

文章编号:1673-0062(2018)01-0015-05

急降雨对尾矿堆积子坝溃坝影响的试验研究

曾 晟¹,周 杰¹,孙 冰²

(1.南华大学 核资源工程学院,湖南 衡阳 421001;2.南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:为探究尾矿堆积子坝在不同降雨量作用下的溃坝反应,以湖南某尾矿堆积子坝中尾砂为试验材料,采用自制的尾矿子坝溃决破坏试验装置,探究尾矿在下游运移的长度和淹没高度与降雨的关系.试验结果表明:1)不同降雨工况下,尾砂下游运移长度和淹没高度呈现不同状态.在距离原子坝较远处,随降雨量的增加,溃坝运移距离和淹没高度都相应增加.2)试验中降雨强度取0、20、40、60和80 mm/h,近坝体部位降雨强度为60 mm/h时对子坝危害最严重,较远处降雨强度为80 mm/h时对下游危害严重.3)近坝体处,降雨强度为0和20 mm/h时淹没高度较接近,降雨强度为40 mm/h和80 mm/h较接近;稍远处降雨强度60 mm/h和80 mm/h较接近.研究成果为急降雨导致尾矿子坝呈现不同的破坏状态,进而溃坝这一灾害的演进提供参考,对加强子坝防护,增加坝体整体安全等级措施方面提供依据.

关键词:边坡工程;堆积子坝;溃坝;降雨量;相似模拟试验

中图分类号:TD7 **文献标志码:**A

Experimental Study on the Influence of Emergency Rainfall on the Tailings Stacking Dam

ZENG Sheng¹, ZHOU Jie¹, SUN Bing²

(1.School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to explore the tailings stacking dam response in different rainfall and the relationship between the length of the downstream migration, the height of the submergence and the rainfall, the destructive testing device of tailings dam was developed. And the experiment used tailings sand in a tailings stacking dam in Hunan. The experimental results show that: 1) under different rainfall conditions, the length of the downstream migration and the height of the submergence are different. At the distance from the tailings dam, the migration distance and the submerged height of the dam increase correspondingly with the

收稿日期:2018-01-20

基金项目:湖南省研究生科研创新项目(CX2016B435)

作者简介:曾 晟(1977-),男,副教授,博士,主要从事矿山岩石力学方向的研究.E-mail:zeng0808@126.com

increasing rainfall.2) the intensity of rainfall in the test is 0,20,40,60 and 80 mm/h.Near the dam,the most serious hazard to sub dam is when the rainfall intensity is 60 mm/h. When the rainfall intensity is 80 mm/h,it damages the downstream seriously.3) the submergence height is closer near the dam when the rainfall intensity is 0 and 20 mm/h.The submergence height is closer near the dam when the rainfall intensity is 40 mm/h and 80 mm/h.The submergence height is closer far away from the dam when the rainfall intensity is 60 mm/h and 80 mm/h.The research provides a reference for the evolution of tailings dam break due to the sudden rainfall.It provides a basis for strengthening the protection of sub dam and increasing the safety level of the dam.

key words: slope engineering; stacking dam; dam break; rainfall; similar simulation test

0 引言

尾矿库是筑坝拦截谷口或围地构成的,用以堆存金属或非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿或其他工业废渣的场所;尾矿坝是储存尾矿和水的围堰构筑物,分为初期坝和堆积坝.据资料显示,尾矿坝溃坝的危害仅次于地震、洪水和氢弹爆炸等危害,一旦失事,破坏力巨大的泥石流将涌向下游,必将对下游地区人民的生命和财产造成巨大危害,对环境造成严重污染^[1-3].对于尾矿坝溃决,其中水起到很关键的作用.一方面因储存尾矿和水引起自身坝体含水率的变化,影响尾矿坝内部力学性能;另一方面源于大气急降雨,水无法及时排除,导致坝体含水率过高,引起溃坝.

在降雨对坝体的影响方面,国内外学者做了很多研究,并得出很有意义的结论.如在尾矿含水率较低时,尾矿砂接近于散体状态,黏聚力、内摩擦角和抗剪强度相对较小,当含水率增加至饱和含水率过程中,内摩擦角、黏聚力和抗剪强度先增加后减小^[4-5].降雨量影响尾矿坝的含水率及负孔隙水压力(即基质吸力)^[6]、影响尾矿库浸润线的高度^[7]和影响尾矿坝的最小安全系数^[8],进而影响坝体边坡的稳定性.降雨条件引起的尾矿坝溃决后,能形成极强的砂流冲击波,危害巨大.绝大部分情况下尾矿库坝体都是局部或部分溃决^[9-10],本实验重在研究急降雨条件下单个堆积子坝的溃坝危害,探讨不同降雨强度对尾矿的运移距离和溃坝高度的影响,为尾矿堆积坝在强降雨下稳定性分析以及尾矿堆积坝的设计提供依据.

1 急降雨溃坝试验

1.1 试验材料及设备

试验尾砂取自湖南某铜矿尾矿库内,用型号

为 101-1A 型烘干箱在 105 ℃ 的温度下,烘干时长达 12 h,将实验尾矿砂烘干后测得其密度为 ρ 为 $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,通过筛分试验结果分析得到尾矿砂颗粒的分布和累计级配,尾矿砂颗粒粒径分布集中在 0.315 mm 以下,如图 1 所示.因此,本次实验选取粒径小于 0.315 mm 的尾砂进行试验,其中 0.16~0.315 mm 和 0.08~0.16 mm 的尾砂占选取尾砂的 2/5,粒径小于 0.08 mm 的尾砂占选取尾砂的 1/5.试验采用直径为 100 mm 和高为 400 mm 的渗水桶进行,尾砂分层装入的次序为:最下面层装入粒径小于 0.08 mm 的尾砂量为桶容量的 1/5;中间层装入粒径 0.08~0.16 mm 的尾砂量占桶容量的 2/5;最上层装入粒径 0.16~0.35 mm 的尾砂占桶容量的 2/5.用维西尔 YZ15 蠕动泵能够使加入的尾砂在稳定流速下达到饱和状态,测出尾砂需水量.

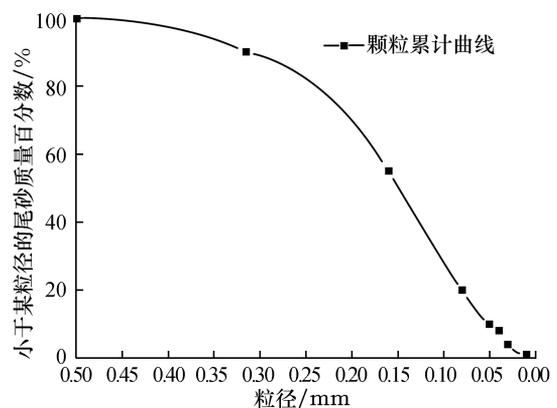


图 1 尾矿库内尾砂颗粒累计曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of tailings

溃坝试验模拟装置采用钢化玻璃、木架、斜梁等自制而成,模拟尾矿堆积子坝设置比例为 1:15,模型 A 部前后,底部以及左侧为钢化玻璃,在离地表面高 600 mm 上构筑堆积坝体;B 部

为斜坡,长 2 474 mm,坡度为 14°(模拟现场坡度为 14°,坡长为 37 m 的下游状况),分成 3 段,每段之间用玻璃胶连接,并用刀片刮平,保持光滑度;B 部前后还有底部为钢化玻璃,如图 2 所示.

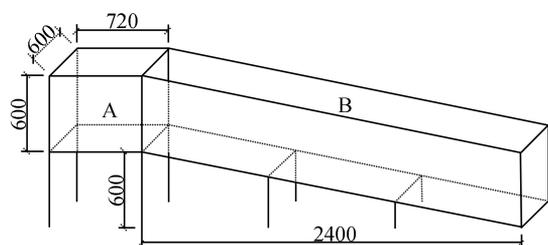


图 2 试验装置
Fig.2 Test device

1.2 试验步骤与方法

采用尾矿坝溃坝相似模拟试验装置,进行不同程度的降水,使尾砂呈现不同的含水率,探究堆积子坝溃坝砂流的运移模拟研究.具体步骤:调整支架高度,保证尾砂运移坡度为 14°;在 A 部堆积子坝,子坝高度为 18 cm(相当于现场堆积子坝高度 2.7 m).试验分 3 层堆积,最底部为粒径小于 0.08 mm 的尾砂,中部为 0.08~0.16 mm,最上部为 0.16~0.315 mm 的尾砂,各粒径尾砂堆积量见表 1.在 A 与 B 之间加入围挡,上部施加荷载,压实堆积坝;按照不同的降雨强度,将分层的尾砂每小时均匀加入不同质量的水;待 1 h 后,迅速抽出围挡,使堆积子坝全溃,用数码像机摄取溃坝全过程,并记录尾砂下游溃坝高度及运移距离,整理数据.

表 1 试验尾砂量

Table 1 Tailings required for the test

颗粒粒径/mm	<0.08	0.08~0.16	0.16~0.315
重量/kg	22.2	44.3	44.3

2 实验结果与分析

2.1 尾矿砂饱和含水率

计算尾砂饱和需水量的试验中,在最上层尾砂面施加荷载,随荷载的变大,压强增加,尾砂饱和和时需水量减小,如图 3 所示.堆积尾矿子坝高度为 18 cm,子坝上部加荷,压实尾砂,使尾砂上部压强达到 8 kPa,此时堆积子坝底部压强达到 10.56 kPa,为探求其整个坝体饱和时的需水量,取 9.28 kPa 时尾砂饱和需水量,计算出尾砂饱和

含水率为 27.9%.溃坝试验中,在降雨强度分别为 0、20、40、60 和 80 mm/h,降雨时长为 1 h 的水量能使得堆积坝的含水率呈现 0、7.8%、15.59%、23.39%和饱和状态.

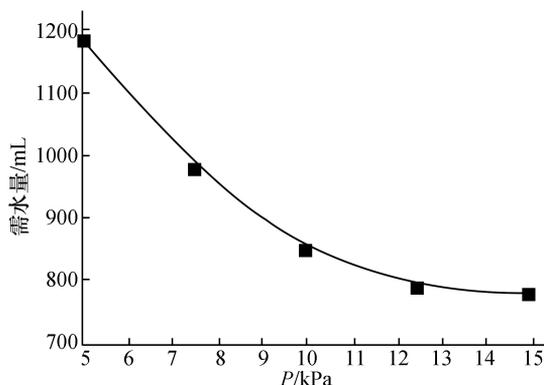


图 3 尾砂饱和需水量

Fig.3 Saturated water requirement of tailings

2.2 不同降雨强度的尾矿子坝溃坝特征

根据上述试验步骤,分析不同降雨强度堆积坝体溃坝后下游运移高度与溃坝距离,如图 4 所示.

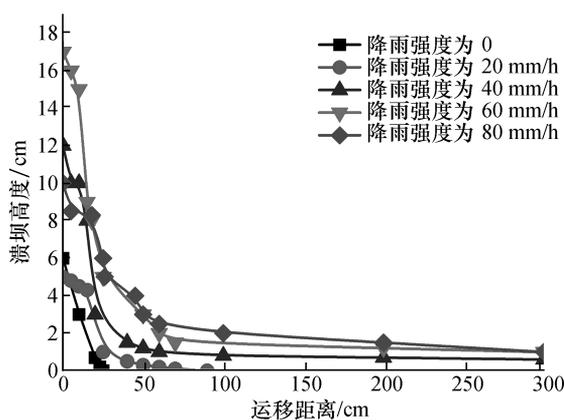


图 4 不同降雨强度堆积坝溃坝运移对比

Fig.4 Migration comparison of dam break in different intensity rainfall

1) 不同降雨强度的溃坝特征

降雨强度为 0 时,尾砂堆积子坝高度为 18 cm,对于不降雨的情况,尾砂集中在离坝体原位置的 20 cm 处,并终止于 25 cm.尾砂运移高度下降很快,离坝体较远处不受溃坝影响.在距离为 0 处,高度为 6 cm,此处为溃坝高度最高处.该条件下尾砂迅速下落,瞬间达到其自然休止角,不受其他因素扰动情况下能保持稳定,对下游绝大部分无危害.

降雨强度为 20 mm/h 时,坝体中上部滑落黏在一起的尾砂块,并伴有少部分较小尾砂黏团滚至距原坝体 40~70 cm 处,所有滑落体都处于 80 cm 之前.尾砂块在坡度为 14° 的情况下,靠自身的摩阻力能够保持稳定,没有下滑迹象.在 40 cm 以后,运移尾砂高度低于 0.5 cm,危害基本可以忽略.因此,该条件下,降雨强度实际影响最大部分集中在距坝体 3 m 以内.

降雨强度为 40 mm/h 时,迅速抽出挡板,堆积子坝全溃.在 0 处,溃落尾砂高度达 12 cm.随运移距离的增加,溃坝高度下降明显,与不降雨和降雨强度为 20 mm/h 相比,尾砂运移长度贯穿整条斜坡,在 40 cm 处高度降至 1 cm,在 200 cm 处高度为 0.6 cm.尾砂大部分集中在距原坝体 25 cm 处,溃下尾砂由于自身粘聚力作用,与原坝体黏结在一起.还有部分尾砂滑至下游斜坡末端.

降雨强度为 60 mm/h 时,尾砂在距原坝体为 0 处高度较上述降雨强度继续上升,达到 17 cm,且在 25 cm 处高度仍在 9 cm,存在较大的危害,这是因为此时的黏聚力大,溃坝后大部分还与原坝体黏结在一起,溃坝后的坝体高度仅稍低于原坝体.在距离大于 70 cm 时,溃坝高度略大于降雨强度为 40 mm/h 的情况,趋势相类似.

降雨强度为 80 mm/h 时,尾砂之间黏聚力较降雨强度为 60 mm/h 的有所减小,溃坝高度的变化较降雨强度为 60 mm/h 的缓,且高度最高为 10 cm.在距离为 50 cm 时,尾砂淹没高度为 3 cm.在距原坝体 100 cm 以上时,淹没高度较上述几个降雨强度高,趋势和降雨强度为 40 mm/h 和 60 mm/h 的相当.

2) 对比分析

对于不同程度的降水,特别是急降雨,对下游的影响是巨大的.不同程度降水导致含水率的不同,进而影响溃坝后下游的危害程度,如图 4 所示.在降雨强度为 60 mm/h 时,起初的运移高度最高,随溃坝距离的增加,下降最明显;其次为降雨强度为 40 mm/h 和 80 mm/h,最后是不降雨和降雨强度为 20 mm/h.说明在降雨条件为 60 mm/h 情况下近坝体危害极为严重,此时黏聚力最高.不降雨的状态下,溃坝运移止步于 50 cm 之前;降雨强度为 20 mm/h 时,溃坝危害影响在 100 cm 处终结;在降雨强度为 40 mm/h 及以上时,尾砂运移距离达到斜坡全程,在高度方面随降雨强度的增加呈增长的趋势,但增长的幅度不大.在降雨强度为 60 mm/h 时,近坝体危害最严重,在距坝体约 18 cm 处,降雨强度为 60 mm/h 与 80 mm/h 的

含水率子坝溃坝后危害相当,并在之后超过降雨强度为 60 mm/h 的情形,成为试验中危害最严重的.降雨强度为 20 mm/h 和不降雨的状况较为接近,在很小的范围内,不降雨的危害高于降雨强度为 20 mm/h;后期危害降雨强度为 20 mm/h 的大,并范围广.降雨强度为 80 mm/h 和 40 mm/h 的情况在距坝体 18 cm 内较接近,且降雨强度为 40 mm/h 的危害大;在 18 cm 后,降雨强度为 80 mm/h 和 60 mm/h 较接近,且降雨强度为 80 mm/h 的危害更大.

3 结 论

对堆积子坝进行相似模拟试验,考虑到不同降雨强度对溃坝后尾砂运移的影响.试验结果表明:

1) 仅研究堆积坝中一级子坝的溃坝反应,与尾矿坝整体全溃相比,急降雨下最易导致局部溃决,最上部的堆积子坝最先受到冲击.不同降雨强度下堆积子坝溃坝后的运移高度大致呈现先高后低状,运移距离与溃坝高度之间关系在距原坝体 25~50 cm 间转折的比较突兀,没有呈现较缓的坡度.

2) 在距原坝体与坝高相当的位置内,降雨强度为 60 mm/h 的堆积子坝溃坝危害最大.在距起始位置超过坝高的范围内,降雨强度为 80 mm/h 的子坝溃决产生的危害最严重.降雨强度为 60 mm/h 的坝体溃坝时近坝体淹没高度与子坝高度相当,而降雨强度为 40 mm/h 和 80 mm/h 约为子坝高度的 2/3,不降雨和降雨强度为 20 mm/h 的则更小,约为子坝高度的 1/3.

3) 在距离大于约 5.5 个坝体高度时,降雨强度为 20 mm/h 和不降雨的坝体溃坝无影响,而后降雨强度大于 40 mm/h 时,随降雨强度的增加尾砂运移高度略有上升,增加幅度较小.随着降雨强度的增加,溃坝运移的能力显著增强,干尾砂对下游较远处基本无危害.急降雨能够快速改变坝体内部力学性能,影响坝体稳定,并在溃坝的运移演进方面具有很重要的作用,应该引起足够重视.

本文仅考虑到降雨强度的变化对最上层堆积坝体的危害,对于降水引起其他部位的溃决以及由上部子坝的扰动导致其他坝体一系列的溃坝链式反应还未进行深入探索,需要进一步研究.

参考文献:

- [1] 于广明,宋传旺,潘永战,等.尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J].岩石力学与工程学报,2014,(增刊1):3238-3248.

研究表明:利用单通道模型热工程序与 MCNP 间接耦合的方法可得到更为可信的结果,计算代价也并不高,因而在反应堆的概念设计过程中值得采用。

参考文献:

- [1] 陈文振,于雷,郝建立.核动力装置热工水力[M].北京:中国原子能出版社,2013.
- [2] SNOJ L, RAVNIK M. Calculation of power density with MCNP in TRIGA reactor[J]. Nuclear energy for new europe, 2006(9):18-21.
- [3] 咸春宇. 华龙一号安全设计与防城港二期示范工程进展[J]. 南方能源建设, 2015, 2(4):8-10.
- [4] 中国核工业集团公司, CNP1000 核电厂工程技术方案[J]. 现代电力, 2006(5):39-48.
- [5] 杜景晖. MCNP5 在 CANDU 堆芯物理参数模拟中的应用[J]. 科技风, 2015(4):88.
- [6] 马腾跃, 杨宁, 张信一, 等. 基于单通道模型的 ADS 堆芯物理热工耦合计算[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(4):604-608.
- [7] DAWID Taler. Simple power-type heat transfer correlations for turbulent pipe flow in tubes[J]. Journal of thermal science, 2017, 26(4):339-348.
- [8] 路广遥. 管束通道内单相及两相沸腾换热特性及流动特性的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [9] 何丽华, 于涛, 郑平卫, 等. 阶跃反应性扰动及温度变化下压水堆堆芯响应特性的 SIMULINK 仿真[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2015, 29(1):16-21.

(责任编辑:龙威)

(上接第 18 页)

- [2] JU H Y, GAO G Q, LI Q X, et al. Analysis of safety and risk factors about the tailings dam in the mental mines[J]. Advanced materials research, 2012, 594-597:299-302.
- [3] WEI O Y, LI W J. Online monitoring system of tailing dam seepage line in abominable weather[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 340:913-919.
- [4] 李志平, 彭振斌, 肖尊群, 等. 含水率影响下尾矿砂内摩擦角随标贯击数变化研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5):1340-1344.
- [5] 李雪梅, 陈玉明, 袁利伟, 等. 含水率对尾矿抗剪强度影响的试验研究[J]. 黄金, 2016, 37(4):70-73.
- [6] CHEN R, ZHANG B Z, LEI W D, et al. Response of soil suction to heavy rainfalls in a tailings dam[J]. Advanced materials research, 2011, 250-253:1681-1685.
- [7] 陈生水, 邓翌, 钟启明. 连续降雨下尾矿库失稳溃坝数学模型研究与应用[J]. 金属矿山, 2016(10):165-170.
- [8] 陈承, 程三建, 张亮, 等. 降雨对良山太平尾矿坝稳定性影响分析[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(2):94-98.
- [9] 尹光志, 敬小非, 魏作安, 等. 尾矿坝溃坝相似模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2):3830-3838.
- [10] ZHANG S, ZHANG L, QI Q, et al. Numerical simulation of the characteristics of debris flow from a tailing pond dam break[J]. International journal of heat and technology, 2015, 33(3):127-132.

(责任编辑:扶文静)

(上接第 33 页)

- [26] SEPEHRI S, HEIDARPOUR M, JAHANGIR A K. Nitrate removal from aqueous solution using natural zeolite-supported zero-valent iron nanoparticles[J]. Soil and water research, 2014, 9(4):224-232.
- [27] UZVM C, SHAHWAN T, EROGLU A E. Synthesis and characterization of kaolinite supported zero valent iron nanoparticles and their application for the removal of aqueous Cu^{2+} and Co^{2+} ions[J]. Applied clay science, 2009, 43(2):172-181.
- [28] 曾维特, 张金川, 丁文龙, 等. 延长组页岩储层纳米级孔隙特征及影响因素—以鄂尔多斯盆地柳坪 171 井为例[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6):1118-1126.
- [29] 易正戟, 曹新星, 谢叶归. 零价铁固定 U(VI) 的反应动力学及反应机理研究[J]. 采矿技术, 2009, 9(2):56-61.
- [30] 冯婧微, 梁成华, 王黎, 等. 零价纳米铁对水中 Cr(VI) 的吸附动力学研究[J]. 科技导报, 2011, 29(24):37-41.
- [31] 张小宝, 刘宏芳, 庆伟, 等. 零价纳米铁去除 ReO_4^- 的研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(5):7-10.

(责任编辑:龙威)