

DOI: 10.11779/CJGE201810002

堆石料剪切强度与变形的尺寸效应模拟

邵晓泉^{1, 2}, 迟世春^{*1, 2}, 陶勇³

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 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; 3. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 堆石料尺寸效应的研究对准确预测土石坝的强度与变形至关重要。但是受室内试验条件的限制, 能反映原型足尺级配料试样特征的三轴试验难以开展。通过对 10~40 mm 粒径范围内的古水玄武岩颗粒进行单粒强度试验, 分析了单粒强度的尺寸效应, 采用离散元方法对室内三轴试验的强度和变形进行模拟, 结果表明采用的模拟方法可以很好地重现室内缩尺级配料的特性。运用相似级配法将模拟的缩尺级配扩展到原型足尺级配料级配, 对原型足尺级配料试样的偏应力、体变和轴向应变关系进行模拟预测, 同时整理了不同尺寸试样的强度参数。研究成果为由室内缩尺试验参数推演原型足尺级配料试样的强度及变形参数提供了一种可能。

关键词: 堆石料; 三轴剪切试验; 单粒强度; 尺寸效应

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)10-1766-07

作者简介: 邵晓泉(1990-), 女, 博士研究生, 主要从事土石坝数值模拟研究工作。E-mail: shaoxqhfr@mail.dlut.edu.cn。

Numerical simulation of size effect on shear strength and deformation behavior of rockfill materials

SHAO Xiao-quan^{1, 2}, CHI Shi-chun^{*1, 2}, TAO Yong³

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Earthquake Engineering, School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The scale effect of rockfill materials is crucial to predicting the strength and deformation of earth-rockfill dams. Due to their large particle size and the experimental restrictions, large triaxial tests on full scale samples are seldom conducted. The size effect coefficient for single particle ranging from 10 to 40 mm in diameter is measured by single particle crushing tests. The discrete element method is adopted here, and the results show that this method can reproduce the strength and deformation of dam rockfill materials with scaled gradation well. The grain size distribution of the prototype samples is parallel to the scaled one, and the large samples are simulated. The strength parameters of samples with different sizes are studied. This work may offer a possible way to get the strength and deformation parameters for prototype samples from the laboratory results.

Key words: rockfill material; triaxial shear test; single particle strength; scale effect

0 引言

颗粒破碎是引起土石坝发生大变形的原因之一。随着中国土石坝实现 300 m 级的跨越, 对颗粒破碎引起的强度和变形特性研究显得尤为重要。目前研究者对堆石料的研究主要集中在单粒强度、三轴剪切、蠕变和湿化等室内缩尺级配料试样, 大尺寸试验受试验条件的限制难以开展^[1], 颗粒破碎情况也只能根据破碎前后的级配演化来推断^[2]。

Frossard 等将单颗粒强度与集合体剪切强度联系起来, 并通过分析前人三轴试验成果对剪切强度的演化规律进行验证^[3]。Ovalle 等对两种堆石料分别进行直径 250 和 1000 mm 的三轴剪切试验, 提出颗粒粒径

越大, 颗粒破碎越严重, 剪切强度越低, 其演化规律与 Frossard 提出的经验公式吻合较好^[4]。Zhou 等在 4 个粒组砂岩颗粒强度尺寸效应的基础上对两个尺寸的模型进行定性模拟, 结果表明强度并未表现出明显的尺寸效应, 高围压下体变具有明显的尺寸相关性^[5]。研究认为堆石料等粗粒土的单粒强度与粒径有较强的相关性, 而单粒强度又使集合体表现出一定的尺寸效应。目前单粒强度尺寸效应的表征方法主要有两种。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379029); 国家重点研发计划项目(2016YFB0201001)

收稿日期: 2017-06-20

*通讯作者: (E-mail: schchi@dlut.edu.cn)

一是基于单颗粒强度试验与受力研究推断颗粒破碎准则与强度分布规律。比如 Russell 等提出当颗粒遭受一系列外部点荷载作用时, 只要最大荷载达到极限条件颗粒就发生破碎^[6]。Bono 等^[7]和 Mcdowell 等^[8]认为颗粒破坏的临界条件是其八面体剪切应力达到极限值。Zhou 等提出当接触趋近于点或线荷载时, 张拉破坏会多于剪切破坏, 采用莫尔-库仑破坏准则来判断颗粒破碎情况更为合理^[5, 9]。不管采用何种破坏准则, 颗粒强度的分布规律主要是采用概率统计方法, Weibull 理论由于其具有一定的理论基础被广泛用来表征单粒强度的分布^[5, 7, 10-11], 其内置的尺寸参数可以用来表征不同粒径的颗粒强度。二是基于断裂力学, 当内部裂纹或缺陷贯穿颗粒就会发生破坏, 一般认为裂纹长度与颗粒粒径成正比, 通过引入裂纹扩展速度还可以进一步考虑时间效应^[12-13]。无论采用哪种思路, 如何确定单粒强度的尺寸效应是研究结果合理性的关键。

本文在前人研究的基础上, 参考第一种思路, 通过室内单颗粒强度试验对玄武岩的单粒强度尺寸效应进行分析, 然后采用数值模拟方法对室内不同围压下的缩尺坝坝级配料的偏应力、体变和轴向应变的演化曲线进行拟合, 最后对原型足尺筑坝料三轴试样的强度和变形规律进行模拟预测。

1 单颗粒强度的尺寸效应

1.1 单颗粒强度规律

直径为 d 的颗粒在力 F 的径向荷载作用下, 其所受劈裂应力可为^[14]

$$\sigma_c = \frac{F}{d^2} \quad , \quad (1)$$

其中, σ_c 为颗粒所受的劈裂应力, F 为颗粒受力, d 为颗粒直径。劈裂强度为颗粒破碎时的力除以颗粒直径的平方。

研究表明岩土这类准脆性材料的劈裂强度符合 Weibull 分布, 对直径为 d 的颗粒在劈裂应力 σ_c 下的破坏概率可以写为

$$P_f(\sigma_c, d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{d_0} \right)^{n_d} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad , \quad (2)$$

式中, σ_0 为粒径 d_0 的颗粒在破坏概率为 63% 时对应的劈裂应力, m 表征强度的离散性。 n_d 根据几何相似性取 1, 2 或 3^[15], 为强度的尺寸效应参数, n_d 越大, 尺寸效应越明显。

Lim 等研究者对岩土材料进行单颗粒强度试验时发现, 对单一粒组单颗粒强度符合 Weibull 分布, 但对不同粒径的同种材料, 运用 Weibull 内含的尺寸效应方程, 即 $n_d = 3$ 时拟合结果较差^[4, 16]。提出由于材料

矿物成分和破坏类型等原因, 直接按几何相似性选择 n_d 的值是不合适的, 同时验证了 Lee 提出的一定破坏概率下劈裂强度尺寸效应关系的合理性^[17], 关系式为

$$\sigma_{cf} \propto d^b \propto d^{-n_d/m} \quad . \quad (3)$$

其中 b 为负, 可通过试验结果拟合得到, 值越小, 颗粒强度的尺寸效应越明显。 n_d 不再是固定的整数, 它决定材料尺寸效应的强弱程度。根据 $b = -n_d/m$ 可求得 n_d 。表 1 为统计的文献中 m , n_d 和 b 的值。由表 1 可知, n_d 的取值范围为 [0.19, 2.96]。

表 1 文献中 m 、 n_d 和 b 的取值

Table 1 Values of m , n_d and b reported in literatures

材料	m	n_d	b	来源
Ballast A-F	2.06~3.42	1.12~2.24	-0.69~-0.40	Lim 等 ^[16]
Calcareous rockfill(CP)	2.18	0.63	-0.289	Ovalle 等 ^[4]
Quartzite shale rockfill(STV)	1.54	0.81	-0.53	
Leighton Buzzard sand			-0.357	Lee(1992) ^[17]
Oolitic limestone			-0.343	
Carboniferous limestone			-0.42	
Quartz sand	4.20	1.46	-0.35	Nakata 等 ^[18]
Feldspar sand	1.8	0.19	-0.11	
Quiou sand	1.5	3	-1.96	McDowell 等 ^[19]
大连石灰岩	2.59	3	-1.15	迟世春等 ^[20]

1.2 单颗粒强度试验

室内单颗粒强度的试验仪器为大连理工大学研制的 DYQ-1 单粒岩块强度测试仪, 最大加载能力为 60 kN。加载方式可以采用位移控制或力控制。试验材料为古水面板坝玄武岩堆石料^[2], 加载速率为 1 mm/min。采用定制的不同粒径的圆孔筛, 筛出 10~15, 15~18, 18~20, 20~22, 22~24, 24~26, 26~28, 28~30, 30~32, 32~34, 34~36, 36~38, 38~40 mm 共 13 组颗粒, 挑选 3 个方向差不多的颗粒, 每组不少于 32 个, 将颗粒浸泡 48 h 后置于单颗粒强度仪进行单颗粒强度试验。

由式 (1) 和 (3) 有 $F_{fav} \propto d^{b+2}$, 根据室内单颗粒试验, 统计 38~40 mm 破坏力在 0~20 kN 范围内的分布概率密度, 计算破坏荷载均值 F_{fav} 和标准差 $D(F_{fav})$, 并拟合破坏荷载均值和名义粒径的关系, 如图 1 所示, 得到系数 $b=-0.215$ 。

$$D(F_{fav}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_{fi} - F_{fav})^2}{N - 1}} \quad , \quad (4a)$$

$$F_{fav} = 0.0143d^{1.785} \quad , \quad (4b)$$

式中, F_{fi} 为第 i 个颗粒对应的破坏力, N 为测试的颗粒个数。

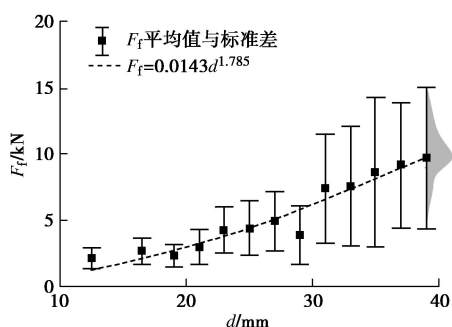


图1 颗粒直径与破坏力的关系

Fig. 1 Correlations between diameter and failure force

2 颗粒破碎的离散元模型

2.1 颗粒破碎强度准则

参考 Bono 等^[7]和 McDowell 等^[8]提出的, 假设单颗粒在多个外荷载作用下, 当其八面体剪切应力 τ_8 达到极限值 τ_{8L} 时颗粒破碎。采用的平均应力计算方法计算体积为 V^p 的颗粒 p 在 N_c 个接触力下的应力张量 σ_{ij} ,

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V^p} \sum_{c \in N_c} f_j^c l_i^c \quad (5a)$$

再由计算其八面体剪切应力 τ_8 值。

$$\tau_8 = \frac{1}{3} [3\sigma_{ij}\sigma_{ij} - \sigma_{ii}\sigma_{jj}]^{\frac{1}{2}} \quad (5b)$$

式 (5a)、(5b) 中, f_j^c 为接触点 c 处颗粒 p 受到接触力的 j 方向分量, l_i^c 为接触点 c 与颗粒 p 中心的连线支向量的 i 方向分量, 因为 τ_8 与劈裂应力 $\sigma_c = F/d^2$ 成比例, 所以 τ_{8L} 与颗粒直径 d 之间也满足 Weibull 尺寸效应关系^[7-8]。对直径为 d 的颗粒 p , Weibull 模量为 m , 参考粒径 d_0 , 63% 破坏概率对应的强度为 τ_{80} , 对任意直径 d , τ_{8L} 符合

$$P_f(\tau_{8L}, d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{d_0} \right)^{n_d} \left(\frac{\tau_{8L}}{\tau_{80}} \right)^m \right] \quad (6)$$

根据随机数生成方法, 任意颗粒 p 的 τ_{8L} 计算公式为

$$\tau_{8L} = \tau_{80} \left[-\ln(1-u) \left(\frac{d_0}{d} \right)^{n_d} \right]^{1/m} \quad (7)$$

式中, u 为 $[0, 1]$ 上的随机数, 需要指定的参数有 n_d , m , τ_{80} , d_0 。

2.2 颗粒替换模型与质量损失

颗粒破碎模型参考 Ciantia 等提出的替换方法。Ciantia 等认为采用球形区域 14 个内切 (apollonian packing) 小球替换, 最终保留 53% 的质量来模拟颗粒破碎是合适的^[11]。当单个颗粒的八面体剪切应力 τ_8 达到强度极限时, 计算大主应力方向, 替换时将图 2 (a)

中的初始排列球通过旋转使 3 个最大粒径球的球心形成的平面与大主应力方向垂直, 如图 2 (b) 所示。替换完成后, 将原始球除了单粒强度以外的全部属性, 比如密度、加速度、速度和位移等基本信息全部复制给新生成的小球, 单粒强度重新随机指定, 然后删除原始球, 这样就完成了颗粒破碎的替换过程。

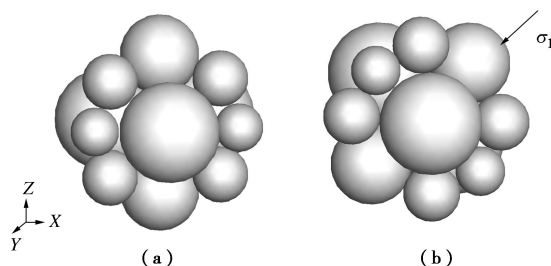


图2 颗粒破碎替换规则

Fig. 2 Replacement mechanism for particle crushing

虽然研究表明小颗粒对宏观力学性质的影响可以忽略, 但是在考虑级配的演化情况时需要考虑损失的质量。这里假设损失的质量符合分形分布, 如式 (8) 所示对损失的质量进行分配以保证级配演化的连续性。

$$\frac{M_{(L < d)}}{M_T} = \frac{d^{3-\alpha} - d_{\min}^{3-\alpha}}{d_{\max}^{3-\alpha} - d_{\min}^{3-\alpha}} \quad (8)$$

式中, α 为分形维数, 假定 $\alpha = 2.6$, M_T 为需要分配的总质量, $M_{(L < d)}$ 为颗粒尺寸小于 d 的颗粒质量, d_{\max} 为替换原始球的 14 个小球中最小球对应的直径, d_{\min} 为级配曲线中考虑的最小粒径, 取 0.074 mm。

3 接触模型与改进的围压模型

3.1 接触模型

接触模型采用 PFC 内置的滚动阻力模型, 该模型在线性接触模型的基础上, 对接触点处的相对弯曲运动进行限制^[21]。滚动阻力系数 μ_r 的物理意义如图 3 所示, 为颗粒在斜面上与自重达到极限平衡时对应的斜面倾角 β 正切值:

$$\mu_r = \tan \beta \quad (9)$$

滚动阻力刚度 k_r 和接触有效半径 \bar{R} 定义为

$$k_r = k_s \bar{R}^2 \quad (10a)$$

$$\frac{1}{\bar{R}} = \frac{1}{R^{(1)}} + \frac{1}{R^{(2)}} \quad (10b)$$

式中, $R^{(1)}$ 和 $R^{(2)}$ 分别为两接触实体的半径, 墙体的半径 $R = \infty$ 。

F_n 为接触处的法向力, 极限滚动阻力矩定义如下:

$$M_r^{\max} = \mu_r \bar{R} F_n \quad (11)$$

图 4 为抗滚动力矩与相对滚动角的关系, $\Delta \theta_r$ 为相对弯曲滚动角增量, 抗滚动力矩为

$$M_r = \begin{cases} M_r^* = (M_r)_0 - k_r \Delta \theta_r & (\|M_r^*\| \leq M_r^{\max}) \\ M_r^{\max} (M_r / \|M_r\|) & (\text{其他}) \end{cases} \quad (12)$$

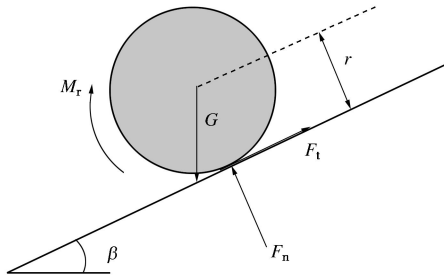


图 3 滚动阻力系数定义

Fig. 3 Definition of rolling resistance coefficient

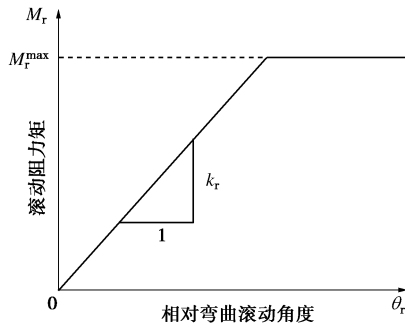


图 4 抗转动力矩与相对滚动角

Fig. 4 Correlations between rolling resistance moment and relative bend-rotation

3.2 改进的围压模型

为尽可能使数值模拟边界条件与室内三轴试验相符,前人进行了不少尝试,但都较大地增加了计算量^[22-23]。本文针对这一问题进行改进,在与柔性边界产生相似的效果的同时不会过大地影响计算效率。将上、下板和橡皮膜视为一个整体采用墙单元建立,并离散为一系列规则排列的三角形,具体如图 5 所示。橡皮膜展开为矩形面,上下两排节点分别与上下加载板共用,与试验时橡皮膜通过捆扎固定在加载板的情况一致。

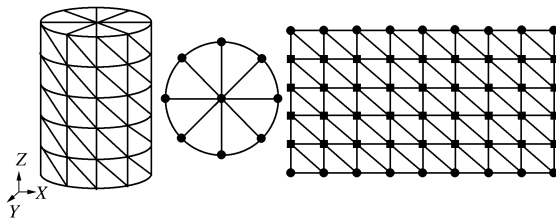


图 5 墙体细节图

Fig. 5 Details of wall

考虑堆石料常规三轴试验的破坏形式多为鼓状破坏,变形比较均匀,所以这里假设橡皮膜是均匀扩大或缩小的,即同一高程的节点在 xy 平面内运动速度大小相同,不同高程处橡皮膜受力偏离目标围压越大,运动速度越快。如图 6 所示,根据任意一圈橡皮膜上的受力 F 和法向接触刚度 k_n 可计算该圈橡皮膜的平均

响应速度 v_{xy} :

$$v_{xy} = \frac{\beta A}{\sum k_n \Delta t} \left(\frac{F}{A} - \sigma_3^{\text{required}} \right) \quad (13)$$

式中, $\sigma_3^{\text{required}}$ 为目标围压, A 为该圈橡皮膜的面积, $\sum k_n$ 为与橡皮膜接触颗粒的法向刚度总和, Δt 为运行时间, β 为保证伺服响应计算的稳定而引入的松弛因子,一般取 0.5。

围压是通过控制离散后橡皮膜的节点速度来实现的。对任一节点,速度为共节点的三角片对应的响应速度以面积为权的平均。

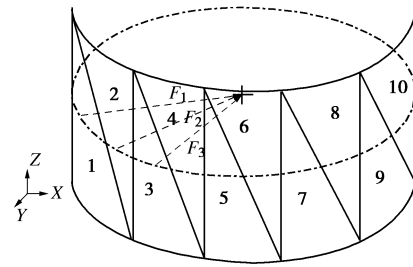


图 6 任意一圈橡皮膜的三角面分布与受力示意图

Fig. 6 Triangular distribution and forces on each facet for a given row of membrane

4 数值试验模拟

数值试样模拟的是贾宇峰等^[2]的三轴试验结果。不考虑制样过程中的颗粒破碎,模拟的缩尺级配料以制样后的级配(图 7 中的试验级配)为基础,采用等量替换法,得到粒径范围为 15~60 mm 的缩尺模拟级配。缩尺模拟试样尺寸与试验一致,为 $\Phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。通过相似级配法对缩尺模拟级配的曲线平移,得到模拟的原型足尺级配料试样的级配,粒径范围为 200~800 mm,试样尺寸为 $\Phi 4000 \text{ mm} \times 8000 \text{ mm}$ 。

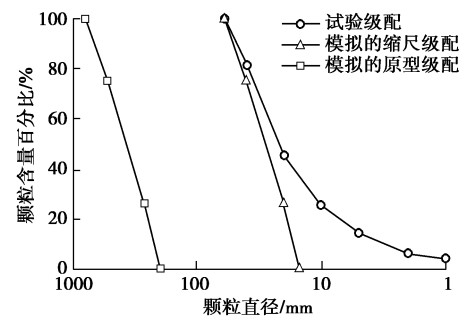


图 7 颗粒级配曲线

Fig. 7 Grain-size distribution curves

数值试样分 6 层碾压制备。首先在每层层高的 2 倍范围内生成满足相应级配的颗粒,用墙体匀速将颗粒压到指定高度范围,最后检查并调整该层颗粒的粒径使之满足指定的级配和孔隙率。制样完成后施加预固结围压为 30 kPa,初始孔隙率为 0.36。

颗粒密度为 2790 kg/m^3 ,法向刚度 k_n 与粒径 d 成

正比，法向和切向刚度比值恒定，参考粒径为 d_0 ，法向刚度为 k_{n0} ，切向刚度为 k_{s0} ，任意粒径 d 的法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s 为

$$k_n = \frac{k_{n0}d}{d_0} \quad , \quad (14a)$$

$$k_s = \frac{k_{s0}d}{d_0} \quad 。 \quad (14b)$$

摩擦系数 μ 和滚动阻力系数 μ_r 通过拟合确定。上、下加载板等分为28份，橡皮膜等分为27圈，上、下板的法向刚度与模型中颗粒的最大刚度相等，橡皮膜的法向刚度为加载板的0.1倍，切向刚度、摩擦系数和抗转动系数均为0.0。参考贾宇峰等^[2]三轴试验破碎级配演化规律，同时考虑计算效率，假定颗粒破碎的极限粒径为20 mm。由单粒强度试验可知玄武岩的尺寸效应系数 $b=-0.215$ ，即 $n_d/m=0.215$ 。模拟室内三轴试验时，考虑单粒强度试验是在筛分后人为选择的比较立体的颗粒，剔除了大量的片状和长条形的颗粒，这些颗粒由于形状的影响，会导致颗粒强度更加离散，所以模拟时不要求 m 值与试验完全一致，只要保证 n_d/m 的比值不变即可。剪切过程中保持围压偏差在1%以内，通过对缩尺级配料试样拟合500 kPa和1000 kPa围压下试样的应力、体变和轴向应变关系，得到细观参数如表2所示。

表 2 模拟选用的细观参数

Table 2 Micro-parameters for simulation

d_0 /mm	k_{n0} /(MN·m ⁻¹)	k_{s0} /(MN·m ⁻¹)	μ	μ_r	m	n_d	τ_{80} /MPa
50	70	60	0.42	1.8	0.95	0.204	35

5 数值模拟结果

5.1 室内试验与模拟结果对比

图8为缩尺级配料的数值模拟和试验的偏应力、体变与轴向应变关系对比图。由图可知数值模拟基本能表征不同围压下玄武岩的强度和变形特性。偏应力与轴向应变关系曲线和试验结果基本趋于一致，体变曲线与试验结果拟合稍差一些，这是由于不适合的颗粒破碎替换机制或者颗粒组构与真实情况的差异导致。

图9为分别为剪切结束后缩尺模拟试样与试验试样的粒组颗粒百分含量分布图。由图9可以看出模拟和试验的粒组含量演化趋势大致相同，即剪切过程中大体上是40~60 mm和20~40 mm两粒组的颗粒减小，而小于20 mm的粒组颗粒增加。试验中的大粒径粒组颗粒的破碎情况较模拟的严重，以40~60 mm粒组为例，试验下500 kPa时就发生了大量的破碎，降幅达39%，且随着围压的增加，颗粒破碎量越大，2000 kPa时达到降幅达到47%，缩尺模拟中500 kPa围压下降幅

仅为12%，2000 kPa的降幅为28%。统计不同围压下的Hardin相对破碎参量 B_r ，如表3所示。试验与缩尺模拟的 B_r 值总体上是随着围压的增加而增大，缩尺模拟的 B_r 值较试验偏小。总体来说模拟结果可以较好地描述不同围压下破碎变形关系。

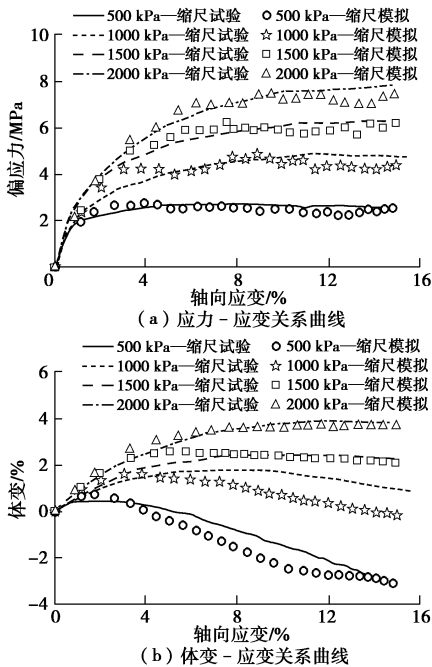


图 8 缩尺料试验与数值模拟的应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of experimental and numerical tests for reduced scale materials

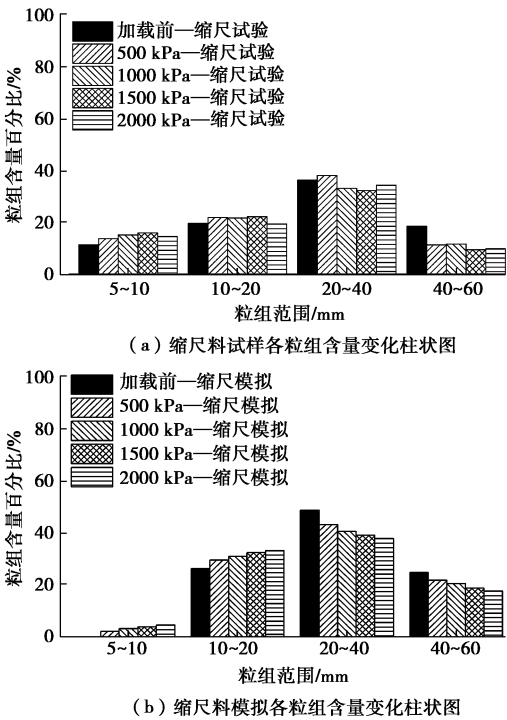


图 9 试验前后试验与模拟的粒组含量变化

Fig. 9 Variation of particle fraction of experimental and numerical samples before and after tests

表 3 缩尺试验与模拟的 Hardin 相对破碎参量

Table 3 Relative breakage parameters for reduced scale experiment and DEM simulation

围压/kPa	500	1000	1500	2000
室内试验	0.025	0.051	0.066	0.070
数值模拟	0.029	0.042	0.053	0.062

5.2 原型足尺级配料试样预测

图10为不同围压下缩尺试验与足尺模拟的偏应力、体变和轴向应变关系对比图。由图可知足尺模拟的应力应变关系曲线明显低于缩尺试样的，足尺模拟表现出更大的剪缩体积变形。足尺级配料试样在500 kPa时表现出轻微的剪胀特性，随着围压的增加，破碎更加严重，表现为绝对的剪缩体积变形。

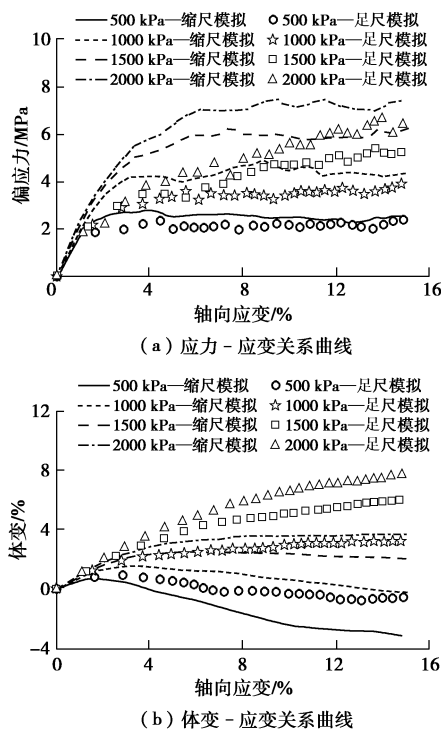


图 10 缩尺模拟与足尺模拟堆石料应力 - 应变 - 体变关系的比较

Fig. 10 Stress-strain-volumetric strain curves for simulation of reduced and full scale rockfills

图11为不同围压下缩尺试验与足尺级配料模拟试样 B_r 值的累积变化。轴向应变为零时对应的是固结完成时的 B_r 值。由图可知，随着围压增加，固结产生的破碎量逐渐增加，加载初期颗粒破碎量较大， B_r 值增加较快。随着加载的进行，颗粒破碎量逐渐减少， B_r 值也趋于稳定。缩尺试样的破碎量低于原型试样，且随着围压的增加， B_r 曲线差距越来越小，可以预计当围压增加到一定值时， B_r 将达到一个极限值，破碎趋于稳定。

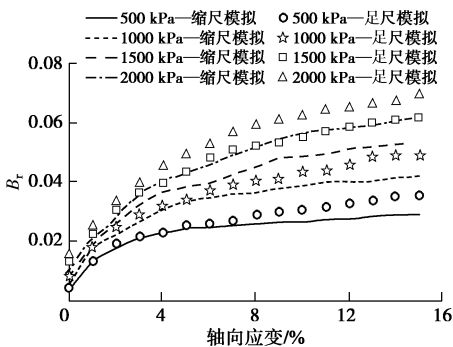


图 11 缩尺和足尺模拟三轴试验过程中的相对破碎参量比较
Fig. 11 Relative breakage parameters for reduced and full scale rockfills during triaxial tests

表4为整理的室内试验、模拟的缩尺和足尺级配料峰值偏应力和部分EB强度参数汇总表，不同围压下的室内试验与缩尺级配料模拟的峰值偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 比较接近，可以认为缩尺级配料的模拟能很好地反映室内三轴试验的强度特性。不同围压下足尺模拟的强度与Frossard等^[3]提出的剪切强度预测公式计算结果较为一致。在相同围压下，原型足尺级配料试样的单粒强度低于缩尺级配料试样，颗粒破碎更严重，导致其偏应力增长缓慢， K 值降低显著。足尺级配料模拟与缩尺模拟相比，其初始模量较小，抗剪强度小，变形大，摩擦角也有所降低。整理出的 K 和 n 值可以为室内试验参数推演到原型足尺级配料试样的大坝参数反演提供一定的参考。

表 4 抗剪强度参数汇总

Table 4 Shear strength parameters

类型	σ_3 /MPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ /MPa	K	n	φ /($^\circ$)	c /MPa	φ_0 /($^\circ$)	$\Delta\varphi$ /($^\circ$)
室内 试验	0.5	2.8	2011	0.24	38.8	0.3	54.1	9.6
	1.0	4.8						
	1.5	6.3						
	2.0	7.9						
缩尺 模拟	0.5	2.8	2068	0.24	37.2	0.37	55.4	11.1
	1.0	4.9						
	1.5	6.2						
	2.0	7.4						
原型 模拟	0.5	2.4	956	0.24	35.8	0.26	51.8	10.3
	1.0	3.8						
	1.5	5.4						
	2.0	6.6						

6 结 论

本文在室内单颗粒强度和三轴试验数据的基础上对原型足尺级配料试样的偏应力、体变和轴向应变关系曲线进行模拟预测，得到以下 4 点结论。

(1)玄武岩颗粒强度可以采用 Weibull 模型表征，但是 n_d 应根据单粒强度试验拟合确定，依据几何相似性得到的颗粒强度尺寸效应会偏大。

(2)离散元模拟方法能很好地反映室内三轴试验

的强度和变形特性。

(3)与缩尺级配料模拟相比,原型足尺级配料试样模拟的初始刚度低,峰值偏应力低,压缩变形大。对邓肯-张参数进行整理,可以为工程应用提供一定的参考。

(4)缩尺级配料模拟的体变曲线与试验还是有一定的差距,这是不合适的破碎机制导致的。今后可以进一步研究单颗粒破碎准则,使模拟结果更贴近真实情况。

参考文献:

- [1] 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): 1941 - 1947. (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): 1941 - 1947. (in Chinese))
- [2] 贾宇峰, 王丙申, 迟世春. 堆石料剪切过程中的颗粒破碎研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9): 1692 - 1697. (JIA Yu-feng, WANG Bing-shen, CHI Shi-chun. Particle breakage of rockfill during triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1692 - 1697. (in Chinese))
- [3] 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.
- [4] OVALLE C, FROSSARD E, DANO C, et al. The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data[J]. Acta Mechanica, 2014, **225**(8): 2199 - 2216.
- [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] RUSSELL A R, WOOD D M, KIKUMOTO M. Crushing of particles in idealised granular assemblies[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2009, **57**(8): 1293 - 1313.
- [7] DE BONO J P, MCDOWELL G R. The fractal micro mechanics of normal compression[J]. Computers and Geotechnics, 2016, **78**: 11 - 24.
- [8] MCDOWELL G R, DE BONO J P. On the micro mechanics of one-dimensional normal compression[J]. Géotechnique, 2013, **63**(11): 895 - 908.
- [9] ZHOU W, YANG L, MA G, et al. Macro-micro responses of crushable granular materials in simulated true triaxial tests[J]. Granular Matter, 2015, **17**(4): 497 - 509.
- [10] CIANTIA M O, ARROYO M, BUTLANSKA J, et al. DEM modelling of cone penetration tests in a double-porosity crushable granular material[J]. Computers and Geotechnics, 2016, **73**: 109 - 127.
- [11] CIANTIA M O, ARROYO M, CALVETTI F, et al. An approach to enhance efficiency of DEM modelling of soils with crushable grains[J]. Géotechnique, 2015, **65**(2): 91 - 110.
- [12] ALONSO E E, TAPIAS M, GILI J. Scale effects in rockfill behaviour[J]. Géotechnique, 2012, **2**(3): 155 - 160.
- [13] TAPIAS M, ALONSO E E, GILI J. A particle model for rockfill behaviour[J]. Géotechnique, 2015, **65**(12): 975 - 994.
- [14] JAEGER J C. Failure of rocks under tensile conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1967, **4**(2): 219 - 227.
- [15] BAŽANT Z P, PLANAS J. Fracture and size effect in concrete and other quasi brittle materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [16] LIM W L, MCDOWELL G R, COLLOP A C. The application of Weibull statistics to the strength of railway ballast[J]. Granular Matter, 2004, **6**(4): 229 - 237.
- [17] LEE D M. The angles of friction of granular fills[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1992.
- [18] NAKATA Y, HYDE A F L, HYODO M, et al. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test[J]. Géotechnique, 1999, **49**(5): 567 - 583.
- [19] 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.
- [20] 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. (in Chinese))
- [21] AI J, CHEN J F, ROTTER J M, et al. Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations[J]. Powder Technology, 2011, **206**(3): 269 - 282.
- [22] DE BONO J, MCDOWELL G, WANATOWSKI D. Discrete element modelling of a flexible membrane for triaxial testing of granular material at high pressures[J]. Géotechnique, 2012, **2**(4): 199 - 203.
- [23] CHEUNG G, O'SULLIVAN C. Effective simulation of flexible lateral boundaries in two-and three-dimensional DEM simulations[J]. Particuology, 2008, **6**(6): 483 - 500.