

粗粒料单向压缩湿化变形试验研究

朱文君^{1,2}, 张宗亮³, 袁友仁³, 朱俊高^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要:采用高压单向压缩仪,对糯扎渡堆石坝的坝壳反滤料进行了不同相对密度的粗粒料湿化变形试验研究。分析试验结果,揭示了粗粒料在单向压缩条件下的湿化变形规律,探讨了不同干密度下粗粒料的湿化变形性质,发现湿化变形仅在高压下随粗粒料干密度的增大而增加,低压下干密度的影响不明显。另外,还分析了压力对湿化变形的影响,得出了湿化变形随竖向压力的增大而增加的规律,并用一指数函数进行了拟合。试验中,研究了一种减小侧壁摩擦力的方法,并通过是否减轻摩擦的对比试验,论证了方法的有效性。

关 键 词:粗粒料; 单向压缩; 湿化变形; 摩擦力

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)03-0099-04

土石坝在建设或运行过程中,由于库水位上下波动、雨水浸入等因素,会使坝体粗粒料发生湿化并产生变形,从而引起坝体应力应变状态的变化,其中大多产生不利于坝体安全运营的应力调整和变形^[1]。研究粗粒料湿化变形的试验主要有单向压缩试验、等向压缩试验和常规三轴试验等。目前,工程应用中普遍采用常规三轴试验测定粗粒料的湿化变形,相关研究也较多^[1-10]。单向压缩试验因侧壁摩擦力影响,试验精度较差,数据可靠性低,但具有制样方便、操作简单、耗时短等优点。土石坝坝体中,靠近中心轴线的部位,如上游过渡层与反滤层,其应力状态接近于静止土压力 K_0 状态,在精度要求不高的情况下,可以用单向压缩试验估测湿化变形;而对于偏离轴线的堆石区部分,其应力状态复杂,应采用三轴湿化试验。综上所述,研究和改进粗粒料单向压缩条件下湿化变形试验仍具有一定的工程意义。

本文对云南糯扎渡水电站心墙堆石坝的坝壳反滤料进行了单向压缩条件下的湿化变形试验,研究了不同相对密度粗粒料湿化变形规律,同时,研究了一种减小侧壁摩擦力的方法,并用对比试验进行了论证。

1 试验材料及试验方案

试验用粗粒料为糯扎渡水电站心墙堆石坝的坝壳反滤料。该材料为花岗岩,岩性新鲜、微风化,粒度均匀,棱角尖锐。干态无侧限抗压强度为 128.1 MPa,湿态为 102.1 MPa,软化系数为 0.80。试验用粗粒料的级配:粒径 $d=10 \sim 20$ mm 的土粒含量为 18%, $d=5 \sim 10$ mm 的含量为 15%, $d \leq 5$ mm 的含量为 67%。粗粒料的最大粒径 $d_{\max} = 20$ mm, 不均匀系数 $C_u = 18.2$, 曲率系数 $C_c = 1.51$, 最小干密度 $\rho_{d\min} = 1.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 最大干密度 $\rho_{d\max} = 1.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[1]。采用的试样直径为 101 mm, 高度为 100 mm。试样分 3 层击实, 控制一定的干密度^[11]。为减轻试样与筒壁间的摩擦力,试验前在筒内壁涂上凡士林并再贴满长度为 70 mm, 宽度为 20 mm 的薄塑料片(厚度约为 0.5 mm),塑料片之间预留 1 mm 的缝隙,避免塑料片之间相互挤压(见图 1)。这样,土

收稿日期: 2008-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579014),国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金项目(50639050)

作者简介: 朱文君(1986-),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要从事土体基本特性研究。E-mail: johnzhu1986@hhu.edu.cn

颗粒直接与塑料片接触,塑料片与筒壁间涂抹了凡士林,可减小侧壁摩擦力影响。塑料片受土石料挤压会压缩变形,但由于这里只研究一定压力下的湿化变形,可以认为湿化变形时塑料片不产生变形。

制样完成后,通过单向压缩固结仪施加竖向压力 p ,砝码最大质量 81.28 kg,试样横截面积 80 cm^2 ,竖向压力 p 按加载比 $\Delta p/p=1$ 设定,经计算后所设定的 p 见表 1^[11]。本文试验采用分别加载的方式,在试样固结稳定后($>24 \text{ h}$),测读竖向应变 ε_{a1} ,然后将试样浸水饱和。在试样湿化过程中,始终保持 p 不变,至变形稳定后,测读竖向应变 ε_{a2} ,则湿化应变 $\Delta\varepsilon_a^w = \varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}$ ^[8,9]。为尽量消除试样蠕变变形对湿化变形的影响,试验压力维持至少 24 h,待固结稳定后,才将试样浸水饱和。

为研究不同相对密度试样在不同竖向压力下的湿化变形规律,制定了如表 1 所示的试验方案。另外,为了研究本文建议的减轻侧壁摩擦力方法的可行性,探讨侧壁摩擦力对试样湿化变形的影响,又进行了不设置侧壁摩擦力减轻措施的试验,即表 1 中的试样 S4。

表 1 粗粒料单向压缩条件下的湿化变形试验方案

Tab. 1 Plans for wetting deformation tests of coarse-grained materials under axial compression condition

试样编号	相对密度 D_r	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	是否减小摩擦力	竖向压力 p / kPa				
S1	0.60	1.919	是	76.2	152.5	305.0	610.0	1220.0
S2	0.70	1.929	是	76.2	152.5	305.0	610.0	1220.0
S3	0.80	1.939	是	76.2	152.5	305.0	610.0	1220.0
S4	0.80	1.939	否	76.2	152.5	305.0	610.0	1220.0

2 试验成果及分析

单向压缩条件下粗粒料湿化变形试验结果见表 2。总体上,该石料的湿化应变不大,在试验的压力范围内,最大仅 0.17%。

表 2 各试样在不同竖向压力下的湿化应变 $\Delta\varepsilon_a^w$

Tab. 2 Wetting strain $\Delta\varepsilon_a^w$ of samples under different axial pressure (单位:%)

压力 p / kPa	S1	S2	S3	S4
76.2	0.024	0.047	0.018	0.007
152.5	0.035	0.029	0.039	0.032
305.0	0.038	0.042	0.032	0.041
610.0	0.068	0.072	0.047	0.035
1220.0	0.140	0.163	0.175	0.084

为了分析同一竖向压力下试样湿化变形随相对密度 D_r 的变化规律,绘制相对密度 D_r 与竖向湿化应变 $\Delta\varepsilon_a^w$ 的关系曲线(见图 2)。可见,同一竖向压力下,不同相对密度试样的湿化应变差别不大,仅在 $p=1220 \text{ kPa}$ 时,湿化应变似乎随相对密度的增大而增大。由图 2 还可推测,在 610 和 1220 kPa 之间可能存在一个临界压力,当竖向压力小于临界压力时,相对密度对湿化变形的影响不明显;而当竖向压力达到临界压力后,湿化应变开始随相对密度的增大而增大。这是根据本文试验结果所进行的推测,仍需通过进一步的试验来验证。为研究不同竖向压力下试样的湿化变形规律,点绘的竖向压力 p 与湿化应变 $\Delta\varepsilon_a^w$ 的关系见图 3。可见,对于同一试样,湿化变形随竖向压力的增大而增加,且压力越大,湿化变形增幅越大。这是由于在湿化过

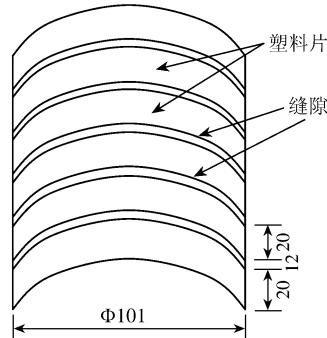


图 1 试验筒内壁贴塑料片示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of plastic plates inside test tub (unit: mm)

程中,随着竖向压力的增大,风化的试样颗粒在水的作用下更容易发生软化,破坏棱角,减弱了颗粒间的摩擦和咬合作用,滑移后重新排列,从而导致试样的湿化变形增大^[2]. 从图3还可以看出,不同试样的数据点均分布在比较窄的范围内,说明不同相对密度对湿化变形影响不大. 因此,可以认为湿化变形不随密度而变化,可用同一曲线拟合全部试验点(见图3). 拟合曲线为 $\Delta\varepsilon_a^w = a \cdot \exp(b \frac{p}{p_a})$, 其中: a, b 为参数; p_a 为大气压力. 本文试验用粗粒料, $a=0.0003$, $b=0.1517$.

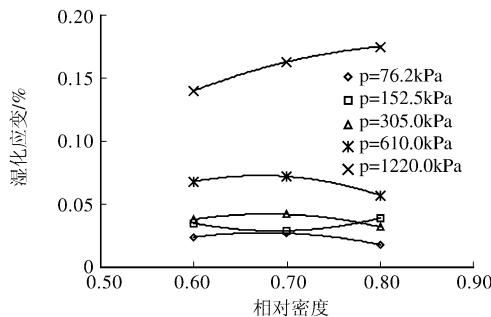


图2 相对密度与湿化应变关系曲线

Fig. 2 Curves of relative density and wetting strain

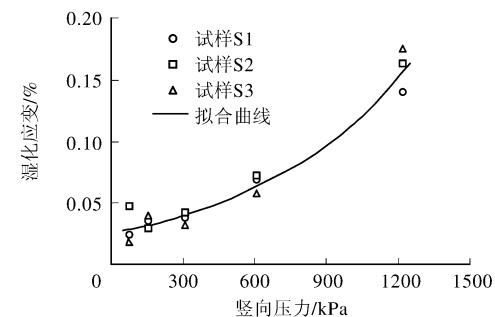


图3 竖向压力与湿化应变关系曲线

Fig. 3 Curves of axial pressure and wetting strain

最后,为了研究侧壁摩擦力对试样湿化变形的影响,绘制试样S3和S4的竖向压力与湿化应变的关系(见图4),并用直线分别拟合. 由图4可见,同一竖向压力下,是否采取减小摩擦力措施对湿化变形影响显著. 不采取减小摩擦力措施,湿化变形明显小于采取减小摩擦力措施;随着竖向压力的增大,这种差异愈发明显. 这是由于侧壁摩擦力阻止筒壁附近的颗粒滑移和重新排列,导致试样的湿化变形偏小;随着竖向压力逐渐增大,试样受到的侧向压力也增大,侧壁摩擦力随之增大,阻碍筒壁附近颗粒位移的作用加剧,导致两种条件下湿化变形差异增大. 这也说明在粗粒料单向压缩条件下的湿化变形试验中,采取减小侧壁摩擦力的措施是十分必要的. 本次试验所采用的措施只是减轻了摩擦力的作用,并未完全消除侧壁摩擦力的影响,这可能是由于凡士林具有一定的黏着力,使得塑料片与筒壁间仍存在摩擦力,未能达到充分光滑的缘故. 因此,如何选用更佳的润滑剂,采取更完善的措施和方法,仍有待深入研究. 但尽管如此,本文所建议的减轻摩擦力的方法是简单可行的.

3 结语

- (1) 对于所试验的花岗岩粗粒料,湿化变形随着竖向压力的增大而增大. 湿化应变与竖向压力之间呈指数函数关系;
- (2) 侧壁摩擦力对试样的湿化变形影响显著,导致试验测得湿化变形偏小,这种偏差随竖向压力的增大而加剧,本文采取的减小侧壁摩擦力的措施简单可行;
- (3) 单向压缩湿化试验一般适用于精度要求不高、应力状态近似 K_0 状态的情形,也可用于初步估计粗粒料的湿化变形大小,复杂应力条件下的湿化变形特性应利用三轴仪试验.

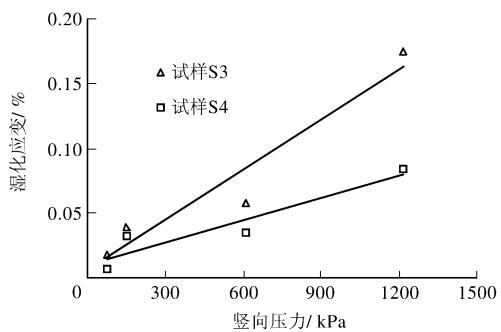


图4 竖向压力与湿化应变关系曲线

Fig. 4 Curves of axial pressure and wetting strain

参考文献:

- [1] 魏松. 粗粒料浸水湿化变形特性试验及其数值模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (WEI Song. Study on wetting

- deformation behavior and numerical model of coarse-grained materials [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [2] 李鹏, 李振, 刘金禹. 粗粒料的大型高压三轴湿化试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 231–234. (LI Peng, LI Zhen, LIU Jin-yu. Slaking test study of coarse-aggregate under high triaxial stress condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 231–234. (in Chinese))
- [3] 张少宏, 张爱军, 陈涛. 堆石料三轴湿化变形特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5938–5942. (ZHANG Shao-hong, ZHANG Ai-jun, CHEN Tao. Triaxial slaking test research on rock fill deformation feature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp. 2): 5938–5942. (in Chinese))
- [4] 刘新喜, 夏元友, 刘祖德, 等. 复杂应力下强风化软岩湿化变形试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 925–930. (LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, LIU Zu-de, et al. Experimental study on slaking deformation of intense weathering soft rock under complicated stress condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 925–930. (in Chinese))
- [5] 魏松, 朱俊高. 粗粒土料湿化变形三轴试验研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1609–1614. (WEI Song, ZHU Jun-gao. Study on wetting behavior of coarse-grained soil in triaxial test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1609–1614. (in Chinese))
- [6] 魏松, 朱俊高. 粗粒料湿化变形三轴试验中几个问题 [J]. 水利水运工程学报, 2006(1): 19–23. (WEI Song, ZHU Jun-gao. Discussion on some problems in triaxial wetting test of coarse-grained materials [J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(1): 19–23. (in Chinese))
- [7] 左元明, 沈珠江. 坝料土的浸水变形特性研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1989. (ZUO Yuan-ming, SHEN Zhu-jiang. Study on wetting deformation behavior of rock fill [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1989. (in Chinese))
- [8] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Theory and calculation of geotechnology [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1996. (in Chinese))
- [9] 殷宗泽, 费余绮, 张金富. 小浪底土坝坝料土的湿化变形试验研究 [J]. 河海科技进展, 1993, 13(4): 73–76. (YIN Zong-ze, FEI Yu-qi, ZHANG Jin-fu. Study on wetting deformation behavior of materials from the Xiaolangdi earth and rock fill dam [J]. Advances in Science and Technology of Hohai, 1993, 13(4): 73–76. (in Chinese))
- [10] 殷宗泽, 赵航. 土坝浸水变形分析 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 1–8. (YIN Zong-ze, ZHAO Hang. Deformation analysis of earth dam during reservoir filling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 1–8. (in Chinese))
- [11] SL237-1999, 土工试验规范 [S]. (SL237-1999, Specification of soil test [S]. (in Chinese))

Study on wetting deformation behavior of coarse-grained materials under axial compression condition

ZHU Wen-jun^{1,2}, ZHANG Zong-liang³, YUAN You-ren³, ZHU Jun-gao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Kunming Hydropower Investigation and Design Institute, Kunming 650051, China)

Abstract: By using high pressure axial compression apparatus, the wetting deformation behavior is studied for the filter material of Nuozadu rock-filled dam with different relative density. According to the result of tests, the disciplinarian of coarse-grained material wetting deformation is presented under axial compression condition, and the character of coarse-grained material wetting deformation with different dry density is discussed. The wetting deformation increases along with the dry density only in the high pressure case. The infection of the dry density is unobvious when the axial pressure is low. Impact of the pressure on wetting deformation is analyzed using the result. The wetting deformation increases follow the axial pressure. A new method is used to reduce the side frictional force in the tests, and the validity of this method is demonstrated through comparison tests.

Key words: coarse-grained material; axial compression; wetting deformation; frictional force