

堆石料湿化特性试验研究

程展林, 左永振, 丁红顺, 姜景山, 孔宪勇

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 采用大型三轴仪, 对花岗岩和变质岩两种堆石料, 比较系统地进行了单线法和双线法湿化试验。依据试验成果, 比较了单线法和双线法试验成果间的差异, 明确了堆石料湿化特性试验研究宜采用单线法, 确定了单线法湿化变形取值方法, 比较了不同堆石料湿化变形规律, 得到了堆石料湿化应变与应力状态的相关关系, 初步提出了堆石料湿化模型及模型参数。提出的堆石料湿化模型及参数可作为堆石坝湿化变形分析的基础。

关键词: 堆石料; 湿化变形; 湿化模型; 三轴试验; 双江口水电站

中图分类号: TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)02-0243-05

作者简介: 程展林(1963-), 男, 湖北武穴人, 教授级高级工程师, 主要从事土力学研究。E-mail: chengzl@mail.crsri.cn。

Wetting characteristics of coarse-grained materials

CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, DING Hong-shun, JIANG Jing-shan, KONG Xian-yong

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on single-line method and double-line method, wetting tests on two kinds of coarse-grained materials, granite and metamorphic rock, are performed by use of a large-scale triaxial apparatus. According to the test results, there are some differences between the single-line method and the double-line method. The single-line method is better to study the wetting characteristics of coarse-grained materials. The method to obtain the wetting deformation in the single-line method is established. Based on different wetting deformation regularities of coarse-grained materials, the relationship between strain and stress in the wetting tests is obtained. As a result, the wetting model and model parameters of coarse-grained materials are proposed and used as the basis in the analysis of wetting deformation of coarse-grained materials.

Key words: coarse-grained material; wetting deformation; wetting model; triaxial test; Shuangjiangkou Hydroelectric Station

0 前 言

所谓堆石料的湿化变形是指堆石料由干态遇水变成湿态时所产生的变形, 是产生堆石坝后期变形的主要因素之一。在堆石坝建设或运行过程中, 水库蓄水、水位上下波动、雨水浸入坝体等, 都会使粗粒料浸水湿化产生变形, 从而引起坝体应力应变状态发生变化。国内外已建成的堆石坝, 有不少因湿化变形产生不同程度的破坏。因此研究堆石料的湿化特性对堆石坝的安全运行有重要的工程意义。国内外学者针对堆石料的湿化特性已进行了大量的有益的研究工作, 并建立了多种可用于进行堆石坝湿化变形分析的计算模型和方法^[1-5], 采用 $\Phi 101$ mm的中三轴进行的湿化试验研究^[6-7] $\Phi 300$ mm三轴湿化试验, 这些研究工作都是非常有价值并具参考意义的。然而, 由于堆石料湿化特性的重要性、堆石料湿化机理的复杂性、堆石料湿化试验的难度, 因此, 有必要对堆石料的湿化特性进行

深入的试验研究。

本文针对花岗岩和变质岩两种堆石料, 分别采用单线法和双线法进行了 $\Phi 300$ mm的三轴湿化试验。在堆石料的湿化变形与应力状态的关系、单线法和双线法试验成果间的差异等方面取得了一定成果, 并初步提出了堆石料的湿化模型, 以期供同行学者参考。

1 堆石料的湿化试验

1.1 试验材料

试验材料选取大渡河双江口水电站 300 m 级土质心墙堆石坝的花岗岩和变质岩两种坝壳料, 根据土工试验规程^[8]采用混合法对原始级配进行缩尺确定试验

基金项目: 国家自然科学基金委、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50639050)

收稿日期: 2008-11-18

用料级配, 坝壳料的原始级配和试样级配曲线见图 1。

花岗岩堆石料的最大干密度为 2.187 g/cm^3 , 最优含水率为 5%, 按照压实度 0.95 考虑, 确定试样的制样干密度为 2.078 g/cm^3 ; 变质岩堆石料的最大干密度为 2.273 g/cm^3 , 最优含水率为 6%, 压实度 0.95 对应的制样干密度为 2.159 g/cm^3 。

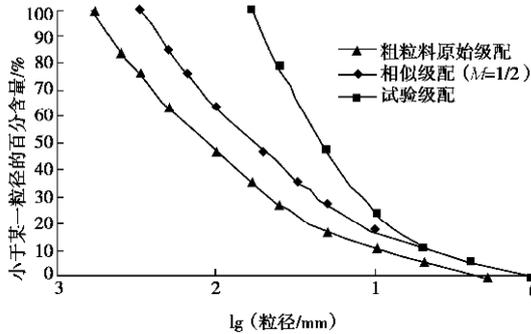


图 1 原始级配和试样级配曲线

Fig. 1 Prototype and test gradation curves

1.2 试验设备与试验方法

试验采用 YLSZ30-3 型大型高压三轴仪进行, 最大围压 3.0 MPa, 最大竖向荷载 1500 kN。试样尺寸 $\Phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 试样最大粒径 60 mm。

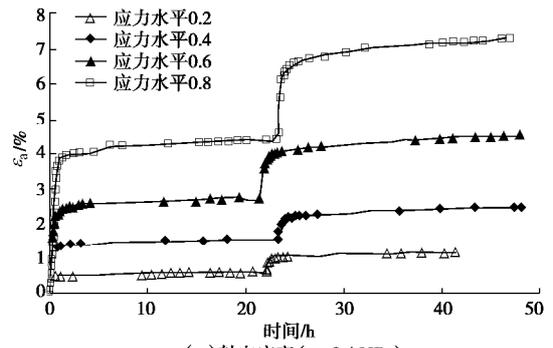
试验方法通常分单线法和双线法两种。单线法是在控制应力状态不变的条件下将试样由填筑含水率状态(干态)加水至饱和状态(湿态), 在该过程中所发生的变形作为堆石料在该应力状态下的湿化变形。双线法是分别在填筑含水率(干态)和饱和(湿态)两种状态下进行试验, 将同一应力状态下干湿两态试验所得的应变之差作为该应力状态下的湿化变形。

本次单线法三轴湿化试验采用风干样按应变控制剪切至设定应力状态后, 保持应力稳定, 当试样变形稳定后从底孔充水湿化(湿化水头 1 m, 充水时间 30~40 min), 待湿化变形稳定后, 再剪切至出现峰值或轴向应变 15%~20%。试样变形稳定标准为轴向应变率 $0.000056\%/min$, 即每小时轴向变形不大于 0.02 mm。一组试验选取 3 个围压 0.8, 1.6, 2.4 MPa, 5 个应力水平 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 以研究堆石料湿化变形与应力状态的关系。

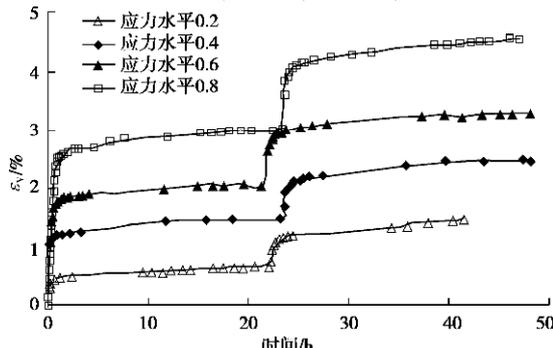
2 试验成果分析

2.1 单线法湿化变形取值

图 2 为典型的堆石料湿化试验过程中变形与时间关系曲线。图中反映出湿化试验过程中 4 个阶段的变形, 干态剪切、应力不变条件下的干态蠕变、湿化变形、湿态蠕变。为了合理的分离湿化变形与蠕变, 同时与堆石料的蠕变取值原则^[9]相匹配, 本文取开始充水时至充水完成后 1 h 间的变形为堆石料的湿化变形。



(a) 轴向应变 ($\sigma_3=2.4 \text{ MPa}$)



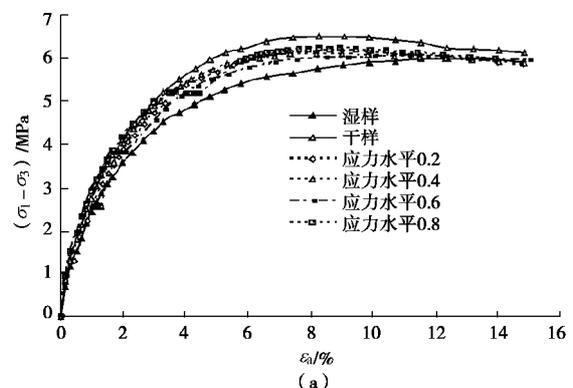
(b) 体变 ($\sigma_3=2.4 \text{ MPa}$)

图 2 变质岩堆石料轴向应变和体变与时间关系曲线

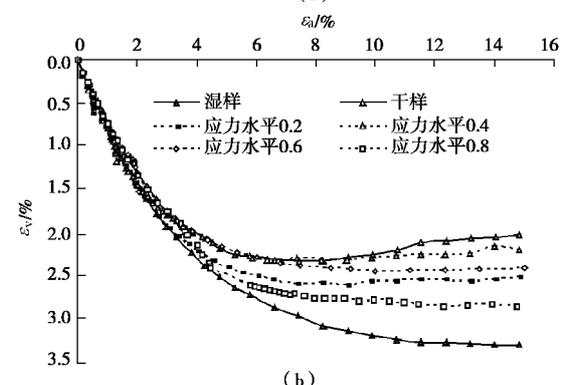
Fig. 2 Relationship among axial strain, volumetric strain and time of metamorphic rock

2.2 单线法湿化试验的应力应变关系

图 3 为典型的堆石料湿化试验的应力应变关系曲线。对于同一种堆石料, 在相同应力条件下, 湿态堆



(a)



(b)

图 3 花岗岩堆石料湿化试验应力应变关系

Fig. 3 Relationship between stress and strain in wetting tests on granite

石料的变形比干态堆石料大, 峰值强度高, 且应力应变曲线形态与湿化时的应力大小有关, 但大变形后的强度相近。从不同应力水平条件下的湿化三轴试验成果比较可以看出, 对于堆石坝的变形数值分析, 忽视堆石坝的湿化过程, 单一采用堆石料干态试验参数或湿态试验参数, 其分析成果都会产生偏差的。

2.3 单线法湿化试验的湿化变形

图 4 完整地给出了花岗岩堆石料湿化应变(轴向应变和体积应变)与应力状态(围压和应力水平)的

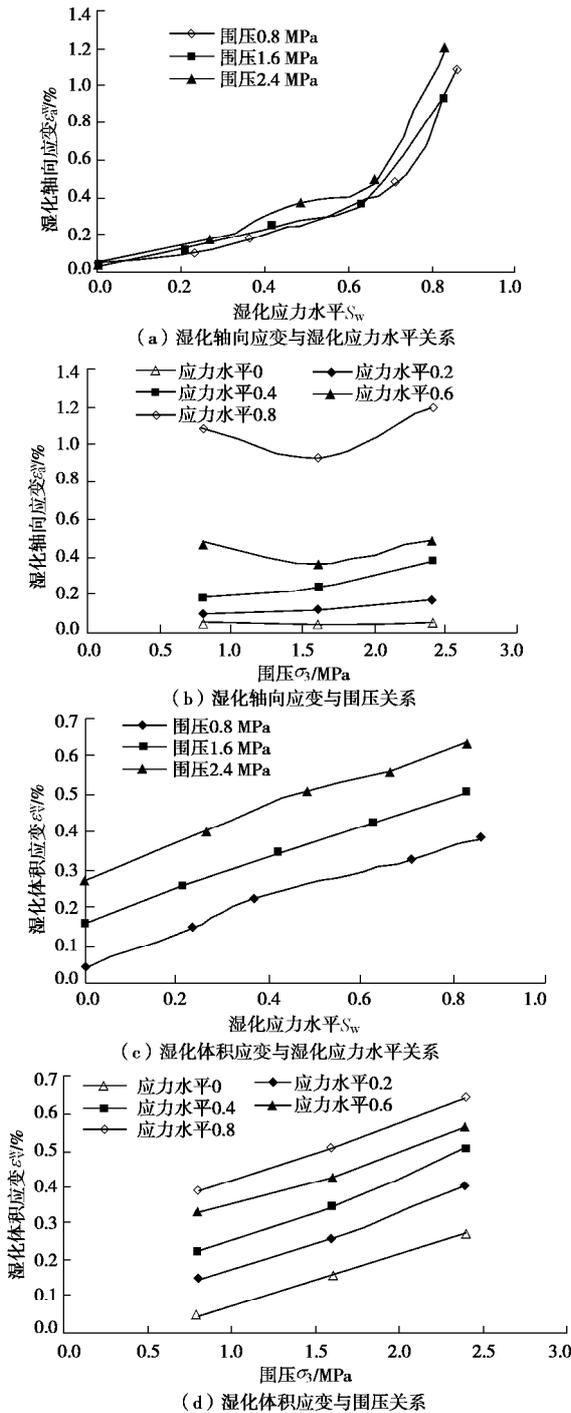


图 4 花岗岩堆石料湿化应变与应力状态关系

Fig. 4 Relationship between granite wetting strain and stress of granite

关系。试验成果表明, 花岗岩堆石料的湿化变形与其所受的应力状态关系密切, 且规律性强。值得强调的是, 1 组试验最少由 15 个试样的试验成果组成, 且应变变量小, 试验中各环节造成的试验误差相对明显, 往往容易造成试验成果离散, 规律性不强, 影响研究者对堆石料湿化应变与应力关系的确定, 堆石料单线法湿化试验难度大主要体现在该方面。从图 4 可以看出: ①花岗岩堆石料湿化轴向应变主要与湿化时的应力水平相关, 而与湿化时的围压关系不大, 当应力水平达 0.6 后, 湿化轴向应变随应力水平的增加而急剧增加; ②花岗岩堆石料湿化体积应变不仅与湿化时的应力水平有关, 而且与湿化时的围压有关。且与应力水平和围压均呈线性增长关系。

2.4 不同堆石料湿化变形的比较

为了验证上述由花岗岩堆石料湿化试验得到的规律是否具有普遍性, 本文针对变质岩堆石料同时进行了湿化试验, 试验成果见图 5。比较图 4, 5 相应试验成果可看出, 变质岩堆石料湿化应变与应力状态关系的规律性与花岗岩堆石料相同, 该试验成果为建立堆石料湿化模型提供了支撑。同时可看出, 不同堆石料在相同应力条件下, 湿化变形量差别较大, 本文采用的变质岩堆石料的湿化应变约为花岗岩堆石料的 2 倍。

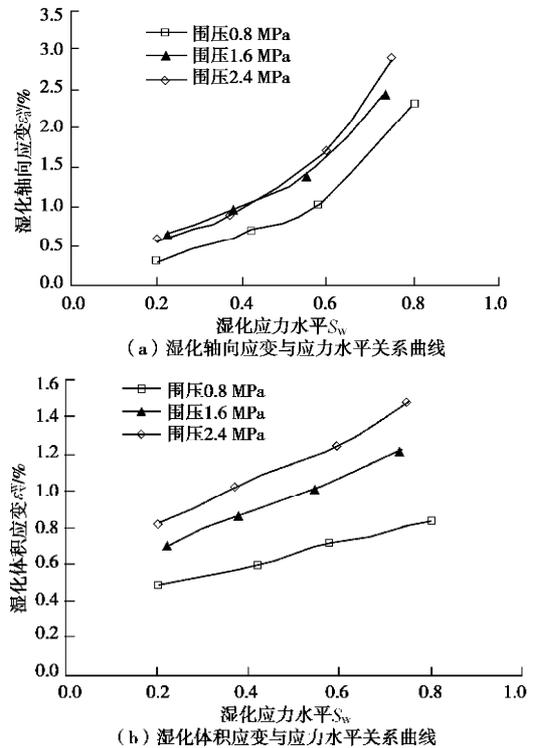


图 5 变质岩堆石料湿化应变与应力状态关系

Fig. 5 Relationship between wetting strain and stress of metamorphic rock

2.5 单线法和双线法试验成果间的比较

由于单线法湿化试验工作量大, 试验成果容易离散, 试验难度大, 人们期望采用简便的双线法进行湿化试验。对两种方法试验成果间的差异的认识往往有

所不同,为此针对花岗岩堆石料分别进行了单线法和双线法湿化试验。图6给出了两种方法的典型试验成果以示比较。单线法和双线法的堆石料湿化变形趋势相同,但湿化变形量差别较大。由于单线法接近堆石坝实际浸水饱和过程,因此,用单线法较为符合实际。

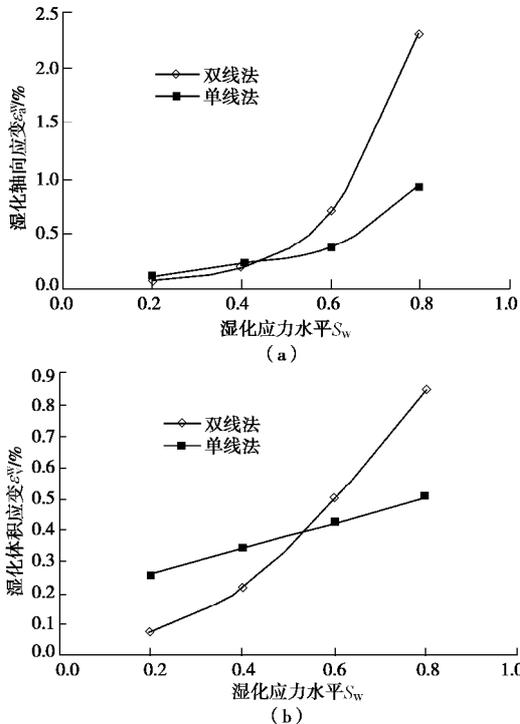


图6 花岗岩堆石料不同湿化试验方法成果比较($s_3 = 1.6 \text{ MPa}$)

Fig. 6 Results in different wetting tests on granite

3 湿化模型及模型参数

湿化变形是在水的作用下,由于材料软化和水的润滑作用造成的堆石料颗粒的破碎和重新排列,从而发生的变形。本文基于三轴试验方法对两种堆石料进行了堆石料湿化试验,初步揭示出不同堆石料的湿化应变与应力状态关系具有相同的规律性,论证了单线法与双线法成果间的差异,单线法成果更为符合实际工程的湿化过程。下文将以花岗岩堆石料单线法试验成果导出堆石料湿化模型及相应模型参数。

3.1 湿化轴向应变

依据湿化试验揭示的堆石料湿化特性,湿化轴向应变主要与湿化时的应力水平相关,而与湿化时的小主应力(围压)关系不大。因此,假定湿化轴向应变只与湿化应力水平有关,而与湿化时的小主应力无关。由不同围压下相应的湿化轴向应变平均值确立湿化轴向应变与应力水平关系,见图7。可看出湿化轴向应变与应力水平较好的符合指数函数关系:

$$e_a^w = ae^{bS_w} \quad (1)$$

式中, a 和 b 为拟合参数, S_w 为湿化时应力水平。

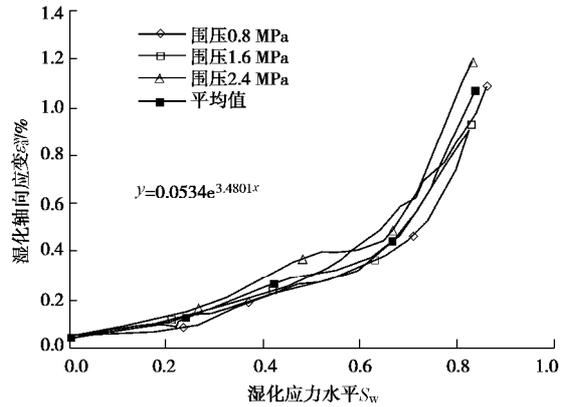


图7 湿化轴向应变与湿化应力水平关系拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of wetting axial strain and stress level

3.2 湿化体积应变

采用线性方程拟合湿化体积应变与湿化应力水平间的关系,如图8所示。其关系可以表示为

$$e_v^w = cS_w + d \quad (2)$$

式中, c 和 d 为拟合参数, S_w 为湿化时应力水平。

参数 c , d 与小主应力符合线性关系,如图9,10所示。其关系式为

$$c = fs_3 + g \quad (3)$$

$$d = ks_3 + h \quad (4)$$

式中, f , g , k 和 h 为拟合参数, s_3 为湿化时小主应力。

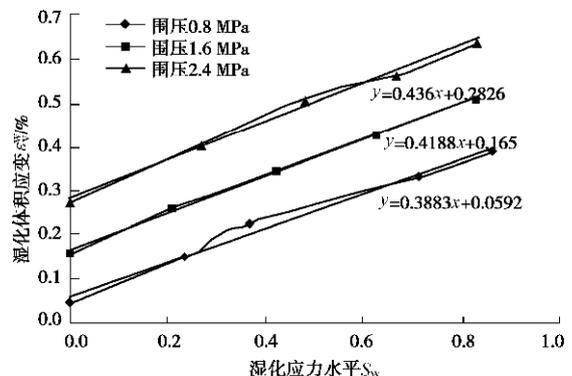


图8 湿化体积应变与湿化应力水平关系拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of wetting volumetric strain and stress level

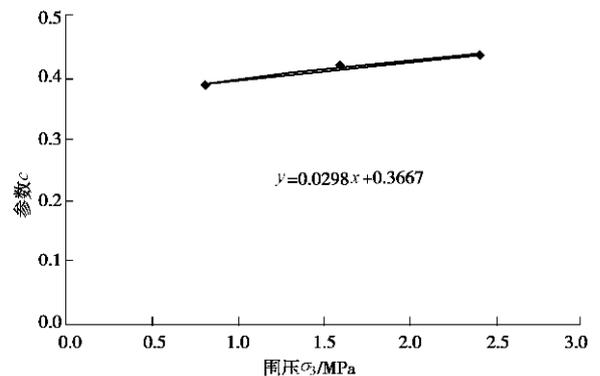


图9 参数 c 与围压关系曲线

Fig. 9 Relationship between parameter c and confining pressure

将式 (3)、(4) 代入式 (2) 中, 得到湿化体积应变与湿化应力状态间的关系式:

$$e_v^w = (fS_3 + g)S_w + (kS_3 + h) \quad (5)$$

式 (1)、(5) 成为了本文提出的堆石料的湿化模型。从图 7~10 可以看出, 拟合曲线与试验点之间是非常吻合的。

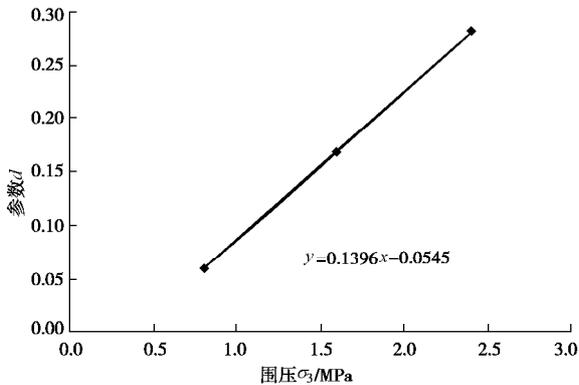


图 10 参数 d 与围压关系曲线

Fig. 10 Relationship between parameter d and confining pressure

3.3 湿化模型参数

堆石料的湿化模型共有 a, b, f, g, k, h 参数。花岗岩堆石料和变质岩堆石料的湿化模型参数如表 1 所示, 相应的应变单位为, 应力单位为 MPa。

表 1 单线法湿化模型参数

Table 1 Wetting deformation parameters for single line method

材料	a	b	f	g	k	h
花岗岩堆石料	0.053	3.48	0.030	0.367	0.140	0.000
变质岩堆石料	0.275	2.90	0.369	0.315	0.132	0.264

4 结 论

(1) 不同堆石料在相同应力条件下, 湿化变形量存在差别, 但湿化应变与应力状态关系的规律性相同。

(2) 单线法和双线法试验得到的堆石料湿化变形成果差别较大, 堆石料湿化特性试验研究宜采用单线法。

(3) 湿化轴向应变主要与湿化时的应力水平相关, 而与湿化时的小主应力关系不大。堆石料湿化轴向应变与应力水平可采用指数函数表示。

(4) 湿化体积应变与湿化应力水平、小主应力均呈线性关系。

(5) 堆石料湿化模型是在两种堆石料试验基础上提出经验关系式, 期望得到多种堆石料试验成果的进一步验证。

参考文献:

- [1] 李广信. 堆石料的湿化试验和数学模型[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 198 - 205. (LI Guang-xin. Study on wetting of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(5): 198 - 205. (in Chinese))
- [2] 殷宗泽, 赵航. 土坝浸水变形分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 1 - 7. (YIN Zong-ze, ZHAO Hang. Deformation analysis of earth damss during reservoir filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 1 - 7. (in Chinese))
- [3] 左元明, 沈珠江. 坝壳砂砾料浸水变形特性的测定[J]. 水利水运科学研究, 1989(1): 107 - 113. (ZUO Yuan-ming, SHEN Zhu-jiang. Determination of deformation character of gravel sand due to wetting[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1989(1): 107 - 113. (in Chinese))
- [4] 沈珠江, 王剑平. 土质心墙坝填筑及蓄水变形的数值模拟[J]. 水利水运科学研究, 1988(4): 48 - 63. (SHEN Zhu-jiang, WANG Jian-ping. Numerical simulation of construction behavior of clay core dam and its movement due to reservoir impounding[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1988(4): 48 - 63. (in Chinese))
- [5] 保华富, 屈知炯. 粗粒料的湿化特性研究[J]. 成都科技大学学报, 1989(1): 23 - 30. (BAO Hua-fu, QU Zhi-jiong. The study of wetting properties for coarse materials[J]. Journal of Sichuan University, 1989(1): 23 - 30. (in Chinese))
- [6] 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 of coarse aggregate under high triaxial stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 231 - 234. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test [S]. 1999. (in Chinese))
- [9] 程展林, 丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 473 - 476. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun. Creep test for rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 473 - 476. (in Chinese))