

DOI: 10.11779/CJGE201508021

破碎性堆石料单剪试验研究

刘斯宏¹, 黄明坤^{*1}, 王子健², 孔维耀², 谢 浩¹, 王怡舒¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利水电勘测设计研究院, 浙江 杭州 310002;
3. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:介绍了自行研制的叠环式大型单剪试验仪。对两种不同岩性的堆石料进行了不同竖向应力条件下大变形的单剪试验, 分别研究了竖向应力施加过程(压缩过程)及单剪过程中颗粒破碎的变化。试验结果表明: 颗粒破碎与颗粒抗压强度及施加的竖向应力有关, 颗粒抗压强度小及施加的竖向应力大, 压缩过程与剪切过程中颗粒破碎率大; 无论是压缩过程还是剪切过程, 颗粒破碎均存在一个临界值; 颗粒破碎主要发生在压缩或剪缩过程中。

关键词:单剪试验; 颗粒破碎; 颗粒强度; 堆石料

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)08-1503-06

作者简介: 刘斯宏 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事粒状体力学、土石坝工程及软土地基处理方面的研究。
E-mail: sihongliu@hhu.edu.cn。

Simple shear tests on breakable rockfill materials

LIU Si-hong¹, HUANG Ming-kun¹, WANG Zi-jian¹, KONG Wei-yao², XIE Hao¹, WANG Yi-shu¹

(1. Research Institute of Hydraulic Structure, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design
Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: A large-scale simple shear test device with staged shearing rings is developed. A series of simple shear tests are conducted on two different rockfill materials with different particle compressive strengths under different vertical stresses and large shear deformations. Changes of particle breakage during compression and simple shearing are investigated. The results show that the particle breakage relates with the compressive strengths of particles and the applied vertical stresses. The lower the particle compressive strength is and the higher the vertical stresses are, the larger the particle breakage takes place during the compression and the simple shearing process. The particle breakage may tend to a critical value either during the compression or the shearing process. The particle breakage mainly occurs in the process of the confined or shearing compression.

Key words: simple shear test; particle breakage; particle strength; rockfill material

0 引言

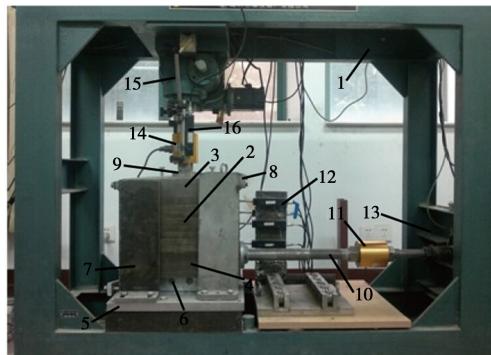
中国高土石坝建设大量采用粗粒料, 在复杂荷载和雨水侵蚀环境下易发生破碎。目前, 土石坝是世界坝工建设中应用最为广泛和发展最快的一种坝型, 作为土石坝主要筑坝材料的粗粒料得到了广泛的使用, 因此对于粗粒料的特性研究也成为当今的热点。随着当今土石坝高度的不断增加, 作为土石坝材料的粗粒料在高围压下容易发生颗粒破碎现象^[1], 改变了粗粒料试验前后的颗粒级配, 影响了其粗粒料的物理力学性质, 使得大坝体积收缩, 从而影响到土石坝的正常工作状态^[2]。以紫坪铺堆石坝为例, 在汶川地震中, 坝顶震陷达到1 m左右, 经分析坝顶震陷主要与颗粒在动接触应力下的破碎有关。因此, 颗粒破碎现象越来越引起人们的重视。

自从颗粒破碎现象被发现以来, 国内外很多学者对颗粒破碎进行了研究。Marsal^[3-5]提出了颗粒破碎指数的概念, 定量地对颗粒破碎程度进行了分析; 郭庆国^[6-7]研究认为粗粒土的颗粒形状、风化程度、颗粒级配以及颗粒强度等因素都会对颗粒破碎程度有影响, 且颗粒棱角越多、越突出, 颗粒强度越低, 颗粒越容易破碎; 刘汉龙等^[8]通过大型三轴压缩试验研究了不同围压下颗粒破碎对粗粒土应力应变的影响, 以及影响颗粒破碎的主要因素。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179059); 江苏省2014年度普通高校研究生科研创新计划项目(KYZZ_0148); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(YS11001)

收稿日期: 2014-09-26

*通讯作者



(a) 试验装置照片

1-自反力架, 2-剪切叠环, 3-加压顶板, 4 底盒, 5 底座, 6-滚轮, 7-侧边保护板, 8-连接板, 9-顶盖, 10-水平拉杆, 11-水平向拉力传感器, 12-水平向位移传感器, 13-水平电机, 14-竖向压力传感器, 15-竖向电机, 16-竖向位移传感器

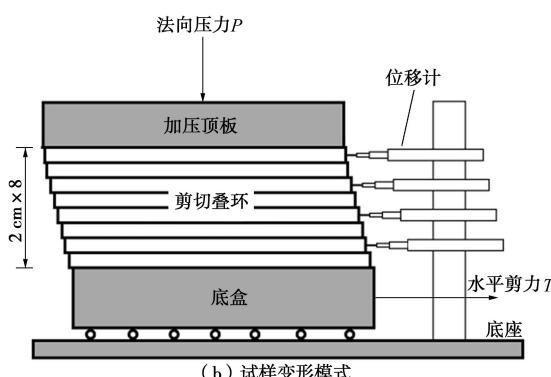


图 1 大型叠环式单剪仪

Fig. 1 Large-scale simple shear test device with staged shearing rings

迄今为止, 对粗粒土颗粒破碎的研究成果主要通过三轴压缩试验得到。三轴压缩试验的缺点是轴向应变比较小, 而颗粒破碎问题通常在较大应变情况下较为明显。本文通过能够进行较大应变试验的大型单剪仪, 对两种不同性质的堆石料进行不同竖向应力、剪切位移情况下的试验, 研究试验前后颗粒级配的演变规律, 以及试验过程中的颗粒破碎与其影响因素, 同时探讨极限颗粒破碎率的存在性。

1 试验概况

1.1 试验装置

图 1 为本试验采用的 SH-DJ-01 大型单剪仪, 由竖向加载系统、水平向剪切系统、8 个剪切叠环、计算机控制数据采集系统组成。

竖向加载系统由伺服电机、法向力作动器和控制器组成, 法向力作动器安装在具有足够强度与刚性的自反力架上。作动器产生的法向力通过压杆施加于试样上, 法向力由连接在压杆上的力传感器测量。

剪切叠环形状为内圆(直径 30 cm)外方(边长 36 cm), 叠环厚 2 cm。叠环间在剪切方向的两侧边设置若干滚珠, 用以减小摩擦。在前后两边各设置 2 块连接板, 以连接 8 个剪切叠环, 连接板与叠环侧壁间同样设有滚珠。

水平剪切力通过一根与底盒连接的水平拉杆施加, 水平拉杆由另一安装在自反力架侧边的伺服电机驱动。底盒与底座间设置 1 排滚轮。在水平拉杆上连接有 1 个力传感器, 用以量测水平剪切力。

在剪切叠环前方不同高度安置 4 个水平位移计, 用以测量试样不同高度上的水平剪切位移; 为了探究试验过程中堆石料的剪缩、剪胀特性, 在顶部加载板上对称安置 2 个竖向位移计。

通过计算机控制数据采集装置完成力传感器、位移计的测量、法向力的控制、剪切速率的控制等, 采集数据并记录, 实时绘制剪切力与剪切应变曲线、变

形与时间曲线等, 并将记录的数据以 EXCEL 的文件格式输出。

1.2 试验材料

对两种不同岩性的堆石料进行了单剪试验, 其中: 堆石料 1 为粉砂质泥岩, 颗粒密度为 2.74 g/cm^3 , 饱和抗压强度为 21.1 MPa, 软化系数为 0.45; 堆石料 2 为弱风化砂岩, 颗粒密度为 2.61 g/cm^3 , 饱和抗压强度 45.5 MPa, 软化系数为 0.74。两种堆石料均属于软岩, 试验前的初始级配取为一致, 如图 2 所示, 其最大粒径 $d_{\max}=60 \text{ mm}$, 平均粒径 $d_{50}=10 \text{ mm}$, 不均匀系数 $C_u=31$, 曲率系数 $C_c=2$ 。

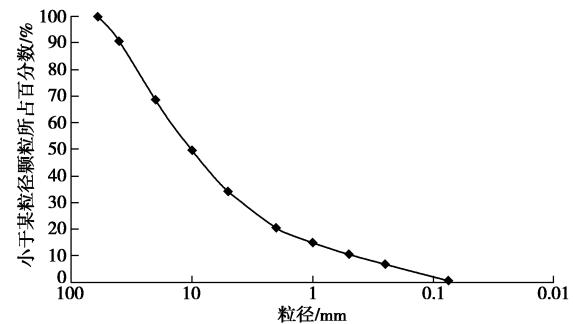


图 2 试验堆石料的初始级配曲线

Fig. 2 Initial gradation of rockfill materials

1.3 试验方法

本文试验主要研究不同竖向应力下压缩及剪切过程中颗粒破碎情况。因此, 试验主要按以下几个步骤进行:

- (1) 试样制备。制样密度为 1.96 g/cm^3 。首先, 用振动筛将处于自然风干状态下的堆石料进行筛分, 分成 $60\sim40 \text{ mm}$, $40\sim20 \text{ mm}$, $20\sim10 \text{ mm}$, $10\sim5 \text{ mm}$, $5\sim2 \text{ mm}$, $2\sim1 \text{ mm}$, $1\sim0.5 \text{ mm}$, $0.5\sim0.25 \text{ mm}$, $0.25\sim0.75 \text{ mm}$ 9 种粒组。然后根据试验级配及制样密度, 计算并称取每个试样所需的各粒组料的重量, 将备好的各粒组料混合均匀。然后分成 6 层装入剪切叠环内(装样时 8 个剪切叠环用一竖向插销临时固定), 每装入一层试样用小振动棒振捣密实, 最后平整试样顶面。

(2) 压缩过程中的颗粒破碎试验。对按步骤(1)制备好的试样, 分别施加 200, 400, 800, 1200, 2000, 4000, 6000 kPa 的竖向应力进行侧限压缩试验。竖向应力施加过程中, 用数据采集系统采集试样的应力-变形数据。在某一级竖向应力下试样压缩变形稳定后, 将试样进行筛分, 绘制压缩试验后颗粒分曲线。

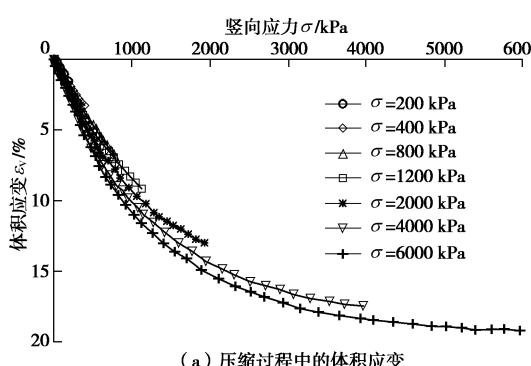
(3) 剪切过程中的颗粒破碎试验。对两种堆石料分别进行了 200, 400, 800, 1200 kPa 4 种竖向应力下的剪切试验。试样按步骤(1)重新制备, 在某一竖向应力下压缩变形稳定后, 开始水平向剪切, 剪切速率设定为 0.2 mm/min。当剪切位移分别为 10, 20, 30, 40 mm 时, 结束试验, 对试样进行筛分, 绘制对应于不同剪切位移试验后的级配曲线。对于一个竖向压力, 进行了 4 个样的剪切试验, 每个试样分别剪切至设定的剪切位移后结束。

2 试验成果及分析

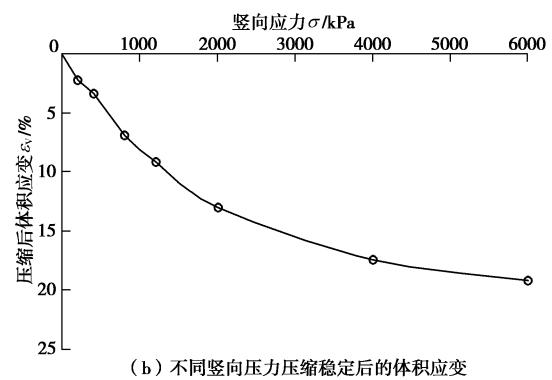
2.1 应力应变关系

单剪试验在不同的竖向应力下进行, 竖向应力从零开始逐步施加。图 3(a)、(b) 分别为堆石料 1 不同竖向应力施加过程(侧限压缩)中的体积应变变化及侧限压缩稳定后的体积应变。由图可见, 当竖向应力小于 2 MPa 时, 体积应变在竖向应力施加过程中逐渐增大, 压缩稳定后的体积应变与竖向应力基本呈线性关系; 而当竖向应力大于 2 MPa 后, 体积应变逐渐趋于稳定。

图 4 为堆石料 1 在不同竖向应力下单剪试验过程中的应力应变关系(由于本试验系统水平张拉能力的限制, 仅进行了竖向应力 2 MPa 以下的单剪试验)。由图可知, 单剪试验初始阶段剪应力增长较快, 当剪应变达到一定数值的时候, 剪应力趋于稳定, 最大剪应力随竖向应力的增大而增大; 竖向应力小于 800 kPa 时, 试样在单剪试验过程中先发生减缩、后发生剪胀, 剪应变达到一定数值的时候体积应变趋于稳定; 竖向应力为 1200 kPa 时, 试样在整个单剪试验过程中均为减缩, 但其体积应变也趋于稳定。



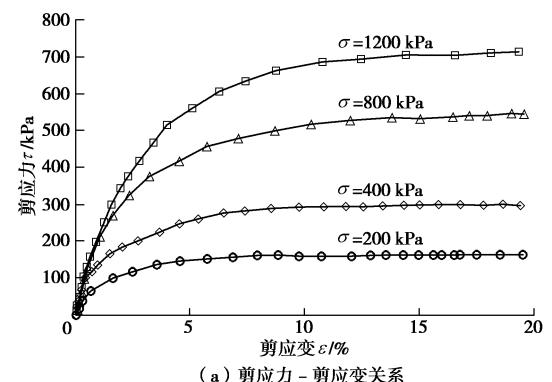
(a) 压缩过程中的体积应变



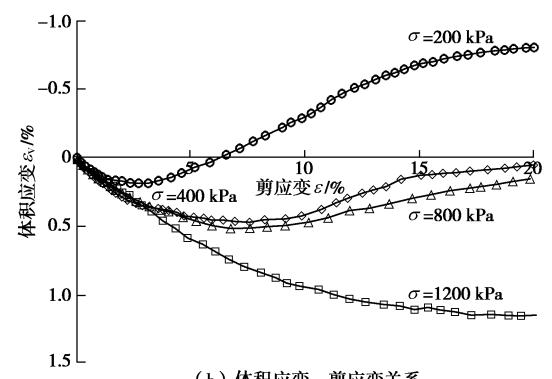
(b) 不同竖向压力压缩稳定后的体积应变

图 3 堆石料 1 竖向应力施加过程(侧限压缩)中的试验结果

Fig. 3 Test results of rockfill 1 during application of vertical stresses



(a) 剪应力 - 剪应变关系



(b) 体积应变 - 剪应变关系

图 4 不同竖向应力下堆石料 1 单剪试验过程中的应力应变关系

Fig. 4 Stress-strain relationship of rockfill 1 during simple shearing under different vertical stresses

2.2 颗粒破碎的度量

目前对颗粒破碎的定量描述多采用体积、面积、质量、直径等常规指标的变化来进行, 如 Lee 等^[9]、柏树田^[10]以试验前后某一单一特征粒径的含量之差或之比反映颗粒破碎情况。这种描述简单易懂, 但不能反映整体变化情况。相对于将单一特征粒径作为标准的方法, Obby 等^[11]提出多粒径指标, 即通过试验前后颗粒级配曲线的变化来描述颗粒破碎情况。

Marsal 建议用破碎率 B_g 来表征颗粒破碎的程度。

对同一种级配料，计算试验前、后各粒组的含量差值 ΔW_k ，取所有 ΔW_k 的正值之和：

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

$$\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf}, \quad (2)$$

式中， W_{ki} 为试验前级配曲线上某粒组的含量， W_{kf} 为试验后级配曲线上某粒组的含量。

Hardin 认为粒径小于 0.074 mm 的颗粒对颗粒破碎的影响很小，可以忽略不计。根据颗粒分布曲线的变化，定义试验前后的颗粒分布曲线与粒径 $D=0.074$ mm 的竖线所围成的面积分别为初始破碎势 B_{pi} 和最终破碎势 B_{pf} 。破碎量 B_t 为上述两面积之差，即

$$B_t = B_{pi} - B_{pf}. \quad (3)$$

同时，考虑到颗粒破碎势与颗粒粒径有关，Hardin 又定义了相对颗粒破碎率 B_r ，

$$B_r = B_t / B_{pi}. \quad (4)$$

由于 Hardin 的相对颗粒破碎率 B_r 能够较好地反映颗粒粒径整体变化情况，本文采用 B_r 作为堆石料的颗粒破碎度量指标。

2.3 压缩过程中颗粒破碎量变化

对于两种不同岩性的堆石料试样，压缩至不同竖向应力后进行了筛分，统计出各粒径组的含量（按质量百分数计），然后按式（4）计算得出试样压缩后的相对颗粒破碎率 B_r ，其结果列于表 1。从表 1 的试验结果可知，在压缩过程中，20 mm 以上的粒组含量减小，20 mm 以下的粒组含量增加，且竖向应力越大其减小或增加的量也越大。大颗粒粒组含量减小与小颗粒粒组含量增加是由于颗粒发生了破碎而引起。两种

不同岩性的堆石料试样压缩后的相对颗粒破碎率 B_r 随竖向应力的变化如图 5 所示。从图中可以得到以下两点结论：①颗粒破碎与颗粒的饱和抗压强度有关，饱和抗压强度较低的粉砂质泥岩（堆石料 1）相对颗粒破碎率 B_r 比饱和抗压强度较高的砂岩（堆石料 2）要大；②当竖向应力小于 2 MPa 时，相对颗粒破碎率 B_r 随竖向应力的增大而增大；当竖向应力大于 2 MPa 时，相对颗粒破碎率 B_r 基本趋于稳定，也就是说颗粒破碎不会随着竖向应力的增加而无限制地发展，会趋近于一个临界值。该现象可以解析为：当颗粒破碎到一定程度后，大颗粒周围的小颗粒数目增加，为大颗粒提供了类似于静水压力的作用^[12]，被小颗粒围绕的大颗粒不容易破碎。图 5 所示的 B_r 随竖向应力的变化与图 3 (b) 所示的试样体积应变随竖向应力的变化基本一致。

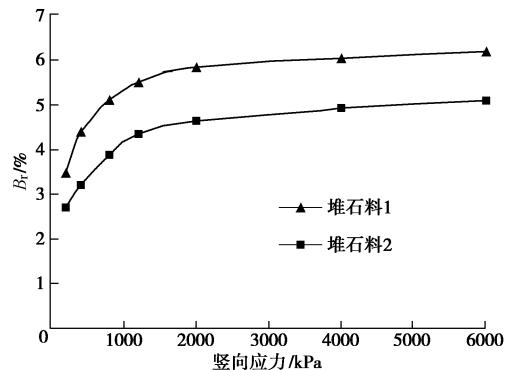


图 5 侧限压缩后相对颗粒破碎率随竖向应力的变化

Fig. 5 Change of relative particle breakage rate with vertical stresses after confining compression

表 1 压缩过程中颗粒破碎情况比较

Table 1 Comparison of particle breakages during compression process

试样	试验状态	竖向应力 /kPa	各粒径组 (mm) 粗颗粒土质量分数/%						B_r /%
			40~60	20~40	10~20	5~10	2~5	<2	
堆石料 1	试验前	9.11	22.26	18.83	15.38	13.61	20.81		
		200	8.66	21.99	18.72	15.61	13.61	21.41	3.48
		400	8.22	21.83	19.17	15.50	13.44	21.84	4.36
		800	8.06	21.01	19.73	15.73	13.67	21.80	5.05
	试验后	1200	7.96	21.05	19.30	15.96	13.60	22.13	5.49
		2000	7.14	20.42	19.42	16.41	13.84	22.77	5.83
		4000	6.93	20.25	19.43	16.57	14.02	22.80	6.03
		6000	6.82	20.21	19.35	16.53	14.13	22.96	6.17
堆石料 2	试验前	9.11	22.26	18.83	15.38	13.61	20.81		
		200	8.94	22.02	18.88	15.44	13.60	21.12	2.72
		400	8.75	21.96	19.11	15.32	13.48	21.38	3.20
		800	8.68	21.88	19.13	15.24	13.53	21.54	3.88
	试验后	1200	8.50	21.52	19.23	15.28	13.67	21.80	4.34
		2000	7.61	20.68	19.30	16.19	13.72	22.50	4.62
		4000	7.50	20.61	19.33	16.24	13.73	22.59	4.89
		6000	7.42	20.53	19.34	16.27	13.73	22.71	5.15

2.4 单剪过程中颗粒破碎量变化

对于两种不同岩性的堆石料, 分别进行了竖向应力为 200, 400, 800, 1200 kPa 条件下的单剪试验。对于每一竖向应力, 试验分别进行到剪应变为 5%, 10%, 15% 与 20% 时, 对试样进行了筛分, 统计出各粒径组的含量(按质量百分数计), 然后按式(4)计算得出试样对应不同剪应变的相对颗粒破碎率 B_r , 其结果列于表 2。由于剪切过程是在竖向应力逐步施加并压缩变形稳定后开始的, 表 2 中统计的 B_r 包含了某一竖向应力下压缩过程中的颗粒破碎, 即剪应变为零时的数值。不同竖向应力下 B_r 随剪应变的变化如图 6 所示。从图表中可以看出, 颗粒破碎主要发生在剪切的初始阶段, 当剪应变达到一定值时, 颗粒破碎率变化缓慢, 基本趋于某一稳定值, 即临界破碎率。对照图 4(b) 的体积应变与剪应变的关系可以发现, 颗粒破碎主要发生在试样剪缩阶段。对于堆石料 1, 当剪切至剪应变 5% 时, 竖向应力 200 kPa 作用下的试样体积应变已经从剪缩转变为剪胀, 剪切过程中发生的颗粒破碎率 ΔB_r 为 0.39%, 而其他竖向应力作用下的试样仍处于剪缩状态, ΔB_r 为 1.08%~1.26%; 当剪应变超过 5% 时, 竖向应力 200 kPa 作用下的试样处于剪胀状态, 颗粒破碎率增加量明显小于其他竖向应力作用下的试样。在单剪过程中, 同样也是饱和抗压强度较低的粉砂质泥岩(堆石料 1) 相对颗粒破碎率 B_r 比饱和抗压强度较高的砂岩(堆石料 2) 要大。

表 2 两种堆石料在不同剪应变下的颗粒破碎情况

Table 2 Particle breakage of the two rockfill materials under different shear strains

试样	竖向应力 /kPa	不同剪应变下颗粒破碎率 B_r /%				
		0	5	10	15	20
堆石料 1	200	3.48	3.87	3.91	4.07	4.16
	400	4.36	5.44	5.77	6.03	6.12
	800	5.05	6.22	6.39	6.58	6.66
	1200	5.49	6.66	6.83	6.89	7.05
堆石料 2	200	2.72	2.79	2.83	2.88	2.90
	400	3.20	3.61	3.73	3.88	3.96
	800	3.88	4.56	4.65	4.77	4.82
	1200	4.34	4.92	5.01	5.09	5.13

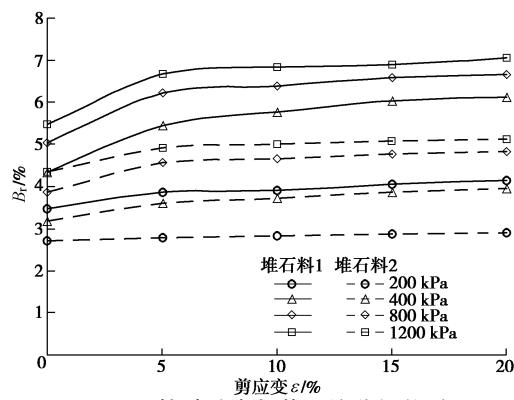


图 6 颗粒破碎率与剪切位移的关系

Fig. 6 Relationship between particle breakage rate and shear displacement

2.5 压缩过程与剪切过程颗粒破碎量的对比分析

表 2 及图 6 中计算的颗粒破碎率包括了竖向应力施加过程(又称压缩过程)中的颗粒破碎率。表 3 统计了压缩过程引起的颗粒破碎占整个试验过程颗粒破碎的比例。从表 3 中可以看出以下两点: ①对于试验的两种不同岩性的堆石料, 压缩过程中发生的颗粒破碎较剪切过程中发生的颗粒破碎要大得多, 这是因为堆石料中存在较大裂隙、局部强度较低的颗粒很容易在压缩过程中就产生破碎, 这部分颗粒破碎占得比重较大, 到剪切过程, 易破碎的颗粒已经破碎为较稳定小颗粒, 故剪切过程破碎量相对较少; ②竖向应力为 200 kPa 时的压缩过程所发生的颗粒破碎比例较其他竖向应力下要大, 因为在该竖向应力下单剪过程中试样发生了明显的剪胀, 随着竖向应力增大, 试样剪胀现象变弱, 体积变化减小。此统计结果进一步说明颗粒破碎主要发生在压缩或剪缩过程中, 此时堆石料越来越密实, 颗粒间的接触力逐渐增大, 颗粒容易破碎。

表 3 压缩破碎在整个试验过程中所占的比例

Table 3 Proportions of compression crushing in whole test process

试样	竖向应 力/kPa	整个试验 破碎率/%	压缩破 碎率/%	压缩破碎所 占比例/%
堆石 料 1	200	4.16	3.48	83.67
	400	6.12	4.38	71.27
	800	6.66	5.05	7.583
	1200	8.13	5.49	67.55
堆石 料 2	200	2.90	2.72	93.79
	400	3.96	3.20	80.81
	800	4.82	3.88	80.50
	1200	5.13	4.34	84.60

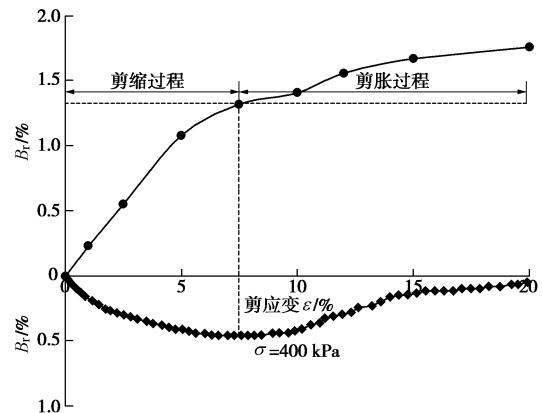


图 7 剪缩与剪胀过程中颗粒破碎率比较

Fig. 7 Comparison of particle breakage rates between shear shrinkage and dilatancy

2.6 剪缩与剪胀过程中的颗粒破碎

不同竖向应力下剪切试验结果表明, 剪切过程中的颗粒破碎主要发生在剪缩阶段。为进一步验证此现象, 对堆石料 1 在竖向应力 400 kPa 条件下单剪过程

中的颗粒破碎进行了详细的分析, 即制备若干相同的试样, 在相同的竖向应力下至不同的剪切位移时, 对试样进行筛分, 计算相应的颗粒相对破碎率 B_r 。图 7 为单剪过程中试样的体积应变及对应的 B_r 。可见, 在剪缩过程中颗粒破碎比较明显, 破碎量较大; 随着试验的进行, 试样由剪缩转为剪胀, 颗粒破碎发展缓慢, 颗粒破碎量较小。

3 结 论

对于两种不同岩性的堆石料进行了不同竖向应力条件下大变形的单剪试验, 分别研究了竖向应力施加过程(压缩过程)及单剪过程中颗粒破碎的变化, 得到的结论如下:

(1) 堆石料的颗粒破碎与颗粒的饱和抗压强度有关, 饱和抗压强度较低的粉砂质泥岩(堆石料 1)相对颗粒破碎率 B_r 比饱和抗压强度较高的砂岩(堆石料 2)要大。

(2) 压缩过程中, 竖向应力较小时堆石料的颗粒破碎明显, 竖向应力增大到一定值时, 颗粒破碎逐渐趋于稳定; 单剪过程中, 在相同的剪应变下, 相对颗粒破碎率随竖向应力的增大而增大; 在同一竖向应力作用下, 剪应变较小时颗粒破碎明显, 剪应变达到一定值时, 颗粒破碎逐渐趋于稳定。也就是说, 无论是压缩过程还是剪切过程, 颗粒破碎均存在一个临界值。

(3) 堆石料的颗粒破碎主要发生在压缩或剪缩过程中, 此时堆石料越来越密实, 颗粒间的接触力逐渐增大, 颗粒容易破碎。

值得指出的是, 堆石料颗粒破碎与很多因素有关^[13], 本文主要研究了颗粒强度、竖向应力与剪应变大小的影响, 试验结果所推断得出的临界破碎率的存在性及其机理, 还有待于进一步的研究。

参 考 文 献:

- [1] 日本土质工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 等译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 7–8. (Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Field compaction of coarse-grained materials[M]. Xi-ling, et al trans. Beijing: China Water Power Press, 1999: 7–8. (in Chinese))
- [2] 刘恩龙, 覃燕林, 陈生水, 等. 堆石料的临界状态探究[J]. 水力学报, 2012, 43(5): 505–511. (LIU En-long, TAN Yan-lin, CHEN Sheng-shui, et al. Investigation on critical state of rockfill materials[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5): 505–511. (in Chinese))
- [3] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York: Wiley, 1973: 109–200.
- [4] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill materials[J]. Journal of Soils Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, 1967, 93(2): 27–43.
- [5] MARSAL R J. 土石坝工程[M]. 南京: 水利出版社, 1979. (MARSAL R J. Embankment Dam Engineering[M]. Nanjing: Water Conservancy Press, 1979. (in Chinese))
- [6] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水力学报, 1987(5): 59–66. (GUO Qing-guo. Experimental study on shear strength characteristics about coarse-grained soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(5): 59–66. (in Chinese))
- [7] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. (GUO Qing-guo. Engineering characteristics of coarse-grained soil and its application[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998. (in Chinese))
- [8] 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): 562–565. (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): 562–565. (in Chinese))
- [9] LEE K L, FARHOOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, 4: 69–86.
- [10] 柏树田. 西北口混凝土面板堆石坝筑坝材料特性的试验研究[M]// 水利水电科学研究院科学论文集: 第 32 集(结构材料、岩土与抗震工程). 北京: 水利电力出版社, 1991: 19–29. (BAI Shu-tian. Experimental study on characteristics of rockfill materials of Xibeikou concrete face rockfill dam[M]// Scientific research papers of Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research (32): Structure material, geotechnical and earthquake engineering. Beijing: Hydraulic and electric power press, 1991: 19–29. (in Chinese))
- [11] OBBY O, HARDIN F. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, 111(10): 1177–1192.
- [12] EBRAHIM Alaei, AHMAD Mahboubi. A discrete model for simulating shear strength and deformation behavior of rockfill material, considering the particle breakage phenomenon[J]. Granular Matter, 2012(14): 707–717.
- [13] 刘尧, 卢延浩. 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-hao. Experimental study on large simple shear particle breakage of coarse-grained soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(2): 707–717. (in Chinese))