

DOI: 10.11779/CJGE201605019

堆石料的颗粒破碎规律研究

蔡正银^{1, 3}, 李小梅^{2, 1}, 关云飞¹, 黄英豪¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 粗颗粒土剪切过程中的颗粒破碎现象已被广泛认识, 并且在试验和理论方面进行了大量研究。利用大型三轴仪开展了一系列不同级配、不同密度、不同围压条件下堆石料的排水剪切试验, 并对试验前后的试样分别进行了颗粒分析, 以探讨堆石料的颗粒破碎规律及其影响因素。试验结果表明: 密度对颗粒破碎影响较小, 而级配和围压的影响较大, 围压越高则颗粒破碎越严重。对比试验前后的粒径分布曲线发现, 颗粒破碎主要集中在粒径 20 mm 以上的颗粒范围内, 粒径变化幅度随粒径的减小呈减小趋势。基于分形理论, 建立了颗粒破碎分形维数与围压和颗粒级配之间的关系表达式, 为进一步研究堆石料的强度、变形及剪胀特性提供依据。

关键词: 堆石料; 颗粒破碎; 级配; 密度; 围压

中图分类号: TU411.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)05-0923-07

作者简介: 蔡正银(1965-), 江苏海安人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术等方面的研究工作。E-mail: zycai@nhri.cn。

Particle breakage rules of rockfill materials

CAI Zheng-yin^{1,3}, LI Xiao-mei^{2,1}, GUAN Yun-fei¹, HUANG Ying-hao¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The particle breakage phenomenon of coarse-grained soils during shearing has been widely known, and a lot of researches have been performed in the fields of experiments and theories. A series of drained shear tests on rockfill materials with different gradations and densities under different confining pressures are carried out by using large-scale triaxial apparatus, and the particles of rockfill samples before and after tests are analyzed to discuss the particle breakage rules of rockfill materials as well as their influencing factors. The test results indicate that the density has small influence on the particle breakage, while the gradation and confining pressure have great influence on the particle breakage. The larger the confining pressure, the severer the particle breakage. A comparison of grain-size distribution curves of rockfill specimens before and after tests shows that the particle breakage mainly occurs within the range of particles with grain size larger than 20 mm, and the variation amplitude of grain size has a decreasing tendency with the decrease of the grain size. Based on the fractal theory, an expression of relationship between the fractal dimension of particle breakage and the confining pressure and particle gradation is proposed so as to provide a basis for further researches on strength, deformation and dilatancy of rockfill materials.

Key words: rockfill material; particle breakage; gradation; density; confining pressure

0 引言

堆石料作为一种工程建筑材料, 被广泛应用于土木、水利、交通等工程中, 如土石坝、传统的抛石防波堤、复合地基中的碎石桩、铁路路基等, 其受力变形特性很大程度上决定了建(构)筑物的工作性态。

土石坝的长期变形问题一直是困扰工程界的难题, 研究表明该问题与粗颗粒土的颗粒破碎密切相关。近年来, 国内外学者对堆石料颗粒破碎特性进行了大

量研究, 取得了许多重要科研成果。Marsal^[1-2]、郭庆国^[3]、柏树田等^[4-5]、周晓光等^[6]、郭熙灵等^[7]以及 Hardin^[8]通过试验探讨了堆石料的颗粒大小、形状、强度、级配、密度、受力情况等因素对颗粒破碎的影响。刘汉龙等^[9]通过粗粒料的大型三轴试验指出颗粒

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179105); 国家自然科学基金青年基金项目(51208321)

收稿日期: 2015-08-13

破碎率随围压增加而增加, 二者之间关系可用双曲线表示。同时指出无论粗粒料的岩性、强度、大小、形状、级配和初始孔隙比等情况如何, 若已知围压和材料的试验参数, 则可估计其颗粒破碎率。高玉峰等^[10]通过对多种堆石料进行大型三轴剪切试验, 发现剪切后的颗粒破碎率与围压之间呈线性增加关系。魏松等^[11]通过三轴试验揭示了等压固结颗粒破碎率与围压之间呈幂函数关系。凌华等^[12]利用超大型和大型三轴仪对级配缩尺后不同最大粒径堆石料进行试验, 指出同等应力条件下, 颗粒破碎率随最大粒径增大而增大, 同时发现当应力较小时, 不同最大粒径堆石料的破碎率相近。刘恩龙等^[13-14]对堆石料进行了固结应力从 400 kPa 到 4 MPa 的一系列常规三轴压缩试验及等向压缩试验, 发现围压低时颗粒破碎轻微, 围压高时颗粒破碎严重。众多学者的研究成果仅限于某一个或几个影响因素的基础上开展, 堆石料颗粒破碎规律尚不系统, 难以定论, 有待进一步开展系统研究。

本文通过开展不同级配、不同相对密度、不同围压条件下堆石料的大型三轴剪切试验, 系统地研究堆石料的颗粒破碎规律, 进而建立了颗粒破碎与围压和颗粒级配之间的理论关系式, 为进一步研究堆石料的强度、变形及剪胀特性提供依据。

1 堆石料颗粒破碎试验方案

1.1 试验设备

试验所采用的设备为水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室的大型三轴仪, 试样尺寸为 $\phi 300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$, 如图1所示。该设备主要用于研究筑坝材料的强度与变形特性, 可进行不同应力路径条件下粗颗粒料的大型三轴剪切试验。该设备主要技术参数为: 最大围压 2.5 MPa, 最大轴向荷载 700 kN, 最大轴向动出力 500 kN, 最大垂直变形 150 mm。



图 1 大型三轴仪

Fig. 1 Large triaxial equipment

堆石料渗透性能良好, 采用各向等压固结排水剪切试验方法, 剪切速率控制为 2.0 mm/min, 试验采用应变控制。试样的最大允许粒径与试样直径之比 (径径比) d_{\max}/D 为 0.2。

1.2 试样制备

试验所用土料取自河南省河口村水库面板堆石坝施工现场。岩性为白云质灰岩, 颗粒比重 G_s 为 2.77。堆石料原材料的最大粒径为 800 mm, 超粒径含量为 58.5%, 小于 5 mm 的颗粒含量为 10%。由于试验设备试样直径为 300 mm, 试样的径径比 d_{\max}/D 为 0.2, 不满足超粒径材料试验的要求。根据《土工试验规程》^[15], 按堆石料原始级配及试验设备要求, 最大粒径取 60 mm, 并控制小于 5 mm 颗粒含量配置 4 种典型级配开展三轴压缩试验。试验各级配的粒径分布曲线详见图 2。

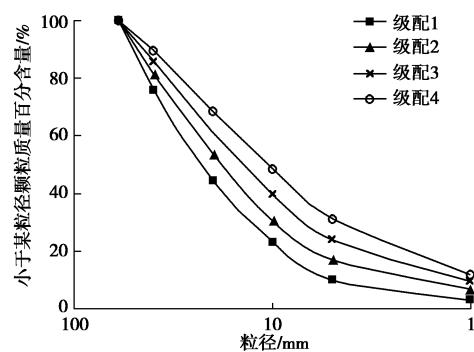


图 2 各级配试样的粒径分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of particles of various grading samples

从图2可以发现, 从级配1到级配4, 颗粒逐级变细, 即级配1颗粒最粗, 级配4颗粒最细。为了量化堆石料的级配, 本文采用分形维数^[16] D_0 作为剪切试验前初始级配的衡量指标。

堆石料的分形模型^[16]可以表示为 $\lg \left[\frac{M(r < d_i)}{M_T} \right] = (3 - D) \lg (d_i / d_{\max})$, 其中, r 为粒径, $M(r < d_i)$ 为小于粒径 d_i 的颗粒质量, M_T 为全部颗粒的总质量, d_{\max} 为粒组内最大粒径, 以 $\lg (d_i / d_{\max})$ 为横坐标, $\lg [M(r < d_i) / M_T]$ 为纵坐标, 则该直线斜率为 $3 - D$, 从而可得每一级配下的分形维数 D 。

剪切试验前各初始级配计算得到的分形维数 D_0 如表1所示。不难看出, 本文研究的堆石料初始级配均具有较好的分形特性, 分形维数 D_0 越小, 颗粒越粗。颗粒破碎分形维数^[17]不仅可以表征堆石料颗粒级配的良好程度及颗粒粒径大小, 而且能较全面地反映颗粒破碎后的粒径分布状况。本文采用颗粒破碎分形维数 D 作为衡量颗粒破碎程度的一个量化指标。

试样采用分层击实法制备, 共分 5 层。制备完成后

采用水头法饱和, 并确保每个试样的试验前的孔隙水压力系数 B 值大于 0.95。

表 1 各级配试样参数

Table 1 Parameters of various grading samples

级配特性	d_{\max} /mm	曲率系数 C_c	不均匀系数 C_u	分形维数 D_0	分形维数相关系数 R^2
级配 1	60	1.18	6.00	2.082	0.99
级配 2	60	1.64	10.55	2.285	0.99
级配 3	60	2.17	17.23	2.425	0.99
级配 4	60	1.70	18.77	2.531	0.98

1.3 技术方案

本文拟从级配、相对密度、围压 3 个方面研究堆石料在三轴排水剪切过程中的颗粒破碎规律。因此对配置的 4 种级配试样, 控制相对密度分别为 0.60, 0.75, 0.90, 1.00, 对每种密度的试样分别在 300, 600, 1000, 1500 kPa 四种围压作用下进行常规三轴固结排水剪切试验, 共进行了 64 组试验。试验结束后对各试样进行颗粒分析试验, 以研究剪切过程中的颗粒破碎情况。

2 三轴排水剪切试验的颗粒破碎规律

2.1 级配对堆石料颗粒破碎的影响

以相对密度 $D_r = 0.75$ 的试样为例, 分别在围压 300, 600, 1000, 1500 kPa 作用下进行三轴排水剪切试验, 研究级配对堆石料剪切过程中颗粒破碎的影响。试验前后各级配的粒径分布情况如图 3 所示, 颗粒破碎分形维数详见表 2。

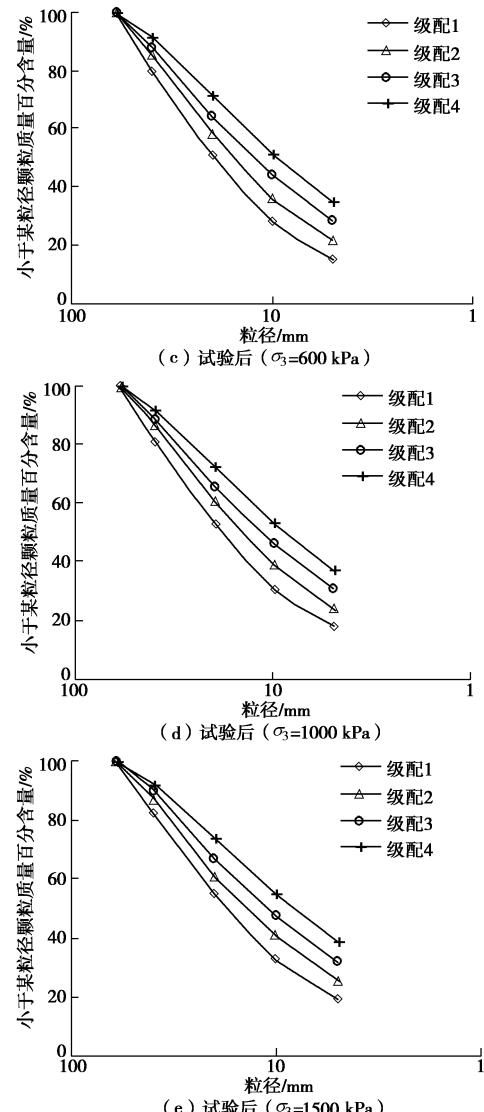
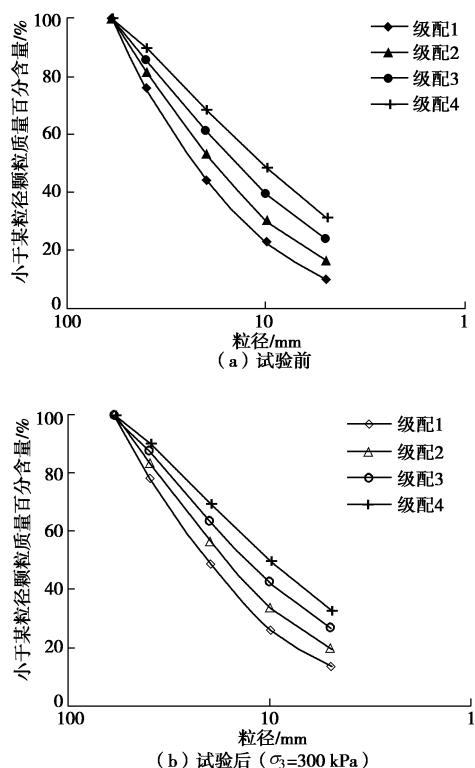


图 3 各级配试样试验前后粒径分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of particles of various grading samples before and after tests

表 2 试验前后的分形维数汇总表($D_r=0.75$)Table 2 Fractal dimensions before and after tests ($D_r=0.75$)

级配特性	分形维数 D_0	破碎分形维数 D			
		300 kPa	600 kPa	1000 kPa	1500 kPa
级配 1	2.082	2.209	2.245	2.297	2.345
级配 2	2.285	2.351	2.385	2.423	2.453
级配 3	2.425	2.472	2.494	2.521	2.543
级配 4	2.531	2.557	2.579	2.592	2.619

根据图 3 及表 2, 通过比较可以发现如下规律:

- ① 级配 1 试样试验前后粒径分布变化最大; 级配 4 试样试验前后粒径分布变化最小; 显然, 试验前后粒径分布变化随分形维数 D_0 的增大而减小, 这说明粗颗粒破碎率高。
- ② 试验前后粒径变化主要集中在 20~60 mm 范围内, 粒径变化幅度随粒径的减小呈减小趋势。
- ③ 随分形维数 D_0 的增大, 试样中细颗粒含量增多, 剪

切后试样颗粒破碎程度较轻。

综上可知, 相对密度及围压一定时, 级配对堆石料三轴剪切试验前后粒径变化的影响不可忽视, 随着分形维数 D_0 的增大颗粒破碎程度逐渐减轻。

2.2 围压对堆石料颗粒破碎的影响

以相对密度分别为 0.60, 0.75, 0.90, 1.00 的级配 1 试样为例, 研究围压对堆石料三轴剪切试验前后颗粒粒径分布变化的影响, 颗粒破碎分形维数详见表 3, 试验前后的粒径分布情况如图 4 所示。

表 3 试验前后的分形维数汇总表(级配 1)

Table 3 Fractal dimensions before and after tests (Gradation 1)

相对密度	分形维数 D_0	破碎分形维数 D			
		300 kPa	600 kPa	1000 kPa	1500 kPa
0.60	2.082	2.183	2.226	2.282	2.329
0.75	2.082	2.209	2.245	2.297	2.345
0.90	2.082	2.218	2.228	2.302	2.357
1.00	2.082	2.204	2.280	2.316	2.367

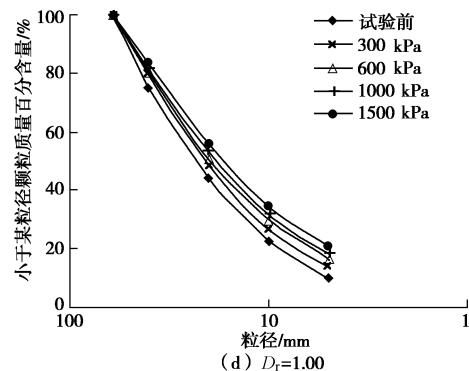
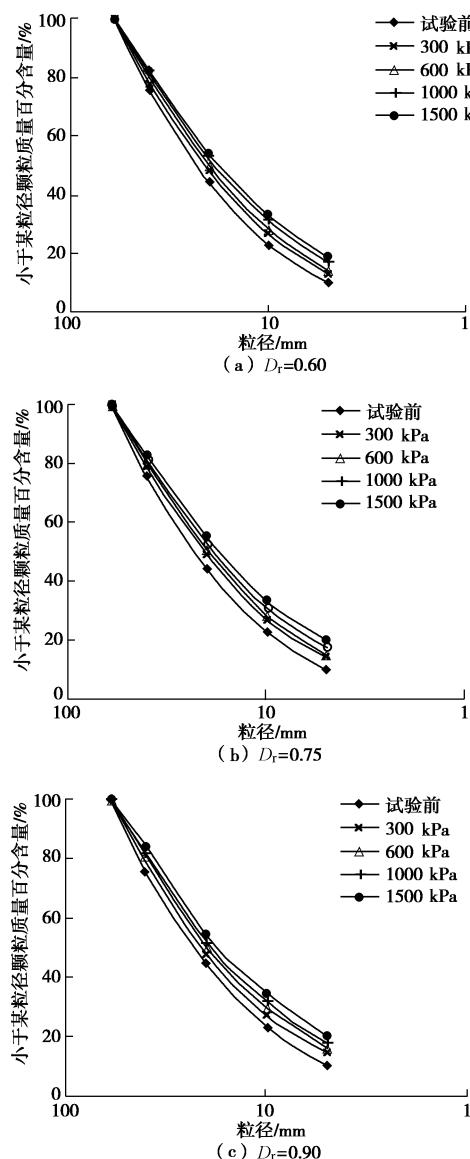


图 4 级配 1 试样试验前后的粒径分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of particles of grading sample No. 1 before and after tests

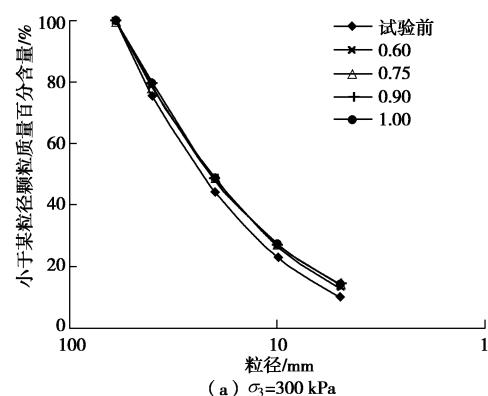
从表 3 及图 4 中可以发现如下规律: ①围压 $\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$ 时, 试验前后粒径分布变化最小, $\sigma_3 = 1500 \text{ kPa}$ 时, 试验前后粒径分布变化最大。显然, 试验过程中的颗粒破碎随围压 σ_3 的增大而增大。②试验前后粒径变化主要集中在 $20\text{~}60 \text{ mm}$ 范围内, 粒径变化幅度随粒径的减小呈减小趋势。③各粒径分布曲线的变化趋势基本一致。

综上可知, 相对密度及级配一定时, 围压对堆石料三轴剪切试验过程中的颗粒破碎程度影响显著, 围压越大, 颗粒破碎越严重。

2.3 密度对堆石料颗粒破碎的影响

以级配 1 试样为例, 分别在围压 300, 600, 1000, 1500 kPa 作用下, 研究相对密度对堆石料三轴剪切试验前后颗粒粒径分布变化的影响, 试验前后不同相对密度试样的粒径分布如图 5 所示, 颗粒破碎分形维数详见表 3。

从图 5 及表 3 中可以发现, 对于具有不同相对密度试样, 如果级配和围压相同, 试验后的粒径分布基本一致, 这说明相对密度对堆石料三轴剪切试验前后粒径分布变化的影响较小, 可忽略相对密度对堆石料颗粒破碎程度的影响。



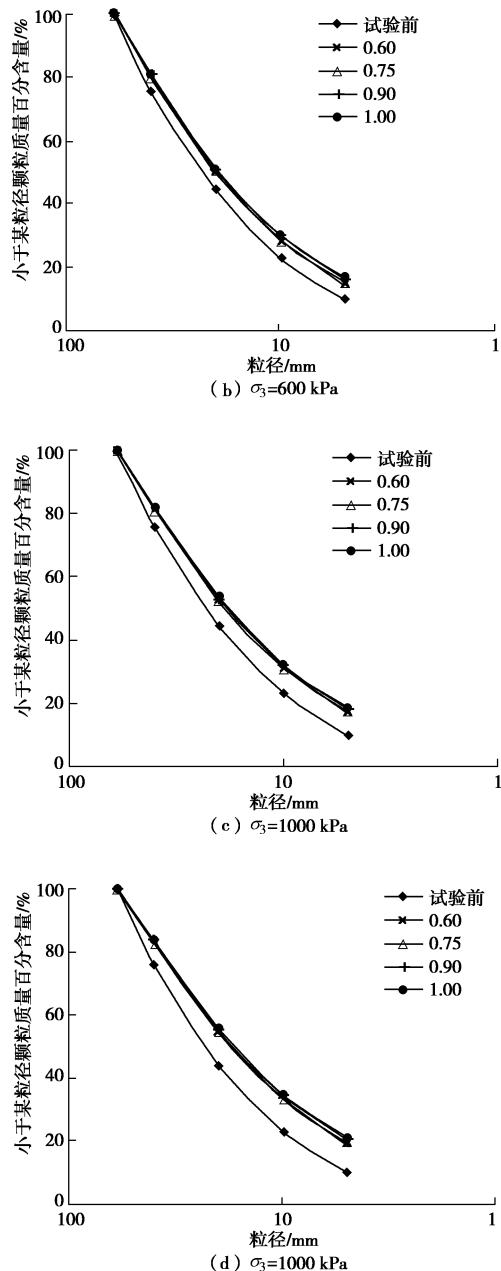


图 5 级配 1 试样试验前后的粒径分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of particles of grading sample No. 1 before and after test

3 堆石料的颗粒破碎规律

颗粒破碎是堆石料的一个重要工程特性, 通过前文对三轴剪切试验结果的分析, 可以初步认为级配及围压对堆石料试验前后的粒径分布影响较大, 试样受剪后颗粒发生了不同程度的破碎, 而相对密度对其颗粒破碎程度影响较小, 可忽略不计。

如前所述, 剪切试验结束后得到的试样分形维数 D 不仅可以表征堆石料颗粒级配的良好程度及颗粒粒径大小, 而且能较全面地反映颗粒破碎后的粒径分布状况。 D 可以通过剪切后的级配曲线直接求得, 图 6

为不同初始级配下颗粒破碎分形维数 D 与围压 σ_3 的关系曲线。由于 D 为无量纲量, 故将围压 σ_3 除以大气压强 p_a 转化为无量纲量。

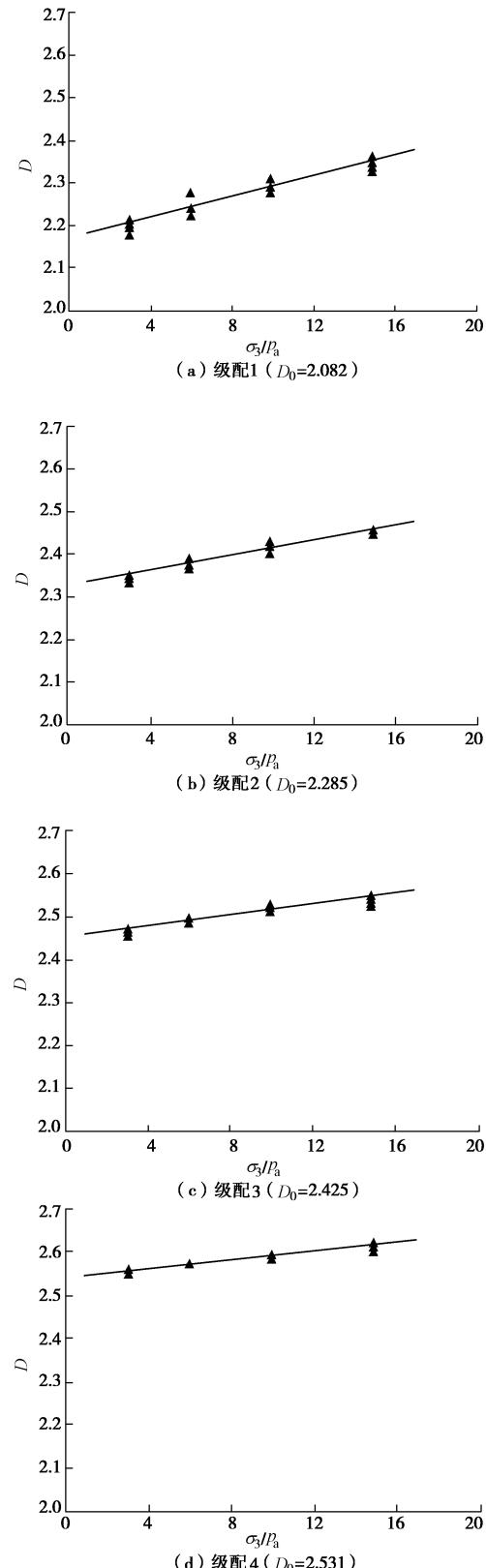
图 6 D 与 σ_3/p_a 之间的关系曲线

Fig. 6 Relation between D and σ_3/p_a

从图 6 中可以发现如下规律: ①各初始级配试样

试验结束后的颗粒破碎分形维数 D 与围压 σ_3/p_a 具有较好的线性关系, 随着围压增大, 破碎分形维数逐渐增大; ②级配 1 试样的颗粒破碎分形维数 D 与初始分形维数 D_0 偏离距离较大, 随着级配中细颗粒含量的增加, 偏离距离逐渐减小, 颗粒破碎程度逐渐减轻; ③作用于试样的围压越高, 试样的颗粒破碎分形维数 D 与初始分形维数 D_0 偏离距离越大, 颗粒破碎越严重。

基于上述分析, 可知试样级配、围压对颗粒破碎情况影响显著, 而密度对其影响可忽略不计, 故可设颗粒破碎分形维数是级配、围压的函数, 即

$$D = f(D_0, \sigma_3), \quad (1)$$

式中, D 为颗粒破碎分形维数, D_0 为试样初始分形维数, σ_3 为围压 (kPa)。

由于颗粒破碎分形维数与围压呈线性增长关系, 且随初始分形维数增大而增大, 最终得出颗粒破碎分形维数 D 随围压、初始级配的变化规律为

$$D = l + \alpha(\sigma_3/p_a) + \beta D_0, \quad (2)$$

式中, l , α , β 为材料参数, 对于本文研究的堆石料, $l = 0.744$, $\alpha = 0.008$, $\beta = 0.699$ 。

颗粒破碎分形维数随试样级配及围压的变化规律如图 7 所示。

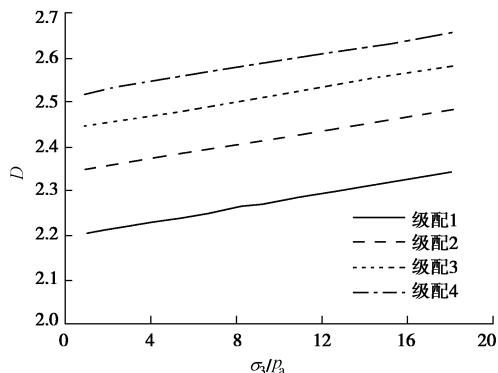


图 7 D 与 σ_3/p_a 之间的关系曲线

Fig. 7 Relation between D and σ_3/p_a

4 结 论

本文利用大型三轴仪, 开展了一系列不同级配、不同密度、不同围压条件下的三轴剪切试验, 并对剪切前后的试样进行了颗粒分析, 研究了级配、密度、围压对试验前后试样粒径分布的影响, 探讨了堆石料的颗粒破碎规律, 得到以下 4 点结论。

(1) 级配、围压一定时, 相对密度对试样剪切后的粒径分布影响很小, 密度对其颗粒破碎的影响程度可以忽略。

(2) 级配、密度一定时, 围压对试样剪切后的粒径分布影响较大, 颗粒破碎随围压增大而增大, 颗粒

破碎分形维数与围压呈线性增长关系。

(3) 围压、密度一定时, 级配对试样剪切后的粒径分布影响显著, 颗粒越粗, 破碎越严重, 随着初始分形维数 D 的增大, 颗粒破碎程度逐渐减轻。

(4) 建立了颗粒破碎分形维数随初始级配、围压的变化规律公式, 可较好地描述颗粒破碎程度与各影响因素之间的关系。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York: Wiley, 1973: 109 - 200.
- [3] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水力学报, 1987(5): 59 - 66. (GUO Qing-guo. Experimental study on the shear strength of coarse-grained materials[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(5): 59 - 66. (in Chinese))
- [4] 柏树田, 周晓光. 堆石在平面应变条件下的强度和应力 - 应变关系[J]. 岩土工程学报, 1991, **13**(4): 33 - 40. (BAI Shu-tian, ZHOU Xiao-guang. Strength and Stress-Strain Relationship of rockfill under plane strain condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **13**(4): 33 - 40. (in Chinese))
- [5] 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. The mechanical properties of rockfills[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1997(3): 21 - 30. (in Chinese))
- [6] 周晓光. 堆石在高应力及实际应力路径条件下的强度与变形特性研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1998: 65 - 81. (ZHOU Xiao-guang. Study on the strength and deformation of rockfill materials under high stress and stress path conditions[R]. Beijing: Chinese Institute of Water and Hydropower Research, 1998: 65 - 81. (in Chinese))
- [7] 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. (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))
- [8] HARDIN B. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [9] 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))

[10] 高玉峰, 张兵, 刘伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究[J]. 岩石力学, 2009, **30**(5): 1237 - 1240. (GAO Yu-feng, ZHANG Bing, LIU Wei, et al. Experimental study on particle breakage behavior of rockfill in large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1237 - 1246. (in Chinese))

[11] 魏松, 朱俊高, 钱七虎, 等. 粗粒料颗粒破碎三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4): 533 - 538. (WEI Song, ZHU Jun-gao, QIAN Qi-hu, et al. Particle breakage of coarse-grained materials in triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(4): 533 - 538. (in Chinese))

[12] 凌华, 殷宗泽, 朱俊高, 等. 堆石料强度的缩尺效应试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, **39**(5): 540 - 544. (LING hua, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao, et al. Experimental study of scale effect on strength of rockfill materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, **39**(5): 540 - 544. (in Chinese))

[13] 刘恩龙, 覃燕林, 陈生水, 等. 堆石料的临界状态探讨[J]. 水利学报, 2012, **43**(5): 505 - 511. (LIU En-long, TAN Yan-lin, CHEN Sheng-shui, et al. Investigation on critical state of rockfill materials[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(5): 505 - 511. (in Chinese))

[14] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 堆石料的临界状态与考虑颗粒破碎的本构模型[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊2): 148 - 154. (LIU En-long, CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, et al. Critical state of rockfill materials and a constitutive model considering grain crushing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 148 - 154. (in Chinese))

[15] SL 237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL 237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))

[16] 石修松. 平面应变条件下堆石料强度和中主应力研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2011. (SHI Xiu-song. Study on strength and intermediate principal stress of rockfill material in plain strain state[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2011. (in Chinese))

[17] 朱俊高, 翁厚洋, 吴晓铭, 等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2394 - 2398. (ZHU Jun-gao, WENG Hou-yang, WU Xiao-ming, et al. Experimental study of compact density of scaled coarse-drained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2394 - 2398. (in Chinese))