

DOI: 10.11779/CJGE2020S2028

# 洪水条件下粉煤灰坝非饱和入渗特性及稳定性分析

蔡 红<sup>1</sup>, 严 俊<sup>\*1</sup>, 魏迎奇<sup>1</sup>, 张守臻<sup>2</sup>, 吴帅峰<sup>1</sup>, 孙黎明<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 2. 华能山东发电有限公司白杨河发电厂, 山东 淄博 255200)

**摘要:** 燃煤发电厂干式贮灰场内的粉煤灰坝多处于非饱和状态, 在遭遇洪水时表层灰体经历了由非饱和到饱和的变化过程, 不考虑该过程将极大地影响边坡稳定分析结果, 国内外对该过程中粉煤灰的非饱和渗流特性试验研究鲜见报道。以某燃煤电厂的粉煤灰作为研究对象, 研发了一套非饱和入渗试验装置, 开展了灰坝在遭遇 1.0, 2.5, 3.3, 5.2 m 等不同洪水水头条件下入渗特性试验研究, 结果表明非饱和粉煤灰在洪水入渗下前峰面的平均入渗系数为  $1.2 \times 10^{-3}$  cm/s, 饱和面的入渗系数在  $A \times 10^{-4}$  cm/s 量级, 且随着试验水头提高而越来越接近前峰面入渗系数, 基于此提出一种洪水条件下灰坝内饱和区域的估算方法, 即低洪水水头时饱和区入渗系数可取试验结果, 大于 10.0 m 洪水水头时可取前峰面入渗系数来估算饱和区范围, 并对比数值模拟结果验证了其准确性。最后, 通过对边坡稳定性分析结果, 验证了基于估算饱和区下的边坡稳定分析方法更能反映上游边坡的实际稳定性, 研究成果可以为粉煤灰坝的非饱和渗流与稳定分析提供借鉴。

**关键词:** 粉煤灰; 非饱和渗流; 孔隙水压力; 前峰面; 饱和面

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0157-06

**作者简介:** 蔡 红(1968—), 女, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事土石坝工程、燃煤电厂贮灰场工程方面的岩土工程研究。E-mail: caihong@iwhr.com。

## Unsaturated infiltration characteristics and stability of fly ash dams under flood conditions

CAI Hong<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>, WEI Ying-qi<sup>1</sup>, ZHANG Shou-zhen<sup>2</sup>, WU Shuai-feng<sup>1</sup>, SUN Li-ming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Department of Geotechnical Engineering, China

Institute of Water Resources and Hydro-Power Research, Beijing 100048, China; 2. Huaneng Shandong Power Generation Co., Ltd.,

Baiyanghe Power Plant, Zibo 255200, China)

**Abstract:** The fly ash dams in the storage field of coal-fired power plants are mostly in unsaturated state. The surface ash body experiences the change from unsaturated state to saturated one during floods, which will greatly affect the slope stability. However, the experimental researches on the unsaturated characteristics of fly ash in this process are rarely reported. A coal fly ash is chosen as the research object, and the related unsaturated infiltration test device is developed. The systematical tests are then carried out on the infiltration characteristics of a fly ash dam under different flood water-head conditions such as 1.0, 2.5, 3.3 and 5.2 m. The test results show that the average infiltration coefficient of forward edge surface for unsaturated fly ash is  $1.2 \times 10^{-3}$  cm/s, while the infiltration coefficient of saturated surface is  $A \times 10^{-4}$  cm/s level, and it is closer and closer to that of the forward edge surface with the increasing flood water-head. Based on this, a method for estimating the saturated area in the fly ash dam is proposed, that is, the infiltration coefficient of saturated surface under low flood water-head can be obtained from the test results, while the coefficient of forward edge surface can be used to estimate the saturated area when the flood water-head is larger than 10.0 m. The accuracy of the proposed method is verified by comparing with the numerical results. As a result, based on the stability analysis results of upstream slope of a typical fly ash dam considering flood infiltration, the analysis method based on the estimation of saturated zone can be better reflect the actual stability of the upstream slope, and the research results may provide reference for the unsaturated seepage and stability analysis of fly ash dams.

**Key words:** fly ash; unsaturated seepage; pore water pressure; forward edge surface; saturated surface

基金项目: 国家重点研发计划课题资助项目(2017YFC0804600); 国家自然科学基金面上项目(41775164); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(KY01882008); 黑龙江省重大科技招标项目(GA14A501)

收稿日期: 2020-09-01

\*通信作者(E-mail: yanjun@iwhr.com)

## 0 引言

粉煤灰是燃煤发电厂排放的主要废料，虽然近些年来粉煤灰综合利用率大大提高，但是大部分还是集中存放在的贮灰场里，且为了节省费用，多采用灰渣直接填筑子坝的形式扩大贮灰场容积，延长灰库使用期限<sup>[1-3]</sup>。因火力发电而产生的大量粉煤灰的贮存和工程安全是保证工程和社会安全的重要科技问题。事实上，填筑坝体的粉煤灰多处于非饱和状态，只有表层灰土的饱和度随季节、环境而变化，特别是在遭遇洪水时短期内饱和度急剧升高，导致灰土孔隙水压力增大和强度降低，对坝体的边坡稳定性造成较大影响<sup>[4]</sup>，因此，研究粉煤灰在洪水条件下的非饱和性状对确保工程渗流安全和边坡稳定都具有十分重要的意义。

洪水在灰体中入渗使灰体经历了一个由非饱和到饱和的变化过程<sup>[5-6]</sup>，由于非饱和灰中孔隙水压力分布的测量极为困难，国内外对粉煤灰非饱和渗流特性试验的研究鲜见报道，这就导致粉煤灰坝洪水条件下的渗流安全和边坡稳定分析中参数选取多采用经验类比的方法<sup>[7-14]</sup>，如采用工程特性相近的粉土的土水特征曲线代替粉煤灰的土水特征曲线，缺乏可靠的试验结果支撑。本文以某燃煤电厂的粉煤灰作为研究对象，基于研发的粉煤灰非饱和入渗试验装置，研究了不同洪水水位条件下入渗深度与时间的关系，获得了非饱和灰体的相应入渗系数，提出了洪水在灰坝体中的入渗范围估算方法，并结合典型灰坝开展遭遇洪水后的稳定性分析。

## 1 试验装置

如图 1 所示，非饱和粉煤灰的洪水入渗试验设备包括填装灰样的有机玻璃筒、供水装置和测量灰体孔隙水压力的负压计系统等 3 部分。①有机玻璃筒内径 10 cm，每节筒长 60 cm，两端配有关节法兰供连接时使用，试验可根据具体情况选择不同的有机玻璃筒长度。②供水装置主要由溢流桶、进/出/排水口等构成，在有机玻璃筒上配有专门的进水和出水口，在筒壁上沿长度方向每隔 10 cm 开一个孔径为 1 cm 的圆孔，用来安装负压计。③负压计系统可以量测正、负孔隙水压力，由陶土头、集气管、压力传导管、水银压力表（由 U 形管和水银槽组成）、观测板、注水除气管、多路三通等部件组成。陶土头是负压计的传感部件，集气管一端与陶土头相连接，另一端与压力传导管经多路三通连到观测板的水银槽形成 U 形管水银压力表。

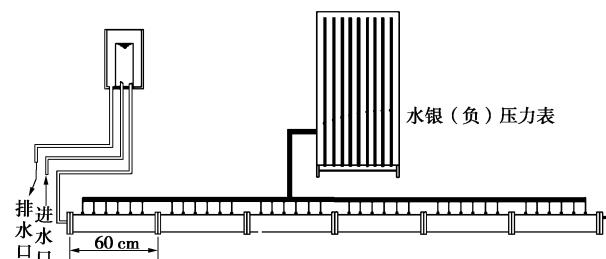


图 1 非饱和粉煤灰洪水入渗试验装置

Fig. 1 Test equipment for flood infiltration of unsaturated fly ash

## 2 试验灰样和试验方法

### 2.1 试验灰样

本文以某电厂的粉煤灰为研究对象，粉煤灰的基本物理指标：粉煤灰相对密度  $G_s=2.27$ ，最大干密度  $\rho_{dmax}=1.08 \text{ g/cm}^3$ ，最优含水率  $w_{op}=25.0\%$ ，饱和渗透系数  $k_s=4.60 \sim 8.80$ 。采用筛分法和比重计联合测定法得出的 4 组粉煤灰试样（F1, F2, F3, F4）的级配曲线如图 2 所示。可以看出，粉煤灰颗粒粒径主要处于 0.005~0.25 mm，其中粉粒含量为 53.75%，砂粒含量为 46.25%。依据土的工程分类标准，将其定名为粉土质砂。

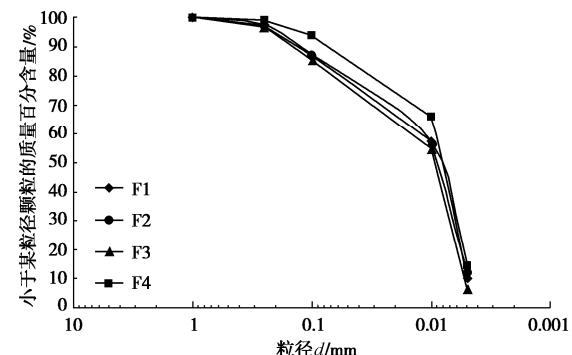


图 2 粉煤灰的级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of fly ash

### 2.2 试验方法

试验选用直径为 10.0 cm，长为 3.6 m 的灰柱来模拟洪水入渗，开展 4 个不同洪水水头下灰柱模型入渗试验，每一灰柱模型采用一级恒定水头，4 个入渗模型试验的水头分别是 1.0, 2.5, 3.3, 5.2 m，每个灰柱制样干密度和含水量都相同。

灰柱模型制作是先将干灰加水拌和，密闭 24 h 使灰中的含水量均匀，然后分层装入有机玻璃筒，每层厚度为 2.0 cm。灰柱制好后，将负压计陶土头埋入灰柱轴线位置，使之与周围粉煤灰紧密接触，并封闭负压计管与有机玻璃筒接触部位，埋入灰体中的负压计共计 37 支。

灰柱模型制作完毕及安装好负压计后, 静置一夜, 待负压计读数稳定, 记录各个位置的初始负孔隙压力 ( $-370.0 \sim -330.0$  cm 水柱高度), 然后施加试验水头。试验开始后根据入渗情况每隔一定时间记录一次, 直至各位置水头变化不大为止。由于水头压力不同, 4 个模型试验持续的时间为 2~6 d 不等。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 孔隙水压力变化规律

不同洪水条件下有机玻璃筒沿程各位置负压计对应水头随时间变化过程如图 3 所示。总体上看, 不同洪水水头条件下, 最靠近上游负压计处的灰土最先达到饱和, 随着洪水的下渗, 沿程负压计处的也自上到下逐步趋于饱和, 且随着洪水水头的增加, 灰土全部达到饱和的时间越短, 1.0, 2.5, 3.3, 5.2 m 下对应的饱和时间分别为大于 140.0, 106.0, 71.0, 61.0 h。

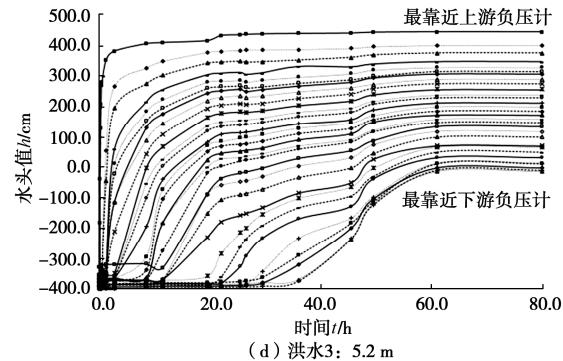
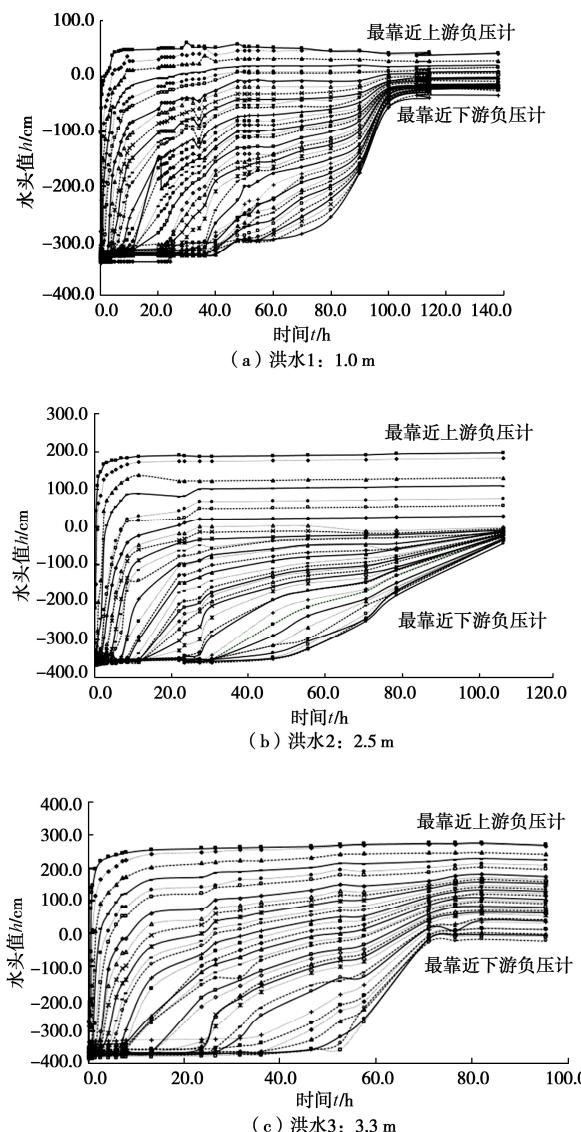


图 3 不同洪水水头下各位置孔隙水压力随时间变化曲线

Fig. 3 Curves of pore water pressure changing with time at various positions under different flood conditions

从试验过程可以看出: 1.0 m 洪水条件下, 最靠近上游负压计处的灰土在 1.6 h 即达到饱和, 随后孔隙水压力逐步增加, 在 8.1 h 即达到峰值 0.52 m 水头后趋于稳定, 在 140.0 h 时灰样自 0.16 m 后仍未达到饱和, 对应的孔隙水压力仍为负值; 2.5 m 洪水条件下, 最靠近上游负压计处的灰土在 0.4 h 即达到饱和, 随后孔隙水压力迅速增加, 在 2.0 h 达到峰值 1.92 m 水头后趋于稳定, 在入渗 106.0 h 后灰样基本处于整体饱和状态, 最靠近下游负压计测量值达到 0.01 m 水头; 3.3 m 洪水条件下, 最靠近上游负压计处灰土在入渗 0.3 h 即达到饱和, 在 5.6 h 达到峰值 2.61 m 水头后趋于稳定, 在 71.0 h 时灰样基本处于整体饱和状态, 最靠近下游负压计在试验结束 (100 h) 时测量值达到 0.10 m 水头; 5.2 m 洪水条件下, 最靠近上游负压计处灰土在入渗 0.2 h 后即达到饱和, 在 3.5 h 达到峰值 4.42 m 水头后趋于稳定, 在 61.0 h 时灰样基本处于整体饱和状态, 在入渗 80.0 h 时, 最靠近下游负压计测量值达到 0.13 m 水头。

#### 3.2 前锋面和饱和面入渗规律

试验过程中遭遇洪水时灰样孔隙水压力分布演变过程如图 4 所示。试验中将刚有水分到达某位置时的入渗面为前锋面, 此时负压计读数刚开始变化, 灰体尚未达到饱和状态。对应的, 当灰柱模型内某一位位置的负孔隙压力接近于 0 时, 这一位置的粉煤灰达到或接近饱和状态, 为饱和面。

从试验结果可以看出, 在封闭试验条件下, 前锋面的入渗过程中灰样未全部饱和, 灰样中原有的孔隙气体逐步被压缩并缓慢从尾端排出, 孔隙气体并未全部排出, 因此前锋面入渗速度差异不大: 洪水入渗初期 (1.0 h 内) 各洪水下前锋面范围均在 0.60 m 灰样范围内, 入渗 5.0 h 时前锋面影响范围均达到 1.20 m; 入渗 10.0 h 时, 4 种洪水下前锋面影响范围为 1.80~1.90 m; 入渗 20.0 h 时, 前锋面影响范围为 2.40~2.60

m。4 种洪水下灰样中前锋面到达尾端所需的时间分别为 47.6, 47.0, 46.5, 45.5 h。

试验过程中, 4 种洪水位下各灰样观测的饱和区发展规律基本相同, 都是从初始干燥状态发展到局部饱和, 直至整体饱和。饱和区域逐步向深部移动过程中, 灰样沿程孔隙水压力值逐步由负压抬升至正压, 洪水水头越大, 抬升速度越快。

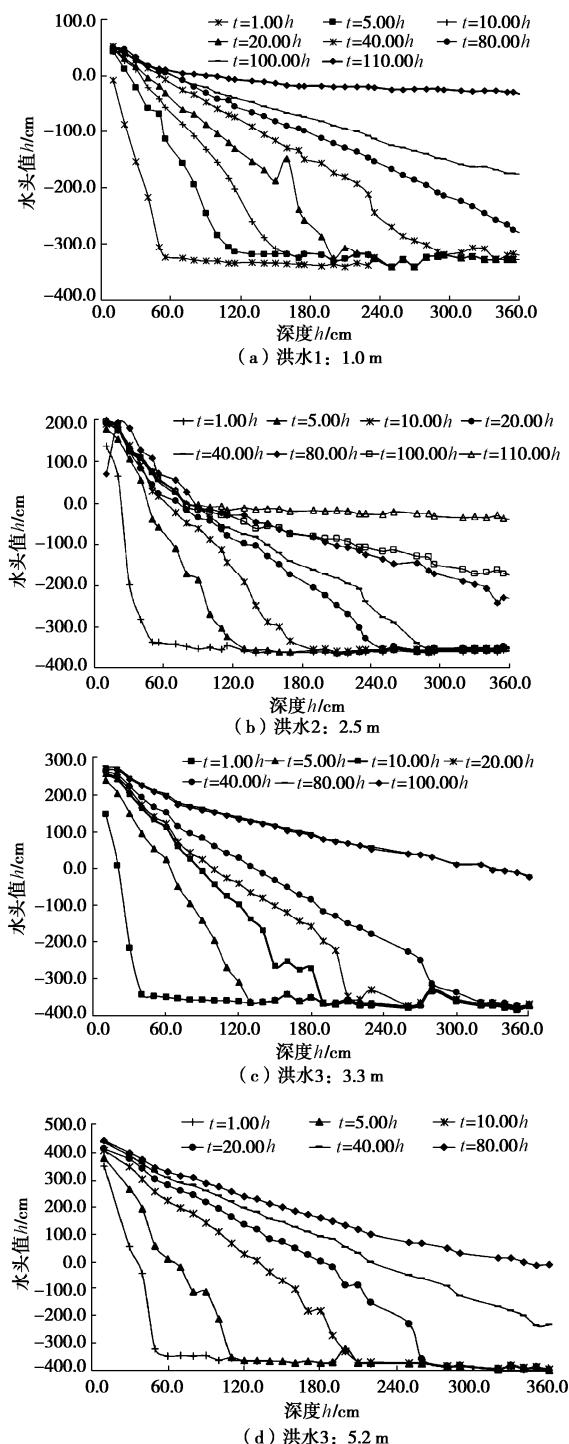


图 4 不同洪水水头下各阶段孔隙水压力分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of pore water pressure at each process under different flood conditions

#### 4 灰坝上游侧饱和区域的估算方法

根据 Darcy 定律  $v_w = -k_w \partial h_w / \partial y$ , 在本入渗试验中,  $\partial h_w / \partial y$  可看成作用在某一段灰柱上上游试验水头和负孔隙压力之和<sup>[15]</sup>。考虑入渗系数  $k$ ,

$$k = \frac{v}{i} = \frac{l/t}{(h+u)/l} = \frac{l^2}{t(h+u)} \quad , \quad (1)$$

式中,  $v$  为平均流速 (cm/s),  $i$  为水力比降,  $l$  为入渗深度 (cm),  $t$  为时间 (s),  $h$  为试验水头 (cm),  $u$  为负孔隙压力 (cm)。

表 1 给出了 4 个模型试验的前锋面到达不同位置时计算出的入渗系数, 可以发现洪水入渗的前锋面在 4 个模型中以及同一模型到达不同深度时的平均入渗系数十分接近, 平均值为  $1.2 \times 10^{-3}$  cm/s。

表 1 前锋面的入渗系数

Table 1 Infiltration coefficients of forward edge surface

( $10^{-3}$  cm/s)

模型	100 cm 处	200 cm 处	300 cm 处	350 cm 处
1	1.6	1.4	1.3	1.6
2	1.2	1.1	1.3	1.5
3	1.3	1.0	1.1	1.3
4	1.1	1.0	1.0	1.1

表 2 列出了根据 5 个不同时间饱和面位置计算出的入渗系数, 可以看出, 水分饱和面入渗系数在  $A \times 10^{-4}$  cm/s 量级, 小于前锋面入渗系数, 但是随着试验水头提高而越来越接近前锋面入渗系数。这是由于在同一起始负孔隙压力下, 水头值越高, 起始负孔隙压力所占比例越小, 起始负孔隙压力从低水头时主导作用变成高水头时次要作用。

表 2 饱和面的入渗系数

Table 2 Infiltration coefficients of saturated surface ( $10^{-4}$  cm/s)

模型编号	5 h	10 h	15 h	20 h	25 h
模型 1	2.5	2.5	2.4	2.2	2.1
模型 2	3.9	3.5	2.8	2.7	2.5
模型 3	4.9	4.5	3.4	3.2	3.4
模型 4	6.4	6.8	6.9	7.1	6.9

根据上述试验结果, 洪水在灰坝内的入渗时饱和面入渗系数不是一个常数, 在计算灰坝内饱和区域时可采用如下估算方法, 即低水头时饱和入渗系数可取试验结果, 高水头时可取前锋面入渗系数。在实际洪水来临时, 坝体不同高程处的入渗持续时间是不同的, 上述估算方法计算得到的入渗深度显然大于实际入渗深度, 使灰坝上游边坡的稳定性分析结果偏于安全。

#### 5 洪水条件下粉煤灰坝上游边坡安全性分析

为验证上述饱和区估算模型的准确性, 选取典型

粉煤灰筑坝案例来开展研究: 某拦洪坝为干粉煤灰碾压坝, 设计坝顶高程为 100.00 m, 最大坝高 33 m。坝顶宽为 10 m, 上、下游坝坡均为 1:4, 每隔 11 m 设一马道, 马道宽 5 m。上游坝坡采用由混凝土预制块护面及砂垫层土工布组成的上游护面, 下游坝坡则为防止雨水冲蚀坝坡而设置的山皮土及碎石下游护面。

考虑洪水历时按 1 d, 排空时间按 3 d 计算, 表 3 列出了按饱和区估算方法获得的洪水从来临到排空期间的坝体几个不同高程下的入渗深度, 并与数值模拟分析结果相互对照, 两者较为接近, 且在大于 10.0 m 洪水水头时可采用前锋面平均入渗系数来估算其饱和区范围。

表 3 洪水下坝体不同高程下的入渗深度

Table 3 Infiltration depths at different elevations of dam under flood conditions

不同坝高	洪水水头	入渗深度估算结果	(m)
27.5	1.0	1.4	1.8
26.0	2.5	2.3	2.1
18.5	10.0	10.0	9.8
13.5	15.0	11.2	10.6
8.5	20.0	12.3	12.5
3.5	25.0	13.2	13.4
0	28.5	13.9	13.7

在上述入渗深度估算结果上, 对灰坝上游边坡的抗滑稳定性进行复核, 采用的强度指标如表 4 所示, 分析结果如图 5 所示: 洪水来临到排空后, 考虑洪水入渗时上游坝坡的最小稳定安全系数为 1.43, 稍高于规范允许的稳定安全系数, 其最危险滑弧位于上游坡脚的饱和区, 远小于不考虑洪水入渗时的结果 2.69, 这表明, 洪水入渗增加了坝体饱和区的范围, 极大地降低了坝体的强度指标, 导致坝体的安全稳定性降低, 考虑该影响更能准确地反映上游边坡稳定性。

表 4 灰坝边坡稳定分析计算指标

Table 4 Parameters for slope stability analysis

土样名称	湿密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	有效强度指标 c'/kPa	$\phi'$ / (°)
粉煤灰坝体(饱和区)	1.40	1.5	8	27
粉煤灰坝体(非饱和区)	1.40	1.50	10	30
坝基原土	1.90	2.10	30	18

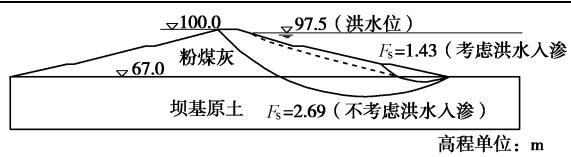


图 5 洪水下灰坝上游边坡稳定性计算结果

Fig. 5 Calculated results of upstream slope stability for ash dam under flood conditions

## 6 结 论

本文以某燃煤电厂的粉煤灰作为研究对象, 基于

研发的粉煤灰非饱和入渗试验装置, 研究了不同洪水水位条件下入渗深度与时间的关系, 提出了一种灰坝饱和区估算方法, 并结合典型灰坝开展遭遇洪水后的稳定性分析:

(1) 研发的非饱和粉煤灰的洪水入渗试验装置能够很好地量测粉煤灰在不同洪水水头下沿程孔隙水压力分布, 为研究粉煤灰非饱和长期入渗特性提供了一种良好的测试手段。

(2) 非饱和粉煤灰在洪水入渗下的前锋面的平均入渗系数为  $1.2 \times 10^{-3}$  cm/s, 饱和面的入渗系数在  $A \times 10^{-4}$  cm/s 量级。由于在同一起始负孔隙压力下, 水头值越高, 起始负孔隙压力所占比例越小, 起始负孔隙压力从低水头时主导作用变成高水头时次要作用, 因此饱和面入渗系数随着试验水头提高而越来越接近前锋面入渗系数。

(3) 提出一种洪水条件下灰坝内饱和区域的估算方法, 即低洪水水头时饱和区入渗系数可取试验结果, 大于 10.0 m 洪水水头时可取前锋面入渗系数来估算饱和区范围, 并对比数值模拟结果验证了其准确性。

(4) 通过对比考虑洪水入渗与否下典型干灰筑坝上游侧边坡稳定性计算结果, 表明洪水入渗增加了坝体饱和区的范围, 极大地降低了坝体的强度指标, 导致坝体的安全稳定性降低, 考虑该影响更能准确地反映上游边坡稳定性。

## 参考文献:

- 1] CHANW H, MAZLEE M N, AHMAD Z A, et al. Effects of fly ash addition on physical properties of porous clay-fly ash composites via polymeric replica technique[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2017, **19**(2): 794 - 803.
- 2] KUMAR H, MISHRA M K. Optimization and evaluation of fly ash composite properties for geotechnical application[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, **8**(6): 3713 - 3726.
- 3] 丁家平. 贮灰库渗流控制及三维等参元渗流数学模型的应用[J]. 岩土工程学报, 1991, **13**(4): 41 - 50. (DING Jia-ping. Numerical the seepage control from ash lagoon and the application of three dimensional mathematicl engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **13**(4): 41 - 50. (in Chinese))
- 4] 时 红, 张永波. 粉煤灰水在土壤包气带中的垂直迁移规律[J]. 水资源保护, 2007, **23**(3): 30 - 32. (SHI Hong, ZHANG Yong-bo. Law of vertical transfer of fly ash water in aeration zone of soil[J]. Chinese Journal of Water Resources Protection, 2007, **23**(3): 30 - 32. (in Chinese))

- [5] 丁家平, 徐 辉, 顾国新, 等. 大型贮灰场的三维饱和-非饱和瞬变流数值模拟及非饱和参数试验[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 230 - 234. (DING Jia-ping, XU Hui, GU Guo-xing, et al. Numerical model of three dimensional saturated-unsaturated flow for a flyash lagoon of thermal power plant[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 230 - 234. (in Chinese))
- [6] 魏迎奇, 田继雪, 蔡 红, 等. 粉煤灰的基质吸力及非饱和特性研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(增刊 2): 8 - 13. (WEI Ying-qi, TIAN Ji-xue, CAI Hong, et al. Research on matrix suction and un-saturated characteristics of fly ash[J]. Chinese Journal of shuili xuebao, 2014, **45**(2): 8 - 13. (in Chinese))
- [7] 饶俊勇, 彭德刚, 李模军. 基于非饱和渗流的干灰场边坡稳定分析[J]. 2017, **12**(6): 1 - 4. (RAO Jun-yong, PENG De-gang, LI Mo-jun. Slope stability analysis for dry ash pond based on unsaturated seepage[J]. Chinese Journal of Electric Power Survey & Design, 2017, **12**(6): 1 - 4. (in Chinese))
- [8] 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. (WU Hong-wei, CHEN Shou-yi, PANG Yu-wei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(1): 1 - 14. (in Chinese))
- [9] 李景娟, 谢罗峰, 段祥宝. 灰坝加高条件下渗流与应力稳定分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(6): 177 - 181. (LI Jing-juan, XIE Luo-feng, DUAN Xiang-bao. An analysis of seepage and stress stability of the ash heightened dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(6): 177 - 181. (in Chinese))
- [10] 周成利, 张全红. 山谷灰场土坝坝体及坝肩渗流分析[J]. 山西电力, 2013(1): 69 - 72. (ZHOU Cheng-li, ZHANG Quan-hong. The leakage analysis of the dam body and dam shoulders of the valley ash pond earth dam[J]. Shanxi Electric Power, 2013(1): 69 - 72. (in Chinese))
- [11] 段 涛, 张爱军, 李大可, 等. 基于 Underflow-3D 的灰坝渗流计算[J]. 人民黄河, 2009, **31**(4): 111 - 113. (DUAN Tao, ZHANG Ai-jun, LI Da-ke, et al. Seepage analysis of fly ash dam based on Underflow-3D[J]. Yellow River, 2009, **31**(4): 111 - 113. (in Chinese))
- [12] 金梅玉. 发电厂贮灰场坝体的渗流及稳定性研究[J]. 内蒙古电大学刊, 2009(1): 69 - 70, 84. (JIN Mei-yu. Seepage and stability study of dam body of ash storage field in power plant[J]. Journal of Inner Mongolia RAD & TV University, 2009(1): 69 - 70, 84. (in Chinese))
- [13] 陈宇棠, 李广杰, 夏广卿. 吉林热电厂贮灰场坝体渗流分析[J]. 山西建筑, 2007(28): 17 - 18. (CHEN Yu-tang, LI Guang-jie, XIA Guang-qing. Seepage analysis of ash storage dam of Jilin thermal power plant[J]. Ahanxi Architecture, 2007(28): 17 - 18. (in Chinese))
- [14] 罗启北, 张艳霞, 刘东波. 贮灰场渗流分析及 ANSYS 二次开发技术研究与应用[J]. 水力发电学报, 2007(3): 115 - 119. (LUO Qi-bei, ZHANG Yan-xia, LIU Dong-bo. Seepage analysis of ash disposal area and further development technique of ANSYS[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(3): 115 - 119. (in Chinese))
- [15] 金 生, 耿艳芬, 王志力. 利用饱和-非饱和渗流模型计算坝体自由面渗流[J]. 大连理工大学学报, 2004(1): 110 - 113. (JIN Sheng, GENG Yan-fen, WANG Zhi-li. Computation of seepage flow of dam's free surface by using saturated unsaturated model[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004(1): 110 - 113. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)