

DOI: 10.11779/CJGE202003018

# 粗粒料颗粒破碎变化规律大型三轴试验研究

刘萌成<sup>1</sup>, 孟 锋<sup>1</sup>, 王洋洋<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 311305)

**摘 要:** 基于土的颗粒破碎渐进演化分析, 提出了土的颗粒破碎 4 项基本性质, 以及在长期/反复加载过程中土的颗粒破碎 3 个特征状态。定义了土的全局与局部破碎指标, 用以区分破碎的中止和终止状态, 同时分析给出了(修正)相对破碎与破碎指数间的数学关系。定性分析了系列大型三轴试验过程中粗粒料级配变化规律, 给出了各类型破碎指标的数学表达式, 揭示了单调加载条件下粗粒料颗粒破碎完整规律: 剪切过程中全局破碎关于归一化偏应力与平均主应力呈负指数增长关系, 而临界状态和固结完成时的全局破碎只关于归一化平均主应力呈负指数增长关系, 局部破碎只关于应力水平呈双曲线关系且在临界状态时均归为 1。

**关键词:** 粗粒料; 级配; 颗粒破碎; 破碎指标; 三轴试验

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)03-0561-07

**作者简介:** 刘萌成(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事交通岩土与特殊土土力学方面的教学与科研工作。E-mail: mcliu2002@163.com。

## Evolution of particle crushing of coarse-grained materials in large-scale triaxial tests

LIU Meng-cheng<sup>1</sup>, MENG Feng<sup>1</sup>, WANG Yang-yang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 311305, China)

**Abstract:** By analyzing the progressive evolution of particle crushing of crushable soils, four basic properties of particle crushing are presented, and three characteristic states are also given over long-term or repeated loading. Two breakage indexes, namely the global and local breakage index, are defined for the crushable soils to distinguish temporary stop from perpetual termination of particle crushing, and a mathematical relationship is put forward between the revised relative breakage and the grading index. A series of consolidated drained large-scale triaxial tests are conducted for the coarse-grained materials (CGMs). The evolution of particle grading and breakage is analyzed, and some mathematical formulations are presented for various breakage indexes, which exhibits an entire rule of particle crushing of CGMs under the monotonic loads: (1) The global breakage has a negative exponential increase with the non-normalized deviatoric stress and the mean principal stress upon shearing. (2) At the end of consolidation or in the critical state, it increases merely with the non-normalized mean principal stress which meets the above-mentioned negative exponential function. (3) The local breakage varies with the stress level in a way of hyperbolic function and approaches 1 in the critical state.

**Key words:** coarse-grained material; grading; particle crushing; breakage index; triaxial test

## 0 引 言

粗粒料(包括碎/砾石和堆石料等)具有强度高与变形小的良好性质, 因而被广泛用于土木、水利与交通等基础设施建设之中。作为一种粒径较大的粗颗粒材料, 粗粒料具有突出的颗粒破碎特性, 从而在工程性质上与细粒土存在较大差别<sup>[1]</sup>。目前, 粗粒料颗粒破碎研究集中于宏观尺度上的破碎指标定义、演化规律分析及其对强度变形特性影响规律等方面。

已有研究表明, 土的颗粒破碎与其颗粒强度、尺寸、

形状、接触配位数、级配、密实度以及受力状况等内外因素相关<sup>[2]</sup>。为了度量颗粒破碎大小, Sebastina<sup>[2]</sup>、Marsal<sup>[3]</sup>、Hardin<sup>[4]</sup>、Lade等<sup>[5]</sup>、Muir等<sup>[6]</sup>、Xiao等<sup>[7]</sup>分别提出了 $B_g$ ,  $B_r$ ,  $B_{10}$ ,  $I_G$ ,  $D$ 与 $B_{r50}$ 等各种各样的颗粒破碎量化指标。Einav<sup>[8]</sup>以极限分形级配 $p(d) = (d/d_{max})^{3-\lambda}$  ( $\lambda$  为分形维数)<sup>[9]</sup>替代 $d=0.074$  mm截断级

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51378472, 51778584)

收稿日期: 2019-03-28

配<sup>[4]</sup>作为破碎终止级配,从而提出了修正的相对破碎指标 $B_r^*$ 。针对上述不同指标,尹振宇等<sup>[10]</sup>评述认为:大多数破碎指标以偏概全,只抓住了某一指定颗粒粒径的变化,不能以统一标准来评价不同材料的破碎程度;而数个破碎指标( $I_G, B_r, B_r^*$ )抓住了级配变化的整体情况,而且 $B_r^*$ 在评价和比较材料的破碎程度时较为统一。

国内外学者采用各种破碎指标定性或定量分析了粗粒土颗粒破碎的变化规律。Hardin<sup>[4]</sup>认为相对破碎 $B_r$ 随应力比 $\eta (=q/p)$ 增加而增加,因为破碎应力 $\sigma_b$ 是 $p$ 与 $q$ 的复合函数。Kikumoto等<sup>[11]</sup>和Kan等<sup>[12]</sup>将级配状态指数 $I_G$ 与硬化参数 $p_c$ 关联,有些学者认为破碎指标只与输入总能量 $E_T$ <sup>[5]</sup>或塑性功 $W^p$ <sup>[13]</sup>存在唯一关系。Lade等<sup>[5]</sup>进一步给出了破碎指标 $B_{10}$ 与 $E_T$ 的双曲线关系,而Liu等<sup>[13]</sup>给出了破碎指标 $B_r$ 与 $W^p$ 的双曲线关系。然而,临界状态下破碎指标 $B_{rc}$ 仅与 $p$ 相关,因为此时 $\eta$ 为一常数<sup>[4]</sup>。为简化数学形式, $B_{rc}$ 与 $p$ 常用sigmoid函数予以描述<sup>[11-12, 14]</sup>;上述文献研究的是试验结束状态下级配或破碎指标的变化规律,而试验过程中的变化规律未曾涉及,原因在于试验进行过程中级配测试较为困难。这就不能了解和掌握粗粒料破碎演化的完整规律。

有鉴于此,本文首先分析土的颗粒破碎基本性质,区分了破碎的暂时与永久终止概念;其次,定义了全局与局部破碎指标,给出了相对破碎与破碎指数间的相互关系;最后,定性和定量分析了大型三轴试验各个阶段粗粒料颗粒破碎变化规律。这些研究可为深入认识三轴试验不同状态下类似岩土材料颗粒破碎完整演化规律提供参考。

为统一表达,文中所有应力皆为有效应力。

## 1 颗粒破碎基本性质

通常,颗粒破碎是指颗粒材料内(某些)颗粒在接触应力作用下开裂、崩解或磨耗而致级配改变的现象。颗粒破碎与颗粒自身强度直接关联。若不考虑环境因素(例如温湿循环)影响,粗粒土的颗粒破碎则只源于各类荷载作用。在自然条件下和漫长地质年代中,粗粒土遭受了各类荷载的长期反复作用,包括多个(静动)加载→(临界)破坏→再(静动)加载→(临界)破坏的循环往复过程,其级配产生了渐进变化和演化历史。

目前,室内单元试验是粗粒土颗粒破碎研究的主要手段,可测得某一加载(组合)条件下粗粒土的级配变化情况。由于颗粒破碎是长期渐进过程,并非试验室的一次性过程。因此,室内单元试验只能模拟自然条件下或漫长地质年代中粗粒土所历经加载历史的

小部分或代表性阶段。在三轴剪切过程中,粗粒土的剪切破坏与颗粒破碎既相互关联又有所区别。剪切破坏为宏观层次,颗粒破碎是微观层面。

在各类荷载(组合)作用下,粗粒土的颗粒破碎与塑性变形具有类似性质。即使起始应力状态一致,不同的加载历史或路径,将导致不同的颗粒破碎大小,有如摩擦耗能。依据颗粒破碎概念或定义可以推知颗粒破碎具有以下4点基本性质:①不可逆性;②累加性;③应力历史或应力路径相关性;④卸载不产生颗粒破碎的特性。

在长期/反复加载过程中,粗粒土的颗粒破碎存在破碎起始状态、(试样)临界状态和破碎终止状态3个特征状态。破碎起始状态是指开始计及颗粒破碎的初始状态。在已知的或可测度的加载历程中,破碎起始状态可人为地合理定义,因而具有相对性。(试样)临界状态是指应力和体变不再变化而偏应变持续发展的特征状态<sup>[15]</sup>,而破碎终止状态是指任意条件下颗粒材料内部不再有颗粒破碎发生的极端状态<sup>[8]</sup>。临界状态涉粗粒土的抗剪强度,而破碎终止状态涉颗粒自身强度。对于初始级配确定的粗粒土,(试样)临界状态与围压相关,而破碎终止状态具有唯一性。因为破碎终止状态仅决定于材料级配及颗粒自身强度。两者分别为破碎的中止与终止状态。当围压趋于无穷时,破碎的中止状态(例如试样临界状态)趋于破碎的终止状态。

## 2 不同破碎指标间的相互关系

依据尹振宇关于破碎指标优缺点评价<sup>[9]</sup>,以下仅讨论 $I_G$ 和 $B_r^*$ 这两种破碎指标的相关关系。由于 $B_r$ 与 $B_r^*$ 同源,为了简化表述,以下 $B_r^*$ 仍用 $B_r$ 标识。

对于连续级配的粗粒料而言,通常满足以下两个基本条件<sup>[14, 16]</sup>: $d_{\min} \rightarrow 0$ 和 $d_{\min} \ll d_{\max}$ 或 $d_{\min}/d_{\max} \rightarrow 0$ ,其中 $d_{\max}$ 与 $d_{\min}$ 分别为最大和最小粒径。

设级配函数(即土颗粒的通过百分率 $p$ 与粒径 $d$ 之间的数学表达式)为 $T=p(d)$ ,而粒径 $d=p^{-1}(T)$ 为其逆函数。定义 $F$ 为级配函数的定积分值,其表达式为

$$F = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} p(d) d(d) \approx \int_0^{d_{\max}} p(d) d(d) \quad (1)$$

与特征状态对应,将相关级配划分为初始级配 $p_0(d)$ 、当前级配 $p(d)$ 、临界状态级配 $p_c(d)$ 和破碎终止级配 $p_u(d)$ ,各自对应的定积分值为 $F_0, F, F_c$ 和 $F_u$ 。依据破碎终止状态概念,其级配满足分形分布特征<sup>[9, 17-18]</sup>,表达式为 $p_u(d)=(d/d_{\max})^{3-\lambda}$ , $\lambda$ 为分形维数。依据文献<sup>[14]</sup>,当粗粒土级配满足Talbot分布<sup>[9]</sup>( $T=p(d)=$

$(d/d_{max})^\mu$ , 其中  $\mu$  为级配曲线形状指数) 时, 可由临界状态下级配形状指数  $\mu_c$  推知极限状态下  $\mu_u$ , 此时  $3-\lambda=\mu_u$ 。

在文献[15]中, 笔者采用全局和局部破碎指标分别度量全部加载历程中和某一次加载过程中土的颗粒破碎大小, 以区分颗粒破碎的中止与终止状态。

对于修正相对破碎 (revised relative breakage) [8], 定义全局、局部和临界状态破碎指标如下:  $B_r=(F-F_0)/(F_u-F_0)$ ,  $B'_r=(F-F_0)/(F_c-F_0)$ ,  $B_{rc}=B_r/B'_r=(F_c-F_0)/(F_u-F_0)$ 。

同理, 对于级配指数 (Grading Index:  $I_G$ ) [6], 定义全局、局部和临界破碎指标如下:  $I_G=F/F_u$ ,  $I'_G=F/F_0$ ,  $I_{Gc}=I_G/I'_G=F/F_u$ 。

依据  $B_r$  与  $I_G$  的定义以及不同特征状态的物理意义可知:  $B_r=0$  与初始级配关联, 而  $I_G=0$  与  $p(d)|_{d=d_{max}}=100\%$  的单一级配关联, 且初始状态下的级配指数  $I_{G0}=F_0/F_u>0$ ;  $B_r=I_G=1$  均与破碎终止状态下土的 (极限/分形分布) 级配关联。

破碎指标  $B_r$  或  $I_G$  均能体现破碎势大小,  $B_r$  或  $I_G$  越大, 破碎势则越小, 表明粗粒料后续可破碎的程度越小。 $B_r$  或  $I_G$  均可用以描述破碎历史, 可用于构建硬化/软化规则, 例如:  $p_c=f(B_r/I_G)$ 。

依据  $I_G$ ,  $I'_G$  与  $B_r$ ,  $B'_r$  的定义, 可以推导获得级配指数与相对破碎的数学关系:

$$B_r = \frac{F - F_0}{F_u - F_0} = \frac{I_G - I_{G0}}{1 - I_{G0}} \quad (2)$$

$$B_{rc} = \frac{F_c - F_0}{F_u - F_0} = \frac{I_{Gc} - I_{G0}}{1 - I_{G0}} \quad (3)$$

$$B'_r = \frac{F - F_0}{F_c - F_0} = \frac{I_G - I_{G0}}{I_{Gc} - I_{G0}} = \frac{I'_G - I'_{G0}}{1 - I'_{G0}} \quad (4)$$

由于初始状态级配、临界状态级配以及破碎终止状态级配均可测定或推导获得<sup>[14]</sup>, 即对应定积分  $F_0$ ,  $F_c$  和  $F_u$  是确定的, 因此破碎指标仅是当前状态级配对定积分  $F$  的函数。天然条件下形成的粗粒土通常具有连续级配, 可用具有单一待定参数  $\mu$  的级配函数来描述 (例如 Talbot 分布<sup>[9]</sup>)。藉由级配函数  $\rightarrow$  定积分  $\rightarrow$  破碎指标之间的递推关系, 可知破碎指标只为参数  $\mu$  的函数, 亦即

$$B_r=B_r(\mu), B'_r=B'_r(\mu), I_G=I_G(\mu), I'_G=I'_G(\mu)。$$

### 3 粗粒料三轴试验

#### 3.1 试验简介

针对西南地区一山区高填方路基填料开展了不同围压和不同应力水平条件下的固结排水三轴剪切试验研究。试验材料为采石场山体爆破开采所得粗粒料, 母岩岩性为弱风化石英砂岩。该材料的颗粒级配如图 1 所示, 级配特征参数:  $d_{10}=1.94$  mm,  $d_{30}=9.97$  mm,  $d_{50}=21.36$  mm,  $d_{60}=28.02$  mm,  $C_u=14.44$ ,  $C_c=1.83$ 。其他基本物理力学性质指标见表 1。

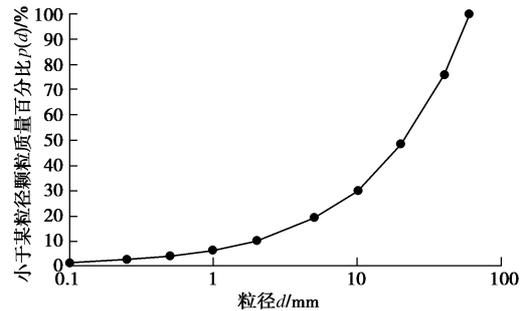


图 1 粗粒料级配曲线

Fig. 1 Grading curve of coarse-grained materials

试验设备为国产大型三轴仪, 最大围压 3 MPa。圆柱形试样尺寸为 300 mm (直径)  $\times$  600 mm (高度)。依据路基填方高度, 确定测试围压  $\sigma_3$  或固结压力  $\sigma_c$  为 300, 600, 900 和 1200 kPa。在每级围压下, 当剪切阶段应力水平  $S_L=q/q_f$  达到 0.2, 0.4, 0.6 和 0.8 时, 停止试验并对试样进行筛分试验, 测定土的颗粒级配。其中,  $q$  和  $q_f$  分别为偏应力和峰值偏应力。当应力应变曲线存在应变软化阶段时, 取峰值状态及其之前阶段来定义应力水平。

整个试验包括试样制备、试样饱和、试样固结与排水剪切 4 阶段 (具体过程参见文献[19])。

#### 3.2 结果分析

##### (1) 应力应变

如图 2 所示, 该粗粒填料的应力 - 应变 - 体变曲线较为典型。当  $\sigma_3=300, 600$  和  $900$  kPa 时应力应变曲线具有微弱软化特性, 软化趋势随围压增加而减弱, 而当  $\sigma_3=1200$  kPa 时应力应变曲线完全硬化。同理, 当  $\sigma_3=300$  kPa 时体变曲线具有较强剪胀性, 而当  $\sigma_3=600$  和  $900$  kPa 时体变曲线剪胀性逐渐减弱, 直至

表 1 粗粒料基本物理力学性质指标

Table 1 Basic physical and mechanical indexes of coarse-grained materials

土粒相对密度 $G_s$	相对密实度 $D_r/\%$	制样干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	制样孔隙比 $e_0$	母岩抗压强度(饱和)/MPa	压缩模量 $E_{s4-8}/MPa$	压缩指数 $C_c$	再压缩指数 $C_s$	渗透系数 $k/(cm \cdot s^{-1})$
2.72	96	2.10	0.295	86.9	93.5	$1.13 \times 10^{-1}$	$1.48 \times 10^{-3}$	0.227

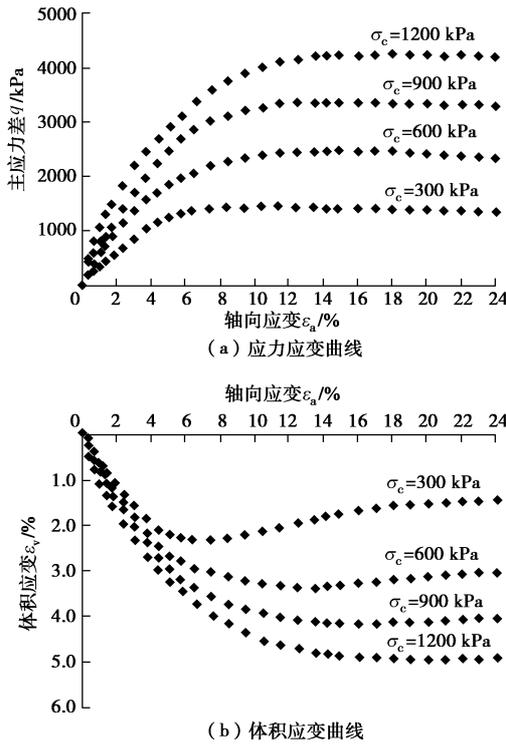


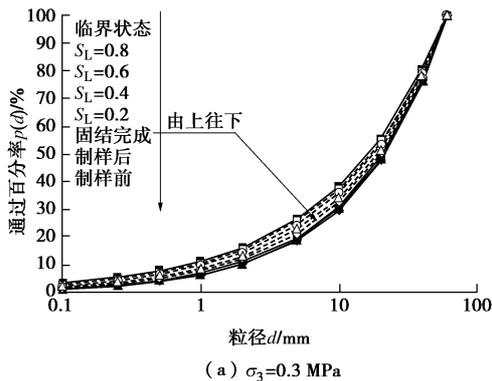
图2 粗粒料应力应变与体积应变测试结果

Fig. 2 Test results of stress-strain-volume change of coarse-grained materials

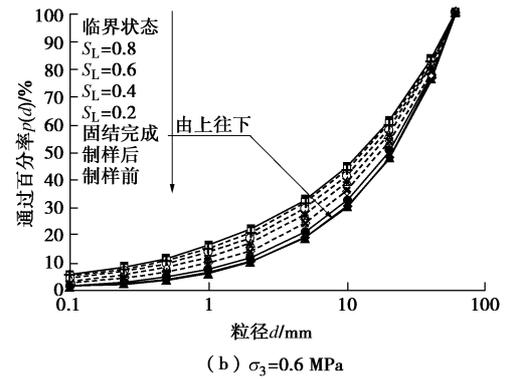
$\sigma_3=1200$  kPa时完全剪缩。对测试数据进行拟合可知：峰值与临界状态强度满足线性关系，即 $q/p_a=1.67p/p_a$ （峰值状态）和 $q/p_a=1.65p/p_a$ （临界状态），其中 $p_a$ 为大气压力。

(2) 级配演化

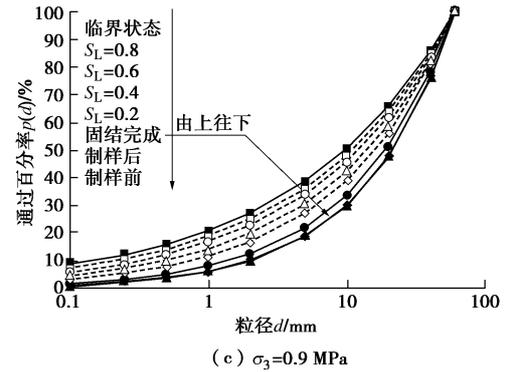
由图3可知：①颗粒破碎导致粗颗粒含量减小而细颗粒含量增加，级配曲线绕 $d_{max}$ 点向上逐步抬升和偏移；②围压越大，初始与临界状态级配曲线间的变幅越宽，排水固结阶段级配曲线上升幅度越大；③某一级围压下，应力水平越高，其级配曲线越接近该级围压下的临界状态级配；④三轴试验制样过程中亦产生颗粒破碎，使得级配曲线轻微上抬。此外，图3还表明：制样与固结导致了级配变化，但较之剪切而言很小，这与文献[20]的测试结果及分析结论吻合。



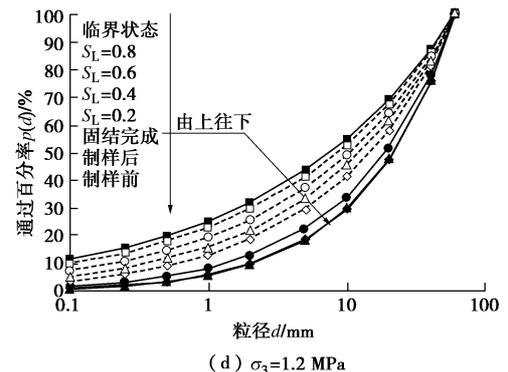
(a)  $\sigma_3=0.3$  MPa



(b)  $\sigma_3=0.6$  MPa



(c)  $\sigma_3=0.9$  MPa



(d)  $\sigma_3=1.2$  MPa

图3 大型三轴试验各个阶段粗粒料的级配曲线

Fig. 3 Grading curves of coarse-grained materials in various phases of large-scale triaxial tests

采用非线性拟合分析可知，本文试验所用粗粒料级配曲线满足Talbot分布<sup>[9]</sup>。图4给出了三轴试验各个阶段级配曲线形状指数 $\mu$ 的变化规律。由图4可知，不同应力路径下粗粒料 $\mu$ 随归一化平均主应力 $p/p_a$ 的增加而非线性减小。对于三轴剪切路径， $\sigma_3$ 或 $S_L$ 越大 $\mu$ 变幅越大。固结完成和临界状态两条路径是不同围压三轴剪切路径下 $\mu$ 曲线的上、下包线。

图5则给出了三轴试验各个阶段级配参数 $C_u$ 与 $C_c$ 的变化规律。对比图4与图5可知， $C_u/C_c - p/p_a$ 曲线与 $\mu - p/p_a$ 曲线变化规律恰好相反。固结完成路径下的 $C_u/C_c$ 曲线非常平缓，而其他路径下 $C_u$ 关于 $p/p_a$ 变化急剧， $C_c$ 关于 $p/p_a$ 变化相对较小。临界状态和固结完成两条路径是不同围压三轴剪切路径下 $C_u/C_c$ 曲线的上、下包线。

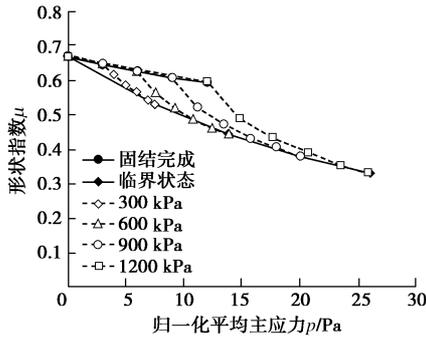


图4 大型三轴试验各个阶段粗粒料级配曲线形状指数变化规律  
Fig. 4 Evolution of shape index of grading curves of coarse-grained materials in various phases of large-scale triaxial tests

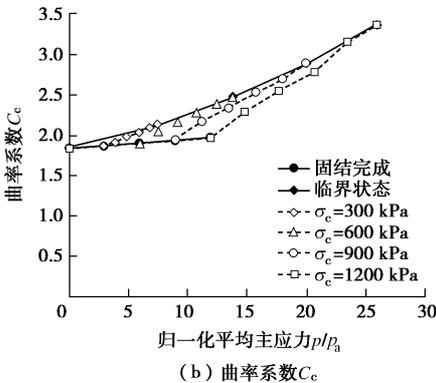
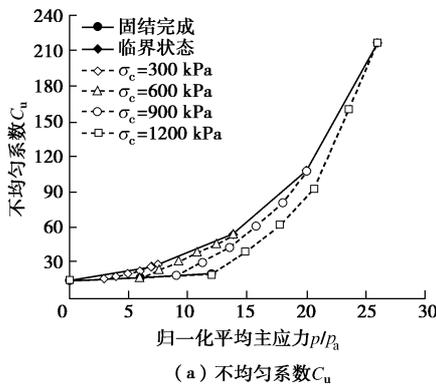


图5 大型三轴试验各个阶段粗粒料级配参数变化规律  
Fig. 5 Evolution of grading parameters of coarse-grained materials in various phases of large-scale triaxial tests

上述规律表明：粗粒料宏观层面上的应力 - 应变 - 体变变化与细观尺度下的颗粒破碎或细化过程同步，其级配演化与粗颗粒破碎为细颗粒的渐进过程直接关联。

(3) 颗粒破碎

依据全局与局部破碎的定义及其物理意义分析可知：三轴剪切过程中的  $B'_r$  主要受偏应力  $q/p_a$  或应力水平  $S_L$  控制； $B_r$  则受偏应力  $q/p_a$  和平均主应力  $p/p_a$  二者共同影响；固结完成和临界状态下的  $B_{r0}$  和  $B_{rc}$  主要受平均主应力  $p/p_a$  控制。

鉴于式 (2) ~ (4) 给出了  $I_G$  与  $B_r$  ( $B'_r$ ) 的显式

数学关系，限于篇幅，以下只对本文大型三轴试验过程中粗粒料  $B_r$  ( $B'_r$ ) 的演化规律进行具体分析。

a) 全局破碎

由图 6 和 7 可知：

对于三轴剪切路径，破碎指标  $B_r$  关于  $p/p_a$  或  $q/p_a$  的变化规律类似，且二者均与级配参数  $C_u/C_c$  关于  $p/p_a$  的变化规律相似。当  $\sigma_3 = \text{const}$  时， $B_r$  随  $p/p_a$  或  $q/p_a$  增加而增加，而当  $S_L = \text{const}$  时， $B_r$  均随  $\sigma_3$  增加而增加。然而， $B_r - p/p_a$  曲线的变化率大于  $B_r - q/p_a$  曲线。通过非线性拟合获得  $B_r = B_r(p/p_a, q/p_a)$  的数学表达式：

$$B_r = 1 - \exp \left\{ - \left[ \alpha \left( \frac{p}{p_a} \right)^{5/4} + \beta \left( \frac{q}{p_a} \right)^{5/4} \right] \right\}, \quad (5)$$

式中， $\alpha = 8.19 \times 10^{-3}$ ， $\beta = 5.12 \times 10^{-3}$ ， $R^2 = 0.98$ 。

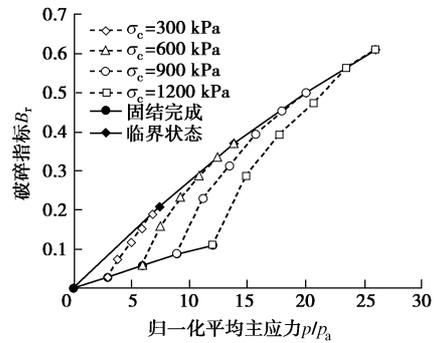


图6 大型三轴试验各阶段粗粒料  $B_r - p/p_a$  曲线

Fig. 6  $B_r - p/p_a$  curves of coarse-grained materials in various phases of large-scale triaxial tests

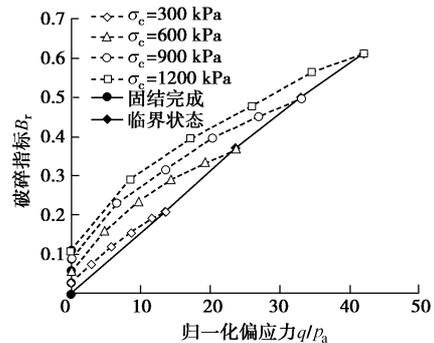


图7 大型三轴试验各阶段粗粒料  $B_r - q/p_a$  曲线

Fig. 7  $B_r - q/p_a$  curves of coarse-grained materials in various phases of large-scale triaxial tests

临界状态和固结完成两条路径是不同围压三轴剪切路径下  $B_r - p/p_a$  和  $B_r - q/p_a$  曲线的上、下包线。在这两条特殊应力路径下，破碎指标  $B_{rc}$  和  $B_{r0}$  均从 0 开始并关于  $p/p_a$  单调增加。对三轴试验数据进行非线性拟合，可得如下数学表达式：

$$B_{rc} = 1 - \exp \left( - \alpha_c \left( \frac{p}{p_a} \right)^{5/4} \right), \quad (6)$$

$$B_{r0} = 1 - \exp\left(-\alpha_0 \left(\frac{p}{p_a}\right)^{5/4}\right), \quad (7)$$

式中,  $\alpha_c = 1.67 \times 10^{-2}$ ,  $R^2 = 0.99$ ;  $\alpha_0 = 5.67 \times 10^{-3}$ ,  $R^2 = 0.97$ 。

拟合结果与测试结果的对比情况如图 8 所示。

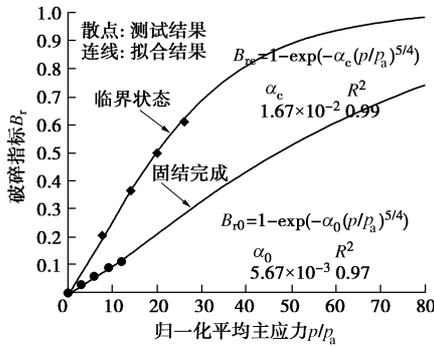


图 8 固结完成与临界状态粗粒料  $B_{r0}/B_{rc} - p/p_a$  拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of  $B_{r0}/B_{rc} - p/p_a$  of coarse-grained materials at end of consolidation and in critical state

b) 局部破碎

由图 9 可知:

对于三轴剪切路径,  $B'_r - S_L$  曲线与  $B_r - q/p_a$  曲线的变化趋势类似。当  $S_L = \text{const}$  时,  $B'_r$  关于  $\sigma_3$  增加而有较小增幅, 且应力水平越大增幅越小。当  $S_L \rightarrow 1$  时,  $\Delta B'_r \rightarrow 0$ 。在任意围压下, 破碎指标  $B'_r$  均随应力水平  $S_L$  增加而累积, 均由固结完成时的初值  $B'_{r0}$  一直增长到临界状态时的 1.0。  $B'_{r0}$  可反映  $B'_r$  受  $p$  变化而产生的影响规律。非线性拟合获得如下表达式:

$$B'_r = \frac{B_r}{B_{rc}} = B'_{r0} + (1 - B'_{r0}) \frac{\gamma S_L}{(\gamma - 1) + S_L}, \quad (8)$$

式中,  $B'_{r0}$  和  $\gamma$  为材料参数, 拟合结果与测试结果的对比情况如图 9 所示。

在  $B'_r - S_L$  坐标中, 临界状态和固结完成两条路径仍是不同围压三轴剪切路径下  $B'_r - S_L$  曲线的上、下包线/界限; 临界状态应力路径退化为 1 个点, 而固结完成应力路径则为纵坐标上的 1 条直线。

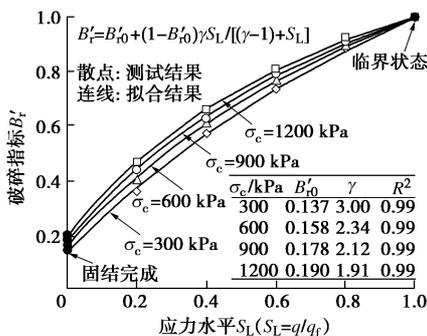


图 9 大型三轴试验各阶段粗粒料  $B'_r - S_L$  拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of  $B'_r - S_L$  of coarse-grained materials in various phases of large-scale triaxial tests

## 4 结 论

本文分析了土的颗粒破碎基本性质, 定义了全局与局部破碎指标, 并通过大型三轴试验研究了粗粒料颗粒破碎演化规律。主要研究结论如下:

(1) 分析提出了土的颗粒破碎 4 项基本性质, 以及在长期/反复加载过程中土的颗粒破碎 3 个特征状态, 区分了破碎的中止与终止概念。

(2) 基于土的颗粒破碎渐进演化历史与进程分析, 定义了全局与局部破碎指标, 给出了 (修正) 相对破碎  $B_r$  与级配指数  $I_G$  间的数学关系。

(3) 定性分析了三轴试验过程中粗颗粒级配变化规律, 给出了各类型破碎指标的数学表达式, 揭示了单调加载条件下粗粒料颗粒破碎完整规律。

有待进一步开展不同应力水平下粗粒料三轴蠕变试验研究, 以便全面了解瞬时加载与荷载恒定条件下粗粒料颗粒破碎变化规律间的相关关系, 为揭示高土 (堆) 石坝工后长期变形机理提供试验依据。

## 参考文献:

- [1] 日本土工学会(日). 堆石料的现场压实[M]. 郭熙灵, 等译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (Association of Geotechnique of Japan. In-Situ Compaction of Coarse-Grained Materials[M]. GUO Xi-ling, et al trans. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [2] SEBASTINA L G. Evaluation of Crushing in Granular Materials Using the Discrete Element Method and Fractal Theory[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2006.
- [3] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [4] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [5] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(4): 309 - 316.
- [6] MUIR W D, MAEDA K. Changing grading of soil: effect on critical state[J]. Acta Geotechnica, 2008, **3**(1): 3 - 14.
- [7] XIAO Y, LIU H L. Elastoplastic constitutive model for rockfill materials considering particle breakage[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2017, **17**(1): 1 - 13.
- [8] EINAV I. Breakage mechanics-part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, **55**(6): 1274 - 1297.
- [9] MCDOWELL G R, BOLTON M D. On the micromechanics

- of crushable aggregates[J]. *Géotechnique*, 1998, **48**(5): 667 - 679.
- [10] 尹振宇, 许强, 胡伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究: 进展及发展[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(12): 2170 - 2180. (YIN Zhen-yu, XU Qiang, HU Wei. Constitutive relations for granular materials considering particle crushing: review and development[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(12): 2170 - 2180. (in Chinese))
- [11] KIKUMOTO M, MUIR WOOD D, RUSSELL A. Particle crushing and deformation behavior[J]. *Soils and Foundations*, 2010, **50**(4): 547 - 563.
- [12] KAN E M, TAIEBAT H A. A bounding surface plasticity model for highly crushable[J]. *Soils and Foundations*, 2014, **54**(6): 1188 - 1201.
- [13] LIU H B, ZOU D G. Associated generalized plasticity framework for modeling gravelly soils considering particle breakage[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2013, **139**(5): 606 - 615.
- [14] LIU M C, ZHANG Y, ZHU H Z. 3D elastoplastic model for crushable soils with explicit formulation of particle crushing[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2017, **143**(12): 1 - 18.
- [15] LIU M C, GAO Y F, LIU H L. An elastoplastic constitutive model for rockfills incorporating energy dissipation of nonlinear friction and particle breakage[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2014, **38**(9): 935 - 960.
- [16] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 模拟堆石料颗粒破碎对强度变形的影响[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(11): 1691 - 1699. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Effect of particle breakage on strength and deformation of modeled rockfills[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(11): 1691 - 1699. (in Chinese))
- [17] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**(B2): 1921 - 1926.
- [18] SAMMIS C G, KING G, BIEGEL R. The kinematics of gouge deformations[J]. *Pure Applied Geophysics*, 1987, **125**(5): 777 - 812.
- [19] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 应力路径条件下堆石料剪切特性大型三轴试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(1): 176 - 186. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear behaviors of rockfill in large-scale triaxial tests under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(1): 176 - 186. (in Chinese))
- [20] JIA Y F, XU B, CHI S C, et al. Research on the particle breakage of rockfill materials during triaxial tests[J]. *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 2017, **17**(10): 1 - 11.