

DOI: 10.11779/CJGE201708019

# 循环荷载作用下堆石料颗粒破碎特性试验研究

张振东<sup>1, 2</sup>, 李国英<sup>\*1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 淮海工学院土木工程学院, 江苏 连云港 222005)

**摘 要:** 利用大型动三轴试验设备, 针对 3 种堆石料进行了考虑周围压力、固结比以及动应力幅值影响的排水动三轴压缩试验, 探讨了动力荷载作用下筑坝堆石料的颗粒破碎特性。研究表明: 在循环荷载作用下, 堆石料颗粒破碎率随母岩强度的提高而降低, 随围压、固结比及动应力幅值的增加而增加; 根据动三轴试验过程, 在进行颗粒破碎分析时应将堆石料颗粒破碎的产生分为 4 个阶段予以分别考虑; 堆石料在动荷载施加前的已有颗粒破碎状态及应力水平对其后续的颗粒破碎特性具有一定的影响, 动力加载过程中试样的体积收缩能够在一定程度上反映这一过程中颗粒破碎率的变化。

**关键词:** 堆石料; 大型动三轴试验; 颗粒破碎; 体积应变

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 4548(2017)08 - 1510 - 07

**作者简介:** 张振东(1979 - ), 男, 副教授, 主要从事土动力学等方面的教学和科研。E-mail: qinghan0623@126.com。

## Experimental study on particle breakage behaviors of rockfill under cyclic loadings

ZHANG Zhen-dong<sup>1, 2</sup>, LI Guo-ying<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** Using the large-scale dynamic triaxial apparatus, a series of cyclic drained triaxial shearing tests are performed on there kinds of rockfill materials with different confining pressures, consolidation stress ratios and dynamic stress amplitudes to investigate the particle breakage behaviors of rockfill materials under dynamic loads. The results show that the particle breakage rate of rockfill materials decreases with the increase of the strength of parent rock, and increases with the increase of the confining pressure, consolidation ratio and dynamic stress amplitude. The analysis of particle breakage can be divided into four stages according to the process of dynamic triaxial tests. The current particle breakage state and stress level have a certain influence on the subsequent particle breakage behaviors. In addition, during the process of dynamic load, the volume shrinkage of samples can reflect change of the particle breakage rate to some extent.

**Key words:** rockfill; large-scale dynamic triaxial test; particle breakage; volumetric strain

## 0 引 言

堆石料等粗粒土是由大小不一的颗粒互相填充所组成的散粒体材料, 具有压实性能好、填筑密度大、沉陷变形小、透水性强以及抗剪强度高工程特性, 因此被广泛地应用于土石坝、公路、铁路、堤坝等实际工程中。然而, 堆石料在高应力水平下容易发生颗粒破碎, 而颗粒破碎将直接改变土体结构, 对土体的峰值强度、内摩擦角、剪胀性、渗透系数等工程特性具有显著影响。近些年, 土石坝工程发展迅速, 其建设高度也在不断增加, 糯扎渡水电站心墙堆石坝坝高达 261.5 m, 而在建的两河口水电站和双江口水电站心墙堆石坝坝高达到了 300 m 级<sup>[1]</sup>。因此, 作为主要筑坝材料的堆石料其所承受的应力也越来越大, 土体的颗粒破碎现象则愈加显著。针对堆石料的颗粒破碎特性以及颗粒破碎对土体强度等工程特性的影响, 很

多学者做了深入的研究。刘汉龙等<sup>[2]</sup>通过室内大型三轴试验, 深入探讨了堆石料颗粒破碎特性, 研究表明颗粒破碎随围压的增加而增加, 呈非线性关系, 颗粒破碎的增加将导致土体抗剪强度的降低。李国英等<sup>[1]</sup>、傅华等<sup>[3]</sup>、蔡正银等<sup>[4]</sup>通过大型三轴试验, 研究了粗颗粒土的母岩性质、颗粒级配、堆石密度、围压以及应力状态等对颗粒破碎特性的影响。高玉峰等<sup>[5]</sup>、贾宇峰等<sup>[6]</sup>通过试验研究表明: 在堆石料的试样制备过程中所发生的颗粒破碎不可忽视。魏松等<sup>[7]</sup>、杨光等<sup>[8]</sup>通过三轴试验, 探讨了不同应力路径、不同应力水平以及干湿状态对粗粒料颗粒破碎特性以及强度特性的

基金项目: 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目 (YK914020); 水利部公益性行业专项经费项目 (201501035)

收稿日期: 2016 - 09 - 05

\*通讯作者 (E-mail: gyli@nhri.cn)

影响。刘斯宏<sup>[9]</sup>利用自行研制的大型单剪仪, 探讨了压缩过程与单剪过程中颗粒破碎规律, 研究认为堆石料的颗粒破碎主要发生在压缩与剪缩过程中。刘尧等<sup>[10]</sup>、王光进等<sup>[11]</sup>、胡万雨等<sup>[12]</sup>探讨了法向应力对堆石料颗粒破碎影响规律, 研究表明: 随着法向应力的增加, 土体颗粒破碎率增加, 相同法向应力条件下, 粒径越大破碎率越大。同时, 颗粒破碎受剪应力大小的影响程度随着法向应力的增大而减小。Xiao 等<sup>[13-16]</sup>通过大型三轴试验, 探讨了堆石料的强度与变形特性, 并考虑了中主应力对堆石料颗粒破碎特性的影响以及颗粒破碎对堆石料临界状态线的影响规律, 进而建议了一个结合剪胀应力比和峰值破坏应力比的简单界面塑性本构模型。

目前针对堆石料颗粒破碎特性的试验研究多在静力条件下进行, 动三轴试验研究相对较少<sup>[17-20]</sup>。然而, 汶川大地震紫坪铺混凝土面板坝震害调查研究表明: 坝体断面收缩是由于筑坝堆石料在高围压和地震循环荷载作用下颗粒破碎而发生体积收缩的结果<sup>[21]</sup>, 研究动力荷载作用下堆石料颗粒破碎特性同样具有重要意义。本文利用大型动三轴试验设备, 针对 3 种不同堆石料试样, 探讨了不同周围压力与固结比条件下循环荷载对堆石料颗粒破碎特性的影响规律。

1 试验材料、内容及方法

动三轴试验采用 1500 kN 大型动静三轴仪。试验材料采用糯扎渡心墙堆石坝 3 种填筑堆石料, 分别为弱风化花岗岩、弱风化砂泥岩和强风化花岗岩, 试样尺寸为  $\Phi 300\text{ mm}\times H700\text{ mm}$ 。由于试验设备的限制, 试验前须对原始材料按《土工试验规程》(SL237—1999) 进行缩尺, 缩尺后最大粒径为 60 mm。3 种土料在加载前采用相同的颗粒级配, 如图 1 所示为强风化花岗岩加载前及加载后的颗粒级配演化曲线。

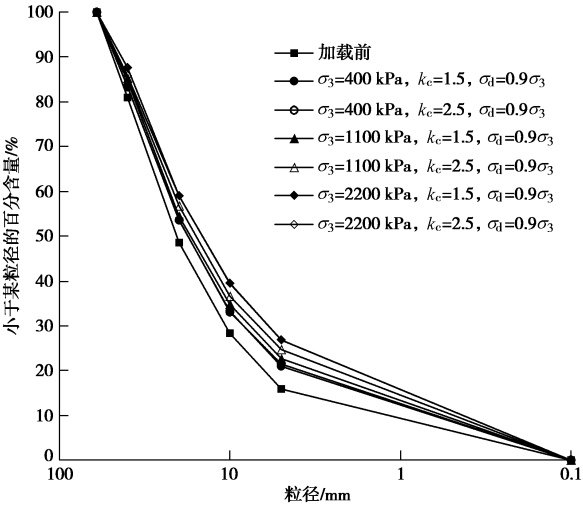


图 1 颗粒级配演化曲线  
Fig. 1 Evolving curves of grading

由图可见, 加载前与不同应力条件加载后的颗粒级配变化较大, 加载前颗粒级配曲线相对较陡, 加载后曲线随着加载程度的提高逐渐趋于平缓,

试验振动频率采用 0.1 Hz, 输入波形为正弦波。在考虑不同周围压力以及不同固结比条件下针对试样进行排水循环三轴试验, 并根据试验要求确定每次试验所施加的动应力, 测记动应力、动应变和体变, 直至预定振次停止振动 (本次试验均为 30 次), 试验完成后重新测定堆石料的粒径变化。具体试验方案如表 1 所示。

表 1 动三轴试验方案  
Table 1 Schemes of dynamic triaxial tests

试验材料	试验内容		
	$K_c=\sigma_1/\sigma_3$	$\sigma_3/\text{kPa}$	动应力幅值 $\sigma_d$
3 种 试验 土料	1.5, 2.5	400	$0.3\sigma_3$
		1100	$0.6\sigma_3$
		2200	$0.9\sigma_3$

2 试验结果与分析

2.1 颗粒破碎度量方法

本文采用 Marsal 方法<sup>[22]</sup>研究堆石料的颗粒破碎, 定义颗粒破碎率为受荷前后颗粒在曲线上各粒组含量之差的正值之和, 即

$$B_g = \sum \Delta W_k \quad , \quad (1)$$

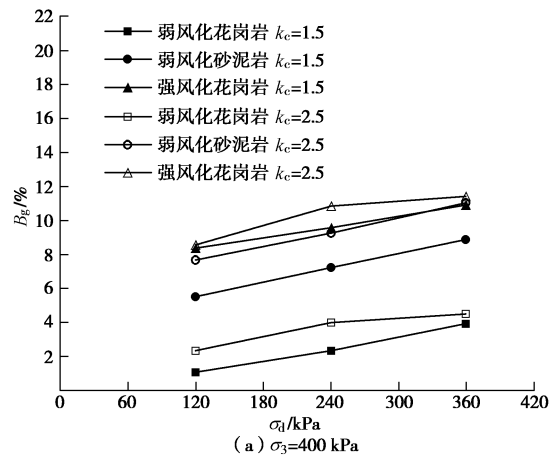
式中,  $\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf}$ ,  $W_{ki}$  为原级配曲线上某级粒组的含量;  $W_{kf}$  为受荷后级配曲线上某级粒组的含量。

2.2 试验结果分析

如图 2, 3 所示分别为周围压力  $\sigma_3$  为 400, 1100, 2200 kPa 时不同母岩与不同固结比条件下堆石料颗粒破碎率  $B_g$  及循环排水剪切过程中产生的最大体积应变  $\varepsilon_v$  与动应力幅值  $\sigma_d$  的关系曲线。

通过分析图中数据可得到以下结论:

(1) 颗粒破碎特性



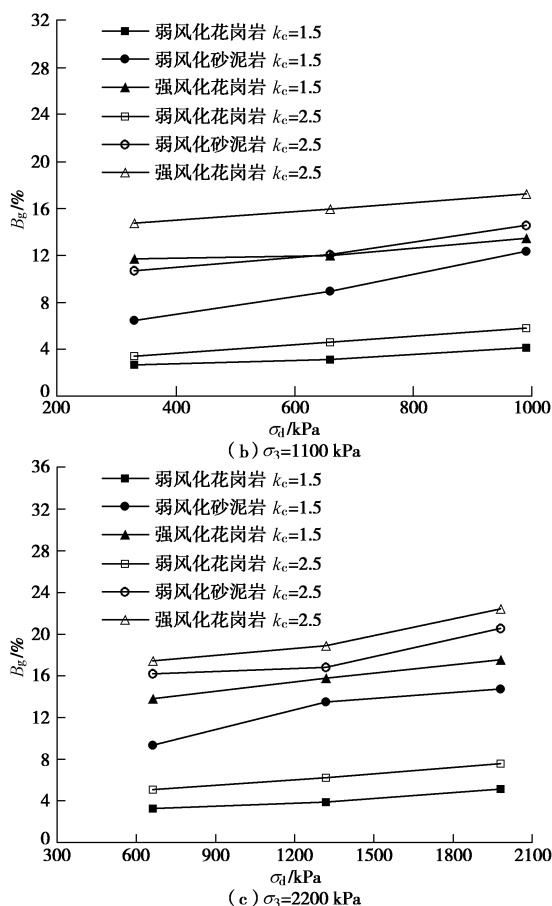


图2 堆石料颗粒破碎率与动应力幅值关系曲线

Fig. 2 Relation curves between particle breaking rate of rockfill and dynamic stress amplitude

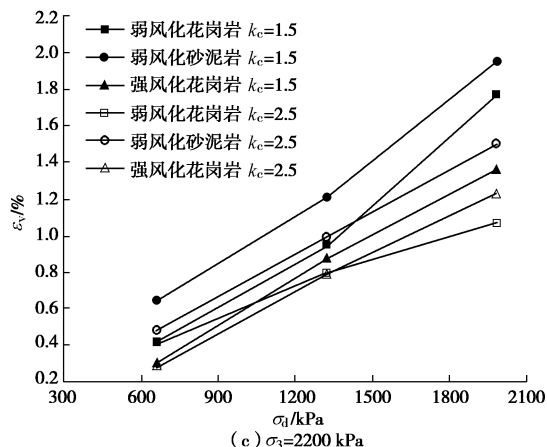
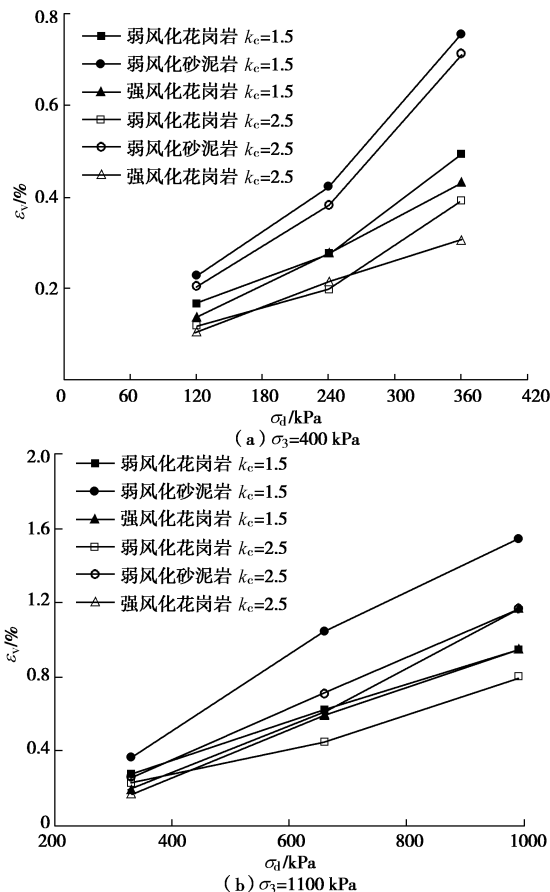


图3 堆石料最大体积应变与动应力幅值关系曲线

Fig. 3 Relation curves between the largest volume strain of rockfill and dynamic stress amplitude

a) 在相同周围压力、固结比以及动应力幅值条件下, 强风化花岗岩颗粒破碎率最大, 弱风化砂泥岩次之, 而弱风化花岗岩颗粒破碎率最小, 这充分说明了母岩原始强度对堆石料颗粒破碎特性影响较大, 母岩强度越高则颗粒破碎率越小。

b) 在相同母岩、围压以及固结比条件下, 随着剪切过程中所施加动应力幅值的增加, 颗粒破碎率也相应增加。

c) 在相同母岩、围压及动应力幅值条件下, 随着固结比的增加, 堆石料颗粒破碎率增加。

## (2) 体变特性

a) 在相同周围压力、固结比以及动应力幅值条件下, 强风化花岗岩与弱风化花岗岩在施加动力荷载过程中所产生的最大体积应变相差较小, 且均小于弱风化砂泥岩体积应变。

b) 在相同母岩、围压以及固结比条件下, 随着动应力幅值的提高, 堆石料最大体积应变也相应增加。

c) 在相同母岩、围压及动应力幅值条件下, 固结比  $K_c=2.5$  时堆石料产生的最大体积应变反而要小于  $K_c=1.5$  时所产生的体积应变。

如图 4 所示为循环排水剪切过程中动应力幅值  $\sigma_d=660$  kPa 时, 考虑 3 种堆石料母岩、不同固结比及周围压力影响的颗粒破碎率  $B_g$  及最大体积应变  $\varepsilon_v$  条形图。

通过分析图中数据可得到以下结论:

## (1) 颗粒破碎特性

a) 在相同围压、固结比及动应力幅值条件下, 颗粒破碎率  $B_g$  随母岩强度的降低依次增加, 次序为弱风化花岗岩、弱风化砂泥岩及强风化花岗岩。

b) 3 种堆石料同时反映出一个规律: 在母岩、围压及动应力幅值相同时, 固结比越大则堆石料颗粒破碎率越大。



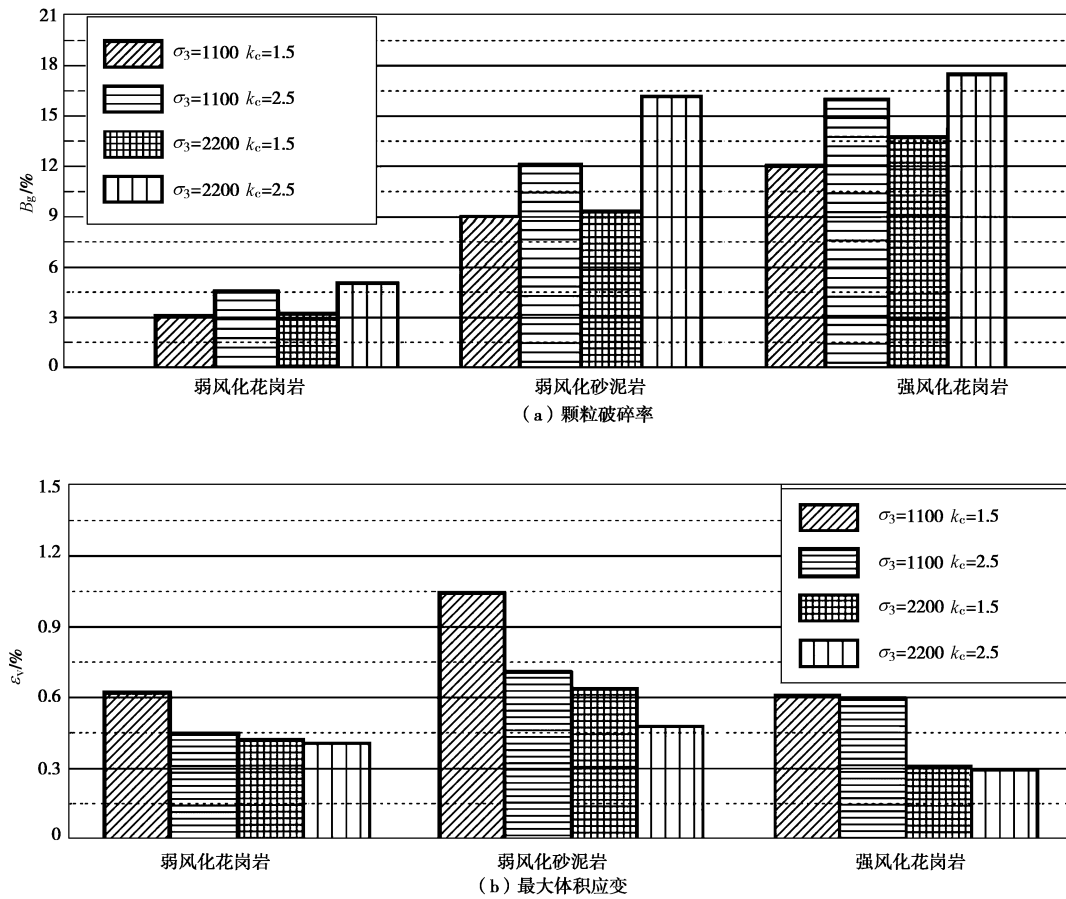


图4 动应力幅值相同条件下颗粒破碎率及最大体积应变条形图

Fig. 4 Charts of particle breakage rate and the largest volume strain under same dynamic stress amplitude

c) 在相同母岩、固结比及动应力幅值条件下, 围压越大则颗粒破碎率越大。

d) 但是在母岩与动应力幅值相同时,  $\sigma_3=1100$  kPa,  $K_c=2.5$  条件下的颗粒破碎率要大于  $\sigma_3=2200$  kPa,  $K_c=1.5$  条件下的颗粒破碎率。

#### (2) 体变特性

a) 在相同围压、固结比及动应力幅值条件下, 最大体积应变  $\varepsilon_v$  与母岩强度具有一定的相关性, 随着母岩强度降低, 体积应变也相应增加。但强度最低的强风化花岗岩其最大体积应变却与弱风化花岗岩相差不大, 且小于弱风化砂泥岩。

b) 3 种堆石料反映出同一个规律: 在母岩及动应力幅值相同时, 4 种不同周围压力与固结比的组合条件下其体积应变由大到小变化规律为  $\sigma_3=1100$  kPa,  $K_c=1.5$ ;  $\sigma_3=1100$  kPa,  $K_c=2.5$ ;  $\sigma_3=2200$  kPa,  $K_c=1.5$ ;  $\sigma_3=2200$  kPa,  $K_c=2.5$ ; 即动荷载施加前所承受应力水平越低则加载过程中产生的最大体积应变越大。

综合分析图 2~4 所得结论不难发现, 虽然大部分结论与已有研究成果基本相同或相近, 但仍存在较多问题:

(1) 已有研究表明堆石料颗粒破碎率随母岩强度的提高而降低、随周围压力以及应力水平的增加而增加, 但当存在两种或两种以上影响因素同时发生变化时, 哪种影响因素占主导作用需要进一步分析。例如如图 4(a) 所示, 在母岩与动应力幅值相同时,  $\sigma_3=1100$  kPa,  $K_c=2.5$  条件下的颗粒破碎率要大于  $\sigma_3=2200$  kPa,  $K_c=1.5$  条件下的颗粒破碎率。

(2) 已有研究表明堆石料颗粒破碎是引起其体积收缩的主要原因<sup>[21, 23-24]</sup>, 而试验结果分析显示试样在循环剪切过程中所产生的体积应变与实际颗粒破碎规律并不完全相同。例如:

a) 强风化花岗岩颗粒破碎率最高, 但其体积应变却较小。

b) 其他条件相同, 固结比  $K_c=2.5$  时颗粒破碎率较  $K_c=1.5$  大, 但体积应变反而较小。

进一步分析发现, 该实验现象的产生主要有两个原因:

(1) 已有试验研究表明, 在堆石料的试样制备过程中所发生的颗粒破碎不可忽视<sup>[5-6]</sup>。而对于堆石料的动三轴试验而言, 不仅装样过程的颗粒破碎不可忽视,

其他如周围压力施加过程、竖向偏应力施加过程等都对堆石料最终的颗粒破碎率具有不同程度的影响。因此,根据动三轴试验过程,可将颗粒破碎的产生分为4个阶段并分别定义颗粒破碎率:

a) 装样过程所产生的颗粒破碎率定义为  $B_{g\text{装样}}$ 。

b) 周围压力施加过程中所产生的颗粒破碎率定义为  $B_{g\text{围压}}$ 。

c) 偏应力施加过程中所产生的颗粒破碎率定义为  $B_{g\text{静}}$ 。

d) 动力荷载施加过程中所产生的颗粒破碎率定义为  $B_{g\text{动}}$ 。

(2) 试验数据中所体现的颗粒破碎率是通过装样前的颗粒级配与完成动三轴试验后测得的颗粒级配用 Marsal 方法计算得到的,即该颗粒破碎率反映了装样前到动荷载施加完成后整个试验过程的颗粒级配变化。而试验数据中的最大体积应变仅仅是施加动荷载过程中所产生的体积应变,是该过程颗粒破碎的结果。

假定:①所有试验装样过程步骤规范,颗粒破碎率  $B_{g\text{装样}}$  相同,即每个试验颗粒破碎率之间的差别主要来自于后3个过程。②动力加载过程中堆石料试样的体积收缩在一定程度上能够反映该加载过程中颗粒破碎率的变化,即假设  $\varepsilon_v = aB_{g\text{动}} + b$ , 其中  $a, b$  为常数。

在母岩与动应力幅值相同时,  $\sigma_3 = 1100 \text{ kPa}$ ,  $K_c = 2.5$  (条件1) 的颗粒破碎率要大于  $\sigma_3 = 2200 \text{ kPa}$ ,  $K_c = 1.5$  (条件2) 的颗粒破碎率。条件1:  $\sigma_3 = 1100 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_1 = 2750 \text{ kPa}$ ; 条件2:  $\sigma_3 = 2200 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_1 = 3300 \text{ kPa}$ 。整体上条件2所承受应力水平高于条件1,但颗粒破碎率却小于条件1,其主要原因:虽然在周围压力施加过程中,条件2围压要远大于条件1,根据已有研究成果分析在该阶段所产生的颗粒破碎率  $B_{g\text{围压}}$  也是条件2大于条件1,但在偏应力施加及动荷载施加阶段,由于堆石料试样的周围约束力条件1小于条件2,因此在相同或相近的动应力及偏应力条件下,约束力小的试样更有可能发生进一步破碎或反复破碎,从而使这两个阶段中条件1的颗粒破碎率 ( $B_{g\text{静}} + B_{g\text{动}}$ ) 大于条件2,此结论与文献[15]中“随围压增大,单纯由振动三轴试验引起的颗粒破碎率则相应降低”的结论基本一致。

而对于图4(b)中反应出来的动荷载施加前所承受应力水平越低则加载过程中产生的最大体积应变越大(见图4体变特性试验分析b)的现象,主要原因之一即为前面所述当周围约束力较小时,其在相同的动力荷载作用下试样颗粒更有可能发生进一步破碎或反复破碎,因此试样体积收缩更为明显。而另外一个原因是当周围压力相同而偏应力不同时,虽然约束力

相同,但在偏应力施加过程中偏应力较大时试样颗粒破碎相对充分,偏应力较小时试样颗粒破碎程度小于前者,因此在施加动力荷载时颗粒破碎不充分试样更容易发生进一步的破碎,从而其颗粒破碎率更大,体积收缩更为明显。但整体来说,当周围压力相同时,偏应力较大试样其总的颗粒破碎率仍要大于偏应力较小试样,见图4(a)。

另外,在应力条件相同时,与其他母岩相比,强风化花岗岩堆石料虽然其总颗粒破碎率相对最大,但在动力荷载施加过程中体积收缩却相对较小。分析认为由于强风化花岗岩强度较低,在试样装样、施加周围压力及施加偏应力过程中其颗粒破碎已非常充分,因此施加动荷载过程中试样发生颗粒破碎的程度反而较小,体积收缩也相对较小。

### 3 结论与建议

利用大型动三轴试验设备,针对3种堆石料进行了考虑周围压力、固结比以及动应力幅值影响的排水动三轴试验,探讨了动力荷载作用下筑坝堆石料的颗粒破碎特性,得出如下结论:

(1) 考虑母岩强度、周围压力、固结比及动应力幅值对堆石料颗粒破碎特性的影响。研究认为,在其他3种影响因素相同时,堆石料颗粒破碎率随母岩强度提高而降低,随围压、固结比及动应力幅值的增加而增加。

(2) 根据动三轴试验过程,可将颗粒破碎的产生分为4个阶段并分别定义颗粒破碎率,即:装样过程  $B_{g\text{装样}}$ ; 围压施加过程  $B_{g\text{围压}}$ ; 偏应力施加过程  $B_{g\text{静}}$ ; 动力荷载施加过程  $B_{g\text{动}}$ , 在分析堆石料颗粒破碎率的影响因素时应对4个阶段予以分别考虑。另外,根据已有研究成果分析认为,堆石料颗粒破碎是引起其体积收缩的主要原因。因此,在动力加载过程中堆石料试样的体积收缩同样能够在一定程度上反映该加载过程中颗粒破碎率的变化。

(3) 堆石料试样的装样、周围压力施加及偏应力施加过程中所产生的颗粒破碎及达到的应力水平对后续循环荷载下的颗粒破碎特性具有一定的影响。例如在动应力幅值相同的条件下,随着周围压力的增加,堆石料在循环荷载作用下的颗粒破碎率存在逐渐降低的可能。但该试验现象或许与动应力幅值和周围压力等的相对大小有关,应通过试验做进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 李国英,傅华,米占宽.堆石料颗粒破碎特性试验研究[J].岩土力学,2006,27(增刊2):575-578. (Li Guo-ying,

- FU Hua, MI Zhan-kuan. Test study on behaviors of grain crushing for rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(S2): 575 - 578. (in Chinese))
- [2] 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 Han-long, QIN Hong-yu, GAO Yu-feng, et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 562 - 566. (in Chinese))
- [3] 傅 华, 凌 华, 蔡正银. 粗颗粒土颗粒破碎影响因素试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, **37**(1): 75 - 79. (FU Hua, LIN Hua, CAI Zheng-yin. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, **37**(1): 75 - 79. (in Chinese))
- [4] 蔡正银, 李小梅, 关云飞, 等. 堆石料的颗粒破碎规律研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(5): 923 - 929. (CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, GUAN Yun-fei, et al. Particle breakage rules of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(5): 923 - 929. (in Chinese))
- [5] 高玉峰, 张 兵, 刘 伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1237 - 1240. (GAO Yu-feng, ZHANG Bing, LIU Wei, et al. Experimental study on particle breakage behavior of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1237 - 1240. (in Chinese))
- [6] 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 Yu-feng, WANG Bing-shen, CHI Shi-chun. Particle breakage of rockfill during triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1692 - 1697. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 杨 光, 张丙印, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒料的颗粒破碎试验研究[J]. 水利学报, 2010, **41**(3): 338 - 342. (YANG Guang, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen, et al. An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress paths[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(3): 338 - 342. (in Chinese))
- [9] 刘斯宏, 黄明坤, 王子健, 等. 破碎性堆石料单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1503 - 1508. (LIU Si-hong, HUANG Ming-kun, WANG Zi-jian, et al. Simple shear tests on breakable rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(8): 1503 - 1508. (in Chinese))
- [10] 刘 尧, 卢廷浩. 粗粒土大型单剪颗粒破碎试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, **37**(2): 175 - 178. (LIU Yao, LU Ting-gao. Large-scale simple shear tests of particle breakage of coarse-grained soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, **37**(2): 175 - 178. (in Chinese))
- [11] 王光进, 杨春和, 张 超, 等. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3649 - 3654. (WANG Guang-jin, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3649 - 3654. (in Chinese))
- [12] 胡万雨, 覃燕林, 刘恩龙, 等. 粗粒土颗粒破碎大型直剪试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, **11**(2): 59 - 62. (HU Wang-yu, QIN Yan-lin, LIU En-long, et al. Large scale direct shear experimental study on particle breakage of coarse-grained soils[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, **11**(2): 59 - 62. (in Chinese))
- [13] XIAO Y, LIU H, CHEN Y, et al. Bounding surface plasticity model incorporating the state pressure index for rockfill materials[J]. J Eng Mech, 2014, **140**(11): 04014087.
- [14] XIAO Y, LIU H, CHEN Y, et al. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. II: Influence of particle breakage[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2014, **140**(12): 04014071.
- [15] XIAO Y, LIU H, DESAI C S, et al. Effect of intermediate principal-stress ratio on particle breakage of rockfill material[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2016, **142**(4): 06015017.
- [16] XIAO Y, LIU H, DING X, et al. Influence of particle breakage on critical state line of rockfill material[J]. Int J Geomech, 2016, **16**(1): 04015031.
- [17] 刘汉龙, 孙逸飞, 杨 贵, 等. 粗粒料颗粒破碎特性研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, **40**(4): 361 - 369. (LIU Han-long, SUN Yifei, YANG Gui, et al. A review of particle breakage characteristics of coarse aggregates[J].

- Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, **40**(4): 361 - 369. (in Chinese))
- [18] INDRARATNA B, LACKENBY J, CHRISTIE D. Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading[J]. *Géotechnique*, 2005, **55**(4): 325 - 328.
- [19] 陈生水, 韩华强, 傅 华. 循环荷载下堆石料应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(8): 1151 - 1157. (CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang, FU Hua. Stress and deformation behaviors of rockfill under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(8): 1151 - 1157. (in Chinese))
- [20] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高, 等. 紫坪铺面板坝堆石料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(1): 35 - 40. (KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao, et al. Experimental study of particle breakage of Zipingpu rockfill material[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(1): 35 - 40. (in Chinese))
- [21] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 795 - 801. (CHEN Sheng-shui, HUO Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of “5.12” Wenchuan earthquake on Zipingpu concrete face rock-fill dam[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(6): 795 - 801. (in Chinese))
- [22] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York: Wiley, 1973: 109 - 200.
- [23] 沈珠江. 面板堆石坝应力应变分析的若干问题[C]// 中国混凝土面板堆石坝十年学术研讨会论文集(1985—1995). 北京: 中国水利水电出版社, 1995: 43 - 50. (SHEN Zhu-jiang. Problems of concrete faced rockfill dam stress and deformation analysis[C]// *Proceedings of the 10th Chinese Academic Conference on Concrete Faced Rockfill Dam*(1985—1995). Beijing: China Water & Power Press, 1995: 43 - 50. (in Chinese))
- [24] 孔德志, 张丙印, 孙 逊. 钢珠模拟堆石料三轴试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, **29**(2): 210 - 221. (KONG De-zhi, ZHUANG Bing-yin, SUN Xun. Triaxial tests on artificial rockfill materials of steel balls[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, **29**(2): 210 - 221. (in Chinese))

## CNKI 推出《中国高被引图书年报》

日前, 中国知网 (CNKI) 中国科学文献计量评价研究中心推出了一套《中国高被引图书年报》, 该报告基于中国大陆建国以来出版的 422 万余本图书被近 3 年国内期刊、博硕、会议论文的引用频次, 分学科、分时段遴选高被引优秀学术图书予以发布。据研制方介绍, 他们统计并分析了 2013-2015 年中国学术期刊 813 万余篇、中国博硕士学位论文 101 万余篇、中国重要会议论文 39 万余篇, 累计引文达 1451 万条。根据统计数据, 422 万本图书至少被引 1 次的图书达 72 万本。研制方根据中国图书馆分类法, 将 72 万本图书划分为 105 个学科, 分 1949-2009 年和 2010-2014 年两个时间段, 分别遴选被引最高的 TOP10% 图书, 共计选出 70911 本优秀图书收入《中国高被引图书年报》。统计数据显示, 这 7 万本高被引优秀图书虽然只占全部图书的 1.68%, 却获得 67.4% 的总被引频次, 可见这些图书质量上乘, 在同类图书中发挥了更加重要的作用。该报告还首次发布各学科“学科 h 指数”排名前 20 的出版单位的评价指标, 对客观评价出版社的社会效益——特别是学术出版物的社会效益具有重要的参考价值。

该报告从图书被引用的角度出发, 评价图书的学术影响力, 弥补了以销量和借阅等指标无法准确评价学术图书的缺憾, 科学、客观地评价了图书、图书作者以及出版单位对各学科发展的贡献。

《中国高被引图书年报》把建国以来出版图书全部纳入评价范围属国内首创, 是全面、客观评价图书学术影响力的工具, 填补了目前图书学术水平定量评价的空白, 在帮助图书馆建设特色馆藏和提高服务水平、帮助出版管理部门了解我国学术出版物现状、帮助科研机构科研管理、帮助读者购买和阅读图书等方面, 均具有较强的参考价值, 也为出版社评估出版业绩、决策再版图书、策划学科选题提供有用的信息。

《中国高被引图书年报》由《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司出版。该产品的形式为光盘电子出版物, 分为理学、工学、农学、医学、人文科学和社会科学 6 个分卷, 随盘赠送图书, 欢迎您咨询、订购。咨询电话: 010-82710850, 82895056 转 8599, email: aspt@cnki.net。