

人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究

孔德志, 张丙印, 孙 逊

(清华大学水利水电工程系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 高应力作用下堆石料的颗粒破碎严重, 其对堆石体变形的影响不可忽视。采用水泥净浆浇筑不同粒径和不同强度椭圆颗粒的方法, 探讨了一种人工模拟堆石料的制备方法。通过系列的三轴试验研究了不同破碎率情况下模拟堆石料应力变形和破碎体应变的特性。结果表明, 试验中相对破碎率同颗粒强度和围压力的相对大小直接相关。颗粒破碎对堆石体的应力应变特性具有十分重要的影响。堆石体的破碎体应变均为正值, 且随轴向应变的增加而增大, 两者近似呈双曲线关系。破碎体应变和破碎率之间存在近似的幂函数关系。

关键词: 人工模拟堆石料; 颗粒破碎; 破碎体应变; 剪胀性

中图分类号: TU521

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)03-0464-06

作者简介: 孔德志(1978-), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 主要从事岩土材料本构关系方面的研究。E-mail: kdz04@mails.tsinghua.edu.cn。

Triaxial tests on particle breakage strain of artificial rockfill materials

KONG De-zhi, ZHANG Bing-yin, SUN Xun

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Particle breakage of rockfill materials is serious under high pressure, and its influence on deformation of rockfill cannot be ignored. A method is presented to make artificial rockfill materials with ellipse-shaped particles, which are moulded in various sizes and strengths with cement pastes. Based on a series of triaxial tests, the behaviour of stress-strain and breakage volumetric strain of artificial rockfill materials is analyzed. The test results show that the relative breakage is correlative to the particle strength and confining pressure. The stress-strain behaviour of rockfill is seriously influenced by the particle breakage. The breakage volumetric strain of rockfill is positive and increases with the increase of axial strain in a trend of hyperbolic curve. The relationship between the breakage volumetric strain and the relative breakage can be fitted by a power function.

Key words: artificial rockfill material; particle breakage; breakage volumetric strain; dilatancy

0 前 言

堆石料被广泛应用于水利、港口、交通等岩土工程的建设。堆石料多由人工爆破开采, 具有许多天然的肉眼无法看到的潜在缺陷, 在高应力作用下, 堆石料的颗粒破碎现象通常会很严重。近年来, 随着高土石坝工程的不断兴建, 使得高压下堆石料颗粒破碎现象日益突显, 并越来越受到重视^[1-4]。

目前, 针对颗粒破碎的研究工作主要针对天然堆石料展开。但天然堆石料试验存在颗粒破碎不易控制和颗粒破碎率不能准确确定等困难, 使得很难进行定量的研究工作。

本文尝试采用水泥净浆浇筑4种不同粒径水泥椭圆颗粒的方法, 探讨了一种制备人工模拟堆石料的方法。通过调节水灰比和龄期控制水泥球的颗粒强度, 从而可以实现在同样应力条件下, 控制不同颗粒破碎率的目的。采用上述方法制备的人工模拟堆石料, 进

行了多组常规三轴排水剪切试验, 对堆石料的颗粒破碎应变进行了系统的试验研究。

1 试验方法

1.1 试验材料和试样制备

制备水泥椭圆颗粒的材料包括: 标号为P42.5的普通硅酸盐水泥、挪威EIKEM公司生产的硅粉和日本进口的聚羧酸高效减水剂等。采用自制的有机玻璃模具, 制备了4种粒径的椭圆颗粒(图1), 椭圆的3个轴长比分别为9:9:12、12:12:16、15:15:20和21:21:28(单位:mm)。

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江联合基金项目(50639060);

国家自然科学基金项目(50879040); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060003040)

收稿日期: 2008-02-19

制备水泥椭球颗粒的过程为：①按照表 1 的制备方案配制水泥净浆，用搅拌机搅拌均匀；②倒入有机玻璃模具（图 1），让水泥净浆填满模具中的半椭圆形凹槽，保持净浆平面高出模具平面 5 mm 左右；③将两块有机玻璃模具放在震动台上震动 10 min，使水泥净浆密实；④静置一定的时间，待水泥净浆呈塑性，然后将一块模具反扣在另一块上，挤掉模具间多余的水泥净浆，在模具的 4 个角上用定位插销定位并用夹具夹紧；⑤在标准养护室养护 24 h 后拆模，取出已成形硬化的水泥椭球颗粒，按照表 1 不同方案在养护室中养护到规定的时间。

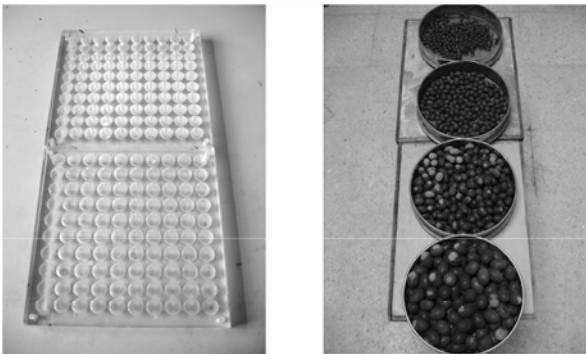


图 1 有机玻璃模具和制成的水泥椭球颗粒
Fig. 1 Organic glass mould and cement ball

按照上述制备程序还分别制备了 5 组标准立方体水泥试块（70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm），分别进行了抗压强度试验，具体数值见表 1。试验结果表明，人工模拟堆石料在颗粒强度和模量方面类似土石坝工程中常用的中硬岩石或硬质岩石。

表 1 人工材料的制备方案

Table 1 Preparation schemes of artificial materials							
方 案	水泥 /kg	硅粉 /kg	水 /kg	减水 剂/g	龄期 /d	水灰质 量比	抗压强 度/MPa
1	1.784	0.223	0.343	80.3	28	0.20	105
2	1.784	0.223	0.343	80.3	7	0.20	100
3	1.642	0.206	0.421	27.7	3	0.24	80
4	1.642	0.206	0.421	27.7	1	0.24	60
5	1.420	0.178	0.553	10.7	1	0.35	30

1.2 试验方案和过程

对上述 5 种颗粒强度的水泥椭球人工模拟堆石料进行了系列的常规三轴固结排水试验，统计分析了试验中颗粒的破碎情况。进行了完整和过程两大类型试验。

完整试验指剪切到轴向应变 $\varepsilon_1=15\%$ 的试验。试验完成后，对试样进行烘干和筛分，并数出每种粒径剩余的完整颗粒数。对表 1 中 5 种颗粒强度的人工模拟堆石料均进行了 5 个围压： $\sigma_3=100, 200, 400, 800,$

1200 kPa 的完整试验。另外，对抗压强度 $f_c=105$ MPa 和 $f_c=30$ MPa 两种颗粒强度的模拟堆石料还增加了 $\sigma_3=50, 150$ kPa 两个围压。完整试验主要用于研究试验结束时颗粒的破碎情况。

过程试验是指控制轴向应变到某一值时停止的试验。试验停止后即进行试样的烘干和筛分。过程试验主要针对颗粒强度 $f_c=30$ MPa 的模拟堆石料进行，2 个围压力 $\sigma_3=400$ kPa 和 1200 kPa，轴向应变分别控制在 $\varepsilon_1=0\%$ （只进行等向固结），2%，4%，8%，12%，15%六处停止试验。过程试验主要用于研究试验过程中颗粒的破碎情况。

采用中型三轴仪进行试验，试样直径 15 cm，高 26.5 cm。每个试样均采用颗粒强度相同的 4 种不同大小的水泥椭球制成。水泥椭球颗粒数之比从小粒径到大粒径依次为 18：20：25：29（颗）。所得试样的初始孔隙比 $e_0=0.674$ 。为保证试样的均匀性，分十层撒制试样。装样时，在同一固定高度将一定数目的水泥球自由随机撒落到对开膜中，每两层用击锤击实 10 下。试验的剪切速率为 0.62 mm/min。

2 试验结果

2.1 应力应变曲线

图 2~5 给出了 4 组典型的应力应变试验曲线。其中，图 2 和图 3 分别为方案 1 和方案 5 的试验结果；图 4 和图 5 分别为围压 $\sigma_3=200$ kPa 和 $\sigma_3=1200$ kPa 不同颗粒强度模拟堆石料的试验成果。

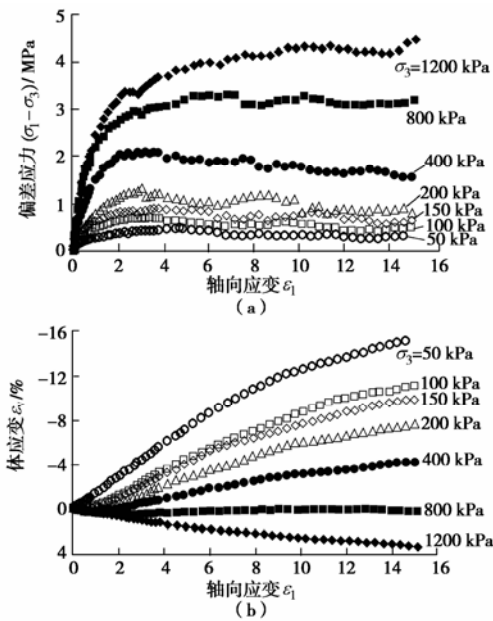


图 2 方案 1 试验结果

Fig. 2 Test results of scheme 1

图 2 为典型高颗粒强度（抗压强度 $f_c=105$ MPa）模拟堆石料的试验结果。可见其应力变形曲线最显著

的特征为很强的剪胀特性。当围压力较低时, 尽管试样的初始孔隙比较大, 强烈的剪胀仍使得试样发生较大的体积膨胀。如当 $\sigma_3=50$ kPa 时最终试样的体胀可达约 15%, 当 $\sigma_3=100$ kPa 时最终体胀仍可达约 11%。仅在高围压时试样才发生相对较小的压缩体变。伴随低围压时的剪胀, 其应力应变曲线发生了一定的应变软化。

图 3 为典型低颗粒强度 (抗压强度 $f_c=30$ MPa) 模拟堆石料的试验结果。同高颗粒强度的试验结果相比, 该组试验所表现出的剪胀特性明显减弱。例如当 $\sigma_3=50$ kPa 时最终试样的体胀降为约 11%, $\sigma_3=100$ kPa 时最终体胀降为约 6%。在高围压时试样也发生了相对较大的压缩体变。 $\sigma_3=1200$ kPa 时最终压缩体变可达约 7.5%。伴随高围压时的体积压缩, 其应力应变曲线表现为明显的持续硬化。

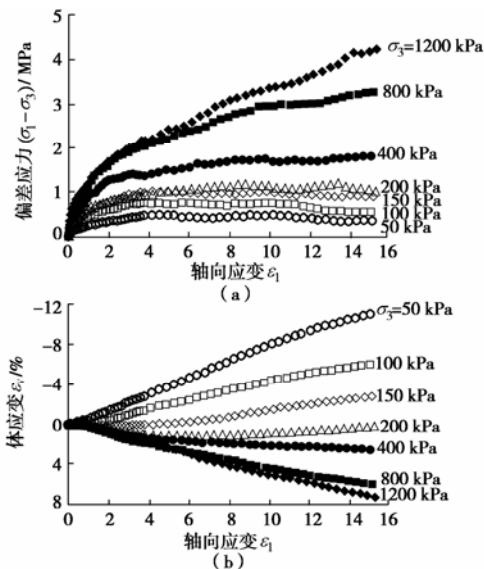


图 3 方案 5 试验结果

Fig. 3 Test results of scheme 5

图 4 和图 5 分别为 $\sigma_3=200$ kPa 和 $\sigma_3=1200$ kPa 时, 不同颗粒强度模拟堆石料的试验结果。试验结果反映了水泥椭圆颗粒强度和试验围压力的相对大小关系对人工模拟堆石料应力变形特性的影响。图 4 所示的试验结果表明, 在一固定围压条件下, 当模拟堆石体的颗粒强度逐步降低时, 由于颗粒破碎的增加, 试样体积变形由剪胀逐步变化为剪缩, 其相应的应力应变曲线也由应变软化变化为持续硬化, 峰值强度对应的轴向应变也在不断增大。由于图 5 中试验的围压较高, 各种颗粒强度的试验均有大量的颗粒破碎现象发生, 此时体应变随轴向应变接近呈线性增加, 其相应的应力应变曲线均表现为持续硬化型。尤其是对颗粒强度较低的 $f_c=30$ MPa 的试验, 最终压缩体变可达约 7.5%, 应力应变曲线硬化明显, 偏差应力在轴向应变达 15%

时仍处在持续的增加过程中。图 4 和图 5 中不同颗粒强度模拟料试验结束时颗粒的破碎程度不同, 但各自的峰值强度差别不大, 说明颗粒破碎对强度具有损伤和硬化的双重作用。

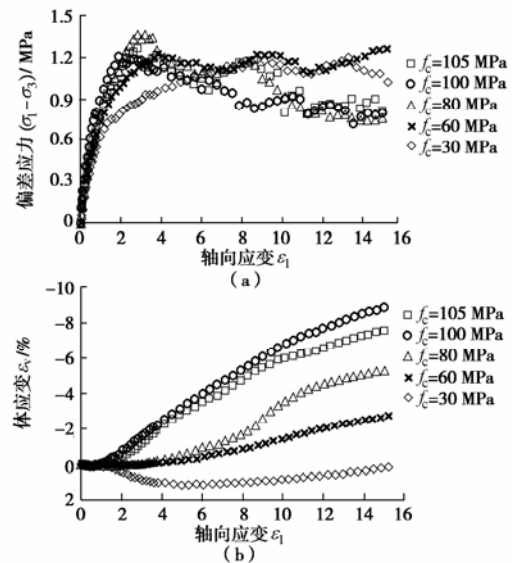


图 4 相同围压不同颗粒强度试验结果 ($\sigma_3=200$ kPa)

Fig. 4 Test results under different particle strengths ($\sigma_3=200$ kPa)

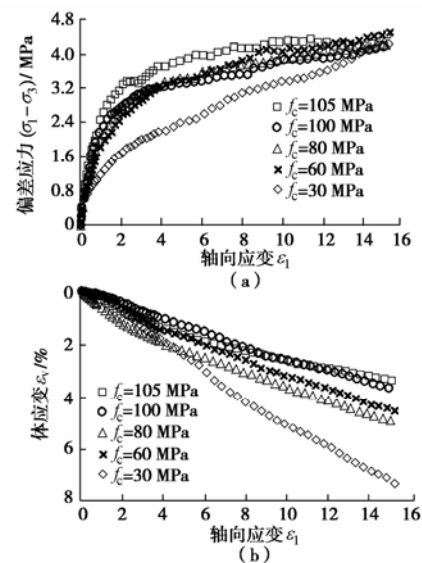


图 5 相同围压不同颗粒强度试验结果 ($\sigma_3=1200$ kPa)

Fig. 5 Test results under different particle strengths ($\sigma_3=1200$ kPa)

总结上述试验结果, 人工模拟堆石料表现出了如下的应力应变特性: ①同种颗粒强度的人工模拟堆石料, 低围压时一般发生剪胀, 高围压时发生剪缩; ②低围压下当颗粒强度从高到低减小时, 应力应变曲线从应变软化逐渐变化为应变硬化, 剪胀现象逐渐削弱。在高围压条件下, 不论颗粒强度高低, 应力应变曲线均呈应变硬化, 体变发生剪缩; ③应力应变曲线的初始弹模随颗粒强度的不同发生变化, 颗粒强度越高, 初始模量越大; ④当颗粒强度较低且围压相对较大,

也即颗粒破碎严重时, 应力应变关系曲线呈持续硬化型, 此时体变和轴向应变接近线性关系。

2.2 破碎率

本文采用 Hardin (1985) [5]提出的相对破碎率 B_r 指标来定量描述颗粒破碎的多少。 B_r 的含义指土体破碎量 B_t 与土体初始破碎势 B_{pi} 之比, 即 $B_r=B_t/B_{pi}$ 。破碎量 B_t 指加载前后级配曲线差围成的面积, 初始破碎势 B_{pi} 指试验前的级配曲线与 0.074 mm 粒径线所围成的面积, 如图 6 所示。

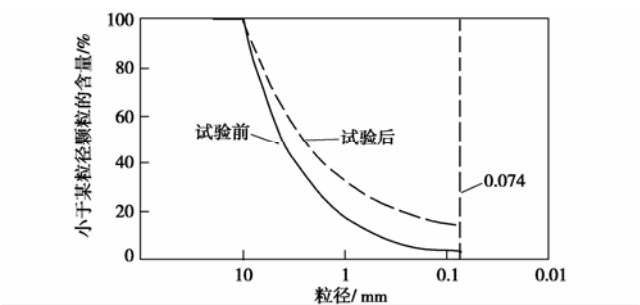


图 6 相对破碎率 B_r 的定义

Fig. 6 Definition of relative breakage

对各个试验颗粒破碎的情况进行了详尽的统计分析。统计工作包括统计破碎及完整的水泥椭球数量和对试样进行筛分两个方面。表 2 和表 3 分别列出了两类试验相对破碎率的统计结果。由表中的试验结果可见, 颗粒的相对破碎率随围压的升高、颗粒强度的降低和轴向应变的增加逐步增大。表中的一些数据存在一定的波动, 这可能与水泥球制备过程的差异、试样龄期跨度较大以及三轴试验的误差有关。

表 2 完整试验的颗粒破碎率

Table 2 Relative breakage in full tests								单位: %
σ_3/kPa	50	100	150	200	400	800	1200	
方案 1	0	0.010	0.033	0.092	0.560	2.117	3.965	
方案 2	—	0.018	—	0.202	0.700	2.206	3.551	
方案 3	—	0.039	—	0.443	1.076	2.847	3.997	
方案 4	—	0.063	—	0.517	1.350	2.627	3.988	
方案 5	0.140	0.467	0.924	0.809	2.893	3.604	4.857	

从表 2 所示的试验结果可以发现, 试验的相对破碎率同颗粒强度和围压的相对大小直接相关。当围压较小时, 各颗粒强度均存在一个基本不发生破碎 (本文定义 $B_r \leq 0.1\%$) 的围压范围。也即对不同的颗粒强度可以认为存在起始破碎围压压力 σ_{30} , 在小于该围压压力时, 堆石体基本不发生颗粒破碎的现象。根据表 2 五种试验方案相对破碎率试验结果, 采用插值的方法可得到颗粒强度和起始破碎围压压力的关系见图 7 所示, 可见两者近似成线性关系。当围压增大时, 各种颗粒

强度的破碎率增加。当试验围压达到 400 kPa 时, 各种颗粒强度试验的相对破碎率均不容忽视。

表 3 过程试验的颗粒破碎率 B_r

Table 3 Relative breakage in process test							单位: %
$\varepsilon_1/\%$	0	2	4	8	12	15	
$\sigma_3=400\text{ kPa}$	0	0.173	0.477	1.267	1.997	2.639	
$\sigma_3=1200\text{ kPa}$	0	0.531	0.720	2.704	3.825	4.296	

根据表 3 所示的试验结果, 可得两个围压下相对破碎率 B_r 和轴向应变 ε_1 的关系见图 8 所示。可以发现, 除试验的初始段外, 试验过程中相对破碎率随轴向应变的增加基本呈线性增大。在试验 $\varepsilon_1=0\sim 1\%$ 的初始段, 基本不发生颗粒的破碎。这种现象可解释为在等向固结以及剪切的开始段, 由于颗粒尚未充分咬合所致。

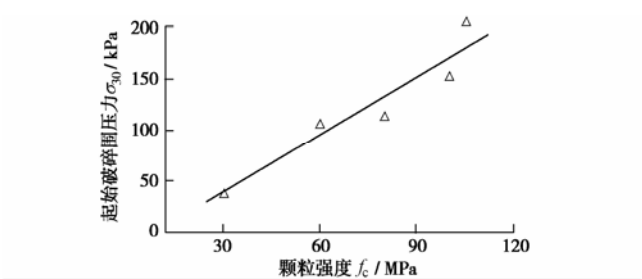


图 7 起始破碎围压 σ_{30} 与颗粒强度的关系

Fig. 7 Relationship between σ_{30} and particle strength

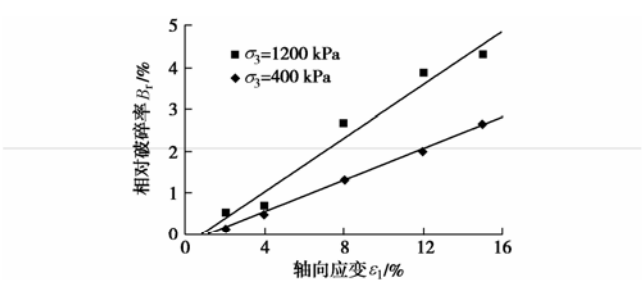


图 8 相对破碎率和轴向应变关系

Fig. 8 Relationship between B_r and ε_1

对两类试验破碎后的细颗粒材料进行了筛分和整理。图 9 图示了所有试验破碎新增细颗粒材料粒径分布和其相对破碎率的关系。由图可见, 破碎后对应某一粒径 d 下新增细颗粒材料的质量百分比 P 与相对破碎率 B_r 存在良好的线性关系。这表明由破碎过程所产生细颗粒材料的粒径分布存在固定的比例关系。在图 9 中还给出了各直线的斜率, 发现各斜率同颗粒粒径 d 成正比, 其比例系数约为 $2(1+e_0)$ 。因此, 根据试验结果, 可得破碎后对应某一粒径 d (单位 cm) 下新增细颗粒材料的质量百分比 P 的近似计算公式可写为

$$P=2d(1+e_0) \cdot B_r \text{ 。} \tag{1}$$

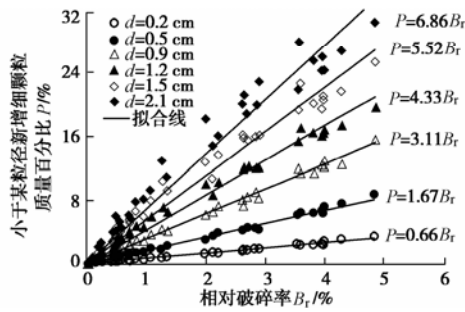


图9 破碎新增细颗粒含量与相对破碎率的关系

Fig. 9 Relationship between P and B_r

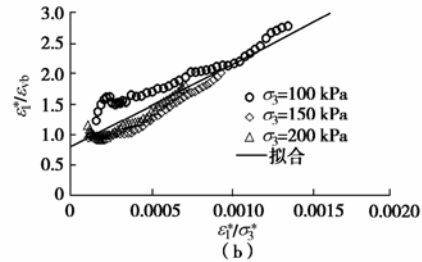
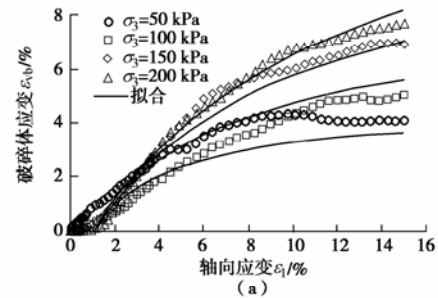
3 破碎体应变

由表2所示破碎率的试验结果可见,对于颗粒强度 $f_c=105$ MPa的试验方案1,在围压 $\sigma_3=50\sim 200$ kPa的范围内其相对破碎率 $B_r<0.1\%$,近似可认为无颗粒破碎发生。而对于颗粒强度 $f_c=30$ MPa的试验方案5,在围压 $\sigma_3=50\sim 200$ kPa的范围内其相对破碎率 B_r 均远大于 0.1% ,其颗粒破碎现象不可忽视。由于方案1和方案5两种人工材料的试样大小、试样孔隙比和级配、颗粒表面粗糙度和试验加载过程等试验条件都均基本相同,差别主要仅仅为其颗粒强度不同。因此,可以认为,在围压 $\sigma_3=50\sim 200$ kPa范围内,试验方案5由颗粒破碎过程所产生的破碎体应变 ε_{vb} 可由试验方案5和方案1相应的体积变形之差求得。

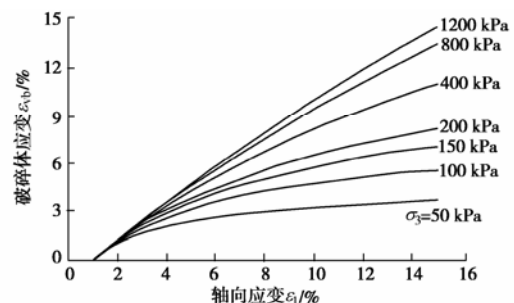
根据上述分析以及图2和图3所示的试验结果,可以得到试验方案5在 $\sigma_3=50, 100, 150$ 和 200 kPa 4种围压力下破碎体应变随轴向应变的变化过程曲线如图10所示。除 $\sigma_3=50$ kPa的试验曲线有些离散外,其余3种围压的试验曲线具有一致的规律性。主要表现为:①各围压下的破碎体应变均为正值,也即颗粒破碎仅导致体积收缩或减小剪胀效应,这和以往人们的定性认识一致;②当轴向应变小于 1% 时,破碎体应变很小可近似为0。这和前述的在试验 $\varepsilon_1=0\sim 1\%$ 初始段基本不发生颗粒破碎的现象一致。表明在剪切过程的开始,由于颗粒尚未咬合,颗粒基本不发生破碎;③当轴向应变大于 1% 以后,破碎体应变随轴向应变的增加而增大,两者近似呈双曲线关系。对不同围压的试验曲线进行归一化处理,可得

$$\frac{\varepsilon_{vb}^*}{\varepsilon_{vb}} = a \frac{\varepsilon_1^*}{\sigma_3^*} + b \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_1^* = \varepsilon_1 - \varepsilon_{10}$, $\sigma_3^* = \sigma_3 - \sigma_{30}$, ε_{10} 和 σ_{30} 分别为起始破碎轴向应变和围压力,分别有 $\varepsilon_{10}=1\%$, $\sigma_{30}=36$ kPa。 a 和 b 为试验常数,分别为图10(b)拟合直线的斜率和截距,对本次试验可得 $a=1377$, $b=0.8$ 。

图10 破碎体应变 ε_{vb} Fig. 10 Breakage volumetric strain ε_{vb}

由于各种颗粒强度的试验在高围压情况下均发生了不可忽视的颗粒破碎,所以无法直接从试验结果分离破碎体应变。以下仅根据公式(2)通过外延近似讨论高围压情况下破碎体应变的特性。图11即为由该式预测计算所得不同围压力时破碎体应变随轴向应变变化的曲线簇。可见在轴向应变 $\varepsilon_1=1\%\sim 15\%$ 范围内,当围压较低时,破碎体应变主要发生在剪切的开始段,随轴向应变呈双曲线关系。当围压增大时,曲线的线型逐渐向直线发展,发生破碎体应变的范围增大。在围压力较高时,破碎体应变和轴向应变近似呈线性关系,此时颗粒破碎体积压缩的发生会伴随整个三轴试验的全过程。这表明在高围压下颗粒破碎变形是总变形的主要组成部分之一。颗粒破碎体应变的上述规律与图3所示的试验结果一致。值得说明的是,由于本组试验采用的是抗压强度 $f_c=30$ MPa的4级配椭圆颗粒模拟堆石料,颗粒接触条件差,试样的孔隙较大,试验的破碎率应比一般的真实堆石料为大。

图11 不同围压 $\varepsilon_{vb} - \varepsilon_1$ 关系Fig. 11 Relationship between ε_{vb} and ε_1 under different confining pressures根据图11中 $\sigma_3=400$ kPa和 $\sigma_3=1200$ kPa 破碎体应

变的计算结果, 并结合表3所示过程试验相对破碎率的试验结果, 可得到破碎体应变和相对破碎率的关系曲线, 见图12所示。所有试验点均落在一个较为集中的带内。说明尽管不同试验点所处的应力状态不同, 但破碎体应变和破碎率之间存在唯一性的关系。上述关系可以用如下的幂函数进行拟合,

$$\varepsilon_{vb} = a \cdot B_r^b, \quad (3)$$

式中, a 和 b 为试验常数, 对本文的试验结果可得到 $a=1.119$, $b=0.667$ 。

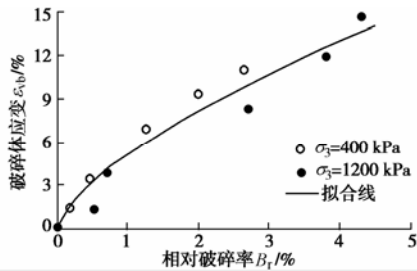


图12 破碎体应变和相对破碎率的关系

Fig. 12 Relationship between ε_{vb} and B_r

4 结 论

高应力作用下堆石料颗粒破碎严重, 变形中颗粒破碎的贡献不可忽视。本文采用水泥净浆浇筑不同粒径和不同强度的椭圆颗粒的方法, 制备了一种四级配人工模拟堆石料。通过调节水灰比和龄期控制水泥球的颗粒强度, 可达到在试验中控制颗粒破碎率的目的。同天然堆石料相比, 模拟堆石料可以控制和较为准确地确定试验中颗粒破碎率的大小, 适合于进行破碎应变的定量试验研究工作。

对上述人工模拟堆石料, 进行了颗粒破碎应变的系列三轴试验研究, 探讨了模拟堆石料在不同破碎率情况下应力变形和破碎体应变的特性。得到如下主要结论:

(1) 颗粒破碎对堆石体的应力应变特性具有重要的影响。颗粒破碎可减小堆石体的剪胀和应变软化现象。

(2) 相对破碎率同颗粒强度和围压力的相对大小直接相关。存在起始破碎围压力, 且随颗粒强度的

增加线性增大。

(3) 由颗粒破碎所产生细料的粒径分布存在固定的比例关系, 某一粒径新增细料的质量百分比与相对破碎率 B_r 存在线性关系。

(4) 破碎体应变均为正值, 且随围压的增加而增大。在固定围压下, 破碎体应变随轴向应变的增加而增大, 两者呈双曲线关系。

(5) 破碎体应变和破碎率之间存在近似唯一性的关系, 可以用幂函数进行拟合。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 周云东. 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, ZHOU Yun-dong. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 562 - 566. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 魏 松. 粗粒料浸水湿化变形特性试验及其数值模型研究[D]. 南京: 河海大学 2006. (WEI Song. Study on wetting deformation behavior and numerical model of coarse-grained materials[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [5] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 11(10): 1177 - 1192.