

文章编号: 1000-7598-(2008)12-3229-06

考虑饱和-非饱和渗流作用的土质边坡稳定性分析

廖红建^{1,2}, 姬建², 曾静³

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 西安交通大学 土木工程系, 西安 710049;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 饱和-非饱和土的研究一直是岩土工程界的一个热点问题。土体中孔隙水压力的存在使得对岩土体的力学性状的分析变得更加复杂化。基于土体渗透系数与基质吸力之间的相互联系, 对理想的各向同性土的水库堤坝进行了非稳定渗流场的数值模拟, 得出不同水位、同一水位因不同骤升速率而产生的渗流场的变化规律, 并对土体固-液耦合研究进行了初步探讨。把堤坝渗流场的动态变化在时间和空间上进行离散, 分别引入到坝坡稳定性的分析中, 以极限平衡原理和 Morgenstern-Price 条分法为基础对坝坡产生滑移的最小安全系数变化规律进行了分析, 从而得出渗流-滑坡的内在联系。

关键词: 饱和-非饱和土; 渗流; 基质吸力; 最小安全系数

中图分类号: TV 139.14; TV 16

文献标识码: A

Stability analysis of soil slopes considering saturated and unsaturated seepage effect

LIAO Hong-jian^{1,2}, JI Jian², ZENG Jing³

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Hazard Control Engineering of Chinese Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China;
3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Researches on saturated-unsaturated soils became a hot issue in recent years. In fact, it is very difficult to analyze the mechanical behaviors of soil because of the pore water pressure's existence. Based on the relationship between permeability and matric suction, numerical simulation of unsteady seepage analysis of an ideal isotropic embankment is presented. And the dynamic change of the seepage field is temporally and spatially discretized and inducted into the stability analysis of the embankment slope. Regularity of the minimum safety factor of the slope is discussed by applying the limit equilibrium theory and Morgenstern-Price slice method to show the inherent relation between seepage and landslide.

Key words: saturated-unsaturated soil; seepage; matric suction; minimum safety factor

1 引言

饱和-非饱和渗流是岩土介质中普遍客观存在的地下水运动现象, 由于其对岩土体定性、地下水资源利用、污染控制、石油天然气开采等工程问题均具有重要影响, 同时近十年来由于国内外在上述领域工程需求增加, 使饱和-非饱和土体渗流对边坡稳定性影响的研究越来越受到重视。吴宏伟等^[1]通过对香港地区的非饱和土斜坡的稳定性研究, 认

为: 基质吸力的变化是土坡失稳的重要因素; 张文杰等^[2]从水位升降情况出发, 也得到了一些规律性的认识。在目前的岩土工程界, Terzaghi 提出的有效应力概念已经被普遍接受并应用于研究饱和土, 但在非饱和土方面, 人们对于应力状态的描述则一直难于达成共识。目前研究的主要思路有两个: 一是 Bishop 提出的单值有效应力经验公式, 研究重点集中在参数 χ 的表达上, 但 χ 的意义及确定都存在很大的困难; 二是近年来以 Fredlund 和 Morgenstern^[3]

收稿日期: 2007-03-29

基金项目: 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室访问学者基金项目; 国家自然科学基金资助项目 (No.50379043)。

作者简介: 廖红建, 女, 1962 年生, 西安交通大学土木工程系教授, 博士生导师; 主要从事岩土材料的本构关系及边坡稳定性研究。E-mail: hjliao@mail.xjtu.edu.cn

为首提出的双应力变量理论,并在此基础上发展了饱和土的抗剪强度理论,引进了基质吸力强度。在边坡稳定计算方面,目前主要的方法包括极限平衡法和有限元法。其中,极限平衡法中的条分法使用较多,对土条受力的不同假设产生了很多不同的方法,而有限元法考虑了土体变形等,能更准确地反映土体内的应力变化,特别是随着计算机的发展有着广阔的前景。

本文首先对岩土体饱和-非饱和渗流运动微分方程进行了推导,运用有限元法得到了渗流-应力的耦合方程,以岩土介质饱和-非饱和渗流理论为依据,采用 Fredlund 的双变量抗剪强度理论,运用 Morgenstern-Price 二维条分法进行一水库堤坝算例的渗流场有限元模拟,分析了两种不同的水位骤升情况下渗流场的改变对水库堤坝的稳定性影响,这对于水利工程的库岸边坡稳定性研究具有一定的参考价值。

2 基本方程与固-液耦合原理

2.1 渗流场基本方程

在非稳态渗流场下,多孔介质中地下水运动的微分方程可依据 Darcy 定律和质量守恒定律来推导^[4],即根据渗流场中水在某一单元体内的积累速率等于该单元体水量随时间变化的速率。若取一微单元体,其体积为 $dx dy dz$ 。设介质在 x, y, z 3 个方向的渗透速率分别为 v_x, v_y, v_z ,则通过 3 个方向流进的水体质量分别为 $\rho v_x dy dz, \rho v_y dx dz, \rho v_z dy dx$,通过 3 个方向流出的水体质量分别为 $\left(\rho v_x + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}\right) dy dz, \left(\rho v_y + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y}\right) dx dz, \left(\rho v_z + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}\right) dy dx$,可得到单位时间内流入和流出单元体水量的变化量 ΔQ 为

$$\Delta Q = -\left(\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}\right) dx dy dz \quad (1)$$

相应的体积水质量 Θ 为 $n \rho dx dy dz$, Θ 随时间的变化率为

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial(n \rho dx dy dz)}{\partial t} \quad (2)$$

根据 Darcy 定律和质量守恒定律,由式(1)和式(2)可得到不考虑水的密度变化时的多孔介质渗流基本微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (3)$$

式中: k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 方向的渗透系数 (m/s); Q 为源汇项 (m³/s); 对于非饱和土,渗透系数取 $k_{mn} = k_r(\theta) k_{ij}$; k_{ij} 为饱和土渗透系数; k_r 为非饱和渗透系数相对应饱和渗透系数的比值,对于非饱和区,有 $0 \leq k_r \leq 1$ 。

由于介质体应变 $\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_s + \Delta V_v}{V}$,假设土体颗粒是不可压缩的,则有 $\frac{\partial V_s}{\partial t} = 0$,则介质体应变的变化率就是孔隙率的变化率,即 $\frac{d\varepsilon_v}{dt} = \frac{\partial n}{\partial t}$ 。

边界条件包括水头边界条件和流量边界条件,可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} H(x, y, z)|_{\Gamma_1} &= H_1(x, y, z) \\ \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial H}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial H}{\partial z} l_z \right) \Big|_{\Gamma_2} &= q \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: H, H_1 分别为渗流场水头和 Γ_1 类边界条件下的已知水头 (m); q 为 Γ_2 类边界条件下单位面积流量 (m³/s); l_x, l_y, l_z 分别为 Γ_2 类边界 x, y, z 方向的单位法向量。

上述偏微分方程的定解问题可转化为式(5)泛函求极值的问题。将泛函令为地下水渗流计算区的总势能,则由泛函求极值与欧拉方程等价的原理可求得有限元计算的基本方程^[5],据以求得各点的水头值。

$$\Pi(H) = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \left\{ k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - 2QH \right\} dx dy dz - \iint_{\Gamma_2} qH ds = \min \quad (5)$$

以上方程适合三维状态下的渗流问题,对于二维渗流情况,上述各式 z 方向可以忽略不计。

2.2 渗流力学行为及有限元方程建立

在一定的水头差作用下,水会在土骨架之间的孔隙中发生流动,对土粒骨架形成渗透力。这种渗透体积力与土骨架对水的渗流所产生的的阻力构成一对作用力与反作用力。将渗流水头 H 表示为

$$H = Z' + \frac{P}{\gamma_w} \quad (6)$$

式中： Z' 为位置水头； γ_w 为水的重度； P 为渗透体积力。

渗流体积力与水力梯度成正比，则各方向的渗流体积力为

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} = \gamma_w \begin{Bmatrix} \frac{\partial H}{\partial x} \\ \frac{\partial H}{\partial y} \\ \frac{\partial H}{\partial z} + f \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中： P_x, P_y, P_z 分别为 x, y, z 方向的渗透体积力； f 为浮力。

将渗流力转化为单元节点力，则有：

$$\{P\}^e = \iiint [N]^T \{P\} |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (8)$$

式中： $|J|$ 为 Jacobin 行列式； ξ, η, ζ 为局部坐标系； $[N]$ 为单元节点形函数矩阵。

在饱和-非饱和和岩土体中，总应力 σ 和有效应力 σ' 之间的关系根据有效应力原理可表示为

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} + Mp \quad (9)$$

式中： M 为法向应力中单位列阵； p 为孔隙水压力。

根据虚功原理，应力的增量型平衡方程可写为

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T d\sigma d\Omega - \int_{\Omega} \delta u^T db d\Omega - \int_{\Gamma} \delta u^T dl d\Gamma = 0$$

式中： $d\sigma$ 为总应力增量； db, dl 分别为体积力和面力增量； $\delta \varepsilon, \delta u$ 分别为虚应变和虚位移。

联立土体中渗流作用力方程和应力方程，通过有限单元法可得到如下渗流-应力的耦合方程：

$$\left. \begin{aligned} [K]\{\delta\} &= \{F\} + \{P\}^e \\ [K_s]\{H\} &= \{F'\} \\ k_{ij} &= k(\sigma_{ij}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： $[K]$ 为单元刚度矩阵； $\{F\}$ 为节点荷载； $\{P\}^e$ 为上述渗透体积力引起的节点荷载； $\{\delta\}$ 为节点位移； $\{F'\}$ 为渗流自由项系数； $[K_s]$ 为整体渗透矩阵。

2.3 饱和-非饱和和土固-液耦合原理

由以上分析可见，岩土体中因水相的渗透流动会产生相应的渗流体积力。通过有效应力原理可知，其节点总应力将随之改变。由此，以不同的本构理论可反算出岩土体体积应变率。土体的渗流场是一组与介质渗透系数 k_{ij} 密切相关的函数。根据饱和-非饱和土理论知， k_{ij} 受到基质吸力、孔隙率、

温度、体积含水率等多种因素的影响。可见，渗流与应力-应变行为是一个相互影响的复杂过程。数值分析中可根据不同的非饱和理论设定 k_{ij} 函数式，把计算方程在时间和空间上离散，采取相应的数值计算方法，如：有限元法、差分法等，进行迭代计算。

2.4 土体滑坡的稳定性分析

当土体中最大剪应力达到极限状态时，土体将发生破坏而导致失稳。为此，可采用应力极限平衡法分析土坡稳定性问题。为考虑基质吸力对饱和-非饱和土体中剪应力的影响，运用 Fredlund 修正 Mohr-Coulomb 准则^[6]：

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (11)$$

式中： c' 为有效凝聚力； $(\sigma_n - u_a)$ 为破坏面上的净法向应力； u_a 为破坏面上的孔隙气压力； ϕ' 为与净法向应力状态变量 $(\sigma_n - u_a)$ 有关的内摩擦角； $(u_a - u_w)$ 为破坏时在破坏面上的基质吸力； ϕ^b 为抗剪强度随基质吸力而增加的速率。

以极限平衡状态理论为基础，可得到土坡失稳时安全系数为^[7]

$$F_s = \frac{\int_{\Gamma} \tau_f d\Gamma}{\int_{\Gamma} \tau_i d\Gamma} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_f &= c' + \sigma_n^* \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \\ \tau_i &= 0.5(\sigma_x^* - \sigma_y^*) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \\ \sigma_n^* &= 0.5(\sigma_x^* + \sigma_y^*) + 0.5(\sigma_x^* - \sigma_y^*) \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： α 为坡面外法线与水平面的夹角； σ^* 为坡面处净应力。

3 算例分析

本文采用 GeoStudio 岩土工程数值分析软件中的 Seep 以及 Slope 两大模块对一水库堤坝进行数值模拟，分析库坝在两种不同水位骤升情况下渗流场的变化规律及其对水库堤坝稳定性的影响。为了描述渗流场的变化对应力场带来的影响，首先在 Seep 程序中建立水库堤坝的外观模型、水-土特征参数以及两种不同形式的水位边界条件的历时曲线图，对渗流场时间离散进行非稳态渗流分析，得到各个不同时间段下的渗流场水头分布；然后将渗流场中的水头值输入到边坡稳定分析 Slope 模块中，采用 Morgenstern-Price 条分法计算各个时段下堤坝的稳定性系数。

在有限元计算过程中，单元水头值是结合 Seep 和 Slope 两大模块进行处理的。首先将 Seep 模块中

的水库模型及有限元网格引入到 Slope 模块中，然后在网格模型上输入土性参数、选择滑动面的方法、确定土体的条分数目。在每一个潜在的滑动面上找出各土条的底面中心点及其所在的土体单元。利用 Seep 模块传递给 Slope 模块的所有节点水头信息，找到各土条底面中点在其单元中的相对坐标及其相应的插值函数矩阵，从而利用以下方程计算出底面中心点处的水头值^[8]，即

$$h = \langle N \rangle \{ H \} \tag{14}$$

式中： h 为局部坐标下的水头 (m)； $\langle N \rangle$ 为插值函数向量； $\{ H \}$ 为节点处的水头向量。

这样，就将动态的渗流场与极限平衡分析结合起来。

3.1 模型的建立及土性参数的选取

本算例中，假设库区堤坝剖面外形尺寸如图 1 所示，分两层土考虑，坝身采用填土，坝基采用砂壤土。选取的土性参数如表 1 所示。

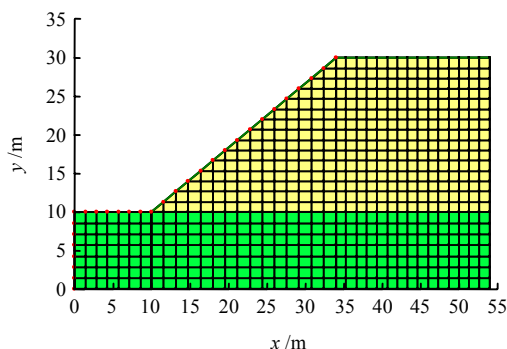


图 1 水库堤坝剖面图 (单位: m)
Fig.1 Section of the reservoir dam (unit: m)

表 1 堤坝土性基本参数

Table 1 Basic Soil-parameters of the Embankment

土层	饱和渗透系数 $k_{sat} / 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	孔隙率 n	重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	固结排水剪凝聚力 c_d / kPa	固结排水剪内摩擦角 $\phi_d / (^\circ)$
填土	3.38	0.38	18.1	27	27.4
砂壤土	5.92	0.45	18.64	24	28.1

为简单起见，计算中对所定义的模型共划分了 604 个单元，库水位上升过程可以作为坝坡的水头边界条件施加于计算模型上。设定两种水位变化情况如图 2 所示，分别为水头以 0.25 m/h 以及 0.5 m/h 的涨速从库底均匀上升至 25 m 水位的过程。

库水位上升对堤坝的直接影响就是使堤坝中渗流场随着时间的改变而发生相应的变化。分析中考虑了非饱和土渗透系数随基质吸力而发生变化的特性，利用 Fredlund 和 Xing 法对非饱和部分进行估

值。非饱和状态下两种土质的渗透系数随基质吸力的变化曲线如图 3 所示。

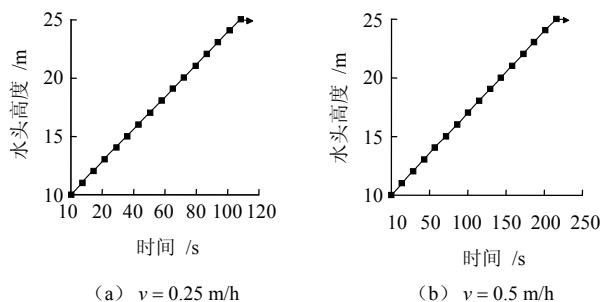


图 2 水位历时曲线图
Fig.2 Curves of the water level variation

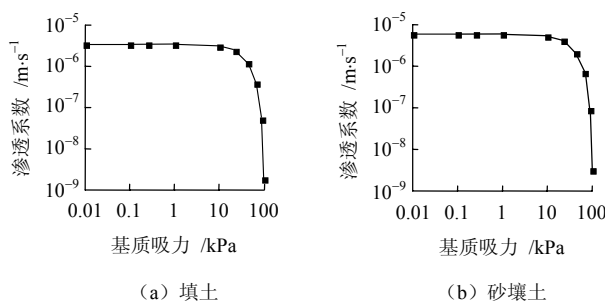


图 3 渗透系数与基质吸力关系曲线
Fig.3 Curves of the relationship between permeability coefficients and matric suction

为进一步说明饱和-非饱和土坡渗流场中渗透系数的变化规律，又计算了由 Fredlund 和 Xing 法定义的土渗透系数在某一时刻的等值线图，如图 4 所示。可见，浸润线以下土体的渗流计算可以采用饱和土渗流理论。浸润线以上土体则处于非饱和状态，其内部因负水压力的影响会改变这部分土体的渗透系数。计算时采用各向同性土体，即 $k_x = k_y$ 。

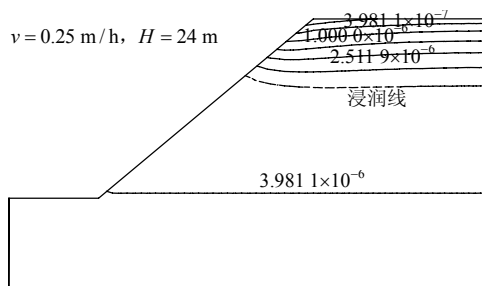


图 4 堤坝渗透系数等值线图 (单位: m/s)
Fig.4 Contour map of permeability coefficients of the embankment (unit: m/s)

3.2 渗流场计算结果及分析

本文对堤坝中渗流场的变化情况分两种情况进行讨论。图 5 (a)、图 5 (b) 分别表示了水位以

0.25 m/h 骤升时，库水位 H 处于 15 m 以及 25 m 处的堤坝内水压力等值线图。由图可见，当水位以恒定速率上涨时，不同水位下土体中的应力分布有较显著的差异。随着水位的上升，靠近坝坡侧的浸润线随之上升，其抬升趋势在堤坝深处有所减缓。因此，水位骤升过程中所导致的渗流场的变化主要发生在坝坡侧，而远离坝坡的土体，其渗流场的改变总要滞后一些。对于稳定渗流，计算结果表明，水库周围渗流场渐趋于一致。

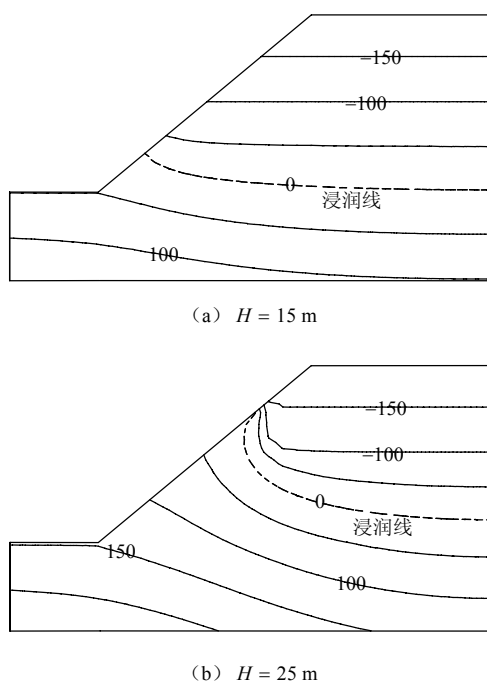


图 5 $v=0.25$ m/h 时堤坝水压力等值线图 (单位: kPa)
Fig.5 Contour map of pressures at the velocity $v=0.25$ m/h (unit: kPa)

图 6 (a)、图 6 (b) 分别表示了库水位以不同速度骤升时，水位处于同一水位线 20 m 处的水压力等值线图。

从图中可以看出，当水位上升速度不同时，同一水位线下土体中的水压力分布也不同，但其变化幅值不如上述情况显著，水位骤升速率的大小仅对坝坡处浸润线附近区域土体渗流场产生影响，而远离这一区域的土体，无论哪种情况下的渗流场变化曲线均相似。

3.3 堤坝稳定性分析结果

为了更直观地认识固-液耦合的机制及渗流对边坡稳定性的影响，进一步把计算出的渗流场引入对该堤坝边坡的稳定性分析过程中。按照极限平衡原理，同时把渗流产生的水压力作为单元节点平衡力，采用 Morgenstern-Price 条分法对不同水位、不

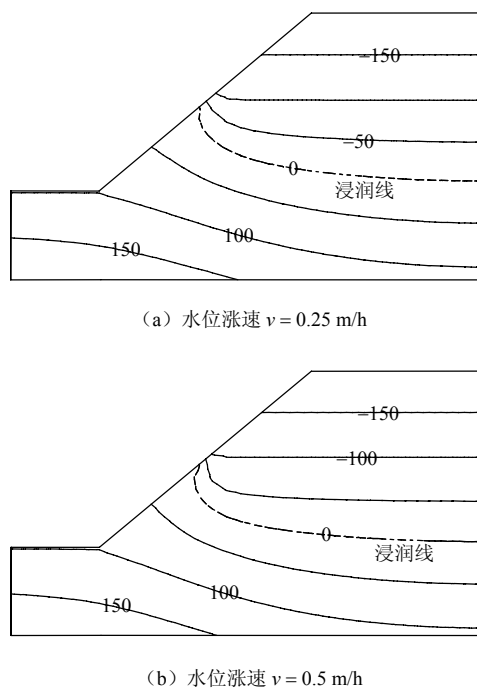


图 6 $H=20$ m 时堤坝水压力等值线图 (单位: kPa)
Fig.6 Contour map of pressures at the water-line $H=20$ m (unit: kPa)

同上涨速率下分时段计算出可能产生滑坡的最小安全系数。计算中，可事先确定滑坡面上、下沿的大致范围，通过 Slope-W 程序自动搜索功能找出安全系数最小的滑裂面即可。图 7 为水位骤升速率 $v=0.25$ m/h，库水位处于 20 m 时计算得到的最危险滑裂面，其最小安全系数为 1.729。

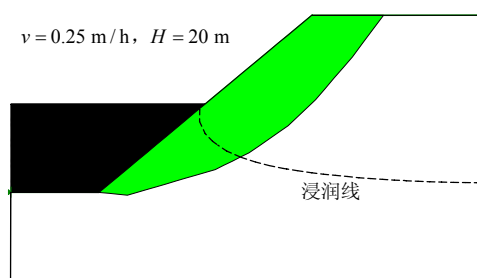


图 7 堤坝最危险滑裂面
Fig.7 Critical circular failure surface of the embankment

将相同骤升速率时不同水位下，以及相同水位下不同骤升速率时计算得到的最危险滑裂面对应的最小安全系数整理于图 8 中，可以得到最小安全系数随着水位、水位骤升速率的关系。由图中可见，同一水位骤升速率下，堤坝最小安全系数随水位的抬升有较明显的增大趋势。这是因为高水位对坡面有垂直于坡面的压应力，水位越高，越有利于滑块体的力系平衡，从而越有利于坡面的稳定。因此，滑坡的产生一般发生在水位下降期间。值得注意的

是,在本文的算例中,当水位上升至18 m附近时,最小安全系数有所下降,随后又继续增大。这说明水位上升期间库区存在一个最不利水位线,实际水利工程中应结合工程地质状况,找出这一水位范围从而尽量避免滑坡的产生。

对于水位以不同速率骤升的情况,同一水位线下的最小安全系数随上升速率的增加略有提高。这表明土坡在水位骤升过程中水位上升速率大的坡体要稳定一些。

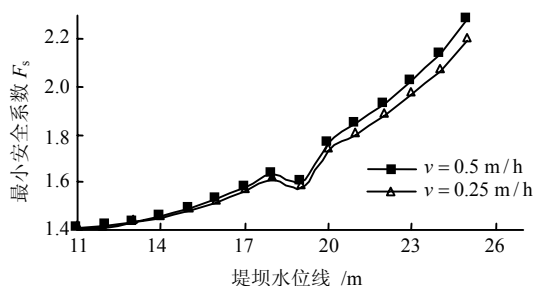


图8 最小安全系数比较结果图

Fig.8 Comparative result among the the minimum safety factors

4 结 论

本文研究了饱和-非饱和库区堤坝渗流场在水位骤升情况下的变化规律。从不同的水位骤升速率、同一骤升速率下的不同水位两个方面分别计算了其渗流场的水压力等值线,分析和比较了两种情况对堤坝渗流场的影响,基于本文算例得到如下结论:

(1) 当水位以恒定速率上涨时,不同水位下土体中的水压力分布有较为显著的变化。随着水位的上升,靠近坝坡侧的浸润线也随之上升,其抬升趋势在堤坝深处有所减缓。

(2) 水位涨速不同时,同一水位线下土体中的应力分布变化较小。

(3) 堤坝随着库水位的抬升,其最小安全系数总体上呈增大的趋势,表明水位越高,坝坡越趋于稳定。

(4) 提出库区在水位升降期间因不稳定渗流而存在一危险水位区的概念,以期对工程建设以指导意义。

本文只做了库水位骤升对坝坡稳定性影响的部

分工作,考虑了在库水位上涨过程中,非饱和土体的渗透系数与渗流场中基质吸力和库水位的上涨速度与边坡稳定性变化之间的关系,还应进一步考虑一些复杂因素,如:水库坝坡的斜率、滑坡体的形状、土体的渗透系数为非均质等。

参 考 文 献

- [1] 吴宏伟,陈守义,庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1-14.
NG WANG WAI CHARLES, CHEN Shou-yi, PANG Yue-wai. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(1): 1-14.
- [2] 张文杰,陈云敏,凌道盛. 库岸边坡渗流及稳定性分析[J]. 水利学报, 2005, 23(12): 1 510-1 516.
ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-min, LING Dao-sheng. Seepage and stability analysis of bank slopes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 23(12): 1 510-1 516.
- [3] 吴俊杰,王成华,李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732-736.
WU Jun-jie, WANG Cheng-hua, LI Guang-xin. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(5): 732-736.
- [4] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994.
- [5] 张伟. 渗流场及其与应力场的耦合分析和工程应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [6] FREDLUND D G, RAHARDJO. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, INC. 1993.
- [7] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28: 185-208.
- [8] 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): 3 454-3 458.
LIAO Hong-jian, SHEN Qian, GAO Shi-hang, et al. Influence of drawdown of reservoir water lever on landslide stability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 3 454-3 458.