

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.016

粗颗粒土颗粒破碎影响因素试验研究

傅 华, 凌 华, 蔡正银

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:通过室内粗颗粒土的大型三轴和单轴试验,对粗颗粒土的颗粒破碎特性进行了研究,并分析了粗颗粒土母岩性质、级配、围压及应力状态对颗粒破碎的影响.结果表明 粗颗粒土的母岩强度或细颗粒含量越高,或粗颗粒土的浑圆度越好,颗粒破碎率越小.随着围压和应力的增大,粗颗粒土的颗粒破碎率也呈增大趋势.

关键词:粗颗粒土 颗粒破碎率 影响因素

中图分类号: TU411.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2009)01-0075-05

颗粒破碎是粗颗粒料所具有的重要特性之一^[1].颗粒破碎会使颗粒受力前后的级配发生变化,影响颗粒的强度和变形特性.而在面板堆石坝坝体填筑材料中,粗颗粒料的体积占到面板堆石坝体积的 99% 以上,无论是粗颗粒料本身的变形还是面板的应力,都与颗粒的变形有很大关系.随着面板堆石坝的不断发展以及近几年高坝的不断兴建,粗颗粒料由于颗粒破碎而导致的强度和变形问题越来越受到工程界的关注. Marsal 等^[2-7]对堆石料的颗粒破碎问题进行了研究,并取得了较好的研究成果.笔者在他人研究的基础上,通过室内试验对影响粗颗粒土颗粒破碎的主要因素进行了研究.

1 颗粒破碎的量化指标

粗颗粒土颗粒破碎的量化指标,可以采用能定量地反映试验前后粗颗粒土级配变化的某一参数来表示.目前,常用的参数有:

a. Marsal^[6]提出的颗粒破碎率 B_g .该参数可以表征相应压力下颗粒破碎的程度,其定义为试验前后颗粒各粒组含量之差的正值之和,即

$$B_g = \sum |\Delta W_K|$$

其中

$$\Delta W_K = W_{Ki} - W_{Kf}$$

式中: W_{Ki} ——试验前级配曲线上某级粒组的含量; W_{Kf} ——试验后级配曲线上相同粒组的含量.

b. 施洪洋提出的粗度系数 K_c ^[8].该参数可以用来描述堆石料的级配特征,其数学表达式为

$$K_c = \frac{\bar{d}}{d_c} P_5$$

式中: $\bar{d}$ ——粗细料的平均粒径; d_c ——粗细料的分界粒径, $d_c = 5 \text{ mm}$; P_5 ——粗料的质量分数.

c. 中国水利水电科学研究院提出的堆石受荷前后的控制粒径之差 B ^[8].该参数可以用来度量颗粒的破碎程度,其数学表达式为

$$B = d_{60} - d_{60f}$$

式中: d_{60} ——受荷前的控制粒径; d_{60f} ——受荷后的控制粒径.

d. Hardin^[7]提出的破碎量 B_f 和相对破碎率 B_r . Hardin^[7]根据颗粒分布曲线的变化,定义试验前后颗粒分布曲线与粒径 $d = 0.074 \text{ mm}$ 竖线所围面积分别为 B_{pi} 和 B_{pf} ,并认为粒径小于 0.074 mm 的细颗粒对颗粒破碎的影响不大,其中

收稿日期: 2008-01-08

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金(50639050)

作者简介: 傅华(1977—),男,江苏响水人,工程师,主要从事粗颗粒土的试验研究.

$$B_{pi} - B_{pf} = B_t$$

B_t 为破碎量.同时,Hardin^[7]还定义了相对破碎率 B_r ,即

$$B_r = B_t/B_{pi}$$

本文采用 Marsal^[6]提出的颗粒破碎率 B_g 来描述粗颗粒材料的颗粒破碎情况.

2 试验方法

考虑到粗颗粒土颗粒破碎率的大小同其颗粒大小、形状、密度、级配、围压、受力状态、试验方法等因素有关,挑选其中主要影响因素进行试验研究.试验分别在大型三轴压缩仪和大型单轴压缩仪上进行,其中三轴试验尺寸为 $\varnothing 300\text{ mm} \times 700\text{ mm}$,单轴试验尺寸为 $\varnothing 450\text{ mm} \times 300\text{ mm}$.根据设定的干密度、试样的尺寸和级配曲线计算所需试样的质量.试样均采用振动器振实.振动器底板静压为 14 kPa,振动频率为 40 Hz,电机功率为 1.2 kW.试样均处于自然风干状态,分 60~40 mm,40~20 mm,20~10 mm,10~5 mm,<5 mm 5 种粒径范围进行试样的称取.按试验要求进行试验,试验结束后对试样进行风干、筛分.筛分结果反映了粗颗粒土在制样和剪切过程中的颗粒破碎状况.

3 试验结果及分析

3.1 母岩性质对颗粒破碎的影响

为了研究母岩强度对颗粒破碎的影响,选用级配曲线相同的片麻岩混合料和掺和比例为 1:1 的砂岩与板岩混合料进行了试验.其中,片麻岩饱和抗压强度为 71.6~73.4 MPa,砂岩饱和抗压强度为 52.7~66.8 MPa,板岩饱和抗压强度 24.5~37.3 MPa,母岩强度存在一定的差异.不同母岩强度的粗颗粒土颗粒破碎对比如表 1 所示.

表 1 不同母岩强度的粗颗粒土颗粒破碎对比

Table 1 Particle breakages of coarse grained soil with different strengths of mother rock

母岩名称	试验状态	围压/ MPa	各粒径组粗颗粒土质量分数/%					$B_g/\%$
			$d = 60 \sim 40\text{ mm}$	$d = 40 \sim 20\text{ mm}$	$d = 20 \sim 10\text{ mm}$	$d = 10 \sim 5\text{ mm}$	$d = 5 \sim 0\text{ mm}$	
片麻岩	试验前		17.7	26.2	24.0	17.6	14.5	
		0.3	14.4	24.0	24.2	17.7	19.7	5.5
	试验后	0.8	14.0	22.5	23.1	18.4	22.0	8.3
		1.2	12.9	21.3	22.3	19.1	24.4	11.3
		1.6	10.2	19.9	24.0	18.5	27.4	13.8
砂板岩	试验前		17.7	26.2	24.0	17.6	14.5	
		0.3	13.5	23.8	24.4	17.8	20.5	6.6
	试验后	0.8	13.1	21.7	23.5	18.2	23.5	9.6
		1.2	10.4	20.5	23.1	18.9	27.1	13.9
		1.6	9.9	18.5	22.5	19.6	29.4	17.0

注: d 为粒径.

为了研究颗粒形状对颗粒破碎的影响,选用常规爆破产生的灰岩粗颗粒料及磨圆度较好的砂砾料进行了试验.其中,砂岩母岩饱和状态下的抗压强度为 97.3~102.0 MPa,砂砾料母岩饱和状态下的抗压强度为 104.0~108.0 MPa,强度指标较接近,但 2 种料在颗粒形状上存在明显的差异.不同颗粒形状的粗颗粒土颗粒破碎对比如表 2 所示.

从试验结果可知 粗颗粒土的母岩强度越高,颗粒破碎率越小;磨圆度较好的粗颗粒混合料的颗粒破碎率明显低于棱角状的粗颗粒混合料,而且破碎率的差别均随围压的增大呈明显增大趋势.通常认为砂砾料是一种较为优越的筑坝材料,是因为砂砾料母岩强度高、磨圆度好.由于粗颗粒料的颗粒破碎率是影响强度的主要因子,颗粒破碎率越低,强度越高.总体来看,砂砾料具有强度高、变形小的优点,高应力条件下的这种优点更加明显.

3.2 级配对颗粒破碎的影响

选用 2 组不同级配(表 3)的弱风化片麻岩进行了试验,试验结果如表 4 所示.

从试验结果可知 细颗粒含量高的混合料颗粒破碎率明显低于细颗粒含量低的混合料.粗颗粒混合料中

表 2 不同颗粒形状的粗颗粒土颗粒破碎对比

母岩名称		试验状态	围压/ MPa	各粒径组粗颗粒土质量分数/%					$B_g/\%$
				$d = 60 \sim 40 \text{ mm}$	$d = 40 \sim 20 \text{ mm}$	$d = 20 \sim 10 \text{ mm}$	$d = 10 \sim 5 \text{ mm}$	$d = 5 \sim 0 \text{ mm}$	
砂砾岩	试验前			17.8	25.5	27.8	14.4	14.5	
			0.3	16.4	26.5	26.2	15.6	15.3	3.0
	试验后		0.7	16.0	26.7	25.9	15.5	15.9	3.7
			1.2	15.6	26.5	25.6	16.0	16.3	4.4
砂岩料	试验前			17.8	25.5	27.8	14.4	14.5	
			0.3	11.5	23.2	27.1	16.1	22.1	9.5
	试验后		0.7	11.1	21.4	25.1	19.0	23.4	13.5
			1.2	9	21.4	22.8	19.6	27.2	17.9

注： d 为粒径。

的细颗粒含量增大时,粗颗粒的骨架作用会逐渐被细颗粒隔离,粗颗粒混合料逐渐表现出细颗粒料的力学性质,在剪切应力的作用下,主要以颗粒移动、压实为主,颗粒破碎率相对较低,混合料强度得到充分发挥;当粗颗粒含量达到 60% ~ 70% 时,粗、细颗粒形成最佳组合,各部分强度得到充分发挥,抗剪强度最大^[9]。随着细颗粒含量的减小,混合料主要因粗颗粒棱角的相互咬合而产生骨架作用,在剪切应力的作用下,粗颗粒棱角容易产生应力集中,颗粒破碎也比较明显^[10]。从试验结果还可以看出,细颗粒含量达到 45% 的粗颗粒混合料,粗、细颗粒具有较好的咬合效果,而细颗粒含量为 14.5% 的粗颗粒混合料,细颗粒则不能完全充填粗颗粒骨架形成的孔隙,孔隙率较大。在剪切应力的作用下,没有和细颗粒咬合的粗颗粒棱角颗粒破碎明显,粗颗粒混合料强度指标逐渐降低。

表 4 不同级配的粗颗粒土颗粒破碎对比

级配组别		试验状态	围压/MPa	各粒径组粗颗粒土质量分数/%					$B_g/\%$
				$d = 60 \sim 40 \text{ mm}$	$d = 40 \sim 20 \text{ mm}$	$d = 20 \sim 10 \text{ mm}$	$d = 10 \sim 5 \text{ mm}$	$d = 5 \sim 0 \text{ mm}$	
级配 1	试验前			13.0	16.0	14.5	11.5	45.0	
			0.3	11.0	16.2	15.4	11.7	45.7	2.0
	试验后		0.8	10.3	15.4	14.9	11.7	47.7	3.3
			1.2	10.1	15.2	15.3	10.9	48.5	4.3
			1.6	9.6	14.5	15.1	11.5	49.3	4.9
级配 2	试验前			17.8	25.5	27.8	14.4	14.5	
			0.3	14.4	24.0	24.2	17.7	19.7	5.5
	试验后		0.8	14.0	22.5	23.1	18.4	22.0	8.3
			1.2	12.9	21.3	22.3	19.1	24.4	11.3
			1.6	10.2	19.9	24.0	18.5	27.4	13.8

2 种粗颗粒混合料在不同围压下的破坏强度如表 5 所示。

从表 5 可知,低围压状态下 2 种料的颗粒破碎率相差不大,破坏强度也比较接近;随着围压的增大,细颗粒含量低的混合料的颗粒破碎率明显增大,破坏强度差别明显增大。其主要原因是母岩强度较高而围压较低、剪切应力较小时,颗粒破碎并不明显,级配的优势并没有显示出来,随着围压和粗颗粒土颗粒破碎率的增大,级配对强度和变形的影响才会明显地表现出来。从表 5

表 5 不同细颗粒含量的粗颗粒土强度指标

小于 5 mm 的 颗粒含量/%		$(\sigma_1 - \sigma_3)_f/\text{MPa}$				非线性强度 指标/($^\circ$)	
		$\sigma_3 =$ 0.3 MPa	$\sigma_3 =$ 0.8 MPa	$\sigma_3 =$ 1.2 MPa	$\sigma_3 =$ 1.6 MPa	φ_0	$\Delta\varphi$
45.0		1.856	3.891	5.436	6.682	54.0	9.5
14.5		1.777	3.462	4.757	5.981	52.6	10.1

注： σ_3 表示围压； σ_1 表示轴向压力； $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 表示主应力差的破坏值； φ 表示剪切角； φ_0 表示 $\sigma_3/p_a = 1$ 时的剪切角； p_a 表示大气压力； $\Delta\varphi$ 表示 σ_3 扩大 10 倍时剪切角的减小值。

还可以看出,细颗粒含量为 14.5% 的粗颗粒土的 $\Delta\varphi$ 值明显大于细颗粒含量为 45% 的粗颗粒土的 $\Delta\varphi$ 值,而细颗粒含量 14.5% 的粗颗粒土的颗粒破碎较明显. 因此,非线性强度指标 $\Delta\varphi$ 一方面反映了堆石料强度指标随围压增加而衰减的程度,另一方面从宏观上较好地反映了堆石料的颗粒破碎情况.

3.3 围压对颗粒破碎的影响

颗粒破碎率与围压的关系如图 1 所示.

从图 1 可知 随着围压的增大,堆石料颗粒破碎率明显增大. 试验结果显示 :随着围压的增大,试样在受力产生剪切变形的过程中,颗粒会产生滑动和滚动过程,此过程会不断地产生颗粒破碎,颗粒间原先所具有的承载结构会被破坏,颗粒移动变得相对容易,堆石料颗粒破碎率明显增大,剪胀效应发挥受到阻碍,试样的破坏峰值有一定程度的降低.

3.4 应力状态对颗粒破碎的影响

在母岩、试验级配和制样密度均相同的情况下,通过三轴压缩和单轴压缩试验比较了应力状态对颗粒破碎的影响,结果如表 6 所示.

从表 6 可知,三轴应力状态下堆石料的颗粒破碎率明显高于单轴应力状态下堆石料的颗粒破碎率, B_g (三轴)/ B_g (单轴) 值的变化范围为 1.96 ~ 4.25. 因为单轴压缩试验试样在受力过程中侧向不能变形,所以其颗粒破碎率相对会小些.

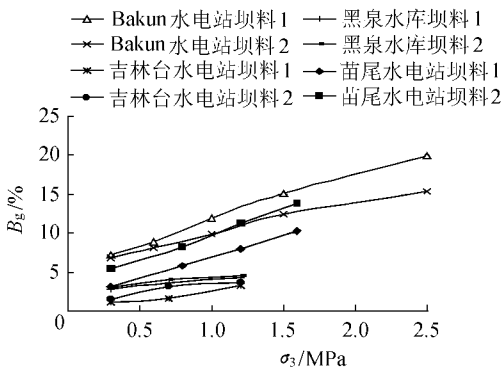


图 1 颗粒破碎率与围压的关系
Fig. 1 Relationship between ratio of particle breakage and pressure

表 6 不同应力状态下的粗颗粒土颗粒破碎对比

Table 6 Comparison among particle breakages of coarse grained soil with different stresses

试验组别	试验状态	应力状态	各粒径组粗颗粒土质量分数/%					$B_g/\%$
			$d = 60 \sim 40\text{ mm}$	$d = 40 \sim 20\text{ mm}$	$d = 20 \sim 10\text{ mm}$	$d = 10 \sim 5\text{ mm}$	$d = 5 \sim 0\text{ mm}$	
1	试验前		13.0	16.0	14.5	11.5	45.0	
	试验后	三轴	9.6	14.5	15.1	11.5	49.3	4.9
		单轴	11.1	15.4	15.2	11.8	46.5	2.5
2	试验前		19.5	24.3	20.0	16.2	20.0	
	试验后	三轴	14.0	19.2	20.3	17.4	29.1	10.6
		单轴	16.4	24.3	19.9	16.8	22.6	3.2
3	试验前		17.7	26.2	24.0	17.6	14.5	
	试验后	三轴	9.9	18.5	22.5	19.6	29.4	17.0
		单轴	14.4	25.5	24.5	18.1	17.5	4.0
4	试验前		18.9	23.7	21.0	18.4	18.0	
	试验后	三轴	7.7	15.8	18.2	24.1	34.2	21.9
		单轴	11.9	20.9	20.6	21.4	25.2	10.2

4 结 语

影响粗颗粒料颗粒破碎的因素较多,本文仅对影响粗颗粒料颗粒破碎的主要因素进行了试验研究. 结果表明 粗颗粒料的母岩强度或细颗粒含量越高,或粗颗粒料的浑圆度越好,颗粒破碎率越小. 粗颗粒料的颗粒破碎率会随着围压和应力的增大而增大. 颗粒破碎是引起粗颗粒料抗剪强度指标降低的主要原因.

由于堆石料体积收缩主要是由颗粒的棱角破碎造成的^[11],要研究粗颗粒料的强度和变形问题,就必须研究粗颗粒料的颗粒破碎问题. 如坝体后期的流变变形及由浸水引起的湿化变形,都与颗粒破碎有密切的关系,而目前对湿化变形中产生的颗粒破碎问题的研究甚少^[12],如何在本构模型中合理地引入颗粒破碎的影响等一系列问题还有待于进一步研究.

参考文献：

[1] 日本土工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵,文丹,译. 北京: 中国水利水电出版社,1999: 7-8.

[2] 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.

[3] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 1987(5): 59-66.

[4] 郭熙灵, 胡辉, 包承刚. 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.

[5] 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.

[6] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York: Wiley, 1973: 109-200.

[7] HARDIN C S. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, 1985, 111(10): 1177-1192.

[8] 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993: 19-45.

[9] 郭庆国. 粗粒土的工程性质及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 45.

[10] 傅华, 李国英. 级配和密度对堆石料强度和变形特性的影响[C]//第 24 届全国土工测试学术研讨会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 111-116.

[11] 沈珠江. 面板堆石坝应力应变分析的若干问题[C]//中国混凝土面板堆石坝十周年学术研讨会论文集(1985—1995). 北京: 中国水利水电出版社, 1995: 43-50.

[12] 魏松, 朱俊高, 王俊杰. 土石坝粗粒料湿化变形研究进展[C]//土石坝与岩土工程实践及探索 2004 年技术研讨会论文集. 北京: 中国电力出版社, 2004: 203-208.

Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil

FU Hua, LIN Hua, CAI Zheng-yin

(Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Through laboratory large scale triaxial and uniaxial tests on coarse grained soil, the characteristics of particle breakage were studied. The effect of mother rock character, gradient, pressure and stress of the coarse grained soil on the particle breakage was analyzed. The test results show that the larger the strength of the mother rock or the higher the content of fine particles or the better the roundness of the particles, the lower the ratio of particle breakage; with the development of the pressure and stress, the ratio of particle breakage regularly increases.

Key words: coarse grained soil; particle breakage; influencing factor

· 简讯 ·

河海大学有 4 种期刊被收录为 2008 年中国科技论文统计源期刊

经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐,由河海大学主办的《河海大学学报(自然科学版)》、《水利水电科技进展》、《水资源保护》、《水利经济》被收录为“中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)”。《2008 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(CJCR)共收录中国科技论文统计源期刊 1 765 种,约占我国 5 000 多种科技期刊的 1/3。这些被收录的期刊都是经过严格的定量和定性分析选取的各个学科的重要期刊。由河海大学主办的这 4 种期刊已连续多年被收录为“中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)”,标志着河海大学期刊继续保持着较好的发展势头,这对提升河海大学学术声誉,促进河海大学学科建设将起到有力的推动作用。

(本刊编辑部供稿)