

风化模型在粗粒土颗粒破碎研究中的应用

贾宇峰,王丙申,迟世春

(大连理工大学 水利工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:对古水面板堆石坝玄武岩筑坝粗粒土堆石料进行了颗粒破碎试验。依据试验前后试样的颗粒级配曲线,研究了风化模型参数与颗粒破碎之间的关系。研究表明,风化模型能够很好地拟合试验前后土体的颗粒级配曲线,对于大粒径颗粒(大于 5 mm)的级配拟合效果远优于分形几何模型;风化模型参数本质上反映了土体颗粒级配曲线与土体最大颗粒粒径线围成面积的大小及其分布状态;相对破碎参量 B_r 是风化模型参数的函数,可以直接通过试验前后土体颗粒级配曲线的风化模型参数求出。

关键词:粗粒土;颗粒破碎;风化模型;相对破碎参量

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.22.017

粗粒土是指粒径在 0.1 ~ 60 mm 范围内的颗粒含量大于 50% 的土石混合料。粗粒土具有压实性能好、透水性强、填筑密度大、抗剪强度高、沉陷变形小、承载力高等工程特性,广泛应用于土石坝建设,一般占坝体 70% ~ 90%。筑坝粗粒土经过人工爆破开采,内部含有微裂缝,在高应力下会产生显著的颗粒破碎现象。颗粒破碎改变土体的级配和内部结构,对土体的强度、内摩擦角、孔隙比、渗透系数和湿化变形都会产生不可忽视的影响,颗粒破碎还削弱了土体的剪胀性,增加土体的流变性^[1-2]。

Marsal 定义破碎参量 B_g 等于试验前后相同粒径筛分量差值中所有正值的总和,用该参数来度量土体的颗粒破碎。在此基础之上,B. O. Hardin 建立了相对破碎参量 B_r ^[3]。近年来分形几何模型开始用于研究粗粒土的颗粒破碎。石修松和程展林通过堆石料的颗粒破碎试验,建立了级配曲线分形维数与破碎参量 B_g 之间的经验关系^[4],研究了围压、密度对分形维数的影响。杜俊和侯克鹏等通过粗粒土的击实试验,研究了含水率对分形维数的影响^[5]。巍巍和姜程程等通过人工模拟堆石料的排水三轴试验,建立了分形维数与相对破碎参量 B_r 之间的经验公式^[6]。虽然,分形几何模型

能够较好地描述破碎颗粒的分布状态,分形维数与破碎参量之间也存在一定的相关性。但是,分形几何模型本身是根据破碎颗粒之间的相似性建立的。由于粗粒土受力变形后仍存在一定数量的未破碎颗粒,分形几何模型很难直接描述颗粒破碎后土体级配的变化。另一方面,分形维数本身也并没有实际的物理意义,其与破碎参量之间只是存在一定的经验关系。

在以上研究的基础上,本文进行了古水面板堆石坝玄武岩堆石料的颗粒破碎试验,研究了土体在固结、制样和剪切后的颗粒破碎情况,并采用风化模型拟合了土体破碎前后的颗粒级配曲线。与分形几何模型相比,风化模型能够更好地描述颗粒破碎对土体级配的影响,并且其模型参数是相对破碎参量 B_r 的函数,具有明确的物理意义。

1 相对破碎参量

B. O. Hardin 根据粗粒土的颗粒破碎试验,提出粒径小于 0.074 mm 的土颗粒很难发生颗粒破碎。因此,将土体级配曲线与 0.074 mm 粒径线围成的面积定义为土体的破碎势 B_p ,如图 1 所示。根据 B_p 的定义,颗粒级配曲线上某一粒径颗粒的破碎势 b_p 为

收稿日期:2015-04-27

收稿日期:国家自然科学基金资助项目(51109027,51179024,51379029);中央高校基本科研业务费资助项目(DUT12LK11)

作者简介:贾宇峰,男,博士,硕士研究生导师,研究方向为筑坝粗粒土本构关系研究及应用。E-mail:jiayf130@dlut.edu.cn

$$b_p = \begin{cases} \lg\left[\frac{D_i}{0.074}\right] & D_i \geq 0.074 \text{ mm} \\ 0 & D_i < 0.074 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

式中, D_i 是颗粒级配曲线上某一粒径。土体颗粒级配曲线的破碎势 B_p 为

$$B_p = \int_0^1 b_p df \quad (2)$$

B. O. Hardin 将土体试验前后破碎势的变化值定义为整体破碎参量 B_t

$$B_t = \int_0^1 (b_{p0} - b_{pt}) df \quad (3)$$

式中, b_{p0} 是土体破碎前的某一粒径的破碎势, b_{pt} 是土体破碎后这一粒径的破碎势。 B_t 实际上是土体试验前后级配曲线所围成的面积, 如图 1 所示。

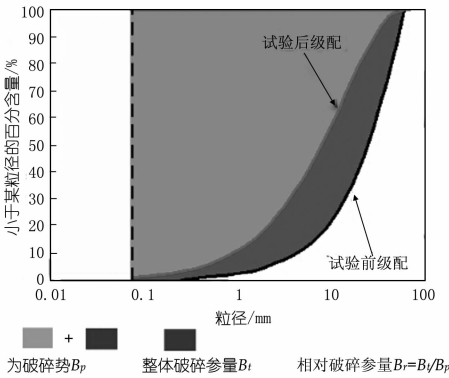


图 1 相对破碎参量的定义

为了消除试验前级配曲线对颗粒破碎的影响, B. O. Hardin 定义了相对破碎参量 B_r

$$B_r = B_t / B_p \quad (4)$$

B_r 的最小值是 0, 最大值是 1, 即试验后的土体颗粒粒径全部小于 0.074 mm, 土体完全破碎。与 B_g 相比, B_r 反映了级配曲线整体变化, 并消除了试验前级配对破碎的影响。

2 风化模型

T. Fukumoto 在 1990 年建立了描述土体颗粒级配曲线的风化模型^[7]。风化模型假设土颗粒在风化作用下的破碎率为常数 r , 并假定经过 y_0 年地质年代后, 在风化作用下土颗粒发生破碎。用筛分率为 λ 的一系列筛网筛分风化后的土颗粒, 并假定筛网的最大孔径为 D_{\max} , 则由上至下第 n 层筛网上土颗粒的百分量为 $(1 - r) \cdot r^{n-1}$ 。若再经过 y_0 年风化作用, 且土颗粒的破碎率 r 不变, 则前 $n - 1$ 层筛网上的残余颗粒风化到第 n 层筛网上土颗粒含量均为 $(1 - r)^2 \cdot r^{n-1}$ 。因此, 第 n 层筛网上土颗粒的残留量为 $C_{n-1}^{n-1} (1 - r)^2 \cdot r^{n-1}$ 。经过 m 倍 y_0 年, 则第 n 层筛网上土颗粒的残留量为

$$q_{n-1} = C_{m+n-2}^{n-1} \cdot (1 - r)^m \cdot r^{n-1} \quad (5)$$

根据(5) 式可以求出, 通过第 n 层筛网上的土颗粒含量 p_n 为

$$p_n = 1 - \sum_{i=0}^n q_n = 1 - \sum_{i=0}^n C_{m+i-1}^{m-1} \cdot (1 - r)^m \cdot r^i \quad (6)$$

其中, 筛网层数 n 是筛分率 λ 和筛网孔径 D_n 的函数, 即

$$n = \lg\left(\frac{D_{\max}}{D_n}\right) / \lg \lambda \quad (7)$$

根据(5) 式可以求出土体在风化作用下破碎后的颗粒级配曲线的平均值 μ 和方差 σ^2 , 即

$$\begin{cases} \mu = \sum q_n \cdot n / \sum q_n = mr / (1 - r) \\ \sigma^2 = \sum q_n \cdot (n - \mu)^2 / \sum q_n = mr / (1 - r)^2 \end{cases} \quad (8)$$

根据(8) 式可以由土体的颗粒级配曲线求出对应的风化模型参数 m 和 r , 将土体颗粒级配曲线数值化。

3 颗粒破碎试验

颗粒破碎试验采用大连理工大学研制的粗粒土大型多功能三轴仪, 试样直径 30 cm, 高 60 cm。试验粗粒土选用古水面板堆石坝玄武岩筑坝堆石料, 土料平均比重 2.79, 制样干密度 2.21 g/cm³, 最大粒径 60 mm。根据级配称量好各粒组的质量, 拌匀后分 6 层装填, 并捣实至要求的干密度。从试样底部通入二氧化碳气体置换试样内的空气, 在 30kPa 的预围压下由底部进水饱和。试样采用各向等压排水固结, 固结围压依次为 100, 500, 1 000, 1 500 kPa 和 2 000 kPa。试样固结方式采用上、下两面排水固结, 待排水量稳定后开始剪切, 剪切速率约为 0.5 mm/min, 当轴应变达到 15% 后卸载。

试验结束后, 将试样烘干, 进行颗粒筛分, 分析试验前后颗粒级配的变化。重新制样, 捣实至要求的干密度后, 进行颗粒筛分试验, 研究制样过程中的颗粒破碎。试验前、制样后以及各围压下剪切结束后的颗粒级配如表 1 所示。

4 试验结果分析

试验前后颗粒级配曲线的分形维数 D 根据(9) 式确定

$$\lg[M_1(d_i)/M_t] = (3 - D) \lg(d_i/d_{\max}) \quad (9)$$

式中, $M_1(d_i)$ 为小于 d_i 粒径的颗粒质量, M_t 为试样总质量, D 为分形维数, d_{\max} 为试样的最大粒径。

图 2 绘制了试验前后实测颗粒级配曲线、风化模型拟合曲线和分形几何模型拟合曲线。表 2 中列出了

表 1 试验前后土体的颗粒级配

状态	围压/ kPa	不同粒径颗粒含量/%										
		40 ~ 60	20 ~ 40	10 ~ 20	5 ~ 10	2 ~ 5	1 ~ 2	0.5 ~ 1	0.25 ~ 0.5	0.1 ~ 0.25	0.075 ~ 0.1	< 0.075
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
试验前		25.77	32.59	19.60	10.65	6.71	2.29	1.17	1.22			
制样后		18.39	36.19	19.51	11.33	8.13	1.92	2.15	1.20	0.41	0.13	0.64
剪切后	100	17.37	36.45	18.49	13.04	7.48	2.03	2.39	1.32	0.46	0.15	0.82
	500	11.27	37.97	21.80	13.62	8.18	1.53	2.50	1.38	0.41	0.22	1.14
	1000	11.59	33.05	21.59	15.11	8.91	1.86	3.58	1.90	0.79	0.26	1.36
	1500	9.42	32.18	22.13	15.84	10.17	2.20	3.37	1.98	0.84	0.24	1.62
	2000	9.78	34.22	19.32	14.51	10.45	2.54	4.03	2.12	0.91	0.29	1.81

风化模型参数、分形维数 D 、各围压下试验后颗粒级配曲线的相对破碎参量 B_r 。其中, B_r 剔除了制样产生的颗粒破碎。从图 2 可以看到,分形几何模型对粒径小于 5 mm 的颗粒级配拟合较好,对于粒径大于 5 mm 的颗粒拟合较差,并且误差随着围压的增大而增大。而风化模型能够很好地拟合各围压下试验后的颗粒级配曲线,其大于 5 mm 粒径的颗粒级配拟合误差远小于分

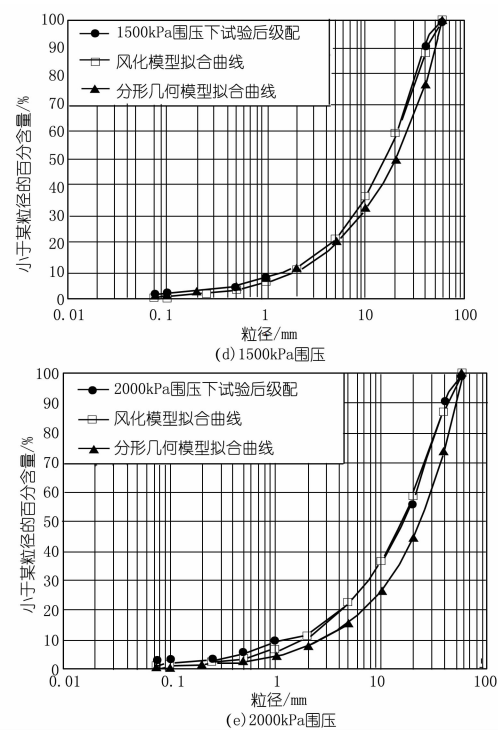
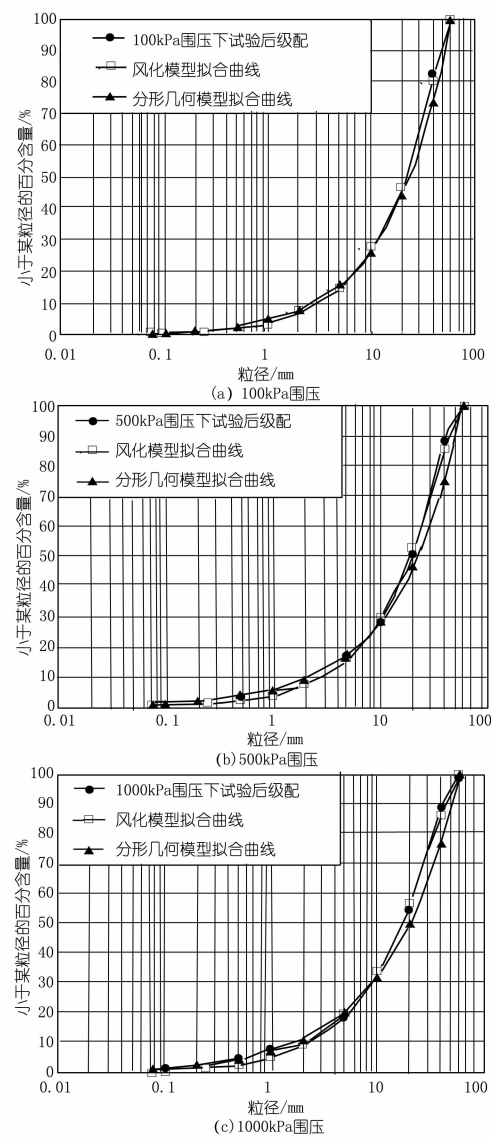


图 2 各围压下试后颗粒级配曲线拟合

形几何模型。

表 2 试验前后土体的颗粒级配曲线的拟合参数和破碎参量							
状态	围压/ kPa	λ	m	r	D	B_r	B'_r
试验前		1.52	1.268	0.647	2.10		
制样后		2.56	1.525	0.372	2.23		
剪切后	100	3.69	1.268	0.303	2.26	0.034	0.034
	500	1.01	1.722	0.988	2.30	0.045	0.045
	1000	1.01	1.593	0.990	2.35	0.070	0.072
	1500	1.01	1.560	0.991	2.37	0.087	0.086
	2000	1.01	1.506	0.991	2.39	0.093	0.091

如图 3 所示,颗粒级配曲线与最大粒径 D_{\max} 所围成的面积 S 为

$$S = \frac{q_0}{2} \lg \frac{D_{\max}}{D_1} + \frac{q_1}{2} \left(\lg \frac{D_{\max}}{D_1} + \lg \frac{D_{\max}}{D_2} \right) + \cdots$$

$$+ \frac{q_n}{2} \left(1g \frac{D_{\max}}{D_n} + 1g \frac{D_{\max}}{D_{n+1}} \right) \tag{10}$$

将(7)式带入(10)整理后,得到

$$\begin{aligned} S &= \frac{1g\lambda}{2} [q_0 + 3q_1 + 5q_2 + \cdots + (2n + 1)q_n] \\ &= \frac{1g\lambda}{2} \sum q_n + 1g\lambda (q_1 + 2q_2 + \cdots + nq_n) \\ &= \left(\frac{1g\lambda}{2} + \mu_l 1g\lambda \right) \cdot \sum q_n \end{aligned} \tag{11}$$

(11) 式表明,试样颗粒级配曲线与 D_{\max} 粒径线所围成的面积可以通过风化模型参数计算。由(11) 式和整体破碎参量 B_l 的定义可以得到

$$\begin{aligned} B_l = S_l - S_0 &= \left[\left(\frac{1g\lambda_l}{2} + \mu_l 1g\lambda_l \right) - \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{1g\lambda_0}{2} + \mu_0 1g\lambda_0 \right) \right] \cdot \sum q_n \end{aligned} \tag{12}$$

式中, S_0 和 S_l 分别为试验前后级配曲线与 D_{\max} 所围成的面积, λ_0 、 λ_l 、 μ_0 和 μ_l 分别为试验前后颗粒级配曲线的风化模型参数。

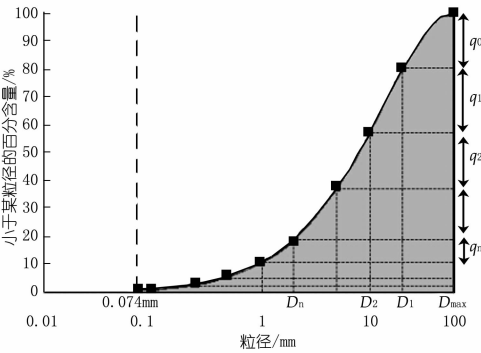


图3 颗粒级配曲线与 D_{\max} 围成的面积

由(11) 式和整体破碎势 B_p 的定义可以得到

$$\begin{aligned} B_p &= 1g \frac{D_{\max}}{0.074} \cdot \sum q_n - S_0 \\ &= \left[1g \frac{D_{\max}}{0.074} - \left(\frac{1g\lambda_0}{2} + \mu_0 1g\lambda_0 \right) \right] \cdot \sum q_n \end{aligned} \tag{13}$$

将(12)式和(13)式带入(4)式,得到

$$B_r = \frac{B_l}{B_p} = \frac{\left(\frac{1g\lambda_l}{2} + \mu_l 1g\lambda_l \right) - \left(\frac{1g\lambda_0}{2} + \mu_0 1g\lambda_0 \right)}{1g \frac{D_{\max}}{0.074} - \left(\frac{1g\lambda_0}{2} + \mu_0 1g\lambda_0 \right)} \tag{14}$$

(14) 式表明,相对破碎参量 B_r 是风化模型参数的函数。根据表 2 中的风化模型参数,结合(8) 式和(14) 式,计算了剪切后土体的相对破碎参量 B'_r , 并列 入表 2 中。从表 2 可以看到,根据风化模型参数求出的 相对破碎参量 B'_r 与直接根据颗粒级配曲线求出的相 对破碎参量 B_r 基本相等。

由上述分析可见,风化模型参数代表了级配曲线 与 D_{\max} 粒径线所围成的面积 S ,而 σ^2 则代表 S 在各个 粒径 D_n 下的分布情况。因此,相对破碎参量 B_r 只是反 映了颗粒级配曲线在颗粒破碎作用下 S 的变化值,并 不能反映这个 S 的变化值是如何在各个粒径之间进行 分配的。因此,只能根据 B_r 粗略地度量颗粒破碎对级 配曲线的影响,并不能完全根据 B_r 描述破碎后土体的 颗粒级配,预测土体受力变形后的颗粒级配。相对破碎 参量 B_r 只是在一定程度上反映了土体颗粒级配的整体 变化,并不能准确反映土体颗粒破碎对土体级配的 改变。而风化模型参数,实质上不仅反映了颗粒破碎作 用下土体颗粒级配曲线的整体变化,而且描述了这种 变化在各个粒径间的分布状态。

5 结 论

本文通过古水面板堆石坝玄武岩粗粒土堆石料的 颗粒破碎试验,得到了试验前后的颗粒级配曲线,研究 了风化模型参数与相对破碎参量 B_r 的关系,得到以下 结论。

- (1) 风化模型能够很好地拟合试验前后土体的颗 粒级配曲线。与分形几何模型相比,风化模型对于大 粒径颗粒(大于 5 mm)的级配拟合更为准确。
- (2) 风化模型参数本质上反映了土体颗粒级配曲 线与土体最大颗粒粒径线围成面积的大小及其分布状 态。通过对颗粒级配曲线面积的大小和分布状态的描 述来模拟颗粒级配曲线。
- (3) 相对破碎参量 B_r 是风化模型参数的函数,可 以直接通过试验前后土体颗粒级配曲线的风化模型参 数来求出。

参考文献:

[1] Lade Poul V, Yamamuro Jerry A, A Bopp Paul. Significance of Particle Crushing in Granular Materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(4): 309-316.

[2] 王振兴,迟世春,王峰,等.堆石料流变试验的颗粒破碎研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(5): 103-106.

[3] Hardin Bobby O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.

[4] 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(9): 3852-3857.

[5] 杜俊,侯克鹏,梁维,等.粗粒土压实特性及颗粒破碎分形特征试验研究[J]. 岩石力学, 2013, 34(8): 155-161.

[6] 魏巍,姜程程,覃燕林,等.人工模拟堆石料颗粒破碎的分形特性[J]. 人民黄河, 2014, 36(12): 126-129.

[7] Fukumoto T. Grading equation for decomposed granite soil[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(1): 27-34. (编辑:郑毅)

试验研究[J]. 人民长江, 2006, 37(4): 58-61.

[4] 韩炜, 杜科, 李珍, 等. 大坝混凝土裂缝修补材料的制备研究[J]. 人民长江, 2011, 42(10): 80-86.

[5] Chen L, Li Z, Xiao C J, et al. Size - controlled synthesis of highly dispersed silver particles[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013, (24): 1469-1474.

[6] 廖波, 袁江, 董建军, 等. 高耐候性抗碳化氟碳涂层材料的研制[J]. 人民长江, 2011, 42(3): 99-102.

[7] 王卫英, 于志鹏, 吕平, 等. 钢筋混凝土的腐蚀与防护[J]. 海岸工程, 2003, 22(2): 104-108.

[8] 冯菁, 韩炜, 李珍, 等. 新型聚脲混凝土保护材料开发及工程应用研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 64-67.

[9] 刘磊, 陈亮, 汪在芹, 等. 水工金属结构水性无机富锌涂料研究进展[J]. 人民长江, 2013, 44(20): 61-65.

[10] 魏涛, 廖灵敏, 韩炜, 等. CW 系列混凝土表面保护修补材料研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 175-179.

(编辑: 胡旭东)

Study on freeze - thaw resistance property of new surface protective coatings of hydraulic concrete

LIANG Hui^{1,2,3,4}, WANG Zaiqin^{2,3,4}, LI Zhen^{2,3,4}

(1. College of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 3. National Dam Safety Research Center, Wuhan 430010, China; 4. Collaborative Innovation Center for Geo - hazards and Eco - Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443000, China)

Abstract: The geographic position of alpine - cold region of west China is unique, the hydrological conditions and climatic conditions are complex and the natural environment there is harsh, therefore the freeze - thaw damage of the concrete materials occurs frequently. Freeze - thaw resistance property tests were conducted for three newly - developed surface protective coating materials of hydraulic concrete, namely the weathering epoxy coating, unsaturated polyester resin and polyurea coating system. The freeze - thaw resistance property of the polyurea coating system, using epoxy mortar as primer, polyurea material as paint, has the best effects under indoor accelerated freeze - thaw tests. And it is proved by the field production test that the material can protect the hydraulic concrete effectively in Tibet region, which is expected to be applied to the surface protection of hydraulic structures for improving the durability of water conservancy and hydropower projects in alpine - cold regions of west China.

Key words: hydraulic concrete; freeze - thaw cycle; surface protective coating; western alpine - cold region

(上接第 78 页)

Application of weathering model in particle breakage study of coarse granular soil

JIA Yufeng WANG Bingshen CHI Shichun

(Institute of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The particle breakage tests were carried out to the basalt coarse granular soil of Gushui concrete face rockfill dam. The relationship between the parameters of weathering model and particle breakage was studied according to the grading curves of the soil before and after the tests. The study shows that the weathering model can well simulate the grading curves of the soil before and after the tests, especially for the particle with large diameter (larger than 5mm), the simulation effect of weathering model is better than that of the fractal model. The weathering model parameter reflects the size and distribution of the area enclosed by the grading curve and the largest particle size curve. The relative breakage parameter of Br, a function of the parameter of the weathering model, can be directly calculated by using the weathering model parameters of the grading curves of the soil before and after the tests.

Key words: coarse granular soil; particle breakage; weathering model; relative breakage parameter