

DOI: 10.11779/CJGE201710001

循环荷载作用下堆石料的颗粒破碎特性

韩华强^{1, 2}, 陈生水^{1, 2}, 傅 华^{1, 2}, 郑澄峰^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 通过大型动力三轴试验, 研究了循环荷载作用下堆石料的颗粒破碎特性及其影响因素, 首次根据堆石颗粒在混合料中所发挥的作用以及堆石料发生颗粒破碎后不同粒径范围颗粒含量的变化量, 将堆石料的颗粒破碎形式划分为棱角破碎和骨架破碎。进而, 基于堆石料发生颗粒破碎前后级配的分形维数定义了堆石料的颗粒破碎率, 建立了循环荷载作用下堆石料颗粒破碎率与其动剪应变及体积应变关系表达式。

关键词: 堆石料; 循环荷载; 颗粒破碎率; 影响因素

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)10-1753-08

作者简介: 韩华强(1978-), 男, 河南郾城人, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程的基本理论及工程应用等方面研究。E-mail: hqhan@nhri.cn。

Particle breakage of rockfill materials under cyclic loadings

HAN Hua-qiang^{1, 2}, CHEN Sheng-shui^{1, 2}, FU Hua^{1, 2}, ZHENG Cheng-feng^{1, 2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210024, China)

Abstract: Through lab dynamic tri-axial tests on rockfill materials, the characteristics of particle breakage and its influence factors under cyclic loadings are studied. Considering the variable quantity of different ranges of particle size after grain crushing, the particle breakage form of rockfill is differentiated as angular crushing and skeleton crushing in view of the roles that the rockfill particles play in the mixture for the first time. Incorporation with the fractal theory, the broken rate of rockfill is defined as the variable of the fractal dimension of aggregate gradation, which can be obtained by the fractal dimension of aggregate gradation before and after particle breakage. Furthermore, the relationship among the broken rate, the shear strain and the dynamic volume change of rockfill materials is established.

Key words: rockfill material; cyclic loading; broken rate of particle; influence factor

0 引言

堆石料具有压实性能好、填筑密度大、沉陷变形小、透水性强以及抗剪强度高等工程特性, 被广泛应用于土石坝、公路、铁路、机场、堤坝、房屋地基等建筑工程中。堆石料在高应力水平下容易发生颗粒破碎, 颗粒破碎直接改变堆石体结构, 对其峰值强度、内摩擦角、剪胀性、渗透系数等工程特性均产生明显影响。随着高土石坝坝高的不断增加, 作为主要筑坝材料的堆石料承受的应力也越来越大, 堆石料的颗粒破碎现象则愈加显著。围绕堆石料的颗粒破碎特性及其影响因素、颗粒破碎的度量方法、颗粒破碎对强度与变形特性的影响, 国内外学者开展了大量卓有成效的研究工作^[1-9]。然而当前关于堆石料颗粒破碎特性的研究成果只适用于某一特定条件(如单一孔隙比、单一加载路径), 并不能较好地反映复杂条件下堆石料颗粒破碎的变化规律^[10]。

陈生水等^[11]关于堆石料颗粒破碎特性的研究表明: 堆石料在不等向固结、静力三轴剪切和振动三轴试验过程中均产生明显的颗粒破碎, 颗粒破碎率的大小与堆石料的母岩、级配以及围压等因素相关。循环荷载作用下颗粒破碎对堆石料的强度和变形特性有重要影响^[12], 研究堆石料在循环荷载作用下的颗粒破碎特性, 是建立合理反映堆石料在循环荷载作用下动力本构模型的重要基础, 基于此, 本文采用大型静动三轴仪, 系统研究了级配、围压及动应力对堆石料颗粒破碎的影响, 分析了堆石料不同的颗粒破碎形式, 重新定义了堆石料的颗粒破碎率, 并建议了循环荷载下堆石料颗粒破碎率与动剪应变及体变的关系表达式。

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215301); 国家自然科学基金重点项目(51539006); 国家自然科学基金青年基金项目(51309161)

收稿日期: 2017-01-06

1 试验方案及试验过程

1.1 试样制备

试样尺寸均为 $\phi 300 \times 700$ mm, 所用堆石料均处于自然风干状态, 分 60~40 mm, 40~20 mm, 20~10 mm, 10~5 mm, 5~0 mm 5 种粒径范围进行制备。试样制好后采用水头饱和法自下而上进行饱和, 然后按不同的初始试验条件开展不同加载条件下的动力特性试验研究。本次试验共进行了 2 组 60 个试样的循环荷载三轴试验, 试样基本物性指标见表 1。

表 1 试样基本物性指标

Table 1 Basic physical property indices of rockfill

试样 编号	岩性	最小	最大	制样	孔隙率 %
		比重	干密度 $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干密度 $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	
D1	英安岩	2.71	1.59	2.17	20
D2			1.54	2.11	22

1.2 试验过程

试验均采用大型静动力三轴试验系统 (TYD-1500 型), 试验围压 σ_3 共分 5 级, 分别为 400, 800, 1200, 2000 和 3200 kPa, 输入波形采用正弦波。为了使试样在振动过程中有充分的时间进行排水, 试验振动频率采用 0.1 Hz^[13], 试验固结应力 K_c 分别为 1.5 和 2.0, K_c 为 1.5 时动应力 σ_d 分别为 $\pm 0.3 \sigma_3$, $\pm 0.5 \sigma_3$ 及 $\pm 0.8 \sigma_3$, K_c 为 2.0 时动应力分别为 $\pm 0.3 \sigma_3$, $\pm 0.6 \sigma_3$ 及 $\pm 1.0 \sigma_3$ 。参考 Seed 对地震等效振次的定义, 各级轴向动应力施加 30 振次, 典型动体变、动应变与振次试验曲线见图 1。试验完成后, 对试样重新进行颗粒分, 筛分粒径同样按 60~40 mm, 40~20 mm, 20~10 mm, 10~5 mm, 5~0 mm 五种粒径范围, 试验前及试验后的部分级配曲线见图 2。

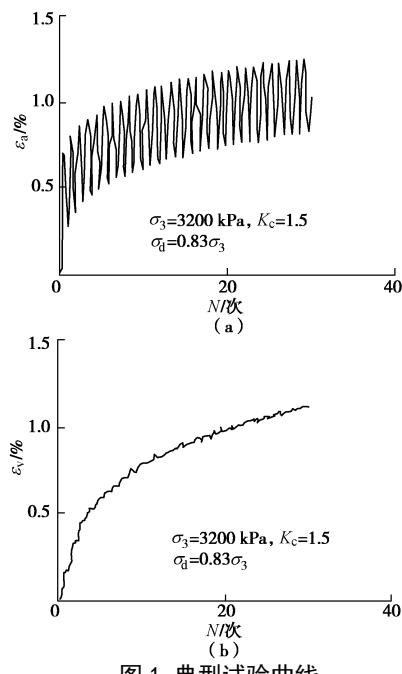


图 1 典型试验曲线

Fig. 1 Typical test curves

由图 2 可以看出, 循环荷载试验结束后, 堆石料各粒组含量均相应发生不同程度改变, 表现为随围压、固结应力及动应力的增大, 堆石料粗颗粒逐渐减少而小于 5 mm 的细料逐渐增多, 试验后堆石料级配曲线较试验前初始级配曲线不断上移, 表明在不同循环应力条件下堆石料均发生了颗粒破碎, 图 3 给出了部分试验后不同粒径范围堆石料含量相对初始含量的变化柱状图。

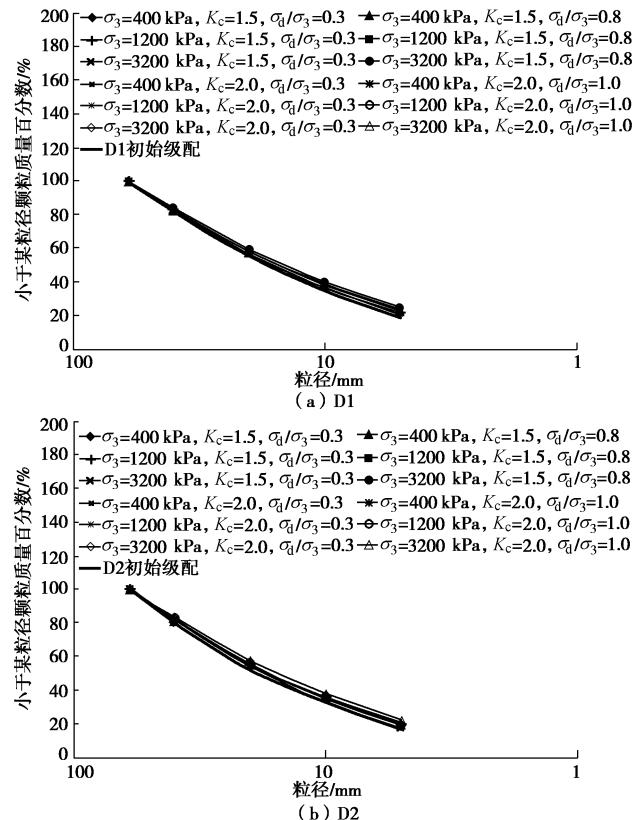


图 2 循环荷载试验前后级配曲线对比

Fig. 2 Comparison of gradation curves of cyclic load tests before and after cyclic loadings

本次试验 D1 试样级配中小于 5 mm 含量为 19.3%, D2 试样级配中小于 5 mm 细料含为 17.0%, 级配差异导致小于 5 mm 细颗粒对堆石料骨架的填充作用不同, 虽然 D1 及 D2 母岩性质相同, 但由于 D1 较 D2 有相对较多的细料含量, 细颗粒能较好的充填到骨架孔隙中, 因此在相同振动功率下 D1 较 D2 具有更大的室内最大干密度。

图 3 表明, 与 D2 相比, D1 试样 40~60 mm 粒组的减少量明显小于 D2, 而 D1 中小于 5 mm 细料含量的增加量相应高于 D2; 除小于 5 mm 细料含量显著增加外, D1 其它各粒组含量均发生了不同程度减少, 而 D2 除小于 5 mm 细料含量显著增加外, 10~20 mm 粒组也发生了明显增加, 由此表明 D1 及 D2 在循环荷载作用下虽然均发生了颗粒破碎, 但二者颗粒发生破

碎的方式并不相同。

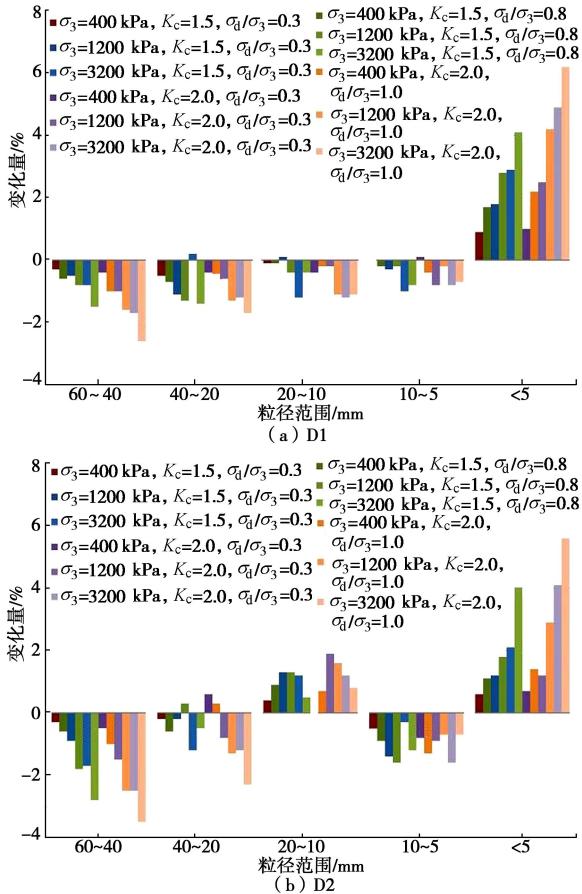


图 3 不同粒径范围相对初始级配的柱状变化图

Fig. 3 Change of columns relative to initial gradation under different grain sizes

从试验结果来看, 在低围压、低固结应力及低动应力等较低应力状态下, 由于堆石料所承受的荷载不大, 不足以导致堆石料发生明显的颗粒破碎, 因此 D1 及 D2 试验后的残余轴向动变形及残余动体积变形量大致相当, 从试验后筛分结果也表明二者的破碎量几乎相同; 但随着围压、固结应力及动应力的增大, 堆石料所承受的荷载逐步增大, 此时, 由于细颗粒的填充作用, 级配较优的 D1 细颗粒更多的分担了骨架承受的荷载, 因而不容易发生显著的大颗粒破碎, 相对于 D1, D2 细粒含量较少, 细颗粒对荷载的分担作用不如 D1, 粗颗粒孔隙间的架空现象较 D1 明显, 导致粗颗粒骨架分担的荷载相应较大, 因而更容易发生大颗粒的破碎现象。从试验后筛分结果来看, 虽然筛分后的颗粒破碎量相当, 但具体的破碎形式却并不相同, 如图 3 所示, D1 基本上表现为大颗粒的减小以及小于 5 mm 细颗粒增多, 而 D2 则除小于 5 mm 细粒含量增多外, 也表现出了中间 10~20 mm 粒径的增加。

针对散粒体材料的颗粒破碎, Guyon 认为可分为破裂、破碎及研磨 3 种破碎形式, 沈珠江则从受力模

式出发将破碎分为压碎、剪裂和弯裂 3 种模式^[14], 显然上述分类都是从试验后堆石颗粒的破碎形式来加以归类。如果从堆石颗粒在混合料中所发挥的作用来看, 堆石颗粒的压碎、剪裂和弯裂或者破裂、破碎均属于混合料的骨架发生破碎, 而研磨则对应于骨架发生了棱角破碎。显然棱角破碎主要是由于堆石体在受力过程中发生滑移、错动等颗粒重组所导致的, 这种破坏方式不涉及颗粒的内部变形, 更多的表现为堆石料逐级破碎以及小于 5 mm 细料的显著增加; 骨架破碎更多的是由于混合料中堆石颗粒所分担的荷载超出了堆石母岩的抗压或抗剪强度, 由此所引起的堆石颗粒自身破裂、剪裂和弯裂或者破裂、破碎, 更多的表现为堆石料中间粒径含量以及小于 5 mm 细料含量的显著增加。据此 D1 及 D2 应分别对应堆石料的棱角破碎为主和骨架破碎为主两种破碎方式。

显然, 围压越低, 固结应力越低、动应力越低, 母岩强度越高, 堆石料更多的表现为棱角破碎; 反之, 围压越高, 固结应力越高、动应力越高, 母岩强度越低, 堆石料更多的表现为骨架破碎。

试验结果表明, 对于同一种母岩材料, 在上述相同的试验条件下, 经受循环荷载作用的堆石料的颗粒破碎量几乎相同, 但堆石料的破碎形式并不一致。显然这是由于级配差异所导致的, D1 细颗粒含量较多, 相对于 D2 细颗粒对于大颗粒具有较好的填充作用, 分担了更多的骨架应力, 使得试样变形更多的表现为颗粒滑移, 从而导致堆石料产生棱角破碎, 相反 D2 则更多的反映出骨架破碎的特性。由此表明: 级配越细, 越优, 细颗粒的填充作用越好, 堆石料在受力过程中更多的表现为棱角破碎, 随着级配曲线下移, 细粒含量降低, 细颗粒对于应力的分担作用减弱, 骨架分担的应力越来越大, 堆石料由以棱角破碎为主向骨架破碎转移, 对应堆石体的体积变形剪胀作用受到抑制, 而更多的表现为剪缩, 应力应变曲线相应的由剪切软化向剪切硬化过渡。

2 循环荷载作用下堆石料的颗粒破碎分析

2.1 堆石料颗粒破碎的度量

为了描述堆石料破碎的程度, 一些专家学者定义了破碎参数来衡量堆石料的颗粒破碎。如 McDowell 等^[15]通过建立分形几何模型来描述颗粒的破坏应力, 并根据最小颗粒的破坏应力和当前荷载计算堆石料的颗粒破碎率; Hardin^[16]则将级配曲线与 0.074 mm 线围成的面积定义为堆石料的破碎势, 并将堆石料试验前后破碎势的变化值定义为整体破碎参数。Marsal^[17]将

试验后堆石料级配曲线在某一筛分粒径上对应的百分含量减去试验前的级配曲线在对应粒径上的百分含量，并将该变化量正值之和定义为破碎参量。

目前，Marsal 提出的堆石料的颗粒破碎得到了广泛的应用，图 4 分别给出了不同围压不同固结应力比条件下堆石料 D1 及 D2 试样的 Marsal 破碎率随动应力变化曲线，从图 4 可以看出：随围压升高、固结应力及动应力增大，Marsal 定义的堆石料的破碎率均明显增大，从量值上看，D1 及 D2 基于破碎率的结果基本接近，很难反映出 D1 棱角破碎而 D2 骨架破碎的特性，更为重要的是也很难反映出堆石料发生颗粒破碎后级配调整的特征，显然，单纯某一粒径范围破碎量的叠加并不能很好反映堆石料的颗粒破碎特性，尤其是不能反映堆石料不同粒径范围破碎形式并不相同的特点，也很难反映出级配不同对于堆石料颗粒破碎影响不同的特点。颗粒破碎具体表现为不同粒径范围堆石料含量的变化，宏观上表现为级配的调整，当前常用的破碎率已很难反映循环荷载作用下堆石料级配的调整。有必要结合堆石料的级配曲线定义可反映堆石破碎导致堆石料级配曲线发生调整的新的破碎率。

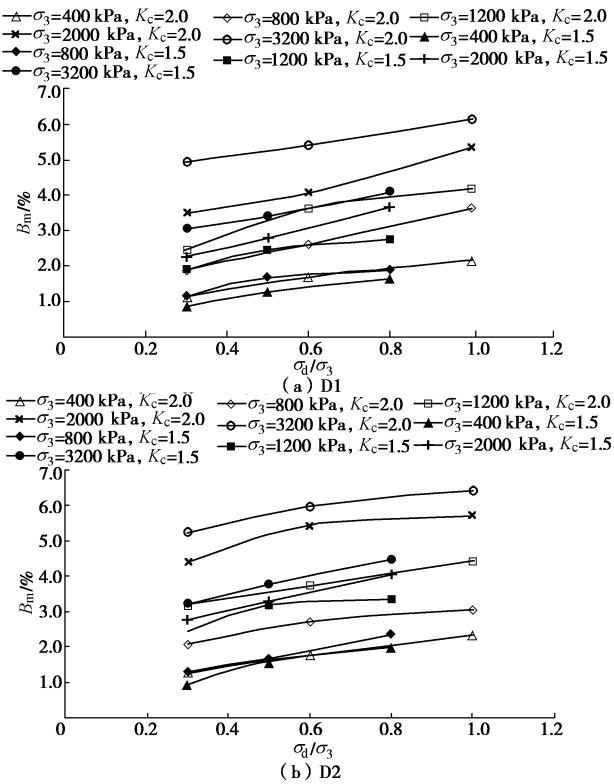


图 4 Marsal 颗粒破碎率随动应力变化图

Fig. 4 Relationship of variation of Marsal's particle breakage rate with dynamic stress

2.2 以分形维数的变化来定义堆石料的破碎率

堆石料的分形模型^[18-19]可以表示为

$$P(d_i) = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D}, \quad (1)$$

其中， $P(d_i)$ 为小于 d_i 粒径的颗粒质量， d_{\max} 为粒组内最大粒径。

由此可以得到循环荷载试验后不同围压、不同动应力条件下堆石料的级配分形维数如图 5 所示，由图 5， D_r 增大，级配曲线上移，粗颗粒材料发生颗粒破碎，相对堆石料初始分形维数，试验后堆石料的分形维数持续增大，一方面反映了堆石料持续破碎的特性，另一方面也反映了堆石料级配的调整。

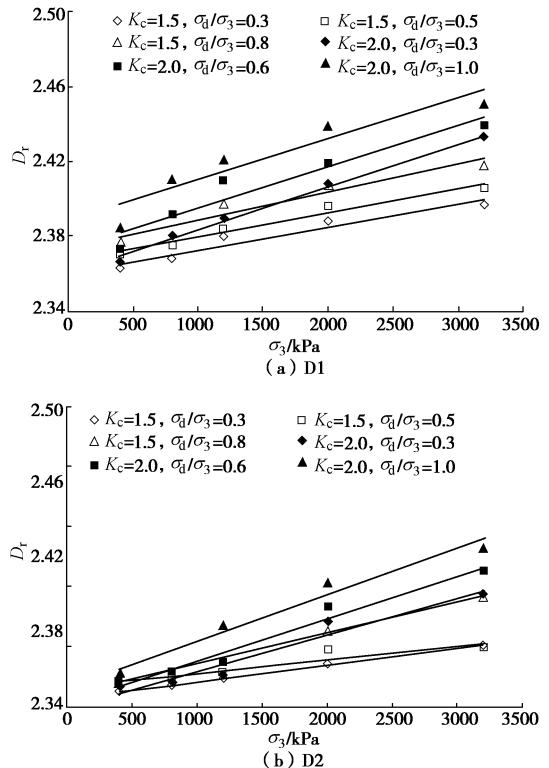


图 5 循环荷载试验后分形维数随围压变化图

Fig. 5 Relationship between fractal dimension and dynamic stress after cyclic loading tests

显然试验前后堆石料分形维数的变化可以反映堆石料级配调整的特性，不同的级配曲线本身也已包含了堆石料不同的破碎形式，且与初始分形维数相比，堆石料新的级配曲线由于颗粒破碎导致分形维数持续增大，因此以发生颗粒破碎后新的级配的分形维数减去堆石料初始级配的分形维数 D_0 ，可以作为堆石料发生颗粒破碎后的破碎率，即

$$D_m = D_r - D_0, \quad (2)$$

式中， D_0 为试验前堆石料级配的初始分形维数， D_r 为试验后堆石料发生颗粒破碎后级配分形维数， D_m 为以分形维数表示的堆石料的颗粒破碎率。表 2 给出了以分形维数表示的堆石料颗粒破碎率。

从表 2 可见，随围压、固结应力比、动应力增长，堆石料的颗粒破碎相应增长并呈非线性增长，反之，堆石料的颗粒破碎量相应降低。

表 2 循环荷载试验后堆石料的颗粒破碎率 D_m
Table 2 Values of broken rate D_m of rockfill after cyclic loading tests

试样编号	K_c	D1					D2				
		围压/kPa					围压/kPa				
σ_d/σ_3	400	800	1200	2000	3200	400	800	1200	2000	3200	
1.5	0.3	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04
	0.5	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04
	0.8	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.02	0.02	0.03	0.05	0.07
2.0	0.3	0.02	0.04	0.04	0.06	0.09	0.01	0.02	0.02	0.06	0.07
	0.6	0.03	0.05	0.06	0.07	0.09	0.02	0.02	0.03	0.07	0.09
	1.0	0.04	0.07	0.08	0.09	0.11	0.02	0.03	0.05	0.08	0.11

2.3 循环荷载作用下堆石料的颗粒破碎率

循环荷载作用下, 堆石料的颗粒破碎与其最终的体积变形、剪切变形及轴向变形密切相关, 随堆石料累积残余变形的增大而增大。循环荷载作用下, 堆石料的累积残余变形包括累积轴向变形、累积体积变形以及累积剪切变形, 以累积最大变形做为堆石料最终的动残余变形。因此有

$$D_m = f(\varepsilon_{vmax}, \gamma_{dmax}, \varepsilon_{dmax}) \quad , \quad (3)$$

式中, ε_{vmax} 为循环荷载作用下累积动体应变, γ_{dmax} 为累积动剪应变, ε_{dmax} 为累积动应变。

堆石料的动剪应变 γ_d 和动应变 ε_d 之间有如下关系:

$$\gamma_d = (1 + v_d) \varepsilon_d \quad . \quad (4)$$

堆石料的动泊松比 v_d 一般在 0.3~0.4 之间变化, 本文取为 0.33。由此, 式(3)可以简化为

$$D_m = f(\varepsilon_{vmax}, \gamma_{dmax}) \quad . \quad (5)$$

进一步以幂函数来拟合堆石料破碎率与剪应变及动体变关系有

$$D_m \times \varepsilon_{vmax} = c_1 (\gamma_{dmax})^{c_2} \quad . \quad (6)$$

点绘不同围压、不同固结应力比及不同动应力条件下堆石料的颗粒破碎率与剪应变及动体变关系曲线如图 6 所示, 由此可以拟合得到相应模型参数如表 3 所示。

从图 6 可以看出, 围压越大, 动应力越高, 堆石料的动残余变形越大, 颗粒破碎率越大, 在根据试验结果分析堆石料的颗粒破碎特征时应充分考虑不同试验条件下堆石料的变形对颗粒破碎的影响。

由表 3 可以看出, 当围压及动应力较小时, 堆石料的动剪应变相应较小, 此时, 堆石料更多的表现出棱角破碎的特性, 由于 D2 中粗颗粒相对较多, 因此 D2 中粗颗粒堆石料所发挥的骨架作用相对优于 D1, 导致 D2 的颗粒破碎相对较低, 表现在参数上即对应 D2 的 c_1 值较 D1 小, 表明以分形维数表示的 D2 的破碎率小于 D1, 但随着围压及动应力增大, 堆石料的动

剪应变相应增大, 堆石料的颗粒破碎由棱角破碎向骨架破碎转移, D1 级配较优的特性逐步得以体现, D2 的破碎率逐渐增大并超过 D1, 由此表现在参数上即为 D2 的指数 c_2 大于 D1, 表明以分形维数表示的 D2 的破碎率大于 D1。

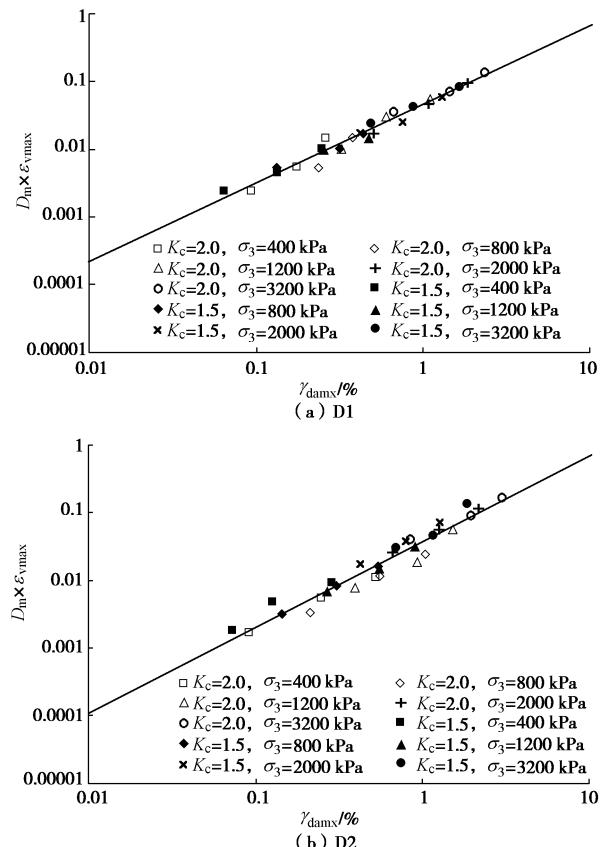


图 6 D_m 拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of D_m

表 3 D1 及 D2 试验拟合参数表

Table 3 Fitting parameters of D1 and D2

试验编号	$c_1/\%$	c_2
D1	0.0465	1.158
D2	0.0378	1.268

表 4 验证试验基本参数及拟合参数表

Table 4 Basic and fitting parameters of verification tests

试样编号	母岩	最小干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最大干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	制样干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	制样孔隙率	c_1 /%	c_2
T1	弱风化花岗岩	1.74	2.21	2.03	24.0	0.0214	1.632
T2	弱风化砂泥岩	1.73	2.23	2.21	20.5	0.0504	1.510
T3	强风化花岗岩	1.61	2.14	2.14	20.5	0.1165	1.052
T4	弱风化花岗岩	1.69	2.17	2.00	25.0	0.0225	1.739

3 以分形维数变化表示破碎率的验证

为验证本文建议的堆石料破碎率表达式及其拟合参数并分析级配、密度及母岩对堆石料颗粒破碎的影响, 本文挑选了 3 种堆石料, 进行了 3 种级配共 4 组试验总计 72 个试样进行相应的试验验证。试验条件及筛分粒径同前, 试验围压 σ_3 共分 3 级, 分别为 400, 1100 和 2200 kPa, 输入波形采用正弦波。试验振动频率采用 0.1 Hz, 试验固结应力 K_c 分别为 1.5 和 2.5, 两种固结应力条件下动应力 σ_d 均为 $\pm 0.3 \sigma_3$ 、 $\pm 0.6 \sigma_3$ 及 $\pm 0.9 \sigma_3$, 各级轴向动应力施加 30 振次。试验选用堆石料分别为弱风化花岗岩、弱风化砂泥岩及强风化花岗岩, 试验级配如图 7 所示, 为对比母岩影响, 其中 T2 及 T3 选用相同级配, 试验编号、控制指标及相应岩性及拟合结果如表 4 所示, 拟合试验结果如图 8 所示。

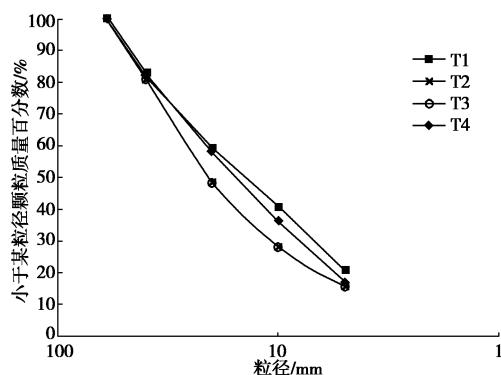


图 7 验证试验级配曲线
Fig. 7 Grading curves of verification tests

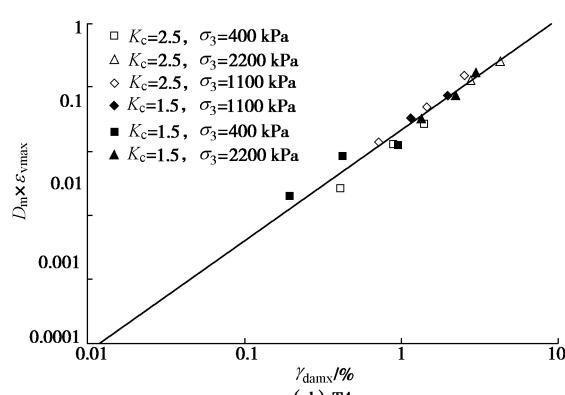
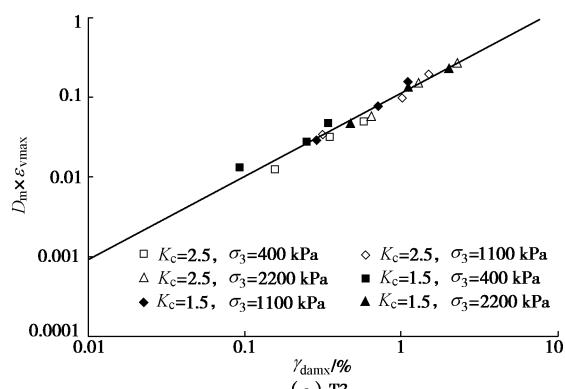
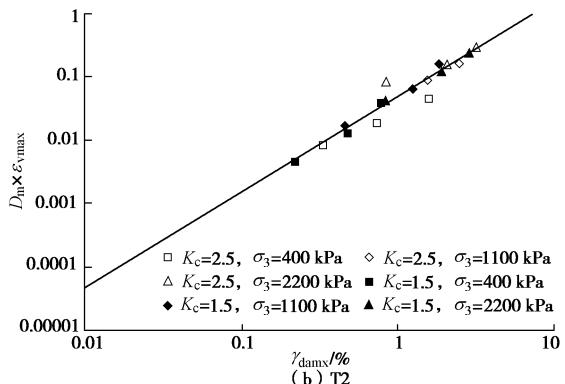
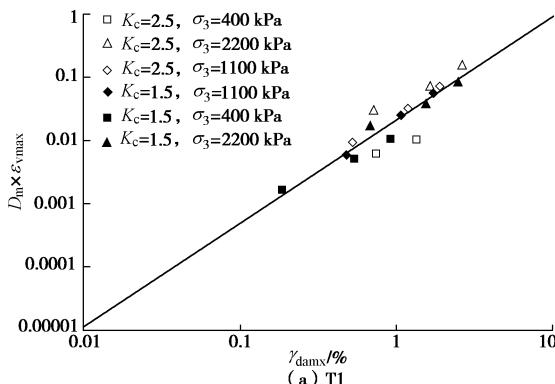


图 8 验证试验 D_m 拟合曲线
Fig. 8 Fitting curves of D_m from different verification tests

试验结果表明, 本文基于分形维数变化定义的堆石料的颗粒破碎率及建议的破碎率经验表达式可以反映堆石料的颗粒破碎特性。

3.1 级配影响

T1 及 T4 母岩均为弱风化花岗岩, T1 试样级配中

小于 5 mm 含量为 21.0%, T4 试样级配中小于 5 mm 细料含为 17.1%, 由相对密度试验结果, T1 具有室内最大干密度, 表明 T1 相对 T4 级配较优。与 D1 及 D2 试验结果相似, 当围压及动应力较小时, 堆石料的动剪应变相对较小, 此时, 堆石料更多的表现出棱角破碎的特性, 但由于二者的孔隙率较大, 密实度相对较低, T4 中粗颗粒堆石料的骨架作用发挥不明显, 导致 T4 的颗粒破碎高于 T1, 表现在参数上即对应 T4 的 c_1 值较 T1 大, 表明以分形维数表示的 T4 的破碎率大于 D1, 同时, 随着围压及动应力增大, 堆石料的动剪应变相应增大, 堆石料的颗粒破碎由棱角破碎向骨架破碎转移, T1 级配较优的特性进一步得到体现, T4 的破碎率进一步增大, 由此表现在参数上即为 T4 的指数 c_2 同样大于 T1, 表明以分形维数表示的 T4 的破碎率大于 T1。

结合 D1 及 D2 的试验结果可以得出如下结论, 相同母岩条件下, 应力越低、堆石料的变形越小, 级配优劣对堆石料颗粒破碎的影响越不明显, 而主要受堆石料粗颗粒骨架作用强弱的影响, 堆石料的骨架作用发挥的越强, 堆石料的颗粒破碎率越低, 相应的模型参数 c_1 越小, 反之堆石料的颗粒破碎率越高, 相应的模型参数 c_1 越大。而应力越高、堆石料的变形越大, 堆石料的颗粒破碎率越高, 相应的级配优劣对堆石料颗粒破碎的影响越明显, 表现为级配越粗, 细颗粒对粗颗粒的填充作用越弱, 相对分担的应力越小, 堆石料的颗粒破碎率越高, 相应模型参数 c_2 越大, 反之则越小。

3.2 母岩影响

T2 及 T3 具有相同的级配特征, 试验孔隙率均为 20.5%, T2 堆石料母岩为弱风化砂泥岩, 其单轴抗压强度为 30~55 MPa, T3 堆石料母岩为强风化花岗岩, 单轴抗压强度为 17~28 MPa, T2 堆石料母岩性略优于 T3 堆石料, 由表 4, T2 的 c_1 为 0.0504, T3 的 c_1 为 0.1165, 表明由于母岩岩性较差, 当围压及动应力较小时, T3 的破碎率即显著大于 T2 的颗粒破碎率。随剪应变发展, 虽然 T3 的破碎率仍大于 T2 的破碎率, 但破碎率增量 T3 小于 T2, 表现在参数上即为 T3 的指数 c_2 小于 T2, 表明随剪应变发展, 堆石料的颗粒破碎不会持续发展, 而表现出颗粒破碎随应变发展而收敛的特征, 这也与文献[11]的研究成果相一致。

4 结 论

采用大型静动三轴仪, 系统研究了堆石料级配、母岩、围压及动应力对其颗粒破碎的影响, 得出结论如下:

(1) 根据堆石颗粒在堆石混合料中所发挥的作用, 堆石料的颗粒破碎可以分为棱角破碎和骨架破碎。棱角破碎主要由于堆石体在受力过程中发生滑移、错动等颗粒重组所导致的, 这种破坏方式不涉及颗粒的内部变形, 更多的表现为堆石料逐级破碎以及小于 5 mm 细料的显著增加; 而骨架破碎主要是由于混合料中堆石颗粒所分担的荷载超出了堆石母岩的抗压或抗剪强度, 由此所引起的堆石颗粒自身破裂、剪裂和弯裂或者破裂、破碎, 更多的表现为堆石料中间粒径含量以及小于 5 mm 细料含量的显著增加。

(2) 围压越低、固结应力越低、动应力越低, 母岩强度越高、级配越优、堆石料粗细颗粒的充填关系越好, 循环荷载作用下堆石料的颗粒破碎量越小, 堆石料更多的表现为棱角破碎; 反之, 循环荷载作用下堆石料的颗粒破碎量越大, 堆石料更多的表现为骨架破碎。

(3) 结合分形理论, 以发生颗粒破碎后新的级配的分形维数减去堆石料初始级配的分形维数重新定义了堆石料的颗粒破碎率 D_m , $D_m = D_r - D_0$, 并以幂函数建立了堆石料破碎率与动剪应变及体变的关系式。

(4) 结合本文建议的堆石料破碎率关系式研究了级配对堆石料颗粒破碎的影响, 发现在较低应力条件下, 堆石料级配优劣对其颗粒破碎的影响不明显, 而是随堆石料骨架作用的强弱呈规律性变化, 堆石料骨架作用越强, 颗粒破碎率越低, 相应的模型参数 c_1 越小, 反之则越大; 应力越高, 级配优劣对堆石料颗粒破碎的影响越明显, 表现为级配越粗, 细颗粒对粗颗粒的填充作用越弱, 相对分担的应力越小, 堆石料的颗粒破碎率越高, 相应模型参数 c_2 越大, 反之则越小。

(5) 母岩对堆石料颗粒破碎影响的试验结果表明: 相同条件下, 堆石料的母岩岩性越差, 堆石料的颗粒破碎率越大, 但颗粒破碎随应变发展呈现收敛的特征。

参考文献:

- [1] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[C]// Proceedings of Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. London, 1962: 500~527.
- [2] 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-gan. 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))
- [3] 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))
- [4] 刘松玉, 童立元, 邱任, 等. 煤研石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 505 - 510. (LIU Song-yu, TONG Li-yuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 505 - 510. (in Chinese))
- [5] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [6] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊): 661 - 665. (ZHANG Jia-ming, WANG Ren, ZHANG Yang-ming, et al. Advance in studies of soil grain crush[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S0): 661 - 665. (in Chinese))
- [7] 贾宇峰. 考虑颗粒破碎的粗粒土本构关系研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (JIA Yu-feng. Coarse granular soil constitutive model incorporating particle breakage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [8] FRAGASZY R J, VOSS M E. Undrained compression behavior of sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **112**(3): 334 - 347.
- [9] 蒙进, 屈智炯. 高压下冰砾土的颗粒破碎及应力应变关系[J]. 成都科技大学学报, 1989, **43**(1): 17 - 22. (MENG Jin, QU Zhi-jiong. Stress-strain behavior of glacial till under high confining pressure[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1989, **43**(1): 17 - 22. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 陈生水, 韩华强, 傅华. 循环荷载作用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 loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1151 - 1157. (in Chinese))
- [12] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 循环荷载作用下考虑颗粒破碎的堆石体本构模型[J]. 岩土力学, 2012, **33**(7): 1972 - 1978. (LIU En-long, CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, et al. A constitutive model for rockfill materials incorporating grain crushing under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(7): 1972 - 1978. (in Chinese))
- [13] 陈生水, 沈珠江. 堆石坝的地震永久变形分析[J]. 水利水运科学研究, 1990, **9**(3): 277 - 286. (CHEN Sheng-shui, SHEN Zhu-jiang. Analysis of seismic permanent deformation of rock fill dam[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1990, **9**(3): 277 - 286. (in Chinese))
- [14] 余村. 基于Cosserat连续体模型的颗粒材料宏细观力学行为数值模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (YU Cun. Simulation of macro-meso mechanical behaviors for granular materials based on cosserat continuum model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))
- [15] MEDOWELL G R, BOLTON M D. On the micromechanics of crushable aggregates[J]. Géotechnique, 1998, **48**(5): 667 - 679.
- [16] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [17] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [18] 朱晟, 邓石德, 宁志远, 等. 基于分形理论的堆石料级配设计方法[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(6): 1151 - 1155. (ZHU Sheng, DENG Shi-de, NING Zhi-yuan, et al. Gradation design Method of rockfill materials based on the fractal theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(6): 1151 - 1155. (in Chinese))
- [19] 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))