

## 堆石蠕变与颗粒破碎特性三轴试验

王琛<sup>a,b</sup>, 詹传妮<sup>b</sup>, 何鹏<sup>a,b</sup>, 张建卫<sup>b</sup>, 李黎<sup>b</sup>

(四川大学 a. 水力学与山区河流开发保护重点实验室; b. 水利水电学院, 成都 610065)

**摘要:**为分析堆石的蠕变规律和研究颗粒破碎与蠕变的关系,对某堆石料进行了不同应力水平和围压下的大型三轴排水蠕变试验。蠕变试验后通过筛分试验测量了堆石的颗粒破碎程度。结果表明堆石的蠕变变形与应力水平和围压有关;轴向蠕变和体积蠕变随应力水平的增大而增大,应力水平相同时则随围压增大而增大。堆石的应变-时间关系可用幂函数表示,轴向应变-应力关系和体积应变-应力关系分别满足双曲线函数和线性比例函数。随应力水平和围压的增大,堆石颗粒破碎增多。堆石颗粒破碎可用相对颗粒破碎指数度量,其与轴向蠕变和体积蠕变近似呈线性比例关系。

**关键词:**蠕变;堆石;颗粒破碎;压缩试验

**中图分类号:**TU411.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)05-0057-06

## Creep and Particle Breakage Behavior of Rockfill in Triaxial Compression Testing

WANG Chen<sup>a,b</sup>, ZHAN Chuan-ni<sup>b</sup>, HE Peng<sup>a,b</sup>, ZHAN Jian-wei<sup>b</sup>, LI Li<sup>b</sup>

(a. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering;

b. School of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the creep laws and the relation between particle breakage and creep strain of some certain rockfill, a series of constant-stress drained creep tests were conducted on rockfill materials with the large-scale triaxial apparatus. Tests were carried out under different confining pressures and stress levels. Particle breakage degrees of this rockfill were measured by sieve test after creep tests. It is indicated that creep deformation of rockfill has something to do with confining pressures and the stress levels. The axial creep strain and the volumetric creep strain increase with the increase of stress levels, and also increase with the increase of confining pressures under same stress level. The strain-time relation can be described with power function. The stress-axial strain and stress-volumetric strain behavior can be described with hyperbolic and linear function, respectively. Particle breakage degrees increase with the increase of stress levels and confining pressures. The relative particle breakage index can be adopted to descript the particle breakage of rockfill. And the axial creep strain and volumetric creep strain are linearly dependent on this index.

**Key words:** creep; rockfill; particle breakage; compression testing

颗粒材料的流变性质研究是岩土力学与工程的重要课题<sup>[1-4]</sup>。如对高面板堆石坝,堆石颗粒材料的

流变将引起面板和垫层分离,导致面板压应力增大而压裂,危害坝体防渗和安全<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期:2010-11-28

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(50909068)

作者简介:王琛(1977-),男,副教授,博士,主要从事粗粒土的本构模型与数值模拟研究,(E-mail)cwang@scu.edu.cn。

颗粒材料流变性质研究包括蠕变、应力松弛和应变速率效应<sup>[2-3]</sup>,迄今,堆石的流变性质研究主要集中在蠕变规律和机理研究方面<sup>[7-10]</sup>。堆石的蠕变规律宜通过大型三轴试验获取<sup>[7]</sup>,蠕变与时间关系有幂函数<sup>[8-9]</sup>和双曲线函数<sup>[10]</sup>等,且与应力水平有关。花俊杰等<sup>[9]</sup>对堆石蠕变的尺寸效应进行了试验分析。一般认为结合细观机理去分析材料的宏观力学行为是建立更加合理本构的可行途径。从细观机理来看,堆石体在应力持续作用下颗粒破碎,细化破碎的颗粒结构调整、滑移填充孔隙,这在宏观上表现为蠕变现象<sup>[11]</sup>。初步的堆石颗粒破碎研究分析了颗粒破碎与应力的关系<sup>[11]</sup>。然而,在颗粒破碎指标的合理选取,及其与应力、蠕变等的定量关系等方面尚有不足。

本文采用分别加载方式,对两河口堆石料进行了不同围压,不同应力水平下的大型三轴排水蠕变试验,获取堆石蠕变规律;并用筛分法测量试验后堆石颗粒级配,初步探讨蠕变与颗粒破碎的关系。

## 1 三轴排水蠕变试验

### 1.1 试验程序

三轴排水蠕变试验在应力控制式大型三轴仪上开展。试验土料采用两河口板岩堆石料,试样尺寸 $\phi 300 \times 600$  mm,对粒径 $d > 60$  mm超径土以5~60 mm等量替代法处理,其不均匀系数 $C_u = 4.2$ ,曲率系数 $C_c = 0.81$ ,分类定名为级配不良砾 GP。试样控制干密度 $1.95 \text{ g/cm}^3$ ,分5层制样以保证试样的均匀性。采用真空和水头法联合饱和,试验水温 $20 \pm 2$  °C。

试验考虑了围压 $\sigma_3$ 和偏应力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 的影响, $\sigma_1$ 为大主应力。试验分2组,编号为TC2和TC4,对应 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ 和 $400 \text{ kPa}$ 。每组各进行4个偏应力下的蠕变试验,以应力水平 $D = \frac{q}{q_f}$ 表示偏应力的相对大小, $q_f$ 为相应 $\sigma_3$ 下的破坏偏应力,由固结排水三轴试验获得;设置 $D = 0.25, 0.50, 0.75$ 和 $0.95$ 。试验编号及其对应的应力状态见表1,其中, $p = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3}$ 为平均法向应力。

为测量不同 $\sigma_3$ 和 $q$ 情况下堆石的颗粒破碎,蠕变试验采用分别加载方式进行。各试样蠕变试验程序如下:1)在给定 $\sigma_3$ 下固结24 h。2)以较快的加载速率在2 min内加载至预定的偏应力 $q$ 。3)保持荷

载稳定,测定随时间 $t$ 变化的轴向变形和体积变形,并根据面积校正微调荷载,保证加载应力恒定。4)加载2 880 min后结束试验,并进行颗粒筛分以获取试验后颗粒级配。

表 1 试验编号与应力状态

编号	$\sigma_3 / \text{kPa}$	$q / \text{kPa}$	$p / \text{kPa}$	$D$	
TC2	TC21	200	252	284	0.25
	TC22	200	503	368	0.50
	TC23	200	755	452	0.75
	TC24	200	956	519	0.95
TC4	TC41	400	457	552	0.25
	TC42	400	913	704	0.50
	TC43	400	1370	857	0.75
	TC44	400	1735	978	0.95

### 1.2 试验结果及其分析

对于堆石蠕变,蠕变变形起始时间是一重要问题。于浩等对堆石料选取1 h作为划分主压缩变形和蠕变变形的时刻<sup>[9]</sup>,但缺乏理论依据。对固结排水试验的剪切速率,吉甫逊建议破坏历时 $t_f$ <sup>[12]</sup>为

$$t_f = \frac{h^2}{\eta C_v (1 - U_f)} \quad (1)$$

式中: $h$ 为排水距离,本次试验为30 cm; $C_v$ 为消散系数; $\eta$ 为系数,两端排水时可取3.0; $U_f$ 为试样的平均消散度。若取 $U_f = 0.99$ , $C_v = 3\ 000 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,得 $t_f = 10 \text{ s}$ 。鉴于此,并基于试验测试精度,定义由加载初始至应力保持恒定后1 min内产生的变形为相对瞬时变形,其后产生的变形为蠕变变形,则轴向应变和体积应变的总应变由相对瞬时应变和蠕变应变组成。 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ 和 $400 \text{ kPa}$ 下的轴向应变 $\epsilon_a \sim t$ 关系和体积应变 $\epsilon_v \sim t$ 关系如图1和图2所示;表2列出了总轴向应变 $\epsilon_a^t$ 和总体积应变 $\epsilon_v^t$ 及其瞬时分量 $\epsilon_a^i$ 、 $\epsilon_v^i$ 和蠕变分量 $\epsilon_a^c$ 、 $\epsilon_v^c$ 。可知:

1)堆石颗粒材料发生了较明显的随时间增长的变形,即蠕变。其产生原因有以下2点:(1)随着荷载施加直至稳定,颗粒接触点所受的剪力和法向应力发生变化,则颗粒位置重新调整;该调整引起颗粒接触面积的改变,则颗粒接触点所受应力随之发生变化;该细观应力和变形的反复循环调整,为一个随时间发展的过程,宏观表现为堆石蠕变现象,即发生随时间变化的变形<sup>[13]</sup>。(2)堆石颗粒受力后发生颗粒破碎,其破碎来源于较大的接触应力导致的颗粒棱角破碎,以及颗粒内部裂纹的发生发展以致颗粒的整体破碎。颗粒破碎后的相对位移、相互充填和结构调整宏观上即表现为蠕变<sup>[11]</sup>。

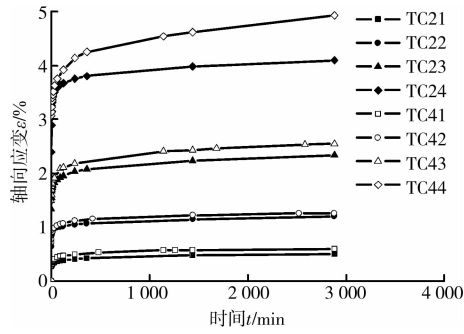


图 1 轴向应变  $\epsilon_a$ -时间  $t$  关系曲线

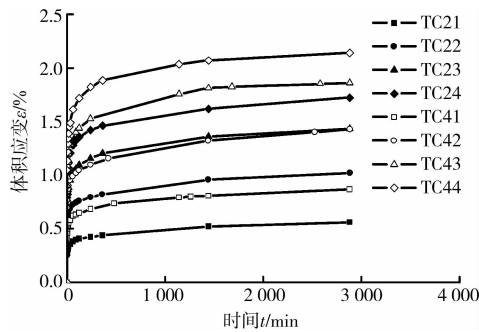


图 2 体积应变  $\epsilon_v$ -时间  $t$  关系曲线

表 2 三轴蠕变试验结果

编号	$\epsilon_a^i / \%$	$\epsilon_a^f / \%$	$\epsilon_s / \%$	$\epsilon_v^i / \%$	$\epsilon_v^f / \%$	$\epsilon_v^s / \%$	$B_r / \%$
TC21	0.50	0.27	0.23	0.56	0.25	0.31	1.54
TC22	1.20	0.64	0.56	1.02	0.47	0.55	6.73
TC23	2.34	1.34	1.00	1.44	0.67	0.77	11.45
TC24	4.09	2.39	1.70	1.73	0.82	0.91	22.28
TC41	0.59	0.28	0.31	0.87	0.42	0.45	7.74
TC42	1.26	0.71	0.55	1.43	0.69	0.74	11.61
TC43	2.55	1.49	1.06	1.86	0.91	0.95	13.02
TC44	4.93	3.07	1.86	2.14	1.05	1.09	25.72

2)蠕变曲线分衰减蠕变和匀速蠕变阶段。衰减蠕变阶段蠕变应变增长较快,但增长速率逐渐衰减,且衰减速率较快,一般在 240 min 后进入匀速蠕变阶段,该阶段蠕变增量较小,且应力水平较小时迅速趋于稳定值。然而,面板堆石坝堆石体变形完成所需时间较长,故室内试验结果应结合实际工程变形资料反馈分析后参考取用。

3)随应力水平  $D$  的提高,总应变、相对瞬时应变和蠕应变皆增大。 $D$  一定时随围压  $\sigma_3$  增大,颗粒破碎增多,蠕应变相应增大。

## 2 蠕变规律

### 2.1 应变-时间方程

总应变  $\epsilon$  一般可写成如下形式<sup>[14]</sup>:

$$\epsilon = \epsilon_r G(t) \tag{2}$$

式中,  $\epsilon_r$  为参考应变;  $G(t)$  为时间  $t$  的函数。

时间函数  $G(t)$  表示应变-时间关系,可以选用不同的函数形式,包括幂函数、对数函数和双曲线函数等。数据分析表明堆石蠕变与时间的关系以幂函数拟合较好,式(2)可写成,

$$\epsilon = \epsilon_r \left( \frac{t}{t_r} \right)^n \tag{3}$$

式中:  $t_r$  为参考时间,对于试验结果分析,可取  $t_r = 1 \text{ min}$ ;  $n$  为  $\lg \epsilon - \lg \left( \frac{t}{t_r} \right)$  关系曲线的斜率,图 3 给出了  $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$  时的  $\lg \epsilon_a - \lg \left( \frac{t}{t_r} \right)$  关系曲线。各参数见表 3,其中,  $\epsilon_{ar}$  和  $\epsilon_{vr}$  分别表示轴向和体积参考应变,  $n_a$  和  $n_v$  分别表示轴向和体积斜率。

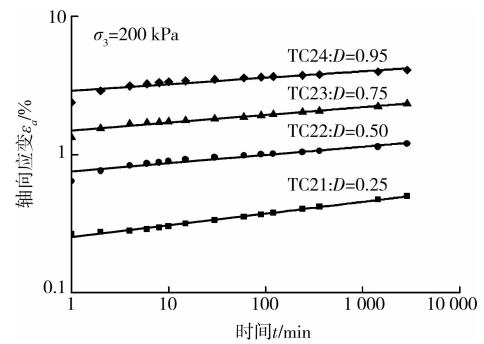


图 3  $\lg \epsilon_a - \lg \left( \frac{t}{t_r} \right)$  关系曲线

表 3 应变-时间关系参数

编号	$\sigma_3 / \text{kPa}$	$D_r$	$n_a$	$\epsilon_{ar}$	$n_v$	$\epsilon_{vr}$
TC21	200	0.203	0.084	0.002 5	0.099	0.002 5
TC22	200	0.406	0.064	0.007 4	0.090	0.005 0
TC23	200	0.609	0.058	0.014 8	0.097	0.006 8
TC24	200	0.771	0.052	0.028 4	0.091	0.008 6
TC41	400	0.199	0.094	0.002 9	0.086	0.004 4
TC42	400	0.397	0.067	0.007 6	0.084	0.007 1
TC43	400	0.596	0.063	0.015 5	0.090	0.009 3
TC44	400	0.754	0.060	0.029 8	0.092	0.010 8

### 2.2 应力-应变方程

$\epsilon_{ar}$  表示轴向应变-应力关系,一般为应力水平的双曲线函数和指数函数等,本文采用双曲线函数拟合,即

$$\epsilon_{ar} = \frac{D_r a_r}{1 - D_r b_r} \tag{4}$$

经坐标变换有

$$\frac{\epsilon_{ar}}{D_r} = a_r + b_r \epsilon_{ar} \tag{5}$$

式中,  $a_r$  和  $b_r$  为模型参数,分别为  $\left( \frac{\epsilon_{ar}}{D_r} \right) - \epsilon_{ar}$  关系曲

线的截距和斜率;  $D_r$  为  $t=t_r$  时应力-应变关系的应力水平, 与前文中的  $D$  稍有差别。  $\sigma_3=200$  kPa 时的  $\left(\frac{\epsilon_{ar}}{D_r}\right)-\epsilon_{ar}$  关系曲线如图 4 所示, 参数取值见表 4。

$\epsilon_{vr}$  表示体积应变-应力关系, 本文假定其与  $D_r$  成线性比例关系, 即

$$\epsilon_{vr} = c_r D_r \quad (6)$$

式中:  $c_r$  为方程参数, 为  $\epsilon_{vr}-D_r$  关系曲线的斜率, 计算值见表 4。

### 2.3 应力-应变-时间方程

对于轴向应变, 分析表明以幂函数和双曲线函数拟合应变-时间关系和应力-应变关系较好。将式(4)代入式(3), 得 Mesri 应力水平-轴向应变-时间方程<sup>[14]</sup>:

$$\epsilon_a = \frac{D_r a_r}{1 - D_r b_r} \left(\frac{t}{t_r}\right)^{n_a} \quad (7)$$

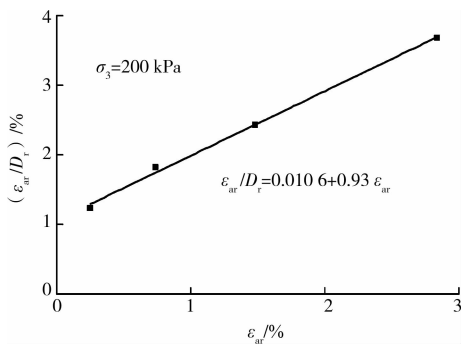


图 4  $\left(\frac{\epsilon_{ar}}{D_r}\right)-\epsilon_{ar}$  关系曲线

表 4 应力-应变关系参数

编号	$\sigma_3$ / kPa	$a_r$	$b_r$	$c_r$
TC2	200	0.010 6	0.93	0.011 4
TC4	400	0.012 0	0.92	0.015 5

对于体积应变, 分析表明以幂函数和线性函数拟合应变-时间关系和应力-应变关系较好。将式(6)代入式(3), 得应力-体积应变-时间方程,

$$\epsilon_v = c_r D_r \left(\frac{t}{t_r}\right)^{n_v} \quad (8)$$

## 3 蠕变与颗粒破碎关系

### 3.1 相对颗粒破碎指数

颗粒破碎的合理度量是进行颗粒材料破碎研究的重要前提。目前度量颗粒破碎的参数主要有<sup>[15]</sup>: 1)以某一特征粒径的变化来衡量颗粒破碎的程度, 如特征粒径  $d_{15}$ 。2)试验前后粒组含量变化绝对值之和, 如 Marsal 的破碎率  $B_g$ 。3)比表面积增量。4)体积破碎率指标<sup>[16]</sup>。5)级配面积表示的相对破碎指数<sup>[17]</sup>, 该参数因直观方便且概念清晰从而得到

了广泛应用<sup>[15,18]</sup>。

Hardin<sup>[17]</sup>认为颗粒材料将最终破碎于某一界限粒径, 并取界限粒径  $d_m=0.074$  mm。定义试验前后级配曲线与  $d_m=0.074$  mm 竖线所围的面积分别为初始破碎势  $B_{pi}$  和  $B_{pf}$ , 破碎量  $B_t = B_{pi} - B_{pf}$ , 则可定义相对颗粒破碎指数  $B_r = \frac{B_t}{B_{pi}}$ , 即为某一状态下颗粒破碎量与初始破碎势的比值。然而, 颗粒破碎的最终形式将是颗粒分布趋于自相似的质量分形结构<sup>[19-20]</sup>, 即最终级配曲线  $F_u$  可表示为

$$F_u(d) = \left(\frac{d}{d_M}\right)^{3-\alpha} \quad (9)$$

式中:  $d$  和  $d_M$  分别为粒径和最大粒径;  $\alpha$  为分形维数。颗粒材料经破碎后的最终级配的分形维数为 2.5~2.6, 本文取  $\alpha=2.5$ 。

基于自相似分形结构的最终颗粒级配, Einav<sup>[21-22]</sup>修正 Hardin 的相对颗粒破碎指数  $B_r$  为

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (10)$$

式中:  $B_t$  和  $B_p$  分别为某一状态级配曲线和最终级配曲线与初始级配曲线所围面积。考虑到堆石粒径大, 粒径小于 0.074 mm 的颗粒含量较少, 其对破碎势的贡献较小, 故修正  $B_t$  和  $B_p$  分别为某一状态级配曲线和最终级配曲线与初始级配曲线及  $d_m=0.074$  mm 竖线所围面积, 如图 5 所示。故可定义相对颗粒破碎指数  $B_r$ , 见式(10)。

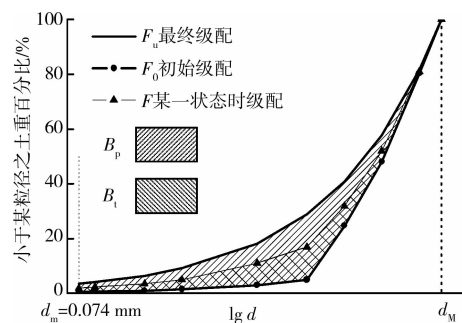


图 5 相对颗粒破碎指数示意图

### 3.2 蠕变与相对颗粒破碎指数关系

堆石料的初始级配  $F_0$ 、经三轴排水蠕变试验后的级配曲线和分形维数  $\alpha=2.5$  的  $F_u$  见图 6, 图中纵坐标以对数坐标表示, 以便清晰表示各级配曲线。由式(10)计算出各围压和应力水平下的  $B_r$  见表 2。可知: 相同围压条件下, 应力水平增大, 级配曲线渐由初始级配向最终级配移动, 相对颗粒破碎指数增大, 原因为平均法向应力和偏应力的增大引起颗粒破碎增多; 应力水平相同时, 围压增大, 由于平均法向应力的增大, 颗粒破碎亦增多。

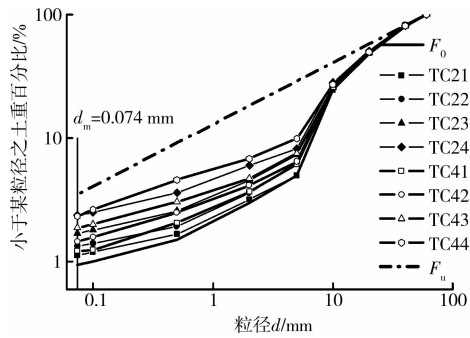


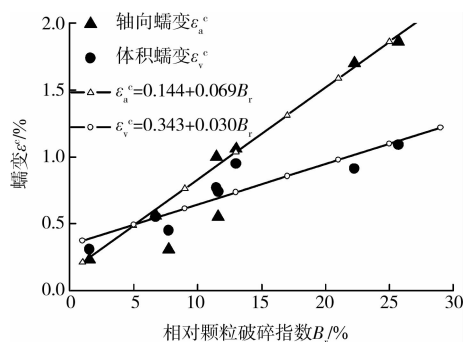
图6 蠕变试验后级配曲线

为分析堆石蠕变机理,获得蠕变变形与颗粒破碎的关系,绘制轴向蠕变  $\epsilon_a^c$  和体积蠕变  $\epsilon_v^c$  与相对颗粒破碎指数  $B_r$  关系,见图7。可见,除个别点外,该关系呈现良好的线性关系,表明堆石的蠕变变形,包括轴向蠕变和体积蠕变随着颗粒的逐渐破碎逐渐增大,二者存在近似的线性比例关系,有

$$\epsilon_a^c = \alpha_a + \beta_a B_r \quad (11)$$

$$\epsilon_v^c = \alpha_v + \beta_v B_r \quad (12)$$

式中:  $\alpha_a$ 、 $\alpha_v$  和  $\beta_a$ 、 $\beta_v$  分别为  $\epsilon_a^c - B_r$  与  $\epsilon_v^c - B_r$  关系曲线的截距和斜率。图7给出了拟合曲线,其中,在拟合  $\epsilon_a^c - B_r$  关系曲线时,对个别离异数据未采用。参数  $\alpha_a$  和  $\alpha_v$  表示相对颗粒破碎指数  $B_r = 0$  时,由于堆石颗粒位置发生调整而引起的  $\epsilon_a^c$  和  $\epsilon_v^c$ , 分别为 0.144% 和 0.343%。参数  $\beta_a$  和  $\beta_v$  表示颗粒破碎对  $\epsilon_a^c$  和  $\epsilon_v^c$  的影响程度,值越大表示颗粒破碎引起的蠕应变越大。其值分别为 0.069 和 0.030,可知颗粒破碎对轴向蠕应变的影响大于体积蠕应变。

图7 蠕变  $\epsilon^c$  -相对颗粒破碎指数  $B_r$  关系

## 4 结 语

采用分别加载方式,对两河口堆石料进行了不同围压,不同应力水平下的大型三轴排水蠕变试验,并在试验后测量颗粒破碎情况,分析了堆石蠕变规律及其与颗粒破碎的关系,结论如下:

1)堆石受荷后将发生相对瞬时变形和较明显的蠕变变形;给出了不同偏应力水平和围压下的总变

形、相对瞬时变形和蠕变变形;轴向蠕变和体积蠕变随应力水平的增大而增大,应力水平一定时随围压的增大而增大。

2)堆石的应变-时间关系满足幂函数,应力-轴向应变关系符合双曲线函数,应力-体积应变关系符合线性比例关系。

3)随应力水平和围压的增大,颗粒破碎增多。采用相对颗粒破碎指数分析了堆石经蠕变试验后的颗粒破碎情况,表明轴向蠕变和体积蠕变皆近似与相对颗粒破碎指数呈线性比例关系。

## 参考文献:

- [1]王者超,李术才.高应力下颗粒材料一维力学特性研究(II):蠕变性质[J].岩土力学,2010,31(11):3392-3396.  
WANG ZHE-CHAO, LI SHU-CAI. One-dimensional mechanical behavior of granular materials at high stresses(Part II): Creep behavior[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3392-3396.
- [2]LADE P V, LIGGIO C D JR, NAM J. Strain rate, creep and stress drop-creep experiments on crushed coral sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(7): 941-953.
- [3]LADE P V, NAM J, LIGGIO C D JR. Effects of particle crushing in stress drop-relaxation experiments on crushed coral sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(3): 500-509.
- [4]WANG FEI, MIAO LIN-CHANG, LV WEI-HUA. Experimental study on the creep behavior of the Yangtze river sand[C]//FRATTA D O, PUPPALA A J, MUHUNTHAN B. GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design(GSP 199), February 20-24, 2010, West Palm Beach, Florida. Reston, VA: Geo-Institute of ASCE, 2010: 777-782.
- [5]花俊杰,常晓林,周伟.高堆石坝流变研究进展[J].水力发电学报,2010,29(4):194-199.  
HUA JUN-JIE, CHANG XIAO-LIN, ZHOU WEI. Advances in researches on creep of high rock-fill dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 194-199.
- [6]OLDECOP L A, ALONSO E E. Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill[J]. Geotechnique, 2007, 57(3): 289-301.
- [7]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. Method research for rockfill

- creep test [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(12): 63-65, 70.
- [8] 于浩, 李海芳, 温彦锋, 等. 九旬峡堆石料三轴蠕变试验初探[J]. 岩土力学, 2007, 28(S): 103-106.  
YU HAO, LI HAI-FANG, WEN YAN-FENG, et al. Study on triaxial creep test for Jiudianxia rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S): 103-106.
- [9] 花俊杰, 周伟, 常晓林, 等. 堆石体应力变形的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 328-335.  
HUA JUN-JIE, ZHOU WEI, CHANG XIAO-LIN, et al. Study of scale effect on stress and deformation of rockfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 328-335.
- [10] 王海俊, 殷宗泽. 堆石流变试验及双屈服面流变模型的研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 959-963.  
WANG HAI-JUN, YIN ZONG-ZE. Creep tests of rockfill and double-yield surface creep model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 959-963.
- [11] 梁军, 刘汉龙, 高玉峰. 堆石蠕变机理分析与颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 479-483.  
LIANG JUN, LIU HAN-LONG, GAO YU-FENG. Creep mechanism and breakage behaviour of rockfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 479-483.
- [12] 南京水利科学研究所. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [13] TATSUOKA F, BENEDETTO H D, ENOMOTO T, et al. Various viscosity types of geomaterials in shear and their mathematical expression [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(1): 41-60.
- [14] LIN H D, WANG C C. Stress-strain-time function of clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 289-296.
- [15] 魏松, 朱俊高, 钱七虎, 等. 粗粒料颗粒破碎三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 533-538.  
WEI SONG, ZHU JUN-GAO, QIAN QI-HU, et al. Particle breakage of coarse-grained materials in triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 533-538.
- [16] 孔德志, 张其光, 张丙印, 等. 人工堆石料的颗粒破碎率[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(6): 795-799.  
KONG DE-ZHI, ZHANG QI-GUANG, ZHANG BING-YIN, et al. Particle breakage ratio of artificial rockfill materials[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technique Edition, 2009, 49(6): 795-799.
- [17] HARDIN C S. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [18] KARIMPOUR H, LADE P V. Time effects relate to crushing in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(9): 1209-1219.
- [19] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2): 1921-1926.
- [20] BEN-NUN O, EINAV I. The role of self-organization during confined comminution of granular materials[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2010, 368: 231-247.
- [21] EINAV I. Breakage mechanics—Part I: Theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55: 1274-1297.
- [22] EINAV I. Breakage mechanics—Part II: Modelling granular materials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55: 1298-1320.

(编辑 王秀玲)