

DOI: 10.11779/CJGE2020S2007

砾石土心墙料的大三轴湿化变形试验与规律分析

左永振, 程展林, 潘家军, 周跃峰, 赵娜

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

摘要: 蓄水湿化变形一直是制约高土石坝长期安全运行的技术难题, 为此开展了筑坝堆石料的湿化变形试验, 却极少针对砾石土心墙料进行湿化变形试验, 这主要是受限于目前的砾石土料试验技术手段而难以开展试验研究。采用在大尺寸砾石土料试样中设置砂芯增加进水通道、缩短湿化路径的方法, 可以解决砾石土心墙料的湿化变形试验所需时间较长、样品不能充分饱和等技术难点, 实现砾石土心墙料的大三轴湿化变形试验。开展的砾石土心墙料的单线法湿化变形试验结果表明, 砾石土心墙料存在明显的湿化变形现象, 轴向湿化变形、体积湿化变形与围压、应力水平等密切相关, 湿化变形与应力水平关系, 在围压较小时随应力水平的增加而增加, 在围压较大时随应力水平的增加而减小, 关系曲线呈现明显的分叉现象, 湿化变形与围压关系基本呈现先增加后减小的规律, 与堆石料的湿化变形规律相比较, 砾石土心墙料的湿化变形规律更加复杂。

关键词: 砾石土心墙料; 湿化变形; 单线法; 大型三轴

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0037-06

作者简介: 左永振(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 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。

Large-scale triaxial wetting deformation tests and laws of gravelly soil core materials

ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, PAN Jia-jun, ZHOU Yue-feng, ZHAO Na

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research

Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Wetting deformation of water storage has always been a technical issue that restricts the long-term safety operation of high earth-rockfill dams. The wetting deformation tests have been commonly carried out for rockfill materials, but seldom for gravelly soil core wall materials, which is mainly because it is difficult to carry out experimental studies due to the current testing techniques of gravel soil materials. By setting sand cores in large-scale gravelly soil samples to increase the water inlet channel and shorten the wetting path, the technical difficulties such as the long time required for the wetting deformation tests on gravelly soil core materials and the insufficient saturation of samples can be solved. Then the large-scale triaxial wetting deformation tests on gravelly soil core materials can be conducted successfully. The wetting test results show that there is obvious wetting deformation phenomenon in gravelly soil core wall materials. The axial and volume wetting deformations are closely related to the confining pressure and stress level. The relationship between the wetting deformation and the stress level increases with the increasing stress level when the confining pressure is small, and decreases with the increasing stress level when the confining pressure is large. The relationship between the wetting deformation and the confining pressure basically shows the deformation tendency of increasing first and then decreasing. Compared with that of rockfill materials, the wetting deformation tendency of gravelly soil core materials is more complex.

Key words: gravelly soil core material; wetting deformation; single-line method; large-scale triaxial test

0 引言

对高土石心墙堆石坝而言, 坝体变形、心墙拱效应、心墙开裂等问题都是影响大坝安全的关键因素^[1], 近年来随着国内外一批 200 m 级高土石心墙堆石坝的建成和运行, 既有成功经验, 也有不少心墙坝出现坝

体裂缝、局部破坏等现象, 如国内小浪底土心墙堆石

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404804); 国家自然科学基金-雅砻江联合基金重点项目 (U1765203); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目 (YK319013)

收稿日期: 2020-05-30

坝(坝高 160 m)、瀑布沟土心墙堆石坝(坝高 186 m)、美国 Cougar 土心墙堆石坝(坝高 156 m)、墨西哥的 Infiernillo 心墙堆石坝(坝高 148 m), 都在初期蓄水过程中在坝顶处出现明显的局部或贯穿的纵向裂缝, 奥地利 Gepatsch 心墙堆石坝(坝高 153 m)在初蓄完成后出现坝壳湿陷变形较大、心墙拱效应强烈、坝顶有严重的纵向裂缝等问题^[2], 这些现象的发生时间, 均是在大坝蓄水不久后出现, 这说明蓄水是导致产生裂缝的重要因素之一。

在大坝蓄水后, 坝壳料的湿化变形是显著的, 上游堆石料因渗透性较好, 湿化变形在相对较短时间内完成, 导致上游堆石料与心墙料差异变形, 对心墙防渗系统产生不利影响, 比如上游堆石料的湿化变形会引起上游靠近心墙处堆石区及心墙中上部应力减小, 可能会引起心墙上部局部区域产生拉应力及偏向上游的位移, 这是大坝初期蓄水引起心墙顶部裂缝的主要原因之一^[3]。随着蓄水时间的增加, 砾石土心墙料从填筑时的非饱和状态逐渐过渡到饱和状态, 砾石土心墙料将产生一定的湿化变形, 如果湿化变形量较大, 心墙应承担的应力逐渐传递到堆石料区, 在坝体中产生反拱效应, 心墙料产生张拉裂缝进而导致坝体漏水或诱发水力劈裂现象, 破坏坝体的防渗系统。因此, 砾石土心墙材料与堆石材料在湿化变形时序上的不协调, 引起坝体不均匀沉降和应力重分布^[4], 纵向裂缝和水力劈裂的发生只是外在表现。

长期以来只关注堆石料的湿化变形, 对砾石土心墙料的湿化变形没有开展相关研究, 在高土心墙堆石坝的后期变形计算分析中, 对大坝竣工期及蓄水期应力变形进行模拟分析, 一般只考虑蓄水引起的堆石料部分的湿化变形, 不考虑砾石土心墙料的湿化变形, 这主要是因当前试验技术手段的限制, 无法开展砾石土心墙料的湿化变形试验研究, 更没有砾石土心墙料的湿化模型。砾石土心墙料中既含有粗颗粒的碎石料, 最大粒径可达 150 mm, 大于 5 mm 的粒径一般占 30%~50%, 又含有较大比例的黏性土, 渗透系数一般为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s。因此砾石土心墙料强度变形试验需要使用常规大型三轴仪(试样尺寸 $\phi 300$ mm \times $H 600$ mm), 但砾石土料因渗透系数低导致大试样的饱和、固结排水等十分困难, 需要耗费较长的时间, 按 $\phi 39.1$ mm 的小试样饱和需要 1 d 时间计算, $\phi 300$ mm 的大试样饱和约需要 60 d^[5], 试验周期长、效率低时间, 而且很难保证试样内部心墙料达到饱和状态。

随着高土石坝的建设和技术发展需求, 开展砾石土心墙料的湿化变形试验, 已经成为必须面对解决的问题。长江科学院长期关注砾石土心墙料的试验难点,

为进行常规大型三轴试验提出采用“砂芯”加速饱和、固结排水的专利技术方法^[6], 成功解决了砾石土心墙料的大型三轴试验饱和、固结排水问题, 近期应用“砂芯”方法进行砾石土心墙料的湿化变形试验, 取得了较好的效果, 本文对如何采用砂芯技术进行砾石土心墙料的大型三轴湿化变形试验, 进行详细的介绍。

1 砾石土心墙料湿化变形试验方法

1.1 试验材料

本次试验的砾石土心墙料取自两河口水电站, 砾石与黏土按 4:6 比例掺拌, 60~5 mm 为砾石, 小于 5 mm 细粒全部是黏土, 占比 60%, 试验级配见图 1。

该料的重型击实最大干密度为 2.10 g/cm^3 , 最优含水率为 10.1%, 试验干密度采用 2.00 g/cm^3 , 压实度为 0.95。

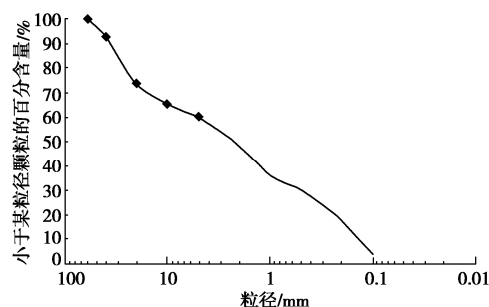


图 1 砾石土心墙料试验级配

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

1.2 砂芯加速饱和和技术方法^[6]

砾石土心墙料大型三轴湿化试验的难点即为大尺寸试样的充分饱和与试验过程中的排水通畅, 保证数据的真实可靠, 因此对“砂芯”加速饱和、固结排水方法进行简单介绍。砾石土心墙料加速饱和、固结排水的基本要求是在不影响力学性质的条件下, 尽量缩短试样饱和、固结排水时间, 提高效率。

以试样尺寸 $\phi 300$ mm \times $H 600$ mm 的大型三轴为例, 在直径为 300 mm 的大尺寸砾石土心墙料土样中沿轴向均匀分布 13 个直径 6 mm 的预成孔, 砂芯占试样截面积的比例为 0.52%, 在孔中灌砂形成砂芯, 砂芯起到有效增加进水通道、减小排水距离, 提高试样的饱和度、排水速度的作用。经试验验证有砂芯样和无砂芯样的三轴固结排水剪切试验的应力应变关系曲线十分近似, 砂芯的设置对砾石土试样的强度及应力应变特性的改变不大。有砂芯样的孔压消散过程明显加快, 砂芯的排水作用是明显的(图 2), 砂芯加速饱和和排水方法使砾石土心墙料大型三轴试验成为可能。

1.3 大尺寸砾石土样湿化变形试验方法

在堆石料的湿化变形试验中, 试验方法通常分单

表 1 砾石土心墙料湿化变形量

Table 1 Wetting deformations of gravelly soil core materials

应力水平	不同围压的轴向应变/%					不同围压的体积应变/%				
	0.2	0.4	0.8	1.2	1.6	0.2	0.4	0.8	1.2	1.6
0.2	0.171	0.408	0.812	0.591	0.568	0.537	0.987	1.418	0.935	0.906
0.4	0.746	1.095	0.938	0.291	0.580	1.209	1.884	1.203	0.690	0.673
0.6	2.352	2.289	2.083	0.319	0.027	1.658	1.699	1.908	0.228	0.097
0.8	5.473	4.422	2.843	0.432	0.039	1.108	2.109	1.270	0.225	0.037

线法和双线法两种。单线法是对干态（备样含水率）样品施加预定应力，保持应力状态不变条件下对样品充水至饱和状态，在该过程中所发生的变形作为在该应力状态下的湿化变形量。双线法是分别采用干态和饱和态的样品进行三轴试验，将同一应力状态下的应变之差作为该应力状态下的湿化变形。一般认为单线法更接近实际浸水饱和过程，因此砾石土心墙料的湿化变形试验中采用单线法。

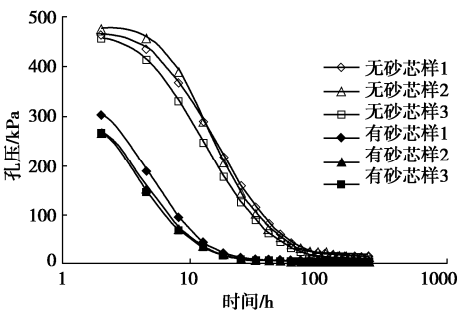


图 2 砂芯样孔压消散曲线对比^[6]

Fig. 2 Comparison of pore pressure dissipation curves in samples with sand cores^[6]

根据土的三相组成，土体中由空气、水、土颗粒组成，土中各种形状的粗细颗粒集合和排列形成固相骨架，骨架内部有宽窄和形状不同的孔隙，构成复杂的孔隙系统，水和空气并存并填满在孔隙系统中，湿化试验过程中就是将液态水置换孔隙中的空气，从而使土颗粒周边充满液体水，达到饱和效果，实现湿化过程。砾石土心墙料湿化变形试验在堆石料的湿化变形试验基础上，细化了试验操作步骤，增加了 CO₂ 置换和真空抽气过程，操作流程见图 3，关键几步操作如下：

- (1) 按要求制备试样后，先采用 CO₂ 置换试样孔隙中的空气，试验过程和操作按标准^[7]进行。
- (2) 利用真空泵对试样进行抽气，将试样狭窄孔隙中的 CO₂ 气体抽出。狭窄孔隙中的小气泡，具有较强的吸附能力，阻碍毛细水头的浸润发展，因此增加真空抽气过程，为将土体中的气体尽量抽出，抽气过程应至少持续 48 h。对试样真空抽气，相当于对试样施加了 100 kPa 的围压力，这一过程中试样会产生体积变形，因此从开始真空抽气，记录不同时刻试样

- 的轴向变形和体积变形。
- (3) 对试样施加周围围压力，进行等压固结，固结过程中持续真空抽气。
- (4) 对试样施加轴向压力，进行偏压固结，固结过程中持续真空抽气。当达到变形稳定标准后，停止真空抽气，从底孔进行水头饱和。

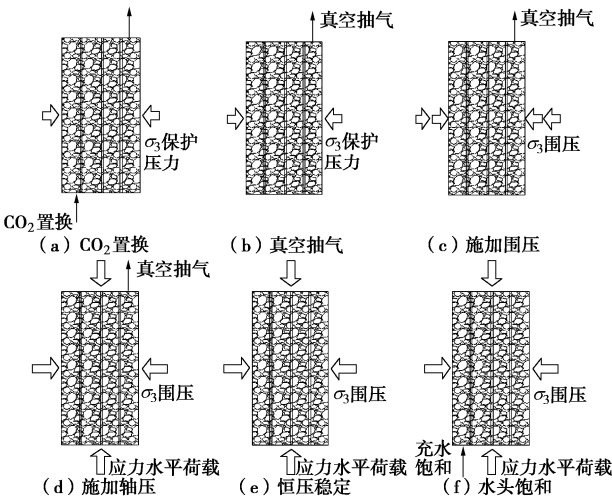
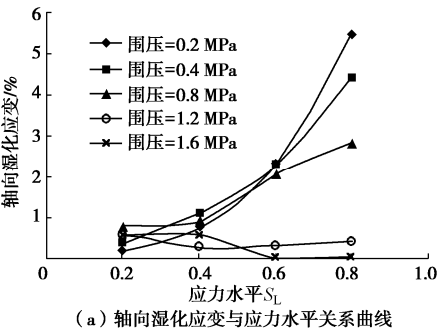


图 3 砾石土心墙料湿化变形试验的实现流程图

Fig. 3 Flow chart of wetting deformation tests on gravelly soil core materials

2 湿化变形试验成果

针对直径 300 mm 的砾石土心墙料试样，进行了单线法湿化变形试验，围压分 0.2，0.4，0.8，1.2，1.6 MPa 五级，应力水平分 0.2，0.4，0.6，0.8 四级，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 1，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 4。



(a) 轴向湿化应变与应力水平关系曲线

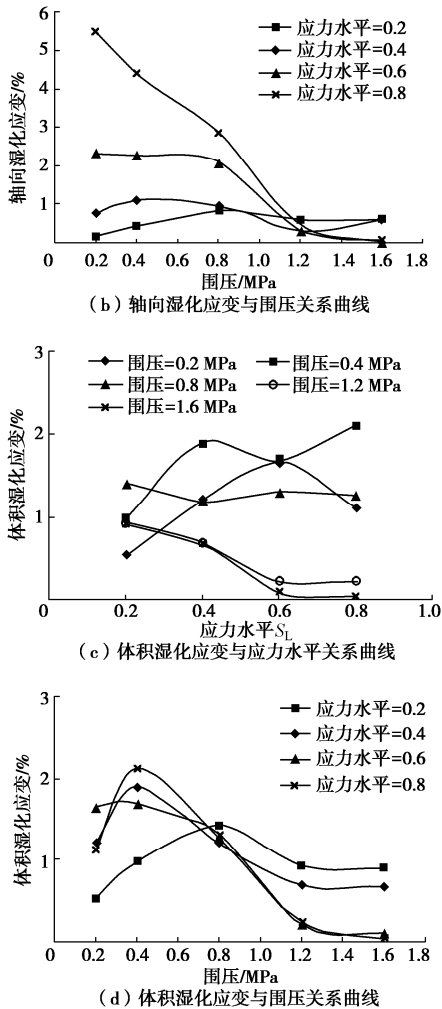


图4 砾石土料湿化变形与应力水平、围压关系曲线

Fig. 4 Relation curves of wetting deformation with stress level and confining pressure of gravelly soil core materials

从图4中可见,砾石土心墙料的湿化变形与应力水平、围压关系密切相关。轴向湿化变形、体积湿化变形与应力水平的关系,当围压较少时,湿化变形量随应力水平的增加呈明显增长趋势,当围压为1.2 MPa时,湿化变形量基本上呈现水平状态,不受应力水平的影响,但当围压较大(1.6 MPa)时,湿化变形量随应力水平的增加呈降低趋势,湿化变形量整体具有明显的分叉结构。轴向湿化变形与围压的关系,在应力水平较低时(S_L 为0.2, 0.4)呈现先随围压增加后降低的趋势,在应力水平较高时(S_L 为0.6, 0.8)整体呈现降低趋势,体积湿化变形与围压的关系整体呈现先随围压增加后降低的趋势。与堆石料的湿化变形规律^[8]相比较,砾石土心墙料的湿化变形规律明显不同,表现出更加复杂的规律。

需要说明的是在砾石土心墙料的湿化变形试验中,因采用单线法,一组湿化试验成果是由16个试样分别进行4个围压和4个应力水平组合得到,试样间的差异和试验误差导致有些试验点的规律性较差。

3 含水率对湿化变形的影响

为研究含水率对砾石土湿化变形的影响,进行了1组干密度 2.00 g/cm^3 ,含水率10%的湿化变形试验。图5(a)是围压0.8 MPa条件下的湿化变形量与应力水平的对比曲线,图5(b)是应力水平0.6条件下的湿化变形量与围压的对比曲线,可见2个含水率下的湿化变形量与应力水平、围压的变化规律基本相似,但含水率10%的湿化变形量明显低于含水率9%的变形量,说明含水率对砾石土心墙料的湿化变形量影响显著。

砾石土心墙料的施工填筑含水率受土料性质、填筑部位、气候条件、施工机械等影响,碾压式土石坝设计规程中规定含水率控制在最优含水率的 $-2\% \sim +3\%$ 偏差范围内。从含水率对湿化变形的显著影响看,施工含水率宜控制在最优含水率的 $0 \sim +3\%$ 范围内,采用较大含水率的砾石土料进行填筑,可以有效减小砾石土心墙的后湿化变形沉降量。

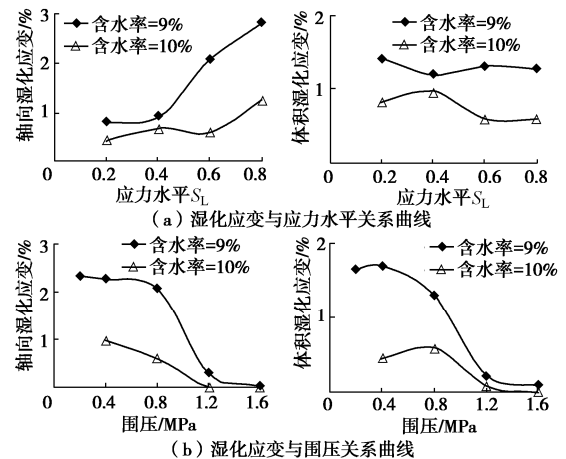


图5 不同含水率条件下的砾石土料湿化变形对比

Fig. 5 Comparison of wetting deformation under different water content conditions

4 湿化变形成果分析

湿化变形与应力水平、围压密切相关,在围压和应力水平较小时的湿化变形规律较好,基本服从湿化变形量随围压和应力水平增加而增加的规律,但是当在高围压和高应力水平时,湿化变形量反而减小,甚至几乎没有湿化变形量,如围压1.6 MPa、应力水平为0.6, 0.8条件下的湿化变形量非常小,这是湿化试验过程中因为充水饱和时间不够或者水头差较小导致的试样饱和度没有达到规范要求的95%以上标准?还是试样已经达到饱和度标准的真实宏观表现?这直接关系到湿化试验成果的真实性,需要进行明确判断,下面通过细化后的逐步试验操作进行分析。

根据试验过程中每一时刻测量的体积变形量和充水湿化过程中的进水量, 通过下式可以计算每一时刻的样品干密度和饱和度:

$$\rho_d = \frac{\rho_{d0}}{1 - \varepsilon_v}, \quad (1)$$

$$w = w_0 + \frac{\mu}{m_0}, \quad (2)$$

$$\rho = \rho_d \cdot (1 + w), \quad (3)$$

$$S_r = \frac{(\rho - \rho_d) \cdot d_s}{d_s - \rho_d}. \quad (4)$$

式中 S_r 为试验过程中试样饱和度 (%); μ 为试验过程中充水湿化中进入试样的进水量 (ml); ρ_d 为试验过程中试样变形后的干密度 (g/cm^3); ρ 为试验过程中试样变形后的湿密度 (g/cm^3); w 为试验过程中试样含水率 (%); ρ_{d0} 为备样干密度 (g/cm^3); w_0 为备样含水率 (%); m_0 为试样干质量 (g); ε_v 为试验过程中试样的体积应变 (%); d_s 为试样相对质量密度。

图 6, 7 是砾石土心墙料两种典型的湿化变形试验时程曲线。图 6 的围压为 0.4 MPa, 应力水平为 0.6, 存在比较明显的湿化变形过程, 从图 6 中可见, 样品在围压和轴压下偏压固结完成后, 充水湿化前的干密

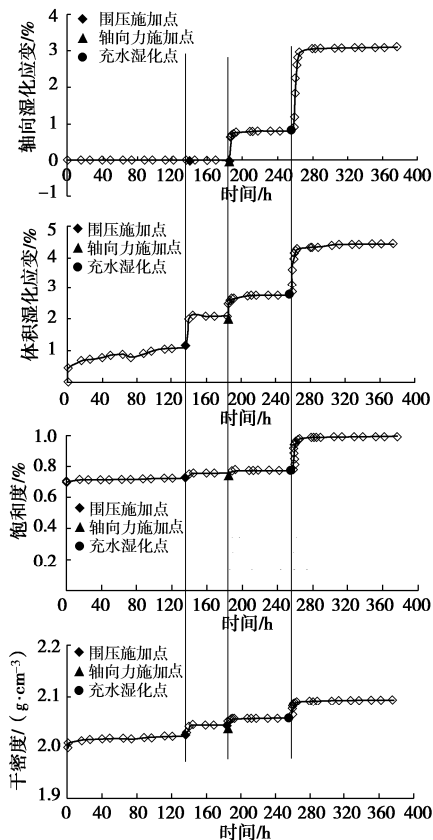


图 6 砾石土料湿化变形试验时程曲线 ($\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$, $S_L = 0.6$)

Fig. 6 Time-history curves of wetting deformation tests on gravelly soil core materials ($\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$, $S_L = 0.6$)

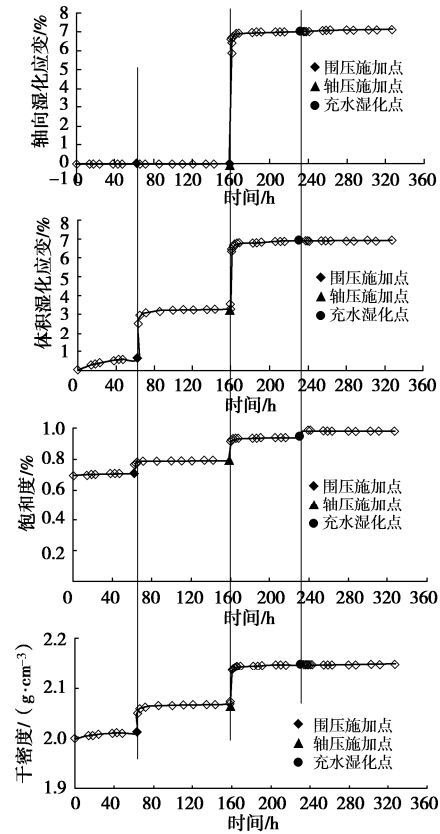


图 7 砾石土料湿化变形试验时程曲线 ($\sigma_3 = 1.6 \text{ MPa}$, $S_L = 0.8$)

Fig. 7 Time-history curves of wetting deformation tests on gravelly soil core materials ($\sigma_3 = 1.6 \text{ MPa}$, $S_L = 0.8$)

度为 $2.057 \text{ g}/\text{cm}^3$, 对应的样品饱和度为 78%, 因此在充水湿化过程中进水量较多, 呈现明显的湿化变形现象。图 7 的围压为 1.6 MPa, 应力水平为 0.8, 充水湿化过程中基本没有产生湿化变形量, 这是因为图 7 中的样品充水湿化前的干密度为 $2.148 \text{ g}/\text{cm}^3$, 对应的样品饱和度已经达到 95%, 因此在充水湿化过程中进水量非常少, 也没有湿化变形现象。

通过图 7 的示例说明, 在高围压和高应力水平条件下, 试样在偏压固结完成后试样被压缩密实, 已经没有湿化变形空间, 饱和度已经达到了规范要求的 95% 饱和状态, 没有充水湿化变形是试样达到饱和状态的真实表现。在湿化变形试验后对试样进行了多组含水率试验, 换算后的饱和度全部达到规范要求的饱和度要求。

5 结 论

本文在砂芯加速饱和固结排水的专利技术基础上, 针对砾石土心墙料采用单线法开展了大三轴湿化变形试验。

(1) 砾石土心墙料存在明显的湿化变形现象。

(2) 砾石土心墙料的湿化变形与围压、应力水平密切相关。与堆石料的湿化变形规律相比较, 砾石土

心墙料的湿化变形规律明显不同,表现出更加复杂的规律。

(3) 当围压较少时,湿化变形量随应力水平的增加呈增长趋势,但当围压较大时,湿化变形量随应力水平的增加呈降低趋势,具有明显的分叉结构。轴向湿化变形与围压的关系,在应力水平较低时呈现先随围压增加后降低的趋势,在应力水平较高时整体呈现降低趋势,体积湿化变形与围压的关系整体呈现先随围压增加后降低的趋势。

(4) 在高围压和高应力水平条件下,试样在偏压固结完成后试样被压缩密实,其饱和度已经达到了饱和状态,充水湿化过程中进水量较少,没有湿化变形过程是试样达到饱和状态的真实表现。

(5) 含水率对砾石土料的湿化变形影响显著,为减小砾石土心墙料的后期湿化变形量,填筑含水率宜偏大于最优含水率。

本文重点介绍了砾石土心墙料的湿化变形试验过程和湿化变形成果规律,湿化模型及影响因素分析等将另文陈述。

参考文献:

- [1] 李国英,王禄仕,米占宽.土质心墙堆石坝应力和变形研究[J].岩石力学与工程学报,2004(8):1363-1369. (LI Guo-ying, WANG Lu-shi, MI Zhan-kuan, Research on stress-strain behaviour of soil core rockfill dam[J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 2004(8): 1363 - 1369. (in Chinese))
- [2] 雷红军,冯业林,刘兴宁.糯扎渡水电站蓄水速度对心墙堆石坝安全的影响研究[J].大坝与安全,2012(5):1-5. (LEI Hong-jun, FENG Ye-lin, LIU Xing-ning, Effect of impounding speed on safety of Nuozadu core wall rockfill dam[J]. Dam and safety, 2012(5): 1 - 5. (in Chinese))
- [3] 陆阳洋,高庄平,朱俊高.湿化变形对斜心墙堆石坝受力变形特性的影响[J].扬州大学学报(自然科学版),2014,17(3):64-68,73. (LU Yang-yang, GUO Zhuang-ping, ZHU Jun-gao. Effect of wetting deformation on behavior of earth rockfill dam[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2014, 17(3): 64 - 68, 73. (in Chinese))
- [4] 徐泽平.当代高堆石坝建设的关键技术及岩土工程问题[J].岩土工程学报,2011,33(增刊1):34-40. (XU Ze-ping. Technologies and geotechnical problems for construction of modern rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 34 - 40. (in Chinese))
- [5] 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 Xi-bao, etc. Triaxial tests effect study on drilling and pumped sands of gravelly soil[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 84 - 88. (in Chinese))
- [6] 程展林,左永振,丁红顺.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.中国专利:ZL2009100630575[P].2011-06-15. (CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, DING Hong-shun. Accelerated drainage method and sample making device of sand core in large scale triaxial test of gravelly soil. Chinese patent: ZL2009100630575[P]. 2011-06-15. (in Chinese))
- [7] 土工试验方法标准:GB/T50123—2019[S].2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [8] 程展林,左永振,丁红顺,等.堆石料湿化特性试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(2):243-247. (CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, DING Hong-shun, et al. Wetting characteristics of coarse-grained materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 243 - 247. (in Chinese))

(编校:胡海霞)