

库水位回落条件下土石坝边坡稳定分析

岳庆河^{1,2}, 刘福胜¹

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 烟台市大沽夹河管理处, 山东 烟台 264000)

摘要: 利用二次开发的有限元软件 ANSYS, 形成渗流与边坡稳定分析程序模块, 计算得到库水位回落条件下的土石坝渗流场; 据此分析非饱和土强度、土体密度随含水量变化的关系及渗透力作用; 利用强度折减有限元技术分析了水位降落过程中渗透系数、水位降速对边坡稳定性的影响。结果表明, 库水位降落初期, 坝内浸润线下降, 下游坝坡稳定性增大, 但此时上游坝坡稳定性仍大于下游坡; 饱和渗透系数相同时, 库水位降落速度越大则上游坝坡稳定性越差, 不同水位降落速度对较小饱和渗透系数的土石坝渗流场及边坡稳定性影响程度较小, 对较大渗透系数的坝体则影响较大; 水位下降速度相同, 则坝体饱和渗透系数越小其上游边坡稳定安全系数越小。

关键词: 非稳定渗流; 非饱和土强度; 水位降速; 边坡稳定; 强度折减有限元; ANSYS

中图分类号: TU413.62

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)03-0081-05

Slope stability analysis of earth-rock fill dams

YUE Qing-he^{1,2}, LIU Fu-sheng¹

(1. *Civil Engineering and Water Conservancy College of Shandong Agriculture University, Tai'an 271018, China;*
2. *Administrative Section for Dagujia River of Yantai, Yantai 264000, China*)

Abstract: Using format program model for seepage and slope stability obtained from secondary developing finite element software ANSYS, calculations of the seepage field of the earth-rockfill dam under reservoir water level falling have been carried out. Analyses of fluctuation relations between unsaturated soil, soil mass density and change in water content, and the seepage pressure are then made on the basis of calculation. And with strength reduction finite element method analyses of influence of permeability coefficient and the falling rate of water level on slope stability are also made in this study. The results show that when the seepage line declines, the slope stability increases, but the upstream slope stability is still better than that of downstream slope stability during the initial stage of the falling of reservoir water level. When the saturated infiltration coefficients are the same, the greater the falling rate of reservoir water level is, the poorer the slope stability is. Different falling rates of water level make less influence on the earth-rock fill dam's seepage field with smaller saturated permeability coefficients and the slope stability and make more influence on dam body with greater permeability coefficients. If the falling rates of water level are the same, the less the saturated coefficients are, the less the safety factors of upstream slopes are.

收稿日期: 2007-08-17

作者简介: 岳庆河(1981-),男,山东章丘人,硕士,主要从事水工结构方面的研究。E-mail: num.0@163.com

Key words: unsteady seepage; unsaturated soil intensity; falling rate of water level; slope stability; strength reduction FEM; ANSYS

库水位回落是土石坝运行过程中的一种不利工况,多数坝体滑坡都与此有关.堤坝上游水位骤降时,因堤坝内水不能及时排出,导致坝内浸润线高于上游水位,上游坡内形成倒流,不利坝坡稳定.本文利用通用有限元分析软件 ANSYS,采用 APDL 语言对其二次开发来实现渗流场的模拟及边坡稳定分析.

1 非稳定饱和—非饱和渗流场数值模拟

使用有限元软件 ANSYS 热模块进行渗流场分析已有较多研究成果^[1-3],但主要限制在稳定渗流或有压非稳定渗流方面,对于存在自由面的非稳定渗流却少有研究.

1.1 温度场与渗流场的相似性分析

将非饱和区渗透系数看作是孔隙水压力的函数,则不考虑土骨架变形及水压缩性时,非稳定饱和—非饱和渗流微分控制方程为^[4]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right) = (C(h) + \alpha S_s) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $k_x(h)$ 、 $k_y(h)$ 为非饱和土渗透系数; H 为总水头; $C = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ 为容水度, θ 为介质含水率; S_s 为储水率; α 在饱和区取1,非饱和区取0.

假设物体中无内热源,根据能量守恒原理导出以温度 T 为控制变量的瞬态热传导微分方程为^[5]

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y^2} = \rho c' \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: λ_x 和 λ_y 分别为 x 、 y 方向的热传导系数; ρ 为介质密度; c' 为比热系数.

渗流场中第一类边界条件为边界上给定位势函数或水头分布,或称水头边界条件, $h|_{\Gamma_1} = f_1(x, y, t)$;对应于热传导中的定温度边界, $T|_{\Gamma_1} = g_1(x, y, t)$.

渗流场中第二类边界条件为边界上给出位势函数或水头的法向导数,或称流量边界条件, $\left. \frac{\partial h}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = -v_n/k = f_2(x, y, t)$;对应于热传导中的定热流密度边界, $\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = -v_n/\lambda = g_2(x, y, t)$.

非稳定渗流场初始条件, $H(x, y, t_0) = H_0(x, y, t_0)$;对应于热传导中初始温度场分布, $T(x, y, t_0) = T_0(x, y, t_0)$.

通过以上比较可见,渗流微分方程与热传导微分方程形式完全相同,参数及边界条件相互对应,这就为应用 ANSYS 热模块进行渗流场分析奠定了基础.

表1 渗流与热传导相关参数对照

Tab. 1 Comparison between seepage and heat exchange parameters

渗流			热传导		
项目	符号	单位	项目	符号	单位
水头	h_w	m	温度	T	°C
水量	V	m ³	热量	W	J
水流量	Q_w	m ³ /s	热流量	Q	J/S
水流速度	v	m/s	热流密度	q	W/m ²
渗透系数	$K(h)$	m/s	导热系数	λ	W/(m·°C)
比水容度	C	l/m	比热系数×密度	$\rho c'$	J/(m ³ ·°C)

1.2 非稳定饱和—非饱和渗流程序结构

非饱和土渗流属非线性问题,饱和、渗透系数、逸出面范围等只能在计算过程中迭代确定.迭代可分3层进行^[6]:最内层迭代确定渗流参数,该层迭代中边界条件及时间步长不变,渗流参数根据单元孔隙水压力不断调整,直到前后两次计算各单元孔压满足要求;次外层迭代确定渗流逸出面边界,该层迭代时间步长不变,根据内层的计算结果调整逸出面边界范围,直至迭代收敛;最外层迭代调整时间步长,只有相邻时间步长间的水头差在允许范围之内时,才进行下一时间步长计算,否则此步计算结果作废,更改时间步长重新计算.

2 边坡稳定分析

传统的极限平衡法以极限平衡理论为基础进行稳定性分析,没有考虑土体内部的应力应变关系,无法分析边坡破坏的发生和发展过程,对于堤坝渗流作用只能以容重分区作替代,在求安全系数时通常需要假定滑裂面形状为折线、圆弧、对数螺旋线等.而强度折减有限单元法正好克服了上述缺陷,不但能够满足力的平衡条件,而且考虑了材料的应力应变关系,使得计算结果更加精确合理^[7,8].

2.1 强度折减有限元

对于摩尔-库仑材料,强度折减安全系数可表示为

$$\tau' = \frac{\tau}{f_s} = \frac{c'}{f_s} + \frac{\tan\varphi'}{f_s} \quad (3)$$

不断调整 f_s 值,直到达到破坏临界值,即得边坡的安全系数.

对于非饱和土,根据 Fredlund 的双应力变量理论^[9]得非饱和土抗剪强度为

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

将由于基质吸力增加的抗剪强度部分 $(u_a - u_w)\tan\varphi^b$ 合并入粘聚力构成非饱和土的广义凝聚力 $c'' = c' + (u_a - u_w)\tan\varphi^b$ 进行折减即可.(4)式中 φ^b 表示由于基质吸力增加引起抗剪强度增加的吸力摩擦角; $u_a - u_w$ 为基质吸力,一般情况下考虑孔隙气体处于大气压下,即取 $u_a = 0$.

2.2 非稳定渗流作用下边坡稳定分析程序

边坡稳定计算是在渗流计算的基础上进行的,在 ANSYS 中首先需要将热单元转变为结构单元.根据强度折减有限元原理,结合优化法寻找临界安全系数.材料屈服准则使用 ANSYS 程序中的 DP 准则,考虑等向硬化,选用相关流动法则.由压力水头梯度求得渗透力^[10],然后将力施加在结点上,较极限平衡法分析时以容重分区考虑渗流作用更合理.对于不同含水率的土壤,根据其含水率大小,对单元赋予不同的密度.同时,非饱和区土体也要根据含水率(或基质吸力、负压)大小,确定其非饱和土强度特性值.本文以规定迭代次数内有限元计算不收敛作为边坡失稳的判据,迭代次数的选择关系到计算的精度与计算时间,文中选用迭代次数为30次.

确定边坡临界安全系数 f_s 值时使用二分法进行搜索.首先给定安全系数的范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$,第 i 次计算时令中间变量 $f_s^i = (f_{\min} + f_{\max})/2$ 作为第 i 次的计算时使用的折减系数.如果计算收敛则将搜索范围缩小为 $[f_s^i, f_{\max}]$,计算不收敛时则将搜索范围缩小为 $[f_{\min}, f_s^i]$,当前后两次计算所得中间变量的差值 $\Delta = f_s^i - f_s^{i-1} < \varepsilon$ (ε 为设定的收敛容差)时程序自动退出循环,即得边坡稳定安全系数 $f_s = (f_s^i + f_s^{i-1})/2$.

3 算例

分析一均质土坝,坝体高50 m,顶宽10 m,上下游坡比均为1:2,下游设水平褥垫式排水伸入坝内70 m,土体有效应力指标 $c' = 17$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$, $\varphi_b = 25^\circ$,孔隙率 $n = 0.44$,饱和密度 $\gamma_{sat} = 2000$ kg/m³,则非饱和土密度在1560~2000 kg/m³之间,非饱和土的土水特性见表2.取上游水位45 m、下游水位为0 m时的稳定渗流场为初态,经一定时间上游水位降至5 m.为研究饱和渗透系数及库水位降速对渗流场与边坡稳定性

的影响,取以下2种工况组合进行分析:库水位降速 v 取 1 m/d,饱和渗透系数 k_x 分别取 5×10^{-8} m/s、 5×10^{-7} m/s、 5×10^{-6} m/s;饱和渗透系数 k_x 取 5×10^{-6} m/s,库水位降速 v 分别取 0.5,1 和 2 m/d.

表2 土体材料的渗流特性

Tab.2 Seepage properties of the soil

饱和度	吸力/ kPa	相对渗透系数 k_r
1	0	1
0.989 2	21.19	9.80×10^{-1}
0.976 3	31.00	9.10×10^{-1}
0.939 6	39.44	4.80×10^{-1}
0.631 5	47.87	1.00×10^{-1}
0.528 0	51.31	6.00×10^{-2}
0.379 3	61.12	1.00×10^{-2}
0.286 6	72.89	2.00×10^{-3}
0.212 5	92.02	2.00×10^{-4}
0.177 6	115.07	2.00×10^{-5}
0.154 7	138.12	3.00×10^{-6}

各工况水位降至最低时的水压力分布见图1,其中0压线即为浸润线.得到孔隙水压力分布后,即可计算非饱和土强度、渗透力等,进而进行边坡稳定分析;图2为某时刻边坡失稳时的塑性区图,由此即可看出滑坡位置;图3给出了相同渗透系数下库水位3种不同降速对边坡稳定的影响;图4给出相同库水位降速时不同饱和渗透系数坝体的稳定性.

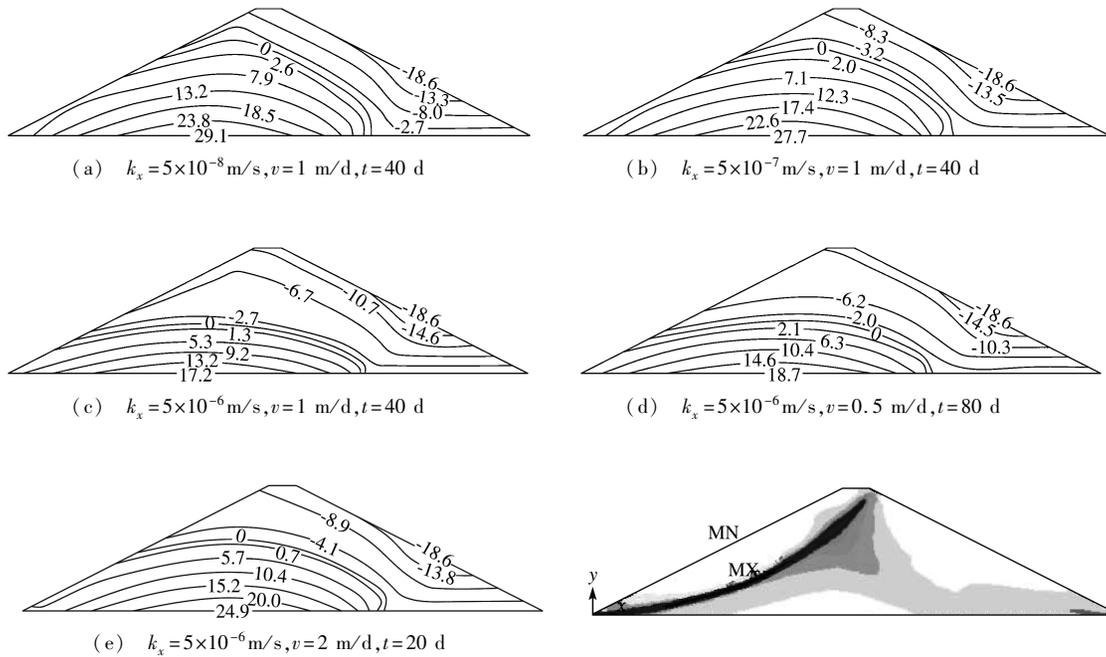


图1 各工况下水压力分布

Fig.1 Pore pressure distribution under different working conditions

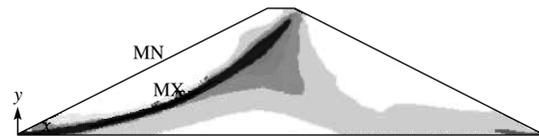


图2 边坡失稳时的塑性区图

Fig.2 Plastic strain at slope losing stability

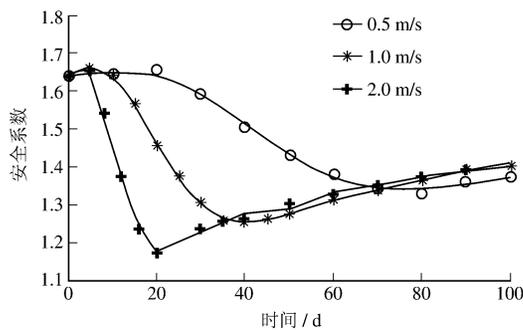


图3 库水位降速对边坡稳定安全系数的影响

Fig. 3 Stability factors of slope affected by falling rate of reservoir water level

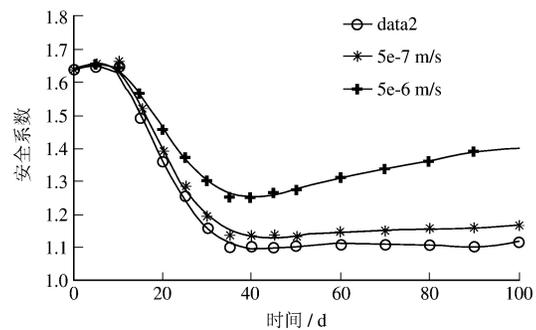


图4 渗透系数对边坡稳定安全系数的影响

Fig. 4 Stability factors of slope affected by infiltration coefficients

4 结 语

(1) 库水位降落初期, 坝体整体安全系数稍有增加. 这是因为库水位降落的初始条件为上游水位最高时的稳定渗流场, 此时下游坝稳定性小于上游坡, 坝体整体稳定性由下游坡控制. 库水位降落初期, 坝内浸润线下降, 下游坝坡稳定性增大, 但此时上游坝坡稳定性仍大于下游坡;

(2) 饱和渗透系数相同时, 库水位降落速度越大则上游坝坡稳定性越差. 水位降落速度对较小饱和渗透系数 ($k_x = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 、 $k_x = 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$) 的土石坝渗流场及边坡稳定性影响较小; 对较大渗透系数 ($k_x = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) 的坝体则影响较大, 水位降落速度快时得到的安全系数明显减小. 这是由于较小渗透系数情况下, 坝体浸润线滞后库水位回落速度明显, 孔隙水压力分布图也表明坝内超孔隙水压力消散极为缓慢, 已不能体现出库水位降速对边坡的稳定性影响; 而渗透系数较大时, 库水位降速对坝内超孔隙水压力消散影响显著, 进而显著影响边坡稳定性;

(3) 相同库水位降速, 则饱和渗透系数越小, 上游边坡稳定安全系数越小. 这是因为渗透系数越小坝内超孔隙水消散就越慢, 坝内浸润线就越高, 产生的向上游坝外方向的渗透力也就越大. 因此, 为了加大上游坝坡的稳定性, 应在上游坝内设置排水设施;

(4) 通过对大型通用有限元分析软件 ANSYS 的二次开发, 得到了渗流分析与边坡稳定分析程序, 利用了商业软件前、后处理的优越性能, 避免了重复编制有限元程序的繁琐, 可以方便地完成非稳定渗流作用下的边坡稳定分析.

参 考 文 献:

- [1] 许玉景, 孙克俐, 黄福才. ANSYS 软件在土坝稳定渗流计算中的应用[J]. 水力发电, 2003, 29(4): 69-71.
- [2] 罗启北, 郝方, 肖良锦, 等. ANSYS 在渗流场动态分析中的应用[J]. 贵州水力发电, 2005, 19(1): 68-71.
- [3] 戚蓝, 黄君宝, 黄晓东. ANSYS 软件在有垂直防渗墙的堤坝及地基渗流计算中的应用[J]. 长沙交通学院学报, 2005, 21(3): 48-51.
- [4] 薛禹群, 朱学愈. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [5] 章熙民. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] 岳庆河, 刘福胜, 刘佩玺. 基于 ANSYS 模拟非稳定饱和-非饱和渗流场[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 76-80.
- [7] 郑颖人, 赵尚毅, 宋雅坤. 有限元强度折减法研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2005, (3): 1-6.
- [8] 郑颖人. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57-61.
- [9] Fredlund DG, Rahardio H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐等译, 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [10] 毛熙震, 李吉庆, 段祥宝. 渗流作用下土坡圆弧滑动有限元计算[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 726-752.