

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.01.004

考虑孔隙比影响的堆石料湿化试验及湿化模型

王柳江¹, 毛航宇^{1,2}, 刘斯宏¹, 傅中志³, 韩华强³, 沈超敏¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 对某堆石坝的坝壳料进行了不同密实状态下的单线法三轴湿化试验, 分析了湿化变形随围压、应力水平以及初始孔隙比的变化规律。结果表明: 在围压和应力水平相同条件下, 随着初始孔隙比的减小, 堆石料湿化轴向应变和体积应变均明显降低; 初始孔隙比对湿化应力剪胀规律影响不大, 采用对数形式的湿化剪胀方程可对不同初始孔隙比条件下的湿化应力剪胀关系进行统一描述。对指数形式的湿化轴向应变经验模型进行修正, 构建了考虑初始孔隙比及应力状态影响的湿化轴向应变计算模型, 并联立湿化剪胀方程推导了湿化体积应变的计算公式, 通过对三轴湿化试验结果进行模拟验证了该公式的合理性。

关键词: 堆石料; 湿化试验; 初始孔隙比; 应力剪胀方程; 湿化模型

中图分类号: TV641

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)01-0029-08

Wetting deformation test and wetting model of rockfill materials considering effect of void ratio

WANG Liujiang¹, MAO Hangyu^{1,2}, LIU Sihong¹, FU Zhongzhi³, HAN Huaqiang³, SHEN Chaomin¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The triaxial wetting test in single line method of rockfill materials with different initial void ratio was carried out, and the varies of wetting deformation with the confining pressure, stress level and initial void ratio were analyzed. The test results show that the axial and volumetric wetting deformation decreases with the decrease of the initial void ratio under the same confining pressure and stress state. Based on the test results, it can be found that the initial void ratio has little influence on the dilatancy law of wetting stress, and the logarithmic wetting dilatancy equation can be used to describe the wetting stress dilatancy relationship under different initial pore ratio conditions. In addition, the model for the axial wetting deformation with the consideration of initial void ratio and stress state was proposed by modifying the empirical exponential model. After that, the equation for the volumetric wetting deformation was derived by the stress-dilatancy equation. Finally, the rationality of the proposed model was validated according to the comparison with test results.

Key words: rockfill materials; wetting deformation test; initial void ratio; stress-dilatancy equation; wetting deformation model

土石坝具有可就地取材、对复杂地形地质条件适应性好等优点, 是我国水电开发的主力坝型^[1]。受大坝蓄水、降雨入渗、库水位升降的影响, 筑坝堆石料会由干态转变为湿态, 在此过程中产生湿化变形^[2-4], 从而产生较大的湿陷变形^[5]和不均匀沉降^[6-7], 损坏坝体防渗系统。因此开展堆石料湿化变形研究对保证土石坝工程的安全运行具有重要意义。

堆石料的湿化试验主要有单线法和双线法 2 种^[8-9]。单线法更接近堆石坝实际浸水饱和过程, 因此, 现有湿化试验大多采用单线法^[10-12], 即在维持三轴剪切应力条件下对试样进行蓄水饱和并测量湿化变形^[13]。朱俊高等^[14-19]通过试验分析了湿化应力大小、颗粒级配、母岩岩性、应力路径、降雨强度、干湿循环等因素对

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0105000); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52209160, 52009036); 江苏省卓越博士后计划项目(2022ZB186); 国家自然科学基金面上项目(51979091)

作者简介: 王柳江(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土石坝工程材料特性及数值模拟研究。E-mail: 15850514642@163.com

通信作者: 毛航宇(1991—), 男, 博士, 主要从事土石坝材料力学特性研究。E-mail: hymao9@hhu.edu.cn

引用本文: 王柳江, 毛航宇, 刘斯宏, 等. 考虑孔隙比影响的堆石料湿化试验及湿化模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 29-36.
WANG Liujiang, MAO Hangyu, LIU Sihong, et al. Wetting deformation test and wetting model of rockfill materials considering effect of void ratio [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 29-36.

堆石料湿化变形的影响,探究了堆石料湿化变形的一般规律。除上述影响因素外,密实度同样会影响堆石料的湿化变形,左元明等^[20-21]通过分析不同密度的堆石料湿化试验结果发现,等应力状态条件下,密度的提高会减小堆石料的湿化变形量。张延亿^[22]的试验结果则表明,制样密度较低时湿化变形随着密度的增大而减小,当制样密度超过一定值后湿化变形随着密度的增大略微增大。魏松^[23]开展了密实堆石料的湿化试验,观察到了低围压条件下湿化轴向应变大于高围压的现象,以及低围压高应力水平条件下体积膨胀的现象。密实度对粗粒料湿化变形规律的影响较为复杂,有必要开展更为系统的研究。

湿化模型一般是通过构建拟合公式对湿化试验规律进行描述。例如:李广信^[24]分别采用双曲线函数及幂函数描述湿化轴向应变及湿化体积应变规律;程展林等^[25]分别采用指数函数及线性方程描述湿化轴向应变及湿化体积应变规律。上述模型均是通过不同的拟合方程直接计算湿化轴向应变与湿化体积应变。考虑到三轴湿化试验中的湿化体积应变测量结果可能存在误差,迟世春等^[26]通过分析大量湿化试验结果发现,湿化过程中体积应变增量与轴向应变增量的比值保持不变,由此提出通过轴向应变计算结果间接得到体积应变的建模思路,并基于非线性弹性理论提出了湿化割线模量及泊松比模型。周雄雄等^[27]基于试验结果推导了湿化体积应变与湿化轴向应变比值的计算公式,结合湿化轴向应变与应力水平的双曲线关系,间接计算湿化体积应变。湿化试验是一种应力状态恒定的特殊试验,参考弹塑性本构理论^[28-29],可认为湿化过程中湿化体积应变增量与湿化轴向应变增量的比值为湿化剪胀比,其计算公式即湿化剪胀方程,结合合适的湿化轴向应变计算公式,即可间接得到湿化体积应变。由于湿化剪胀比的数值可正可负,因此间接计算湿化体积应变的方法在综合反映湿缩及湿胀等复杂湿化体积应变规律时具有一定的优势。

本文对某堆石坝的坝壳料进行了一系列不同初始孔隙比的单线法大型三轴湿化变形试验,分析了初始孔隙比及应力状态对湿化变形的影响规律,并基于试验结果建立了一个能够考虑初始孔隙比影响的变形计算模型。

1 试验内容及方法

1.1 试验内容

湿化试验在河海大学的大型三轴仪上进行,试样直径300 mm,高度600 mm。试验所用堆石料为某混合坝右岸心墙堆石坝的坝壳料,母岩岩性为粉质砂岩,母岩抗压强度为94.16 MPa,软化系数为0.61。由于设计级配最大粒径较大,对设计级配进行了缩尺,缩尺方法采用相似级配法和等量替换法相结合的混合法,图1为设计级配曲线及试验级配曲线。为研究初始密实度对湿化变形特性的影响,制样时控制初始孔隙率为19%、22%和25%,对应的初始孔隙比为0.234、0.282、0.333。

1.2 试验方法

参考 GB/T 50123—2019《土工试验规程》开展单线法湿化试验,试验步骤:①干样三轴剪切(图2中的OA段)。试样初始状态为干态,该阶段按干态试样常规三轴压缩试验方法进行,采用应变控制式加载,加载速率为0.02%/min。试验过程中采集试样的轴向变形、外体积变化以及轴向力,加载直至试验预设应力水平 S_L 所对应的偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_w$ 。②干样变形稳定(图2中的AB段)。剪切至预定轴向压力后,保持围压及轴向应力不变,稳定3~5 h后观察试样轴向应变变化量,当30 min内轴向应变变化量小于0.01%,判定干样变形稳定。③浸水湿化(图2中的BC段)。干样变形稳定后继续保持围压和轴向应力不变,同时从试样通水,进行水头饱和,待通入试样的水从试样顶部连续流出且无气泡排出时认定饱

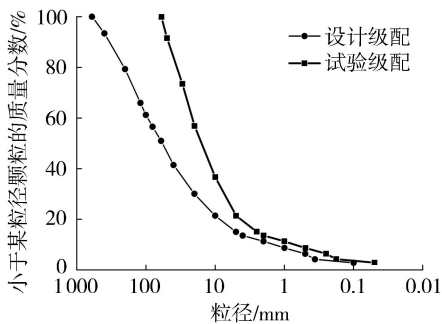


图1 试验材料级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of test material

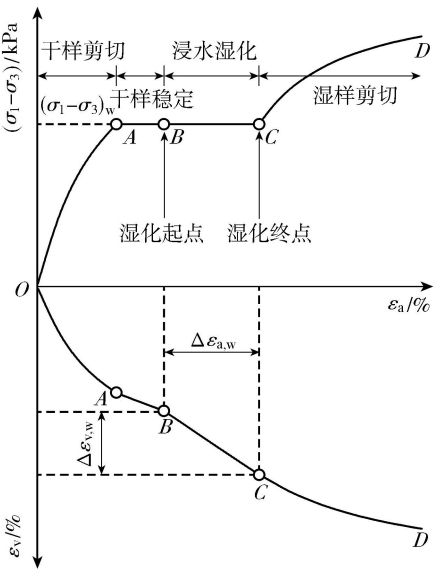


图2 典型湿化试验曲线

Fig.2 Typical wetting deformation test curve

和完成,随后静置至试样变形稳定。浸水湿化过程中记录试样的轴向变形及体积变化,其中体积变化仍采用外体积变化量测方法测量。当 30 min 内轴向应变的变化量小于 0.01% 时可认为湿化变形稳定,随后根据记录的变形量计算湿化轴向应变 $\Delta\varepsilon_{a,w}$ 及湿化体积应变 $\Delta\varepsilon_{v,w}$ 。④湿样三轴剪切(图 2 中的 CD 段)。切换加载控制方式,采用应变控制式加载进一步剪切试样到破坏,加载速率为 0.02%/min。

分别对不同初始孔隙比($e_0=0.234, 0.282, 0.333$)的试样,在不同围压($\sigma_3=0.2, 0.4, 0.8, 1.2$ MPa)条件下开展三轴湿化试验,每个围压条件下分别设置 4 个不同的湿化应力水平,共计 48 个试样。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变关系曲线

图 3 中应力-应变关系的水平段即为湿化变形段,其对应的轴向应变及体积应变差值分别为湿化轴向应变及湿化体积应变。由图 3 可知,不同初始孔隙比试样的湿化规律基本一致,即湿化轴向应变和湿化体应变均随着湿化应力水平的增大而增长。此外,当初始孔隙比较小时,即试样密实程度较高时,其三轴剪切阶段的应力-应变曲线为应变软化型,体积变形表现为剪胀;随着初始孔隙比的增大,试样密实程度降低,其三轴剪切阶段的应力-应变曲线逐渐转变为应变硬化型,且剪胀性明显减弱。由于本文的试验工况较多,其余 3 个围压($\sigma_3=0.4, 0.8, 1.2$ MPa)条件下的试验曲线不再给出,仅在表 1 中列出所有试验工况对应的湿化变形统计结果。

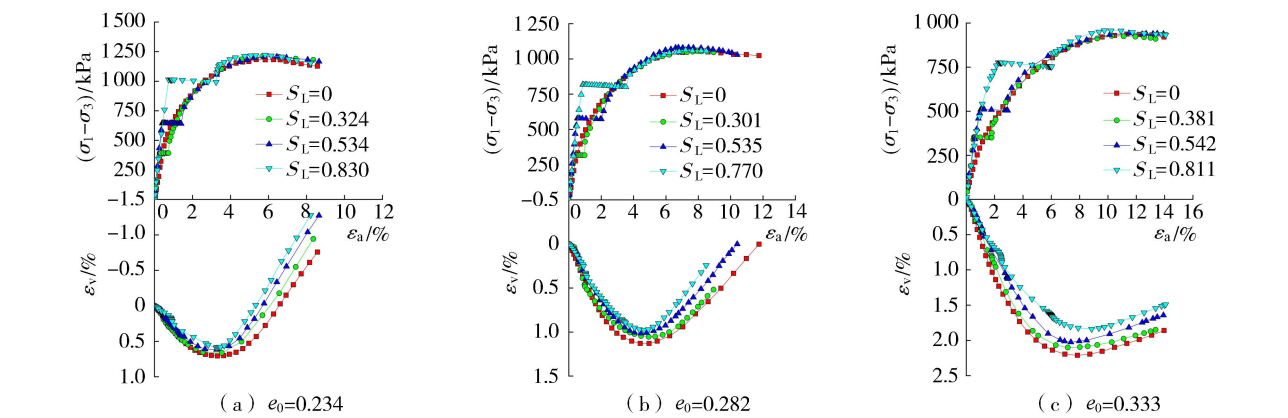


图 3 三轴湿化试验应力-应变关系 ($\sigma_3=0.2$ MPa)

Fig. 3 Stress-strain relationship of wetting tests ($\sigma_3=0.2$ MPa)

表 1 不同试验工况的湿化变形统计结果

Table 1 Statistical results of wetting deformation under different test conditions				
e_0	试样应力条件		湿化变形结果	
	σ_3/MPa	S_L	$\Delta\varepsilon_{a,w}/\%$	$\Delta\varepsilon_{v,w}/\%$
0.234	0.2	0	0.057	0.170
		0.324	0.417	0.221
		0.534	0.906	0.293
		0.830	2.322	0.378
	0.4	0	0.081	0.244
		0.316	0.541	0.301
		0.468	0.908	0.376
		0.755	2.147	0.497
	0.8	0	0.126	0.378
		0.347	0.695	0.459
		0.477	1.073	0.561
		0.798	2.643	0.69
	1.2	0	0.151	0.454
		0.337	0.876	0.544
		0.550	1.618	0.684
		0.811	2.887	0.845
0.282	0.2	0	0.091	0.272
		0.301	0.581	0.376
		0.535	1.370	0.457
		0.770	2.475	0.546
	0.4	0	0.143	0.430
		0.299	0.769	0.454
		0.530	1.683	0.586
		0.815	3.101	0.735
	0.8	0	0.208	0.624
		0.309	0.972	0.713
		0.479	1.625	0.866
		0.803	3.520	1.009
	1.2	0	0.268	0.803
		0.318	1.217	0.914
		0.543	2.246	1.100
		0.803	3.799	1.261
0.333	0.2	0	0.128	0.384
		0.381	1.162	0.549
		0.542	1.753	0.638
		0.811	3.516	0.763
	0.4	0	0.213	0.639
		0.369	1.301	0.819
		0.488	1.800	0.884
		0.801	3.921	1.059
	0.8	0	0.308	0.924
		0.309	1.304	1.119
		0.513	2.125	1.261
		0.748	3.777	1.439
	1.2	0	0.402	1.207
		0.308	1.571	1.433
		0.504	2.362	1.608
		0.826	4.633	1.886

2.2 湿化变形规律分析

由图4可知,堆石料的湿化轴向应变不仅与湿化应力水平 S_L 相关,还与 σ_3 相关,随着 S_L 和 σ_3 的增大,对应的湿化轴向应变也呈增大趋势,且当 S_L 达到0.5后,湿化轴向应变随着 S_L 的增加而急剧增加;堆石料湿化体积应变同样随着 S_L 和 σ_3 的增大而增大,且与 S_L 之间呈较好的线性关系。

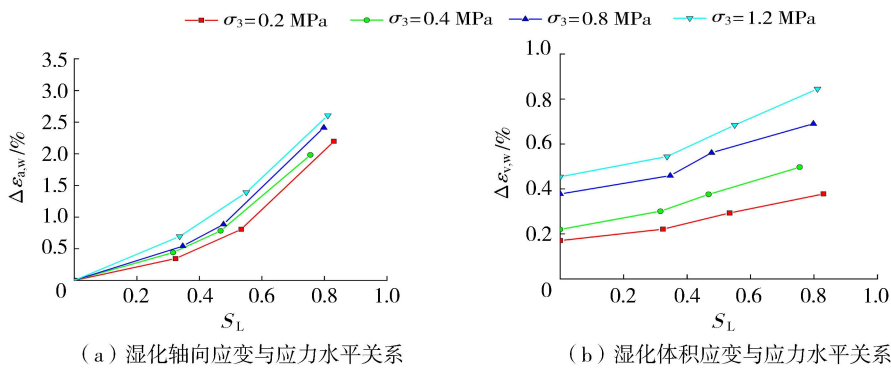


图4 堆石料湿化应变与应力水平关系($e_0=0.234$)

Fig. 4 Relationship between wetting strain and stress level of rockfill ($e_0=0.234$)

由图5可知,在相同 σ_3 下,湿化体积应变随着初始孔隙比的减小而减小,当 σ_3 较小时,初始孔隙比对湿化体积应变的影响较小,但随着 σ_3 的增大,初始孔隙比对湿化体积应变的影响明显增大,即提高堆石料的密实度可以有效减小湿化产生的体积变形。

由图6可知,当 S_L 相同时,随着初始孔隙比的减小,堆石料的湿化轴向应变和体积应变均有明显降低;对于湿化体积应变,在不同 S_L 下,由密实度变化引起的堆石料湿化体积变形差异基本相等;而对于湿化轴向应变,当 S_L 较低时,堆石料密实度增加对减小湿化轴向应变的效果不明显,但在 S_L 较高时,堆石料密实度增加可有效减小湿化轴向应变。堆石料的湿化变形主要源于颗粒破碎后的颗粒重排,且变形均表现为体缩变形。对于密实度较高的试样,堆石颗粒湿化破碎后体积进一步缩小的空间较小,相应的湿化变形较小。因此,在实际工程中可以通过提高压实质量减小湿化变形量。

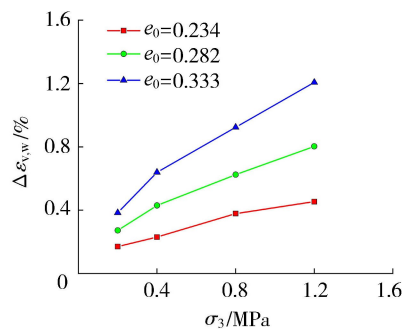


图5 各向等压条件下($S_L=0$)湿化体积应变与围压的关系

Fig. 5 Relationship between wetting volumetric strain and confining pressure under isotropic pressure ($S_L=0$)

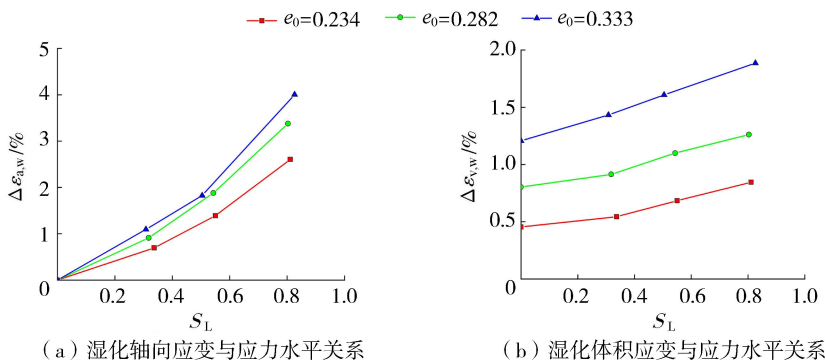


图6 不同初始孔隙比条件下堆石料湿化应变与应力水平关系($\sigma_3=1.2$ MPa)

Fig. 6 Relationship between wetting strain and stress level under different initial void ratio ($\sigma_3=1.2$ MPa)

3 湿化模型及验证

3.1 湿化剪胀方程

湿化变形过程中,体积应变与轴向应变的关系一般可近似认为是直线关系^[25],即图2中体积应变-轴向应变关系的BC段。可以通过定义湿化剪胀比 d_w 表示湿化过程中体积应变与轴向应变直线关系的斜率:

$$d_w = \Delta \varepsilon_{v,w} / \Delta \varepsilon_{a,w} \tag{1}$$

周雄雄等^[27]通过分析大量堆石料单线法湿化试验结果发现,当 d_w 相等时,相应的平均正应力 p 和广义剪应力 q 关系为经过原点的直线,即 d_w 与应力比 η 存在一一对应关系;进一步分析发现 η 与 d_w 的试验点存在凹曲线、直线和凸曲线 3 种可能,而指数函数可以同时描述这 3 种情况,基于材料各向同性假设,给出了如下表达式:

$$\eta = q/p = a(b^{d_w} - b^3) \tag{2}$$

式中 a 和 b 为拟合参数。

根据本文试验结果统计不同初始孔隙比条件下堆石料的 d_w 与 η 的关系,如图 7 所示。由图 7 可知,不同初始孔隙比条件下, η 与 d_w 的试验点基本都分布在同一条曲线上,即 η 与 d_w 的关系基本不受初始孔隙比的影响。利用式(2)对试验点进行拟合,发现拟合效果较好,相应的拟合参数 $a=2.38, b=0.26$ 。

对式(2)进行变换,可得到湿化剪胀方程为

$$d_w = \log_b(\eta/a + b^3) \tag{3}$$

利用式(3)可计算不同湿化应力比条件下的湿化剪胀比,得到湿化体积应变与湿化轴向应变的比例关系。

3.2 湿化轴向应变

通过对本文湿化试验数据的分析,发现湿化轴向应变与湿化时的应力水平以及围压均存在一定的相关性。程展林等^[25]提出了基于指数函数的湿化轴向应变模型,但该模型仅考虑了与湿化应力比之间的相关性,未考虑围压的影响。为此,本文以湿化过程中的应力比与平均正应力作为变量,提出湿化轴向应变表达式:

$$\Delta \varepsilon_{a,w} = A \lg(p/p_a) e^{B\eta} \tag{4}$$

式中: A 和 B 为模型参数; p_a 为大气压。

由于 η 和 p 分别对应 S_L 和 σ_3 ,说明式(4)能够同时考虑 S_L 和 σ_3 的影响。由图 8 可知,对于初始孔隙比相同的试样,其不同 σ_3 下的 $\Delta \varepsilon_{a,w} / \lg(p/p_a)$ 与 η 试验点基本在一条曲线上,说明式(4)能够统一考虑围压对湿化轴向应变的影响。此外,对于初始孔隙比不同的试样, $\Delta \varepsilon_{a,w} / \lg(p/p_a)$ 与 η 的关系为 3 条趋于平行的曲线,其中,在相同 η 下,初始孔隙比越大,对应的 $\Delta \varepsilon_{a,w} / \lg(p/p_a)$ 越大。采用式(4)对图 8 中的试验数据进行拟合,拟合结果见表 2。由表 2 可知,式(4)拟合效果很好,相关系数均大于 0.97,其中,参数 B 基本保持不变,而参数 A 随初始孔隙比的增大呈指数函数增长趋势。基于此,对式(4)进行修正:

$$\Delta \varepsilon_{a,w} = A_0 e_0^n \lg(p/p_a) e^{B\eta} \tag{5}$$

式中 A_0 和 n 为模型拟合参数。

对比式(4)和式(5)可知, $A=A_0 e_0^n$ 。由于式(5)增加了初始孔隙比为变量,因此可以考虑初始孔隙比对湿化轴向应变的影响。根据表 2 中的数据,拟合得到 $A_0=4.676, n=2.31$ 。由图 9 可知,不同初始孔隙比试样在不同围压下,其 $\Delta \varepsilon_{a,w} e_0^{2.31} / \lg(p/p_a)$ 与 η 的关系曲线基本重合,且满足程展林等^[25]提出的指数增长关系,说明本文提出的湿化轴线应变表达(式(5))能够考虑初始孔隙比和围压的影响。

联立式(3)和式(5),即可得到湿化体积应变表达式:

$$\Delta \varepsilon_{v,w} = A_0 e_0^n \lg(p/p_a) e^{B\eta} \log_b(\eta/a + b^3) \tag{6}$$

由式(6)可知,本文提出的湿化模型参数简单,仅包含 5 个参数,分别为 a, b, A_0, n, B ,通过三轴湿化试验

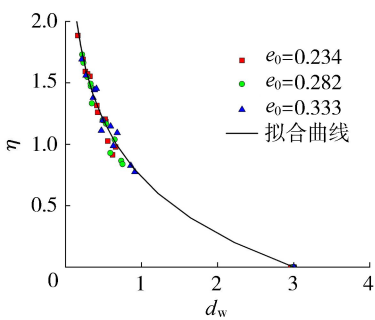


图 7 堆石料湿化剪胀比与应力比的关系
Fig. 7 Relationship between dilatancy ratio and stress ratio

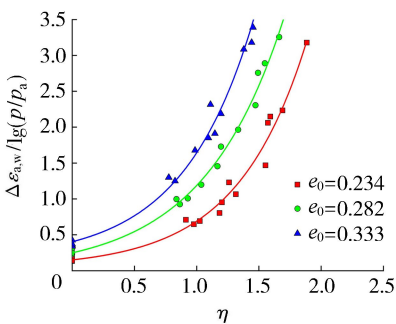


图 8 $\Delta \varepsilon_{a,w} / \lg(p/p_a)$ 与 η 的关系
Fig. 8 Relationship between $\Delta \varepsilon_{a,w} / \lg(p/p_a)$ and η

表 2 式(4)参数拟合结果

Table 2 Fitting results of parameters for Equation (4)			
e_0	A	B	R^2
0.234	0.163	1.548	0.970
0.282	0.253	1.548	0.993
0.333	0.368	1.548	0.989

即可获得。考虑到在有限元分析计算中常用广义剪应变作为一般应变分量,而在轴对称三轴应力状态下广义剪应变 ε_s 与轴应变以及体应变有如下对应关系:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_a - \varepsilon_v/3$$

(7)

在开展有限元分析计算时,可以联立式(5)(6)(7),将轴向应变转换为广义偏应变。

3.3 模型验证

根据本文试验结果,拟合得到模型参数: $a=2.38, b=0.26, A_0=4.676, n=2.31, B=1.548$ 。将拟合参数代入湿化模型,即可得到不同初始孔隙比试样在不同围压和应力水平下的湿化轴向应变和湿化体积应变。由图 10~12 可知,对于不同初始孔隙率的堆石料,其在不同围压和湿化应力水平下的模拟结果与试验数据吻合很好。

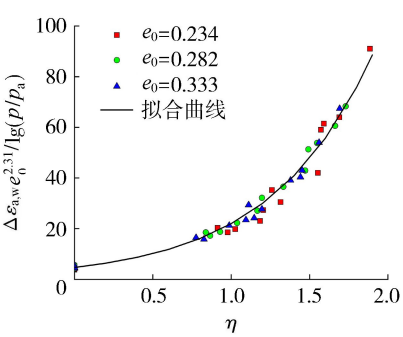


图 9 $\Delta\varepsilon_{a,w}e_0^{2.31}/\lg(p/p_a)$ 与 η 的关系
Fig. 9 Relationship between $\Delta\varepsilon_{a,w}e_0^{2.31}/\lg(p/p_a)$ and η

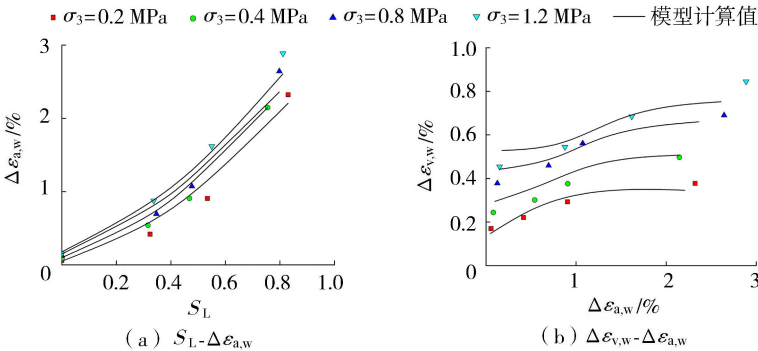


图 10 堆石料湿化试验模拟($e_0=0.234$)

Fig. 10 Simulation of rockfill wetting test ($e_0=0.234$)

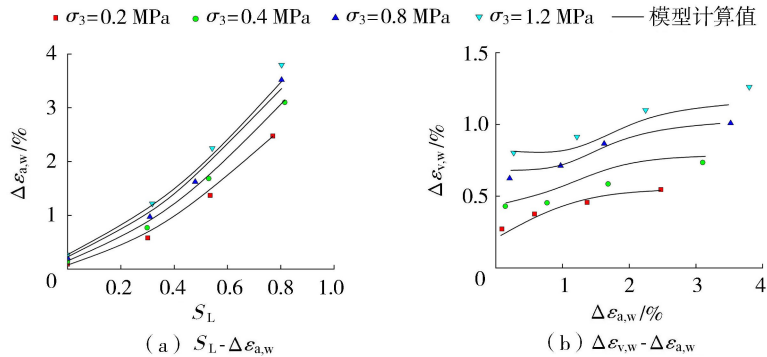


图 11 堆石料湿化试验模拟($e_0=0.282$)

Fig. 11 Simulation of rockfill wetting test ($e_0=0.282$)

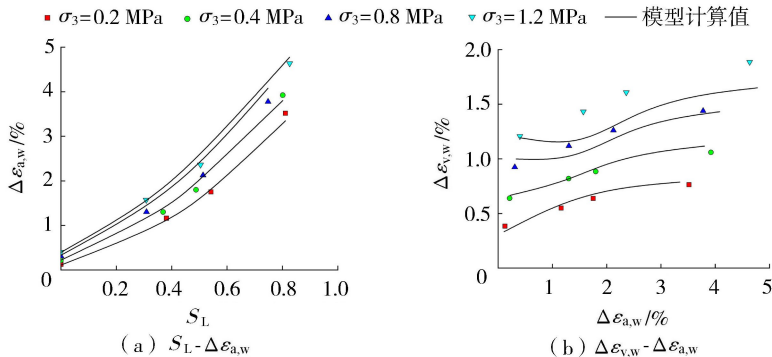


图 12 堆石料湿化试验模拟($e_0=0.333$)

Fig. 12 Simulation of rockfill wetting test ($e_0=0.333$)

工程中通常采用李国英等^[30]改进后的沈珠江模型(又称沈珠江三参数湿化模型) 计算湿化应变:

$$\Delta\varepsilon_{v,w} = C_w \left(\sigma_3/p_a \right)^{n_w} \tag{8}$$

$$\Delta\gamma_w = D_w S_L / (1 - S_L) \tag{9}$$

式中: $\Delta\gamma_w$ 为湿化剪切应变; C_w 、 D_w 、 n_w 为参数。

由式(8)可知,相同围压下,湿化体积应变保持不变,即湿化体积应变不随湿化轴向应变的变化而变化,而本文试验结果显示,湿化体积应变与初始密实状态、围压以及湿化应力水平均相关,随着湿化轴向应变的增加,湿化体积应变同样呈增长趋势。对于式(9),尽管其能够考虑湿化应力水平对湿化剪切应变的影响,但目前尚无法考虑堆石料压实状态的影响。因此,沈珠江三参数湿化模型在描述堆石料的湿化体积应变时有一定局限性。相比较而言,本文提出的模型能够较好地反映不同密实状态下的堆石料湿化变形特性,能够更好地预测实际工程中堆石料的湿化变形。

4 结 论

- a. 初始孔隙比对堆石料湿化变形特性影响显著,在相同围压和应力水平下,坝料碾压越密实,对应的湿化变形越小。
- b. 各向等压条件下,当围压较低时,初始孔隙比对湿化变形影响不显著,随着围压的增大,湿化变形受初始孔隙比的影响增大。
- c. 初始孔隙比对湿化应力剪胀规律影响不大,采用对数形式的湿化剪胀方程可对不同初始孔隙比条件下的湿化应力剪胀关系进行统一描述。
- d. 本文建立的湿化模型能考虑密实状态、围压以及应力水平的影响,模拟结果与试验数据吻合很好,可应用于实际工程中的湿化变形预测。

参考文献:

[1] 刘汉龙,秦红玉,高玉峰,等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(4):562-566. (LIU Hanlong, QIN Hongyu,GAO Yufeng, et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates [J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(4):562-566. (in Chinese))

[2] 卢廷浩,汪荣大. 瀑布沟土石坝心墙应力变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),1997,25(4):28-32. (LU Tinghao, WANG Rongda. Stress and deformation analysis of core wall for Pubugou soil and rock fill dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),1997,25(4):28-32. (in Chinese))

[3] 魏松,朱俊高. 粗粒料三轴湿化颗粒破碎试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(6):1252-1258. (WEI Song, ZHU Jungao. 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))

[4] 毛航宇,刘斯宏,沈超敏,等. 温、湿控制粗粒料大型三轴仪的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(6):1258-1266. (MAO Hangyu,LIU Sihong,SHEN Chaomin,et al. Development and application of a temperature-humidity controlled large triaxial apparatus for coarse granular materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(6):1258-1266. (in Chinese))

[5] COSTA L M ,ALONSO E E . Predicting the behavior of an earth and rockfill dam under construction [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering,2009,135(7):851-862.

[6] 王柳江,赵志杰,刘斯宏,等. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝重力挡墙位移影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):358-365. (WANG Liujiang,ZHAO Zhijie,LIU Sihong,et al. Analysis of influence factors on gravity retaining wall displacement of main dam for the upper-reservoir of Yixing Pumped-Storage Hydropower Station [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):358-365. (in Chinese))

[7] SHEN Chaomin, LIU Sihong, WANG Liujiang, et al. Packing, compressibility, and crushability of rockfill materials with polydisperse particle size distributions and implications for dam engineering [J]. Water Science and Engineering,2022,15(4):358-366.

[8] 介玉新,张延亿,杨光华. 土石料湿化变形计算方法探讨[J]. 岩土力学,2019,40(增刊 1):11-20. (JIE Yuxin,ZHANG Yanyi,YANG Guanghua. Calculation method of wet deformation of earth-rock materials [J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(Sup1):11-20. (in Chinese))

[9] 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 Jungao. Study on wettig behavior of coarse grained soil in triaxial test [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(8):1609-1614. (in Chinese))

- [10] ZHOU X, CHI S, JIA Y. Wetting deformation of core-wall rockfill dams[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(8): 04019084.
- [11] YIN Y, WU Y, ZHANG B, et al. Two-stage wetting deformation behaviour of rock-fill material[J]. Environmental Geotechnics, 2019, 9(2): 94-107.
- [12] 沈广军, 殷宗泽. 粗粒料浸水变形分析方法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2437-2444. (SHEN Guangjun, YIN Zongze. Improvement of wetting deformation analysis method of coarse-grained materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2437-2444. (in Chinese))
- [13] 彭凯, 朱俊高, 王观琪. 堆石料湿化变形三轴试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1953-1960. (PENG Kai, ZHU Jungao, WANG Guanqi. Study on slaking deformation of rockfill materials by triaxial test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(5): 1953-1960. (in Chinese))
- [14] 朱俊高, MOHAMED A A, 龚选, 等. 某板岩粗粒料湿化特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 170-174. (ZHU Jungao, MOHAMED A A, GONG Xuan. Triaxial tests on wetting deformation behavior of a slate rockfill material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 170-174. (in Chinese))
- [15] 保华富, 屈智炯. 粗粒料的湿化特性研究[J]. 成都科技大学学报, 1989(1): 23-30. (BAO Huaifu, QU Zhijiong. Study of wetting deformation of coarse-grained materials[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1989(1): 23-30. (in Chinese))
- [16] 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(增刊2): 5938-5942. (ZHANG Shaohong, ZHANG Aijun, CHEN Tao. Triaxial slaking test research on rock fill deformation feature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup2): 5938-5942. (in Chinese))
- [17] JIA Y, XU B, DESAI C S, et al. Rockfill particle breakage generated by wetting deformation under the complex stress path[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(10): 04020166.
- [18] WU Y, YIN Y, ZHANG B, et al. Unsaturated wetting deformation characteristics of a granite rockfill under rainfall conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59: 1774-1792.
- [19] ZHANG B Y, ZHANG J H, SUN G L. Deformation and shear strength of rockfill materials composed of soft siltstones subjected to stress, cyclical drying/wetting and temperature variations[J]. Engineering Geology, 2015, 190: 87-97.
- [20] 左元明, 沈珠江. 坝壳砂砾料浸水变形特性的测定[J]. 水利水运科学研究所, 1989(1): 107-113. (ZUO Yuanming, SHEN Zhujiang. Deformation character of gravel sand due to wetting[J]. Hydro-Science and Engineering, 1989(1): 107-113. (in Chinese))
- [21] 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(4): 50-53. (FU Hua, HAN Huaqiang, ZHAO Xiaojue. Experimental study on slaking deformation properties of rockfill[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 50-53. (in Chinese))
- [22] 张延亿. 浸水湿化和水位升降条件下堆石材料变形特性研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [23] 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.
- [24] 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 Guangxin. Rockfill materials' wetting test and mathematical model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(5): 58-64. (in Chinese))
- [25] 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. (CHEN Zhanlin, ZUO Yongzhen, DING Hongshun, et al. Wetting characteristics of coarse-grained materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 243-247. (in Chinese))
- [26] 迟世春, 周雄雄. 堆石料的湿化变形模型[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 48-55. (CHI Shichun, ZHOU Xiongiong. Slaking deformation model for rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 48-55. (in Chinese))
- [27] 周雄雄, 迟世春, 贾宇峰. 粗粒料湿化变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1943-1948. (ZHOU Xiongiong, CHI Shichun, JIA Yufeng. Wetting deformation characteristics of coarse granular materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10): 1943-1948. (in Chinese))
- [28] 朱俊高, 卢廷浩, 邵松桂, 等. 粗粒料“空间准滑面”模型及其在高面板坝三维分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1991, 19(6): 87-96. (ZHU Jungao, LU Tinghao, SHAO Songgui, et al. Spatial mobilized plane model for coarse grained materials and its application to 3D analysis of high concrete face rockfill Dams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1991, 19(6): 87-96. (in Chinese))
- [29] 刘斯宏, 沈超敏, 毛航宇, 等. 堆石料状态相关弹塑性本构模型[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2891-2898. (LIU Sihong, SHEN Chaomin, MAO Hangyu, et al. State-dependent elastoplastic constitutive model for rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2891-2898. (in Chinese))
- [30] 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 Guoying, WANG Lushi, MI Zhankuan. 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))