

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1678

堆石料单颗粒劈裂试验破碎强度随机性与尺寸效应的三维离散元模拟

周梦佳¹, 温彦锋¹, 邓 刚¹, 王蕴嘉², 宋二祥²

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 堆石单颗粒形状不规则, 强度随机且存在尺寸效应, 开发堆石颗粒模型是开展堆石料颗粒流室内数值试验的基础。文中提出一种随机裂缝模型, 并对模型参数的设置进行分析讨论, 模型在合理的参数设置的情况下能反映真实堆石颗粒的脆性劈裂、强度随机性 Weibull 分布、强度尺寸效应, 是深入开展筑坝材料破碎及缩尺效应颗粒流模拟分析的前提。单颗粒数值试验表明, 颗粒形状对破碎模式影响显著; 在相同岩性材质和裂缝分布情况下形状对颗粒强度影响较大; 颗粒越不规则, 其强度离散性越大。

关 键 词: 堆石颗粒; 裂缝; 破碎; 尺寸效应; 形状

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 增 1-0503-08

Three-dimensional discrete element simulation of random breaking strength and size effect in single particle splitting test of rockfill

ZHOU Meng-jia¹, WEN Yan-feng¹, DENG Gang¹, WANG Yun-jia², SONG Er-xiang²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The single particle shape is irregular in the rockfill, which is characterized as random strength and size effect. The development of rockfill particle model is the basis of particle flow simulation in laboratory tests of rockfill materials. A random crack model is proposed in this paper. Furthermore, the parameters of model are analyzed and discussed. The model can reasonably simulate the behavior of brittle splitting, Weibull distribution and size effect of the rock strength. It is the premise of in-depth simulation analysis of particle flow simulation of damming material crushing and scale effect. The single particle numerical test shows that the particle shape has a significant influence on the breaking mode and particle strength under the same lithological material and fracture distribution. The more irregular the particle is, the greater the dispersion of particle strength.

Keywords: rockfill particle; crack; breakage; size effect; shape

1 引 言

堆石料是堆石坝和高填方工程地基的主要填筑料, 受力后可能发生的颗粒破碎引起级配、变形和颗粒间作用力的改变, 对堆石料的工程力学性质产生影响^[1-2]。国内外许多学者对粗粒料的破碎特性开展了系统地研究, 试验研究了破碎程度的量化及

相应的破碎本构关系^[3-6], 近些来堆石料的离散元模拟也逐渐成为研究粗粒料初始结构性、复杂应力加载条件下的破碎特性、堆石料尺寸效应、破碎宏细观本构模型等深化研究的手段之一^[7-8]。

堆石料单颗粒破碎模型的开发是堆石料离散元数值模拟的基础^[9], 已有相关试验表明^[10-11]单颗粒破碎强度表现出明显的随机特性和尺寸效应, 如

收稿日期: 2018-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目课题 (No.2018YF0407103, No.2017YFC0404803); 中国水科院基本科研业务费项目 (No.GE0145B562017)。

This work was supported by the National Key Research Program of China(2018YF0407103, 2017YFC0404803) and Fundamental Research Funds for IWHR(GE0145B562017).

第一作者简介: 周梦佳, 女, 1987 年生, 博士后, 主要从事岩土力学基础理论与数值计算方法方面的研究工作。E-mail: zhousmj@iwhr.com

通讯作者: 邓刚, 男, 1979 年生, 博士, 教授级高工, 主要从事岩土材料特性和数值模拟, 水利水电工程安全应急管理等方面研究。E-mail: dgang@iwhr.com

何合理地有效地模拟单颗粒破碎特性是颗粒流破碎定量关系研究的重点之一。Robertson 等^[12]、Cheng 等^[13]开展过较为系统的可破碎土的颗粒流模拟,其中破碎颗粒采用若干小颗粒粘结形成的颗粒簇模型(Cluster),通过随机扣除一定百分比的小球反映单颗粒强度的随机性。McDowell 等^[14]在此基础上通过调整扣除小球百分比,经验性地反映单颗粒强度的尺寸效应。对于颗粒簇模型,当粒间作用力(拉力或者剪力)超过连接强度时小颗粒脱离,可以模拟局部或整体破碎。另一方面,Deluzarche 等^[15]、Alaei 等^[16]针对典型碎石料颗粒建立了块(Clump)模型,利用相关破碎准则对颗粒接触力进行破碎判断,实现预设破碎模式的发展。Alonso 等^[17]在 Clump 模型的劈裂破碎准则中引入裂缝长度来体现破碎(包括延时破碎)的尺寸效应特性。Clump 模型计算量相对较小,但不规则形状及多点接触情况的破碎准则较为复杂,并且预设的破碎模式对破碎模拟的精度也无法保障。

本文在颗粒簇单元颗粒粘结(bond)处引入裂缝,开发了一种堆石单颗粒随机裂缝模型。模型参数物理意义明确,且能反映不同形状颗粒的不同破碎模式,较之 Clump 模型在破碎模式上更精确,较之 Cluster 粘结模型通过合理的裂缝设置,能更有效地合理地反映堆石颗粒的强度随机性和尺寸效应,利用该模型本文还探讨了两类形状对破碎模式及颗粒破碎随机性与尺寸效应的影响。

2 随机裂缝模型开发

已有颗粒微观试验表明^[18],砂土及粗粒土的破碎是由微观裂缝引起的,图 1 为砂土颗粒内部随机分布的微裂缝的扩展效果。堆石料由于颗粒尺度较大,目前单颗粒微观裂缝分布及扩展的相关测试资料并不多见,本文暂时假设堆石料天然缺陷在颗粒空间均匀随机分布,在颗粒流程序 PFC5.0 基础上开发随机虚拟裂缝模型,见图 2,是堆石料单颗粒

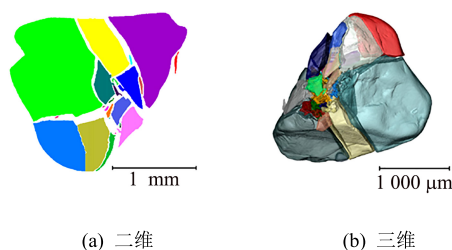


图 1 砂土单颗粒破碎的 X 射线显微断层成像^[18]

Fig.1 X-ray micro-tomography of single sand particle fracture^[18]

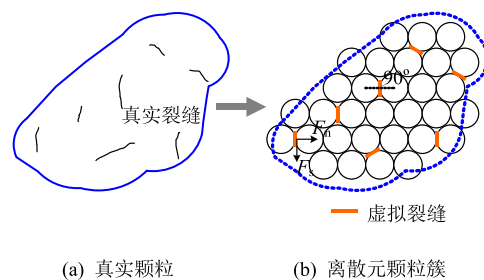


图 2 随机虚拟裂缝模型示意图^[19]

Fig.2 Sketches of random virtual crack model^[19]

破碎成因及行为数值探讨的工具基础。

模型采用半径为 R 的单元小球构成密排六方结构的颗粒簇来模拟特定形状的堆石料颗粒,单元小球之间设置平行粘结接触模型,如图 3 所示。颗粒接触处随机设置裂缝,裂缝所在平面方向与接触方向正交,裂缝长度在某一区间接某一分布取值。模型的程序流程如图 4 所示。

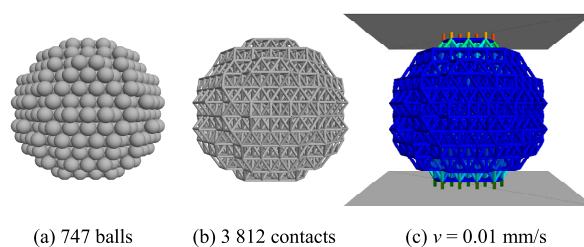


图 3 密排六方结构圆球颗粒模型

Fig.3 HCP model of ball-shaped particle

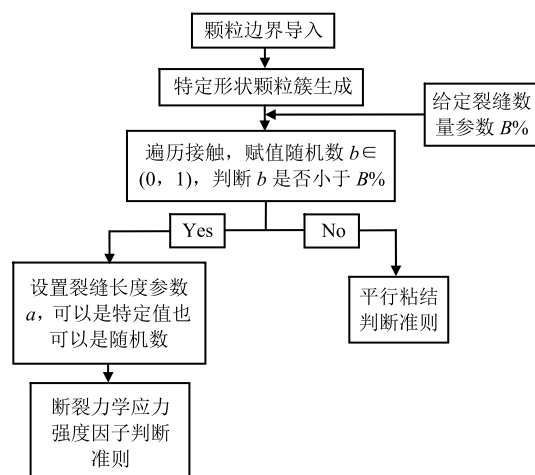


图 4 PFC 程序开发流程图

Fig.4 Program development in PFC

根据线弹性断裂力学,裂缝受拉和受剪引起的 I 型和 II 型应力强度因子计算值^[20]为

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \beta_I \sigma \sqrt{\pi a} = \beta_I \frac{F_n}{\sqrt{\pi R^2}} \sqrt{a} \\ K_{II} &= \beta_{II} \tau \sqrt{\pi a} = \beta_{II} \frac{F_s}{\sqrt{\pi R^2}} \sqrt{a} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： β_I 、 β_{II} 为系数，与裂缝位置、尺寸、颗粒形状有关，可近似取为 1； σ 、 τ 为无裂缝时裂缝面处的正应力和剪应力，在模型计算中采用接触拉力 F_n 与接触剪力 F_s 除以小球单元过圆心处的截面面积近似得到。根据 Bolton^[21] 的方法，考虑裂缝处拉剪复合受力情况，等效应力强度因子计算式为

$$K_{eq} = \frac{1}{2}[(K_I^2 + K_{II}^2)^{1/2} + K_I] \quad (2)$$

当某处裂缝的等效应力强度因子 K_{eq} 达到断裂韧度 K_c 时裂缝扩展，颗粒破碎。

在随机虚拟裂缝模型中有 3 个强度参数、2 个变形参数和 1 个摩擦参数，颗粒内部 bond 为颗粒内部的初始缺陷，bond 强度参数 σ_n 、 τ_s 为均质岩块岩性强度；设置裂缝处为微裂纹，由岩块断裂韧度 K_c 控制^[22]； K_n 、 K_s 与弹性模量有关， $K_n = 4RE_c$ ； K_n / K_s 与泊松比有关；摩擦参数 ϕ 通常取为 30° ^[23]。不同岩块的力学参数各有不同，本文按相关规范取一组常规经验值进行研究，见表 1。

表 1 随机虚拟裂缝参数

Table 1 Parameters of random virtual crack model

E_c /GPa	K_n/K_s	σ_n /MPa	τ_s /MPa	ϕ /(°)	K_c /(MPa·m ^{1/2})/mm	R /mm	a /mm	B /%
12.5	2.5	25~50	50~100	30	1	5	1~5	20~100

模型中的裂缝长度参数 a 与裂缝数量参数 $B\%$ 原则上应该通过 CT 扫描得到该批颗粒内部微裂缝的定量统计值确定，在这方面的研究还比较匮乏，在数值模型中目前只做理想化的参数分析。为了体现破碎是由薄弱区的微裂纹扩展导致缺陷贯通而形成的这一思想，本文对裂缝参数 a 的取值在理论上有所限制：

$$a_{\min} = \frac{K_c^2}{\sigma_n^2 \beta_I^2 \pi}; a_{\max} = R \quad (3)$$

3 颗粒破碎的强度随机性模拟

3.1 Weibull 分布试验数据

堆石颗粒的破碎是颗粒内部微裂缝扩展引起的，由于每个颗粒具有独特的裂缝分布（含裂缝位置、方向、数量和长度），堆石颗粒的压碎强度通常表现出显著的统计变异性，对于某一种料在某一粒径区间，其劈裂强度值符合某一随机分布。Mcdowell 采用 Weibull 函数来描述颗粒强度的随机性^[24]，在劈裂拉应力 σ 作用下颗粒的存活概率 P_s ：

$$\left. \begin{aligned} P_s &= \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \\ \ln[\ln(1/P_s)] &= m \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \\ \sigma &= \frac{F}{d_p^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： d_p 为圆球直径； F 为劈裂峰值荷载； σ_0 为特征应力，代表在此应力作用下有 $1/e$ (e 为自然常数， $1/e = 37\%$) 的试样可以存活； m 为 Weibull 模量，定量描述了强度的离散性， m 越大表明强度的离散性越低，如图 5 所示。

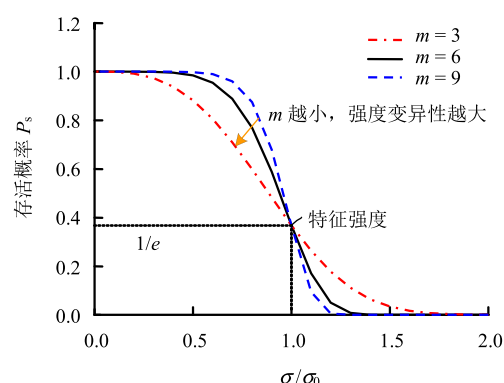


图 5 Weibull 分布函数

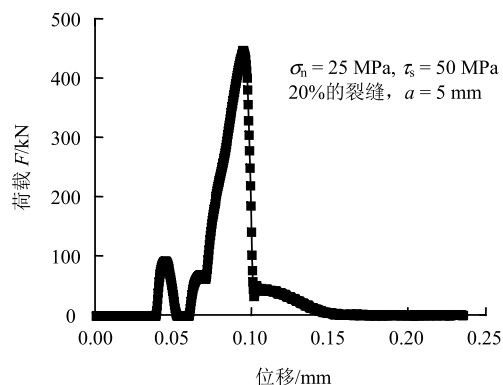
Fig.5 Weibull distribution function

Lobo-Guerrero 等^[25]对黑云母片麻岩和灰石英岩分别进行了单颗粒压碎试验，证明了其压碎强度符合 Weibull 分布函数，其特征强度值为 10 MPa 和 30 MPa，Weibull 模量分别为 2.75 和 4.23。

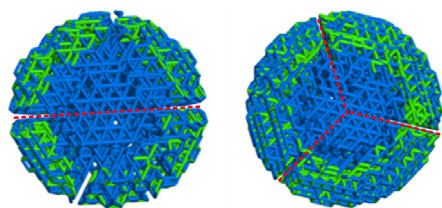
3.2 随机性数值模拟

对图 3 中模型按照表 1 参数设置进行劈裂试验模拟，模型劈裂过程荷载—位移关系曲线和破坏模式如图 6(a)、6(b)所示。模型能模拟出圆球颗粒脆性破坏特性，颗粒中心裂缝劈裂使得圆球发生一分为二或一分为三的整体破坏模式，这与硬质岩块试验现象吻合良好^[26]。通过 $45 \times 2 = 90$ 组算例进行不同裂缝数量和裂缝长度的数值分析，如图 6(c)、6(d)所示。由计算结果可得，(1) 对于圆球颗粒，裂缝位置随机对强度随机性基本不起作用。(2) 颗粒强度的离散性主要来源于裂缝数量和裂缝长度；裂缝越多，裂缝长度随机引起的强度离散性越大；裂缝越长，裂缝数量随机引起的强度离散性越大。

考虑两种情况($\sigma_n = 25$ MPa, $\tau_s = 50$ MPa 和 $\sigma_n = 50$ MPa, $\tau_s = 100$ MPa)下裂缝长度取 1~5 mm，裂缝数量取为颗粒内部 bond 数量的 20%~100%，颗粒强度离散性用 Weibull 函数拟合，特征



(a) 荷载-位移曲线



(b) 破碎模式 (俯视图)

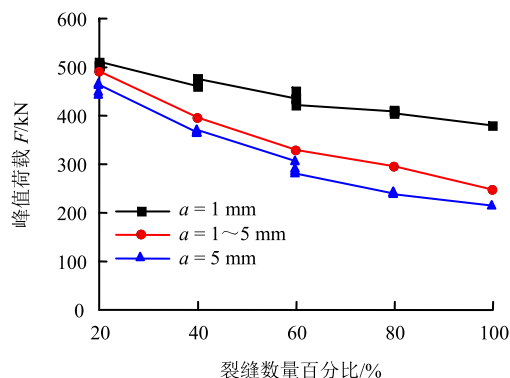
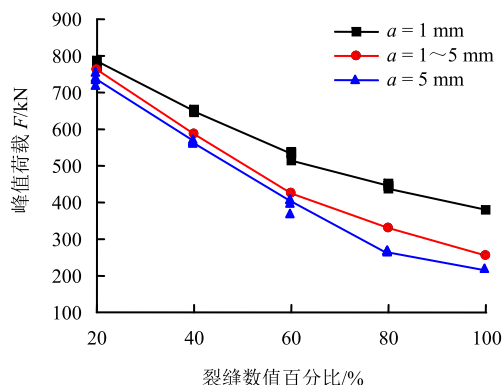
(c) $\sigma_n = 25 \text{ MPa}$, $\tau_s = 50 \text{ MPa}$ (d) $\sigma_n = 50 \text{ MPa}$, $\tau_s = 100 \text{ MPa}$

图6 峰值荷载 P 与裂缝设置参数的关系
Fig.6 Relationships between splitting load P and crack parameters

强度值分别为 43.5 MPa 和 56.7 MPa; Weibull 模量 m 值分别为 4.1 和 3.1, 如图 7 所示, 这与常见岩块

试验值接近, 证明了模型的有效性。基础材质较好的颗粒, 裂缝随机引起的强度离散性大。

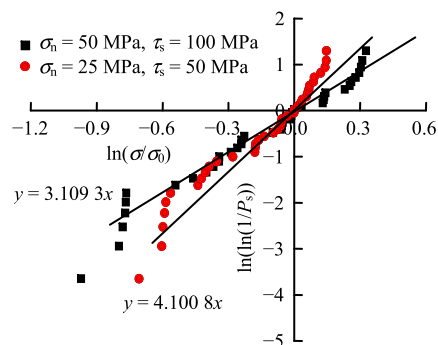


图7 Weibull 参数 m 的拟合
Fig.7 Fitting of Weibull parameter m

4 颗粒破碎的尺寸效应模拟

4.1 尺寸效应的内在机理分析

堆石颗粒的强度不仅表现出统计变异性, 还存在明显的尺寸效应, 即颗粒尺寸越大, 特征强度越小。相关研究表明, 颗粒的尺寸效应与颗粒强度的随机性有密切的关系, 其尺寸效应规律由式 (5) 给出^[10], 其中的参数 m 即为表征颗粒强度离散性的 Weibull 参数, m 越小, 表征离散性越大, 尺寸效应也越明显。

$$P_s(V) = \exp \left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (5)$$

$$\sigma_{0,d} = (\sigma_0 / d_0^{-3/m}) d^{-3/m}$$

以上公式是采用强度理论基于最弱环理论推导所得, 认为材料整体受拉破坏是由一点的受拉破坏控制的, 材料不破坏的前提是所有部分均不破坏。由于大颗粒内部缺陷比小颗粒更多, 因此, 在相同荷载作用下大颗粒破坏的概率比小颗粒大。采用裂缝理论也可以解释尺寸效应, 大颗粒相对小颗粒, 内部裂缝数量与尺寸相对大且多, 根据

$$K = \beta \sigma (\pi a)^{0.5} \quad (6)$$

在特定应力状态下大颗粒的裂缝尖端的应力强度因子较大, 更容易产生破碎。

4.2 模拟方法的探讨

采用离散元模型, 分别分析裂缝数量和裂缝尺寸对强度尺寸效应规律的影响。对 $d_p = 100$ 、150、200 mm 和 250 mm 的圆球颗粒进行单颗粒劈裂试验数值模拟, 模拟基本小球单元半径 $R = 5 \text{ mm}$, 裂缝长度 $a = 5 \text{ mm}$ 保持不变, 不同大小颗粒的基本单元

小球数量不同,如图 8(b)所示。分析数值计算结果(见图 9(a))可得,增加缺陷及裂缝的数量,颗粒强度会减小,这与尺寸效应的趋势吻合,但其尺寸效应规律相比于试验和理论较不明显。另外,采用此种方法,增加了计算量,在大型试验模拟中计算效率需要着重考虑。

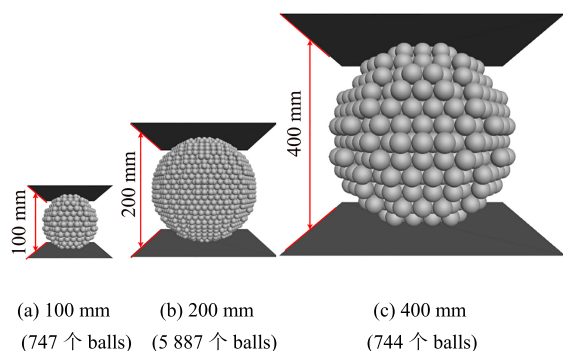


图 8 不同大小颗粒模型

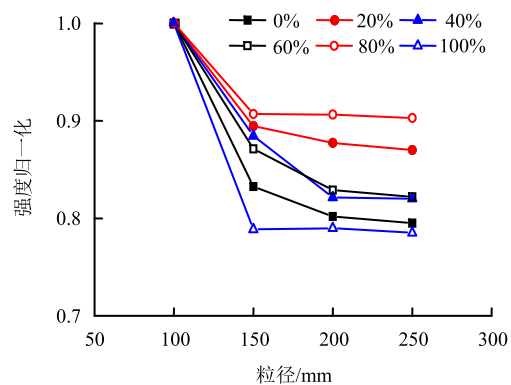
Fig.8 Numerical model of grains with different sizes

采用等比例放大颗粒尺寸与基本小球单元尺寸,同时裂缝尺寸也随粒径增大的方法进行尺寸效应模拟,如图 8(c)所示。实际颗粒的裂缝尺寸随着颗粒增大的规律并不容易提前定量(需要微观扫描与定量描述),本文模型简化处理为 $a = 0.05d_p$ 、 $a = 0.01d_p$ 和 $a = 0.0001d_p^2$ 三种方法。由模拟结果如图 9(b)、9(c)、9(d)和图 10 所示。分析可得,(1)增加裂缝长度,颗粒强度整体表现减小趋势(除 $a = 0.01d_p$ 方法局部数据由于离散性原因以外),其程度与裂缝数量有关,裂缝数量为 bond 数量的 60%以上,尺寸效应趋势明显;(2)根据式(5)对上述数据进行拟合,3 种方法得到的尺寸效应 Weibull 参数分别为 6.82、7.69、4.29,其中按二次方规律得到的 Weibull 参数 4.29 与试验值较为接近。下文两类料分析中采用裂缝数量 80%、裂缝尺寸 $a = 0.0001d_p^2$ 模拟尺寸效应。

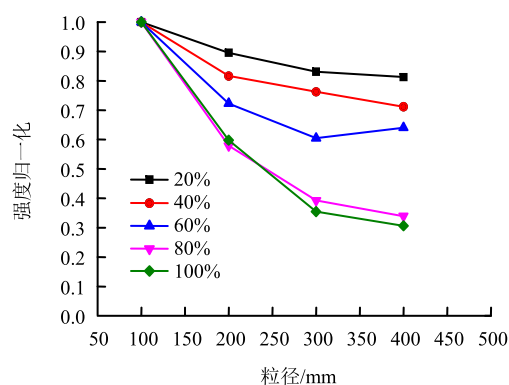
5 两类料破碎特性的模拟

5.1 破碎强度与破碎模式

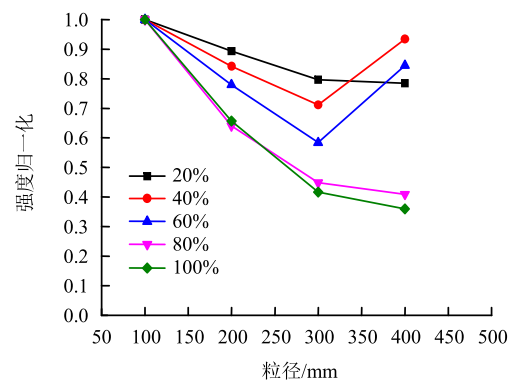
实际工程中堆石颗粒并非理想的圆球形状,根据生成方式的不同,堆石颗粒可分为磨圆度较好的砂砾石和棱角突出的爆破料^[27-28]。图 11 为两种典型形状及其颗粒流模型。采用上文所述方法进行单颗粒压碎试验模拟,由图 12(a)可见,与圆球颗粒不同的是两类料在单轴压缩过程中先发生旋转等刚体运动,直至颗粒达到最稳定受力状态,内部裂缝发生扩展从而导致颗粒破碎。颗粒破碎强度与裂面面



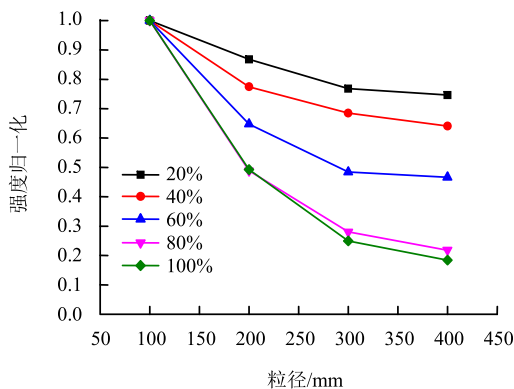
(a) 增加缺陷和裂缝



(b) 增加裂缝尺寸 ($a = 0.05d_p$)



(c) 增加裂缝尺寸 ($a = 0.01d_p$)



(d) 增加裂缝尺寸 ($a = 0.0001d_p^2$)

图 9 尺寸效应数值计算结果

Fig.9 Numerical calculation result of size effect

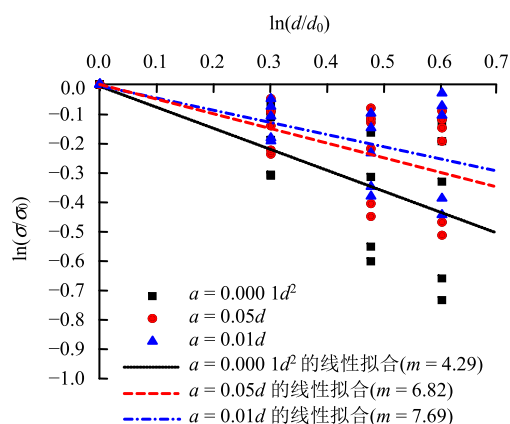
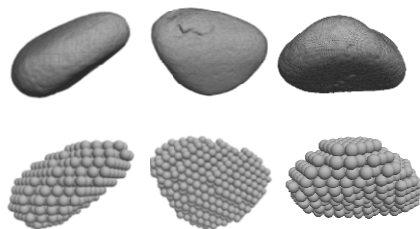
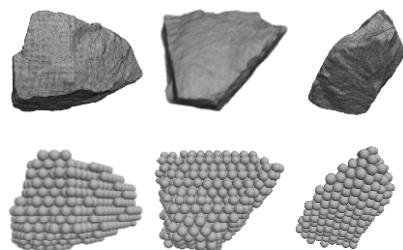


图 10 尺寸效应的 Weibull 参数 m 拟合
Fig.10 Fitting of Weibull parameter m considering size effect



(a) 砂砾石颗粒 (745 balls)



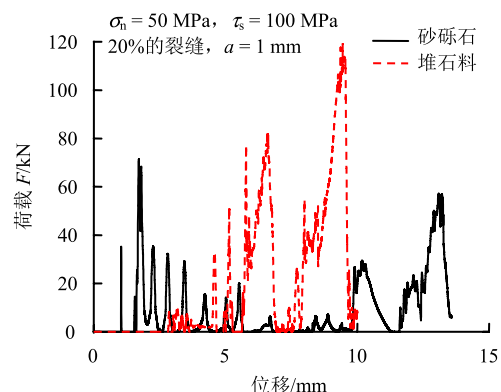
(b) 堆石料颗粒 (901 balls)

图 11 两类料颗粒形状的数值模拟
Fig.11 Particle shape simulation of two rockfills

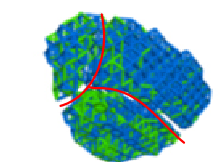
积及颗粒内部应力集中程度有关。颗粒破碎模式主要取决于颗粒内部的应力分布，也与裂缝数量及分布有一定关系，(1) 磨圆的砂砾石以整体破碎（分为几块相同大小的小颗粒）为主；不规则爆破料由于颗粒形状尖端应力集中明显，以局部破碎（应力集中处棱角脱落）为主。(2) 当颗粒内部裂缝较多，颗粒破碎出现粉碎特征，特别是堆石料，其棱角磨损程度较大，见图 12(b)。

5.2 随机性与尺寸效应

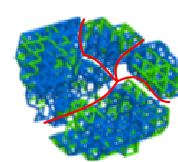
取 $\sigma_n = 50$ MPa, $\tau_s = 100$ MPa, 裂缝长度取为 1~5 mm, 裂缝数量取为颗粒 bond 数量的 20%~100%, 颗粒强度离散性用 Weibull 函数拟合, 得到



(1) 力-位移加载曲线



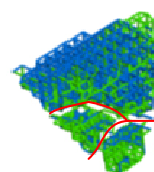
(a) Rounded-20%-random



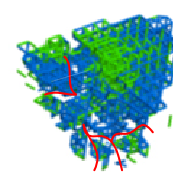
(b) Rounded-100%-random



(c) 爆破料破碎模式



(d) Angular-20%-random



(e) Angular-100%-random

(2) 两类料破碎模式 (俯视图)

图 12 两类料单颗粒破碎模拟
Fig.12 Particle breakage simulation of two rockfills

砂砾石和堆石料特征强度值为 7.08 MPa 和 7.72 MPa, Weibull 模量 $m = 2.7$ 、1.5, 结合圆球颗粒的 3.1 做对比发现, 颗粒越不规则其 Weibull 模量越小, 即离散性越大, 这与颗粒内部的应力集中情况密切相关。采用上文所述方法进行尺寸效应分析, 发现砂砾石和堆石料尺寸效应规律拟合得到 $m = 2.46$ 、2.89, 并无显著区别, 如图 13 所示。

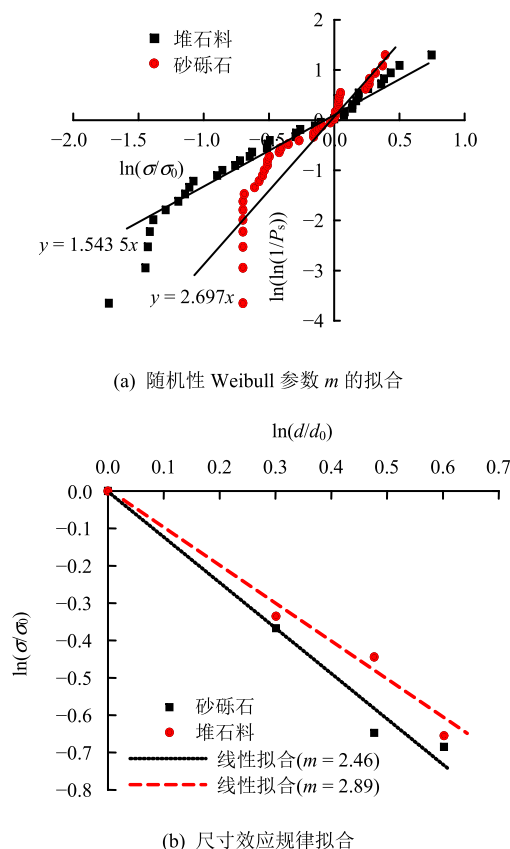


图 13 两类料单颗粒强度随机性和尺寸效应规律

Fig.13 Randomness of single grain strength and size effect of two kinds of rockfills

6 结 语

本文基于堆石料单颗粒破碎细观机理，开发了较为精细的堆石料单颗粒随机裂缝模型。采用该模型进行单颗粒试验模拟，颗粒发生脆性破坏，颗粒强度符合 Weibull 分布，得到的 Weibull 参数 $m=3.1$ 、 4.1 ，与现有试验值基本符合，验证了模型的合理性和有效性。通过设置裂缝长度与颗粒粒径大小的关系，能反映颗粒强度的尺寸效应规律。

单颗粒数值试验表明，（1）颗粒形状对破碎模式影响显著，磨圆度较好的砂砾石在劈裂试验中以整体破碎为主，形状不规则的爆破料则发生较多的颗粒棱角破碎和磨损。（2）在相同岩性材质和裂缝分布情况下，砂砾石和堆石料的特征强度为 7.08 MPa 和 7.72 MPa，相比于圆球颗粒的 56.7 MPa，认为形状对颗粒强度影响较大。另外，颗粒越不规则，其强度离散性越大（砂砾石 $m = 2.7$ ，堆石料 $m = 1.5$ ），但尺寸效应规律未有明显区别。

参 考 文 献

- [1] 刘汉龙, 孙逸飞, 杨贵, 等. 粗粒料颗粒破碎特性研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 361—369.
- [2] LIU Han-long, SUN Yi-fei, YANG Gui, et al. A review of particle breakage characteristics of coarse aggregates[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2012, 40(4): 361—369.
- [3] XIAO Yang, LIU Hong, ZHANG Wen-gang, et al. Testing and modeling of rockfill materials: A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 8(3): 1—8.
- [4] 徐明, 宋二祥. 粗粒土的一种应变硬化模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2967—2986.
- [5] XU Ming, SONG Er-xiang. A strain hardening model for rockfills[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2967—2986.
- [6] 陈金锋, 徐明, 宋二祥, 等. 不同应力路径下石灰岩碎石力学特性的大型三轴试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 195—201.
- [7] CHEN Jin-feng, XU Ming, SONG Er-xiang, et al. Large scale triaxial testing on mechanical properties of broken limestone under various stress paths[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8): 195—201.
- [8] 魏松, 朱俊高, 钱七虎, 等. 粗粒料颗粒破碎三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 533—538.
- [9] WEI Song, ZHU Jun-gao, QIAN Qi-hu, et al. Particle breakage of coarse-grained materials in triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 533—538.
- [10] HU W, YIN Z, DANO C, et al. A constitutive model for granular materials considering grain breakage[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(8): 2188—2196.
- [11] LIU F, JIANG M J, SUN C, et al. On the size-dependent compressive resistance of bonded granules[J]. *Geotechnique Letters*, 2015, 5(3): 104—111.
- [12] 姜浩, 徐明. 碎石料应力路径大型三轴试验的离散元模拟研究[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 151—157.
- [13] JIANG Hao, XU Ming. Study of stress-path-dependent behavior of rockfills using discrete element method[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(10): 151—157.
- [14] 徐琨, 周伟, 马刚, 等. 基于离散元法的颗粒破碎模拟研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 880—889.
- [15] XU Kun, ZHOU Wei, MA Gang, et al. A review of particle breakage simulation based on DEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(5): 880—889.
- [16] LOBO-GUERRERO S, VALLEJO L E. Application of Weibull statistics to the tensile strength of rock aggregates[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2006, 132(6): 786—790.
- [17] NAKATA Y, HYODO M, HYDE AFL, et al. Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression[J]. *Soils and Foundations*, 2001, 41(1): 69—82.
- [18] ROBERTSON D, BOLTON M D. DEM simulations of

- crushable grains and soils[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Micromechanics of Powders and Grains. Sendai, Japan: [s. n.], 2001: 623—626.
- [13] CHENG Y P, NAKATA Y, BOLTON M D. Discrete element simulation of crushable soil[J]. **Geotechnique**, 2003, 53(7): 633—641.
- [14] MCDOWELL G R, HARIRECHE O. Discrete element modelling of soil particle fracture[J]. **Geotechnique**, 2002, 52(2): 131—135.
- [15] DELUZARCHE R, CAMBOU B. Discrete numerical modelling of rockfill dams[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30(11): 1075—1096.
- [16] ALAEI E, MAHBOUBI A A. Discrete model for simulating shear strength and deformation behaviour of rockfill material, considering the particle breakage phenomenon[J]. **Granular Matter**, 2012, 14(6): 707—717.
- [17] ALONSO E E, TAPIAS M, GINI J. Scale effects in rockfill behavior[J]. **Géotechnique Letters**, 2012, 2(3): 155—160.
- [18] ZHAO B, WANG J, COOP M R, et al. An investigation of single sand particle fracture using X-ray micro-tomography[J]. **Géotechnique**, 2015, 65(8): 625—641.
- [19] 周梦佳. 高填方填筑体强夯模拟及碎石填料流变特性研究[博士学位论文 D]. 北京: 清华大学, 2015.
ZHOU Meng-jia. Study on dynamic compaction of high-filled foundation and creep behavior of rockfill[ph. D thesis D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [20] BROEK D. Elementary engineering fracture mechanics[M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1996.
- [21] KWOK C Y, BOLTON M D. DEM simulations of soil creep due to particle crushing[J]. **Geotechnique**, 2013, 63(16): 1365—1376.
- [22] 刘新荣, 傅晏, 郑颖人, 等. 颗粒流细观强度参数与岩石断裂韧度之间的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2084—2089.
LIU Xin-rong, FU Yan, ZHENG Ying-ren, et al. Relation between meso-parameters of particle flow code and fracture toughness of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2084—2089.
- [23] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded- particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1329—1364.
- [24] MCDOWELL G R, AMON A. The application of Weibull statistics to the fracture of soil particles[J]. **Soils and Foundations**, 2000, 40(5): 133—141.
- [25] LOBO-GUERRERO S, VALLEJO L E. Application of Weibull statistics to the tensile strength of rock aggregates[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2006, 132(6): 786—790.
- [26] 孔德志. 堆石料的颗粒破碎应变及其数学模拟[博士学位论文 D]. 北京: 清华大学, 2009.
KONG De-zhi. Particle breakage strain of rockfill materials and its numerical simulation[ph. D thesis D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [27] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2003, 129(3): 206—218.
- [28] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 203—222.
WANG Xiao-gang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(2): 203—222.
- [21] JON J M, THOMAS C P. Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries[J]. **Water Resources Research**, 1992, 28(3): 841—857.
- [22] PAPANASTASIOU T C. Flows of materials with yield[J]. **Journal of Rheology**, 1987, 31(5): 385—404.
- [23] FRIGAARD I A, NOUAR C. On the usage of viscosity regularisation methods for visco-plastic fluid flow computation[J]. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 2005, 127: 1—26.
- [24] 乔成, 潘华利, 欧国强. 两相光滑粒子流体动力学方法在动床溃坝问题中的应用[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(5): 625—632.
QIAO Cheng, PAN Hua-li, OU Guo-qiang. Application of two-phase smoothed particle hydrodynamics method to dam break over movable bed[J]. **Journal of University of Chinese Academy of Sciences**, 2017, 34(5): 625—632.
- [25] ULRICH C, LEONARDI M, RUNG T. Multi-physics SPH simulation of complex marine-engineering hydrodynamic problems[J]. **Ocean Engineering**, 2013, 64: 109—121.
- [26] MONAGHAN J J. Simulating free surface flows with SPH[J]. **Journal of Computational Physics**, 1994, 110(2): 399—406.
- [27] UZUOKA R, YASHIMA A, KAWAKAMI T, et al. Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading[J]. **Computers & Geotechnics**, 1998, 22(3-4): 243—282.
- [28] KOMATINA D, JOVANOVIĆ M. Experimental study of steady and unsteady free surface flows with water-clay mixtures[J]. **Journal of Hydraulic Research**, 1997, 35(5): 579—590.

上接第 485 页