

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2525

# 堆石料单粒强度尺寸效应的颗粒流模拟方法研究

李 杨, 余成学

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 围绕堆石料单粒强度尺寸效应的颗粒流模拟方法展开研究。首先, 基于 FISH 二次开发建立了堆石料的随机不规则单粒模型, 充分考虑堆石料的形状特征和破碎现象; 然后, 建立了堆石料单粒强度尺寸效应的等效模拟方法, 以单粒强度随其粒径的变化规律为基础, 推导了堆石料模型中细观黏结强度与堆石料等效粒径的负指数经验公式; 其次, 基于建立的数值模型对堆石料的室内单粒压缩试验进行仿真模拟, 验证数值模型的正确性和合理性, 并对较大粒径堆石料的单粒强度进行模拟预测, 突出数值试验的优势; 最后, 基于建立的数值模型对相同粒径不同形状特征堆石料的单粒强度分布特征进行模拟研究。研究表明: (1) 堆石料内部缺陷含量和尺寸随粒径增加对其单粒强度所产生的尺寸效应, 可通过堆石料模型中细观强度参数随粒径折减进行等效模拟; (2) 形状特征对堆石料的破裂机制具有重要影响, 方形颗粒为压剪破裂, 单粒强度较高, 而随机不规则颗粒和圆形颗粒为拉剪或劈裂, 单粒强度相对较低; (3) 拉剪或劈裂条件下, 堆石料形状越不规则, 其单粒强度的离散程度越高, 反之则离散程度越低。相关研究成果可为进一步研究荷载作用下堆石体内各粒径段堆石料的破碎量奠定基础, 从而更加真实地反映堆石体的级配演化规律。

**关 键 词:** 堆石料; 单粒强度; 尺寸效应; 数值模拟

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)08-2951-10

## Numerical simulation of effect of size on crushing strength of rockfill grains using particle flow code

LI Yang, SHE Cheng-xue

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** Effect of size on crushing strength of rockfill grains is studied using the particle flow code. Firstly, a discrete model of rockfill grains is developed using secondary development method with FISH language, in which particle shape and breakage behavior of rockfill grains are replicated reasonably. Then an equivalent simulation method is proposed to investigate the effect of size on crushing strength of rockfill grains in various particle sizes. A negative power formula is presented to describe the relationship between crushing strength of rockfill grains and its particle sizes. The meso bond strengths of contacts inside an aggregate model of rockfill grain are dependent on the size of the aggregate itself. Then, one dimensional compression tests of rockfill grains in lab are replicated based on the proposed numerical method to verify its accuracy and validity. At the end, influence of shape of rockfill grains on distribution of crushing strength is studied. Several basic conclusions are obtained: 1) Size effect on crushing strength of rockfill grains due to microcracks can be simulated equivalently by the way that meso strength of contact in the numerical model of rockfill grains decreases while the size of rockfill grains increases; 2) Crushing mechanical of rockfill grains is influenced by the particle shape, and square grains are usually crushed in compression-shear mode, while irregular and round grains fail in tension-shear or splitting mode. As a result, crushing strength of square grain is usually much higher than that of irregular and round grain; 3) When fail in tension-shear or splitting mode, dispersion of crushing strength of rockfill grains is dependent on shape of rockfill grains. The regular particle shape presents higher Weibull modulus, indicating smaller divergence for the crushing strengths. The breakage behavior of rockfill grains with different sizes under load provides a reasonable method to predict the evolution of particle size distribution of rockfill assembly.

**Keywords:** rockfill grains; crushing strength; size effect; numerical simulation

收稿日期: 2016-10-27

第一作者简介: 李杨, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事堆石体静、动力特性的颗粒流模拟研究。E-mail: ly\_whusld@163.com

## 1 引 言

堆石料单粒压缩试验<sup>[1]</sup>研究发现,堆石料的单粒强度存在明显的尺寸效应,即堆石料的单粒强度随着粒径的增加而降低。对堆石料单粒强度尺寸效应进行模拟,有利于定量研究不同粒径堆石料(尤其是较大粒径堆石料)的单粒强度分布规律,并在考虑堆石料单粒强度的基础上进一步研究荷载作用下堆石料集合体中各粒径段堆石料的破碎量,从而更加真实地模拟预测堆石体的级配演化规律,具有重要的工程意义。

对于堆石料的尺寸效应,目前普遍认为是由于堆石料普遍存在一定程度的内部缺陷且其含量和尺寸随粒径不断增加所引起的<sup>[2]</sup>。因此,模拟堆石料单粒强度尺寸效应的关键问题,是以合理的方式反映堆石料内部缺陷对其单粒强度的影响。

针对堆石料单粒强度尺寸效应的数值模拟,Zhou等<sup>[3]</sup>基于PFC<sup>2D</sup>进行了研究,通过指定形状的颗粒簇(cluster)模拟堆石料,并在颗粒簇内部黏结处随机设置虚裂纹模拟堆石料的内部缺陷,但该文忽略了堆石料形状的随机性,且模型中虚裂纹的含量及尺寸缺乏必要的依据;杨贵<sup>[4]</sup>、Zhou<sup>[5]</sup>等分别基于单个圆颗粒模拟堆石料,将圆颗粒的破裂强度设置为颗粒粒径的函数以反映其单粒强度的尺寸效应,但该文忽视了颗粒形状对单粒强度的影响;周海娟等<sup>[6]</sup>给予SGDD方法研究了堆石料单粒强度的尺寸效应。此外,McDowell<sup>[7]</sup>、Cheng<sup>[8]</sup>和Lim<sup>[9]</sup>等基于颗粒流模型模拟研究了砂土单粒强度的尺寸效应,通过随机删除填充颗粒的方式模拟砂土颗粒的内部缺陷,存在一定的局限性。由此可见,尽管目前国内外学者对堆石料等粗粒料单粒强度的尺寸效应进行了相关研究,但仍存在一定的不足之处,亟需进一步深入探索。

针对当前研究的不足之处,本文基于二维颗粒流模型提出了一种模拟堆石料单粒压缩试验的数值模型,重点研究了堆石料单粒强度尺寸效应的细观等效模拟方法。首先,基于颗粒流方法建立堆石料的随机不规则单粒模型,尽可能真实地模拟堆石料形状的随机不规则特征及其破碎现象;然后,基于堆石料单粒强度与其粒径的关系,推导了堆石料模型细观黏结强度与其等效粒径的负指数型经验公式,以间接反映堆石料内部缺陷含量和尺寸对其单粒强度的影响;最后基于建立的数值模拟方法对堆石料的单粒压缩试验进行仿真模拟,验证所建数值模型的可靠性和正确性,并进一步研究了颗粒形状

特征对堆石料单粒强度分布规律的影响。

## 2 堆石料单粒强度的Weibull分布及其尺寸效应

室内试验<sup>[1]</sup>研究发现,堆石料的单粒强度服从Weibull分布<sup>[10]</sup>,即相同粒径的堆石料在一定应力 $\sigma$ 作用下未破碎的概率为

$$P_s(\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中: $P_s$ 为堆石料未破碎的概率; $\sigma_0$ 为该粒径堆石料未破碎概率为37%( $1/e \approx 0.37$ )时所对应的应力,本文称之为特征应力; $m$ 为Weibull模量。

式(1)中 $P_s$ 的计算方法为:对某一粒径的堆石料进行单粒压缩试验,测量堆石料破裂时的单粒强度。假设试验中堆石料数量为 $N$ ,试验结束后将各堆石料的单粒强度按照从小到大的顺序进行排序,假设序列中第 $k$ 位的堆石料单粒强度为 $\sigma_k$ ( $k=1, 2, \dots, N$ ),则该粒径堆石料在一定应力 $\sigma$ 作用下未破碎的概率为<sup>[11]</sup>

$$P_s(\sigma) = 1 - \frac{k}{N+1} \quad (\sigma_k \leq \sigma < \sigma_{k+1}) \quad (2)$$

对于式(1),将方程两边同时取两次自然对数,可以将其改写为线性形式,即

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{P_s}\right)\right] = m \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0) \quad (3)$$

于是,通过绘制 $\ln[\ln(1/P_s)] - \ln(\sigma)$ 可拟合得到该粒径堆石料单粒强度分布的Weibull模量 $m$ 和特征应力 $\sigma_0$ 。

由于相同粒径堆石料的单粒强度具有一定的离散性,因此,目前常通过特征应力 $\sigma_0$ 来表征该粒径段堆石料的单粒强度特征<sup>[1]</sup>。室内试验研究表明,堆石料的单粒强度随粒径增大而不断减小,存在明显的尺寸效应<sup>[1]</sup>。

## 3 堆石料的随机不规则颗粒流模型

基于颗粒流模型对堆石料单粒强度的尺寸效应进行模拟研究,首先需建立能真实反映堆石料力学性质的数值模型。考虑到堆石料形状随机不规则,且存在明显的破碎现象,因此,本文在建立堆石料的数值模型时,重点从堆石料的形状特征和破碎现象两个方面进行研究。

### 3.1 堆石料形状特征的模拟方法

在早期的研究工作中,笔者建立了堆石料的随机不规则单粒模型,其基本原理已另择文献<sup>[12]</sup>详细

介绍，本文在文献[12]的基础上进行了适当改进，现对其进行简单说明。

本文中堆石料模型的基本形状为椭圆内接随机多边形，其形状特征取决于所在椭圆的长短轴之比  $\xi$ 、边数  $N$  以及形状系数  $c$ ，如图 1 所示。其中形状系数  $c$  是自定义参数，以控制堆石料模型形状的不规则程度，在  $[0, 1]$  区间取值，当  $c$  取 0 时，堆石料模型为正多边形，形状最规则， $c$  值越大，生成的堆石料模型形状越不规则。另外，堆石料所在椭圆长短轴之比  $\xi$ 、边数  $N$  和形状系数  $c$  均在一定范围内随机分布，以模拟堆石料形状的随机性。

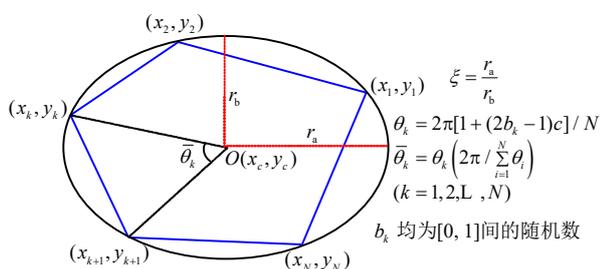


图 1 椭圆内接随机不规则多边形  
Fig.1 Stochastic irregular shaped polygon in ellipse

堆石料模型的形状特征确定后，其粒径也随之确定。但是由于堆石料形状极不规则，对于其粒径存在多种不同的描述方法<sup>[13]</sup>。为统一起见，本文中所提及的堆石料粒径，均是指其等效粒径，即与堆石料面积相等的圆直径。假设堆石料模型的面积为  $S$ ，则其等效粒径  $d$  为

$$d = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (4)$$

定义堆石料模型的形状特征后，以其边界为基准生成墙体，构成封闭的随机多边形区域，为生成堆石料模型做准备。

### 3.2 堆石料破碎现象的颗粒流模拟方法

从目前的研究现状来看，基于颗粒流模型模拟堆石料等粗粒料的破碎现象主要包括两种常见方法：①粗粒料模型由若干圆形颗粒彼此黏结构成，通过黏结的断裂模拟堆石料的破碎现象<sup>[14-18]</sup>；②基于单个圆形或不规则形状的刚性颗粒团 (clump) 模拟堆石料，当刚性颗粒团内部的应力状态满足指定的破裂准则时，将该刚性颗粒团由若干子颗粒按照指定的方式进行替换<sup>[4-5, 19-20]</sup>。上述两种模拟方式各具优势，但后者在模拟堆石料的破碎现象时，需人为定义母堆石料破裂后生成的子堆石料的构成方式，存在一定程度的主观因素，且忽略了堆石料的

不同模式的破裂特征及破裂过程中裂纹扩展的随机性，与堆石料的真实破碎现象存在一定差异。因此，本文在建立堆石料模型时，采用第 1 种方式模拟堆石料的破碎现象，即堆石料模型内部由若干圆形颗粒填充并彼此黏结。

对堆石料模型进行填充时，Lim 等<sup>[9]</sup>指出，为了避免填充颗粒的尺寸效应（与本文所研究的单粒强度尺寸效应不是同一概念，具体可参见文献[9]）对粗粒料模型的单粒强度产生不利影响，填充颗粒的数量不宜少于 500（三维模型）。换言之，填充颗粒与粗粒料模型的粒径之比不宜超过 0.126。以此类推，在二维条件下，堆石料模型内部填充颗粒的数量之比不宜少于 63。因此，本文在对粒径为  $d$  的堆石料模型进行填充时，填充颗粒直径  $2r$  满足以下条件：

$$\frac{2r}{d} < 0.126 \quad (5)$$

式 (5) 确定了填充颗粒的最大粒径，即填充颗粒直径  $2r$  不宜超过堆石料模型等效粒径  $d$  的 0.126 倍（约 1/8），但是却并没有限制填充颗粒粒径的最小值。事实上，填充颗粒粒径越小，越能避免填充颗粒的尺寸效应，并充分反映堆石料模型的形状特征和破碎现象，然而却会导致模型中的颗粒数量显著增加，对计算效率产生不利影响。因此，在确定填充颗粒粒径时，需综合考虑模型精度和计算效率两个方面的影响。由于本文的研究对象为单个堆石料，数值模型规模相对较小，可容纳较多数量的填充颗粒，因此，本文在设计填充颗粒的粒径时，填充颗粒粒径可适当小于堆石料粒径的 0.126 倍。

于是，本文在具体考虑堆石料模型内部填充颗粒的尺寸时，采取统一的填充标准，即对于粒径为  $d$  的堆石料模型，其内部填充颗粒半径在  $[r_{\min}, r_{\max}]$  内随机分布，并满足以下条件：

$$\left. \begin{aligned} \frac{r_{\min}}{d} &= 0.02 \\ r_{\max} &= 1.6r_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

确定填充颗粒的粒径后，在堆石料模型内部随机投放填充颗粒，且投放过程中允许填充颗粒间发生初始重叠。当投放的填充颗粒面积之和达到堆石料模型面积时结束投放过程，随后将模型计算至平衡状态，平衡过程中重叠的颗粒彼此分离，并最终填满整个堆石料模型边界内部。

基于本文所采用的填充方法，填充颗粒间无需满足严格相切的关系，极大地简化了填充颗粒的投放过程，但是当填充颗粒填满整个堆石料模型时，相邻填充颗粒间会存在一定量的重叠，虽然重叠量

很小,但是若直接施加黏结仍有可能导致黏结中出现过大的拉力而造成黏结断裂。为了解决这一问题,本文引入接触力清零方法<sup>[21]</sup>,清除相邻填充颗粒间由于初始重叠而产生的接触力,随后施加平行黏结(BPM),并根据增量格式的力-位移方程计算颗粒间接触力<sup>[21]</sup>,此时只有当相互重叠的颗粒发生新的相对位移时才会形成接触力。

施加黏结后,删除堆石料模型边界处的墙体,即可建立可破碎的随机不规则堆石料模型。当堆石料模型承受荷载作用时,若模型内部黏结中的应力达到设定的强度阈值则会出现断裂,形成微裂纹;当微裂纹汇集贯穿形成破裂面时,堆石料模型出现破裂,从而模拟堆石料的破碎现象。图2反映了本文所建立堆石料模型的典型破裂现象,即堆石母颗粒在荷载作用下出现破碎,生成若干子颗粒(由不同颜色加以区分),红色虚线表示堆石母颗粒破裂过程中形成的断裂面。

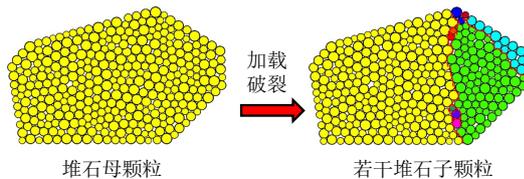


图2 堆石料模型的典型破裂现象

Fig.2 Typical breakage phenomenon of discrete model of rockfill grains

#### 4 堆石料单粒强度尺寸效应的颗粒流模拟方法

通常情况下,堆石料普遍存在一定程度的内部缺陷(包括晶粒瑕疵、微裂纹和孔洞等),某些情况下还可能具有尺寸相对较大的薄弱面。对于仅含有内部缺陷的堆石料,其内部缺陷的分布特征一般为数量多、尺寸小且位置随机均匀分布<sup>[2]</sup>,如图3(a)所示,因此,可将其等效为均质堆石料,本文主要针对上述仅含有内部缺陷的堆石料进行模拟研究。对于内部含有薄弱面的堆石料,其薄弱面的分布特征一般为数量较少、尺寸较大且具有一定的方向性,如图3(b)所示,从而造成堆石料的力学性质在平行和垂直于薄弱面的两个方向上存在各向异性,故不能将其视为均质堆石料。对内部含有薄弱面的堆石料进行模拟,可在本文研究成果的基础之上,在堆石料模型内部引入节理模型,以反映其力学性质的各向异性和非均匀性,这不是本文所研究的范畴,因此,这里暂不予以讨论,下文中所提到堆石料,均指内部仅含有缺陷而不含薄弱面的堆石料。

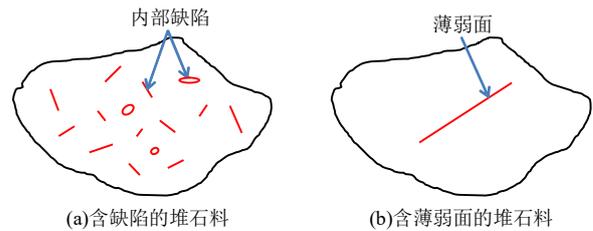


图3 堆石料内部缺陷或薄弱面分布特征示意图  
Fig.3 Distribution of flaws or discontinuous cracks in rockfill grains

由于本文的研究重点是堆石料单粒强度的尺寸效应,因此,以堆石料的单粒强度为出发点,采用等效的方式对堆石料单粒强度的尺寸效应进行模拟研究,其基本方法如下:将堆石料模型的细观强度设置为其等效粒径的函数,即细观强度随等效粒径的增加而不断降低,从而使得各粒径堆石料模型的单粒强度随粒径增加而不断减小,实现堆石料单粒强度尺寸效应的模拟。上述模拟方法的本质在于,通过堆石料模型中细观强度参数随粒径降低,间接反映堆石料中内部缺陷的含量和尺寸随粒径升高而对其单粒强度产生的不利影响。

为此,本文结合已有的研究成果,基于粗粒料单粒强度与其粒径的负指数型经验公式,推导建立了堆石料模型细观黏结强度与其等效粒径的负指数型关系式,具体推导过程如下:

(1) 堆石料等粗粒料的极限荷载  $f$  与其粒径  $d$  的关系可通过以下指数型方程进行描述<sup>[22]</sup>:

$$f = \eta_{3D} d^{\lambda_{3D}} \quad (7)$$

式中:  $\eta_{3D}$ 、 $\lambda_{3D}$  为堆石料材料常数。式(7)针对的是三维堆石料,本文假定二维堆石料同样满足式(7)所示的指数关系,即

$$f = \eta_{2D} d^{\lambda_{2D}} \quad (8)$$

二维堆石料的单粒强度  $\sigma$  为

$$\sigma = k \frac{f}{dt} \quad (9)$$

式中:  $k$  为反映颗粒形状的参数,参考文献[23]将其取为 0.70;  $t$  为二维模型在垂直于模型平面方向的厚度,一般取单位厚度 1 m。

基于式(8)、(9)可得到二维堆石料的单粒强度与其粒径满足指数关系,即

$$\sigma = k \eta_{2D} d^{\lambda_{2D}-1} \quad (10)$$

(2) 堆石料等岩石材料的颗粒流模型中,颗粒间接触的细观黏结强度  $\sigma_n$  和  $\tau$  与堆石料模型的单粒强度  $\sigma$  存在近似的正比关系<sup>[21]</sup>:

$$\sigma \propto \sigma_n \quad (11)$$

及

$$\sigma \propto \tau \quad (12)$$

根据式 (10)、(11) 和式 (12) 可建立堆石料模型中细观黏结强度  $\sigma_n$  和  $\tau$  与其粒径  $d$  的负指数型经验公式, 如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= K_1 d^{\lambda_{\sigma_n}} \\ \tau &= K_2 d^{\lambda_{\tau}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $\lambda_{\sigma_n}$  和  $\lambda_{\tau}$  均为待定细观参数, 且  $\lambda_{\sigma_n}$  和  $\lambda_{\tau}$  均小于 0。

为了降低待定参数数量, 通常可假定  $\sigma_n$ 、 $\tau$  满足一定的倍比关系, 即

$$\tau = p\sigma_n \quad (14)$$

式中:  $p$  为常数, 可根据经验确定。

此时, 式 (13) 中待定细观参数仅剩  $K_1$  和  $\lambda_{\sigma_n}$ , 可通过对堆石料单粒压缩的室内试验进行标定而确定。

### 5 算例验证

为了验证本文所提出模拟方法的合理性和可靠性, 本文对迟世春等<sup>[1]</sup>开展的堆石料单粒压缩试验进行验证模拟。

#### 5.1 室内试验概述

室内试验中选用的堆石料为大连地区某石料厂爆破料, 岩性为石灰岩, 棱角分明。堆石料的粒径范围为 40~60、20~40、10~20 mm 和 5~10 mm, 每组 30 颗堆石料。试验过程由上、下平行的钢板挤压堆石料, 直至颗粒破碎, 加载时间控制在 60 s 内。

#### 5.2 堆石料单粒压缩试验的颗粒流模型

由于室内试验中未对堆石料的形状特征进行具体描述, 只简要介绍了其属于人工爆破料且棱角分明, 因此, 本文在建立相应的堆石料模型时, 按照人工爆破料的一般特征设置堆石料模型的形状参数, 如表 1 所示。

表 1 堆石料模型的形状参数

Table 1 Geometry parameters for particle shape of rockfill grains

外接椭圆长短轴半径比	多边形边数	形状系数
1.4~1.6	6~9	0.4~0.8

图 4 为生成的各粒径段堆石料模型的示例, 从中可以看出, 生成的堆石料模型均呈块状, 棱角分明, 符合人工爆破堆石料的一般特征。

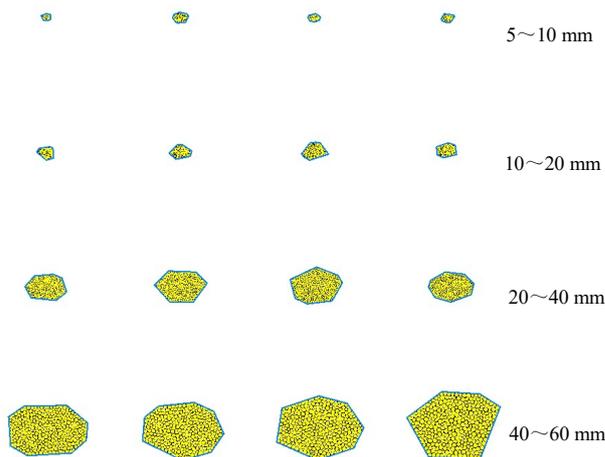


图 4 各粒径段堆石料模型 (示例)  
Fig.4 Discrete model of rockfill grains with various sizes (example)

室内试验中堆石料静置于加载底板时, 一般是其最长边与加载底板接触, 因此, 本文在建立堆石料单粒压缩的数值模型时, 将堆石料模型的最长边作为加载底面。于是, 堆石料模型在上、下水平的两面光滑刚性墙体之间随机生成, 通过旋转使得堆石料模型的最长边达到水平位置且位于堆石料模型底部, 并通过顶部墙体施加一定作用力(本文取 100 N)将堆石料模型卡紧。

加载过程中, 通过速度加载控制顶部墙体运动, 即以恒定的速度压缩堆石料模型, 加载速度取  $1.5 \times 10^{-6}$  m/步, 加载过程中记录顶部墙体施加的荷载  $F$ , 当堆石料模型出现破裂且  $F$  跌落至荷载峰值  $F_{max}$  的 0.30 倍以下时结束加载。

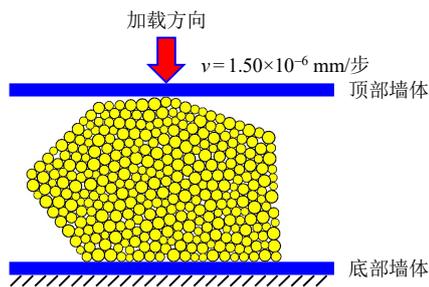


图 5 堆石料单粒压缩的颗粒流模型  
Fig.5 PFC model for compression test of rockfill grains

#### 5.3 堆石料模型的细观力学参数

堆石料模型内部填充颗粒密度取为  $\rho = 2\ 400$  kg/m<sup>3</sup>, 颗粒间摩擦系数取 0.55, 局部阻尼系数取 0.70, 黏性阻尼系数取为 0.0。填充颗粒间的接触模型为平行黏结模型, 相应的细观力学参数包括细观刚度参数和细观强度参数, 具体的参数设置如

下所示。

(1) 细观刚度参数

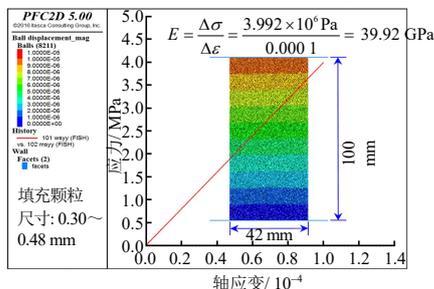
堆石料模型的细观刚度参数一般由堆石料的弹性模量进行标定,但是堆石料形状不规则,加载条件下易出现局部尖端破裂,使得力-位移曲线出现锯齿状波动,因而难以确定其弹性模量。为了解决这一问题,本文基于堆石料母岩标准试件的弹性模量来标定堆石料模型的细观刚度参数。由于室内试验<sup>[1]</sup>选用的堆石料母岩岩性为大连石灰岩,因此本文参考相关文献<sup>[24]</sup>,取石灰岩标准试件静弹模为 39.54 GPa。于是,通过标定即可得到一组合适的细观刚度参数,如表 2 所示,从而使得堆石料母岩标准试件模型的宏观弹性模量与室内试样基本一致,如图 6 所示。

表 2 堆石料模型的细观刚度参数

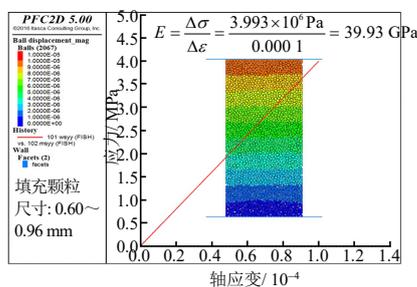
Table 2 Meso stiff parameters for discrete model of rockfill grains

颗粒接触 法向刚度 $k_n$ /(N/m)	颗粒接触 切向刚度 $k_s$ /(N/m)	平行黏结 法向刚度 $p_b k_n$ /(Pa/m)	平行黏结 法向刚度 $p_b k_s$ /(Pa/m)
$15.26 \times 10^9$	$15.26 \times 10^9$	$15.26 \times 10^9 / (2R_{\text{contact}})$	$15.26 \times 10^9 / (2R_{\text{contact}})$

注:  $R_{\text{contact}}$  表示平行黏结半径,  $R_{\text{contact}} = \min(R_1, R_2)$ , 其中  $R_1$ 、 $R_2$  分别为黏结的两个颗粒的半径。



(a) 填充颗粒尺寸 0.30~0.48 mm



(b) 填充颗粒尺寸 0.60~0.96 mm

图 6 堆石料母岩试件模型的单轴压缩试验

Fig.6 Uniaxial compression test for numerical model of parent rock of rockfill grains

表 2 中将平行黏结刚度设置为黏结半径函数的原因,主要是考虑到堆石料模型内部填充颗粒的尺寸是其等效粒径的函数(式(6)),因此,堆石料模

型等效粒径越大,其内部填充颗粒的尺寸也越大,此时若将平行黏结刚度设置为常量,将会导致堆石料模型的弹性模量随着粒径的增加而不断增大,与实际不符。于是,若将平行黏结刚度按照表 2 所示的函数关系进行设置,可以使得不同粒径堆石料模型的弹性模量基本相同。

(2) 细观强度参数

本文对式(14)中  $p$  取值为 2,通过对文献<sup>[1]</sup>中堆石料单粒压缩试验进行的标定,可得到一组合适的细观参数  $K_1$ 、 $\lambda \sigma_n$ ,使得各粒径堆石料模型单粒强度分布与室内试验结果基本一致。于是,各粒径段堆石料模型的细观黏结强度参数按照下式进行计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= 0.228d^{-0.985} \\ \tau &= 0.456d^{-0.985} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中:  $\sigma_n$  为平行黏结的细观法向强度 (MPa);  $\tau$  为平行黏结的细观切向强度 (MPa);  $d$  为堆石料模型的等效粒径 (m),按照式(4)进行计算。

5.4 模拟结果验证及分析

基于建立的堆石料模型和细观力学参数,对室内试验中各粒径段堆石料的压缩试验进行仿真模拟,各粒径段均包含 30 颗堆石料模型。

(1) 堆石料模型单粒压缩的典型力-位移曲线

图 7 反映了堆石料模型单粒压缩过程的典型力-位移曲线,从图中颗粒看出,堆石料模型单粒压缩的力-位移曲线在达到峰值  $F_{\text{max}}$  前,会出现一定程度的锯齿状波动,这主要是由于局部的尖端破碎(图 7 中反映为裂纹数量增加)引起的,这与室内试验中<sup>[1]</sup>所描述的堆石料单粒压缩力-位移曲线形态的一般特征是一致的。当接触力  $F$  达到峰值后迅速跌落,此时裂纹数量显著增加,堆石料模型出现整体破裂。

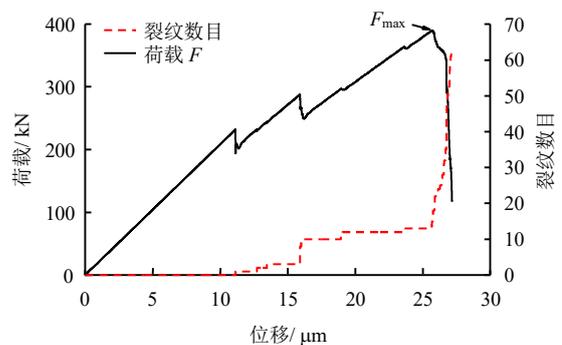


图 7 堆石料模型单粒压缩的典型力-位移曲线

Fig.7 Typical force-displacement curve of rockfill grains under one dimensional compression test

(2) 堆石料单粒强度的 Weibull 分布特征

堆石料模型的单粒强度按照式 (9) 进行计算, 其中极限荷载  $f$  取力-位移曲线的荷载峰值  $F_{max}$ ,  $d$  取堆石料模型的等效粒径, 按照式 (4) 计算。根据模拟结果, 数值试验中各粒径段堆石料单粒强度的 Weibull 分布特征如图 8 所示。可以看出, 除 40~60 mm 粒径段存在一定差异外, 数值试验中其余 3 组模拟结果与室内试验基本吻合, 表明本文所建立的数值模拟方法, 可较好地模拟各粒径堆石料颗粒单粒强度的分布特征。

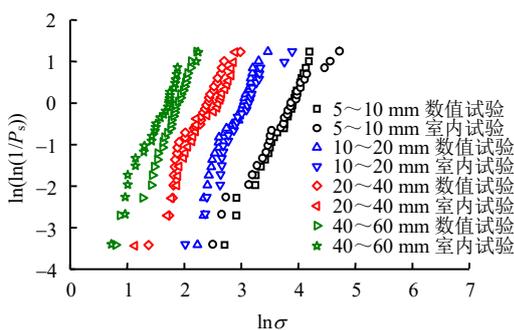


图 8 各粒径段堆石料单粒强度分布特征  
Fig.8 Strength distribution of rockfill grains with different particle sizes

(3) 堆石料模型的单粒强度特征及其尺寸效应

对数值试验中各粒径段堆石料模型单粒强度分布的  $\ln[\ln(1/P_s)] - \ln(\sigma)$  关系进行线性拟合, 可得到各粒径段堆石料模型单粒强度分布的 Weibull 模量  $m$  及其特征应力  $\sigma_0$ , 并与室内试验结果进行对比, 如表 3 及图 9 所示。

通过表 3 及图 9 可以看出, 数值试验中各粒径段堆石料模型单粒强度分布的 Weibull 模量  $m$  和特征应力  $\sigma_0$  与室内试验结果基本一致, 从而验证了本文所建立的数值模拟方法, 可较好地模拟各粒径段堆石料颗粒单粒强度的尺寸效应。

(1) 大粒径堆石料单粒强度的预测模拟

堆石坝工程中堆石料的粒径可达到 600~800 mm, 目前在室内试验中还难以对如此大粒径的堆石料进行单粒压缩试验, 相比之下, 数值模拟不受模型尺寸和加载能力的限制, 可对大粒径堆石料的单粒压缩试验进行模拟预测。本文基于建立的数值模拟方法对大粒径堆石料的单粒强度特征进行研究。数值试验中, 堆石料模型的粒径范围为 600~800 mm, 颗粒密度取  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ , 形状参数按照表 1 进行设置, 细观刚度参数按照表 2 进行设置, 细观强度参数按照式 (15) 进行设置, 颗粒间摩擦系数取 0.55, 堆石料模型数量设为 30。

表 3 堆石料模型单粒强度分布的 Weibull 参数  
Table 3 Weibull parameters of crushing strength distribution of discrete model of rockfill grains

粒径段 / mm	Weibull 模量 $m$ (斜率)		特征应力 $\sigma_0$ / MPa	
	室内试验	数值模拟	室内试验	数值模拟
5~10	2.10	2.86	51.05	48.14
10~20	2.74	3.26	23.33	20.33
20~40	2.57	2.93	12.43	11.92
40~60	2.93	3.31	5.50	6.63

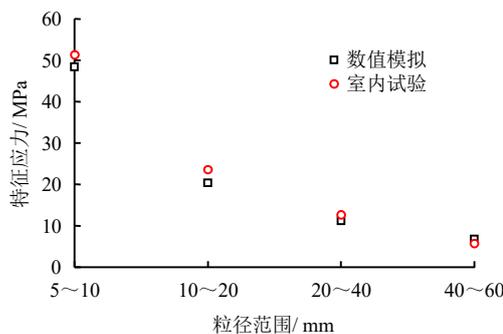


图 9 各粒径段堆石料模型的单粒强度  
Fig.9 Crushing strength of rockfill grains with different particle sizes

通过对 600~800 mm 大粒径堆石料模型进行单粒压缩试验, 得到该粒径段堆石料模型的单粒强度的 Weibull 分布规律如图 10 所示。

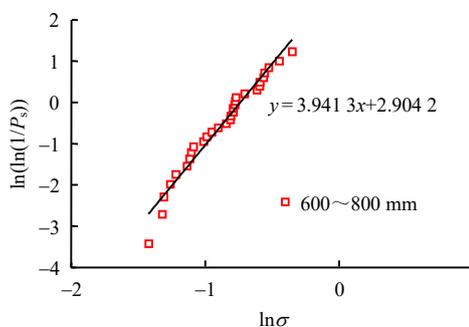


图 10 超大粒径堆石料(600~800 mm)单粒强度的 Weibull 分布特征  
Fig.10 Weibull distribution of crushing strength of rockfill grains with excess size(600-800 mm)

基于图 10 进行线性拟合, 可得到 600~800 mm 堆石料单粒强度的 Weibull 模量为  $m = 3.94$ , 未破碎概率为 37% 时的特征应力  $\sigma_0 = 0.48 \text{ MPa}$ 。为了验证预测结果的可靠性, 本文对室内试验中<sup>[1]</sup>各粒径段堆石料的特征应力与其粒径 (取该粒径段的平均粒径, 对于 5~10 mm 的堆石料, 取其粒径为 7.5 mm) 的关系按照负指数形式进行拟合, 基于拟合公式计算 600~800 mm 大粒径堆石料的特征应力, 并将计算结果与本文模拟结果进行对比, 结果如图 11 所示。

基于图 11 可以看出, 本文模拟预测的 600~800 mm 大粒径堆石料的特征应力, 与基于室内试验结果拟合的结果十分吻合, 从而表明本文所建立的数值模型, 在模拟预测较大粒径堆石颗粒的单粒强度特征时, 也是同样有效的。

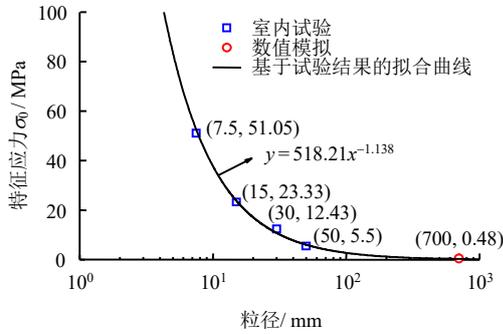


图 11 超大粒径堆石料单粒强度的模拟预测结果

Fig.11 Prediction results of crushing strength of rockfill grains with excess size

## 6 颗粒形状对堆石料单粒强度的影响分析

为进一步研究堆石料形状对其单粒强度的影响, 本文开展了一组对照试验, 即对相同粒径、不同形状特征的堆石料模型开展单粒压缩试验, 研究其单粒强度分布规律。对照试验中, 堆石料模型的粒径均为 50 mm, 模型内部填充颗粒半径为 1.00~1.60 mm, 颗粒密度为 2 400 kg/m<sup>3</sup>, 颗粒间接触的细观刚度和强度参数分别按照表 2 和式 (15) 进行设置, 颗粒间摩擦系数均取 0.55, 各组中堆石料模型的数量均为 30。

对照试验共包括 4 种不同形状的堆石料模型, 其具体的形状特征描述如表 4 所示。

表 4 对照试验各组堆石料模型的形状特征

Table 4 Particle shape characteristic of discrete model of rockfill grains in controlled trials

组别	颗粒形状	形状参数
A	随机多边形颗粒	$\xi=1.0\sim 2.0, N=6\sim 9, c=0.2$
B	随机多边形颗粒	$\xi=1.0\sim 2.0, N=6\sim 9, c=0.8$
C	圆形颗粒	
D	正方形颗粒	

通过对 4 种不同形状的堆石料模型进行单粒压缩试验, 得到各组堆石料模型单粒强度的 Weibull 分布特征, 如图 12 所示。

对各粒径段堆石料单粒强度的  $\ln[\ln(1/P_s)] - \ln(\sigma)$  关系进行线性拟合, 得到相应的 Weibull 模量  $m$  和特征应力  $\sigma_0$ , 如表 5 所示。

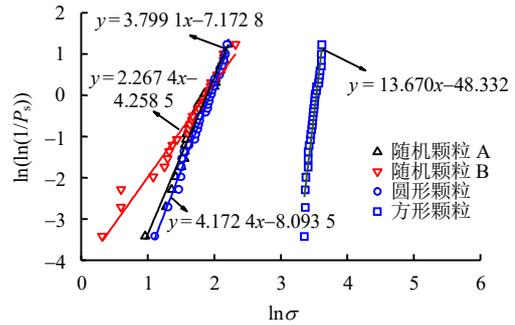


图 12 不同形状特征堆石料单粒强度的 Weibull 分布  
Fig.12 Weibull distribution of crushing strength of rockfill grains with different particle shapes

表 5 不同形状堆石料单粒强度的 Weibull 分布参数  
Table 5 Weibull parameters of crushing strength distribution of discrete model of rockfill grains in controlled trials

颗粒形状	Weibull 模量 $m$	特征应力 $\sigma_0$ / MPa
随机多边形 A	3.80	6.61
随机多边形 B	2.27	6.54
圆形	4.17	6.96
正方形	13.67	34.32

基于图 12 及表 5 的模拟结果, 本文从堆石料的单粒强度 (即特征应力  $\sigma_0$ ) 和 Weibull 模量  $m$  两个角度分别进行研究, 可得到以下主要结论:

(1) 从单粒强度的角度来看, 方形颗粒的单粒强度远高于随机多边形颗粒和圆形颗粒, 而随机多边形颗粒与圆形颗粒的单粒强度十分接近。这主要是由于方形颗粒的破裂机制为压剪破坏, 而随机多边形颗粒和圆形颗粒的破裂机制为拉剪或劈裂, 在相同细观强度的条件下, 压剪破坏的单粒强度远高于拉剪或劈裂破坏的单粒强度。由此可见, 堆石料的形状决定了其在单向压缩条件下的破裂机制, 进而影响其单粒强度。另外, 在破裂机制相同的情况下, 颗粒形状对堆石料的单粒强度影响不大。

(2) 从 Weibull 模量  $m$  的角度来看, 堆石料的形状越不规则, 其 Weibull 模量  $m$  值越小, 表明堆石料的单粒强度离散性越大, 反之颗粒形状越规则, 则 Weibull 模量  $m$  值越大。造成上述现象的原因在于, 形状特征决定了堆石料在单向压缩下受力状态, 若堆石料的形状特征越不规则, 则各堆石料的受力状态差异越大, 于是部分堆石料由于受力状态较好而具有较高的单粒强度, 而部分堆石料由于受力状态较差而单粒强度较低, 从而使得堆石料的峰值强度表现出明显的离散性, 即 Weibull 模量  $m$  值较小; 反之, 若堆石料形状十分规则, 相似性较高, 则堆石料的受力状态十分接近, 由于堆石料岩性相同,

材料强度较为接近, 因此各堆石料的峰值强度就基本一致, 离散性较小。

基于上述分析可以看出, 形状特征对堆石料的破裂机制和单粒强度的离散程度具有明显的影响, 因此, 数值试验中若仅采用简单规则形状的颗粒模型对堆石料进行模拟, 难以真实反映堆石料的破裂机制和单粒强度的分布规律。

## 7 结 论

(1) 堆石料内部缺陷含量随粒径增加而对其单粒强度产生的影响, 可通过堆石料模型细观黏结强度随粒径的减小进行等效模拟。

(2) 基于本文建立的数值模拟方法, 各粒径堆石料模型的单粒强度分布特征与试验结果基本吻合, 较为真实地反映了堆石料单粒强度的尺寸效应, 从而验证了本文模拟方法的可靠性与合理性。

(3) 堆石料的形状特征对其单粒强度分布规律具有重要影响, 颗粒形状越规则, 其单粒强度分布的 Weibull 模量越大, 即单粒强度的离散性越小, 反之单粒强度离散性越大。因此, 数值模拟中若不考虑堆石料形状的随机不规则性, 则难以真实模拟其单粒强度分布特征。

**致谢:** 本文的研究工作得到依泰斯卡(武汉)咨询有限公司的资助, 向其衷心的感谢! 另外, 大连理工大学海岸与近海国家重点实验室王峰博士提供了室内试验的原始数据, 这里也向其表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 迟世春, 王峰, 贾宇峰, 等. 考虑细观单粒强度的堆石料破碎特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1780—1785.  
CHI Shi-chun, WANG Feng, JIA Yu-feng, et al. Modeling particle breakage of rockfill materials based on single particle strength[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1780—1785.
- [2] 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.
- [3] ZHOU M J, SONG E X. A random virtual crack dem model for creep behavior of rockfill based on the subcritical crack propagation theory[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, 11(4): 827—847.
- [4] 杨贵, 许建宝, 刘昆林. 粗粒料颗粒破碎数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3301—3306.  
YANG Gui, XU Jian-bao, LIU Kun-lin. Numerical simulation of particle breakage of coarse aggregates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3301—3306.
- [5] ZHOU W, YANG L, MA G, et al. DEM analysis of the size effects on the behavior of crushable granular materials[J]. *Granular Matter*, 2016, 18(3): 1—11.
- [6] 周海娟, 马刚, 袁葳, 等. 堆石颗粒压缩破碎强度的尺寸效应[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2425—2433.  
ZHOU Hai-juan, MA Gang, YUAN Weir, et al. Size effect on the crushing strengths of rock particles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(8): 2425—2433.
- [7] MCDOWELL G R. Discrete element modelling of soil particle fracture[J]. *Géotechnique*, 2002, 52(2): 131—135.
- [8] CHENG Y P. Discrete element simulation of crushable soil[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 633—642.
- [9] LIM W L, MCDOWELL G R. The importance of coordination number in using agglomerates to simulate crushable particles in the discrete element method[J]. *Geotechnique*, 2007, 57(8): 701—705.
- [10] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18(3): 293—297.
- [11] LEE K L, FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1967, 4(1): 68—86.
- [12] 李杨, 余成学, 焦小亮. 堆石料碾压试验的颗粒流模拟新方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3029—3038.  
LI Yang, SHE Cheng-xue, JIAO Xiao-liang. New method of simulating rockfill compaction based on particle flow code[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(10): 3029—3038.
- [13] 张家发, 叶加兵, 陈劲松, 等. 碎石颗粒形状测量与评定的初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 343—349.  
ZHANG Jia-fa, YE Jia-bing, CHEN Jin-song, et al. A preliminary study of measurement and evaluation of breakstone grain shape[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 343—349.
- [14] 刘君, 刘福海, 孔宪京. 考虑破碎的堆石料颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 107—112.  
LIU Jun, LIU Fu-hai, KONG Xian-jing. Particle flow code numerical simulation of particle breakage of rockfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Supp.1): 107—112.