

# 砾石料尾矿坝力学性质大型三轴剪切试验研究

Study on mechanical properties of gravel tailings dam by large-scale triaxial shear test

马艳晶<sup>1</sup>, 江泊洧<sup>2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**某尾矿坝采用砾石料一次建坝方式建设,分两期实施。在开展二期工程前,对已填筑坝体砾石料的物理力学性能指标进行了系统测试,为坝体加高工程稳定性评价分析提供理论依据。现场取样进行颗粒分析表明,该筑坝料为级配良好砾,同时基于现场检测干密度指标,在室内开展了不同固结排水状态下砾石料的大型三轴剪切试验,以了解其在不同状态下的力学性能。试验结果表明:筑坝砾石料 CD 试验抗剪强度指标内聚力  $c$  为 20 kPa,摩擦角  $\varphi$  为 31.8°;CU 试验抗剪强度指标内聚力  $c$  为 8 kPa,摩擦角  $\varphi$  为 29.2°;UU 试验抗剪强度指标内聚力  $c$  为 107 kPa,摩擦角  $\varphi$  为 4.0°。

**关键词:**尾矿坝;砾石料;大型三轴剪切试验;抗剪强度

**中图分类号:** P589.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2021)04-0005-04

**Abstract:** A tailings dam is constructed by gravel with one-step constructed method in two phases. Before the second phase of the project, the physical and mechanical properties of the dam gravel were systematically tested, which provided a theoretical basis for the stability evaluation and analysis of the dam heightening project. On-site sampling and particle analysis showed that the dam material was well-graded gravel. At the same time, based on the dry density index detected on site, large-scale triaxial shear tests of this gravel under different consolidation and drainage conditions were carried out indoors. The test results show that the cohesion  $c$  is 20 kPa and the friction angle  $\varphi$  is 31.8° for CD test, the cohesion  $c$  is 8 kPa and the friction angle  $\varphi$  is 29.2° for CU test, the cohesion  $c$  is 107 kPa and the friction angle  $\varphi$  is 4.0° for UU test.

**Key words:** tailings dam; gravel material; large-scale triaxial shear test; shear strength

## 1 前言

某尾矿库位于我国西北部,尾矿坝采用一次建坝分期加高方式建设,筑坝材料采用当地土石料。该尾矿坝一期工程已建成并运行多年,形成的尾矿库库容即将使用完毕,需开展尾矿坝二期工程,即实施尾矿坝加高建设。根据原设计资料,尾矿坝一期坝高 50 m,二期采用下游法加高 20 m,最大坝高达到 70 m。

根据国家相关规范要求,尾矿库初期坝与堆积坝的抗滑稳定性应根据坝体材料及坝基的物理力学性质经计算确定<sup>[1]</sup>。由于该尾矿坝建成时间较长,关于筑坝料土工试验开展较少,一期坝坝体状态较难掌握,为保证尾矿坝加高工程的安全实施,充分了解现有尾矿一期坝筑坝料的物理力学性能尤其是抗剪强度参数,特开展一系列试验研究工作,为加高后

的尾矿坝稳定计算分析提供必要的理论依据。

筑坝料的工程分类属于粗粒土,利用大型三轴剪切试验进行相关研究工作。试验在室内进行,为准确进行试验制备,在进行大型三轴剪切试验前,分别对筑坝料进行了颗粒级配试验和击实试验。

## 2 筑坝料颗粒级配及现场干密度

现场随机选取三个点,分别取约 1 t 试样进行全级配颗粒分析。图 1 所示为颗粒级配累积曲线;表 1 统计了各粒组区间质量百分含量。根据三组颗粒分析试验成果,分别在图 1 和表 1 中绘制和统计得

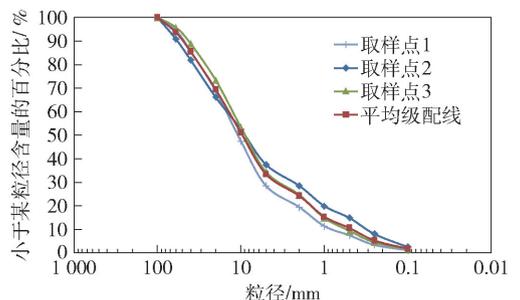


图 1 尾矿坝筑坝料颗粒级配曲线

[作者简介] 马艳晶(1984-),男,硕士,高级工程师,从事尾矿工程设计及研究相关工作。

[引用格式] 马艳晶,江泊洧.砾石料尾矿坝力学性质大型三轴剪切试验研究[J].中国矿山工程,2021,50(4):5-8.

到了筑坝砾石料的平均级配累积曲线及粒组含量情况。综合来看,该尾矿坝筑坝砾石料可命名为级配

良好砾<sup>[2]</sup>。另据现场检测,筑坝砾石料的天然干密度为 $2.05 \text{ g/cm}^3$ 。

表1 筑坝料级配表

编号	小于某粒径颗粒质量百分数/%											不均匀系数 Cu	曲率系数 Cc	命名
	80~ 60/mm	60~ 40/mm	40~ 20/mm	20~ 10/mm	10~ 5/mm	5~ 2/mm	2~ 1/mm	1~ 0.5/mm	0.5~ 0.25/mm	0.25~ 0.10/mm	<0.10/ mm			
1	5.61	8.74	16.98	21.23	18.96	9.05	8.06	3.93	4.10	2.22	1.12	19.73	2.73	级配良好砾
2	9.26	8.86	15.83	13.58	15.00	8.99	8.62	5.05	6.85	5.53	2.45	58.80	1.57	级配良好砾
3	4.29	6.88	15.53	19.96	18.98	9.69	9.82	5.46	4.97	2.74	1.67	27.78	2.43	级配良好砾
平均	6.39	8.16	16.11	18.26	17.65	9.24	8.83	4.81	5.31	3.50	1.75	28.10	2.17	级配良好砾

### 3 重型击实试验

获取筑坝料现场颗粒级配后,按照平均级配曲线制样开展大型击实试验,可进一步获得砾石料的最大干密度和最优含水率。最大干密度试验采用表面振动击实法。试样筒尺寸为 $300 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$ 。试样分3次铺装,每层振击 $6.5 \text{ min}$ 。

试验成果见表2,平均级配线得到的击实试验曲线如图2所示。

表2 击实试验成果

样品编号	最大干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	最优含水率/%
平均级配线	2.239	约6.5

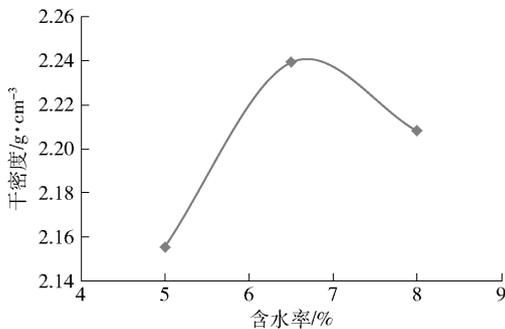


图2 击实试验曲线

据击实试验最大干密度,经与筑坝料现场检测干密度 $2.05 \text{ g/cm}^3$ 对比,筑坝料现场压实度约为91.6%,后续大型三轴剪切试验参照该指标进行制样并测试。

## 4 大型三轴剪切试验

### 4.1 试验仪器

图3所示为大型三轴压缩试验仪。试样尺寸为 $300 \text{ mm} \times \text{H}600 \text{ mm}$ 的圆柱体,最大围压 $3.0 \text{ MPa}$ ,最大轴向应力 $21 \text{ MPa}$ ,最大轴向行程 $300 \text{ mm}$ 。该仪器的系统组成包括:竖向荷载加载、稳压、控制系统;周



图3 大型高压三轴压缩试验仪

围压力加载、稳压、控制系统;三轴压力室;反力框架;位移、体变量测系统;荷载传感器及数据采集系统等。

### 4.2 试验方案设计及试验过程说明

采用表2中的试验级配,并按照 $2.05 \text{ g/cm}^3$ 试验干密度标准制备试样(对应压实度91.6%)开展三轴压缩试验。考虑到后续坝体抗滑稳定分析不同工况的需要,分别开展固结排水剪(CD)、固结不排水剪(CU)、不固结不排水剪(UU)三轴试验各一组。其中CD试验强度对应充分变形后坝体的长期抗剪强度;CU试验强度对应充分变形后坝体在地下水水位线骤变条件下的强度;UU试验强度则对应欠固结状态下坝料在极端降雨条件下的强度。另参照拟加高后的坝高,试验四级围压依次选取 $0.3 \text{ MPa}$ 、 $0.6 \text{ MPa}$ 、 $0.9 \text{ MPa}$ 、 $1.2 \text{ MPa}$ 。

试验过程如下:

(1)在三轴压力室底座上放置透水板,打开进水阀,使试样底座透水板充水至无气泡溢出,关闭

进水阀。在底座上扎好橡皮膜,安装成型筒,将橡皮膜上端外翻在成型筒上,使橡皮膜紧贴在成型筒内壁。

(2)将分层称取的试样加水至最优含水率附近后混合均匀,逐层装入试样成型桶,采用表面振动器对试样进行振密至要求干密度,直至试样制备完成,整平表面后,放置透水板和试样帽,扎紧橡皮膜,采用真空泵从试样帽顶孔排水阀抽真空,去掉成型筒,关闭抽气阀门使试样在真空负压下直立,放置0.5~1 h,检查橡皮膜,若有破裂处,立即进行黏补,必要时再加一层橡皮膜。

(3)安装压力室,开压力室排气孔,向压力室内注满水后,关闭排气孔,对试样施加50 kPa的保护围压,开顶孔排水阀释放负压,从底孔采用水头饱和方法对试样进行饱和。

(4)饱和完成后,对于CD和CU试验,按设定围压等级加压对试样进行固结,待固结过程排水稳定后,开始下一步轴向压缩剪切。在CD试验剪切过程中,试样持续保持排水条件,试验过程中记录轴向荷载、轴向位移、排水量等,直至轴向应变达到

15%停止试验;在CU试验剪切过程中,关闭排水阀,其余与CD试验一致;UU试验则在饱和完成并施加设定围压后关闭排水阀,直接进行剪切试验。

(5)绘制应力应变曲线,如应力应变曲线有峰值时,取峰值点为破坏点,反之取轴向应变15%所对应的点为破坏点,按摩尔-库仑强度准则计算抗剪强度指标。

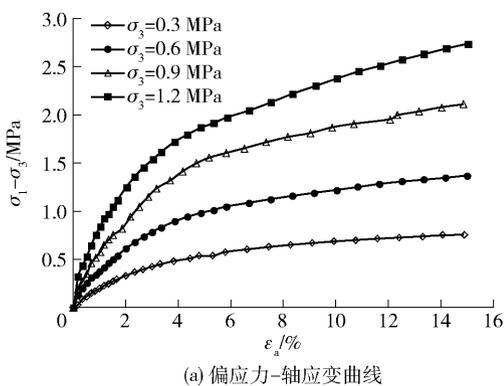
试验过程均严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)和《粗粒土试验规程》(T/CHES—2019)执行。

### 4.3 参数整理

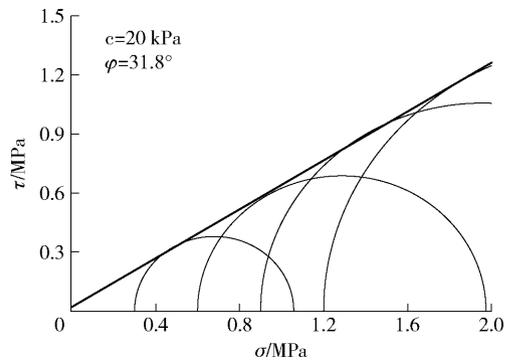
土的抗剪强度指标 $c$ 、 $\varphi$ 值采用摩尔-库仑强度准则,先作出不同围压 $\sigma_3$ 下偏应力-轴应变关系曲线( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) -  $\varepsilon_a$ ,得到不同围压 $\sigma_3$ 下的峰值强度(无峰值时取轴应变15%对应的偏应力),据此绘制各围压下 $\tau - \sigma$ 极限摩尔应力圆,按摩尔圆公切线的截距和斜率分别得到试样的内聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 。

### 4.4 试验成果

试验曲线如图4、图5、图6所示。根据试验曲线整理得到各测试工况下试样的抗剪强度指标见表3。

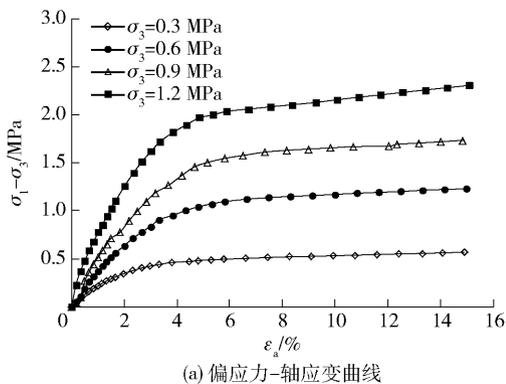


(a) 偏应力-轴应变曲线

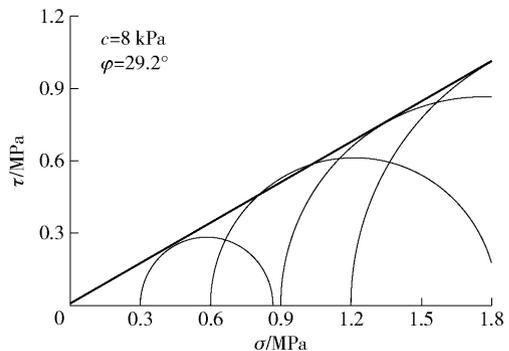


(b) 摩尔应力圆及强度包线

图4 CD三轴试验成果



(a) 偏应力-轴应变曲线



(b) 摩尔应力圆及强度包线

图5 CU三轴试验成果

CD试验抗剪强度指标内聚力 $c$ 为20 kPa,摩擦角 $\varphi$ 为31.8°;CU试验抗剪强度指标内聚力 $c$ 为

8 kPa,摩擦角 $\varphi$ 为29.2°;UU试验抗剪强度指标内聚力 $c$ 为107 kPa,摩擦角 $\varphi$ 为4.0°。

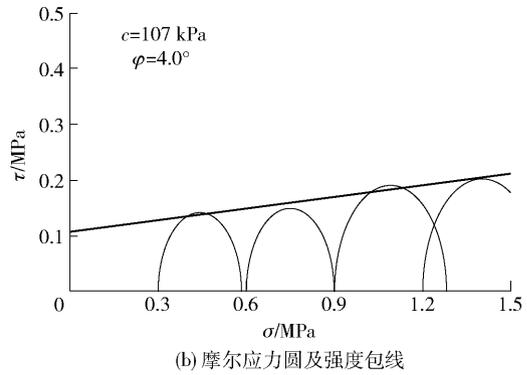
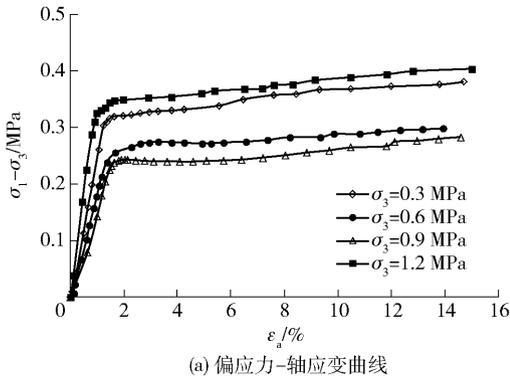


图6 UU三轴试验成果

表3 大型三轴试验成果表

试验工况	试验干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	抗剪强度指标	
		$\varphi / (^{\circ})$	$c / \text{kPa}$
固结排水(CD)		31.8	20
固结不排水(CU)	2.05	29.2	8
不固结不排水(UU)		4.0	107

#### 4.5 成果分析

总体来看,由于试样的压实度相对较低,因此CD和CU试验的全过程中,偏应力-轴应变曲线无显著峰值,试样变形机理大致呈现为进一步的挤密和大变形摩擦,强度参数中的内聚力 $c$ 主要反映了固结颗粒间的机械咬合。

近年来,关于砾石或卵砾石料的抗剪强度,许多学者开展了大量试验研究<sup>[3-5]</sup>,其中严伟对砾石土料也进行了高压大三轴试验,在最大直径60 cm的试验条件下,针对 $P_5 = 50$ (粒径大于5 mm的粗粒质量占总质量的百分数)的砾石土试样,分别进行了固结排水剪和固结不排水剪试验,CD试验抗剪强度指标内聚力 $c$ 为40 kPa,摩擦角 $\varphi$ 为30.4°;CU试验抗剪强度指标内聚力 $c$ 为50 kPa,摩擦角 $\varphi$ 为19.1°。

与本文所做试验相比,从试验结果来看,二者在CD试验条件下的结果较相近,而在CU试验条件下的试验结果相差较大,这主要因为砾石土材料的细粒含量较多,从而 $c$ 值也较大。

对于UU试验,其内摩擦角 $\varphi$ 为4.0°,接近于理论土力学的水平包络线,主要是由于试样本身透水性较好,加之试验过程中饱和过程和剪切过程之间存在衔接,因此存在较小的摩擦角,在后续极端工况验算分析中,可主要参考内聚力 $c$ 值进行计算。

## 5 结论

针对本工程尾矿坝的筑坝材料,通过室内土工

试验分析,可以得出以下结论:

(1)颗粒分析试验表明,该尾矿坝筑坝材料为粗粒土,工程分类为级配良好砾。

(2)击实试验表明,筑坝材料的最大干密度为2.239  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,最优含水率为6.5%。另外,根据工勘资料,现有坝体筑坝料的干密度为2.05  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,相应的压实度为91.6%,现有坝体筑坝施工质量控制较差。

(3)大型三轴剪切试验结果表明,CD试验抗剪强度指标内聚力 $c$ 为20 kPa,摩擦角 $\varphi$ 为31.8°;CU试验抗剪强度指标内聚力 $c$ 为8 kPa,摩擦角 $\varphi$ 为29.2°;UU试验抗剪强度指标内聚力 $c$ 为107 kPa,摩擦角 $\varphi$ 为4.0°。

尾矿坝作为矿山重要的生产设施,其安全性至关重要。在现有的尾矿库工程中,由于技术水平的限制,针对筑坝材料广泛开展物理力学试验的情况较少,为全面掌握坝体筑坝料性质,应结合实际情况开展相关土工试验。本次研究工作,针对某尾矿坝砾料筑坝材料,进行了大型三轴剪切试验,其试验结果可为类似工程提供参考。

#### [参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 尾矿设施设计规范:GB 50863—2013 [S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019 [S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
- [3] 严伟. 高土石坝宽级配砾石土心墙料特性研究及数值模拟[D]. 成都:四川大学, 2006.
- [4] 洪波, 吕艳兵. 含砾石粘土抗剪强度分析[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(5): 512—514.
- [5] 汤劲松, 刘松玉, 童立元, 等. 卵砾石土抗剪强度指标原位直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1): 167—171.