

颗粒形状变异对砂性类岩堆体地层宏观力学性能及变形特征的影响研究

齐兵¹, 谈嘉山¹, 李文¹, 欧阳汛¹, 高晓耕², 黄昕², 张子新²

¹中电建路桥集团有限公司, 北京

²同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

Email: 1246539575@qq.com

收稿日期: 2021年7月8日; 录用日期: 2021年7月30日; 发布日期: 2021年8月6日

摘要

类岩堆体既不属于岩体, 也不属于土体, 且不同的类岩堆体围岩在机械开挖或爆破开挖扰动下的力学响应不同。本文针对典型的非连续介质—砂性类岩堆体, 通过离散元数值试验研究了颗粒形状变异对其宏观力学性能及变形特征的影响规律。结果表明: 颗粒形状越扁, 砂性类岩堆体的整体抗压缩能力越弱, 在相同的围压下会被压缩得更密, 整体强度也有一定程度的提高; 颗粒凹凸性越大, 砂性类岩堆体的整体抗压缩能力越强, 在相同的围压下更难被压密, 凹凸性指数对整体强度几乎没有影响。

关键词

颗粒形状, 离散单元法, 类岩堆体, 变形特征, 力学性能

Effects of Grain Shape Variation on the Macro Mechanical and Deformation Properties of Sandy Talus-Type Medium

Bing Qi¹, Jiashan Tan¹, Wen Li¹, Xun Ouyang¹, Xiaogeng Gao², Xin Huang², Zixin Zhang²

¹POWERCHINA Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing

²Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: 1246539575@qq.com

Received: Jul. 8th, 2021; accepted: Jul. 30th, 2021; published: Aug. 6th, 2021

文章引用: 齐兵, 谈嘉山, 李文, 欧阳汛, 高晓耕, 黄昕, 张子新. 颗粒形状变异对砂性类岩堆体地层宏观力学性能及变形特征的影响研究[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(8): 1040-1055. DOI: 10.12677/ag.2021.118100

Abstract

The talus-type medium belongs to neither rock nor soil categories. Different types of talus media will behave differently subject to either mechanical or explosive excavation. Of the talus media, the sandy type talus is a typical discontinuous medium. This study investigated the effects of shape variation on the macro mechanical and deformation properties of sandy talus-type medium using the element modeling (DEM). The simulation results show that the overall compressive rigidity decreased with increasing elongation, while the overall strength increased with increasing elongation under the same confining pressure. The sample was compacted more densely as elongation increased. The compressive increased and it was more difficult for the sample to be compacted. Nevertheless, the convexity did not show obvious influence on the sample overall strength.

Keywords

Grain Shape, Discrete Element Modeling, Talus-Type Medium, Deformation Characteristics, Mechanical Behavior

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

类岩堆体一般指岩土混合体,组成物质复杂,粒径跨度大,呈碎裂、松散状,节理、裂隙极其发育,自稳能力差,且容易受到地下水的影响,在我国红土高原的云南地区分布极为广泛,属于特殊软弱围岩体。类岩堆体既不属于岩体,也不属于土体,且不同的类岩堆体围岩在机械开挖或爆破开挖扰动下的力学响应不同。基于类岩堆体的特征,通常可将其划分为类土型岩堆体、类岩型岩堆体和土石混合岩堆体。其中类土型岩堆体,尤其是砂土型类岩堆体是一种典型的非连续介质,其宏观力学性能及变形特征与颗粒形状密切相关,迫切需要进一步研究。

不论是宏观还是细观层面,颗粒形状对岩土体的力学性能有着重要影响,为此,许多学者研究了如何较为简单客观地得到真实颗粒的形状参数,在将颗粒形状参数量化之后,国内外的学者围绕此点使用现场原位试验、室内模型试验以及数值实验等进行了诸多研究[1]-[8]。

Xiao 等[1]通过对塔城的堆石料开展了一系列大型三轴压缩试验,测定堆石料剪切过程中颗粒破碎量计算得到相对破损指数,研究其对摩擦角、模量和变形的影响。结果显示颗粒的分形维数与孔隙率和围压的对数呈线性关系。马丽琴[2]研究了碎石颗粒大小及形态特征对混合料强度的影响,选用不同的圆度、扁平率等形状指标进行 CBR 试验,结果发现集料的 CBR 值随碎石的扁平率增大而减小,随碎石圆度的增大而增大。赵书辉等[3]扫描了三种不同形状的粗砂进行室内直剪试验,探究颗粒形状对粗砂抗剪强度的影响。结果表明四种颗粒形状参数敏感性由大到小依次为:长宽比 > 扁平度 > 磨圆度 > 球度,粗砂颗粒形状愈规则,峰值内摩擦角就愈小,剪切后期颗粒间滑动摩擦就愈小。Guo 等[4]使用三维离散单元法(DEM)对各向异性颗粒材料进行了排水/不排水剪切试验,研究其细观力学特性,结果显示试件的整体抗剪强度中占据主导地位。Luo [5] [6]选取福建土、玻璃珠以及碎玻璃珠三种不同形状的颗粒材料,将其按不同比例混合,微观尺度上使用激光扫描技术得到颗粒的细长比、圆度和凸度,将这三个

形状参数取平均作为颗粒的新形状指数,进行了宏观和微观试验,证明了颗粒形状会影响整体力学响应、应力空间和体积应变。Yang [9]随后做了进一步的室内试验来研究颗粒级配的影响,结果发现在给定相似条件下,临界状态摩擦角与级配无关,而在给定级配下,临界状态摩擦角与颗粒形状有很大关系,其他研究还发现,相同孔隙比和围压条件下,级配良好的土比均匀级配土更容易液化。Tsomokos [10]研究了颗粒形状和棱角性指数对砂土不排水剪切特性的影响,使用四种不同形状相同级配的均匀砂进行不排水剪切试验,结果发现圆形颗粒在达到峰值偏应力后剪应力变小,而棱角状颗粒表现出稳定的响应,在达到瞬时峰值后强度持续增加。Keramatikerman 等[11]使用静三轴压缩试验研究了颗粒形状的影响,用圆度(R)、球度(S)和规则度(ρ)描述三种不同形状的砂颗粒,结果表明碎砂和混合砂表现出了剪胀性,而天然砂表现出应变软化收缩行为。Igwe 等[12]制备了三种不同级配的硅砂样品,使用环形剪切仪研究了粒径分布对硅砂力学性能的影响,结果表明相同应力条件下,级配良好的试件比其他试件具有更高的峰值和稳态强度,均匀系数越高,抗剪强度越高,级配不良的砂土不仅在破坏后容易强度降低,其稳态强度也很容易降到零。

综上,国内外研究成果虽然考虑了颗粒形状,但在改变颗粒形状的室内模型试验中只得到了定性的结论,缺乏定量结果和细观力学结构的分析;且在数值模拟中采用的形状参数单一,较难反映颗粒的复杂形状特征。本论文基于室内单元体试验,考虑细长比 AR 和凸度 C 两个形状参数对砂土强度和变形特性的影响,开展数值试验,通过建立宏观应力应变参数与细观力学指标的关系,明确颗粒形状对砂性岩堆体物理力学性质的影响机制。

2. 数值模型建立方法

2.1. 形状参数选取

土体颗粒形状定量表征方法有多种,为了综合描述颗粒的不规则形状,揭示颗粒形状对砂土宏观的力学性能以及变形性能的影响规律,本文选取两个被广泛应用的形状定量表征指标:细长比 AR (Aspect Ratio)和凹凸度 C (Convexity)。其中细长比的定义公式为[10]:

$$AR = \frac{D^{F \min}}{D^{F \max}} \quad (1)$$

式中 $D^{F \min}$ 代表与颗粒外轮廓相切平行线之间的最短距离, $D^{F \max}$ 代表与颗粒外轮廓相切平行线之间的最长距离。凹凸度表示为[11]:

$$\text{Convexity} = \frac{A}{A+B} \quad (2)$$

式中: A 表示颗粒的几何面积, B 表示颗粒凹陷区域的几何面积,也可以用颗粒凸包的面积与颗粒面积做差得出。考虑真实土体颗粒形状各向异性,采用 Luo 等[5]的试验作为标定参考,使用福建砂测得的 AR 和 C 两个形状参数统计如图 1 和图 2 所示。

2.2. 颗粒团簇单元构建

考虑到计算机的算力,如果用几十个圆去近似拟合一个不规则形状的砂土颗粒,那相比于圆颗粒模型,同等大小的模型盒将使用几十倍的颗粒数量。如果一个由圆颗粒组成的模型盒有 5 万个颗粒,那颗粒形状精细化建模得到的模型盒将有百万计的颗粒数,以现在的计算机算力还无法处理这么多的颗粒数量,以往的学者大多使用圆颗粒进行模型简化也正是因为这个原因。

为了同时考虑颗粒细长比 AR 和凹凸性 C 的影响,也兼顾计算机的运算速度,本论文构建了四颗粒模型,即一个颗粒团簇(clump)仅由 4 个圆颗粒粘结构成,位置分布呈矩形结构,如图 3 所示。

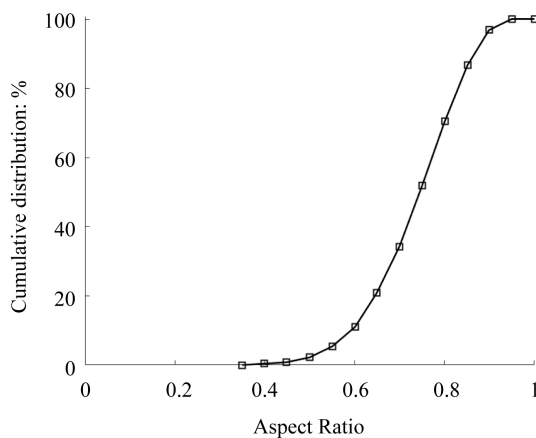


Figure 1. Cumulative distribution of shape parameter *AR* for Fujian sand

图 1. 福建砂 *AR* 形状参数累积分布图

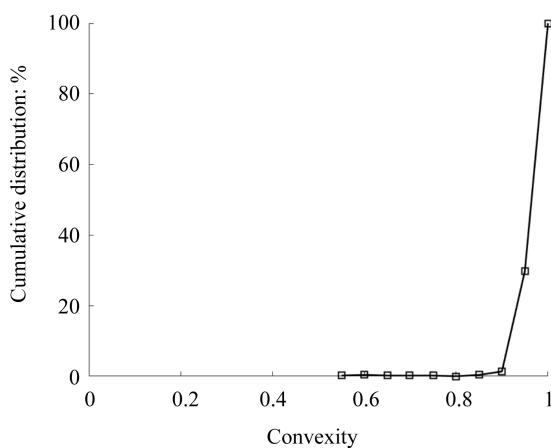


Figure 2. Cumulative distribution of shape parameter *C* for Fujian sand

图 2. 福建砂 *C* 形状参数累积分布图

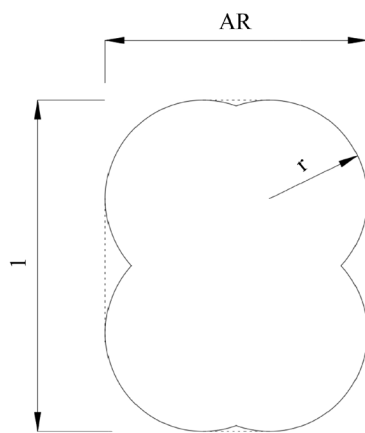


Figure 3. Illustration of the four-grain model

图 3. 四颗粒模型示意图

建模过程为：首先确定颗粒细长比 AR ，构建出一个长宽比等于 AR 的矩形，然后在其内部四个顶点附近做四个内切圆，这样改变内切圆半径的时候，颗粒细长比 AR 不会改变。然后根据颗粒凹凸性 C ，用下式方程求解出需要的小圆半径 r [11]：

$$\frac{AR - (4 - \pi)r^2 - 2 \left[r(AR - 2r) - \pi r^2 \frac{90 - \theta_1}{180} - \frac{1}{2} r^2 \sin 2\theta_1 \right] - 2 \left[r(1 - 2r) - \pi r^2 \frac{90 - \theta_2}{180} - \frac{1}{2} r^2 \sin 2\theta_2 \right]}{AR - (4 - \pi)r^2} = C \quad (3)$$

式中， $\theta_1 = \arccos \frac{AR - 2r}{2r}$ ， $\theta_2 = \arccos \frac{1 - 2r}{2r}$ 。

设置好某形状的颗粒簇基本单元后，在 PFC 软件中 `clump` 建模时使用 `diameter` 命令，并设置好对应的圆颗粒直径，软件即可自动将颗粒簇的尺寸等比例放缩，最终建出的颗粒模型将与目标直径的圆颗粒有着相同的面积。

根据 Luo [5] 等室内试验用到的福建砂 AR 以及 C 的累计分布图，做出 5 组不同形状的颗粒簇，如图 4 所示，分别代表 20% 的颗粒总数。

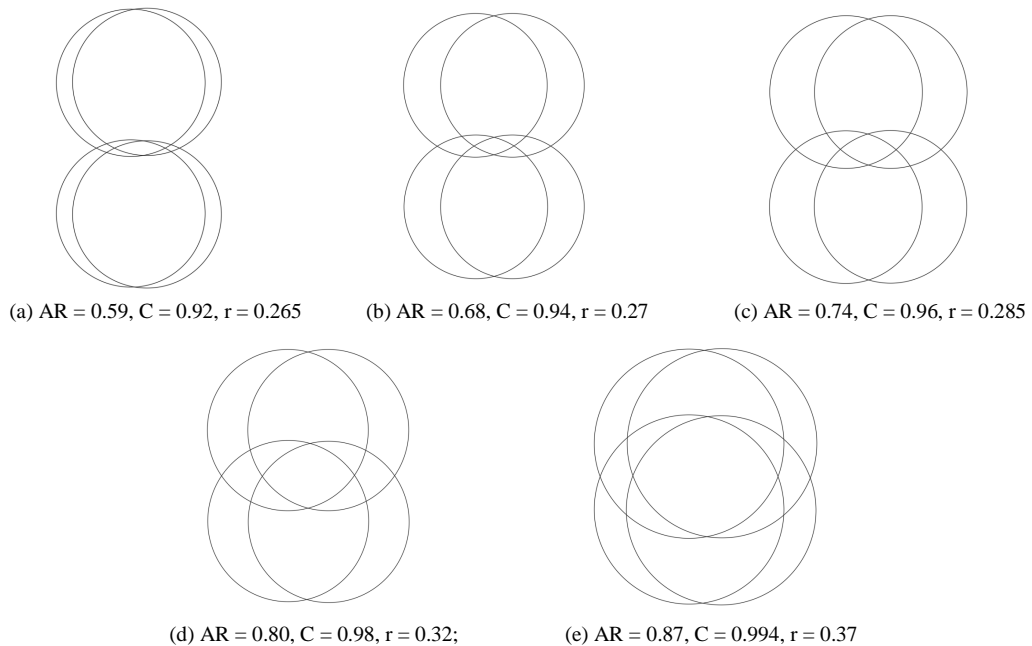


Figure 4. The five grain shape parameters used in the calibration
图 4. 标定试验所用五种颗粒形状图

为了得到形状参量对力学特性的影响，除了标定的砂性地层外，还改变了 AR ， C 参数，做出了多组不同形状的颗粒单元，如表 1 和图 5 所示。

必须指出的是，四颗粒模型也有其局限性，只有 $AR > 0.5$ 以及 C 较接近 1 的时候，关于内切圆半径 r 的方程才有解，且 AR 越接近 0.5，让方程有解的 C 参数范围也越小，不过从福建土这一天然土颗粒的 AR ， C 累积分布图可以看到， AR 参数和 C 参数极端的情况几乎不存在，大部分的类土岩堆体颗粒都在四颗粒模型的模拟范围之内。因此，本文的研究颗粒形状参数都在 $0.6 \leq AR \leq 1.0$ 和 $0.95 \leq C \leq 1.0$ 范围内进行变化，这也与类土岩堆体砂性地层的形状参数分布较为吻合。

Table 1. Summary of the grain shape parameters
表 1. 颗粒单元形状参数汇总

编号	AR	C	r
AR1C1	0.572	0.95	0.286
AR2C1	0.70	0.95	0.276
AR4C1	0.85	0.95	0.275
AR6C1	1.0	0.95	0.29
AR2C2	0.7	0.97	0.302
AR4C2	0.85	0.97	0.301
AR6C2	1.0	0.97	0.317
AR2C3	0.7	0.99	0.35
AR4C3	0.85	0.99	0.346
AR5C3	0.92	0.99	0.355
AR6C3	1.0	0.99	0.363
AR3C4	0.77	0.996	0.385
AR4C4	0.85	0.996	0.385
AR5C4	0.92	0.996	0.39
AR6C4	1.0	0.996	0.40

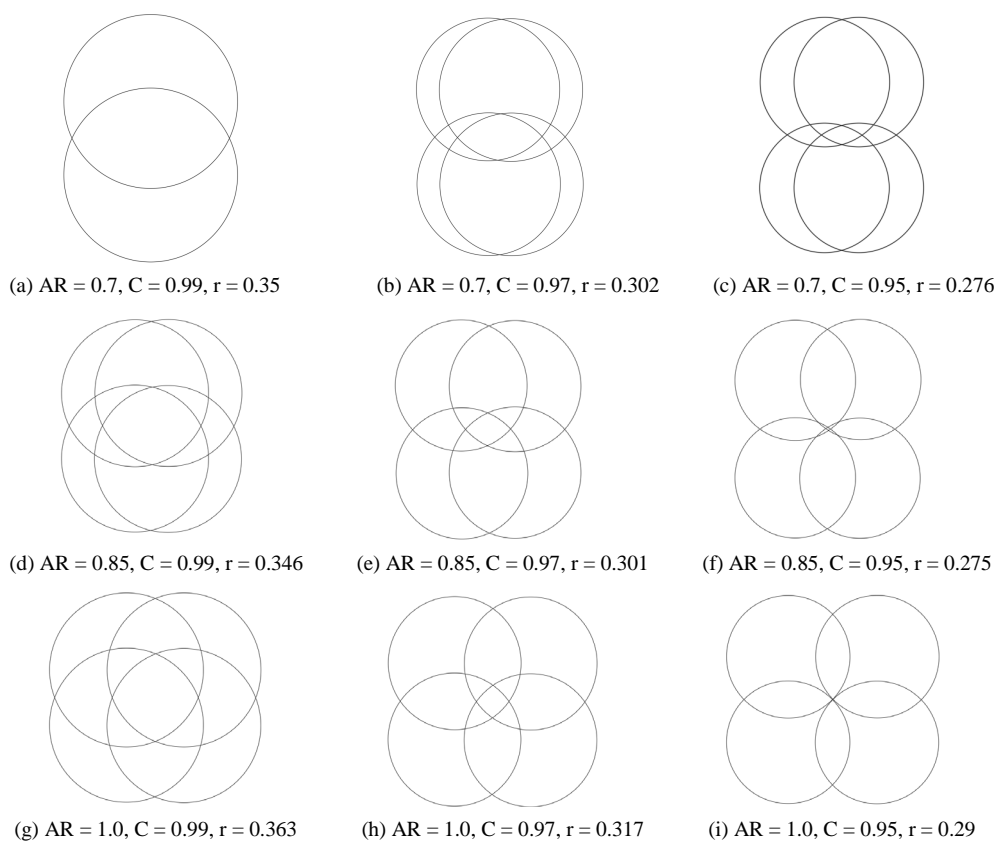


Figure 5. Grain shape adopted in the parametric sensitivity study

图 5. 敏感性分析中所用不同颗粒形状图

2.3. 接触本构模型选取

本文建模使用的接触本构模型是 PFC 软件内置的本构模型之一：滚动阻力线性模型，这是一个以线性模型为基础拓展而来的本构模型(图 6)。

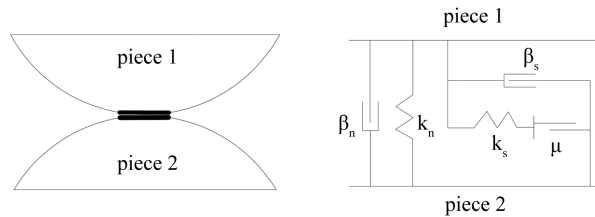


Figure 6. Illustration of the linear contact model
图 6. 线性接触模型示意图

线性模型假设了模型颗粒之间的接触力与相对位移之间的线性关系，相当于在接触位置放置了一个切向和一个法向两个弹簧，力 - 位移满足胡克定律。只要设置好颗粒的刚度属性，两颗粒接触就像弹簧串联，其接触的切向刚度和法向刚度就能通过如下公式计算获得[13] [14] [15]：

$$k_n = \frac{k_n^{(1)} \cdot k_n^{(2)}}{k_n^{(1)} + k_n^{(2)}} \quad (4)$$

$$k_s = \frac{k_s^{(1)} \cdot k_s^{(2)}}{k_s^{(1)} + k_s^{(2)}} \quad (5)$$

上式中， $k_n^{(1)}$ 、 $k_n^{(2)}$ 分别是颗粒 1 和 2 的法向刚度属性， k_n 为两颗粒接触的法向刚度， $k_s^{(1)}$ 、 $k_s^{(2)}$ 分别是颗粒 1 和 2 两颗粒的切向刚度属性， k_s 为两颗粒接触的切向刚度。

滚动抵抗线性模型则是在线性模型的基础上，新设了一个滚动摩擦系数，当滚动抵抗力矩超过一定限值时，滚动抵抗力矩不再继续提升，具体公式如下[8]：

$$M^r = \begin{cases} M^r, & \|M^r\| \leq M^* \\ M^* \left(M^r / \|M^r\| \right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$M^* = \mu_r \bar{R} F_n^l \quad (7)$$

式中 M^* 是最大滚动抵抗力矩， μ_r 是滚动摩擦系数， \bar{R} 是接触有效半径，通过接触两端颗粒的半径倒数和再取倒数求得， F_n^l 是法向接触力， M^r 为最终的滚动抵抗力矩。

2.4. 试样生成及加载

由于是使用二维模型模拟三轴试验，模型边界选择可平移的四个 wall 单元构成一个矩形区域，横向宽度 71.1 mm，竖向高度 142.2 mm。

试样生成方法选用重力沉积法，即让颗粒簇在整个矩形区域内随机生成，赋予颗粒刚度和重力，让颗粒簇在重力场作用下作自由落体运动，最终沉积在试样盒的底部，这样的生成方法可以让颗粒随机分布在整个模型空间内，且与实验室制样过程十分近似。

颗粒的半径按 Luo 等[5]的室内试验测得的级配曲线设置，如图 7 所示。

具体建模步骤如下：

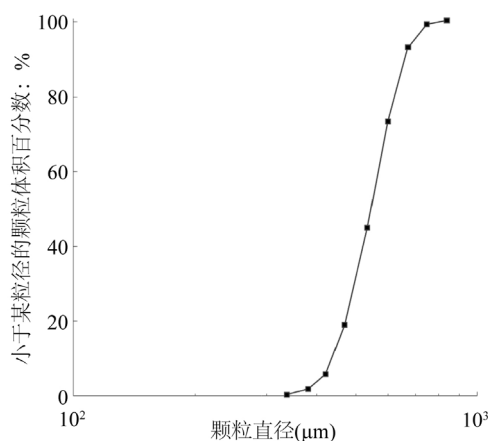


Figure 7. Cumulative distribution curve of the AR parameter

图 7. AR 参数累积分布图

(1) 分五次填充不同形状(表 1)的颗粒, 每次填充 $(1 - \text{孔隙比}) \times 20\%$ 试样盒体积的颗粒, 粒径按照级配曲线分布;

(2) 设置墙体刚度和颗粒刚度, 设置接触本构模型, 墙体刚度远大于颗粒刚度, 无摩擦;

(3) 设置重力, 添加重力场;

(4) 循环, 让试样颗粒自由扩散、堆积, 有些 clump 重复面积过大, 互相嵌套, 受力保持一个平衡, 无法通过扩散堆积分离, 需删除堆叠重复的颗粒;

(5) 设置目标围压, 每个时步计算颗粒作用在墙体上的力, 计算该力和目标围压之间的差, 以此定义墙体运动速度, 循环直至围压稳定;

(6) 计算围压稳定后的孔隙比, 若当前孔隙比大于目标给定的孔隙比, 下调扩散、堆积时的摩擦系数, 反之则下调摩擦系数;

(7) 保持水平围压不变, 撤去竖直围压, 设置上下两个墙体一个恒定向中心的加载速度, 加载过程中每 1% 遍历输出所有颗粒、接触的数据, 直至整体试样达到 30% 轴应变。

最终建立模型如图 8 所示。

模型中的颗粒簇均为四颗粒模型, 共 36928 个颗粒簇(clump), 147712 个圆颗粒(pebble)。

2.5. 参数标定流程

参数标定分为可调参数和不可调参数, 其中颗粒和模型盒的几何尺寸、颗粒密度、固结围压、初始孔隙度、压缩速率等, 主要参考 Luo 等[5]的室内试验及现有文献常识取了一个合理值, 在之后标定流程中不再更改, 具体见表 2 取值。

可调参数包括颗粒刚度、摩擦系数、转动摩擦系数、阻尼等, 通过与室内试验应力应变曲线和体积应变曲线匹配。参数标定时, 不可调参数不做更改, 当进行一轮试样生成及加载流程后, 若偏应力 - 轴应变曲线和体积应变 - 轴应变曲线无法和室内试验的结果对应时, 则微调可调参数, 直至两条曲线匹配上室内试验的结果。最终标定完成的参数如表 3。

3. 结果分析及讨论

3.1. 应力 - 应变曲线与试验应力 - 应变曲线对比

数值模拟应力 - 应变曲线与试验应力 - 应变曲线对比如图 9 和图 10 所示。在刚进入剪切阶段时, 数

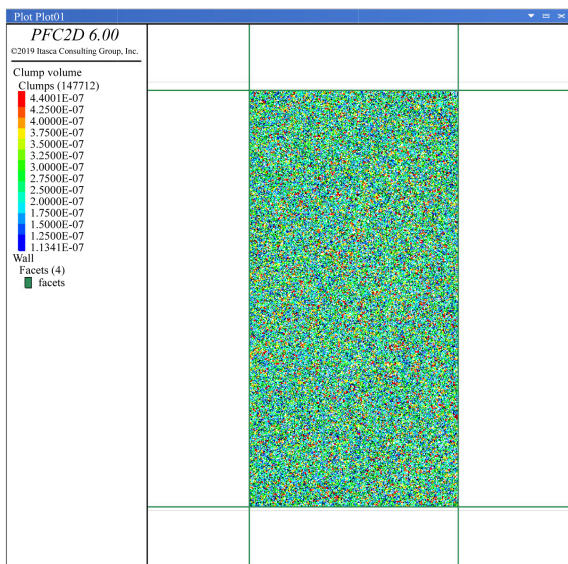


Figure 8. The generated model in PFC2D

图 8. PFC2D 生成模型示意图

Table 2. Non-calibratable parameters

表 2. 不可调标定参数表

参数	数值
颗粒密度(kg/m ³)	2640
初始孔隙度	0.2
固结围压(kPa)	500
压缩速率(m/s)	0.1
颗粒粒径(μm)	380~468 (20%)
	468~521 (20%)
	521~568 (20%)
	568~623 (20%)
	623~749 (20%)

Table 3. Calibratable parameters

表 3. 可调标定参数表

参数	数值
颗粒法向刚度(Pa)	2e9
颗粒切向刚度(Pa)	1.333e9
颗粒摩擦系数	0.5
颗粒转动摩擦系数	0.5
颗粒阻尼	0.5
墙体法向刚度(Pa)	1e12
墙体摩擦系数	0

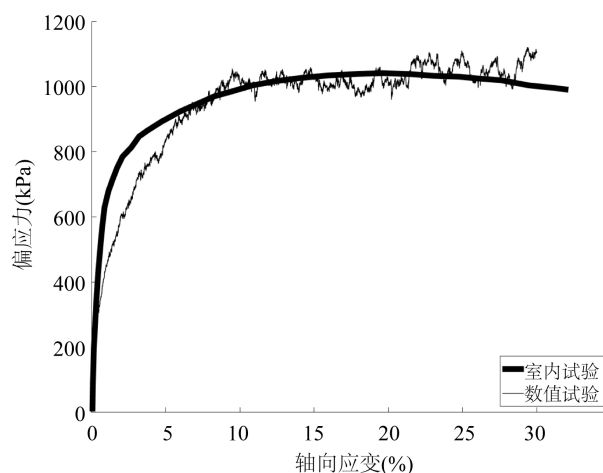


Figure 9. The calibrated deviatoric stress-axial strain curve
图 9. 标定偏应力 - 轴应变曲线图

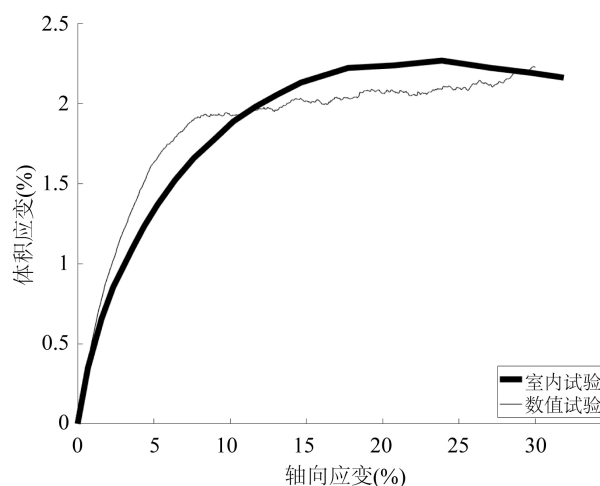


Figure 10. The calibrated volumetric strain-axial strain curve
图 10. 标定体积应变 - 轴应变曲线图

值模拟模型的弹性模量比室内试验模型的弹性模量小一些，但是当轴应变达到约 8% 后，数值模拟模型的偏应力应变曲线很快趋于平缓，进入了屈服阶段，数值模型的峰值强度与室内试验的峰值强度相差无几，但是曲线有着一定程度的上下波动，原因是数值模型内部在剪切过程中会不断出现局部结构的调整，每次调整都会导致偏应力 - 应变曲线波动。

体积应变 - 轴应变曲线中的体积应变是压缩应变，由于围压 500 kPa 较大，数值试验和室内试验都表现出了一定的剪缩性，在剪切阶段初期，数值试验的剪缩性比室内试验更显著，而当到达轴应变约 8% 后体积应变曲线很快趋于平缓，此状态对应了偏应力应变曲线中的屈服点。之后室内试验和数值试验的体积应变都趋近于 2%，相差不大。

综上所述，标定模拟结果与室内试验结果二者十分接近，因此标定参数可作为后续细观力学性能数值试验的参数。

进一步在 200 kPa 至 1500 kPa 范围内改变围压时，通过数值试验做出类土岩堆体砂性地层的破坏包络线如图 11 所示。

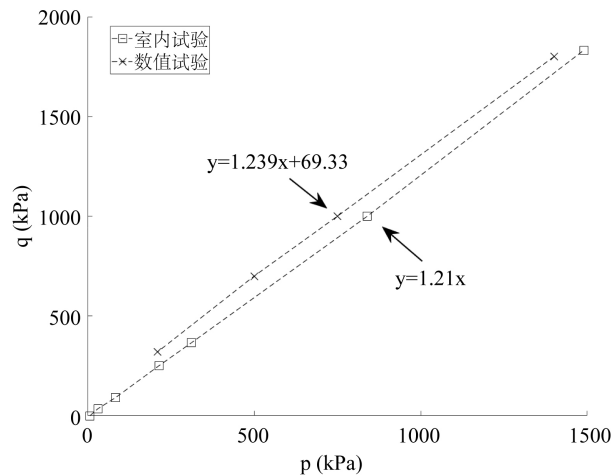


Figure 11. The calibrated test failure envelope

图 11. 标定试验的破坏包络线图

砂土颗粒的粘聚力很小，所以主要关心其内摩擦角，在破坏线包络图中体现这一性质的是拟合直线的斜率。在室内试验中，Luo [5]给出的福建土破坏包络线斜率为 1.21，数值模型的破坏包络线斜率为 1.239，误差在 2% 以内，已十分接近。

根据破坏线的斜率可以算出福建砂的内摩擦角，用下式进行计算：

$$\sin \varphi_{cs} = \frac{3M}{6+M} \quad (8)$$

式中， M 为破坏包络线的斜率， φ_{cs} 为砂土的内摩擦角。

根据室内试验的结果算出内摩擦角为 30.23° ，根据数值试验的结果算出内摩擦角为 30.90° ，误差为 2.2%，可见数值模拟计算出的内摩擦角和室内试验得到的内摩擦角十分接近。

经过软件导出的颗粒数据并计算后，该模型在施加围压稳定后，剪切开始前模型盒的孔隙率为 0.228。为了保证之后形状变异的砂土与数值试验中的砂土在压缩前有着除了形状因素外所有因素都相同的初始条件，可调整形状变异的砂土模型在固结阶段的摩擦系数，使所有不同形状的砂土模型在进入压缩阶段前，有着相同的孔隙比 0.228，孔隙比误差控制在 0.4% 内。数值模型的摩擦系数将在进入剪切阶段前调回标定值。

3.2. 颗粒形状参数敏感性分析

3.2.1. 颗粒细长比影响

为了研究颗粒细长比 AR 对力学特性的影响，采用控制变量法，固定颗粒凹凸性 C 为定值，然后更改 AR 参数，生成试样进行剪切模拟，获得的偏应力 - 轴应变曲线图和体积应变 - 轴应变曲线如图 12~图 15 所示。

在偏应力轴应变曲线中可以看出，改变 AR 后的曲线初始阶段几乎是重合的，说明 AR 参数不影响模型在剪切开始时的弹性模量。不同 AR 下曲线进入屈服阶段的时刻几乎没有改变，都在 5%~10% 之间，说明 AR 参数不影响模型的屈服点。综合图 12~15，可以从中看出： C 不变时， AR 参数越小，试样的强度越高和压缩变形越大，且 AR 对体积变形的影响较对强度的影响更为明显； C 在 0.95~0.996 范围内变化时都呈现相同的趋势。改变 AR 参数对体积应变曲线的影响在 AR 参数较接近 1 时，不太明显；当 AR 参数远离 1 时，影响程度越来越大。

由此可见, 当颗粒凹凸性不变时, 细长比越小, 整体模型的变形能力越强, 强度略有提高, 弹性模量几乎没有影响。随着颗粒凹凸程度的增加, 即 C 值减小时, 细长比的影响也更为明显。

3.2.2. 颗粒凹凸性影响

固定颗粒细长比 AR 保持不变, 可以获得如下偏应力 - 轴应变曲线图和体积应变曲线图。此外, 根据试验的偏应力应变曲线和式(6)可算出不同形状颗粒组成的模型的内摩擦角, 如表 4 所示。

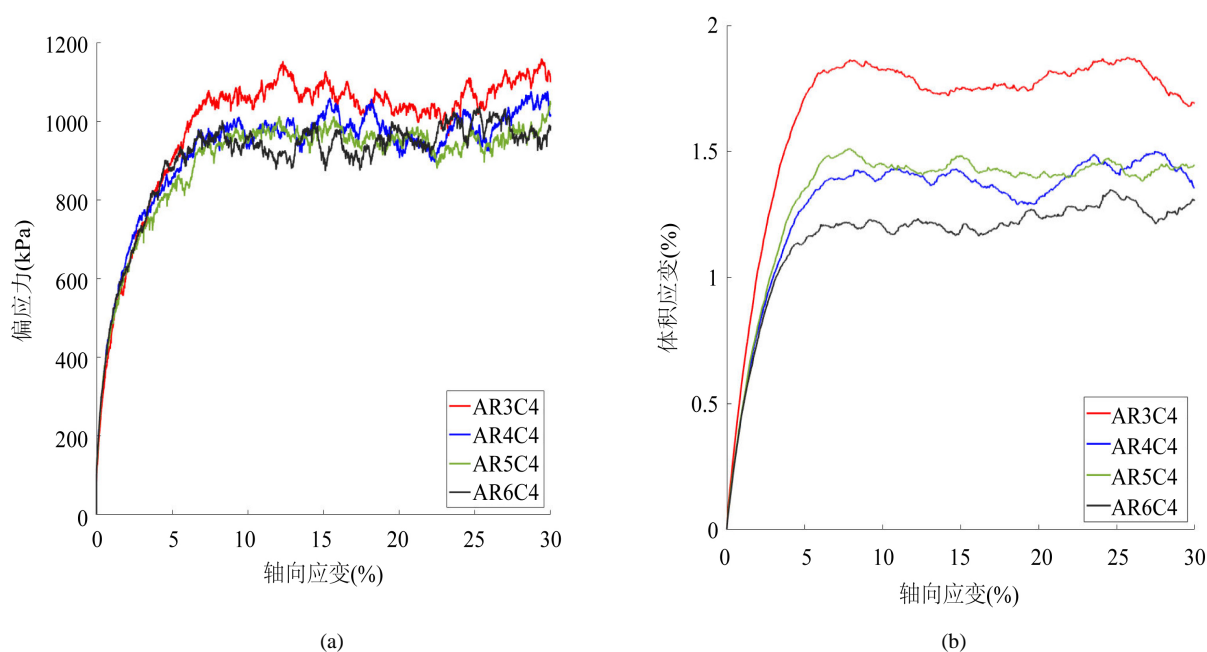


Figure 12. At $C = 0.996$ (a) deviatoric stress-axial strain curve; (b) volumetric strain-axial strain curve
图 12. $C = 0.996$ 时 (a) 偏应力 - 轴向应变曲线图; (b) 体积应变 - 轴向应变曲线图

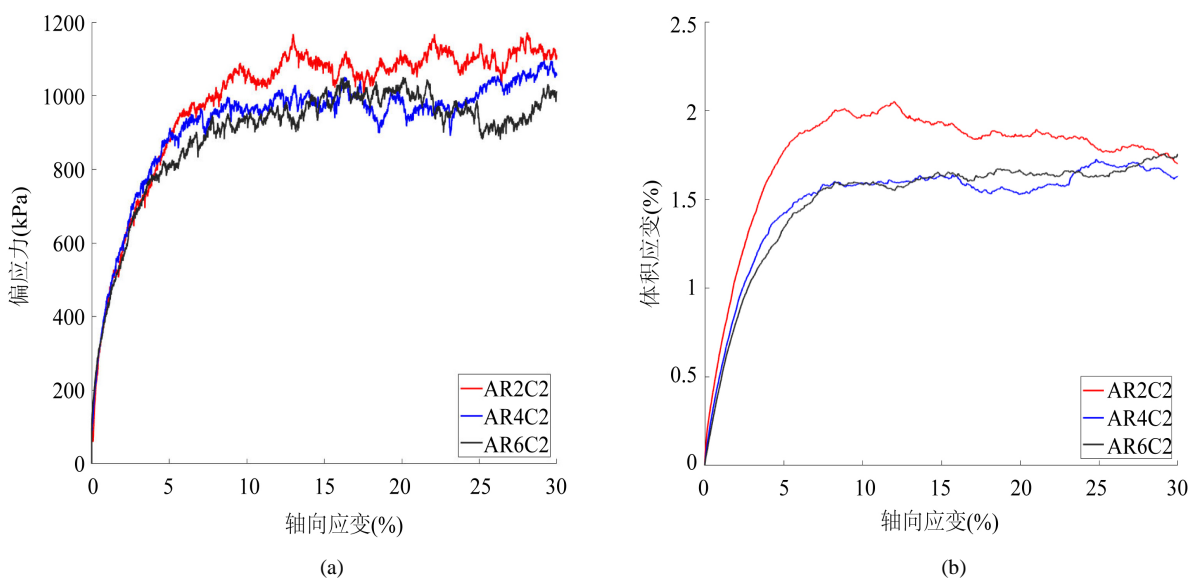


Figure 13. At $C = 0.99$ (a) deviatoric stress-axial strain curve; (b) volumetric strain-axial strain curve
图 13. $C = 0.99$ 时 (a) 偏应力 - 轴向应变曲线图; (b) 体积应变 - 轴向应变曲线图

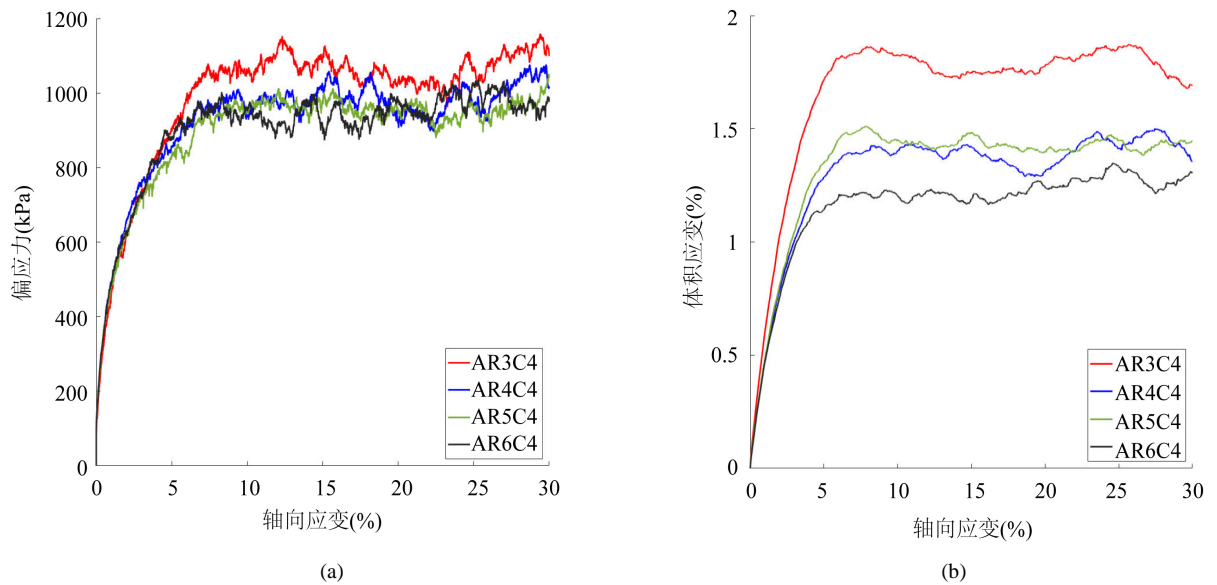


Figure 14. At $C = 0.97$ (a) deviatoric stress-axial strain curve; (b) volumetric strain-axial strain curve
图 14. $C = 0.97$ 时(a) 偏应力 - 轴向应变曲线图; (b) 体积应变 - 轴向应变曲线图

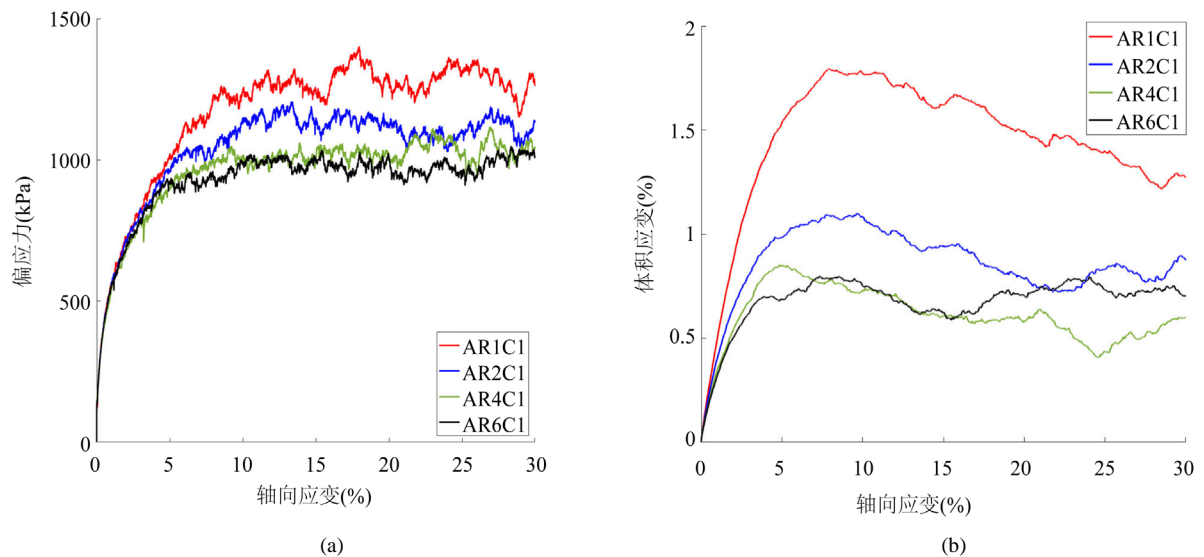


Figure 15. At $C = 0.95$ (a) deviatoric stress-axial strain curve; (b) volumetric strain-axial strain curve
图 15. $C = 0.95$ 时(a) 偏应力 - 轴向应变曲线图; (b) 体积应变 - 轴向应变曲线图

在偏应力轴应变曲线图中可以看出，改变 C 后曲线的初始阶段不再重合， C 值越小，其斜率越大，说明凹凸程度会影响模型的整体弹性模量，凹凸程度越大， C 值越小，弹性模量越大。不同 C 下曲线进入屈服阶段的时刻几乎没有改变，都在 5%~10% 之间，说明 C 参数不影响模型的屈服点。由图 12~15 可以看出： AR 不变时， C 参数越小，抵抗变形能力越强，而强度几乎没有改变，且当 C 越接近 1 时，其抵抗变形能力的变化也越小，这一规律在 $AR = 0.7\sim 1.0$ 范围内都成立。

因此，当颗粒细长比不变时，凹凸性指数 C 越大，整体模型的变形能力越强，凹凸性不影响模型的整体强度(图 16)。

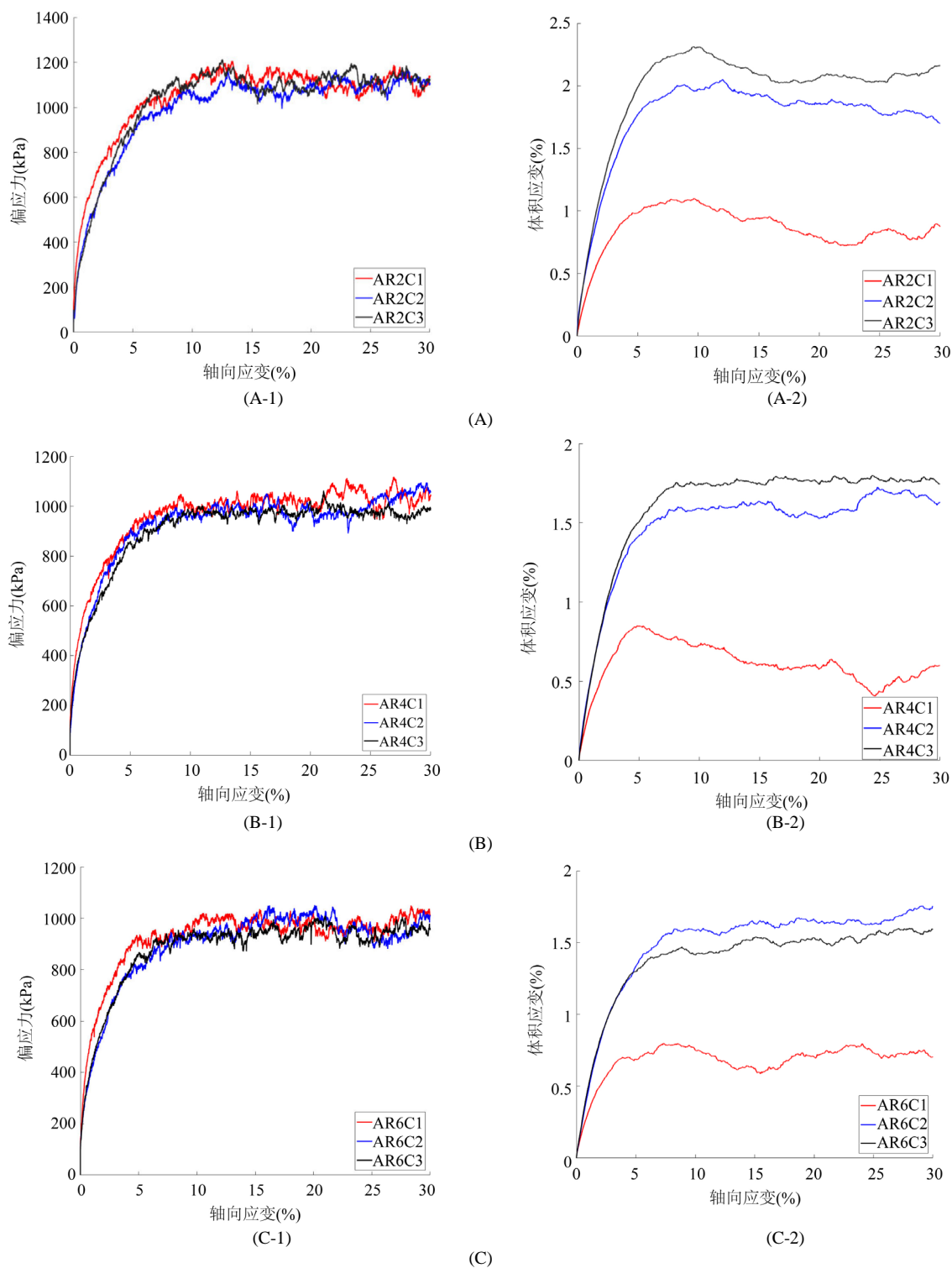


Figure 16. (A) At $AR = 0.7$: (A-1) deviatoric stress-axial strain curve; (A-2) volumetric strain-axial strain curve; (B) At $AR = 0.85$: (B-1) deviatoric stress-axial strain curve; (B-2) volumetric strain-axial strain curve; (C) At $AR = 1.0$: (C-1) deviatoric stress-axial strain curve; (C-2) volumetric strain-axial strain curve

图 16. (A) $AR = 0.7$ 时(A-1) 偏应力 - 轴向应变曲线图; (A-2) 体积应变 - 轴向应变曲线图; (B) $AR = 0.85$ 时(B-1) 偏应力 - 轴向应变曲线图; (B-2) 体积应变 - 轴向应变曲线图; (C) $AR = 1.0$ 时(C-1) 偏应力 - 轴向应变曲线图; (C-2) 体积应变 - 轴向应变曲线图

Table 4. Internal friction of samples with different grain shape
表 4. 不同形状颗粒试样的内摩擦角

试验组	AR2C1	AR2C2	AR2C3	AR4C1	AR4C2	AR4C3	AR6C1	AR6C2	AR6C3
内摩擦角(°)	34.155	33.819	34.148	33.265	32.943	32.790	32.809	32.645	32.426

4. 结论

本文采用颗粒流软件针对类土岩堆体砂性地层颗粒形状变异对宏观力学性能及变形特征的影响进行了数值仿真试验, 提出选取细长比 AR 和凹凸性 C 作为量化的颗粒形状参数, 并建立了四颗粒模型, 并与已有的试验结果进行了对比分析。然后通过改变颗粒的形状, 对不同形状参数的颗粒在其他参数完全相同的情况下进行压缩试验, 使用控制变量法, 研究了两个形状参数对试验宏观力学性能的影响, 获得结论如下:

(1) 在控制颗粒细长比 AR 介于 0.6~1.0 范围以及凹凸性 C 介于 0.95~1.0 范围内时, 两者对压缩试验的体积应变 - 轴应变曲线都有较为显著的影响, 其中 AR 还会对偏应力 - 轴应变曲线有不同程度的影响。

(2) 在不同的颗粒凹凸性 C 保持不变的情况下, 试样的压缩变形随着 AR 的减小而增大, 且 C 越小, 此影响越显著, 即颗粒的形状越扁, 试样整体抵抗压缩能力越弱, 在压力的作用下能够被压得更密, 且整体强度也有一定程度的提高。

(3) 在颗粒细长比 AR 保持不变的情况下, 减小凹凸性 C 会降低体积应变曲线, 且 C 越小, 此影响越显著, 即颗粒的凹陷程度越大, 试样整体抵抗压缩能力越强, 在压力的作用下很难被压密, 但凹凸性对整体强度几乎没有影响。

致 谢

本项目得到了中电建路桥集团有限公司(编号 HHZ-JGY-FW-03)的资助, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] Yang, X., Liu, H., Chen, Y., *et al.* (2014) Strength and Deformation of Rockfill Material Based on Large-Scale Triaxial Compression Tests. II: Influence of Particle Breakage. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **140**, 1-16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001177](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001177)
- [2] 马丽琴. 碎石形态与混合料路用性能 CBR 的关联性分析[J]. 青海交通科技, 2016(3): 6-8.
- [3] 赵书辉, 魏厚振, 吴永洁, 等. 颗粒形状对粗砂直剪特性影响研究[J]. 土工基础, 2020, 34(6): 740-744.
- [4] Guo, N. and Zhao, J.D. (2013) The Signature of Shear-Induced Anisotropy in Granular Media. *Computers and Geotechnics*, **47**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.07.002>
- [5] Luo, X.D. (2015) Investigation of the Mechanical Behavior of Granular Material: Effects of Particle Size Distribution and Particle Shape. University, city.
- [6] Yang, J. and Luo, X.D. (2015) Exploring the Relationship between Critical State and Particle Shape for Granular Materials. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, **84**, 196-213. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.08.001>
- [7] 王晓鹤. 颗粒形状对堆石料强度和变形特性试验研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [8] 高晓耕. 颗粒形状对盾构隧道开挖地层稳定性影响的宏微观力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2021.
- [9] Yang, J. and Luo, X.D. (2018) The Critical State Friction Angle of Granular Materials: Does It Depend on Grading? *Acta Geotechnica*, **13**, 535-547. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0581-x>
- [10] Tsomokos, A. and Georgiannou, V.N. (2010) Effect of Grain Shape and Angularity on the Undrained Response of Fine Sands. *Canadian Geotechnical Journal*, **47**, 539-551. <https://doi.org/10.1139/T09-121>
- [11] Keramatikerman, M. and Chegenizadeh, A. (2017) Effect of Particle Shape on Monotonic Liquefaction: Natural and

-
- Crushed Sand. *Experimental Mechanics*, **57**, 1341-1348. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0313-z>
- [12] Igwe, O., Sassa, K. and Wang, F. (2007) The Influence of Grading on the Shear Strength of Loose Sands in Stress-Controlled Ring Shear Tests. *Landslides*, **4**, Article No. 43. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0051-2>
- [13] Bullard, J.W. and Garboczi, E.J. (2013) Defining Shape Measures for 3D Star-Shaped Particles: Sphericity, Roundness, and Dimensions. *Powder Technology*, **249**, 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.08.015>
- [14] 任树林, 曾亚武, 赵凯. 颗粒形状对断层摩擦强度影响的数值试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 42-47.
- [15] 朱泽奇, 盛谦, 程红战, 等. 基于直接生成法的土石混合体三维随机模型构建与数值仿真研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1188-1194.