

沙漠公路风蚀破坏规律的数值模拟研究

李 驰, 高 瑜, 黄 浩

(内蒙古工业大学 土木工程学院, 呼和浩特 010051)

摘 要: 通过 Fluent 软件对沙漠公路的风蚀破坏规律进行数值模拟研究。分析公路不同横断面时风沙流扰动、增速、减速、恢复的过程, 确定路基(堑)高度、边坡坡率和路面宽度等公路断面设计参数对风沙流扰动的影响, 提出沙漠公路路基(堑)风蚀破坏规律。结果表明: 路面宽度的改变对路基沿程风速变化影响较小, 各特征点处风速变化小于 5%。路基(堑)高度和边坡坡率对风沙流扰动的影响较大。随路基(堑)高度增加, 风沙流流场的扰动被增强, 路基(堑)风蚀破坏越显著, 当边坡坡率为 1:1 时, 路基模型高度 250 mm 时的迎风路肩风速为模型高度 60 mm 时的 1.15 倍, 其背风坡脚风速降低 45%; 路堑模型高度 250 mm 时的背风堑顶风速为模型高度 60 mm 时的 1.05 倍, 迎风堑脚处风速降低高达 80%。建议沙漠公路宜采用中低路基(堑), 不宜高填深挖。当路基(堑)高度一定, 边坡坡率为 1:1.75 或 1:2 时, 路基(堑)沿程风速变化平缓, 沙漠路肩不易被吹蚀破坏; 路堑中堑脚位置处不易出现堆积。其结论与室内风蚀风洞试验结果有很好的 consistency。

关 键 词: 环境岩土工程; Fluent 数值模拟; 沙漠公路; 风蚀破坏

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Numerical simulation of wind erosion damage rules for desert highway

LI Chi, GAO Yu, HUANG Hao

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

Abstract: Wind erosion damage rules of desert highway are simulated using the Fluent software. The process of disturbance, acceleration, speed-down, and recovery of the sand flow that is obstructed by different highway cross-sections are analyzed. The influences of main cross-section design parameters such as subgrade (cutting) height, slope, and pavement width on the sand flow are determined; and the wind erosion rules of desert highway subgrade (cutting) are proposed. The results indicate that the influence of the pavement width on wind speed variety is slight, the changes of wind speeds at feature points are less than 5%; but the subgrade (cutting) height and slope have great influence on wind speed variety. The disturbance of sand flow field is reinforced with the subgrade (cutting) height increases, the wind erosion damage of subgrade (cutting) is more evidently. While the side slope is 1:1, the wind speed on the shoulder of windward when the subgrade model height is 250 mm is 1.15 times more than the speed when the subgrade model height is 60 mm, but the wind speed on the bottom of leeward slope decreases 45%; the wind speed on the shoulder of windward when the cutting model height is 250 mm is 1.05 times more than the speed when the cutting model height is 60 mm; but the wind speed on the bottom of leeward slope decreases about 80%. So it is suggested that the desert highway should use middle or low height subgrade (cutting) and shouldn't be filled highly or digged deeply. While the height of subgrade (cutting) is certain, and the side slope is 1:1.75 or 1:2, the change of wind speed along the subgrade (cutting) is gentle; and the accelerate effect of windward shoulder and the speed-down effect of leeward bottom are inconspicuous. At this time, the subgrade isn't destroyed by wind erosion and the leeward bottom of cutting isn't changed by accumulation easily. The conclusions drawn from numerical simulating are consistent with the experiment results perfectly.

Key words: geoenvironmental engineering; Fluent numerical simulation; desert highway; wind erosion damage

1 引 言

我国沙漠多分布在北方干旱、半干旱地区, 由

于气候干燥、风大沙多、植被稀疏, 使得风蚀路基成为沙漠公路沙害的主要形式。笔者历经 3 年时间对内蒙古境内 S307 巴丹吉林沙漠公路尚德-孟根路

收稿日期: 2010-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50868010); 内蒙自然科学基金项目 (No. 2009BS0704); 教育部科学技术研究重点项目 (No. 210036)。

第一作者简介: 李驰, 女, 1973 年生, 博士, 教授, 主要从事沙漠环境岩土工程方面的科研工作。E-mail: tjdxlch2003@126.com

段、S217 乌兰布和沙漠公路乌海—吉兰泰路段以及 G210 库布齐沙漠公路东胜—包头路段等不同道路等级、防护状况下的沙漠公路进行实地调研,发现内蒙古境内修建的沙漠公路大约有 95% 以上受到不同程度的风蚀破坏,甚至出现大面积边坡坍塌现象。公路被严重风蚀破坏的现状已成为公路交通部门亟待解决的关键问题。

风沙土是沙漠地区最丰富、最廉价的筑路材料。由于风沙土颗粒粒径大都小于 0.50 mm, 粒间无黏聚力, 抗风蚀能力弱, 属于最易蚀性颗粒^[1]。在一定的环境风场下, 由于风沙土路基(壟)的存在, 环境风场被扰动, 引起路基(壟)沿程风速的变化, 造成路基吹蚀破坏和路壟堆积。沙漠公路风蚀破坏程度与其高度、边坡坡率、路面宽度及路线与来风方向的夹角等密切相关。针对土壤风蚀、沙漠公路风蚀问题国内已做过一些研究工作, 主要集中在风沙流的起动、输沙量等方面^[2-7]。文献[8-10]对沙漠路基合理的填土高度和防风固沙的工程实践等进行研究, 为沙漠公路风蚀破坏研究提供了很好的借鉴。但对沙漠公路风蚀破坏机制尚未明确。

文中基于 Fluent 数值计算, 对沙漠公路的风蚀破坏规律进行研究, 并与室内风蚀风洞试验结果进行相互验证, 分析公路风蚀破坏形态以及风蚀破坏规律与路基断面设计参数之间的关系, 为进一步揭示沙漠公路风蚀破坏机制提供理论依据。

2 路基风蚀破坏规律

2.1 数值计算模型

为了与风洞试验相互验证, 参考内蒙古农业大学研发的 FDY-1.2 型可移动式风蚀风洞机的实际尺寸, 建立 Fluent 二维数值计算模型^[11-12]。选择非耦合求解法、隐式算法、稳态、绝对速度的计算模式, 建立黏度层流模型。流体材料选择净风空气流体, 入口边界类型为 velocity-inlet, 设置来风场速度为 18 m/s, 出口边界类型为 outflow, 模型网格划分示意图见图 1。

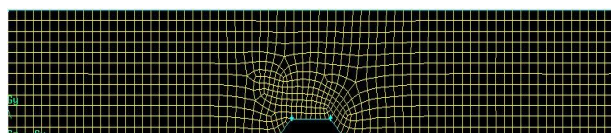


图 1 路基模型的网格划分

Fig.1 Meshing of computer region for subgrade

2.2 路基高度和边坡坡率对路基周围流场的影响

计算中, 路基模型高度选取 250、170、100、60 mm 作为沙漠公路常用路基高度的代表。选取

1:1、1:1.5、1:1.75、1:2 为沙漠公路常用的路基边坡代表坡率。当路基边坡坡率一定时, 不同路基高度下路基周围风速流场分布见图 2, 当路基高度一定时, 不同边坡坡率下路基周围风速流场见图 3。

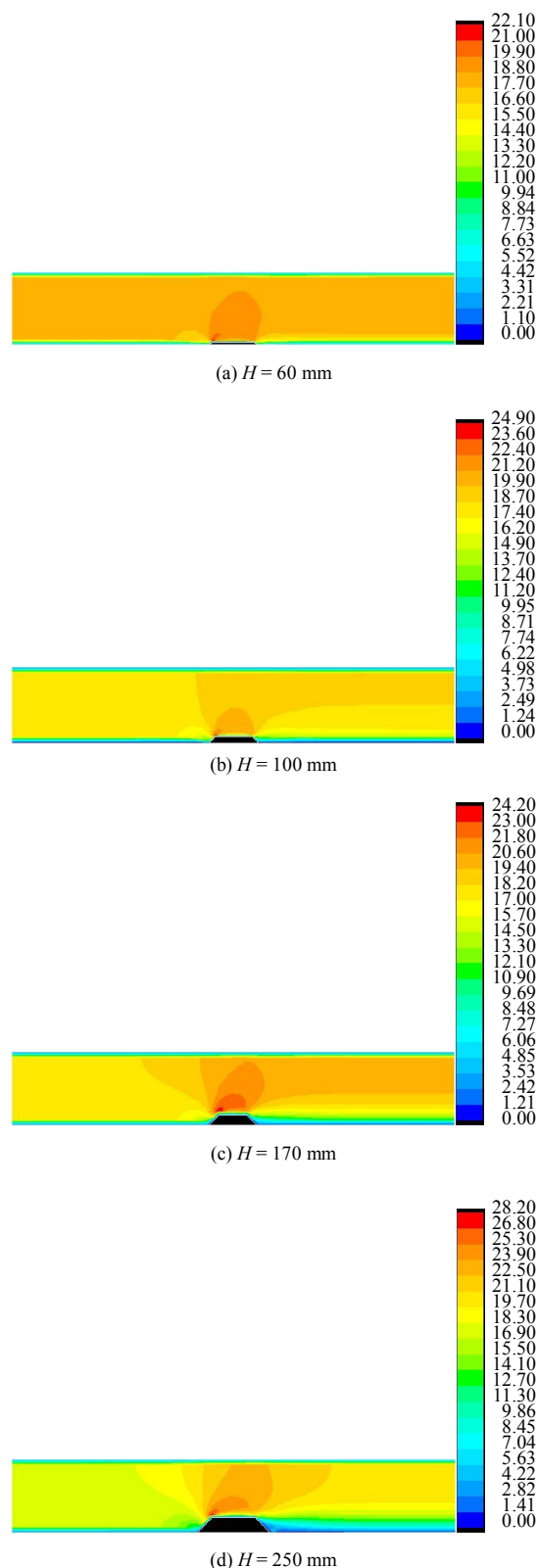


图 2 不同路基高度下路基周围风速云图
(坡率 1:1)(单位: m/s)

Fig.2 Wind speed nephogram for different subgrade heights (slope rate 1:1)(unit: m/s)

从图 2 可以看出, 由于路基的存在使路基周围环境风场和风速都发生了变化。在距离路基一定距离时, 风沙流开始减速, 并在到达路基迎风坡脚处沿路基迎风坡向上爬升, 至迎风路肩处出现增速现象, 之后风速出现回落, 当风沙流越过路基到达背风坡脚处风速急剧减小。因此, 路基高度越大对环境风速流场的扰动越明显, 迎风坡肩被吹蚀、背风坡脚出现堆积越显著, 当风沙流远离路基后, 环境风速流场的恢复也越缓慢。

分析图 3 可得, 当路基高度一定时, 边坡坡率越大, 对环境风场的影响越显著。边坡坡率为 1:1.75 和 1:2 时, 沿程风速变化较缓和, 迎风坡肩风速增加和背风坡脚风速减弱不明显。

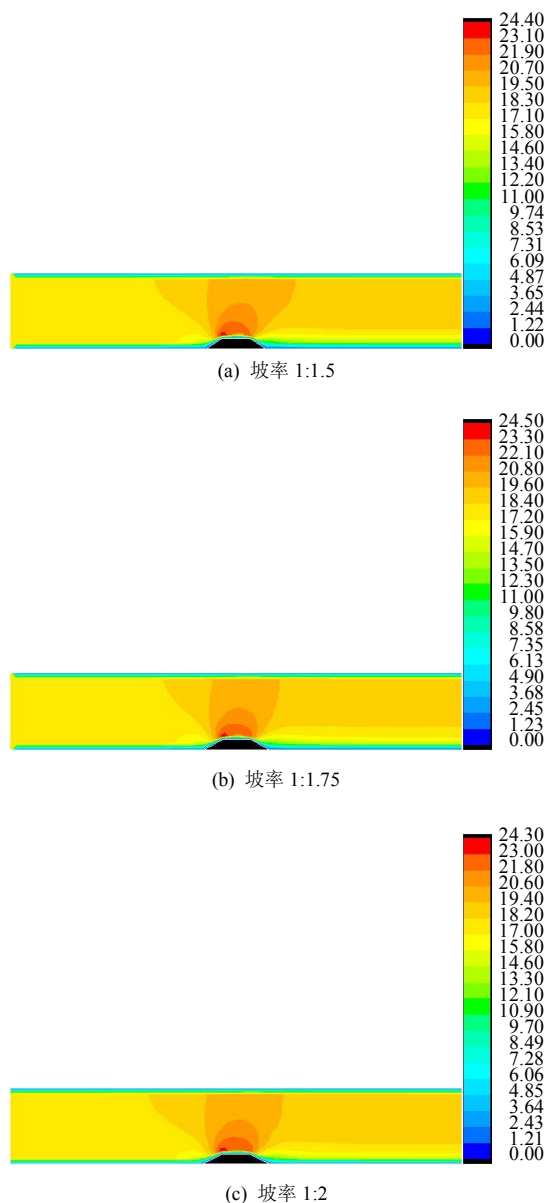


图 3 不同边坡坡率下路基周围风速云图
($H = 170 \text{ mm}$) (单位: m/s)

Fig.3 Wind speed nephogram for different slopes
($H = 170 \text{ mm}$) (unit: m/s)

2.3 风蚀路基特征点风速变化规律

选择具有代表性的风速变化特征点, 即迎风坡脚 A 点、迎风坡肩 B 点、背风坡肩 C 点、背风坡脚 D 点, 如图 4 所示。

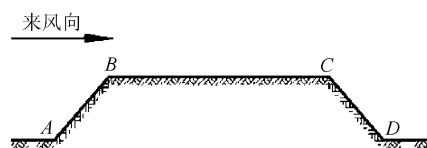


图 4 路基示意图

Fig.4 Diagram of the roadbed

计算中, 确定的净风中心风速 $V_0 = 18 \text{ m/s}$, 与室内风洞试验中选用的风洞中心风速一致。当边坡坡率一定时, 确定不同路基高度时路基特征点处风速比值, 并与室内风洞试验比较见表 1。

表 1 不同高度时路基特征点风速比值 V/V_0 (边坡坡率 1:1)
Table 1 Wind speed ratios of feature points for different subgrade heights V/V_0 (slope rate 1:1)

试验方法	路基模型高度 /mm	风速比值 / %			
		A 点	B 点	C 点	D 点
Fluent 模拟	60	53.3	140.2	123.9	26.1
	100	51.5	151.2	113.3	25.6
	170	47.2	152.2	98.9	19.4
	250	44.4	161.1	88.9	14.4
室内 试验	60	58.0	91.4	58.9	34.7
	100	46.9	94.5	58.4	21.5
	170	40.3	96.0	56.2	19.2
	250	38.1	103.0	52.0	17.2

分析表 1 中数据结果看出, 一定的边坡坡率下, 随路基高度的增加, 迎风坡肩风速愈大, 背风坡脚处风速下降愈明显, 越容易在迎风坡肩处出现吹蚀破坏, 背风坡脚处出现堆积, 这一路基风蚀破坏规律在 Fluent 数值模拟和室内风蚀风洞试验中得到相同的验证。当边坡坡率为 1:1 时, 在数值模拟计算中, 路基模型高度 250 mm 时的迎风坡肩风速为模型高度 60 mm 时的 1.15 倍, 背风坡脚风速降低 45%; 室内风蚀风洞试验中, 路基模型高度 250 mm 时的迎风坡肩风速为模型高度 60 mm 时的 1.13 倍, 背风坡脚风速降低 50%。

当路基高度一定时, 确定不同边坡坡率时路基特征点处风速比值, 与室内风洞试验比较见表 2。表中数据显示, 当路基高度一定, 边坡坡率为 1:1 时, 路基沿程风速变化越显著, 在边坡坡率为 1:1.75 和 1:2 时, 路基沿程风速变化较平缓, 迎风坡肩增速和背风坡脚减速效果不显著, 此时, 沙漠公路路基不易被吹蚀破坏。

表 2 不同坡率下路基特征点风速比值 V/V_0 ($H = 170$ mm)
Table 2 Wind speed ratios of feature points for different slopes V/V_0 ($H = 170$ mm)

试验方法	边坡坡率	风速比值 / %			
		A 点	B 点	C 点	D 点
Fluent 模拟	1:1	47.2	152.2	98.9	19.4
	1:1.5	65.2	145.3	129.2	38.5
	1:1.75	71.1	140.0	130.2	44.4
	1:2	73.4	143.8	132.7	53.3
室内 试验	1:1	40.3	96.0	56.2	19.2
	1:1.5	45.6	91.8	63.4	23.1
	1:1.75	52.0	90.0	66.1	26.9
	1:2	49.0	91.6	77.5	25.4

2.4 路面宽度对路基周围流场的影响

当路基高度 $H = 170$ mm, 坡率为 1:1 时, 考察路面宽度对沿程风速变化的影响, 见表 3。当路基模型宽度改变时, 路基沿程 A、B、C、D 4 个特征点风速比值的误差分别为 2.1%、2.6%、1.7%、4.3%, 均小于 5%。因此, 路基宽度的改变对路基沿程风速变化影响较小, 数值模型和物理模型中可仅从行车安全和行车顺适上考虑满足使用要求即可。

表 3 不同路面宽度下特征点风速比值 V/V_0
Table 3 Wind speed ratios of feature points for different subgrade widths V/V_0

路基模型宽度 a / mm	风速比值 / %			
	A 点	B 点	C 点	D 点
460	51.5	140.2	98.9	25.6
920	52.1	141.9	97.8	24.6
1 380	52.2	140.3	97.2	24.5
1 840	51.1	143.8	97.2	24.9

3 路堑风蚀破坏规律

3.1 数值计算模型

建立路堑的 Fluent 二维数值模型。路堑模型的网格划分见图 5。计算中, 同样取路堑模型高度为 250、170、100、60 mm, 取 1:1、1:1.5、1:1.75、1:2 为 4 个边坡代表坡率。

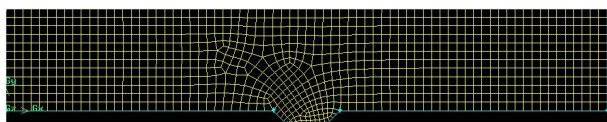
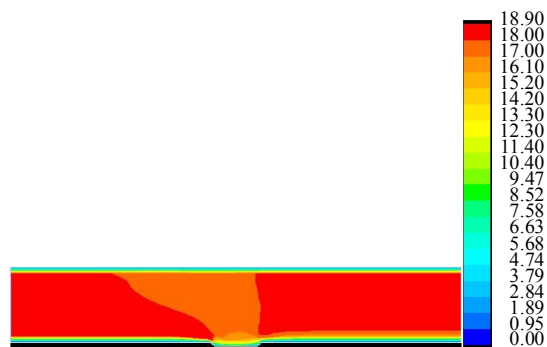


图 5 路堑模型的网格划分

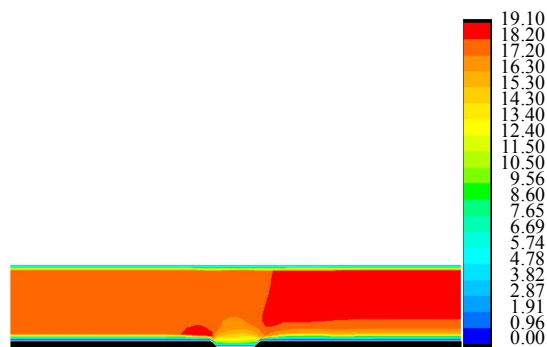
Fig.5 Meshing of computer region for road cutting

3.2 路堑高度和边坡坡率对路堑周围流场的影响

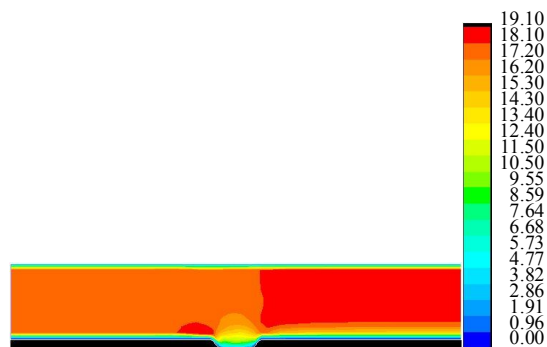
当路堑边坡坡率为 1:1 时, 不同路堑高度下路堑周围风速云图见图 6。当路堑高度为 170 mm 时, 不同边坡坡率下路堑周围风速云图见图 7。



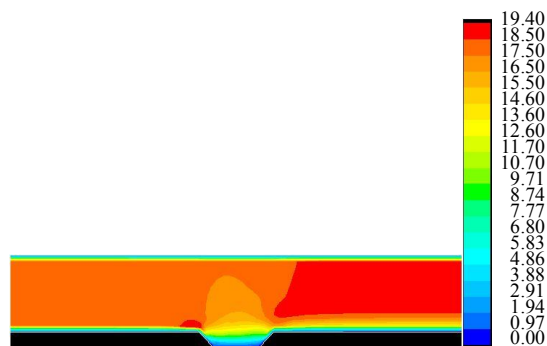
(a) $H = 60$ mm



(b) $H = 100$ mm



(c) $H = 170$ mm



(d) $H = 250$ mm

图 6 不同高度下路堑周围风速云图
(边坡坡率 1:1) (单位: m/s)

Fig.6 Wind speed nephogram for different cutting height
(slope rate 1:1) (unit: m/s)

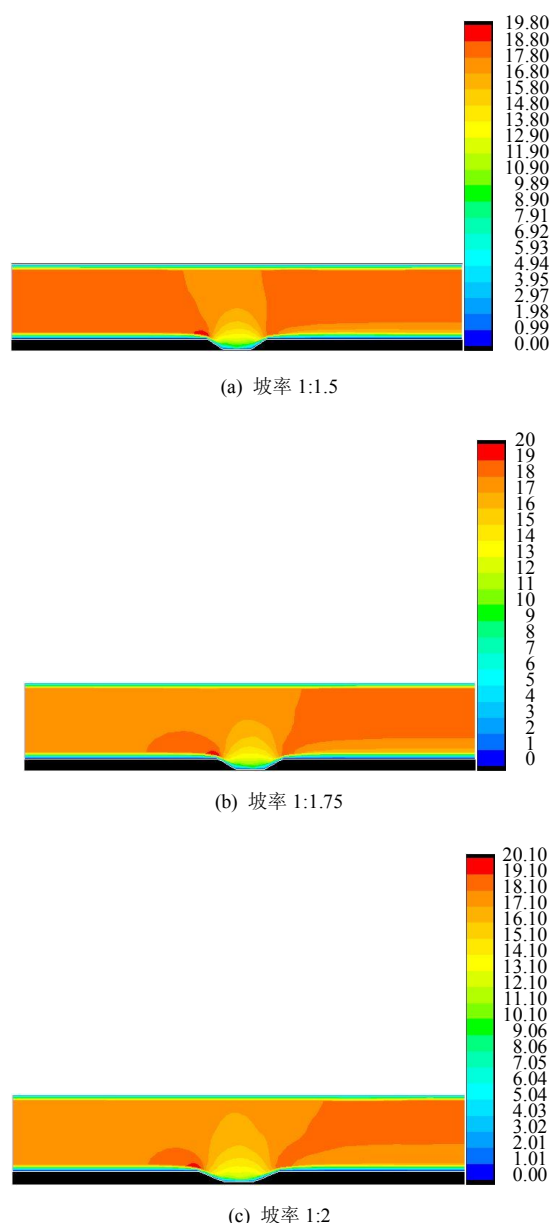


图7 不同边坡坡率下路堑周围风速云图
($H = 170 \text{ mm}$) (单位: m/s)

Fig.7 Wind speed nephogram for different cutting slopes
($H = 170 \text{ mm}$) (unit: m/s)

由图 6、7 可知, 由于路堑的存在使得路堑周围的风场发生明显的变化, 风沙流在坡顶处增速明显, 之后沿路堑背风侧出现漩涡降至堑脚处减速效果显著, 且通过堑脚至迎风坡顶风速逐渐增大, 离开路堑后风沙流逐渐恢复稳定。因此, 路堑在坡顶处易发生风蚀破坏, 且背风坡顶较迎风坡顶吹蚀更为严重; 在堑脚处易发生沙粒堆积, 且迎风堑脚处堆积比背风堑脚处明显。

3.3 风蚀路堑特征点风速变化规律

选择具有代表性的风速变化特征点, 即背风坡顶 A 点、背风堑脚 B 点、迎风堑脚 C 点、迎风坡顶 D 点, 如图 8 所示。

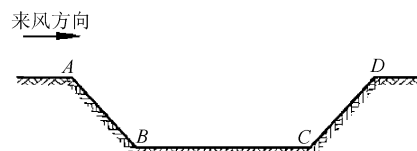


图8 路堑示意图
Fig.8 Diagram of the cutting

净风中心风速仍选 $V_0 = 18 \text{ m/s}$, 当路堑边坡坡率为 1:1 时, 不同高度路堑的特征点风速比值见表 4。随路堑高度的增大, 风沙流在背风坡顶 A 点处风速越大, 在背风堑脚 B 点处和迎风堑脚 C 点处风速降低越明显, 当风沙流由迎风堑脚上爬到迎风坡顶 D 点处风速增加越显著。

表4 不同高度路堑特征点风速比值 V/V_0 (边坡坡率 1:1)
Table 4 Wind speed ratios of feature points for different cutting heights V/V_0 (slope 1:1)

路堑模型 高度/mm	风速比值 / %			
	A 点	B 点	C 点	D 点
60	100.2	30.0	28.9	67.2
100	102.0	24.5	13.3	67.8
170	102.0	22.2	11.7	72.2
250	105.0	21.7	5.6	81.7

当边坡坡率为 1:1 时, 路堑模型高度 250 mm 时背风坡顶风速是模型高度为 60 mm 时的 1.05 倍, 迎风坡顶风速为模型高度 60 mm 时的 1.21 倍; 而背风堑脚处风速降低约 28%, 迎风堑脚处风速降低高达约 80%。因此, 在沙漠工程中若开挖路堑, 建议选择中低路堑。

当路堑高度为 $H = 170 \text{ mm}$, 不同坡率下路堑特征点的风速比值见表 5。随路堑坡率的减小, 沿程风速变化平缓, 背风堑脚 B 点处和迎风堑脚 C 点风速降低不显著, 堑脚位置处不易出现堆积。

表5 不同坡率下路堑特征点风速比值 V/V_0 ($H = 170 \text{ mm}$)
Table 5 Wind speed ratios of feature points for different slopes V/V_0 ($H = 170 \text{ mm}$)

路堑模型 边坡坡率	风速比值 / %			
	A 点	B 点	C 点	D 点
1:1	102.0	22.2	11.7	72.2
1:1.5	114.0	42.2	41.1	98.9
1:1.75	116.7	46.7	46.1	103.9
1:2	117.2	51.7	53.9	107.8

4 结 论

(1) 以路基(堑)高度、边坡坡率和路面宽度作为沙漠路基断面的主要设计参数进行风速流场分析。路面宽度对沙漠路基风蚀破坏影响较小, 路基

(堑)高度和边坡坡率对路基(堑)沿程风速变化影响显著,随路基(堑)高度增加,路基(堑)周围风场扰动被增强,路基(堑)风蚀破坏愈严重。

(2)以沙漠路基(堑)高度不大于 2.5 m 为例,当边坡坡率为 1:1.75 或 1:2 时,路基(堑)沿程风速变化较平缓,路基(堑)风蚀破坏较弱。因此,沙漠公路忌高填深挖,建议采用 1:1.75 或 1:2 的边坡坡率。

文中通过数值模拟研究沙漠公路风蚀破坏规律,并与室内风蚀风洞试验结果进行相互验证。关于沙漠公路风蚀破坏机制及风蚀破坏后路基稳定性将做进一步研究。

致谢:感谢内蒙古农业大学风洞实验室的赵志杰老师、童淑敏老师以及各位硕士生在风洞试验中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] SKIDMORE E L, POWERS D H. Dry soil-aggregate stability: Energy-based index[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1982, 46: 1274—1279.
- [2] BAGNOLD R A. The physics of wind sand and desert dune[M]. New York: Willian Morrow & Co., 1943.
- [3] CHEPIL W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind[J]. **Soil Structure Soil Science**, 1952, 75: 473—483.
- [4] WOODRUFF N P, SIDDOWAY F H. A wind erosion equation[J]. **Soil Science Society of America Proceedings**, 1965, 29(5): 602—608.
- [5] 郑晓静, 王萍. 风沙流中沙粒随机运动的数值模拟研究[J]. **中国沙漠**, 2006, 26(2): 184—188.
ZHENG Xiao-jing, WANG Ping. Numerical simulation of stochastic movement of sands in wind-blown sand[J]. **Journal of Desert Research**, 2006, 26(2): 184—188.
- [6] 黄宁, 郑晓静. 风沙跃移运动发展过程及静电力影响的数值模拟[J]. **力学学报**, 2006, 38(2): 145—152.
HUANG Ning, ZHENG Xiao-jing. The numerical simulation of the evolution process of wind-blown sand saltation and effects of electrostatic force[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2006, 38(2): 145—152.
- [7] 郑晓静. 风沙运动的力学机制研究[J]. **科技导报**, 2007, 25(14): 22—27.
ZHENG Xiao-jing. On mechanism of wind-blown sand movement[J]. **Science & Technology Review**, 2007, 25(14): 22—27.
- [8] 罗俊宝. 我国不同沙漠类型区公路沙害防治技术与机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [9] 马培建. 影响沙漠地区路基填土高度原因分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [10] 胡朋. 牧区道路路基合理断面型式的研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [11] 刘汉涛, 麻硕士, 窦卫国, 等. 国内外移动式风洞在土壤风蚀试验中的应用[J]. **农机化研究**, 2006, 12: 132—135.
LIU Han-tao, MA Shuo-shi, DOU Wei-guo, et al. Application of movable wind tunnel in the study of wind erosion at home & abroad[J]. **Journal of Agricultural Mechanization Research**, 2006, 12: 132—135.
- [12] 齐志伟, 童淑敏, 田建川, 等. 基于 Fluent 的风洞典型风蚀地表风速廓线的模拟[J]. **农机化研究**, 2009, 1(1): 35—37.
QI Zhi-wei, TONG Shu-min, TIAN Jian-chuan, et al. The simulation of wind speed contour line of typical wind erosion surface in wind—tunnel based on fluent[J]. **Journal of Agricultural Mechanization Research**, 2009, 1(1): 35—37.