

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0021

PENG Guodong, LIU Ziwei, FENG Qijiang, et al. Simulation analysis on the influence of roadside corrugated beam guardrail on blowing snow hazards of separated subgrade[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):277-284. [彭国冬, 刘梓伟, 冯启江, 等. 路侧波形梁护栏对分离式路基风吹雪雪害影响的仿真分析[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1):277-284.]

路侧波形梁护栏对分离式路基风吹雪雪害影响的仿真分析

彭国冬¹, 刘梓伟², 冯启江¹, 张展硕³, 李浩瑄⁴

(1. 锡林郭勒盟乾图交通设计有限责任公司, 内蒙古 锡林浩特 026000; 2. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022; 3. 吉林省高速公路集团有限公司, 吉林 长春 130022; 4. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要: 对内蒙古自治区多条公路调查发现, 设置有防撞护栏的路段雪害严重。由于风吹雪现场监测受降雪量、风力、时间等诸多因素限制, 因此本文采用计算机仿真“数字风洞”的方法, 选择分离式路基中典型的路堤断面形式, 建立路基模型和防撞护栏模型, 定量分析不同防撞护栏设置参数下公路横断面风速流场特性及其影响关系。通过对路面风速控制点的数据及路面整体风速云图分析发现, 防撞护栏阻碍风吹雪的流动, 导致路面风速大幅度降低使大量雪粒子沉积到路面上造成道路积雪, 故在风吹雪多发地区分离式路基路段可通过放缓边坡坡度或采用绳索护栏以确保路侧安全的同时消除或减少雪害的发生。本研究结果可为多雪地区公路分离式路基路侧安全设计与养护提供理论基础与参考依据。

关键词: 公路; 分离式路基; 防撞护栏; 风吹雪; 仿真分析

中图分类号: U417.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0277-08

0 引言

分离式路基是指道路左侧和右侧行车道分开建设, 由双线组成的路基。分离式路基与整体式路基相比, 其左右幅相对独立、自成一体, 有各自的左右路缘带和左右路肩, 可以对道路的平面、纵断面、横断面进行灵活设计, 因此近年来我国公路建设的分离式路段数量增多, 比重逐渐增大^[1-3]。公路风吹雪是指地面上的积雪在风的作用下, 再次进入空中运动并降落的现象, 其积雪深度是自然积雪的 3~8 倍, 它导致的公路雪害包括两方面: 首先会造成公路局部路面深度积雪, 致使道路阻断; 其次会阻挡驾驶员的视线, 造成驾驶员的视程障碍^[4-5]。

早在 20 世纪 30 年代起, 国外就开始对风吹雪进行较大规模的研究, 其中主要研究成果集中在深受风吹雪灾害影响的美国、日本、加拿大等国家。美国著名风雪流学者 Tabler^[6-7]于 2003 年发表专著

《基于防雪栅设计和道路设计的风吹雪防治研究》, 深度阐述道路风吹雪的预防措施, 并总结出可减少路面积雪的公路路基断面设计原则和设计方法。加拿大的交通管理部门在出版的公路设计手册中强调高等级公路雪害的防治主要通过加高路基, 利用风速输送公路上的雪^[8]。日本采用风洞试验的方法研究了挡雪栅栏的防雪机理, 并于 2001 年发表了《根据风洞试验设置不同类型挡雪栅栏的挡雪机理的研究》^[9]。近年来我国的一些专家学者开始从道路设计的角度来研究如何预防风吹雪灾害, 对多雪地区的道路线形和路基进行广泛分析。高鹏飞^[8]通过野外实测风速流场、积雪量和室内风洞试验, 建立了风吹雪数学模型和数据库, 提出了公路路线走向与主风向夹角的设计范围和合理的公路路基断面形式。张林林^[10]用计算机仿真的方法, 模拟风吹雪在遇到不同路基断面形式时的积雪堆积过程, 并提出适宜的路基高度与边坡坡度可以减弱雪害。

收稿日期: 2022-01-08; 修订日期: 2022-05-09

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项“内蒙古特殊环境公路灾变机理及综合防控成套技术研究”资助

作者简介: 彭国冬, 高级工程师, 主要从事于公路桥梁工程研究. E-mail: pengguodong315@163.com

通信作者: 刘梓伟, 硕士研究生, 主要从事于道路交通安全研究. E-mail: 1633863719@qq.com

李楚鹏等^[11]运用数值模拟的方法,针对典型的路堤断面形式,对挡雪板挡雪效果进行了研究。Ma等^[12]采用数值模拟方法研究了导风板对路堑式路基断面风雪流场的影响,讨论了导风板对切割风雪流场的影响,并针对导风板对路堑式路基断面积雪面积、积雪量及能见度进行了研究。

综上所述,目前国内外主要集中研究整体式路基断面下的风吹雪雪害形成机理和防治措施,研究重点主要在路基高度、边坡坡度以及道路走向对风吹雪的影响等方面^[13-15],对分离式路基这种路基断面形式研究较少,对公路交通安全设施研究也比较欠缺。另一方面,根据《公路风吹雪雪害防治技术规程》(DB15/T 435—2020)中有关规定,推荐在雪害中、重度区域的高速公路和一级公路路基断面形式宜采用分离式断面^[16]。另外,作者团队通过对内蒙古自治区G16、G1013等多条公路雪害路段调查发现,采用分离式路基断面的路段仍然会造成一定程度的风吹雪雪害,尤其是在设置有防撞护栏的路段道路积雪最为严重。因此,本文通过计算机仿真的方法,模拟分析波形梁防撞护栏不同设置条件对分离式路基路段的典型路堤断面风吹雪及其雪害的影响,从而为上述路段风吹雪雪害防治和交通安全设施设置优化提供参考依据。

1 仿真分析基础

1.1 仿真方法简介

由于风吹雪现场监测受季节、气候、风力等多种因素制约,且可能会在研究期内出现风吹雪发生频率较少或风吹雪强度较低等现象,易造成有效数据不足,影响研究结果。故本文采用计算机仿真“数字风洞”的实验方法研究路侧防撞护栏对分离式路基风吹雪雪害的影响^[17-19]。

1.2 仿真模型构建

已有的公路风吹雪雪害研究表明,从中观和微观层面而言,在雪源充足的情况下,公路横断面流场特性很大程度上决定了风吹雪的积雪规律,即,公路路基断面形式是影响公路风吹雪雪害发生及其严重程度直接的、主导性的因素。除个别过低和过高路堤外,大多数路堤是不会形成明显的风吹雪积雪的。适宜的路基边坡可保障风雪流的连续性,使其通过路面,边坡越缓越不易在路面形成风吹雪积雪^[4-7]。

如前所述,由于现有研究已经对路堤高度、边坡等道路设计参数进行了系统研究,而本文的研究目标是分析和验证防撞护栏设置对分离式路基路段路堤断面风吹雪雪害影响,因此,在建模阶段主要考虑路基模型、防撞护栏模型、入风口、出风口以及计算边界的建模,同时,在模型建立过程中舍去了螺栓等零碎部件模型的建立。在仿真时考虑了流体的湍流特性,选取 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟计算,同时针对网格划分进行了如下处理:护栏断面及立柱建模尺寸为20~30 mm,护栏长度方向为50 mm,倒角及连接处做细化处理。

1.2.1 路基模型建立

根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)规定,风吹雪地区路基设计应根据当地风、雪情况及地形条件,采用合理的路基断面形式,路基和路肩上不宜设置各种设施,并应清除路基两侧距边坡脚各20 m范围内的障碍物和构造物,同时应保障适当高度的路堤保证风雪流顺利通过^[20]。同时,结合内蒙古自治区境内G5511、G1013、G16等多条公路分离式路基路段的实际建设情况,本文选用如图1所示的这一典型的分离式路堤断面形式作为路基仿真模型,其中路基宽度设为39 m,路堤高度设为6 m,路基外侧边坡坡度设为1:2,路基内侧边坡坡度设为1:3。

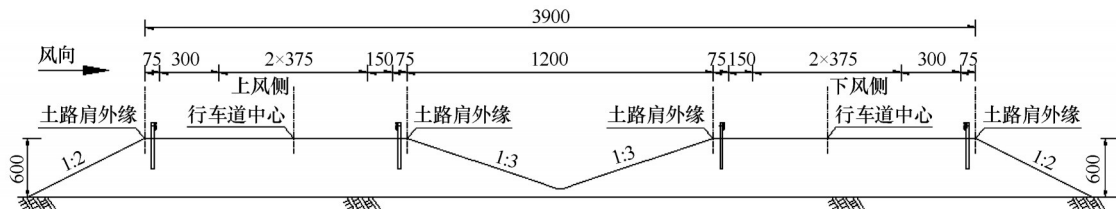


图1 分离式路堤断面设计图(单位:cm)

Fig. 1 Section design of separated embankment (unit: cm)

1.2.2 防撞护栏模型建立

对内蒙古自治区G16、G1013等多条公路调查

可知,公路路侧防撞护栏多采用波形梁护栏,根据《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)

中的规定,本文仿真模拟路侧防撞护栏采用A级波形梁护栏,护栏截面尺寸及护栏模型见图2所示^[21]。同时在对路侧防撞护栏仿真时,需要确定护栏长度,护栏太短时,不足以表现来流经过护栏的真实场景,为排除护栏两端对整个流场的影响,护栏长度应取足够长。《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)中规定在进行实车足尺碰撞试验时,公路波形梁护栏最小设置长度为70 m,参考此标准,在仿真计算时,选取护栏长度为100 m,足以排除两侧干扰,如图3所示护栏置于流场域中^[22]。

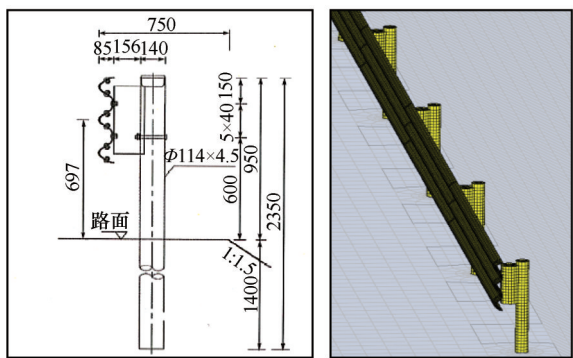


图2 路侧防撞护栏截面尺寸模型(单位:mm)

Fig. 2 Section size model of side crash guardrail (unit: mm)

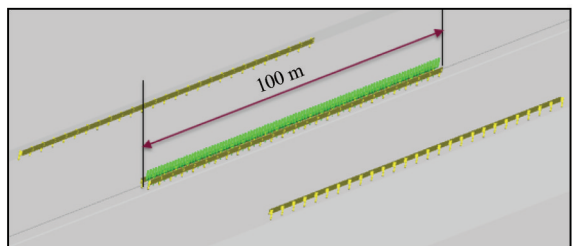


图3 护栏长度模型

Fig. 3 Length model of guardrail

1.2.3 计算域设置

流体计算域计算原则是要求物体对流场的扰动传播到外流场计算域的最外边界时可以忽略不计。一般情况下,计算域长度取物体参考长度的5倍以上即为合理^[23-24]。本文以分离式路堤断面和防撞护栏为研究对象,其中路基宽度为39 m,计算域大小取为:400 m×300 m×150 m。计算域长400 m,其中路基断面距入风口约100 m,距出风口约300 m;计算域宽取300 m。

2 仿真方案

2.1 仿真情形设定

实地调查发现,设置有防撞护栏的路段雪害相

对严重,而《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81—2017)等现行标准、规范规定,公路路侧或中央分隔带可通过保障合理的净区宽度来降低车辆驶出路外或驶入对向车行道的事故的严重程度,当路侧净区宽度足够大时可以不设置防撞护栏^[25]。因此,仿真模拟在分离式路堤断面的条件下,分别建立有无防撞护栏等3种组合数据模型,具体情形如下:

- (1)第一种情形:未设置防撞护栏;
- (2)第二种情形:设置路基外侧防撞护栏;
- (3)第三种情形:设置路基外侧防撞护栏和路基内侧防撞护栏。

2.2 路面风速控制点的选取

选取分离式路堤断面风速流场中上、下风侧的行车道中心、路基内侧土路肩外缘和路基外侧土路肩外缘6处为风速的控制点(或观测点),风速控制点的横向位置沿路基断面由上风侧至下风侧,横向具体位置信息如图4所示。风速控制点的纵向位置即路基断面的选取位置,位于整个防撞护栏系统中心位置,且为立柱之间的横梁中心点,如图5所示,各风速控制点的空间坐标如表1所示。

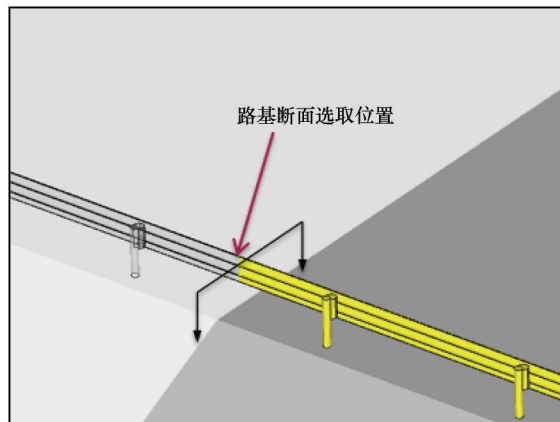


图4 路基断面选取位置

Fig. 4 Location of subgrade section

2.3 仿真参数设置

通过对内蒙古自治区多条公路雪害路段野外调查发现,冬季积雪期诱发风吹雪现象的常见风速范围为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 至 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时,根据国家风力等级划分标准,3级风、5级风和7级风的风速上限分别为 $5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $17.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,因此,为了方便进行仿真分析,将 $5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $17.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为仿真实验的入口水平风速,从而分析不同风速条件下风吹雪雪害的发展规律。

分离式路堤断面路侧防撞护栏风吹雪雪害仿

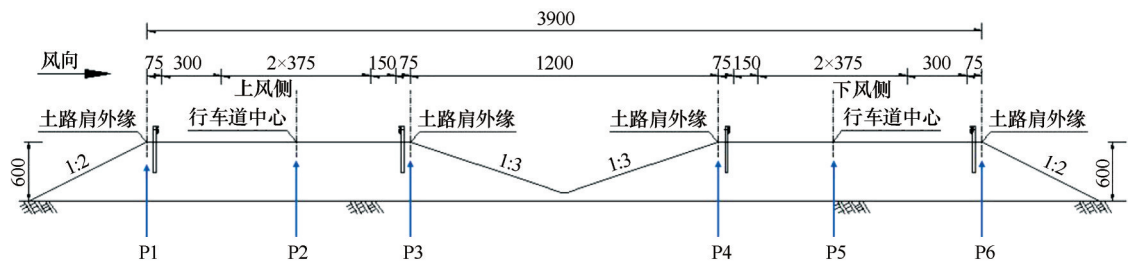


图5 分离式路堤断面风速控制点(单位:cm)

Fig. 5 Control points for wind speed of separated embankment section (unit: cm)

表1 分离式路堤断面风速点空间坐标
Table 1 Spatial coordinates of wind speed points of separated embankment section

位置	X/m	Y/m	Z/m
P1	-13.5	2.0	0
P2	-6.0	2.0	0
P3	0	2.0	0
P4	12.0	2.0	0
P5	18.0	2.0	0
P6	25.5	2.0	0

真模拟情形见表2,仿真模拟时的进口水平风速 v ,分别取 $5.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $17.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在所有模型中,路侧防撞护栏采用A级波形梁护栏,具体尺寸见图2,所有仿真分析风向设置为从左至右。

3 仿真结果分析

3.1 第一种情形仿真结果分析

在第一种情况下(未设置防撞护栏)仿真得到的路面控制点风速数据见表3,路面整体风速变化

趋势见图6所示,仿真得到的风速云图见图7(取:入口风速 $v=17.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

通过对表3、图6和图7中的数据图像分析可知,远处的来流风在上风侧坡脚处受坡脚形状的影响,在分离式路堤迎风坡坡脚处形成涡流使风速降低;随后来流风因迎风边坡的影响,导致过流断面减小使风速逐渐提高并在迎风侧土路肩处达到最大值。来流风经过迎风侧土路肩时,受其形状的影响形成涡流,从而导致来流风风速在路面处快速降低并在上风侧行车道中心达到最小。来流风经过上风侧行车道后风速略有升高,随后由于分离式路堤断面的影响,在路基中央处形成了一个低速旋涡。当来流风经过下风侧行车道时,所受影响与通过上风侧行车道时相似,在迎风侧土路基处由于涡流的影响造成风速降低并在下风侧行车道中心处达到最小,随后当来流风到达下风侧土路肩处时,因为流场断面的变化,风速迅速提高。从以上分析结果来看,由于缆索护栏其缆索截面很小,对风速及流场影响可以忽略不计,因此,缆索护栏对公路风吹雪的影响等同于仿真分析中的第一种情形。

表2 防撞护栏模拟计算情形统计

Table 2 Simulation calculation statistics of anti-collision guardrail

变量	变化范围	选取个数	第一种情形	第二种情形	第三种情形
风速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5.4、10.7、17.1	3	3	3	3
路基	分离式	1			
路基外侧防撞护栏		1			
路基内侧防撞护栏		1			

注:同一种情形采用3个风速做了3个模拟仿真,一共三种情形:情形一无未设置护栏,情形二设置外侧护栏,情形三为内外均设置护栏,共计算 $3\times3=9$ 组。

Note: in the same case, three wind speeds are used for simulation. There are three cases in total, as follows: 1) no anti-collision guardrail is set; 2) outer guardrail is set; 3) both inside and outside guardrails are set, and $3\times3=9$ groups are calculated.

3.2 第二种情形仿真结果分析

在第二种情况下(设置路基外侧护栏)仿真得到的控制点风速数据见表4,路面整体风速变化趋

势见图8所示,仿真得到的风速云图见图9(取:入口风速 $v=17.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

通过对表4、图8和图9的数据图像分析可知,

表3 第一种情形下分离式路堤断面路面控制点风速值

Table 3 The wind speed value of road control point in the first case

位置	X/m	计算风速值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
		5.4	10.7	17.1
P1	-13.5	9.227	18.464	29.679
P2	-6.0	3.749	7.696	12.558
P3	0	5.450	11.116	18.082
P4	12.0	5.671	11.514	18.694
P5	18.0	3.969	8.087	13.144
P6	25.5	7.218	14.711	23.911

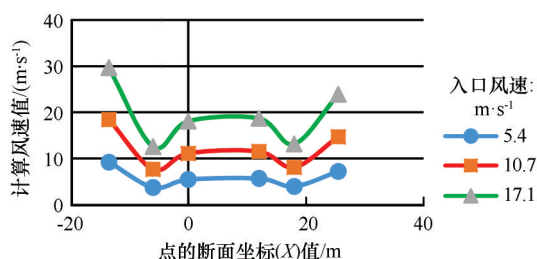


图6 第一种情形下分离式路堤断面路面风速趋势

Fig. 6 The trend of road surface wind speed in the first case

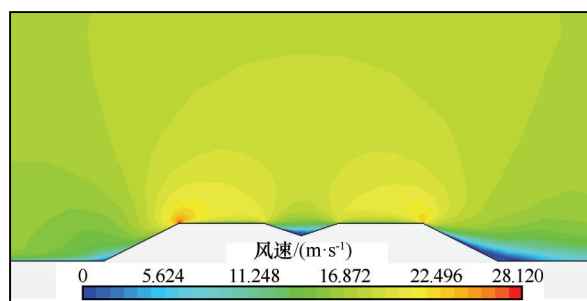
图7 第一种情形下分离式路堤断面的风速云图
(入口风速 $v=17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)Fig. 7 Cloud image of wind speed in the first case
($v=17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

表4 第二种情形下分离式路堤断面路面控制点风速值

Table 4 The wind speed value of road control point in the second case

位置	X/m	计算风速值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
		5.4	10.7	17.1
P1	-13.5	5.985	11.993	19.215
P2	-6.0	3.113	6.318	10.158
P3	0	1.406	2.882	4.493
P4	12.0	0.075	0.092	0.638
P5	18.0	0.030	0.094	0.280
P6	25.5	0.474	1.016	0.411

在第一种情形的基础上设置路基外侧防撞护栏后,来流风经过路侧防撞护栏时,受上风侧波形梁护栏

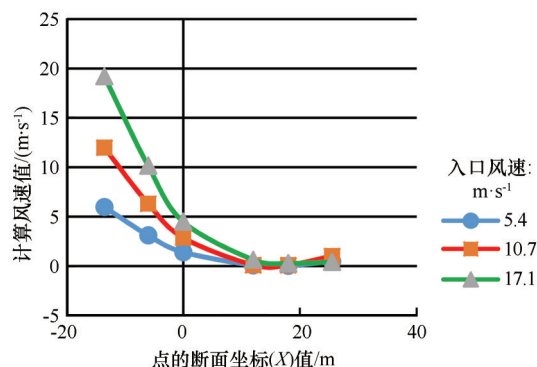
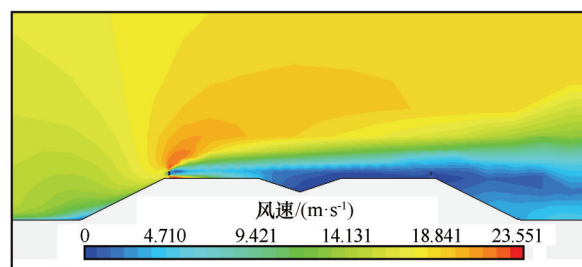


图8 第二种情形下分离式路堤断面路面风速趋势

Fig. 8 The trend of road surface wind speed in the second case

图9 第二种情形下分离式路堤断面的风速云图
(入口风速 $v=17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)Fig. 9 Cloud image of wind speed in the second case
($v=17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

断面形状的影响,在防撞护栏上下两端形成加速气流,在防撞护栏背部形成弱风区,上风侧行车道风速大幅度降低。来流风经过上风侧行车道后至下风侧行车道中心处风速持续降低,在通过下风侧行车道中心后风速略有增加,但增加幅度不大。

3.3 第三种情形仿真结果分析

在第三种情形下(设置路基外侧防撞护栏和路基内侧防撞护栏)仿真得到的控制点风速数据见表5,路面整体风速变化趋势见图10所示,仿真得到的风速云图见图11(取:入口风速 $v=17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

表5 第三种情形下分离式路堤断面路面控制点风速值

Table 5 The wind speed value of road control point in the third case

位置	X/m	计算风速值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
		5.4	10.7	17.1
P1	-13.5	5.929	11.878	19.003
P2	-6.0	3.060	6.208	9.956
P3	0.0	1.856	3.746	5.808
P4	12.0	0.243	0.452	1.698
P5	18.0	0.093	0.164	0.777
P6	25.5	0.302	0.646	1.144

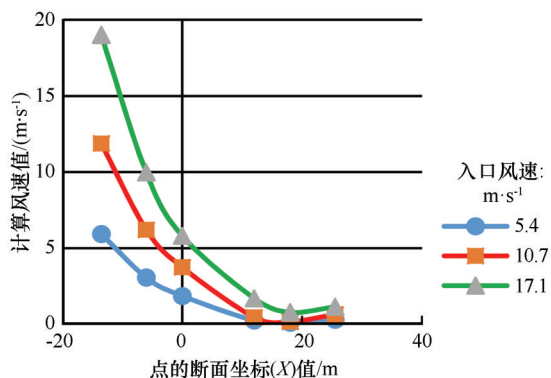
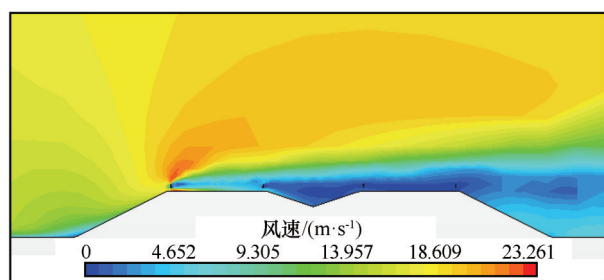


图 10 第三种情形下分离式路堤断面路面风速趋势

Fig. 10 The trend of road surface wind speed in the third case

图 11 第三种情形下分离式路堤断面的风速云图
(入口风速 $v=17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)Fig. 11 Cloud image of wind speed in the second case
($v=17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

通过对表 5、图 10 和图 11 的数据图像分析可知,第三种情形在第二种情形的基础上增加了路基内侧防撞护栏,因此来流风经过上风侧行车道时与第二种情形风速变化相似。由于路基内侧防撞护栏的尺寸及安装高度与路基外侧防撞护栏一致,路基内侧防撞护栏上端和下端虽有加速作用,使得来流风通过上风侧车道中央土路肩处至下风侧车道风速有所提高,但效果不明显,上风侧至下风侧控

制点整体呈下降趋势。来流风通过下风侧行车道中心后与第二种情形相似,风速略有增加。

3.4 同一入口风速下不同防撞护栏设置方式时的仿真结果分析

根据上文中在同一情形下分离式路堤断面不同入口风速的数据,将数据按入口风速进行划分,得到分别在 $v=5.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下不同防撞护栏设置情形的路面控制点风速,并用平滑的曲线连接各控制点风速,得到同一风速下不同防撞护栏设置情形时分离式路堤断面的路面整体风速变化。

绘制出的 $v=5.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的路面整体风速变化,如图 12 所示。其中:jc-1 表示第一种情形下分离式路基断面风速变化曲线;jc-2 表示第二种情形分离式路基断面风速变化曲线;jc-3 表示第三种情形下分离式路基断面风速变化曲线。

通过对图 12 所示的不同入口风速情形下分离式路堤断面的路面风速变化分析可知,其变化趋势基本一致;区别在于,当入口风速增大,分离式路堤断面风速控制点的风速及其变化幅度随之增大。对三个风速变化图中不同防撞护栏设置情形的风速曲线对比分析,安装防撞护栏后,上风侧土路肩至上风侧行车道中心路面风速比未安装防撞护栏略低。但由于防撞护栏的影响,从上风侧行车道中心至下风侧外缘土路肩路面风速比未安装防撞护栏有大幅度降低,因此很有可能造成路面积雪。同时由于路基内侧护栏的加速作用,安装路基内侧护栏导致从上风侧行车道中心至下风侧行车道中心路面的风速相比于未安装路基内侧护栏略有提高,但增加幅度微弱,所以仿真分析结果表明路基防撞

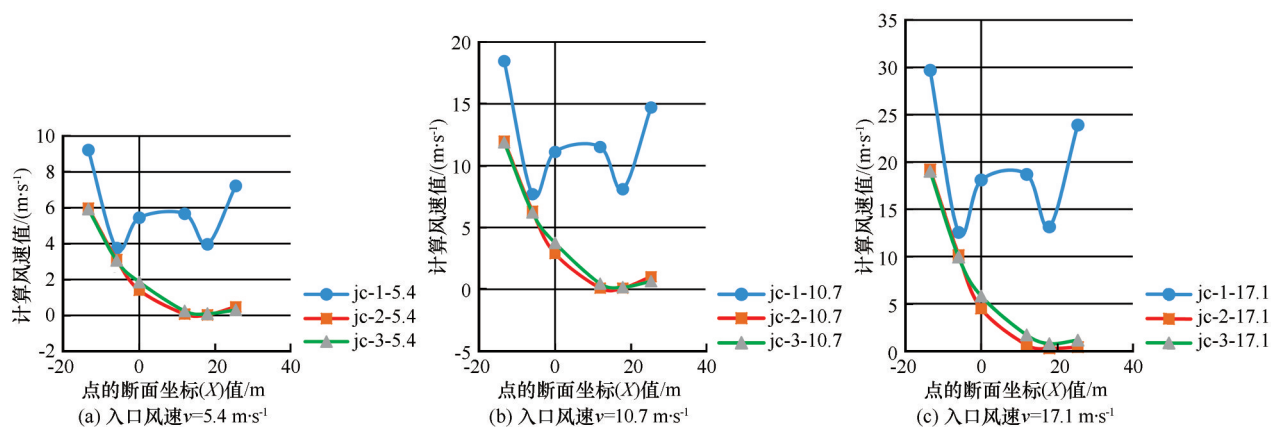


图 12 不同情形下分离式路堤断面路面风速变化

Fig. 12 Pavement wind speed changes under different conditions

护栏是引起分离式路堤断面风吹雪雪害的重要因素。

4 结论

基于对内蒙古自治区多条高速公路风吹雪灾害野外观测资料,采用计算机仿真“数字风洞”的实验方法,建立分离式公路路基断面和波形梁防撞护栏模型,仿真分析不同防撞护栏设置条件下分离式路堤断面对风吹雪雪害的影响,主要得到以下结论:

(1)设置防撞护栏后,由于防撞护栏的阻挡导致风速降低,同时由于护栏形状的不规则性,导致在护栏前后的风吹雪形成涡流,雪粒子运动的动能减小,在路面和边坡处逐渐沉积下来形成积雪。而且,由于波形梁护栏高度有限,挡雪的能力受限,当风吹雪持续到一定时间后,大量雪粒子翻越护栏在路面上形成严重积雪。

(2)设置防撞护栏后,由于入口风速越大,分离式路堤断面风速控制点的风速降低幅度越大,故在大风区域内的分离式路基路段更易造成积雪,所以风吹雪严重地区建设分离式路基公路时,应考虑路侧防撞护栏对雪害的影响。即,在投资、地形条件允许的情况下可通过放缓边坡坡度使其符合《公路交通安全设施设计细则》中的可以不设置路侧防撞护栏的有关规定,从而采取不设置路侧护栏达到避免或减少风吹雪雪害发生的目的;如若需要设置路侧护栏,尽可能设置对风吹雪影响较小的缆索护栏;如若需要设置波形梁等路侧护栏,应同步采取路侧雪害工程防治技术措施,以减轻护栏带来的风吹雪危害。

参考文献(References):

- [1] Xu Yingzhu. Discussion on design of separated subgrade for old road reconstruction[J]. Industrial Technology Innovation 2019, 1(11): 78-79. [徐映珠. 旧路改造分离式路基设计探讨[J]. 产业科技创新, 2019, 1(11): 78-79.]
- [2] Fan Ying. The design method of separated sub-grade[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(17): 158-160. [范英. 分离式路基设计方法[J]. 山西建筑, 2014, 40(17): 158-160.]
- [3] Zhang Qiang, Zhang Shizhou. Application of separated subgrade in expressway design[J]. Northern Communications, 2012(5): 37-39. [张强, 张世洲. 分离式路基在高速公路设计中的应用[J]. 北方交通, 2012(5): 37-39.]
- [4] Xi Jianfeng. Research on mechanism and forecast of highway snowdrift hazard[D]. Changchun: Jilin University, 2007. [席建锋. 公路风吹雪雪害形成机理及预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.]
- [5] Ying Chengliang. Research on the countermeasures of the blowing snow hazards on highways[D]. Changchun: Jilin University, 2007. [应成亮. 公路风吹雪雪害防治技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.]
- [6] Tabler R D. Design guidelines for the control of blowing and drifting snow[M]. Washington, D. C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.
- [7] Tabler R D. Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design (Final report)[R]. National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board. Niwot, Colorado: the National Academie, 2003.
- [8] Gao Pengfei. Research on control technology of highway snowdrift hazard[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. [高鹏飞. 公路风吹雪雪害防治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.]
- [9] Ren Zhicheng. Research on snow distribution pattern and prevention technology of typical subgrade section in wind-blown snow area[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. [任志成. 风吹雪地区典型路基断面面积雪分布规律及防治技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.]
- [10] Zhang Linlin. Research on snowdrifts and snow disaster simulation technology of road[D]. Changchun: Jilin University, 2005. [张林林. 公路风吹雪雪害仿真技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.]
- [11] Li Chupeng, Chen Fang, Gao Chong. Research on setting ways of snow board with fluent[J]. Technology and Economy in Areas of Communications, 2015, 17(5): 107-110. [李楚鹏, 陈芳, 高崇. 基于Fluent的挡雪板设置方式研究[J]. 交通科技与经济, 2015, 17(5): 107-110.]
- [12] Ma Wenyong, Luo Yan, Li Feiqiang, et al. The influence of wind deflectors on the snow distribution in road cuttings during snowdrift[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 196: 103505.
- [13] Liu Qingkuan, Liang Pengfei, Gao Ling, et al. Effects of side slope inclination on drifting snow of embankment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(3): 87-94. [刘庆宽, 梁鹏飞, 高岭, 等. 边坡坡度对路堤风吹雪影响研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 87-94.]
- [14] Hu Yi, Zhang Zhigang, Feng Zongbao, et al. Computer simulation of effect of different subgrade cross-section on snow flow field[J]. Architecture Technology, 2020, 51(5): 610-614. [胡毅, 张志刚, 冯宗宝, 等. 不同路基断面对风雪流场影响的计算机仿真模拟及分析研究[J]. 建筑技术, 2020, 51(5): 610-614.]
- [15] Zhang Xia. Highway subgrade and roadside design for preventing against blowing snow hazards[D]. Changchun: Jilin University, 2007. [张霞. 面向风吹雪雪害防治的公路路基与路侧设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.]
- [16] Local standards of Inner Mongolia Autonomous Region. Technical alregulation for control of blowing and drifting snow onto highways: DB15/T 435—2020[S]. Inner Mongolia: Inner Mongolia autonomous region market supervision and Administration Bureau, 2020. [内蒙古自治区地方标准. 公路风吹雪雪害防治技术规程: DB15/T 435—2020[S]. 内蒙古: 内蒙古自治区市场监督管理局, 2020.]
- [17] Lü Xiaohui, Huang Ning, Tong Ding. Wind tunnel experiments on natural snow[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2012, 42(5): 622-634. [吕晓辉, 黄宁, 佟鼎. 天然雪的风洞实验研究[J]. 中国科学(技术科学), 2012, 42(5): 622-634.]
- [18] Zheng Lili, Xi Jianfeng, Ding Tongqiang, et al. Flow field observation and simulation of road snow-drift[J]. Journal of

- Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(2): 260-263. [郑黎黎, 席建锋, 丁同强, 等. 公路风吹雪流场测定及仿真分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 260-263.]
- [19] Shi Guanglei. A general model of blowing snow: saltation and suspension[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [时光磊. 风吹雪跃移和悬移运动的综合模型[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]
- [20] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. [中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.]
- [21] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design guidelines for highway safety facilities: JTG/T D81—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2018. [中华人民共和国交通运输部. 公路交通安全设施设计细则: JTG/T D81—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.]
- [22] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard for safety performance evaluation of highway barriers: JTG B05-01—2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013. [中华人民共和国行业标准. 公路护栏安全性能评价标准: JTG B05-01—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.]
- [23] Zhao Yinbao. Optimization design of geometric parameters for a SUV body local on external flow field[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019. [赵银宝. 基于外流场的某SUV车身局部几何参数优化[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.]
- [24] Jiang Yongxin. Analysis and correction of automobile wind tunnel test data under high blocking conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2021. [蒋永欣. 高阻塞汽车风洞试验数据分析及修正[D]. 长春: 吉林大学, 2021.]
- [25] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design specifications for highway safety facilities: JTG D81—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2018. [中华人民共和国交通运输部. 公路交通安全设施设计规范: JTG D81—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.]

Simulation analysis on the influence of roadside corrugated beam guardrail on blowing snow hazards of separated subgrade

PENG Guodong¹, LIU Ziwei², FENG Qijiang¹, ZHANG Zhanshuo³, LI Haoxuan⁴

(1. Xilin Gol League Qian Tu Traffic Design Co. LTD, Xilinhot 026000, Inner Mongolia, China; 2. School of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Jilin Province Expressway Group Co. LTD, Changchun 130022, China; 4. Inner Mongolia Transportation Design and Research Institute Co. LTD, Hohhot 010010, China)

Abstract: According to the investigation of several roads in Inner Mongolia Autonomous Region, it is found that the sections with collision guardrails have serious snow hazards. Due to the limit of many factors such as snowfall, winds, time and research period, it is difficult to monitor the snow drift on site. Therefore, the computer simulation “digital wind tunnel” is used to select the typical embankment section form in the separated subgrade, establish the subgrade model and collision guardrail model, and quantitatively analyze the characteristics and influence relationship of different collision guardrail setting parameters on the wind speed and flow field of highway section. Through the analysis of the data of the pavement wind speed control points and the overall wind speed cloud map of the pavement, the irregularity of the shape of the anti-collision guardrail hinders the flow of wind-blown snow, resulting in a significant reduction in the pavement wind speed, causing a large number of snow particles to deposit on the pavement, resulting in road snow. Therefore, in areas with frequent wind-blown snow, the separated subgrade section may slow down the slope gradient or use cable guardrail to ensure the safety of the roadside and eliminate or reduce the occurrence of snow damage. Therefore, this paper can provide theoretical basis and reference for the design and maintenance of roadside collision guardrail of highway separated subgrade in snowy areas.

Key words: highway; separate subgrade; collision guardrails; snow drift; emulation analysis

(责任编辑: 李志军)