

# 基于非饱和土理论的土石坝坝坡稳定分析

汪璐, 杨杰, 任杰, 马婧

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**在对非饱和土特性及其对坝体材料强度的影响机理研究的基础上,结合实际工程,依托 Geo-studio 软件,比较仅考虑饱和土及考虑非饱和土对坝体渗流及稳定的影响。结果表明:考虑非饱和土情况下计算的最大渗透比降相对较小,坝体渗流量有所减少,坝坡稳定安全系数有所增大,更符合坝体实际情况。与此同时,在考虑非饱和土情况下,运用极限平衡法,对影响坝坡稳定安全系数的因素进行比较分析,表明摩擦角及容重对安全系数的影响比粘聚力大;防渗墙向前后移动对下游坝坡有一定的影响。研究结果可为土石坝优化设计及工程运行管理提供科学依据。

**关键词:**非饱和土; 基质吸力; 极限平衡法; 安全系数; 坝坡稳定分析

中图分类号:TV641

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)04-0206-05

## Analysis of slope stability of earth rock dam based on theory of unsaturated soil

WANG Lu, YANG Jie, REN Jie, MA Jing

(Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Based on the research of properties of unsaturated soil and its mechanism effect on dam material strength, the paper combined the actual project and relied on geo-studio software to compare the influence of saturated soil and unsaturated soil on seepage and stability of dam body. The result showed that in the case of unsaturated soil, the calculated maximum penetration rate is relatively small, the seepage discharge of dam decreases, the safety factor of slope stability increases, which is more in line with the actual situation of dam. At the same time, in the condition of unsaturated soil, it used limit equilibrium method to compare and analyze the factors affecting slope stability. The impact of friction angle and bulk density on safety factor is larger than that of cohesion; the movement of impervious wall forth and back has a certain impact on downstream slope. The results can provide scientific basis for the optimum design of dam and the operation and management of engineering.

**Key words:** unsaturated soil; matric suction; limit equilibrium method; safety factor; slope stability analysis of earth rock dam

## 1 研究背景

由于国内对于非饱和土的研究起步较晚,因此目前常规的渗流分析中,主要考虑饱和区内水的渗流,而研究表明<sup>[1]</sup>,非饱和区不但存在连续渗流,而且对于土体抗剪强度也有影响,饱和土和非饱和土在工程性状和性质上存在很大差异。非饱和土具有多于两相的组成,其孔隙水压力相对于孔隙气压力而言是负值<sup>[2]</sup>。因此,仅考虑饱和渗流对大坝影响很大,需要将非饱和渗流的有限元法渐渐应用到土石坝渗流分

析中。同时,进行坝坡稳定分析时,影响其安全系数大小的因子很多<sup>[3~5]</sup>,包括坝体材料的粘聚力、内摩擦角、渗透系数 $k$ 、给水度、坝坡坡率 $m$ 、水位降落幅度 $H'/H$ 及水位降落速度 $v$ 等,由于在国内大规模实施的土石坝工程建设中,混凝土防渗墙位置是否对坝坡稳定产生影响的研究较少,工程设计上也很少考虑。本文依托 Geo-studio 软件,运用极限平衡法,对上述各个因素对上下游坝坡稳定安全系数变化情况进行比较分析,探讨其影响机理和规律,本文的研究结果对大坝的设计应用及工程运行管理有很大的帮助。

收稿日期:2015-05-20; 修回日期:2015-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51309189)

作者简介:汪璐(1990-),女,陕西延安人,在读研究生,主要研究方向:水工结构。

通讯作者:杨杰(1971-),男,四川大邑人,博士,教授,主要从事水工结构、水利工程安全监测及风险分析研究。

## 2 计算原理及其参数选择

### 2.1 非饱和土渗流基本方程

1931年, Richards 对达西定律的范围进行扩展, 用其表达非饱和土中水的运动规律。即非饱和土中的水流通量与土水势梯度成正比, 该比例系数称为导水率, 与渗透系数类似<sup>[6]</sup>, 如下式(1)所示:

$$q = v = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

式中:  $q$  为非饱和土中水流通量, m/s;  $v$  为平均流速, m/s;  $H$  为总水头, m;  $H = y + \psi_w$ ;  $y$  为位置势(重力势);  $\psi_w$  为基质势;  $\frac{\partial H}{\partial x}$  为土水势梯度; 土水势以水头表示, 导水率  $k$  不是一个常数, 它与体积含水率  $\theta$  有关。

### 2.2 非饱和土参数的选择

土水特征曲线及非饱和渗透系数为非饱和土两个重要的参数, 一般采用间接法获得, 即在少量实验数据的基础上建立模型对土水特征曲线进行拟合与预测<sup>[7]</sup>。常见的土水特征曲线模型包括多项式模型(DXS模型)、Fredlund 和 Xing 模型(F-X模型)及 Van Genuchten 模型(VG模型); 常见的非饱和渗透系数模型包括 Brooks 和 Corey 模型(B-C模型)、Gardner 模型、Van Genuchten 模型(VG模型)。本文土水特征曲线模型采用多项式模型(DXS模型), 非饱和渗透系数模型采用 Van Genuchten 模型。

### 2.3 坝坡稳定分析理论

进行坝坡稳定分析的方法主要有极限平衡法、强度折减法等。由于极限平衡法对分析二维土坝稳定性较为成熟, 因此本文采用极限平衡法。为了确定沿滑裂面的应力分布, 需要将滑裂土体分成若干垂直土条, 通过分析作用于土条上的力来建立平衡方程。土体稳定的安全系数表达式见下式(2):

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (2)$$

式中:  $\tau_f$  为沿着整个土体滑裂面的抗剪强度, Pa;  $\tau_m$  为沿着整个滑裂面的实际剪应力, Pa。

对于非饱和土而言, 其含水量的变化引起土体强度的变化<sup>[8-9]</sup>。Fredlund 等针对非饱和土的抗剪强度提出下列相互独立的双应力变量公式, 见下式(3):

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (3)$$

式中:  $\tau_f$  为非饱和土抗剪强度, Pa;  $c'$  为有效黏聚力, Pa;  $\phi'$  为非饱和土体的内摩擦角;  $(\sigma - u_a)$  为非饱和土体的有效应力, Pa;  $u_a$  为孔隙气压力, Pa;  $(u_a - u_w)$  为基质吸力, Pa;  $\phi^b$  为基质吸力摩擦角, 当土接近饱和时, 基质吸力趋于零,  $\phi^b$  趋近于  $\phi'$ 。

而同时,  $\tan \phi^b$  体现了基质吸力  $(u_a - u_w)$  对土体抗剪强度产生贡献的实际情况, 即抗剪强度随基质吸力  $(u_a - u_w)$  增加而增加的速率。基质吸力会转化为土样的一种“假黏聚力”, 并以这种形式来增强土体的强度<sup>[8,10]</sup>。该公式对非饱和土抗剪强度的主要构成形式进行了本质性的描述, 其所蕴含的观点也得到了业内的广泛认同。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

某工程大坝为均质土坝, 坝顶高程 1 211.0 m, 坝高 20.5 m, 为 4 级建筑物, 工程区地震烈度为 VI 度。上游坡比为 1:3, 在死水位下 1.5 m 处设宽 1.5 m 的马道; 下游排水棱体顶高程 1 193.00 m, 顶宽 1.5 m, 其上坡比为 1:2.5, 其下坡比为 1:1.5, 在 1 203.00 m 处设宽 2.0 m 的马道。为恢复交通需要在坝顶上部设交通道路, 路面高程为 1 218.00 m, 路面宽 7 m, 上下游坡比均为 1:2。

表 1 给出了坝体不同部位计算参数的取值。

### 3.2 建模计算

本文采用 Geo-studio 软件进行建模分析, 上下游及坝基以下均取 1.5 倍的坝高, 边界条件如图 1 所示, 其中上下游为定水头边界, 下游坝坡为自由溢出面, 其余为不透水边界。模型共剖分 3093 节点、3028 个单元。该大坝最大横剖面计算模型网格剖面图如下图 1 所示。

表 1 模型计算参数

分区	坝体填土		排水 棱体	坝基下部壤土		坝基上 部岩层	坝基中 部岩层	坝基下 部岩层	灌浆
	$K_h$	$K_v$		$K_h$	$K_v$				
渗透系数 $K_{sat} / (m \cdot s^{-1})$	$3.16 \times 10^{-7}$	$1.22 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-4}$	$5.62 \times 10^{-6}$	$5.73 \times 10^{-6}$	$8.4 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-8}$
容重 / $(kN \cdot m^{-3})$	20.10		23.90	19.30		23.80	23.80	23.80	23.80
粘聚力 / kPa	19		0	9		600	600	600	600
内摩擦角 / $(^\circ)$	29		35	21		35	35	35	35
吸力内摩擦角 / $(^\circ)$	14		0	0		0	0	0	0

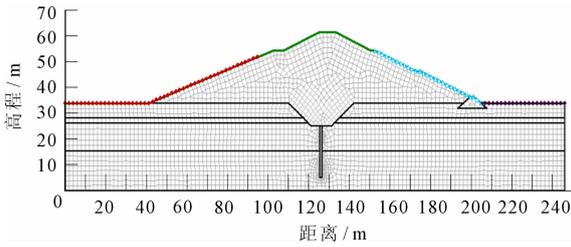


图1 计算模型网格划分图

3.2.1 比较考虑饱和-非饱和与仅考虑饱和的区别 现就分别对两种工况仅考虑饱和土及考虑饱和

-非饱和土的模型范围的渗流及坝坡稳定性进行计算分析,具体计算结果见表2所示。

通过以上计算对比,考虑非饱和土情况下计算的最大渗透比降相对较小,坝体渗流量有所减少。由于非饱和土中基质吸力越大,水流渗透系数越少,渗流难度越大。同时,基质吸力会转化为“额外”的黏聚力,增加非饱和区的土体强度参数,进而增大坝体的抗滑力,坝坡稳定安全系数也相应增加。比较对上下游坝坡的影响,发现其对下游坝坡稳定安全系数影响相对较大。

表2 大坝计算结果汇总表(考虑饱和及饱和-非饱和比较)

工况	上游水位/m	下游水位/m	坝体出逸点处计算最大渗透比降	单宽渗流量/ ( $m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )	坝坡稳定安全系数(上游/下游)	备注
正常蓄水位	51.69	34.10	0.78	$4.53 \times 10^{-6}$	2.126/1.471	饱和
			0.47	$4.07 \times 10^{-6}$	2.188/1.613	非饱和
死水位	43.32	34.00	0.31	$1.96 \times 10^{-6}$	1.841/1.508	饱和
			0.11	$1.68 \times 10^{-6}$	1.863/1.751	非饱和

3.2.2 考虑坝坡稳定影响因子 影响坝坡稳定的因子很多,上游的坝坡稳定与坝体材料的粘聚力、内摩擦角、渗透系数  $k$ 、给水度、坝坡坡率  $m$ 、水位降落幅度  $H'/H$ 、防渗墙位置及水位降落速度  $v$  等因素相关。假设水位是瞬时骤降,坝体内自由水面线未发生变化,不考虑水位降落过程中坝体内的非稳定渗流对坝坡稳定的影响,即水位骤降后的坝坡稳定与水位降落速度  $v$ 、渗透系数  $k$  及给水度等这3个因素无关。

根据上文分析,参考相关文献[11],最后确定水位降落幅度  $H'/H$ 、容重、粘聚力、内摩擦角及防渗墙位置为数模的试验因素,数模试验分析的目的为考察这5个因素在骤降情况下对坝坡稳定的影响程度,以坝坡稳定安全系数  $F_s$  为考察指标。

这5个因素中前4个分别记做A、B、C和D,进行了4因素的正交试验,各因素分别取4个值,具体见表3。

表3 各因素的取值范围

	A	B	C	D
水位骤降幅度 $H'/H$	容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	
0	0	20	19	29
1	0.1127	22	21	31
2	0.2817	24	23	33
3	0.5634	26	35	35

(1)水位降落幅度对坝坡稳定的影响如表4及图2所示。

表4 水位降落幅度对坝坡稳定的影响

A	B	C	D	$K_{上}$	$K_{下}$
水位骤降幅度 $H'/H$	容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )		
0	20	19	29	2.188	1.613
1	20	19	29	2.020	1.613
2	20	19	29	1.813	1.612
3	20	19	29	0.789	1.546

(2)容重对坝坡稳定的影响如下表5及图3所示。

表5 容重对坝坡稳定的影响

A	B	C	D	$K_{上}$	$K_{下}$
水位骤降幅度 $H'/H$	容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )		
0	20	19	29	2.188	1.613
1	22	19	29	2.076	1.613
2	24	19	29	1.991	1.538
3	26	19	29	1.924	1.509

(3)粘聚力对坝坡稳定的影响如下表6及图4所示。

表6 粘聚力对坝坡稳定的影响

	A	B	C	D	$K_{上}$	$K_{下}$
水位骤降幅度 $H'/H$ (kN · m <sup>-3</sup> )	容重/	粘聚力/	内摩擦	$K_{上}$	$K_{下}$	
		kPa	角/(°)			
0	0	20	19	29	2.188	1.613
1	0	20	21	29	2.213	1.626
2	0	20	23	29	2.238	1.639
3	0	20	25	29	2.263	1.651

(4)内摩擦角对坝坡稳定的影响如下表7及图5所示。

表7 内摩擦角对坝坡稳定的影响

	A	B	C	D	$K_{上}$	$K_{下}$
水位骤降幅度 $H'/H$ (kN · m <sup>-3</sup> )	容重/	粘聚力/	内摩擦	$K_{上}$	$K_{下}$	
		kPa	角/(°)			
0	0	20	19	29	2.188	1.613
1	0	20	19	31	2.264	1.662
2	0	20	19	33	2.343	1.713
3	0	20	19	35	2.425	1.765

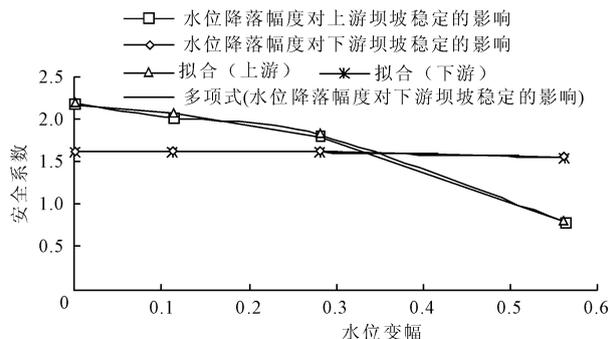


图2 水位降落幅度对安全系数的影响

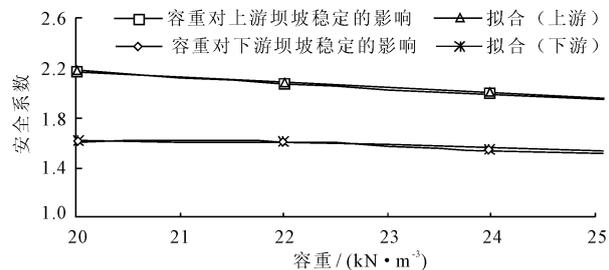


图3 容重对安全系数的影响

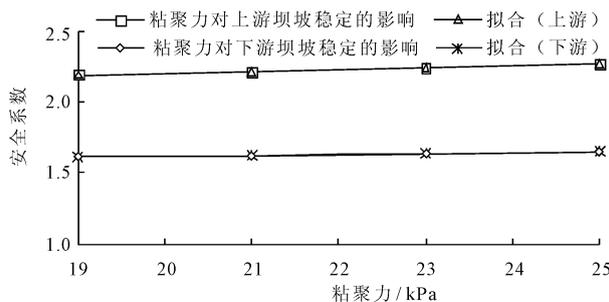


图4 粘聚力对安全系数的影响

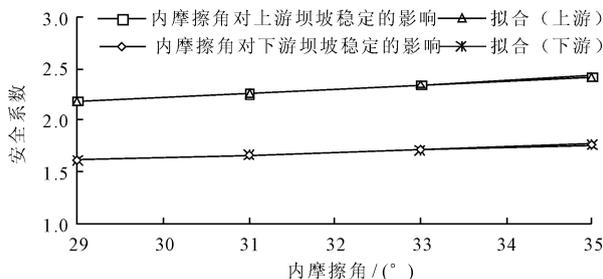


图5 内摩擦角对安全系数的影响

根据上图2~5所示,可以将水位降落幅度、容重、粘聚力、内摩擦角与安全系数的关系进行拟合,分别如下表8~11所示:

(5)水位变幅对安全系数的影响(二次曲线)

$$y = ax^2 + bx + c$$

表8 水位变幅对安全系数二次拟合结果

选用模型 (二次曲线)	拟合参数			相关系数
	a	b	c	
上游安全系数	-3.7533	-0.3069	2.1602	0.986
下游安全系数	-0.3836	0.1020	1.6109	0.971

(6)容重对安全系数的影响(二次曲线)

$$y = ax^2 + bx + c$$

表9 容重对安全系数二次拟合结果

选用模型 (二次曲线)	拟合参数			相关系数
	a	b	c	
上游安全系数		0.083	3.0533	0.988
下游安全系数	-0.0018	0.064	1.0635	0.972

(7)粘聚力对安全系数的影响(一次曲线)

$$y = ax + b$$

表10 粘聚力对安全系数二次拟合结果

选用模型 (一次曲线)	拟合参数		相关系数
	a	b	
上游安全系数	0.0125	1.9505	1
下游安全系数	0.0063	1.4926	0.999

(8)内摩擦角对安全系数的影响(一次曲线)

$$y = ax + b$$

表11 内摩擦角对安全系数二次拟合结果

选用模型 (一次曲线)	拟合参数		相关系数
	a	b	
上游安全系数	0.0395	1.0410	0.999
下游安全系数	0.02535	0.8771	1

从图2中各点分布情况可知,水位变幅对安全系数的影响近似符合二次曲线,水位降幅越大,安全

系数越小。从图3~5中各点分布情况可知,土体的粘聚力、摩擦角及容重对坝坡的安全系数的影响近似符合一次曲线,土体的粘聚力和摩擦角越大,坝体安全系数也随之增大;土体的容重越大,安全系数越小。采用 Matlab 进行拟合分析,对比表8~11可知,内摩擦角及容重对安全系数的影响比粘聚力对安全系数的影响大,且对上游坝坡安全系数的影响大于对下游坝坡的影响,同时发现,对于粘聚力和内摩擦角对于安全系数的影响采用直线拟合是合理的,上游水位降幅及容重对于安全系数的影响采用曲线拟合也是可行的。因此应注意土体参数的精确性对于稳定性分析的重要性,根据需要选取材料。

(9)防渗墙位置的不同,会影响到坝坡的稳定性。防渗墙向前移动3 m,上游坝坡稳定安全系数从2.188变成2.205,下游坝坡稳定安全系数从1.613变为1.608;防渗墙向后移动3 m,坝坡稳定安全系数从2.188变成2.205,下游坝坡稳定安全系数从1.613变为1.607。调整防渗墙的前后位置,影响浸润线的时候,坝体材料的容重等也同时发生了变化。而发现移动防渗墙位置,均可以使上游坝坡安全系数增大,下游坝坡安全系数减小,而对于稳定渗流的坝体来说,下游坝坡的安全系数作为控制条件,所以进行防渗墙位置的选取需要做详细的对比分析。

## 4 结 语

本文通过比较仅考虑饱和土及考虑饱和和非饱和对坝体渗流及稳定性的影响,并在考虑非饱和土情况下,对影响坝坡稳定的各个因素进行对比分析,得出以下结论:

(1)由于基质吸力的作用,考虑非饱和土情况下计算的最大渗透比降相对较小,坝体渗流量有所减少,更符合坝体实际情况。

(2)影响坝坡稳定安全系数的各个因素对其影响作用有所不同。水位变幅对安全系数的影响近似符合二次曲线,水位降幅越大,安全系数越小;土体的粘聚力、摩擦角及容重对坝体的安全系数的影响近似符合一次曲线,土体的粘聚力和摩擦角越大,坝体安全系数也随之增大;土体的容重越大,安全系数

越小,摩擦角及容重对安全系数的影响比粘聚力对安全系数的影响大。

(3)防渗墙位置在影响坝体渗流特性的同时,对坝坡稳定安全系数也有很大的影响。防渗墙向前后移动对上游坝坡的影响较大,对下游坝坡的影响较小。

从以上计算分析可知,进行坝体渗透计算时一定要注意土体参数的选取。而若是进行坝坡稳定计算时不满足条件,则可参照本文计算情况,调整坝体材料参数,进行调整使其满足条件。虽然本文对土石坝各个材料参数、水位变化及防渗墙位置对上下游坝坡的稳定的影响的问题进行了研究,取得了一定的研究成果,但这些研究针对特定模型进行的,有必要对其普适性作相应研究。

## 参考文献:

- [1] 郑敏生,钱镜林,苏玉杰.考虑非饱和区的土石坝渗流分析[J].水力发电学报,2011,29(1):86-92.
- [2] 凌华,殷宗泽.非饱和土强度随含水量的变化[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):208-212.
- [3] 祝小靓.流固耦合下土石坝稳定性分析研究[D].南昌:南昌大学,2011:1-82.
- [4] 张建博,杜应吉.防渗体形式对土坝除险加固工程渗流稳定的影响[J].武汉大学学报(工学版),2014,47(1):53-56.
- [5] 王武刚,姚智全,曹光栩.混凝土坝体防渗墙对坝坡稳定影响的有限元研究[J].建筑科学,2014,30(7):95-100.
- [6] 关明芳,陈洪凯.流自由面求解方法综述[J].重庆交通大学学报,2005,24(5):70-75.
- [7] 侯龙.非饱和土孔隙水作用机理及其在边坡稳定分析中的应用研究[D].重庆:重庆大学,2012:1-130.
- [8] 林鸿州,李广信,于玉贞,等.基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J].岩土力学,2007,28(9):167-172.
- [9] 刘子振,言志信,凌松耀,等.非饱和土边坡抗剪强度的力学参数影响及灵敏度分析[J].中南大学学报,2012,43(11):349-354.
- [10] 耿慧辉,吴俊阳,单仁亮,等.非饱和土强度的吸力贡献形式研究[J].岩土工程学报,2012,34(9):44-49.
- [11] 张芳枝,梁志松,周秋娟.非饱和土性状及其边坡稳定性[M].北京:中国水利水电出版社,2011.1-106.