

堆石料形状系数分析

杨 杰

(南京水利科学研究院,江苏 南京 210029)

摘要:堆石料是堆石坝坝体的主体材料,其颗粒形状作为影响堆石料颗粒破碎和密实程度的一个重要因素,与堆石料的应力变形特性有直接关系,进而影响坝体的整体沉降变形特性。以某大型水电站堆石坝为例,从二维尺度和三维尺度对其堆石料形状系数进行了描述,并通过形状系数试验分析了不同颗粒粒径条件下的堆石料形状系数。研究表明,针对所使用的试验材料,在二维尺度下堆石料的修正 Blaschke 系数在 0.85 ~ 0.86 之间,凹凸度在 0.55 ~ 0.80 之间;三维尺度下,堆石料的颗粒球形度在 0.69 ~ 0.78 之间,凹凸度在 0.60 ~ 0.67 之间。

关 键 词:形状系数;修正 Blaschke 系数;球形度;凹凸度;堆石料

中图法分类号:TV641.4

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.015

1 研究背景

随着振动碾压技术的应用,土石坝迎来了一个大发展时期,目前世界上已建成的最高面板坝是我国的水布垭大坝,坝高达 233 m^[1]。土石坝坝高的增加导致坝体应力增大,作为坝体主体部分的堆石料在高应力场中会出现较大的变形。低应力场中,坝体的变形以堆石料的错动、压密为主,高应力场中,除以上低应力场中的因素外,颗粒破碎也是导致坝体变形的主要因素之一。而堆石料的颗粒形状与其颗粒破碎、密实程度密切相关,对其强度和变形特性有很大影响。近年来,随着高土石坝的建设,堆石料的颗粒形状对其力学性质的影响越来越受到科研工作者的关注。目前对颗粒形状的量化主要有 3 种方法:采用颗粒本身的物理尺寸参数^[2],采用基于分形理论的分形维数^[3],傅里叶分析方法^[4]。分形理论和傅里叶分析方法描述颗粒形状时过于复杂,不宜推广使用。本文从堆石料颗粒的物理尺寸出发,对颗粒形状进行描述。常用来描述颗粒形状的基本参数包括,长度、宽度、面积、周长、体积等,这些参数均可通过图像分析或试验直接测

得。

根据图像处理技术的发展,目前对颗粒形状的描述主要是在二维尺度下进行的,较常用的颗粒形状参数有圆度^[5]、布拉斯谢克(Blaschke)形状系数^[6],以及将布拉斯谢克形状系数归一化后的修正参数^[2]等。J. C. Santamarina 等认为土粒的形状可从球形度、棱角度和粗糙度三方面描述^[7]。球形度主要用来描述颗粒的外轮廓,如球状、立方体状、柱状等;棱角度是更进一步地描述颗粒的外轮廓,重点描述颗粒棱角的突出度、表面的凹凸度;粗糙度用来描述颗粒表面的起伏程度。王勇等^[8]依据圆形的特征提出了圆形度概念,孔亮等^[9]在圆形度的基础上又考虑了凹凸度,刘清秉等从轮廓系数、扁平度、球形度、磨圆度和粗糙度等方面对颗粒形状进行描述^[10-11]。以上定义的各项参数见表 1。

2 颗粒形状系数

堆石料一般由人工开采或爆破岩石得到,其颗粒较不规则,棱角较鲜明。对于堆石料的颗粒形状属性,可以从颗粒的整体形状和颗粒棱角的尖锐程度两方面考虑。依据前人的研究成果,本文从二维尺度和三维

尺度对如何描述堆石料的颗粒形状展开探讨。

表 1 颗粒形状二维描述参数

定义	公式	描述
圆度 ^[5]	$C = \frac{P^2}{A}$	颗粒周长二次方与面积的比值,取值范围 $[4\pi, +\infty]$,圆度越大,颗粒越狭长
Blaschke 系数 ^[6]	$C = \frac{32A}{(\pi P)^2}$	取值范围 $[0, 8/\pi^2]$,系数越大,越接近圆
修正 Blaschke 系数 ^[2]	$C_b = \frac{2\sqrt{\pi A}}{P}$	取值范围 $[0, 1]$
圆形度 ^[8]	$C = \frac{A}{A_s}$	颗粒实测面积与等周长圆面积之比,取值范围 $[0, 1]$,系数越大,越接近圆
凹凸度 ^[9]	$C_o = \frac{A'_f}{A_s}$	颗粒最大内切椭圆面积与同周长圆面积之比,取值范围 $[0, 1]$,系数越大,外轮廓越圆滑
轮廓系数 ^[10]	$\alpha = \frac{\pi D}{P}$	等效面积圆周长与颗粒周长之比,取值范围 $[0, 1]$,系数越大,越接近圆
扁平度 ^[10]	$e = \frac{L}{B}$	长宽比,取值范围 $[0, 1]$,系数越小,颗粒越扁平、狭长
球形度 ^[10]	$S = \frac{r_i}{r_c}$	内切圆半径和外接圆半径之比,取值范围 $[0, 1]$
磨圆度 ^[11]	$A_g = \frac{P_E}{P_C}$	等效椭圆周长与外接多边形周长之比
粗糙度 ^[10]	$r = (\frac{P}{P_C})^2$	颗粒周长与外接多边形周长之比

2.1 二维尺度颗粒形状系数

表 1 中列出的是在二维尺度下描述颗粒形状的参数,前 3 种系数均采用颗粒周长和面积的关系来描述,虽然形式不同,但含义相同。后几种形状系数是通过颗粒自身周长或面积与其外接圆、内切圆、内切椭圆、外接多边形等周长、面积之间的关系来描述。虽然各参数的定义略有不同,但本质上均是与圆对比,形状越接近圆,系数越大,形状越狭长,系数越小。

采用二维图像对堆石料颗粒形状进行分析,最容易获得的基本参数是周长和面积,而内切圆和外接圆的半径、外接多边形的周长等参数较难准确获得。为此,本文建议采用修正 Blaschke 系数和凹凸度共同确定颗粒的二维形状。修正 Blaschke 系数表示的是颗粒的外观轮廓与圆的接近程度,凹凸度表示的是颗粒外轮廓的平滑程度。

修正 Blaschke 系数

$$C_b = \frac{2\sqrt{\pi A}}{P} \tag{1}$$

凹凸度

$$C_o = \frac{A'_f}{A_s} \tag{2}$$

2.2 三维尺度颗粒形状系数

受三维图像处理技术的限制,目前在三维尺度下

开展颗粒形状的研究较少,刘广提出了球度的概念^[12]

$$S = S_s/S_p \tag{3}$$

式中, S_s 为与颗粒等体积的球体表面积; S_p 为颗粒表面积。

球度概念明确,但是颗粒的表面积较难测定,在实际使用中困难较大,本文提出采用球形度和凹凸度概念进行颗粒形状三维尺度的描述。球形度表示的是颗粒外观轮廓与球的接近程度,凹凸度表示的是颗粒外轮廓的平滑程度。

球形度

$$S_q = \frac{V}{V_c} \tag{4}$$

凹凸度

$$S_a = \frac{V_t}{V} \tag{5}$$

式中, V 为颗粒体积; V_c 为颗粒外接球体积; V_t 为颗粒内切最大椭球体积。

3 堆石料形状系数试验

3.1 试验用料

本次颗粒形状试验采用某大型水电站面板堆石坝主堆石料的大型三轴试验用料,各粒组试料是在实验室采用破碎机将现场开采的堆石料进行破碎并采用振动筛筛分得到。分别就 10~20、20~40 mm 和 40~60 mm 三个粒组随机抽取样品(样品质量约为试料总质量的 1%)进行试验,试验堆石料颗粒数量分别为 40、50 粒和 30 粒(图 1)。

3.2 二维尺度试验

首先采集颗粒的二维图像,采用图像处理软件得到颗粒二维图像的基本参数,如图 2 所示。分别求得颗粒的修正 Blaschke 系数和凹凸度,统计结果见图 3。计算各粒组颗粒形状系数加权平均值,列于表 2。

从图 3 和表 2 中可看出,二维尺度下,本次试验得到的堆石料颗粒修正 Blaschke 系数集中在 0.85~0.86 之间,凹凸度集中在 0.55~0.80 之间,前者数值较集中,后者数值较分散。颗粒粒径越大,修正 Blaschke 系数和凹凸度越大,表明颗粒外形越接近于圆形,表面越平滑;反之颗粒外形越狭长,表面棱角越鲜明。

3.3 三维尺度试验

堆石料颗粒的体积采用溢水法测得。

- (1) 将中型烧杯(以能够装下所测堆石料最大颗粒为宜)放入大型烧杯中,并将中型烧杯装满水。
- (2) 将堆石料颗粒用细线吊起并轻轻放入中型烧

杯,保证颗粒全部浸没在水中,直到水不再溢出后将颗粒取出。

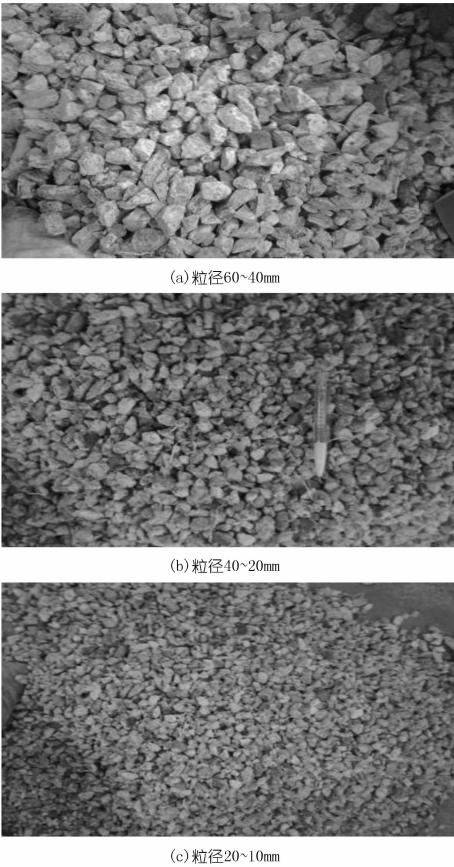


图 1 试验用堆石料

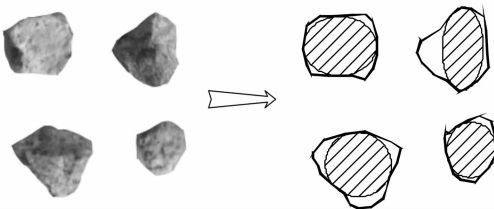


图 2 二维尺度下堆石料二维图像处理示意

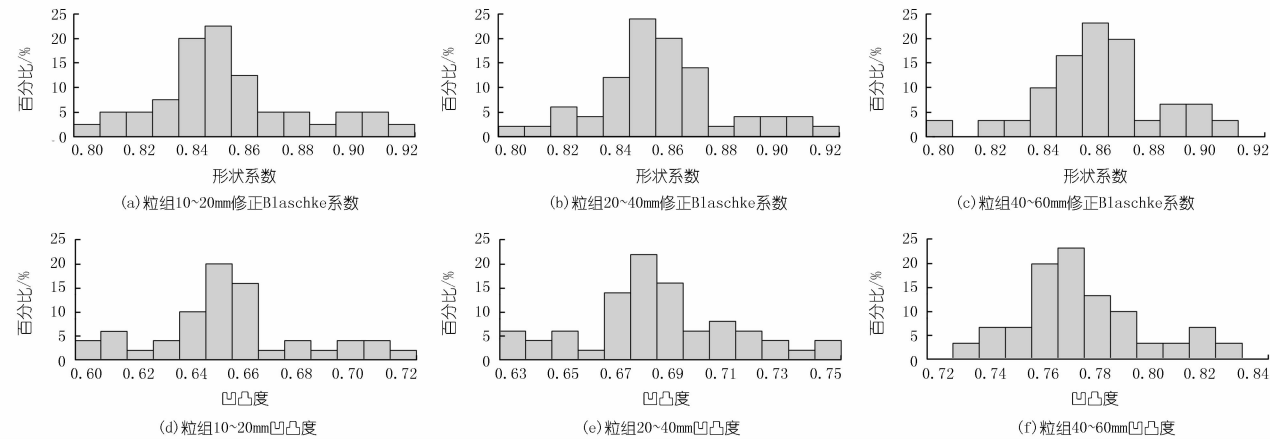


图 3 二维尺度下堆石料各粒组修正 Blaschke 系数和凹凸度分布

表 2 堆石料颗粒形状系数

粒组/mm	统计值	二维尺度		三维尺度	
		修正 Blaschke 系数	凹凸度	球形度	凹凸度
10 ~ 20	最大值	0.923	0.723	0.842	0.736
	最小值	0.802	0.596	0.601	0.499
	平均值	0.854	0.573	0.694	0.606
20 ~ 40	最大值	0.918	0.753	0.857	0.758
	最小值	0.805	0.632	0.623	0.522
	平均值	0.857	0.685	0.750	0.622
40 ~ 60	最大值	0.907	0.844	0.884	0.787
	最小值	0.798	0.716	0.635	0.549
	平均值	0.861	0.774	0.773	0.663

(3) 用量筒测量大烧杯中溢出水的体积,即为颗粒体积。

(4) 重复上述过程测得下一颗粒体积。

为减小误差,试验前需将中型烧杯内外壁充分湿润,大烧杯、量筒内壁充分湿润;试验须由同一人连续作业完成。

采用卡尺测量堆石料颗粒的最大、最小外径和与这两个方向垂直的外径,分别作为最大内切椭球的长、短、中轴,最大外径作为外接球直径。

按照公式(4)和(5)分别求颗粒的球形度和凹凸度,统计结果见图 4,计算各粒组颗粒形状系数加权平均值,列于表 2。

从图 4 和表 3 中可看出,三维尺度下,本次试验采用的堆石料颗粒球形度在 0.69~0.78 之间,凹凸度集中在 0.60~0.67 之间。颗粒粒径越大,球形度和凹凸度越大,表明颗粒外形越接近于球形,表面越平滑;反之颗粒外形越狭长,表面棱角越鲜明。

4 结 论

(1) 分析了描述颗粒材料形状的参数,本文建议在二维尺度下采用修正 Blaschke 系数和凹凸度共同描

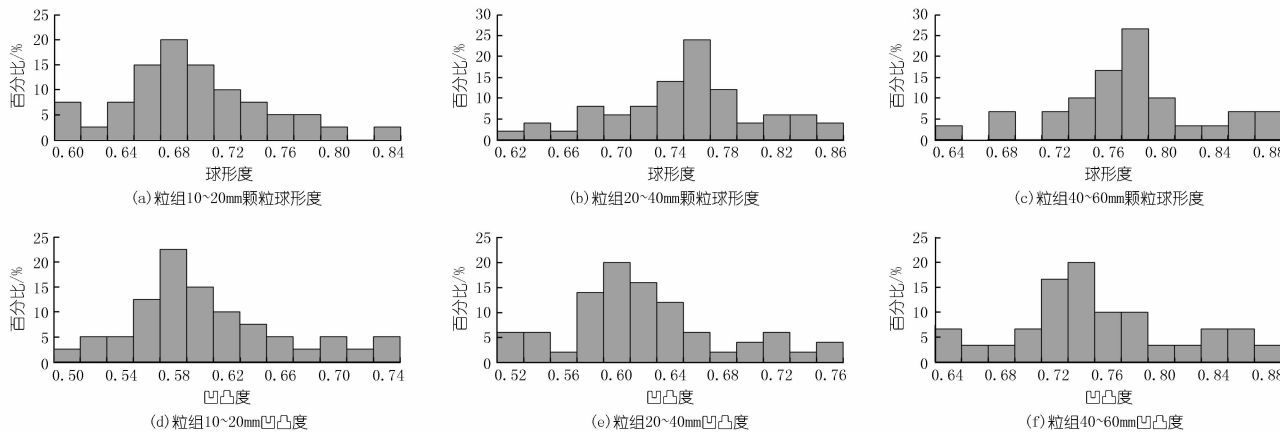


图 4 堆石料各粒组三维尺度球形度和凹凸度分布

述颗粒形状,在三维尺度下采用球形度和凹凸度共同描述颗粒形状。

(2) 对某大型水电站面板坝坝体主堆石料进行颗粒形状试验,二维尺度下采用图像分析法得到基本参数,三维尺度下采用实测法得到基本参数。经计算得出二维尺度下,试验堆石料的颗粒修正 Blaschke 系数集中在 0.85 ~ 0.86 之间,凹凸度集中在 0.55 ~ 0.80 之间;三维尺度下,堆石料的颗粒球形度在 0.69 ~ 0.78 之间,凹凸度集中在 0.60 ~ 0.67 之间。颗粒粒径越大,颗粒磨圆度越好,颗粒粒径越小,颗粒磨圆度越差,棱角越分明。

(3) 颗粒形状是影响颗粒破碎发生的一个重要因素,而颗粒破碎是一个较复杂的过程,受多方面因素相互影响、共同作用,弄清各影响因素之间的关系及对颗粒破碎的影响程度是下一步的重点研究内容。

参考文献:

[1] 杨启贵,熊泽斌,李金凤. 水布垭高面板堆石坝变形控制[J]. 人民长江,2007,38(7):52-53.
[2] 涂新斌,王思敬. 图像分析的颗粒形状参数描述[J]. 岩土工程学报,2004,26(5):659-662.
[3] Hyslp J P, Vallejo L E. Fractal analysis of the roughness and size dis-

tribution of granular materials[J]. Engineering Geology, 1997, (48): 231-244.
[4] Bowman E T, Soga K, Drumnond W. Particle shape characterization using Fourier descriptor of analysis[J]. Geotechnique, 2001, 51(6): 545-554.
[5] 夏德深,蒋初,杨静宇. 颗粒形状的自动识别[J]. 兵工自动化, 1994, (4): 6-10.
[6] 吴继敏. 应用图像分析法评价花岗岩结构特征[J]. 河海大学学报, 1998, 26(4): 1-7.
[7] Santamarina J C, Cho G C. Soil behavior; the role of particle shape [C]//Proceedings of Skempton Conference on Advances in Geotechnical Engineering. London: Thomas Telford, 2004: 604-617.
[8] 王勇,杨公训,路迈西. 图像识别中颗粒形状表征方法的研究[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2005, (1): 27-29.
[9] 孔亮,彭仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, (10): 2112-2119.
[10] 刘清秉,项伟, M. Budhu, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, (S1): 190-197.
[11] 刘清秉,项伟, Lehan B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, (2): 400-410.
[12] 刘广,荣冠,彭俊,等. 矿物颗粒形状的岩石力学特性效应分析[J]. 岩土工程学报, 2013, (3): 540-550.

(编辑:郑毅)

Analysis of shape factor of rockfill material

YANG Jie

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The rockfill material is the main material of the rock-fill dams, and the particle shape is one of the most important influence factors to the particle breaking and compaction degree. It is directly related with the deformation and stress of material and can influence the settlement characteristics of the dam body as a whole. Taking a large-scaled rock-fill dam as an example, we describe the shape factor of rockfill material from two-dimensional and three-dimensional scales respectively, and analyze the shape coefficient of rockfill material under different particle sizes by experiment. For the material used in the experiment, in the two-dimensional scales, the revised Blaschke coefficient is from 0.85 to 0.86, the bump degree is from 0.55 to 0.80; in the three dimensional scales, the spherical degree is from 0.69 to 0.78, and the bump degree is from 0.60 to 0.67.

Key words: shape factor; revised Blaschke coefficient; spherical degree; bump degree; rockfill material