

# 水位骤降下边坡渗流场与应力场耦合数值分析

卢树盛<sup>1</sup>, 辛全才<sup>1</sup>, 肖诗荣<sup>2</sup>, 王世梅<sup>2</sup>, 董书明<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100;

2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室 宜昌 443002)

摘要: 引入非饱和-饱和的渗流分析方法, 考虑渗透系数以及饱和度与基质吸力之间的非线性关系, 分析渗流场-应力场耦合机理和相互影响关系, 并采用渗流场-应力场耦合有限元法对水位骤降下堤坝边坡位移场、孔隙水压力、超孔隙水压力进行具体分析。分析结果表明, 利用渗流场-应力场耦合有限元法, 比不考虑基质吸力和双场耦合作用分析, 更加真实可靠。

关键词: 基质吸力; 非稳定渗流; 耦合; 边坡稳定

中图分类号: TV 871

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)06-0130-04

库岸边坡的稳定性是岩土工程界普遍关心的问题之一。随着三峡库区的蓄水以及蓄水后的正常运行, 库区水位变化将对区内边坡的稳定性产生重要影响, 因此, 研究三峡库区库水位下降作用下边坡的稳定性是一个重大的工程问题。

自 20 世纪 90 年代以来, 国内不少学者陆续开展了这方面的探讨<sup>[1-3]</sup>。这些方法基本上能够合理确定浸润线的位置, 但其局限性在于无法考虑浸润线以上土体的非饱和特性。本文主要是引入非饱和和非稳定的渗流分析方法, 考虑渗透系数以及饱和度与基质吸力之间的非线性关系, 将计算得到的孔隙水压力用于滑坡的极限平衡分析, 并探讨了库水位下降对滑坡稳定性的影响。

## 1 饱和-非饱和渗流及非饱和土抗剪强度理论

由于地下水位线以上的滑坡体处于非饱和状态, 地下水位线以下处于饱和状态, 随着库水位的变化, 地下水位线也相应发生变化, 土体在饱和与非饱和状态之间变化, 而非饱和区土壤水和饱和区是相互联系的, 故将两者统一饱和与非饱和问题<sup>[4]</sup>。

当采用总水头  $h$  作为控制方程的因变量时, 各向异性的二维 Richards 饱和-非饱和渗流控制方程为:

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

式中:  $K_x, K_y$ ——水平和垂直方向的饱和渗透系数;

$m_w$ ——比水容量, 定义为体积含水量  $\theta_w$  对基质吸力  $(u_a - u_w)$  偏导数的负值。

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

饱和-非饱和渗流的初始条件为:  $H(x, y, 0) = \phi(x, y, 0)$ 。边界条件通常有以下两类: ①第一类边界条件, 即已知水头边界  $\Gamma_1: H(x, y, t) |_{\Gamma_1} = \gamma(x, y, t), t > 0$  ②第二类边界条件, 即已知流量边界条件  $\Gamma_2$ :

$$K \cdot \frac{\partial H(x, y, t)}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, t), t > 0$$

利用相应的边界条件, 求解方程, 即可求得库水位变化时的地下水位线, 并可对稳态和瞬态饱和流与非饱和流进行模拟。

本文分析中所用的土-水特征曲线为粉土的土-水特征曲线, 如图 1 所示。

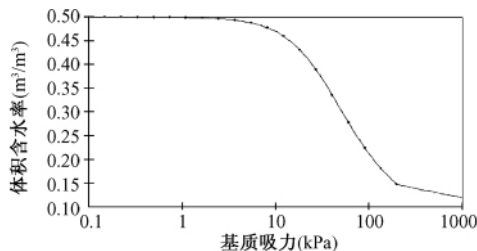


图 1 土-水特征曲线

Fig. 1 Soil-water characteristic curve

本文将用到的水渗透性函数采用 Fredlund&Xing 模型进行估计<sup>[6-8]</sup>, 通过相关实验确定饱和渗透系数 (假定为各向同性渗流即水平和垂直方向上的渗透系数相等) 为  $K_s = 0.1 \text{ m/d}$  (图 2)。

收稿日期: 2009-10-21; 修订日期: 2010-04-20

作者简介: 卢树盛 (1984-) 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程的计算和数值模拟。

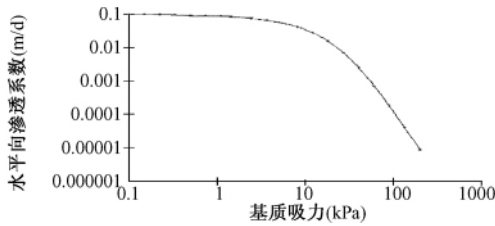


图 2 水平向渗透系数与基质吸力性关系函数

Fig. 2 Hydraulic conductivity function

## 2 渗流场 - 应力场耦合计算原理

### 2.1 耦合基本方程

对于渗流场—应力场耦合分析中,将裂隙岩体平衡方程和流动方程同步进行计算。利用虚功原理,将渗透力作为唯一外力,把孔隙水压力和体积应变利用有限元形式表达,即把虚拟的孔隙水压力,施加于流动方程,从而得到耦合方程,其具体推导过程参见文献[9]。

### 2.2 耦合模型

为突出主要矛盾,对影响边坡的其他因素进行了适当的简化。数值模拟中假定堤坝由水平各向同性材料组成,上部为坝体,下部为地基。剖面模型水平方向为 76m,垂直方向为 20m,坡高比为 1:2,并在下游坡脚处设置一反滤层长 10m。利用有限单元法共划分了 1 020 个单元,共 1 098 个节点。对于模型的边界条件,堤坝的左右为自由端约束,边坡底部为固定端,如图 3 所示。

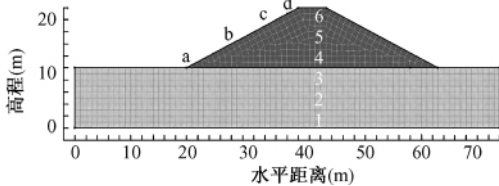


图 3 边坡模型及网格划分图

Fig. 3 Slope model and finite element grids

双场耦合分析中,需确定的计算参数主要包括两部分,即平衡方程和流动方程的参数。流动方程所需各种参数,主要是各岩土体的渗透系数和含水量。图 4 和图 5 给出渗透系数以及含水量随压力变化关系曲线。

平衡方程中需确定的计算参数主要包括岩土体的容重、弹性模量、泊松比。堤坝岩土体计算参数见表 1。

表 1 岩土物力学参数

Table 1 soil layer physical mechanics parameter

| 土层名称 | 密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 粘滞力<br>(kPa) | 摩擦角<br>(°) | 弹性模量<br>(MPa) | 泊松比 |
|------|----------------------------|--------------|------------|---------------|-----|
| 坝体   | 1 800                      | 5            | 28         | 5             | 0.3 |
| 地基   | 2 100                      | 10           | 24         | 6             | 0.3 |

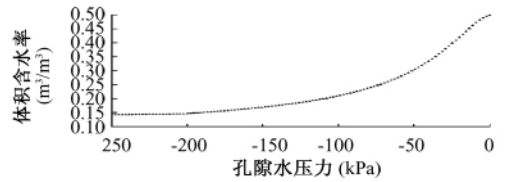


图 4 体积含水率与孔隙水压力关系曲线图

Fig. 4 the relationship between vol-water content and pore-water pressure

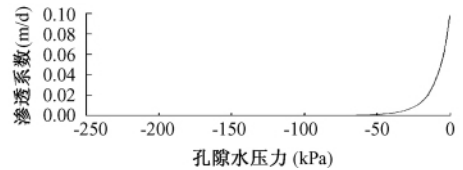


图 5 渗透系数与孔隙水压力关系图

Fig. 5 the relationship between conductivity and pore-water pressure

## 3 计算结果和分析

利用该模型对库水位骤降作用下孔隙水压力消散,超孔隙水压力与时间的变化及岸坡的位移场进行了分析研究。

### 3.1 孔隙水压力分析

孔隙水压力骤变是导致边坡失稳的一个重要因素。选取上游坝面四个关键点, a 点是坡脚点, b 点是初始蓄水水头的三分之一处, c 点初始蓄水的三分之二处, d 点是初始位置水头线。从图 6 可以看出, a 坡脚点孔隙水压力随着库水位骤降而急剧减小, d 从 19m 下降到 10m, 之后保持稳定, b 点从 19m 下降到浸润线 13.15m, 然后保持稳定, c、d 点都是随着水位的骤降而减小, 然后逐渐趋向稳定, 孔隙水压力的快速消散程度反应边坡稳定性的安全储备程度。

### 3.2 坝中心剖面超孔隙水压力分析

土的抗剪强度与土体内的孔隙水压力密切相关, 水库库岸滑坡既有一般山地滑坡的共性, 又有其特殊的一面。其特殊在于它的活动与库水位的升降有很大的关系, 库水位骤然下降时, 由于坡体中地下水水位下降相对滞后, 导致坡体内产生超孔隙水压力。所有这些都可能对滑坡的稳定产生不良的影响。选取坝中心轴上六个关键点(见图 3), 从图 7 中可以看出, 坝底点超孔隙水压力在 1d 的时间内变化最大, 其余次之。坝顶点超孔隙水压力随着库水位的骤降变化不大, 与时间近似呈线性关系。

### 3.3 位移场分析

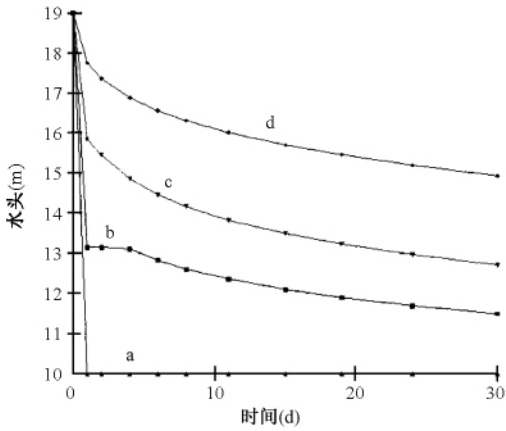


图6 上游坡面关键点孔隙水压力消散

Fig. 6 pore-water pressure dissipation at the upstream slope key point

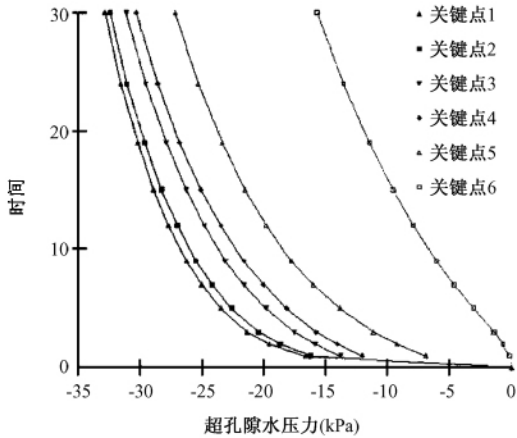


图7 坝体中心超孔隙水压力与时间关系图

Fig. 7 the relationship between Excess pore-water pressure and time at the middle of dyke

水平位移分析:随着库水位的骤降,24h后,水平向最大位移发生在上游坡面,最大位移水平-0.1m,随着地基向下,水平位移逐渐减小(图8)。垂直位移场:随着库水位的骤降,24h后,垂直向最大位移发生在上游坡面顶端,最大位移为向下沉降0.045m,坡脚处向上位移0.02m,这对坝坡稳定性不利(图9)。

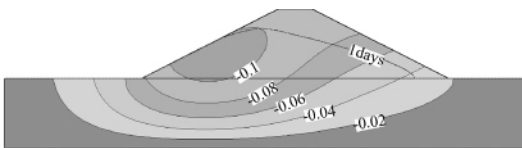


图8 上游坝坡历时24小时水平向位移云图

Fig. 8 the contour of 24 hours horizontal displacement of the upstream slope

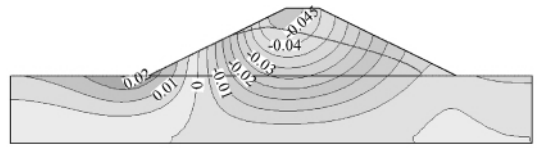


图9 上游边坡历时24小时垂直向位移云图

Fig. 9 the contour of 24 hours vertical displacement of the upstream slope

到的浮托力突然减小,致使库岸陷落压密,可能激发很高的超孔隙水压力,使压密带抗剪强度急剧降低而导致岸坡失稳。通过关键点孔隙水压力的消散比较发现,坡脚点的孔隙水压力消散的最快;坝底点超孔隙水压力在24h变化最大。

(2) 随着库水位的骤降,水平向最大位移发生在上游坡面,垂直向最大位移发生在上游坡面顶端,这对坝坡的稳定性极为不利,需加强观测和采取有效的工程措施。

参考文献:

[1] 贾苍琴,黄茂松,王贵和. 水位骤降对土坡稳定性的影响分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(3):304-309.

[2] 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.

[3] 朱冬林,任光明,聂德新,等. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质,2002,29(3):6-9.

[4] 张培文,刘德富,黄达海,等. 饱和-非饱和非稳定渗流的数值模拟[J]. 岩土力学,2003,24(6):927-930.

[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.

[6] FREDLUND D G, XING An-qing. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31 (3): 521-532.

[7] FREDLUND D G, XING A, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 420-448.

[8] D G 弗雷德隆德, H 拉哈尔佐. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐,译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

[9] John krahn. Stress and deformation modeling with sigma/w [M]. Alberta, Canada, 2004:205-213.

4 结论

## Coupling numerical analysis of seepage and stress fields of slope when the water rapid drawdown

LU Shu-sheng<sup>1</sup>, XIN Quan-cai<sup>1</sup>, XIAO Shi-rong<sup>2</sup>, WANG Shi-mei<sup>2</sup>, DONG Shu-ming<sup>1</sup>

(1. College of Water Resource and Architectural Engineering Northwest A & F University, Yangling 712100;

2. China Three Gorges University Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The water rapid drawdown to the dyke slope stability influence is the present Geotechnical hot issues, This article mainly introduces the unsaturated transfusion analysis method, considered that between the penetration coefficient as well as the degree of saturation and matric suction's misalignment relations, the analysis infiltrates the flow field - stress field coupling mechanism and the mutual influence relations, under uses infiltrates the flow field - stress field coupling finite element method to plummet the dike side slope bias field to the water level, the pore-water pressure, the excess pore-water pressure carries on the concrete study. The analysis result indicated that the use infiltrates the flow field - stress field coupling finite element method to rapid drawdown to the water level to the dike stability of slope numerical analysis is feasible.

**Key words:** matric suction; transient seepage; coupling; slope stability

责任编辑:张若琳

(上接第 129 页)

## Application of UAV remote sensing in Geologic hazards survey along the Project of west-east Gas Transmission

GAO Jiao-jiao<sup>1</sup>, YAN Yu-sen<sup>2</sup>, SHENG Xin-pu<sup>3</sup>, TAN Qu-lin<sup>4</sup>, QI Xiao-bo<sup>2</sup>

(1. China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

2. China Institute for Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China;

3. China North Optical-electrical Technology Co., Ltd. Beijing 100176, China;

4. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** This paper describes the key technology and methods of UAV remote sensing in geologic hazards survey. It introduces the composition of the UAV remote sensing system. Through researching the aerial photography, orthophotoquad production process and imagery interpretation, analyzing the accuracy of aerial photography results, the feasibility of UAV remote sensing in geological survey is demonstrated.

**Key words:** UAV; aerial photogrammetry; imagery interpretation; geologic hazards

责任编辑:汪美华