

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.033

河水位升降下饱和-非饱和驳岸岸坡稳定性分析

简文彬, 叶琪

(福州大学 环境与资源学院, 福州 350108)

摘要:岸坡失稳常常与河水升降密切相关。为了分析水位升降对福州晋安河驳岸岸坡稳定性的影响,根据某段岸坡的工程地质条件,建立驳岸岸坡饱和-非饱和渗流计算模型,结合引水冲污工程,研究河水位不同升降型式对稳定性的影响。结果表明,坡脚淤泥的堆积阻碍了坡内孔隙水的变化,表现为在其影响范围内,河水上涨时水流难以流入,水位下降时则孔隙水不易排出;水位上升越快,驳岸越稳定,较大的水位下降速度则对其稳定性不利;水位频繁升降,由于岸坡排水条件不佳,孔隙水进一步赋存,稳定性降低;在引水冲污工程中应做好水位下降速度的控制和坡内孔隙水的疏排;在对岸坡进行加固时,可采取置换坡脚淤泥为良好透水材料的措施。

关键词:驳岸;岸坡;河水位升降;渗流;稳定性

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S2-0129-05

Analyses on Stability of Saturated-Unsaturated Bank Slope with Revetment During Rise and Fall of River Level

Jian Wenbin, Ye Qi

(College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108)

Abstract: The bank slope failure is closely related to the rise and fall of river level generally. In order to analysis the influence of the rise and fall of river level on Jin'an River bank slope stability in Fuzhou, the saturated-unsaturated seepage of bank slope with revetment was modelled based on the engineering geological condition of some bank of Jin'an River, and the effect of rise and fall of river induced by the DRWWOS(Drawing River Water to Wash Out Sewage) project on bank slope stability was studied. The results show the silt lying on the slope toe impedes pore water change, manifesting as in its sphere of influence river water is hard to flow into the bank when river rises, and the pore water pressure can not dissipate in time when drawdown. The faster the river rises, the more stable the bank slope becomes. On the contrary, the larger river level falling rate is more likely to leads to bank slope failure. Due to the poor bank drainage performance, the frequent rise and fall of river level results in pore water pressure increasing further, then impairing the bank slope stability. During DRWWOS project, the river level falling rate control and pore water pressure dissipation must be paid enough attention to. Also, replacing silt lying on the slope toe by good permeable material is a good choice to reinforce the bank slope.

Key words: revetment; bank slope; rise and fall of river level; seepage; stability

随着国民经济的迅速发展,在福州市内,大量工业废水和生活污水直接排入内河,造成内河污染严重,河道淤积,排涝能力下降。当地政府为了防止内涝,对内河进行了清淤;为改善水质,实施了引水冲污工程^[1]。这些整治措施不仅取得了显著的效果,而且也带来了工程地质问题。内河在进行清淤作业降低河床标高,以及引水引起河水位频繁升降等因素作用后,某些工程地质条件不良的驳岸段失稳滑入河中,以晋安河沿岸最为典型,这必然影响周边市民的出行安全和增加内河的整治难度。

关于水位升降对边坡稳定性的影响,近年来国内外众多学者进行了研究,并取得了一定的成果。2000年, Lane 和 Griffiths^[2]假定土坡内的浸润线为直线,基于有限元强度折

减法分析了库水位在骤降与缓降条件下岸坡的稳定性;2004年,时卫民和郑颖人^[3]根据布西涅斯克非稳定渗流微分方程,得到了库水位等速下降时坡体内浸润线的简化计算公式,并以此为基础分析了库水位下降速度和下降高度等因素对坡体稳定系数的影响;2005年,刘才华等^[4]研究了库水位上升诱发边坡失稳机理,表明库水位由坡脚上升到坡顶的过程中,孔隙水压力作用使边坡的稳定性先降低后增加;廖红建等^[5]计算了在库水位下降期间,滑坡体稳定性受库水位下降速度和渗透系数影响的变化情况;2010年,年廷凯等^[6]从水位下降速率和渗透系数等方面研究了水位下降过程岸坡的整体稳定性,发现水位下降速率对高渗透性土坡内孔压的影响显著,对低渗透性土坡内孔压影响较小;王学武等^[7]对

收稿日期:2013-09-30

基金项目:国家自然科学基金(41072232)

作者简介:简文彬(1963-),男,教授,主要从事岩土工程与工程地质研究,(E-mail)jwb@fzu.edu.cn。

库水位骤降时的坝坡稳定进行了计算,结果表明,库水位的骤降,易引起坝坡的滑动,随着超静孔隙水压力的消散,坝坡稳定性逐渐提高,基质吸力对抗剪强度的贡献增大;2012年,Núria M. Pinyol 等^[8]模拟了西班牙某水库边坡在水位骤降过程孔隙水压力的变化,并与实测资料进行对比,证实了水位骤降对边坡稳定性的不利影响。以上研究中只单一进行了水位上升或下降时边坡稳定性分析,对于大部分实际工程已足够。2006年,张文杰等^[9]模拟了升降过程中岸坡内孔压场,并考虑基质吸力的贡献对边坡稳定进行了分析,指出在水位升降过程中,岸坡安全系数的变化规律非常复杂;2011,涂国祥等^[10]探讨了水位变动速度对堆积体渗流场及稳定性的影响机理和规律,发现水位变动速度对堆积体在水位变动期间瞬时渗流场有着较大的影响,较大水位上升速度对堆积体稳定性有利,但水位下降速度增大对堆积体稳定性不利。在以上分析水位升降对边坡影响的文献中,水位升降的初始状态均是稳定渗流场,或升降段隔着较长的时间以使边坡内渗流稳定,而实际上,如引水冲污工程中周期性水位升降,升降段相隔时间短或时间间隔不足以形成稳定渗流场。目前,这方面的研究比较少见。

因此,本文根据福州晋安河某段驳岸岸坡的工程地质条件,结合清淤后河床高程,建立驳岸岸坡饱和-非饱和和渗流计算模型,研究河水位不同升降型式对驳岸岸坡稳定性的影响。研究成果对引水冲污工程的调控和驳岸岸坡加固措施的选择有理论及实际意义。

1 工程概况

1.1 福州晋安河驳岸岸坡

驳岸是设在岸坡前、支挡河岸的构筑物。根据《福州晋安河驳岸稳定性分析与评价报告》,影响驳岸岸坡稳定性的因素包括降雨入渗、水位变动、清淤、交通荷载、施工扰动等。自驳岸建成以来,经历了除清淤外各因素的作用,未曾发现整体性的滑动破坏。清淤作业导致邻近驳岸坡脚被动区土体卸荷,岸坡临空面加深,在水位升降、降雨、坡顶荷载等因素作用下驳岸失稳。

引水冲污工程,是通过引用闽江水至内河上游,加大内河水流量,提高河道水流流速,利用内河与闽江相连的地理条件,使得稀释后浓度较低的水及时排入闽江^[1]。由于引水冲污工程的开展,内河驳岸岸坡外的水位常处于变动之中,岸坡内外水分的相互补给使坡内渗流场不断变化,从而孔隙水压力场也处在不断的变化之中,进而影响到岸坡的稳定性^[9]。

1.2 驳岸岸坡工程地质条件

1.2.1 地形地貌 晋安河是福州长度最长和流域最广的河流,也是历史最悠久的人工内河,与光明港连通,是重要的南北水路交通干道和景观廊道。流向自北向南,北自东浦路接解放溪,南经象园水闸至光明港,长约 6 550 m,河面宽 25~49 m。

晋安河中下游河道始于光明港(桩号 JA0+000),由南往北,止于茶园水闸(桩号 JA5+334)。沿途多为居民区及沿河公园。所选分析段即位于中下游西岸,桩号 JA4+580,平面位置见图 1 所示。

根据沿线调查,河段所在区域地势相对平坦,地面罗零



图 1 研究区平面位置示意图

高程一般为 6~7 m,属冲淤积平原地貌单元。根据区域地质资料,沿线及邻近地区全新世以来未发现活动断裂,构造稳定。

1.2.2 岩土类型 根据现场钻探揭示及已有地质资料,结合土工试验结果,并参考附近破坏段情况,研究区主要由以下几类土层组成,如图 2 所示。图中,①素填土:稍密,以粘性土为主,含少量碎石,新近堆填,堆填时间未超过 1 年。②粉质粘土:灰黄色,可塑~硬塑状态。稍有光泽,干强度中等,有一定粘性。③淤泥:深灰色,含水量高,流塑,有臭味,摇振反应慢,有光泽,干强度中等。

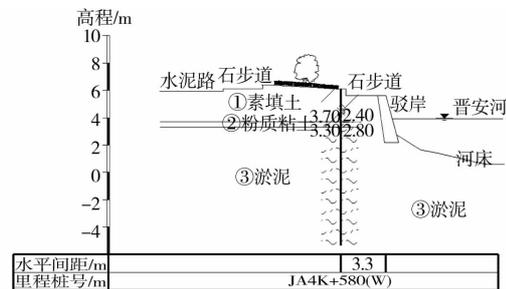


图 2 工程地质剖面图

1.2.3 水文条件 晋安河中下游水深约 2.10~4.20 m,河床罗零标高为 1.40~4.60 m,水量主要受大气降水和地区生活用水影响,枯水期、平水期水量都较小,雨季洪水期方有较大水量。河水流向由北向南流,因与闽江连通,受闽江涨落潮影响。

内河整治工程中的引水冲污对河水位也产生了影响。晋安河水域采用大腹山引水工程冲污,经过屏西处分流 5 m³/s 的水量,余下 25 m³/s 的水量进入晋安河水系进行冲污,最后进入晋安河经光明港入闽江。

2 河水位升降下饱和-非饱和和驳岸岸坡稳定性分析

2.1 饱和-非饱和和渗流及非饱和土抗剪强度理论

2.1.1 饱和-非饱和和渗流微分方程 地下水位以上土体处于非饱和状态,地下水位以下处于饱和状态,随着河水位的变动,地下水位也随之变化,饱和区和非饱和区互相转换,且饱和区与非饱和区的水运动互相联系、互相影响,将两者统

一起来即饱和-非饱和问题^[11-12]。

将土体视为一种固相骨架不变形、各向异性的多孔介质,根据质量守恒定律,结合达西定律,以总水头 h 作为微分方程因变量,得到二维饱和-非饱和和渗流微分方程^[13]为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k_x, k_y 分别为水平和垂直方向的渗透系数,在饱和区视为常数,在非饱和区为体积含水量的函数; γ_w 为水的重度; m_w 为比水容量,定义为单位土体吸力变化时单位质量土壤可释放或吸收的水量,即

$$m_w = - \frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)} \quad (2)$$

式中: θ 为体积含水量; u_a, u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力, $(u_a - u_w)$ 为基质吸力。

当水头不随时间变化时,式(1)右边项为 0,得到饱和稳定渗流控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

2.1.2 非饱和土抗剪强度 驳岸岸坡的主要破坏模式是受剪破坏,其稳定性主要取决于抗剪强度的大小。饱和土的抗剪强度可用摩尔-库仑破坏准则表达,而对于非饱和土,由于气的存在,其强度理论变得极为复杂,经典的饱和土力学理论已不再适用。国内外众多学者通过试验研究或理论分析,提出了许多非饱和土的抗剪强度理论和公式,其中得到工程界广泛认可的是 Fredlund 提出的双参数模型^[14-15]

$$\tau = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi^b \quad (4)$$

式中: τ 为土的抗剪强度; c' 为土的有效粘聚力; $(\sigma_f - u_a)_f$ 为破坏面上有效法向应力; φ' 为土的有效内摩擦角; $(u_a - u_w)_f$ 为破坏面上的基质吸力,当孔隙中气体与空气连通时, $u_a = 0$; φ^b 为抗剪强度随基质吸力而增加的速率,其值随基质吸力的变化而变化,在解决实际工程问题时常常取为小于 φ' 的定值^[14]。

当土接近饱和时,孔隙水压力 u_w 接近孔隙气压力 u_a , 因此基质吸力 $(u_a - u_w)$ 趋于零。式(4)中的基质吸力项消失,从而变为饱和土的抗剪强度公式。

2.2 计算模型及其参数的选取

2.2.1 计算模型 文中采用 Slide 软件进行模拟。驳岸由块石干砌而成,透水性好,在边坡模型中简化为具有一定强度的各向同性材料,并结合内河清淤后河床实测高程,简化沿岸地形条件,建立模型如图 3 所示。分析时渗流由有限元法计算得出,稳定性分析则利用极限平衡法中的简化 Bishop 条分法。根据实测资料,岸坡远端地下水水位高程为 5 m,河水位为变动值。

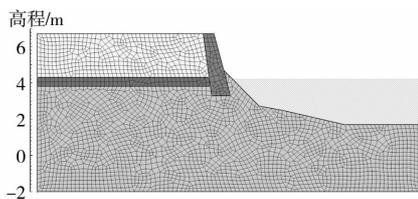


图 3 计算模型

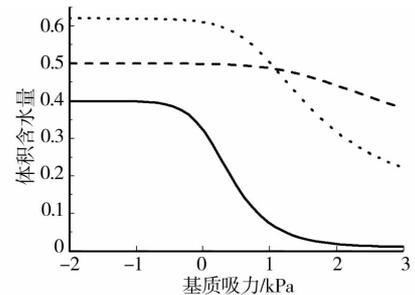
渗流计算中边界条件设置模型底部、右侧边界为隔水边界,左侧边界地下水以下为定水头边界,以上为零流量边界,

坡面为随时间变化的水头边界,水头小于高程的节点定义为不透水边界。有限元网格共剖分为 2 781 个单元,共 2 903 个节点。

2.2.2 计算参数的选取

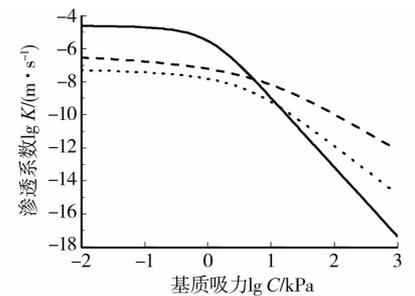
1) 土水特征曲线和渗透性函数的选取

由于试验条件限制,非饱和土的土水特征曲线和渗透性函数均可由 Van Genuchten 模型拟合^[16-17],模型参数采用同类土的试验值,如图 4、图 5 所示。其中,驳岸组成为块石,孔隙大,不存在毛细现象,故不考虑其土水特征曲线。



注:—素填土 ---粉质粘土淤泥

图 4 土水特征曲线



注:—素填土 ---粉质粘土淤泥

图 5 渗透性函数

2) 物理力学参数的选取

各材料土体均不考虑各向异性,参数根据室内土工试验及工程经验选取,见表 1 所示。

表 1 岩土物理力学参数

序号	土层	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内聚力 c/kPa	内摩 擦角 $\varphi/(\text{°})$	吸力内 摩擦角 $\varphi^b/(\text{°})$	渗透 系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	驳岸	21.0	12.0	33.0	0	9.0×10^{-4}
2	素填土	17.0	7.0	8.0	5	2.4×10^{-5}
3	粉质粘土	18.0	27.2	12.9	8	3.0×10^{-7}
4	淤泥	15.8	15.8	8.2	5	5.0×10^{-8}

3) 分析工况

引水冲污工程使河水位涨落处于周期变化中,考虑周期为一天,分析河水位不同升降型式下水位升降一天及多天驳岸岸坡稳定性的变化情况。

取初始河水位 4.2 m,终止河水位 6.2 m,简化水位变动情况,分析工况见表 2 所示。

表 2 水位变化表

工况序号	初始水位/ m	上升速率/ ($m \cdot h^{-1}$)	水位稳定 时间/h	下降速率/ ($m \cdot h^{-1}$)
I	4.2	0.2	4	0.2
II	4.2	0.2	12	1
III	4.2	0.5	10	0.2
IV	4.2	0.5	18	1

用曲线表示,如图 6 所示。

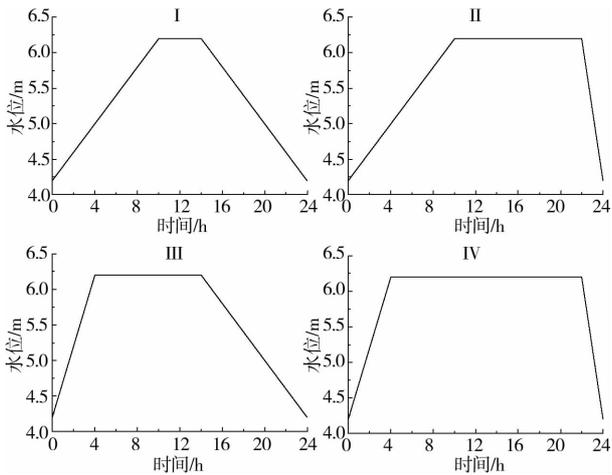


图 6 水位变化曲线

2.3 渗流场模拟结果

以工况 I 为例说明河水水位升降过程驳岸岸坡内浸润线的响应情况。将水位上升、稳定和下降段的浸润线变化情况如图 7 所示。可知:由于岸坡土体渗透系数较小,水流不能及时渗入、排出,整个过程,岸坡内浸润线变化缓慢、滞后;埋入河床淤泥的驳岸段,由于前缘淤泥的阻水作用,在河水上升初期,水流不能及时流入驳岸,在水位下降后期,水分不能排出,岸坡内的孔隙水压力不能及时消散;驳岸排水性能好,未埋入河床的驳岸段浸润线与河水水位变化一致。

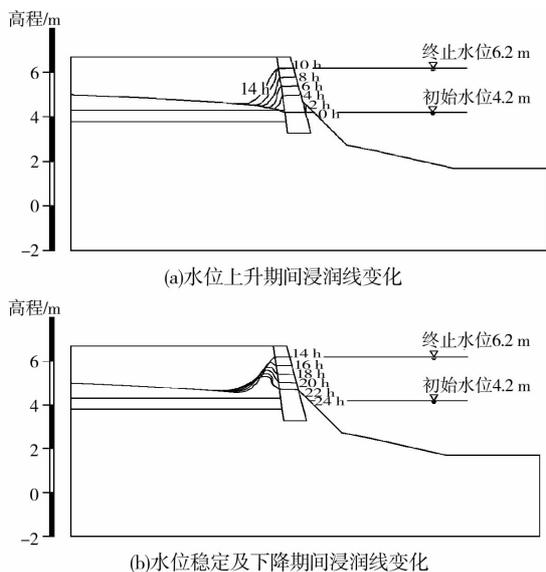
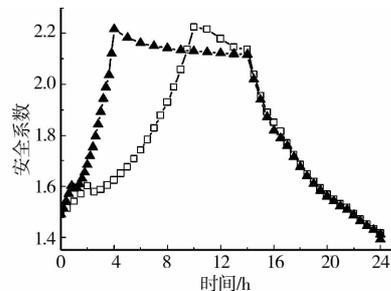


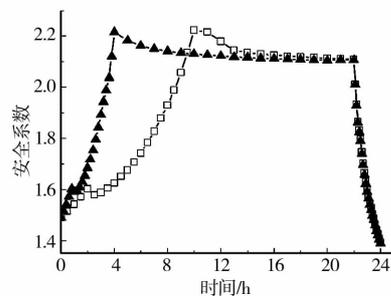
图 7 工况 I 水位升降期间浸润线变化

2.4 稳定性计算及分析

2.4.1 河水一次升降的模拟结果 图 8 为 4 种工况下驳岸岸坡安全系数在水位升降一个周期的变化情况。对各工况进行对比分析可知,在水位上升段,驳岸岸坡安全系数增加,对比工况 I 和 III,上升越快,同一时刻边坡越稳定,这是由于坡外水压力的作用,水位越高,这种作用越强烈;注意到在水位上升初期某时刻,稳定性突然下降,表明河水开始流入驳岸,驳岸岸坡内孔隙水压力增加。在河水水位稳定段,水逐渐流入岸坡,浸润线抬升,孔隙水压力增加,驳岸岸坡安全系数随着时间慢慢减小,但幅度不大。在河水水位下降段,随着水位的降低,作用于坡面的静水压力减小,坡内孔隙水压力消散,但较慢,驳岸岸坡安全系数减小,对比图 8(a)和图 8(b)工况,下降速度越快,稳定性下降也越快,当河水水位降至初始水位 4.2 m 时,安全系数达到最小。4 种工况下驳岸岸坡的安全系数分别从 0 时的 1.489 降至 24 时的 1.416、1.392、1.411、1.388。可知,水位下降使土体内水压力增加,稳定性减小,且下降速率较上升速率对最终稳定性的影响显著。



(a) 工况 I 和 III 安全系数随时间变化



(b) 工况 II 和 IV 安全系数随时间变化

注: \square —II \blacktriangle —IV

图 8 4 种工况安全系数随时间变化

2.4.2 河水频繁升降的模拟结果 引水冲污是一项长期的工作,河水频繁升降是不可避免的结果,因而进行水位频繁变化对驳岸岸坡稳定性的影响是必要的。

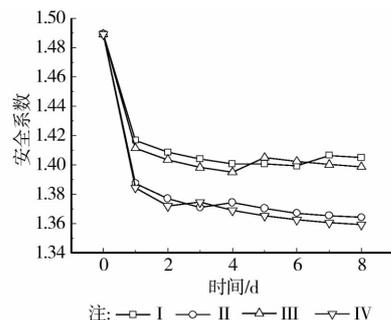


图 9 水位频繁升降下安全系数的变化

图 9 显示了水位在 4 种升降型式作用下,驳岸岸坡安全系数随天数的变化。可见,频繁升降引起的稳定性变化的总体趋势是减小的。期间也有小幅的提高,是由于孔隙水压力减小的结果,但这种影响很有限。

3 结 论

根据福州晋安河某段驳岸岸坡的工程地质条件,结合淤后河床高程,建立驳岸岸坡饱和-非饱和渗流计算模型,考虑引水冲污工程的影响,简化水位变动条件,分析了河水位不同升降型式对驳岸岸坡稳定性的影响,得出了以下结论:

1)对比 4 种河水位升降型式,水位上升越快,驳岸越稳定,较大的水位下降速度则安全系数减小的越快。结合升降过程稳定性的变化,水位下降速度较上升速度对驳岸岸坡的影响更显著。在实际的引水冲污工程中,应做好下降段速度的控制和坡内孔隙水压力的排泄。

2)河水位一次升降后,驳岸坡脚堆积的淤泥阻止坡体内孔隙水的及时排泄,对稳定性不利,但直接清除淤泥相当于解除了坡脚的反压作用,对稳定性也不利,工程上可通过置换坡脚淤泥为抛石等良好透水材料的措施来提高岸坡稳定性。

3)岸坡土体的渗透性能较差,在频繁的河水位升降过程孔隙水不易消散,稳定性进一步降低,在降雨入渗、路面荷载等因素的综合影响下,易产生整体滑移。

参考文献:

- [1] 张美绚,陈兴伟. 福州内河水环境治理及其研究的若干问题[J]. 福建地理,2003,18(4):35-37.
- [2] Lane P A, Griffiths D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5):443-450.
- [3] 时卫民,郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报,2004,(3):76-80.
- [4] 刘才华,陈从新,冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学,2005,26(5):769-773.
- [5] 廖红建,盛谦,高石夯,等. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3454-3458.
- [6] 年廷凯,万少石,蒋景彩,等. 库水位下降过程中土坡稳定强度折减有限元分析[J]. 岩土力学,2010,31(7):2264-2269.
- [7] 王学武,许尚杰,党发宁,等. 水位骤降时的非饱和坝坡稳定分析[J]. 岩土力学,2010,31(9):2760-2764.
- [8] Núria M Pinyol, Eduardo E Alonso, Jordi Corominas, et al. Canelles landslide: modelling rapid drawdown and fast potential sliding[J]. Landslides, 2012, 9(1):33-51.
- [9] 张文杰,詹良通,凌道盛,等. 水位升降对库区非饱和土质岸坡稳定性的影响[J]. 浙江大学学报:工学版,2006,40(8):1365-1370.
- [10] 涂国祥,邓辉,黄润秋. 水位变动速度对某库区岸坡堆积体稳定性的影响[J]. 四川大学学报:工程科学版,2011,43(4):63-70.
- [11] 刘新喜,夏元友,练操,等. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究[J]. 岩土力学,2005,26(9):1427-1431,1436.
- [12] 张芳枝,陈晓平. 非饱和堤岸的渗流特征及其稳定性研究[J]. 岩土力学,2011,32(5):1561-1567.
- [13] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [14] 弗雷德隆德,拉哈尔佐. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐,等. 译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [15] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15:313-321.
- [16] Van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [17] Papagiannakis A T, Fredlund D G. A steady state model for flow in saturated-unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(3):419-430.

(编辑 詹燕平)