

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0164

WEI Jiabei. Study on the snowdrift disaster influenced by w-beam barrier used in expressway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1887-1897. [魏佳北. 高速公路波形梁护栏对风吹雪灾害的影响研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1887-1897.]

# 高速公路波形梁护栏对风吹雪灾害的影响研究

魏佳北

(中铁建苏州设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:** 风吹雪是新疆道路交通典型的雪害形式之一,其对道路交通的影响主要体现在降低行车能见度和导致路面大量积雪造成交通中断。新疆地区道路沿线风吹雪灾害呈现出“点多线长面广”且时空分布不均匀的特点,风吹雪涉及到风-雪-温度-湿度等多场耦合,是非常复杂的科学问题。同时,风吹雪灾害防治也是寒区道路交通基础设施建设和运营中亟需解决的现实问题。对于位于风吹雪多发地区的高速公路而言,由波形梁护栏引起的道路风吹雪灾害越来越突出,但目前尚缺乏对波形梁护栏这种高速公路附属设施加深风吹雪灾害的深入研究。针对上述现状,为探究其成因和防治方法,以新疆京新高速公路(G7)为工程背景,设计了波形梁护栏、缆索护栏和无护栏路堤的现场模型试验,并结合数值模拟及公路现场调研等方法,研究了高速公路波形梁护栏和缆索护栏对路面风吹雪灾害的影响,得出设置波形梁护栏和缆索护栏等的路堤路面上的风雪场分布规律。研究表明,风雪流从上风侧路堤坡脚处增速,到达设置在路面路肩处或中央分隔带处的波形梁处,通过波形梁护栏下部空隙运动至路面,波形梁护栏对近地面风场产生扰动,使得梁后出现弱风区,导致大量雪粒沉积。尤其当波形梁护栏下部空隙被雪填满后,波形梁后侧的路面积雪覆盖行车道,严重影响公路通行能力,而不设置护栏或者设置缆索护栏的地段有利于风雪流通过。考虑到未来气候变化的不确定性,为更好防范风吹雪对交通运营安全的影响,提出可将部分风吹雪灾害严重地段的波形梁护栏更换为符合高速公路安全要求的缆索护栏的初步建议,也可增设防雪栅、挡雪板及挡雪墙等其他防风雪措施。研究成果可为高速公路运营期间的除雪保畅工作及新疆风吹雪多发地区高速公路的建设提供有益借鉴。

**关键词:** 风吹雪; 高速公路; 波形梁护栏; 模型试验; 数值模拟

**中图分类号:** U416.1\*68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1887-11

## 0 引言

风吹雪也称风雪流,是积雪在风力的作用下流向输运的一种常见自然现象<sup>[1]</sup>,在全球分布广泛,频繁发生,对自然环境和社会经济的影响很大,其涉及到风场-雪颗粒-温度-湿度场的多场耦合,且具有随机性和多尺度的科学共性,至今尚缺乏系统化的解决方法<sup>[2-4]</sup>。我国新疆阿尔泰山和天山西部、北部及东北地区是风吹雪现象高发地区<sup>[5]</sup>,风吹雪对道路交通的影响体现在降低行车能见度和导致路面大量积雪中断交通。新疆地区道路沿线风吹雪灾害呈现出“点多线长面广”且时空分布不均匀的特点。由于早期道路建设等级低,缺少针对性的

防风设施,风吹雪发生时多采取封闭道路的方式来清除雪害。近年来,我国西部地区大力开展交通基础设施建设,寒区的高速公路具有等级高、运营条件严格、受风吹雪影响大的特点,因此在高速公路工程设计、建设与运营全生命周期中,风吹雪灾害防治是需引起重视和亟待解决的现实问题。

风吹雪作为世界性难题,在国外研究的百年历史中,主要侧重于风吹雪机理等基础理论和交通风雪灾害防治技术应用。例如,一些国外学者在南北极附近以及加拿大、瑞士等地测试了风吹雪发生时的风速、风向、温湿度、雪粒浓度、风吹雪频率、风吹雪运输总量和悬移通量等参数<sup>[6-10]</sup>,在交通防雪工

收稿日期: 2022-04-29; 修订日期: 2022-08-04

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(2018-C54); 中国铁建投资集团有限公司京新高速科技研发项目(2018)资助

作者简介: 魏佳北,高级工程师,主要从事交通工程设计咨询、生态环保工程的科研和管理工作. E-mail: 1545241318@qq.com

程中采用挡雪墙、防雪栅栏以及防雪网等措施<sup>[11]</sup>, 均可作为防雪工程设计提供借鉴。我国对风吹雪的研究始于 20 世纪 60 年代。1967 年, 中国科学院兰州冰川冻土研究所和兰州沙漠研究所(现为中国科学院西北生态环境资源研究院)、新疆交通厅公路管理局、中国科学院新疆地理研究所(现为中国科学院新疆生态与地理研究所)等单位系统开展了天山风雪流的野外观测和风洞模拟实验研究, 得出了天山西部山区雪粒起动速度、时空分布与运动特征, 提出了不同地形地貌和路基形式的风雪流场结构及防雪技术。随后与新疆、黑龙江、西藏等省(区)交通厅和农牧厅共同研究了我国西北、西南和东北地区的风雪流。2002 年, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所(现为中国科学院西北生态环境资源研究院)主持的“中国天山公路风吹雪研究和大型创新防治工程”项目获国家科学技术进步奖二等奖, 发明的造价低、利用自然风力吹走路面积雪和吹刮宽度更大的透风式下导风等新技术, 在新疆 218 国道天山艾肯达坂成功实施<sup>[12]</sup>。2002—2006 年, 内蒙古锡林郭勒盟交通科学研究所、黑龙江省交通科学研究所、新疆生产建设兵团勘测设计院公路勘察设计分院开展了“公路风吹雪雪害防治技术研究”, 在风吹雪形成机理、运动规律、时空分布及其灾害防治等方面取得较多成果<sup>[13]</sup>。近年来, 高寒地区大量的交通基础设施建设和运营中面临的风吹雪问题逐渐增多, 因此在风吹雪基础理论及工程应用上的研究进展较快, 例如, 张家平等<sup>[14]</sup>通过现场调研发现地面起伏对地表风速流场改变影响较大, 山地较丘陵发生风吹雪灾害频率大, 平原发生风吹雪可能性较小; 施佳誉等<sup>[15]</sup>分析了白茫雪山走廊段的雪阻灾害, 得出道路周边地形和植被覆盖情况影响风吹雪灾害形成, 以及迎风半路堑和全路堑路基会加剧风吹雪灾害的结论; 刘庆宽等<sup>[16]</sup>基于模型试验和数值分析认为路堤迎风坡坡度影响路面积雪厚度, 并给出了路面不易积雪的临界边坡坡度为 40°~45°; 陈领等<sup>[17]</sup>基于风洞试验研究了青藏高原公路路基周边风场特征等, 上述成果为道路工程防风吹雪设计提供了理论支持。

风吹雪的发生受多种因素制约, 包括地形地貌、风场条件、地面粗糙度、降雪量以及雪的物理学性质等, 对于风吹雪多发地区的高速公路而言, 近年来由于波形梁护栏导致的道路路面积雪问题更加突出<sup>[18-19]</sup>, 但是目前尚缺乏对波形梁护栏这种

高速公路附属设施加深风吹雪灾害的深入研究。本文基于新疆京新高速公路(G7)实际, 采用模型试验、数值分析和现场调研的方法, 研究了波形梁护栏对高速公路风吹雪的影响, 并根据高速公路波形梁护栏的安全防护要求, 结合新疆其他高速公路护栏应用情况, 给出采用新型缆索护栏或者增设防雪栅和挡雪板等防雪设施的建议。

## 1 现场模型试验

### 1.1 试验原理及相似性

现场模型试验一般通过小比例尺模型试验获取相关数据, 其具有实际结构的部分特征, 与采用模拟雪介质和恒定风场的室内风洞试验以及现场实体工程试验相比, 在野外风雪环境中开展风吹雪现场模型试验的主要优点有: 可以控制主要试验参数而不受环境条件的限制与影响, 便于改变试验参数并进行对比等。Tabler<sup>[20]</sup>在 1986 年进行了 6 cm 高的挡雪板缩尺模型与实际 3.8 m 高的挡雪板对比试验, 结果表明二者积雪形状几何相似。这为现场采用缩小比例模型研究风吹雪积雪问题提供了思路。

本研究将模型和实际结构物风吹雪形成的时间对应, 以满足时间尺度相似。根据风洞试验中的雪粒运动时间相似, 即基于颗粒的漂移质量相似公式和颗粒的漂移体积相似公式, 如式(1)和式(2)。

$$\left(\frac{ut}{L}\right)_p = \left(\frac{ut}{L}\right)_m \quad (1)$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_p} \frac{ut}{L}\right)_p = \left(\frac{\rho}{\rho_p} \frac{ut}{L}\right)_m \quad (2)$$

式中: 下标  $p$  和  $m$  分别代表原型与模型;  $L$  是几何长度。

由于现场试验中风速  $u$ 、颗粒密度  $\rho$ 、模型  $\rho_p$  与原型相同, 因此式(1)和式(2)统一简化为:

$$\left(\frac{t}{L}\right)_p = \left(\frac{t}{L}\right)_m \quad (3)$$

模型与原型的风雪流作用时间以及几何比例相同。考虑到现场不同时间段风速有差异, 在平均风速大致相同的情况下, 时间比尺仅可用于估算达到某一积雪程度的模型与原型的时间比。为避免关键构件尺寸过小导致试验结果失真, 部分小尺寸部件采用较大的缩尺比。Peterson 等<sup>[21]</sup>进行现场灌木阻雪试验时, 模型整体缩尺比采用了 1:20, 灌木模型茎部采用更大缩尺比, 对试验结果无明显影响。

新疆京新高速公路(G7)伊吾-木垒段的护栏形

式主要包括,波形梁护栏,缆索护栏以及某些特殊地段的无护栏形式。波形梁护栏是一种半刚性护栏,本条高速公路大量采用三波形梁护栏,梁高为 506 mm,下部空隙离地高为 444 mm,总高 950 mm,适用于路侧一至八级防护和中央分隔带二至七级防护。缆索护栏是一种柔性护栏,由端部结构、中

间端部结构、中间立柱、托架、缆索和索端锚具等组成。本文根据实际应用,设计了三种模型,分别为无护栏路堤、波形梁护栏路堤以及缆索护栏路堤模型,路堤本体缩尺比采用 1:45,上部护栏采用 1:25 缩尺比,如表 1 所示。制作好的模型放置于户外,2021 年 12 月 28 日试验情况见图 1。

表 1 路堤模型尺寸表

Table 1 Model size of embankment

路堤类型	路堤高度 $H$	路基面宽度 $L1$	边坡坡率	护栏高度	路基基底宽度 $L2$	路堤长度 $L3$
原型路堤	6.0 m	27.0 m	1:1.5	0.95 m	40.5 m	45.0 m
模型路堤	13.0 cm	60.0 cm	1:1.5	4.0 cm	99.0 cm	100.0 cm

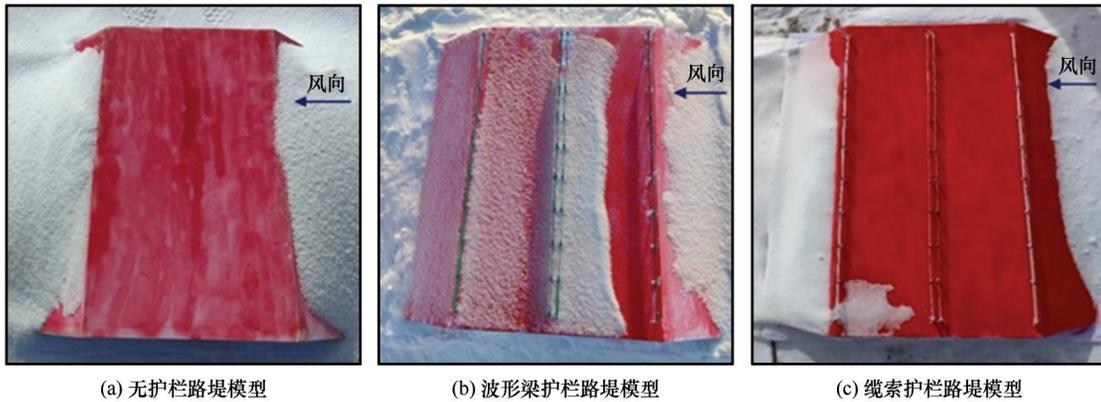


图 1 现场模型图

Fig. 1 Site model diagram: embankment model without barrier (a); embankment model with w-beam barrier (b); embankment model with cable barrier (c)

### 1.2 试验场地及试验方法

模型试验场地选在新疆京新高速公路(G7)骆驼井子互通收费站附近,该处位于新疆哈密市巴里坤哈萨克自治县西侧约 70 km,与 G335 国道在此处相接。试验场地周围地势开阔平整,无遮挡物,降雪量适中,利于风雪流发育。本研究在此处设立了风场监测站,通过近两年的风速风向监测结果,该地段主导风向为西北风,风速较强且稳定,满足试验对风场的要求,如图 2 所示。测得试验时距离地面 1.5 m 高处平均风速为  $4.72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,对比无护栏、波形梁护栏和缆索护栏路堤模型的风速和积雪分布,模型间隔一定距离摆放,确保前后无明显障碍物,如图 3 所示。

为减轻模型端部的影响,选取模型中间横截面测试风速和积雪分布。积雪厚度的测量点间隔为 2 cm,得到较为连续平滑的积雪轮廓。采用手持式皮托管风速仪对路基模型横断面的不同高度的风速进行测量,试验场地附近的风场监测设备表明该

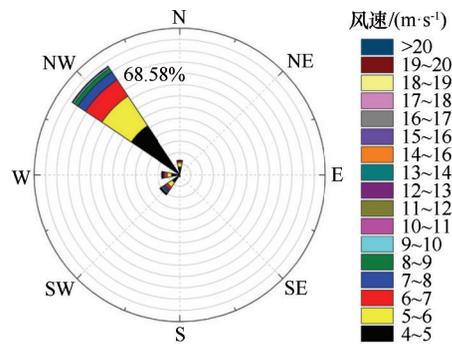


图 2 试验场地风玫瑰图

Fig. 2 Wind rose diagram of test site

测试时间段内风速基本保持稳定。测量时将主机数值清零,皮托管全压孔正对来流,待数据稳定时读取 5 s 内最大风速和最小风速,取两者平均值,以尽量消除脉动风影响。

### 1.3 试验结果分析

图 1 为 2021 年 12 月 28 日不同护栏模型路堤路面积雪覆盖的试验效果,2022 年 1—2 月重复进行了



图3 模型试验场地  
Fig. 3 Model test site

3次试验,得出类似的风速及积雪分布规律。缆索护栏路堤与无护栏路堤的风速和积雪分布结果相似,图4将仅对无护栏路堤与波形梁护栏路堤横断面的风速和积雪厚度情况进行比较,横坐标原点为

模型中间位置,横坐标负半轴为上风侧,正半轴为下风侧。

由于测试时间和点位不同,图4中两个风速变化不进行数值对比,而是了解其各自分布规律。无护栏的路面积雪主要分布边坡两侧,坡脚位置为弱风区,雪堆积较厚。上风侧边坡积雪较多,路面基本无积雪,上风侧路肩风速较坡脚位置处大,风雪流不受阻碍通过整个路面。波形梁护栏路堤上风侧边坡坡脚积雪厚度大,下风侧边坡积雪厚度小且较均匀,路面积雪较多,风速波动较大。波形梁护栏路堤的路面上积雪轮廓与风速分布基本吻合,上风侧半幅路面积雪起始位置对应0 cm 高风速最低点[图4(b)]中横坐标-15 cm左右),积雪厚度最高点对应1 cm位置处(护栏下部空隙中部)为风速最低点,下风侧半幅路面积雪厚度小且呈均匀分布状态,积雪厚度分布与近地面风速有很好的关联性。

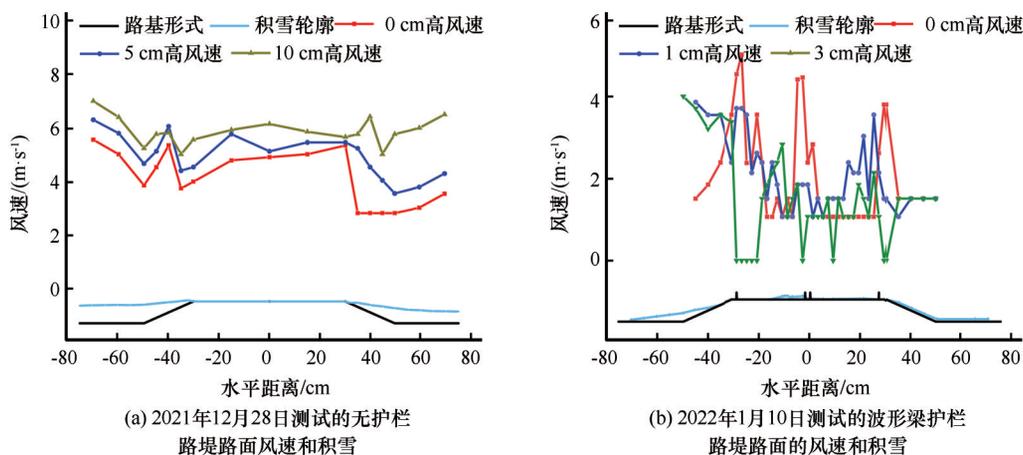


图4 有无护栏路堤风速积雪分布对比图

Fig. 4 Comparison of wind speed and snow distribution of embankment with and without barrier: the wind and snow distribution on embankment without barrier on Dec. 28, 2021 (a); the wind and snow distribution on embankment with w-beam barrier on Jan. 10, 2022 (b)

模型试验测得的波形梁护栏和缆索护栏路堤断面的积雪分布情况如图5所示。其中,波形梁护栏路堤路面的积雪集中在上风侧半幅路面,下半幅

路面有均匀的浅层积雪。而缆索护栏路堤的积雪集中在下风侧边坡,原因是缆索护栏透风率高,风雪流能够顺利穿过路面,在下风侧边坡坡脚处堆积,其路面积雪情况与无护栏的路堤形式相当。

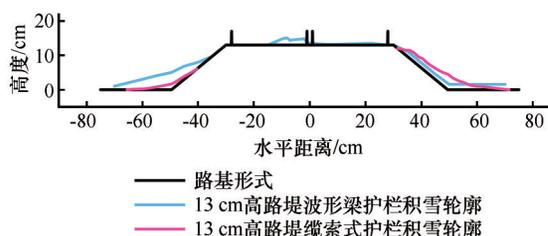


图5 波形梁护栏与缆索护栏路堤模型积雪分布图  
Fig. 5 Snow distribution of embankment model with w-beam barrier and cable barrier

现场雪情调研显示,2020年冬季,新疆京新高速(G7)的BMTJ-5标K214~K216尚处于建设期,路面已经完工,尚未安装护栏,此时风雪流能够穿过路面,路面没有积雪存留,如图6(a)所示。2021年波形梁护栏与缆索护栏等交安设施完成施工,产生了不同于建设期的风吹雪现象,此时波形梁护栏与缆索护栏积雪情况与上文模型试验结果相符,如图6(b)所示。该图左侧为路堤上风侧,安装了缆索护

栏,中央分隔带为波形梁护栏。风雪流从左侧穿过路面,因此左幅路面未存留明显积雪,雪颗粒大量沉积在中央分隔带右侧即下风侧路面上。2021—2022年冬季对本条高速公路其他里程处调研发现较多类

似情况出现,风吹雪期间路面行车道上大量积雪,严重干扰车辆正常通行。因此,安装波形梁护栏后大量雪颗粒沉积在护栏后侧的路面行车道上,这成为加重高速公路路面风吹雪灾害的主要原因。



图6 路堤路面实际积雪情况

Fig. 6 Actual snow distribution on the expressway: the embankment surface without barrier (a); the embankment surface with cable barrier at upwind site and w-beam barrier at central divider site (b)

## 2 流场数值模拟

### 2.1 流体基本控制方程

数值模拟是研究风吹雪的重要方法,以流体物理学理论为基础,建立数学模型进行计算分析,具有成本低、便于改变研究参数等优点。现阶段风吹雪数值模拟研究多采用Fluent、CFX等计算流体力学(CFD)求解器求解,一般分为单相流(空气相)和两相流(空气相和雪相)模型。单向流模型模拟风场分布,根据风速变化判断积雪位置;两相流模型通过建立雪相和空气相的关系,直接模拟呈现积雪形态,其一般分为欧拉-欧拉双流体模型和欧拉-拉格朗日模型。大气运动为湍流运动,单相流湍流模型较为成熟,与实际吻合较好。而风吹雪两相流模拟受固气关系等影响大,导致护栏研究中局部位置易与实际产生偏差,因此,本文采用Fluent(2021R2版)单相流数值模拟与模型试验中积雪分布相结合的研究方法。Fluent计算需遵循质量守恒定律和动量守恒定律。

#### (1)质量守恒方程(连续性方程)

质量守恒方程表述为单位时间内流体微元增加的质量等于流入该微元的净质量,如式(4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

对于定常不可压缩流动,忽略密度 $\rho$ 变化,连续性方程可表示为:

$$\text{div} \vec{u} = 0 \quad (5)$$

式中: $t$ 为时间; $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别是 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的速度分量。

#### (2)动量守恒方程(N-S方程)

动量守恒方程用于描述黏性流体运动规律,表述为微元流体动量对时间的变化率等于外力矢量和,如式(6)~(8):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \cdot \vec{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \cdot \vec{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \cdot \vec{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (8)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $p$ 为流体微元压力; $\mu$ 为流体动力黏度; $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$ 为动量守恒方程的广义源项,表示为:

$$S_u = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \text{div} \vec{u}) \quad (9)$$

$$S_v = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \text{div} \vec{u}) \quad (10)$$

$$S_w = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \text{div} \vec{u}) \quad (11)$$

湍流数值模拟方法主要分为直接数值模拟(DNS)、大涡模拟(LES)和雷诺平均N-S方程(RANS)。前两种方法计算量大,而本研究中主要关心平均流场变化,雷诺平均N-S方程方法能够满足研究需要,是工程中最常用的方法。RANS法湍流模型包括 $k-\omega$ 模型、 $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型等,

根据需求,本文采用  $k-\epsilon$  模型中的 RNG  $k-\epsilon$  模型,能模拟分离流、旋流等复杂流动,对瞬变流和流线弯曲有较好应用。

### 2.2 数值模拟工况及边界条件

设置波形梁护栏的目的是降低车辆驶出路外的事事故率,通常分为二波形梁护栏和三波形梁护栏两类。二波形梁护栏主要适用于二至四级公路和部分一级公路,不满足现行规范对高速公路防护的要求,因此新建高速公路均不采用。三波形梁护栏适用于路侧一至八级防护和中央分隔带二至七级

防护,被大部分高速公路采用。波形梁护栏是一种保障交通安全的交安设施,但在其应用中缺少对风雪流影响的考虑,波形梁护栏影响风雪流运动的因素包括梁宽度和梁下部空隙(梁底部至路基面的高度)的大小。

取波形梁护栏和缆索护栏路堤的横断面进行二维流场数值模拟研究,数值模拟中的模型尺寸与实际设计中的横断面尺寸一致。将三波形、二波形梁护栏和缆索护栏的数值计算模型简化,如图 7 所示,图中尺寸单位为 mm。

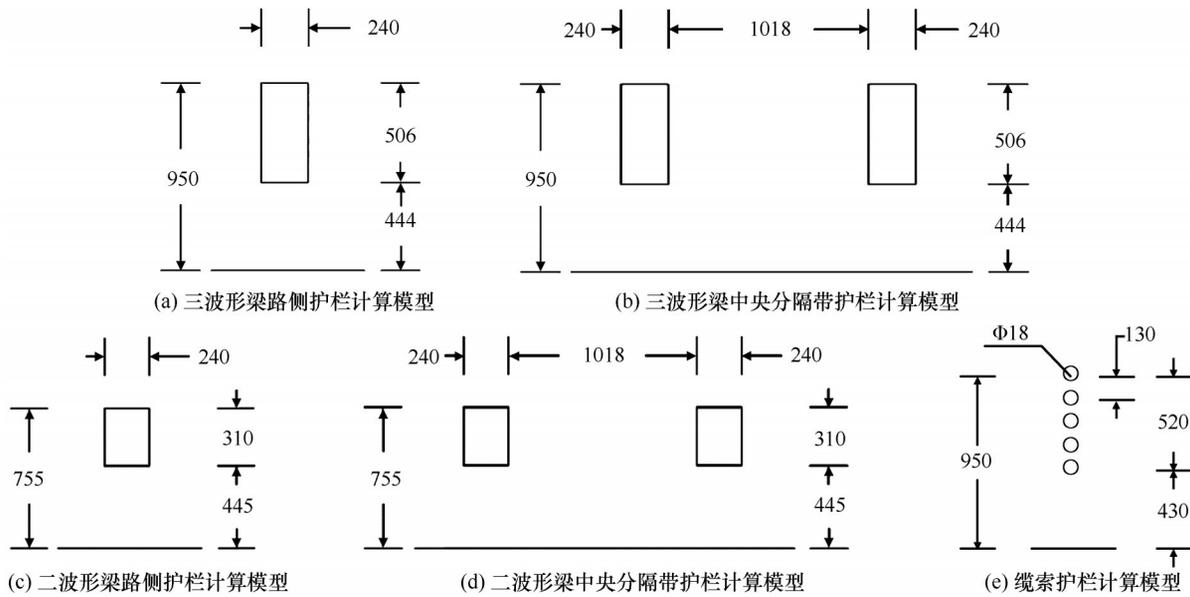


图 7 计算模型

Fig. 7 The calculation model: three w-beam barrier at roadside (a); three w-beam barrier at medial divider (b); two w-beam barrier at roadside (c); two w-beam barrier at medial divider (d); cable barrier (e)

路堤数值计算模型高为 4 m,边坡坡度为 1:1.5,上下边界层网格尺寸采用适用于高雷诺数湍流模型的标准壁面函数计算,取完全湍流区下限为

30,计算得到近壁面网格高度约为 0.1 m,网格增长率为 1.1,网格总数约为  $9 \times 10^4$  个,如图 8 所示。模型的入口边界采用普朗特-冯卡曼对数形式风速廓线:

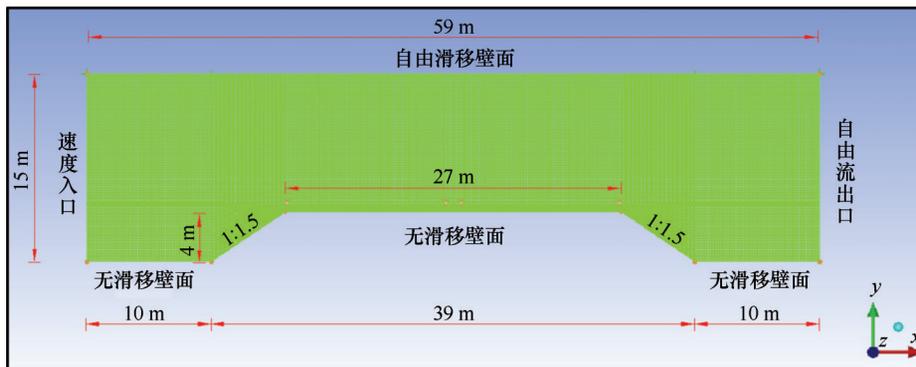


图 8 路堤计算模型网格划分

Fig. 8 Embankment computational model meshing

$$u(y) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{y}{z_0} \quad (12)$$

式中: $u(y)$ 为 $y$ 高度的风速; $\kappa$ 为卡曼常数,取0.4; $u_*$ 为摩擦速度,取 $0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $z_0$ 为 $3\times 10^{-5} \text{ m}$ <sup>[22]</sup>。

湍流动能 $k$ 和湍能耗散率:

$$k = \frac{3}{2} (vI)^2 \quad (13)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (14)$$

式中: $v$ 为平均速度; $I$ 为湍流度,取7.5%; $C_\mu$ 为经验常数,取0.09; $l$ 为湍流尺度,取 $0.07L$ , $L$ 为模型高度<sup>[23]</sup>。

模型的出口边界采用自由流出口,这是因为模拟自然环境中气流运动,下游气流流动对上游风场无影响,因此无需关注出口边界位置风速分布。

数值模型的上边界采用自由滑移壁面边界,下边界采用无滑移壁面边界。

求解模型采用压力-速度耦合的基于压力的SIMPLE方法,判定计算收敛的标准为各项参数残差低于 $10^{-5}$ 。

### 2.3 数值模拟结果及分析

风吹雪的雪粒大部分集中在2 m高度以下,80%的雪粒在1 m以下运动<sup>[24]</sup>,三波形梁护栏整体结构高度为0.95 m,涵盖了大部分雪粒运动范围,而其梁高度范围在0.444~0.950 m,更是对运动的雪粒有直接的阻挡作用。高速公路在路侧及中央分隔带共设置4道波形梁护栏。以1 m高度风速为 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况的零填挖地段和4 m高路堤为例,风吹雪经过波形梁护栏路堤和缆索护栏路堤断面的风场分布如图9所示。

由图9(a)~(c)可见,路面近地面的风速受上风侧第一道护栏影响最大,上风侧从坡脚至路肩处的边坡对气流有抬升作用,导致护栏前部气流加速区范围增大,风速达到最高。与零填挖路基的护栏风速比较,三波形梁护栏加速区范围由4.0 m增长到7.5 m,最高风速由 $4.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增长为 $6.87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,加速区后部范围路面上整体风速也大于零填挖地段护栏对应位置的风速。因此,增加路堤高度能够提高路面上整体风速。显著的气流加速区仅位于第一道护栏后侧,图10中三波形梁护栏底部加速区范围比图9(c)的二波形梁护栏约长2 m,相应三波形梁护栏上风侧弱风区范围小,积雪范围小。下风侧半幅路面的二波形梁护栏对近地面风速近乎无影响,风速维持一定的水平,变化较小;三波形梁护栏近地面风速进一步降低,在路中央风速有一定幅度

回升,距离下风路侧护栏约1/3处风速达极大值而后减小。设置二波形梁护栏的路面近地面风速波动较小,整体风速较三波形梁护栏路面大,理论上风吹雪的积雪量较少。据统计,相邻的奇木高速设置了二波形梁护栏,相比设置三波形梁护栏的新疆京新高速伊吾至木垒段,路面总体积雪量少,风吹雪造成的交通封闭时间较短。

设置缆索护栏的路面风速分布如图9(d)所示,相比设置三波形梁护栏的路面风速起伏变化的情况,缆索护栏路堤断面的风速在全幅路面均保持较大值,基本不受护栏影响,路面最大风速位于上风侧边坡的路肩位置。

2021年11月20日新疆京新高速公路沿线降雪,雪后随除雪车对下涝坝至大浪沙区段K203~K219进行了现场调研。图10(a)为无护栏与波形梁护栏交界处,来流方向为右侧,无护栏区风雪流能够通过,路面积雪较少,而前方波形梁护栏的路幅中积雪多。图10(b)来流方向为左侧,受中央分隔带波形梁护栏影响,积雪集中在右幅路面。上述积雪分布与数值模拟计算中不同风速引起积雪厚度不同的规律是对应和吻合的。

### 3 减小波形梁护栏对高速公路风吹雪灾害影响的相关措施

考虑到全球气候变化复杂的大趋势,极端气候导致冰雪灾害和危险程度持续增加,已有气象资料表明近十年以来,新疆东部天山北麓伊吾、巴里坤和木垒的年降雪量变化很大,在本工程修建的2019—2021年属于降雪量较少的年份。因此,为保证本路线的长期安全运营,需要以动态思维指导路线防治风吹雪措施的设计和优化。

根据本文进行的模型试验、数值模拟及新疆京新高速公路(G7)2021年6月30日通车以来经历第一个冬季的现场风吹雪情况调研,从定性和定量的角度对波形梁护栏加深风吹雪灾害有了更深入的了解,如何改进、更换或采取其他措施来防治高速公路的风吹雪灾害是需要解决的实际问题。通过参考《新疆公路雪害防治技术规范》(DB65/T 4185—2019)、《公路护栏安全性能评价标准》(JTGB05-01—2013)以及《公路交通安全设施设计规范设计及设置要求》(JTGD81—2017)的有关规定,了解到目前已有科研和生产单位研制出SB级地锚式自张拉缆索护栏满足上述规范要求,可作为雪害地区的

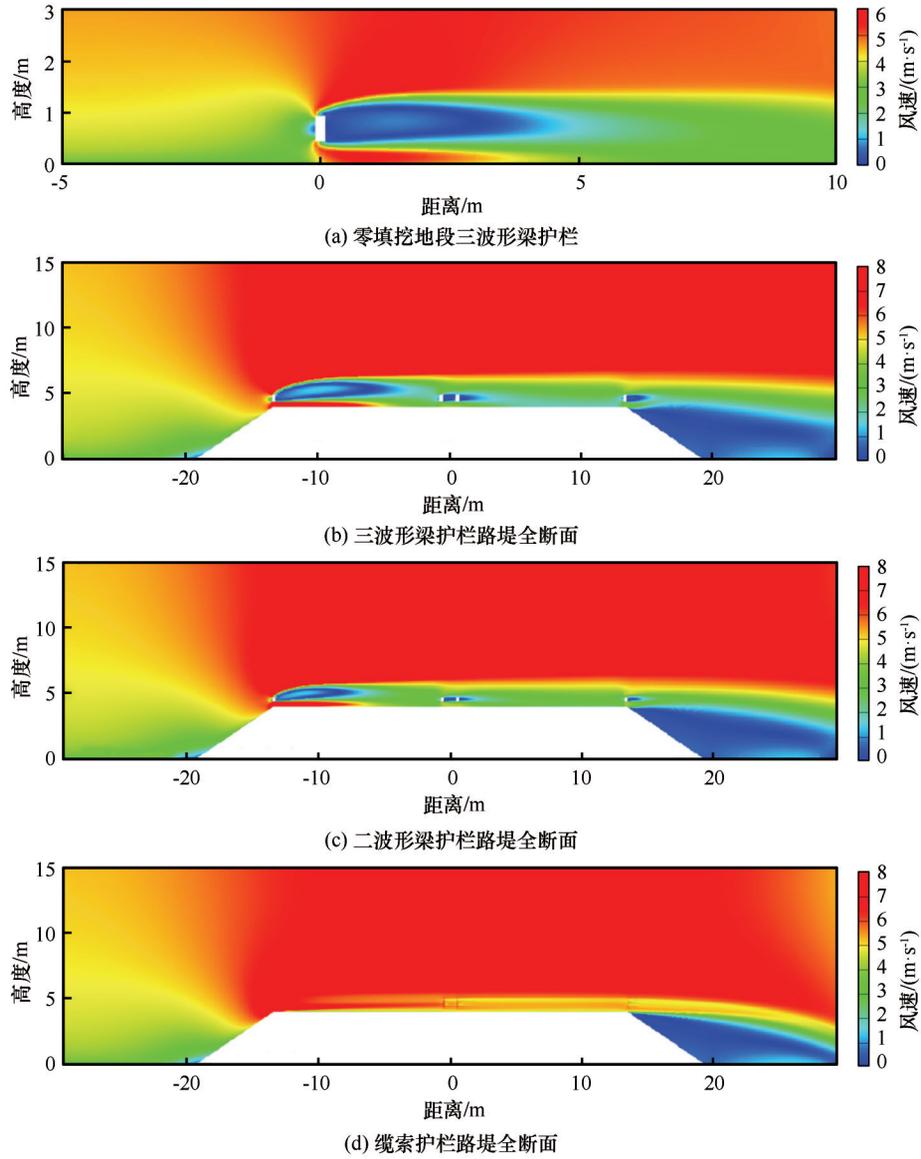


图9 风速分布云图

Fig. 9 Wind speed distribution cloud map: zero embankment section with w-beam barrier (a); embankment section with three w-beam barrier (b); embankment with two w-beam barrier (c); embankment with cable barrier (d)



(a) 来流方向为右侧

(b) 来流方向为左侧

图10 K205附近不同护栏影响下的积雪分布图

Fig. 10 Snow distribution under different barriers' influence near K205: the upwind direction is from the right (a); the upwind direction is from the left (b)

路侧及中央分隔带防护措施,且已在新疆克塔高速公路上应用,为新疆京新高速公路伊吾至木垒段波形梁护栏的改进或更换提供了借鉴。此外,在不具备更换条件的地段,还可考虑在路线一定位置设置防雪栅、挡雪板、挡雪墙或防雪网等防(挡)雪措施,以保障冬季路线安全运营。

#### 4 结论

(1)针对高速公路波形梁护栏加深道路风吹雪灾害、阻碍高速公路通行及加大运营除雪保畅工作难度的现状,采用现场模型试验方法得到了不同护栏类型下的路堤路面不同位置的风速和积雪分布规律,这些规律与勘察设计及施工阶段的认识存在不同,可为今后本条高速公路冬季安全运营及后续在新疆风吹雪多发地区建设高速公路时提供参考。

(2)数值模拟从路面的近地面流场变化角度阐述了波形梁护栏引起路面积雪的原理。波形梁护栏是引起路堤路面风吹雪灾害的主要原因,因其设置在路基面两侧路肩处或中央分隔带处,风雪流从路基坡脚处增速,到达路肩处通过波形梁护栏下部空隙运动至路面,波形梁护栏对近地面风场产生扰动,出现弱风区,导致大量雪粒沉积在路面上。尤其当波形梁护栏下部空隙被雪填满后,波形梁后侧的路面积雪覆盖行车道,严重影响公路通行能力,而不设置护栏或者设置缆索护栏的地段有利于风雪流通过。

(3)模型试验和数值模拟结果与现场调研结果较好吻合,考虑到工程实际以及未来全球气候变化对当地气候影响的不确定性,为更好防范高速公路运营期间风吹雪影响路面通行的问题,给出了在风吹雪灾害严重地段将波形梁护栏更换为符合安全要求的缆索护栏的初步建议。

#### 参考文献(References):

- [1] Li Guang, Yu Hongxiang, Zhang Jie, et al. Multi-phase flow of wind blowing snow and its application in snow hydrology[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2021, 39(3): 170-181. [李广, 于鸿翔, 张洁, 等. 风吹雪多相流运动及其在寒区雪水文中的应用[J]. *空气动力学学报*, 2021, 39(3): 170-181.]
- [2] Huang Ning, Li Guang. Mountain snow: the source of the mother river: study of multi-scale and multi-physical process of spatio-temporal evolution of snow distribution[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(17): 10-22. [黄宁, 李广. 高山积雪: 母亲河之源——积雪分布时空演化的多物理过程、多尺度研究[J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 10-22.]
- [3] Li Feiqiang. Research on profiles of blowing snow and snow distribution on traffic line [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021. [李飞强. 风吹雪特性及风致交通线路积雪分布研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.]
- [4] Wang Zhengshi. Large eddy simulation of the distribution and evolution of snow over complex terrain [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [王正师. 复杂地形积雪分布及其演化的大涡模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [5] Zhao Qiudong, Zhao Chuancheng, Qin Yan, et al. The change features and future trend of snowfall and extreme snowfall in the arid areas of Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 81-90. [赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 中国西北干旱区降雪和极端降雪变化特征及未来趋势[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 81-90.]
- [6] Schmidt R A. Measuring particle size and snowfall intensity in drifting snow [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1984, 9(2): 121-129.
- [7] Mann G W, Anderson P S, Mobbs S D. Profile measurements of blowing snow at Halley, Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D19): 24491-24508.
- [8] Mahesh A, Eager R, Campbell J R, et al. Observations of blowing snow at the South Pole[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D22): 4707.
- [9] Gordon M, Taylor P A. Measurements of blowing snow, Part I: particle shape, size distribution, velocity, and number flux at Churchill, Manitoba, Canada[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 55(1): 63-74.
- [10] Sturm M, Stuefer S. Wind-blown flux rates derived from drifts at Arctic snow fences [J]. *Journal of Glaciology*, 2013, 59(213): 21-34.
- [11] Tabler R D, Meena J A. Effects of snow fences on crashes and road closures: a 34-year study on Wyoming interstate-80[C]// 13th International Conference on Cold Regions Engineering. Orono, Maine, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2006: 1-10.
- [12] Wang Zhonglong. Snowdrift in China and its prevention and control[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001. [王中隆. 中国风雪流及其防治研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.]
- [13] 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.]
- [14] Zhang Jiaping, Wu He, Meng Shangjiu, et al. Formation mechanism and distribution characteristics of snowdrift on highway in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(3): 130-133. [张家平, 武鹤, 孟上九, 等. 黑龙江省公路风吹雪灾害形成机理与分布特征[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(3): 130-133.]
- [15] Shi Jiayu, Xu Dongying, Xia Caichu, et al. Research on the distribution law of snow blockage of snow drift on road and the formation mechanism of snow disaster[J]. *Highway*, 2020, 65(1): 257-264. [施佳誉, 徐冬英, 夏才初, 等. 公路风吹雪雪阻分布规律及雪灾形成机理研究[J]. *公路*, 2020, 65(1): 257-264.]
- [16] 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, 梁朋飞, 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.]

- [17] Chen Ling, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Wind tunnel test on wind flow around highway embankment on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(2): 474-483. [陈领, 马巍, 穆彦虎, 等. 青藏高原公路路基周边风场特征风洞实验研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(2): 474-483.]
- [18] Lin Qifei, Zhang Liqun, Yang Huanhuan, et al. Numerical simulation research on the auxiliary facilities of expressway to deepen the degree of snowdrift disaster[J]. *Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering*, 2021, 39(2): 42-47. [林起飞, 张立群, 杨欢欢, 等. 高速公路附属设施对加深风吹雪灾害程度的数值模拟研究[J]. *河北建筑工程学院学报*, 2021, 39(2): 42-47.]
- [19] Yan Dongfang, Li Xiang, Zha Minggao, et al. Study on the snowdrift disaster of highway embankment based on the corrugated beam barrier [J]. *Construction Technology*, 2021, 50(23): 74-78. [严东方, 李响, 查明高, 等. 基于波形梁护栏的公路路堤风吹雪灾害研究[J]. *施工技术*, 2021, 50(23): 74-78.]
- [20] Tabler R D. Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design [R]. Niwot, Colorado, America: Tabler and Associates, 2003.
- [21] Peterson T C, Schmidt R A. Outdoor scale modeling of shrub barriers in drifting snow[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1984, 31(2): 167-181.
- [22] Wu Yue, Sun Ying, Zheng Chaorong, et al. Wind engineering and wind-resistant design of structures[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014. [武岳, 孙瑛, 郑朝荣. 风工程与结构抗风设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.]
- [23] Hu Kun, Hu Tingting, Ma Haifeng, et al. ANSYS CFD Getting start: fundamentals and applications of computational fluid dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2018. [胡坤, 胡婷婷, 马海峰, 等. ANSYS CFD入门指南: 计算流体力学基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.]
- [24] Liu Baohe, Zuo Hejun, Wang Yanjiao, et al. Snow drift structure over a flat typical steppe in Xilingol, Inner Mongolia, China[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(5): 1042-1048. [刘宝河, 左合君, 王嫣娇, 等. 锡林郭勒典型草原区平坦草地风雪流结构特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(5): 1042-1048.]

## Study on the snowdrift disaster influenced by w-beam barrier used in expressway

WEI Jiabei

*(China Railway Construction Suzhou Design & Research Institute Co., Ltd, Suzhou 215004, Jiangsu, China)*

**Abstract:** Snowdrift is one of the most typical snow disaster forms of road traffic in Xinjiang area. Its impact on road traffic is mainly reflected in reducing driving visibility and causing traffic interruption induced by a large amount of snow on the road surface. The snowdrift disaster along the road in Xinjiang area shows the characteristics as many points, long lines and wide spread occurring with uneven distribution in time and space. Snowdrift question involves wind field, snow distribution field, temperature field and humidity field coupling, which is a very complex scientific problem. At the same time, the prevention and control of snowdrift disasters is also a practical problem that needs to be solved urgently in the construction and operation of road traffic infrastructure in cold areas. For expressways in areas of frequent snowdrift occurring, its snowdrift disaster caused by the w-beam barrier is becoming more and more obviously. But there is still a lack of in-depth research on the w-beam barrier, which is one kind of auxiliary facilities of the highway deepening the snowdrift disaster. In view of the status mentioned above and in order to explore the causes and prevention methods to snowdrift disaster by w-beam barrier, on the background of Beijing-Urumqi Expressway (G7) engineering, the field model tests of the w-beam barrier, the cable barrier and the no barrier embankment were designed. The study also combined with numerical simulation and highway field investigation and other methods in order to verify each other. In the meantime, the influence of the w-beam barrier and cable barrier on the road snowdrift disaster of the highway is studied, and the distribution law of wind field and snow field on the embankment surface with w-beam barrier and cable barrier is obtained. The results show that the snowdrift velocity increases from the foot of the embankment on the upwind side till to the w-beam barrier installed at the shoulder of or the central divider of the road. Then it moves to the road surface through the gap in the lower part of the w-beam barrier. At this time the w-beam barrier disturbs the wind field near the ground, causing a weak wind area to appear behind the beam, resulting in a large number of snow particles deposited. Especially when the lower gap of the w-beam barrier is filled with snow, the road area behind the w-beam barrier covers the driving lane with snow, which seriously affects the road capacity. While the section without setting up a barrier or setting a cable barrier is conducive to the passage of snowdrift flow. Considering the uncertainty of future climate change, in order to better prevent the impact of snowdrift on traffic operation safety, it is proposed to replace the w-beam barrier in some areas with serious wind and snow disasters with cable barrier that meet the safety requirements of expressways. Moreover, other snowdrift protection measures such as snow fences, snow barriers and snow walls can also be adopted. The research results can provide useful reference for snow removal of the expressway and new expressway construction in the windy and snow areas of Xinjiang.

**Key words:** snowdrift; expressway; w-beam barrier; model test; numerical simulation

(责任编辑: 李忠勤)