

基于级配方程的粗粒料级配演化预测模型

郭万里¹, 朱俊高¹, 王青龙², 余挺²

- (1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京, 210098;
2. 中国电力建设集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都, 610072)

摘要: 为了揭示粗粒料级配随应力应变演化的规律, 建立粗粒料“应力应变→破碎指标→级配分布”的数学模型(SBG模型)。首先, 引入1个适用性良好的级配方程来描述土体的级配, 其级配参数为 b 和 m ; 同时, 定义1个新的破碎指标 B_W , 并将 B_W 和破碎指标 B_g 建议为该模型所需的2个破碎指标。其次, 推导并且验证 B_W 和 B_g 与级配参数 b 和 m 的数学关系, 实现“破碎指标→级配分布”这一目标。根据粗粒料的三轴试验结果总结三轴试样破坏时 B_W 和 B_g 与围压 σ_3 之间的关系、三轴试样在剪切过程中 B_W 和 B_g 与平均正应力 p 和广义剪应变 ϵ_s 之间的关系, 实现“应力应变→破碎指标”这一目标。将以上2个部分联合, 即可得到“应力应变→破碎指标→级配分布”的数学模型(SBG模型)。研究结果表明: 本文提出的模型可以用来描述三轴应力状态下粗粒料级配随应力应变演化的规律。

关键词: 粗粒料; 颗粒破碎; 级配方程; 级配演化; 三轴试验

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)08-2076-07

Mathematical model based on the gradation equation for predicting gradation evolution of coarse-grained soils

GUO Wanli¹, ZHU Jungao¹, WANG Qinglong², YU Ting²

- (1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Chengdu Survey and Design Institute Limited, Power Construction Corporation of China, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to study the evolution law of gradation for coarse-grained soils, a mathematical model describing the relationship between stress and strain state, breakage indicators and gradation(SBG model) was established. Firstly, a gradation equation in which the two gradation parameters were named b and m was proposed to describe the grain size distribution(GSD) curve. Then, a new grain breakage indicator B_W was defined. Together with another breakage indicator B_g , they were both suggested as the two required breakage indicators for the proposed model. On one hand, the relationship between B_W and B_g and the gradation parameters b and m were derived and verified. On the other hand, an empirical equation of B_W and B_g and confining pressure at the failure of the specimens, and an empirical equation of B_W and B_g and the mean normal stress and general shear strain during shearing of the specimens were proposed. The SBG model was thereby established by combining the above two parts. The results show that the proposed SBG model can be used to predict change of breakage indicators and GSD of coarse-grained soils with stress and strain states in triaxial test.

Key words: coarse-grained soil; particle crushing; gradation equation; gradation evolution; triaxial test

收稿日期: 2017-08-01; 修回日期: 2017-09-21

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2017YFC0404801); 国家自然科学基金资助项目(51479052)(Project(2017YFC0404801) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(51479052) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 朱俊高, 教授, 博士生导师, 从事土体基本性质及本构关系、土石坝工程研究; E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

粗粒料在加载过程中会发生颗粒破碎,从而显著影响土体的强度、变形、渗透性等性质^[1-3],因此,对于粗粒料颗粒破碎的研究一直以来都是土力学的热点^[4-9]。目前研究多集中于颗粒破碎指标。张季如等^[3]分析了相对破碎指标 B_r 与应力水平之间的关系,贾宇峰等^[5]通过三轴试验总结了剪切过程中 B_r 随剪应变的变化规律。不少研究者基于分形理论提出了颗粒破碎之后的分形维数与围压之间的经验公式^[1-2]。此外,也有研究者尝试将颗粒破碎规律融入到本构模型之中,但是现有本构模型大多是在宏观层面上反映颗粒破碎对粗粒料应力变形的影响^[4]。总的来说,目前研究大多能够建立破碎指标与应力或应变之间的关系^[5-6],但是无法进一步反映级配的演化。值得注意的是,“破碎指标”与“级配分布”并不是呈一一对应的关系:由级配分布可以计算破碎指标,但是由破碎指标无法推算出级配分布。虽然破碎指标在一定程度上能够反映土体性质的变化,但是对于某些土体仅能预测破碎指标是不够的。例如,在大坝填筑过程中,反滤土石坝中的反滤料的受力是不断增加的,所引发的颗粒破碎会导致其级配的变化,而级配又能显著影响其渗透性。若能够建立反映粗粒料的级配随应力应变演化的数学模型,则这对于土石坝等工程的设计、监测与维护都具有重要意义。为此,本文作者引入对各种级配曲线描述效果良好的级配方程^[10-12],并且定义1个新的颗粒破碎指标,推导破碎指标与级配参数之间的关系,并依此建立1个反映颗粒级配随应力应变演化的数学模型。最后,以粗粒料的三轴试验结果为例,验证该模型的合理性。

1 模型的建立

1.1 级配的定量表示方法

本文作者的最终目标是建立“应力应变→级配分布”的数学模型,即通过土体的应力应变状态可以预测当前的级配分布。但是,现有的研究大都止步于“应力应变→破碎指标”,即通过应力应变可以预测出颗粒破碎的程度,无法进一步推测出当前的级配分布。

分析其原因,土体的应力和应变是用定量的数值表示的,而目前级配分布都只是定性描述,而不是定量的数学表示(主要有级配曲线和粒组质量分数2种表示方法,虽然各个粒组的质量分数都有具体的数值,但是对于级配分布整体而言,依然是定性描述)。因而“定量的”应力应变与“定性的”级配之间无法建立数学关系。

因此,本文作者试图引入之前提出的一个适用性良好的级配方程^[10-12],将级配曲线量化表示为关于参数 b 和 m 的函数。当已知级配分布时,一般采用最优化拟合^[12]来确定参数 b 和 m ;若已知参数 b 和 m ,则可以代入式(1)绘出级配曲线。因此,在本文中级配方程与级配分布是等价的。该级配方程为

$$P = f(b, m, d) = \frac{1}{(1-b)\left(\frac{d_{\max}}{d}\right)^m + b} \times 100\% \quad (1)$$

式中: d 为任意粒径; d_{\max} 为最大粒径,通常为已知量; P 为粒径小于 d 的颗粒所占百分数; b 和 m 为参数,其中 $b < 1$ 且 $m > 0$,以下称为级配参数。

1.2 模型的统一表达式

通过粗粒料在三轴应力状态下的颗粒破碎试验,初步发现级配参数 b 和 m 与围压 σ_3 之间并不存在规律性关系,因此,直接建立“应力应变→级配参数(级配分布)”的关系是比较困难的。

引入破碎指标来作为应力应变和级配参数之间的过渡条件,即建立“应力应变→破碎指标→级配参数”的关系。一方面,“应力应变→破碎指标”已有较多的研究成果可供参考^[1-2];另一方面,“破碎指标→级配参数”的关系可以通过破碎指标的定义进行数学推导。因此,建立这样的数学模型在理论上是切实可行的。

该数学模型的本质是通过建立方程组求解当前的级配参数 b 和 m 。由于级配方程有 b 和 m 这2个参数作为未知数,因此,需要联立2个不同的方程来求解。基于此,引入2个破碎指标 B_w 和 B_g 。

首先,根据破碎指标的定义,只需要进行数学上的推导即可确定“破碎指标→级配参数”的函数关系,设其统一表达式为

$$\begin{cases} B_w = g_1(b, m) \\ B_g = g_2(b, m) \end{cases} \quad (2)$$

其次,“应力应变→破碎指标”可以通过试验总结理论或经验公式,设其统一表达式为

$$\begin{cases} B_w = f_1(\sigma, \varepsilon) \\ B_g = f_2(\sigma, \varepsilon) \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变。

最后,联立式(2)和式(3)即为本文所建立的“应力应变→破碎指标→级配参数”的数学模型。当式(2)和式(3)中的函数 g 和 f 确定之后,根据土体所处的应力应变状态即可求出当前的级配参数 b 和 m ,即确定新的级配分布。

1.3 破碎指标的选择

由于式(2)和式(3)都是关于破碎指标的函数,因此,选择合适的破碎指标 B_w 和 B_g 成为模型建立的重

要环节。目前, 颗粒破碎指标总的来说可以分为 3 类: 第 1 类是基于特定粒径或系数, 第 2 类是基于粒组质量分数, 第 3 类是基于破碎势。

第 1 类用单个粒径(比如 d_{10} 和 d_{15} 等)或系数(比如 C_u 或 C_c)的变化来衡量颗粒破碎程度^[13], 在计算方面简单实用, 但描述的级配特征比较单一, 难免以偏概全。

第 2 类用粒组质量分数的变化来衡量颗粒破碎程度, 以 MARSAL^[7]定义的 B_g 为代表。若用 w_{0i} 和 w_i 分别表示试验前、后第 i 个粒组的质量分数, 则该粒组的质量分数变化量为 $(w_i - w_{0i})$, 其中, w_{0i} 和 w_i 示意图如图 1 所示。MARSAL 定义的破碎指标 B_g 为所有 $(w_i - w_{0i})$ 的正值之和^[7]。 B_g 能够反映土颗粒整体破碎的特点, 且简单实用, 因此, 将作为模型所需的破碎指标之一。

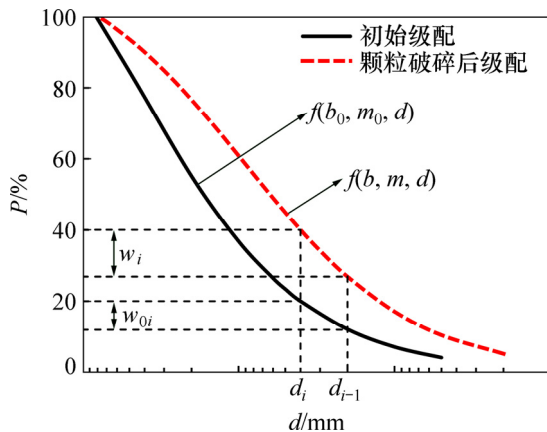


图 1 w_{0i} 和 w_i 示意图

Fig. 1 Schematic map of w_{0i} and w_i

第 3 类以 HARDIN 等^[8-9]定义的破碎率为代表, 是以颗粒破碎前后的级配曲线所围成的面积作为破碎量, 再除以各自所定义的破碎潜能, 得到的比值即为破碎率。其中, HARDIN^[8]将粒径 $d=0.074$ mm 与初始级配曲线围成的面积作为破碎潜能; EINAV^[9]则认为颗粒破碎会存在 1 个极限级配, 因此, 将 $d=0.074$ mm 的限制取消, 改为将初始级配曲线与极限级配曲线围成的面积作为破碎潜能, 在理论上更为合理。将初始级配曲线、试验后的级配曲线和极限级配曲线与最大粒径线 $d=d_{max}$ 所围成的面积分别表示为 S_0 , S_1 和 S_2 , 则 EINAV^[9]定义的破碎指标可表示为

$$B_E = \frac{S_1 - S_0}{S_2 - S_0} \quad (4)$$

事实上, B_E 在实际运用中并不方便: 相比于其他破碎指标, 确定极限级配曲线的试验属于额外试验,

加大了试验量, 而且该试验需要在高应力状态下进行, 难度较大。因此, B_E 虽然在理论上为人们所认可, 但目前被作为破碎指标应用于实际研究的不多。由式(4)可知: 对于给定的某种土料, 初始级配曲线确定之后(即 S_0 为定值), 对应的极限级配曲线也随之确定(即 S_2 也为定值)。因此, EINAV 破碎指标 B_E 的本质是用破碎量 $(S_1 - S_0)$ 除以一个同量纲的定值, 得到量纲一的百分比即为破碎指标。基于此, 将式(4)的分母由定值 $(S_2 - S_0)$ 替换为定值 S_0 , 从而定义 1 个新的破碎指标 B_W , 如图 2 所示。 B_W 表达式为

$$B_W = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \quad (5)$$

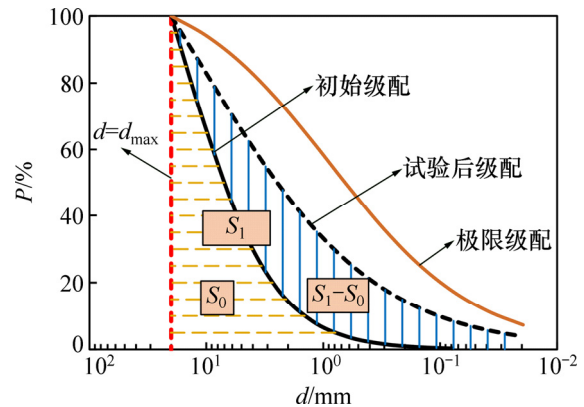


图 2 B_W 示意图

Fig. 2 Schematic map of B_W

在理论的完整性上 B_W 不如 B_E : B_E 的变化区间是 0~1, 适合用来对比评价不同土体的颗粒破碎程度; B_W 的理论变化区间则是 0~无穷大。但是, B_W 反映的是级配整体的变化, 且简单实用, 因此, 将其作为模型所需的另外 1 个破碎指标。

至此, 模型要求的 2 个破碎指标已选定, 即 B_g 和 B_W , 其优势是都能够反映级配整体的变化, 且定义简单, 计算方便。

2 破碎指标与级配参数的关系推导

2.1 B_W 与级配参数的关系

HARDIN^[8]和 EINAV^[9]定义的破碎指标在实际应用时, 一般通过梯形分割法求取级配曲线所围面积。若利用本文的级配方程, 则可以直接利用方程积分求取面积。级配方程计算面积示意图如图 3 所示。

由于粒径 d 的最小值不能为 0 mm, 故式(1)中 P 的最小值只能趋向于 0, 最大值为 100%。因此, 在利

用积分求面积时可以先对 P 在区间 $[k, 1]$ 内进行积分, 然后使 k 趋向于 0 并求极限(见图 3)。

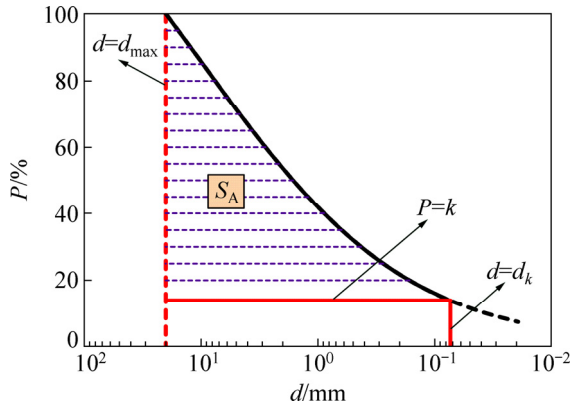


图 3 级配方程计算面积示意图

Fig. 3 Diagram of area calculated by gradation equation

级配曲线与 $d=d_{max}$ 所围的面积 S 可表示为

$$S = \lim_{k \rightarrow 0} S_A = \int_k^1 (\lg d_{max} - \lg d_k) dP \quad (6)$$

式中 d_k 为级配曲线上 $P=k$ 时所对应的粒径。

结合式(6)和式(1)可得:

$$\lg d_{max} - \lg d_k = -\frac{1}{m} \lg \frac{P(1-b)}{1-Pb} \quad (7)$$

当 k 趋向于 0 时, 将式(7)代入式(6)可得

$$S = -\frac{\ln(1-b) - \ln(1-kb)}{mb \ln 10} \quad (8)$$

特别地, 当 $b=0$ 时, 式(8)可进一步表示为

$$S = \frac{1-k}{m \ln 10} \quad (9)$$

因此, 若初始级配参数为 b_0 和 m_0 , 颗粒破碎后的级配参数为 b 和 m , 根据式(8)和式(5)可得到本文定义的破碎指标 B_W :

$$B_W = g_1(b, m) = \frac{\ln(1-b) - \ln(1-kb)}{\ln(1-b_0) - \ln(1-kb_0)} \frac{m_0 b_0}{mb} - 1 \quad (10)$$

当 k 趋向于 0 时对应的粒径 d 为 0 mm, 而实际上土颗粒的最小粒径不可能为 0 mm, 因此, 将 k 设定为一个较小的值, 但不为 0, 这样更符合级配分布的实际情况。

为约定 k 的取值, 此处以某砂板岩的三轴试验为例^[14], 试验所得各围压下的级配参数如表 1 所示(其中利用式(10)所求得的面积 S 和破碎指标 B_W 也列于表 1)。当 k 分别取为 1.0%, 0.5% 和 0.1% 时, 相同围压下的面积 S 和破碎指标 B_W 基本保持不变。由此可见, 当 k 较小时, 利用式(10)计算得到的破碎指标 B_W 是稳定的, 不随 k 的变化而发生显著变化。因此, 可以将 k 约定为 0.1%。

综上所述, 利用本文的级配方程积分求取破碎指标 B_W 是可行的。同理, 该方法也可以推广到计算 HARDIN^[8]和 EINAV^[9]定义的破碎指标。

2.2 B_g 与级配参数的关系

根据 B_g 的定义, 由于粒组质量分数的增加量与其余粒组质量分数的减少量是相等的, 因此, B_g 又可以表示为各粒组质量分数变化值之和的 1/2, 即

$$B_g = g_2(b, m) = 0.5 \sum |w_i - w_{0i}| \quad (11)$$

w_{0i} 和 w_i 利用级配参数可以分别表示为

$$\begin{cases} w_i = f(b, m, d_i) - f(b, m, d_{i-1}) \\ w_{0i} = f(b_0, m_0, d_i) - f(b_0, m_0, d_{i-1}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: 函数 f 为级配方程(见式(1)); d_i 和 d_{i-1} 分别为某个粒组的最大和最小粒径。在 GB T50123—1999 “土工试验方法标准”^[15]中, 颗粒分析试验分别采用孔径为 60.00, 40.00, 20.00, 10.00, 5.00, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 和 0.075 mm 的土工筛。

式(11)和式(12)分别确定了 B_g 与级配参数 b 和 m 的函数关系。值得注意的是, 级配曲线是通过筛分试验确定的, 而级配方程是对筛分所得级配曲线进行数学拟合, 两者之间存在拟合误差。图 4 所示为级配方程与筛分试验所得 w_i 示意图(其中, 公式 w_i 为利用式

表 1 面积 S , 破碎指标 B_W 与 k 的关系

Table 1 Relationship between S , B_W and k

围压/MPa	级配参数		S			破碎指标 B_W /%		
	b	m	$k=1.0\%$	$k=0.5\%$	$k=0.1\%$	$k=1.0\%$	$k=0.5\%$	$k=0.1\%$
0	0.683	1.16	0.628	0.630	0.631	—	—	—
0.3	0.749	1.12	0.712	0.713	0.715	13.4	13.3	13.3
0.8	0.746	1.05	0.756	0.759	0.760	20.5	20.5	20.5
1.2	0.798	1.07	0.809	0.811	0.813	28.9	28.9	28.8
1.6	0.816	1.06	0.847	0.849	0.851	34.9	34.9	34.8

表 2 级配方程计算 B_g 的误差分析

Table 2 Error analysis of B_g calculated by gradation equation

围压/MPa	筛分试验各粒组质量分数/%					级配参数		B_g /%		筛分试验与公式
	[60, 40)	[40, 20)	[20, 10)	[10, 5)	<5	b	m	筛分 试验	公式 计算	计算所得 B_g 相对误差/%
0	19.0	27.5	25.4	16.4	11.7	0.690	1.252	—	—	—
0.4	16.2	26.0	23.8	16.5	17.5	0.678	1.094	5.9	6.1	3.5
0.8	15.6	24.1	22.8	18.6	18.9	0.698	1.068	9.4	8.8	-6.3
1.5	14.9	23.6	22.4	17.7	21.4	0.683	1.004	11.0	10.8	-1.6
2.2	13.3	21.0	23.2	18.3	24.2	0.741	1.025	14.4	14.6	1.2

(12)计算得到的各个粒组的质量分数：筛分 w_i 为筛分试验得到的粒组质量分数。二者之间存在误差，因此，利用式(11)所计算的破碎指标 B_g 与筛分试验确定的 B_g 也存在误差。

配参数 b 和 m 之间的函数关系式已经确定，即模型中的式(2)已确定。

3 破碎指标与应力应变的关系

3.1 三轴试样破坏时的颗粒破碎规律

目前有关颗粒破碎的研究主要是基于三轴试样破坏时的试验结果，因此，下面以普通三轴试验为例，总结三轴应力状态下式(3)的函数关系 f_1 和 f_2 ，初步验证本模型的合理性。

实际上，已有较多的经验公式可供参考^[1,3,5]，其中大部分是描述三轴试验破坏时的破碎指标与应力或应变的单因素关系。对于三轴试样破坏时的破碎规律，本文作者建议了破碎指标与围压 σ_3 之间的经验公式为

$$\begin{cases} B_W = f_1(\sigma) = A_1(\sigma_3 / p_a)^{C_1} \\ B_g = f_2(\sigma) = A_2(\sigma_3 / p_a)^{C_2} \end{cases} \quad (13)$$

式中： A_1 、 C_1 、 A_2 和 C_2 为拟合参数。

对于式(13)的适用性，现以 1 组三轴试样破坏时的数据来检验其拟合效果。三轴试样破坏时破碎指标与围压的关系如图 5 所示(其中， σ_3 为围压； $A_1=9.16$ ， $C_1=0.465$ ； $A_2=5.81$ ， $C_2=0.349$)。从图 5 可以看出：式(13)对于破碎指标与围压的关系描述效果较好。

3.2 三轴试样剪切过程中的颗粒破碎规律

式(13)只是针对试样在不同围压下破坏时的这个“点”，而无法推广到整个加载剪切的“过程”。三轴剪切试验过程中目前也有一些经验公式可供参考。比如，贾宇峰等^[5]将 B_r 表示为广义剪应变 ϵ_s 的函数；刘恩龙等^[4]在压缩试验中将破碎指标表示为平均正应力 p 的函数；SALIM 等^[6]在其弹塑性模型中将破碎指标 B_g 表示为塑性剪应变 ϵ_{sp} 、临界状态应力 $p_{cs(i)}$ 和 p 的函数。本文作者则建议了 1 个将破碎指标表示为广义剪应变 ϵ_s 和平均正应力 p 的经验公式：

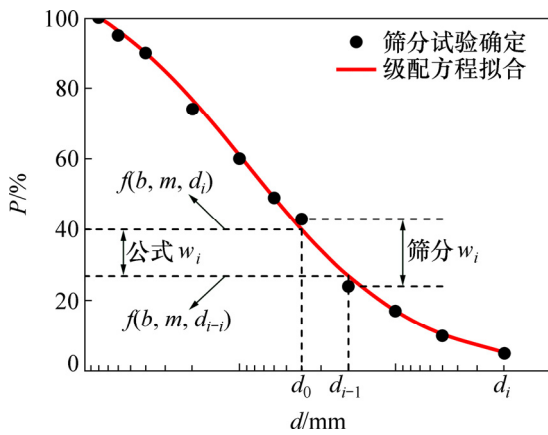


图 4 级配方程与筛分试验所得 w_i 示意图

Fig. 4 Diagram of w_i obtained from gradation equation and sieving test

朱俊高等^[10]的研究表明式(1)对于级配曲线的拟合相关系数 R^2 一般都在 0.95 以上，由此可知式(12)计算得到的各个粒组质量分数与筛分试验相比虽然存在误差，但是误差应该在合理范围之内。以某堆石料的三轴试样颗粒破碎数据为例，通过筛分试验得到各粒组质量分数，通过级配方程拟合得到参数 b 和 m 。同时利用筛分试验数据和式(11)对各围压下的 B_g 进行计算。进一步地，以筛分试验计算的 B_g 为基准，算出式(11)计算结果的相对误差。级配方程计算 B_g 的误差分析如表 2 所示。由表 2 可知：两者相对误差都在 10% 以内，属于合理范围。因此，可以认为利用式(11)计算破碎指标 B_g 是合理的。

综上所述，模型中的 2 个破碎指标 B_W 和 B_g 与级

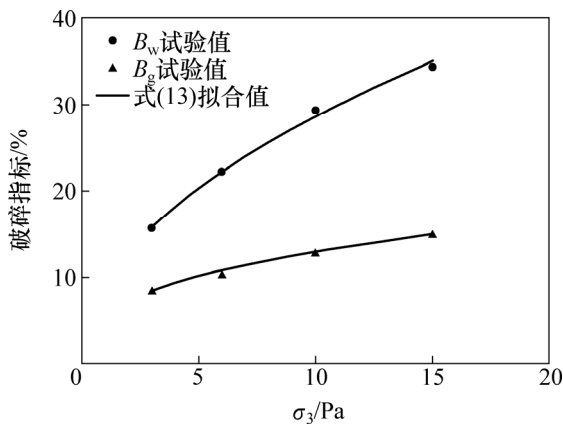


图 5 三轴试样破坏时破碎指标与围压的关系

Fig. 5 Relationship between breakage indicators and confining pressure after sample failure in triaxial test

$$\begin{cases} B_w = f_1(\sigma, \varepsilon) = \frac{\alpha_1 [1 - \exp(-\beta_1 \varepsilon_s)]}{\ln(h_s / p)} \\ B_g = f_2(\sigma, \varepsilon) = \frac{\alpha_2 [1 - \exp(-\beta_2 \varepsilon_s)]}{\ln(h_s / p)} \end{cases} \quad (14)$$

式中: h_s 为粗粒土的固相硬度, 一般通过压缩试验确定^[16]。 α_1 , β_1 , α_2 和 β_2 均为拟合参数。

对于式(14)的适用性, 现以 1 组三轴剪切过程中的颗粒破碎数据^[5]来检验其拟合效果。图 6 所示为用式(14)拟合的三轴剪切过程中破碎指标与应力应变的关系(其中, B 为破碎率; $h_s=19.1$ MPa, $\alpha_1=0.61$, $\beta_1=32$, $\alpha_2=0.265$, $\beta_2=39.1$)。由图 6 可知: 式(14)能够较好地描述破碎指标与应力应变之间的关系。

土的应力状态有多种, 比如普通三轴应力状态、 K_0 应力状态以及其他多种复杂应力状态等, 因此, 总结出适用于一般应力状态的函数关系 f_1 和 f_2 是本文的最终目的。式(13)和式(14)则都是基于三轴应力状态,

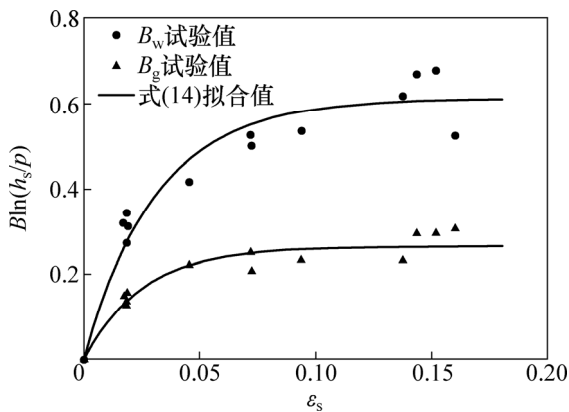


图 6 三轴剪切过程中破碎指标与应力应变的关系

Fig. 6 Relationship between breakage indicators and stress and strain during shearing

其中式(13)描述的是三轴试样破坏时粗粒料的破碎规律, 式(14)则描述的是三轴剪切过程中粗粒料的破碎规律。

4 模型初步验证

模型的适用性主要取决于 2 个环节: 首先是“应力应变→破碎指标”之间经验公式的适用性。这一部分是通过颗粒破碎试验结果来进行总结的。虽然目前尚无适用于一般应力状态下的经验公式, 但适用于某一类应力状态的经验公式有较多文献可供参考^[1, 3, 5]。因此, 这一部分虽然是模型的重点, 但并不是模型的难点。其次是“破碎指标→级配参数”是否可行, 这是模型是否成立的关键。

下面主要证明已知 B_w 和 B_g 时, 是否可以求得 b 和 m 。以某粗粒料的三轴试验为例, 当围压分别为 0.6 MPa 和 1.5 MPa 时, 试样筛分实验破碎指标 $B_{w1}=22.2\%$, $B_{g1}=10.1\%$ (围压为 0.6 MPa); $B_{w2}=34.3\%$, $B_{g2}=15.3\%$ (围压为 1.5 MPa)。将 B_w 和 B_g 试验值分别代入式(10)和式(11)联立方程求解, 得到级配参数分别如下: $b_1=0.607$ 和 $m_1=0.891$ (围压为 0.6 MPa); $b_2=0.638$ 和 $m_2=0.794$ (围压为 1.5 MPa)。将 b 和 m 代入式(1), 绘制得到的级配曲线预测值如图 7 所示。从图 7 可见: 模型预测的级配曲线与筛分试验结果较吻合, 这说明了模型中“破碎指标→级配参数”是可行的。

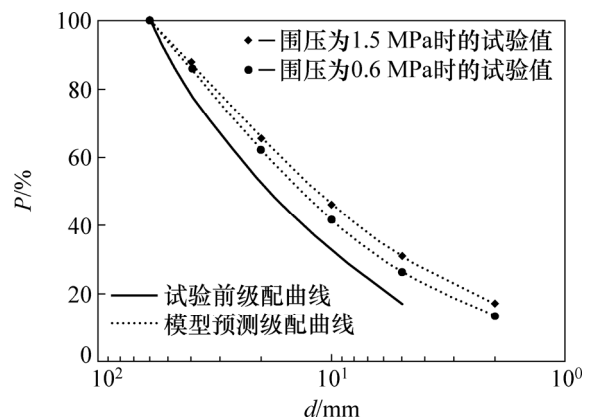


图 7 模型对级配分布的预测

Fig. 7 The gradation curve from test and prediction

5 结论

1) 定义 1 个新的破碎指标 B_w , 连同 MARSAL 定义的破碎指标 B_g 一起建议为该模型中所需的 2 个破

碎指标,同时推导并证明了 B_w 和 B_g 与级配参数 b 和 m 之间的数学关系式,即完成模型中“破碎指标→级配参数”的转换。

2) 对于三轴试样破坏时颗粒破碎指标与围压的关系、三轴试样剪切过程中破碎指标与应力和应变的关系,建议合适的经验公式,并利用试验数据初步证明其适用性,即完成模型中“应力应变→破碎指标”的转换。

3) 以三轴试验为例,已知试验所得的破碎指标 B_w 和 B_g ,成功预测三轴试样在不同围压下破坏时的级配分布,初步验证了模型的合理性。

参考文献:

- [1] 吴爱祥,王建栋,彭乃兵. 颗粒级配粗骨料充填料浆离析的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3201-3207.
WU Aixiang, WANG Jiandong, PENG Naibing. Effect of grain composition on coarse aggregate filling slurry segregation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(9): 3201-7.
- [2] 陈镠芬,高庄平,朱俊高,等. 粗粒土级配及颗粒破碎分形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015(9): 3446-3453.
CHEN L, GAO Zhuangping, ZHU Jungao, et al. Gradation of coarse grained soil and fractal geometry character of particle breakage[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015(9): 3446-3453.
- [3] 张季如,张弼文,胡泳,等. 粒状岩土材料颗粒破碎演化规律的模型预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1898-1905.
ZHANG Jiru, ZHANG Biwen, HU Yong, et al. Predicting the particle breakage of granular geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1898-1905.
- [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(S2): 148-154.
LIU Enlong, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Critical state of rockfill materials and a constitutive model considering grain crushing[J]. Rock & Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 148-154.
- [5] 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. Particle breakage of rockfill during triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1692-1697.
- [6] SALIM, W., INDRARATNA, B. A new elastoplastic constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(4), 657-671.
- [7] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1967, 93(2): 27-44.
- [8] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [9] EINAV I. Breakage mechanics-part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(6): 1274-1297.
- [10] 朱俊高,郭万里,王元龙,等. 连续级配土的级配方程及其适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1931-1936.
ZHU Jungao, GUO Wanli, WANG Yuanlong, et al. The research on equation of soil gradation curve and its applicability[J]. Chinese Journal of Geotechnical, 2015, 37(10): 1931-1936.
- [11] 郭万里,朱俊高,温彦锋. 对粗粒料 4 种级配缩尺方法的解释[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1473-1480.
GUO Wanli, ZHU Jungao, WEN Yanfeng. Unified description for four grading scale methods for coarse aggregate[J]. Chinese Journal of Geotechnical, 2016, 38(8): 1473-1480.
- [12] ZHU Jungao, GUO Wanli, WEN Yanfeng, et al. A new gradation equation and its applicability for particle size distributions of various soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(2): 1-8.
- [13] 柏树田,崔亦昊. 堆石的力学性质[J]. 水力发电学报, 1997, 16(3): 21-30.
BAI Shutian, CUI Yihao. The mechanical properties of rockfill[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1997, 16(3): 21-30.
- [14] 傅华,凌华,蔡正银. 粗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 Zhengyin. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, 37(1): 75-79.
- [15] GB 50123—1999, 土工试验方法标准[S].
GB 50123—1999, Standard for geotechnical test methods[S].
- [16] 陈生水,傅中志,韩华强,等. 一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1489-1495.
CHEN Shengshui, FU Zhongzhi, HAN H Q, et al. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1489-1495.

(编辑 伍锦花)