

DOI: 10.11779/CJGE201904007

等应力比路径下粗粒土湿化试验研究

贾宇峰, 姚世恩, 迟世春*

(近海与海岸工程国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用古水面板坝玄武岩堆石料进行了等应力比路径下的粗粒土湿化试验。试验结果表明, 在等应力比路径下的土体的湿化变形不仅受应力状态的影响还受加载应力路径的影响。在传统湿化变形公式中引入应力路径参量, 并采用体积应力和参考应力水平描述应力状态对湿化变形的影响, 建立了等应力比路径下的湿化变形公式。所建立的湿化变形公式能够很好地描述等应力比路径下的粗粒土湿化变形。

关键词: 粗粒土; 等应力比路径; 湿化变形; 橡皮膜嵌入量; 参考应力水平; 体积应变

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)04-0648-07

作者简介: 贾宇峰(1979-), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事堆石料本构关系方面的研究和教学工作。E-mail: jiayf130@dlut.edu.cn。

Wetting of coarse-grained soil under equal stress ratio path

JIA Yu-feng, YAO Shi-en, CHI Shi-chun

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The wetting tests of coarse-grained soil under the equal stress ratio path are performed using the basalt rockfill of Gushui concrete face rockfill dam. The tests results show that the wetting deformation of soil under equal stress ratio path is affected by stress state and loading stress path. The stress path is added in the traditional wetting deformation formula, and the volumetric stress and reference stress level are used to simulate the influences of stress state on the wetting deformation. A formula for the wetting deformation under equal stress ratio path is developed. The developed formula can accurately simulate the wetting deformation of the coarse-grained soil under equal stress ratio path.

Key words: coarse-grained soil; equal stress ratio path; wetting deformation; rubber membrane embedded amount; reference stress level; volume strain

0 引言

21世纪以来中国土石坝建设飞速发展。已经建成天生桥一期面板堆石坝、水布垭面板堆石坝、糯扎渡心墙堆石坝等一批200 m级高土石坝。目前, 还有长河坝、两河口、双江口等一批200~300 m级的超高土石坝正在建设。而变形控制是土石坝设计和安全运行的核心问题。在初次蓄水阶段, 随着水位的不断升高库水会渗入坝体, 导致筑坝粗粒土发生湿化变形。湿化变形控制不利, 会产生坝体裂缝破坏坝体防渗性, 甚至直接导致坝体坍塌。如委内瑞拉的埃尔伊西罗坝初期蓄水后下游坝坡出现纵向裂缝^[1], 密云水库走马庄副坝在汛期水位快速上升时坝面下沉, 并且坝顶心墙区出现纵向裂缝^[2-3], 湿化变形导致墨西哥的英菲尔尼罗坝坝顶在蓄水后快速下沉, 进而产生了纵向裂缝^[4]等。

因此, 粗粒土的湿化变形引起了广泛的关注, 很

多学者对此进行了专门研究。如李鹏等^[5]通过大型常规三轴湿化试验研究了粗粒土的湿化变形与湿化抗剪强度的关系, 魏松等^[6-7]通过粗粒土三轴湿化试验发现湿化变形与湿化颗粒破碎密切相关, 并且受湿化应力水平影响。目前, 关于湿化变形的研究都是基于常规三轴应力路径下的湿化试验, 而土石坝在填筑过程中筑坝粗粒土的真实应力路径接近于主应力比 R ($R = \sigma_1 / \sigma_3$) 为常数的等应力比路径^[8]。并且, 在大坝蓄水过程中, 坝体内粗粒土的应力路径发生转折, 呈现为复杂应力路径^[9]。已有研究表明, 复杂应力路径下筑坝粗粒土的力学特性与常规三轴试验存在较大差异, 如古兴伟等^[9]指出复杂应力路径下堆石料的

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0201001); 国家自然科学基金项目(51109027); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT12LK11)

收稿日期: 2017-12-29

*通讯作者 (E-mail: schchi@dlut.edu.cn)

应力-应变特性与应力路径密切相关, 杨光等^[10]发现在不同应力路径下粗粒土的颗粒破碎与常规三轴试验有很大差异, 王远等^[11]研究了不同应力路径下粗粒土的颗粒破碎规律, 发现相同围压下不同应力路径的颗粒破碎仍存在较大差异。因此, 为了准确描述筑坝粗粒土在实际应力路径下的湿化变形特性需要进行等应力比路径下的粗粒土湿化试验。

本文采用古水玄武岩粗粒土堆石料进行了等应力比路径下的湿化试验, 并给出了等应力比路径下湿化变形的经验公式。试验分为两个阶段, 即等应力比加载阶段和浸水湿化阶段。其中, 等应力比加载阶段模拟筑坝堆石料的填筑过程。在浸水湿化阶段, 试样应力状态维持不变并通水饱和产生湿化变形, 模拟坝体上游堆石料在蓄水期的湿化过程。试验结果表明, 在等应力比路径下, 应力路径与应力状态共同影响粗粒土堆石料的湿化变形, 这与常规三轴路径下的湿化变形规律存在差异。

1 试验方法

粗粒土的湿化变形指土石料在应力状态不变时, 粗粒土浸水饱和由干变湿所发生的变形^[12]。由于, 粗粒土试样在浸水湿化前处于非饱和状态, 土体的体积变形无法根据试样排水体积直接测量。湿化试验的难点在于如何准确测量非饱和试样在湿化试验过程中的体积应变。对此很多学者提出了有效的试验方法, 如缪林昌等^[13]采用气水交换装置测量非饱和试样体积变形, 沈珠江^[14]和明经平等^[15]采用双筒压力室测量非饱和试样体积变形, 李广信^[12]通过双筒体变罐量测压力室内水的体积变化量测非饱和试样体变, 魏松^[16]通过施加围压的高精度 GPS 液体压力控制系统测量压力室内的水量变化, 进而量测非饱和试样的体变。上述这些方法能够准确测量常规三轴应力路径下土体湿化试验中的体积变形。但是, 在等应力比路径下试样通水湿化前压力室内的围压不断变化, 影响压力室内水的体积测量。

在常规三轴条件下的湿化试验中, 试样在剪切前施加了固结应力, 并且在湿化试验过程中围压保持不变。因此, 双压力室内的气体体积的压缩量保持稳定, 量测的压力室内水的体积变化量即为土体体积变形。而在等应力比路径下, 在试样通水湿化前的加载过程中围压一直改变, 双压力室内的气体的体积也随之改变, 进而影响试样体积变形的测量。因此, 本文采用魏松的方法通过施加围压的液压伺服系统直接测量压力室内水量变化。为了验证试验的可靠性, 进行了饱和粗粒土堆石料在等应力比 $R (R = \sigma_1 / \sigma_3)$ 为 2, 3,

4 三个应力路径下的排水剪切试验, 同时测量压力室内水量变化和试样排水体积。试验结果如图 1 所示。

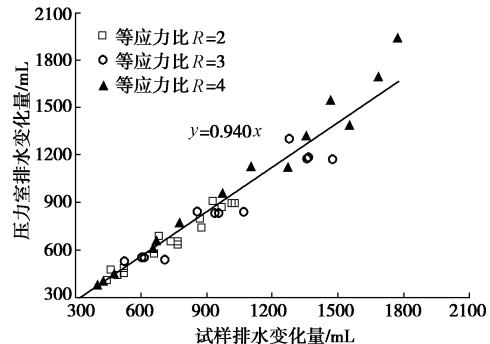


图 1 试样排水体积与压力室内排水变化量的关系 (自来水)

Fig. 1 Relationship between volume of sample drainage and change in pressure indoor drainage (tap water)

从图 1 中可以看到, 试样排水体积与压力室内水量变化存在较大差异。并且, 二者之间的偏差随着应力比的增大而增大。产生这种差异主要有两方面的原因: 首先, 在压力室充水过程中, 试样的橡皮膜外壁与压力室内壁会附着一些气泡。其次, 普通自来水中本身也含有一定量的细小气泡。因此, 随着围压的增大这些气泡体积被进一步压缩导致压力室内水量变化与试样排水体积存在差异。并且, 在等应力比加载路径下体积应力随着应力比的增大而增大, 土体体积压缩量也随之提高。因此, 进入压力室内的水量也明显增大, 压力室水中的气泡含量进一步提高, 这导致二者间的偏差随之增大。

因此, 对等应力比路径下的湿化试验方法进行了调整。首先, 在压力室充水前先从压力室底部通入 CO_2 置换压力室内的空气, 减少压力室内可能产生的附着气泡。其次, 用无气水替代压力室和侧压力系统中的自来水, 剔除普通自来水中的细小气泡。图 2 是采用上述两种改进措施之后的试验结果。通过图 2 可以看到, 各个应力比下压力室水量变化与试样排水体积的离散性显著降低。并且, 试样排水体积变化与压力室内水量变化基本上在 45° 线上。从而可以采用压力室内水量变化测量等应力比路径下非饱和试样的体积变形。因此, 为了准确测量湿化试验中的土体体变, 在进行等应力比路径下的湿化试验时需要采用无气水, 并且在压力室充水前用 CO_2 置换压力室内的空气。

图 3 是应力比 R 为 2, 3, 4 时, 饱和试样通过试样内排水体积测量的体变曲线与通过压力室水量变化测量的体变曲线的对比图。从图中可以看到, 二者之间误差很小, 最大绝对误差值不超过 0.2%。

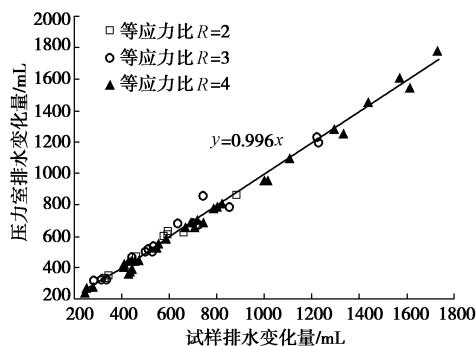


图2 试样排水体积与压力室内排水变化量的关系（无气水）

Fig. 2 Relationship between volume of sample drainage and change in pressure indoor drainage (air-free water)

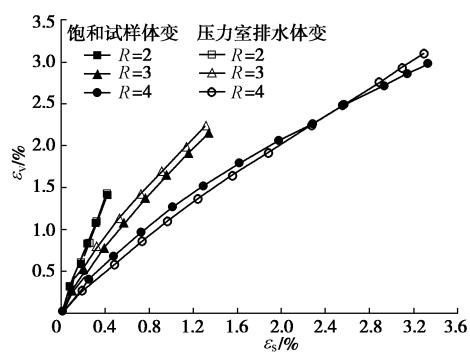


图3 饱和试样体变曲线与压力室排水体变曲线

Fig. 3 Curves of volumetric strains of saturated samples and drainage in pressure chamber

2 试验仪器及试验材料

试验采用大连理工大学研制的堆石料大型多功能三轴仪, 试样高度为600 mm, 试样直径为300 mm, 仪器的最大限制粒径为60 mm。试验堆石料采用古水面板坝玄武岩堆石料, 制样干密度为2.21 g/cm³, 孔隙比为0.26, 不均匀系数C_u=7.5, 曲率系数C_c=1.875, 级配曲线如图4所示。

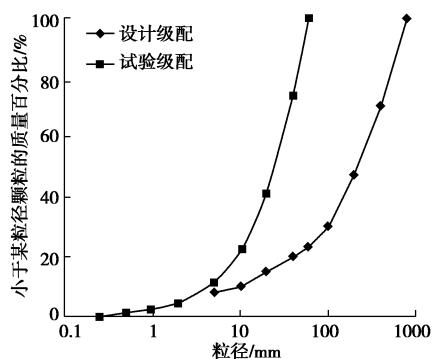


图4 试验级配曲线图

Fig. 4 Grain-size distribution curves

按试样级配进行配料, 分6层装填, 每层装填高度为100 mm, 击实到控制密度。试样装填完成后装

上压力室, 并从底部通入CO₂置换压力室内的空气。然后, 从底部向压力室内充入无气水, 待无气水充满后。在30 kPa的预围压下, 从试样底部通入CO₂置换试样内部空气。待全部空气排出后, 开始固结。固结完成后开始加载, 等应力比加载路径分别为 $\sigma_1/\sigma_3=2, 3, 4$ 。待围压分别加载到1, 2 MPa后, 保持应力状态不变, 释放停机变形和流变变形。然后, 从试样底部通入无气水, 试样进入湿化阶段并产生湿化变形。待试样轴向应变趋于稳定后停止通水, 试验结束。

3 试验结果分析

3.1 橡皮膜嵌入量的影响

在室内大型三轴仪上进行粗粒土的剪切试验时, 由于粗粒土试样的土颗粒不均匀, 且细粒不能完全填充在大粒径的孔隙中。这导致在施加围压时, 周围橡皮膜会嵌入颗粒间的空隙, 进而引起测量体变发生偏差。张丙印等^[8]、杨光等^[10]通过粗粒土等应力比路径下的三轴剪切试验发现, 在等应力比加载路径下必须考虑橡皮膜嵌入量对体积应变的影响; 橡皮膜嵌入量 ΔQ 与围压 σ_3 呈双曲线关系, 即

$$\Delta Q = \frac{100\sigma_3}{A + B\sigma_3} \quad , \quad (1)$$

式中, 参数A和B通过等向固结试验确定。图5为非饱和试样在等向固结试验条件下测量的橡皮膜嵌入量 ΔQ 与围压 σ_3 的关系。根据试验结果, 拟合得到 $A=39.236$, $B=0.226$ 。

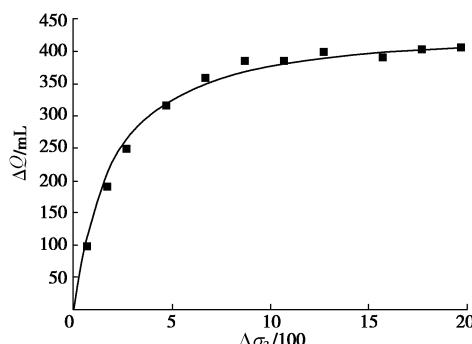


图5 非饱和试样围压与橡皮膜嵌入量的关系

Fig. 5 Relationship between confining pressure of unsaturated samples and rubber membrane embedded amount

3.2 等应力比路径下剪应力的调整

等应力比($R=\sigma_1/\sigma_3$ 为常数)条件下对试样进行剪切试验, 即在剪切过程中由柱头产生的大主应力 σ_1 与由压力室内水产生的围压 σ_3 不断增大, 但是二者的比值保持不变。而在常规三轴固结排水剪切试验过程中, 试样在固结后围压 σ_3 保持不变。因此, 土工试验规程^[17]给出的土体剪切过程中的剪应力为

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (2)$$

式中 C 为测力计率定系数 ($N/0.01\text{mm}$); R 为测力计读数 (0.01mm); A_a 为试样剪切时的截面面积 (cm^2); 10 为单位换算系数。而在等应力比剪切过程中, 由于围压 σ_3 不断增大, 需要对式 (2) 进行修正。

试样在剪切过程中的受力状态如图 6 所示。图中, 传力柱柱头的面积为 A_z , 试样帽的面积为 A_s , 试样截面的面积为 A_a , 压力室内的围压为 σ_3 , 试样间截面的应力 σ_1 。取试样侧面上的一个小微元, 其中该微元在水平面的投影面积为 dA_i , 侧向法向应力与水平线的夹角为 θ_i 。试样侧面上法向应力在竖直方向的分量为 $\sigma_3 \sin \theta_i$, 试样在竖直方向的力的平衡有

$$F + \sigma_3(A_s - A_z) + \iint \frac{dA_i}{\sin \theta_i} (\sigma_3 \sin \theta_i) = \sigma_3 A_a \quad (3)$$

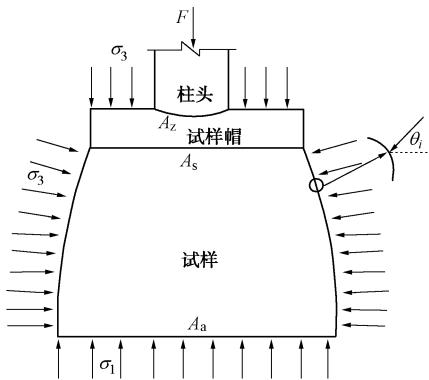


图 6 试样受力简图

Fig. 6 Forces on test sample

根据图 6 受力分析可知

$$\iint \frac{dA_i}{\sin \theta_i} (\sigma_3 \sin \theta_i) = \sigma_3(A_a - A_s) \quad (4)$$

把式 (4) 代入到式 (3) 中整理可得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{F - \sigma_3 A_z}{A_a} \quad (5)$$

式 (5) 表明, 试样剪切过程中的剪应力与围压 σ_3 有关。由于, 常规三轴固结排水剪切试验过程中围压 σ_3 保持不变, 可以在试样固结后直接使用土工试验规程^[17]规定的式 (2) (测力计读数即为轴力增量读数, 即剔除了固结围压 σ_3 的影响) 计算剪切应力。而对于等应力比剪切试验, 围压 σ_3 在剪切过程中一直发生改变。因此, 根据 (5) 式可知, 必须修正等应力比路径下的剪应力, 否则会导致测量的剪应力大于真实值。

3.3 等应力比路径下粗粒土的湿化变形

等应力比加载路径下玄武岩堆石料在 2 MPa 围压下的湿化试验结果如图 7, 8 所示, 图中剪切变形指试样等应力加载过程中产生的剪应变, 流变变形指试样等应力比加载完成后在通水湿化之前保持应力状态不

变产生的流变, 湿化变形指试样流变变形释放完毕后通过湿化引起的变形。在表 1 中列出了 1, 2 MPa 围压下各个应力路径下的湿化变形。

表 1 湿化变形

Table 1 Wetting deformations

参数	$\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$			$\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$		
	$R=2$	$R=3$	$R=4$	$R=2$	$R=3$	$R=4$
S_{el}	0.036	0.086	0.150	0.071	0.125	0.300
$\varepsilon_v / \%$	0.147	0.299	0.455	0.472	0.858	1.345
$\varepsilon_s / \%$	0.086	0.270	0.652	0.266	0.730	1.640

结合图 7, 8 和表 1 可以看到, 相同围压下湿化变形随着加载应力比的增大而增大。加载路径的应力比相同, 湿化变形随着围压的增大而增大。因此, 在等应力比加载路径下, 粗粒土的湿化变形不仅受应力状态的影响, 同时还受加载应力比的影响。这与常规三轴应力状态下粗粒土的湿化变形存在差异。

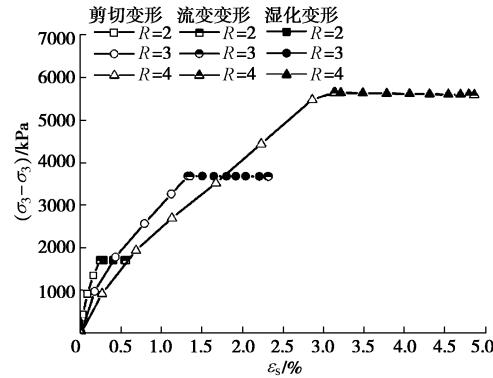


图 7 $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ 时各个应力路径下的剪应变与剪应力关系

Fig. 7 Relationship between shear strain and shear stress under each stress path when $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$

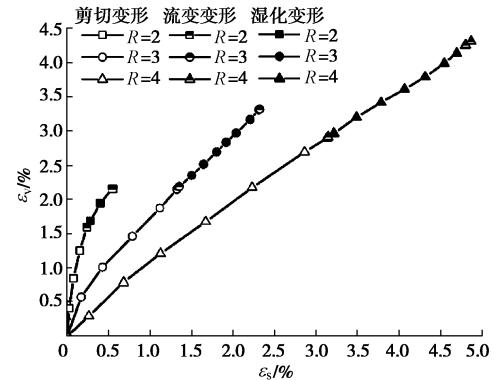


图 8 $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ 时各个应力路径下的剪应变与体应变关系

Fig. 8 Relationship between shear strain and volumetric strain under each stress path when $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$

在常规三轴条件下粗粒土的湿化变形主要受土体应力状态的影响。李国英等^[18]和傅华等^[19]通过粗粒土堆石料常规三轴湿化试验建立了粗粒土的湿化变形公式, 即

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{vs} &= c_w \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_w}, \\ \gamma_s &= b_w \frac{S_l}{1 - S_l} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 ε_{vs} 为湿化体积应变; γ_s 为湿化剪切应变; S_l 为应力水平; c_w , n_w 和 b_w 为试验参数; p_a 为标准大气压。由式 (6) 可以看到, 在常规三轴应力路径下, 土体湿化剪切变形是应力水平的函数, 湿化体积变形是围压的函数。本文在式 (6) 的基础上, 引入应力比参量, 构建等应力比路径下粗粒土的湿化变形公式。

由于, 等应力比路径剪切试验与常规三轴试验的应力路径存在差异, 二者的应力状态不同。因此, 需要对式 (6) 中描述应力状态的围压 σ_3 和应力水平 S_l 进行调整。首先, 采用体积应力 p 替代式 (6) 中的围压 σ_3 。

其次, 对等应力比路径下的应力水平 S_l 的进行调整。如图 9 所示, 在常规三轴应力路径下, 土体加载应力路径与莫尔库仑线相交, 其破坏剪切应力 q_f 可以直接由强度参数根据莫尔库仑准则求出, 从而计算应力水平 $S_l = q/q_f$ 。而在等应力比加载路径下, 应力路径与莫尔库仑线没有交点, 不能由强度参数直接根据莫尔库仑准则计算破坏应力和应力水平。因此, 将式 (6) 中的应力水平 S_l , 调整为参考应力水平 $S_{el} = q/q_{15\%}$ 。其中, $q_{15\%}$ 是土工试验规程^[17]规定的轴向应变 ε_1 达到 15% 时的剪切应力。

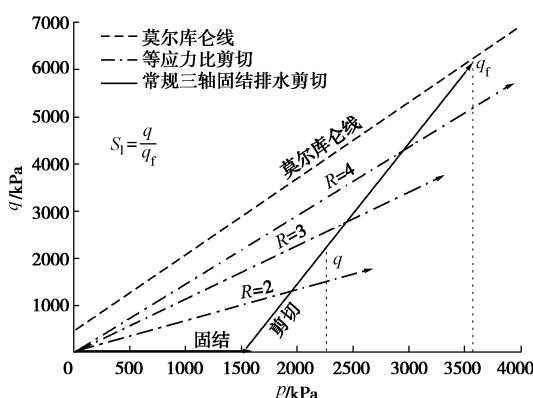


图 9 应力路径图

Fig. 9 Stress paths

为了计算 15% 轴向应变剪切应力 $q_{15\%}$, 采用相变^[20]建立的等应力比路径下三模量增量非线性模型拟合等应力比路径下土体应力应变关系。三参量增量非线性模型为

$$\left. \begin{aligned} p &= A \cdot (\varepsilon_v)^B, \\ q &= C \cdot (\varepsilon_s)^D \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, A , B , C , D 为拟合参数, 受应力路径的影响。根据式 (7), 对古水玄武岩等应力比加载路径下的试验曲线进行拟合, 拟合结果如图 10 所示, 拟合参数见表 2。

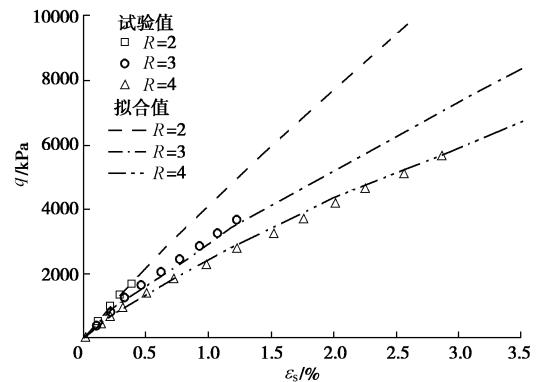


图 10 各个应力路径下 $q - \varepsilon_s$ 曲线试验值和拟合值

Fig. 10 Test and calculated curves of $q - \varepsilon_s$ under each stress path

表 2 参数的拟合值

Table 2 Fitting values of parameters

参数	关系式
A	$A = 61.22\eta + 1456$
B	$B = 0.965$
C	$C = 3360\eta^{-0.747}$
D	$D = 0.861\eta^{-0.134}$

如图 10 所示, 三模量增量非线性模型可以很好地描述等应力比路径下玄武岩粗粒土的应力应变关系。根据式 (7) 可以求出等应力比加载路径下, 土体轴向应变达到 15% 时的剪切应力 $q_{15\%}$, 进而求出各个等应力比路径下试样浸水湿化前的参考应力水平 $S_{el} = q/q_{15\%}$ 。表 1 中列出了各个应力路径下与湿化变形对应的参考应力水平 S_{el} 。

根据表 1 中的试验结果, 结合式 (6), 建立了等应力比路径下的湿化变形公式:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{vs} &= c_{ew} (1 + \eta)^2 (a - \eta) \left(\frac{p}{100 p_a} \right)^{n_{ew}}, \\ \gamma_s &= b_{ew} \left(\frac{\eta}{1 + \eta} \right) \frac{S_{el}}{1 - S_{el}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 η 为加载应力比; p 为体积应力; S_{el} 为参考应力水平; $a = 2.984$, $c_{ew} = 0.682$, $n_{ew} = 1.664$, $b_{ew} = 5.888$ 为模型参数。图 11, 12 为式 (8) 计算的湿化变形与表 1 列出的实测湿化变形。从图 11, 12 中可以看到, 式 (8) 可以很好地描述等应力比加载路径下粗粒土堆石料的湿化变形。

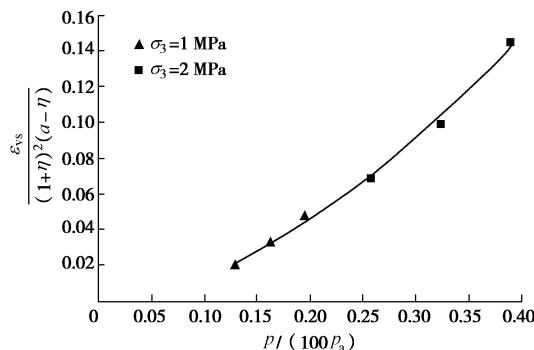


图 11 湿化体积应变的拟合图

Fig. 11 Fitting of wetting volumetric strain

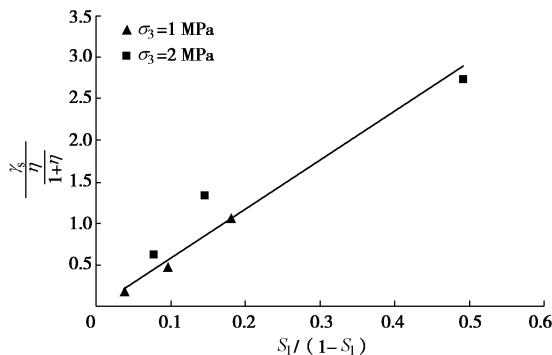


图 12 湿化剪切应变的拟合图

Fig. 12 Fitting of wetting shear strain

4 结 论

通过古水面板坝玄武岩粗粒土堆石料的等应力比路径下湿化试验, 研究了等应力比路径下的粗粒土湿化变形, 得到以下 3 点结论。

(1) 在等应力比加载路径下的湿化试验中, 通过压力室内水量变化测量非饱和试样体变时需要采用无气水, 从而减小由气体压缩引起的测量误差。

(2) 在等应力比加载路径试验过程中, 由于围压一直变化, 不能直接采用常规三轴试验条件下的剪应力公式。需要考虑围压的影响, 对剪切应力进行修正, 否则会导致测量的剪应力偏大。

(3) 等应力比路径下粗粒土的湿化变形不仅受应力状态的影响, 同时还受加载路径的影响, 这与常规三轴试验条件下的湿化变形存在差异。在常规三轴试验条件下的湿化变形公式中引入加载应力比参量, 构建的等应力比路径下的湿化变形公式, 能够很好地描述等应力比加载路径下粗粒土的湿化变形。

参考文献:

- [1] 华东水利学院. 土石坝工程[M]. 北京: 水利水电出版社, 1978. (East China Institute of Water Resources. Embankment dam[M]. Beijing: Water conservancy and Hydropower Press,

1978. (in Chinese))
- [2] 陈明致, 金来鳌. 堆石坝设计[M]. 北京: 水利出版社, 1982. (CHEN Ming-zhi, JIN Lai-yun. Rockfill dam design[M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1982. (in Chinese))
- [3] 郎能惠. 密云水库走马庄副坝裂缝原因分析[R]. 北京: 清华大学, 1965. (LI Neng-hui. Analysis on the causes of cracks in the secondary dam of Miyun Reservoir[R]. Beijing: Tsinghua University, 1965. (in Chinese))
- [4] 李志烈. 土石坝初次蓄水的湿陷问题研究[D]. 北京: 清华大学, 1986. (LI Zhi-lie. Study on collapsibility of earth rock dam during initial impoundment[D]. Beijing: Tsinghua University, 1986. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 魏松, 朱俊高. 粗粒土料湿化变形三轴实验研究[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))
- [7] 魏松, 朱俊高. 粗粒料三轴湿化颗粒破碎研究实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1152 - 1158. (WEI Song, ZHU Jun-gao. Study on wetting breakage of coarse-grained materials in triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006, 25(6): 1252 - 1258. (in Chinese))
- [8] 张丙印, 吕明治, 高莲士. 粗粒土大型三轴试验中橡皮膜嵌入量对体变的影响及校正[J]. 水利水电技术, 2003, 34(2): 30 - 33. (ZHANG Bing-yin, LU Min-zhi, GAO Lian-shi. Correction of membrane penetration in large-scale triaxial tests for granular materials[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(2): 30 - 33. (in Chinese))
- [9] 古兴伟, 沈蓉, 张永全. 复杂应力路径下糯扎渡堆石料应力 - 应变特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 3251 - 3260. (GU Xing-wei, SHEN Rong, ZHANG Yong-quan. Study on stress-strain properties of rockfill materials under different stress paths in Nuozhadu project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 3251 - 3260. (in Chinese))
- [10] 杨光, 张丙印, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒料的颗粒破碎试验研究[J]. 水力学报, 2010, 41(3): 338 - 342.

- (YANG Guang, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen, et al. An experimental study on particle breakage of coarse- grained materials under various stress paths[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **41**(3): 338 - 342. (in Chinese))
- [11] 王 远, 张 胜, 敖大华, 等. 复杂应力路径下堆石料的颗粒破碎特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(4): 668 - 706. (WANG Yuan, ZHANG Sheng, AO Da-hua, et al. Particle breakage characteristics of rockfills under complex stress paths[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(4): 668 - 706. (in Chinese))
- [12] 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): 58 - 64. (LI Guang-xin. Slaking test and mathematical model of rockfill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, **12**(5): 58 - 64. (in Chinese))
- [13] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. *岩土力学*, 1999, **20**(3): 1 - 6. (MIAO Lin-chang, YIN Zong-ze. Shear strength of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, **20**(3): 1 - 6. (in Chinese))
- [14] 沈珠江. 坝料土的应力应变关系及其测定方法的初步研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1985. (SHEN Zhu-jiang. Preliminary research on the stress-strain relationship of dam material soil and its determination[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985. (in Chinese))
- [15] 明经平, 赵维炳. 粉煤灰湿陷变形的三轴试验和计算[J]. *岩 土 力 学*, 2004, **25**(增刊): 32 - 38. (MING Jing-ping, ZHAO Wei-bing. Triaxial test and calculation about collapsibility deformation of coal ash[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(S0): 32 - 38. (in Chinese))
- [16] 魏 松. 粗粒土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 behaviour and numerical model of coarse-grained materials[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [17] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [18] 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, **23**(8): 1363 - 1369. (LI Guo-ying, WANG Lu-shi, MI Zhan-kuang. Research on stress-strain behaviour of soil core rockfill dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(8): 1363 - 1369. (in Chinese))
- [19] 傅 华, 韩华强, 赵晓菊. 堆石料湿化变形特性试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2010, **8**(6): 50 - 53. (FU Hua, HAN Hua-qiang, ZHAO Xiao-ju. Experimental study on slaking deformation properties of rockfill[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2010, **8**(6): 50 - 53. (in Chinese))
- [20] 相 彪. 筑坝堆石料应力路径本构关系研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (XIANG Biao. Study on constitutive relations of dam rockfill considering the effect of stress path[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))