

文章编号: 1000-4750(2021)Suppl-0178-06

边坡坡度对路堤周围积雪分布 影响规律的数值模拟研究

何书勇¹, 冯耀恒¹, 周一航¹, 王 熙¹, 李海飞¹, 刘庆宽^{1,2,3,4}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;

3. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 石家庄 050043; 4. 石家庄铁道大学土木工程学院风工程研究中心, 石家庄 050043)

摘 要: 道路风吹雪灾害是雪灾地区重要的灾害类型, 对交通出行等造成很大威胁。该文以二维路堤为研究对象, 通过 Fluent 软件对不同边坡坡度下的路堤进行流场模拟, 得到了不同边坡坡度下路堤周围的风速和壁面剪切速度, 进而从雪颗粒运动机理上分析边坡坡度对路堤周围积雪分布的影响。结果表明: 路堤周围的流场与路堤表面的剪切速度有很好的对应关系; 较缓的迎风边坡可减少路堤周围的积雪, 在风吹雪灾害频发的地区进行道路建设时建议选取小边坡坡度的路堤; 研究结果可为路堤的工程建设提供参考。

关键词: 风吹雪; 路堤边坡坡度; 数值模拟; 风速分布; 剪切速度

中图分类号: TV663+.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.S031

NUMERICAL SIMULATION FOR INFLUENCE OF SLOPE RATE ON SNOW DISTRIBUTION AROUND THE EMBANKMENT

HE Shu-yong¹, FENG Yao-heng¹, ZHOU Yi-hang¹, WANG Xi¹, LI Hai-fei¹, LIU Qing-kuan^{1,2,3,4}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures,
Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;

4. Wind Engineering Research Center, School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Road snowdrift disaster is an important disaster type in snow disaster areas, which poses a great threat to transportation. This paper takes the two-dimensional embankment as the research object, and uses Fluent software to simulate the flow field of embankments under different slopes, so that to obtain the wind speed and wall shear velocity around embankment under different slopes. And then the influence of slope on snow distribution around embankment is analyzed according to the mechanism of snow particle motion. The results show that the flow field around the embankment is closely related with the shear velocity of the embankment surface; the gentle upwind slope can reduce the snow around the embankment. It is recommended to build roads on the embankment with a small slope in areas with frequent snowdrift disaster. The research results can provide a reference for the construction of embankment.

Key words: snowdrift; embankment slope; numerical simulation; wind speed distribution; shear velocity

收稿日期: 2020-05-28; 修改日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778381); 河北省自然科学基金重点项目(E2018210044); 河北省高层次人才(冀办[2019]63号); 河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2020065); 石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2020016)

通讯作者: 刘庆宽(1971—), 男, 河北人, 教授, 博士, 从事桥梁与结构的风荷载, 风致振动与控制研究 (E-mail: lqk@stdu.edu.cn).

作者简介: 何书勇(1995—), 男, 河南人, 硕士生, 从事桥梁的风荷载, 风致振动与控制研究 (E-mail: heshuyong789@126.com);

冯耀恒(1996—), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事桥梁的风荷载, 风致振动与控制研究 (E-mail: fyh2019@126.com);

周一航(1999—), 女, 河北人, 硕士生, 主要从事结构的风荷载, 风致振动与控制研究 (E-mail: zyh19992099@163.com);

王 熙(1995—), 男, 河北人, 硕士生, 主要从事结构的风荷载, 风致振动与控制研究 (E-mail: 18832226157@163.com);

李海飞(1995—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事桥梁的风荷载, 风致振动与控制研究 (E-mail: lhf20140311@126.com).

雪灾害被认为是全球十大灾害之一^[1]。中国的雪灾害也特别严重,特别是中国的东北以及西北地区雪灾害事件频发,其中由道路风吹雪灾害引起的交通事故最为严重,已经严重威胁到人们的正常生产和生活,也严重制约了当地经济的发展,因此对道路风吹雪问题及其防护措施的研究刻不容缓。

目前,国内已经有部分学者对道路风吹雪问题进行研究,其中李聪辉^[2]通过 Fluent 计算软件对不同边坡坡度和不同高度下的路堤表面流场进行模拟,得出了边坡坡度及路堤高度对路堤表面风速分布的影响,从而预计铁路路堤表面的积雪分布情况。吴鹏等^[3]运用 Fluent 软件对不同防雪栅与路堤的水平距离、路堤高度以及边坡坡度等参数设定进行流场模拟,最终分析雪颗粒堆积的规律和确定合理的模拟参数。王向阳^[4]采用 Fluent 软件对路堤周围流场进行模拟,分析了路堤高度、边坡坡度及入射风速的变化对路堤周围流场的影响。研究表明风速模拟值与实际观测值基本吻合,当路堤高度处于一定高度范围内时,采用高路堤、小边坡坡度等提高路堤面风速措施可有效减轻路面风吹雪灾害。王向阳^[5]采用现场实测和有限元模拟的方法对多种形式的路堑模型进行研究,结果表明路堑内风速总是较小,易产生积雪堆积,工程中建议选择边坡较缓且路堑深度较浅的路堑。应成亮^[6]对公路风吹雪雪害形成机理进行解释,并基于典型路基断面的风吹雪雪害形成机理,对公路风吹雪防治技术进行了系统的汇总,最终给出了设计防治和工程防治两种解决方法。苏国平^[7]利用 Fluent 软件对净风和携雪风条件下路堑周围及挡雪墙背风侧的流场进行模拟,根据流场特征和路堑内积雪量的不同,提出挡雪墙的设计参数。吕晓辉等^[8]将新雪和老雪置于风洞内进行试验,利用粒子图像测速系统(PIV)对两种地形下(平坦床面和路基)风吹雪中雪粒的速度进行测量。结果表明,在平坦床面、路基表面以及背风坡的雪粒速度呈高斯分布,而在迎风坡处雪粒速度不服从高斯分布。王中隆等^[9]通过风洞试验给出了多个风向以及路堑、隧道两头路基型式和不同条件下的积雪与流场结构特征,附面层分离和雪粒堆积的关系,并给出了相应防治雪害的措施。周尘华^[10]对现有路基断面设计形式(路堤

断面、路堑断面、半路堑断面、分离式断面)、防雪栅设计(不同高度和透风率)以及不同断面形式的路基与防雪栅的组合进行仿真模拟,最终确定最优化的路基断面设计参数以及防雪设施设计参数。李鹏翔^[11]以新建阿富准铁路阿富段为例,在现场设立风雪监测典型试验段,研究了不同路基型式、不同防雪栅栏类型等防风雪流的效果,进而通过室内风洞试验和数值模拟计算对铁路风吹雪灾害的防灾减灾开展了深入分析。梁鹏飞^[12]利用现场模型实测和流场数值模拟的方法,对不同边坡坡度下的路堤和不同透风率的防雪栅进行研究,最终确定合理的模型参数。周暄毅等^[13]和肖艳等^[14]利用两相流模拟的技术对房屋建筑进行研究,得到了房屋周围积雪分布的模拟结果。

综上所述,目前针对道路风致雪漂移的研究大多是改变路基形式以及改变其参数来进行研究,且以往得到的结果仅对路基周围风场和实际的积雪分布进行展示与对比,很少从运动机理上对影响雪颗粒漂移的剪切速度进行分析。因此,基于目前的研究现状,本文通过数值模拟方法,以不同边坡坡度的路堤为研究对象来进行研究,得到了不同边坡坡度下路堤周围的风速和路堤表面的剪切速度,从而分析路基表面的积雪分布情况,为下一步路堤的建设提供理论基础。

1 试验概况

1.1 模型参数及其试验工况

本文试验共设计 4 种不同边坡坡度的二维路堤模型,为更好地研究边坡坡度对路堤周围积雪分布的影响,试验模型只改变单侧边坡坡度,即一侧边坡坡度固定为 45° ,改变另一侧边坡。所有路堤模型均采用路面宽度为 0.3 m ,高度为 0.15 m 的路堤模型。试验分别研究了迎风边坡坡度变化和背风边坡坡度变化对路堤周围积雪分布的影响,各路堤模型尺寸及其工况示意图如图 1、图 2 所示。

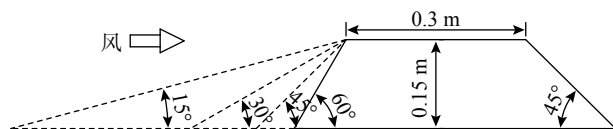


图 1 迎风边坡坡度改变时路堤模型尺寸及其工况示意图
Fig. 1 Schematic diagram of embankment model size and working conditions when the slope of the windward side slope changes

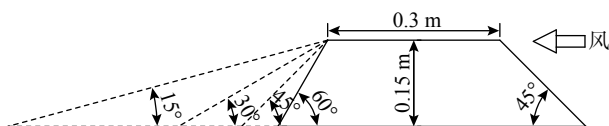


图2 背风边坡坡度改变时路堤模型尺寸及其工况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of embankment model size and working conditions when the slope of the leeward side slope changes

1.2 数值模拟介绍

为了进一步分析边坡坡度对路堤周围流场的影响规律,应用 Fluent 软件对 4 种边坡坡度下的路堤表面风速进行模拟。数值模拟采用有限体积法进行计算,模型采用具有较高计算精度的 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型,本文在计算的过程中选用残差为 10^{-5} 。速度压力耦合采用 SIMPLEC 方法求解,本文选用的壁面函数为标准壁面函数。

路堤计算域尺寸以及边界条件的设置如图 3 所示,入口边界距路堤模型的距离为 10 m,出口边界距路堤模型的距离为 20 m,上下边界距离取 2 m,计算域中模型尺寸由图 1 和图 2 所示。计算域入口设置为速度入口 (Velocity-inlet),考虑模型和计算域高度较小,风速在高度方向上变化不明显,入口设置为均匀流,风速取 10 m/s,计算域出口设置为自由出口 (outflow);计算域上边界设置为对称边界 (Symmetry);计算域下边界和路堤模型表面设置为无滑移壁面 (No Slip-Wall)。以迎风侧和背风侧边坡坡度均为 45° 为例,则该路堤模型周围网格划分情况如图 4 所示,为了保证计算

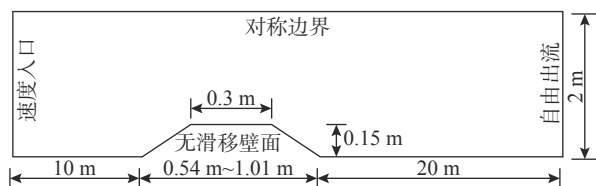


图3 路堤模型计算域及其边界条件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the calculation domain and boundary conditions of the embankment model

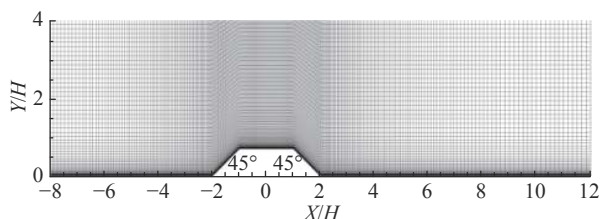


图4 路堤模型周围网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grid division around the embankment model

结果准确,在数值模拟前对网格总数及计算域进行了无关性验证,并最终选择了网格质量相对较好且计算时间较短的网格,第一层网格高度为 0.5 mm,网格总量约 15 万。考虑到地面附近流场变化较为复杂,在近地面以及接近模型表面的一定高度范围内对网格进行加密,以确保计算结果的准确。

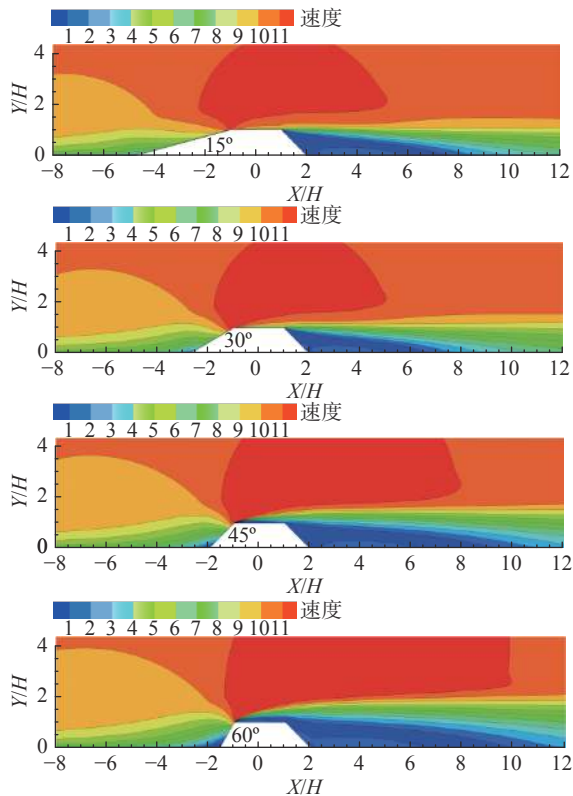
2 模拟结果及分析

2.1 边坡坡度变化对路堤周围流场的影响

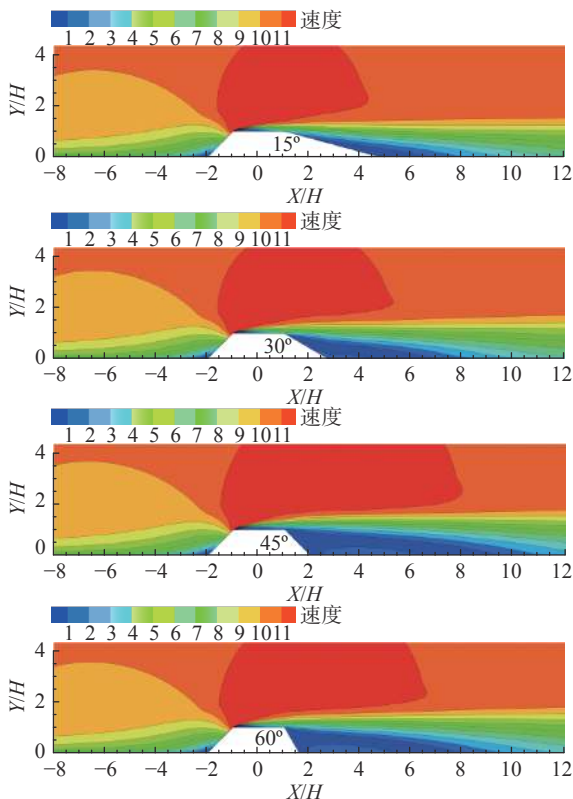
用 Fluent 软件计算分别得到 4 种迎风边坡坡度改变时和 4 种背风边坡坡度改变时路堤周围的风速等值线云图,如图 5 所示。其中图 5 中蓝色区域为风速小于 2 m/s 的区域,在此称为风速减弱区,该区域是参考王向阳^[4]中风速减小区的规定方法,并结合本文数值计算结果确定的,所以该风速减弱区的定义与雪颗粒的漂移机理是没有对应关系的,只是从流场的角度分析提出的,接下来主要是分析边坡坡度改变对路堤周围风速减弱区的影响。

当迎风边坡坡度变化,背风边坡坡度不变时,如图 5(a) 所示,随着迎风边坡坡度从 15° 逐渐增加到 60° ,路堤迎风侧坡脚处风速减弱区范围以及蔓延到迎风侧边坡上的高度均逐渐增大,说明坡度较陡的迎风边坡对气流的阻挡作用和干扰更大,使得较陡的迎风边坡坡脚处风速较小,风力不足以将雪颗粒携带并产生漂移,所以风雪流流经较陡的迎风路堤时更容易在路堤迎风侧形成积雪;随着迎风边坡坡度的增大,路面上风速不断减小且风速减弱区的长度和高度范围也不断增大;随着迎风边坡坡度的增大,路堤背风侧风速减弱区的长度和高度范围也不断增大,由于当风雪流流经路堤的迎风边坡时,随着迎风边坡坡度的增大,雪颗粒沿着边坡运动以及雪颗粒的惯性作用,雪颗粒跃起高度就越高,而在迎风路肩处,风速较大,雪颗粒被风携带的距离就越远,雪颗粒堆积位置越靠后,在路面以及背风侧形成的积雪范围也就越大,反之则积雪范围越小。同时迎风边坡越缓对气流的阻挡作用越小,有利于减小背风侧风速减弱区的范围。

当背风边坡坡度变化,迎风边坡坡度不变时,如图 5(b) 所示,随着背风边坡坡度从 15° 逐渐增加到 60° ,路堤迎风侧坡脚处风速减弱区范围和流场分布并无明显变化,路面上的风速减弱区范



(a) 迎风边坡坡度变化时路堤周围的风速等值线云图



(b) 背风边坡坡度变化时路堤周围的风速等值线云图

图5 迎风和背风边坡坡度变化时路堤周围的风速等值线云图

Fig. 5 Contour cloud map of wind speed around the embankment when the slope of the windward and leeward slope changes

围也无明显变化, 分析原因是由于此时各工况下路堤迎风侧边坡坡度一致, 对来流的阻挡作用一致, 所以背风边坡坡度改变对来流的阻挡作用几乎没有影响。随着背风边坡坡度从 15° 逐渐增加到 60° , 路堤背风侧风速减弱区的范围有增大趋势, 由于路堤背风侧较陡时, 气流流过背风路肩后风速截面增大的较快, 风速变小的较快, 从而使得背风侧风速减弱区和积雪区域有所增大。

2.2 边坡坡度变化对路堤表面剪切速度的影响

《风对结构的作用—风工程导论》^[15] 中定义雪颗粒刚要开始运动时, 雪颗粒表面的流动剪切速度 u_* 为阈值剪切速度 u_{*t} 。当 $u_* > u_{*t}$ 时, 雪颗粒才能移动, 路基表面积雪会发生侵蚀; 当 $u_* = u_{*t}$ 时, 雪颗粒处于将要移动但并未移动的临界状态; 当 $u_* < u_{*t}$ 时, 雪颗粒不能移动, 路基表面积雪会堆积。其中流体的剪切速度公式如下所示:

$$u_* = \sqrt{\tau/\rho} \quad (1)$$

式中: τ 为壁面剪切力; ρ 为空气密度。

为了进一步研究不同边坡坡度对路堤表面积雪的侵蚀与堆积的影响, 从雪颗粒漂移的运动机理上进行分析, 本次研究提取出不同边坡坡度下路堤表面的剪切速度, 如图6和图7所示。又对不同边坡坡度下路堤表面关键位置处的剪切速度进行分析, 如图8所示。

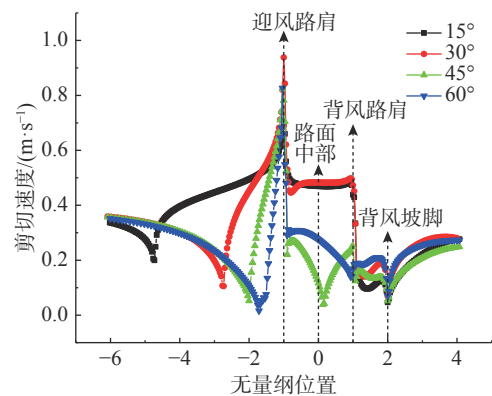


图6 迎风边坡坡度变化时路堤表面的剪切速度图

Fig. 6 Shear velocity diagram of the embankment surface when the slope of the windward side slope changes

由图6可知, 背风边坡坡度不变, 4种迎风边坡坡度下路堤表面的剪切速度变化趋势基本一致。路肩处均为剪切速度急剧增加的位置且剪切速度均达到极大值, 坡脚处均为剪切速度急剧减小的位置且剪切速度均达到极小值。迎风路肩处的剪切速度均大于背风路肩处的剪切速度。在路

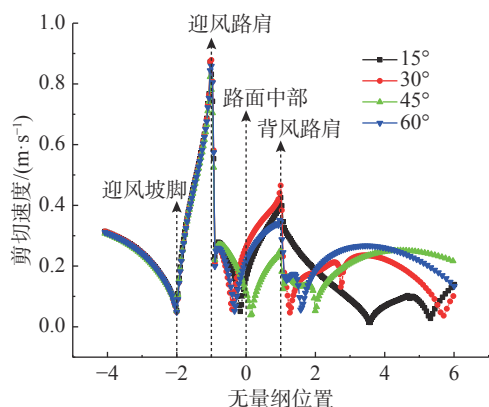
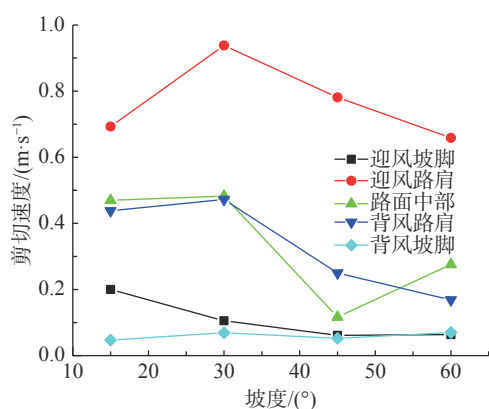
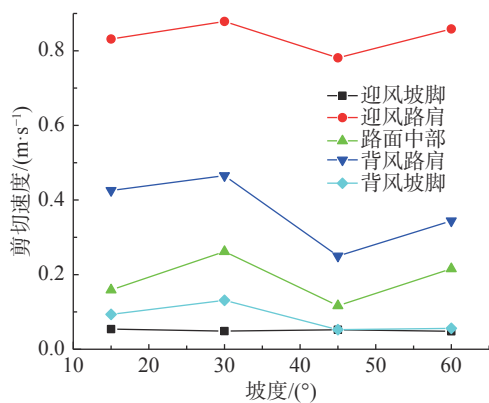


图7 背风边坡坡度变化时路堤表面的剪切速度图
Fig. 7 Shear velocity diagram of the embankment surface when the slope of the leeward side slope changes



(a) 迎风边坡坡度变化时剪切速度图



(b) 背风边坡坡度变化时剪切速度图

图8 迎风和背风边坡坡度变化时路堤表面关键位置的剪切速度图

Fig. 8 Shear velocity diagram at key positions of the embankment surface when the slope of the windward and leeward slope changes

面上, 15°和 30°边坡的剪切速度比 45°和 60°的剪切速度要大, 所以较缓的边坡坡度路面处不易产生积雪堆积。背风侧剪切速度浮动较大, 是由于气流经过背风路肩处风速开始急剧减小, 贴地附面层分离, 在背风坡脚处形成漩涡所造成的。

由图7可知, 迎风边坡坡度不变, 4种背风边坡坡度下路堤表面的剪切速度变化趋势基本一致。剪切速度均在两个路肩处达到极大值, 在两个坡脚处达到极小值, 且迎风路肩处的剪切速度均大于背风路肩处的剪切速度, 与路堤周围的流场分布有很好的对应关系。分析可知, 背风坡坡度改变对路堤迎风侧以及路面的剪切速度基本不产生影响, 仅对背风侧有影响, 这是由于来流条件和路堤迎风侧条件一致, 气流受到的阻挡条件一致造成的, 而背风侧边坡坡度不一样, 气流流经背风侧坡脚处风速变化的不同而造成背风侧坡脚处的速度减弱区范围不同。

图8(a)为迎风边坡坡度变化时路堤表面关键位置的剪切速度图。整体上看, 随着迎风边坡坡度的增大, 路堤迎风坡脚处的剪切速度是不断减小, 迎风路肩和背风路肩处剪切速度是先增大后减小, 路面中部和背风坡脚处的剪切速度是先增大后减小再增大。也可以看出在这4种迎风边坡坡度下, 路堤的两个坡脚处剪切速度较小, 两个路肩处的剪切速度较大, 而路面上的剪切速度大小一般介于两个路肩处剪切速度大小之间, 且更接近背风路肩处的剪切速度。所以一般路堤的两个坡脚处更容易产生积雪堆积, 而两个路肩处的剪切速度较大, 不易产生堆积, 这与前面对路堤的流场分析有较好的对应。

图8(b)为背风边坡坡度变化时路堤表面关键位置的剪切速度图。整体上看, 随着背风边坡坡度的增大, 除迎风坡脚处的剪切速度变化不太明显外, 其余4个位置处的剪切速度均呈先增大后减小又增大的趋势。路堤两个坡脚处的剪切速度较小, 路堤两个路肩处的剪切速度较大, 且坡脚处的剪切速度均小于路肩处的剪切速度。

3 结论

本文主要应用了数值模拟的方法得出不同边坡坡度下路堤周围的流场分布和剪切速度, 进而研究了边坡坡度对路堤表面积雪分布的影响, 主要得到以下结论:

(1) 路堤迎风侧边坡坡度的改变对路堤周围的流场影响较大, 路堤背风侧边坡坡度的改变对路堤周围的流场影响较小。小边坡坡度下的路堤周围速度减弱区较小, 周围产生的积雪堆积较少, 但小的边坡坡度会产生大的经济负担, 所以在考

考虑经济条件允许的范围内,在风吹雪频发地区进行道路建设时应优先选择小的边坡坡度的路堤。

(2) 路堤周围的风速流场分布和其表面的剪切速度分布具有较好的对应关系。从两者的分析角度来看,均在路堤的两个路肩处的风速和剪切速度较大,不易产生积雪堆积;在路堤的两个坡脚处的风速和剪切速度较小,易产生积雪堆积。

(3) 迎风边坡坡度改变对路堤各关键位置处的剪切速度影响较大,使其变化规律不太一致;背风边坡坡度改变对路堤各关键位置处的剪切速度影响较小,使其变化规律基本一致。

参考文献:

- [1] 王中隆, 张志忠. 中国风吹雪区划[J]. 山地研究, 1999, 17(4): 312—318.
Wang Zhonglong, Zhang Zhizhong. Regionalization of snow drift in China [J]. Mountain Research, 1999, 17(4): 312—318. (in Chinese)
- [2] 李聪辉. 不同路堤表面风速分布的数值计算研究[C]. 厦门: 第24届全国结构工程学术会议论文集(第II册), 2015: 213—217.
Li Conghui. Research on numerical calculation for the wind speed distribution on embankment surface [C]. Xiamen: Proceedings of The 24th National Structural Engineering Conference (Volume II), 2015: 213—217. (in Chinese)
- [3] 吴鹏, 陈发明, 刘健. 基于Fluent防雪栅栏数值仿真研究[J]. 交通科技与经济, 2016, 18(6): 57—60.
Wu Peng, Chen Faming, Liu Jian. Research on numerical simulation of snow fence based on Fluent [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2016, 18(6): 57—60. (in Chinese)
- [4] 王向阳. 路堤风吹雪灾害流场分析[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(8): 42—47.
Wang Xiangyang. Analysis of flow field of snow drifting disaster to embankment [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(8): 42—47. (in Chinese)
- [5] 王向阳. 路堑风吹雪的观测与研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(4): 37—41, 57.
Wang Xiangyang. Observation and research on cutting snow-drift [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(4): 37—41, 57. (in Chinese)
- [6] 应成亮. 公路风吹雪雪害防治技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
Ying Chengliang. Research on the countermeasures of the blowing snow hazards on highways [D]. Jilin: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [7] 苏国平. 铁路路堑风吹雪数值模拟及风吹雪灾害防治工程研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
Su Guoping. Research on numerical simulation of wind blowing snow at railway cut and disaster prevention and control engineering [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [8] 吕晓辉, 黄宁, 佟鼎. 天然雪的风洞实验研究[J]. 中国科学, 2012, 42(5): 622—634.
Lü Xiaohui, Huang Ning, Tong Ding. Wind tunnel experiments on natural snow drift [J]. Science China, 2012, 42(5): 622—634. (in Chinese)
- [9] 王中隆, 潘遐华, 刘贤万. 路堑和隧道风雪流的风洞模拟实验研究[J]. 地理学报, 1988(3): 265—273.
Wang Zhonglong, Pan Xiahua, Liu Xianwan. Simulation research of snow drift on the cut and tunnel in wind tunnel [J]. Acta Geographica Sinica, 1988(3): 265—273. (in Chinese)
- [10] 周尘华. 基于fluent的路基断面设计以及防雪设施设置研究[D]. 新疆: 新疆农业大学, 2014.
Zhou Chenhua. Research on based on fluent subgrade cross-section settings and snow protection facilities [D]. Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [11] 李鹏翔. 阿富准铁路风吹雪灾害形成机理与防治技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Li Pengxiang. Study on formation mechanism and prevention technology of wind and snow disaster on Afuzhun railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [12] 梁朋飞. 道路的路堤边坡对风吹雪的影响和防雪栅效果研究[D]. 河北: 石家庄铁道大学, 2020.
Study on the effect of embankment slope on wind-blown snow and the effect of anti-snow fence [D]. Hebei: Shijiazhuang Tiedao University, 2020. (in Chinese)
- [13] 周珣毅, 胡学富, 顾明. 考虑摩擦速度修正的风致积雪重分布模拟方法研究[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 19—25.
Zhou Xuanyi, Hu Xuefu, Gu Ming. Study on wind-induced snow redistribution considering modification of friction velocity [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 19—25. (in Chinese)
- [14] 肖艳, 杨易. 拱形屋盖结构不平衡雪荷载的模拟研究[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 155—164.
Xiao Yan, Yang Yi. A simulation study on uneven snow loads on an arch roof [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 155—164. (in Chinese)
- [15] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用—风工程导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
Simiu E, Yeo D H. Wind effects on structures: modern structural design for wind [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992. (in Chinese)