

考虑颗粒破碎的堆石料蠕变特性研究

王峰^{1,2}, 迟世春^{*1,2}, 王振兴³

- (1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024;
3. 长春黄金设计院, 吉林 长春 130000)

摘要: 高土石坝竣工之后, 坝体内堆石颗粒会不断发生破碎和重组, 这在宏观上表现为堆石体不断产生蠕变变形. 过大的堆石体蠕变变形会使得大坝防渗体发生破坏, 从而危害大坝的安全运行. 颗粒破碎是导致堆石体蠕变的主要因素之一, 为研究颗粒破碎效应对堆石料蠕变特性的影响, 在堆石料单粒强度的 Weibull 分布和颗粒分形破碎理论的基础上, 引入了考虑时间效应的颗粒延迟破坏强度公式, 并推求了蠕变条件下堆石料的级配演化过程. 之后通过建立蠕变和破碎参量的关系, 实现了对三轴试样蠕变变形的计算. 最后通过堆石料三轴蠕变试验验证了方法的有效性. 新提出的方法不仅能合理预测堆石料的蠕变变形, 而且可以较好地反映蠕变过程中试样级配曲线的演化.

关键词: 堆石料; 单粒强度试验; Weibull 分布; 颗粒级配演化

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201706005

0 引言

近年来, 我国西南地区建成了一批高土石坝, 如天生桥一级面板堆石坝(178 m)、水布垭面板堆石坝(233 m)等^[1]. 大坝建成后, 随着运行时间的增长, 坝体内堆石颗粒会不断发生破碎和重组, 这在宏观上表现为堆石体的蠕变变形. 堆石体的蠕变变形会使坝体堆石料与面板的变形协调性变差, 恶化面板的应力变形性状, 导致面板发生脱空、裂缝、挤碎以及止水破坏, 严重危害大坝防渗安全^[2]. 如罗马尼亚的 Lesu 坝, 建成 2 a 后, 左岸面板发生错动, 建成 4 a 后, 右岸坝肩面板产生裂缝. 国内的西北口面板堆石坝, 建成 1 a 后, 面板就发生裂缝, 7 a 之后裂缝依旧在发展^[3]. 天生桥一级水电站面板堆石坝自 1999 年 5 月面板竣工后, 便监测到一期至三期面板均有脱空出现, 并且脱空在不断地发展^[4]. 新建成的水布垭面板堆石坝、猴子岩面板堆石坝等, 也均监测到了明显的后

期变形^[3]. 随着已建成土石坝坝高的不断增加, 堆石体的蠕变变形计算已成为亟待解决的问题.

对于堆石料的蠕变特性研究, 一般是通过室内单轴或者三轴蠕变试验来进行的. 国外最早为 Parkin 进行的粗粒土的单轴蠕变试验, 其认为沉降速率和时间呈对数关系^[5]. 国内最早为沈珠江等对西北口面板坝垫层料进行的三轴蠕变试验, 并提出了沈珠江三参数蠕变模型^[6]. 梁军等通过堆石料单轴蠕变试验研究了软岩含量对于试样蠕变参数的影响^[7]. 程展林等对水布垭堆石料进行了不同围压和应力水平下的三轴蠕变试验, 并在这个基础上提出了九参数蠕变模型^[8]. 但是, 以上研究均是在测得的蠕变时间曲线的基础上展开. 对于考虑级配演化的堆石料蠕变特性研究, 前人还未涉及. 并且由于测试手段的限制, 室内蠕变试验过程中的堆石料破碎量无法直接测得, 因而难以通过单轴或者三轴试验直接研究堆石料蠕变过程中的级配演化. 迟世春等^[2]提出了一种基于堆

石料单粒强度试验推求三轴剪切过程中堆石料级配演化的方法,这种方法可以较好地计算三轴剪切过程中的堆石料级配演化,但是对于蠕变过程中堆石料级配演化的研究还没有展开.

本文对前文提出的“推求剪切过程中堆石料级配演化的方法”进行了扩展^[2].首先在堆石料单粒强度 Weibull 分布和颗粒分形破碎的理论基础上,通过加入考虑时间效应的岩石延迟破坏强度公式,从而实现蠕变过程中堆石料级配演变的实时预测;然后通过建立试样蠕变和破碎参量的关系,实现对三轴蠕变条件下,试样蠕变变形的计算;最后通过和堆石料三轴蠕变试验结果进行对比,验证方法的有效性.

1 试 验

1.1 单粒强度试验

试验材料为大连地区某石料厂爆破料,岩性为石灰岩,岩石棱角分明.首先用圆孔筛将石灰岩筛分为 40~60、20~40、10~20 和 5~10 mm 共 4 个粒组,然后从每个粒组中随机选取 30 颗不规则岩块,测定其瞬时强度.试验过程相当于上、下平行的刚性平面挤压堆石颗粒,直至颗粒破坏.参考岩石点荷载试验,加载时间控制在 60 s 内.详细试验过程可参见文献[2].

1.2 三轴蠕变试验

试验所用仪器为大连理工大学研制的粗粒土大型三轴仪.试样直径 300 mm,高 600 mm,密度 1.87 g/cm³,试验材料和单粒强度试验一致;试验的级配,参照多种堆石料工程级配,并取其平均值^[3](图 1).

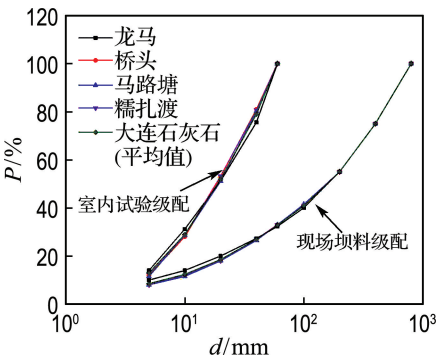


图 1 堆石料的初始级配曲线

Fig. 1 Initial grading curves of the rockfill materials

首先,通过 3 组常规三轴试验,确定试样的剪切强度 q_t .之后进行蠕变试验:对试样进行固结,轴向加载至指定应力水平 $s(s=q/q_t)$,然后维持荷载不变,测量试样的变形.当连续 2 d 试样的轴向变形率小于 5×10^{-5} 时,认为试样变形稳定,试验结束.试验后,试样进行烘干并筛分.本次试验的围压、应力水平、试验时间和试样的破碎参量 B_r 见表 1.详细试验过程见文献[3].

表 1 三轴蠕变试验的方案

Tab. 1 Triaxial creep tests plan

围压/kPa	应力水平	时间/h	试验值 B_r
400	0.25	156	0.32
	0.50	180	0.39
	0.75	216	0.43
800	0.25	144	0.38
	0.50	168	0.48
	0.75	216	0.52
1 200	0.25	144	0.41
	0.50	168	0.51
	0.75	216	0.59

2 堆石料颗粒的强度和破碎特性

2.1 堆石料单粒强度的 Weibull 分布

在单粒强度试验中,不规则岩块的劈裂强度 σ_s 通常可以用下式表示^[9]:

$$\sigma_s = F_t/d^2 \tag{1}$$

式中: F_t 为岩块可以承受的最大轴向荷载; d 为颗粒初始粒径(试验开始时,上、下挤压钢板的初始距离).

已有研究表明^[10-14],单粒强度试验中,若颗粒未被破坏的概率 P_s 较好服从 Weibull 分布,则可由下式表示:

$$P_s = \exp \left[- \left(\frac{d}{d_0} \right)^3 \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0} \right)^m \right] \tag{2}$$

试验前,如果将颗粒进行筛分,则对于同一粒组,认为粒径相同($d=d_0$),可得下式:

$$P_s = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0} \right)^m \right] \tag{3}$$

式中: m 为 Weibull 模量; σ_0 为某一粒组颗粒的特征强度,即 P_s 取 1/e 时对应的颗粒劈裂强度,各粒组颗粒强度的 Weibull 分布如图 2 所示.随着颗粒粒径的增加,堆石料颗粒的特征强度在显著

减小(图 3). McDowell 指出堆石料颗粒的特征强度和粒径的关系可以较好地由下式表示:

$$\sigma_0=\lambda d^{-3/m} \tag{4}$$

式中: λ 为尺寸效应常数, m 为 4 个粒组 Weibull 模量的平均值.

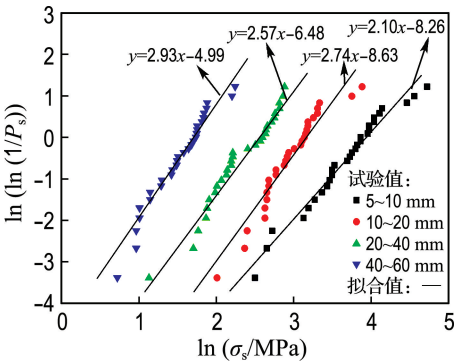


图 2 各组颗粒单粒强度的 Weibull 分布
Fig. 2 Weibull distribution of single particle strength for each set of grains

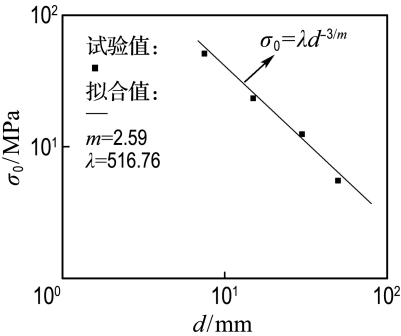


图 3 颗粒特征强度和粒径的关系
Fig. 3 Characteristic strength as a function of particle size

2.2 颗粒的延迟破坏强度

通常情况下,当外荷载达到岩石的瞬时强度 σ_s 时,岩石发生破坏.在岩石承受荷载低于其瞬时强度的情况下,如果持续作用较长的时间,由于蠕变作用,岩石也可能发生破坏.因此岩石的强度会随外荷载作用时间的延长而降低.这里把和时间相关的岩石强度 σ_{st} 称为岩石的延迟破坏强度^[15].特别的,把作用时间 $t \rightarrow \infty$ 的延迟破坏强度称之为岩石的长期强度 $\sigma_{s\infty}$.

大量的岩石蠕变试验资料表明^[15],岩石的延迟破坏强度可以由指数型经验方程描述如下:

$$\sigma_{st}=A+B\exp(-\alpha t) \tag{5}$$

当 $t=0$ 时,可得瞬时强度为

$$\sigma_s=A+B \tag{6}$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,可得长期强度 $\sigma_{s\infty}$ 为

$$\sigma_{s\infty}=A \tag{7}$$

将式(6)和(7)代入式(5)可得

$$\sigma_{st}=\sigma_{s\infty}+(\sigma_s-\sigma_{s\infty})\exp(-\alpha t) \tag{8}$$

岩石的长期强度通常可以由瞬时强度折减得到,关系式如下:

$$\sigma_{s\infty}=\beta \cdot \sigma_s \tag{9}$$

式中: β 为长期强度对应的应力水平,取值范围为 $(0,1)$,将式(9)代入式(8)可得

$$\sigma_{st}=\sigma_s[\beta+(1-\beta)\exp(-\alpha t)] \tag{10}$$

σ_{st} 会随着时间的增加而降低; α 为试验参数,数值为一个常数.如图 4 所示,随着参数 α 的减小,曲线变得越来越平缓,但是最终会收敛于同一个 β 值.

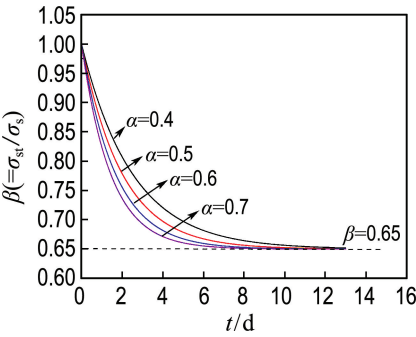


图 4 岩石应力水平和破坏时间的关系
Fig. 4 The relationship between the stress levels and failure time of the rock

2.3 粒组颗粒的分裂模式

McDowell 发现一维固结试验中,均一级配沙子破碎后,颗粒级配较好地服从分形分布,这表明分形分布较适合描述均一级配颗粒的分裂模式.所以在单粒强度试验中,同一粒组的颗粒破碎后的级配分布可由下式表示:

$$P_{d<d_i}=\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \tag{11}$$

式中: $d_{\max}$ 为最大颗粒直径; $P_{d<d_i}$ 为粒径小于 d_i 的颗粒质量含量百分比; D 为分形维数,范围在 $2\sim 3$.单粒强度试验后,粒组颗粒破碎后的级配见图 5.

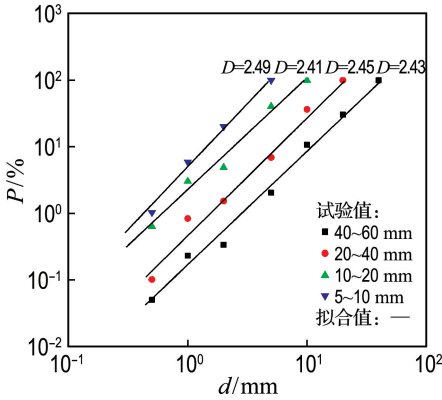


图 5 各组颗粒单粒强度试验后的粒径级配曲线
Fig. 5 Particle-size grading curves after single particle strength test for each set of grains

3 试样蠕变的计算过程

3.1 堆石料级配演化的推求过程

对于堆石料三轴蠕变试验,当试样固结完成之后,试验的加载过程可以分为两个阶段:第一阶段是加载到指定应力水平 s ;第二阶段是维持应力状态不变,试样进入蠕变状态.所以对于级配演化的计算也分两个阶段进行,具体过程如下.

3.2 加载至指定应力水平时试样当前各粒组质量

三轴试样中的颗粒发生破碎,主要是由于主力链上的接触力大于颗粒自身的强度所致,这种破坏模式和单粒强度试验较为接近.通常,单粒强度试验中颗粒所受的劈裂应力和三轴试样受力的关系,可由下式表示^[2,13]:

$$\sigma_s = q\eta \left(\sqrt{\frac{3(1+e)\pi}{6}} \right)^2 \tag{12}$$

式中: q 为三轴试样所受的广义剪应力, e 为试样孔隙比, η 表示颗粒形状修正系数.

加载前,试样中第 i 粒组的堆石质量为 $M_{0,i}$, $i=1,2,\cdots,6$,对应 60~40、40~20、20~10、10~5、5~2 和 2~0 mm 的 6 个粒组.

当施加轴向荷载至指定应力水平($s=q_1/q_t$)时,第 i 粒组颗粒的当前质量 $M_{1,i}$ 可由前文方法求出^[2].

3.3 蠕变过程中试样级配的演化

当试样开始发生蠕变时,令 $t=0$,此时三轴试样中各粒组的当前质量为 $M_{1,i}$.

在时间 $t=t_1$ 时,由式(3)、式(10)和式(12)可

得,第 i 粒组颗粒未发生破碎的堆石质量 $M_{2,i}$ 为 $M_{2,i} = P_s(\sigma, t) \cdot M_{0,i} =$

$$\exp \left[- \left(\eta \frac{q_1}{\sigma_0 (\beta + (1-\beta) \exp(-at_1))} \times \left(\sqrt[3]{\frac{(1+e)\pi}{6}} \right)^2 \right)^m \right] M_{1,i} \tag{13}$$

第 i 粒组颗粒发生破碎的堆石质量为 $M_{1,i} - M_{2,i}$,破碎颗粒按分形分布分配至下一级粒组(粒径较小粒组),可得

$$M_{3,i} = P_{ij} (M_{1,i} - M_{2,i}) \tag{14}$$

其中

$$(P_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & 0 & 0 & 0 \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & 0 & 0 \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & 0 \end{pmatrix} \tag{15}$$

式中: (P_{ij}) 即为颗粒破碎的分配矩阵,在每一级荷载作用下,对于某一粒组发生破碎的堆石质量如何分配到下一级更小的粒组,均可由上面矩阵得出,矩阵中的元素 P_{ij} 可以由分形分布求得:

$$P_{ij} = P_{(d_{i+2} < d < d_{i+1})} = P_{(d < d_{i+1})} - P_{(d < d_{i+2})} = \left(\frac{d_{i+1}}{d_i} \right)^{3-D} - \left(\frac{d_{i+2}}{d_i} \right)^{3-D} \tag{16}$$

将第 i 粒组未破碎颗粒质量与新生成颗粒质量相加,得到试验至时刻 $t=t_1$ 时,第 i 粒组的当前质量 $M_{4,i}$:

$$M_{4,i} = M_{2,i} + M_{3,i}; \quad i=1,2,\cdots,6 \tag{17}$$

重复上面的步骤即可求得任意时刻 t 时,各粒组颗粒的当前质量.

3.4 试样变形和破碎参量的关系

Xiao 等指出^[16],堆石料的破碎程度可以较好地由 Einav 提出的相对破碎参量 B_r 度量,其表达式如下:

$$B_r = B_p / B_t \tag{18}$$

式中: B_p 为破碎潜能(初始级配和当前级配之间的面积), B_t 为总破碎量(初始级配和分形维数为 2.6 的最终级配之间的面积).这里对于试验级配,取堆石料的最小粒径 2 mm 为界限粒径.破碎参量 B_r 越大,表明堆石料破碎越严重.

由于蠕变过程中,试样的破碎量难以直接进行量测,目前尚未有专门描述蠕变过程中试样轴向变形和破碎参量关系的公式.这里假定其与三轴剪切试验一致.贾宇峰等提出三轴剪切过程中,破碎参量和轴向应变的关系可由下式表示^[1]:

$$B_r=a\varepsilon_l/(b+\varepsilon_l) \tag{19}$$

即

$$\varepsilon_l=bB_r/(a-B_r) \tag{20}$$

式中: a 和 b 为试验参数.

对前人堆石料三轴蠕变试验资料整理后发现,三轴蠕变条件下,试样轴变和体变的关系近似线性关系^[3,17-19](图 6).所以,试样轴变和体变的关系这里用线性函数描述,表达式如下:

$$\varepsilon_v=k\varepsilon_l+f \tag{21}$$

式中: k 和 f 为直线的斜率和截距.

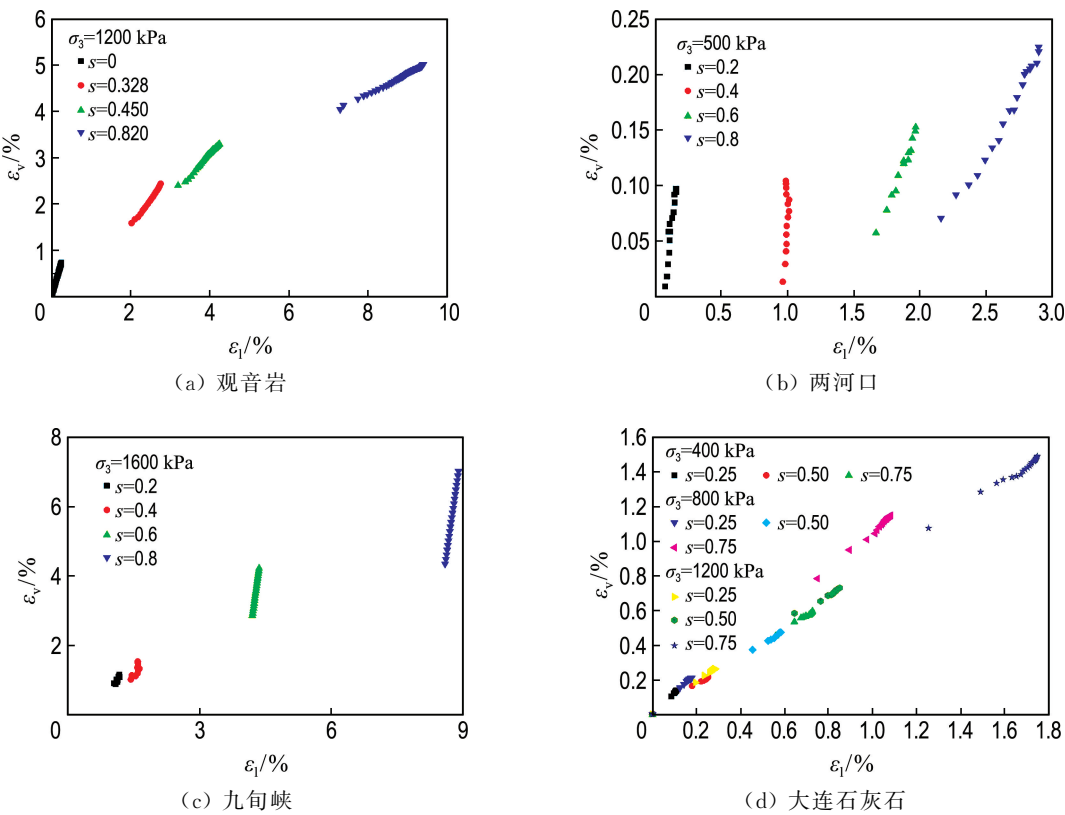


图 6 几种堆石料三轴蠕变试验的轴变和体变关系

Fig. 6 The relationship between the axial strain and the volumetric strain in triaxial creep test for several rockfill materials

3.5 试样蠕变的计算流程

试样蠕变的计算流程如图 7 所示,首先通过前文方法计算出试样加载到应力水平 s 时,试样的级配曲线 PSD_1 . 然后经过时间 Δt 后,通过式 (13)~(18) 计算出试样当前的级配曲线 PSD_2 ,并计算出相应的破碎参量 B_r . 之后通过式 (20) 和式 (21) 计算得到试样的轴向蠕变和体积蠕变. 在下一步计算之前,更新试样的孔隙比和时间变量. 这样就可以计算出在任意时刻下,试样的蠕变变形和级配变化了.

4 模型验证

试样蠕变计算所需的参数见表 2,参数可以分为两部分:与单粒相关的细观参数和与三轴试样相关的宏观参数. 细观参数可以通过单粒强度试验求得,其中 Weibull 模量 m 和分形维数 D 取 4 个粒组试验值的平均值. 与延迟破坏强度相关的参数 α 和 β 可以通过拟合三轴试验测得的破碎参量 B_r 得到. 宏观参数 a 、 b 、 k 和 f ,可以通过拟合三轴蠕变试验结果得到.

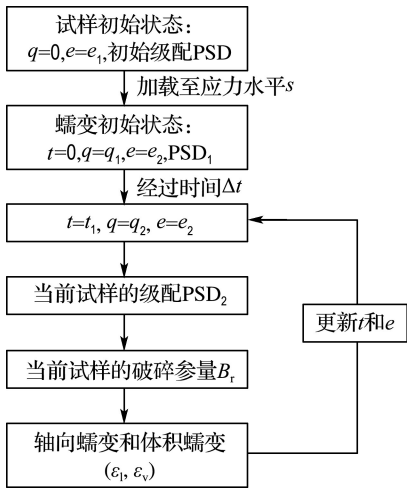


图 7 堆石料试样蠕变的计算流程图
Fig. 7 Calculation flowchart for the creep behavior of the rockfill materials

为了验证模型的有效性,这里对 800 kPa 和 1 200 kPa 围压下的三轴蠕变试验进行了模拟. 在

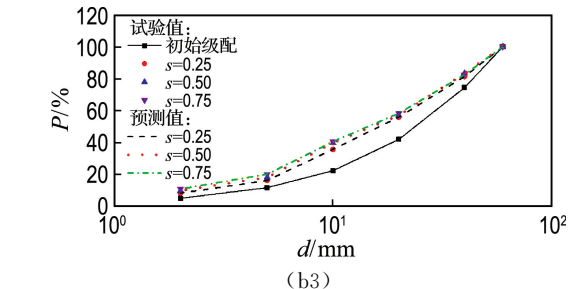
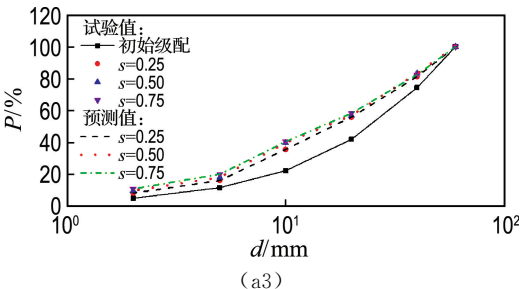
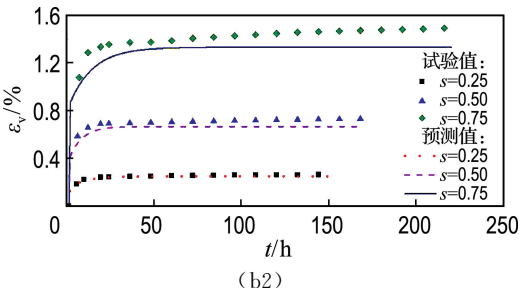
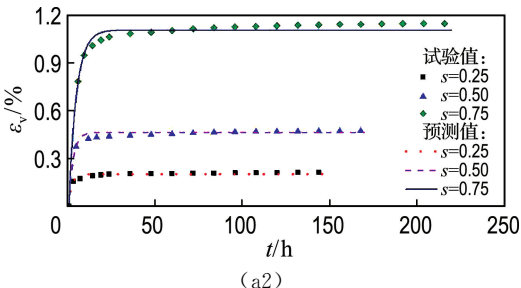
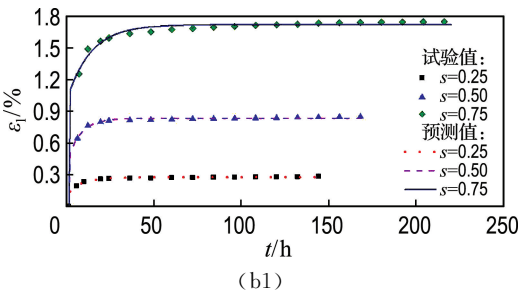
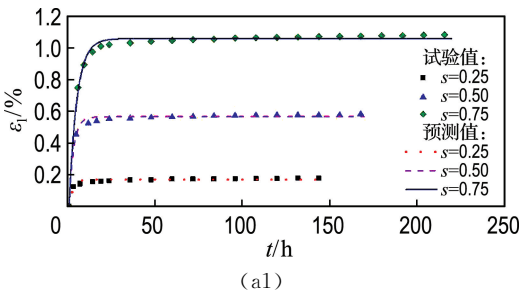
不同应力水平($s=0.25, 0.50, 0.75$)下,试样的试验值和预测值如图 8 所示. 如图 8(a1)、(a2)所示,在同一个围压下,应力水平越高,试样的蠕变变形越大,试样达到稳定状态(轴向变形率小于

表 2 蠕变计算的参数

Tab. 2 Parameters of creep calculation

参数	模型常数	符号	数值
微观参数	Weibull 模量	m	2.59 ¹⁾
	尺寸效应常数	λ	516.76
	分形维数	D	2.45 ¹⁾
	石块相对密度	G_s	2.65
	延迟破坏强度常数	α	10
	长期强度折减系数	β	0.75
宏观参数	试样初始孔隙比	e_0	0.42
	破碎参量公式参数	a	0.46
	破碎参量公式参数	b	0.05
	轴变体变公式参数	k	0.75
	轴变体变公式参数	f	0.04

注:1) 表示平均值.



(a) $\sigma_3 = 800 \text{ kPa}$ (b) $\sigma_3 = 1\,200 \text{ kPa}$

图 8 试样蠕变变形和级配曲线的试验值和预测值比较

Fig. 8 Comparisons between model predictions and test data on creep deformation and the grading curve

5×10^{-5})所需的时间也越长(图 8(b2)中的现象非常偶然,可能是试验过程中的误差所致,并不具有普遍性)。如图 8(a3)所示,蠕变试验前后,试样级配曲线明显左移,表明试验过程中试样破碎明显,并且随着应力水平的提高,颗粒破碎也在不断的加剧。三轴试样蠕变和级配的计算值和试验值基本一致,这表明所提方法可以较好地描述堆石料在三轴蠕变条件下的变形特性和级配演化规律。

5 结 论

(1)通过引入考虑时间效应的岩石延迟破坏强度公式,可以合理地通过单粒强度试验推求出三轴蠕变试验过程中堆石料的级配演化。通过构建试样变形和破碎参量的关系,可以方便地实现对试样蠕变变形的计算。

(2)计算所需的参数可以通过单粒强度试验和三轴蠕变试验取得,参数的物理意义明确,求取方法简单。

(3)试样蠕变时间曲线和级配变化曲线的预测值和试验值基本一致,表明本文提出的方法可以较好地反映堆石料的蠕变和破碎特性。

参考文献:

- [1] 贾宇峰,王丙申,迟世春. 堆石料剪切过程中的颗粒破碎研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9):1692-1697.
JIA Yufeng, WANG Bingshen, CHI Shichun. Particle breakage of rockfill during triaxial tests [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, **37**(9):1692-1697. (in Chinese)
- [2] 迟世春,王峰,贾宇峰,等. 考虑细观单粒强度的堆石料破碎特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(10):1780-1785.
CHI Shichun, WANG Feng, JIA Yufeng, *et al.* Modeling particle breakage of rockfill materials based on single particle strength [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, **37**(10):1780-1785. (in Chinese)
- [3] 王振兴. 堆石料的流变试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
WANG Zhenxing. Experimental study on rheology of rockfill [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] 张丙印,师瑞锋. 流变变形对高面板堆石坝面板脱空的影响分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(8):1179-1184.
ZHANG Bingyin, SHI Ruifeng. Influence of creeping on separation between concrete slab and cushion layer in high concrete face rock-fill dam [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, **25**(8):1179-1184. (in Chinese)
- [5] MARANHA DAS NEVES E. **Advances in Rockfill Structures** [M]. Berlin: Springer Netherlands, 1991.
- [6] 沈珠江,左元明. 堆石料的流变特性试验研究[C]//第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海:同济大学出版社, 1991.
SHEN Zhujiang, ZUO Yuanming. Experimental study on creep properties of rockfill materials [C] // **Proceedings of the Sixth Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Shanghai: Tongji University Press, 1991. (in Chinese)
- [7] 梁军,刘汉龙. 面板坝堆石料的蠕变试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2):257-259.
LIANG Jun, LIU Hanlong. Creep test for rockfill of CFRD [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, **24**(2):257-259. (in Chinese)
- [8] 程展林,丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4):473-476.
CHENG Zhanlin, DING Hongshun. Creep test for rockfill [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, **26**(4):473-476. (in Chinese)
- [9] JAEGER J C. Failure of rocks under tensile conditions [J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1967, **4**(2):219-227.
- [10] MCDOWELL G R, AMON A. The application of Weibull statistics to the fracture of soil particles [J]. **Soils and Foundations**, 2000, **40**(5):133-141.
- [11] MCDOWELL G R. On the yielding and plastic compression of sand [J]. **Soils and Foundations**, 2002, **42**(1):139-145.
- [12] NAKATA Y, KATO Y, HYODO M, *et al.* One-

- dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength [J]. **Soils and Foundations**, 2001, **41**(2): 39-51.
- [13] NAKATA Y, HYDE A, HYODO M, *et al.* A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test [J]. **Géotechnique**, 1999, **49**(5): 567-583.
- [14] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1951, **18**(3):293-297.
- [15] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
CAI Meifeng. **Rock Mechanics and Engineering** [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [16] XIAO Yang, LIU Hanlong, DING Xuanming, *et al.* Influence of particle breakage on critical state line of rockfill material [J]. **International Journal of Geomechanics**, 2016, **16**(1):04015031.
- [17] 于 浩, 李海芳, 温彦锋, 等. 九甸峡堆石料三轴蠕变试验初探[J]. 岩土力学, 2007, **28**(s1):103-106.
YU Hao, LI Haifang, WEN Yanfeng, *et al.* Study on triaxial creep test for Jiudianxia rockfill materials [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, **28**(s1):103-106. (in Chinese)
- [18] 李国英, 米占宽, 凌 华. 观音岩水电站心墙堆石坝坝料后期变形试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
LI Guoying, MI Zhankuan, LING Hua. Test report for the deformation properties of Guanyinyan core rockfill dam material [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2016. (in Chinese)
- [19] 程 博, 刘斌云, 李海芳. 两河口堆石坝堆石料蠕变特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, **10**(5):65-67, 99.
CHENG Bo, LIU Binyun, LI Haifang. Experimental study on creep properties of Lianghekou dam's rockfill materials [J]. **Journal of Water Resources Architectural Engineering**, 2012, **10**(5):65-67, 99. (in Chinese)

Research on creep behavior of rockfill materials considering particle breakage

WANG Feng^{1,2}, CHI Shichun^{*1,2}, WANG Zhenxing³

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. Changchun Gold Design Institute, Changchun 130000, China)

Abstract: After the completion of high rockfill dams, particle breakage and reorganization occurred continuously in the dam cause the significant creep deformation of rockfill materials (RFMs). Oversize deformation of RFMs will lead to impervious system failure and affect safety operation of the dams. Particle breakage is one of the main factors that lead to the creep of RFMs. To research the effect of the particle breakage on the creep, based on the Weibull distribution of the particle strength and particle fractal crushing theory, a time-dependent particle delayed failure strength formula is introduced and a method for the prediction of particle grading evolution during the creep process is proposed. Then, by building the relationship between the creep and relative breakage parameters, the creep deformation of the triaxial sample is calculated. Finally, the validity of the method is verified by the triaxial creep tests. The new method can not only well predict the creep deformation of RFMs, but also well reflect the evolution of the particle grading curve during the creep process.

Key words: rockfill materials; single-particle strength test; Weibull distribution; evolution of particle grading