

DOI: 10.11779/CJGE202012021

三轴剪切过程中粗粒料颗粒破碎变化规律研究

吴二鲁¹, 朱俊高^{*1}, 黄维², 刘忠³

(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. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

3. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 准确预测粗粒料在加载过程中颗粒破碎的变化规律, 并将其应用于粗粒料的本构模型中具有重要意义。合理定义和精确计算颗粒破碎指标是准确研究加载过程中粗粒料颗粒破碎变化规律的保障。引入 Einav 的分形破碎指标, 认为在目前的颗粒破碎指标中该指标最适合用来对比评价粗粒料的颗粒破碎程度, 并利用连续级配土的级配方程代替分形级配方程进行破碎指标的准确计算。在此基础上, 选取已有文献中的试验数据, 对粗粒料三轴剪切过程中的颗粒破碎变化规律进行了研究, 建立了一个可以描述三轴剪切过程中颗粒破碎指标与剪应变及平均正应力之间关系的数学模型, 并验证了该模型的适用性。

关键词: 粗粒料; 三轴剪切; 颗粒破碎; 级配方程; 变化规律

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)12-2330-06

作者简介: 吴二鲁(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事土体基本性质及本构关系、土石坝工程研究。E-mail: 170804010004@hhu.edu.cn。

Evolution law of particle breakage of coarse-grained soil during triaxial shearing

WU Er-lu¹, ZHU Jun-gao¹, HUANG Wei², LIU Zhong³

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

2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Accurate prediction of the evolution law of particle breakage during loading process is of great significance to building the constitutive model for coarse-grained soil. The reasonable definition and accurate calculation of particle breakage indices are the guarantee to exactly study the evolution law of particle breakage during loading process. The fractal breakage index of Einav is introduced and considered as the most suitable one to compare and evaluate the breakage degree of coarse-grained soil among breakage indices. It is realized to accurately calculate the fractal breakage index by replacing fractal gradation equation with the gradation equation for continuous gradation soil. On this basis, the evolution law of particle breakage of coarse-grained soil is studied by selecting the experimental data in the existing literatures. A mathematical model is established to describe the relationship among particle breakage indices, shear strain and average normal stress during triaxial shearing, and the applicability of this model is validated.

Key words: coarse-grained soil; triaxial shearing; particle breakage; gradation equation; evolution law

0 引言

粗粒料由于具有抗剪强度高、透水性强及压实性好等优良工程特性成为土石坝工程的主要填筑材料^[1-2]。粗粒料易发生颗粒破碎^[3-5], 导致其级配和结构发生了改变, 从而对其变形性质产生了显著的影响^[6-9]。因此, 研究粗粒料在加载过程中颗粒破碎的发展规律, 并将其应用于考虑颗粒破碎影响的粗粒料本构模型中具有重要意义^[10-13]。

研究颗粒破碎规律之前, 需要找出一个衡量颗粒

破碎量的指标即破碎指标。为此, 不少学者对如何定义破碎指标进行了研究^[14-18], 如 Einav^[19]将试验前后各粒级配的含量差值之和作为破碎指标 B_g 。基于这些破碎指标, 国内外学者对粗粒料的颗粒破碎规律展开

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404801); 国家自然科学基金项目 (U1865104, 51479052); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51609098)

收稿日期: 2020-01-19

***通信作者** (E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn)

了大量研究^[20-23]。刘汉龙等^[24]通过大型三轴试验发现, 剪切之后的颗粒破碎指标 B_r 与围压之间呈双曲线的关系。蔡正银等^[25]基于三轴剪切试验总结了剪切后级配与围压及初始级配之间的关系。张季如等^[26]通过侧限压缩试验分析了应力水平与破碎指标 B_r 的数学关系。Jia 等^[27]基于大量三轴试验数据, 总结了剪切过程中破碎指标 B_r 随着剪应变的变化规律。郭万里^[28]研究了三轴试样剪切过程中及破坏时颗粒破碎指标的变化规律, 并给出了相应的经验公式。

从上述研究中可以看出, 对于粗粒料的颗粒破碎研究大多数都是针对三轴试样破坏时的破碎规律进行研究, 这些规律无法得到整个三轴剪切过程中颗粒破碎的变化规律。其次, 准确定义和求解颗粒破碎指标是准确研究三轴剪切过程中颗粒破碎变化规律的保证。为此, 本文通过对颗粒破碎指标的合理定义及三轴剪切过程中颗粒破碎指标的精确计算进行了分析。在此基础上, 研究了三轴剪切过程中粗粒料的颗粒破碎变化规律, 并提出了可以准确描述三轴剪切过程中颗粒破碎指标变化的数学模型。

1 颗粒破碎指标

1.1 颗粒破碎指标的选择

用来衡量颗粒破碎量的破碎指标是研究粗粒料颗粒破碎规律的基础。对已有的破碎指标^[14-19]可以分为两类: ①采用某个粒径或特征参数(不均匀系数或曲率系数)的变化衡量颗粒破碎量; ②则是从考虑级配整体的变化角度衡量颗粒破碎量。相对而言, 第二类定义的颗粒破碎指标考虑了颗粒破碎前后级配的整体变化, 描述颗粒破碎量更加准确, 其中 Marsal 提出的 B_g 不仅定义明确, 而且计算简单, 因此, 被国内外众多学者采用^[11, 28], 其表达式为

$$B_g = \sum |\Delta W_k|, \quad (1)$$

式中, ΔW_k 为颗粒破碎前后某一粒组的含量差值。

对于第二类指标, 除了 Marsal 提出的 B_g , Hardin^[18]将 P - $\lg d$ 坐标系中 $d=0.074$ mm、 $P=100\%$ 与发生颗粒破碎前的级配曲线围成的面积作为破碎潜能 S_p , 然后将试验前后的级配曲线所围成的面积作为颗粒破碎量 S , 如图 1 所示, 两者相除从而得到了破碎指标 B_r 。Einav^[19]认为 Hardin 提出的破碎潜能与实际不符, 为此提出极限级配的概念, 将极限级配曲线与初始级配曲线围成的面积作为颗粒破碎潜能 S_g , 如图 2 所示, 定义的破碎指标 B_E 为

$$B_E = S/S_g. \quad (2)$$

郭万里^[28]认为采用 B_E 衡量颗粒破碎量时, 首先需要通过额外的试验确定极限级配曲线, 而且该试验

需要高应力状态下进行, 难度较大。所以, 郭万里^[28]在式 (2) 的基础上, 将 S_g 换成初始级配曲线与最大粒径线及横坐标轴围成的面积, 从而得到了新的颗粒破碎指标 B_W 。

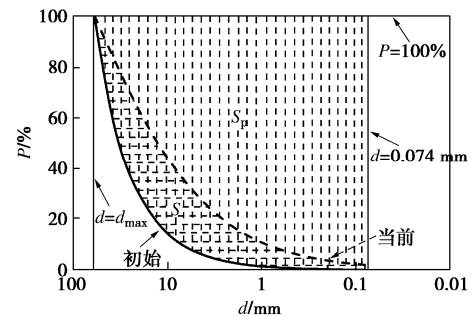


图 1 Hardin 破碎指标定义

Fig. 1 Definition of particle breakage index of Hardin

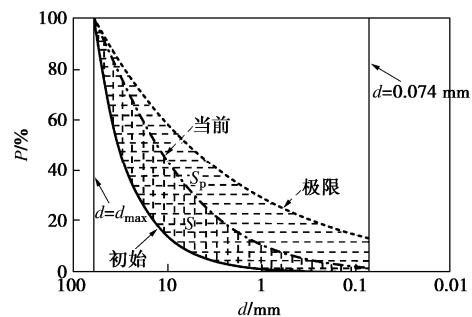


图 2 Einav 破碎指标定义

Fig. 2 Definition of particle breakage index of Einav

上述几个破碎指标中, 只有 B_W 的理论变化范围是 0 到无穷大, 其它的范围均为 0~1。颗粒破碎指标的变化区间为 0~1, 当指标值为 0 时, 粗粒料还未发生颗粒破碎, 当指标值为 1 时, 粗粒料的颗粒破碎程度达到最大。这样从指标的数值上就可以看出颗粒破碎发生的程度。因此, B_W 不适合用来对比评价颗粒破碎发生的程度。

虽然 B_g 和 B_r 的理论范围均为 0~1, 但是, 从式 (1) 和图 1 中可以看出, 当粗粒料的颗粒破碎程度达到最大时, B_g 和 B_r 的值都不可能是 1, 因此用它们衡量颗粒破碎发生的程度不够准确。此外, 极限级配是粗粒料的重要物理特性之一, 与其颗粒破碎相关联^[29-30]。因此, 粗粒料的颗粒破碎指标定义应基于极限级配的基础之上。

破碎指标 B_E 是基于极限级配定义的, 其实际范围为 0~1。相对于其它破碎指标, B_E 最适合用来评价粗粒料颗粒破碎发生的程度。而且, 已有研究表明^[8, 29-30], 对于不同初始级配的粗粒料, 其极限级配均趋近于分形维数为 2.7 的级配。也就是说, 采用 B_E 衡量颗粒破碎量无需通过额外的试验确定极限级配。所以, 本文采用 B_E 作为衡量粗粒料颗粒破碎量的指标。

1.2 颗粒破碎指标的计算

毫无疑问, 颗粒破碎指标定义的合理性是准确研

究粗粒料颗粒破碎规律的基础,颗粒破碎指标的精确计算是准确研究粗粒料颗粒破碎规律的保证。孙逸飞等^[1]、Einav^[19]和 Xiao 等^[8, 30]均采用分形级配方程进行破碎指标 B_E 的计算,但是分形级配方程对于不少粗粒料级配不能很好地描述,尤其是对反 S 形级配曲线^[31-33]。也就是说,某些情况下计算出的 B_E 不够准确。为此,本文采用朱俊高等^[31]提出的适用于连续级配土的级配方程,

$$P = \frac{d^m}{(1-b)d_{\max}^m + bd^m} \times 100\% \quad , \quad (3)$$

式中, b, m 为级配参数。

为了验证式 (3) 的适用性,利用式 (3) 对实际工程中一些粗粒料的级配曲线^[32]进行了拟合,如图 3 所示。从图 3 可以看出,与分形级配方程相比,式 (3) 对于粗粒料的级配适用性更好,其拟合的级配曲线与实际级配曲线较为吻合。因此,用式 (3) 代替分形级配方程进行破碎指标 B_E 的计算,保证了其准确性。

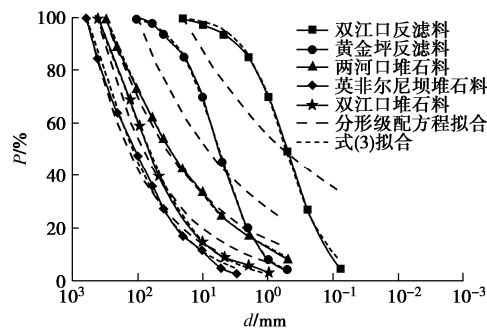


图 3 式 (3) 的适用性验证

Fig. 3 Verification of applicability of Eq. (3)

为了求得 S_g 和 S , 首先引入级配曲线面积的概念。级配曲线面积为级配曲线与横坐标轴、最大粒径线和 $d=0.074\text{ mm}$ 线围成的面积,如图 4 所示。将极限级配曲线面积、当前级配曲线面积和初始级配曲线面积分别表示为 S_j, S_d 和 S_c , 根据图 2, S_g, S 和 B_E 可以利用下式进行求解:

$$\left. \begin{aligned} S_g &= S_j - S_c \quad , \\ B_E &= \frac{S_d - S_c}{S_j - S_c} \quad , \\ S &= S_d - S_c \quad . \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

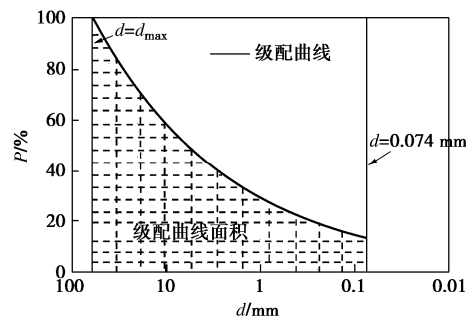


图 4 级配曲线面积 S

Fig. 4 Area of gradation curve

根据级配方程式 (3), 可以推出级配曲线面积 S 的计算公式,

$$S = \frac{\ln(1-kb) - \ln(1-b)}{mb \ln 10} \quad , \quad (5)$$

式中,

$$k = \frac{1}{(1-b)(d_{\max}/d)^m + b} \quad . \quad (6)$$

当 $b=0$ 时, 式 (3) 与分形级配方程相同, 式 (5) 可表示为

$$S = \frac{1-k}{m \ln 10} \quad . \quad (7)$$

综上所述, 利用级配方程式 (3) 可以计算出破碎指标 B_E 的值。

2 颗粒破碎规律

Jia 等^[27]通过大型三轴固结排水剪切试验,研究了堆石料在剪切过程中的颗粒破碎变化规律,指出颗粒破碎率与应力和应变两者有关,但是,究竟是何种关系并未给出。

为研究三轴剪切过程中粗粒料的颗粒破碎变化规律,得到破碎指标 B_E 与应力和应变之间的关系,重新整理了文献[27]中粗粒料 A 的颗粒破碎试验数据,其中最大颗粒粒径为 60 mm,并计算出不同应力和应变下的破碎指标 B_E , 结果如表 1 所示。

表 1 三轴剪切过程中的颗粒破碎试验数据

Table 1 Test data of particle breakage during triaxial shearing			
围压/kPa	剪应变 ε_s /%	平均正应力 p /kPa	B_E /%
0	0	0	0
500	1.87	1242	8.7
500	4.56	1422	11.1
500	8.44	1494	15.0
500	12.49	1469	15.3
500	16.01	1420	14.0
1000	1.75	2046	9.9
1000	4.60	2343	13.9
1000	7.20	2552	18.2
1000	10.66	2534	15.1
1000	15.19	2621	23.4
1500	1.90	2760	11.2
1500	7.34	3504	21.9
1500	9.31	3596	22.2
1500	12.47	3543	25.6
1500	14.35	3602	27.6
2000	1.85	3336	10.9
2000	4.55	4064	17.7
2000	7.26	4484	22.0
2000	10.75	4653	26.7
2000	13.76	4619	29.8

通过分析 B_E 与剪应变和平均正应力的关系, 发现平均正应力和剪应变对 B_E 的影响可用下式定量描述:

$$B_E = a \arctan(\lambda \varepsilon_s) \exp(b p / p_a) \quad , \quad (8)$$

式中, a , b 和 λ 为拟合参数。

利用式 (8) 对表 1 的试验数据进行拟合, $a=0.0891$, $b=0.0182$, $\lambda=40.1$, $R^2=0.928$, 平均相对误差=9.5%。

从中可以看出, 平均相对误差为 9.5%, 决定系数在 0.9 以上, 拟合效果较好。为进一步展示式 (8) 的拟合效果, 给出了三轴剪切过程中破碎指标 B_E 的拟合值与实测值的对比图, 如图 5 所示。

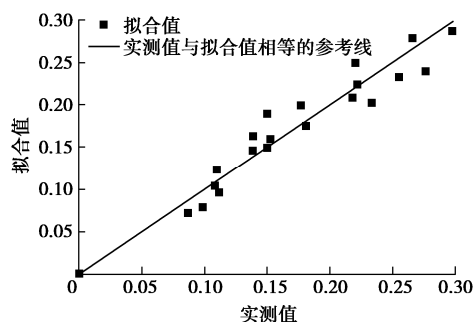


图 5 B_E 的实测值与拟合值

Fig. 5 Measured and fitting data of B_E

3 验 证

式 (8) 虽然描述了破碎指标 B_E 与剪应变和平均正应力之间的定量关系, 但是, 式 (8) 只是根据一组堆石料的试验结果得出, 其适用性还需更多的试验数据进行验证。所以, 笔者又整理了另一种粗粒料 B 在三轴剪切过程中的颗粒破碎试验数据^[28], 其中最大颗粒粒径为 20 mm, 结果如表 2 所示。

表 2 粗粒料 B 的颗粒破碎试验数据

Table 2 Test data of particle breakage of coarse-grained soil B			
围压/kPa	剪应变 ε_s /%	平均正应力 p /kPa	B_E /%
0	0	0	0
200	4.41	570	10.6
200	9.95	580	14.4
200	13.40	560	15.6
500	3.37	1140	11.6
500	7.53	1300	18.7
500	14.30	1320	23.1
1000	2.60	1800	12.2
1000	8.56	2370	26.0
1000	15.20	2480	32.1
1500	1.63	2160	13.2
1500	5.34	3010	30.2
1500	16.30	3570	41.4

利用式 (8) 拟合三轴固结排水剪切过程中堆石料 B 的颗粒破碎试验数据, 结果如图 6 所示。其中, 平

均相对误差为 7.5%, 决定系数为 0.981, B_E 的拟合值与实测值较为吻合。可见, 式 (8) 适用于不同性质的粗粒料。

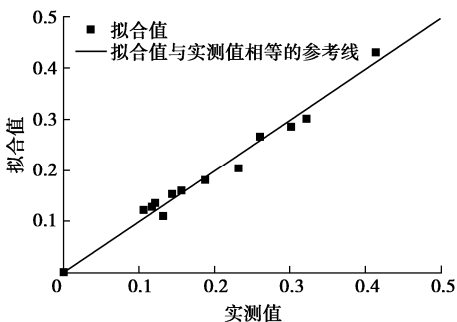


图 6 堆石料 B 破碎指标的实测值与拟合值

Fig. 6 Measured and fitting data of breakage index of coarse-grained soil B

4 结 论

本文首先探讨了如何合理定义和精确计算颗粒破碎指标, 在此基础上, 基于三轴固结排水剪切过程中粗粒料的颗粒破碎试验数据, 研究了剪应变和平均正应力对粗粒料颗粒破碎的影响, 得到如下 3 点结论。

(1) 在目前的颗粒破碎指标中, Einav 提出的破碎指标 B_E 不仅考虑了颗粒破碎前后级配整体的变化, 而且在破碎过程中可以从 0 变化到 1, 最适合用来评价比较粗粒料的破碎程度。

(2) 相对于分形级配方程, 连续级配土的级配方程可以更加精确地描述粗粒料的级配曲线。基于连续级配土的级配方程计算破碎指标 B_E , 保证了其准确性。

(3) 建立了描述颗粒破碎指标 B_E 与剪应变及平均正应力之间关系的数学模型, 可较好地描述三轴剪切过程中粗粒料的颗粒破碎变化规律。

参考文献:

[1] 孙逸飞, 刘汉龙, 杨 贵. 考虑颗粒破碎引起级配演变的粗粒料屈服函数研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3479 - 3484. (SUN Yi-fei, LIU Han-long, YANG Gui. Yielding function for coarse aggregates considering gradation evolution induced by particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3479 - 3484. (in Chinese))

[2] XU M, SONG E X, CHEN J F. A large triaxial investigation of the stress-path-dependent behavior of compacted rockfill[J]. Acta Geotechnica, 2012, 7(3): 167 - 175.

[3] ALONSO E E, TAPIAS M, GILI J. Scale effects in rockfill behaviour[J]. Geotechnical Letters, 2012, 3: 155 - 160.

[4] 贾宇峰, 迟世春, 林 皋. 考虑颗粒破碎影响的粗粒土本

- 构模型[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3261 - 3267. (JIA Yu-feng, CHI Shi-chun, LIN Gao. Constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3261 - 3267. (in Chinese))
- [5] GUO W L, CAI Z Y, WU Y L, et al. Estimations of three characteristic stress ratios for rockfill material considering particle breakage[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2019, **32**(2): 215 - 229.
- [6] TAPIAS M, ALONSO E E, GILI J. A particle model for rockfill behavior[J]. Géotechnique, 2015, **65**(12): 975 - 994.
- [7] XIAO Y, LIU H L. Elastoplastic constitutive model for rockfill materials considering particle breakage[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(1): 04016041.
- [8] XIAO Y, LIU H L, DING X M, et al. Influence of particle breakage on critical state line of rockfill material[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, **16**(1): 04015031.
- [9] 武颖利, 皇甫泽华, 郭万里, 等. 考虑颗粒破碎影响的粗粒土临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 2): 25 - 28. (WU Ying-li, HUANGFU Ze-hua, GUO Wan-li, et al. Influences of particle breakage on critical state of coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S2): 25 - 28. (in Chinese))
- [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] 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.
- [12] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎的粗粒土剪胀统一本构模型[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))
- [13] 米占宽, 李国英, 陈生水. 基于破碎能耗的粗颗粒料本构模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 1801 - 1811. (MI Zhan-kuan, LI Guo-ying, CHEN Sheng-shui. Constitutive model for coarse granular materials based on breakage energy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 1801 - 1811. (in Chinese))
- [14] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(4): 309 - 316.
- [15] LEE K L, FARHOOHAND L. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1976, **4**(1): 68 - 86.
- [16] GUO W L, HUANG Y H, ANDY F, et al. Mathematical model revealing the evolution of particle breakage and particle-size distribution for rockfill during triaxial shearing[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering. DOI: 10.1080/19648189.2018.1552898.
- [17] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill materials[J]. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [18] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [19] EINAV I. Breakage mechanics-part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, **55**(6): 1274 - 1297.
- [20] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, **54**(3): 157 - 163.
- [21] 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, **46**(9): 3446 - 3453. (CHEN Liu-fen, GAO Zhuang-ping, ZHU Jun-gao, et al. Gradation of coarse grained soil and fractal geometry character of particle breakage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, **46**(9): 3446 - 3453. (in Chinese))
- [22] 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 Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao, et al. Experimental study of particle breakage of Zipingpu rockfill material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(1): 35 - 40. (in Chinese))
- [23] 田海, 孔令伟, 赵翀. 基于粒度熵概念的贝壳砂颗粒破碎特性描述[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(6): 1152 - 1159. (TIAN Hai, KONG Ling-wei, ZHAO Chong. Characterization of particle breakage with grading entropy on shell sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 1152 - 1159. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 蔡正银, 李小梅, 关云飞, 等. 堆石料的颗粒破碎规律研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(5): 923 - 929. (CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, GUAN Yun-fei, et al. Particle breakage rules of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(5): 923 - 929. (in Chinese))
- [26] 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 Ji-ru, ZHANG Bi-wen, HU Yong, et al. Predicting the particle breakage of granular geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(9): 1898 - 1905. (in Chinese))
- [27] 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, 2017, **17**(10): 04017085.
- [28] 郭万里. 粗粒土颗粒破碎演化规律及本构模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2018. (GUO Wan-li. Study on the Particle Breakage Evolution and Constitutive Model of Coarse-Grained Soils[D]. Nanjing: Hohai University, 2018. (in Chinese))
- [29] YANGZ Y, JUO J L. Interpretation of sieve analysis data using the box-counting method for gravelly cobbles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(6): 1201 - 1212.
- [30] XIAO Y, LIU H L, YANG G, et al. A constitutive model for the state-dependent behaviors of rockfill material considering particle breakage[J]. Science China Technological Science, 2014, **57**(8): 1636 - 1646.
- [31] 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 Jun-gao, GUO Wan-li, WANG Yuan-long, et al. Equation for soil gradation curve and its applicability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(10): 1931 - 1936. (in Chinese))
- [32] 吴二鲁, 朱俊高, 王龙, 等. 粗粒料的单参数级配方程及其适用性研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(3): 1 - 6. (WU Er-lu, ZHU Jun-gao, WANG Long, et al. Gradation equation with a parameter of coarse-grained soil and its applicability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(3): 1 - 6. (in Chinese))
- [33] ZHU J G, GUO W L, WEN Y F, et al. New gradation equation and applicability for particle-size distributions of various soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(2): 04017155.

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司