

DOI: 10.11779/CJGE2020S2021

# 不同相对密实度含软岩堆石料的蠕变特性研究

陈秀吉<sup>1</sup>, 陈群<sup>\*</sup>, 周承京<sup>2</sup>, 李建国<sup>3</sup>

(1. 四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010000; 3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:** 软岩作为高土石坝的筑坝材料时, 易产生较大的蠕变变形, 对高土石坝的长期稳定十分不利。因此有必要开展含软岩堆石料的蠕变特性研究。利用大型压缩仪, 对不同相对密实度的含软岩堆石料进行了单轴蠕变试验, 探讨了相对密实度对堆石料蠕变特性的影响。随着相对密实度增大, 堆石料的轴向蠕变应变减小; 随着轴向压力增大, 相对密实度对轴向蠕变应变的影响程度提高。利用幂函数蠕变模型拟合轴向蠕变应变随时间变化的曲线, 获得最终蠕变应变和衰减指数。探讨其与轴向压力的函数关系, 得出两者分别与轴向压力满足双曲线函数和幂函数关系, 建立了考虑轴向压力的单轴蠕变模型。由蠕变模型参数随相对密实度的变化可知, 相对密实度对衰减指数的影响很小。依据模型中与最终蠕变应变相关的一个参数和相对密实度呈良好的线性关系, 建立了同时考虑轴向压力和相对密实度的单轴蠕变模型, 并讨论了模型各参数的物理意义。

**关键词:** 含软岩堆石料; 蠕变; 相对密实度; 蠕变模型

中图分类号: TV41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0118-05

作者简介: 陈秀吉(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事土的工程性质研究。E-mail: 1263766528@qq.com。

## Creep behavior of rockfill with soft rock under different relative densities

CHEN Xiu-ji<sup>1</sup>, CHEN Qun<sup>1</sup>, ZHOU Cheng-jing<sup>2</sup>, LI Jian-guo<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Inner Mongolia Transportation Design Research Institute Co., Ltd., Hohhot 010000, China;  
3. Power China, Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** When soft rock is used as the dam embankment materials for high earth-rock dams, large creep deformation may occur, which is very unfavorable to the long-term stability of high earth-rock dams. Therefore, it is necessary to study the creep characteristics of rockfill with soft rock. The uniaxial creep tests are carried out on rockfill with soft rock under different relative densities by using a large odemeter, and the influences of relative density on creep characteristics of rockfill are discussed. The axial creep strain of rockfill decreases as the increase in the relative density. With the increase in the axial pressure, the influences of the relative density on the axial creep strain are more significant. The creep model of power function is used to fit the change curves of the axial creep strain with time. The attenuation index and the final creep strain are obtained. The functional relationship among the final creep strain, the attenuation index and axial pressure is discussed. It is found that the final creep strain and the attenuation index meet the hyperbolic function and power function relationship with the axial pressure, respectively, and a uniaxial creep model considering axial pressure is proposed. The relationship between the parameters of the creep model and the relative density shows that the relative density has small effects on the attenuation index. Based on a good linear relationship between the parameter related to the final creep strain in the model and the relative density, a uniaxial creep model related to both the axial pressure and the relative density is proposed, and the physical significance of each parameter of the model is discussed.

**Key words:** rockfill with soft rock; creep; relative density; creep model

## 0 引言

软岩堆石料填筑碾压时, 岩块易发生崩解, 级配细化, 且易受温度和干湿循环等环境因素影响, 产生较大蠕变变形<sup>[1-3]</sup>, 这对高土石坝长期稳定是极其不利

的。为了更准确地掌握软岩堆石坝运行期的稳定性, 有必要对含软岩堆石料蠕变特性进行研究。

目前, 许多学者对堆石料的蠕变特性进行了研究,

得到大量有益的结论。梁军<sup>[4]</sup>探究了干密度对堆石料最终蠕变应变的影响, 并建立了两者的经验关系式。孙振远等<sup>[5]</sup>通过试验发现提高干密度可减小堆石料的蠕变应变。上述研究主要考虑了干密度对堆石料蠕变特性的影响, 但干密度不宜作为堆石坝填筑质量的控制指标。朱晟等<sup>[6]</sup>认为除了孔隙率, 还应将相对密实度作为高土石坝填筑质量的控制指标。因此有必要研究不同相对密实度的含软岩堆石料的蠕变特性。

在本文中, 以相对密实度为研究因素, 采用大型压缩仪进行含软岩堆石料单轴蠕变试验, 探讨不同相对密实度堆石料的蠕变规律。利用幂函数蠕变模型拟合试验结果, 探究相对密实度对拟合参数的影响, 进而提出考虑相对密实度的单轴蠕变模型, 为高土石坝的设计和稳定性分析提供依据。

## 1 试验仪器和标准

### 1.1 试验仪器

单轴蠕变试验采用成勘院组建的大型压缩仪进行, 仪器由主机架、加载系统和计算机测控与数据采集系统等组成。加载系统采用交流伺服与液压加载方式自动加压, 加载压力和变形分别采用精密力传感器和高精度变形传感器测量, 计算机自动采集。仪器稳压效果好, 测量精度高。仪器主要技术参数: 试样尺寸  $\Phi 502 \text{ mm} \times 252 \text{ mm}$ , 最大负荷 1500 kN, 最大变形 50 mm。

### 1.2 试验标准

目前, 堆石料蠕变试验尚无规范和标准可循, 在本文的研究中, 参考相关研究成果<sup>[7]</sup>制定蠕变起始时间判别标准和稳定标准。堆石料蠕变试验在加载 1 h 后, 变形基本能平稳发展, 因此选择加载 1 h 作为蠕变发生起始时间。蠕变稳定采用双标准控制, 即 24 h 内变形量不大于 0.05 mm 且试验时间不少于 252 h。

## 2 试验土料和试验方案

### 2.1 试验土料

以某高心墙堆石坝工程的堆石料为研究对象, 堆石料以板岩为主, 夹少量条带状或透镜状变质砂岩, 饱和抗压强度为 25.7~140.0 MPa, 软化系数为 0.65~0.85。根据《GB 50021—2001 岩土勘察规范》<sup>[8]</sup>分类, 试验土料中含有部分软岩, 遇水容易软化。

工程所用堆石料的最大粒径为 800 mm, 受限于试验仪器尺寸, 需处理堆石料中粒径超过 60 mm 的颗粒。对超粒径土料采用混合法<sup>[9]</sup>处理, 先将原级配的粒径缩小为 1/2, 再对超过 60 mm 的颗粒进行等量替代, 试验用料的原级配与试验级配见表 1。

软岩料的压实密度受含水率影响, 存在最优含水率和最大干密度<sup>[10]</sup>。制备不同含水率的含软岩堆石料, 利用振动台法进行最大干密度试验。测得试验用料最大干密度为 2.00 g/cm<sup>3</sup>, 对应的含水率为 4.6%。采用固定体积法测得最小干密度为 1.57 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 堆石料原级配与试验级配

Table 1 Grain-size distribution of rockfill materials

土样级配	不同粒径 (mm) 堆石料百分比/%						
	800 ~400	400 ~200	200 ~60	60 ~40	40 ~20	20 ~10	<5 ~5
原级配	17.5	44.0	24.5	5.5	9.0	6.5	5.5
试验级配				27.0	18.4	25.6	18.5
							10.5

### 2.2 试验方案

依据文献[11]中关于土石坝填筑要求的规定, 堆石料碾压时宜加水。因此, 试验中的试样均为非饱和状态, 采用最大干密度试验确定的含水率 4.6%。一般高堆石坝堆石料的相对密实度为 0.9 左右, 采用 0.85, 0.90 和 0.95 三种相对密实度分别进行试验, 每个相对密实度的试样都在 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 MPa 4 级轴向压力下进行单轴蠕变试验。

## 3 结果及分析

### 3.1 相对密实度对堆石料轴向蠕变特性的影响

不同相对密实度单轴蠕变试验的轴向蠕变随时间变化的曲线见图 1, 图中最右侧的数值为轴向压力, 压力相同的一组曲线中上、中、下分别为相对密实度 0.85, 0.90, 0.95 的曲线。在蠕变初期, 蠕变应变曲线斜率较大, 蠕变速率较快; 随着时间增长, 蠕变速率逐渐减慢, 最终蠕变应变趋于一个稳定值。这是由于在蠕变初期, 堆石料的蠕变应变主要由颗粒破碎和颗粒重排列共同产生。随着轴向压力作用时间延长, 颗粒破碎速率逐渐减慢, 直至不再发生破碎。说明在试验压力范围内, 含软岩堆石料的蠕变为衰减蠕变。

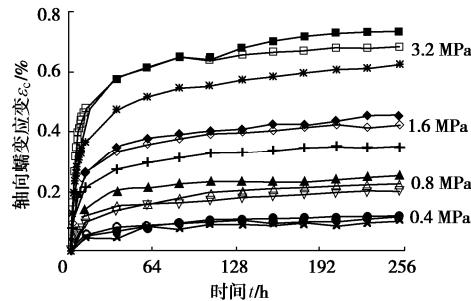


图 1 不同相对密实度的轴向蠕变应变随时间变化

Fig. 1 Change in axial creep strain with time under different relative densities

随着相对密实度增大, 试样的轴向蠕变应变逐渐减小, 说明堆石料蠕变与其自身密实程度相关。密实程度低的堆石料孔隙率大, 外力作用下, 粗大颗粒棱

角或软岩颗粒发生破碎、细化后，更容易滑移填充到孔隙中，产生较大蠕变应变。随着轴向压力增大，相同压力、不同相对密实度试样的蠕变应变曲线的差距逐渐增大。这是由于轴向压力较小时，颗粒表面接触应力较小，破碎颗粒数量少且粒径大，破碎颗粒填充受孔隙的影响较小，故不同密实程度的堆石料蠕变应变相差较小。随着轴向压力增大，颗粒表面接触应力增大，破碎颗粒数量增加且粒径变小，破碎颗粒滑移填充受孔隙的影响程度提高，故各试样间蠕变应变曲线差距变得明显。轴向蠕变应变曲线局部存在交叉现象，主要是由于堆石料颗粒互相咬合，若局部发生破碎或错动，变形量会有一定的激增，在蠕变应变曲线中表现较明显。

### 3.2 考虑轴向压力的蠕变模型

长江科学院提出的幂函数蠕变模型已成功应用于水布垭、双江口<sup>[12]</sup>的堆石料蠕变研究。说明该模型用于表达堆石料的蠕变特性具有较好的适用性，故本文的试验结果也采用该模型进行拟合。该蠕变模型为

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f (1 - t^{-\lambda}) , \quad (1)$$

式中， $\varepsilon_c$  为轴向蠕变应变， $\varepsilon_f$  为最终蠕变应变， $\lambda$  为衰减指数， $t$  为时间，单位为 h。

利用 Matlab 分别对 3.1 节所述的 12 组试验获得的轴向蠕变应变曲线用式（1）拟合，得到各组试验的最终蠕变应变和衰减指数。由于拟合得到的未必是与实测蠕变应变过程线变化趋势吻合最佳的模型参数，因此需优化模型参数。利用 Excel 表格的试算功能，以拟合得到的两参数为基准，在±5% 变化范围内分别间隔 0.003% 和 0.001 选取多个值，利用不同参数值组合试算，对比试算和试验结果，确定与实测蠕变应变过程线变化趋势吻合最佳的模型参数组合，结果见表 2。

表 2 幂函数蠕变模型参数

Table 2 Parameters of creep model of power function

相对密 实度 $D_r$	轴向压 力 $p/MPa$	最终蠕变应 变 $\varepsilon_f /%$	衰减指 数 $\lambda$	决定系数 $R^2$
0.85	0.4	0.295	0.090	0.9712
	0.8	0.574	0.107	0.9638
	1.6	0.938	0.121	0.9826
	3.2	1.441	0.131	0.9729
0.90	0.4	0.268	0.089	0.9866
	0.8	0.535	0.102	0.9844
	1.6	0.837	0.121	0.9107
	3.2	1.347	0.130	0.8501
0.95	0.4	0.237	0.087	0.9621
	0.8	0.488	0.099	0.9870
	1.6	0.731	0.120	0.9632
	3.2	1.225	0.129	0.9829

利用表 2 的参数计算各相对密实度和轴向压力的轴向蠕变应变曲线，其结果与试验结果的比较见图 2。

由图 2 可知，曲线与离散点偏差小，变化趋势一致，说明幂函数蠕变模型能较好表现含软岩堆石料蠕变特性。

通过绘制最终蠕变应变随轴向压力变化的曲线可知，两者关系曲线形状近似双曲线：

$$\varepsilon_f = \frac{p}{ap + b} , \quad (2)$$

式中， $p$  为轴向压力 (MPa)， $a$ ， $b$  为拟合参数。故用双曲线来拟合两者关系，见图 3，图例中 T 代表试验点，F 代表拟合曲线。衰减指数随轴向压力的变化关系见图 4，由图 4 可知，两者关系曲线形状近似幂函数：

$$\lambda = cp^d , \quad (3)$$

式中， $c$  和  $d$  为拟合参数，拟合曲线也绘于图 4 中。

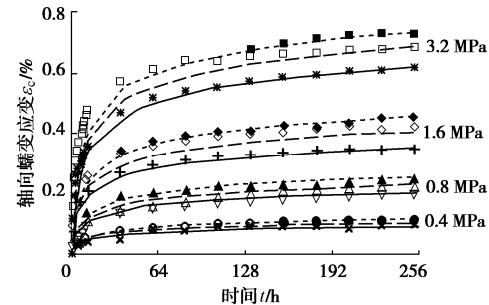


图 2 幂函数蠕变模型计算的轴向蠕变应变和试验结果的对比  
Fig. 2 Comparison between axial creep strain calculated by creep model of power function and test results

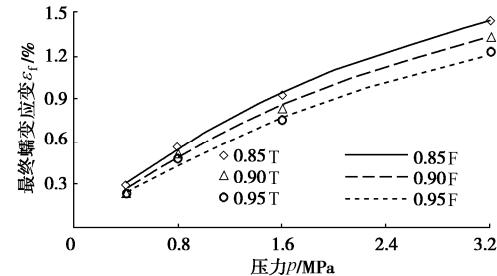


图 3 最终蠕变应变 - 轴向压力关系  
Fig. 3 Relationship between the final creep strain and axial pressure

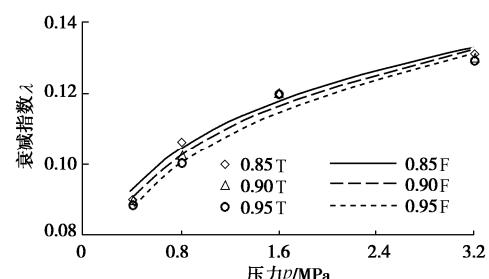


图 4 衰减指数 - 轴向压力关系  
Fig. 4 Relationship between attenuation index and axial pressure

将式（2），（3）代入式（1），整理后可得考虑轴向压力  $p$  的单轴蠕变模型表达式：

$$\varepsilon_c = \frac{p}{ap+b} (1 - t^{-cp^d}) \quad . \quad (4)$$

不同相对密实度的最终蠕变应变和衰减指数随轴向压力变化曲线的拟合参数及决定系数  $R^2$  如表 3 所示。由表 3 可知,  $R^2$  均在 0.95 以上, 拟合效果良好。

表 3 最终蠕变应变和衰减指数拟合曲线的参数及决定系数

Table 3 Parameters and determination coefficients of fitting curve

of final creep strain and attenuation index

相对密实度 $D_r$	最终蠕变应变 $\varepsilon_f$			衰减指数 $\lambda$		
	a	b	$R^2$	c	d	$R^2$
0.85	0.330	1.167	0.9994	0.109	0.174	0.9721
0.90	0.334	1.319	0.9973	0.107	0.184	0.9730
0.95	0.349	1.517	0.9934	0.105	0.193	0.9687
平均值	0.338	1.334	—	0.107	0.184	—
标准差	0.008	0.143	—	0.002	0.008	—

公式(4)中的各参数的标准差见表 3 最后一行。参数  $a$ ,  $c$ ,  $d$  的标准差均小于 0.01, 远小于参数  $b$  的标准差 0.143, 说明相对密实度对这三个参数的影响很小。为简化模型, 将参数  $a$ ,  $c$ ,  $d$  取平均值, 分别为 0.338, 0.107, 0.184。由表 2 中不同相对密实度、相同轴向压力的衰减指数  $\lambda$  值的对比, 也可看出相对密实度对衰减指数的影响很小。

### 3.3 考虑轴向压力和相对密实度的蠕变模型

由表 3 可知参数  $b$  与相对密实度呈正相关, 据此可进一步分析参数  $b$  与相对密实度的函数关系, 建立考虑相对密实度的蠕变模型。将不同相对密实度的参数  $b$  绘于图 5 中, 由图可知, 其与相对密实度呈良好的线性关系, 拟合的决定系数大于 0.95。将图 5 中参数  $b$  与相对密实度的线性函数关系代入式(4), 可得

$$\varepsilon_c = \frac{p}{ap + (b_1 D_r + b_2)} (1 - t^{-cp^d}) \quad , \quad (5)$$

式中,  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c$ ,  $d$  为模型参数, 各参数取值见表 4。

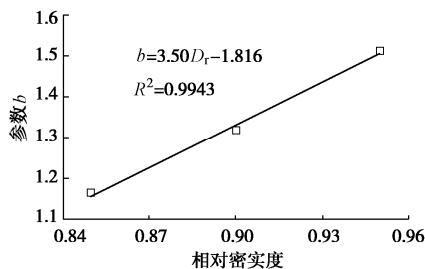


图 5 参数  $b$  与相对密实度的关系

Fig. 5 Relationship between parameter  $b$  and relative density

利用考虑轴向压力和相对密实度的蠕变模型计算各轴向压力和相对密实度含软岩堆石料的轴向蠕变应变曲线, 计算结果和试验结果的比较见图 6。由图 6 可知, 计算结果与试验结果偏差较小, 且变化趋势一致。说明前文中求取模型参数的方法可行, 模型参数可靠。

表 4 考虑轴向压力和相对密实度的蠕变模型参数

Table 4 Parameters of creep model for rockfill considering axial pressure and relative density

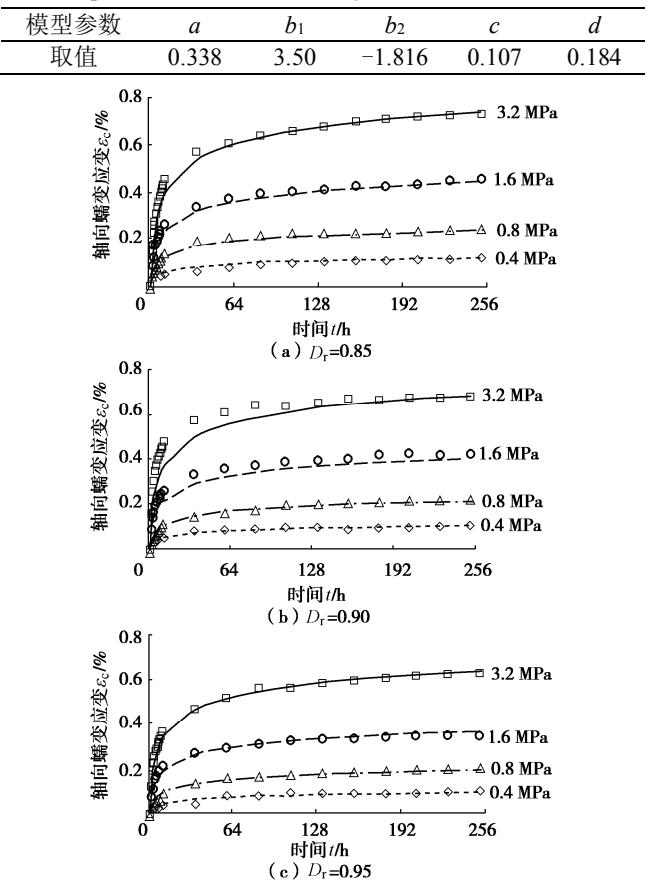


图 6 最终蠕变模型计算的轴向蠕变应变与试验结果的对比

Fig. 6 Comparison between axial creep strain calculated by final creep model and test results

对于以相对密实度为填筑指标的堆石坝, 可进行单轴蠕变试验获得堆石料轴向蠕变应变曲线。利用式(1)拟合求取各相对密实度堆石料最终蠕变应变和衰减指数, 然后分别用式(2), (3)拟合两者随轴向压力变化的曲线, 得到参数  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ 。将参数  $a$ ,  $c$ ,  $d$  取平均值, 将参数  $b$  表示为相对密实度的线性函数, 得到参数  $b_1$  和  $b_2$ 。为符合堆石料变形特性, 参数  $b$  不能为负值, 因此其与相对密实度的线性关系仅适用于密实情况下的堆石料。本文建立的蠕变模型在前文讨论的压力和相对密实度范围对含软岩堆石料适用, 上述范围以外模型的适用性需进一步研究确定。单轴蠕变模型能较好表现堆石料的蠕变特性, 预测堆石坝的长期变形特性。如梁军<sup>[4]</sup>利用单轴蠕变模型结合广义虎克定律, 计算得到的关门山坝的沉降曲线与实测沉降过程线相似程度较高。

### 3.4 模型参数的物理意义

本文的模型是通过将式(1)中最终蠕变应变和衰减指数表示为轴向压力和相对密实度的函数关系建立的, 因此模型参数的物理意义可通过最终蠕变应变和

衰减指数表达式中各参数的物理意义来说明。由式(2)可知,  $1/a$  为轴向压力趋近于无穷大时最终蠕变应变。对式(2)求导,  $1/b$  为轴向压力为 0 时最终蠕变应变随轴向压力增长的速率。由图 5 可知,  $b_1$  为参数  $b$  随相对密实度的变化速率,  $b_2$  为堆石料相对密实度为 0 时的  $b$  值。由式(3)为幂函数可知,  $c$  为轴向压力为 1 MPa 时的衰减指数,  $d$  是双对数坐标下衰减指数与轴向压力关系曲线的斜率, 表征衰减指数随轴向压力变化的速率。

## 4 结 论

本文对不同相对密实度的含软岩堆石料进行了单轴蠕变试验研究, 得到以下结论:

(1) 在试验压力范围内, 含软岩堆石料的蠕变类型为衰减蠕变。随着相对密实度的增大, 堆石料的轴向蠕变应变逐渐减小。轴向压力较低时, 不同相对密实度的轴向蠕变应变差距较小; 随着轴向压力提高, 轴向蠕变应变的差距逐渐增大。

(2) 利用幂函数蠕变模型拟合轴向蠕变应变随时间变化的曲线, 得到最终蠕变应变和衰减指数。其分别与轴向压力满足双曲线和幂函数关系, 由此建立了考虑轴向压力的含软岩堆石料的单轴蠕变模型。

(3) 分析模型参数可知相对密实度对衰减指数的影响很小。依据与最终蠕变应变相关的模型参数  $b$  和相对密实度呈线性关系, 提出了同时考虑轴向压力和相对密实度的单轴蠕变模型。利用分析确定的模型参数计算各轴向压力和相对密实度情况下堆石料的轴向蠕变应变, 计算结果与试验结果较吻合。说明提出的单轴蠕变模型在本文讨论的压力和相对密实度范围对含软岩堆石料是适用的。

## 参 考 文 献:

- [1] SHIBATA K, TANI K, OKADA T. Creep behavior of tuffaceous rock at high temperature observed in unconfined compression test[J]. Soils and Foundations, 2007, **47**(1): 1–10.
- [2] 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.
- [3] AZIZ M, TOWHATA I, YAMADA S, et al. Water-induced granular decomposition and its effects on geotechnical properties of crushed soft rocks[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, **10**(6): 1229–1238.
- [4] 梁军. 高面板堆石坝流变特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. (LIANG Jun. Research on Rheology Properties of High Concrete-Faced Rock-fill Dam[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [5] 孙振远, 王占军, 韩华强. 密度对堆石料流变特性的影响 [J]. 广东水利水电, 2019(4): 84–87. (SUN Zhen-yuan, WANG Zhan-jun, HAN Hua-qiang. Effect of density on rheological properties of rockfill[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2019(4): 84–87. (in Chinese))
- [6] 朱晟, 钟春欣, 王京, 等. 高心墙堆石坝填筑标准的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 561–566. (ZHU Sheng, ZHONG Chun-xin, WANG Jing, et al. Experimental study on filling standard of rockfill dam with high core wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 561–566. (in Chinese))
- [7] LI H F, ZHANG Y Q. Creep rate and creep model of rockfill[J]. Procedia Engineering, 2012, **28**: 796–802.
- [8] 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 2009. (Code for Geotechnical Engineering Investigation: GB 50021—2001 [S]. 2009. (in Chinese))
- [9] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019 [S]. 2019. (in Chinese))
- [10] XING H F, GONG X N, ZHOU X G, et al. Construction of concrete-faced rockfill dams with weak rocks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(6): 778–785.
- [11] 碾压土石坝设计规范: SL 274—2001[S]. 2002. (Code for Design of Roller Compacted Earth and Rock Dams: SL 274—2001 [S]. 2002. (in Chinese))
- [12] 左永振, 程展林, 丁红顺, 等. 堆石料蠕变试验方法研究[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(12): 63–65, 70. (ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, et al. Study on creep test method of rockfill[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(12): 63–65, 70. (in Chinese))

(编校: 明经平)