

细粒尾矿堆坝加筋加固模型试验研究

尹光志^{1,2}, 魏作安^{2,3}, 万玲^{1,2}, 张东明^{1,2}

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘要: 采用龙都尾矿库内的细粒尾矿作为试验材料, 以该尾矿库的设计尾矿坝为原形堆积尾矿坝体模型, 进行细粒尾矿堆坝加筋加固模型试验。通过模型试验, 检验了细粒尾矿堆积的尾矿堆坝加筋加固的作用效果, 获得了加筋尾矿坝体与不加筋尾矿坝体的不同破坏模式, 在细粒尾矿堆坝的稳定性研究以及将加筋材料应用于尾矿坝的加固方面作了一些新的探索。

关键词: 建筑材料; 尾矿库; 细粒尾矿; 模型试验; 加筋加固

中图分类号: TU 502

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)06-1030-05

TEST STUDY ON STABILITY OF FINE GRAINED TAILINGS DAM IN GEO-GRID REINFORCEMENT SITUATION

YIN Guang-zhi^{1,2}, WEI Zuo-an^{2,3}, WAN Ling^{1,2}, ZHANG Dong-ming^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Taking the materials of the fine tailings from Longdu tailings pond as a case study, the model, based on the design tailings dam of Longdu tailings pond, was performed to study the stability of fine grained tailings dam in two situations, with and without geo-grid reinforcement. The effects of geo-grid reinforcement were verified. At same time, the failure patterns of dam with and without reinforcement were presented, where the former slide surface is found to be rotational and the later to be wedge. The results provide a new approach in the stability research on fine-grained tailings dam and the application of geo-grid.

Key words: Building material; tailings pond; fine grained tailings; model test; geo-grid reinforcement

1 引言

由于尾矿库是一种特殊的工业建筑物, 也是矿山三大控制性工程之一。它的运营好坏, 不仅直接

影响到一个矿山企业的经济效益, 而且与周围居民的生命财产及周边环境息息相关^[1]。在我国矿山由于尾矿库工程失效, 造成严重危害的事例屡见不鲜。据有关资料统计, 我国黑色、有色、黄金、化工、核工业、建材等行业的矿山每年产出尾矿约 $3 \times$

收稿日期: 2003-10-13; 修回日期: 2003-12-02

基金项目: 高等学校优秀青年教师教学与科研奖励计划资助项目

作者简介: 尹光志(1962-), 男, 博士, 1982年毕业于重庆大学采矿工程系, 现任教授、博士生导师、院长、西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室主任, 主要从事矿业工程、安全工程和岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: jiangxi3215@sina.com。

10^8 t, 其中, 有相当部分尾矿为细粒尾矿。

细粒尾矿堆坝分两种情况^[2]: 一种情况是选矿厂排出的全尾矿本身就属于细粒尾矿, 像云南锡业公司的细粒尾矿就是这一类; 另一种情况是选矿厂排出的全尾矿本身不是细粒尾矿, 由于生产上需要尾矿井下充填, 全尾矿经过分级处理后, 较粗部分用于井下充填, 余下较细部分即细粒尾矿被输送到尾矿库堆坝。大红山铜矿龙都尾矿库的细粒尾矿就属于这一类。

当尾矿中的细粒成分占到一定比例时, 用于堆坝就很困难, 尤其是堆积高坝就更难。目前, 细粒尾矿堆坝高度未超过 30 m。细粒尾矿堆坝主要涉及到尾矿库的安全问题, 由于尾矿粒径变细, 造成堆坝质量变差, 尾矿坝的稳定性降低; 同时, 由于干滩面坡度比较缓, 使得库区防洪能力减弱。据有关资料表明, 在我国高含泥极细颗粒尾矿堆坝的病害率偏高, 并建议对高含泥极细颗粒尾砂能否用上游法筑坝进行研究。从矿山发展和环境保护方面考虑, 都希望能解决好细粒尾矿堆积高坝的问题, 1995 年中国有色总公司把细粒尾矿堆积高坝作为尾矿处理技术发展的方向之一^[3]。

为此, 作者经过综合研究分析, 在细粒尾矿堆坝方面, 得出了一种新的筑坝方法, 即加筋梯田法^[4]。通过加入土工合成材料(筋材)来提高坝体的稳定性, 为了检验加筋加固的效果, 采用与现场相似或相近的物理模型, 进行了室内模型试验研究, 得出了加筋能提高细粒尾矿堆坝稳定性等一系列新的成果。

2 细粒尾矿的定义及堆坝特性

目前, 细粒尾矿没有严格的定义, 根据资料^[3, 5], 细粒尾矿是指平均粒径 d_{cp} 0.03 mm 的尾矿, 其中, 小于 0.019 mm 粒径含量一般大于 50%; 大于 0.074 mm 粒径含量一般小于 10%; 大于 0.037 mm 粒径含量一般小于或等于 30%。

根据国内筑坝的实践, 一般认为: 大于 0.037 mm 粒径的尾矿在分散放矿时可以形成沉积滩; 0.037 ~ 0.019 mm 粒径的尾矿沉积较好; 小于 0.019 mm 粒径的尾矿不易沉积。当悬液浓度为 5% ~ 10%, 潜流速度超过 10 cm/s 时, 可能发生异重流。所以, 把 0.020 mm 作为筑坝的分界粒径。我国云南锡业公司的大多数尾矿属于细粒尾矿, 并用它堆积了一

批尾矿堆坝(坝高在 20 m 左右)。

3 细粒尾矿堆坝加筋加固模型试验

3.1 模型试验目的

物理模型试验是指在实验室条件下, 按照事物原型, 用不同比例尺(包括缩小、放大及等尺寸)模型, 对工程问题或现象进行研究的一种重要的科学方法^[6]。物理模型试验作为工程科学研究的一种手段, 不仅越来越受到科研人员的高度重视, 而且应用范围也越来越广。通过物理模型试验, 可以揭示和分析现象的本质和机理, 可以验证理论并解决工程实际问题。对实体可能出现的一些情况作超前了解, 同时也可检验对实体所作某些假设的正确性。

通过细粒尾矿堆坝加筋加固物理模型试验, 可以测试、检验细粒尾矿堆积坝体未来的稳定性和可能出现的破坏情况; 同时, 检验坝体实施加固措施(加筋)后的稳定情况; 探索尾矿坝加筋加固前后的破坏形式和破坏机理, 寻求一些规律。

3.2 试验研究内容

试验研究内容主要有: (1) 以龙都尾矿库的设计资料为基础, 按照 1 : 200 的比例尺缩小, 堆积尾矿坝体(+600 m 标高)模型, 测试其稳定性; (2) 按照加固设计资料, 在尾矿堆坝中加设筋带, 以检测筋带的加固效果以及作用机理; (3) 探索细粒尾矿堆坝加筋前后的破坏形式与破坏机理。

如图 1 所示, 按照龙都尾矿的设计资料, 考虑到初期坝为块石坝和堆积坝体中的关键性标高等, 这次模型试验只模拟 +550 ~ +600 m 的坝体, 这段坝体也是龙都尾矿库(坝)最危险的地段, 也是细粒尾矿堆积坝段, 这段坝体的主要参数为: 高度为 50 m, 坝坡为 1 : 5, 坝坡在水平方向上的投影长度为 250 m, 考虑到加筋测试, 干滩面长度取 100 m, 这样模拟坝体的实际尺寸为: 50 m × 350 m (高度 × 长度)。按照 1 : 200 的比例缩小, 则模型的尺寸为: 25 cm × 175 cm。

3.3 模型试验装置

模型试验装置主要由 3 部分组成: 试验槽、垂直加压系统以及垂直和水平位移监测标志。其中, 试验槽的外形尺寸为 200 cm × 50 cm × 50 cm (长 × 宽 × 高), 考虑到能观察坝体破坏过程和破裂面, 试验槽的材料采用厚度为 10 mm 的透明钢化玻璃。加压系统由加力架、油压千斤顶和加载板组成。位移监

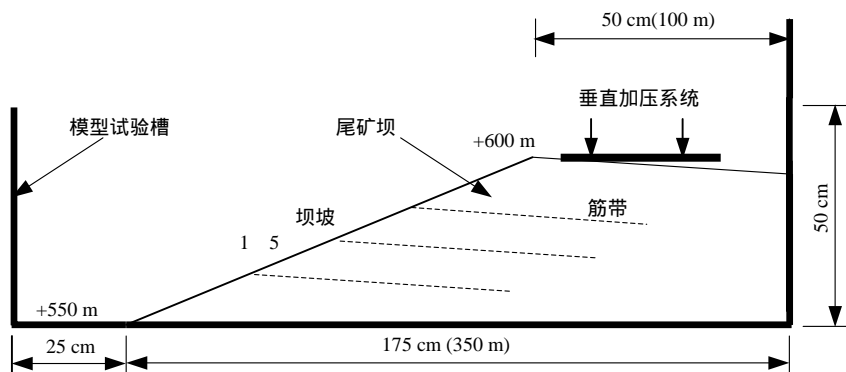


图1 模型试验示意图

Fig.1 The scheme of model test

测标志,是在尾矿堆积过程中,在坝体内靠试验槽壁处设置标志点,并在试验槽壁外侧对应位置设置标记。整个模型试验装置如图2所示。



图2 模型试验装置

Fig.2 The settings of model test

3.4 试验材料

细粒尾矿堆坝物理模型试验的细粒尾矿,来源于大龙都尾矿库,其颗粒组成见表1^[7]。加筋材料,参考相似的路基加筋及挡土墙加筋模型试验资料^[8~10],采用窗纱代替土工格栅。

表1 细粒尾矿堆坝的颗粒组成

Table 1 The ingredients of fine grain tailings %

介质	粒径/mm				
	> 0.074	0.074 ~ 0.037	0.037 ~ 0.018	0.018 ~ 0.01	< 0.01
细粒尾矿	3.50	16.50	26.00	28.00	26.00

3.5 试验结果

试验时,先按设计的尾矿堆坝的几何尺寸堆积模型,考虑到实际尾矿堆坝的最大特点是尾矿基本处于饱水状态,所以在试验前,先在坝体的顶部(干

滩面处)加水,使整个坝体处于饱水状态,然后再施加垂直荷载等。不同工况下模型坝体破坏的垂直荷载见表2。

表2 不同工况下模型坝体破坏时的垂直荷载

Table 2 The failure vertical load of dam's model under different conditions kPa

不加筋状态			加筋间距为 4 cm			加筋间距为 6 cm		
1 [#]	2 [#]	3 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]
15.56	17.08	15.64	22.72	22.08	21.84	20.6	21.96	21.28

同时,在模型中布置了5个位移监测点,其中,3[#]监测点的测试结果比较典型,如图3,4所示。坝体模型破坏面形状如图5所示。

3.6 试验结果分析

通过模型试验,可以得出如下几点结论:

(1) 首次以细粒尾矿作填料土进行尾矿堆坝模型试验,研究细粒尾矿堆坝加筋与不加筋工况坝体稳定性,取得了很好的效果,试验成果可为尾矿坝和类似工程的加固提供参考。

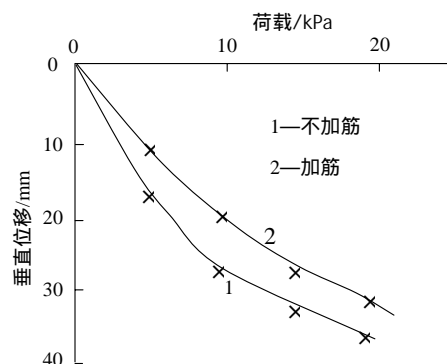
图3 3[#]监测点加筋与不加筋垂直位移曲线

Fig.3 The curves of vertical displacement at monitoring point No.3 with and without reinforcement

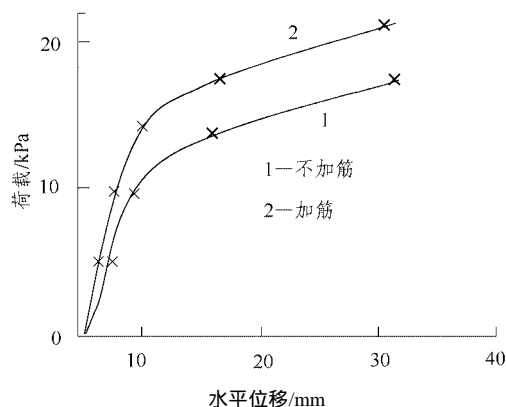


图 4 3#监测点加筋与不加筋水平位移曲线

Fig.4 The curves of horizontal displacement at monitoring point No.3 with and without reinforcement

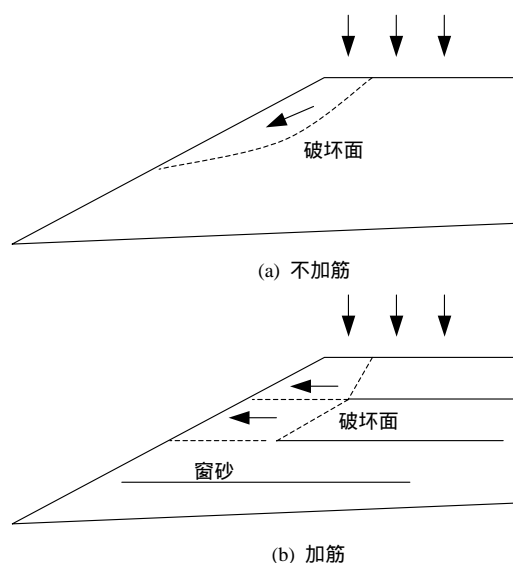


图 5 坝体模型破坏面形状

Fig.5 The failure face of model dam

(2) 从表 2 可以看出, 细粒尾矿堆坝模型加筋加固后, 坝体承受垂直荷载的能力增加了 15% ~ 30%, 证明加筋能提高细粒尾矿堆坝的稳定性。

(3) 从图 3, 4 可以看出, 在同等垂直荷载作用下, 坝体加筋与不加筋相比, 加筋后坝体标志点的水平和垂直位移比不加筋的要小, 证明加筋后坝体抵抗变形的能力增强, 坝体稳定性也增加。

(4) 加筋间距不同, 即 ΔH 分别取 4, 6 cm, 在同等正压力下, 坝体标志点的水平位移与垂直位移相差不大; 同时, 承受垂直荷载的大小相差也不大。

(5) 从图 5 可以看出, 不加筋坝体模型破坏呈弧形, 而加筋后坝体模型破坏时, 只是沿窗砂的层状水平位移加大, 无明显的连续破坏面, 呈楔型破坏。

(6) 试验后, 窗纱未发生拉断破坏, 只是网眼

产生变形, 有的网眼被挤大。

4 结 语

由于是首次进行细粒尾矿堆坝模型试验, 尽管获得了很多很好的资料和信息, 但还有很多地方需要改进, 如模型的尺寸稍大些, 则效果可能会更好些。此外, 库内水的问题以及地下水的问题等, 还值得更深入探讨与研究。

参考文献(References):

- [1] 魏作安, 尹光志, 沈楼燕等. 探讨尾矿库设计领域中存在的问题[J]. 有色金属(矿山部分), 2002, (4): 44-45.(Wei Zu'an, Yin Guangzhi, Shen Louyan, et al. Discussing some existing problems on tailings pond design[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2002, (4): 44-45.(in Chinese))
- [2] 陈守义. 浅议上游法细粒尾矿堆积坝问题[J]. 岩土力学, 1995, 16(3): 70-76.(Chen Shouyi. Some superficial views on the problem of building fine grain tailings fill dams by means of up-stream method[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(3): 70-76.(in Chinese))
- [3] 《中国有色金属尾矿库概论》编辑委员会. 中国有色金属尾矿库概论[R]. 北京: 中国有色金属工业总公司, 1992.(Editorial Committee of China Nonferrous Metals Tailings Ponds Conspectus. China nonferrous metals tailings ponds conspectus[R]. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Company, 1992.(in Chinese))
- [4] 魏作安. 细粒尾矿及其堆坝稳定性研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2004.(Wei Zu'an. Research on the characteristics and dam stability of fine grained tailings[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.(in Chinese))
- [5] 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.(Editorial Group of Tailings Establishments Design References Data. References Data of Tailings Establishments Design[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1980.(in Chinese))
- [6] 雷阿林, 唐克丽. 土壤侵蚀模型试验的原型选定问题[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 60-65.(Lei Alin, Tang Keli. Discussion on choosing prototypes in simulated test of soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(3): 60-65.(in Chinese))
- [7] 尹光志, 张东明, 魏作安等. 土工合成材料与细粒尾矿界面作用特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 426-429.(Yin Guangzhi, Zhang Dongming, Wei Zu'an, et al. Testing study on interaction characteristics between fine tailings and geosynthetics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2004, 23(3): 426–429.(in Chinese))
- [8] 徐林荣, 华祖焜. 加筋边坡承载力和位移模型试验及结果分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(1): 73–76.(Xu Linrong, Hua Zukun. Model tests and investigation on the bearing capacity and displacement of geogrids-reinforced slope[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(1): 73–76.(in Chinese))
- [9] 朱 湘, 黄晓明. 加筋路堤的室内模拟试验和现场沉降观测[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 386–388.(Zhu Xiang, Huang Xiaoming. Laboratory simulating test and field settlement observation of reinforced embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 386–388.(in Chinese))
- [10] 梁 波, 孙遇祺. 加筋土模型试验中的拉力破坏研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 83–87.(Liang Bo, Sun Yuqi. A study on the tensile failure of reinforced earth retaining wall with model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 83–87.(in Chinese))

第五届全国地面岩石工程学术会议中南地区岩石力学与工程学术会议 (2005 年 10 月 湖南)

第 1 号通知

“第五届全国地面岩石工程学术会议中南地区岩石力学与工程学术会议”将于 2005 年 10 月在湖南省张家界市召开。这次会议的主题为“地面岩石工程建设与环境的协调”。主办单位为中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会、湖南省岩石力学与工程学会、湖北省岩石力学与工程学会、河南省岩石力学与工程学会、广东省岩石力学与工程学会、广西省岩石力学与工程学会、海南省岩石力学与工程学会、香港大学土木工程系及湖北省力学学会；承办单位为湖南省岩石力学与工程学会、中南大学及中国科学院武汉岩土力学研究所；协办单位为中南勘测设计研究院、湖南省宏禹水电岩土工程公司、《岩石力学与工程学报》及《岩土力学》；这些会议的专题有：(1) 矿山开采诱发的地质灾害；(2) 水电工程中人工开挖高陡边坡；(3) 水库岸坡稳定；(4) 山区高速公路工程中路基与边坡；(5) 矿山复垦与生态边坡；(6) 地下与地面岩石工程协调设计；(7) 数字岩土工程；(8) 岩土工程新材料新设备。

会议论文清稿请参考《岩石力学与工程学报》及《岩土力学》征稿要求撰写，字数(含图)一般不超过 4 页。会议优秀论文将以全国中文核心期刊、EI 收录期刊《岩石力学与工程学报》、《岩土力学》专刊或增刊的形式正式出版。

会议安排了大会专题学术报告和分组学术报告及讨论。会期 3 天，2 天为学术交流，1 天为专委会、省学会年会。

会后考察常德—张家界高速公路建设中的边坡工程。

会议联系人：

(1) 湖南长沙中南大学资源与安全工学院、湖南省岩石力学与工程学会(邮编：410083)

联系人：胡毅夫 邓义方

Tel：(0731)8879612；Fax：(0731)8879612；E-mail：huyifu6@163.com；dengye@mail.csu.edu.cn

(2) 武汉市武昌小洪山中国科学院武汉岩土力学研究所中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会(邮编：430071)

联系人：陈莉娜

Tel：(027)87197560，(027)62597880；Fax：(027)87197386；E-mail：lnchen@whrsm.ac.cn

征文联系人：

武汉市武昌小洪山中国科学院武汉岩土力学研究所中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会(邮编：430071)

联系人：陈莉娜

Tel：(027)87197560，(027)62597880；Fax：(027)87197386；E-mail：lnchen@whrsm.ac.cn