

DOI: 10.11779/CJGE20220971

# 砾石土心墙料的湿化变形特性试验研究

左永振<sup>1,2</sup>, 程展林<sup>1,2</sup>, 潘家军<sup>1,2</sup>, 周跃峰<sup>1,2</sup>, 赵 娜<sup>1,2</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 针对砾石土心墙料, 采用大型应力式三轴仪开展了单线法湿化变形试验, 较系统地研究了湿化应变与应力水平、围压之间的变化规律。依据试验成果, 砾石土心墙料的湿化变形是明显的, 且与应力水平、围压密切相关, 在高围压、高应力水平条件下, 外力改变了试样的饱和状态, 砾石土样品逐渐从非饱和状态过渡到饱和状态, 砾石土料存在应力饱和现象, 导致湿化过程中没有明显的湿化变形。当围压较小时, 湿化应变随应力水平的增大而增大, 当围压增大到一定量值时, 湿化应变反而随应力水平的增大而减小, 呈现明显的分叉现象, 表现出更加复杂的规律。最后提出了砾石土料湿化变形模型及模型参数, 提出的砾石土料湿化模型可作为高土石坝湿化变形分析的基础。

**关键词:** 砾石土心墙料; 高土石坝; 湿化变形; 单线法; 大三轴试验

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)10-2188-06

**作者简介:** 左永振(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事粗粒土的力学特性试验研究和岩土力学 CT 可视化技术研究。E-mail: zuoyongzh@163.com。

## Experimental study on wetting deformation characteristics of gravelly soil core materials

ZUO Yongzhen<sup>1,2</sup>, CHENG Zhanlin<sup>1,2</sup>, PAN Jiajun<sup>1,2</sup>, ZHOU Yuefeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Na<sup>1,2</sup>

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** A series of single-line wetting deformation tests are carried out on the gravelly soil core materials using a large stress triaxial apparatus to systematically investigate the variation of wetting deformation with stress level and confining pressure. According to the test results, the wetting deformation of the gravelly soil core materials is obviously related to the stress level and the confining pressure. Under of high confining pressure and stress level, the external force changes the saturation state of a specimen, and the gravel soil sample gradually transits from an unsaturated state to a nearly saturated one, indicating that a ‘stress saturation’ phenomenon exists in the gravelly soil materials, and resulting in less obvious wetting deformation during the wetting process. When the confining pressure is small, the wetting strain increases with the increasing stress level. When the confining pressure reaches a certain value, the wetting strain decreases with the increasing stress level, presenting an obvious bifurcation phenomenon, showing a more complex pattern. Finally, a wetting deformation model for gravel soil and its parameters are put forward, and can be used as the basis of wetting deformation analysis of high earth-rock dams.

**Key words:** gravelly soil core material; high earth-rockfill dam; wetting deformation; single-line method; large-scale triaxial test

## 0 引言

土质心墙堆石坝是高土石坝建设的主流坝型之一, 砾石土经压密后具有较高的密度和强度、较低的压缩性、较好的防渗性能, 因此在高土石坝中被广泛用作高土石坝心墙料<sup>[1]</sup>。

高心墙堆石坝的变形控制事关大坝的安全运行, 其重点是协调坝壳与心墙的变形, 而心墙防渗料与坝壳堆石料的变形特性、渗透特性差异较大, 是其变形不协调的根本原因。砾石土心墙料属于黏性粗粒土,

渗透性一般在  $10^{-6}$  量级, 试验过程中的饱和、固结、排水非常困难, 试验周期长, 按  $\Phi 39.1\text{mm}$  的小试样饱和需要 1 d 时间计算,  $\Phi 300\text{mm}$  的大试样饱和约需要 60 d<sup>[2]</sup>, 效率低费时间, 而且很难保证试样内部心墙料达到饱和状态。因此长期以来受试验技术水平的

基金项目: 国家自然科学基金-联合基金重点项目 (U21A20158; U1765203); 国家自然科学基金面上项目 (51979010); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (CKSF2021484/YT)

收稿日期: 2022-08-08

限制, 一般研究只针对砾石土心墙料进行击实、压缩等常规试验, 大三轴试验的成果较少<sup>[3-4]</sup>, 极少涉及砾石土心墙料的湿化变形试验。近年来, 随着特高土心墙堆石坝变形及渗流形态与时空演化、破坏机制与发展趋势等关键科学问题的深入研究, 对砾石土心墙料的湿化变形研究有了更迫切的需求, 起防渗作用的砾石土心墙料的湿化变形特性直接决定了高土石坝的变形时空演化规律。这提出了2个亟需解决的问题: ①砾石土心墙料在大坝蓄水条件下有没有湿化变形现象? ②如果砾石土心墙料有湿化变形, 其变化规律如何? 回答这2个问题, 需要开展砾石土心墙料的湿化变形试验研究。

笔者长期关注砾石土心墙料的试验技术难题, 进行了长达15 a的系列技术攻关, 提出了“砂芯”加速饱和固结排水<sup>[5]</sup>、高精度外体变测量等专利技术方法, 进行了较多组数的砾石土心墙料的大三轴固结不排水剪(CU)、固结排水剪(CD)试验研究, 积累了丰富的砾石土心墙料的大三轴试验技术方法。近年来成功地进行了砾石土心墙料的三轴湿化变形试验, 取得了较好的砾石土心墙料湿化变形规律。

## 1 砾石土料湿化变形试验方法

### 1.1 试验材料

开展湿化变形试验所用的砾石土心墙料取自两河口水电站, 为黏土掺砾料, 其中土料占60%, 为纯黏土, 砾石料占40%, 为板岩料, 试验级配见图1。

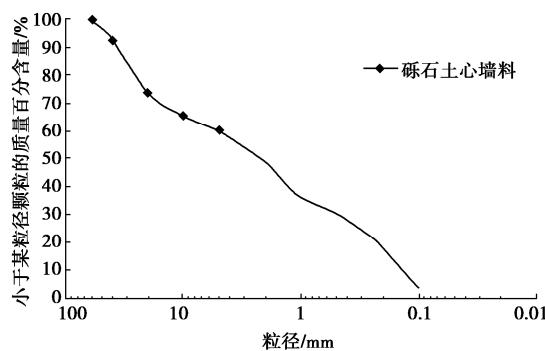


图1 砾石土心墙料试验级配

Fig. 1 Grain-size distribution curve of gravelly soil core materials

对该料分别进行了轻型击实试验和重型击实试验, 轻型击实试验获得的最大干密度为2.00 g/cm<sup>3</sup>,

表1 砾石土心墙料大型三轴CD试验成果表

Table 1 Large-scale triaxial CD test results of gravelly soil core materials

试验干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗剪强度指标				K	n	R <sub>f</sub>	E-μ(B) 模型参数			
	c <sub>d</sub> / kPa	φ <sub>d</sub> / (°)	φ <sub>0</sub> / (°)	Δφ / (°)				G	F	D	K <sub>b</sub>
2.00	65	26.3	34.7	5.8	421	0.34	0.80	0.40	0.12	2.60	172
2.00	62	26.6	34.0	5.0	458	0.40	0.85	0.35	0.08	3.10	213

最优含水率为11.6%。重型击实试验获得的最大干密度为2.10 g/cm<sup>3</sup>, 最优含水率为10.1%。

### 1.2 基本力学性质

对砾石土心墙料进行了大型三轴饱和固结排水剪切(CD)试验, 试样尺寸Φ300 mm×H610 mm, 试验围压0.3, 1.0, 1.7, 2.4 MPa四级, 试验干密度为2.00 g/cm<sup>3</sup>, 对应的压实度为重型击实标准的95%, 轻型击实标准的100%。

为保证试样的充分饱和, 在试样中设置了13个直径8 mm的砂芯孔, 并在砂芯孔中填充达到密实状态的中砂, 砂芯面积占试样截面积0.92%。砂芯的设置可增加进水通道, 有效降低饱和距离<sup>[5]</sup>。

表1给出了通过三轴试验获得的抗剪强度指标和E-μ(B)模型参数, 两组成果为平行试验成果, 所得的参数比较接近。

### 1.3 大尺寸砾石土样湿化变形试验方法

湿化变形试验可采用单向压缩仪和三轴仪设备, 其中三轴试验为柔性边界约束, 应力状态(围压、应力水平等)可控, 因此进行湿化变形试验以三轴仪居多, 本次砾石土心墙料试验进行湿化变形试验也采用大型应力控制式三轴仪。

湿化变形试验有单线法和双线法, 其中单线法更能真实反映实际浸水饱和过程, 更接近工程实际, 因此砾石土心墙料的湿化变形试验中采用单线法。单线法湿化变形试验过程中, 因样品湿化前是非饱和样, 因此采用外体变法测量样品种体积变化。

砾石土心墙料的湿化变形试验步骤和试验过程中任一时刻的样品饱和度准确测量, 在文献[6]中已经进行了详细介绍, 本文不再赘述。

## 2 湿化变形试验成果

针对砾石土心墙料样品, 进行了单线法湿化变形试验, 试样尺寸Φ300 mm×H610 mm, 围压分0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 MPa五级, 应力水平S<sub>L</sub>分0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8五级, 备样含水率为9.0%, 对应初始饱和度为69.0%, 湿化变形试验成果见表2, 表2中同时给出了经施加围压和应力水平使样品固结后、充水湿化前的饱和度S<sub>rb</sub>。轴向湿化变形和体积湿化变形与应力水平、围压的关系曲线见图2。

表 2 砾石土心墙料湿化变形量  
Table 2 Wetting deformations of gravelly soil core materials  
单位: %

围压/ MPa	$S_L=0.0$			$S_L=0.2$			$S_L=0.4$			$S_L=0.6$			$S_L=0.8$		
	轴变	体变	$S_{rb}$												
0.2	0.419	0.885	75.3	0.890	1.071	76.2	2.000	1.470	78.1	3.509	1.860	79.6	5.729	2.179	80.3
0.4	0.482	0.876	76.7	0.745	1.040	78.1	1.397	1.294	80.0	2.154	1.489	78.9	3.768	1.722	81.0
0.8	0.518	0.935	77.0	0.573	0.793	81.6	0.536	0.815	81.1	0.492	0.467	86.5	0.584	0.318	89.5
1.2	0.412	0.700	81.7	0.324	0.495	84.1	0.178	0.392	88.5	0.203	0.173	88.6	0.058	0.097	94.9
1.6	0.243	0.255	82.7	0.138	0.216	84.2	0.064	0.109	91.2	0.029	0.062	94.7	0.049	0.042	95.1

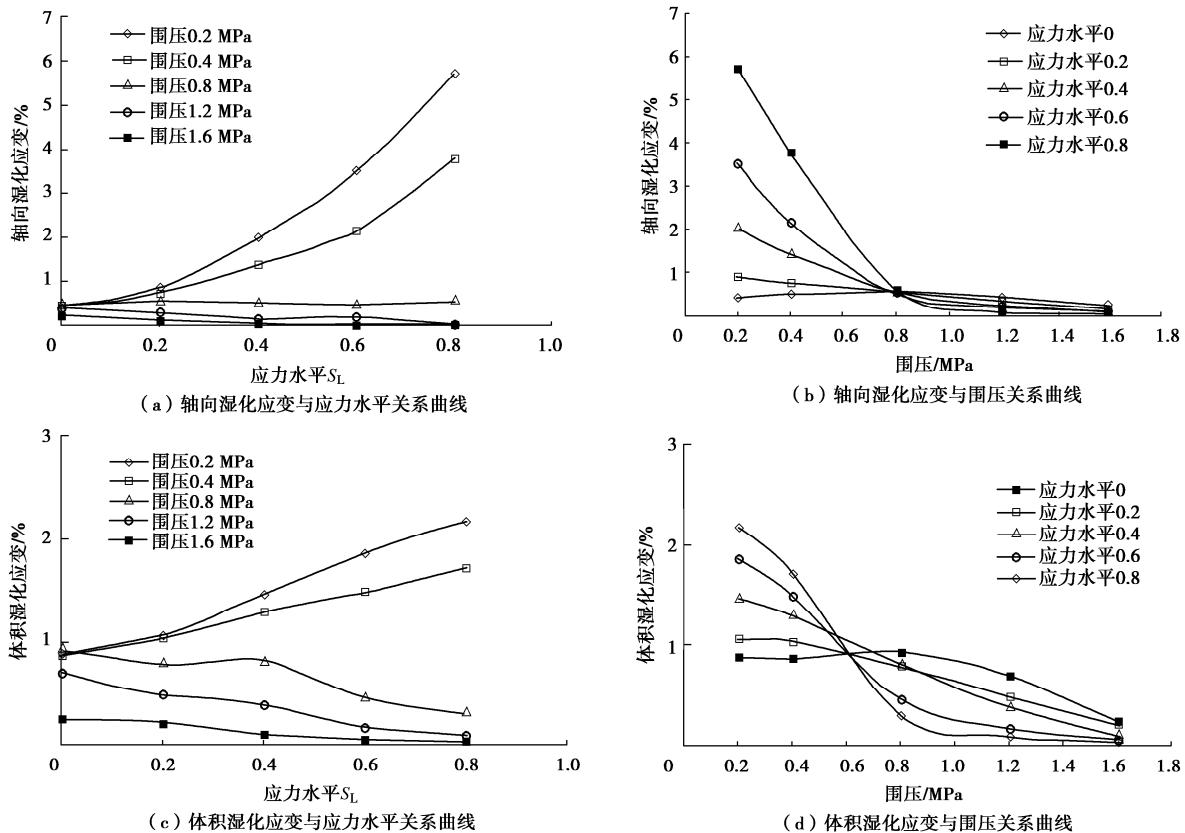


图 2 砾石土料湿化变形与应力水平、围压关系曲线

Fig. 2 Relation curves of wetting deformation with stress level and confining pressure of gravelly soil core materials

图 2 的砾石土心墙料湿化变形量与应力状态的关系曲线蕴涵着以下规律: ①砾石土心墙料的湿化变形是明显的, 且与应力状态(应力水平、围压)密切相关。②当围压较少时, 湿化应变随应力水平的增大而增大, 当围压达到一定量值时, 湿化应变反而随应力水平的增大而减小, 呈现明显的分叉现象, 这在应力应变关系研究中是比较少见的。③当  $\sigma_3=1.6$  MPa,  $S_L>0.6$  时, 几乎不发生湿化应变。试验中面对这种情况, 最直接的认识是试验“失败”, 之后误认为是应力增大, 土的渗透性减小, 没有完成湿化。经反复试验分析, 最终找到其客观原因, 是非饱和土的“应力饱和”。对于非饱和土, 当受到应力作用后, 不仅产生超孔压, 而且饱和度也随体变增大而增大。

### 3 湿化变形过程中的应力饱和现象

如何理解图 2 中的湿化应变与应力关系的“分叉”现象, 当围压较小时, 湿化应变随应力水平增大而增大, 当围压达到一定数值后, 湿化应变随应力水平增大而减小。

对于砾石土心墙料, 围压、应力水平等外部应力不仅引起土体应变, 同时将改变土体的干密度及饱和度, 湿化前的饱和度决定了土体的湿化变形, 这就是所谓“应力饱和现象”。

绘制湿化前的饱和度  $S_{rb}$  随围压、应力水平的变化曲线, 如图 3 所示。从图 3 可见, 湿化前样品饱和度与围压、应力水平关系密切, 饱和度随着围压、应力

水平的增加而增加, 呈现明显的正相关性。当围压、应力水平较低时, 湿化前饱和度也较低, 当围压、应力水平较高时, 湿化前饱和度也较高。

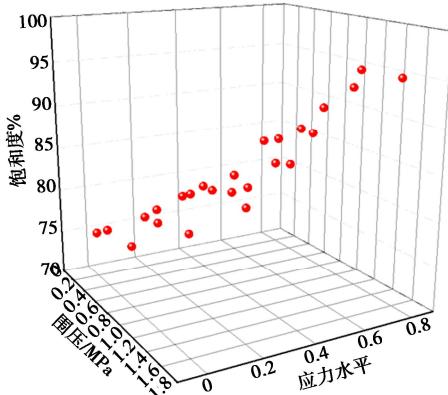


图3 湿化前饱和度与围压、应力水平关系

Fig. 3 Relationship between saturation before wetting and confining pressure and stress level

具体分析两个试样在湿化试验中各阶段的应变、饱和度及干密度的演化过程, 样品1,  $\sigma_3=0.4 \text{ MPa}$ ,  $S_L=0.6$ , 样品2,  $\sigma_3=1.6 \text{ MPa}$ ,  $S_L=0.8$ 。其演化过程如图4所示。

对于样品1, 围压0.4 MPa, 围压及偏应力引起的试样体应变相对较小, 试样干密度由起始点 $2.00 \text{ g/cm}^3$ 增至 $2.057 \text{ g/cm}^3$ , 变化也很小, 最为关键的是应力作用后试样饱和度由初始69%增加为79%。在湿化饱和过程中, 进水量较大, 最终饱和度接近100%, 试样湿化变形明显。

对于样品2, 围压1.6 MPa, 围压及偏应力引起的试样体变相对较大, 试样干密度增至 $2.148 \text{ g/cm}^3$ , 饱和度达到95%。在这种状态下, 在湿化饱和过程中, 只有少量进水, 试样几乎不发生湿化变形。

砾石土料的湿化变形与土体的起始物理状态密切

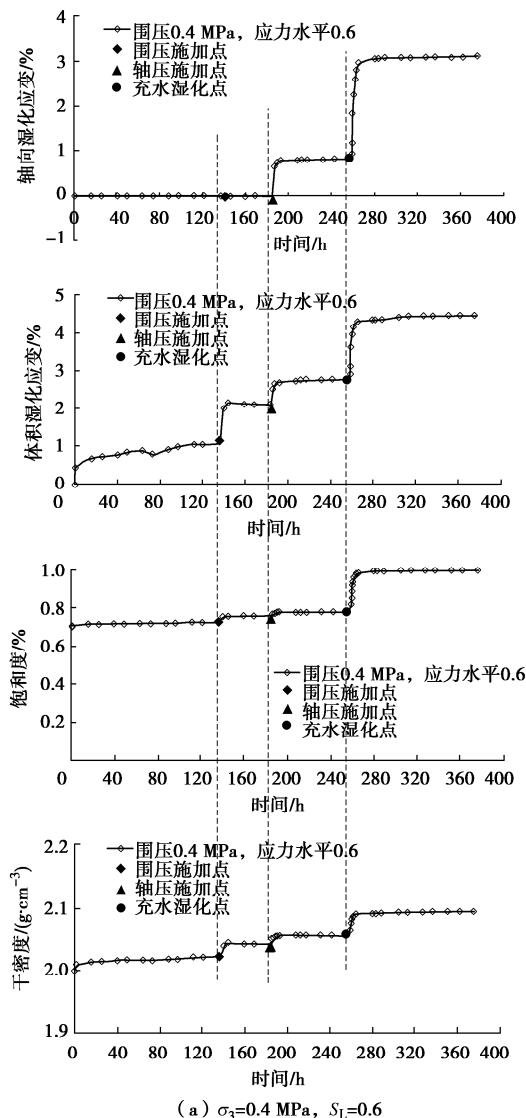


图4 砾石土料湿化变形试验时程曲线<sup>[6]</sup>

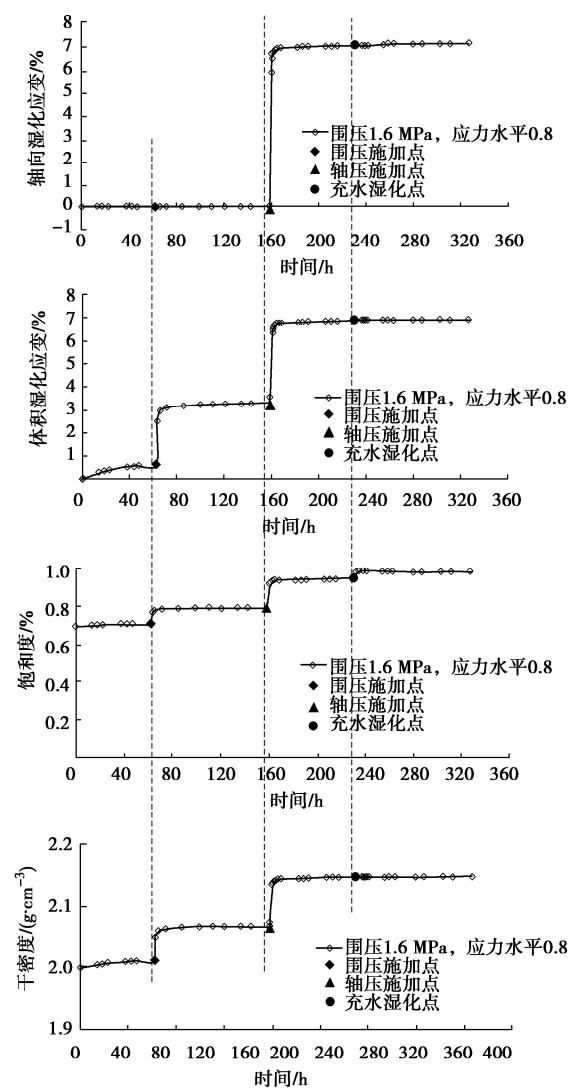


Fig. 4 Time-history curves of wetting deformation tests on gravelly soil core wall materials

相关, 当土体的起始含水率较低时, 未必出现“分叉”现象。之所以不研究土体的起始物理状态对湿化变形的影响, 而重点研究应力与湿化变形的关系, 其出发点在于笔者长期以来对土石坝的认识, “在坝体分区中, 每一小区域内土的物理指标也可能不一样, 但不能准确了解它, 是填筑施工随机的产物, 某一坝体分区只能选择代表性试样确定其力学性”。

对于土石坝心墙料的湿化试验, 当初始含水率选择小了, 可能夸大了湿化变形, 当试验初始含水率偏大, 预测湿化变形可能偏小, 这也是土石坝湿化变形不易预测的主要原因。依据以往经验, 选择比其最优含水率略小一点的初始含水率进行湿化试验是合适的。

#### 4 砾石土料的湿化模型与参数

砾石土的湿化特性相对堆石料而言, 不论试验方法还是成果规律都要复杂, 正是其复杂性导致砾石土的湿化研究成果的缺失。针对图 2 中湿化应变与应力水平的关系, 经反复试拟合, 采用指数函数结合二次多项式能较准确表达应力与湿化应变关系。

##### 4.1 轴向湿化应变

轴向湿化应变  $\varepsilon_a^w$  显然是围压  $\sigma_3$  和应力水平  $S_L$  的函数。先采用指数函数拟合  $\varepsilon_a^w$  与  $S_L$  间的关系, 如图 5。其关系表达式为

$$\varepsilon_a^w = \alpha_1 e^{\beta_1 S_L} \quad (1)$$

式中:  $\alpha_1$  和  $\beta_1$  为拟合参数, 是  $\sigma_3$  的函数。

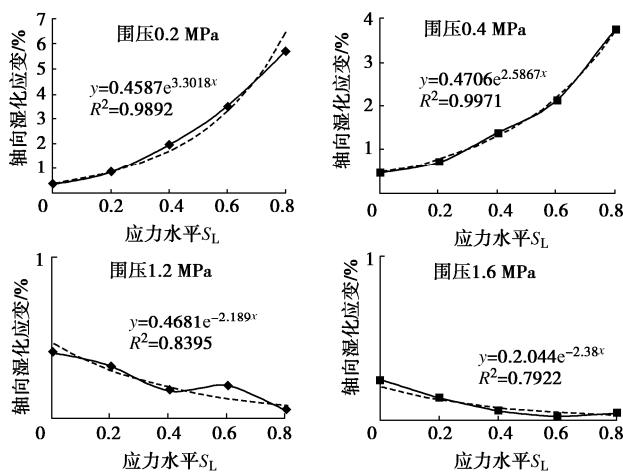


图 5 轴向湿化应变与应力水平关系曲线

Fig. 5 Relation curves between axial wetting strain and stress level

图 6 为  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  与  $\sigma_3$  的关系曲线, 采用多项式进行拟合, 数学表达式为

$$\alpha_1 = a_1 \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^2 + b_1 \frac{\sigma_3}{p_a} + c_1 \quad (2)$$

$$\beta_1 = d_1 \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^2 + f_1 \cdot \frac{\sigma_3}{p_a} + g_1 \quad (3)$$

式 (2), (3) 中,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$ ,  $f_1$ ,  $g_1$  为模型参数。为使得量纲统一, 围压均除以大气压, 以使得无量纲化。

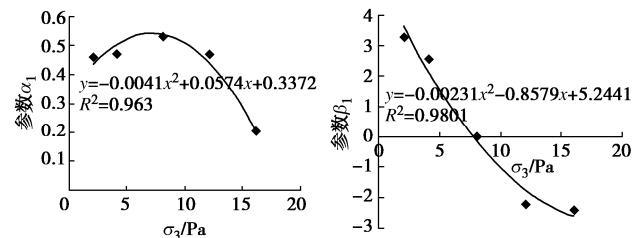


图 6 参数  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  与围压关系曲线

Fig. 6 Relation curves between parameters  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  and confining pressure

##### 4.2 体积湿化应变

湿化体积应变  $\varepsilon_v^w$  也是围压  $\sigma_3$  和应力水平  $S_L$  的函数。先采用指数函数拟合  $\varepsilon_v^w$  与  $S_L$  间的关系, 如图 7。其关系表达式为

$$\varepsilon_v^w = \alpha_v e^{\beta_v S_L} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_v$  和  $\beta_v$  为拟合参数, 是  $\sigma_3$  的函数。

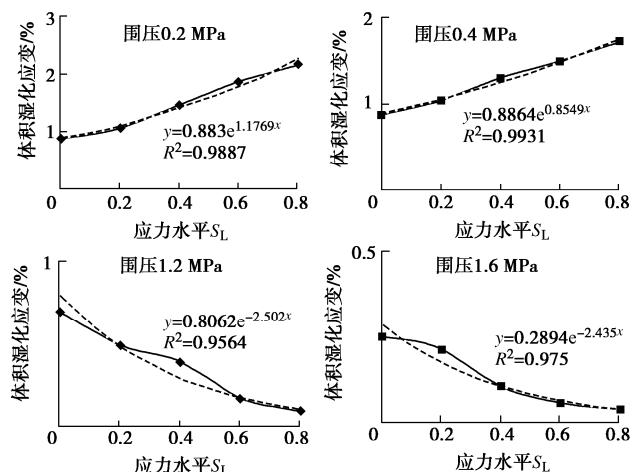


图 7 体积湿化应变与应力水平关系曲线

Fig. 7 Relation curves between volumetric wetting strain and stress level

图 8 为  $\alpha_v$ ,  $\beta_v$  与  $\sigma_3$  的关系曲线, 采用多项式进行拟合, 数学表达式为

$$\alpha_v = a_v \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^2 + b_v \frac{\sigma_3}{p_a} + c_v \quad (5)$$

$$\beta_v = d_v \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^2 + f_v \frac{\sigma_3}{p_a} + g_v \quad (6)$$

式中:  $a_v$ ,  $b_v$ ,  $c_v$ ,  $d_v$ ,  $f_v$ ,  $g_v$  为模型参数。

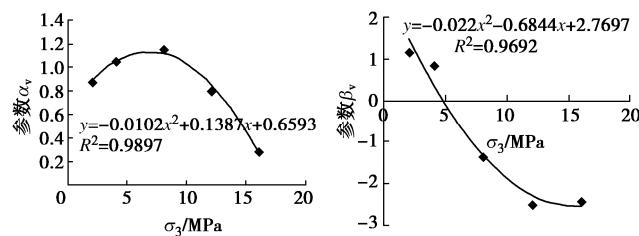
图8 参数  $\alpha_v$ ， $\beta_v$  与围压关系曲线

Fig. 8 Relation curves between parameters  $\alpha_v$ ,  $\beta_v$  and confining pressure

#### 4.3 湿化模型参数

本次试验获得的砾石土心墙料的湿化模型参数见表3。表中模型参数均是拟合值, 无具体的物理意义。

表3 砾石土料湿化模型参数

Table 3 Wetting model parameters of gravelly soil core materials

湿化轴	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$	$f_1$	$g_1$
向应变	-0.004	0.057	0.337	0.023	-0.858	5.244
湿化体	$a_v$	$b_v$	$c_v$	$d_v$	$f_v$	$g_v$
积应变	-0.010	0.139	0.659	0.022	-0.684	2.770

## 5 结 论

通过砾石土心墙料的大三轴湿化变形试验研究, 明确回答了引言中的问题。

(1) 砾石土心墙料的湿化变形是明显的, 且与应力水平、围压密切相关。

(2) 当围压较少时, 湿化应变随应力水平的增大而增大, 当围压达到一定量值时, 湿化应变反而随应力水平的增大而减小, 呈现明显的分叉现象, 表现出更加复杂的规律。

(3) 在高围压、高应力水平条件下, 砾石土料存在应力饱和现象, 外部应力改变了土体的饱和度, 使湿化前的饱和度基本达到饱和状态, 导致湿化应变在湿化过程中没有明显变化。

非饱和砾石土料在外应力作用下超孔压的产生及固结、耦合在水压力作用下的渗透与湿化, 完整的响应机理和分析方法是值得深入探讨的课题。

## 参考文献:

- [1] 余挺. 砾质土防渗料在高土石坝上的应用[J]. 水电站设计, 2003, 19(3): 15-17. (YU Ting. Application of gravelly soil impervious material in high earth-rock dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2003, 19(3): 15-17. (in Chinese))
- [2] 黄玲, 徐晗, 饶锡保, 等. 砾质土钻孔灌砂工艺三轴试验效果研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 84-88. (HUANG Ling, XU Han, RAO Xibao, et al. Triaxial tests effect study on drilling and pumped sands of gravelly soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(12): 84-88. (in Chinese))
- [3] 朱俊高, 龚选, 周建方, 等. 不同剪切速率下掺砾料大三轴试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 29-34. (ZHU Jungao, GONG Xuan, ZHOU Jianfang, et al. Large-scale triaxial tests on behavior of gravelly soil at different shearing rates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(1): 29-34. (in Chinese))
- [4] 李玲琳. 狮子坪水电站心墙堆石坝砾石料施工期大型三轴压缩试验[J]. 四川水力发电, 2013, 32(5): 92-94. (LI Linglin. Large-scale triaxial compression test of gravel soil material for core rockfill dam of Shiziping Hydropower Station during construction period[J]. Sichuan Water Power, 2013, 32(5): 92-94. (in Chinese))
- [5] 程展林, 丁红顺, 左永振, 等. 砾石土大型三轴试验砂芯加速排水方法及试样成孔制样器: CN101655424A[P]. 2010-02-24. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, ZUO Yong-zhen, et al. Accelerated drainage method and sample making device of sand core in large scale triaxial test of gravelly soil CN101655424A[P]. 2010-02-24. (in Chinese))
- [6] 左永振, 程展林, 潘家军, 等. 砾石土心墙料的大三轴湿化变形试验与规律分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊2): 37-42. (ZUO Yongzhen, CHENG Zhanlin, PAN Jiajun, et al. Large-scale triaxial wetting deformation tests and laws of gravelly soil core materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 37-42. (in Chinese))