

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.014

# 考虑级配影响的粗粒料压缩破碎特性试验

魏 浩,沈超敏,刘斯宏,于际都

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**采用分形维数和级配宽度作为级配的量化指标,通过粗粒料的侧限压缩试验,研究级配对密实粗粒料的堆积、变形以及破碎特性的影响规律。试验结果表明,粗粒料的最大干密度和低应力下的压缩模量均随着分形维数的增大先增大后减小,在分形维数为2.2附近存在极大值;同时,两者均随着级配宽度增大而增大。粗粒料的破碎强度可通过双对数坐标下的拐点表征,破碎强度随着分形维数与级配宽度的增大而增大;破碎强度越高,颗粒破碎率越小;不同级配的粗粒料充分破碎后的最终级配都收敛于唯一的分形分布。

**关键词:**粗粒料;最大干密度;压缩模量;分形维数;级配宽度;破碎强度

**中图分类号:**TV41      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-1980(2020)02-0182-07

## Experimental study on compression and crushing characteristics of coarse granular materials considering influence of gradations

WEI Hao, SHEN Chaomin, LIU Sihong, YU Jidu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Using the fractal dimension and the gradation width to quantify the gradation, the influence of gradation on the maximum dry density, the oedometric modulus and the particle breakage is investigated through a series of oedometric compression tests. The test results show that the maximum dry density of coarse-grained material increases first and then decreases with the increase of fractal dimension and reaches a maximum value when the fractal dimension is near 2.2. Meanwhile, the maximum dry density of coarse grain increases with the increase of gradation width. The oedometric modulus under a low-stress level is influenced similarly by the gradation. Denoting the transitional stress in double logarithmic coordinates as the crushing strength, the crushing strength of coarse-grained materials increases with the increase of fractal dimension and gradation width. The greater the crushing strength, the smaller the breaking rate of particle. The final gradation of coarse aggregate with different initial gradations converges towards a unique ultimate fractal distribution.

**Key words:** coarse-grained materials; maximum dry density; compression modulus; fractal dimension; gradation width; crushing strength

粗粒料是由粒径大小不一、形状不规则的颗粒相互充填而形成,具有压实性好、沉陷变形小、抗剪强度高、取材广等优点,被广泛应用在水利、港口、交通等基础建设工程中。由于粗粒料颗粒间更多是点接触,一般在外力作用下,即使在低应力时,颗粒也容易发生破碎,在高应力作用时粗粒料破碎现象通常更加明显<sup>[1-3]</sup>。颗粒发生破碎后会导致粗粒料级配发生变化,进而对粗粒料的变形特性,尤其是对压缩性产生十分显著的影响。以堆石坝为例,在坝体填筑、蓄水以及运行过程中的颗粒破碎是造成土石坝沉降的重要因素之一。

以往关于粗粒料的室内大型三轴试验<sup>[4-9]</sup>和数值试验<sup>[10-11]</sup>结果表明颗粒大小和形状、母岩的性质、相对

**基金项目:** 国家自然科学基金(U1765205);国家重点研发计划(2017YFC0404801)

**作者简介:** 魏浩(1997—),男,硕士研究生,主要从事土石坝工程研究。E-mail:weihaohu@163.com

**通信作者:** 沈超敏,博士后。E-mail:chaomin.shen@hotmail.fr

**引用本文:** 魏浩,沈超敏,刘斯宏,等. 考虑级配影响的粗粒料压缩破碎特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):182-188.  
WEI Hao, SHEN Chaomin, LIU Sihong, et al. Experimental study on compression and crushing characteristics of coarse granular materials considering influence of gradations[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(2):182-188.

密实度、围压及应力路径等对颗粒压缩破碎均有影响。然而针对粗粒料的侧限压缩破碎特性研究相对不多,但同样作为颗粒材料的砂土,国内外学者研究相对较多且可为粗颗粒的压缩破碎特性研究提供借鉴。Hagerty<sup>[12]</sup>通过高压应力下的砂土侧限压缩试验,发现初始试样密度、初始中值粒径、颗粒形状、颗粒物质组成都对颗粒破碎有影响。张季如等<sup>[13]</sup>认为破碎强度、破碎量和颗粒粒径的大小有关,破碎量随着应力增大而增大,但单位应力增量对应的破碎率逐次减小。这些研究大都是探究影响颗粒破碎的因素,而关于初始级配对粗粒料压缩破碎规律的影响研究较少。粗粒料作为一种宽级配颗粒体材料,单颗粒的接触点数目、接触力大小都有很大的变化幅度,因此其破碎特性与材料的初始级配关系密切。近年来,随着筑坝坝高的提升,相应的堆石坝填筑标准也在提高,此时优化级配的选取可以有效地提高粗粒料的压缩模量与破碎强度从而减小坝体变形。因此,研究初始级配对粗粒料的压缩破碎特性影响具有重要意义。

本文通过系统的侧限压缩试验,探究粗粒料级配对最大干密度、侧限压缩模量与破碎特性的影响规律,旨在为土石坝工程筑坝堆石料的级配优化提供科学依据。

# 1 试验仪器、材料与方法

## 1.1 试验仪器与材料

试验在大型侧限压缩仪上进行,试样直径为 300 mm,高度为 150 mm。仪器采用油缸加压,液压控制系统,最大竖向荷载为 2000 kN,量测精度为 0.1 kN。轴向位移传感器的最大量程为 150 mm,量测精度为 0.01 mm。

试验材料为某露天料场的微风化白云岩,饱和抗压强度为 30 ~ 60 MPa(中硬岩),相对密度为 2.65。试验选用 20 ~ 15 mm、15 ~ 10 mm、10 ~ 5 mm、5 ~ 2 mm、2 ~ 1 mm 共 5 个粒径组。试样最大粒径均为 20 mm。与正常的级配曲线设计不同,本文对颗粒粒径分布的质量分形维数模型进行适当修改,并采用修改过的模型制定不同试样的级配。

Mandelbrot<sup>[14]</sup>建立二维分形模型后,Tyler 等<sup>[15]</sup>对该分形模型进行了三维空间的推广,通过假定不同土壤粒级的密度相同等条件,使体积模型转化为质量模型,从而得到土壤粒径分布的质量分形模型,Einave<sup>[16]</sup>进一步修改得

$$P(d) = \frac{d_{\min}^{3-D} - d^{3-D}}{d_{\min}^{3-D} - d_{\max}^{3-D}}$$

(1)

式中: $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$ ——最小、最大粒径; $d$ ——颗粒特定粒径; $D$ ——分形维数。

对式(1)进行整理得

$$P(d) = \frac{1 - (\frac{d}{d_{\min}})^{3-D}}{1 - \Lambda^{3-D}}$$

(2)

其中

$$\Lambda = \frac{d_{\max}}{d_{\min}}$$

用 3 个参数  $D$ 、 $d_{\min}$  和  $\Lambda$  可以表征任意一条级配曲线,调整式(2)的任意一个参数,级配曲线就会发生变化。本文通过控制不同的  $D$ 、 $d_{\min}$  和  $\Lambda$  制定了 7 组试验料的级配,见表 1。需要指出的是,由于本文制备的试样控制了粒径组宽度,因此小于最小粒径的颗粒被剔除。

表 1 粗粒料试样各粒径组初始质量分数

Table 1 Initial mass contents of particles with different sizes for coarse granular samples

| 试样编号 | 粗粒料级配 |           |                      | 各粒径组的初始质量分数/% |            |           |          |          |
|------|-------|-----------|----------------------|---------------|------------|-----------|----------|----------|
|      | $D$   | $\Lambda$ | $d_{\min}/\text{mm}$ | 20 ~ 15 mm    | 15 ~ 10 mm | 10 ~ 5 mm | 5 ~ 2 mm | 2 ~ 1 mm |
| 试样 1 | 1.8   | 10        | 2                    | 31.2          | 29.1       | 26.2      | 13.5     |          |
| 试样 2 | 2.0   | 10        | 2                    | 27.8          | 27.8       | 27.7      | 16.6     |          |
| 试样 3 | 2.2   | 10        | 2                    | 24.4          | 26.2       | 29.1      | 20.3     |          |
| 试样 4 | 2.4   | 10        | 2                    | 21.2          | 24.3       | 30.0      | 24.5     |          |
| 试样 5 | 2.6   | 10        | 2                    | 18.0          | 22.2       | 30.5      | 29.3     |          |
| 试样 6 | 2.0   | 20        | 2                    | 26.3          | 26.3       | 26.3      | 15.8     | 5.3      |
| 试样 7 | 2.0   | 4         | 5                    | 33.3          | 33.4       | 33.3      |          |          |

1.2 试验方法

制备试样时,控制试样的总质量一定,拌和均匀后分2层装入试样筒振实。为了尽量消除每组级配的初始孔隙比对试验压缩过程的影响,试样统一按其最大干密度制备。记录每次制备完成后试样的高度并换算成试样密度。试验开始前,先在试样顶面放置一块刚性加载板,使加载时竖向荷载均匀分布在试样顶部,然后固定竖向位移计。试验采用轴向应变控制,控制试验轴向压缩速率为0.5 mm/min,并采集即时的加载力与位移数据。

2 试验结果与分析

2.1 最大干密度

由图1(a)可见,粗粒料的最大干密度随着 $D$ 的增大先增大后减小,当 $D$ 在2.2附近时,最大干密度出现极大值,即试样的密实度达到最优。这种现象的主要原因是随着 $D$ 的增大,细粒增多,颗粒间相互接触数量增多使颗粒间接触更紧凑,充填关系变得更好;而当 $D>2.2$ 后,随着细粒含量继续增大,小颗粒的非仿射运动增多,即颗粒体系内部会出现不受力的小颗粒,使得充填关系变差<sup>[17]</sup>。值得说明的是,本文试验是剔除最小粒径后进行的,因此最大干密度的极大值对应的分形维数均在2.2附近,比不剔除小颗粒的试验得到的分形维数值略小。由图1(b)可以看出,粗粒料的最大干密度随着 $\Delta$ 增大而增大。这是因为随着 $\Delta$ 的增大,颗粒粒径跨越的尺度越大,小颗粒填充大颗粒孔隙越充分,体系密实度越高。

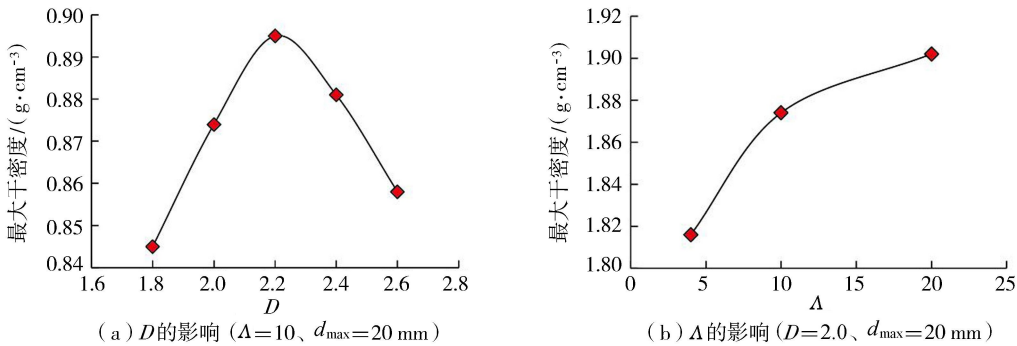


图1 最大干密度与初始级配的关系

Fig.1 Relationship between initial gradation and maximum dry density

2.2 压缩曲线与压缩模量

由图2(a)可见,粗粒料侧限压缩过程中,当竖向应力较小时,孔隙比变化范围较小,Pestana 等<sup>[18]</sup>认为,这一阶段主要是颗粒骨架的和颗粒位置的调整。当竖向应力增大到某个临界值时发生粗粒料颗粒破碎,孔隙比变化较大,因此曲线会出现骤降。可以看出在高应力情况下,5个不同初始级配试样的压缩曲线均有收敛于同一压缩曲线的趋势。图2(b)可见类似规律,高应力状态下的压缩曲线有收敛于唯一压缩曲线的趋势。

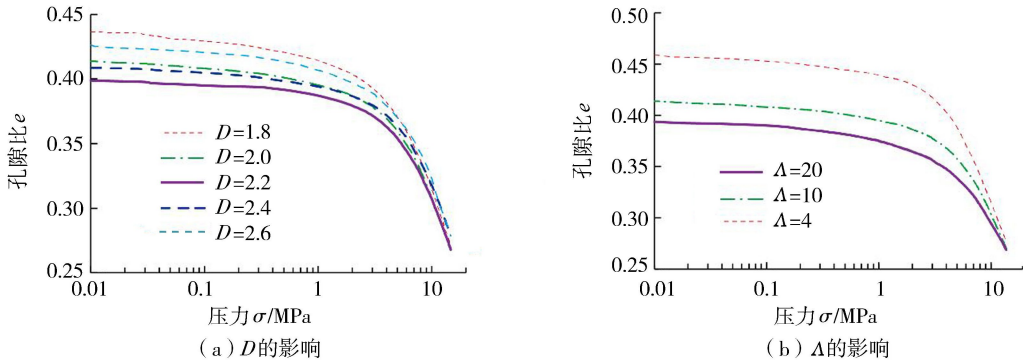


图2 不同级配下粗粒料的侧限压缩曲线

Fig.2 Oedometric compression curves of coarse-grained material with different gradations

在250~300 kPa的竖向应力下,粗粒料试样的破碎都较小,对应的压缩模量 $E_s$ 主要由颗粒骨架的变形引起,因此以这段应力范围内的模量作为颗粒破碎前的压缩模量。由图3(a)可知,随着 $D$ 的增大 $E_s$ 先增大

后减小,在  $D=2.2$  附近达到最大,这与粗粒料的最大干密度试验结果有着相似的规律。这是因为颗粒间排列紧密不易发生位置调整,粗粒料颗粒间的摩擦和咬合作用吸收了大部分能量,使得粗粒料抵抗变形的能力变强,表现出较大的压缩模量<sup>[19]</sup>。这个结果与 Minh 等<sup>[17]</sup> 针对不同分形维数砂土的侧限压缩试验的离散元模拟结果基本吻合,离散元模拟结果表明,当  $D<2.2$  时,随着  $D$  的增加,颗粒间的细观接触增多,有助于提高材料的  $E_s$ ;当  $D>2.2$  时,继续增大  $D$ ,会导致颗粒体系内部出现不承受力的小颗粒,反而会降低材料的  $E_s$ 。由图 3(b)可见,随着  $\Delta$  的增大,粗粒料的  $E_s$  也随之增大。从细观上看,随着  $\Delta$  的增大,细颗粒有助于充填大颗粒间的孔隙,并分担颗粒间的接触力,从而提升  $E_s$ 。

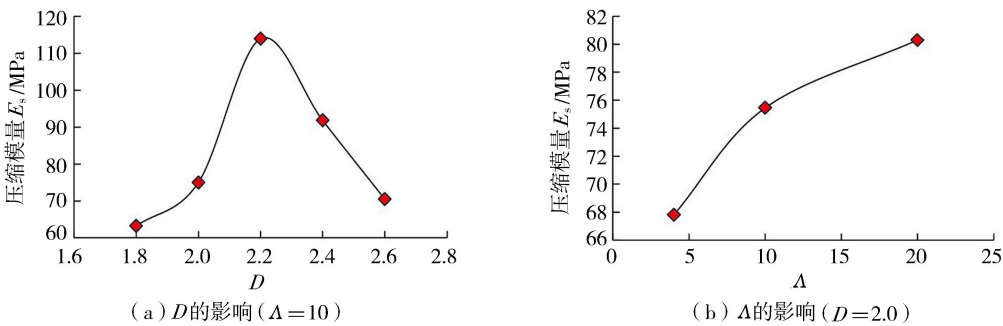


图 3 初始级配与压缩模量的关系

Fig 3 Relationship between initial gradation and oedometric modulus

2.3 颗粒破碎

粗粒料作为一种散粒体材料,细观-宏观理论与试验结果均表明,颗粒材料的压缩变形可以分为 2 个阶段,分别对应着不同的细观机制<sup>[20]</sup>:在竖向应力较低时,粗粒料的变形主要是由颗粒骨架间弹性压缩造成的,而在竖向应力较高时,粗粒料压缩变形的机制为颗粒破碎造成颗粒结构重排。在低应力条件下,细观颗粒层面的细观接触本构关系以及颗粒配位数与应力的关系表明颗粒材料的压缩变形曲线在双对数坐标下呈线性关系<sup>[21]</sup>。而在高应力条件下,Pestana 等<sup>[18]</sup>发现,在发生破碎后压缩曲线双对数坐标下的线性关系依然成立,只会发生斜率的变化。因此,本文定义双对数坐标下双线性的交点所对应的应力大小为粗粒料的破碎强度。图 4 为双对数坐标下试样 2 的应力-应变关系,其他 6 个粗粒料试样均有类似规律故列于表 2。可以看出,在双对数坐标内,不同级配的粗粒料应力应变关系均有双线性趋势,且相较于常规的直接在  $e-\lg \sigma$  曲线上定义拐点或临界点,本文定义的破碎强度具有显著性好、细观机制明确的优点。

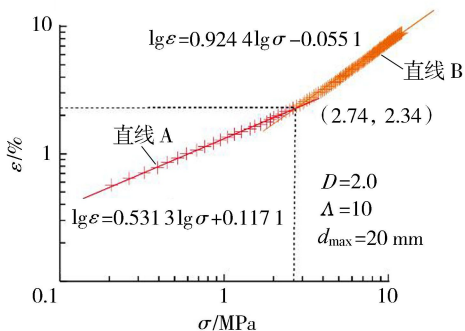


图 4 双对数坐标下试样 2 的应力-应变关系

Fig.4 Stress-strain relationship for two coarse-grained material samples in the double logarithmic coordinates

表 2 粗粒料在双对数坐标内的线性参数

Table 2 Linear fitting parameters for coarse-grained materials in double logarithmic coordinates

| 试样编号 | 直线 A                                       |        | 直线 B                                       |        | 破碎强度<br>$\sigma_f$ /MPa |
|------|--------------------------------------------|--------|--------------------------------------------|--------|-------------------------|
|      | 线性拟合方程                                     | $R^2$  | 线性拟合方程                                     | $R^2$  |                         |
| 试样 1 | $\lg \varepsilon=0.5190 \lg \sigma+0.1943$ | 0.9989 | $\lg \varepsilon=0.8809 \lg \sigma+0.0458$ | 0.9997 | 2.5724                  |
| 试样 2 | $\lg \varepsilon=0.5313 \lg \sigma+0.1171$ | 0.9995 | $\lg \varepsilon=0.9244 \lg \sigma-0.0551$ | 0.9987 | 2.7422                  |
| 试样 3 | $\lg \varepsilon=0.7302 \lg \sigma-0.0763$ | 0.9996 | $\lg \varepsilon=1.0311 \lg \sigma-0.2160$ | 0.9998 | 2.9115                  |
| 试样 4 | $\lg \varepsilon=0.5647 \lg \sigma+0.0235$ | 0.9984 | $\lg \varepsilon=1.0027 \lg \sigma-0.1910$ | 0.9998 | 3.0883                  |
| 试样 5 | $\lg \varepsilon=0.5877 \lg \sigma+0.1350$ | 0.9997 | $\lg \varepsilon=0.8456 \lg \sigma+0.0020$ | 0.9991 | 3.2779                  |
| 试样 6 | $\lg \varepsilon=0.6200 \lg \sigma+0.1040$ | 0.9997 | $\lg \varepsilon=0.8334 \lg \sigma-0.0192$ | 0.9993 | 3.2822                  |
| 试样 7 | $\lg \varepsilon=0.3840 \lg \sigma+0.2135$ | 0.9993 | $\lg \varepsilon=1.0022 \lg \sigma-0.0001$ | 0.9993 | 2.1180                  |

图 5(a)表明,在粗粒料的级配宽度一定时,破碎强度随着  $D$  的增大而近似呈线性增大。这是因为根据颗粒粒径分布的质量分形维数模型, $D$  的增大意味着细粒含量增加,而根据 Nakata 等<sup>[22]</sup> 针对单一颗粒的破碎试验结果,颗粒的破碎强度与粒径负相关,因此试样越难发生破碎,从而破碎强度变大。图 5(b)可见,在

$D$  相同的情况下,随着  $\Delta$  的增大粗粒料的破碎强度变大。因为  $\Delta$  越大意味着粒径组宽度越大,颗粒的接触点数目越多,颗粒在大量接触力作用下处于类似于“静水压力”的作用,不易发生破碎。

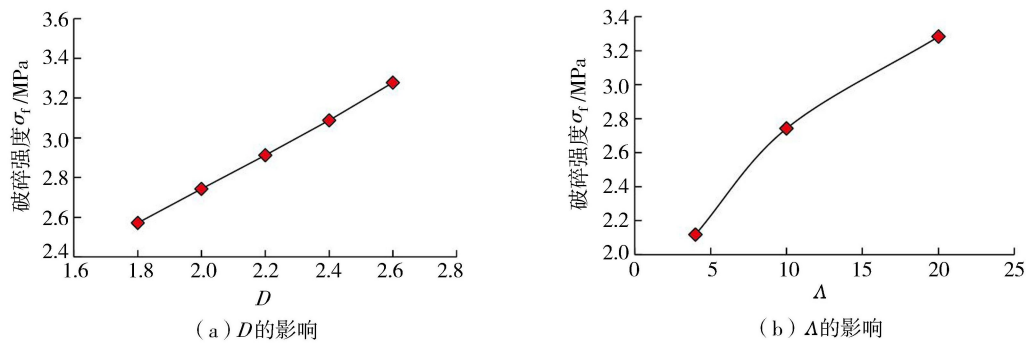


图5 级配对粗粒料破碎强度的影响

Fig. 5 Effect of initial gradation on crushing strength of coarse-grained material

采用 Marsal<sup>[23]</sup> 提出的破碎率  $B_r$  来评价颗粒的破碎程度,其中  $B_r$  表示的是试验前后各粒径组含量正差值之和,即

$$B_r = \sum (W_{ki} - W_{kf})$$

(3)

式中: $W_{ki}$ ——初始级配曲线上某粒径组的含量; $W_{kf}$ ——最终级配曲线上相同粒径组的含量。

由图 6 可见,粗粒料的颗粒破碎率随  $D$  和  $\Delta$  的增大而减小。这是因为随着  $D$  和  $\Delta$  的增大,破碎强度增大,颗粒越不容易发生破碎。这也从级配变化的角度验证了级配对颗粒破碎的影响。

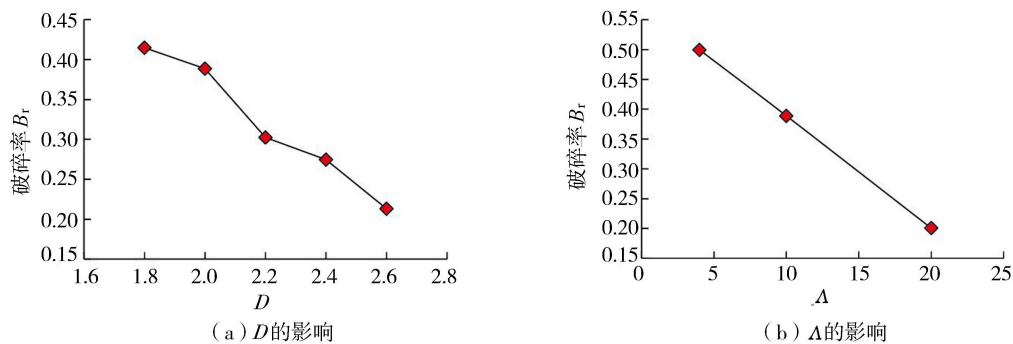


图6 不同初始级配的粗粒料对破碎率  $B_r$  的影响

Fig. 6 Effect of initial gradation on breakage index  $B_r$

图7为双对数坐标下不同初始级配的粗粒料试验后的级配曲线,可见在高应力下粗粒料的级配曲线有

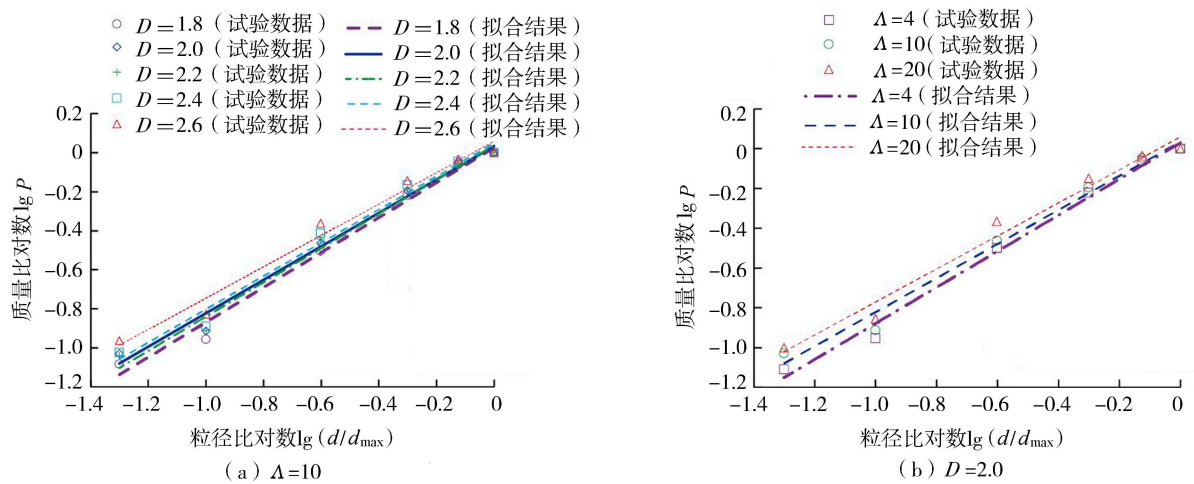


图7 不同初始级配粗粒料试验后  $\lg P - \lg(d/d_{max})$  关系曲线

Fig. 7 Relationship of  $\lg P$  and  $\lg(d/d_{max})$  for coarse-grained materials samples of different initial gradation after compression tests

收敛于唯一分形级配的趋势。由表 3 可见,破碎后的级配分形维数  $D$  在 2.1 ~ 2.2 之间,说明在达到一定的应力大小之后,不同的初始级配的粗粒料压缩特性会趋于相似的力学特性。

表 3 粗粒料试验后颗粒破碎结果

Table 3 Particle breakage results of coarse-grained materials after compression tests

| 试样编号 | 试验后颗粒含量/%  |            |           |          |          |       | 破碎后 $D$ | $B_r/\%$ | $R^2$   |
|------|------------|------------|-----------|----------|----------|-------|---------|----------|---------|
|      | 20 ~ 15 mm | 15 ~ 10 mm | 10 ~ 5 mm | 5 ~ 2 mm | 2 ~ 1 mm | <1 mm |         |          |         |
| 试样 1 | 13.2       | 26.3       | 29.1      | 20.3     | 2.8      | 8.3   | 2.106   | 41.48    | 0.988 1 |
| 试样 2 | 10.4       | 25.7       | 29.4      | 22.2     | 2.9      | 9.4   | 2.144   | 38.88    | 0.985 9 |
| 试样 3 | 12.4       | 23.1       | 28.4      | 23.9     | 3.2      | 9.0   | 2.140   | 30.24    | 0.986 2 |
| 试样 4 | 9.7        | 22.0       | 29.6      | 25.8     | 3.4      | 9.5   | 2.149   | 27.48    | 0.983 7 |
| 试样 5 | 7.4        | 20.6       | 28.5      | 28.6     | 4.0      | 10.9  | 2.199   | 21.32    | 0.980 7 |
| 试样 6 | 8.1        | 20.8       | 28.2      | 28.9     | 3.9      | 10.1  | 2.170   | 20.10    | 0.980 3 |
| 试样 7 | 11.6       | 32.3       | 31.1      | 15.6     | 2.8      | 6.6   | 2.101   | 49.95    | 0.985 1 |

3 结 论

- a. 当级配宽度  $\Lambda$  一定时,随着分形维数  $D$  的增大,粗粒料最大干密度先增大后减小,极大值在  $D=2.2$  附近出现;当  $D$  一定时,最大干密度随  $\Lambda$  增大而增大。低应力情况下,级配对压缩模量有相似的影响规律。
- b. 在双对数坐标下,不同级配粗粒料的应力应变均呈双线性关系。当  $\Lambda$  一定时,粗粒料的破碎强度随  $D$  的增大而近似线性增大;当  $D$  一定时,破碎强度随  $\Lambda$  的增大而显著增大。
- c. 粗粒料破碎强度越大,颗粒破碎率  $B_r$  越小。不同初始级配的粗粒料充分破碎后的最终级配都收敛于唯一的分形分布。

参考文献:

[ 1 ] 日本土质工学会. 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.

[ 2 ] 翁厚洋,朱俊高,余挺,等. 粗粒料缩尺效应研究现状与趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(4):425-429. (WENG Houyang, ZHU Jungao, YU Ting, et al. Research situation and trend of coarse aggregate scale effect[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, 37(4): 425-429. (in Chinese))

[ 3 ] 刘汉龙,孙逸飞,杨贵,等. 粗粒料颗粒破碎特性研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(4):361-369. (LIU Hanlong, SUN Yifei, YANG Gui, et al. Review of particle crushing characteristics of coarse aggregate[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(4): 361-369. (in Chinese))

[ 4 ] 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]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1237-1240. (GAO Yufeng, ZHANG Bing, LIU Wei, et al. Experimental study on particle breakage behavior of rockfills in large-scale triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1237-1240. (in Chinese))

[ 5 ] 傅华,凌华,蔡正银. 粗颗粒土颗粒破碎影响因素试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(1):75-79. (FU Hua, LING Hua, CAI Zhengyin. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(1): 75-79. (in Chinese))

[ 6 ] 杨光,张丙印,于玉贞,等. 不同应力路径下粗粒料的颗粒破碎试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 338-342. (YANG Guang, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen, et al. An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress paths[J]. Journalof Hydraulic Engineering, 2010, 41(3): 338-342. (in Chinese))

[ 7 ] 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 Xianjing, LIU Jingmao, ZOU Degao, et al. Experimental study of particle breakage of Zipingpu rockfill material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(1): 35-40. (in Chinese))

[ 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 Yufeng, WANG Bingshen, CHI Shichun. Study on particle breakage during rock-fill shearing[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1692-1697. (in Chinese))

[ 9 ] 杨杰,蔡新,宋小波. 基于大三轴试验的胶凝堆石料力学特性[J]. 水利水电科技进展,2014,34(4):24-28. (YANG Jie,CAI Xin,SONG Xiaobo. Mechanical properties of CSG material based on large triaxial test[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(4):24-28. (in Chinese))

[10] 杨贵,许建宝,刘昆林. 粗粒料颗粒破碎数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2015,36(11):3301-3306. (YANG Gui, XU

Jianbao, LIU Kunlin. Numerical simulation of particle breakage of coarse aggregate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3301-3306. (in Chinese))

[11] 吴莹, 马刚, 周伟, 等. 基于分形理论的堆石料级配优化研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1977-1985. (WU Ying, MA Gang, ZHOU Wei, et al. Optimization of rockfill gradation based on fractal theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1977-1985. (in Chinese))

[12] HAGERTY M M. One-dimensional high-pressure compression of granular media[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(1): 1-18.

[13] 张季如, 祝杰, 黄文竞, 等. 侧限压缩下石英砂砾的颗粒破碎特性及其分形描述[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 783-789. (ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Wenjing, et al. Particle crushing characteristics and fractal description of quartz sand gravel under lateral compression[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 783-789. (in Chinese))

[14] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[J]. American Journal of Physics, 1983, 51(3): 286.

[15] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.

[16] EINAVE I. Breakage mechanics part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(6): 1274-1297.

[17] MINH N H, CHENG Y P. A DEM investigation of the effect of particle-size distribution on one-dimensional compression[J]. Géotechnique, 2013, 63(1): 44-53.

[18] PESTANA J M, WHITTLE A J. Compression model for cohesionless soils[J]. Géotechnique, 1995, 45(4): 611-631.

[19] 姜景山, 刘汉龙, 程展林, 等. 密度和围压对粗粒土力学性质的影响[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(8): 46-50. (JIANG Jingshan, LIU Hanlong, CHENG ZhanLin, et al. Effects of density and confining pressure on mechanical properties of coarse-grained soils[J]. Journal of Yangtze River Academy of Sciences, 2009, 26(8): 46-50. (in Chinese))

[20] CIANTIA M, ARROYO A D T M, CALVETTI F, et al. An approach to enhance efficiency of DEM modelling of soils with crushable grains[J]. Géotechnique, 2015, 65(2): 91-110.

[21] SHEN Chaomin, LIU Sihong, WANG Yishu. Microscopic interpretation of one-dimensional compressibility of granular materials[J]. Computers & Geotechnics, 2017, 91: 161-168.

[22] NAKATA Y, KATO Y, HYODO M, et al. One dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society, 2001, 41(2): 39-51.

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

(收稿日期: 2018-12-20 编辑: 刘晓艳)

+++++

• 简讯 •

### 第三届全国交通岩土工程学术会议将在南京召开

为了给工作在设计、施工、科研、教学各个领域的交通岩土工程工作者提供一个交流平台,由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会交通岩土工程专业委员会主办,东南大学、江苏省岩土力学与工程学会承办,中设设计集团股份有限公司、河海大学、南京工业大学协办的第三届全国交通岩土工程学术会议将于2020年11月在南京召开。

会议主题包括:交通基础设施地基基础的勘察、设计、施工、检测和加固、交通隧道和地下工程的设计、施工和运营、交通基础设施地基处理、边坡与支档结构、交通岩土工程抗震、车-路-地基共同作用、特殊土地地区的交通岩土工程、交通基础工程环境保护与修复、轨道交通岩土及地下水问题、岩土工程智能化技术。

(本刊编辑部供稿)