

某电厂贮灰坝失稳过程及破坏机制研究

陈善雄, 冯美果, 许锡昌, 陈守义

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 运用非饱和土土力学理论分析了某电厂贮灰坝失稳过程, 揭示了该贮灰坝的失稳和破坏机制。分析表明, 随着子坝挡水历时的增加, 积水不断下渗, 浸润线逐渐抬高, 非饱和区域相应减少, 坝体中受此影响的部位的孔隙水压力也随之不断增高, 抗剪强度不断降低。此过程发展到一定程度, 则导致贮灰坝产生破坏和滑动。上述分析清楚地诠释了干滩长期消失会使贮灰坝的稳定性遭受巨大威胁的原因。其研究结果可为贮灰坝、尾矿坝在类似工况下的稳定性评价和预测预报提供借鉴。

关键词: 贮灰坝; 浸润线; 非饱和土理论; 失稳过程; 破坏机制

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of instability process and failure mechanism of ash storage dam in a power plant

CHEN Shan-xiong, FENG Mei-guo, XU Xi-chang, CHEN Shou-yi

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on unsaturated soil mechanics theory, the instability process of ash storage dam in a power plant is analyzed and failure mechanism of that is revealed. With the increase of lasting time of retaining water by the 1st sub dam, some phenomena will occur, such as water infiltrates into the dam body gradually, the phreatic surface rises constantly, the unsaturated region reduces correspondingly, the pore water pressure increases and the shear strength decreases continuously in the site which is influenced by water infiltration. When the process develops to a certain degree, the damage and slide of this ash storage will happen. The analysis in this paper explains clearly the reason why the stability of this ash storage dam suffers great threat if the dry beach disappears for a long period. This study may provide a reference for stability evaluation and forecast of those ash storage dams and tailings dams with the similar working condition.

Key words: ash storage dam; phreatic surface; unsaturated soil theory; instability process; failure mechanism

1 引言

贮灰坝是火电厂的重要构筑物。贮灰坝的稳定与否, 关系着电厂正常生产、人民的生命财产安全问题。贮灰坝的稳定性在很大程度上取决于坝体浸润线位置能否控制在设计允许的范围内, 因此, 有“浸润线是灰坝的生命线”的说法。灰坝的渗流控制主要通过两方面的措施加以实现: 一方面, 灰坝设计中必须在坝体中安排有适当的排渗设施; 另一方面, 在贮灰场运营管理过程中必须保证坝前的干滩长度不得小于设计规定的限制干滩长度。

根据灰坝设计专用术语, 灰坝各期设计坝顶标高所允许的最高贮灰标高称为限制贮灰标高, 限制

贮灰标高至灰坝坝顶之间的高差称为坝顶超高。按照灰坝设计规范^[1]有关规定, 坝顶超高的大小与灰坝的设计级别有关, 例如: 对一级灰坝至少应有 1.5 m 的坝顶超高, 对二、三级灰坝应有 1.0~1.5 m 的坝顶超高。坝顶超高的作用主要是为了拦蓄洪水, 并要考虑风浪的影响。在运行中能限制浸润线高度, 保证坝体安全, 而经常维持的干滩长度称为限制干滩长度, 对山谷灰场该值一般不小于 150 m^[1]。洪水到来以前, 由于坝前可以保持设计要求的限制干滩长度, 故坝体浸润线也可以维持在较低的位置。由于贮灰场都建有可靠的排水系统, 所以一次洪水从进入到退出贮灰场的历时(可根据调洪演算得出)通常只有几小时, 最多十几小时。如果遇到短期内

多次洪水的特殊情况,也可能会历时几天的时间^[2]。灰坝拦蓄洪水期间,灰坝边界条件发生很大变化,这会使浸润线的位置受到影响。灰坝拦蓄洪水的情况在灰坝坝体渗流计算中,称为非稳定渗流工况。灰坝设计规范中要求对限制干滩长度下的稳定渗流和非稳定渗流工况均需进行必要的计算与研究。

近年来,有些贮灰场出现了令人担忧的现象,那就是在炎暑或严冬季节供电需求激增的同时,突增的排灰量与原有的排灰工艺和子坝修建计划脱节而又未进行及时调整,结果出现了较长时间子坝持续挡水的情况。由于对其危害性和可能造成的严重后果缺乏认识,有些生产领导者对上述情况听之任之,致使少数贮灰坝发生了重大安全事故。

湖北省某灰坝于 2006 年发生了灰坝坝体开裂和滑动。然而,由于失事坝体关键部位的浸润线观测孔失效而未能获得失事前及失事期间的观测数据,因此,也不能直接依据浸润线观测数据进行灰坝抗滑稳定性验算,这也给灰坝失事原因的确认带来困难。基于上述背景,本文运用非饱和土力学的理论和方法,模拟该灰坝在失事前经历的特殊工况,进行了灰坝非稳态渗流场计算分析和灰坝抗滑稳定性计算,对该贮灰坝失稳过程及破坏机制进行了深入分析,取得了有意义的研究成果。

2 工程概况

本文研究对象为一个山谷型贮灰场的三级灰坝,由初期坝和子坝组成。初期坝坝长为 578.6 m,最大坝高为 28 m,坝顶标高为 120 m。初期坝坝体

由含少量碎、砾石的黏性土填筑(设计书中将其称为“代料”),坝体上游设有黏土防渗斜墙,上下游坡面均有干砌石护坡。坝基面每隔 30 m 设置一条盲沟将上游坝脚的堆石棱体与下游坝脚的堆石棱体和排渗褥垫连接,组成初期坝排渗系统。灰库内设有排水斜槽,与设置在初期坝坝底的排水管连接,可不断地将库内澄清的灰水排至灰坝下游的灰水处理系统。一级子坝于 2005 年年底完工,子坝坝顶标高为 124 m。子坝结构为碾压粉煤灰芯坝、固化粉煤灰斜墙,固化粉煤灰石屑护坡。初期坝坝体上设有浸润线观测孔和位移观测点各 3 排,但坝体中、上部绝大多数观测孔已失效,有的孔已经堵塞,还有的孔设置深度太浅,无法测得水位。

初期坝坝基土性为硬塑~坚硬的黏土,其土性指标的空间变异性较小。该黏土层以下为基岩,其岩性为砂质泥岩与页岩夹条带状白云质灰岩,最浅处理深为坝基面以下 10.6 m,质地坚硬,无大的岩溶渗漏问题。灰坝典型剖面如图 1 所示,灰坝土体物力学指标如表 1 所示,主要根据现场、室内试验及反演分析得到,其中 ϕ^b 值参考文献[9]设定。

2006 年初,由于供电需求激增,坝内剩余库容迅速用完,库尾灰位升高,干滩消失,子坝前形成积水区。采取降水措施后仍保持 20~30 cm 深的积水,这种情况持续了 4 个月之久。而后,发现灰坝西段坝脚堆石棱体表面砌石出现局部松动,96 m 高程排水沟有一段明显向前推移;与此同时,在坝内灰面距新建一级子坝内坡脚约 10 m 处出现 2 条与坝轴线基本平行的裂缝,延伸长度约 150 m,目测宽度约为 15~20 cm。

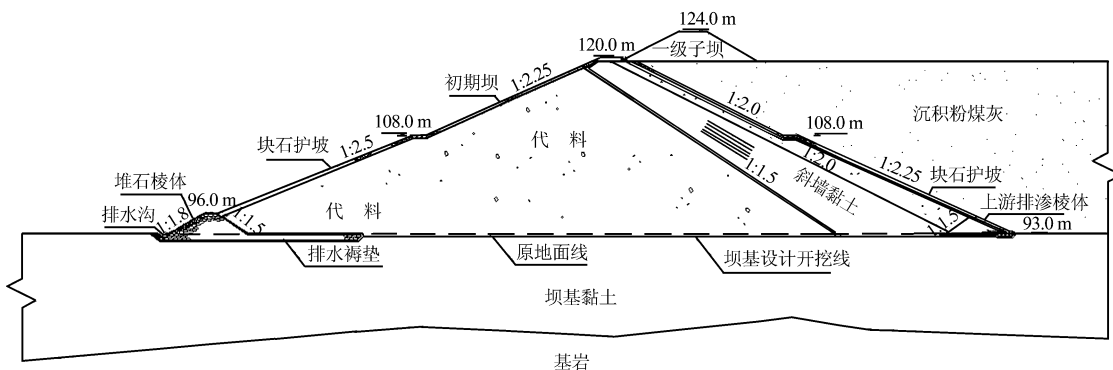


图 1 贮灰坝典型剖面图

Fig.1 The typical profile map of ash storage dam

3 非稳态非饱和渗流分析

3.1 非稳态非饱和渗流分析的重要意义

《火力发电厂灰渣筑坝设计规范》^[1]第 7.2.2 款

规定了需对限制干滩长度的稳定渗流工况、限制干滩长度中纳入设计洪水和校核洪水的稳定渗流或非稳定渗流等工况进行坝体渗流计算。前已提及,通常贮灰库拦蓄洪水均是一个短暂的过程,如果排水

系统不出问题，一般只需几小时或十几小时即可将所拦蓄的洪水排出。即使遇到连续多日强降雨的情况，此过程充其量也就延续几天。当初期坝为坝底设置了排渗系统的不透水坝时，在正常运行工况下，坝体浸润线可以保持相当低的位置，因为贮灰库拦蓄洪水是一个短暂过程，并不会使浸润线位置发生明显的变化。但子坝挡水连续几个月的情况就会严重得多，持续数月的积水下渗则可能使浸润线的位置明显抬升，并对灰坝的稳定性造成威胁。传统的渗流计算方法无法分析这一过程，只有运用非稳态非饱和渗流计算分析方法方可清楚地揭示浸润线位置随着子坝挡水历时增加而逐渐抬升的变化历程。

3.2 控制方程

非饱和土中的渗流与饱和土一样符合达西定律和连续性方程^[3]。主要区别在于，饱和土的渗流过程中渗透系数为常数，而在非饱和土中渗透系数为一个变量，是饱和度或含水率的函数，此函数称为非饱和土的渗透性函数。将达西定律代入连续性方程(忽略渗流过程中总应力的改变和土颗粒骨架的变形)，并以总水头 h 作为未知变量。当渗透的主方向与坐标轴一致时，可推得如下非饱和土二维非稳定渗流的微分方程，该式通常称为 Richards 方程。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \gamma_w \frac{\partial \theta_w}{\partial \psi} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中： k_x 和 k_y 分别为 x 和 y 方向的渗透性函数； γ_w 为水的重度； θ_w 为体积含水率； ψ 为土的基质吸力； t 为时间。 θ_w 与 ψ 之间的关系曲线称为土-水特征曲线，因此，只要知道了土的土-水特征曲线和渗透性函数，并给出明确的边界条件和初始条件，就可以通过数值方法对以上微分方程求解，得到非饱和土渗流场的解答。

3.3 计算断面

由于初期坝是按设计经人工碾压筑成，其坝体结构和土料分布比较明确，其计算参数直接按设计取用。坝基土为硬塑~坚硬状态的黏土，其土性的空间变异性小，但层厚不均。为了便于计算，计算断面在图 1 的基础上稍加简化，即将坝基土简化为均一土层，且坝基土与基岩界面示为平面。

3.4 边界条件及初始条件

初期坝下游坝脚部位地下水位位于坝基底下 1 m。取坝基左右两边和底边为不透水边界，库内沉积粉煤灰右边为不透水边界，粉煤灰顶面和排水沟为水头边界。粉煤灰顶面水头为排灰面以上 0.5 m。假定初期坝下游坝脚部位排水沟水位位于沟底

面以下 0.5 m。灰坝坡面孔隙气压力假设为大气压，这样，基质吸力在数值上等于孔隙水压力，可以用孔隙水压力头表示。

为了模拟灰坝从正常运行到子坝前持续挡水这段时间内，坝体内浸润线位置及孔隙水压力变化的全过程，计算的初始状态设定为干滩长度保持在 150 m，水位为 120.5 m，边界条件如上所述。子坝前直接挡水时，水位高度为 120.8 m，边界条件与初始状态相同。

3.5 参数获取

对于非饱和渗流计算参数，目前对其试验及特征研究已经具备相当多的经验^[4-7]。有学者提出：当试验资料缺乏时，土-水特征曲线可用土的颗粒级配曲线和物理性质指标推求^[8-9]，渗透性函数可以根据土的饱和渗透系数和土-水特征曲线求得^[10]，并进行了相关推求方法的研究及验证工作。本文计算所用的土-水特征曲线根据文献[9-10]的方法及同类土的类比得出，渗透性函数根据 Van Genuchten 方法推求。本文的渗透性函数方程为 Van Genuchten 利用闭合解析式导出的土-水特征曲线形式与 Mualem 模型相结合，给出特定解析式，即 VG-Mualem 模型^[11]：

$$k_w = \frac{k_s [1 - (a\phi)^n] (1 + (a\phi)^n)^{-m}}{((1 + a\phi)^n)^{\frac{m}{2}}} \quad (2)$$

式中： k_s 为饱和渗透系数； ϕ 为基质吸力； a 、 m 、 n 为拟合参数， $m = 1 - 1/n$ 。缺少实测数据时，可以从土-水特征曲线中部数值拟合参数，选取中间变量 S_p ：

$$S_p = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{d\theta_p}{d(\lg \phi_p)} \right| \quad (3)$$

式中： θ_p 为土-水特征曲线中部点对应的体积含水率； θ_s 为饱和状态下的体积含水率； θ_r 为残余含水率（当含水率减小到临界值时，吸力再增大，土体含水率保持不变）； ϕ_p 为与 θ_p 对应的基质吸力。

Van Genuchten 建议用下式估算拟合参数：

$$\left. \begin{aligned} m &= 1 - \exp(-0.8S_p), 0 \leq S_p \leq 1 \\ m &= 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3}, S_p > 1 \\ a &= \frac{1}{\phi} \left(\frac{1}{2^m} - 1 \right)^{1-m} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

各类土的颗粒曲线如图 2 所示,推求出来的土-水特征曲线和渗透性函数分别如图 3、4 所示。图中“盲沟”是代表将空间问题简化为平面问题计算时,与盲沟渗透性等效的虚拟土料。

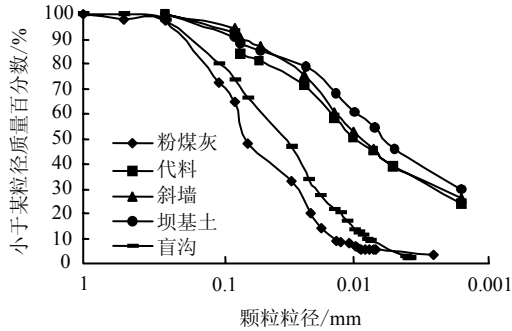


图 2 各类土的颗粒曲线

Fig.2 Grain-size distribution curves with different soil layer

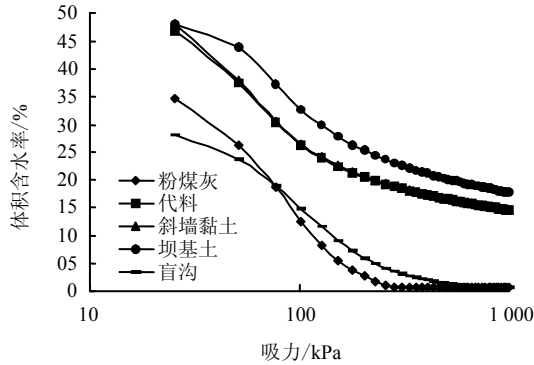


图 3 土-水特征曲线

Fig.3 Soil-water characteristic curves

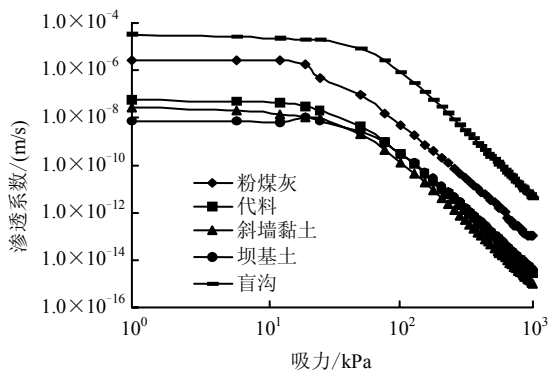


图 4 渗透性函数

Fig.4 Hydraulic conductivity function

3.6 计算分析结果

本文采用 SEEP/W 有限元程序进行非稳态非饱和和渗流分析。图 5 给出了正常运行工况、子坝挡水历时分别为 10、30、60、90、120 d 坝体内浸润线位置的分布,图中标签 1~5 分别对应于子坝挡水历

时分别为 10、30、60、90、120 d 的情况,由于从正常运行状态到子坝前挡水过程缺少水位变化的记载,为简化起见,本文假定该过程比较短暂。计算的初始状态对应于灰坝正常运行、干滩长度保持在 150 m 的情形,此时是通过设置在坝顶和库内侧面山坡上的排灰管将灰浆排入库内。由于篇幅限制,只列出初始状态和挡水 120 d 的坝体孔隙水压力的分布,见图 6、7。孔隙水压力等于 0 的等值线表示暂态的滞水面,即通常所说的浸润线,负孔隙水压力为吸力。从图 4~6 可以看出,从初始的正常运行到子坝前直接挡水,随着时间的推移,浸润线位置不断抬高。积水先渗入渗透系数较大的粉煤灰中,而后逐渐进入初期坝坝体,浸润线不断向前推进,位置逐渐抬高、变陡。整个坝体被浸润线分为两个区域:一是浸润线以下的饱和区,其孔隙水压力为正;二是浸润线以上的非饱和区,其孔隙水压力为负。初始状态即正常运行工况下,浸润线位置非常低,非饱和区域范围较大,这种状况对下游坝坡的稳定是非常有利的。因为土体处于非饱和状态,吸力对土体抗剪强度的贡献很大,而且渗透比降较小,水对土体的渗透作用也小,这对坝体的稳定都是有利的。但由于子坝直接挡水历时很长,使得浸润线位置逐渐抬高,非饱和区域逐渐减小,渗透比降逐渐增大,这使得坝体稳定性朝不利的方向发展。事实上也正是如此,在子坝挡水 4 个多月之时,子坝前方出现了 150 m 长、10~15 cm 宽的裂缝,灰坝下游坡脚出现明显的鼓起,排水沟也发生较大变形,坝体出现了破坏。

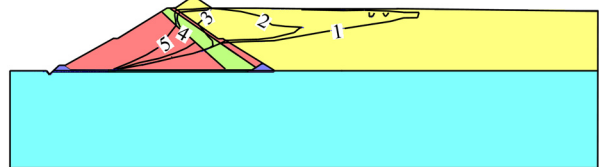


图 5 子坝挡水不同历时对应的浸润线位置

Fig.5 The location of saturation line with different retaining water time duration

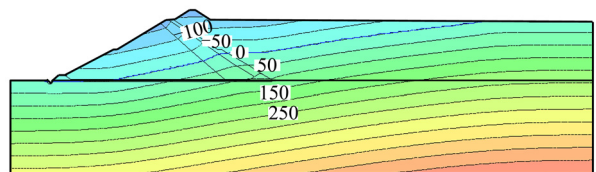


图 6 初始状态的孔隙水压力等值线(单位: kPa)

Fig.6 Pore water pressure contour lines with initial state (unit: kPa)

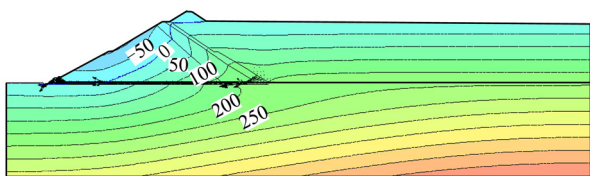


图 7 子坝挡水历时 120 d 的孔隙水压力等值线(单位: kPa)
Fig.7 Pore water pressure contour lines with retaining water time duration 120 d (unit: kPa)

4 灰坝抗滑稳定性分析

从第 3 节的计算结果可知，由于子坝前直接挡水历时数月，导致贮灰坝坝体的浸润线位置明显抬高，这必然使得坝体中相关部位土体的重度增加、吸力减小甚至消失，或者孔隙水压力升高、抗剪强度降低，因而对灰坝的抗滑稳定性降低。因为浸润线抬高是一个暂态过程，所以与其相应的灰坝抗滑稳定性的降低也是一个逐渐变化的过程。为了分析此过程，在第 3 节暂态渗流计算结果的基础上，应用非饱和土边坡稳定性计算理论，对灰坝在各个时段的抗滑稳定性进行了计算，计算参数见表 1。

表 1 贮灰坝土体物理力学指标

土类名称	重度 γ / (kN/m ³)	饱和重度 γ_{sat} / (kN/m ³)	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	有效黏聚力 c' / kPa	有效内摩擦角 ϕ' / (°)	吸力摩擦角 ϕ^b / (°)
粉煤灰	14.5	15.7	12.2	0.30	3.0	30	10
斜墙	19.2	19.6	16.7	0.32	14	20	15
代料	19.5	19.7	15.3	0.35	10.5	22	17
坝基土	19.6	19.7	14.2	0.33	12.0	21	16
棱体	22.0	22.0	100.0	1.10	0.0	32	0
子坝	14.5	15.7	30.6	0.36	100.0	30	10

计算结果如图 8，图中各时间步的含义与非稳态渗流计算结果中完全相同。从图中可以看出，在子坝挡水的初始时段，即子坝挡水 30 d 以前安全系数变化较小。但是，子坝挡水 30 d 以后，安全系数变化比较剧烈。这主要是由于在子坝挡水初期，浸润线抬高不明显，与初始状态相差不多，到了后期浸润线抬高得比较显著，而且明显变陡，使得坝体内部被饱和的土体增加，这从 3.6 节的渗流计算结果可以很明显地看出来。与此相关的坝坡土体的吸力大幅度减小或孔隙水压力增大，土体抗剪强度大幅度下降，相应的坝坡抗滑稳定性也明显降低。这是安全系数降低比较明显的主要原因。另外，从稳定性计算结果的滑弧位置，如图 9、10 所示，可以明显看出，初始状态时浸润线位置较低，部分滑弧处于浸润线以上，为非饱和状态，而最终状态时滑弧已经

完全在浸润线以下了，也就是说，此时滑面上的土体完全处于饱和状态。

从以上分析结果可以得出结论：当初期坝型为设置排渗设施的不透水黏性土坝时，坝前长期挡水，亦即干滩长期消失是非常危险的，而且这个“长期”的具体期限应当与贮灰坝坝体结构和筑坝材料的渗透性等因素有关。此结论对于贮灰坝的安全运行十分重要，因为它直接关系到贮灰坝的稳定。

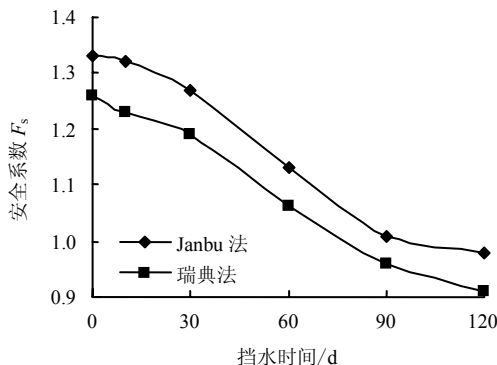


图 8 安全系数与子坝前挡水历时关系曲线
Fig.8 The curves of safety factor with retaining water time duration before dam

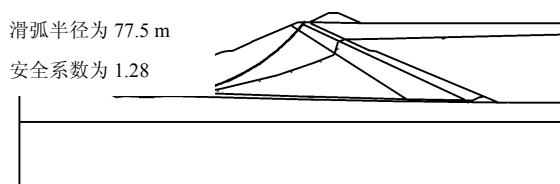


图 9 正常运行状态的滑弧位置
Fig.9 The position of slide surface with normal running state

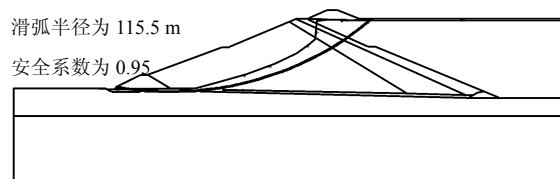


图 10 最终状态的滑弧位置
Fig.10 The position of slide surface with final state

5 有限元计算

为了进一步分析贮灰坝的失稳过程，在前面非稳定渗流场计算结果的基础上，运用弹塑性有限元方法，采用 Mohr-Columb 本构模型，对贮灰坝在子坝挡水不同历时情形下的应力分布和变形性状进行了分析。计算参数见表 1，计算结果见表 2 及图 11、12。受篇幅限制，文中仅列出初始状态及子坝挡水 120 d 的剪应变等值线图。

表2 有限元计算结果表

Table 2 The calculation results with FEM

挡水时间	X方向最大 位移/m	坡角最大 剪应力/kPa	最小主应力 最小值/kPa	最大剪 应变
正常运行状态	0	29.7	-32.1	0.022
子堤挡水10 d	0.005	29.1	-32.7	0.023
子堤挡水30 d	0.012	35.6	-34.9	0.028
子堤挡水60 d	0.034	41.4	-66.7	0.032
子堤挡水90 d	0.135	51.8	-94.6	0.045
子堤挡水120 d	0.245	70.4	-117.1	0.065

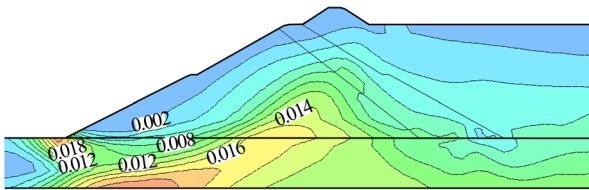


图11 正常运营状态最大剪应变等值线

Fig.11 The maximum shear strain contour lines with normal running state

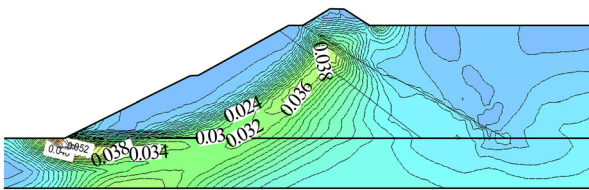


图12 最终状态最大剪应变等值线

Fig.12 The maximum shear strain contour lines with final state

由剪应变孕育过程分析,从子坝前保持150 m干滩到子坝挡水30 d期间,剪应变集中于坡脚,呈逐步增大的趋势,但量值甚小,与剪应力发展相对应,体现坡脚剪切屈服产生的变形。子坝挡水60 d时,最大剪应变值大幅度增长,其等值线显示坡脚剪应变集中更为明显,并且变形呈向上牵引发展趋势。子坝挡水90 d时,最大剪应变值继续增加,其等值线交汇于贮灰坝坡脚与坝基土中,等值线的脊线揭示边坡潜在的滑裂面具有一定的似圆弧特征。子坝挡水120 d时,最大剪应变值成倍增长,体现边坡失稳特征,其等值线脊线清晰揭示滑裂面形状,呈似圆弧面形态,体现坡体整体剪切滑移与坡顶拉裂破坏组合的特征。

计算中,对初期坝坝顶的最外边节点x方向位移随着子坝挡水时间变化进行了跟踪,结果见图13。从图中可以看出,在正常运行工况,位移变化较小,但到了子堤挡水30 d以后,位移显著增大,并开始发生突变,此时灰坝已经开始处于不稳定状态。

6 贮灰坝破坏机制分析

贮灰场正常运行时,须保持一定的干滩长度。对于三级灰坝,设计规范规定干滩长度不小于150 m,灰坝在这种条件下浸润线位置较低,与其相应的灰坝的稳定性也较高。后来,由于电厂发电量激增与灰坝运行管理脱节等原因,致使子坝前积水历时4个多月,此期间干滩完全消失。子坝直接挡水,且积水时间长就会克服土中的气泡阻力,向干滩内的沉积粉煤灰和初期坝坝体内渗透,使浸润线位置升高,从而引起坝体饱水区域不断增大,导致坝体中孔隙水压力不断升高,土体的抗剪强度不断降低。以上变化过程均使得坝体滑动力增加,抗滑力减小。与此同时,坝体的不均匀塑性变形不断增大,塑性应变较大区域也不断向滑体中前部扩展。随着挡水时间的增加,最大剪应变值不断增加,且剪切变形集中带进一步向上发展,子坝挡水120 d时,最大剪应变值成倍增长,其等值线脊线清晰揭示滑裂面形状,呈似圆弧面形态,体现了边坡失稳特征,这就是贮灰坝滑坡变形破坏的主要机制。

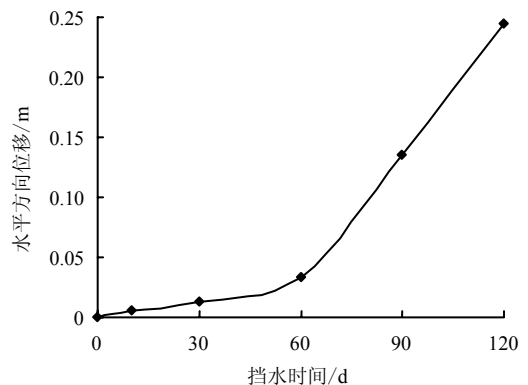


图13 水平方向位移与坝前挡水时间关系图

Fig.13 The graph of horizontal displacement with retaining water time before dam

7 结论

以具体工程为例,开展了非稳态非饱和渗流计算、坝体稳定性计算和弹塑性有限元分析,对某贮灰坝失稳过程及变形破坏机制进行了分析,得到如下结论:

(1) 随着子坝挡水历时的增加,积水不断向坝体入渗使浸润线逐渐抬高,坝体中的非饱和区域逐渐缩小,渗透比降逐渐增大,使贮灰坝稳定性往不利的方向发展。

(2) 在渗流场计算的基础上,通过坝体稳定性

分析及有限元计算, 揭示了贮灰坝遭遇子坝长期挡水的特殊情况下, 从稳定到不稳定的发展过程及坝坡的变形和失稳特征。

(3) 通过分析坝前长期积水引起贮灰坝变形和破坏的作用机制, 认为此情况下积水会克服土中的气泡阻力, 向干滩内的沉积粉煤灰和初期坝体内渗透, 使浸润线位置升高, 从而引起坝体饱水区域不断增大, 导致坝体中孔隙水压力不断升高, 土体的抗剪强度不断降低。以上变化过程均使得坝体滑动力增加, 抗滑力减小, 最终导致坝体失稳。

(4) 本文涉及的工程实例给人们敲响了警钟, 当初期坝坝型为设置排渗设施的不透水黏性土坝时, 生产管理中必须杜绝坝前长期挡水情况的出现, 避免类似事故重演。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5045—2006 火力发电厂灰渣筑坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 尾矿设施设计参考资料编写组. 尾矿设施设计参考资料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- [3] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 卢应发, 陈高峰, 罗先启, 等. 土-水特征曲线及其相关性研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2481—2486.
LU Ying-fa, CHEN Gao-feng, LUO Xian-qi, et al. Study of soil-water characteristic curve and its influential factors [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2481—2486.
- [5] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 1—5.
WANG Tie-hang, LU Jing, YUE Cai-kun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 1—5.
- [6] 李永乐, 刘汉东, 刘海宁, 等. 黄河大堤非饱和土土-水特征试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 347—350.
LI Yong-le, LIU Han-dong, LIU Hai-ning, et al. Test and study on soil water curve of unsaturated soil of Yellow River dyke[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 347—350.
- [7] 徐永福, 董平. 非饱和土的水分特征曲线的分析模型[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 400—405.
XU Yong-fu, DONG Ping. Fractal models for the soil-water characteristics of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 400—405.
- [8] GUPTA S C, LARSON W E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, 1979, 15(6): 1633—1635.
- [9] FREDLUND M D, WILSON G W, FREDLUND D G. Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(5): 1103—1117.
- [10] FREDLUND D G, XING A, HUANG S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 533—546.
- [11] Van GENUCHTEN M T. A closed form equation for predicting the permeability function for unsaturated soils [J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44: 892—898.

书 讯

灌注桩后注浆技术及工程实例 (建工版)

建筑科学类, 张忠苗等著, 16 开, 600 千字, 432 页, 平膜装, 估价: 66 元, 2009 年 9 月出版, ISBN: 978—7—112—11110—7

本书系统阐述了灌注桩后注浆技术的基本原理与设计施工方法及应用效果。全书共分 8 章, 分别介绍了钻孔灌注桩存在的问题及后注浆技术的定义、作用、分类及研究现状; 钻孔灌注桩的施工方法, 受力机理与群桩沉降计算方法及影响钻孔灌注桩承载性状的众多因素; 灌注桩岩土注浆理论及桩端后注浆提高承载力、减少桩沉降量的机理; 室内注浆水泥土力学试验、细观机理及室内注浆模型桩试验等; 注浆桩现场静载试验分析; 桩端后注浆桩的设计施工方法及实例; 桩侧后注浆桩设计施工方法及实例; 注浆锚杆桩、注浆树根桩、预制桩注浆、大直径钻埋空心注浆桩等注浆方法与施工实例。读者对象: 岩土工程技术人员、施工人员及管理人员。

(摘自 新华书目报·科技新书目)