	432	0.461 2
400	750	403	0.533 3
400	650	362	0.615 4

### 4.4 风速放大系数

峡谷某一高度风速的平均值与入口处相同高度风速的比值称为峡谷风速放大系数。经过前面的计算,绘制风速放大系数与峡谷地形参数的关系曲线,分别如下页图 11~图 13 所示。

由图可知,各工况下风速放大系数均大于 1,表明来流风穿过峡谷时风速得到了提高,形成了峡谷风效应。根据这些曲线拟合风速放大系数与峡谷外

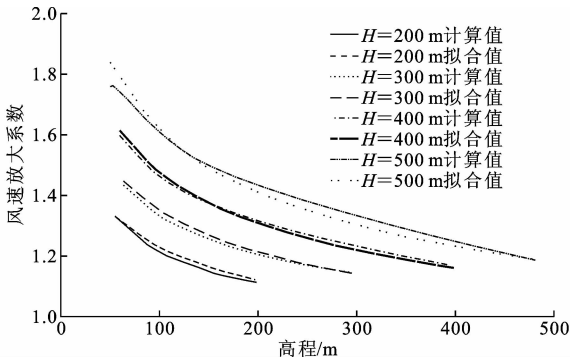


图 11 不同峡谷高度的风速放大系数

Fig. 11 Wind speed magnification coefficients of canyon with different heights

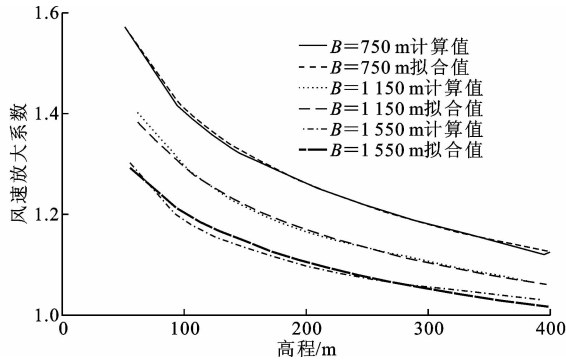


图 12 不同峡谷宽度的风速放大系数

Fig. 12 Wind speed magnification coefficients of canyon with different widths

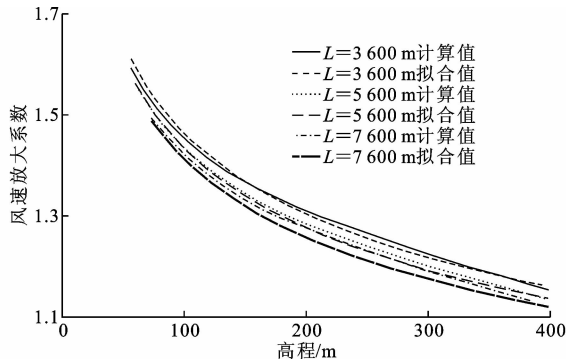


图 13 不同峡谷长度的风速放大系数

Fig. 13 Wind speed magnification coefficients of canyon with different lengths

形参数的相关计算公式如下

$$V_h/V_s = \begin{cases} (1.08 + 0.000\ 2H) \left(\frac{h}{H}\right)^{-(0.093 + 0.000\ 2H)} \\ 2.88B^{-0.141\ 8} \left(\frac{h}{H}\right)^{0.000\ 05B - 0.2} \\ 1.715L^{-0.047\ 6} \left(\frac{h}{H}\right)^{-0.167} \end{cases} \quad (8)$$

综合式(8)中的 3 个公式即可得到风速放大系

数与峡谷 3 个外形参数的相关数学公式

$$\begin{cases} V_h/V_s = \frac{A}{B^{-0.141\ 8}} L^{-0.047\ 6} \left(\frac{h}{H}\right)^D \\ A = 3.671(1.08 + 0.000\ 2H) \\ D = 0.000\ 05B - 0.000\ 2H - 0.46 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $V_s$  为高度  $h$  的峡谷入口风速;  $A$ 、 $D$  为系数。

4.5 山区峡谷大桥抗风设计基准风速推算

(1)矮寨大桥位于湖南湘西自治州吉首地区山区峡谷中,跨中桥面距谷底高度约 340 m,峡谷入口相同高度处的基本风速为 24.2 m/s,桥址处山谷宽约 1 000 m。

(2)坝陵河大桥建于坝陵河峡谷上口处,桥面处河谷宽 1 564 m,桥面距离河谷深达 375 m,峡谷入口相同高度处的基本风速为 24.6 m/s。

(3)四渡河大桥跨越河谷,桥面距四渡河水位约 500 m,峡谷入口相同高度处的基本风速为 24.9 m/s,桥址处山谷宽约 1 000 m。

当桥梁建于峡谷上口处时,峡谷长度的差异对峡谷内风速的影响基本可以忽略不计,因此式(9)可以简化为

$$V_h/V_s = \frac{2.88 \times (1.08 + 0.000\ 2H)}{B^{-0.141\ 8}} \quad (10)$$

按式(10)计算得到矮寨大桥、坝陵河大桥、四渡河大桥桥位抗风设计基准风速  $V_{az}$ 、 $V_{blh}$ 、 $V_{sdh}$  分别为

$$\begin{aligned} V_{az} &= 24.2 \times \frac{2.88 \times (1.08 + 0.000\ 2 \times 340)}{1\ 000^{-0.141\ 8}} = 30.0\ \text{m/s} \\ V_{blh} &= 24.6 \times \frac{2.88 \times (1.08 + 0.000\ 2 \times 375)}{1\ 564^{-0.141\ 8}} = 28.8\ \text{m/s} \\ V_{sdh} &= 24.9 \times \frac{2.88 \times (1.08 + 0.000\ 2 \times 500)}{1\ 000^{-0.141\ 8}} = 31.8\ \text{m/s} \end{aligned}$$

本文模拟的峡谷模型外形与矮寨大桥等 3 座大桥桥位处的峡谷外形类似,均为深切 V 形峡谷。由式(9)计算得到的矮寨大桥等 3 座大桥桥位抗风设计基准风速与文献[15]中的计算结果一致。故根据式(9)结合峡谷入口处的风速计算得出峡谷中任意高度处的风速,进一步可获得跨越山川峡谷桥梁的抗风设计基准风速。

5 结 语

(1)峡谷风剖面轮廓线沿高度方向可分为 3 段:增大段、缩减段和匀速段。风剖面模型的风速增大段应采用线性函数与幂函数分段拟合。

(2)同一高度的峡谷风速自两侧山体向峡谷中心先迅速增大再缓慢减小,且呈抛物线变化,在距离两侧山体约 60 m 处达到最大值。

(3)峡谷中心风剖面最大风速高程  $H_2$  与峡谷高宽比( $H/B$ )呈线性函数关系,峡谷高宽比越大,风剖面的风速拐点高程越小。

(4)根据峡谷外形特点与峡谷风剖面模型的关系,提出峡谷风速放大系数计算公式,可由峡谷入口处的梯度风速推算得到峡谷内任意高程的风速。

(5)推算了矮寨大桥、坝陵河大桥、四渡河大桥桥位抗风设计基准风速,本文方法与相关文献中的计算结果吻合较好,数据可信,验证了所提出峡谷风速放大系数表达式的正确性。

(6)下一步可采用风洞试验验证本文公式的正确性;并进一步研究峡谷内紊流风场的分布特性。

## 参考文献:

## References:

[1] 刘健新,李加武. 中国西部地区桥梁风工程研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):32-39.  
LIU Jian-xin, LI Jia-wu. Study of wind project of bridge in western area of China[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 32-39.

[2] 张 玥,胡兆同,刘健新. 西部山区斜拉桥风特性观测及数值仿真[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011,31(5):44-49.  
ZHANG Yue, HU Zhao-tong, LIU Jian-xin. Wind characteristics observation and numerical simulation of cable-stayed bridge site in Chinese western valley areas[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(5): 44-49.

[3] 胡峰强,陈艾荣,王达磊. 山区桥梁桥址风环境试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(6):721-725.  
HU Feng-qiang, CHEN Ai-rong, WANG Da-lei. Experimental study of wind field in bridge site located in mountainous area[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(6): 721-725.

[4] 张明金,李永乐,唐浩俊,等. 高海拔高温差深切峡谷桥址区风特性现场实测[J]. 中国公路学报,2015,28(3):60-65.  
ZHANG Ming-jin, LI Yong-le, TANG Hao-jun, et al. Field Measurement of wind characteristics at bridge site in deep gorge with high altitude and high temperature difference [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 60-65.

[5] 黄国庆,彭留留,廖海黎,等. 普立特大桥桥位处山区风特性实测研究[J]. 西南交通大学学报,2016,51(2):349-356.  
HUANG Guo-qing, PENG Liu-liu, LIAO Hai-li, et al. Field measurement study on wind characteristics at Puli Great Bridge site in mountainous area [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 349-356.

[6] 程 进,肖汝诚,项海帆. 大跨径斜拉桥静风稳定的参数研究[J]. 土木工程学报,2001,34(2):55-61.  
CHENG Jin, XIAO Ru-cheng, XIANG Hai-fan. Study on aerostatics stability of long-span cable-stayed bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 55-61.

[7] CHEN Fa-zu. Turbulent characteristics over a rough natural surface part I: Turbulent structures [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1990, 52 ( 1/2 ): 151-175.

[8] BATCHVAROVA E, GRYNING S E. Wind climatology, atmospheric turbulence and internal boundary layer development in Athens during the MEDCAPHOT-TRACE experiment [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(12): 2055-2069.

[9] 张 玥. 西部山区谷口处桥位风特性观测与风环境数值模拟研究[D]. 西安:长安大学,2009.  
ZHANG Yue. Field Investigation and wind-environment numerical simulation of bridge site in the western gap of valley areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.

[10] 朱乐东,任鹏杰,陈 伟,等. 坝陵河大桥桥位深切峡谷风剖面实测研究[J]. 实验流体力学,2011,25(4):15-21.  
ZHU Le-dong, REN Peng-jie, CHEN Wei, et al. Investigation on wind profiles in the deep gorge at the Balinghe Bridge site via field measurement[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(4): 15-21.

[11] MAURIZI A, PALMA J M L M, CASTRO F A. Numerical simulation of the atmospheric flow in a mountainous region of the North of Portugal[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74/75/76: 219-228.

[12] KIM H G, PATEL V C. Test of turbulence models for wind flow over terrain with separation and recirculation [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2000, 94 (1): 5-21.

[13] UCHIDA T, OHYA Y. Large-eddy simulation of turbulent airflow over complex terrain [J]. Journal of



- Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 219-229.
- [14] 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, 67.  
CHEN Zheng-qing, LI Chun-guang, ZHANG Zhi-tian, 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, 67.
- [15] 徐洪涛. 山区峡谷风特性参数及大跨度桁梁桥风致振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.  
XU Hong-tao. Research of wind characteristic parameters and wind-induced vibration of long span bridge with truss girder in mountainous area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [16] 李永乐, 蔡宪棠, 唐康, 等. 深切峡谷桥址区风场空间分布特性的数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 116-122.  
LI Yong-le, CAI Xian-tang, TANG Kang, et al. Study of spatial distribution feature of wind fields over bridge site with a deep-cutting gorge using numerical simulation[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 116-122.
- [17] 祝志文, 张士宁, 刘震卿, 等. 桥址峡谷地貌风场特性的 CFD 模拟[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(10): 13-17.  
ZHU Zhi-wen, ZHANG Shi-ning, LIU Zhen-qing, et al. CFD simulation of wind field at bridge site on gorge terrain[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(10): 13-17.
- [18] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S].  
JTG D60—2004, General code for design of highway bridges and culverts[S].
- [19] TB 10002.1—2005, 铁路桥涵设计基本规范[S].  
TB 10002.1—2005, Fundamental code for design on railway bridge and culvert[S].
- [20] 庞加斌. 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 Jia-bin. Field investigation and wind tunnel simulation of strong wind characteristics in coastal and mountainous regions[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [21] 王凯, 廖海黎, 李明水, 等. 山区峡谷桥梁设计基准风速的确定方法[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 29-35.  
WANG Kai, LIAO Hai-li, LI Ming-shui, et al. Determination method for basic design wind speed of mountainous-valley bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 29-35.
- [22] 陈启新. 风速的“狭管效应”增速初探[J]. 山西水利科技, 2002(2): 62-64.  
CHEN Qi-xin. Venturi effect on increasing of wind velocity[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2002(2): 62-64.
- [23] 陈万隆. 峡谷中风状况的分析[J]. 南京气象学院学报, 1979, 2(增1): 28-33.  
CHEN Wan-long. Analysis of wind conditions in valley[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1979, 2(S1): 28-33.
- [24] 高志飞, 彭兴黔, 崔利民, 等. 山体环境对建筑屋面风压影响的数值模拟[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2011, 32(2): 207-211.  
GAO Zhi-fei, PENG Xing-qian, CUI Li-min, et al. Numerical simulation of wind pressure on the building roof in the mountain environment[J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2011, 32(2): 207-211.
- [25] 梁进达, 赵强, 先正权. 山区大跨径悬索桥缆索吊机设计研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(11): 88-92.  
LIANG Jin-da, ZHAO Qiang, XIAN Zheng-quan. Research on design of cable crane for long-span suspension bridges in mountains[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(11): 88-92.
- [26] 夏国邦. 山区悬索桥钢箱梁架设施工方案研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(4): 69-73.  
XIA Guo-bang. Research on mounting scheme for steel box girder of suspension bridge in mountainous area[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(4): 69-73.
- [27] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 2 版. 上海: 同济大学出版社, 2008.  
HUANG Ben-cai. Principle and application of structural wind-resistance analysis[M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2008.
- [28] 魏平, 孙金, 葛梦澜. 山区高速公路标准化跨径桥梁设计要点[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(10): 64-68.  
WEI Ping, SUN Jin, GE Meng-lan. Mountain highway bridge with standardized span[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(10): 64-68.