

某土石坝加固前后渗流及坝坡稳定性对比分析

徐 宇

(江西省南昌市水利信息中心,江西 南昌 330038)

摘 要:针对某水库土石坝渗漏问题采用了“黏土斜墙+贴坡排水”的加固方案.本文对加固前后土石坝稳定渗流期和非稳定渗流期的坝体渗流及坝坡稳定性进行了分析.结果表明:与加固前相比,土石坝加固后的渗流量及渗透坡降均有所下降,上游坝坡安全系数升高,下游坝坡失稳概率大幅度降低.加固后的坝体稳定安全系数满足规范要求,说明所采用的工程加固措施是有效的、可靠的.

关键词:土石坝;饱和-非饱和渗流;坝坡稳定;安全系数;失效概率

中图分类号:TV641 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2018)06-0435-05

0 引言

土石坝是迄今为止采用最多的一种坝型,在建造过程中可就近取材,且施工工序简单,各工序间干扰少,造价较为低廉.在20世纪50~70年代,我国建造了大量土石坝.但受限于当时水利行业技术水平落后,有关标准不完善等,在经过了几十年的运行之后,残留了大量病险问题.这些病险水库不但已经难以满足灌溉、防洪和供水等效益要求,而且在大暴雨等极端条件下极易发生垮坝,这对坝体本身及下游群众而言将是毁灭性的打击.因此,对病险水库的加固与防护已刻不容缓^[1].

目前,国内外学者在土石坝渗流与坝坡稳定分析方面开展了大量的研究.如Tan^[2]等采用蒙特卡洛模拟和随机场理论研究比较了水力参数的变异系数和自相关距离对土石坝渗流量的影响;吴震宇和陈建康^[3]采用缩减方差抽样技术生成随机变量样本值、全局优化算法搜索边坡最小安全系数、Monte-Carlo法计算边坡体系可靠度三种方法建立了一种较为简便实用的高土石坝坝坡稳定体系可靠度分析方法;岑威钧等^[4]采用饱和-非饱和渗流有限元理论,研究讨论了土工膜缺陷高程和缺陷尺寸对大坝浸润线及渗流量的影响规律.但是,关于病险水库土石坝渗流、坝坡稳定及可靠度的研究仍然非常有限,需要深入研究.

本文针对某水库土石坝实际工程,采用了“黏土斜墙+贴坡排水”加固方案.采用Van Genuchten模型^[5]描

述土石坝材料的非饱和状态,运用GEOSTUDIO软件结合蒙特卡洛模拟方法对某水库土石坝加固前后进行饱和-非饱和渗流稳定分析,分别计算土石坝加固前后的安全系数及失稳概率,并分析讨论了计算结果,从而验证该加固方案的可靠性.

1 土石坝渗流及坝坡稳定分析理论

根据达西定律和连续条件

$$v_x = -k_x \frac{\partial H}{\partial x}, v_y = -k_y \frac{\partial H}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

可得二维渗流基本方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: H 代表渗流场中该计算点的水头值, m ; k_x 、 k_y 和 v_x 、 v_y 分别代表流线在 x 、 y 方向上的渗透系数及渗流速度.

在计算时,对于同一种土体材料通常假设 k_x 和 k_y 不随坐标的变化而变化.为了简便计算,可将各向异性的渗流场近似地化为均匀渗流场进行分析.这时,可将式(3)进行坐标变换:

$$X = \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_y}} x, Y = y \quad (4)$$

则在变换后的坐标系 XY 中,存在:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial Y^2} = 0 \quad (5)$$

此时, H 符合拉普拉斯公式, 计算可以在一定程度上得到简化。在变换之后的坐标中, 渗流系数 $k = \sqrt{k_x k_y}$, 渗流速度依然为式(1)所示, 最后便可将 XY 坐标系内的计算结果按照式(4)转变到 XY 坐标系中。

实际工程中, 土石坝一般处于非饱和状态。通常采用土水特征曲线 (SWCC) 描述坝体内的非饱和状态。该函数曲线为高度非线性函数, 许多学者针对土水特征曲线的代理模型进行了深入的研究, 其中 Van Genuchten 模型^[2,5]能够较为完整地贴合整个过程曲线, 故本文采用 Van Genuchten 模型来描述土体含水量及坝体渗透系数与坝体基质吸力之间的函数关系, 其计算表达式为:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\psi/a)^n]^m} \quad (6)$$

$$k = k_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^2] \quad (7)$$

式中: S_e 为有效含水饱和度; θ 为土体材料的体积含水量; θ_s 和 θ_r 分别为土体材料的饱和体积含水量及残余体积含水量; ψ 为土的基质吸力; a 、 n 和 m 均为 SWCC 曲线拟合参数, 且 $n > 1$; k 为土体渗透系数; k_s 为土体饱和渗透系数。

在土石坝有限元非饱和渗流计算的基础上, 基于所获得的渗流结果再进行土石坝边坡稳定性分析, 采用简化毕肖普法计算坝坡最危险滑动面对应的临界安全系数 $FS_{\min}$ 。

由于蒙特卡洛模拟方法 (MCS) 计算简便, 容易编程且可靠性较好。本文采用 MCS 方法考虑坝体材料参数不确定性对非饱和渗流土石坝进行可靠度分析。同时, 输入各类材料参数的统计特征包括均值、互相关系数矩阵、变异系数及分布类型等, 这些统计参数可通过工程类比、试验数据拟合和参考现有文献报告获得。

2 工程实例

2.1 工程概况

某小(2)型水库大坝为均质土坝, 大坝存在的主要渗流问题有: 坝体填筑质量差, 上游坝坡无护坡保护, 下游坝坡未设置排水设施, 大坝局部渗漏, 坝脚有多处散浸点; 坝基与坝体存在接触渗漏。本文针对实际渗流问题, 采取黏土斜墙结合贴坡排水措施对该病险水库进行加固。

2.2 渗流有限元模型与材料参数

取某水库的最大坝高横断面作为计算模型。该横断面的基础高程为 106.38 m, 最大坝高 14.45 m, 坝顶宽度 2.60 m, 上游坡比 1:2.5, 下游坡比 1:2.5。加固后坝顶宽度 3.50 m, 上游坡比 1:3.5, 下游坡比 1:2.5。大坝正常蓄水位 122.40 m, 设计洪水位 122.75 m, 校核洪水位 123.05 m, 死水位 109.55 m。下游高程 114.50 m 处设贴坡排水体, 排水体顶宽取 1.00 m, 考虑坝基材料对坝体渗透稳定的影响, 取坝基影响深度 3.00 m 进行建模。

在 Seep/w 中建立模型, 加固后的模型共包括黏土斜墙、坝体、低液限黏土、坝基、贴坡排水 5 部分分区, 各分区参数如表 1 所示。考虑实际情况, 材料参数并非完全定值, 而是随着各类因素的变化存在一定的变异性。参考实际工程, 坝体内摩擦角变异系数取 0.15, 粘聚力变异系数取 0.25。有限元模型共离散为 1 459 个节点及 2 649 个三角形有限单元, 单元尺寸为 1.00 m。并设置边界条件水头边界。加固后土石坝最大坝高计算截面离散图如图 1 所示。

因实际工程中土石坝不可能全属于饱和状态, 故需进行非饱和渗流计算。通常, 土石坝材料渗透系数是随着土水特征曲线变化而变化的。坝体、贴坡排水及黏土斜墙则进行非饱和渗流计算。

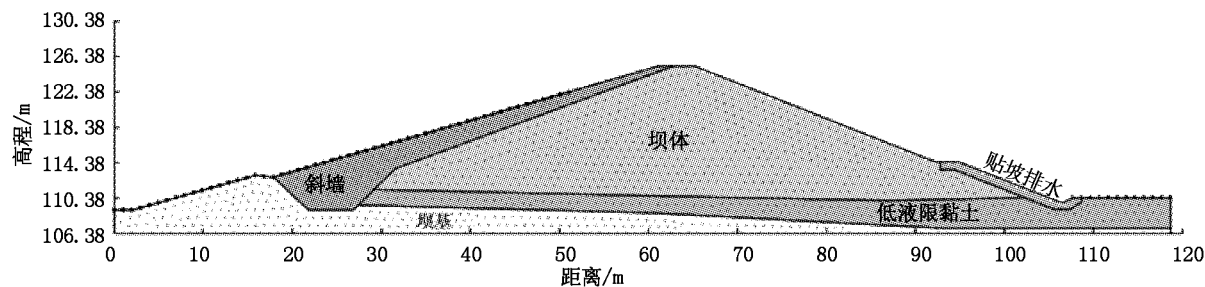


图 1 加固后坝体材料分区示意图

表 1 材料特性参数表

材料类型	坝体土	黏土斜墙(加固)	坝基土	贴坡排水	夹层
岩土类别	含砾低液限粘土	低液限粘土	强风化石英砂岩	碎石	含砾低液限粘土
$\gamma/(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.57	1.90	2.00	2.20	1.90
$c/(\text{kPa})$	10	15	45	0	10
$\varphi/(^{\circ})$	23	21	30	42	22
$k_s/(\text{m}/\text{s})$	5.5×10^{-6}	7.0×10^{-7}	1.5×10^{-7}	1.0×10^{-4}	9.0×10^{-6}

本文使用 SWCC 曲线中的 Van Genuchten 模型对土石坝进行非饱和渗流与坝坡稳定分析,模型参数取值分别为^[2]:土的饱和含水量 θ_s 取 0.045,土水特征曲线拟合参数 a 、 n 、 m 分别取 0.676 5 kPa、2.68、0.626 9,据

此可建立坝体体积含水量和水平方向渗透系数 k 与土体基质吸力的函数关系。下面给出坝体材料的基质吸力与渗透系数及体积含水量之间的函数关系曲线图,如图 2 所示。

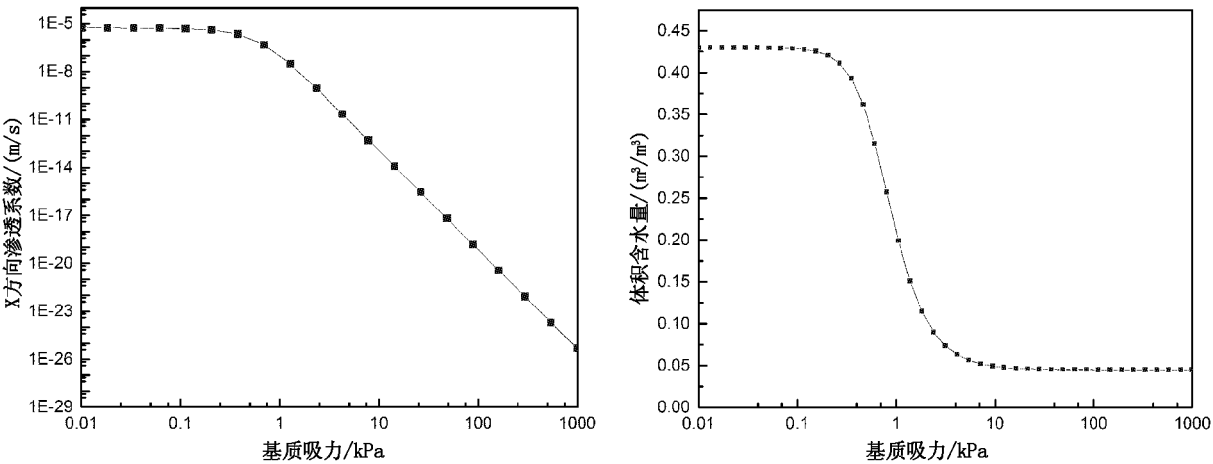


图 2 坝体材料基质吸力与渗透系数及体积含水量之间的函数关系曲线图

2.3 土石坝加固前后渗流与坝坡稳定分析

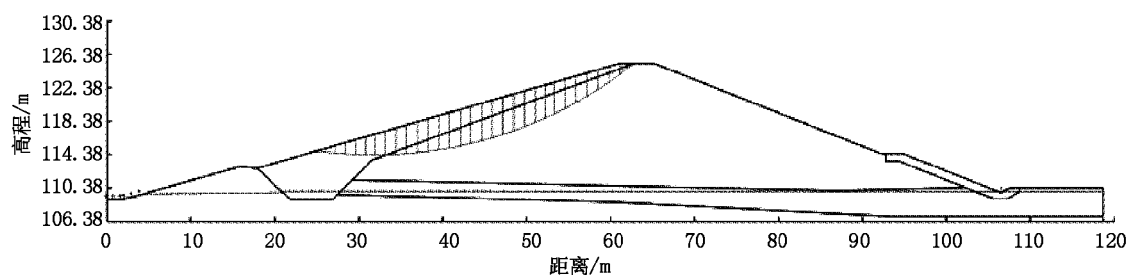
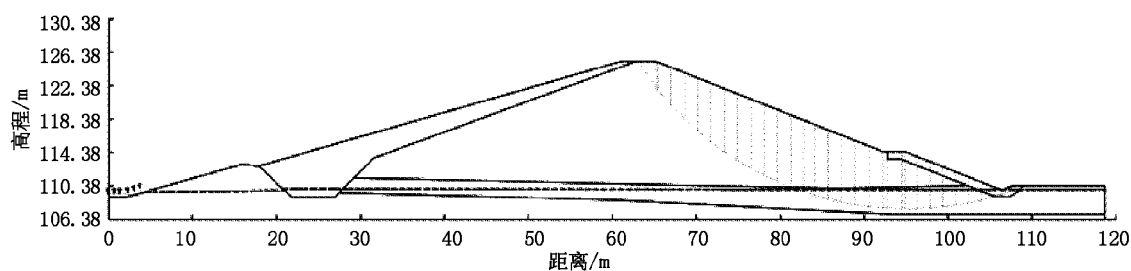
本文对稳态工况下的 3 种水位进行加固前后的渗流稳定分析,结果如表 2。经比较,土石坝加固后的坝坡稳定安全系数均大于加固前,渗流量及渗透坡降均有所下降,证明本文的加固措施是有效的、可靠的。

库水位骤降工况为瞬态渗流工况,上游水位在 48 小时内从正常蓄水位(122.40 m)降至死水位(109.55

m),经计算可得上、下游坝坡安全系数随着时间变化关系曲线。限于篇幅要求,下面只给出了瞬态库水位加固后骤降工况历时 1 296 000 s 时边坡渗流与坝坡稳定性分析结果,在渗流分析结果的基础上采用简化毕肖普法计算的上、下游坝坡安全系数分别为 2.502 和 1.847,满足小型水利工程的设计规范要求 1.15^[6]。上、下游坝坡最危险滑动面如图 3 和 4 所示。

表 2 稳定渗流工况下土石坝加固前后结果数据比较

措施	类型	正常蓄水位	设计洪水位	校核洪水位
加固前	上游坝坡安全系数	2.315	2.366	2.449
	下游坝坡安全系数	1.130	1.104	1.089
	渗透坡降	0.290	0.301	0.307
	渗流量/(m^3/s)	8.192×10^{-4}	8.898×10^{-4}	9.564×10^{-4}
加固后	上游坝坡安全系数	3.232	3.285	3.391
	下游坝坡安全系数	1.308	1.291	1.279
	渗透坡降	0.251	0.258	0.283
	渗流量/(m^3/s)	6.109×10^{-4}	6.573×10^{-4}	7.018×10^{-4}

图3 加固后历时 1 296 000 s 上游坝坡稳定分析图 ($FS = 2.502$)图4 加固后历时 1 296 000 s 下游坝坡稳定分析图 ($FS = 1.847$)

在库水位骤降工况下,加固前上游坝坡失稳概率始终在 0% 附近发生极小的变化,下游坝坡失稳概率则随着水位的升高初始无明显变化,在 5 296 s 之后快速减小,由初始的不符合规范到符合规范;加固后上游坝坡失稳概率始终在 0% 附近发生极小的变化,下游坝坡失稳概率则随着水位的升高呈现极为缓慢降低的趋势,且始终符合规范要求。当坝体内孔隙水压力消散完全时,下游坝坡安全系数和失稳概率逐渐趋于稳定。由图 5 可知,下游坝坡最大失稳概率为 0.26%,最小安全系数为 1.194,在失稳概率与结构性能水平研究中该土石坝结构性能处于安全水平^[6],由此可知此次除险加固取得了预期的效果。

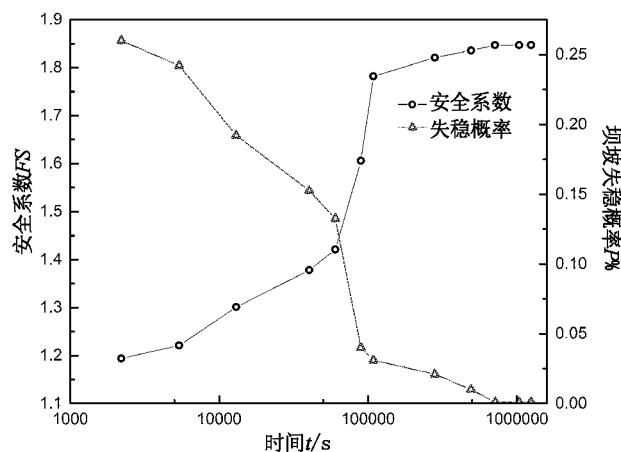


图5 土石坝加固后下游坝坡安全系数和失稳概率随时间变化曲线

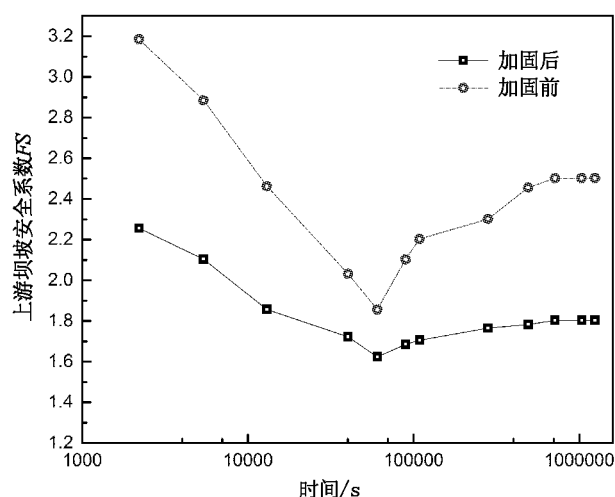


图6 加固前后上游坝坡安全系数的比较图

此外,为了说明所采用的“黏土斜墙+贴坡排水”加固方案的有效性,分别用图 6 和图 7 比较了在库水位骤降工况下土石坝加固前后上游坝坡安全系数和下游坝坡失稳概率的变化过程。由图可知,与加固前相比,土石坝加固后的上游坝坡安全系数提高了 0.9 左右,下游坝坡失稳概率降低了接近 2%,说明本文所采用的工程加固措施是可行的、有效的。

3 结 论

本文针对某病险水库土石坝渗漏问题,采用了“黏土斜墙+贴坡排水”加固方案,并且分析了加固后土石

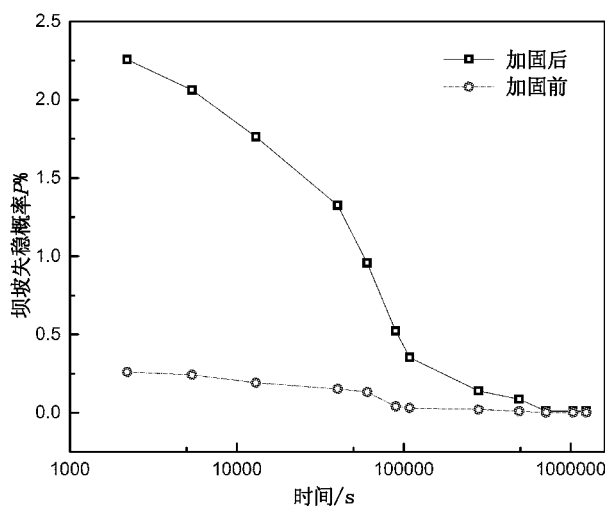


图7 加固前后下游坝坡失稳概率的比较

坝在库水位骤降工况下的坝体渗流及坝坡稳定性。主要结论如下:

(1)库水位骤降工况下,由于基质吸力的存在,土石坝坝内将发生逆向渗流,对上游坝坡稳定具有不利的影响。当坝体内孔隙水压力消散完全时,坝坡安全系数和失稳概率才逐渐上升并趋于稳定。实际工程中应尽量避免该工况的发生。

(2)加固后土石坝的浸润线有所下降,坝体渗流量有较为明显的降低,且上、下游坝坡稳定分析的坝体安全系数及失稳概率均满足规范要求。与加固前相比,土石坝加固后库水位骤降工况下的上游坝坡安全系数提高了0.9左右,下游坝坡失稳概率降低了接近2%,进而证明了所采用的工程加固措施是可靠的、有效的。

参考文献:

- [1] 徐竹青,张桂荣,郑军.我国病险土石坝隐患分类及快速检测方法概述[J].水利与建筑工程学报,2010,8(3):50~52.
- [2] Tan X, Wang X, Khoshnevisan S. Seepage analysis of earth-rock dams considering spatial variability of hydraulic parameters[J]. Engineering Geology, 2017, 288:60~269.
- [3] 吴震宇,陈建康.土坡体系可靠度分析方法及在高土石坝工程中的应用[J].岩土力学,2018,39(2):699~704.
- [4] 岑威钧,王辉,李邓军.土工膜缺陷对土石坝渗流特性及坝坡稳定的影响[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(7):589~595.
- [5] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892~898.
- [6] SL 189-2013. 小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

编辑:张绍付

Comparative analysis on seepage and slope stability of an earth rock dam before and after reinforcement

XU Yu

(Nanchang Municipal Water Resources Information Center of Jiangxi Province, Nanchang 330038, China)

Abstract: Aiming at the seepage of an earth rock dam, reinforcement scheme of inclined clay wall combined with drainage of bank slope is adopted. The seepage and slope stability of the earth rock dam before and after reinforcement are analyzed during stable seepage period and unstable seepage period. The results indicate that compared with earth-rock dam before reinforcement, the seepage discharge and seepage gradient are decreased after reinforcement, the safety factor of upstream slope is increased, and the failure probability of downstream slope is dramatically reduced. The safety factor and failure probability of dam after reinforcement meet standard requirements, which shows that the reinforcement measures adopted are reliable and effective.

Key words: Earth rock dam; Saturated-unsaturated seepage; Slope stability; Safety factor; Failure probability

翻译:彭圣军