

堆石料三维形状量化及其对颗粒破碎的影响

邹德高¹, 田继荣¹, 刘京茂^{1,2}, 周晨光¹, 宁凡伟¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部水利工程学院 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 筑坝堆石料由于尺寸较大, 必须对其按一定比例缩尺后才能用来开展室内三轴试验。但缩尺前后颗粒形状难免会有差异, 如何评价颗粒形状变化对堆石料变形特性的影响是十分重要的。引入了高精度的三维激光扫描技术对紫坪铺面板坝筑坝堆石料 2.5~5、5~10、10~20 mm 以及 20~40 mm 4 个粒径组的颗粒进行了空间形状分析, 在此基础上进一步开展了单一粒组的三轴试验, 研究了 4 个粒组的颗粒形状指标与颗粒破碎率的相关性。试验表明, 紫坪铺堆石料颗粒破碎率随着其平均球度的增加而减小, 并且呈近似半对数线性关系; 随着围压的增加, 颗粒形状对颗粒破碎的影响逐渐减弱, 颗粒强度的影响逐渐增大。紫坪铺堆石料的颗粒强度随着颗粒尺寸的增加逐渐减小, 但其破碎率反而随着颗粒尺寸的增加而逐渐减小, 主要是因为试验所采用的紫坪铺堆石料颗粒尺寸越小时, 其形状越不规则。因此, 研究缩尺效应对颗粒破碎率的影响时, 要同时考虑颗粒尺寸和颗粒形状。

关 键 词: 堆石料; 颗粒形状; 三维扫描技术; 形状指标; 颗粒破碎

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 10-3525-06

Three-dimensional shape of rockfill material and its influence on particle breakage

ZOU De-gao¹, TIAN Ji-rong¹, LIU Jing-mao^{1,2}, ZHOU Chen-guang¹, NING Fan-wei¹

(1. Institute of Earthquake Engineering, School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian, Liaoning 116024, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,

Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Due to the large size of rockfill, it must be scaled by a certain percentage so that it can be used to carry out laboratorial triaxial test. However, the particle shape of rockfill may be different before and after scaling. Therefore, it is important to evaluate the effect of particle shape on the deformation behavior of rockfill material. In this study, a high-precision 3D laser scanning technology was introduced to analyze the spatial shape of the rockfill particles with the sizes of 2.5-5 mm, 5-10 mm, 10-20 mm and 20-40 mm of Zipingpu concrete face rockfill dam. Further, triaxial tests were carried out to determine the correlation between particle shape index and particle breakage. The results show that there exists an approximate semi-logarithmic linear relationship between the particle breakage and the particle sphericity for Zipingpu rockfill. With the increase of confining pressure, the effect of particle shape on particle breakage decreases and the effect of particle strength on particle breakage increases. The particle strength of Zipingpu rockfill gradually decreases with the increase of the particle size, but the particle breakage decreases with the increase of the particle size, which may be due to that the particle shape of Zipingpu rockfill become more and more irregular with the decrease of particle size. Therefore, the impact of the particle shape on the particle breakage should be paid enough attention before and after scaling.

Keywords: rockfill materials; particle shape; 3D laser scanning technology; shape index; particle breakage

1 引 言

堆石料由于具有压实性好、强度高、透水性强、

易于就地取材等特点, 被广泛应用于土石坝、道路、港口等大型建设工程。与砂土在低围压时破碎较少不同^[1], 堆石料在围压较低时就会产生较大的破碎

收稿日期: 2017-04-26

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2017YFC0404902); 国家自然科学基金(No. 51779034, No. 51608095, No.51678113); 中央高校基本科研业务费资助(No. DUT17ZD219)。

This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0404902), the National Natural Science Foundation of China (51779034, 51608095, 51678113) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT17ZD219).

第一作者简介: 邹德高, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高土石坝和核电厂工程抗震等方面的研究。E-mail: zoudegao@dlut.edu.cn

量,颗粒破碎显著影响着堆石料的强度、变形等特性^[2],因此,受到国内外学者的普遍关注。但已有成果主要关注颗粒破碎指标量化及其影响因素^[3-5],对堆石料颗粒形状量化及其对颗粒破碎影响的定量研究并不多见。常晓林等^[6]尝试采用数值方法模拟颗粒形状对散体材料力学性质的影响,但局限于对颗粒形状的简化描述,一般将颗粒抽象为多面体,通过控制外接椭球的长短轴之比来生成不同形状的随机多面体,以尽可能地达到反映颗粒真实形态的目的。

为了揭示堆石料颗粒形状对其颗粒破碎的影响,国外学者针对颗粒形状的量化及其分布规律开展了一些研究工作^[7-13]。但由于试验设备和测量手段的限制,目前关于堆石料颗粒形状的量化研究(如傅里叶级数法、分形理论法等)仍主要局限在二维平面层面。二维指标主要是通过颗粒单个截面的几何信息来获取的,有较大的局限性和主观性。研究表明^[14-15],三维指标更能精确描述颗粒的形状特征,二维平面指标会低估颗粒的球度。

针对以往研究的不足,本文引入三维激光扫描技术对紫坪铺面板坝筑坝堆石料 2.5~5、5~10、10~20 mm 以及 20~40 mm 4 个粒组的堆石料进行颗粒形状和颗粒强度研究。在此基础上开展单一粒组三轴剪切试验,研究颗粒形状指标与颗粒破碎率的相关性,以期从细观颗粒形状角度揭示粒组尺寸效应机制提供了一定的参考依据。

2 堆石料颗粒形状及单粒强度试验

2.1 试验材料

试验材料是在汶川地震后取自紫坪铺面板坝筑坝料场的主堆石料,岩性为灰岩,矿物成分以方解石为主,岩石相对密度为 2.72。试验之前首先将堆石料进行筛分,并且清洗风干。颗粒特性的尺寸效应(如单粒形状、单粒强度等)是研究粒组尺寸效应的基本要素^[16]。本文着重对紫坪铺筑坝堆石料 2.5~5、5~10、10~20 mm 以及 20~40 mm 4 个粒径组的颗粒形状及分布规律进行了研究,同时分析了单粒强度随颗粒尺寸的变化规律。

2.2 堆石料颗粒形状试验

三维扫描技术主要应用于汽车零部件制造、飞机船舶制造、变形监测、3D 打印等领域,具有高效率、高精度、数字化、自动化等独特优势。本文引入了高精度三维激光扫描技术分别对紫坪铺筑坝堆石料 2.5~5、5~10、10~20 mm 以及 20~40 mm 4 个粒径组各 100 个颗粒样本进行了三维扫描,并采用全

自动拼接技术得到了颗粒的三维数字图像。三维典型图像如图 1 所示。

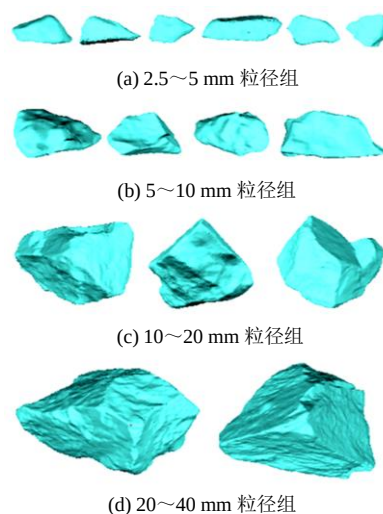


图 1 三维激光扫描设备获取的颗粒三维图像
Fig.1 3D particle shape of rockfill materials obtained by three-dimensional laser scanning equipment

根据扫描得到的堆石料颗粒三维数字图像,计算出每个颗粒 3 个正交方向的长度,即颗粒的长轴长度 L 、中轴长度 I 和短轴长度 S 。然后采用如下 4 个常用的参数描述颗粒形状的差异。①延伸率 α : 即颗粒的长轴 L 与短轴 S 之比, $\alpha = L/S$; ②扁平度 e ^[17]: 即颗粒的短轴 S 与中长轴 I 之比, $e = S/I$; ③球度 ψ ^[18]: 将颗粒近似看作是一个具有 3 个直径的三轴椭球, $\psi = \sqrt[3]{(I \times S) / L^2}$; ④形状因子 SF ^[19]: 将两种扁平率 S/L 和 S/I 相乘进行开方计算,即: $SF = S / \sqrt{L \times I}$ 。测得的紫坪铺堆石料 4 个粒组的颗粒形状指标如表 1 所示:

对于标准球体,4 种参数值均为 1。从表 1 可以看出,本文选取的 4 个粒组的堆石料颗粒各项参数与标准球体均有一定的差距,其中球度的标准方差最小。比较 4 个粒组颗粒各项参数的统计平均值,可以看到,紫坪铺筑坝堆石料随着颗粒粒径的减小,颗粒越来越趋于狭长、扁平,颗粒的平均球度和形状因子逐渐降低,颗粒形状越来越不规则。图 2、3 分别为 4 个粒组颗粒的球度和形状因子指标频率分布曲线,可以明显的看到,试验采用的堆石料颗粒尺寸越大,颗粒形状趋于球体的概率越高。

2.3 堆石料单粒强度试验

对 4 个粒组的堆石颗粒进行了单粒颗粒强度研究,试验方法与文献^[20]一致。Jaeger^[21]研究表明,点荷载下颗粒的强度为

$$\sigma_f = F_f / d_0^2 \quad (1)$$

表 1 堆石料各粒组颗粒形状参数统计表
Table 1 Statistics of particle shape parameters

粒组 /mm	参数	统计量			
		最大值	平均值	最小值	标准方差
2.5~5	延伸率	6.451	3.236	1.758	0.981
	扁平度	0.856	0.545	0.227	0.155
	球度	0.739	0.589	0.439	0.072
	形状因子	0.676	0.426	0.188	0.116
5~10	延伸率	5.047	2.880	1.478	0.821
	扁平度	0.924	0.568	0.248	0.168
	球度	0.824	0.626	0.447	0.074
	形状因子	0.745	0.459	0.240	0.124
10~20	延伸率	6.678	2.716	1.557	0.991
	扁平度	0.942	0.580	0.222	0.167
	球度	0.823	0.655	0.466	0.086
	形状因子	0.746	0.485	0.182	0.133
20~40	延伸率	4.400	2.261	1.409	0.676
	扁平度	0.955	0.629	0.291	0.145
	球度	0.866	0.708	0.504	0.089
	形状因子	0.747	0.545	0.257	0.120

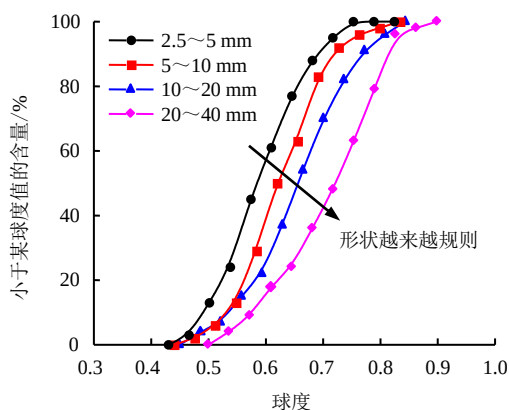


图 2 紫坪铺堆石料球度指标频率曲线

Fig.2 Frequency curves of the sphericity index of Zipingpu rockfill materials

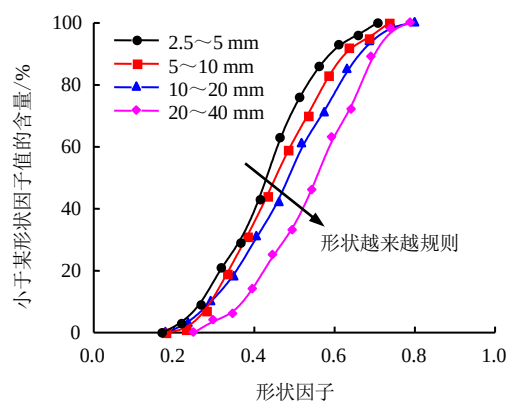


图 3 紫坪铺堆石料形状因子指标频率曲线

Fig.3 Frequency curves of the shape factor index of Zipingpu rockfill materials

式中： F_f 为峰值荷载； d_0 为颗粒的初始粒径； σ_f 为颗粒破坏时的强度。

图 4 为紫坪铺堆石料颗粒强度与粒径的关系。

从图中可知，颗粒初始粒径越大，强度越低。这是因为颗粒尺寸越大，其存在裂隙的数目与长度越大，越容易发生破坏^[20, 22]。值得注意的是，由于单粒强度测试时颗粒在自重下呈自稳定状态，无法准确保证颗粒走向与压缩方向的固定关系，因此，目前的颗粒强度试验仅能反映二维平面内的颗粒强度。

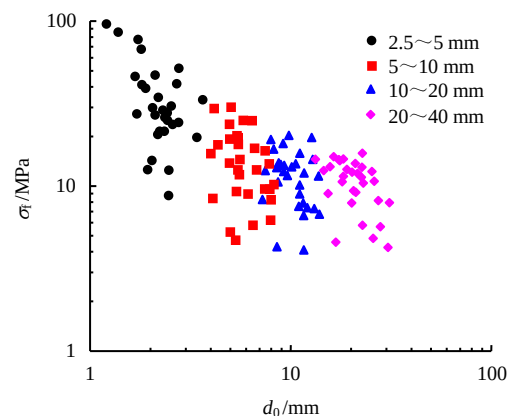


图 4 颗粒强度与初始粒径关系图

Fig.4 Relationships between particle strength and initial particle size of rockfill materials

3 堆石料单粒组颗粒破碎三轴试验

为了探求堆石料的细观颗粒形状和单粒强度与宏观颗粒破碎指标之间的联系，本文开展了单粒组三轴静力试验。试验仪器是大连理工大学自行研制的高精度液压伺服静、动两用中型三轴仪（试样直径为 200 mm，高为 500 mm）。该仪器采用与试样直接接触的内置力传感器^[23]，可以有效地减小由于传力轴摩擦而引起的测量误差。试验材料与前文中的颗粒形状及单粒强度试验一致。试验采用控制干密度成样^[24]，4 个粒径组试样的制样干密度均为 1.585 g/cm³，孔隙比为 0.716。试样制备采用分层振捣法，共分 5 层，每层 10 cm。为了减小试样端部约束引起的测量误差，试验之前在透水板上涂抹凡士林。每组试样分别在 100、300、500 kPa 围压下固结，然后采用位移控制进行剪切，轴向应变速率为 0.1%/min，剪切至轴向应变 20%停机。

将试验后的试样风干进行颗粒筛分，研究了单一粒径条件下的颗粒破碎规律。由于控制密度较小、制样击实较轻，筛分表明装样前后颗粒级配差别较小，故装样引起的颗粒破碎可以忽略。图 5 中给出了紫坪铺堆石料三轴剪切试验后 10~20 mm 粒径

组颗粒级配的典型变化。从图中可以看出,随着围压的增大,级配曲线逐渐上抬,细颗粒的含量逐渐增多,对应的颗粒破碎量逐渐增大。

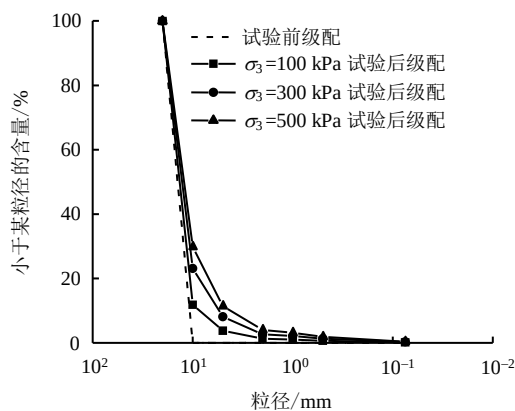


图5 10~20 mm 粒组试验前后颗粒级配的典型变化
Fig.5 Typical particle size distributions of rockfill materials with particle sizes of 10-20 mm before and after triaxial test

目前常用的量化颗粒破碎大小的指标主要有 Marsal^[3]提出的马萨尔破碎率 B_m 和 Hardin^[5]提出的相对破碎率 B_r 。本文采用 B_r 作为量化颗粒破碎的指标,具体表述为

$$B_r = B_t / B_p \quad (2)$$

式中: B_t 为破碎总量,表示为试验前后级配曲线与截止粒径 0.074 mm 之间的闭合区域面积; B_p 为试验级配的颗粒破碎势,表示为试验级配曲线、100% 含量线及截止粒径 0.074 mm 围成的闭合区域面积。

图 6 为 4 个粒组的堆石料的颗粒破碎率与围压的关系曲线。从图中可知,相同围压条件下,紫坪铺筑坝堆石料的颗粒破碎率随着颗粒粒径的增加依次减小。然而,前文单粒强度试验表明,堆石料的颗粒尺寸越大,强度越低,一般认为大尺寸粒组的颗粒破碎率应该越高。说明对于紫坪铺筑坝堆石料,单独采用单粒颗粒强度无法反映粒组颗粒破碎的变化规律,不同尺寸粒组的颗粒破碎差异不仅取决于单粒强度。前文颗粒形状测试结果表明,本文采用的筑坝堆石料随着颗粒粒径的减小,颗粒形状越来越不规则,因此,越容易由于应力集中而发生失稳破坏。因此,在评价堆石料颗粒破碎率的时候还应该考虑颗粒形状的影响。

图 7 给出了紫坪铺堆石料颗粒破碎率 B_r 与平均球度指标 ψ_0 的关系。可以看出,试验数据在 ψ_0 - $\lg B_r$ 空间近似呈线性关系。

$$\lg B_r = k\psi_0 \quad (3)$$

式中: k 为斜率参数,其大小反映了颗粒破碎率 B_r 受颗粒平均球度 ψ_0 的影响程度。当堆石料颗粒的平均球度 $\psi_0=0$ 时,颗粒的形状极度不规则,理想状态下颗粒破碎率 $B_r=100\%$; 当平均球度 $\psi_0=1$ 时,即颗粒均为球体,此时颗粒间接触力仅与围压水平有关(同一排列的理想状态下),围压越大,颗粒间接触力越大,发生颗粒破碎的几率越大。

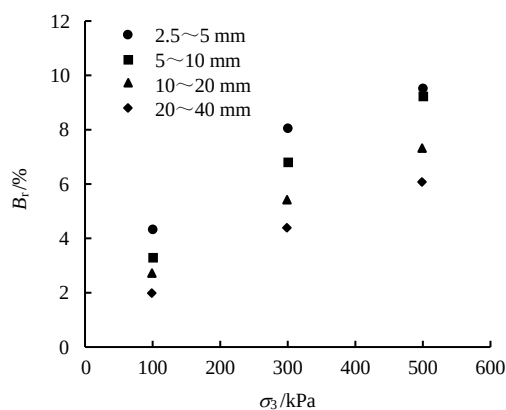


图6 颗粒破碎指标 B_r 与围压 σ_3 的关系
Fig.6 Relationships between particle breakage index B_r and confining pressure σ_3 of rockfill materials

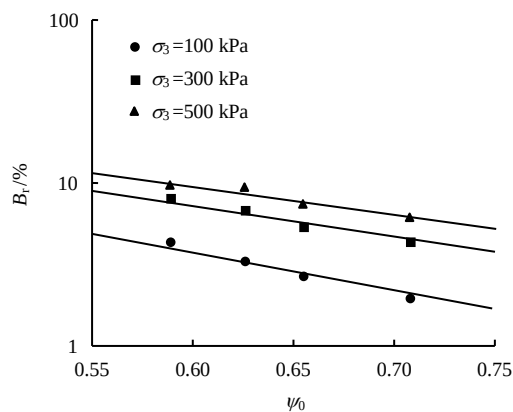


图7 颗粒破碎指标 B_r 与平均球度指标 ψ_0 的关系
Fig.7 Relationships between particle breakage index B_r and average sphericity index ψ_0 of rockfill materials

表 2 为根据式(1)求得的不同围压下的颗粒破碎率 B_r 与颗粒的平均球度 ψ_0 之间的线性拟合结果。比较图 7 中 3 条直线的斜率与围压的关系可知,围压越小,直线的斜率越大,颗粒破碎率 B_r 受颗粒平均球度 ψ_0 的影响越明显。这是因为在低围压条件下,堆石颗粒由于单粒强度因素导致的颗粒破碎相对较弱导致的。随着围压的增加,单粒强度对颗粒

破碎的影响逐渐显著，而颗粒形状的影响则逐渐减弱。

表 2 堆石料 $\lg B_r - \psi_0$ 直线方程参数统计表
Table 2 Parameter statistics for $\lg B_r - \psi_0$ linear equation

围压/kPa	k	R^2
100	-2.388	0.999
300	-1.909	0.999
500	-1.710	0.998

4 结 论

本文对紫坪铺筑坝堆石料 2.5~5、5~10、10~20 mm 及 20~40 mm 4 个粒径组进行了颗粒形状和强度分析，并在此基础上开展了单一粒组三轴试验，研究了紫坪铺筑坝堆石料颗粒形状指标与颗粒破碎指标的相关性，研究结果为从细观颗粒形状角度揭示粒组尺寸效应的机制提供了一定的依据。主要结论有：

(1) 试验采用的紫坪铺筑坝堆石料的颗粒形状表现出明显的尺寸效应，颗粒尺寸越小，颗粒的平均球度越小，形状越不规则。

(2) 堆石料的颗粒破碎率 B_r 随着颗粒的平均球度 ψ_0 的增加而减小，并在半对数坐标中近似呈线性关系。围压越小，颗粒破碎率 B_r 受颗粒平均球度 ψ_0 的影响越明显。

(3) 紫坪铺堆石料颗粒破碎率随颗粒尺寸的增加而逐渐减小是由颗粒形状导致的，颗粒形状越差，越容易由于应力集中而发生失稳破坏。

本文仅研究了紫坪铺筑坝堆石料 2.5~5、5~10、10~20 mm 及 20~40 mm 4 个粒径组的细观颗粒形状以及宏观颗粒破碎特性，不同岩性以及更大粒径组的堆石料的形状特征及其对颗粒破碎指标的影响规律有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 日本土质工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹译. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
Japan Geotechnical Society. Field compaction of coarse material[M]. Translated by GUO Xi-ling, WEN Dan. Beijing: China Water and Power Press, 1999.
- [2] 郭熙灵, 胡辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 83—88.
GUO Xi-ling, HU Hui, BAO Cheng-gang. Experimental studies of the effects of grain breakage on the dilatancy and shear strength of rockfill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(3): 83—88.
- [3] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York: Wiley, 1973: 109—200.
- [4] 傅华, 凌华, 蔡正银, 等. 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—78.
FU Hua, LIN Hua, CAI Zheng-yin, et al. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(1): 75—78.
- [5] HARDIN C S. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1985, 111(10): 1177—1192.
- [6] 常晓林, 马刚, 周伟, 等. 颗粒形状及粒间摩擦角对堆石体宏观力学行为的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 647—652.
CHANG Xiao-lin, MA Gang, ZHOU Wei, et al. Influences of particle shape and inter-particle friction angle on macroscopic response of rockfill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 647—652.
- [7] VALLEJO L E. Fractal analysis of granular materials[J]. *Geotechnique*, 1995, 45(8): 371A.
- [8] KUO C Y, FROST J, LAI J, et al. Three-dimensional image analysis of aggregate particles from orthogonal projections[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996, 1526(1): 98—103.
- [9] RAO C, TUTUMLUER E, KIM I T. Quantification of coarse aggregate angularity based on image analysis[J]. *Transportation Research Record*, 2002, 1787(1): 117—124.
- [10] MASAD E. The development of a computer controlled image analysis system for measuring aggregate shape properties[R]. Washington, DC: Transportation Research Board, 2003.
- [11] WANG L, WANG X, MOHAMMAD L, et al. Unified method to quantify aggregate shape angularity and texture using Fourier analysis[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005, 17(5): 498—504.
- [12] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands[J]. *Journal of Geotechnical*

- and **Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(5): 591—602.
- [13] AL-ROUSAN T, MASAD E, TUTUMLUER E, et al. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics[J]. **Construction and Building Materials**, 2007, 21(5): 978—990.
- [14] SUN Y, INDRARATNA B, NIMBALKAR S. Three-dimensional characterisation of particle size and shape for ballast[J]. **Géotechnique Letters**, 2014, (4): 197—202.
- [15] ALSHIBLI K A, DRUCKREY A M, AL-RAOUSH R I, et al. Quantifying morphology of sands using 3D imaging[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2014, 27(10): 04014275.
- [16] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高. 堆石料尺寸效应研究面临的问题及多尺度三轴试验平台[J]. **岩土工程学报**, 2016, 38(11): 1942—1945.
- KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao. Scale effect of rockfill and multiple-scale triaxial test platform[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(11): 1942—1945.
- [17] SNEED E D, FOLK R L. Pebbles in the lower Colorado River, Texas a study in particle morphogenesis[J]. **The Journal of Geology**, 1958, 66(2): 114—150.
- [18] KRUMBEIN W C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles[J]. **Journal of Sedimentary Research**, 1941, 11(2): 64—72.
- [19] CORMAC A T. Influence of shape on fall velocity of sand grains[D]. Fort Collins: Colorado State College of Agriculture and Mechanic Arts, 1970.
- [20] NAKATA Y, KATO Y, HYODO M, et al. One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength[J]. **Soils and Foundations**, 2001, 41(2): 39—51.
- [21] JAEGER J C. Failure of rocks under tensile conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1967, 4(2): 219—227.
- [22] FROSSARD E, HU W, DANO C, et al. Rockfill shear strength evaluation: A rational method based on size effects[J]. **Géotechnique**, 2012, 62(5): 415—427.
- [23] 孔宪京, 贾革续, 邹德高, 等. 微小应变下堆石料的变形特性[J]. **岩土工程学报**, 2001, 23(1): 32—37.
- KONG Xian-jing, JIA Ge-xu, ZOU De-gao, et al. Deformation characteristics of rockfill at small strains[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 32—37.
- [24] 南京水利科学研究所. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water and Power Press, 1999.

海砂土力学特性及其在路基工程中的应用

著者: 金明东, 李淑娥, 徐永福, 小 16 开, 平膜, 250 页, 定价: 62 元, 出版单位: 中国建筑工业出版社, 版次: 第 1 版, 出版时间: 2018-09, 标准书号: ISBN 978-7-112-20096-2, 征订号: 29559。

内容简介: 本书是作者多年的科研和教学研究总结, 书中既有作者的研究成果, 也有作者对于研究对象所提出的疑问和相应的解决方法, 为研究对象在工程中的实际应用提出了坚强的理论支撑。

全书共有 10 章内容, 第 1 章 海砂利用的意义和问题; 第 2 章 海砂的土力学特性; 第 3 章 海砂的动力学特性; 第 4 章 海砂的溶陷性; 第 5 章 固化海砂的强度特性; 第 6 章 海砂路基的填筑技术; 第 7 章 海砂路基的液化病害及其防治措施; 第 8 章 海砂路基冲刷病害及其防治措施; 第 9 章 海砂中盐离子迁移过程模拟; 第 10 章 海砂中混凝土的防腐措施。

读者对象: 本书适合广大岩土专业的工程技术人员、科研人员和相关专业的师生阅读参考。

(摘自 中国建筑书店)