

虹吸排水抗淤堵能力模型试验与理论分析

汪磊, 尚岳全, 吕俊俊, 徐浩迪

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州, 310058)

摘要: 针对不同虹吸管布置方式和不同虹吸扬程高度, 模拟不同粒径砂粒在虹吸管中的流动特性及其对虹吸过程的影响, 并通过理论分析加以验证。研究表明: 粒径小于 1.00 mm 的砂粒均会在虹吸作用过程中被水流带出, 不发生孔底泥沙淤积或堵塞虹吸管, 虹吸排水过程具有抗淤堵能力; 在虹吸过程中, 管内水流速度大于砂粒的下沉速度, 证明砂粒进入虹吸管能够随水流流动。

关键词: 边坡; 虹吸排水; 抗淤堵能力; 临界扬程; 模型试验

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2019)02-0384-06

Model test and theoretical analysis of anti clogging capacity of siphon drainage

WANG Lei, SHANG Yuequan, LÜ Junjun, XU Haodi

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: For different siphon arrangement and different siphon lift, flow simulation of sand particles with different sizes was conducted. The influence of sand particles on the siphon process was studied, and was then verified by theoretical analysis. The results show that sand particles smaller than 1.00 mm in diameter are brought out of the water under the action of siphon, with no hole bottom sediment or blockage of the pipe. It is thus proved that siphon drainage has the ability of anti-clogging. The water velocity in the pipe is larger than the sand velocity during the siphon process, which indicates that sand particles can enter the siphon and flow with the water.

Key words: slope; siphon drainage; anti clogging capacity; critical lift; model test

滑坡地下水位上升是一个降雨累积的过程, 如果能及时有效地排出坡体地下水, 控制地下水位上升幅度, 就能减少滑坡的发生^[1-6]。滑坡的排水方法可分为地表排水和地下排水 2 大类, 地表排水常常效果不佳, 更多的情况需要采用地下排水。目前地下排水方法主要有排水洞系统、水平排水孔和虹吸排水孔, 其中排水洞系统的排水效率最高, 但是建设成本高, 施工周期长; 水平排水孔极易淤堵, 长期可靠性差, 导致排水效果不好^[7-9]; 虹吸排水孔是近年来发展的新技术,

以其孔位易选择、孔深浅, 集水能力强, 经济性好以及工程建设速度快等优势, 受到了众多研究者的重视, 并得到了较广泛的应用^[10-15]。尚岳全等^[10, 16-18]对虹吸排水的排水管管径、空气积累等关键问题进行了较为系统的研究, 但尚未对其是否会发生孔底泥沙淤堵及虹吸排水的抗淤堵能力等进行研究。为了保证边坡虹吸排水过程中不发生空气积累, 需要在虹吸管内形成段塞流, 这就决定了边坡虹吸排水只能采用内径较小的细管^[19], 例如常用的内径为 4 mm 虹吸管。虽然在

收稿日期: 2018-03-17; 修回日期: 2018-05-17

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(41772276); 浙江省重点研发计划项目(2017C03006)(Project(41772276) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2017C03006) supported by Key Research and Development Program of Zhejiang Province)

通信作者: 尚岳全, 教授, 博士生导师, 从事地质灾害防治研究; E-mail: syq@zju.edu.cn

虹吸排水系统建设时, 首先会在钻孔插入带管靴的透水管, 将虹吸排水管保护在透水管中^[20], 但总会有细小土砂粒进入透水管内。目前虹吸排水常用的透水管是采用打孔聚氯乙烯(PVC)管外裹土工布, 正常情况下, 透水管在保证地下水能顺利进入管内的同时能够阻止砂粒石块进入, 而在实际应用中, 土工布在插入钻孔过程中可能会发生松动、破碎等问题, 从而导致细小的砂粒进入透水管内, 而虹吸排水管内径较小, 最终可能出现淤堵。目前工程上采用打孔波纹管外裹土工布的透水管, 打孔波纹管采用长×宽为 10 mm×1 mm 的孔眼, 可以隔离直径大于 1.00 mm 的砂粒进入透水管, 外裹滤布则可隔离更小直径的砂粒进入透水管^[21]。对于虹吸排水系统, 安装透水管时外裹的土工布可能产生破损, 而打孔波纹管一般不会发生破损。因此, 在泥沙淤堵现象中, 可能进入透水管的颗粒直径应 ≤ 1.00 mm。本文通过室内模型试验和理论分析, 研究不同扬程以及不同虹吸管布置方式条件下, 砂粒在虹吸管中的流动特性及其对虹吸的影响。

1 模型试验装置与试验方案

1.1 试验装置

虹吸排水试验装置如图 1 所示(其中 H_1 为扬程即管靴内水面到虹吸管的最顶端之间的高度差, H_2 为水面到虹吸管出水口处的高度差)。由图 1 可知: 虹吸试验装置由上水管、下水管和水桶 A 及水桶 B 组成。选用透明的尼龙管作为实验的虹吸管, 顶点曲率半径为 0.1 m。

为了最大程度地模拟实际工程, 进水处水桶选择实际治理滑坡时用到的管靴, 使试验条件更贴近工程实践。为了保持管靴内水面高度不变, 安装软管 2 作为补水管。分别调节图 1 中水桶 A 和 B 相对虹吸管顶部的高度位置以实现不同参数的改变。

在实际工程中, H_2 一般大于 5.0 m, 若 H_2 太小则虹吸速率太慢, 严重影响虹吸效率。MEI 等^[22]的研究表明, 当虹吸管长保持不变, 虹吸扬程大于 8.0 m, H_2 大于 5.0 m 时, 虹吸速率保持不变, 并不随着高度差 H_2 的改变而改变。本文 H_2 设定为中间值 7.0 m, 虹吸管长保持 50.0 m 不变, 通过改变扬程 H_1 和砂粒粒径进行实验。

扬程 H_1 的改变主要通过改变管靴中水面的高度, 从而使水面与虹吸管最高点之间的长度发生不同程度的变化, 同时可以保证试验中不同扬程的虹吸管管长保持不变。

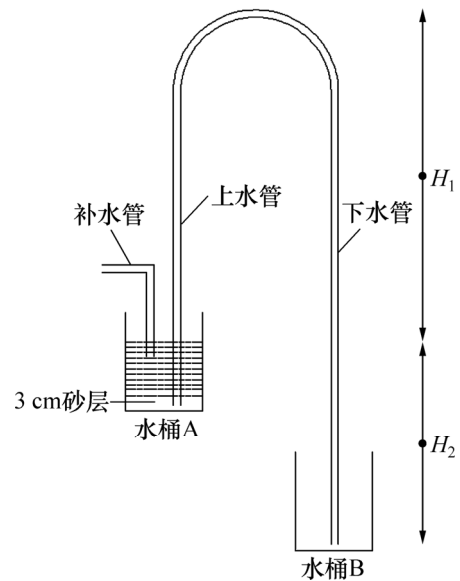
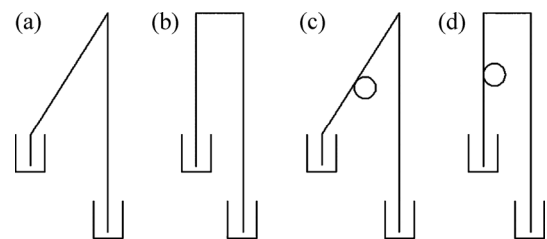


图 1 虹吸实验装置

Fig. 1 Siphon experimental device

试验中虹吸管的布置选择竖向和斜向 2 种方式, 考虑到在实际工程中, 虹吸管的布置很难保证完全拉直, 局部弯曲的情况不可避免, 设置斜向拉直中间打弯和竖向拉直中间打弯 2 种情况, 用来模拟斜孔和竖孔中虹吸管有一定打弯甚至打圈的实际情况, 以期实现更真实的模拟, 得到更加完备的结果。斜向布置时, 下水管与上水管呈 30° 角度保持不变。打弯的位置均为下水管的正中间, 弯直径均为 15 cm。本文中上水管布置方式共有 4 种, 如图 2 所示。由于虹吸管的流速与管径成正比, 管径越小, 流速越小, 因此本文选择管径为 4 mm 的虹吸管^[23-25], 如果泥沙可以通过 4 mm 虹吸管, 那么管径大于 4 mm 虹吸管也不会出现虹吸流动过程中的淤堵问题。



(a) 斜向拉直状态; (b) 竖向拉直状态; (c) 斜向拉直中间打弯状态; (d) 竖向拉直中间打弯状态

图 2 上水管布置方式

Fig. 2 Arranging ways of upper pipe

1.2 试验方案

用筛分法分别选取粒径为 0.25~0.50 mm 和

0.50~1.00 mm 的 2 组级配砂, 分别放入到管靴中进行实验。在管靴内铺厚度为 3 cm 的砂土, 分别采用 4 种不同的上水管布置方式进行实验。通过改变虹吸的扬程, 观察虹吸过程中砂土的流动现象, 并测量虹吸稳定后一定时间内的出沙流量。不断增大虹吸扬程, 探寻虹吸排砂的临界扬程, 从而确定不同扬程、不同布置方式下, 虹吸可以通过的最大粒径砂粒以及流量。

2 模型试验结果

2.1 虹吸管中砂粒的流动

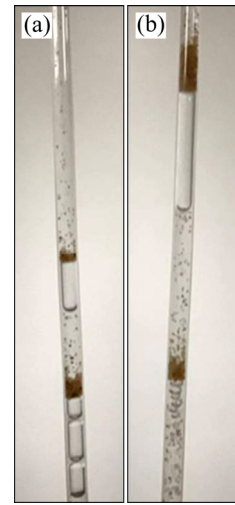
上水管中出现的砂粒随水流流动现象如图 3 所示。在虹吸水流上升过程中, 砂粒具有旋转上升的流动特点, 这反映出管内水流是紊流。随着虹吸水流上升高度增加, 虹吸管压力降低, 溶解在水中的空气逐渐释放并形成气泡, 管内形成水、气、砂的更为复杂的流动方式。越过虹吸顶点后, 管流中的气泡迅速合并形成大气泡, 出现气泡与水弹相间的段塞流, 水、气、砂运动方式发生根本性改变。由于砂粒自身重力作用的方向与水流方向一致, 而此时气泡运动方向与水流方向相反, 因此出现下水管中水、气、砂呈规律的交替下降现象, 如图 4 所示。由图 4 可知砂粒在重力作用下常常集中在气泡的顶部。



(a) 大粒径砂粒流动; (b) 小粒径砂粒流动

图 3 上水管中砂粒流动现象

Fig. 3 Phenomenon of sand flow in the upper pipes



(a) 多气泡流动; (b) 少气泡流动

图 4 下水管砂粒流动现象

Fig. 4 Phenomenon of sand flow in lower pipes

砂粒的流动与砂粒粒径、扬程以及虹吸管布置方式相关。较小粒径砂粒上升速度比大粒径砂粒的更快(见图 3(b)), 并且管流中的砂粒密度更大, 规模更大, 但同时也可能出现一定程度的淤堵; 较大粒径砂粒上升速度较慢, 砂粒密度小(见图 3(a)). 当扬程不断变大时, 流动速度减小, 砂粒全部流出的时间变长; 当虹吸管竖向布置时, 水、沙两相分布均匀, 同时向上运动, 当虹吸管斜向布置时, 砂粒在虹吸管中多集中在下边缘, 从进水口新进入虹吸管的砂粒更易从管的上缘通道随水流通过, 速度较快, 水、砂两相分布不均匀, 如图 5 所示。

2.2 不同布置方式的虹吸排砂能力

表 1 所示为不同布置方式下不同粒径的砂粒流量。由表 1 可见: 在高度差、砂粒粒径以及虹吸管布置方式一定的情况下, 砂粒流量 Q 与扬程 H_1 呈负相关; 随着扬程增大, 砂粒流量降低。例如, 在 H_2 为 7.0 m, 竖向拉直情况下, 对于粒径为 0.50~1.00 mm 的砂粒, 当扬程为 9.0 m 时, 流量为 0.856 cm^3/min ; 当扬程为 8.5 m 时, 流量为 1.556 cm^3/min 。由此可见, 增大扬程不利于砂粒的排出; 在高度差 H_2 、扬程以及虹吸管布置方式一定的情况下, 砂粒流量与粒径呈负相关, 随着粒径增大, 砂粒受到的阻力增大, 砂粒流量降低, 增大粒径不利于砂粒的排出。

在高度差 H_2 、扬程以及砂粒粒径一定的情况下, 砂粒流量与虹吸管布置方式有着一定的关系。各种布置方式的排砂能力仅表现为单位时间上的输砂量, 粒

表1 不同布置方式下不同粒径的砂粒流量 Q

Table 1 Flow rates of sand grains in different sizes under different arrangements cm³/min

布置方式	粒径/mm	扬程 H_1 /m								
		8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3
斜向拉直	(0.25, 0.50]	4.805	4.126	3.325	2.602	2.128	1.625	1.128	0.712	0.482
	(0.50, 1.00]	2.362	2.156	1.932	1.612	1.256	0.965	0.673	0.502	0.402
竖向拉直	(0.25, 0.50]	4.342	4.005	3.725	3.425	3.023	2.356	1.326	0.956	
	(0.50, 1.00]	1.556	1.324	1.152	1.012	0.856	0.765	0.692	0.636	
竖向拉直中间打弯	(0.25, 0.50]	6.525	5.206	4.452	4.028	3.705	3.034	1.723	1.045	
	(0.50, 1.00]	5.089	4.412	3.828	3.262	2.656	2.056	1.505	0.925	
斜向拉直中间打弯	(0.25, 0.50]	5.305	4.456	3.625	2.766	2.062	1.435	0.912	0.499	0.346
	(0.50, 1.00]	4.039	3.502	2.738	2.026	1.425	0.848	0.571	0.456	0.352



图5 斜向布置虹吸管中水砂两相分布

Fig. 5 Two-phase distribution of water and sand in obliquely arranged siphon tube

径小于 1.00 mm 的砂粒均可通过虹吸排出。当虹吸管竖向布置时,带砂粒虹吸临界扬程为 9.2 m;斜向布置时,临界扬程为 9.3 m,由此可知当虹吸管斜向布置时,砂粒可以在扬程范围更大的条件下排出,更有利于砂粒的排出。比较虹吸管是否打弯的 2 种情况,可以得知在虹吸管打弯的条件下,砂粒流量更大,排出速度更快,无论是竖向还是斜向布置,虹吸管打弯都增大了砂粒的流量,对砂粒排出起着促进作用。

当虹吸管竖向布置时,砂粒流量在扬程达到 9.0 m 时出现骤降现象,分析其原因:当虹吸管竖向布置时,小粒径颗粒上升速度较快,随着扬程不断增大,颗粒上升速度逐渐降低,当扬程达到 9.0 m 的临界值时,颗粒会在虹吸管中发生部分堵塞,速度减慢,但随着时间的延长,堵塞的砂粒仍然能够在虹吸作用下通过

虹吸管。由此可知,当砂粒密度不大时,虹吸速度会提高,砂粒流量也会增加。

分析对比不同粒径砂粒实验结果可知:当现场土质条件未知时,可以根据现场实际扬程对透水管打孔孔径进行严格控制。目前工程实践中主要采用长×宽为 10 mm×1 mm 的长方形孔眼,隔绝粒径大于 1.00 mm 的砂粒进入虹吸管,如果技术条件允许,可以再适当缩小孔径,隔绝偏大砂粒,同时减少砂粒的密度,防止虹吸管因泥沙速度过快而出现部分堵塞,导致虹吸速度下降,从而更好地控制和避免泥沙淤堵问题。

3 理论分析结果与试验结果对比

虹吸排水过程中的砂粒排出主要取决于水流速度与砂粒下沉速度。理论上,若水流速大于砂粒下沉速度,则砂粒能够排出,反之则会造成淤堵。

不同扬程下虹吸流体流速如表 2 所示。

研究单颗粒砂在清水中的下沉速度是研究泥沙沉

表2 不同扬程下虹吸流体流速($H_2=7.0$ m)

Table 2 Fluid flow velocity of siphon flow at different lifts ($H_2=7.0$ m)

虹吸扬程 H_1 /m	虹吸管流体平均流速 $\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
8.5	0.188
9.0	0.128
9.3	0.102
9.5	0.078

速最简单的方式。STOKES^[26]提出了滞流区球体的沉速公式,但该公式主要适用于圆球体对象,而本文试验对象是阻力更大的泥沙颗粒,因此本文采用岗恰洛夫紊流区沉速公式^[27]。

计算砂粒沉速,需要首先判断管道中流体的流动状态,通过计算雷诺数确定虹吸管中流体的流型。

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (1)$$

式中: Re 为雷诺数; v 为流体流速; ρ 为流体密度; η 为流体黏度; d 为管道直径。

计算出雷诺数之后便可根据雷诺数判断管道中流体流型。本文 $\rho=1\ 000\ \text{kg/m}^3$, 当扬程为 8.5~9.3 m 时, 流体速度为 0.102~0.188 m/s; 由 $d=0.03\ \text{m}$, $\eta=0.001\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, 计算得到雷诺数 Re 为 3 060~5 640。当 $Re>3\ 000$ 时, 流型为紊流, 因此本文管道流型可以确定为紊流。

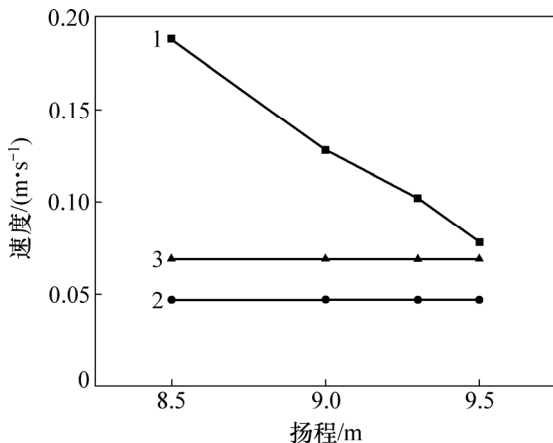
适用于紊流流型条件下的岗恰洛夫紊流区沉速公式^[27]如下:

$$\omega = 1.068 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d_s} \quad (2)$$

式中: ω 为砂粒沉速; γ_s 为砂粒的重度; γ 为水的重度; g 为重力加速度; d_s 为砂粒直径。

由式(2)可以计算出 $0.25 \leq d_s \leq 0.50\ \text{mm}$ 的砂粒沉速为 0.047 m/s, $0.50 < d_s \leq 1.00\ \text{mm}$ 的砂粒沉速为 0.069 m/s。

不同虹吸扬程下砂粒沉速与水流流速对比如图 6 所示。由图 6 可以看出: 在扬程小于 9.5 m 的情况下, 水流上升流速始终大于砂粒沉速, 由此推测, 砂粒均



1—水流上升速度; 2— $0.25 \leq d_s \leq 0.50\ \text{mm}$ 砂粒沉速;
3— $0.50 < d_s \leq 1.00\ \text{mm}$ 砂粒沉速。

图 6 不同扬程下砂粒沉速与水流上升速度对比
Fig. 6 Contrast between sand settling velocity and water rising velocity under different lifts

可以通过虹吸排水方法排出,不会出现泥沙淤堵问题。

4 结论

1) 随着虹吸扬程增大,水流速度逐渐降低,通过虹吸管排出的砂粒流量逐渐减小;当虹吸扬程低于 9.3 m 时,粒径小于 1.00 mm 的砂粒均可以通过虹吸方法排出,且虹吸管不会出现淤堵;虹吸扬程达到 9.3 m 后,单根虹吸管的砂粒流量降到 $0.35\ \text{cm}^3/\text{min}$,此时 $0.50 < d_s \leq 1.00\ \text{mm}$ 的砂粒不再通过虹吸管排出,因此虹吸扬程为 9.3 m 可看作是小砂粒($0.50 < d_s \leq 1.00\ \text{mm}$)能否排出的临界扬程。

2) 虹吸过程具有带出砂粒的能力,通常情况下管内水流速度大于小砂粒($0.50 < d_s \leq 1.00\ \text{mm}$)的下沉速度。在实际工程中,边坡地下水位总是发生上下波动,控制虹吸扬程始终低于 9.3 m,可以使砂粒流出虹吸管。因此,可以认为在实际工程中中小砂粒均可以通过虹吸排出,虹吸具有很强的抗淤堵能力。

参考文献:

- [1] 孙红月,熊晓亮,尚岳全,等. 边坡虹吸排水管内空气积累原因及应对措施[J]. 吉林大学学报(地学版), 2014, 44(1): 278-284.
SUN Hongyue, XIONG Xiaoliang, SHANG Yuequan, et al. Pipe air accumulation causes and its control method in slope siphon drainage[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 278-284.
- [2] 曾玲,李光裕,史振宁,等. 前期降雨对非饱和覆盖层边坡性状及稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 238-245.
ZENG Ling, LI Guangyu, SHI Zhenning, et al. Effect of antecedent rainfall on characteristics and stability of unsaturated overburden slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 238-245.
- [3] COROMINAS J, MOYA J, LEDESMA A, et al. Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain)[J]. Landslides, 2005, 2(2): 83-96.
- [4] IGWE O, MODE W, NNEBEDUM O, et al. The analysis of rainfall-induced slope failures at Iva Valley area of Enugu State, Nigeria[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(5): 2465-2480.
- [5] CASCINI L, CUOMO S, PASTOR M, et al. Modeling of rainfall-induced shallow landslides of the flow-type.[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(1): 85-98.
- [6] 袁藏,常晓林,段寅,等. 考虑抗剪强度参数空间变异性的边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3899-3908.

- YUAN Wei, CHANG Xiaolin, DUAN Yin, et al. Stability analysis of slope considering spatial variation of shear strength parameters[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(11): 3899–3908.
- [7] 朱正武, 王虎, 张鹏. 三维排水与深层土体位移监测技术在滑坡治理中的运用[J]. *西部探矿工程*, 2010, 22(1): 21–23.
ZHU Zhengwu, WANG Hu, ZHANG Peng. Application of 3D drainage and deep soil displacement monitoring technology in landslide control[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2010, 22(1): 21–23.
- [8] 尚岳全, 王清, 蒋军, 等. 地质工程学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 221–233.
SHANG Yuequan, WANG Qing, JIANG Jun, et al. *Engineering geology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 221–233.
- [9] 康剑伟, 孙红月, 刘长殿. 一维土柱高压充气阻渗法的数值模拟[J]. *公路工程*, 2013, 38(3): 67–71.
Kang Jianwei, SUN Hongyue, LIU Changdian. Numerical simulation of high-pressure infiltration resistance of one-dimensional soil column[J]. *Highway Engineering*, 2013, 38(3): 67–71.
- [10] 尚岳全, 蔡岳良, 魏振磊, 等. 滑坡虹吸排水方法[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(4): 706–711.
SHANG Yuequan, CAI Yueliang, WEI Zhenlei, et al. Siphon drainage method for landslide prevention[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(4): 706–711.
- [11] 张永防, 张颖钧. 虹吸排水应用技术研究[J]. *中国铁道科学*, 1999, 20(3): 52–60.
ZHANG Yongfang, ZHANG Yingjun. Research on siphon drainage application technology[J]. *China Railway Science*, 1999, 20(3): 52–60.
- [12] 张永防. 虹吸排水室内试验研究[J]. *路基工程*, 1999(4): 22–25.
ZHANG Yongfang. Experimental study on siphon drainage[J]. *Subgrade Engineering*, 1999(4): 22–25.
- [13] 舒群, 张文德. 虹吸法排除滑坡体中的深层地下水[J]. *中国西部科技*, 2005(10): 10–12.
SHU Qun, ZHANG Wende. The elimination of deep groundwater in landslide body by siphon method[J]. *Science and Technology in Western China*, 2005(10): 10–12.
- [14] 姚爱军, 杨宇友, 赵艳, 等. 不同渗透性的港口岸坡虹吸排水技术实验研究[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(1): 130–132.
YAO Aijun, YANG Yuyou, ZHAO Yan, et al. The experimental study of siphon drainage technology on the harbor slope bank with different permeability[J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2006, 24(1): 130–132.
- [15] 杨宇友, 姚爱军, 张在明, 等. 岸坡地下水控制技术的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2281–2285.
YANG Yuyou, YAO Aijun, ZHANG Zaiming, et al. Experimental study of controlling groundwater technology for bank slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2281–2285.
- [16] CAI Yueliang, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Air accumulation in high-lift siphon hoses under the influence of air dissolution and diffusion[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2015, 16(9): 760–768.
- [17] CAI Yueliang, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. An investigation of flow characteristics in slope siphon drains[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2014, 15(1): 22–30.
- [18] 熊晓亮, 孙红月, 张世华, 等. 高扬程虹吸保障条件分析与合理管径选择数值模拟[J]. *吉林大学学报(地学版)*, 2014, 44(5): 1595–1601.
XIONG Xiaoliang, SUN Hongyue, ZHANG Shihua, et al. Analysis of condition of ensuring high-lift siphon drainage and numerical simulation of choice of optimum diameter[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(5): 1595–1601.
- [19] 陈振瑜, 李志彪, 何利民, 等. 垂直管气液两相弹状流流动特性研究进展[J]. *管道技术与设备*, 2005(4): 3–6.
CHEN Zhenyu, LI Zhibiao, HE Limin, et al. Advance in the investigation on the hydrodynamic characteristics of gas-liquid slug flow in vertical pipes[J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2005(4): 3–6.
- [20] 蔡岳良, 尚岳全, 孙红月. 一种免动力逆向压水的自恢复边坡高扬程虹吸排水系统: 204185871U[P]. 2015–03–04.
CAI Yueliang, SHANG Yuequan, SUN Hongyue. A self-restoring slope high lift siphon drainage system with a non-dynamic reverse pressure water: 204185871U[P]. 2015–03–04.
- [21] 孙红月, 尚岳全, 蔡岳良. 滑坡虹吸排水理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 142–145.
SUN Hongyue, SHANG Yuequan, CAI Yueliang. *Theory and practice of landslide siphon drainage*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 142–145.
- [22] MEI Cheng, LIANG Xu, SUN Hongyue, et al. High-lift siphon flow velocity in a 4-mm siphon hose[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2017, 18(6): 487–495.
- [23] 刘雪敏, 李舟航, 吴玉新, 等. 管径对垂直上升管内气液两相流流型的影响[J]. *水动力学研究与进展*, 2012, 27(5): 531–536.
LIU Xuemin, LI Zhouhang, WU Yuxin, et al. Effect of tube size on flow pattern of air-water two-phase flow in vertical tubes[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(5): 531–536.
- [24] TALVY C A, SHEMER L, BARNEA D. On the interaction between two consecutive elongated bubbles in a vertical pipe[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26(12): 1905–1923.
- [25] MEHENDALE S S, JACOBI A M, SHAH R K. Fluid flow and heat transfer at micro and meso-scales with application to heat exchanger design[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2000, 53(7): 175–193.
- [26] STOKES G G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums[J]. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1850, 9: 8–22.
- [27] 武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室. 河流泥沙工程学(上册)[M]. 北京: 水利出版社, 1981: 150–165.
The Teaching and Research Room of the River Sediment Engineering of the Wuhan Institute of Water Conservancy and Electric Power. *River sediment engineering*[M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1981: 150–165.

(编辑 伍锦花)