

线性斜坡坡度比对地形模型风场过渡效果的数值模拟研究

靖洪森^{1,2,3†}, 张胤璇³, 李维康³, 苏芳⁴, 赵志恒³, 赵万茹³, 张政³

- (1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;
2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043;
3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;
4. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要:为准确获得斜坡过渡段对地形模型风场特性的影响规律,采用大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法,开展了不同坡度比斜坡过渡段风场特性数值模拟研究,其中计算域入口采用NSRFG(narrow band synthesis random flow generation)方法生成的数值湍流来流,斜坡过渡段的坡度比 $\xi=L/h$ (ξ 取值为0、1、2和3,其中 h 为坡高, L 为坡长).研究表明:当来流到达斜坡过渡段时,会在过渡段底部形成回流,风速明显降低,湍流强度减小;当来流到达斜坡过渡段顶部时,风速则会显著提高,湍流强度增大;当来流经过斜坡过渡段后,平均风速剖面逐渐恢复至与入口相同.另外, ξ 越大,斜坡的过渡效果越好,涡脱频率越低,且不同高度处的涡脱频率更均匀,风速放大系数变化越小,湍流积分尺度越大.当 $\xi=3$ 时过渡效果最佳,并在 $x/h=2$ 位置处恢复至与入口风速剖面相当,风速放大系数在更靠前的位置处恢复到初始状态.本研究可为风场特性量测用的地形模型边界过渡段设计提供参考.

关键词:风场特性;斜坡过渡段;坡度比;大涡模拟;NSRFG

中图分类号:U442.59

文献标志码:A

Numerical simulation study on transition effect of linear slope ratio on wind field of terrain model

JING Hongmiao^{1,2,3†}, ZHANG Yinxuan³, LI Weikang³, SU Fang⁴, ZHAO Zhiheng³,
ZHAO Wanru³, ZHANG Zheng³

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;
3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
4. Power China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

* 收稿日期:2024-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208494), National Natural Science Foundation of China(52208494);河北省自然科学基金资助项目(E2024210037), Natural Science Foundation of Hebei Province(E2024210037);河北省自然科学基金创新研究群体项目(E2022210078), Innovation Research Group Project of Natural Science Foundation of Hebei Province of China(E2022210078)

作者简介:靖洪森(1990—),男,山东冠县人,石家庄铁道大学副教授,博士

† 通信联系人,E-mail: jhm@stdu.edu.cn

Abstract: To accurately obtain the influence of slope transition sections on the wind field characteristics of the terrain model, this study used the large eddy simulation (LES) method to conduct numerical simulation of wind field characteristics in the transition section of slopes with different slope ratios. At the entrance of the computational domain, numerical turbulent flow was generated by the narrow band synthesis random flow generation (NSRFG) method. The slope ratio $\xi (=L/h)$ of the slope transition section was defined (ξ takes the values of 0, 1, 2 and 3, where h is the slope height and L is the slope length). The results show that when the incoming flow reaches the slope transition section, a backflow is formed at the bottom of the transition section, the wind speed is significantly reduced, and the turbulence intensity is also reduced. When the incoming flow reaches the top of the slope transition section, the wind speed increases significantly, and the turbulence intensity also increases. When the incoming flow passes through the slope transition section, the mean wind speed profile gradually returns to the same as that of the inlet. In addition, the larger ξ can result in better transition effect, lower vortex shedding frequency, more uniform vortex shedding frequency at different heights, smaller variation in wind speed amplification factor, and larger turbulence integral scale. The transition effect is best when $\xi=3$, and it returns to the same as the inlet wind speed profile at $x/h=2$, and the wind speed amplification factor returns to 1 at the more advanced position. This study can provide a reference for the design of boundary transition sections of terrain models for wind field characteristic measurement.

Key words: wind characteristics; slope transition section; slope ratio; large eddy simulation; NSRFG

在地形风场特性研究中,通常需要截取桥位附近一定范围内的地形,然而,选取的地形范围不可能无限制地大,若直接将截面地形与计算域底部相连会造成难以接受的误差,即“人工悬崖”.为避免人工悬崖的出现,需在地形和计算域之间设置过渡段,以确保来流到达地形时风场特性与来流基本一致.设置不同坡度的斜坡过渡段可有效缓解地形突变对来流的影响,因此,开展斜坡过渡段对风场过渡效果的研究,对山区大跨桥梁等工程的建设如桥梁选址^[4]、污染物扩散^[5]、风力机优化^[6]具有重要意义^[1-3].然而,目前针对复杂地形模型边界过渡段及其坡度变化的研究均相对有限^[7-9].

现场测量是研究风场特性的常用手段,通过建立测风塔,安装实时风速观测设备,可获得大量准确、直接、有效的风场数据.然而,现场测量费用高昂,持续时间长,条件严苛,耗费大量的物力、人力、财力.因此风洞试验和数值模拟的方法使用更广泛,无论是风洞试验还是数值模拟,地形模型均为截取实际地形的一部分制作而成,不同的过渡段会对来流产生影响,因此需要解决地形边界过渡问题.胡峰

强^[10]采用30°斜坡作为地形模型边界过渡段,研究渡河大桥桥址区风特性.陈政清等^[11]采用地形补偿过渡段,研究山区峡谷大跨度桥梁风场特性.然而,风洞试验往往需要采集大量数据,时间成本同样高昂.

数值模拟成本低且周期较短,能够准确再现全尺寸流场,可以根据需要改变风速、风向,获得更多的数据进行分析研究,随着计算能力提升,数值模拟得到了普遍应用.张明金等^[12]通过数值模拟方法对不同线性过渡段的风场特性进行了研究;Jing等^[13]在地形模型边界采用斜坡顺延的方式进行了过渡;Jubayer等^[14]采用近似斜坡过渡的方式对边界进行了延展.

然而上述研究主要涉及非线性过渡段,对线性过渡段的研究较少,虽然非线性过渡段效果更优,可使风场在更短距离内恢复原状态,但在截取复杂地形的过程中,所截取的地形边界高度往往不同,导致地形边界不同位置处非线性过渡段的函数曲线不同,需要对各个位置设置不同的曲率,工作量巨大.线性过渡段仅需将地形边界与底部线性连接,即可保证网格质量,工作量小且制作精度易满足,因此本

文开展了不同坡度比线性过渡段风场特性过渡效果的研究.本研究采用NSRFG^[15-17]入口湍流生成方法,以保证湍流入口的连续性,针对不同坡度比的斜坡线性过渡段的风场特性进行研究,比较不同坡度对比来流的影响,为线性边界过渡段的设计提供理论依据和支持,具有重要的工程应用价值.

1 数值计算模型

1.1 控制方程

数值模拟的控制方程为NS(Navier-Stokes)方程,在无外力作用下,该方程的表达式为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

式中: p 表示压力; u_i 表示*i*方向的来流速度, $i=x, y, z$; ν 表示流体的运动黏度系数; ρ 表示流体的密度.

LES通过滤波函数将NS方程进行空间滤波,将方程分为大涡流和小涡流,经过过滤后的控制方程变为:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (2\nu \tilde{S}_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中: $\tilde{u}_i$ 表示滤波后的速度分量; $\tilde{p}$ 是滤波后的压力; $\tilde{S}_{ij}$ 是滤波过滤后的应变率张量,表达式如下:

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

与原来NS方程相比,LES方法中多了一项 $\tau_{ij} = \widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j$, τ_{ij} 为亚格子尺度雷诺应力(SGS Reynolds stress),用于描述小尺度涡流对大尺度涡流的影响.基于Boussinesq假设,可得其表达式如下:

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} - 2\nu_{sgs} \tilde{S}_{ij} \quad (6)$$

式中: ν_{sgs} 表示亚格子尺度湍流黏度系数.选择壁面自适应局部涡流黏度(WALE)模型作为SGS模型,其 ν_{sgs} 表达式如下:

$$\nu_{sgs} = C_k \sqrt{k_{sgs}} \tilde{\Delta} \quad (7)$$

式中: k_{sgs} 表示模型SGS湍动能.其表达式如下:

$$k_{sgs} = \left(\frac{C_w^2 \tilde{\Delta}^2}{C_k} \right)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^3}{\left[(\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4} \right]^2} \quad (8)$$

式中: C_k 和 C_w 为常数,表示模型系数,分别为0.094和0.325; $\tilde{\Delta} = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$ 表示过滤后的网格尺度.最终的 ν_{sgs} 表达式如下:

$$\nu_{sgs} = (C_w \tilde{\Delta})^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (9)$$

1.2 工况设置

斜坡模型高度 h 设为1 m,斜坡宽度设为 $4h$,坡长 L 分别取0、 h 、 $2h$ 和 $3h$,共4种工况^[18],记为工况a~d,坡度比用符号 $\xi=L/h$ (ξ 取值为0、1、2和3,其中 h 为坡高, L 为坡长)表示.4种工况坡度比差值较大,可全面覆盖各种坡度情况,能够研究风场在不同坡度比工况下的演化机理,为后续数值模拟过渡段的设置提供参考.最终几何模型如图1所示.

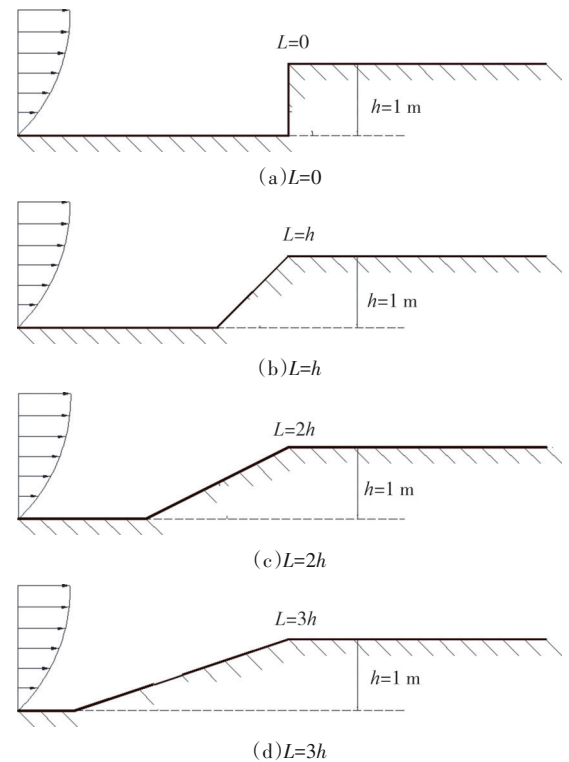


图1 斜坡过渡段几何模型

Fig.1 Slope transition segment geometric model

1.3 计算域和网格划分

计算域左侧为速度入口,右侧为0压力出口,流体可以从该区域自由地流出.计算域底面采用无滑移边界条件,流体的速度相对于底部壁面为零.计算域顶面采用滑移边界条件,流体与顶面可以产生相对运动.计算域的前面和后面均采用循环边界条件,最终计算域和边界条件如图2所示.

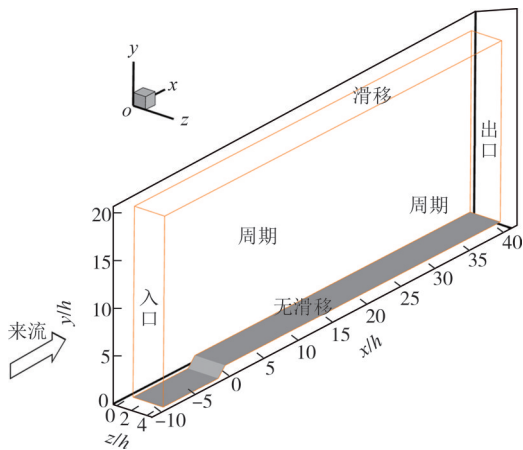


图2 计算域和边界条件

Fig.2 Computational domain and boundary conditions

将计算域入口 5 m 高度处的风速设为参考风速,取 $U_{\text{ref}}=1\text{ m/s}$,采用幂律指数为 0.16 的指数风函数,最终入口风速剖面表达式如式(10)所示.采用 NSRFG^[19-20]方法生成入口湍流风场,入口湍流强度、积分尺度、功率谱分别如式(11)~式(13)所示.

$$U = \begin{cases} U_{\text{ref}} \times (z/z_{\text{ref}})^{0.16}, & z \leq H_0 \\ 1.192, & z > H_0 \end{cases} \quad (10)$$

$$I_u = \begin{cases} I_{\text{ref}} \times (z/z_{\text{ref}})^{0.16}, & z \leq H_0 \\ 0.084, & z > H_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$L_u = \begin{cases} 3 \times (z/3)^{0.46 + 0.074 \ln(0.05)}, & z \leq H_0 \\ 4.402, & z > H_0 \end{cases} \quad (12)$$

$$S_u(f) = \frac{4(I_u U)^2 (L_u/U)}{[1 + 70.8(f L_u/U)^2]^{5/6}} \quad (13)$$

式中: U 为高度 z 处的平均风速; U_{ref} 为参考高度 z_{ref} 的平均风速, z_{ref} 为参考高度,取 5 m; z 为竖直方向计算高度; H_0 为梯度风高度,取 15 m; I_{ref} 代表在参考高度处的湍流强度,取 0.1.

整个计算域采用如图 3 所示的三维空间计算域, x 、 y 、 z 三个方向的长度分别为 $50h$ 、 $20h$ 和 $4h$.斜坡顶部在 x 方向上距离入口 $10h$,距离出口 $40h$,阻塞率为 5%. 整个计算域采用结构化网格进行划分,在水平方向上网格高度以不高于 1.05 的线性倍率增长,在竖直方向上网格高度以 1.05 的线性倍率增长,对近斜坡壁面,采用 O-block 对模型进行加密,斜坡水平方向采用均匀加密方式,网格宽度不大于 $0.02h$,保证 $y^+ < 1$ 以满足计算精度要求.所有工况网格质量均在 0.9 以上,最终整体和局部计算域网格如图 3 所示.不同工况总网格数量具体信息见表 1.

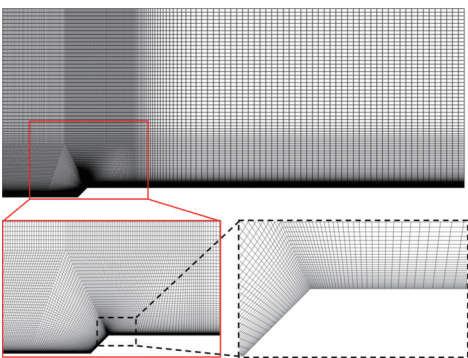


图3 计算域网格分布

Fig.3 Distribution computational mesh

表1 不同工况网格信息				
Tab.1 Grid information for different cases				
工况序号	首层网格高度	竖向网格增长率	水平网格增长率	网格数量
1	0.001L	1.05	≤1.05	1.68×10 ⁶
2	0.001L	1.05	≤1.05	1.29×10 ⁶
3	0.001L	1.05	≤1.05	1.19×10 ⁶
4	0.001L	1.05	≤1.05	1.47×10 ⁶

2 数值验证

2.1 数值模拟方法验证

为验证数值模拟方法的准确性,采用上述方法对图 4 所示简化山丘模型进行数值模拟,得到的结果与 Ishihara 等^[21]的风洞试验结果进行对比.平均风速剖面 and 湍流强度剖面的对比结果分别如图 5、图 6 所示.从图中可以看出,不同位置处的平均风速剖面 and 湍流强度剖面与风洞试验结果趋势相同,结果吻合较好,说明数值模拟方法和设置足够准确.

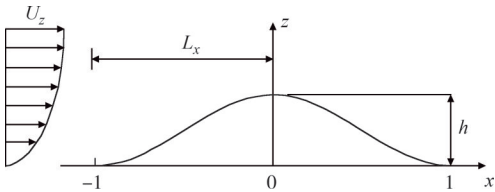


图4 简化山丘模型

Fig.4 Simplify hill geometry model

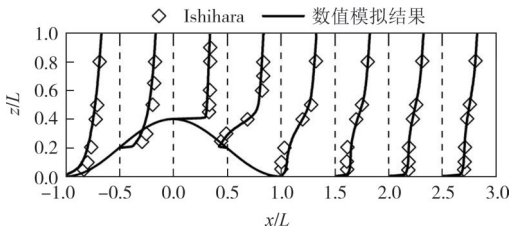


图5 平均风速剖面

Fig.5 Mean wind speed profile

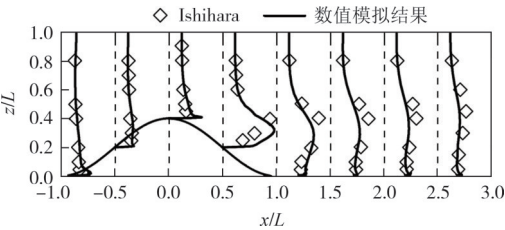


图 6 湍流强度剖面
Fig.6 Turbulence intensity profile

2.2 网格无关性验证

为验证数值模拟的准确性,选取 $L=2h$ 的斜坡过渡段,设置稀疏、中等、密集三种类型的网格进行无关性验证,其中稀疏网格增长率为 1.10,中等网格增长率为 1.05,密集网格增长率为 1.02,具体网格参数见表 2.采用与上述相同的计算设置进行数值计算,并得到三种网格的风场特性结果.顺风向平均风速剖面如图 7 所示,稀疏网格在坡底和坡顶处顺风向平均风速明显降低,而中等网格与密集网格的顺风向平均风速剖面拟合较好.图 8 所示的顺风向湍流强度剖面表明,稀疏网格湍流强度较小,中等网格和密集网格在湍流强度上拟合较好,没有明显差异.在 x 方向上距离坡顶 h 的位置处,得到离地高度分别为 $0.1h$ 、 $0.4h$ 、 $0.6h$ 和 $1.0h$ 的脉动风功率谱,如图 9 所示,稀疏网格脉动风功率谱与中等网格和密集网格差别较大,中等网格与密集网格整体差距较小.从图中可

以看出,中等网格已满足收敛要求,之后所有网格均按照中等网格划分.

表 2 网格设置参数
Tab.2 Grid information

工况	首层网格尺寸	增长率	网格数量
稀疏网格	$0.001L$	1.10	40×10^4
中等网格	$0.001L$	1.05	119×10^4
密集网格	$0.001L$	1.02	140×10^4

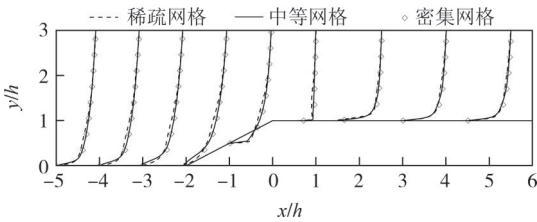


图 7 不同密度网格的顺风向平均风速剖面
Fig.7 Downwind mean wind speed profile for grids with different densities

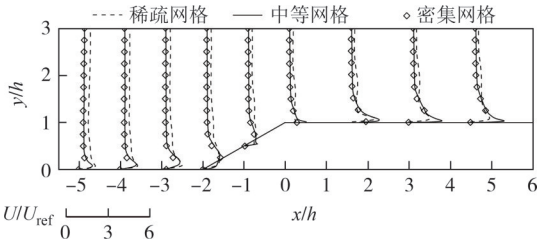


图 8 不同密度网格的顺风向湍流强度剖面
Fig.8 Downwind turbulence intensity profile for grids with different densities

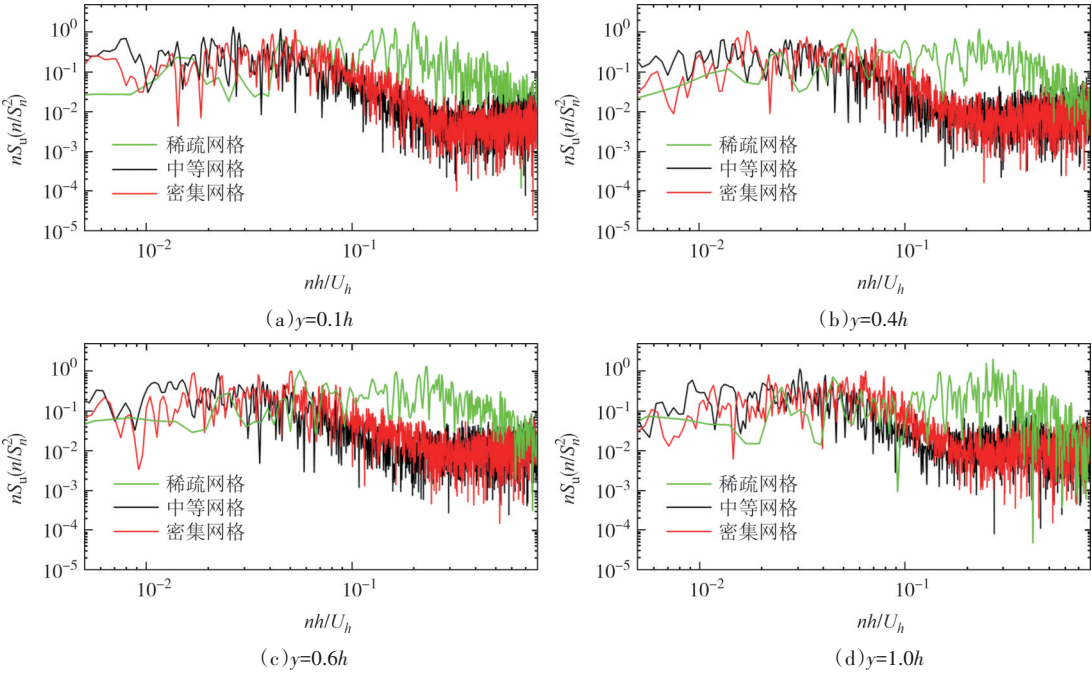


图 9 不同密度网格下不同位置处功率谱
Fig.9 Power spectrum at different positions under grids of different densities

3 结果与讨论

3.1 平均风特性

3.1.1 平均风速剖面

不同斜坡位置的顺风向平均风速剖面如图 10 所示,其中横坐标与纵坐标均以坡高 h 无量纲化. 圆圈表示入口来流的平均风速剖面,实线表示该位置

的平均风速剖面. 坡底来流风速显著降低,可能出现回流区. 随 ξ 增大,风速降幅减小: $\xi=0$ 时坡底风速减小约 50%; $\xi=1$ 时坡底风速减小约 25%; $\xi=3$ 时坡底风速几乎不变. 斜坡顶部 ($x/h=0$) 出现明显加速, ξ 越大,加速现象越不明显,且产生加速效应的位置越靠前. 风过斜坡过渡段后风速逐渐恢复至入口风速剖面, ξ 越大,风速恢复越快: $\xi=3$ 时在 $x/h=2$ 处即可恢复; $\xi=0$ 时需在 $x/h=5$ 处,顺风向平均风速剖面才与入口处基本保持一致.

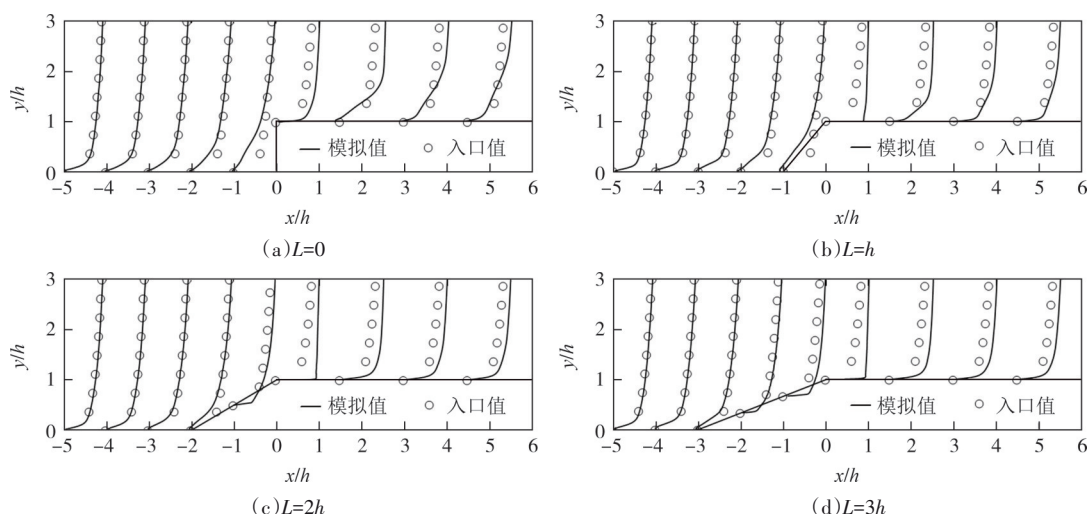


图 10 顺风向平均风速剖面

Fig.10 Downwind mean wind speed profile

3.1.2 风速放大系数

当来流风经过斜坡时,风速产生变化,变化程度用风速放大系数表示,该系数对风环境研究具有重要工程意义. 其定义为同一高度处的风速与入口来流风速之比,表达式如下:

$$C_u = U(y)/U(y') \quad (14)$$

式中: $U(y)$ 为距地面 y 高度处的来流风速; $U(y')$ 为计算域入口距地面 y' 高度处的风速.

本研究选取距离地面 $0.5h$ 和 $1.0h$ 两个高度进行分析. 结果如图 11 所示: 风经过斜坡时风速放大系数逐渐增大,在坡顶达到峰值,随后逐渐减小并趋于 1. 对于不同角度的斜坡, ξ 越大,对风速放大系数影响越小,且风速在更靠前的位置恢复到入口状态. $\xi=0$ 时斜坡与地面垂直,可以认为没有过渡段,导致风速放大系数无法趋于 1. 可见过渡段对风场的影响十分重要. 对于不同高度处,近壁面的风速放大系数变化范围较大,加速效果更明显.

3.2 脉动风特性

3.2.1 湍流强度

湍流强度反映了风速在空间和时间上的波程程

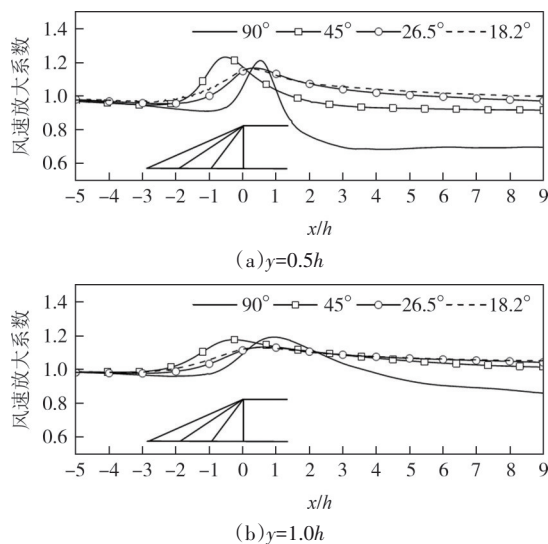


图 11 距地面不同高度处风速放大系数

Fig.11 Wind speed amplification factors at different heights above the ground

度,定义为风速的均方根与平均速度之比,如下所示:

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U} \quad (i = u, v, w) \quad (15)$$

式中: σ_u 、 σ_v 和 σ_w 分别为顺风向、横风向和竖向脉动

风速分量的均方根; U 表示测点位置的平均风速。

顺风向湍流强度剖面如图 12 所示, 地形对湍流强度影响较大, 尤其在坡底和坡顶的转折点处, 湍流强度增大较为明显, 可能是坡底和坡顶产生回流区

所致, 经过地形过渡段后湍流强度逐渐恢复。随着坡角减小, 坡顶下游再附着长度缩短, 湍流强度更快地恢复到入口状态。因此, 坡度差异对湍流强度具有强烈影响。

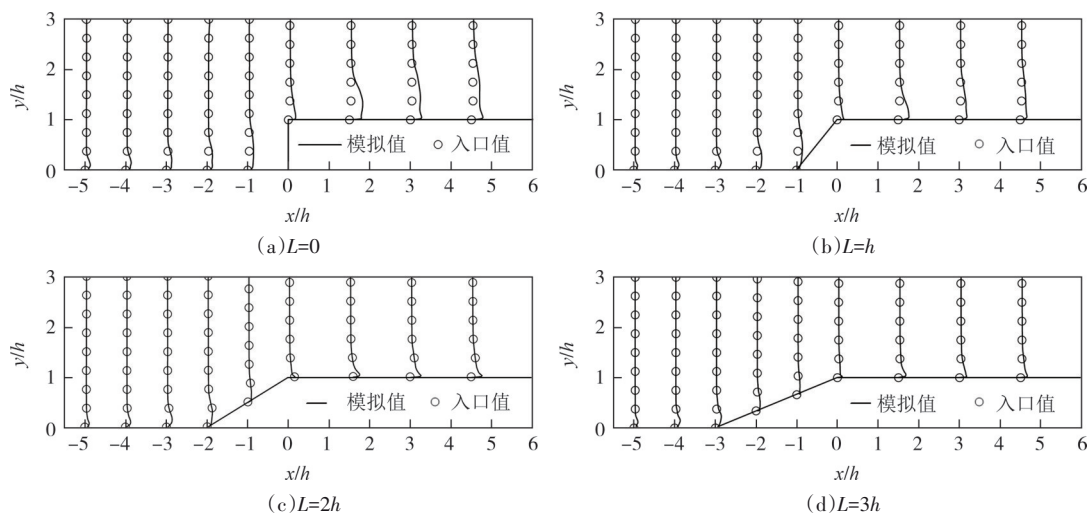


图 12 顺风向湍流强度剖面

Fig.12 Downwind turbulence intensity profile

3.2.2 脉动风功率谱

脉动风功率谱表现了不同频率的脉动风对总能量的贡献。图 13 为风流经过渡段 $x=h$ 后, 距地面 $0.1h$ 、 $0.4h$ 、 $0.6h$ 和 $1.0h$ 处的功率谱。在惯性子区, 风速能谱

按照 Kolmogorov-5/3 的斜率线性衰减, 说明功率谱结果足够准确。另外, 随着 ξ 增大, 涡脱频率降低, 且各高度分布更均匀, 可能是由于较小坡度对速度亏损影响较小, 因此不同高度涡脱频率基本一致。

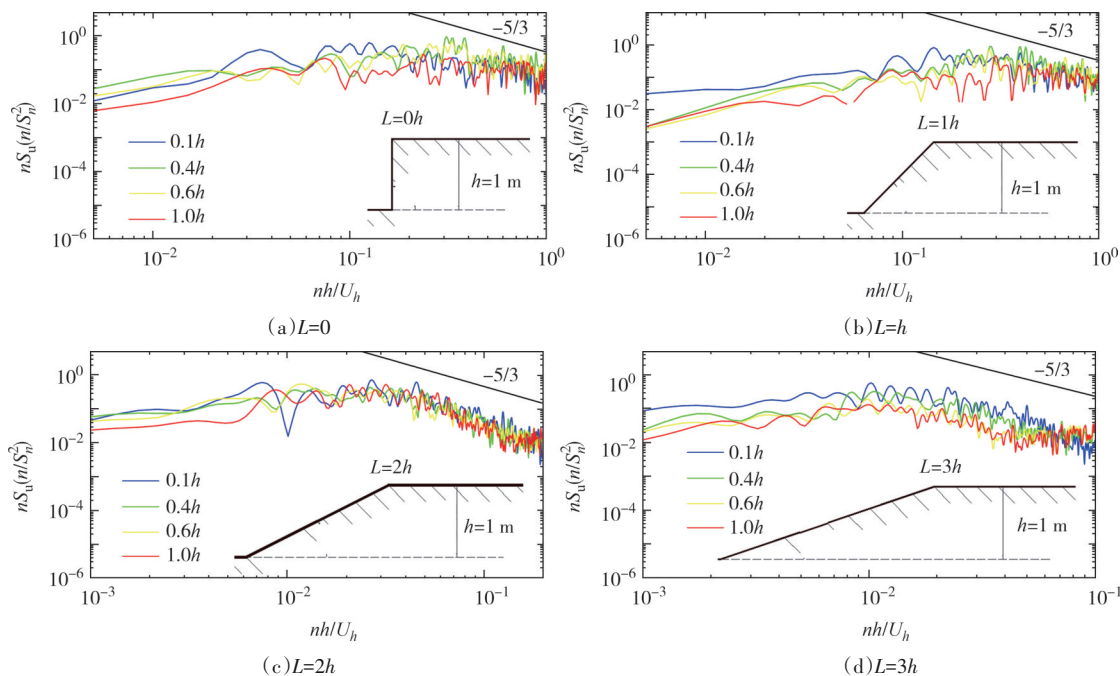


图 13 不同工况下不同位置功率谱

Fig.13 Power spectrum at different positions under different working conditions

3.2.3 湍流积分尺度

湍流积分尺度表征脉动风湍流涡旋平均尺寸的

大小, 也是湍流空间相关性的关键参数, 通常采用基于 Taylor 冻结假设的自相关函数直接积分方法得

到,表达式如下:

$$L_u^x = \frac{U}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_u(\tau) d\tau \quad (16)$$

式中: $R_u(\tau)$ 为顺风向脉动风速的自相关函数.

按式(16)计算得到的顺风向湍流积分尺度随不同斜坡过渡段的变化如图14所示. 总体来看,不同

坡度斜坡过渡段的顺风向湍流积分尺度变化趋势相同,随着高度的增加,湍流积分尺度先增大后减小. ξ 越大,近地面的顺风向湍流积分尺度增幅越显著; $\xi=0$ 时,可以认为没有过渡段,形成“人工悬崖”,导致来流较为复杂,且顺风向湍流积分尺度产生了随着高度的增高呈现先增大、后减小、再增大的趋势.

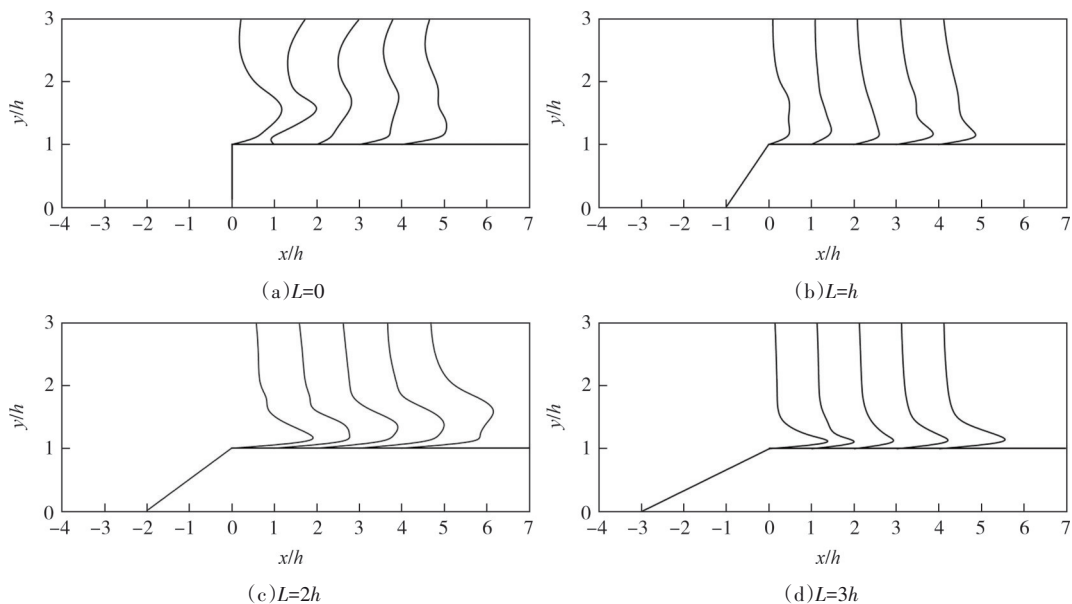


图14 顺风向湍流积分尺度剖面

Fig.14 Downwind turbulent integral scale profiles

3.3 流场信息

3.3.1 湍动能

湍动能表征流场脉动强度,反映流体中湍流的运动,当处于湍动能高能区时,湍流强度也会增大,其计算公式如下:

$$k = \sum (U_i^2) \quad (17)$$

式中: k 为湍动能.

如图15所示,当来流逐渐靠近斜坡底部时,蓝色加深,湍流强度逐渐减小.到达坡顶出现高能区时,湍动能及湍流强度增大,随后逐渐进入蓝色区域,湍动能逐渐减小.当过渡段坡度不同时,湍流强度也不同,随 ξ 增大,红色高能区逐渐减少,湍流强度

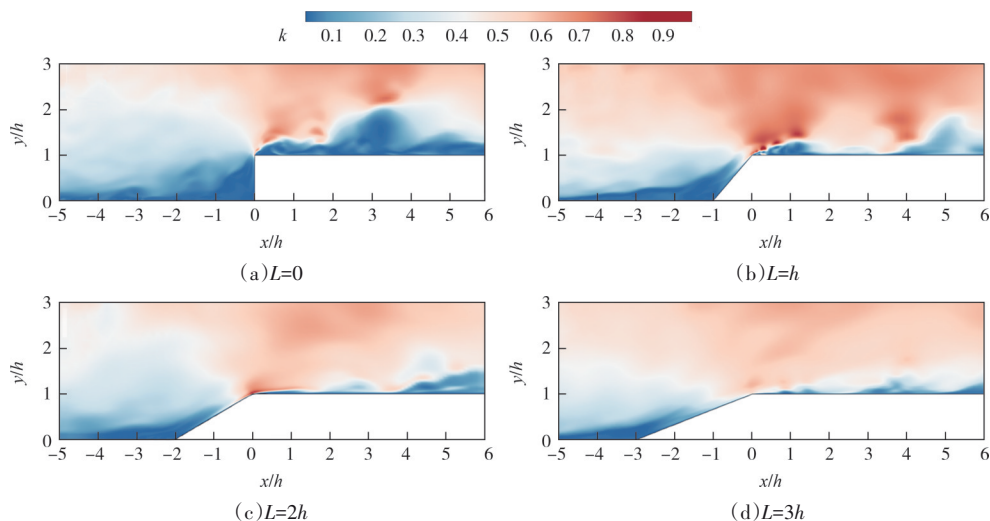


图15 $z/h=2$ 剖面湍动能场

Fig.15 Turbulent kinetic energy field at $z/h=2$ plane

降低,高能区与低能区过渡也更加均匀.综上所述,当 ξ 越大,过渡段对湍流强度的影响越弱,湍流过渡越均匀.

3.3.2 时间平均流线

由4种工况 $z/h=2$ 剖面的时间平均流线(图16)可见,坡顶和坡底均出现明显的分离泡,坡底回流区对来流产生减速效应,使得风速降低,而坡顶的加速区对来流产生加速效应,使得风速升高.当 $\xi=0$ 时,坡

底分离泡大小约0.8,坡顶分离泡大小约1.5.随 ξ 增大,坡顶和坡底的分离泡逐渐减小,坡底对来流的减速效果和坡顶对来流的加速效果均降低.当 $\xi=1$ 时,坡底分离泡的大小变为0.4,减小50%,坡顶分离泡降至1.0,减小33%, ξ 继续增大,坡底和坡底的分离泡逐渐减小为0.这与图7顺风向平均风速剖面规律基本一致.因此,流场结构变化是脉动风特性与平均风特性变化的根本原因.

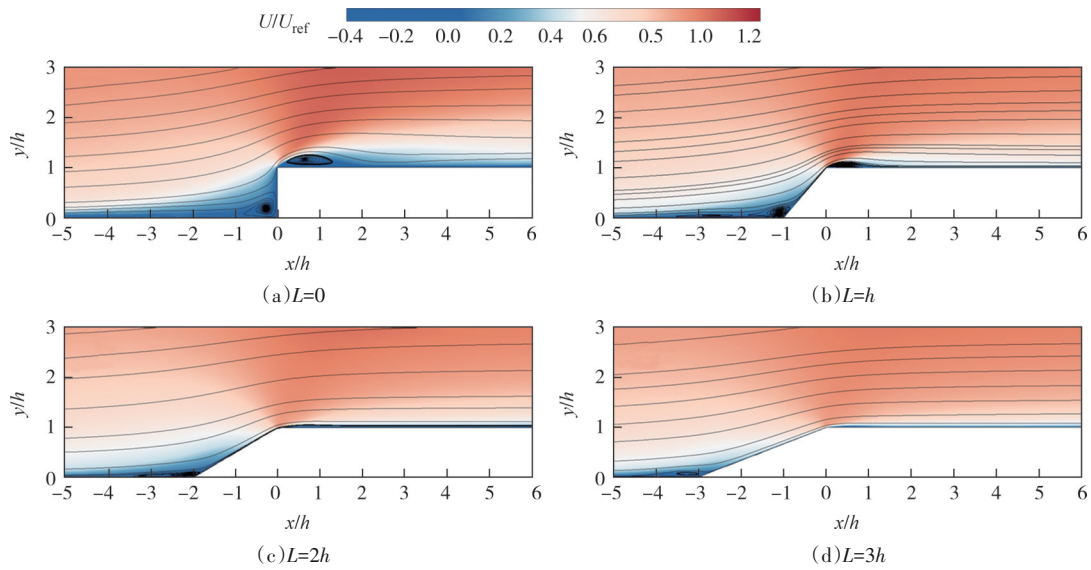


图16 $z/h=2$ 剖面时间平均流线

Fig.16 Time-averaged streamlines on the plane $z/h=2$

3.3.3 涡量场

为了更深入地了解斜坡附近湍流的运动机理,通过瞬时涡形态的可视化对湍流结构进行分析,采用 Q 准则对瞬时湍流结构进行识别,表达式为:

$$Q = \frac{1}{2} (\Omega^2 - S^2) \quad (18)$$

式中: Ω 为反对称张量; S 为对称张量.使 $Q=0.08$ 对来流进行渲染,得到不同斜坡过渡段的瞬时涡量等值面如图17所示.由图可见,斜坡底部由于流体的再循环产生较为破碎的小尺度涡,呈现不规则分布;而斜坡顶部由于剪切层的破坏,产生较为均匀的涡量分布.随 ξ 增大,坡顶和坡底的涡浓度降低,可能是由于坡度变小减弱了局部加速与减速效应,进而影响了涡量的变化.

4 结论

本文采用LES方法,对不同坡度比斜坡过渡段

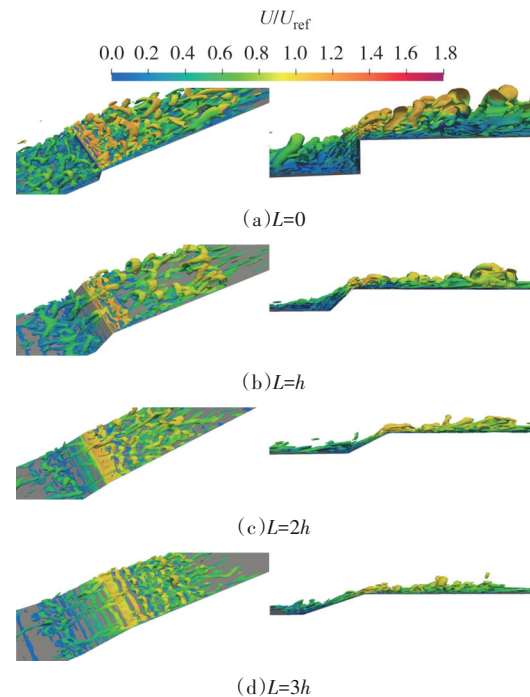


图17 $Q=0.08$ 时瞬时涡量等值面

Fig.17 Instantaneous vorticity equivalent surface at $Q=0.08$

的风场过渡效果进行了系统研究,得到了斜坡过渡段对平均和脉动风场特性的影响规律,丰富了过渡段对风场模拟影响的认识.并阐明了斜坡过渡段的风场流动机理,为以后的人工斜坡、道路和铁路基础设施的风荷载评估及山区风力发电机组的优化布局等提供参考.主要结论如下:

1)对于平均风特性,来流在经过斜坡底部时,风速减小, $\xi=0$ 时降幅最大(约为50%),随 ξ 增大,风速降幅减小.当来流到达斜坡顶部时,产生加速效应,使得来流风速升高,经过过渡段后风速逐渐恢复到入口状态.当 ξ 增大,过渡段对平均风特性的影响减小,平均风特性可以更快地恢复到之前的状态.对于不同过渡段,当经过 $x=5h$ 后均基本恢复到入口状态.

2)对于脉动风特性,由于来流在经过过渡段时平均风特性发生了变化,其脉动风特性也发生变化,在坡顶处湍流强度增大,之后逐渐恢复.当 ξ 增大时,湍流强度变化不再明显,涡脱频率逐渐降低, ξ 越大,在不同高度处的涡脱频率也越均匀.

3)来流经过斜坡底部时,流体的再循环会形成回流区,对流体产生减速效应,导致风速减小;湍动能降低,导致湍流强度减小.经过斜坡顶部时对来流产生加速效果,导致风速增大;湍动能升高,导致湍流强度增大.随着 ξ 的增大,回流区变小,湍动能的变化也逐渐减小,过渡逐渐均匀.

本文仅研究了不同坡度比下光滑过渡段对风场特性的影响,后续将开展过渡段粗糙度对周围脉动风场特性的影响研究.

参考文献

- [1] 李永乐, 胡朋, 蔡宪棠, 等. 紧邻高陡山体桥址区风特性数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(6): 770-776.
LI Y L, HU P, CAI X T, et al. Numerical simulation of wind characteristics above bridge site adjacent a high-steep mountain [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29 (6) : 770-776. (in Chinese)
- [2] 沈炼, 韩艳, 蔡春声, 等. 山区峡谷桥址处风场实测与数值模拟研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 16-24.
SHEN L, HAN Y, CAI C S, et al. Experiment and numerical simulation for wind field of a long-span suspension bridge located in mountainous canyon[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 16-24. (in Chinese)
- [3] 洪新民, 郭文华, 熊安平. 山区峡谷风场分布特性及地形影响的数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(5): 56-64.
HONG X M, GUO W H, XIONG A P. Numerical simulation of distribution characteristic of wind fields and terrain's influence in mountain canyon [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(5): 56-64. (in Chinese)
- [4] BAZDIDI-TEHRANI F, KIAMANSOURI M, JADIDI M. Inflow turbulence generation techniques for large eddy simulation of flow and dispersion around a model building in a turbulent atmospheric boundary layer [J]. Journal of Building Performance Simulation, 2016, 9(6): 680-698.
- [5] JANSSEN W D, BLOCKEN B, VAN HOOFF T. Pedestrian wind comfort around buildings: comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study [J]. Building and Environment, 2013, 59: 547-562.
- [6] DANIELS S J, CASTRO I P, XIE Z T. Peak loading and surface pressure fluctuations of a tall model building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 120: 19-28.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 胡峰强. 山区风特性参数及钢桁架悬索桥颤振稳定性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
HU F Q. The research of wind characteristic parameters and flutter instability of suspension bridges with a steel truss stiffened girder in mountainous regions [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [11] 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 Z Q, LI C G, ZHANG Z T, 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. (in Chinese)
- [12] 张明金, 颜庭轅, 胡博, 等. 复杂山区桥址区地形模型的边界过渡段线型[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(6): 1423-1430.
ZHANG M J, YAN T Y, HU B, et al. Line shape of boundary transition section of terrain model at bridge sites in complex mountainous areas [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,

- 2024, 59(6): 1423–1430. (in Chinese)
- [13] JING H M, LIAO H L, MA C M, et al. Influence of elevated water levels on wind field characteristics at a bridge site[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(7): 1783–1795.
- [14] JUBAYER C M, HANGAN H. A hybrid approach for evaluating wind flow over a complex terrain[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 175: 65–76.
- [15] YU Y L, YANG Y, XIE Z N. A new inflow turbulence generator for large eddy simulation evaluation of wind effects on a standard high-rise building [J]. Building and Environment, 2018, 138: 300–313.
- [16] ZHANG Y X, CAO S Y, CAO J X, et al. Effects of turbulence intensity and integral length scale on the surface pressure on a rectangular 5: 1 cylinder [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 236: 105406.
- [17] YUE H, GUO P, ZHAO Y, et al. Numerical reconstruction of atmospheric boundary layer seasonal turbulent wind field over a complex forest terrain [J]. Physics of Fluids, 2024, 36(10): 105174.
- [18] ZHAO Z H, LI C Y, CHEN Z S, et al. Parallel ribbon vortex: a phenomenological flow feature in an atmospheric boundary layer near sloped terrain [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(11): 115121.
- [19] 杨易, 季长慧, 张之远, 等. 一种改进的大涡模拟入口湍流生成方法研究[J]. 工程力学, 2021, 38(12): 17–24.
- YANG Y, JI C H, ZHANG Z Y, et al. Research on an improved inflow turbulence generation approach for large eddy simulation [J], Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 17–24. (in Chinese)
- [20] LIU Y, HAN Y, HU P, et al. Numerical simulation on aerodynamic admittance of the moving train on a highway-railway one-story bridge under the random synthetic turbulence [J]. Structures, 2024, 69: 107263.
- [21] ISHIHARA T, HIBI K, OIKAWA S. A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/2/3): 95–107.