

DOI: 10.11779/CJGE201804014

复杂应力路径下堆石料的颗粒破碎特性研究

王 远¹, 张 胜², 敖大华², 于玉贞¹, 孙 逊¹

(1. 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学), 北京 100084; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 针对堆石料进行了一系列等向压缩、常规三轴和复杂应力路径试验, 采用相对颗粒破碎率为度量研究了多种应力路径条件下堆石料的颗粒破碎特性。对不同应力路径下试验过程中的塑性功进行了对比, 分析了颗粒破碎与平均应力 p 、广义剪应力 q 所做塑性功之间的关系, 研究了不同应力路径下三轴试验颗粒破碎的差异和原因。结果表明: 模拟心墙土石坝填筑和蓄水应力路径下的颗粒破碎远小于常规三轴试验。多种应力路径下塑性功与相对颗粒破碎率之间存在明显的相关性, 并可用幂函数较好拟合。不同应力路径下塑性功分量之间差异明显。常规三轴试验中广义剪应力 q 所做功占总塑性功的主要部分, 不同复杂应力路径试验 p , q 所做塑性功占比差异较大。

关键词: 堆石料; 颗粒破碎; 应力路径; 塑性功

中图分类号: TU456 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)04-0698-09

作者简介: 王 远(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道和高土石坝方面的研究工作。E-mail: wobenshizhu@126.com。

Particle breakage characteristics of rockfills under complex stress paths

WANG Yuan¹, ZHANG Sheng², AO Da-hua², YU Yu-zhen¹, SUN Xun¹

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Power Construction

Corporation of China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: A series of conventional triaxial tests, isotropic compression tests and complex stress path triaxial tests are conducted to investigate the particle breakage characteristics of rockfills, which are evaluated quantitatively by using the relative breakage B_r . The plastic work in the progress of triaxial tests under different stress paths is compared. The relationship between particle breakage and plastic work done by the mean stress p or generalized shear stress q under different stress paths is analyzed. The results show that the particle breakage of triaxial tests under complex stress paths which simulate the stress paths of rockfills during the progress of construction and impoundment of earth-rockfill dams is much less than that of the conventional triaxial tests. The relationship between plastic work and relative breakage under different stress paths tends to show a unique curve, which can be well fitted by the power function. The plastic work done by the generalized shear stress q accounts for a dominant proportion of all work in the conventional triaxial tests. And in the complex stress path triaxial tests, the proportion of plastic work done by the mean stress p to that done by the generalized shear stress q is different from case to case.

Key words: rockfill; particle breakage; stress path; plastic work

0 引言

堆石料具有压实密度高、透水性强、抗剪强度高、地震荷载作用下不易发生液化等工程特性, 被广泛应用于土石坝、铁路和公路路基、桥梁墩台、软基础处理和高填方等。但堆石料同时还具有高压易破碎的特性, 且颗粒破碎对堆石料的强度和变形特性具有重要的影响^[1-7]。近年来随着中国土石坝的筑坝高度增加, 由此产生的颗粒破碎现象更加凸显, 进而对筑坝堆石料的内摩擦角、孔隙比、渗透系数等产生明显影响^[8]。因此, 堆石料的颗粒破碎特性受到国内外许多学者的重视。

目前堆石料颗粒破碎研究以试验为主, Gupta^[9]

对印度兰吉特萨加尔坝和布鲁利亚坝的堆石料进行了大量的固结排水三轴试验, 对比分析了多种级配、围压条件下的堆石料颗粒破碎特性。贾宇峰等^[8]进行了特定应变的固结排水三轴剪切试验, 研究了相对破碎参量与剪应变的关系, 并用双曲线函数进行了描述。李雪梅等^[10]采用大型直剪试验结合裂离比与加权裂离率从粒组和颗粒料整体 2 个层面对比研究了土料的颗粒破碎发展规律。Hardin^[11]、刘汉龙等^[4]、陈生水等^[12]、丁树云等^[13], 也进行了大量堆石料的颗粒破碎

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0404802, 2017YFC0804602); 国家自然科学基金项目(51379103, 51479099)
收稿日期: 2017-01-09

研究。

国内外诸多学者^[11, 14-18]基于试验前后的粒径级配曲线提出了多种颗粒破碎指标, 常见的度量指标可以分为单一特征粒径指标和多粒径指标。单一特征粒径指标 (Lee 等^[14]; Lade 等^[15]), 采用试验前后某一特征粒径含量的变化量来衡量颗粒破碎程度。多粒径指标 (Marsal^[17]、Hardin^[11]), 采用试验前后整个粒径级配曲线的变化量来衡量颗粒破碎程度。其中 Hardin^[11]提出的相对破碎指标 B_r 能够反映试验前后试样内各个粒径的变化量并且结果稳定^[4], 所以得到了广泛的认可和应用。许多学者^[2, 4, 8, 19-20]采用该指标分析了堆石料的颗粒破碎规律以及该指标与堆石料剪胀性和抗剪强度的关系等。虽然堆石料颗粒破碎的试验研究已经取得很多成果, 但目前对堆石料的颗粒破碎特性的试验研究主要以常规三轴剪切试验为主, 对复杂应力路径条件下的颗粒破碎特性研究较少。而试验时堆石料颗粒破碎状况不仅受到应力水平、应力大小影响, 也与应力路径相关^[9]。复杂应力路径条件下的颗粒破碎状况与常规三轴剪切试验结果具有较大差异。对于易崩解的堆石料, 湿化作用也会引起较大的颗粒破碎, 本文进行的试验均为饱和排水试验, 并未单独考虑湿化引起的颗粒破碎。

本文采用清华大学大型岩土静动真三轴试验机进行了等向压缩、常规三轴和复杂应力路径试验。对试验前后堆石料的粒径级配进行了统计, 采用相对破碎率为度量分析了多种应力路径条件下堆石料的颗粒破碎特性。对不同应力路径下试验过程中的塑性功进行了对比, 分析了颗粒破碎与平均应力 p 、广义剪应力 q 所做塑性功之间的关系, 研究了不同应力路径下三轴试验颗粒破碎的差异性和原因。

1 试验条件与试验内容

1.1 试验设备

试验所用的设备为清华大学大型岩土静动真三轴试验机。该试验机采用伺服系统控制, 静载时竖向力可以施加的范围为 0~2000 kN, 位移为 0~100 mm, 可以施加最大围压为 20 MPa, 圆柱形试样尺寸为 $\phi 300 \text{ mm} \times 660 \text{ mm}$ 。根据 SL237—1999《土工试验规程》^[21], 三轴试验采用的最大粒径 d_{\max} 和试验直径 D 之比为 1:5, 所以该大三轴试验可采用最大允许粒径为 60 mm。

1.2 试验材料

试验所采用的堆石料来自西南某拟建土石坝的主堆石料, 该坝最大坝高 315 m, 小主应力最大值预计可达 2 MPa 以上。堆石料现场原始级配平均线如图 1 (a) 所示, 采用相似级配法与等量替代法结合的混合

法^[21]得到试验级配。

试验堆石料母岩为英安岩, 饱和抗压强度为 60 MPa。制样孔隙比 $e=0.20$, 干密度为 $\rho_d=2.17 \text{ g/cm}^3$ 。如图 1 (b) 和 1 (c) 所示试验颗粒棱角明显, 磨圆度较低, 颗粒表面呈细褶皱状。

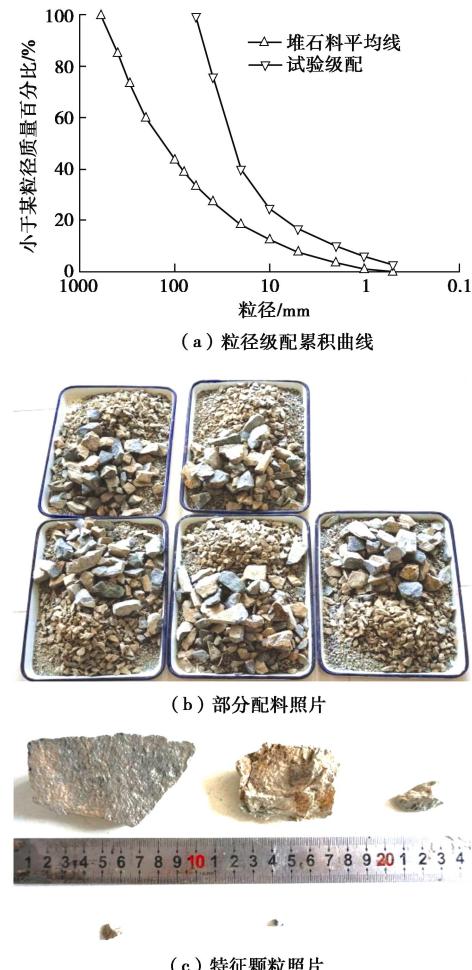


图 1 试验堆石料粒径级配和颗粒特征

Fig. 1 Grain-size distribution and characteristics of rockfills

1.3 试验应力路径

(1) 等向压缩试验

对试样进行了单调加载等向压缩试验。按 100, 200, 400, 600, 800, 1200, 2000, 3200 kPa 加载, 每级等向压缩应力 σ_{3I} 间隔 2 h。

(2) 常规三轴试验

常规三轴试验采用 7 个剪切围压 σ_{3II} , 分别为 100, 200, 400, 800, 1200, 2000, 3200 kPa。先对试样进行等向固结, 然后进行剪切, 轴向应变达到 15% 时试验结束。

(3) 复杂应力路径试验

土石坝内坝料在填筑期的应力路径可近似为等应力比路径 ($\sigma_1/\sigma_3=\text{常数}$)。蓄水期坝料的应力路径将发生转折, 呈复杂应力状态, 且在不同部位应力路径

的变化方向和变化幅度不同^[22-23]。为研究心墙土石坝内堆石料的力学特性和颗粒破碎特性采用如下两种复杂应力路径试验。

加载—减载试验：首先按 $\sigma_1 : \sigma_3 = 2 : 1$ 的路径分别加载至应力转折点围压 $\sigma_{3\text{III}} = 200, 600, 1200, 2000, 3000 \text{ kPa}$, 然后按 $\Delta\sigma_1 : \Delta\sigma_3 = 1 : 1.2$ 的路径减载直到试样破坏(图2)。前一个路径模拟施工期堆石料应力状态的变化过程，后一个路径模拟蓄水时上游堆石料应力状态的变化过程。在蓄水期因容重和主动减压的双重作用，上游堆石料小主应力减小较多。

加载—加载试验：前一加载阶段与上面相同，后一阶段按 $\Delta\sigma_1 : \Delta\sigma_3 = 1 : 1$ 的路径加载至 3200 kPa (图3)。后一等比应力路径模拟蓄水时下游堆石料应力状态变化过程。

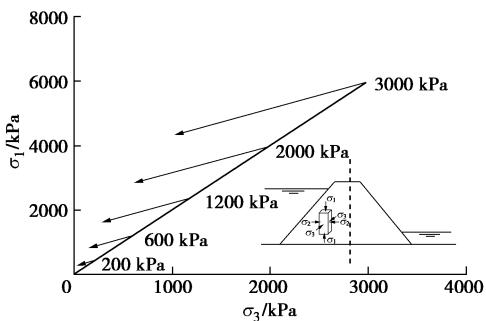


图2 加载—减载试验应力路径

Fig. 2 Stress paths of loading-unloading triaxial tests

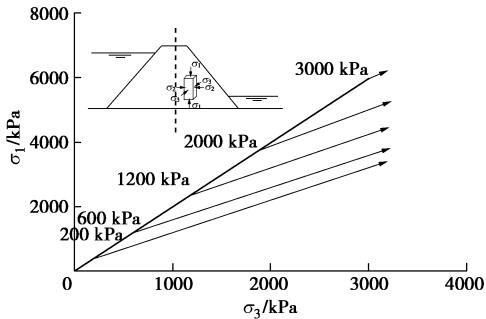


图3 加载—加载试验应力路径

Fig. 3 Stress paths of loading-reloading triaxial tests

2 试验结果

2.1 等向压缩试验

在等向压缩试验和复杂应力路径试验中围压变化范围较大，膜嵌入对试验结果影响明显。所以本文采用张丙印等^[24]建议的方法进行了膜嵌入修正。

图4(a)为修正后等向压缩试验的 $p - \varepsilon_v$ 关系曲线。图4(b)为试验前后的级配曲线，从图中可以看出等向压缩试验后的级配与制样后的级配相比变化不明显，说明等向压缩产生的颗粒破碎量较小。

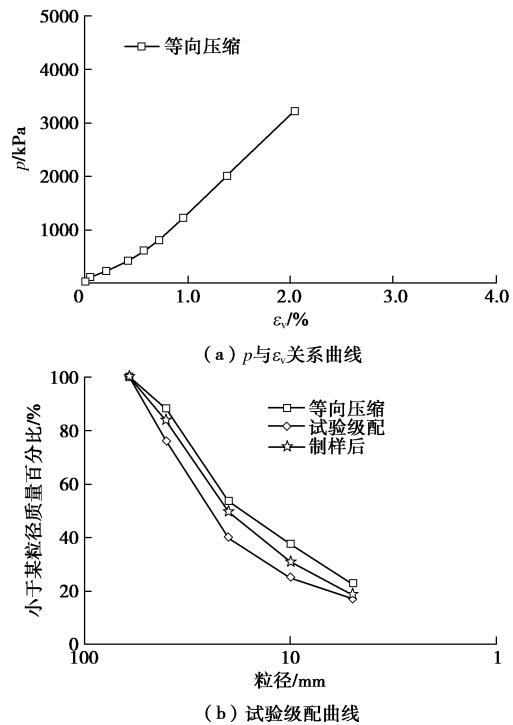
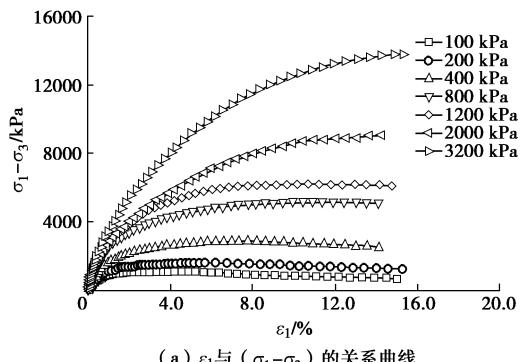


图4 等向压缩试验结果

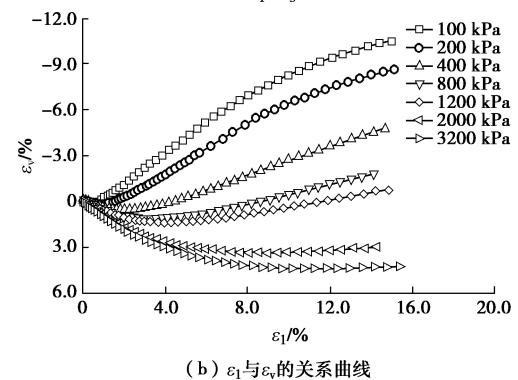
Fig. 4 Results of isotropic consolidation tests

2.2 常规三轴试验

图5(a)为常规三轴试验轴向应变 ε_1 与偏差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的关系曲线，图中所标示的数字为剪切时的围压 $\sigma_{3\text{III}}$ 。图5(b)为体变与轴向应变关系曲线，图5(c)为各级围压下常规三轴试验后的级配曲线，可以看出随着围压的增加，试验后颗粒破碎逐渐加剧，粒径级配曲线变化明显。试验结果与大部分试验数据类似，说明堆石料具有状态依赖特性^[25-26]。



(a) ε_1 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的关系曲线



(b) ε_1 与 ε_v 的关系曲线

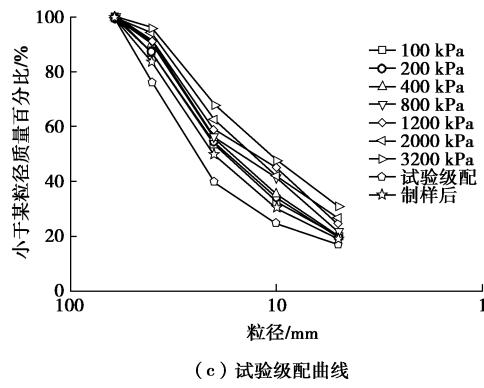


图5 常规三轴试验结果

Fig. 5 Results of conventional triaxial tests

2.3 复杂应力路径试验

(1) 加载—减载复杂应力路径试验结果

图6(a)为加载—减载复杂应力路径试验平均应力 p 和体应变 ε_v 的关系曲线, 图6(b)为广义剪应力 q 和广义剪应变 ε_s 的关系曲线。图中所标示的数字为应力路径发生转折时围压 σ_{3III} 。

在等比加载过程中, 随着 p 值的不断增加, 体应变 ε_v 随之增长, 随着 q 值的增加, 广义剪应变 ε_s 也不断增长。应力路径转折后即在减载过程中随着平均应力 p 的减小, 体应变反而有所增加。图6(c)为加载—减载试验后的级配曲线, 可以发现随着应力转折围压 σ_{3III} 的增加, 级配有一定变化。

(2) 加载—加载复杂应力路径试验结果

图7(a)为加载—加载复杂应力路径试验平均应力 p 和体变 ε_v 的关系曲线, 图7(b)为广义剪应力 q 和广义剪应变 ε_s 的关系曲线。

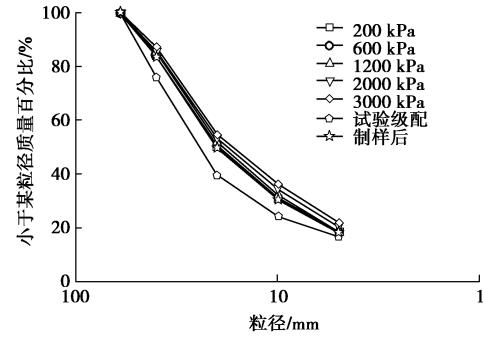
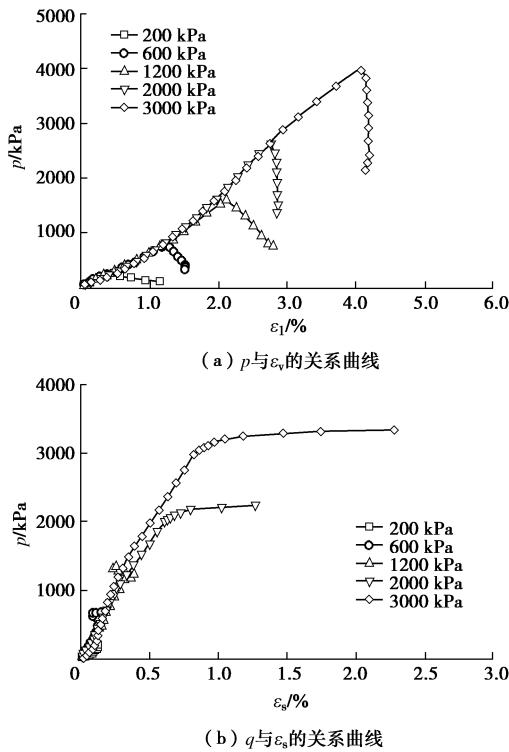


图6 加载—减载试验结果

Fig. 6 Results of triaxial tests under loading-unloading complex stress paths

等比加载阶段与前面的试验一致。应力路径转折后即 $\Delta\sigma_1 : \Delta\sigma_3 = 1 : 1$ 的再加载阶段广义剪应力 q 不变, 平均应力值 p 不断增加。随着平均应力值的增加, 体变不断增加。图7(c)为堆石料加载—加载试验后的级配, 可以看出不同应力转折点的结果差别较小。

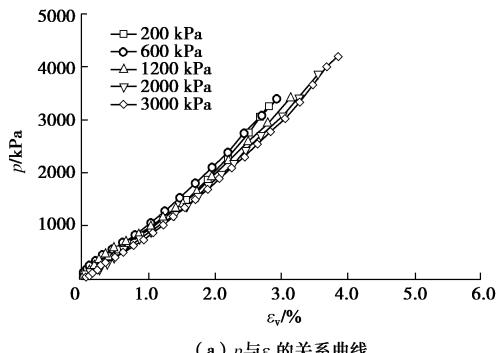
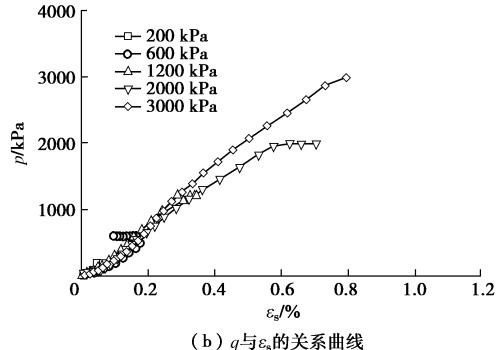
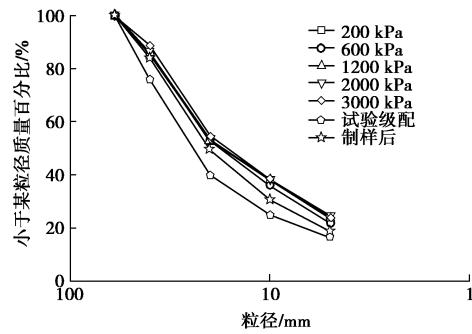
(a) p 与 ε_v 的关系曲线(b) q 与 ε_s 的关系曲线

图7 加载—加载试验结果

Fig. 7 Results of triaxial tests under loading-reloading complex stress paths

3 颗粒破碎分析

3.1 破碎指标

颗粒破碎是与粒径、级配、形状、孔隙比和母岩强度等有关的复杂过程。定量分析颗粒破碎对堆石料的强度和变形特性影响时，需要一种度量指标。常见的度量指标可以分为单一特征粒径指标和多粒径指标。

(1) 单一特征粒径指标有 B_{15} , B_{10} , B_{60} 等^[14-16]，采用试验前后某一特征粒径含量的变化量来衡量颗粒破碎程度。

(2) 多粒径指标有 B_g , B_f , B_r 等^[11, 17-18]，采用试验前后整个粒径级配曲线的变化量来衡量颗粒破碎程度。其中 Hardin^[11]引入的相对颗粒破碎率 B_r 使用较为广泛。 $B_r = (B_p - B_m)/B_p$, B_p , B_m 分别为制样后和试验后的颗粒级配曲线与粒径 $D=0.074$ mm 竖线所围面积。

已有研究表明^[2, 4]，单一粒径指标对应力条件的变化不敏感，多粒径指标则能够较好反映整体粒径分布的变化情况。其中相对破碎率 B_r 对于任何给定的小于某粒径的土粒含量，试验前后对应的粒径变化都包含在面积的计算中，小的量测误差并不会影响整个面积或相对破碎率。所以相对颗粒破碎率 B_r 能够稳定的反映试验前后试样内各个粒径的变化量。因此，本文采用相对颗粒破碎率 B_r 进行分析。

3.2 颗粒破碎与应力状态的关系

图 8 为不同应力路径条件下相对颗粒破碎率 B_r 与围压最大值 $\sigma_{3\max}$ 关系曲线，可以看出在以上的多种应力路径条件下随着 $\sigma_{3\max}$ 的增加 B_r 不断增加，但是常规三轴试验与其它 4 种应力路径的差异较大，常规三轴试验时相同 $\sigma_{3\max}$ 对应的 B_r 远大于其它应力路径。

图 9 为不同应力路径条件下相对颗粒破碎率 B_r 与平均应力最大值 p_{\max} 关系曲线，可以看出在以上的多种应力路径条件下随着 p_{\max} 的增加 B_r 也在不断增加，同样常规三轴试验与其它 4 种应力路径的差异较大，常规三轴试验时相同的 p_{\max} 对应的 B_r 远大于其它应力路径。

图 10 为不同应力路径条件下相对颗粒破碎率 B_r 与广义剪应力最大值 q_{\max} 关系曲线，可以看出在以上的多种应力路径条件下随着 q_{\max} 的增加 B_r 不断增加，常规三轴试验与其它 4 种应力路径具有一定差异，常规三轴试验时相同 q_{\max} 对应的 B_r 大于其它应力路径。

由同一类型应力路径的试验结果可知颗粒破碎率 B_r 与应力状态相关。但是不同类型的应力路径下相对

颗粒破碎率 B_r 与 $\sigma_{3\max}$, p_{\max} , q_{\max} 的关系缺乏良好的归一性，即并不具备唯一的相关性。坝体材料的力学特性常采用常规三轴试验进行研究，但如上所示，常规三轴试验应力路径与坝体填筑和蓄水的应力路径具有较大差异，模拟坝体应力路径产生的颗粒破碎远小于常规三轴试验结果。所以通过常规三轴试验研究复杂应力路径下的颗粒破碎情况存在较大误差。因而应找出影响颗粒破碎的本质因素，并建立二者之间的定量关系。

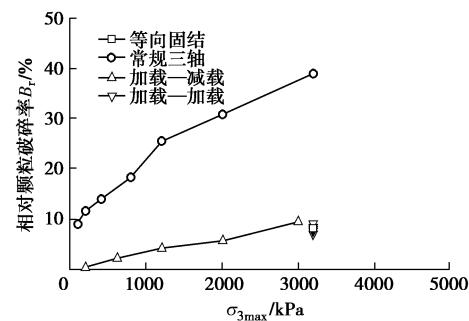


图 8 不同应力路径下 B_r 与 $\sigma_{3\max}$ 关系曲线

Fig. 8 Relationship between B_r and $\sigma_{3\max}$ under different stress paths

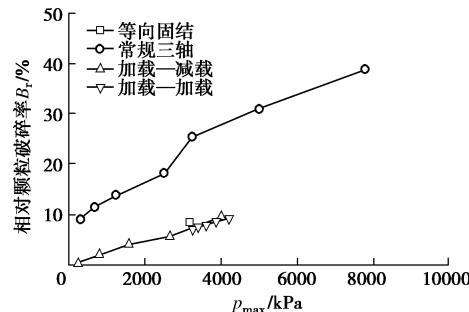


图 9 不同应力路径下 B_r 与 p_{\max} 关系曲线

Fig. 9 Relationship between B_r and p_{\max} under different stress paths

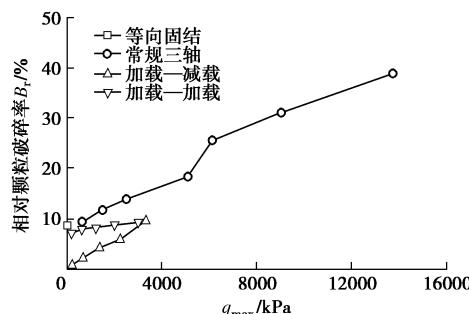


图 10 不同应力路径下 B_r 与 q_{\max} 关系曲线

Fig. 10 Relationship between B_r and q_{\max} under different stress paths

3.3 颗粒破碎与塑性功关系

考虑到颗粒破碎为不可逆现象，所以可将其与不

可逆变形相关的塑性功建立关系。三轴试验过程中的塑性功为

$$W_p = \int dW_p = \int q d\epsilon_s + \int p d\epsilon_v - \int q d\epsilon_{se} - \int p d\epsilon_{ve} , \quad (1)$$

式中, W_p 为塑性功, ϵ_{se} 为广义弹性剪应变, ϵ_{ve} 为弹性体应变。由于堆石料在不同应力路径三轴试验过程中发生的大部分是塑性变形, 弹性变形很小^[15], 因此本文在塑性功的计算中忽略了与弹性变形相关的能量。

图 11 为不同应力路径下塑性功 W_p 与相对颗粒破碎率 B_r 之间的关系曲线, 其中塑性功由前文中的试验结果计算得到。可以发现, 随着塑性功的增加, 颗粒破碎不断增加, 并且集中在狭窄的范围内。颗粒破碎与破碎能量之间的关系一般采用双曲线或者幂函数进行拟合^[19-20]。本文采用如下幂函数进行拟合:

$$B_r = a(W_p)^b , \quad (2)$$

式中, a , b 为与堆石料颗粒强度、形状分布等有关的常数, 由本文试验结果得出 $a=0.71$, $b=0.56$ 。如图 11 所示拟合效果较好, 由此认为在一定区间内不同应力路径条件下塑性功与颗粒破碎率之间存在近似唯一性关系, 并可用幂函数拟合。

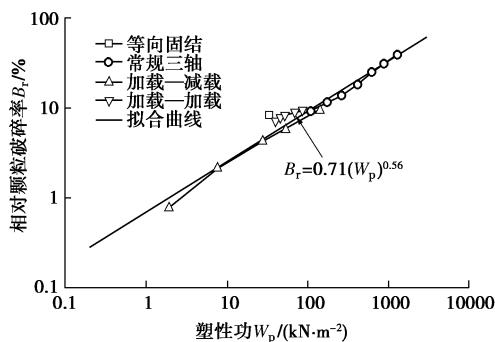


图 11 不同应力路径下 B_r 与 W_p 关系曲线

Fig. 11 Relationship between B_r and W_p under different stress paths

图 12 为等向压缩试验时不同围压下的塑性功 W_p 曲线, 由图可知随着等向压缩应力 σ_{3I} 的增加塑性功不断增加。并且由塑性功与相对颗粒破碎率 B_r 之间的关系可知, 等向压缩试验塑性功全部由平均应力 p 产生, 即等向压缩试验颗粒破碎由平均应力 p 做功产生。

图 13 为常规三轴试验不同剪切围压 σ_{3II} 时总塑性功 W_p 以及其各分量的曲线。在该曲线中将总塑性功分为了 3 部分, 即等向固结阶段所做塑性功、剪切阶段平均应力 p 所做塑性功、剪切阶段广义剪应力 q 所做塑性功。由曲线可以看出, 在常规三轴试验时剪切阶段广义剪应力 q 所做功占总塑性功的主要部分, 远大于等向固结阶段和剪切阶段平均应力 p 的做功。由

塑性功与相对颗粒破碎率 B_r 之间的关系可知, 常规三轴试验中广义剪应力 q 做功占总塑性功的主要部分, 即颗粒破碎主要是广义剪应力作用下产生的滑移错动所致。平均应力 p 产生的颗粒破碎量较小, 甚至当围压小于等于 400 kPa 时平均应力 p 所做塑性功为负。等向固结阶段颗粒破碎量也较小。

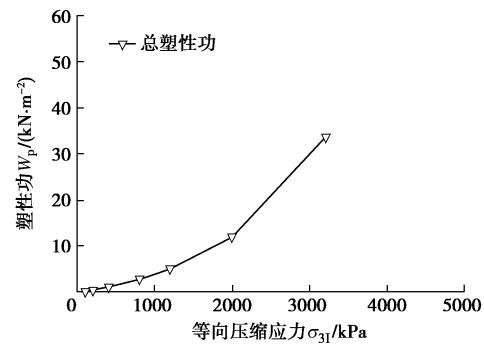


图 12 等向压缩试验 W_p 与 σ_{3I} 关系曲线

Fig. 12 Relationship between W_p and σ_{3I} of isotropic consolidation tests

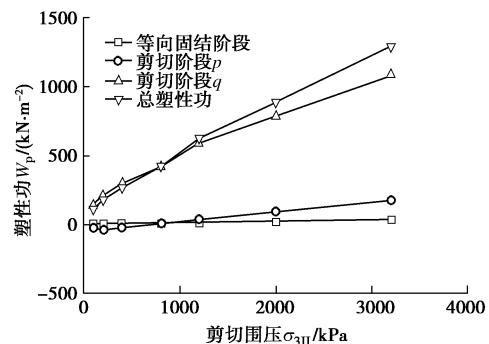


图 13 常规三轴试验 W_p 与 σ_{3II} 关系曲线

Fig. 13 Relationship between W_p and σ_{3II} of conventional triaxial tests

图 14, 15 分别为不同应力转折点围压 σ_{3III} 时加载一减载和加载一加载试验时的总塑性功 W_p 及其分量, 由曲线可以看出随着应力转折点围压的增加, 塑性功不断增加。在加载一减载试验中广义剪应力 q 所做功略大于平均应力 p 。在加载一加载试验中平均应力 p 所做功远大于广义剪应力 q 。即不同复杂应力路径下产生颗粒破碎的塑性功中 p , q 所做功占比相差较大。

3.4 不同应力路径下颗粒破碎特性与机理

由塑性功与颗粒破碎率之间的关系可知, 颗粒破碎不仅和应力状态相关, 也与应变状态相关。从细观上分析, 颗粒破碎是颗粒群之间不断咬合错动的结果。应力状态影响了咬合程度, 而应变状态则表示颗粒错动的量。

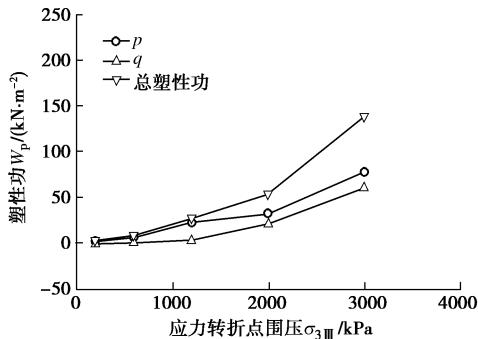
图 14 加载—减载试验 W_p 与 σ_{3III} 关系曲线

Fig. 14 Relationship between W_p and σ_{3III} of loading-unloading tests

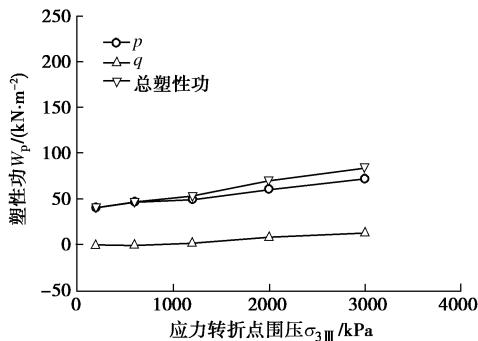
图 15 加载—加载试验 W_p 与 σ_{3III} 关系曲线

Fig. 15 Relationship between W_p and σ_{3III} of loading-reloading tests

对以上试验结果分析可知：

(1) 等向压缩试验中随着固结围压的增加颗粒咬合程度不断增加，但由于是等向压力的作用，颗粒间错动较小，所以破碎量很小。

(2) 在常规三轴试验过程中，前期的固结作用使得堆石料颗粒咬合程度提高，围压越高，咬合越充分。剪切过程则是颗粒之间不断咬合、错动、破碎的过程。由于常规三轴试验试验结束条件设为轴向应变等于 15%，所以堆石料会有充分滑移错动的过程，产生的颗粒破碎量远大其它几种应力路径。

(3) 加载—减载试验中，等比加载过程时颗粒错动较小，应力路径转折后即减载时围压不断降低，即咬合程度不断降低。在产生快速滑移错动时，由于咬合程度较低所以产生的破碎量远小于常规三轴试验。加载-加载试验与等向压缩试验类似，等比加载和再加载过程中颗粒错动量都较小，所以产生的颗粒破碎量也很小。因而，如果采用常规三轴试验模拟复杂应力路径下的颗粒破碎情况则会有较大误差。

4 结 论

堆石料具有高压易破碎的特性，目前颗粒破碎试

验研究以常规三轴试验为主，对复杂应力路径条件下的颗粒破碎特性研究较少。本文根据等向压缩、常规三轴和复杂应力路径的试验结果，研究了堆石料在多种应力路径条件下的颗粒破碎特性，可得出以下结论。

(1) 不同应力路径下颗粒破碎情况与各应力分量之间不具有唯一性关系。如在同样的围压下颗粒破碎情况也可能具有较大的差异。

(2) 多种应力路径下塑性功与相对颗粒破碎率之间存在近似唯一性关系，并可用幂函数较好拟合。即应力状态和应变状态对颗粒破碎都有较大影响。

(3) 不同应力路径下，塑性功分量之间差异明显。如等向压缩试验塑性功全部由平均应力 p 产生。常规三轴试验中广义剪应力 q 做功占总塑性功的主要部分，即颗粒破碎主要是剪应力作用下产生的滑移错动所致。而不同复杂应力路径下塑性功各部分所占比例差异性较大，即产生颗粒破碎的塑性功中 p , q 所做功占比相差较大。

(4) 模拟土石坝填筑和蓄水应力路径下的颗粒破碎量远小于常规三轴试验，破碎过程也有较大差别。即如果通过常规三轴试验研究复杂应力路径下的颗粒破碎情况存在较大误差。本文进行的试验均为饱和排水试验，并未单独考虑湿化作用。在土石坝蓄水过程中，湿化作用也是产生颗粒破碎的重要因素^[27-28]。

参 考 文 献：

- [1] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 模拟堆石料颗粒破碎对强度变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1691 - 1699.
(LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Effect of particle breakage on strength and deformation of modeled rockfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1691 - 1699. (in Chinese))
- [2] 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]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 464 - 469. (in Chinese))
- [3] 郭熙灵, 胡 辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 83 - 88.
(GUO Xi-ling, HU Hui, BAO Cheng-gang. Experimental studies of the effects of grain breakage on the dilatancy and shear strength of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 1997, **19**(3): 83 - 88. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 迟世春, 贾宇峰. 土颗粒破碎耗能对罗维剪胀模型的修正[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(11): 1266 - 1269. (CHI Shi-chun, JIA Yu-feng. Rowe's stress-dilatancy model modified for energy dissipation of particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(11): 1266 - 1269. (in Chinese))
- [6] XIAO Y, LIU H. Elastoplastic constitutive model for rockfill materials considering particle breakage[J]. International Journal Geomechanics, ASCE, 2017, **17**(1): 04016041.
- [7] XIAO Y, LIU H, et al. Effect of intermediate principal-stress ratio on particle breakage of rockfill material[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2016, **142**(4): 06015017.
- [8] 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))
- [9] GUPTA A K. Effect of particle size and confining pressure on breakage and strength parameters of rockfill materials[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **14**: 1 - 12.
- [10] 李雪梅, 李红文, 方华建. 基于大型直剪试验的粗粒料颗粒破碎对比研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **34**(增刊1): 3581 - 3587. (LI Xuemei¹, LI Hongwen¹, FANG Huajian. Comparative study of crushing of coarse-grained soils by large-scale direct shear by tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **34**(S1): 3581 - 3587. (in Chinese))
- [11] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [12] 陈生水, 傅中志, 韩华强. 一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1489 - 1495. (CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi, HAN Hua-qiang. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1489 - 1495. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] LEE K L, FARHOOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, **4**(1): 69 - 86.
- [15] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(4): 309 - 316.
- [16] 柏树田, 崔亦昊. 堆石的力学性质[J]. 水力发电学报, 1997(3): 21 - 30. (BAI Shu-tian, CUI Yi-hao. Mechanics characteristic of rock fill[J]. Hydroelectricity, 1997(3): 21 - 30. (in Chinese))
- [17] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [18] NAKATA Y, HYDE A F L, HYODO M, et al. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test[J]. Géotechnique, 1999, **49**(5): 567 - 583.
- [19] 吴京平, 褚瑶, 楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(5): 49 - 55. (WU Jing-ping, CHU Yao, LOU Zhi-gang. Influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(5): 49 - 55. (in Chinese))
- [20] 杨光. 复杂应力条件下堆石料的静动特性与本构模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. (YANG Guang. Study on Static-dynamic behavior and constitutive model of rockfill materials under complex stress conditions[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese))
- [21] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [22] EISENSTEIN Z, LAW S T C. The role of constitutive laws in analysis of embankments[C]// Proceedings of 3rd international Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Aachen, 1979.
- [23] DOLEIALOVA M, HOIENI A. A path dependent computational model for rockfill dams[C]// Proceedings of

- international symposium on Numerical Models in Geomechanics. Zurich, 1982.
- [24] 张丙印, 吕明治, 高莲士. 粗粒料大型三轴试验中橡皮膜嵌入量对体变的影响及校正[J]. 水利水电科技, 2003, 34(2): 30 - 33. (ZHANG Bing-yin, LÜ Min-zhi, GAO Lian-shi. Correction of membrane penetration in large-scale triaxial tests for granular materials[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(2): 30 - 33. (in Chinese))
- [25] XIAO Y, LIU H, et al. Bounding surface model for rockfill materials dependent on density and pressure under triaxial stress conditions[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2014, 140(4): 04014002.
- [26] XIAO Y, LIU H, et al. Bounding surface plasticity model incorporating the state pressure index for rockfill materials[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2014, 140(11): 04014087.
- [27] 殷宗泽, 赵航. 土坝浸水变形分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 1 - 8. (YIN Zong-ze, ZHAO Hang. Deformation analysis of earth dam during reservoir filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 1 - 8. (in Chinese))
- [28] ALONSO E E, OLIVELLA S, PINYOL N M. A review of beliche dam[J]. Géotechnique, 2005, 55(4): 267 - 285.

(上接第 758 页)

- [5] TOMLINSON S S, VAID Y P. Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 1 - 13.
- [6] CHANG D S, ZHANG L M, XU T H. Laboratory investigation of initiation and development of internal erosion in soils under complex stress states[C]// ICSE6 Paris. Paris, 2012: 895 - 902.
- [7] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界坡降试验研究[J]. 岩土力学, 2012(增刊 1): 73 - 78. (LUO Yu-long, WU Qiang, ZHAN Mei-li, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(S1): 73 - 78. (in Chinese))
- [8] 周健, 姚志雄, 张刚. 砂土渗流过程的细观数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 977 - 981. (ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, ZHANG Gang. Mesomechanical simulation of seepage flow in sandy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 977 - 981. (in Chinese))
- [9] 吴凤元, 梁力, 樊赟赟, 等. 基于 PFC^{3D}的无黏性土渗流临界水力梯度模拟分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015(3): 428 - 432. (WU Feng-yuan, LIANG Li, FAN Yun-yun, et al. Simulation of critical hydraulic gradient in no cohesive soil with PFC^{3D}[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015(3): 428 - 432. (in Chinese))
- [10] BOUILARD J X, LYCZKOWSKI R W, GIDASOW D. Porosity distributions in a fluidized bed with an immersed obstacle[J]. AIChE Journal, 1989, 35(6): 908 - 922.
- [11] 贝尔 J. 多孔介质流体力学[M]. 李竟生, 陈崇希, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983: 91 - 94. (JACOB BEAR. Dynamics of fluids in porous media[M]. LI Jing-sheng, CHEN Chong-xi, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983: 91 - 94. (in Chinese))
- [12] JACOB B. Hydraulics of groundwater[M]. New York: Dover Publications, McGraw-Hill, 1979.
- [13] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89 - 94.
- [14] Itasca Consulting Group Inc. PFC^{2D} particle flow code in 2 dimensions-optional features[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2005.
- [15] WEN C Y, YU Y H. "Mechanics of fluidization" the chemical engineering progress symposium series[M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1966, 162: 100 - 111.