

文章编号:1673-9469(2025)05-0054-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.05.007

强侧风下山区高墩桥梁上货运汽车气动效应分析

邵健恒^{1,2}, 闫亚光^{1*}, 黄弋珍¹, 蒋明敏³, 解会兵⁴, 高军²

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中建八局第四建设有限公司, 山东 青岛 266000;

3. 河北保津高速公路有限公司, 河北 保定 071000; 4. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为系统开展侧风作用下山区高墩桥梁上货运汽车的气动特性研究, 通过数值模拟手段揭示不同侧风强度、不同桥梁位置、不同货车类型的气动参数变化规律。利用 Catia 软件完成货运汽车的精细化三维建模, 还原车身尺寸、货厢形态及重心分布等关键结构特征; 借助 Global Mapper 软件导入山区高墩桥梁所在区域的地形高程数据, 结合桥梁设计图纸构建包含桥墩、桥面、周边山体的地形-桥梁模型, 最终整合形成“车辆-地形-桥梁”耦合计算模型, 确保模型能真实反映山区复杂地形与桥梁、车辆的空间位置关系。利用 Starccm+ 软件进行仿真模拟。通过变化车辆位置以及侧风风速, 研究静止在山区高墩桥梁上的货运汽车的气动荷载变化规律和外流场特性以及车辆的气动效应。研究表明: 侧风环境下, 货运汽车静止在山区高墩桥梁上时, 其安全性主要受到侧向力、侧倾力矩以及横摆力矩的影响, 因此货运汽车在距离桥头 5、200 m 时安全性相对较低。在桥梁上的相同位置, 货运汽车的气动荷载随着风速的增加而增大。

关键词: 山区高墩桥梁; 数值模拟; 气动效应; 侧风作用

中图分类号: TU317⁺.9

文献标识码: A

Analysis of Aerodynamic Effects of Freight Vehicles on High-tower Bridges in Mountainous Areas Under Strong Crosswinds

SHAO Jianheng^{1,2}, YAN Yaguang^{1*}, HUANG Yizhen¹, JIANG Mingmin³, XIE Huibing⁴, GAO Jun²

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. The Fourth Construction Co., Ltd. of Construction Eighth Engineering Division, Qingdao, Shandong 266000, China;

3. Hebei Baojin Expressway Co., Ltd., Baoding, Hebei 071000, China;

4. Department of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To systematically study the aerodynamic characteristics of freight vehicles on high-pier bridges in mountainous areas under crosswind conditions, a numerical simulation method was developed to reveal the variation patterns of aerodynamic parameters under different crosswind intensities, bridge positions, and types of freight vehicles. The Catia software was used to complete the detailed three-dimensional modeling of the freight vehicle, restoring key structural features such as vehicle body size, cargo compartment shape, and center of gravity distribution. The Global Mapper software was used to import the terrain elevation data of the area where the high-pier bridges are located. Based on the bridge design drawings, a terrain-bridge model including the bridge piers, the bridge deck, and the surrounding mountains was developed. Finally, a “vehicle-topography-bridge” coupled calculation model was integrated, ensuring that the model can accurately reflect the spatial positional relationship between the complex terrain in mountainous areas and the bridges and vehicles. The results showed that in the crosswind environment, when the freight vehicle was stationary on the mountainous high-pier bridge, its

收稿日期:2023-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708020)

第一作者:邵健恒(1999—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,从事桥梁抗风方面的研究。

* 通信作者:闫亚光(1978—),男,河北邯郸人,博士,副教授,从事隧道空气动力学方面的研究。

safety was mainly affected by lateral forces, side-tipping moments, and yawing moments, so the safety of the freight vehicle was relatively low at a distance of 5 and 200 meters from the bridgehead. At the same position on the bridge, the aerodynamic load of the freight vehicle increased with the increase of wind speed.

Key words: high pier bridges in mountainous areas; numerical simulation; aerodynamic effects; cross-wind action

在山区高墩桥梁上行驶的货运汽车常受到强侧风影响,随着侧风强度的增大,车辆的行车稳定性显著降低。另外,两侧桥台处的山体地形会影响桥上货运汽车的气动效应,车辆在桥上不同位置承受的气动载荷也会受到影响,严重时可能危及行车安全。

针对不同车型的气动特性,国内外学者已开展大量研究工作,Sterling等^[1]通过道路、风洞试验和流体仿真,研究了侧风作用下货运汽车气动效应;Suzuki等^[2]基于数值仿真,从车辆外形、基础结构和道路工况3个方面,对侧风环境下行驶在桥梁上汽车的气动特性开展了研究;Brandt等^[3]研究发现,车辆重心位置、轴距及路面状况是决定车辆侧风行驶安全性的3个关键要素。Zhang等^[4]借助数值模拟技术,建立车辆模型并仿真其在地形下的行驶过程,发现地形因素对车辆运动路径、行驶状态及气动特性影响较大。Reymert等^[5]围绕车辆道路行驶的安全性及稳定性开展研究,并基于数据分析完成了车辆行驶性能的评估。Leledakis等^[6]以道路碰撞事故车辆为研究对象,在进行荷载计算分析的同时,探讨了乘客坐姿对事故后果的影响;龚旭^[7]研究了重型半挂厢式货车在高速公路上受侧风时的气动稳定性;王露^[8]研究了恶劣天气下,脉动风对行驶在山区桥隧连接段公路上的车辆稳定性和安全性的影响;胡兴军等^[9]采用数值模拟的方法,研究了不同强度侧风条件下重型货车在带护栏桥梁上行驶时的周围流场,以及侧风强度对于货车气动特性的影响;王艳^[10]利用数值仿真方法,对山路和高速路两种环境下,重型货运汽车受侧风影响时的空气动力学特性以及行驶稳定性进行分析;李朱君^[11]结合数值模拟、风洞试验以及理论分析方法,对桥梁上不同类型的汽车受侧风影响时的气动效应进行研究,分析了车辆的行车安全性及其影响因素;朱占猛^[12]采用数值模拟技术,研究了侧风作用下,桥梁上车辆的气动效应以及周围流场特性,对比了不同种类挡风屏的防风效果,分析了侧风环境下车辆的安全性,得到不同路面情况下的安全车速和

风速;詹铠臻等^[13]通过数值模拟的方法,研究了侧风条件下行驶在桥梁上的汽车的安全性,提出了防风措施。

目前,研究多集中于侧风环境下公路不同路段及各类车辆的流场特性,而对侧风作用下山区高墩桥梁上货运汽车的气动荷载和外流场特性的研究较少。因此,本文针对山区高墩桥梁上的货运汽车,开展侧风作用下气动荷载、外流场特性研究。利用Catia和Global Mapper等软件建立“车辆-地形-桥梁”三维数值模型,模拟风的耦合作用及地形风对货运汽车气动荷载的影响规律,以期复杂地形的高墩桥梁上货运汽车的行驶安全性和稳定性提供参考。

1 计算模型

1.1 控制方程

本文研究对象为侧风环境下静止于山区高墩桥梁上的货运汽车,对其在桥梁上不同位置的气动效应进行分析。将货运汽车周围流动的流体介质设置为不可压缩的理想气体,计算域内的流体状态设置为湍流,以模拟等温条件下的分离流体。在流场模拟过程中,模型中流场是非定常流动的,流体的流动参数随时间发生变化。由于梯度风易受地形因素影响,为了降低耦合效应、提高计算精度,在速度进口采用均匀流。本文基于计算流体力学基本理论,在流体力学基本方程^[14-20]基础上构建数值仿真的理论框架。

1.2 湍流模型

RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型对汽车外流场的模拟效果较好,本文选用该模型对侧风作用下山区高墩桥梁上货运汽车的外流场进行模拟。本文基于RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型,使用数值模拟仿真软件Starccm+,对侧风作用下“车辆-地形-桥梁”模型的流场和货运汽车的气动荷载进行数值模拟。

1.3 计算模型概述

本文数值模拟选用国产解放牌J7重型货运汽

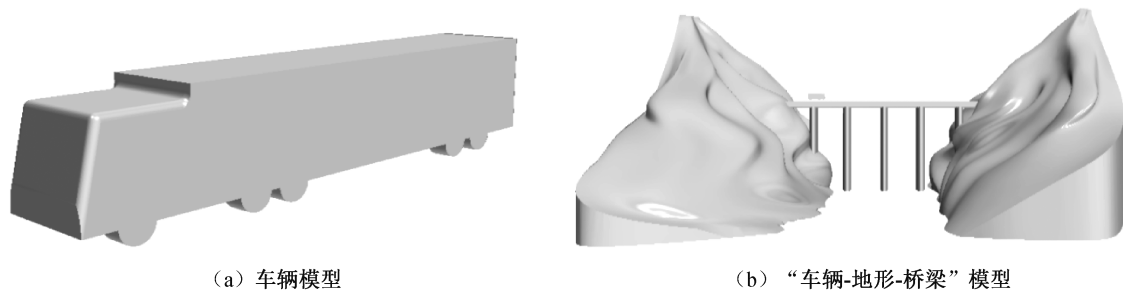


图1 计算模型

Fig.1 Calculation model

车为研究对象,该货运汽车空载重量为 25 t,长 16.5 m、宽 2.5 m、高 4 m,建模时省略了车辆内饰以及外部细节构造。本文以太行山高速胭脂河大桥以及周围地形为工程背景,桥梁为双向四车道设计,全长 387 m,桥面宽 12.75 m,桥墩最高高度为 78 m,两侧山体高度为 91 m。本研究建立的“车辆-地形-桥梁”计算模型如图 1 所示。

1.4 网格划分及边界条件

本文采用重叠网格技术对车辆表面、桥梁表面以及地形表面周围的空间进行加密处理,针对不同大小的加密区域,采用不同尺寸的网格单元,其中最小网格尺寸为 0.05 m。

为了更准确模拟货运汽车在山区高墩桥梁上受侧风时的气动荷载,本研究将地形表面、车辆表面、桥梁表面及计算域底部设置为壁面,将计算域迎风面设置为速度进口,将计算域其余 4 个面设置为压力出口。在车辆重叠网格区域和计算域之间创建重叠交界面。计算域模型如图 2 所示。

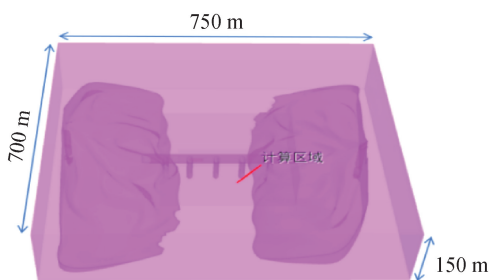


图2 计算域示意图

Fig.2 Calculation area diagram

2 计算结果与分析

受车辆位置和侧风风速的影响,静止于山区高墩桥梁上的货运汽车,其气动荷载及周围流场特性均会发生变化。本研究通过改变货运汽车在桥梁上的位置(距离桥头 5、20、50、100、200 m)和侧风风速(10、20、30 m/s)等参数,共设置 15 种研究工况。

2.1 桥梁不同位置对货运汽车气动效应的影响

为研究货运汽车在山区高墩桥梁上不同位置受侧风时的气动效应,对货运汽车六分力气动荷载变化情况进行分析。本文选取侧风风速为 20 m/s,研究货运汽车位于距离桥台 5、20、50、100、200 m 五个位置时的气动荷载变化。

2.1.1 车辆外流场特性

为分析侧风作用下桥梁不同位置的车辆外流场特性,本文选取距离桥台 5、200 m 处车身中心横截面的仿真计算结果,得到货运汽车在桥梁不同位置的速度云图,见图 3。

由图 3 可知,当位于山区高墩桥梁上不同位置的货运汽车受到侧风影响时,车体表面气体流速均较小,车身周围流场的最大流速出现在车顶上方及车底部靠近桥面的区域。这是因为货运汽车体积较大,对侧向风流具有遮挡作用,使气流绕过车体表面,在车顶的上方和底部汇聚,导致该区域的流场流速较大。在侧风作用下,距离桥台 20 m 处的货运汽车,其车顶上方及底部流场流速最大,达到 36.8 m/s。除距离桥台 200 m 位置外,其余 4 个位置车身周围流场流速最大值相差不大,差值小于 5 m/s。在距离桥台 200 m 处,由于山体凸出部分遮挡部分车身,减弱了侧风对货运汽车周围流场的影响,因此车顶上方流场流速最小,为 25.5 m/s。由于车体的遮挡作用,侧向风流在背风侧形成一个或多个气流旋涡,流场流速较小,中心处流速为 0,呈环状分布。

综上所述,在侧风环境下,若无地形遮挡,货运汽车在山区高墩桥梁上不同位置的周围流场分布及最大流场流速相差不大。当地形遮挡侧向风流时,可显著减弱侧风对静止货运汽车周围流场的影响。

2.1.2 车辆六分力变化规律

在侧风作用下,货运汽车在山区高墩桥梁上的位置改变,其六分力气动荷载会发生变化,通过

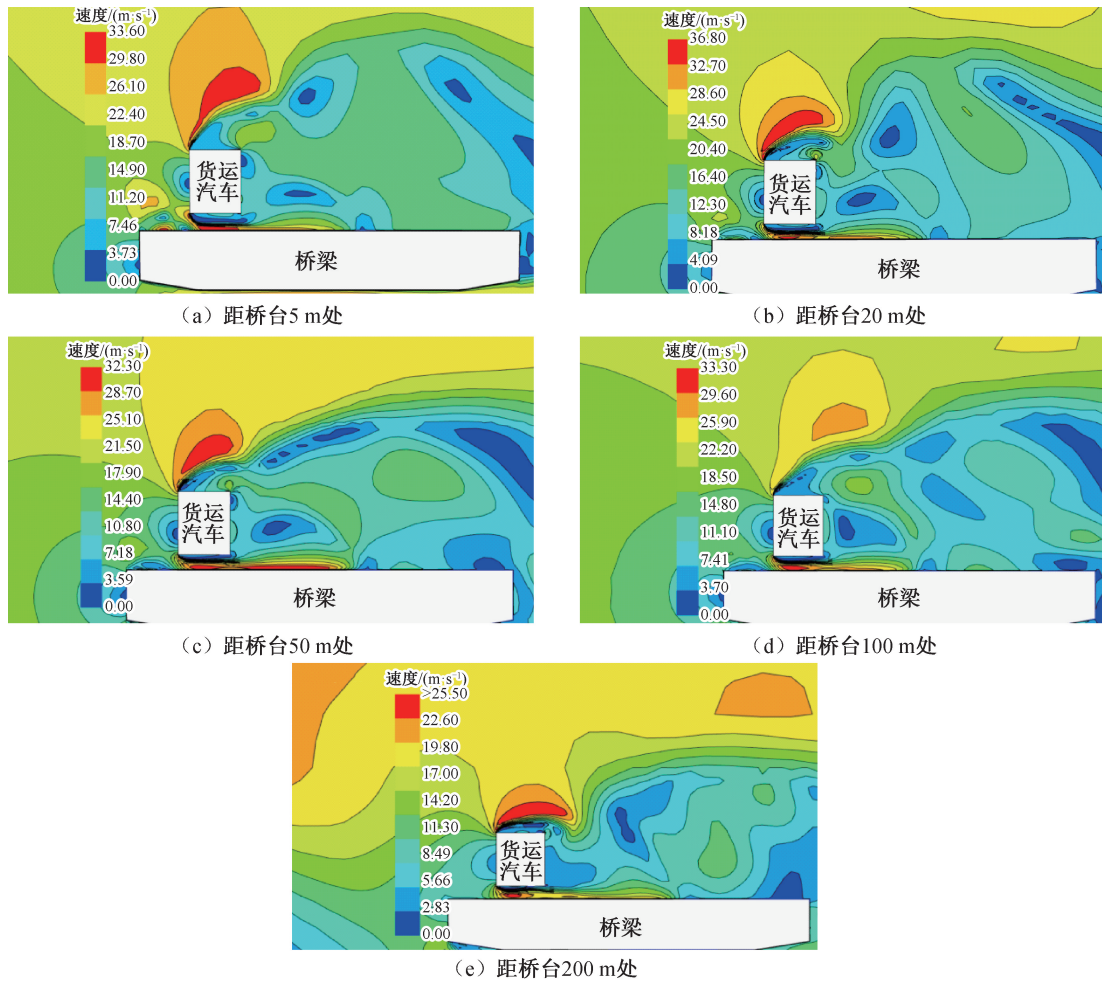


图 3 不同位置货运汽车速度云图

Fig. 3 Cloud images of freight vehicle speeds at different locations

仿真模拟计算得到货运汽车的气动荷载值。为更直观地分析货运汽车气动荷载随位置的变化规律,绘制侧风风速为 20 m/s 时货运汽车的气动荷载随位置的变化曲线,如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可知,货运汽车在桥梁上 5 个不同位置受到侧风影响时,所受阻力随距离的增加而

减小,在距离桥台 100 m 处达到最小值(1.619 kN);在距离桥台 200 m 处,阻力增加至最大值(2.494 kN),这是由桥尾处山体对侧向来风的阻碍作用所致。

货运汽车所受升力在距离桥台 20 m 处达到最大值(3.298 kN),之后随距离的增加而不断降低,

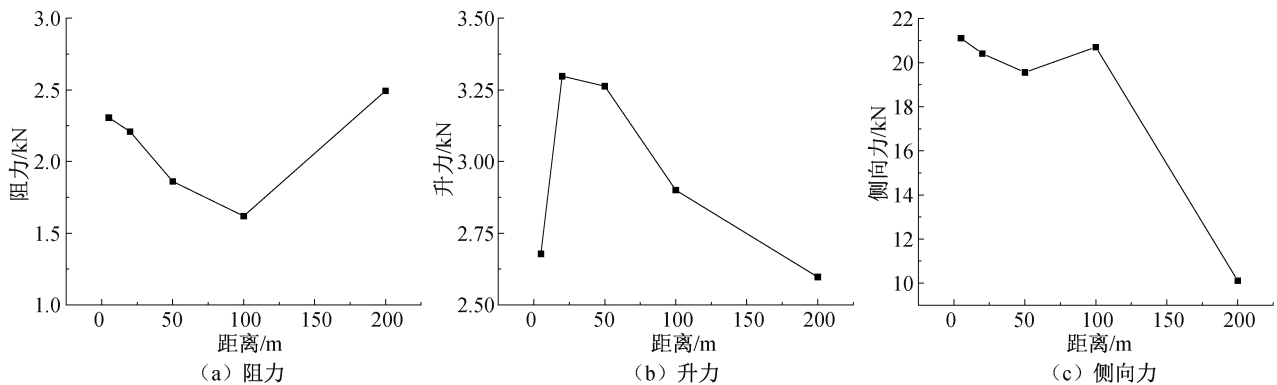


图 4 距离桥台不同位置货运汽车的气动力

Fig. 4 Aerodynamic forces of freight cars in different locations

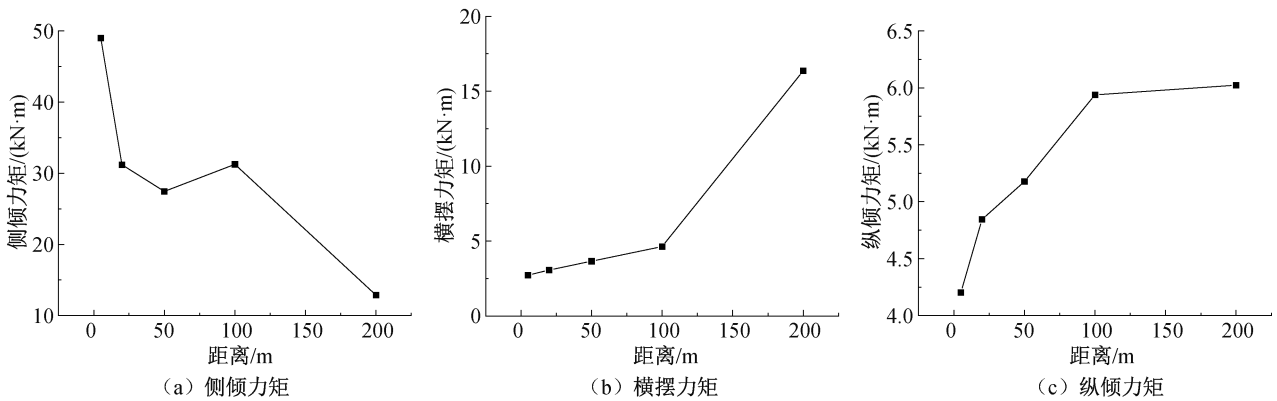


图5 距离桥台不同位置货运汽车的气动力矩

Fig. 5 Aerodynamic torque of freight vehicles at different positions

在距离桥台 200 m 处,货运汽车所受升力达到最小值(2.597 kN)。

侧向力、侧倾力矩总体随与桥台距离的增加呈下降趋势,在距离桥台 100 m 处,即桥梁中心位置,由于峡谷对于气流的加速作用,侧向力和侧倾力矩有所增加。但在距离桥台 200 m 处,即接近桥尾的位置,由于地形的遮挡,二者显著下降至最小值,其中,侧向力最小值为 10.112 kN,侧倾力矩最小值为 12.858 kN·m。

货运汽车所受横摆力矩、纵倾力矩随与桥台距离的增加而增大。横摆力矩在距离桥台 200 m 处增大较为明显,达到最大值(16.36 kN·m),相较于 100 m 处,增幅超过 100%。这是因为距离桥台 200 m 处地形环境较为复杂,对侧向来风影响较大,导致车辆所受横摆力矩增大明显。

综上所述,在侧风环境下,货运汽车所受阻力、横摆力矩以及纵倾力矩在距离桥台 200 m 处最大,所受升力在距离桥台 20 m 处最大,所受侧向力以及侧倾力矩在距离桥台 5 m 处最大。

货运汽车气动荷载分析表明,在侧风环境下,静止于山区高墩桥梁货运汽车的安全性和稳定性主要受侧向力、侧倾力矩及横摆力矩的影响。除距离桥台 200 m 处的工况外,其余工况汽车受到的侧向力和侧倾力矩均大于其他气动荷载,而在 200 m 处,货运汽车所受到的横摆力矩占主导。在距离桥台 5 m 处,货运汽车受到的侧向力和侧倾力矩值最大,在 200 m 处受到的横摆力矩值最大,因此,这两个位置的货运汽车安全性显著降低。

2.2 不同侧风风速对货运汽车气动效应的影响

为研究在山区高墩桥梁上静止的货运汽车受不同侧风风速影响时的气动效应,对货运汽车六分力气动荷载变化情况进行分析。分析时,选取

的侧风风速分别为 10、20、30 m/s。

2.2.1 车辆流场特性

为探讨不同侧风风速下货运汽车的外流场特性,本文选取距离桥台 5、200 m 处车身中心横截面的仿真计算结果,得到不同侧风风速下的速度云图,见图 6 和图 7。

由图 6、图 7 可知,当侧风风速为 10 m/s 时,货运汽车在距离桥台 5、200 m 处,车身周围流场最大流速位于车底,分别为 22、14.4 m/s,气流在车顶上方汇聚导致车顶上方的流场流速也较大,分别为 19.6、12.8 m/s。随着侧风风速的增大,车顶上方和车底的流场流速不断增大。当侧风风速由 10 m/s 增大到 30 m/s,距离桥台 5、200 m 的货运汽车车底的流场流速分别由 22、4.4 m/s 增大到 49.1、37.1 m/s,车顶上方的流场流速由 19.6、12.8 m/s 增大到 43.6、32.9 m/s。同时,流速较快区域面积不断增大,车身周围形成的气旋面积不断增大,最终汇聚成一个或多个大气旋。

综上所述,随着侧风风速的增大,位于货运汽车车顶上方和车底的流场流速不断增大,且流速较大区域的面积也不断增大。

2.2.2 车辆六分力变化规律

为直观分析货运汽车气动荷载随风速的变化规律,绘制了距离桥台 5、200 m 两个位置在不同侧风风速下货运汽车所受气动荷载曲线,如图 8、图 9 所示。

由图 8、图 9 可知,货运汽车在山区高墩桥梁上受到的阻力、升力、侧向力均随侧风风速的增加而增大,其中侧向力的变化最为显著。当侧风风速由 10 m/s 增加到 30 m/s,距离桥台 5 m 的货运汽车所受的侧向力由 7.651 kN 增大到 46.941 kN;距离桥台 200 m 的侧向力由 2.99 kN 增大到

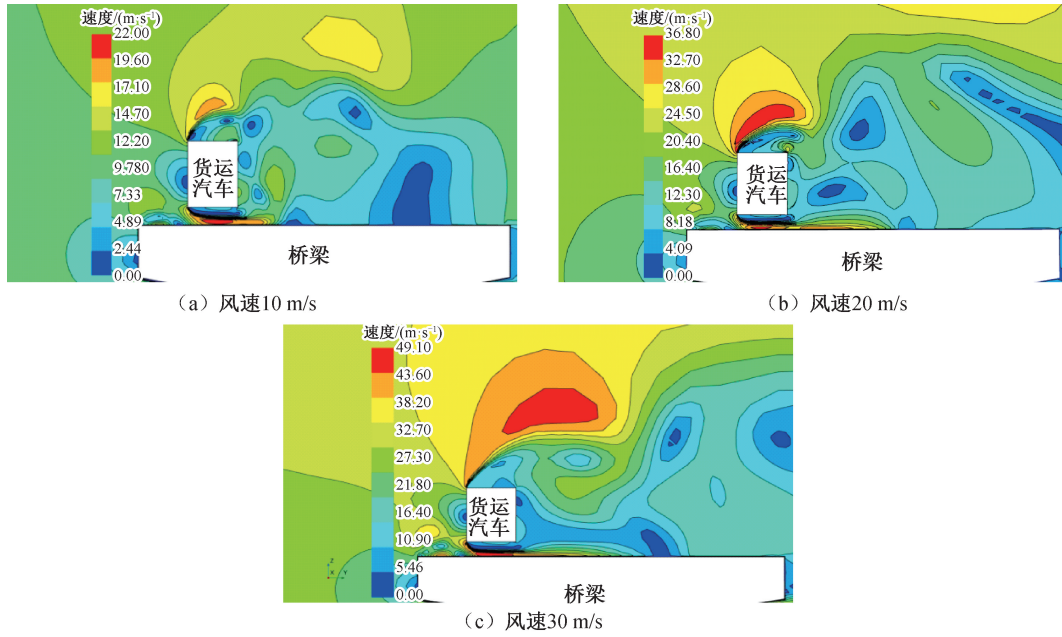


图 6 不同风速下距桥台 5 m 处车辆速度云图

Fig. 6 Vehicle speed cloud image at 5 m distance from the abutment under different wind speeds

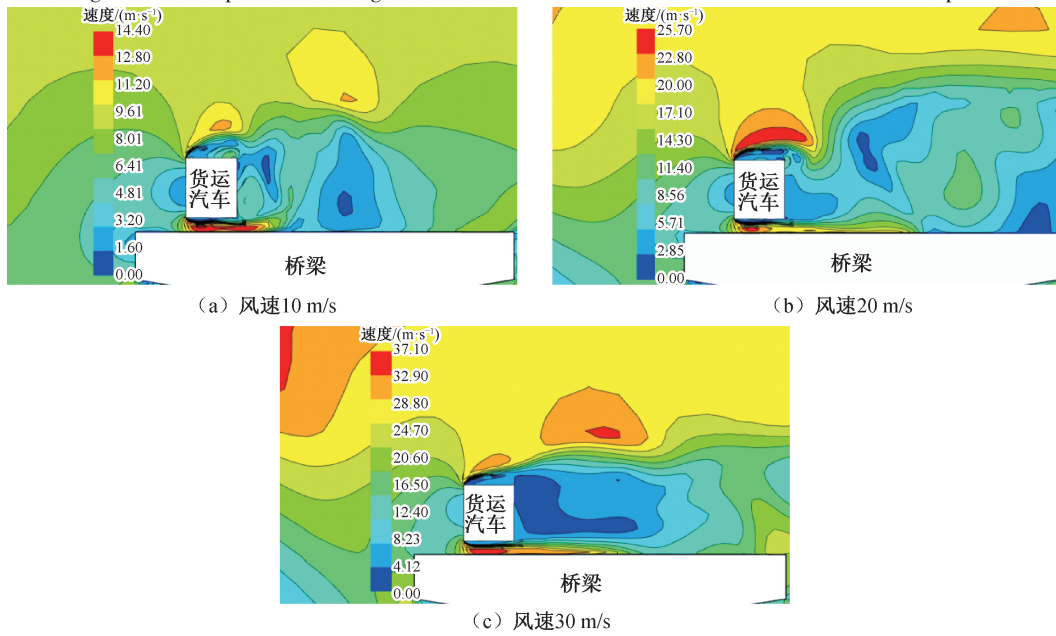


图 7 不同风速下距桥台 200 m 处车辆速度云图

Fig. 7 Vehicle speed cloud map at 200 m from the abutment under different wind speeds

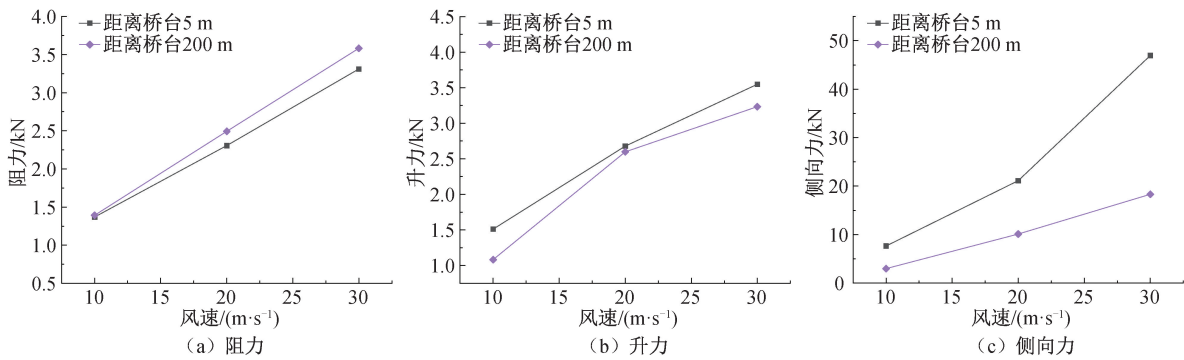


图 8 不同风速下货运汽车的气动力

Fig. 8 Aerodynamic forces of freight cars at different wind speeds

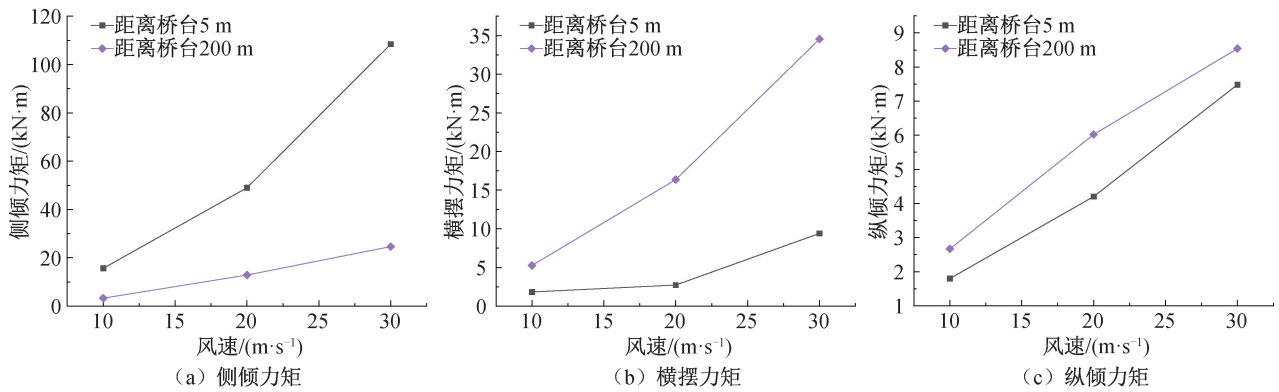


图9 不同风速下货运汽车的气动力矩

Fig. 9 Aerodynamic torque of freight vehicles under different wind speeds

18.325 kN。这是因为货运汽车体积、侧面积较大,侧风敏感性较强导致的。

货运汽车所受横摆力矩、侧倾力矩、纵倾力矩随侧风风速的增加而增大,其中侧倾力矩和横摆力矩随侧风风速的变化较为明显。当侧风风速由10 m/s增加到30 m/s,距离桥台5 m处货运汽车的侧倾力矩由15.642 kN·m增大到108.423 kN·m,横摆力矩由1.833 kN·m增大到9.801 kN·m;距离桥台200 m处货运汽车侧倾力矩由3.301 kN·m增大到24.645 kN·m,横摆力矩由5.261 kN·m增大到34.535 kN·m。纵倾力矩同样有所增加,但增加幅度相对较小。这是因为货运汽车静止在桥梁上,并未向前运动,所以相较于纵倾力矩,侧倾力矩和横摆力矩随侧风风速的增大变化更为显著。

综上所述,随着侧风风速的增大,静止在桥梁上的货运汽车所受到的侧向力、侧倾力矩和横摆力矩变化较为显著,是影响车辆稳定性的主要因素。

3 结论

1)通过建立“车辆-地形-桥梁”的数值简化模型,得到侧风环境下,货运汽车静止在山区高墩桥梁上的流场特性,结果表明:货运汽车车体侧面流场流速较小,车顶上方以及车底位置流场流速较大。没有地形影响的位置,流体流速变化不大。在桥梁上任何位置,随着侧风风速的增大,车身周围流场流速最大区域面积与最大流速不断增大。

2)货运汽车在山区高墩桥梁上不同位置受到侧风影响时,侧向力、侧倾力矩以及横摆力矩成为影响车辆安全性的主要因素。与其他位置的货运汽车相比,距离桥台5、200 m处的货运汽车安全性大大降低。

3)随着侧风风速的增大,静止在山区高墩桥梁上的货运汽车所受气动荷载均有所增大,对于货运汽车的安全性以及稳定性的影响越大。随着侧风风速的增加,货运汽车所受升力、阻力和纵倾力矩增大幅度较小,侧向力、侧倾力矩以及横摆力矩呈倍数增长趋势。

参考文献:

- [1] STERLING M, QUINN A D, CHELI F, et al. A comparison of different methods to evaluate the wind induced forces on a high-sided lorry [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(12): 853-865.
- [2] SUZUKI M, TANEMOTO K, MAEDA T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under crosswinds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1): 209-218.
- [3] BRANDT A, JACOBSON B, SEBBEN S. High speed driving stability of road vehicles under crosswinds: an aerodynamic and vehicle dynamic parametric sensitivity analysis [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2022, 60(7): 2334-2357.
- [4] ZHANG Q W, SU C Q, WANG Y P. Numerical investigation on aerodynamic performance and stability of a sedan under wind-bridge-tunnel road condition [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(5): 3963-3980.
- [5] REYMERT S, RÖNNQUIST A, ØISETH O. Systematic metadata analysis of wind-exposed long-span bridges for road vehicle safety assessments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2022, 27(2): 226-234.
- [6] LELEDAKIS A, ÖSTH J, DAVIDSSON J, et al. The influence of car passenger' sitting postures in intersection crashes [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2021, 157: 106170.
- [7] 龚旭. 重型半挂厢式货车高速侧风气动稳定性分析

- 与优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- GONG X. Analysis and optimization of high-speed aerodynamic stability of a tractor-trailer vehicle in cross winds [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [8] 王露. 风环境下山区高速公路桥隧连接段行车安全影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WANG L. Traffic safety study of mountain highway bridge and tunnel connecting segment under the wind environment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [9] 胡兴军, 丁鹏宇, 秦鹏, 等. 侧风影响下桥上行驶的重型货车气动特性模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(3): 534-538.
- HU X J, DING P Y, QIN P, et al. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of heavy-duty truck driving on bridge within crosswind [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(3): 534-538.
- [10] 王艳. 道路地形对货车侧风行驶气动特性的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- WANG Y. Research on influence of truck within different road terrains on aerodynamic characteristics in crosswind [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [11] 李朱君. 侧风环境下的桥梁行车安全性分析[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2019.
- LI Z J. Safety analysis of bridge driving in side wind environment [D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2019.
- [12] 朱占猛. 高墩桥梁上货运汽车气动特性及防风措施研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- ZHU Z M. Study on aerodynamic characteristics and windproof measures of freight vehicles on high pier bridges [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [13] 詹铠臻, 刘功毫, 袁志群, 等. 强风载荷下桥梁风致行车安全与抗风方法研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(5): 104-111+139.
- ZHAN K Z, LIU G H, YUAN Z Q, et al. Study on wind-induced driving safety on bridge and wind resistant method under strong wind load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(5): 104-111+139.
- [14] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- WANG F J. Computational fluid dynamics analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [15] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- GU Z Q. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [16] 苏铭德, 黄素逸. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- SU M D, HANG S Y. Fundamentals of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [17] 于伟靖. 侧风下类车体瞬态流动结构研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- YU W J. Investigation on unsteady flow structures around a simplified car under the crosswind [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [18] 李尧. 汽车侧风气动特性及操纵性影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- LI Y. Research on aerodynamic characteristics and stability of vehicle under crosswind effects [D]. Chengdu: South-west Jiaotong University, 2018.
- [19] 李杰, 张喆, 张英朝. 侧风对直线行驶卡车操纵稳定性的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(S2): 255-259.
- LI J, ZHANG Z, ZHANG Y C. Effects of crosswind on handling and stability of truck driving in a straight-line [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(S2): 255-259.
- [20] 盛士刚. 公路桥梁侧风风致行车安全研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- SHENG S G. Analysis of vehicle safety under cross wind on the road bridge [D]. Changchun: Jilin University, 2018.

(责任编辑 张爱丽)