

基于裂离参量的粒状土颗粒破碎量化方法

徐日庆^{1,2}, 畅 帅^{1,2}, 李雪刚^{1,2}, 陆建阳^{1,2}

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 以粒组为分析对象, 将颗粒破碎引起粒状土级配变化的过程划分为 3 个阶段。在此基础上, 针对单个粒组与粒状土整体的颗粒破碎情况分别提出了裂离比 R_k 与加权裂离率 B_d 的新概念。在进行等比级数简化假设的基础上, 给出了两者的计算方法。研究已有文献中搜集的 21 组颗粒破碎试验资料发现: 在所研究的围压范围内, 对于不同粒状土材料, $B_d - \sigma_3$ 均呈现出线性关系。且对于多数试验结果, 该关系存在一个明显的斜率折点。综合考虑围压、母岩强度与原始级配对 B_d 的影响发现, 对于灰岩、角砾岩、砂岩料等不同粒状土材料, B_d 的变化规律具有归一性。整理已有试验资料中不同粒状土的加权裂离率 B_d 与破碎率 B_g 发现, B_d 与 B_g 间存在一定的指数化关系。最后通过优势分析, 指出基于裂离参量的粒状土颗粒破碎量化方法有其自身的特点与优势, 具备广阔的研究前景。

关键词: 粒状土; 颗粒破碎; 裂离比; 加权裂离率

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2013)12 - 2179 - 07

作者简介: 徐日庆(1962 -), 男, 浙江金华人, 博士, 教授, 从事土的本构关系方面的研究。E-mail: xurq@zju.edu.cn。

Quantitative method for crushing of granular soils based on discarding parameters

XU Ri-qing^{1,2}, CHANG Shuai^{1,2}, LI Xue-gang^{1,2}, LU Jian-yang^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Taking fraction as analysis object, the crushing of granular soils is divided into three stages. Based on this, new concepts of discarding ratio R_k and weighted discarding ratio B_d are proposed for the crushing of a single fraction and granular soils as a whole respectively. And their theoretical computing methods are put forward based on the simplified hypothesis of geometric progressional distribution. By investigating the collected test data of particle crushing for 21 granular soil samples from references, it is found that the relationship between B_d and σ_3 is linear for different granular soils with varying values of σ_3 in research ranges. In addition, there exist significant turning points of slope in such linear relationship for most test results. Considering the combined effects of confining pressure, strength of mother rock and original grain composition, it is concluded that the variation of B_d is generalized for the particle breakage of limestone, breccia and sandstone. By sorting out the weighted discarding ratio B_d and the breakage factor B_g of the collected test results for different granular soil samples, it is indicated that the relationship between B_d and B_g is exponential. Finally, it is pointed out that the proposed quantitative method for the crushing of granular soils based on the discarding parameters has its own characteristics and advantages, which has broad research prospects.

Key words: granular soil; particle breakage; discarding ratio; weighted discarding ratio

0 引 言

粒状土(堆石、砂石、砂土等)作为一种填料, 被广泛应用于土木工程的各个领域, 如大型堆石坝、碎石路基、铁路道砟等^[1]。然而, 粒状土中颗粒间常为点接触, 应力集中现象普遍, 在外荷作用下土颗粒较易发生破碎, 进而影响粒状土的整体强度与变形, 对工程的安全与稳定十分不利。为此, 不少学者针对粒状土的颗粒破碎问题开展了一系列研究工作^[2-7]。而

在这些研究中, 往往会涉及颗粒破碎的量化问题。目前较为常用的粒状土颗粒破碎量化方法主要有以下几种:

(1) Marsal^[8]在大型三轴压缩试验的基础上, 从颗粒破碎前后级配曲线上各粒组含量差值 ΔW_k 出

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178420); 国家科技支撑计划项目(2012BAJ01B04-3)

收稿日期: 2013 - 05 - 15

发, 定义参量 B_g 为所有 ΔW_k 的正值之和。该参量的下限为 0, 理论上存在上限值为 100%。

(2) Lee 等^[9]在各向等比例加载试验的基础上, 提出了参量 $B_{15}=D_{15i}/D_{15f}$, 其中 D_{15} 表示小于某粒径的土重含量为 15% 时所对应的颗粒粒径, i 与 f 分别表示颗粒破碎前与破碎后。该参量的下限值为 1, 理论上其上限值为一个未知的很大的数。

(3) Hardin^[10]创造性地提出了破碎势 B_p 的概念, 它表示颗粒破碎前的级配曲线与粒径线 0.074 mm 间的面积。同时将颗粒破碎前后级配曲线间的面积定义为破碎总量 B_t 。基于此, Hardin 定义了相对破碎率 $B_r=B_t/B_p$ 。相对破碎率的下限为 0, 理论上存在上限值为 1。

(4) Lade 等^[11]结合土体渗透性研究了颗粒破碎问题, 定义 $B_{10}=1-D_{10f}/D_{10i}$, 其中 D_{10} 表示小于某粒径的土重含量为 10% 时所对应的颗粒粒径, i 与 f 分别表示颗粒破碎前与破碎后。该参量的下限为 0, 理论上存在上限值为 1。

以上学者都对粒状土颗粒破碎问题进行了深入剖析, 但所提出的量化方法大多是经验性的, 其中有些仅以单个粒径上颗粒含量的变化来度量土体的颗粒破碎程度, 在实际使用中存在一定的局限性。本文从颗粒破碎与土体级配改变的内在联系出发, 针对单个粒组和粒状土整体的颗粒破碎情况分别提出了裂离比与加权裂离率的新概念, 并对基于这两个概念的粒状土颗粒破碎量化方法进行了优势分析。

1 裂离参量的提出

笔者认为, 以粒组为分析对象, 粒状土颗粒破碎引起级配变化的过程可以划分为 3 个阶段。第 1 阶段土体受荷, 粒组中出现颗粒的接触应力大于其自身强度的情况, 颗粒开始产生裂纹。该过程与荷载的形式、母岩强度、原始级配、颗粒的大小与形状等因素都有关系。第 2 阶段, 在荷载的持续作用下, 裂纹得以发展, 粒组颗粒分裂成碎散体。由于颗粒裂纹的发展存在不确定性, 致使碎散体中颗粒大小的组成随机性较大, 若要对该过程进行定量描述, 有必要作一定的简化假设。第 3 阶段, 不同粒组颗粒破裂后产生的碎散体混合在一起, 组成土体新的级配分布。

由此, 对粒状土由小到大取 n 个拟界限粒径, 分别用 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 表示, 它们和土体中最小粒径 d_0 以及最大粒径 d_{n+1} 一起作为划分 $n+1$ 个粒组的分界尺寸。以 W_k ($k=1, 2, 3, \dots, n, n+1$) 表示颗粒破碎前位于粒组 $d_{k-1} \sim d_k$ 的颗粒百分含量。定义裂离比 R_k ($k=1, 2, 3, \dots, n, n+1$), 它表示在某粒组颗

粒发生破裂后得到的碎散体中, 按粒径大小被排除在该粒组之外的颗粒质量与碎散体质量的比值。据此定义不难得出, 裂离比的下限值为 0, 上限值为 1。另外, 根据之前分析, 裂离比与母岩强度、原始级配、颗粒的大小与形状、受力路径等因素都有关系, 因此理论上可以表示成它们的函数。在此基础上, 定义加权裂离率 B_d :

$$B_d = \frac{1}{100\%} \sum_{k=1}^{n+1} W_k R_k \quad (1)$$

由式 (1) 知, 加权裂离率表示以原始级配下各粒组的颗粒含量 W_k 为权重的裂离比加权均值。显然, 对于一个粒组而言, 裂离比应与发生破裂的颗粒数量呈现一定的正相关关系。而加权裂离率则综合体现了各粒组的裂离比大小, 在一定程度上反映了粒状土整体的颗粒破碎程度。

对粒状土中的最大粒组而言, 由于颗粒破碎只会使位于该粒组的颗粒含量减少, 所以根据裂离比定义, 该粒组的裂离比可以根据破碎前后的级配分布直接求出。但对于土中的其它各粒组, 其颗粒含量的变化源于两部分: 一方面, 原本位于该粒组的部分颗粒由于发生破裂离开该粒组, 这部分其实就是裂离比所考察的部分; 另一方面, 原本位于更大粒径粒组的部分颗粒由于发生破裂补充到该粒组。因此反映在颗粒破碎后的级配分布上, 这些粒组的颗粒含量较原始级配可能增大, 可能减小, 甚至可能不变。仅根据颗粒破碎前后的级配分布, 这些粒组的裂离比将无法直接求出。

根据之前分析, 针对颗粒破碎引起级配变化的第 2 阶段应作一定的简化假设。文献[12]定量分析了花岗岩风化后的级配改变问题。为了便于数学推导, 该文献假设原始颗粒风化后得到的碎散体中, 颗粒大小的组成满足等比级数分布规律。通过与大量实测数据进行对比分析发现, 基于该假设下推得的风化后级配分布与实际情况较吻合。此外, 该文献指出基于此假设下得到的研究结果同样适用于人为堆压下颗粒破碎问题的分析。此次研究借鉴该文献所采用的等比级数假设, 推导不同粒状土材料在颗粒破碎后各粒组裂离比的求解方法。在此过程中, 建立了等比级数公比与裂离比的等式关系, 使等比级数公比间接地与母岩强度、原始级配、颗粒的大小与形状、受力路径等因素产生关联, 从而使该假设更贴合实际。

2 裂离参量的求解

在荷载作用下, 粒组 $d_{k-1} \sim d_k$ 的颗粒碎裂成碎散体。由裂离比定义知, 碎散体中仍归于 $d_{k-1} \sim d_k$ 这一粒组的颗粒含量为 $W_k (1-R_k)$ 。根据简化假设, 若将

表 1 破碎后各粒组内碎散体的颗粒组成

Table 1 Particle composition of granular soils within each fraction after breakage

破碎前的颗 粒含量	破碎后碎散体的颗粒含量组成					
	$d_{n+1} \sim d_n$	$d_n \sim d_{n-1}$	$d_{n-1} \sim d_{n-2}$...	$d_1 \sim d_0$	$d_0 \sim 0$
W_{n+1}	$W_{n+1}(1-R_{n+1})$	$W_{n+1}(1-R_{n+1})P_{n+1}$	$W_{n+1}(1-R_{n+1})P_{n+1}^2$...	$W_{n+1}(1-R_{n+1})P_{n+1}^n$	$W_{n+1}(1-R_{n+1})P_{n+1}^{n+1}$
W_n	0	$W_n(1-R_n)$	$W_n(1-R_n)P_n$...	$W_n(1-R_n)P_n^{n-1}$	$W_n(1-R_n)P_n^n$
...
W_1	0	0	0	...	$W_1(1-R_1)$	$W_1(1-R_1)P_1$

该碎散体颗粒按所定义的 $n+1$ 个粒组划分, 则归于 $d_0 \sim d_k$ 范围内各粒组的颗粒含量存在等比关系, 也即按粒组的粒径大小以公比 $P_k (k=1, 2, 3, \dots, n, n+1)$ 依次递减。此时理论上会出现粒径位于 $0 \sim d_0$ 范围内的颗粒。设定任一原粒组颗粒破碎后归于 $0 \sim d_0$ 这一新增粒组的颗粒含量也与归于其它粒组的部分一样满足等比关系。

由于原先位于粒组 $d_{k-1} \sim d_k$ 的颗粒发生破碎后, 处于 $0 \sim d_{k-1}$ 范围内的颗粒总量即为 $W_k R_k$, 由此建立裂离比 R_k 与等比级数公比 P_k 的关系如下:

$$\frac{R_k}{1-R_k} = \sum_{i=1}^k P_k^i \quad (2)$$

将粒状土各粒组颗粒破碎后碎散体的颗粒组成情况整理如表 1 所示。对颗粒破碎后位于各粒组的土颗粒含量进行叠加, 并用 W_{kf} 表示颗粒破碎后位于粒组 $d_{k-1} \sim d_k$ 内的颗粒含量。同时, 将原先各粒组颗粒分裂后处于粒组 $0 \sim d_0$ 的颗粒含量叠加结果记为 W_{of} 。由此得到颗粒破碎后新的级配分布情况如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{n+1} \sim d_n : W_{(n+1)f} = W_{n+1}(1-R_{n+1}) \\ d_n \sim d_{n-1} : W_{nf} = W_{n+1}(1-R_{n+1})P_{n+1} + W_n(1-R_n) \\ \dots\dots \\ d_k \sim d_{k-1} : W_{kf} = \sum_{i=1}^{n+1} W_i(1-R_i)P_i^{i-1} \\ \dots\dots \\ d_1 \sim d_0 : W_{1f} = \sum_{i=1}^{n+1} W_i(1-R_i)P_i^{i-1} \\ d_0 \sim 0 : W_{of} = \sum_{i=1}^{n+1} W_i(1-R_i)P_i^i \end{array} \right. \quad (3)$$

考察式 (2)、(3) 可知, 若已知粒状土在颗粒破碎前后各粒组的颗粒含量 W_k 与 W_{kf} , 即可依次求得所有粒组的 R_k 以及与之对应的 P_k 。再根据式 (1) 即可得到对应此次破碎的加权裂离率 B_d 。

3 加权裂离率递变规律分析

搜集文献[13~18]中粒状土的颗粒破碎试验资料, 共计 21 组。根据这些试验结果, 求出不同围压下各颗粒材料的裂离比, 进而求得各组试验的加权裂离

率, 得到 $B_d - \sigma_3$ 关系如图 1~5 所示。由图 1~5 可知, 在各组试验所研究的围压范围内, 针对不同粒状土材料, B_d 随 σ_3 的变化均呈现一定的线性化关系, 且该关系多数存在一个明显的斜率折点。对于图 1 中的弱风化石英砂岩, 可以较明确地判定该转折点所对应的围压值为 0.3 MPa。对于其它各组试验, 虽然由于围压取值个数的限制, 无法准确判定斜率折点所对应的围压值, 但也可大致判断折点所处的位置。

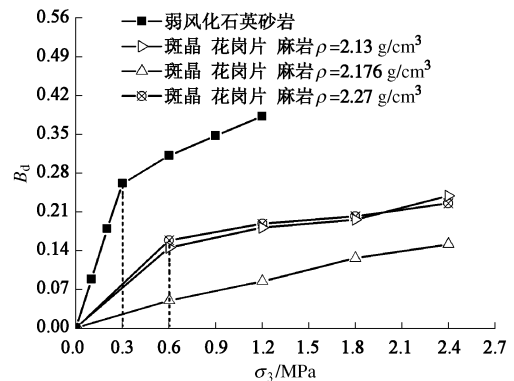


图 1 文献[13, 14]中粒状土材料 $B_d - \sigma_3$ 关系图

Fig. 1 Relationship between B_d and σ_3 for granular materials from References [13, 14]

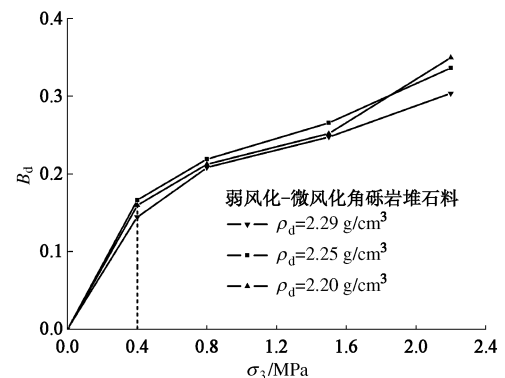


图 2 文献[15]中粒状土材料 $B_d - \sigma_3$ 关系图

Fig. 2 Relationship between B_d and σ_3 for granular materials from Reference [15]

除了围压, 颗粒破碎程度还与母岩强度、原始级配、颗粒形状、应力路径等因素有关。当其它条件均

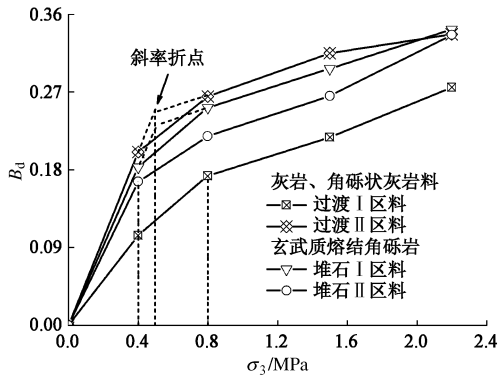


图3 文献[16]中粒状土材料 $B_d - \sigma_3$ 关系图

Fig. 3 Relationship between B_d and σ_3 for granular materials from Reference [16]

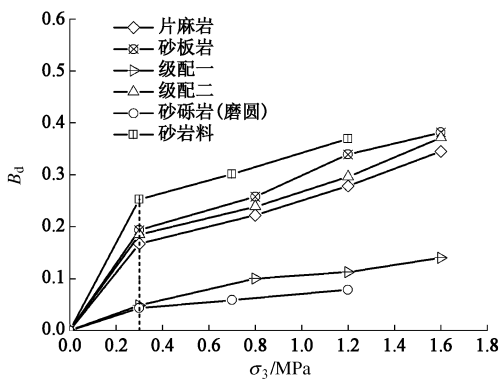


图4 文献[17]中粒状土材料 $B_d - \sigma_3$ 关系图

Fig. 4 Relationship between B_d and σ_3 for granular materials from Reference [17]

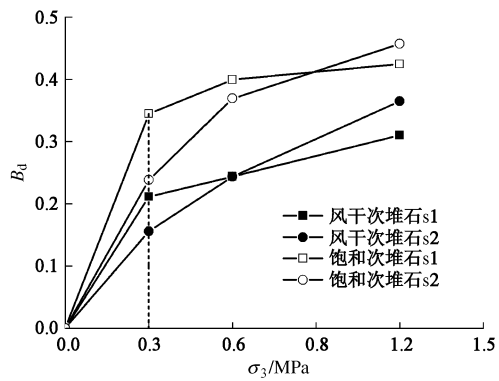


图5 文献[18]中粒状土材料 $B_d - \sigma_3$ 关系图

Fig. 5 Relationship between B_d and σ_3 for granular materials from Reference [18]

相同时，母岩强度增大将使颗粒破碎程度降低。而原始级配对粒状土整体颗粒破碎程度的影响主要体现在破碎前土料中粗、细颗粒的组合配比上^[17]。基于上述分析，定义参数 λ ：

$$\lambda = \sigma_3 / q_u \quad (4)$$

式中， q_u 表示母岩抗压强度。

对文献[16, 17]中灰岩、角砾岩、砂岩料的试验资料进一步研究表明，综合考虑围压、母岩强度和原

始级配影响，对于不同粒状土材料，存在归一性关系如图6所示。该 B_d 归一性关系可统一表示为

$$B_d = \begin{cases} C_c a \lambda & (\lambda > \lambda_0) \\ C_c (b \lambda + c) & (\lambda \leq \lambda_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中， C_c 为粒状土在原级配下的曲率系数， a ， b 与 c 为拟合参数。由前后线性关系在 λ_0 对应的点处相交的条件可得拟合参数与 λ_0 的关系如下：

$$\lambda_0 = \frac{c}{a-b} \quad (6)$$

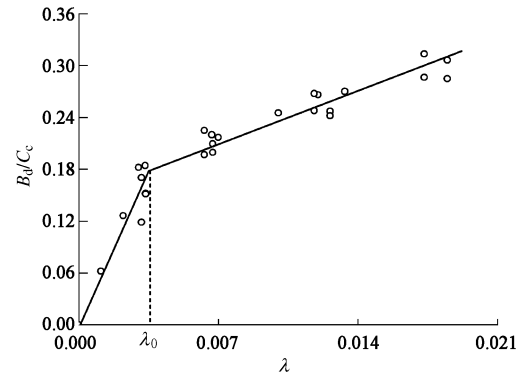


图6 灰岩、角砾岩、砂岩料($B_d/C_c - \lambda$)归一性关系

Fig. 6 Generalized relationship between (B_d/C_c) and λ for limestone, breccia and sandstone

4 加权裂离率 B_d 与破碎率 B_g 的关系

Marsal^[8]提出的破碎率 B_g 简便易得，并且综合考虑了不同粒组在破碎前后颗粒含量的变化情况，目前已得到广泛应用^[17-19]。根据已有文献中的试验资料，计算不同粒状土材料的加权裂离率 B_d 与破碎率 B_g ，整理如表2所示。

表2 文献中不同粒状土的 B_d 与 B_g

Table 2 Values of B_d and B_g of different granular soils from references

土体材料	σ_3/MPa	B_d	$B_g/\%$	参考文献
角砾岩 (干密度 2.29 g/cm^3)	0.4	0.144	5.2	陈生水等 ^[15]
	0.8	0.208	7.7	
	1.5	0.247	10.8	
	2.2	0.303	13.7	
角砾岩 (干密度 2.25 g/cm^3)	0.4	0.166	5.9	同上
	0.8	0.219	9.3	
	1.5	0.266	11.0	
	2.2	0.336	14.4	
角砾岩 (干密度 2.20 g/cm^3)	0.4	0.160	6.2	同上
	0.8	0.212	9.3	
	1.5	0.252	11.8	
	2.2	0.349	16.9	
过渡 I 区料	0.4	0.104	4.3	凌华等 ^[16]
	0.8	0.173	7.3	
	1.5	0.218	10.4	
	2.2	0.275	13.1	

续表 2

过渡 II 区料	0.4	0.200	7.7	同上
	0.8	0.265	9.7	
	1.5	0.315	14.4	
	2.2	0.337	15.4	
堆石 I 区料	0.4	0.183	7.4	同上
	0.8	0.252	10.8	
	1.5	0.297	13.4	
	2.2	0.343	15.8	
堆石 II 区料	0.4	0.166	5.9	同上
	0.8	0.219	9.3	
	1.5	0.266	11.1	
	2.2	0.336	14.5	
片麻岩	0.3	0.167	5.5	傅华等 ^[17]
	0.8	0.222	8.3	
	1.2	0.278	11.3	
	1.6	0.345	13.8	
砂板岩	0.3	0.193	6.6	同上
	0.8	0.258	9.6	
	1.2	0.339	13.9	
	1.6	0.382	17.0	
级配一	0.3	0.049	2.0	同上
	0.8	0.100	3.3	
	1.2	0.112	4.3	
	1.6	0.140	4.9	
级配二	0.3	0.184	8.5	同上
	0.8	0.239	11.5	
	1.2	0.296	14.6	
	1.6	0.371	17.0	
砂砾岩	0.3	0.043	3.0	同上
	0.7	0.059	3.7	
	1.2	0.079	4.4	
砂岩料	0.3	0.253	9.5	同上
	0.7	0.301	13.5	
	1.2	0.369	17.9	
风干次堆石 s1	0.3	0.211	11.57	高玉峰等 ^[18]
	0.6	0.244	13.24	
	1.2	0.310	17.39	
风干次堆石 s2	0.3	0.156	5.41	同上
	0.6	0.243	11.06	
	1.2	0.365	19.32	
饱和次堆石 s1	0.3	0.344	14.88	同上
	0.6	0.399	17.64	
	1.2	0.424	20.79	
饱和次堆石 s2	0.3	0.238	11.32	同上
	0.6	0.369	17.80	
	1.2	0.457	28.54	

根据表 2 中整理的加权裂离率 B_d 与破碎率 B_g 作图 7。由图 7 可知, 在以 B_d 和 B_g 为坐标轴的坐标系中, 所有散点均分布于一个狭长区带内。进一步对图 7 中散点进行拟合, 发现 $B_d - B_g$ 近似满足指数关系, 表达式为

$$B_g = (0.0869e^{\frac{B_d}{0.3485}} - 0.0728) \times 100\% \quad (7)$$

由于颗粒发生破裂后并不一定离开原先的粒组, 所以理论上存在破碎率大于 0, 而加权裂离率仍为 0 的情况。这在式 (7) 中得到了体现。

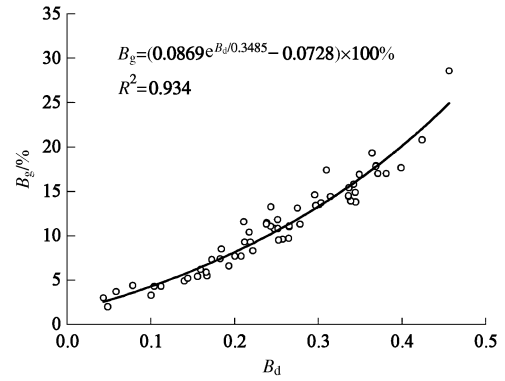


图 7 不同粒状土 $B_d - B_g$ 关系图

Fig. 7 Relationship between $B_d - B_g$ for different granular soils

5 裂离参数量化方法的优势分析

作为新提出的粒状土颗粒破碎量化指标, 裂离比及加权裂离率在实际应用中具备自身优势。

首先, 裂离比与加权裂离率的概念根据粒状土颗粒破碎与级配改变的内在联系提出。前人所提出的量化方法多为经验性的, 相比而言, 基于这 2 个参量的量化方法更能反映颗粒破碎引起粒状土级配改变的实质。

其次, 裂离比的分析对象为单个粒组, 物理意义明确, 加权裂离率的分析对象为粒状土整体, 在其计算方法中考虑了不同粒组的裂离比对粒状土整体的影响权重。前人提出的量化方法有不少仅对单一粒径下颗粒含量的变化进行考察。这些指标虽然较为简单实用, 却不足以全面衡量颗粒破碎的真实情况。Marsal 定义的 B_g 包含了受压前后各粒组含量的变化且计算简便, 但由于以总量表示, 难以反映各粒组的变化情况^[20]。Hardin 提出的相对破碎率 B_r 考虑了颗粒破碎前后整体级配变化, 应用较为广泛。但根据该参量的计算方法, 理论上仍有可能出现破碎情况有所差异, 但彼此的相对破碎率却较为接近的情况。相较而言, 基于裂离概念提出的 R_k 与 B_d 针对性强, 能在粒组与粒状土整体两个层面上更全面地反映出颗粒破碎程度的差异。

再次, 可以通过不同的粒组划分, 根据实际需要细化或简化对裂离比及加权裂离率的求解。在土石坝、碎石路基等工程实体的设计中常将粒状土划分为 60~40, 40~20, 20~10, 10~5, 5~0 mm 这 5 个粒组。根据这样的粒组划分, 结合之前提出的计算方

法可知, R_k 与 B_d 的求解其实是较为简便的。

最后, 结合已有试验资料, 对不同粒状土材料, B_d 的递变规律存在归一性, 且 B_d 与已得到广泛应用的破碎率 B_g 近似存在指数关系。根据归一性关系, 可以大致预测粒状土在荷载作用下的 B_d 值, 进而预估土体的颗粒破碎程度。根据拟合得到的 B_d 与 B_g 间的指数关系, 可以方便地进行 B_d 和 B_g 相互间的推算, 同时也表明 B_d 作为新提出的粒状土颗粒破碎量化参量具备一定的合理性。

6 结 语

以粒组为分析对象, 将粒状土颗粒破碎引起级配变化的过程划分为 3 个阶段。据此, 提出了裂离比 R_k 与加权裂离率 B_d 的新概念。对已有文献中的 21 组试验资料进行研究, 对于不同粒状土材料, 加权裂离率与围压间存在较好的线性关系, 且多数存在一个斜率折点。综合考虑围压、母岩强度、原始级配对颗粒破碎的影响发现, 对于灰岩、角砾岩、砂岩料等不同的粒状土材料, 加权裂离率 B_d 的递变规律具有归一性。整理已有试验资料的加权裂离率 B_d 与破碎率 B_g 发现, 两者存在一定的指数关系。这一方面使 B_d 与 B_g 间的推算成为可能, 同时也在一定程度上表明加权裂离率 B_d 作为新提出的粒状土颗粒破碎量化参量具备合理性。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 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))
- [3] 孙德志, 张丙印, 孙逊. 人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 464 - 469. (KONG De-zhi, ZHANG Bing-yin, SUN Xun. Triaxial tests on particle breakage strain of artificial rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 464 - 469. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎的粗粒土剪胀性统一本构模型[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1381 - 1388. (JIA Yu-feng, CHI Shi-chun, LIN Gao. Dilatancy unified constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1381 - 1388. (in Chinese))
- [6] KARIMPOUR H, LADE P V. Time effects relate to crushing in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(9): 1209 - 1219.
- [7] KUWAJIMA K, HYODO M, HYDE A F. Pile bearing capacity factors and soil crushability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(7): 901 - 913.
- [8] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [9] LEE K L, FARHOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, **4**(1): 68 - 86.
- [10] HARDIN C S. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [11] 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.
- [12] FUKUMOTO T. A grading equation for decomposed granite soil[J]. Soils and Foundations, 1990, **30**(1): 27 - 34.
- [13] 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))
- [14] 石修松, 程展林. 堆石料颗粒破碎的分形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 3852 - 3857. (SHI Xiu-song, CHENG Zhan-lin. Fractal behavior in crushing of rockfill material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3852 - 3857. (in Chinese))

- [15] 陈生水, 韩华强, 傅 华. 循环荷载下堆石料应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(8): 1151 - 1157. (CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang, FU Hua. Stress and deformation behaviors of rockfill under cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1151 - 1157. (in Chinese))
- [16] 凌 华, 傅 华, 韩华强, 等. 颗粒破碎对堆石料静动力特性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, **8**(4): 44 - 47. (LING Hua, FU Hua, HAN Hua-qiang, et al. Experimental study on effects of particle breakage on static and dynamic characteristics of rock-fill materials[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, **8**(4): 44 - 47. (in Chinese))
- [17] 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, LIN Hua, CAI Zheng-yin. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, **37**(1): 75 - 79. (in Chinese))
- [18] 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 - 1246. (GAO Yu-feng, 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 - 1246. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 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 Han-long, SUN Yi-fei, YANG Gui, et al. A review of particle breakage characteristics of coarse aggregates[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, **40**(4): 361 - 369. (in Chinese))

第二届全国岩土本构理论研讨会（第一号通知）

2008年11月中国力学学会岩土力学专业委员会和中国土木工程学会土力学及岩土工程分会联合在北京召开了第一届全国岩土本构理论研讨会, 有力地推动了我国的岩土本构理论研究。中国土木工程学会于2010年12月批准成立了“土的本构关系及强度理论专业委员会”, 2011年8月“专业委员会”在兰州召开了第一次工作会议, 2013年5月在桂林理工大学召开专业委员会主任副主任学术交流会。鉴于第一届全国岩土本构理论研讨会已有五年和近年我国不少学者在岩土材料的本构理论及其应用方面有许多创新性研究成果, 专业委员会决定于2014年5月在上海大学召开第二届全国岩土本构理论研讨会。研讨会将注重“研讨”, 计划在每场报告后留有较多的时间用于讨论和互动。

征文范围: 岩土材料的本构理论及其应用; 岩土材料的力学特性; 岩土材料的力学特性测定方法。

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 土的本构关系及强度理论专业委员会; 中国力学学会岩土力学专

业委员会。

承办单位: 上海大学。

协办单位: 同济大学; 上海交通大学; 北京航空航天大学; 北京工业大学; 上海理工大学。

会议时间地点: 2014年5月23~25日(周末), 上海市(上海大学宝山校区)。

论文截稿日期: 2014年2月30日。论文集非正式出版, 仅供学术交流用, 会后可投其他期刊。特别欢迎作者近年在岩土本构方面研究成果的总结性论文。会议论文格式按照《岩土力学》。

联系方式: 通信地址: 上海市闸北区延长路149号, 上海大学土木工程系, 邮编: 200072, 联系人: 孙文静, 021-56331676(办公室), 18049963719(手机); 秦爱芳, 13701657961(手机), E-mail: wjsun@shu.edu.cn(孙文静, 投稿邮箱), qinaifang@shu.edu.cn(秦爱芳)。

(上海大学 供稿)