

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201803143

大跨公铁两用斜拉桥塔区风环境

袁达平, 郑史雄, 洪成晶, 朱进波

(西南交通大学 风工程试验研究中心, 成都 610031)

摘 要: 为研究公铁两用斜拉桥塔区复杂风环境, 采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法对塔区公路桥面流场进行仿真分析, 并结合大尺度桥塔-主梁刚性局部模型风洞试验, 对公路桥面上 3 种典型车辆中心高度处和铁路桥面上列车中心高度处风速进行测量, 引入风速系数 λ 、风速突变率 ξ 和风速波动率 η , 对比分析并讨论各空间位置处平均风速的变化和瞬时风速波动。结果表明: 桥塔附近区域流场存在一定的风速加速效应; 桥面不同高度处风速变化程度不一致, 中型客车中心高度处流场突变更为剧烈; 上风侧平均风速大于下风侧, 但下风侧风速突变率更大; 桥塔遮风效应对附近区域平均风速影响范围约为 3 倍塔柱迎风面尺寸宽度, 在公路桥面上, 对瞬时风速波动率的影响宽度略小于 4 倍塔柱迎风面尺寸, 而铁路桥面上, 对瞬时风速波动率的影响宽度略大于 4 倍塔柱迎风面尺寸。

关键词: 公铁两用斜拉桥; 桥塔; 风环境; 风洞试验; CFD

中图分类号: U448

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)09-0019-06

Wind environment around the tower of long span railway-highway combined cable-stayed bridge

YUAN Daping, ZHENG Shixiong, HONG Chengjing, ZHU Jinbo

(Research Center for Wind Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate the complex wind environment around the tower of long span railway-highway combined cable-stayed bridge, the computational fluid dynamics (CFD) was employed to simulate the wind field above the highway deck around the tower. Based on the wind tunnel test of large scale local rigid tower-girder model the wind speed measurements at the center height of three typical highway vehicles and train were conducted, respectively, and the wind speed coefficient λ , wind speed mutation rate ξ and the wind speed fluctuation rate η were introduced to analyze the average wind speed variation and the instantaneous wind speed fluctuation. Results showed that a certain wind speed acceleration effect was observed in the flow field near the tower. The degree of wind speed variation at different heights above the deck was different, and the change of flow at center height of the medium-sized coach was more intense. Wind speed at upwind side was greater than that at downwind side, but the wind speed gradient at downwind side was larger. Due to the wind shield effect of the tower, the influenced area of the average wind speed was about 3 times the width of the tower windward surface, and that of the instantaneous wind speed fluctuation was slightly less than 4 times the width of the tower windward surface on the highway deck, whereas it was slightly larger than 4 times the width of the tower windward surface on the railway deck.

Keywords: railway-highway combined cable-stayed bridge; bridge tower; wind environment; wind tunnel test; CFD (computational fluid dynamics)

大跨度桥梁,特别是跨江跨海大桥,常处于不利风环境中,桥面高度处风速远远大于地面常遇风速。在塔-梁结合区,由于桥塔遮挡作用对来流产生加速及折减效应,导致该区域流场变得十分复杂,从而使得高速列车及汽车在通过桥塔影响区域过程中所

受风荷载发生突变,列车易发生脱轨及倾覆,汽车驾驶难以驱动或制动,严重者将发生侧滑及侧翻,严重影响车辆行驶安全性及舒适性^[1-3]。国内外由于风突变导致的车辆安全事故时有发生,2004 年 8 月,广州虎门大桥突发大风将桥面上正常行驶的 7 辆大货车吹翻,导致桥梁紧急关闭,严重影响大桥正常运营^[4-8]。兰新线自建成通车以来因大风引起的车辆脱轨、侧翻事故已发生多起。同时由于桥塔绕流作用,塔柱周围结构置于受桥塔影响流场范围内,其风致振动响应往往受塔区尾流控制,舟山西堠门大桥就发生了塔周长吊索因桥塔附近流场干扰产生涡激

收稿日期: 2018-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51378443);

国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U1434205)

作者简介: 袁达平(1988—)男,博士研究生;

郑史雄(1965—)男,教授,博士生导师

通信作者: 郑史雄, zhengsx@swjtu.edu.cn

振动现象^[9]. 桥塔是引起桥面风场产生较大突变的结构物,一般桥梁结构的行车限制风速由桥塔区域的桥面风速控制. 桁架式主梁的各片桁架及腹杆相互遮挡和干扰,使得桁架间流场由于各构件的绕流作用变得更为复杂. 公铁两用桥梁,既要承载高速铁路运输,又要满足汽车通行,对桥面行车环境要求更高. 所以,对于大跨度公铁两用桁架式主梁斜拉桥,因其结构及桥上复合交通的特殊性,塔区桥面风环境的研究对于桥上行车的安全性具有重要意义.

目前国内外关于大跨度桥梁桥塔区风场分布的研究相对较少,艾辉林等^[10]采用数值风洞技术模拟了桥面无附属结构、桥面仅布置栏杆及桥面布置栏杆风障等情况下桥塔区域的风环境. 结合计算流体力学技术(CFD)和风洞试验手段,曾家东^[11]模拟研究了独塔斜拉桥桥塔区域风速变化. 李永乐等^[12]利用数值模拟方法对大跨度悬索桥桥塔区域桥面风场进行了仿真分析. 郭薇薇等^[13-15]采用快速普法模拟了桥面行车风环境,考虑桥塔宽度与车辆长度的关系,建立风-车-桥耦合系统运动平衡方程,分析了桥塔遮风效应对车辆及桥梁动力响应的影响,并研究了通过设置风障降低流场突变效应这一措施来改善桥塔区行车风环境. 以上研究多采用计算流体力学(CFD)等数值模拟分析方法,且主要针对公路桥梁,对于结构复杂的公铁两用桁架式主梁斜拉桥,数值模拟方法具有一定的局限性:由于结构复杂,三维空间结构网格划分困难,难以细致模拟桥梁结构构件,且计算量较大. 相比较而言,大尺度模型风洞试验,因其具有结构模拟精细、实验条件可控和重复性等优势,可以更好地模拟原结构的流场特性,更宜于展开机理性研究. 本文以超千米级公铁两用大桥—沪通长江大桥为工程背景,采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法对塔区公路桥面进行仿真分析,并结合大尺度桥塔—主梁刚性局部模型风洞试验,测得桥塔区域公路桥面上 3 种典型车辆中心高度处及铁路桥面上列车中心高度处的风速分布,引入风速系数 λ 、风速突变率 ξ 和风速波动率 η , 讨论上风侧与下风侧车道,桥塔遮挡效应对附近区域桥面流场的影响.

1 桥梁概述

沪通长江大桥为双塔三索面公铁两用桁架式主梁斜拉桥,主梁宽 35 m,高 16 m,设四线铁路和六车道高速公路. 桥塔为人字形结构,塔高 32.5 m,公、铁两桥面高度处塔肢间距分别为 38、42 m. 桥塔和主梁结构布置如图 1、2 所示.

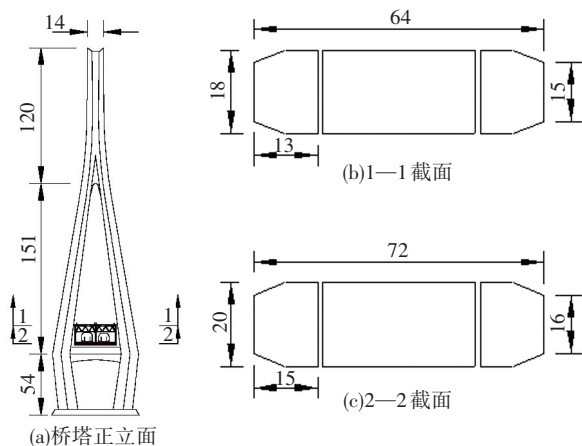


图 1 桥塔布置图(m)

Fig.1 Layout of the bridge tower(m)

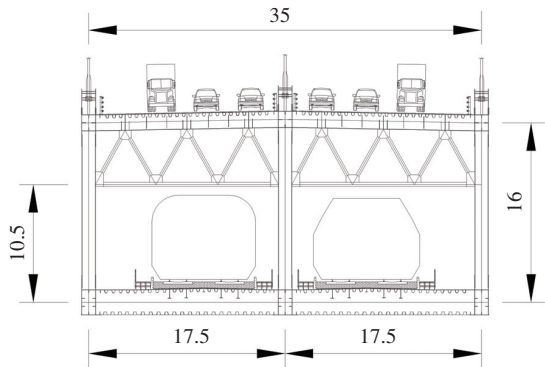


图 2 标准横截面图(m)

Fig.2 Standard cross section

2 桥塔区风环境数值模拟

为直观了解桥塔附近区域的流场特征,采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法对其进行仿真分析.

由于桥面板的阻隔作用,公路桥面以下结构对桥面上方流场虽有一定的影响,但影响不大,因此忽略公路桥面下方主梁结构,仅建立桥塔—公路桥面模型. 采用多分块的方法进行结构化网格的划分^[6]. 考虑计算效率和精度,经多次试算,确定塔—梁结合处的网格尺寸为 0.005 m,采用六面体网格过渡,至扩展区域逐渐放大,全局体单元数量为 7 596 840 个. 计算区域为顺桥向 700 m,横桥向 2 000 m,沿桥塔高度方向 325 m. 为了减弱“边界效应”,将上下计算域边界分别设置在桥塔顶端和底部. 以一侧为速度入口边界,塔柱及主梁表面取为壁面条件,其余 5 个侧面均设置为压力出口边界,计算域及边界条件见图 3. 来流风速为 8 m/s. 公路桥面流场中速度云图和迹线图如图 4、5 所示.

由图 4、5 可知:1) 在桥塔附近,存在风速加速区,这是由于桥塔截面的钝体属性,使得来流在经过

塔柱时产生绕流现象,在塔柱两侧发生分离和叠加。
2)塔柱两肢间流场产生漩涡,甚至出现局部逆流,风速急剧减小。

车辆在进出桥塔区域过程中所受风荷载的突变将严重影响车辆行车安全性和舒适性。

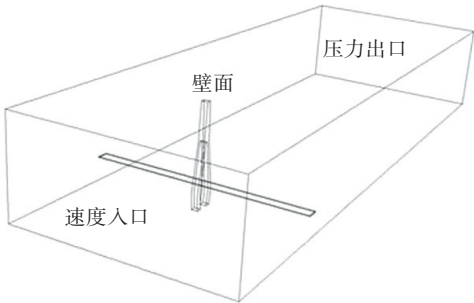
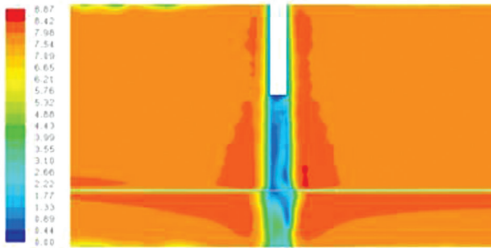
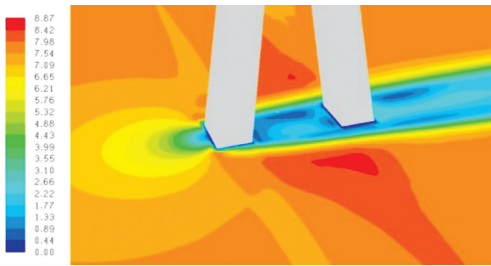


图3 计算域及边界条件

Fig.3 Calculating region and boundary conditions



(a) 正立面视图



(b) 上视图

图4 风速云图

Fig.4 Cloud map of wind speed

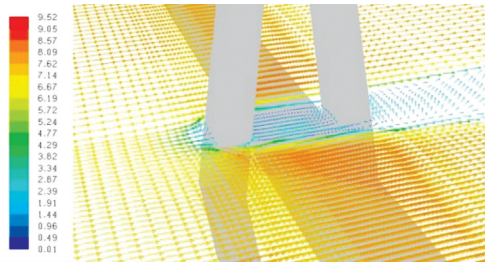


图5 迹线图

Fig.5 Trace map of wind speed

3 风洞模型试验

在数值模拟塔区流场分布的基础上,依托西南交通大学风工程省重点实验室的优良试验条件,综合考虑实验室阻塞比和模型制作精度等因素,依照

相关规范^[16]要求,设计几何缩尺比为1:30的大尺度桥塔-主梁刚性局部模型,桥塔高3.9 m,主梁长6.53 m,宽1.26 m,高0.6 m,以桥塔为中心,主梁对称布置。风洞试验现场见图6。

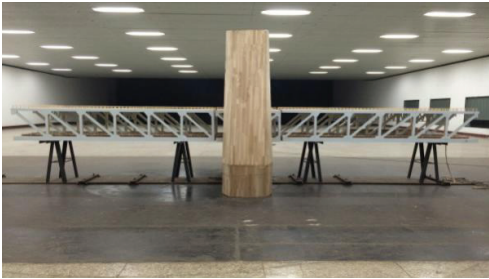


图6 风洞试验照片

Fig.6 Photo of wind tunnel test

为考察桥塔遮风效应分别对附近区域公路、铁路两桥面流场分布的影响,竖向测点布置在公路桥面上距桥面高度0.025、0.05、0.07 m处,分别对应小轿车、中型客车和大型运输车中心高度,铁路桥面上列车中心高度处,沿桥轴向等间距布置纵向测点,两桥面上风侧与下风侧横向测点对称布置。

试验来流为均匀流,横向来风,风速为8 m/s,利用眼镜蛇风速仪采集风速,采样频率为256 Hz,采样时长为60 s,为减小偶然误差,保证试验结果的合理性,每个测点进行了3次风速采集,参考风速测量采用皮托管和补偿式微压计,布置在模型的上风侧5 m处。

4 试验结果与分析

4.1 公路桥面流场

引入风速系数λ和风速突变率ξ,以表征桥面目标位置处平均风速的变化,两变量分别定义为

λ = U_{mean}/U_{come}, (1)

ξ = (U_{max} - U_{min})/U_{max}. (2)

式中:λ为风速系数,U_{mean}为测点平均风速,U_{come}为来流风速,U_{max}、U_{min}分别为各车道上进出桥塔过程中平均风速的最大值和最小值。

公路桥面3种典型车辆中心高度处风速系数λ分布关系如图7所示。

由图7可知:1)远离桥塔区域,3种典型车辆中心高度处相邻水平位置测点风速系数λ比较接近。同一水平位置,风速系数λ在小轿车中心高度处最小,中型客车中心高度处次之,大型运输车辆中心高度处最大。这是由于人行栏杆、防撞护栏等桥面附属设施及公路桥面对低处流场有一定遮挡和粘性阻尼作用;2)在离桥塔边缘约1倍塔柱迎风面尺寸距离时风速系数λ稍有增大,说明在该区域存在风速加速。这是因为桥塔迎风面来流受到塔柱阻挡作

用,在塔柱边缘产生分离绕流,并与附近区域来流发生挤压,流速增大;3)进入桥塔影响区域,塔柱对风速有明显的折减效应,这点在下风侧中型客车中心高度处表现最为明显,风速系数 λ 最小达0.089.车辆在进出桥塔区域过程中所受风荷载会经过加速放大随即急剧减小,达到最低点后又快速增大,从而致使车辆可能发生侧滑甚至侧翻,严重影响行车安全;

在上风侧,小轿车、中型客车及大型运输车中心高度处的风速突变率 ξ 分别为0.586、0.821和0.697,而下风侧3种典型车辆中心高度处风速突变率 ξ 依此为0.613、0.868和0.716.虽然下风侧风速较上风侧风速要小,但下风侧风速突变更为剧烈,尤其是中型客车高度处,风速突变率 ξ 达86.8%.

公路桥面各典型车辆中心高度处瞬时风速波动率 η 分布如图8所示.

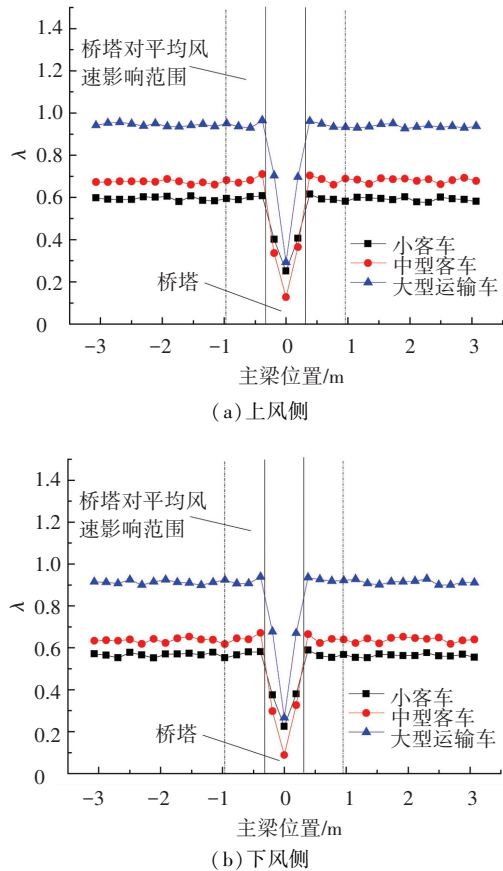


图 7 公路典型车辆中心高度风速系数 λ

Fig.7 Wind speed coefficient λ at the center height of typical vehicles

风速系数 λ 只能表示桥塔附近某车道位置平均风速的变化程度,为更好地分析风速随时间变化这一流场特性,引入瞬时风速波动率 η ,以表征采样时段内风速在平均风速附近的波动强度,其定义如下:

$$\eta = \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda)^2 / n. \quad (3)$$

式中: η 为风速波动率, n 为采样长度, λ_i 为瞬时风速系数.

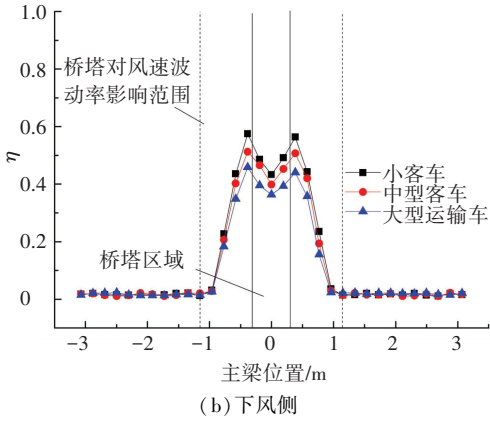
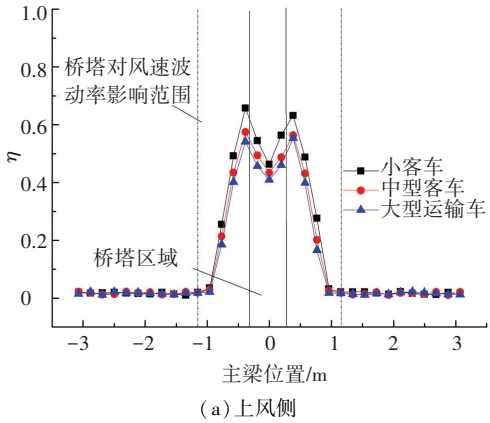


图 8 公路典型车辆中心高度瞬时风速波动率 η

Fig.8 Wind speed fluctuation rate η at the center height of typical vehicles

对比各典型车辆中心高度处瞬时风速波动率分布关系可知:1)距桥塔较远位置,瞬时风速波动率 η 很小,接近于零,证明该区域流场较为稳定.在离桥塔边缘约1.5倍塔柱迎风面尺寸距离时瞬时风速波动率 η 开始快速放大,至离桥塔边缘约0.6倍塔柱迎风面尺寸距离时达到最大,然后往桥塔中心逐渐降低,说明该范围内流场十分紊乱,瞬时风速波动较大;2)瞬时风速波动率 η 与空间位置高度成反相关,越靠近桥面,瞬时风速波动率 η 越大,最大值发生在上风侧小轿车中心高度处,达0.657.这与来流在桥面附近发生分离和再附有关;3)各空间高度处上风侧瞬时风速波动率 η 大于下风侧,表明上风侧瞬时风速波动较下风侧更为剧烈.

4.2 铁路桥面流场

铁路桥面列车中心高度处风速系数 λ 和瞬时风速波动率 η 分布曲线如图9、10所示.

由图9、10可知:1)距桥塔远端,相邻水平位置处风速系数 λ 及瞬时风速波动率 η 有较小变化,这是由桁架梁桥结构特点所引起的,空间腹杆的遮挡绕流作用对方流场存在一定的干扰;2)风速系数

λ 和瞬时风速波动率 η 二者的最大值均发生在距塔柱边缘约 0.6 倍塔柱迎风面尺寸宽度距离处, 说明此处流场受塔柱绕流加速作用变得极不稳定, 波动异常剧烈; 3) 下风侧瞬时风速波动率 η 大于上风侧, 最高达 1.402, 这与公路桥面上、下风侧风速波动率 η 变化规律相反。

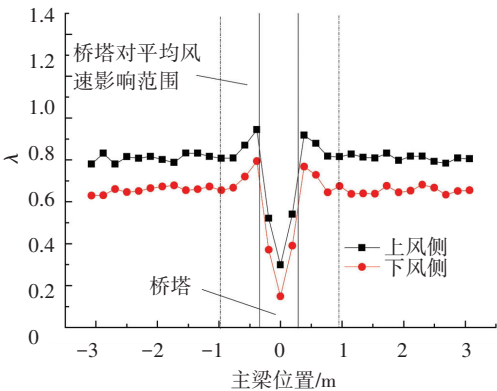


图 9 列车中心高度风速系数 λ

Fig.9 Wind speed coefficient λ the center height of train

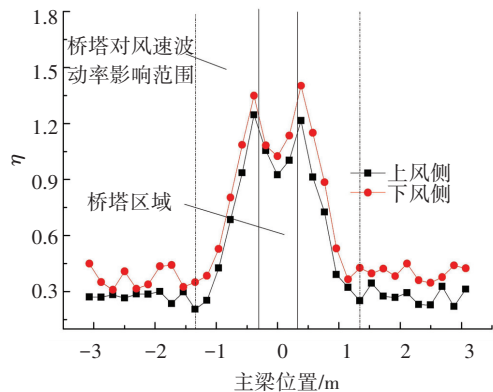


图 10 列车中心高度瞬时风速波动率 η

Fig.10 Wind speed fluctuation rate η at the center height of train

上风侧与下风侧列车中心高度处的风速突变率 ξ 分别为 0.683、0.813, 说明进出桥塔影响区域过程中, 下风侧风速变化更为明显。

4.3 公、铁两桥面流场变化规律对比

综合公铁两桥面各车道位置处风速系数 λ 、风速突变率 ξ 和瞬时风速波动率 η 分布可知: 1) 风速系数 λ 和瞬时风速波动率 η 二者突变范围有所不同, 风速系数 λ 变化范围相对较小, 约为 3 倍塔柱迎风面尺寸宽度, 瞬时风速波动率 η 变化范围相对较大, 这是因为桥塔特征紊流区域中的流动物理量 (速度或压强), 其脉动可沿分离剪切层的法向向外传播。公路桥面上, 瞬时风速波动率 η 突变范围略小于 4 倍塔柱迎风面尺寸, 而对于铁路桥面, 瞬时风速波动率 η 突变范围略大于 4 倍塔柱迎风面尺寸。由于空间腹杆的存在, 塔区铁路桥面上, 来流在经过

塔柱绕流分离后, 在腹杆处再次发生绕流分离, 使得铁路桥面上瞬时风速波动率 η 变化范围更大。 2) 由图 7、9 可知, 公、铁两桥面相同主梁纵向位置处, 下风侧的风速系数 λ 均小于上风侧。这是因为来流在经过上风侧桥面流向下风侧桥面过程中受到桥面中部结构如栏杆和中桁架等遮挡作用导致。 3) 公、铁两桥面相同主梁纵向位置处, 下风侧的风速突变率 ξ 均大于上风侧。这是因为在下风侧塔肢外侧由于塔柱扰流分离, 发生流体挤压, 流速增大, 而在塔肢内侧形成局部逆流, 流速减小, 从而导致风速突变率较大。 4) 对比图 8、10 可知, 在公路桥面, 下风侧风速波动率 η 略小于上风侧, 而在铁路桥面上, 下风侧风速波动率 η 要显著大于上风侧。这是因为在铁路桥面上, 上风侧车道上的流体流向下风侧车道的过程中, 经过中间各空间腹杆时发生绕流分离, 流体再次被打乱, 紊流强度增大, 从而导致下风侧瞬时风速波动率增大。而公路桥面上, 中间遮挡物相对较少, 对流场影响较小, 上风侧车道上流体流至下风侧车道过程中, 由于流体自身的粘滞阻尼作用, 使得流场趋于稳定, 从而下风侧车道上的瞬时风速波动率略小于上风侧。

4.4 CFD 计算结果与风洞试验结果对比

为验证 CFD 数值模拟与风洞试验结果的正确性, 并对比单层桥面桥梁和双层桥面桥梁的塔区风环境的差异, 以上风侧中型客车中心高度处为例, 该位置处风速系数的 CFD 数值模拟计算结果和风洞试验结果如图 11 所示。

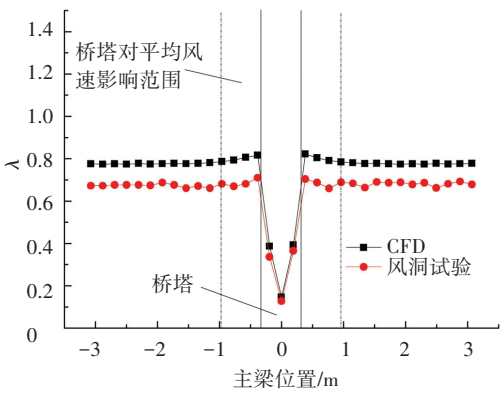


图 11 中型客车中心高度风速系数 λ

Fig.11 Wind speed coefficient λ at the center height of medium-sized coach

由图 11 可知, 采用 CFD 数值模拟方法或风洞试验手段, 所得到的风速系数变化规律相似, 突变范围基本相同。风速系数数值模拟结果略大于风洞试验结果, 是因为双层桥面桥梁, 由于空间腹杆的存在, 对来流有一定的阻挡作用, 上层桥面上方流场不仅受塔柱绕流作用影响, 桥面下方空间结构对其也

有一定程度的影响,从而使得此类双层桥面桥梁的塔区风环境较单层桥面更为复杂,这也是本文选取公铁两桥面桥梁为研究对象的原因所在。

5 结 论

1) 桥塔的存在对附近区域流场存在一定的风速加速及折减效应,车辆在通过桥塔过程中所受风荷载突变将影响行车安全性及舒适性。

2) 进出桥塔过程中,公路桥面不同类型车辆中心高度位置处的平均风速变化程度不同,相较而言,在中型客车中心高度处变化最为剧烈。

3) 下风侧平均风速较上风侧平均风速小,但下风侧风速突变率更大。公路桥面,下风侧瞬时风速波动率小于上风侧,而铁路桥面则刚好相反。

4) 桥塔遮风效应对桥面平均风速影响范围约为 3 倍塔柱迎风面尺寸宽度,而对瞬时风速波动率影响范围相对较大,公、铁两桥面上瞬时风速波动率突变范围略有差异。

参考文献

- [1] 陈晓冬. 大跨桥梁侧风行车安全分析[D]. 上海: 同济大学, 2007
CHEN Xiaodong. Analysis of vehicle safety under cross wind on long span bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2007
- [2] COOPER R K. The effect of cross-winds on trains[J]. Journal of Fluids Engineering, 1981, 103(1): 320
- [3] CHEN S R, CAIC S. Accident assessment of vehicles on long-span bridges in windy environments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(12): 991. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.06.002
- [4] COOPER R K. Atmospheric turbulence with respect to moving ground vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1984, 17(2): 215
- [5] BROCKIE N J W, BAKER C J. The aerodynamic drag of high speed trains[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1990, 34(3): 273
- [6] BAKER C J. Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1986, 24(3): 227
- [7] SUZUKI M, TANEMOTO K, MAEDA T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 209
- [8] SIGBJORNSSON R, SNNBJORNSSON J T. Probabilistic assessment of wind related accidents of road vehicles: a reliability approach

- [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74-76(98): 1079
- [9] 林桥曼. 悬索桥桥塔尾流致塔周吊索涡激振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011
LIN Qiaoman. Tower wake-induced vibration of long sling near the suspension bridge tower[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011
- [10] 艾辉林, 陈艾荣. 跨海大桥桥塔区风环境数值风洞模拟[C]//全国结构工程学术会议. 北京: 工程力学杂志社, 2009: 196
AI Huilin, CHEN Airong. Study on the crosswind environment around the tower and deck of sea-crossing bridge by CFD[C]//National Academic Conference on Structural Engineering, Beijing: Engineering Mechanics Magazine, 2009: 196
- [11] 曾家东. 大跨度桥梁塔区行车风环境研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013
Zeng Jiadong. Research on the crosswind environment of vehicle safety around bridge towers[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013
- [12] 李永乐, 陈宁, 蔡宪棠, 等. 桥塔遮风效应对风-车-桥耦合振动的影响[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(6): 875. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.06.009
LI Yongle, CHEN Ning, CAI Xiantang, et al. Wake effect of bridge tower on coupling vibration of wind-vehicle-bridge system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(6): 875. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.06.009
- [13] 郭薇薇, 夏禾, 徐幼麟. 风荷载作用下大跨度悬索桥的动力响应及列车运行安全分析[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 103
GUO Weiwei, XIA He, XU Youlin. Dynamic response of long span suspension bridge and running safety of train under wind action[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 103
- [14] 郭薇薇, 夏禾. 风荷载作用下大跨度桥梁的动力响应及行车安全性分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 137
GUO Weiwei, XIA He. Dynamic responses of long-span bridges and running safety of trains under wind action [J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 137
- [15] 郭薇薇, 夏禾, 张田. 桥梁风屏障的气动效应及其对高速列车运行安全的影响分析[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 112. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.0062
GUO Weiwei, XIA He, ZHANG Tian. Analysis on aerodynamic effects of bridge wind barrier and its influence on running safety of a high-speed train[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8): 112. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.0062
- [16] 风洞实验指南研究委员会. 建筑风洞实验指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Research committee on wind tunnel experiment guide. Guide for Building Wind Tunnel Experiments[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011

(编辑 魏希柱)