

DOI: 10.11779/CJGE201509018

# 堆石料剪切过程中的颗粒破碎研究

贾宇峰, 王丙申, 迟世春\*

(近海与海岸工程国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 颗粒破碎直接改变堆石料本身结构, 影响土体的剪胀、内摩擦角、峰值强度、渗透系数和流变变形。但是, 目前对于堆石料在剪切过程中的破碎规律尚不明确。通过室内固结排水三轴试验, 研究了古水面板坝玄武岩堆石料在制样、固结和剪切过程中的颗粒破碎规律。研究结果表明: 堆石料在制样过程中会产生较为显著的颗粒破碎现象; 在等向固结过程几乎不产生颗粒破碎。低围压下, 颗粒间的翻越和滑移受围压约束较弱, 剪切过程中的颗粒破碎不明显。高围压下, 颗粒间的翻越和滑移受到限制, 颗粒间的咬合力显著提高, 随着剪切应变的增大, 土体颗粒不断发生破碎。在颗粒破碎过程中, 大粒径颗粒首先破碎, 破碎的颗粒从大粒径逐渐向小粒径扩展。粒径在0.5 mm以下颗粒的含量始终随剪应变的增大而增多, 且增长幅度随着围压的增大而增大。土体颗粒破碎同时受围压和剪切变形的影响, 相同围压下剪切过程中的相对破碎参数 $B_r$ 和剪应变之间的关系可采用双曲线公式描述。

**关键词:** 堆石料; 颗粒破碎; 排水三轴试验; 相对破碎参数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)09-1692-06

作者简介: 贾宇峰(1979-), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事堆石料本构关系方面的研究和教学。E-mail: jiayf130@dlut.edu.cn。

## Particle breakage of rockfill during triaxial tests

JIA Yu-feng, WANG Bing-shen, CHI Shi-chun

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The particle breakage directly modifies the structure of the rockfill, influencing its dilatancy, friction angle, strength, permeability and creep deformation. However, the breakage law of the rockfill during shearing is still unclear. The particle breakage of the basalt rockfill of Gushui concrete face rockfill dam during the sample preparation, consolidation and drained triaxial shearing is studied by using the consolidated-drained triaxial tests. The research shows that the sample preparation of the rockfill generates notable particle breakage. The isotropic consolidation of the sample generates little particle breakage. Under low confining pressure, the particles can freely roll over and slide, and there is little particle breakage during the shearing. Under high confining pressure, the rolling and sliding of the particles are limited, which increases the interlocked force among the particles. And the particle breakage increases with shear strain. During the particle breakage, the large particles break first. The diameter of the broken particle decreases with the increasing confining pressure. The content of the particle less than 0.5 mm always increases with the increasing pressure and the amplification also increases with the increasing confining pressure. Under high confining pressure, the stress and shear strain both influence particle breakage. The relationship between the relative breakage parameter  $B_r$  and the shear strain under the same confining pressure can be described by hyperbolic formula.

**Key words:** rockfill; particle breakage; drained triaxial test; relative breakage parameter

## 0 引言

堆石料是土石坝的主要建筑材料, 一般占坝体工程的70%~90%, 堆石料的工程特性对土石坝的建设和维护十分重要。筑坝堆石料是在料场经人工爆破开采出来的, 由于物理风化作用土颗粒中含有许多肉眼无法看到的潜在缺陷, 加之爆破的影响, 具有受力破碎的特点。随着碾压堆石技术的发展以及调节性大水库建设的需要, 土石坝的坝高已有了较大发展。建设

中的双江口、两河口水电站, 规划中的如美、古水水电站, 最大坝高均以达到300 m级。随着坝高的增大, 筑坝堆石料承受的荷载显著提高, 由此产生的颗粒破碎现象更加显著。颗粒破碎影响堆石料的峰值强度、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109027, 51179024, 51379029); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT12LK11)

收稿日期: 2015-02-25

\*通讯作者

内摩擦角、孔隙比、渗透系数, 削弱了其剪胀性、增加其流变性<sup>[1-2]</sup>。因此, 研究堆石料的颗粒破碎规律, 揭示颗粒破碎影响堆石料工程特性的内在机理是堆石料本构关系研究和土石坝工程设计亟需解决的问题。

国内外很多学者通过室内试验研究了颗粒破碎对于堆石料工程特性的影响。Hardin<sup>[3]</sup>, 米占宽等<sup>[4]</sup>, 丁树云等<sup>[5]</sup>, 进行了大量堆石料的颗粒破碎试验。这些早期的颗粒破碎的试验主要通过固结排水三轴试验, 研究试验前后土体颗粒破碎对其工程性质的影响。随着研究的深入, 更多试验方法用于堆石料颗粒破碎研究。研究内容也从试验前后的颗粒破碎拓展到剪切过程中的颗粒破碎和土体结构变化。王振兴等<sup>[2]</sup>进行了堆石料的流变试验, 研究颗粒破碎对堆石料流变性的影响; 陈生水等<sup>[6]</sup>进行了堆石料的不等向固结、静三轴试验和振动三轴试验, 研究了循环加载作用下堆石料的颗粒破碎规律; Indraratna 等<sup>[7]</sup>进行了路基砾石料颗粒破碎试验, 研究路基砾石料在固结排水三轴试验过程中的颗粒破碎规律; 孔德志等<sup>[8]</sup>采用水泥球制备了人工颗粒料, 通过固结排水三轴试验, 研究了该人工颗粒料在固结排水三轴试验过程中的颗粒破碎规律。

虽然, 堆石料颗粒破碎的试验研究已经取得了很多成果。但堆石料在剪切过程中的颗粒破碎规律尚未见得到较好的描述。而剪切过程中的颗粒破碎规律是研究堆石料受力变形过程中内部结构变化规律和能量转化机制的基础, 也是研究土体细观结构变化与宏观力学特性的桥梁。孔德志和张丙印进行的剪切过程中颗粒破碎研究, 采用的是混凝土球模拟堆石料。其与天然堆石料相比颗粒间的咬合作用不足, 试样密度较低, 孔隙比偏大。Indraratna 等进行的路基砾石料颗粒破碎试验, 最大围压仅 300 kPa, 远低于高土石坝中堆石料承受的围压。笔者<sup>[9]</sup>通过苏家河口堆石料的颗粒破碎试验, 建立了破碎参量和破碎耗能之间的关系式, 推算了堆石料在剪切过程中的破碎参量, 建立了双曲线公式描述剪切过程中破碎参量的变化规律。但是, 由于缺少试验数据, 破碎参量公式一直未能进行得到直接的试验验证。

本文采用古水面板坝堆石料, 进行了固结排水三轴剪切试验。在剪切过程中的某些特定应变下卸载并结束试验, 然后进行颗粒筛分, 研究堆石料在制样、固结和剪切过程中的颗粒破碎规律。验证了剪切过程中的破碎参量关系式。

## 1 试验仪器、材料与方法

试验仪器采用大连理工大学研制的堆石料大型多功能三轴仪, 试样直径 30 cm, 高 60 cm。试验堆石料

选用古水面板坝的玄武岩筑坝堆石料, 最大吸水率 0.33%, 湿抗压强度 83.5 MPa, 平均比重 2.79, 制样干密度 2.21 g/cm<sup>3</sup>, 最大粒径 60 mm, 颗粒长宽比为 1.63, 制样级配如表 2 所示。根据级配称量好各粒组的质量, 拌匀后分 6 层装填, 每层高 10 cm, 将各层土料人工击实至要求干密度。装样完成后从试样底部通入二氧化碳气体置换试样内的空气, 在 30 kPa 的预围压下由底部进水饱和。试样采用各向等压排水固结, 固结围压等级  $\sigma_3 = 100, 500, 1000, 1500, 2000$  kPa。试样固结方式采用上、下两面排水固结, 待排水量稳定后开始剪切, 剪切速率约为 0.5 mm/min。当轴应变达到 15% 后卸载。

试验结束后, 将试样烘干, 进行颗粒筛分, 分析试验前后颗粒级配的变化。整理试验曲线, 记录各个围压下应力 - 应变曲线的峰值应力点和体变 - 应变曲线的胀缩转换点的剪应变数值。

重新制样, 饱和后固结至各个围压, 分别剪切至表 1 中的特定剪应变后卸载, 并结束剪切试验。在试验结束后进行颗粒筛分, 研究剪切过程中的颗粒破碎规律。各围压下的三轴试验曲线和对应的卸载剪应变如图 1 所示。

表 1 各围压下的卸载剪应变

Table 1 Unloading shear strains under different consolidated stresses

$\sigma_3$ /kPa	卸载剪应变 $\varepsilon_s$ /%		
	(1)	(2)	(3)
100	18.46	11.12	4.41
500	16.01	4.56	1.87
1000	15.19	7.20	1.75
1500	14.35	9.39	1.90
2000	13.76	7.25	1.85

重新制样, 分别固结至 500 kPa 和 1500 kPa 后, 卸载, 进行颗粒筛分试验, 研究固结应力对颗粒破碎的影响。重新制样, 捣实至要求干密度后, 进行颗粒筛分试验, 研究制样过程中的颗粒破碎。

## 2 试验结果分析

### 2.1 制样和固结过程中的颗粒破碎

试验前、制样后和固结后的颗粒级配如表 2 所示。从表 2 中可以看到, 制样后土体的颗粒级配发生显著变化。与制样后的颗粒级配相比, 即使在 1500 kPa 的固结应力作用下, 颗粒级配仍然没有明显改变。由此可见, 制样振捣过中产生的颗粒破碎不能忽略, 等向固结过程中几乎不发生颗粒破碎。

### 2.2 剪切过程中的颗粒破碎

各个围压下的试验结果如图 1 所示。从图中可以看到, 相同围压下的几条应力 - 应变曲线和体积 - 应



表 2 制样和固结后的颗粒级配  
Table 2 Particle-size distribution after sample preparation and consolidation

状态	围压/kPa	不同粒径 (mm) 颗粒含量/%									
		40~60	20~40	10~20	5~10	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	0.075~0.1
试验前		25.77	32.59	19.60	10.65	6.71	2.29	1.17	1.22	—	—
制样后		18.39	36.19	19.51	11.33	8.13	1.92	2.15	1.20	0.41	0.13
固结后	500	19.46	34.85	20.74	10.53	8.02	1.71	2.25	1.25	0.38	0.13
	1500	19.04	36.03	18.18	13.82	6.78	1.60	2.31	1.19	0.44	0.13
		19.04	36.03	18.18	13.82	6.78	1.60	2.31	1.19	0.44	0.13
		19.04	36.03	18.18	13.82	6.78	1.60	2.31	1.19	0.44	0.13

表 3 剪切过程中的颗粒级配  
Table 3 Particle-size distribution under different shear strains during triaxial tests

$\sigma_3$ /kPa	$\varepsilon_s$ /%	不同粒径 (mm) 颗粒含量/%										
		40~60	20~40	10~20	5~10	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	0.075~0.1	
制样后		18.39	36.19	19.51	11.33	8.13	1.92	2.15	1.20	0.41	0.13	0.64
	18.46	17.37	36.45	18.49	13.04	7.48	2.03	2.39	1.32	0.46	0.15	0.82
100	11.12	18.44	34.15	20.10	12.44	7.67	2.14	2.37	1.31	0.45	0.13	0.80
	4.41	17.58	36.86	19.28	12.55	7.16	1.92	2.11	1.23	0.42	0.13	0.76
	16.01	11.27	37.97	21.80	13.62	8.18	1.53	2.50	1.38	0.41	0.22	1.14
500	4.56	15.78	35.81	21.08	12.55	7.84	1.93	2.42	1.30	0.42	0.12	0.74
	1.87	18.91	35.46	19.39	11.91	7.48	1.87	2.37	1.25	0.46	0.14	0.78
	15.19	11.59	33.05	21.59	15.11	8.91	1.86	3.58	1.90	0.79	0.26	1.36
1000	7.20	11.82	36.74	20.11	13.37	9.73	2.08	2.94	1.58	0.54	0.17	0.91
	1.75	18.76	34.25	19.51	12.97	7.88	1.95	2.27	1.26	0.39	0.13	0.62
	14.35	9.42	32.18	22.13	15.84	10.17	2.20	3.37	1.98	0.84	0.24	1.62
1500	9.39	12.24	33.54	21.07	14.35	9.45	1.96	3.39	1.81	0.74	0.24	1.22
	1.90	17.47	35.96	18.86	11.93	8.74	1.98	2.41	1.34	0.43	0.14	0.74
	13.76	9.78	34.22	19.32	14.51	10.45	2.54	4.03	2.12	0.91	0.29	1.81
2000	7.25	12.00	34.35	20.23	13.66	10.08	2.47	3.08	1.67	0.70	0.21	1.23
	1.85	16.54	36.69	19.20	12.60	7.82	2.03	2.30	1.27	0.48	0.15	0.93

变曲线几乎落在同一条曲线上。这说明各围压下试样的应力应变关系基本一致，试验的重复性很好，试样内部结构相同，可以看作是同一试样。因此，相同围压下各个试样在不同剪应变下卸载后的颗粒级配，可以看作是在相同围压下同一试样在不同剪应变下卸载后的颗粒级配，如表 3 所示。

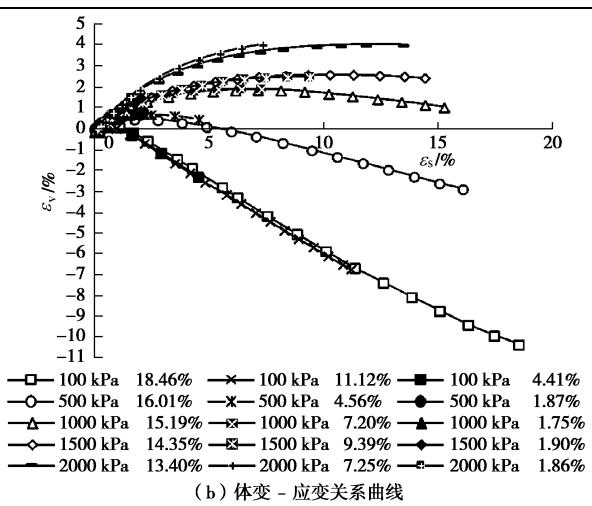
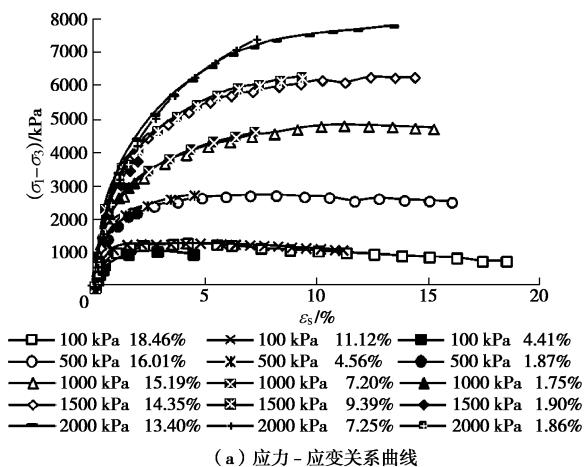


图 1 不同剪切应变卸载的三轴试验曲线  
Fig. 1 Stress-strain curves under different shear strains during tests

从表 3 中可以看到，在 100 kPa 围压下，随着剪应变的增大，土体的颗粒级配与制样后的颗粒级配相比没有明显变化。这表明在 100 kPa 围压下，土体的

小主应力较低无法有效约束颗粒间的翻越和滑移, 剪切过程中土体内没有发生明显的颗粒破碎现象。由此可见, 100 kPa 围压下土体的剪切力主要由颗粒间的摩擦和相互翻越产生, 颗粒间的咬合力相对较低。由于颗粒间相互翻越产生的剪应力主要取决于剪切面上的颗粒结构, 具有较大的随机性。因此, 100 kPa 下的应力-应变曲线的离散性较大。

从表 3 中可以看到, 当围压增加到 500 kPa, 随着剪应变的增加, 40~60 mm 粒径的颗粒含量由 18.91% 降低到 11.27%, 降幅达 30%; 20~40 mm 粒径的颗粒含量由 35.46% 增加到 37.97%; 0.1~20 mm 范围内的 7 组粒径颗粒含量几乎没有明显的变化; 0.075~0.1 mm 和 0.075 mm 以下粒组的颗粒含量则分别从 0.14% 和 0.78% 增加到 0.22% 和 1.14%。结合图 1 和表 3 可以发现, 围压增加到 500 kPa, 小主应力对土样的约束作用增强, 40~60 mm 颗粒的翻越受到限制, 颗粒间的咬合力增大, 土体承受的剪力显著提高; 在咬合力作用下发生了颗粒破碎, 土体的剪胀明显降低。较高的围压提高了土样的密实度, 使颗粒间的接触更为紧密。这导致土体颗粒在相互摩擦和翻越时产生了更多的磨蚀, 0.1 mm 以下粒组的颗粒含量出现 50% 以上的增长。

当围压增加到 1000 kPa, 随着剪应变的增加, 40~60 mm 粒组的颗粒含量随轴向应变的增加而减小, 由 1.75% 小应变时的 18.76% 降低到 15.19% 大应变时的 11.59%; 20~40 mm 粒组的颗粒含量则先是由 1.75% 小应变时的 34.25% 增加到 7.2% 应变时的 36.74% 后, 又降低到 15.19% 应变时的 33.05%; 1~20 mm 范围内的 4 个粒组的颗粒含量总体上呈增长状态, 增幅在 10% 左右; 0.25~1 mm 范围内的两组颗粒含量均发生明显的增长, 增幅接近 30%, 0.1~0.25 mm, 0.075~0.1 mm 和 0.075 mm 以下这 3 个粒组的颗粒含量则分别从 0.39%, 0.13% 和 0.62% 增加到 0.79%, 0.26% 和 1.36%, 增幅接近 100%。对比 500 kPa 和 1000 kPa 围压下剪切过程中的级配变化可以发现, 围压增加到 1000 kPa, 土样受到的约束作用进一步增强, 20~40 mm 颗粒的翻越开始受到限制, 颗粒间的咬合力进一步增大, 这导致 20~40 mm 的颗粒开始在剪切过程中发生较为显著破碎。在初始剪切阶段, 40~60 mm 的颗粒首先破碎, 并且破碎速度随着剪切应变的增大而降低。一部分棱角破碎的颗粒由 40~60 mm 粒组转移到 20~40 mm 粒组。因此, 20~40 mm 的颗粒含量在剪切初始阶段随着剪应变增加而增大, 在胀缩转换点处(剪应变为 7.2%) 达到最大, 其后颗粒含量随着剪应变增加而降低。这表明虽然颗粒破碎能够降低土体内的孔隙, 削弱土体的剪胀。但是, 剪胀同样也降低

了土体内颗粒间的接触点数, 导致颗粒受到的不平衡接触力增加, 引起颗粒发生进一步破碎。因此, 即使土体进入剪胀状态, 颗粒破碎现象仍然没有停止。另一方面, 增大的围压进一步削弱了剪胀, 提高了土样的密实度, 加大了颗粒间的磨蚀。0.1 mm 以下颗粒含量的增幅从 50% 提高到 100%, 0.1~0.25 mm 粒组的颗粒含量也出现 100% 的增长。

当围压增加到 1500 kPa, 随着剪应变的增加, 40~60 mm 粒径的颗粒含量由 17.47% 降低到 9.42%, 降幅增接近 50%; 20~40 mm 粒径的颗粒含量由 35.96% 降低到 32.18%; 1~20 mm 范围内的 4 个粒组的颗粒含量增幅超过 20%; 0.25~0.5 mm 粒组的颗粒含量, 增幅接近 50%, 0.1 mm 以下 3 个粒组的颗粒含量则分别从 0.43%, 0.14% 和 0.74% 增加到 0.84%, 0.24% 和 1.62%, 增幅近 100%。对比 1000 kPa 和 1500 kPa 围压下剪切过程中的级配变化可以发现, 围压增加到 1500 kPa, 土样受到的约束作用进一步增强, 20~40 mm 颗粒的翻越受到更大限制, 颗粒间的咬合力进一步增大, 这导致 20~40 mm 的颗粒在剪切过程中发生明显的破碎, 颗粒含量也开始随着剪应变的增大而降低。在高围压作用下, 土体剪胀被进一步削弱, 土样内部更加密实, 颗粒间的磨蚀作用更加显著。0.1 mm 以下粒组的颗粒含量的增幅仍然保持在 100%, 而且颗粒含量也高于 1000 kPa 围压。

当围压增加到 2000 kPa, 随着剪应变的增加, 40~60 mm 粒径的颗粒含量由 16.54% 降低到 9.78%, 降幅增接近 50%; 20~40 mm 粒径的颗粒含量由 36.69% 降低到 34.22%; 10~20 mm 粒组颗粒含量没有明显变化; 1~10 mm 的 3 个粒组的颗粒含量增幅超过 20%; 0.25~0.5 mm 粒组的颗粒含量, 增幅接近 70%, 0.1mm 以下 3 个粒组的颗粒含量则分别从 0.48%, 0.15% 和 0.93% 增加到 0.91%, 0.29% 和 1.81%, 增幅近 100%。对比 1500 kPa 和 2000 kPa 围压下剪切过程中的级配变化可以发现, 围压增加到 2000 kPa, 土样受到的约束作用进一步增强, 体变曲线未出现剪胀, 应力曲线也未出现微软化。土体在剪切过程中趋于密实, 颗粒间的接触点增加, 大粒径颗粒的接触力增速降低, 颗粒间的磨蚀作用进一步增强。与 1500 kPa 相比, 20~60 mm 粒径范围内两个粒组颗粒含量并没有显著增加, 而 1 mm 以下粒组的颗粒含量仍然保持增长趋势。

### 2.3 剪切过程中破碎参量的变化规律

Hardin<sup>[3]</sup> 将土体级配曲线与 0.074 mm 粒径线所围成的面积定义为相对破碎势  $B_p$ , 将土体试验前后破碎势  $B_p$  的变化定义为整体破碎参量  $B_t$ , 又将  $B_t$  与土体试验前  $B_p$  的比值定义为相对破碎参量  $B_r$ , 即

$$B_r = B_t / B_p \quad . \quad (1)$$

Hardin 根据堆石料的颗粒破碎试验, 建立了  $B_r$  与应力之间的关系式

$$B_r = \frac{(\sigma_b / \sigma_r)^{n_b}}{1 + (\sigma_b / \sigma_r)^{n_b}} \quad , \quad (2)$$

式中,  $\sigma_r$  为土体的抗破碎应力, 是孔隙比、颗粒形状和摩尔硬度的函数,  $n_b$  为拟合系数,  $\sigma_b$  为有效破碎应力

$$\sigma_b = \sigma_0 [1 + 9(\tau_0 / \sigma_0)^3] \quad , \quad (3)$$

式中,  $\tau_0$  为八面体剪应力,  $\sigma_0$  为八面体正应力。

表 4 中列出了 500, 1000, 1500 和 2000 kPa 围压下, 土体剪切过程中的  $B_r$  和最大剪应力。其中,  $B_r$  剔除了制样过程中的颗粒破碎。可以看到, 500 kPa 围压下当剪应变从 4.56% 增加到 16.01%, 最大剪应力从 2766 kPa 降低到 2761 kPa, 而  $B_r$  则从 0.01 增加到 0.024; 1000 kPa 围压下, 剪应变从 7.20% 增长到 15.19%, 最大剪应力从 4724 kPa 增加到 4754 kPa,  $B_r$  则从 0.033 增加到 0.049; 1500 kPa 围压下, 剪应变从 9.39% 增加到 14.35%, 最大剪应力从 6288 kPa 增加到 6303 kPa,  $B_r$  从 0.033 增加到 0.049。由此可见, 在剪切过程中,  $B_r$  与剪应变的相关性超过剪应力。

表 4 剪切过程中的相对破碎参数

Table 4 Relative breakage parameters during triaxial tests

$\sigma_3 / \text{kPa}$	$\varepsilon_s / \%$	$(\sigma_1 - \sigma_3) / \text{kPa}$	$B_r$
500	16.01	2761	0.024
	4.56	2766	0.010
	1.87	2226	0.002
1000	15.19	4754	0.049
	7.20	4724	0.033
	1.75	3159	0.004
1500	14.35	6303	0.064
	9.39	6288	0.045
	1.90	3782	0.009
2000	13.76	7855	0.069
	7.25	6759	0.045
	1.85	4007	0.010

另一方面, 500 kPa 围压下, 剪应变为 16.01% 时的  $B_r$  为 0.024, 远大于 1000, 1500 和 2000 kPa 围压下, 剪应变在 1.75, 1.90 和 1.85% 时的  $B_r$  值, 0.004, 0.009 和 0.01; 相应地, 前者最大剪应力仅为 2761 kPa, 远小于后三者的最大剪应力 3159, 3782 和 4007 kPa。类似地, 1000 kPa 围压下, 剪应变为 15.19% 时,  $B_r$  为 0.049, 大于 1500 和 2000 kPa 围压下, 剪应变在 9.39 和 7.25% 时的  $B_r$  值 0.045; 而前者的最大剪应力为 4754 kPa 远小于后两者的大剪应力 6303 和 6759 kPa。

显然, Hardin 建立的相对破碎参数关系式 (2) 无法描述剪切过程中的颗粒破碎。这主要是因为, 以往的颗粒破碎试验主要研究土体达到破坏后的破碎参

量, 忽视了剪切过程中, 土体没有完全破坏时的破碎参量。从表 4 中可以看到, 500 kPa 围压下, 剪应变为 1.87% 时的  $B_r$  为 0.002, 对应的最大剪应力为 2226 kPa; 1000 kPa 围压下, 剪应变为 1.75% 时的  $B_r$  为 0.004, 对应的最大剪应力为 3159 kPa; 1500 kPa 围压下, 剪应变为 1.90% 时的  $B_r$  为 0.009, 对应的最大剪应力为 3782 kPa; 2000 kPa 围压下, 剪应变为 1.85% 时的  $B_r$  为 0.01, 对应的最大剪应力为 4007 kPa。可以看到, 相同剪应变下,  $B_r$  随着最大剪应力和固结应力的增大而增大。这与土体破坏时  $B_r$  的变化规律相一致。也与 Hardin 建立的破碎参量关系式 (2) 所描述的规律一致。由此可见, 在相同剪应变下, 固结应力是影响颗粒破碎的主要因素; 在土体剪切过程中, 剪应变和固结应力共同影响颗粒破碎。Hardin 的相对破碎参量关系式 (2) 仅仅是描述了土体剪应变达到破坏状态时破碎量与固结应力之和剪应力间的关系, 并不能反映整个剪切过程中的破碎参量变化。

笔者建立的相对破碎参量与剪应变的关系式, 采用双曲线型函数描述剪切过程中的破碎参量:

$$B_r = \frac{B_{r(\text{ult})} \cdot \varepsilon_s}{A_2 + \varepsilon_s} \quad , \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_s$  为剪应变,  $B_{r(\text{ult})}$  为临界状态下的  $B_r$ ,  $A_2$  为试验参数。各个围压下剪切过程中的实测  $B_r$  和式 (4) 的拟合曲线如图 2 所示, 对应的拟合参数列入表 5 中。从图 2 中可以看到, 相同围压下,  $B_r$  随着剪应变的增大而增大, 式 (4) 能够很好地描述剪切过程中的  $B_r$  的变化规律。

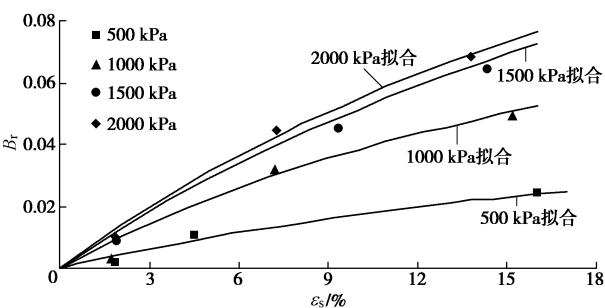


图 2 剪切过程中的相对破碎量

Fig. 2 Relative breakage parameters during triaxial tests

表 5 破碎参量公式拟合参数

Table 5 Parameters of relative breakage parameter fitting formula

$\sigma_3 / \text{kPa}$	$B_{r(\text{ult})}$	$A_2$
500	0.070	30.2
1000	0.134	25.0
1500	0.230	34.8
2000	0.225	31.1

### 3 结语

通过吉水面板坝玄武岩堆石料的固结排水三轴试验, 研究了堆石料在制样、固结和剪切过程中的级配变化规律, 得到以下结论:

堆石料在制样击实过程中会产生较为显著的颗粒破碎。与剪切过程中的颗粒破碎相比, 制样过程中的颗粒破碎不能忽略。与制样和剪切过程中产生的颗粒破碎相比, 等向固结过程(围压 1500 kPa)产生的颗粒破碎相对较少。

低围压下(100 kPa), 颗粒间的翻越和滑移受到的约束较弱, 颗粒间的咬合力较低, 体积-应变曲线出现显著的剪胀现象, 在剪切过程中土体内不发生明显的颗粒破碎。高围压下(500 kPa以上), 颗粒间的翻越和滑移受到的约束较强, 颗粒间的咬合力显著提高, 在剪切过程中出现显著的颗粒破碎现象, 随着剪切应变的增大, 土体颗粒不断发生破碎。在高围压下, 大粒径颗粒首先破碎。随着围压的增大, 破碎的颗粒从大粒径逐渐向小粒径扩展。粒径在0.5 mm以下的颗粒含量始终随着剪应变的增大而增大, 并且增长幅度随着围压的增大而增大。高围压下, 剪切过程中的相对破碎参量 $B_r$ 和剪应变之间的关系可以采用双曲线公式描述。

### 参考文献:

- [1] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(4): 309 - 316.
- [2] 王振兴, 迟世春, 王峰. 堆石料流变试验的颗粒破碎研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, **10**(5): 103 - 106. (WANG Zhen-xing, CHI Shi-chun, WANG Feng. Experimental study for rheological particle breakage of rockfill materials[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, **10**(5): 103 - 106. (in Chinese))
- [3] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [4] 米占宽, 李国英, 陈铁林. 考虑颗粒破碎的堆石体本构模型[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(12): 1865 - 1869. (MI Zhan-kuan, LI Guo-ying, CHEN Tie-lin. Constitutive model for rockfill material considering grain crushing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1865 - 1869. (in Chinese))
- [5] 丁树云, 蔡正银, 凌华. 堆石料的强度与变形特性及临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(2): 248 - 252. (DING Shu-yun, CAI Zheng-yin, LING Hua. Strength and deformation characteristics and critical state of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(2): 248 - 252. (in Chinese))
- [6] 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 Ha. Stress and deformation behaviors of rockfill under cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1151 - 1157. (in Chinese))
- [7] BUDDHIMA Indraratna, WADUD Salim. Modelling of particle breakage of coarse aggregates incorporating strength and dilatancy[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2002, **155**(4): 243 - 252.
- [8] 孔德志, 张丙印, 孙逊. 人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 464 - 469. (KONG De-zhi, ZHANG Bing-yin, SUN Xun. Triaxial tests on particle breakage strain of artificial rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 464 - 469. (in Chinese))
- [9] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎的堆石料剪胀性统一本构模型[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1381 - 1388. (JIA Yu-feng, CHI Shi-chun, LIN Gao. Dilatancy unified constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1381 - 1388. (in Chinese))