

# 积石峡面板堆石坝材料大型三轴试验研究

郑瑞华, 张建民, 张 嘎, 程 嵩, 王富强

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 针对积石峡水电站砼面板堆石坝的筑坝材料, 在清华大学 2000 kN 大型静/动三轴试验机上进行了大型三轴试验。概述了清华大学的 2000 kN 大型静/动三轴试验机的主要功能及性能指标, 并就大型三轴试验所需用到的试验材料以及所采用的试验方法、步骤进行了详尽的阐述。对积石峡水电站砼面板堆石坝的主堆石和次堆石两种筑坝材料分别进行了 3 组大型三轴试验。基于已取得的试验结果, 分析了坝料的应力应变和体变应变的关系, 主要讨论了孔隙率对筑坝材料力学特性、变形特性等性能的影响, 试验结论为该工程的应力变形计算和设计施工提供了试验依据。

**关键词:** 面板堆石坝; 大型三轴试验; 堆石料; 干密度; 孔隙率

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2011)S1 - 0177 - 05

**作者简介:** 郑瑞华(1977 - ), 男, 安徽安庆人, 工程师, 主要从事岩土工程试验研究工作。E-mail: zhengrh@tsinghua.edu.cn。

## Large-scale triaxial tests on rockfills of Jishixia CFRD

ZHENG Rui-hua, ZHANG Jian-min, ZHANG Ga, CHENG Song, WANG Fu-qiang

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A large-scale triaxial testing programme on materials of Jishixia Dam is presented by utilizing the 2000 kN static and dynamic triaxial apparatus in Tsinghua University. Firstly the main function and properties of the large-scale triaxial apparatus are expatiated, as well as the test materials and test method. A total of 6 groups of tests are conducted on main and sub rockfill materials of Jishixia Dam to study the stress-strain and volume-strain relation with different dry densities. The influences of porosity on the mechanics and deformation properties of rockfills are discussed. The results about the deformation behavior of rockfills are expected to provide experimental basis for engineering construction.

**Key words:** CFRD; large-scale triaxial test; rockfill; dry density; porosity

## 0 引 言

积石峡水电站工程位于青海省循化县境内的黄河干流上, 是黄河上游规划的第五个大型梯级电站。该工程是以发电为主, 兼顾灌溉、防洪等综合利用的水利水电枢纽工程。枢纽主要建筑物由混凝土面板堆石坝、坝下掩埋式引水及坝后厂房及溢洪道、泄洪洞等组成, 如图 1。大坝为混凝土面板堆石坝, 最大坝高 100 m, 水电站装机容量 1020 MW。工程规模为二等大(2)型, 大坝为 1 级建筑物。

堆石料的干密度作为面板堆石坝施工的重要参数之一<sup>[1-3]</sup>, 对坝体的变形有较大影响。而在实际的填筑过程中干密度在一定的范围内波动是在所难免的, 为了研究干密度波动的影响, 本研究在清华大学 2000 kN 静/动三轴试验机上分别针对开挖料主堆石和次堆石进行大型三轴力学特性试验, 主要包括不同干密度试样的大型三轴试验。研究孔隙率对坝料变形特性的

影响, 从而初步推断减小孔隙率对于减小坝料变形的影响规律<sup>[3-8]</sup>。探讨施工参数对坝体变形的影响规律, 为设计和施工提供依据。



图 1 积石峡面板堆石坝效果图

Fig. 1 Perspective of Jishixia Dam

## 1 模型制备与试验过程

### 1.1 试验设备

本试验所采用的设备是清华大学与天水红山试验机有限公司联合研制的“微机控制电液伺服2000 kN动静三轴试验机”，该试验机由主机、控制台、油源、远控柜、真空饱和装置和体变量测装置六部分组成。其主要特点有：①围压、轴压及孔压均采用闭环伺服控制系统，精度高，动载时围压保持恒定，最大围压10 MPa，最大轴向载荷为2000 kN，整机精度为0.3%；②轴向及围压作动静态试验时采用自动补偿机构，做到互不干涉，试验机动力稳压装置在大型三轴试验机的应用中处于国际领先水平；③体变采用数字量测，便于数据分析，其最小分别为1毫升，体变电测装置填补了国内大型三轴试验机的空白；④试样最大直径为300 mm，试样高度为700 mm，堆石料最大粒径为60 mm；⑤该试验机可进行砂石料、岩石及混凝土3种材料试样的静/动力特性试验。

## 1.2 试验材料

针对积石峡面板堆石坝的主堆石和次堆石坝料，进行了大型三轴试验。总结各种坝料试验的主要力学特性，为大坝设计和施工提供依据。表1列出了进行本次试验的坝料的颗粒组成。需要指出，由于仪器条件等限制，本文进行的室内试验需对材料的原始级配进行缩尺。试验时，主堆石干密度分别取2.12 g/cm<sup>3</sup>、2.08 g/cm<sup>3</sup>；次堆石干密度分别取2.12 g/cm<sup>3</sup>、2.08 g/cm<sup>3</sup>。

表1 坝料的试验级配

Table 1 Grain size distribution of rockfills for test

坝区石料	颗粒组成/%				
	60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	<5 mm
主堆石	17.0	28	24.5	21	9.5
次堆石	16.5	28	23.5	14	18.0

## 1.3 试验步骤

(1) 称量所需石料，按指定干密度控制，分五层击实、制样。

(2) 试样顶面、底面平行，且与试样轴向垂直，分3次测量试样直径（顶部、中间、底部），并记录数据，计算其平均值，即为试样直径；从不同方向两次测量试样高度，并记录数据，计算其平均值，即为试样高度。

(3) 安装压力室，并往压力室注满水，并排尽压力室水中的气体，打开试验机控制系统，并检查传感器。

(4) 对试样抽真空并使其饱和，并检查试样真空饱和度。

(5) 按试验要求加到相应围压，在该围压条件下进行等向固结，直至固结完成。

(6) 按照试验规程操作，进行不同类型的试验，并记录试验数据以及试验过程。

(7) 试验完成后，控制系统置于初始状态。

(8) 放完压力室水，然后拆样，并拍照记录试样破坏症状。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同干密度的主堆石试验结果

图2至图4分别给出了次堆石在不同干密度下应力-应变和体变-应变的关系曲线。由图可见，随着干密度的增大，峰值应力略微增大；但随着干密度的增大，最大体变减小较大。

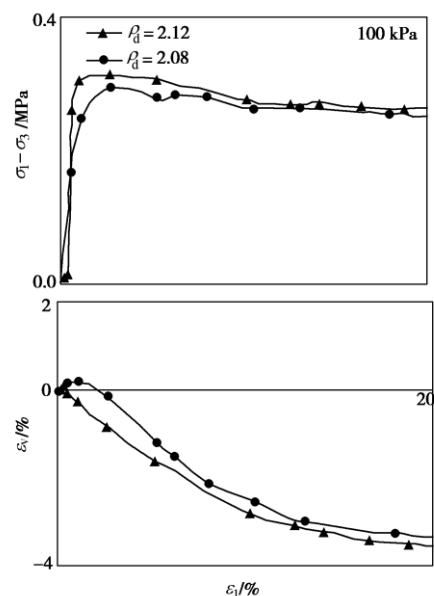


图2 100 kPa 主堆石的主应力 - 应变曲线和体变曲线

Fig. 2 Principal stress-strain curves and volumetric strain curves of main rockfill under different dry densities ( $\sigma_3=100$  kPa)

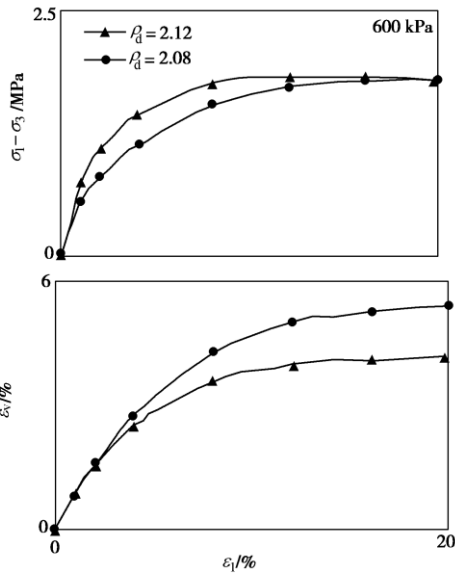


图 3 600 kPa 主堆石的主应力 - 应变曲线和体变曲线  
Fig. 3 Principal stress-strain curves and volumetric strain curves of main rockfill under different dry densities ( $\sigma_3=600$  kPa)

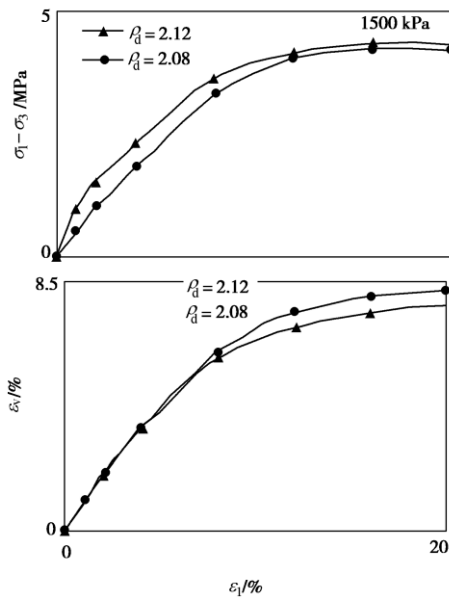


图 4 1500 kPa 主堆石的主应力 - 应变曲线和体变曲线  
Fig. 4 Principal stress-strain curves and volumetric strain curves of main rockfill under different dry densities ( $\sigma_3=1500$  kPa)

表 2 给出了不同干密度的峰值应力与围压的关系。表 3 给出了不同干密度的最大体变与围压的关系。可以看出, 随着围压的增大, 峰值应力和最大体变都相应增大。

表 2 主堆石不同干密度的峰值应力与围压的关系表

Table 2 Relationship between maximum stress and confining pressure or dry density of main rockfill

主堆石	干密度/(g cm <sup>-3</sup> )	围压/kPa		
		100	600	1500
	2.12	314	1832	4365
	2.08	295	1788	4228

主堆石	干密度/(g cm <sup>-3</sup> )	体变/%		
		100	600	1500
	2.12	-3.05	4.20	7.70
	2.08	-3.35	5.46	8.21

表 3 主堆石不同干密度的最大体变与围压的关系表

Table 3 Relationship between maximum volume strain and confining pressure or dry density of main rockfill

主堆石	干密度/(g cm <sup>-3</sup> )	体变/%		
		100	600	1500
	2.12	-3.05	4.20	7.70
	2.08	-3.35	5.46	8.21

2.2 不同干密度的次堆石试验结果

图 5 至图 7 分别给出了次堆石在不同干密度下应力 - 应变和体变 - 应变的关系曲线。由图可见, 随着干密度的增大, 峰值应力略微增大; 但随着干密度的增大, 最大体变减小较大。

表 4 给出了不同干密度的峰值应力与围压的关系。

表 5 给出了不同干密度的最大体变与围压的关系。可以看出, 随着围压的增大, 峰值应力和最大体变都相应增大。

表 4 次堆石不同干密度的峰值应力与围压的关系表

Table 4 Relationship between the maximum stress and confining pressure or dry density of sub rockfill

次堆石	干密度/(g cm <sup>-3</sup> )	围压/kPa		
		100	600	1500
	2.12	162	1858	4443
	2.05	148	1792	4071

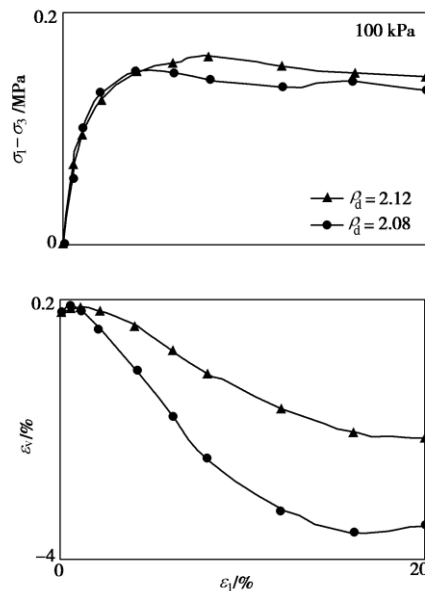


图 5 100 kPa 次堆石的主应力 - 应变曲线和体变曲线

Fig. 5 Principal stress-strain curves and volumetric strain curves of sub rockfill under different dry densities ( $\sigma_3=100$  kPa)

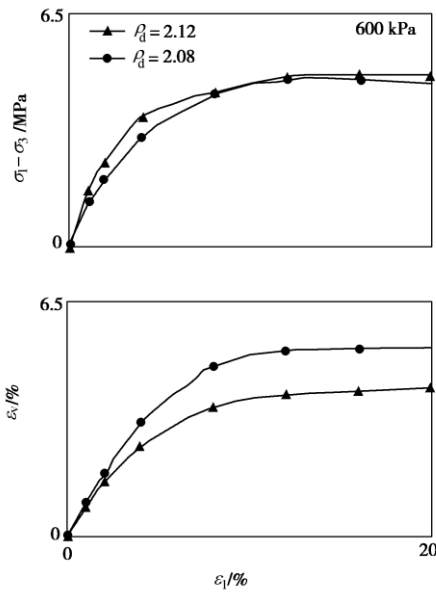


图 6 600 kPa 次堆石的主应力 - 应变曲线和体变曲线

Fig. 6 Principal stress-strain curves and volumetric strain curves of sub rockfill under different dry densities ( $\sigma_3=600$  kPa)

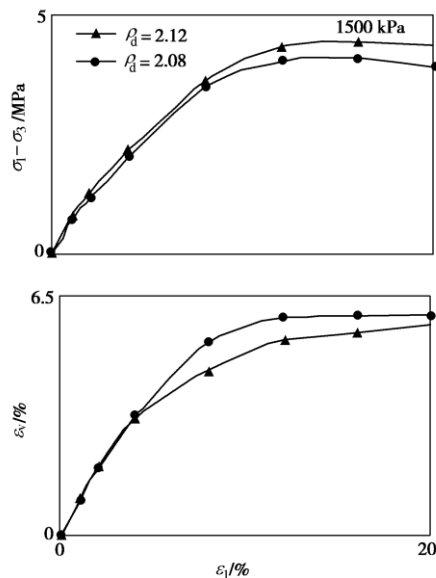


图 7 1500 kPa 次堆石的主应力 - 应变曲线和体变曲线

Fig. 7 Principal stress-strain curves and volumetric strain curves of sub rockfill under different dry densities ( $\sigma_3=1500$  kPa)

表 5 次堆石不同干密度的最大体变与围压的关系表

Table 5 Relationship between maximum volume strain and confining pressure or dry density of sub rockfill

次堆石	干密度/(g cm <sup>-3</sup> )	体变/%		
		100	600	1500
	2.12	-2.03	4.10	5.71
	2.05	-3.43	5.23	6.01

2.3 主堆石和次堆石坝料的材料参数

当偏差应力与轴向应变关系曲线有峰值时，取峰

值点为破坏点；当该关系曲线无峰值或峰值对应的轴向应变大于 15% 时，则取轴向应变 15% 所对应的点为破坏点。根据破坏点确定强度。试验结果表明，开挖料的摩擦角  $\varphi$  与围压  $\sigma_3$  成非线性关系，可采用下式描述：

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (1)$$

$p_a$  是标准大气压力， $\varphi_0$  与  $\Delta\varphi$  是非线性强度指标参数。根据要求，本文还给出库仑和幂函数强度参数。其中库仑强度公式为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中  $c$  与  $\varphi$  是库仑强度指标参数。幂函数强度公式为

$$\tau_f = A \cdot p_a \left( \frac{\sigma_n}{p_a} \right)^b \quad (3)$$

式中， $p_a$  是标准大气压力， $A$  与  $b$  是强度指标参数。

$\sigma_n$  和  $\tau_f$  分别按下式确定

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{2\sigma_1\sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \\ \tau_f &= \sigma_n \tan \varphi \\ \sin \varphi &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

表 6 给出了根据试验结果整理得到的主堆石和次堆石的材料参数。

表 6 主堆石和次堆石的材料参数

材料参数	主堆石		次堆石	
	2.12	2.08	2.12	2.08
$\varphi_0(^{\circ})$	49.50	47.50	48.50	47.00
$\Delta\varphi(^{\circ})$	10.00	9.00	9.50	9.00
$R_f$	0.79	0.82	0.81	0.83
$K$	640.00	600.00	598.00	561.00
$n$	0.32	0.30	0.30	0.29
$C_d/\%$	1.05	1.20	1.30	1.50
$n_d$	0.40	0.50	0.60	0.70
$R_d$	0.69	0.67	0.71	0.73
$K_b$	400.00	400	405.00	405.00
$m$	0.10	0.10	0.10	0.10
$G$	0.34	0.35	0.36	0.38
$F$	0.32	0.31	0.30	0.29
$D$	5.00	4.90	4.80	4.70

3 结 论

本文针对积石峡面板堆石坝不同干密度的主堆石和次堆石，进行了 3 组大型三轴试验。通过已完成试验，初步研究了孔隙率对坝料变形特性的影响和坝料的基本力学特性，根据试验结果可得出以下结论：

(1) 主堆石和次堆石坝料的峰值应力水平随着围压的增大而增大；主堆石和次堆石坝料的体积变化在

低应力水平时表现为体缩, 在围压较高时, 随着围压的增大而增大坝料。

(2) 在同一围压条件下, 主堆石随着干密度的增大, 峰值应力略微增大; 但随着干密度的增大, 最大体变减小较大。

(3) 在同一围压条件下, 此堆石随着干密度的增大, 峰值应力略微增大; 但随着干密度的增大, 最大体变减小较大。

#### 参考文献:

- [1] 吴怀忠, 王汝恒, 刘汉峰, 等. 围压和固结应力比对砂卵石土动力特性的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2006, **32**(5): 111 - 114. (WU Huai-zhong, WANG Ru-heng, LIU Han-feng, et al. Influence of confined pressure and consolidation stress ration on the dynamic characteristics of sandy pebble soils[J]. Sichuan Building Science, 2006, **32**(5): 111 - 114. (in Chinese))
- [2] 贾革续, 孔宪京. 粗粒土动残余变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 26 - 30. (JIA Ge-xu, KONG Xian-jing. Study on residual deformation characteristics of coarse grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 26 - 30. (in Chinese))
- [3] 邹德高, 孟凡伟, 孔宪京, 等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 808 - 812. (ZOU De-gao, MENG Fan-wei, KONG Xian-jing, et al. Residual deformation behavior of rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 808 - 812. (in Chinese))
- [4] 南京水利科学研究所院岩土工程研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (Geotechnical Institute of Nanjing Hydraulic Research Institute. Soil test technical manual[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [5] 凌 华, 傅 华, 蔡正银, 等. 坝料动残余变形特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, **38**(5): 532 - 537. (LING Hua, FU Hua, CAI Zheng-yin, et al. Experimental study on dynamic residual deformation characteristics of dam materials[J]. Journal of Hohai University( Natural Sciences), 2010, **38**(5): 532 - 537. (in Chinese))
- [6] 郑瑞华, 程 嵩, 张建民, 等. 苗家坝面板堆石坝材料动力特性试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, **26**(12): 357 - 361. (ZHENG Rui-hua, CHENG Song, ZHANG Ga, et al. Dynamic tests on rockfills of Miaojia CFRD[J]. World Earthquake Engineering, 2010, **26**(12): 357 - 361. (in Chinese))
- [7] 张建民, 侯文峻, 张 嘎, 等. 大型三维土与结构接触面试验机的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 889 - 894. (ZHANG Jian-min, HOU Wen-jun, ZHANG Ga, et al. Development and application of 3D soil-structure interface test apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 889 - 894. (in Chinese))
- [8] 郑瑞华, 于艺林, 张 嘎, 等. 面板堆石坝材料动力特性试验研究[C]// 第七届全国青年岩土力学与工程会议. 北京: 2011: 69 - 73. (ZHENG Rui-hua, YU Yi-lin, ZHANG Ga, et al. Dynamic tests on rockfills of CFRD[C]// The Seventh Youth Rock and Soil Mechanics and Engineering Meeting. Beijing, 2011: 69 - 73. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)