

# 排土场堆石料单线法湿化变形试验研究

沈兴刚, 杜俊, 李晨晨

(昆明学院建筑工程学院, 昆明 650214)

**摘要:** 为分析降雨入渗条件下排土场堆石料浸水湿化变形特性, 采用粗粒土压缩试验机对排土物料开展单线法浸水湿化试验, 研究堆石料在不同应力水平条件下的湿化变形特征, 揭示其湿化变形发生机制, 建立堆石料湿化蠕变模型。结果表明: 排土场堆石料浸水湿化变形显著且不可忽略, 随竖向压应力的不断增加, 湿化变形量也显著增大。结合堆石料湿化变形速率发展特征, 可将湿化变形分为瞬时变形和流变变形两部分, 且流变变形大于瞬时变形。基于堆石料湿化变形时程曲线, 建立了堆石料四参数双曲线型湿化蠕变模型, 模型计算结果较为准确, 能够客观反映排土场堆石料浸水湿化变形发展规律。

**关键词:** 排土场; 堆石料; 压缩试验; 湿化变形; 蠕变模型

**中图分类号:** TU411.5 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL STUDY ON WETTING DEFORMATION OF THE SINGLE-LINE METHOD OF ROCKFILL MATERIALS IN WASTE DUMP

SHEN Xing-gang, DU Jun, LI Chen-chen

(Construction Engineering College, Kunming University, Kunming 650214, China)

**Abstract:** To analyze the wetting deformation characteristics of dumped rockfill materials under rainfall infiltration conditions, we utilized a coarse-grained soil compression testing machine to conduct single-line wetting experiments on the dumped materials. This study aimed to understand the wetting deformation traits of the rockfill at different stress levels, elucidate the underlying mechanism of this deformation, and establish a wetting creep model for rockfill. Our findings indicate significant and non-negligible wetting deformation in the dump's rockfill. As vertical compressive stress increases, the amount of wetting deformation also rises markedly. Taking into account the progression characteristics of rockfill wetting deformation rate, wetting deformation can be bifurcated into instantaneous and rheological deformations, with the latter surpassing the former. Drawing from the time-course curve of rockfill wetting deformation, we constructed a four-parameter hyperbolic wetting creep model for rockfill. The model's calculations are precise, providing an objective representation of the evolution pattern of rockfill wetting deformation in the dumping area.

**Key words:** waste dump; rockfill materials; compression test; wetting deformation; creep model

收稿日期: 2022-08-20 改回日期: 2022-10-12

基金项目: 云南省地方本科高校基础研究联合专项资金项目(202001BA070001-137); 昆明学院人才引进项目(XJ20220015)

## 1 引言

排土场是一类大型人工松散堆积体,排土物料经倾倒和重力分选呈粒径自然分级堆置<sup>[1]</sup>,且排土场堆积体尚不进行人工夯实,堆石料处于欠固结状态,工后沉降变形是最为普遍的现象<sup>[2]</sup>。受大气降雨入渗影响,排土场堆石料由干态遇水变成湿态而产生湿化变形,加剧了堆积体斜坡的不均匀沉降和滑动,进而对矿山采矿安全产生至关重要的影响。因此,湿化变形是堆积体工后沉降变形的主要组成部分<sup>[3-4]</sup>,堆石料湿化变形控制已成为排土场边坡安全管理的关键问题。

目前,堆石料湿化变形研究主要是开展湿化试验,试验方法有单线法和双线法<sup>[5-6]</sup>,所采用的试验设备有三轴压缩仪与单向压缩固结仪<sup>[7-8]</sup>,并依据试验结果及所研究的目标,建立吻合于试验和实际情况的模型<sup>[9]</sup>。由于单线法对设备控制要求相对较高,早期的湿化研究多为双线法。NOBARI<sup>[10]</sup>提出双线法,并对砂土干态和湿态进行三轴压缩试验,从而得出某一应力水平下的变形差,该值即为湿化变形量。朱红亮等<sup>[11]</sup>、赵振梁等<sup>[12]</sup>、毛航宇等<sup>[13]</sup>通过三轴压缩试验研究指出,母岩成分、颗粒形状、应力水平,以及水温条件等都将显著影响材料的湿化变形。周德泉等<sup>[14]</sup>、张延亿等<sup>[15]</sup>采用压缩固结仪开展了堆石料干态、湿态压缩变形试验,研究成果表明堆石料流变随时间呈指数衰减,并与其所处的应力水平有关;细颗粒含量高的材料,湿化变形显著。尽管已有学者就堆石料湿化变形进行了研究,研究成果具有一定的理论和工程实用价值,但是,由于堆石料湿化变形的重要性、湿化机理的复杂性,以及湿化试验难度较大等客观因素限制,当前,在排土场边坡设计建设中,堆石料湿化变形试验、理论、计算仍没有得到很好的解决。因此,有必要继续深入研究堆石料的湿化变形特性。本文结合都龙锡矿南加排土场工程实例,对排土物料进行单线法湿化压缩变形试验研究,探究堆石料不同应力水平条件下湿化变形特征,以及湿化变形发生机制,建立能够反映单线法的堆石料湿化蠕变模型,并得出模型参数的确定方法,对分析排土场边坡稳定性有重要的科学意义和实践价值。

## 2 试验概述

### 2.1 试验材料

试验材料取自云南文山都龙锡矿南加排土场,该堆石料为露天开采剥离的废弃土石混合料,由大

理岩、云母石英片岩和第四系表土层混合而成。经测定堆石料天然含水量 1.28%,天然容重 1.87 g/cm<sup>3</sup>。为满足室内压缩仪(尺寸  $\Phi 504.6 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ )装料需求,依据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019),按照仪器高度与试样最大粒径之比 4~6 为宜对现场堆石料测定的级配进行等量替代缩尺处理。缩尺前后堆石料颗粒级配累积曲线见图 1。经缩尺后的土体,其不均匀系数  $C_u$  为 9.89,曲率系数  $C_c$  为 1.94,土体中大于 5 mm 质量累积百分数 77.63%。

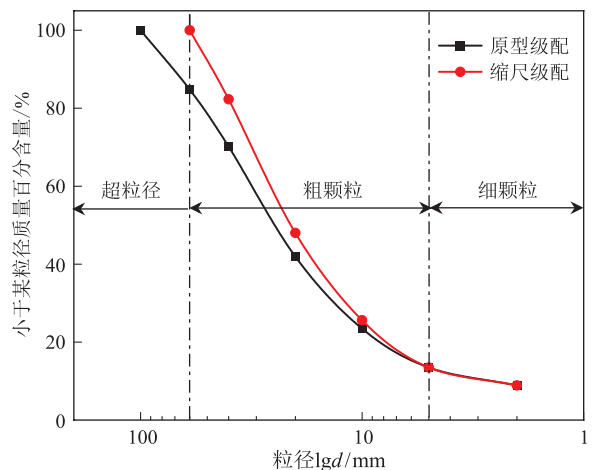


图 1 堆石料颗粒级配累积曲线

### 2.2 试验仪器

湿化压缩试验在昆明学院岩土工程试验中心采用 YS50-4A 型粗粒土固结仪完成,见图 2。仪器尺寸  $\Phi 504.6 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,可测定最大粒径 60 mm、应力水平 3.5 MPa、总荷载 700 kN 的粗粒土压缩特性指标。试验仪器采用浮环式试样筒,外部配有饱和水箱,液压油缸加载,专用电液比例伺服阀稳定固结压力,压力稳定精度  $\pm 0.5\% \text{ F.S.}$ ,拉拔式位移计测定试样沉降量,位移计分度值 0.01 mm,试验数据由计算机自动采集与存储。



图 2 YS50-4A 型粗粒土压缩试验机

### 2.3 试验方案设计与实现

本文将堆石料单线法湿化压缩试验过程划分为两个阶段:①干态压缩阶段,对风干土样按照天然含

水量和天然容重进行制样,并分级施加竖向荷载至压缩稳定,测定土样压缩变形量。②湿态压缩阶段,待土样加载至设计荷载且压缩稳定后,对土样进行自下向上注水湿化饱和,注水速率控制 5 mm/min,

直至土样湿化变形稳定为止。

对制备好的土样分别设计垂直荷载 800 kPa、1 600 kPa 与 3 200 kPa,进行 3 组堆石料单线法湿化压缩变形试验,试验方案见表 1。

表 1 堆石料单线法湿化压缩试验方案设计

编号	天然密度 /g·cm <sup>-3</sup>	含水量/%	分级加载 /kPa							湿化压缩
1#		50	100	200	400	800	—	—	800 kPa 压缩稳定后注水	
2#	1.87	1.28	50	100	200	400	800	1 600	—	1 600 kPa 压缩稳定后注水
3#		50	100	200	400	800	1 600	3 200	—	3 200 kPa 压缩稳定后注水

待土样制备与装填完毕,启动试验机,依据设计荷载,按照 50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa、1 600 kPa、3 200 kPa 逐级施加,每级压力下土样变形每小时变化不大于 0.05 mm 时<sup>[16]</sup>,视为土样压缩稳定,即可施加下一级荷载,直至预设加载过程完成。待设定荷载施加完成且土样压缩稳定后,控制注水速率 5 mm/min 向饱和箱体注水,直至水完全浸没土样上表面,记录湿化过程中土样产生的竖向变形,待湿化变形量每小时变化不大于 0.05 mm 时,方可结束试验。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 堆石料压缩与湿化变形特征

试验土样分级加载至 800 kPa、1 600 kPa 与 3 200 kPa,并注水湿化至变形稳定,土样产生的变形量见表 2,绘制土样压缩变形 *s-t* 曲线见图 3。

分析图 3 可知,堆石料呈单粒结构,在垂直荷载作用下,土颗粒间产生相对滑移与滚动,直至较为稳定的位置。该过程中,竖向压应力小,土颗粒刚度大,土颗粒受力后相对滚动微弱,土的压缩变形小;当增大竖向压应力,外力对土颗粒做功增强,颗粒间的相对滑动剧烈,当应力超过土颗粒强度极限时,颗粒间还将产生相互的挤压破碎,破碎的岩屑进一步填充于大颗粒孔隙中,累积变形增加。堆石料浸水湿化是土料由风干状态过渡到饱和状态,土体孔隙水完全充填,孔隙水的作用使得颗粒自身的矿物质发生软化,且颗粒间产生润滑、颗粒棱角破碎,引起堆石料颗粒重排产生垂直变形。

#### 3.2 堆石料湿化应变分析

将试验土样浸水湿化变形量与浸水前压缩稳定时土样的高度之比定义为湿化应变。竖向应力 800 kPa、1 600 kPa 和 3 200 kPa 条件下,土样压缩稳定后浸水湿化,湿化应变时程曲线见图 4。

分析图 4 可知,土样湿化变形初始阶段的变形

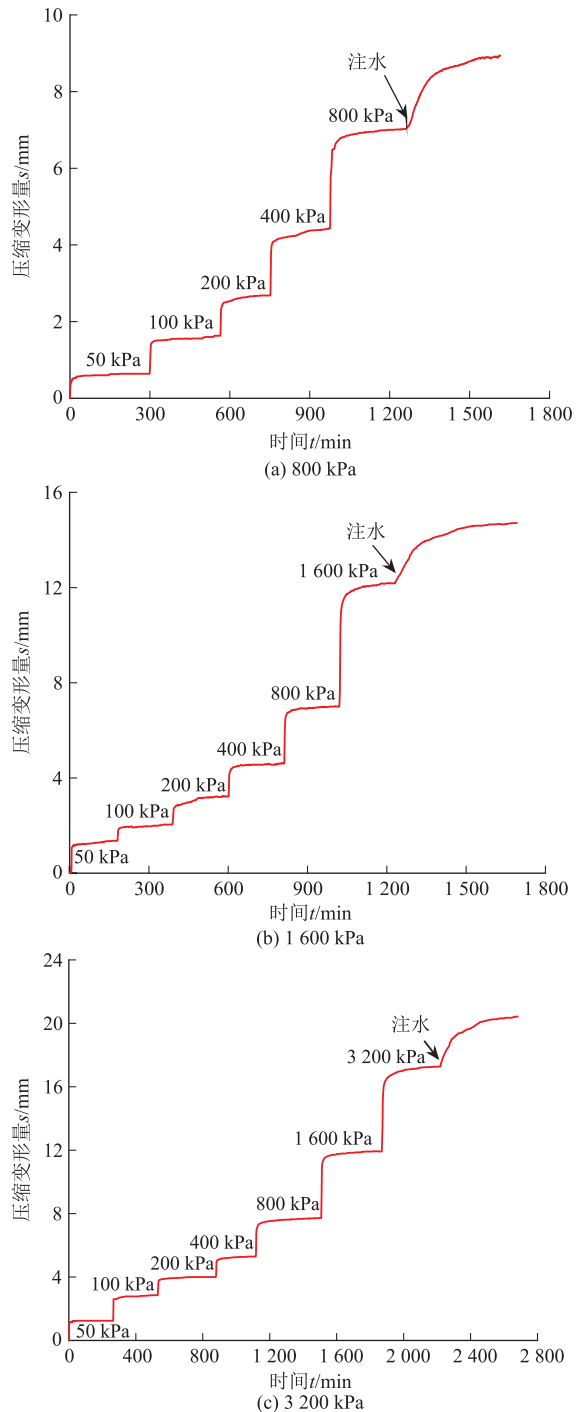


图 3 堆石料不同应力水平单线法湿化变形 *s-t* 曲线

表2 土样分级加载压缩与湿化变形量

编号	浸水前变形量 $s$ / mm							湿化后变形量 / mm
	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa	800 kPa	1 600 kPa	3 200 kPa	
1#	1.31	2.44	3.62	4.91	7.02	—	—	8.94
2#	1.36	2.04	3.23	4.61	7.01	12.18	—	14.71
3#	1.24	2.85	3.99	5.21	7.64	11.93	17.28	20.43

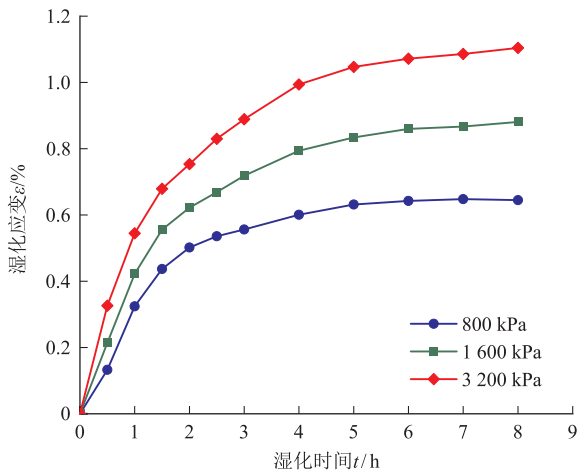


图4 堆石料湿化应变时程曲线

速率较快,随浸水湿化时间的累积,其湿化变形速率趋于平缓。竖向压应力大小对土样湿化应变有显著影响,土样湿化应变稳定值随竖向应力的增加而增大。

试验中土样浸水湿化由两个阶段组成:注水阶

表3 堆石料不同应力水平下固结湿化变形统计

编号	轴向应力 / kPa	干态变形 / mm	湿化变形 / mm			全部变形 / mm	湿化变形占全部变形的比例 / %	湿化瞬时变形占湿化变形的比例 / %
			瞬时	流变	总变形			
1#	800	7.02	0.36	1.56	1.92	8.94	21.48	18.75
2#	1 600	12.18	0.62	1.91	2.53	14.71	17.20	24.51
3#	3 200	17.28	0.92	2.23	3.15	20.43	15.42	29.21

#### 4 湿化压缩变形模型

如前所述,堆石料干态压缩稳定后浸水将产生显著的湿化变形,其主要是由外部荷载与广义荷载联合作用所引起的堆石料压缩变形。已有学者基于三轴湿化试验,建立了堆石料流变随时间变化的数学模型,如指数型、幂函数、双曲线型,以及对数型等,但针对侧限应力条件下堆石料湿化变形模型研究相对较少。本文通过堆石料不同竖向应力条件下的湿化压缩变形特征,得出其具有相似的变形规律,即湿化变形与湿化时间呈双曲线关系。

以固结湿化时间  $t_w$  为横轴,湿化应变  $\epsilon_w$  为纵轴,采用双曲线函数表征堆石料浸水湿化应变与湿

化时间的关系:水在土体孔隙中流动且使土样饱和所产生的湿化变形,称为湿化瞬时变形。注水完成后,饱和土体随时间累积产生的变形,称为湿态流变变形。为对比两个阶段土样湿化变形特征,分别统计对应湿化变形量见表3。

由表3可知,试验土样浸水湿化变形占全部变形的比例为15.42%~21.48%,湿化变形显著且不可忽略。湿化变形由瞬时变形和流变变形组成,流变变形明显大于瞬时变形,其原因大致是试验土样浸水饱和时,土颗粒孔隙逐渐被水填充,颗粒间的润滑作用增强,但土料为弱风化大理岩,母岩强度较高,遇水性质相对稳定,矿物质的软化作用较小,土颗粒之间仅产生较小的滑移与滚动。当土料浸水饱和完成后,随浸水时间累积,试验土样遇水长期稳定性下降,造岩矿物势必产生相应的软化,土颗粒自身产生破碎,且颗粒将重新排列,土样产生较为明显的竖向变形。可以将堆石料浸水湿化视为一种广义荷载,因此,堆石料浸水湿化变形是外部荷载与广义荷载联合作用下土体产生的流变变形。

化时间的关系:

$$\epsilon_w = \frac{t_w}{a + bt_w} \quad (1)$$

式中, $\epsilon_w$  为湿化应变,%; $t_w$  为湿化时间,h; $a$  和  $b$  为湿化变形模型参数。

对式(1)进行坐标变换可得:

$$\frac{t_w}{\epsilon_w} = a + bt_w \quad (2)$$

以湿化时间  $t_w$  为横轴,湿化时间与湿化应变比值  $t_w/\epsilon_w$  为纵轴,将堆石料分别在800 kPa、1 600 kPa、3 200 kPa 竖向应力条件下的湿化应变绘制于图5中,可以发现堆石料浸水湿化变形时程曲线可以用线性函数关系表征。由于堆石料浸水饱和和受孔

隙率大小及注水速率的影响,以上拟合从湿化瞬时变形(注水 1 h)结束开始。

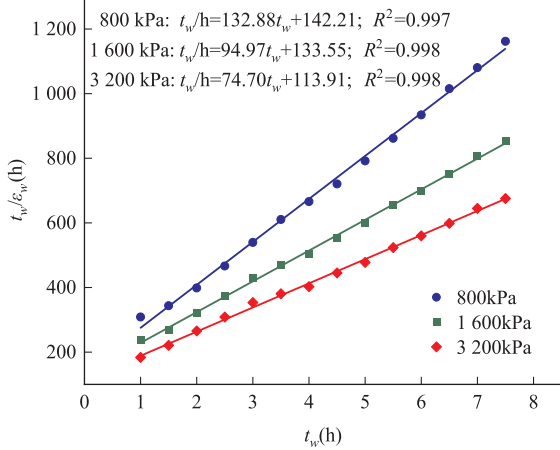


图 5 堆石料  $t_w/\epsilon_w$  与  $t_w$  的拟合关系

将图 5 曲线采用线性函数关系拟合,其中式(2)中参数  $a$  为直线与纵轴的截距,表示堆石料初始湿化变形速率的倒数,参数  $b$  为直线的斜率,表征堆石料湿化变形极限值的倒数。其中,参数  $a$  值越大表示堆石料初始湿化变形随时间变化缓慢,参数  $b$  值越大表示堆石料湿化变形极限值越小。

分析图 5 可知,堆石料湿化变形模型参数  $a$ 、 $b$  均与竖向应力大小有关,且呈反比关系。以参数  $a$ 、 $b$  分别为纵轴,以竖向应力  $\sigma_a/p_a$  ( $p_a$  取 100 kPa) 为横轴绘制曲线,见图 6。

由图 6 可知,堆石料湿化变形模型参数  $a$ 、 $b$  均与竖向应力可用幂函数表征,可表示为:

$$a = s \times \left[ \frac{\sigma_a}{p_a} \right]^t \quad (3)$$

$$b = m \times \left[ \frac{\sigma_a}{p_a} \right]^n \quad (4)$$

式中,参数  $s$ 、 $t$  和参数  $m$ 、 $n$  均为拟合参数。

依据试验数据拟合可得参数  $s$ 、 $t$ 、 $m$ 、 $n$ ,其中  $s = 201.58$ 、 $t = -0.16$ 、 $m = 310.27$ 、 $n = -0.42$ 。

联立式(1)、(3)、(4)可得堆石料固结湿化变形双曲线模型:

$$\epsilon_w = \frac{t_w}{s \times \left[ \frac{\sigma_a}{p_a} \right]^t + m \times \left[ \frac{\sigma_a}{p_a} \right]^n \times t_w} \quad (5)$$

将拟合得到的参数  $s$ 、 $t$ 、 $m$ 、 $n$  代入式(5),可计算出堆石料固结湿化变形的理论值,并建立理论模型对应的固结湿化变形曲线,与图 4 进行对比,见图 7。

分析试验结果与模型计算结果之间的误差,见表 4。由表 4 可知,基于堆石料固结湿化试验建立

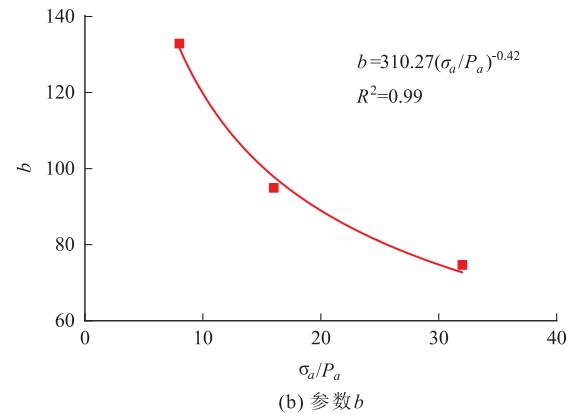
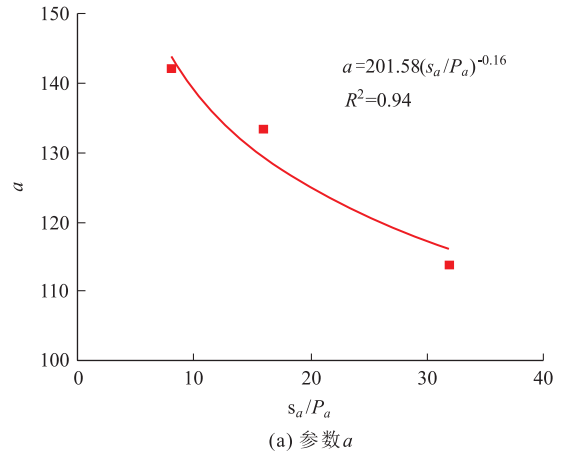


图 6 湿化模型参数与应力水平的关系

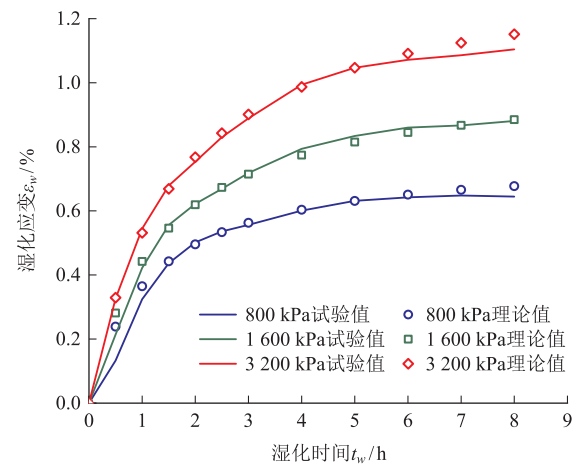


图 7 湿化变形试验结果与模型结果对比

的湿化变形双曲线模型计算结果较为准确,能够较好地反应土料的湿化变形时程规律,可对具体工程实践进行有益指导。

表 4 理论计算与试验结果对比

竖向应力/kPa	稳定湿化应变/%		偏差/%
	试验值	理论计算值	
800	0.644 8	0.677 4	5.06
1 600	0.880 8	0.884 9	0.47
3 200	1.104 1	1.151 4	4.28

## 5 结论

采用室内压缩仪进行了堆石料单线法湿化压缩试验,分析了堆石料湿化变形特性及发生机制,主要结论如下:

(1) 堆石料湿化变形是外部荷载与广义荷载联合作用下土体颗粒产生的破碎及颗粒重排,其湿化变形与竖向应力条件相关,随竖向应力的增加,湿化变形也显著增大。

(2) 堆石料湿化变形由浸水瞬时变形和流变变形组成,瞬时应变变形速率较快,但流变变形量比瞬时变形量大。

(3) 依据堆石料湿化应变时程曲线,建立了堆石料四参数湿化压缩模型,模拟结果准确,模型能够反映材料浸水湿化变形规律。

### 参考文献

- [1] 孙书伟,庞博,刘流. 露天排土场不同排土工艺失稳机制对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1713-1726.
- [2] 张院生,高永涛,吴顺川,等. 排土场工后沉降及蠕变规律[J]. 工程科学学报, 2016, 38(06): 745-753.
- [3] 潘一茜,胡卸文. 某水电站块石料场弃渣堆积体边坡变形破坏机制分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(2): 107-112.
- [4] 温彦锋,张延亿. 堆石料的长期变形特性研究[J]. 水利水电技

- 术, 2019, 50(8): 84-95.
- [5] 孙振远,蒋新文,韩华强. 不同试验方法对堆石料湿化变形的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 189-193.
- [6] 罗伟,漆文邦,王亚洲,等. 不同应力水平砂岩颗粒料湿化变形试验研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 137-140+120.
- [7] 茹大炜,杜少华,李地元,等. 基于大型三轴试验的蚀变花岗岩力学行为及浸水湿化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1819-1831.
- [8] 张延亿,邓刚,温彦锋,等. 土石混合料固结流变试验研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 187-194.
- [9] 殷殷,吴永康,丁艳辉,等. 堆石料非饱和湿化变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3455-3463.
- [10] Nobari E S, Duncan J M. Movement in dams due to reservoir filling [C]. //Performance of Earth and Earth Supported Structures, Lafayette: ASCE, 1973: 797-815
- [11] 朱红亮,许锡昌,肖衡林. 缙云母片岩粗粒料湿化变形规律研究[J]. 湖北工业大学学报, 2018, 33(05): 78-82.
- [12] 赵振梁,朱俊高,杜青,等. 粗粒料湿化变形三轴试验研究[J]. 水利水电工程学报, 2018, (6): 84-91.
- [13] 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.
- [14] 周德泉,肖宏宇,雷鸣,等. 重复加卸载条件下全风化泥质砂岩累积变形与湿化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 465-473.
- [15] 张延亿,邓刚,张茵琪,等. 土石混合料固结湿化变形试验研究[J]. 水利学报, 2020, 51(11): 1393-1400.
- [16] 土工试验方法标准(GB/T50123-2019)[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.

作者简介: 沈兴刚(1977—),男,汉族,云南腾冲人,硕士,讲师,主要研究方向为环境岩土工程。E-mail: kmu\_shenxg@126.com

通讯作者: 杜俊(1984—)男,汉族,甘肃天水人,博士,副教授,主要研究方向为岩土力学特性及岩土工程稳定性。

E-mail: dujun0605@126.com