

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220983

沥青坡面水流特性影响因素敏感性分析

王 笑¹, 邱自萍², 李啟荣³, 华开成³, 陈 辉⁴

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 广东交通职业技术学院土木工程学院, 广东 广州 510800;
3. 广东惠清高速公路有限公司, 广东 广州 510900; 4. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟
与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为阐明城市沥青道路坡面积水分布影响机理, 采用二维浅水方程模拟分析沥青坡面降雨径流特性, 基于全局综合敏感性分析的正交试验法, 对引起沥青坡面不同程度积水的多重影响因素(坡面横坡、纵坡、坡面宽度、坡长、降雨强度及糙率系数)进行综合敏感性分析。以最大径流深度为敏感性分析指标, 同时进行极差分析和方差分析, 不仅给出了各影响因素敏感性排序, 且明确了各影响因素的显著性水平。研究表明, 漫流排水条件下, 横坡、坡面宽度及降雨强度对坡面径流深度影响均较显著; 坡长对坡面径流深度影响不显著; 坡面径流深度与横坡均呈负相关关系, 与降雨强度、坡宽、坡长呈正相关关系, 与糙率系数呈先负后正的相关关系。研究成果可为工程实践提供参考。

关键词: 沥青坡面; 水动力; 敏感性分析; 坡面宽度; 横坡; 降雨强度

中图分类号: TV121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0019-04

1 引言

全球气候变化引发的极端降水事件逐年增加, 城市暴雨内涝已成为干扰城市正常运行、威胁城市公共安全的重大问题。据不完全统计, 城市道路铺装面积占城市用地面积比例高达 30%, 铺装材料大多采用密级配不透水沥青混合料。沥青坡面相比于有草被覆盖的坡面, 其坡面水流阻力较小, 汇流速度更快, 极易形成局部积水^[1]。目前, 围绕坡面流体力学特性的研究主要采用有机玻璃床面或人工模拟粗糙度床面, 通过人工模拟降雨^[2]或放水试验^[3]定量分析降雨强度、水流流量、坡度、糙率等因素对坡面流体力学特性的影响, 但很少量化各因素的影响程度, 也未区分坡面纵坡和横坡, 缺乏多重影响因素的综合分析。此外, 由于坡面流水深一般较浅, 受测量手段和精度限制^[4], 多选用坡面流流速、阻力系数等参数来表征坡面流体力学特性, 对坡面流水深演变规律的研究并不深入。因此, 本文重点关注城市典型的沥青坡面流水深变化特征, 在现有研究^[5,6]基础

上, 通过数值模拟的方法, 以径流深为主要表征参数, 对引起坡面不同程度积水的多重影响因素(坡面横坡、纵坡、坡面宽度、坡长、降雨强度及糙率系数)进行综合敏感性分析, 以揭示沥青坡面积水的作用机理, 从而为坡面快速排水提供依据。

2 正交试验设计原理

正交试验法是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性(具备“均匀分散, 齐整可比”的特点)的因素和水平进行敏感性试验, 它是一种基于标准的正交表揭示多因素多水平对试验指标影响的快速且高效的试验设计方法。

2.1 正交表构造

正交表是正交试验设计的基础工具, 通常用 $L_n(q^m)$ 表示, 其中 L 为正交表代号; n 为试验总次数; m 为因素数量; q 为因素水平数; 正交表具有两个重要性质: ①任一因素的各水平具有相同的试验次数; ②任两个因素的水平组合具有相同的试验次数。

2.2 统计模型和数据分析

同时采用极差分析和方差分析两种方法分析

收稿日期: 2022-05-11, 修回日期: 2022-06-17

作者简介: 王笑(1990-), 女, 博士、助理研究员, 研究方向为水环境水动力数值模拟, E-mail: 1029323406@qq.com

通讯作者: 陈辉(1990-), 男, 博士、高级工程师, 研究方向为水工结构工程, E-mail: chenhui@iwhr.com

正交试验数据。极差分析法通过求解因素 j 在 i 水平下所对应的各次试验指标之和 K_{ij} , 进而求解因素 j 的极差 R_j (因素 j 各水平指标下的最大值与最小值之差)。极差 R_j 越大, 表明该因素对试验指标的影响越显著, 也就越敏感。方差分析法是将总变异的平方和及自由度分解为对应于不同变异来源的平方和及自由度, 以此获得不同来源的变异对总变异的贡献大小, 从而确定各因素对研究结果影响程度^[3]。该方法可区分因素水平或耦合效应的变化与误差波动所引起的试验结果差异, 即:

$$S_T = S_A + S_e \quad (1)$$

式中, S_T 为总平方和; S_A, S_e 分别为组间、组内平方和。

S_T, S_A, S_e 的计算公式分别为:

$$S_T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$S_A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = q \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$S_e = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (4)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个因素在第 j 个水平上的结果; \bar{x}_i 为第 i 个因素所有水平上结果的平均值; \bar{x} 为全部结果的总平均值。

自由度指计算某个统计量时, 取值不受限制的变量个数, 总平方和的自由度为 $(mq - 1)$, 组间平方和的自由度为 $(m - 1)$, 组内平方和的自由度为 $m(q - 1)$ 。变异平方和除以自由度的商即为均方差:

$$\bar{S}_A = S_A / (m - 1) \quad (5)$$

$$\bar{S}_e = S_e / [m(q - 1)] \quad (6)$$

式中, \bar{S}_A, \bar{S}_e 分别为组间、组内均方差。

显著性水平 F 的计算公式为:

$$F = \bar{S}_A / \bar{S}_e \quad (7)$$

3 沥青坡面降雨径流水动力数学模型

3.1 模型控制方程

降雨作用下, 沥青坡面产汇流受坡面宽度、横坡、纵坡、坡长及糙率等因素影响, 具有典型的二维特征, 且坡面径流水平尺度远大于垂向尺度, 符合流体静压分布假设, 因此本文采用二维浅水方程来模拟沥青坡面径流的运动过程, 其控制方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \\ &\frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \\ \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} &= -f\bar{u}h - \\ &gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \\ &\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \right. \quad (9)$$

其中

$$f = 2\omega \sin\varphi$$

式中, h 为水深; t 为时间; x, y 为笛卡尔坐标系坐标; S 为源项; \bar{u}, \bar{v} 分别为 x, y 方向沿水深的平均流速; f 为科氏力系数; g 为重力加速度; η 为水位; p_a 为当地气压; ρ 为水密度; ρ_0 为参考水密度; $\tau_{sx}, \tau_{bx}, \tau_{sy}, \tau_{by}$ 分别为水面与河床边界水流切应力在 x, y 方向上的分量; u_s, v_s 分别为源汇项水流流速; $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 均为辐射应力分量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 均为水平黏滞应力; ω 为地球自转角速度; φ 为当地纬度。

3.2 坡面薄层水流水舌流速计算模式

坡面流水深非常小, 水流在运动过程中往往表现为过流断面水体流速分布差异较大, 同一个断面某些位置上形成流速较大的水舌, 而另一些位置上流速较慢或没有水体流过。基于此, 本文采用水舌流速来描述单宽流量与流速间的关系^[7]:

$$v = Qh \left/ \left[\left(h + \frac{2}{\pi}n \right) (h + n) \right] \right. \quad (10)$$

式中, Q 单宽流量; n 为糙率。

由式(10)可知, 当水深为零时, 单宽平均流速为零; 当水深较大时, 单宽平均流速为 Q/h , 既符合薄层水流水深条件, 又符合较大水深条件。

3.3 模型验证

在交通运输部公路科学院试验场内某一沥青坡段进行人工模拟降雨试验, 降雨强度为 120 mm/h, 采用染色示踪法测量 7 个特征点的水流流速, 这 7 个特征点位于同一纵断面, 如图 1 所示。试验路段长 55.0 m, 宽 2.8 m, 横坡为 0.768%, 纵坡为 0.791%, 路缘石高 12 cm, 受路缘石阻挡作用, 路段排水方式为下游排水。

表 1 为各测点流速的实测值与模拟值, 两者之间最大的绝对误差为 0.07 m/s, 相对误差均控制在 10% 之内, 表明模型具备了处理坡面降雨产汇流的能力, 可较好描述坡面降雨径流变化过程。

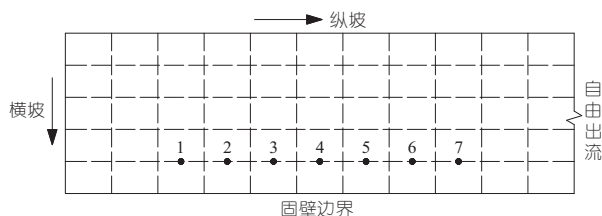


图 1 现场试验

Fig. 1 The field test

表 1 各测点流速实测值与模拟值

Tab. 1 The measured and simulated flow velocities

测点	流速/(m·s ⁻¹)		绝对误差 /(m·s ⁻¹)	相对 误差/%
	实测值	模拟值		
1	0.565	0.583	0.018	3.19
2	0.627	0.657	0.030	4.78
3	0.758	0.714	0.044	5.80
4	0.820	0.762	0.058	7.07
5	0.867	0.803	0.064	7.38
6	0.907	0.840	0.067	7.39
7	0.943	0.873	0.070	7.42

4 沥青坡面水流特性影响因素分析

4.1 试验设计及水动力计算

采用正交试验法,选择坡面最大径流深度 h_{max} 作为敏感性分析指标,分析坡面横坡、纵坡、坡宽、坡长、降雨强度及粗糙程度 6 种因素对坡面降雨径流特性的影响。

结合现行道路路线相关设计规范^[8]及水工设计手册^[9],确定 3 个试验水平,见表 2,选择 L_{18} (3^7) (设置一列误差列)正交表设计模拟工况,表 3 为 18 种正交试验设计工况及模拟结果。由表 3 可知,指标 h_{max} 在工况 17 条件下最小,为 3.407 mm,在工况 3 条件下最大,为 15.768 mm。

表 2 正交试验因素水平参数取值

Tab. 2 Values of the orthogonal experiment factors and levels

因素	横坡	纵坡	坡宽	坡长	降雨强度	糙率
水平	/%	/%	/m	/m	/(mm·h ⁻¹)	系数
1	1	2	24	200	100	0.013
2	2	4	32	300	150	0.014
3	3	6	40	500	200	0.016

4.2 结果分析

为进一步明确各因素对沥青坡面径流深度的影响程度,对指标 h_{max} 的影响因素做极差分析,见表 4。极差分析结果表明,各影响因素对指标 h_{max} 的敏感性由强到弱依次为横坡、降雨强度、坡宽、糙率系数、坡长、纵坡。

图 2 绘制了指标 h_{max} 的影响因素效应曲线。由图 2 可知,横坡、坡宽及降雨强度变化导致的径流深度极差值明显大于糙率系数、坡长及纵坡导致的径流深度极差值。此外,坡面径流深随横坡

表 3 正交试验设计工况及结果

Tab. 3 Design schemes of the orthogonal experiment and calculation results

工况	横坡	纵坡	坡宽	坡长	降雨强度	糙率系数	误差列	h_{max} /mm
1	1	1	1	1	1	1	1	4.921
2	1	2	2	2	2	2	2	9.229
3	1	3	3	3	3	3	3	15.768
4	2	1	1	2	2	3	3	5.006
5	2	2	2	3	3	1	1	7.092
6	2	3	3	1	1	2	2	6.193
7	3	1	2	1	3	2	3	5.467
8	3	2	3	2	1	3	1	4.923
9	3	3	1	3	2	1	2	4.504
10	1	1	3	3	2	2	1	8.753
11	1	2	1	1	3	3	2	10.066
12	1	3	2	2	1	1	3	7.776
13	2	1	2	3	1	3	2	6.875
14	2	2	3	1	2	1	3	6.803
15	2	3	1	2	3	2	1	6.955
16	3	1	3	2	3	1	2	9.947
17	3	2	1	3	1	2	3	3.407
18	3	3	2	1	2	3	1	5.988

表 4 指标 h_{max} 影响因素极差分析、方差分析

Tab. 4 Results of influencing factors on h_{max} by range analysis and variance analysis

类别	项目	横坡	纵坡	宽度	坡长	降雨强度	糙率系数
极差分析	K_1	56.513	40.969	34.859	39.438	34.095	41.043
	K_2	38.924	41.520	42.427	43.836	40.283	40.004
	K_3	34.236	47.184	52.387	46.399	55.295	48.626
	R_j	22.277	6.215	17.528	6.961	21.200	8.622
方差分析	F_j	9.674	0.830	5.420	0.869	8.335	1.554

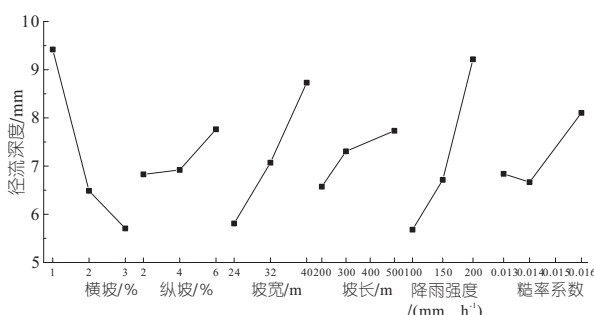


图 2 指标 h_{max} 的影响因素效应曲线

Fig. 2 Influence factor effect curve of indicator h_{max}

的增大而减小,然而随纵坡、坡宽、坡长及降雨强度的增大而增大;在糙率系数小于 0.014 时,径流深随着糙率系数增大而减小,而当糙率系数大于 0.014 时,径流深随着糙率系数的增大而增大。

对指标 h_{max} 的影响因素做方差分析,见表 4。方差分析结果也表明,各影响因素对指标 h_{max} 的敏感性由强到弱依次为横坡、降雨强度、坡宽、糙率系数、坡长、纵坡。图 3 为各影响因素对指标 h_{max} 不确定性影响的显著性水平。由图 3 可知,

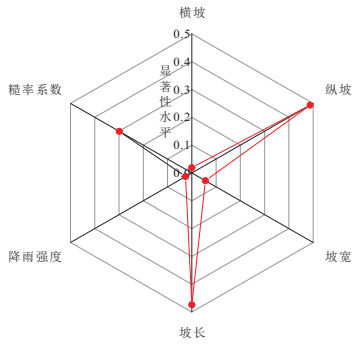
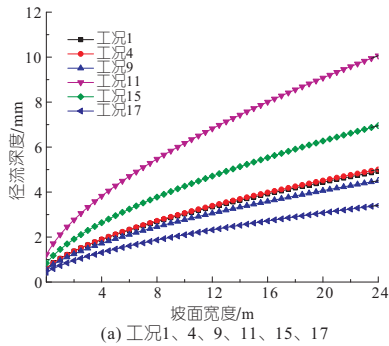
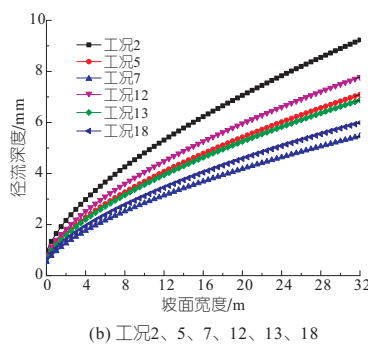


图 3 各影响因素对指标 h_{max} 影响的显著性水平

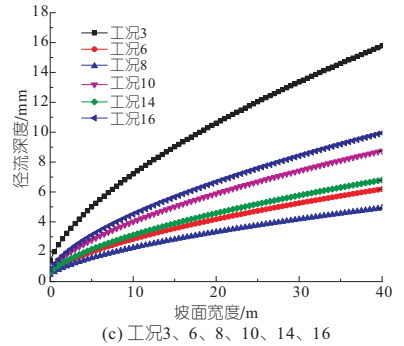
Fig. 3 Significance level of influencing factors on h_{max}



(a) 工况1、4、9、11、15、17



(b) 工况2、5、7、12、13、18



(c) 工况3、6、8、10、14、16

图 4 下游出流断面径流深度变化曲线

Fig. 4 Flow depth variation of downstream outlet section

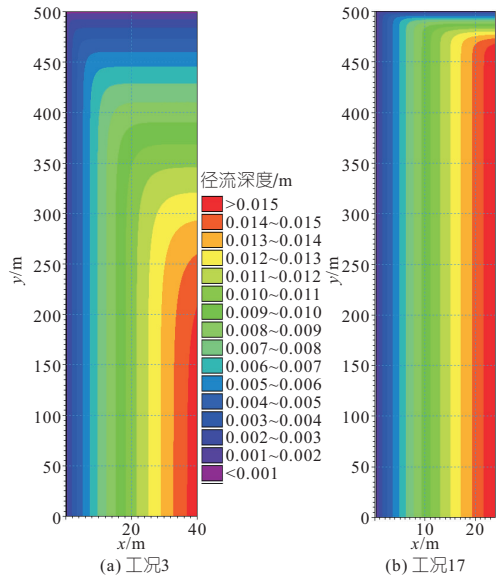


图 5 典型工况条件下坡面径流深度分布

Fig. 5 Flow depth distribution on slope under typical conditions

5 结论

- a. 极差分析与方差分析结果一致,横坡、坡面宽度及降雨强度对坡面径流深度的影响较显著。
- b. 坡面径流深与横坡呈负相关关系,与降雨强度、路面宽度、坡长及纵坡呈正相关关系。
- c. 相比于纵坡,横坡的增大更有利于坡面排水。

横坡、坡宽及降雨强度对指标 h_{max} 的影响显著,糙率系数、纵坡及坡长对指标 h_{max} 的影响不显著。

4.3 坡面径流特性分析

图 4 为 18 种工况条件下横断面径流深度变化曲线。由图 4 可知,沿着坡面横坡,径流深度逐渐增大,增长速率由快变慢。图 5 为典型工况条件下(工况 3、17)的径流分布情况。由图 5 可知,沿坡面横坡方向,路面径流深度逐渐增加,径流深度等值线在纵向上基本一致,相比于纵坡,横坡对坡面径流深度影响更为显著。

参考文献:

- [1] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 371-377.
- [2] 吕宗强,雷孝章,张鹏飞. 人工降雨条件下坡面流试验分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(5): 1-3.
- [3] 汪孟尧,姚原,宗芯伊. 不同地表糙度下坡面流动力学特性实验研究[J]. 科技通报, 2019, 35(4): 180-184.
- [4] 胡国芳,张光辉,朱良君. 3种坡面流水深测量方法比较[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 152-156.
- [5] YU CHUNSHUI, DUAN JENNIFER. Two-dimensional hydrodynamic model for surface-flow routing[J]. Journal of hydraulic engineering, 2014, 140(9): 0414045.
- [6] 吴钢锋. 二维定床和动床洪水数值模型的研究和应用[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [7] WANG XIAO, CHEN HUI, NI DONG, et al. Study on hydrodynamic characteristics and influence factors of asphalt pavement runoff[J]. Water science & technology, 2021, 84(12): 3928-3940.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路路线设计规范: JTG D20-2017[S]. 北京:人民交通出版社, 2018.
- [9] 刘志明,王德信,汪德燧. 水工设计手册(第1卷): 基础理论(第2版)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2011.

Research on Vibration Characteristics of Shafting System of Hydroelectric Generating Set Under Different Load Conditions

ZOU Jia-jie¹, ZHOU Da-qing¹, GUO Jun-xun², DONG Wen-chang¹, WANG Yin-song¹, YOU Jun-song²
(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The flow channel model and the shafting model of the turbine unit were established, and the fluid-solid coupling method was used to analyze the dynamic characteristics of the shafting system vibration of turbine unit induced by hydraulic factors under the steady-state conditions with different loads. The measured data were compared to verify the feasibility of the method. And then the correlation mechanism between the vibration characteristics and the internal flow characteristics under typical steady-state conditions was studied. The results show that the vibration characteristics of the guide bearing obtained by this method are basically consistent with the experimental values, and the trend of vibration changes with the change of load is consistent. Due to the positional relationship, the vibration characteristics of the water guide bearing and the upper guide bearing have a certain amplitude difference. The horizontal vibration amplitude of the unit is the largest due to the obvious vortex belt in the draft tube when running at 75% load condition. The research results can provide a scientific reference for the stable operation of hydropower turbine units under different loads.

Key words: hydropower unit; vibration characteristics; guide bearing; fluid solid coupling

(上接第 22 页)

Sensitivity Analysis of Influencing Factors of Flow Characteristics on Asphalt Slope

WANG Xiao¹, QIU Zi-ping², LI Qi-rong³, HUA Kai-cheng³, CHEN Hui⁴

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. College of Civil Engineering, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510800, China; 3. Guangdong Huiqing Expressway Co., Ltd., Guangzhou 510900, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to illustrate the influence mechanism of flow distribution on slope of urban asphalt road, two-dimensional shallow water equations were applied to simulate runoff characteristics on asphalt slope. Comprehensive sensitivity analysis was performed on multiple factors (cross slope, longitudinal slope, slope width, slope length, rainfall intensity and roughness coefficient) which caused different degrees of ponding on asphalt slope. The maximum flow depth was taken as the sensitivity analysis index. Both range and variance analysis were performed, through which the sensitivity ranking of the influencing factors were obtained and the significance level can be clarified as well. The results show that under overflow drainage condition, cross slope, pavement width and rainfall intensity have significant effects on flow depth; Slope length has no significant effect on flow depth. Flow depth is negatively correlated with cross slope, and positively correlated with rainfall intensity, pavement width and slope length, and negatively correlated first and then positively correlated with the roughness coefficient. The research results can provide reference for engineering practice.

Key words: asphalt slope; hydrodynamics; sensitivity analysis; slope width; cross slope; rainfall intensity

(上接第 206 页)

Performance Test and Flow Field Analysis of Submersible Tubular Pump Device in Yangzhou Sluice Pump Station

DING Ping^{1,2}, LIU Jin-sheng², GE Heng-jun³, LV Yu-ting¹, YANG Fan¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;
2. Water Conservancy Project Construction Center of Yangzhou City, Yangzhou 225000, China;
3. Yangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225007, China)

Abstract: In order to clarify the hydraulic performance of the submersible tubular pump device in Yangzhou Gate Pumping Station, the internal flow and hydraulic performance of the submersible tubular pump device were analyzed by numerical simulation combined with physical model test. The influence of the front and rear bulbs body on the energy performance of the pump device was compared and analyzed through the comprehensive characteristic index C. P. I, and the scheme of the submersible tubular pump device with the rear bulb body was optimized. The maximum efficiency of the submersible tubular pump device with the rear bulb body is 78.86%, the flow rate is 314.86 L/s, the lift is 3.594 m, and the blade placement angle is +2°. When the blade angle is -4°, the runway speed of the prototype pump device is 295.19 r/min, which is 1.75 times the rated speed of the prototype pump device. The streamline of straight pipe inlet is smooth under each flow rate conditions, the local area of guide vane appears backflow and the spiral flow inside straight outlet conduit is obvious under small flow rate conditions. With the increase of flow rate, the proportion of hydraulic loss of bulb body and outlet conduit decreases firstly and then increases, and the proportion of hydraulic loss of bulb body and outlet conduit in the whole flow conduits of pump device is the largest. The research results can provide reference for pumping station engineering.

Key words: submersible tubular pump; pump device; hydraulic performance; flow field; model test