

# 库水位升降变化对巫山宁江岛造地型护岸工程稳定性影响的数值模拟研究

陈洪凯, 汪叶萍

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆, 400074)

**摘要:** 宁江岛是一个以库岸防护为主兼顾土地资源开发利用并具有重要景观价值的的水库护岸工程, 其稳定性受库水位升降影响较大, 研究运用 Geo-studio 数值分析软件进行了 4 种不同速率下的水位升降影响下的渗流场及稳定性变化规律模拟, 模拟结果表明: 随着库水位的上升, 岸坡稳定性有所增强, 当水位上升速度从 0.5 m/d 增加至 6 m/d 时, 其稳定系数也相应的从 1.264 增至 1.702; 相反水位下降时, 随着下降速度的增加, 稳定系数从 0.849 降至 0.604, 岸坡越容易发生失稳。同时, 库水位升降过程中, 岸坡体内浸润线总要滞后于库水位, 且涨落速度越大时, 这种滞后效应越明显。数值模拟结果科学的揭示了不同水位升降情况下对岸坡稳定性及渗流面的影响规律, 模拟结果与实际相吻合。

**关键词:** 数值模拟; 水位升降; 岸坡稳定性; 宁江岛

**中图分类号:** P642.22

**文献标志码:** A

宁江岛位于巫山县大宁河与长江的交汇处, 现巫山码头东侧, 属于水库岸坡人工造地, 面积约 66700m<sup>2</sup> (100 亩), 该回填工程自 2007 年 7 月开始填筑, 2008 年 10 月竣工, 与三峡水库从 145m 水位分阶段蓄水到 175m 基本同步。因此, 研究库水位涨落对岸坡稳定性的影响具有重要的理论意义和应用价值。

迄今为止, 国内外学者对岸坡稳定性机理研究较为深入, 相关理论研究也基本成熟。目前分析岸坡稳定性的数值模拟软件有很多种, 如美国 Itasca 公司开发的 FLAC2D/3D、FLAC/Slope 等程序<sup>[1]</sup>, 加拿大 Rocscience 公司开发的 Phase2D, 韩国 POSCO 集团开发的 Midas/GTS 模块等都内嵌了强度折减法<sup>[2]</sup>, 以及国内唐春安教授研究团队推出的子模块 RFPA2D-Slope<sup>[3]</sup>, 还有一些需要手动编辑实现强度折减过程的大型软件如 Abaqus 等。Sarkar K 等人根据实地调查资料, 利用二维数值模型模拟 Amiyon 边坡的稳定性, 并计算分析其变形和应力分布规律<sup>[4]</sup>; 张文杰等人以非饱和~饱和渗流分析程序模拟水位升降过程中岸坡内孔压场, 并对影响岸坡渗流场的主要水力参数进行了敏感性分析<sup>[5]</sup>; 莫伟伟基于水岩相互作用机理, 详细的介绍了滑坡岩土体的水岩作用机理、滑坡稳定性分析方法<sup>[6]</sup>; 张华庆等人利用 Abaqus 软件建立软土岸坡降雨入渗的三维有限元模型, 分析得到降雨入渗条件下软土岸坡失稳破坏机理及其变化规律<sup>[7]</sup>; 高连通等利用有限元分析软件 Geo-Studio 综合分析了不同降雨条件下重庆市西泉街滑坡的渗流场、应力场和位移场特征<sup>[8]</sup>; 赵代鹏等运用自主研发的滑坡模型试验系统, 并将实验结果对照数值模拟结果得出土压力及孔隙水压力渗流模拟变化规律<sup>[9]</sup>。上述研究均单一的分析单个影响因素对岸坡稳定性的影响, 在众多库水位涨落对岸坡稳定性影响研究中并未考虑渗流面的变化情况。

**收稿日期:** 2014-11-14

**修回日期:** 2014-12-12

**资助项目:** 国家自然科学基金 (No. 51378521; No. 11272185); 2013 年重庆高校创新团队建设资助项目 (No. KJTD201305); 重庆市两江学者计划专项经费资助项目

**作者简介:** 陈洪凯, 教授, 博士后, 博士生导师, 研究方向为动力地貌学、地质安全理论及工程结构健康, E-mail: chk99@163.com

而 Geo-studio 在功能上相对于其他软件具有独特的优势，其中的每一个模块既能单独运行，又能和其他模块耦合运行，可以非常方便地解决复杂的岩土工程计算问题尤其是边坡稳定的计算问题<sup>[10]</sup>。Slope/W 的现代极限平衡分析软件使得分析越来越复杂的问题成为可能，极限平衡法在工程实际中应用广泛<sup>[11]</sup>，简单实用，且理论体系研究较为成熟，由于宁江岛岸坡由主要由第四系人工堆填层、冲积粘性土层、残坡积碎块石土层组成，属于典型的土质岸坡，Morgenstem-Price 法理论上比较严密，适用于任意形状，全面满足力矩和力的平衡条件，故本文采用 Morgenstem-Price 法对宁江岛岸坡进行渗流分析。

本文将基于饱和-非饱和渗流理论，借助 Geo-studio 软件下的 SEEP/W（地下水渗流分析软件）与 SLOPE/W（边坡稳定性分析软件）模块对宁江岛再造岸坡受库水位涨落影响下的渗流稳定性进行耦合分析，模拟结果与实际相吻合。

### 1 宁江岛护岸造地工程简介

巫山县宁江岛岸坡由第四系人工堆填层、冲积粘性土层、残坡积碎块石土层组成，基岩为三叠系中统巴东组第二段紫红色粉砂岩、粉砂质泥岩。表层素填土较松散，压缩性高，堆填方式多为抛填，填堆时间较短，土的差异性交大，均匀性差，因而边坡回填后是边坡破坏时滑动面（带）发育的主要土层。粉质粘土压缩性中等，具有较高承载力，有相当的抗剪强度，但该层厚度大且连续发育，该层土也是边坡滑动面（带）发育的主要土层。宁江岛造地范围内除人工回填土内赋存少量潜水外，其它土层多为隔水层，地下水贫乏，地下水的主要补给来源为水库水、大气降水，因此库水位的升降也是影响岸坡稳定的重要因素，选取宁江岛岸坡护岸工程典型剖面 1-1' 为地质模型进行数值模拟，如图 1 所示。

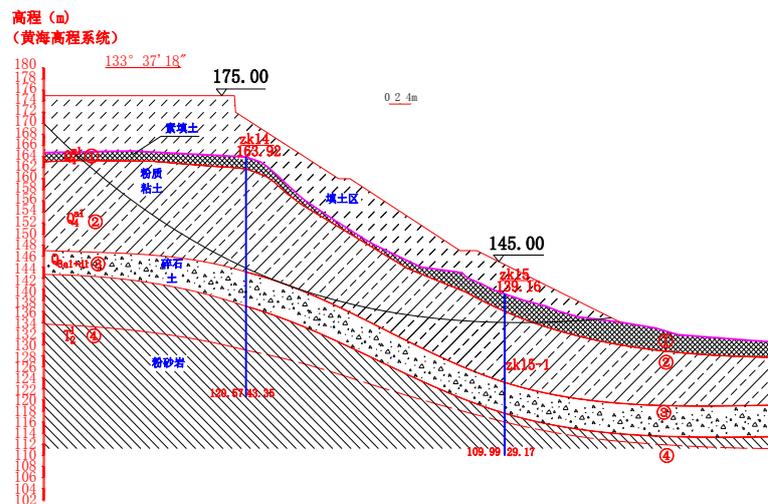


图 1 宁江岛护岸工程 1-1' 典型剖面图

Fig.1 The 1-1 'typical sectional views of Ningjiang Island bank protection

根据现场勘查资料，宁江岛填土工程参数取值见表 1。

表 1 宁江岛填土工程岩土力学参数

Tab.1 Geotechnical parameters of Ningjiang island filling project

岩性	天然状态			饱和状态		
	容重 kN/m <sup>3</sup>	粘结力 kPa	内摩擦角 (°)	容重 kN/m <sup>3</sup>	粘结力 kPa	内摩擦角 (°)
素填土	19.8	17	19	20.7	15	17
粉质粘土	19.2	20	17	21.2	18	14

碎石土	22.5	22	25	22.9	20	22
填岛土体	22	24	27	22.7	20	23

## 2 宁江岛护岸工程数值模拟

### 2.1 数值模型

建立数值模型剖面模型如图所示：

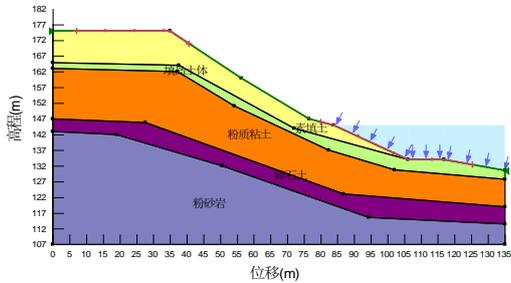


图 2 宁江岛 1-1 剖面模型

Fig.2 The 1-1 sectional model of Ningjiang island

### 2.2 工况设置

三峡水库建成后，库区两岸形成两条平行的永久性的水位季节性消落带，三峡库水位最大涨落幅度达 30m，及防洪限制水位 145m 与正常蓄水位 175m 之差，考虑到暴雨洪水的情况，水库运行时的水位涨落速度在 0.4~6.0m/d，宁江岛回填工程的填筑和竣工时间与三峡水库从 145m 分阶段蓄水至 175m 基本同步，依此设置工况不仅与实际工程相吻合，而且符合岸坡防护工程的实际控制要求<sup>[12]</sup>，为后期土地资源开发以及减灾决策提供科学依据。

库水位涨落过程中岸坡体内渗流发生变化，利用 Geo-studio 模拟 145m 至 175m 的水位涨落情况下岸坡稳定性的变化情况，并针对不同的涨落速度，分以下八种工况分别模拟水位在 145m 至 175m 之间不同涨落速度下岸坡渗流面的变化规律及对宁江岛再造岸坡稳定性的影响，这里的涨落均为匀速。

表 2 宁江岛岸坡模拟工况

Tab.2 Simulated conditions of Ningjiang island slope

工况		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
水位	历时 (天)	5	20	40	60
上升	上升速度 (m/t)	6	1.5	0.75	0.5
工况		工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
水位	历时 (天)	5	20	40	60
下降	下降速度 (m/t)	6	1.5	0.75	0.5

### 2.3 模拟结果

利用 Seep/w 进行渗流分析时，最关键的是要定义体积含水量函数（土水特征曲线）及渗透性函数，分析稳态稳态时只需要定义渗透函数，即渗透系数随基质吸力变化的曲线，分析土体中孔隙水压力随时间变化的瞬态问题时就需定义体积含水量函数。体积含水量函数是指当土体排水时，空隙中保持的孔隙水的体积比例关系，表达了基质吸力变化时土的储水能力的变化情况。决定体积含水量函数的 3 个主要特征量为空气进入值（AEV）、体积压缩系数（mv）、残余含水率或饱和度（ $\theta_r$  或  $S_r$ ）。SEEP/W 提供了四种定义渗透性函数的方法，其中 VG 模型与实测数据十分接近，而且参数意义明确，至今仍为最常用的模型之一。本文也将采用 VG 模型来进行非饱和渗流计算参数的估计<sup>[13]</sup>。

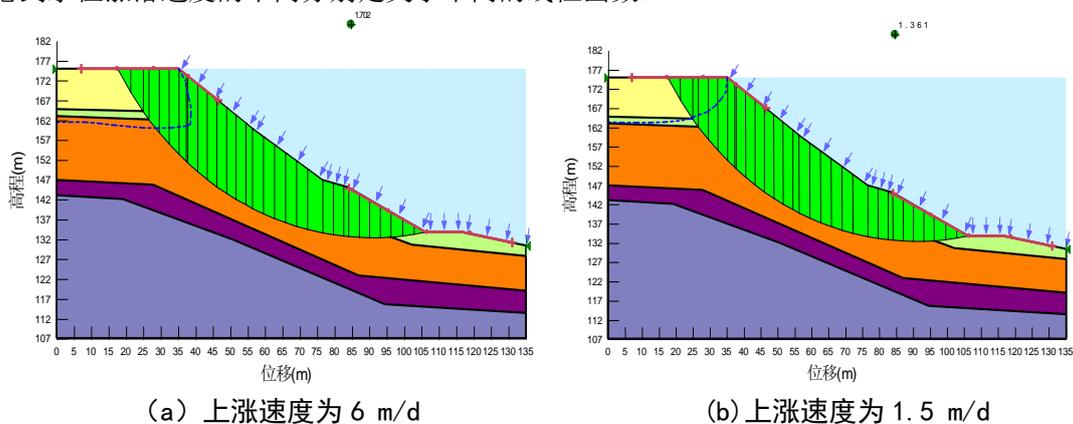
利用 VG 闭合解方法拟合土水特征曲线首先要确定的参数是  $a$ ,  $n$ ,  $m$ , 其中  $a$  为进气值有关的参数, 单位为 kPa,  $n$  为在基质吸力大于进气值之后与土体脱水速率有关的土参数;  $m$  为与残余含水量有关的参数, 而对于  $a$ ,  $n$ ,  $m$  的参数取值很多学者通过大量实验已经做了相关的研究, 并提出了大量有关土水特征曲线的数学模型, 基于 UNSODA 数据库 (非饱和土水力数据库), 谭晓慧, 李丹等<sup>[14]</sup>采用 MATLAB 编程语言中的 Nlinfit、Lsqcurvefit、Fminsearch 三种拟合方法得到四种典型土的 SWCC 拟合参数  $a$ ,  $n$ ,  $m$  值; Vereecken 等<sup>[15]</sup>用 VG 土水特征曲线方程对 40 组土进行了拟合, 验证了土水特征曲线和土性参数的相对重要性和稳定性, 利用土性参数可以很好的预测土水特征曲线; 何晓英<sup>[16]</sup>通过对宁江岛松散填土进行多晶 X 射线衍射试验, 得到了原状土体在不同基质吸力下的含水量值。在综合众多学者的研究, 利用 UNSODA 数据库中的基本土性参数, 结合宁江岛的地层特性本文进行土水特征曲线拟合时所选取的拟合参数取值如表 3 所示。根据拟合参数便得到土水特征曲线, 而渗透系数函数的基本形状是由体积含水量函数派生而出, 由于在大多数非饱和土体渗流分析中体积压缩系数不需要准确定义, 可以取一个小的值, 本文统一取体积压缩系数  $m_v$  为  $1.0e-5/kPa$ , 参考刘增荣等<sup>[17]</sup>编写的土力学教材, 模型中各层土的饱和渗透系数  $K_s$  取值如表 3 所示:

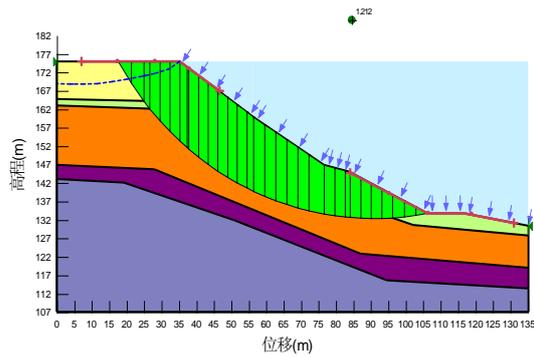
表 3 宁江岛岸坡土水特征曲线拟合参数及饱和渗透系数取值

Tab.3 The water characteristic curve fitting parameters and saturated hydraulic conductivity values of Ningjiang island slope

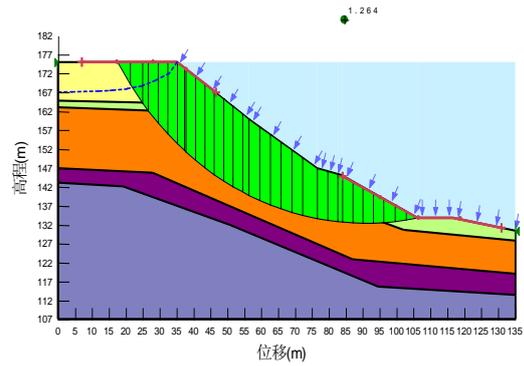
土体	拟合参数			饱和渗透系数
	$a$ (kPa)	$n$	$m$	$K_s$ (cm/s)
填岛土体	49.29	6.37	0.28	$0.8e-4$
素填土	33.92	2.55	0.72	$1.2e-5$
粉质粘土	40.76	1.81	0.18	$1.0e-6$
碎石土	27.81	3.97	0.42	$5.0e-2$

该模型主要模拟库水位在 145m 至 175m 之间涨落对岸坡稳定性影响及其渗流变化情况, 在数值模拟开始前, 假设坡体内外水位均为 145m, 即此时的浸润线趋于一水平直线, 以此时岸坡渗流情况的稳态分析作为 Seep/W 模块瞬态分析的初始条件, 采用稳态分析此刻的岸坡渗流情况。初始条件确定之后要先设定边界条件, 将水浸没的岸坡边界为潜在渗流面, 考虑到水位涨落速度的不同分别定义了不同的线性函数。





(c) 上涨速度为 0.75 m/d

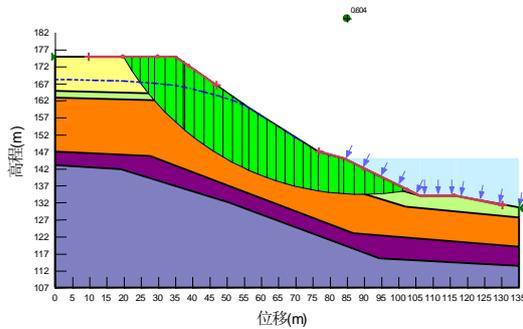


(d) 上涨速度为 0.5 m/d

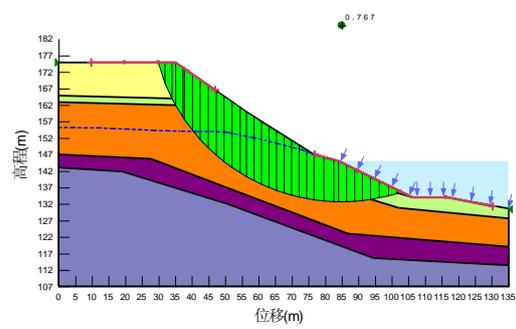
图 3 不同水位上涨速度下浸润线及稳定系数变化图

Fig.3 Infiltration lines and stability factor change under different rising speed

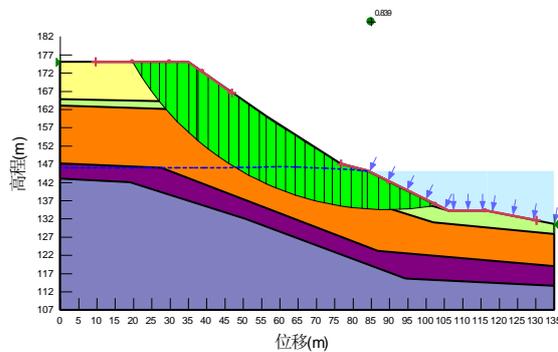
以第 60 天的水位上升至 175m 时的渗流情况作为水位下降瞬态分析的初始状态，同样求得水位下降速度分别在 6m/d、1.5m/d、0.75m/d、0.5m/d 时浸润线及稳定系数变化情况如下图。



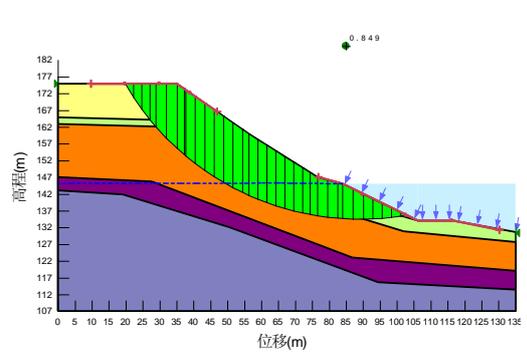
(e) 下降速度为 6 m/d



(f) 下降速度为 1.5 m/d



(g) 下降速度为 0.75 m/d



(h) 下降速度为 0.5 m/d

图 4 不同水位下降速度下浸润线及稳定系数变化规律

Fig.4 Infiltration lines and stability factor change under different declining speed

### 3 数值模拟结果分析

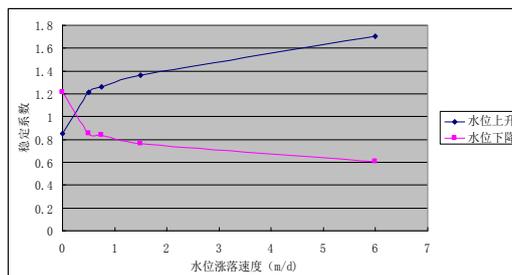


图5 岸坡稳定系数随水位涨落速度的变化

Fig.5 Change of slope stability factor with different Water Level water Fluctuation

通过 geo-studiode 模拟得出水位涨落速度对岸坡稳定系数的影响如图 5 所示, 通过分析得到:

(1) 对比分析 (a)、(b)、(c)、(d) 四个图, 库水位上升时, 岸坡体内水位相应抬升, 岸坡体内水位线总要滞后于库水位, 且靠近坡面的水位越趋近于库水位, 随着水位的上升, 岸坡逐渐浸水, 土壤趋于软化, 内部结构遭受破坏, 随着水位上升速度的增加, 岸坡稳定系数也从 1.264 上升至 1.702, 水位开始上涨时, 岸坡下部首先被淹没, 岩土体含水量增大, 土体含水量增加会产生润滑作用, 削弱土体的抗剪强度, 造成土体内的有效应力降低, 使下部岩体达到饱和容重而失去足够的抗滑阻力而失稳。

(2) 从图 4 可以看出, 水位上升, 坡体外水来不及入渗, 坡体外水位远远高于坡体内, 坡体外水对岸坡施加了较大向下的压力, 反而岸坡稳定性增强, 且上升速度越快, 岸坡越稳定, 主要是因为宁江岛岸坡体内存在隔水层, 而水位的抬高会对隔水层形成一个向上的浮托力, 浮力作用使滑坡体有效重量减小, 一方面减小了下滑力, 利于岸坡稳定, 与此同时, 库水位的上升将对坡面施加水压力作用, 其大小为  $h_w \gamma_w$  ( $h_w$  为库水位深度,  $\gamma_w$  为水容重), 同样增加了坡体的稳定。

(3) 水位急剧下降时, 岸坡体内水排泄较慢, 从而产生较大的水头差, 形成动水压力, 从 (e)、(f)、(g)、(h) 四个图中也可以明显看出水位降落速度分别为 0.5m/d、0.75m/d、1.5m/d、6m/d 时, 通过模拟得到的稳定系数分别为 0.849、0.839、0.767、0.604, 呈递减趋势, 当水位骤降时, 坡体内孔隙水压力来不及消散, 使得岸坡体内水位总要滞后于库水位, 坡体内产生较大的超静孔隙水压力, 水位涨落速度越快, 这种滞后效应越明显, 且越远离岸坡面的浸润面越平缓, 受库水位涨落影响不大, 下降速度越快, 稳定性越弱, 更容易失稳。

## 4 结论

通过 ges-studio 软件下的 SEEP/W 模块与 SLOPE/W 模块耦合建立模型得到宁江岛再造岸坡稳定性和水位涨落之间的关系如图 5 所示, 由此可以得出以下结论:

(1) 水位迅速上升时, 坡体外水来不及入渗, 对岸坡施加了较大向下的压力, 宁江岛岸坡在短时间内趋于稳定, 当水位上升速度由 0.5m/d 增至 6m/d 时, 稳定系数也相应的从 1.264 增加至 1.702, 这主要是因为库水位的突然上升对坡面施加了一个大小为  $h_w \gamma_w$  的水压力作用, 增大了岸坡体的有效重量, 使稳定性增强。

(2) 水位骤降时, 坡体内部水位线滞后于外部水位线, 在岸坡防护结构前后形成水头差, 从而产生较大的渗透力, 坡体内维持较高的浸润面, 坡体内水位高于坡体外水位, 从而大大削弱了岸坡土体的整体抗滑力, 水位降落速度分别为 0.5m/d、0.75m/d、1.5m/d、6m/d 时, 通过模拟得到的稳定系数从 0.849 降至 0.604。因为坡体内外水头差的作用, 削弱土体的抗剪强度, 岸坡稳定性降低。

(3) 水位涨落是造成岸坡失稳的一个重要影响因素, 进行填土造地时, 回填土的材料可以选取渗透系数较大的材料, 减小坡体内外的动水压力差, 同时要加强对岸坡体的排水, 实现岸坡同步排水, 数值模拟结果科学的揭示了不同水位升降情况下对岸坡稳定性及渗流面的影响规律, 整个模拟结果与实际相吻合, 对工程实际及相关科学研究有着重要的参考价值。

## 参考文献:

[1] T. N. Singh, S. P. Pradhan, V. Vishal. Stability of slopes in a fire-prone mine in Jharia Coalfield, India [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(2): 419-427  
[2] Dahal R, Hasegawa S, Nonomura A, et al. GIS-based

Weights-evidence Modeling of Rainfall-induced Landslides in Small Catchments for Landslide Susceptibility Mapping [J]. Environmental Geology, 2008, 54(2): 311-324  
[3] 李连崇, 唐春安, 邢军, 等. 节理岩质边坡变形破坏

- RFP A 模拟分析[J].东北大学学报,2006,27(5):559-563.
- Li L C,Tang C A,Xing J,et al.Numerical Simulation and Analysis of Deformation and Failure of Jointed Rock Slopes by RFP A-Slope[J].Journal Northesatern University(Natural Science), 2006,27(5):559-563.
- [4] Sarkar K,Singh TN,Verma AK.A numerical simulation of landslide-prone slope in Himalayan Region—a case study[J].Arabian Journal of Geosciences,2012.5(1):73-81.
- [5] 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.
- Zhang W J,Zhan L T,Ling D S,et al.Influence of reservoir water level fluctuations on stability of unsaturated soil banks[J].Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2006,40(8):1365-1370.
- [6] 莫伟伟,徐平,丁秀丽.库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展[J].地下空间与工程学报.2006,2(6):997-1002.
- Mo W W,Xu P,Ding X L.Research Advances on the Influences of Reservoir water level fluctuation on slope stability[J].Chinese journal of Underground Space and Engineering,2006,2(6):997-1002.
- [7] 张华庆,谭佳佳,左殿军.降雨入渗对软土岸坡稳定性影响研究[J].水运工程,2014(4):148-153.
- Zhang H Q,Tan J J,Zuo D J.Stability study of unsaturated soft soil slopes under rainfall infiltration[J].Port & Waterway Engineering, 2014 (4):148-153.
- [8] 高连通,晏鄂川,刘珂.考虑降雨条件的堆积体滑坡多场特征研究[J].工程地质学报,2014(2):263-271.
- Gao L T,Yan E C,Liu K.Accumulation landslides under rainfall condition-a case from chongqing[J].Journal of Engineering Geology,2014(2):263-271.
- [9] 赵代鹏,王世梅,谈云志,等.库水升降作用下浮托减重型滑坡稳定性研究[J].岩土力学,2013,34(4):1017-1024.
- Zhao D P,Wang S M,Tan Y Z,et al.Stability studies of buoyancy weight loss landslide s under reservoir water level fluctuation[J].Rock and Soil Mechanics.2013,34(4):1017-1024.
- [10] 陈振民.SLOPE/W 软件总应力法和有效应力法的应用.水运工程,2009,(7):107-111.
- Chen Z M.Application of total stress method and effective stress method in SLOPE/W[J].Port & Waterway Engineering,2009,(7):107-111.
- [11] 李智慧.坡前水位降落对边坡稳定性影响模型试验与数值分析研究[D].北京:中国地质大学,2012.
- Li Z H.Study on the Model Test and Numerical Analysis of Slope Stability Caused by Water Drawdown[D].Beijing:China University of Geosciences,2012.
- [12] 崔志波,陈洪凯,陈涛.改造地功能的水库岸坡防护技术研究与实践[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009(1):95-99.
- Cui Z B,Chen H K,Chen T. Research and Practice on Earth-Fill Reclamation of the Reservoir Bank Protection Technology[J].Journal of Chongqing Jiaotong University,2009(1):95-99.
- [13] 陈浩,黄静,林锋. GeoStudio 软件在土坡饱和——非饱和渗流分析中的应用.岩土力学,2008,28(S1):67-68.
- Chen H,Huang J,Lin F. Application of GeoStudio software in saturated —— unsaturated Seepage Analysis of slopes.Rock and SoilMechanics, 2008,28(S1):67-68.
- [14] 谭晓慧,李丹,沈梦芬,等.土水特征曲线参数的概率统计及敏感性分析[J].土木建筑与环境工程,2012,12(6):97-103.
- Tan X H,Li D,Shen M F,et al.Probability Statistics and Sensitivity Analysis of Parameters of Soil-Water Characteristic Curves,Journal of Chongqing Jianzhu University[J],2012,12(6):97-103.
- [15] Vereecken,H.,Maes,J.,Feyen,J.,&Darius,P.Estimating the soil moisture retention characteristic from texture,bulk density,and carbon content[J].Soil Science,1989,148(6):389-403.
- [16] 何晓英.高变幅水库岸坡造地型护岸结构修筑关键技术研究及应用[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- He X Y.Study on the Key Technologies for Earth-fill Shore Protection Construction and Its

---

Application[D].Chongqing:Chongqing Jiaotong Liu Z R.Soil Mechanics[M].Shanghai:Tongji University,2011. University Press,2005.

[17] 刘增荣.土力学[M].上海:同济大学出版社,2005.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

## **The Numerical Simulation Research on The Influence of Water Level Fluctuation Reclamation Revetment Stability of Ningjiang Island**

CHEN Hong-kai, WANG Ye-Ping

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Ningjiang Island, a reservoir revetment not only has the primary purpose of bank protection, also has important land resources utilization and landscape value, whose stability mainly influenced by the reservoir water level fluctuation, in this paper, Geo-studio software is used to analysed seepage field and stability of variation under the influence of four different rates, the simulation results showed that: the slope stability has been enhanced with the rise of water level, when the water level rise rate increased from 0.5m/d to 6m/d, its stability factor is correspondingly increased to 1.702 from 1.264; conversely when water level dropped, stability dropped to 0.604 from 0.849 with drop of water level, slope can lose stability more easily. Meanwhile, invasive in vivo slope line always lags behind the water level during the reservoir water level fluctuation, and the greater the fluctuations speed is, the more obvious the lag effect is. The simulation results scientifically reveal that the influence of slope stability and seepage face under different water level, which are match with the actual.

**Key words:** Numerical simulation; water level fluctuations; slope stability; Ningjiang Island