

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.013



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



路堤-桥梁过渡段车辆气动力风洞试验研究

韩冰, 李昊轩, 何一宽, 解会兵, 贾影
(北京交通大学土木建筑学院, 北京 100044)

摘要: 为了探究路堤-桥梁过渡段处车辆的气动力, 建立 1:50 的大比例尺路堤-桥梁过渡段和车辆试验模型, 在桥梁和路堤段分别布置两种风屏障, 并在车辆模型表面布置多个测压点, 以研究不同防风措施下处于不同风向角的路桥过渡段车辆气动力。试验结果表明: 与无防风措施相比, 布置桥梁风屏障后最不利风向角会从 -15° 变为 0° , 此风向下过渡段处车辆的三分力最大; 再进一步布置路堤风屏障后最不利风向角不变, 但大幅度减小了 0° 风向角下车辆的侧力系数和力矩系数; 布置路堤风屏障能有效减小车辆所受三分力; 不同风向角下改变陆地风屏障参数产生的影响不同, 针对路堤-桥梁过渡段布置防风措施时, 应充分考虑其来流方向, 以达到最优效果。

关键词: 路堤-桥梁过渡段; 风洞试验; 车辆气动力; 风向角; 防风措施

中图分类号: U417.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)04-0136-07

Experimental analysis of vehicle aerodynamic force in embankment-bridge transition section

HAN Bing, LI Haoxuan, HE Yikuan, XIE Huibing, JIA Ying

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

Abstract: In order to explore the aerodynamic force of vehicles at the transition section of embankment and bridge, a 1:50 large-scale embankment-bridge transition section and vehicle experimental model are established in this paper. Two kinds of wind barriers are arranged in the bridge and embankment sections, and multiple pressure measuring points are arranged on the surface of the vehicle model to study the aerodynamic force of vehicles at the embankment-bridge transition section at different wind directions under different windproof measures. The experiment results show that compared with no wind-proof measures, the most unfavorable wind direction angle will change from -15° to 0° after the arrangement of the bridge wind barrier, and the three-component force of the vehicle at the transition section under this wind direction is the largest. After further arrangement of embankment wind barrier, the most unfavorable wind direction angle remains unchanged, but the lateral coefficient and torque coefficient of the vehicle at 0° wind direction angle are greatly reduced. The arrangement of embankment wind barrier can effectively reduce the three-component force of vehicles. The influence of changing the parameters of land wind barrier is not the same in different wind directions. The

收稿日期: 2020-10-22

基金项目: 山东省交通运输科技项目(C17L00380); 国家自然科学基金(51778051)

作者简介: 韩冰(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事钢-混凝土组合结构长期性能和桥梁结构理论研究, E-mail: bhan@bjtu.edu.cn.

Received: 2020-10-22

Foundation items: Shandong Transportation Science and Technology Project (No. C17L00380); National Natural Science Foundation of China (No. 51778051)

Author brief: HAN Bing (1973-), professor, doctoral supervisor, main research interest: long-term performance of steel-concrete composite structure and bridge structure theory, E-mail: bhan@bjtu.edu.cn.

direction of the incoming flow should be fully considered in the arrangement of windbreak measures for the embankment-bridge transition section to achieve the optimal effect.

Keywords: embankment-bridge transition section; wind tunnel experiment; vehicle aerodynamic force; wind direction angle; windproof measures

在中国发展程度较高的沿海城市,在原有道路基础上建设符合城市新规划要求的快速道路,多需要修建桥梁来跨越原有的道路设施,由此产生了大量路堤-桥梁过渡段。已有研究表明,路桥过渡段线路形式的变化会引起风环境的差异,车辆在其中行驶相当于受到了突风的影响,会对行车安全造成不利的影响^[1-5]。

近年来,许多学者针对过渡段风场进行了研究。在目前的研究中,风洞试验和数值模拟是常用的两种手段。李波等^[6]利用风洞试验的方法,研究了条形风屏障的挡风性能,分析了孔隙率、障条宽度的影响,提出了风速折减系数可以有效评价风屏障挡风效果。王露等^[7]、张景钰等^[8]建立了路堤-路堑缩尺模型,对过渡段区域不同位置处的风剖面及线路不同位置车辆气动力进行研究,结果表明,交界处附近,上方较低区域风剖面由路堑主导,较高区域由路堤主导,交界处附近对行车安全最不利。穆鑫^[9]用模型试验和数值模拟相结合的方法,研究了挡风墙对路堤-隧道过渡段风场的影响。Sun等^[10]通过现场试验和数值模拟相结合,分析了高速列车在通过防风口时的气动力变化。Wang等^[11]建立了桥梁-隧道过渡段模型,针对过渡段提出了梯形和阶梯形两种风屏障。Deng等^[12]建立了桥梁-隧道过渡段模型,分析了列车经过桥隧过渡段时的三分力系数变化。施成华等^[13]研究了不同参数风屏障下,车辆经过桥梁-隧道过渡段时的气动力。Liu等^[14]建立了矩形防风林模型,分析了车辆经过矩形防风林过渡段的三分力系数变化,并计算了车辆安全行驶的临界风速。

已有研究表明,车辆经过过渡段时气动力变化与单一线路行驶并不相同,而目前针对线路过渡段区域的研究还在发展阶段。由于中国地形复杂,修建桥梁跨越障碍是常用手段,因此产生了大量的路堤-桥梁过渡段,路堤结构向上凸起挤压气流会改变原有的风环境^[15],而气流经过桥梁时会产生扰流现象,两者对风环境的影响并不相同。而针对路堤和桥梁上方设置的防风措施一般也不相同,也会造成防风措施过渡段区域影响车辆的行驶安全。目前对路堤-桥梁过渡区域的研究较少,无法准确确定车辆在路堤-桥梁过渡段的气动力特性。笔者以高速路和桥梁过渡段区域为研究对象,在风洞中建立了

1:50的大比例尺模型,研究了线路交界处GTS车辆不同风向角下及不同防风措施参数下的车辆气动力。

1 风洞试验及测试方法

路堤-桥梁过渡段模型由路堤-桥梁模型及GTS车辆模型组成。为了更加准确地模拟路堤-桥梁过渡段上方车辆的受力特点,采用大比例尺模型,模型缩尺比为1:50。设计原型采用路堤-桥梁-路堤的组合模式,两侧路堤等长分别为31 m,中间桥梁长66 m,过渡段总长128 m,采用双向四车道布置,车道宽度3.75 m。车辆采用sandia美国国家试验室于1996年提出的GTS车辆模型作为原型,车辆全长19.8 m,车宽2.6 m,高4.1 m,车头为流线型。路堤-桥梁过渡段模型(如图1所示)路堤高度193.4 mm,顶部宽500 mm,底部宽1 080.2 mm,单侧路堤长度620 mm;如图2所示,桥梁高度91.8 mm,底部距离地面高度120 mm,路面高度193.4 mm,采用双幅桥梁,两幅桥梁间距10 mm,每幅桥梁两侧布置防撞护栏,防撞护栏宽度10 mm(对应实际宽度0.5 m),高度17.6 mm(对应实际高度0.88 m)。车辆模型高72 mm,宽52 mm,长396 mm,车辆位于路堤-桥梁交界处中心。

为了研究不同防风措施和风屏障透风率对车

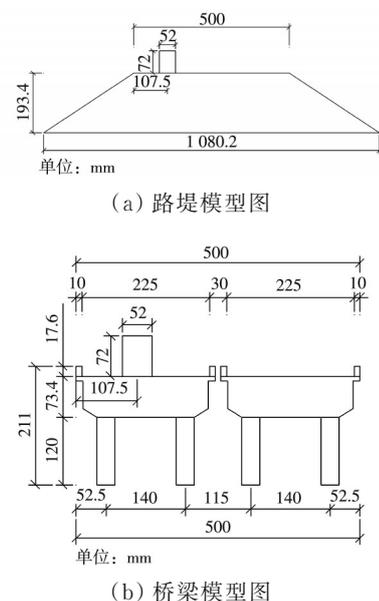


图1 风洞试验模型断面图

Fig. 1 Cross section of wind tunnel experiment model

辆气动力的影响,设计了桥梁和路堤两种风屏障分别布置在桥梁和路堤上方,桥梁风屏障高 40 mm,透风率为 50%,路堤风屏障高 240 mm,只计算上方 120 mm 的透风率,透风率为 30%、50%、70%,路堤风屏障如图 2 所示。

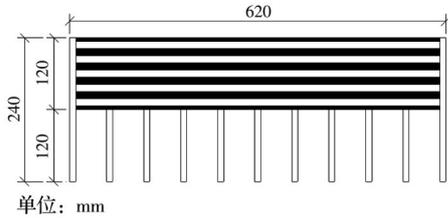


图 2 路堤风屏障模型图

Fig. 2 Embankment wind screen model

试验在北京交通大学风洞试验室进行,风洞尺寸 5.2 m×2.5 m,放置在风洞试验室中的模型如图 3 所示。

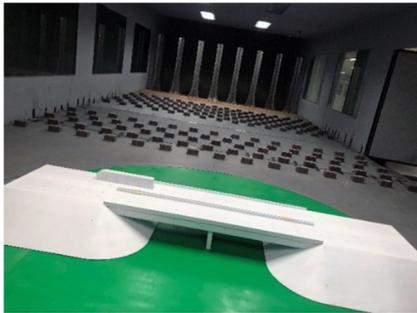


图 3 路堤-桥梁过渡段缩尺模型

Fig. 3 Scaled model of embankment-bridge transition zone

试验中通过尖劈-粗糙元系统模拟边界层风场,在风洞中未放置模型时,通过眼镜蛇三维测速仪在转盘位置测量出风场的风剖面,当来流风速为 6 m/s 时,得到风洞平均风剖面及湍流分布。边界层布置及风剖面如图 4 所示。

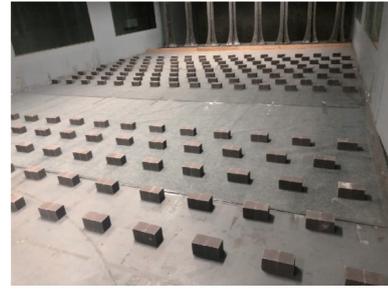
在车辆模型上布置测压点测得车辆表面风压。使用 ESP-64HD 微型压力扫描模块进行采样,因为路堤-桥梁过渡段风场较复杂,在车辆表面布置尽可能多的测点,以保证结果的准确性,最终考虑到车辆内部走线等诸多因素的影响,在车辆侧面布置 3 排 6 列 17 个测点,车辆顶部布置 2 排 5 列 10 个测点,车头布置 2 排 2 列 4 个测点,车尾布置 3 排 2 列 6 个测点,全身共 54 个测点,测点布置如图 5 所示。

为了探究不同风向角下路堤-桥梁过渡段车辆的气动力变化,通过转动试验室转盘来模拟不同来流风向角 φ ,风向角如图 6 所示。

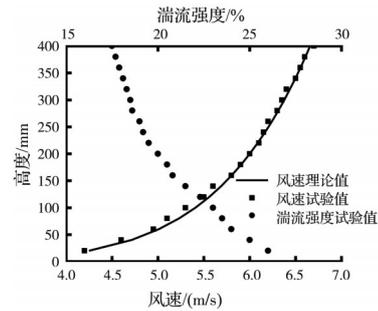
2 数据处理

气动力参数是一组无量纲量,其定义如下:

$$\text{风压系数: } C_{pi}(t) = (P_i(t) - P_0) / (P_1 - P_0) \quad (1)$$



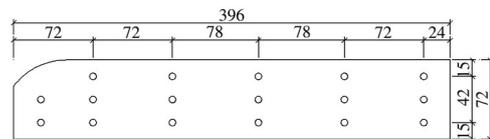
(a) 尖劈及粗糙元布置



(b) 试验风剖面及湍流分布

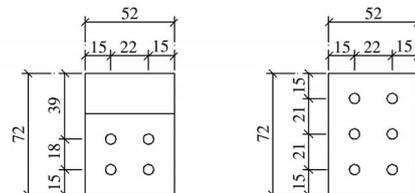
图 4 边界层风场布置

Fig. 4 The arrangement of boundary layer wind field



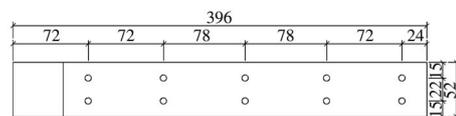
单位: mm

(a) 迎风、背风面



单位: mm

(b) 车头、车尾



单位: mm

(c) 顶面

图 5 车辆模型测点布置

Fig. 5 Layout of measuring points for vehicle model

$$\text{侧力系数: } C_D(\varphi) = \sum_i C_{pi}(\varphi) ds_i / A_D \quad (2)$$

$$\text{升力系数: } C_L(\varphi) = \sum_i -C_{pi}(\varphi) ds_i / A_L \quad (3)$$

$$\text{力矩系数: } C_M(\varphi) = \sum_i -C_{pi}(\varphi) ds_i d_i / A_D H \quad (4)$$

式中: $P_i(t)$ 为压力扫描阀测得的 i 点处表面风压,规定压力作用方向指向结构表面为正,反之为负; P_1

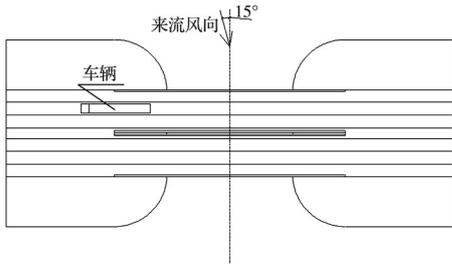


图 6 风向角示意图

Fig. 6 Diagram of wind direction angle

为参考点处的平均总压; P_0 为参考点处的平均静压; H 为车辆高度; A_D 为车辆侧面积; A_L 为车辆顶面面积。车辆气动力系数示意如图 7 所示。

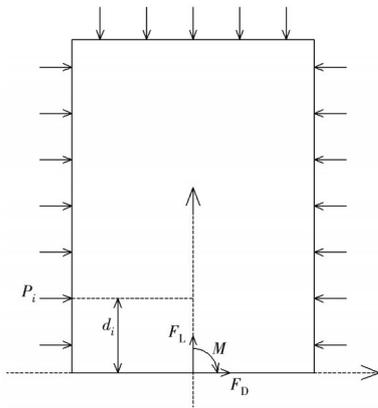


图 7 三分力系数处理示意图

Fig. 7 Diagram of three-component force coefficient

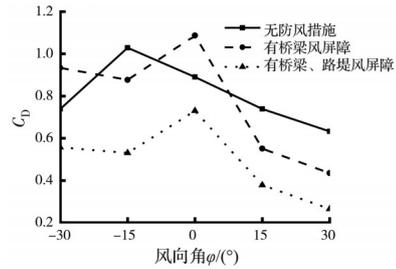
3 风洞试验结果分析

3.1 不同防风措施对车辆气动力的影响

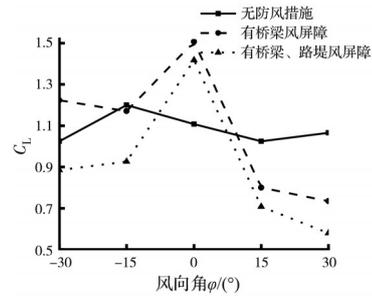
为了探究不同防风措施对车辆气动力的影响,试验中测试了不布置风屏障、布置桥梁风屏障、布置桥梁风屏障和路堤风屏障的情况,车辆三分力系数如图 8 所示。当没有防风措施,车辆三分力系数最大值都出现在 $\varphi = -15^\circ$ 时,随着角度变化三分力系数逐渐降低,可能是因为气流从桥梁侧吹来时,受到气流分离的影响,车辆所处的环境更为不利。当 $\varphi = -30^\circ$ 时,吹向桥梁侧的气流受到另一侧路堤的影响,导致了车辆三分力系数减小。

布置桥梁风屏障之后,风向角 $\varphi = -15^\circ$ 时,受到风屏障遮挡效应的影响,车辆三分力系数皆有一定幅度的下降;而 $\varphi = 0^\circ$ 时车辆三分力系数大幅度增大,可能是因为此时交界处气流受到路堤、桥梁和风屏障的相互影响,条形风屏障的窄道效应增大。

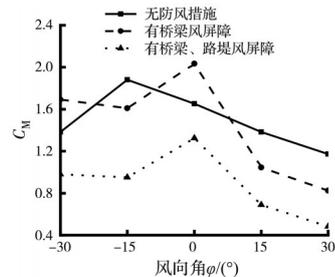
布置桥梁风屏障和路堤风屏障之后,侧力、升力和力矩系数随风向角的变化规律没有改变,但其数值大幅度减小,这是因为路堤风屏障的挡风效应使得气流速度降低,在风向角 $\varphi = 0^\circ$ 时,车辆三分



(a) 不同防风措施下车辆侧力系数



(b) 不同防风措施下车辆升力系数



(c) 不同防风措施下车辆力矩系数

图 8 不同防风措施车辆三分力系数

Fig. 8 Three-component force coefficient of vehicle under different windproof measures

力系数最大。在风向角 $\varphi = 0^\circ$ 时,车辆侧力和力矩系数都小于没有防风措施时,但升力系数减小后仍大于没有防风措施时,仍然需要进一步优化路堤风屏障参数来降低路堤-桥梁过渡段的车辆升力系数。

当风向角为负时(风从桥梁侧吹来),车辆三分力系数大于风向角为正时(风从路堤侧吹来),此时位于路堤-桥梁过渡段的车辆所处环境更为不利。

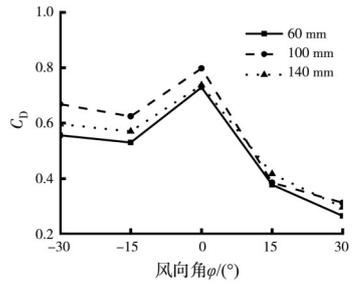
3.2 路堤风屏障参数对车辆气动力的影响

为了进一步探究不同路堤风屏障参数对路堤-桥梁车辆气动力的影响,设置不同的布置距离(路堤风屏障与路堤坡脚之间的距离)、透风率和排间距(两排路堤风屏障间距)的路堤风屏障。

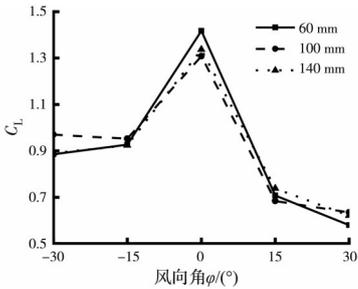
3.2.1 布置距离

为了探究路堤风屏障布置距离对路堤-桥梁过渡段车辆气动力的影响,试验设计了 3 种不同的布置距离 60、100、140 mm(对应实际距离 3、5、7 m),图 9 为不同布置距离下车辆的三分力系数对比图。

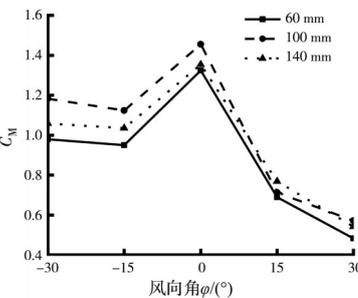
由图 9(a)可知,大多数情况下,减小布置距离



(a) 不同布置距离下车辆侧力系数



(b) 不同布置距离下车辆升力系数



(c) 不同布置距离下车辆力矩系数

图 9 不同布置距离下车辆三分力系数

Fig. 9 Three-component force coefficient of vehicle under different distance

车辆侧力系数先增大后减小,但在风向角 $\varphi = 15^\circ$ 时,侧力系数随着布置距离的减小而减小,当布置距离为 60 mm 时,路堤风屏障的遮挡效应最显著,车辆侧力系数最小。最不利风向角仍为 $\varphi = 0^\circ$,且当风向角为负时,车辆侧力系数对布置距离更为敏感,改变布置距离,侧力系数变化较大。

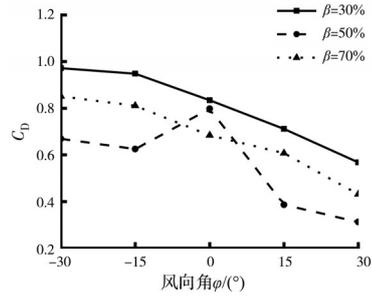
由图 9(b)可知,在不同布置距离下, $\varphi = 0^\circ$ 时车辆升力系数仍远大于其他角度,此时车辆升力系数随着布置距离的增大先减小后增大,但当布置距离达到 100 mm 之后,再增大布置距离,升力系数变化幅度不大。

对比图 9(a)、(c)可见,侧力系数与力矩系数在不同布置距离下变化规律基本一致。

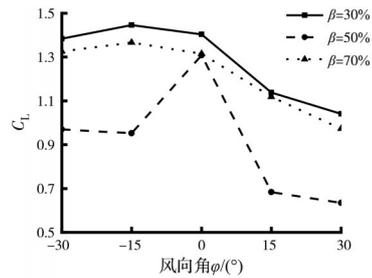
3.2.2 透风率

为了探究路堤风屏障透风率对路堤-桥梁过渡段车辆气动力的影响,试验将路堤风屏障固定在 100 mm 的位置,并设计了 3 种不同的透风率(30%、50%、70%),图 10 为不同路堤风屏障透风率下车辆

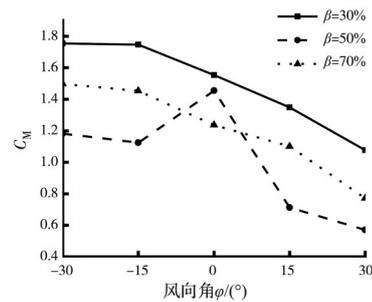
的三分力系数对比图。



(a) 不同透风率下车辆侧力系数



(b) 不同透风率下车辆升力系数



(c) 不同透风率下车辆力矩系数

图 10 不同透风率下车辆三分力系数

Fig. 10 Three-component force coefficient of vehicle under different ventilation rates

由图 10 可见,在透风率为 50% 时,车辆三分力系数在风向角 $\varphi = 0^\circ$ 时会大幅度增大;当透风率为 30% 和 70% 时,车辆三分力系数随着风向角向正向转动而减小。

由图 10(a)可见,除风向角 $\varphi = 0^\circ$ 时,车辆侧力系数随着路堤风屏障透风率的增大先减小后增大,当透风率为 50% 时,车辆侧力系数最小。当 $\varphi = 0^\circ$ 时,车辆侧力系数随着路堤风屏障透风率的增大而减小,当透风率为 70%,车辆侧力系数最小。

由图 10(b)可见,车辆升力系数随着路堤风屏障透风率的增大先减小后增大,但当 $\varphi = 0^\circ$ 时,透风率增大到 50% 之后,升力系数对透风率的反应不敏感,再增大透风率,升力系数基本不变。

对比图 10(a)、(c)可得,车辆力矩系数随着路堤风屏障透风率的变化规律与侧力系数基本一致。

3.2.3 排间距

为了探究路堤风屏障排间距对路堤-桥梁过渡段车辆气动力的影响,试验布置了两排路堤风屏障,将第一排路堤风屏障固定在 100 mm 的位置,并设计了 2 种不同的排间距(100、200 mm 分别对应实际排间距 5、10 m),图 11 为不同路堤风屏障排间距下车辆的三分力系数对比图。

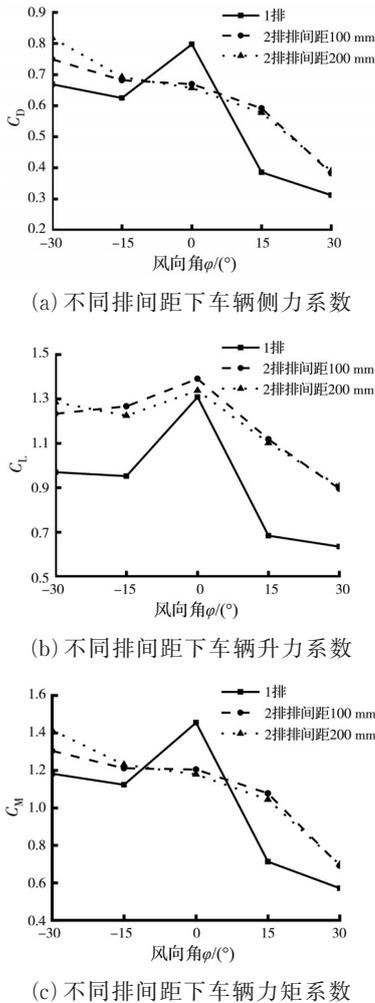


图 11 不同排间距下车辆三分力系数

Fig. 11 Three-component force coefficient of vehicle under different row spacing

由图 11(a)可见,布置两排路堤风屏障,风向角为负时车辆侧力系数相较于一排路堤风屏障时增大,且随着排间距的增大继续增大。当风向角 $\varphi = 0^\circ$ 时,布置两排路堤风屏障后,车辆侧力系数大幅度降低,排间距对其影响不大。当风向角为正时,两排路堤风屏障时车辆侧力系数大于单排路堤风屏障时,且其受排间距的影响较小。

由图 11(b)可见,布置两排路堤风屏障后,相较于单排路堤风屏障,车辆升力系数提高明显,但风向角 $\varphi = 0^\circ$ 时升力系数提升较小,且其随着排间距的增大而减小,风向角 $\varphi = 0^\circ$ 仍为最不利风向角。

当风向角为正时,排间距对车辆升力系数影响不大;但当风向角为负时,车辆升力系数随着排间距的增大有一定变化。

对比图 11(a)、(c)可见,车辆力矩系数随着路堤排间距的变化规律与侧力系数基本一致。

4 结论

以路堤-桥梁过渡段为研究对象,探讨了车辆在不同防风措施下车辆三分力系数的变化规律,得出以下结论:

1) 车辆位于过渡段交界处时,车身三分力系数对风向角较敏感,当风向角为负时,对行车安全更为不利。

2) 与没有防风措施相比,仅布置桥梁风屏障对车辆三分力系数更加不利,升力系数甚至增大了 25%,同时最不利风向角也从 -15° 变为了 0° ;而在此基础上进一步布置路堤风屏障后,车辆三分力系数大幅度减小。

3) 布置单排路堤风屏障时,车辆三分力系数随着路堤风屏障布置距离的增大先减小后增大,但其随风向角变化规律基本不变。

4) 与单排布置相比,布置两排路堤风屏障,除风向角为 0° 时,车辆三分力系数均有所增大,但在风向角为 0° 时,侧力和力矩系数大幅度减小;同时,排间距的增加仅对风向角为 -30° 时车辆的侧力和力矩系数有明显的影。

5) 针对路堤-桥梁过渡段布置防风措施时,应充分考虑来流方向,以达到最优效果。

参考文献

[1] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1-9.
TIAN H Q. Study evolvement of train aerodynamics in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 1-9. (in Chinese)

[2] 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): 103-110.
GUO W W, XIA H, XU Y L. Dynamic response of long span suspension bridge and running safety of train under wind action [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 103-110. (in Chinese)

[3] 彭栋. 桥梁与其它类型线路过渡段车辆气动特性及优化措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
PENG D. Train aerodynamic characteristics and optimization measures of bridge and other types of line transition section [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong

- University, 2017. (in Chinese)
- [4] 刘玮蔚. 桥隧及其衔接段驾驶员行车安全风险研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
LIU W W. Study on safety risk of driving in bridge tunnel and its connection [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [5] 李贤钰, 郭忠印, 方勇, 等. 基于耦合贝叶斯网络的桥隧过渡段交通系统风险评估模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(5): 781-786.
LI X Y, GUO Z Y, FANG Y, et al. Risk assessment model of traffic system on bridge-tunnel transition sections based on coupled Bayesian network [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(5): 781-786. (in Chinese)
- [6] 李波, 张剑, 杨庆山. 桥梁风障挡风性能的试验研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 78-82.
LI B, ZHANG J, YANG Q S. Experimental study on windbreak performance of wind barriers on bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 78-82. (in Chinese)
- [7] 王露, 刘玉雯, 陈红. 侧风下峡谷桥隧连接段汽车的行驶特性 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(3): 736-748.
WANG L, LIU Y W, CHEN H. Cross-wind environment vehicle driving feature at canyon bridge and tunnel connection segment [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3): 736-748. (in Chinese)
- [8] 张景钰, 张明金, 李永乐, 等. 高速铁路路堤-路堑过渡段复杂风场和列车气动效应风洞试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 80-87.
ZHANG J Y, ZHANG M J, LI Y L, et al. Wind tunnel test study on complex wind field and vehicle aerodynamic effects in embankment-cutting transition zone in high-speed railway [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 80-87. (in Chinese)
- [9] 穆鑫. 兰新铁路隧道与路堤相连处防风过渡段接触网风场特性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 70-77.
MU X. Study on wind field characteristics of catenary along wind-break transition section at tunnel and embankment connection of Lanzhou-Urumqi railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 70-77. (in Chinese)
- [10] SUN Z, DAI H Y, GAO H, et al. Dynamic performance of high-speed train passing windbreak breach under unsteady crosswind [J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(3): 408-424.
- [11] WANG L, CHEN X X, CHEN H. Research on wind barrier of canyon bridge-tunnel junction based on wind characteristics [J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(5): 870-883.
- [12] DENG E, YANG W C, HE X H, et al. Aerodynamic response of high-speed trains under crosswind in a bridge-tunnel section with or without a wind barrier [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 210: 104502.
- [13] 施成华, 王昂, 邓镔, 等. 桥隧段风屏障对高速列车气动荷载及行车安全的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 58-68, 76.
SHI C H, WANG A, DENG E, et al. Wind barrier's effect on aerodynamic load and driving safety of high-speed trains at tunnel-bridge-tunnel section [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(6): 58-68, 76. (in Chinese)
- [14] LIU T H, CHEN Z W, ZHOU X S, et al. A CFD analysis of the aerodynamics of a high-speed train passing through a windbreak transition under crosswind [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2018, 12(1): 137-151.
- [15] TOMASINI G, GIAPPINO S, CORRADI R. Experimental investigation of the effects of embankment scenario on railway vehicle aerodynamic coefficients [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 131: 59-71.

(编辑 胡玲)