

胶结土石混合体力学特性的块石形状 效应细观机理分析^{*}

金磊¹ 曾亚武^{1**} 李晶晶²

(¹ 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉, 430072) (² 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉, 430071)

摘要 考虑块石形状为球体、正方体和长方体三种情况, 通过正方体与球体相比较来探究块石不同棱角对胶结土石混合体力学特性的影响, 通过长方体与正方体相比较来探究块石不同球度对胶结土石混合体力学特性的影响. 首先, 基于不规则颗粒三维离散元精细模拟技术实现了正方体和长方体块石数值模型的建立; 然后建立含石量为 30% 和 80% 的块石形状分别为球体、正方体和长方体的胶结土石混合体三维离散元随机结构模型; 最后, 对土石混合体大三轴试验进行颗粒流数值模拟, 获得了不同含石量、不同块石形状下胶结土石混合体的强度特征和变形特征, 并分别就低、高两种含石量下块石形状对土石混合体力学特性影响的细观机理进行了深入地分析. 结果表明: 块石含量和形状均会显著影响胶结土石混合体的力学特性, 并且两者间具有复杂的交互作用; 微裂纹、块石颗粒平均旋转量、应变能和摩擦功等的演化规律能够很好地从细观水平上反映块石形状影响的作用机理.

关键词 胶结土石混合体, 三维离散元, 块石形状, 细观机理, 颗粒旋转

0 引言

土石混合体 (Soil-rock mixture, 简称 SRM) 是指第四纪以来形成的, 由具有一定工程尺度、强度较高的块石、细粒土体及孔隙构成且具有一定含石量 (Rock block proportion, 简称 RBP) 的极端不均匀松散岩土介质系统^[1]. 土石混合体在自然界中分布非常广泛, 地球上绝大多数滑坡体都是由土石混合体构成, 研究土石混合体变形破坏机理对于进一步深化土石混合体力学理论体系和防治滑坡等地质灾害具有重要的意义.

近年来, 针对土石混合体这种特殊地质体, 国内外许多学者对其物理力学特性、渗透特性和变形破坏机制等进行了较为系统的研究, 取得了一系列研究成果. 赫建明等^[2]通过原位试验表明, 含石量是影响土石混合体力学特性的一个重要指标, 其变化对材料的整体力学特性影响较大. 丁秀丽等^[3]采用有限元对土石混合体随机模型进行了双轴数值试验模拟, 分析了土石界面摩擦、含石量和饱和度等因素对土石混合体力学特性的影响. 赵金凤等^[4]基于离散

元模型通过直剪试验数值模拟研究了含石量和颗粒黏结强度对土石混合体抗剪强度的影响规律. 金磊等^[5]基于其开发的不规则颗粒离散元对土石混合体的大三轴试验进行了数值模拟, 深入分析了含石量对土石混合体力学特性影响的细观机理. 油新华等^[6]通过模型试验研究了碎块石形状对土石混合体变形破坏特征的影响, 然而其模型中只包含了一个块石, 与实际情况相差较大. 薛亚东等^[7]针对砂砾石混合物进行了室内大型直剪试验, 分析了含石量和砾石形状对砂砾石混合物抗剪强度的影响, 其研究表明砂砾石混合物的剪胀量和抗剪强度均随砾石含量以及砾石形状不规则程度的增加而增加, 砾石形状的影响显著. Li Y R 等^[8,9]分别针对混合土和黏土-碎石混合物进行了一系列室内大型直剪试验, 分析了含石量和碎石形状对混合土和黏土-碎石混合物抗剪强度的影响, 其研究表明峰值剪切强度随砾石形状不规则程度的增加而降低, 而残余强度则随碎石形状不规则程度的增加而升高. Kalender A 等^[10]提出了一种预测土石混合体单轴抗压强度的方法, 该方法考虑了基质强度、含石量和砾石形状等的影响. Graziani A 等^[11]对某大坝基础

* 国家自然科学基金面上项目 (41272342) 资助.

2015-06-19 收到第 1 稿, 2015-09-29 收到修改稿.

** 通讯作者. Tel: 027-68772132, E-mail: zengyw@whu.edu.cn.

附近的断层破碎带的填充成分(土石混合体)进行了双轴试验和直剪试验的二维颗粒流数值模拟,分析了含石量、块石形状和围压等因素的影响规律,但并未研究块石形状影响的细观作用机理。

可以看到,已有研究主要集中在含石量等因素对土石混合体力学特性的影响上,而针对块石形状影响的研究则比较少,主要是通过室内试验的方法,而室内试验虽然可以获得块石形状影响的一般宏观规律,但是无法从细观水平上揭示其作用的机理。另一方面,由于土石混合体具有典型的非均质和非连续性,在力学性质上表现出强烈的各向异性,采用传统的建立在宏观连续介质上的力学模型和相应的分析方法,难以合理描述和反映其内部结构的复杂性,也难以从细观水平上揭示其变形破坏机理,而离散元法则能较好解决上述难题。

为此,本文采用基于球体的颗粒离散元方法,考虑块石为球体、正方体和长方体三种情况,通过正方体与球体相比较来探究块石不同棱角对胶结土石混合体力学特性和变形特性的影响,通过长方体和正方体相比较来探究块石不同球度对胶结土石混合体力学特性和变形特性的影响。首先,基于不规则颗粒三维离散元精细模拟技术实现了正方体和长方体块石三维离散元模型的建立;然后建立了含石量为 30% 和 80% 的含特定形状块石(包括球形、正方体和长方体三种)的胶结土石混合体三维离散元随机结构模型;最后,对土石混合体大三轴试验进行了颗粒流数值模拟,得到了不同含石量和不同块石形状下胶结土石混合体的强度特征和变形特征,并且从接触力、微裂纹演化、颗粒旋转、系统能量等诸方面深入分析了块石形状影响的细观作用机理,取得了一些有意义的结论。

1 块石三维离散元模型

对块石颗粒形状进行模拟首先需要对颗粒形状进行恰当的描述。目前国际上对不规则颗粒形态的描述主要是分三个尺度来进行。第一个是颗粒尺寸尺度上的,可以定义为球度,它反映了颗粒的总体形状,表示颗粒三向尺寸(长、宽、高)之间的比例。第二个是比颗粒尺寸小一个数量级尺度上的,可以定义为凹凸度(棱角度),它反映了颗粒表面的宏观凹凸程度。第三个是细观尺度上的颗粒表面的粗糙度^[12]。基于这个描述,本文考虑块石为球体、正方体

和长方体三种形状,其中球体和正方体球度相同,棱角度有显著差异;正方体和长方体棱角度相同,球度不同。因此,可以通过将正方体与球体相比较来探究块石棱角度对土石混合体力学特性和变形特性的影响,通过长方体和正方体相比较来探究块石球度对土石混合体力学特性和变形特性的影响。对于球形块石,在颗粒流程序中可直接由较大的基本球体表示,而对于正方体和长方体块石,则需要一种有效的精细模拟方法,下面介绍正方体和长方体块石的三维离散元精细模拟技术。

首先可在大型通用有限元程序 ANSYS 中,建立符合粒径要求的正方体和长方体几何模型,然后采用四面体单元划分网格得到有限元模型,本文所采用的长方体 Y、Z 向长度相同,Y 向长度与 X 向长度的比值为 0.5(即球度为 0.5)。然后利用不规则颗粒三维离散元精细模拟技术^[13],可以获得块石的三维离散元精细模型,从而可以用于土石混合体的三维颗粒流数值模拟。现将主要步骤归纳如下:

(1) 针对所获得的已划分网格的块石有限元模型,导出模型的表面节点坐标和内部节点坐标信息。

(2) 对于任意一个内部节点,计算其到每个表面节点的距离,只记录并存储其中的最小值。对所有内部节点都进行一次计算,即可得到所有内部节点到表面各自对应的最小距离值。然后以内部节点为球心,以对应的最小距离值为半径生成球体。所有的球体组合就能刻画出不规则块石的外形。

(3) 根据研究的需要,引入最小球体半径 R_{lim} 和有效空间系数 K 来对基本填充球体数量进行优化,以节省计算资源。

对于本文中所采用的块石,在离散元模型优化时最小球体半径 R_{lim} 取为 2 mm,有效空间系数 K 取为 1.10,优化后的离散元模型如图 1 所示,其中正方体模型由 301 个球体构成,长方体模型由 338 个球体构成。由图可见,采用该技术建立的块石三维离散元模型能比较好地刻画出块石的棱角特征,而且经优化后基本组成球体数适合目前颗粒流程序的计算能力。另外,由球体重叠构成的块石模型表面有细微的凹凸,可以近似模拟实际块石颗粒表面的粗糙特征。

基于基本球体重叠构建不规则块石的建模方法不可避免的会出现模型密度分布不均匀的现象,为了使模型的质量与实际块石的质量相等,本文采用了平均化密度的方法,用公式可以表示为:

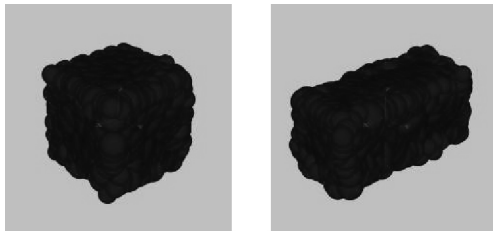


图 1 块石三维离散元模型

Fig.1 3-D DEM models of rock blocks

$$\rho_m = \frac{V_{clump} \cdot \rho_0}{\sum V_i} \quad (1)$$

$$\sum V_i = \sum V_i^{overlap} + V_{clump} \quad (2)$$

式中 ρ_m 为优化后各球体赋值密度, V_{clump} 为模型体积, ρ_0 为颗粒实际密度, $V_i^{overlap}$ 为每个球体中重叠的体积.

2 土石混合体数值试验

2.1 颗粒流(PFC^{3D})概述

三维颗粒流是根据颗粒离散元理论,采用显示差分算法,交替运用力-位移定律和牛顿运动定律来模拟颗粒之间的相互作用和运动过程. PFC^{3D} 提供了三种基本的接触模型,他们分别是接触刚度模型、滑移模型和黏结模型. 其中黏结模型分为接触黏结和平行黏结,平行黏结是在颗粒接触处再现一种附加胶结材料的作用,作用在颗粒接触的一定范围内,常用于致密的强胶结的岩石材料;接触黏结作用于颗粒接触点处,常用于比较松散的弱胶结土体^[14]. 自然界中构成土石混合体的土体部分有相对松散的、未胶结的砂性土,也有的是有一定胶结的,这与土石混合体的成因和地质历史有关. 天然的滑坡堆积体多是有一定胶结的,如图 2 所示,本文所要研究的即为这类土石混合体,需考虑土颗粒间及土颗粒和块石颗粒间的黏结作用,选取线性接触刚度模型、滑移模型和接触黏结模型来模拟土石混合体中颗粒间的接触力学行为.

PFC^{3D}中提供了 clump 以供不规则颗粒的模拟,它由基本的球体颗粒聚集而成,组成颗粒间相对位置保持固定,组成颗粒间的接触计算在循环的过程中被跳过,因此大大节约了计算时间. Clump 边缘颗粒与其外部颗粒产生相互作用,但是不管是否



图 2 典型滑坡堆积土石混合体^[15]

Fig.2 Typical soil-rock mixture derived from landslide accumulation^[15]

有接触力作用在其上面, clump 不会解体. 土石混合体中块石的强度和刚度较细粒土体基质要大得多,而实际的滑坡堆积体中土石混合介质主要位于浅表层,根据已有研究结果可知在较低围压下碎块石颗粒几乎不发生颗粒破碎,因此采用 clump 来模拟不规则块石是比较合适的.

在后处理方面, PFC^{3D} 可以获得模型的速度场、位移场、接触力等信息. 利用 history 可以对各种变量的变化过程进行采样和存储. 利用内嵌的 fish 语言编程,还可以获得其它更多的信息,比如记录黏结的破裂即微裂纹的形成情况,关于微裂纹的抽象定义和监测等可参考文献^[14]. 通过编制微裂纹监测及绘图程序包,可以对试验过程中黏结发生破裂事件(形成微裂纹)进行追踪,并记录发生时间、位置和破裂类型(拉裂或剪裂)等相关信息,统计微裂纹的数量,并在微裂纹形成位置使用八边形或圆形等来进行标记并可以绘图显示,以供观察研究. 本文在已有微裂纹监测及绘图程序包的基础上进行了二次开发,从多个方面对胶结土石混合体三轴试验中微裂纹的演化规律进行了分析.

2.2 土石混合体大三轴数值试样的生成

本文研究所建立的大三轴数值试样是直径为 200 mm、高度为 500 mm 的圆柱形试样. 根据 Medley 等^[16]研究,土石阈值可定义为:

$$d_{s/RT} = 0.05L_c \quad (3)$$

式中: $d_{s/RT}$ 为土/石阈值; L_c 为土石混合体的工程特征尺度,对于三轴试验试样,可取为试样直径. 因此本文的土/石阈值可定为 10 mm. 为了便于研究不同块石形状对土石混合体力学特性和变形特性影响

的细观机理以及考虑到计算效率,本文对颗粒级配进行了一定程度的简化,土体颗粒可直接简化为球体,粒径取值范围为 8-10 mm,对于块石,其粒径均为 30 mm. 这里所说的粒径并不是块石的实际粒径,而是指与该粒径的球体体积相同的当量粒径,这样可以使得相同含石量(体积含石量)的不同块石形状的土石混合体中块石数量相同.

首先要将块石投放到随机的位置上,这里提出一个简单实用的方法:先利用 PFC^{3D} 中 generate 命令生成的球体不会重叠的特点,在比试样较高一些的空间中生成较大数目的粒径较大的球体(为了不让投放的块石重叠),则这些球体的球心坐标是随机的,将这些坐标输出即可获得足够的空间随机点坐标;选取第一个随机点的坐标,选择块石颗粒球体坐标文件,利用 VC++ 语言编制程序将选择的颗粒平移到选取的相应随机点上,同时进行随机旋转,这样就投放好了第一个块石颗粒;继续投放,直到块石颗粒的总体积达到需要的含石量;投放完成以后,在 PFC^{3D} 平台上试运行块石颗粒文件,查看有无接触,若无接触即满足要求;若存在接触则需重新设定取随机坐标的空间高度或者球体直径大小,重新投放.

在投放时,块石平移和随机旋转时的坐标系与单个块石建模时的坐标系相同,块石平移和旋转实际上是其组成球体整体的平移和旋转,平移算法简单,这里介绍一下随机旋转的算法. 设某个组成球体的球心旋转前坐标为 (x, y, z) , 其绕三个坐标轴的随机旋转角度分别为 (α, β, γ) , 旋转后的新坐标为 (x', y', z') 则随机旋转公式为:

$$\{x' y' z'\} = \{x y z 1\} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

块石投放成功以后,在与其投放对应的空间(比试样高)中生成土体颗粒. 这里根据所需的含石量(块石体积与土石总体积的比值)计算土颗粒和块石

颗粒体积时,试样孔隙率假设为 0,这样得到的初始试样是比 500 mm 高一些的颗粒之间非常疏松的颗粒集合体. 然后,为了加快颗粒的下落提高建模效率同时要防止颗粒下落到与墙体接触时动能太大而穿过墙体,本文让颗粒在 4g 的重力加速度下自由下落到基本达到平衡,将位置高于 500 mm 的颗粒删除,循环至平衡,即可得到一个较为密实、块石分布与实际较为相似的土石混合体大三轴数值试样. 本文研究建立了含石量为 30% 和 80% 的块石形状分别为球体、正方体和长方体的土石混合体大三轴颗粒流数值试样,如图 3 和图 4 所示,土颗粒由蓝色的 balls 表示,块石由绿色的 clumps 表示.

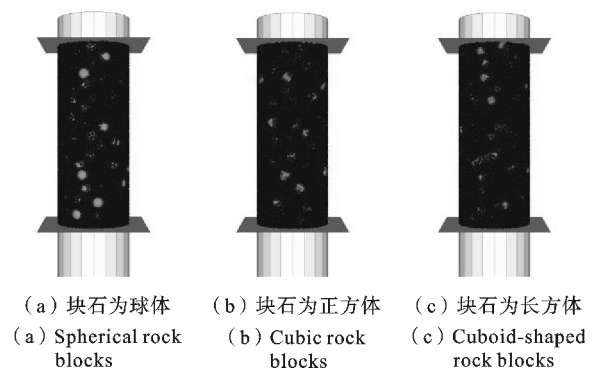


图 3 含石量为 30% 的土石混合体数值试样
Fig. 3 Numerical specimens of SRM with 30% RBP

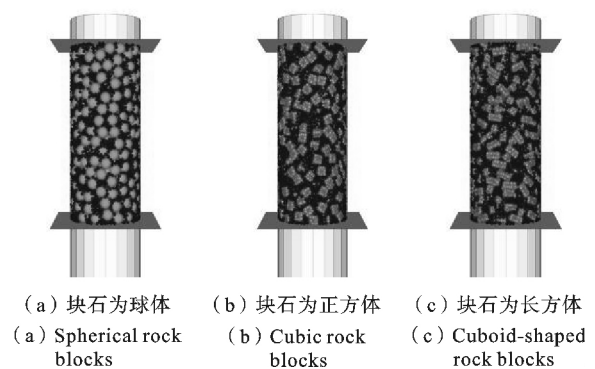


图 4 含石量为 80% 的土石混合体数值试样
Fig. 4 Numerical specimens of SRM with 80% RBP

2.3 模型参数和试验方法

参考已有土体和土石混合体颗粒流模拟的相关文献[4,5,11,17]并经反复试算,本文选取了一组具有代表性的颗粒细观力学参数. 上下边界墙的法向刚度为 1×10^9 N/m,侧墙的法向刚度为 2×10^5 N/

m,切向刚度和摩擦系数均为 0,土颗粒间及土与块石颗粒间接触黏结的法向强度和切向强度均设为 400 kPa,块石颗粒间无黏结作用,其它参数见表 1.

表 1 土石混合体细观力学参数
Table 1 Meso-mechanical parameters of SRM

颗粒类型	密度 (kg/m ³)	法向刚度 (N/m)	切向刚度 (N/m)	摩擦系数
土	2300	2e6	2e6	0.4
块石	2680	12e7	12e7	0.5

进行数值试验时,首先要利用伺服控制程序加围压并保持围压恒定,模型的上下边界墙作为加载板,加载速度为 0.05 m/s,需要指出的是颗粒流静力学模拟中采用的速度不同于真实的室内试验中的加载速度^[18].采用应变控制加载方式,当轴向应变达到 15%时停止加载并终止试验.本文研究围压选为 0.4 MPa,在加载过程中对轴向偏应力、轴向应变、体应变、摩擦能、应变能、微裂纹总数、剪切微裂纹数、张拉微裂纹数、土颗粒间微裂纹数、土与块石颗粒间微裂纹数、块石颗粒平均旋转量等宏细观量进行了采样和记录,以便后续进行分析.

3 宏观力学响应

根据数值试验结果,可绘制两种含石量下土石混合体的应力-应变关系和体应变-轴向应变关系曲线.图 5 为含石量为 30%的试样的偏应力-轴向应变关系曲线,图 6 为含石量为 80%的试样的偏应力-轴向应变关系曲线,图 7 为不同含石量试样的偏应力-轴向应变关系曲线,图 8 为含石量为 80%的试样的

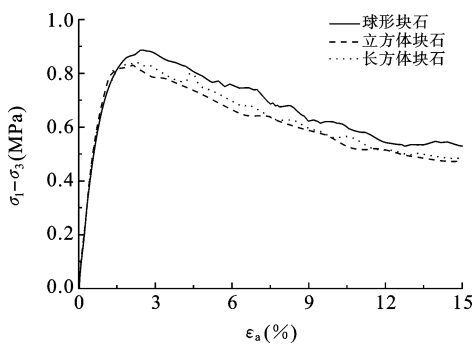


图 5 应力应变关系曲线 (RBP=30%)

Fig. 5 Stress-strain relationship curves (RBP=30%)

体应变-轴向应变关系曲线.

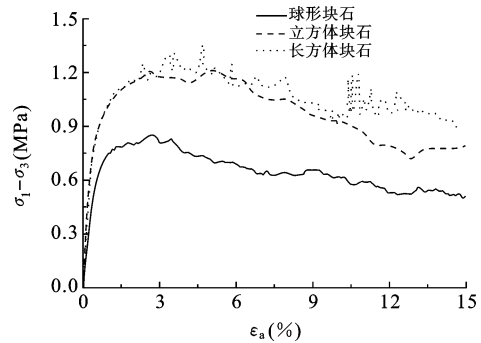


图 6 应力应变关系曲线 (RBP=80%)

Fig. 6 Stress-strain relationship curves (RBP=80%)

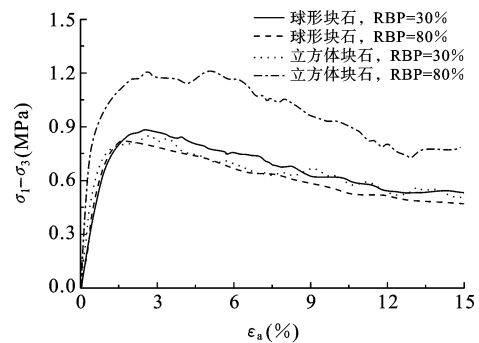


图 7 不同含石量试样应力应变关系曲线

Fig. 7 Stress-strain relationship curves of SRM specimens with different RBP

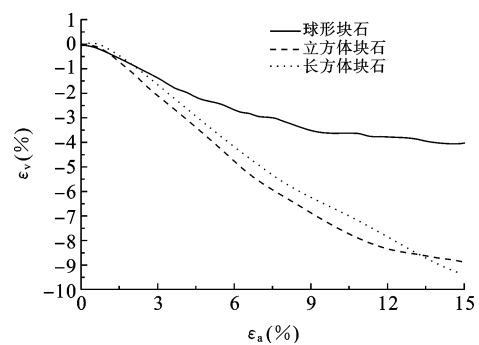


图 8 体应变-轴向应变关系曲线 (RBP=80%)

Fig. 8 Volumetric strain and axial strain relationship curves (RBP=80%)

从图 5 可以看出,胶结土石混合体试样均表现出一定的应变软化特性.含石量为 30%时,含三种形状块石的土石混合体试样的初始弹性模量基本相同,块石为球体的试样的峰值强度、残余强度和破坏应变均比块石为正方体和长方体的试样大,而块石

为正方体和长方体的试样的应力应变关系基本一致. 该数值试验的结果与文献[9]中试样剪切峰值强度随碎石形状变化的规律基本是一致的, 至于残余强度规律为何不同, 可能是由于含石量的差异所引起的, 这可以通过下文的细观机理分析得到解释.

从图 6 可以看出, 当含石量为 80% 时, 含正方体和长方体块石的试样的初始弹性模量较之含球体块石的试样有所提高, 峰值强度、残余强度和破坏应变均有大幅提高, 这与文献[7,8]中室内大直剪试验所得的一般规律是一致的. 块石为长方体的试样的峰值强度与含正方体块石的试样相比略有提高, 但不明显, 而残余强度提高明显.

从图 7 可以看出, 当块石形状为球体时, 含石量从 30% 增加到 80%, 试样的应力应变关系变化不明显, 峰值强度有略微下降. 当块石形状为正方体时, 含石量从 30% 增加到 80%, 试样的弹性模量、峰值强度、残余强度和破坏应变均显著增大.

从图 8 可以看出, 当含石量为 80% 时, 土石混合体试样初始加载阶段均表现出一定程度的剪缩, 在轴向应变达到破坏应变以前即进入剪胀阶段, 剪胀幅度快速增大, 轴向应变较大时逐渐平稳. 试样所含块石形状从球体、正方体到长方体, 剪胀性有逐渐增大的趋势.

4 细观机理分析

从不同含石量和不同块石形状的胶结土石混合体试样的试验结果来看, 含石量和块石形状这两个因素对胶结土石混合体力学特性的影响非常复杂, 而且存在交互作用, 要想阐明其影响的机理, 需从细观水平上去探究.

图 9 给出了块石形状为正方体的土石混合体试样在含石量为 30% 和 80% 时加载结束时的块石颗粒之间接触力分布图, 图中黑色短线即为块石颗粒之间的接触力, 其粗细代表了接触力的大小(最粗的为 4077 N). 从图 9 可以直观地看到, 在较低含石量 30% 时, 块石颗粒之间被土颗粒填充, 即使到加载结束时大部分仍没有发生接触, 因此较低含石量的土石混合体的力学特性主要是由胶结土体基质及土石界面接触特性所决定. 而高含石量 80% 时块石颗粒之间可以充分接触、咬合, 接触力链显著, 正方体的棱角度以及长方体的棱角度和球度作用能够有效地发挥出来, 其力学特性主要由块石颗粒之间的相互

作用所决定. 据此, 下文将分低、高含石量两种情况分别就各自情形下块石形状的细观作用机理进行深入分析.

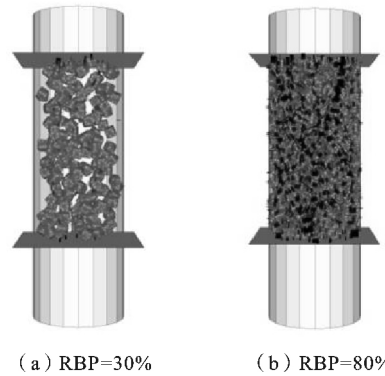


图 9 块石颗粒间接触力分布图
Fig. 9 Distribution diagram of contact forces

4.1 低含石量情形 (RBP=30%)

低含石量的胶结土石混合体中块石分散在胶结土体基质中, 其力学特性主要由胶结土体基质和土石界面接触特性决定. 图 10 给出了块石为正方体的土石混合体试样在加载过程中不同类型微裂纹数量 (N_{crk}) 随轴向应变的变化过程. 图 11 给出了块石为正方体的土石混合体试样在加载过程中不同位置形成的微裂纹数量随轴向应变的变化过程. 块石为球体和长方体的土石混合体试样的不同类型和不同位置的微裂纹数量变化规律与图中给出的块石为正方体的规律是相同的, 限于篇幅, 这里不再给出.

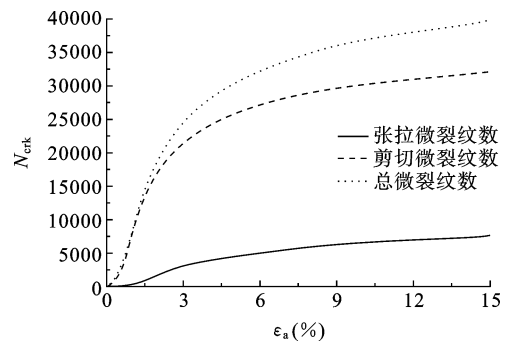


图 10 不同类型微裂纹数与轴向应变关系曲线
Fig. 10 Micro-crack number of different type and axial strain relationship curves

从图 10 可以看出, 张拉裂纹数、剪切裂纹数和微裂纹总数的变化趋势基本一致: 加载初期微裂纹

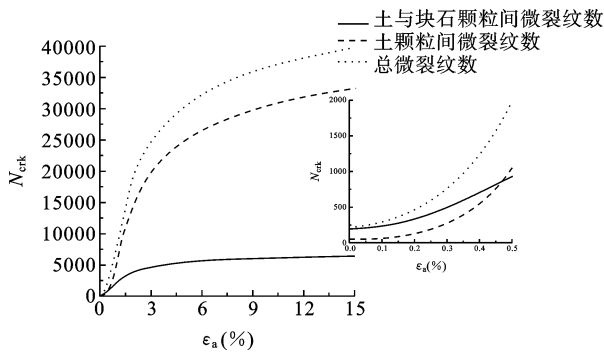


图 11 不同位置微裂纹数与轴向应变关系曲线

Fig. 11 Micro-crack number of different location and axial strain relationship curves

数比较少,增长缓慢,峰值前后发展迅速,裂纹数量急剧增加,后期趋于平稳. 还可以看到,张拉破裂形成的微裂纹数很少,以剪切破裂形成的微裂纹为主,这与大三轴试验中低含石量土石混合体试样发生的主要是剪切破坏是一致的.

从图 11 可以看出,在轴向应变小于 0.5% 时,微裂纹主要在块石颗粒与土颗粒之间形成,发展速度非常快,在峰值强度前即达到稳定,而后则主要在土颗粒间形成和发展. 这是因为模型中土颗粒与块石颗粒刚度等力学参数相差悬殊,它们的接触面为土石混合体中的薄弱环节,最容易发生破裂,这与其它文献得到的结论是一致的. 至于轴向应变接近于 0 时既有少许微裂纹,是因为在数值试验时采样间隔设为 200 个时步,加载了 200 个时步时才开始进行第一次采样所致.

由上述分析可知,低含石量的胶结土石混合体在加载过程中,微裂纹起始于土与块石颗粒间,而后在土颗粒中扩展,主要是由于剪切破裂所致. 为了比较不同块石形状对试样微裂纹演化的影响,将含不同形状块石的土石混合体试样的微裂纹总数随轴向应变的变化过程绘于图 12.

从图 12 可以看出,块石为正方体和长方体的试样与块石为球体的试样相比较,微裂纹数发展的规律是一致的,但发展速度要快,数量也要多,而块石为正方体的试样和块石为长方体的试样差别不明显,这与图 5 中宏观应力应变响应的规律是一致的. 究其原因,可能是正方体和长方体块石的棱角分明,在其棱角边缘处容易出现应力集中,造成块石与土颗粒接触处黏结更容易发生破裂,加速了微裂纹的发生和发展,所以其峰值强度较低.

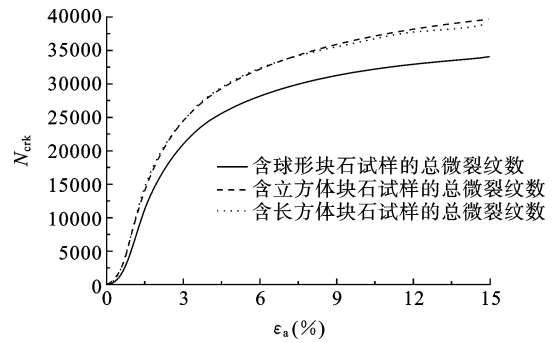


图 12 试样总微裂纹数与轴向应变关系曲线

Fig. 12 Total microcrack number and axial strain relationship curves of cemented SRM specimens

4.2 高含石量情形 (RBP=80%)

高含石量(80%)的土石混合体试样中块石颗粒之间可以充分接触、咬合,其力学特性主要由块石颗粒之间的相互作用所决定,下面将分别从块石颗粒旋转和系统能量演化两个方面来探究不同形状块石颗粒间相互作用的微观机理.

(1) 颗粒旋转分析

已有颗粒材料研究结果表明颗粒旋转对无粘性颗粒试样的强度和变形具有重要的影响^[19]. 图 13 分别给出了土石混合体试样中各块石颗粒转动分量绝对值的平均值随轴向应变的变化过程,这里的转动分量是块石颗粒相对于块石(clump)的质心的绕三个坐标轴的转动量.

分析图 13 可知,各形状块石颗粒的平均旋转量的三个分量随轴向应变近似呈线性增长关系,球形块石颗粒的平均旋转量的三个分量均显著大于正方体块石和长方体块石颗粒. 正方体块石颗粒与长方体块石颗粒相比较,绕 X 轴和 Y 轴的平均旋转量基本相同,绕 Z 轴的平均旋转量稍大.

图 14 所示为球形颗粒间和长方体颗粒间相互作用示意图,图中 C 为 A 颗粒的质心、 F_n 为颗粒间接触力的法向分量、 F_s 为颗粒间接触力的切向分量. 对于球形颗粒,颗粒为点接触,接触点处法向接触力通过颗粒质心,不能形成抗转动力矩,这样其颗粒间结构就难以抵抗切向接触力引起的转动力矩作用,所以颗粒旋转显著. 而对于正方体颗粒和长方体颗粒,颗粒接触点处法向接触力一般不通过颗粒质心,这样就能形成抗转动力矩,其粒间结构相对稳定,切向接触力引起的转动力矩作用可在粒间传递,而不会引起过大的旋转.

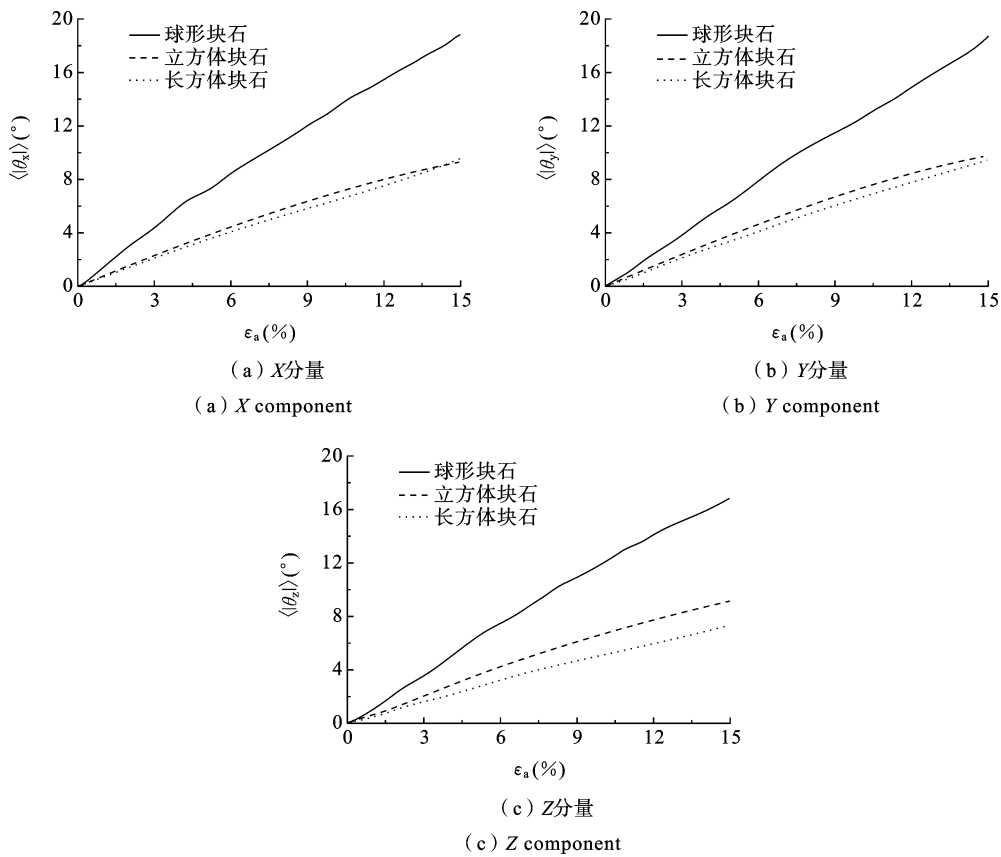


图 13 土石混合体试样中块石颗粒平均旋转量与轴向应变关系曲线

Fig. 13 Mean rotation of rock blocks and axial strain relationship curves

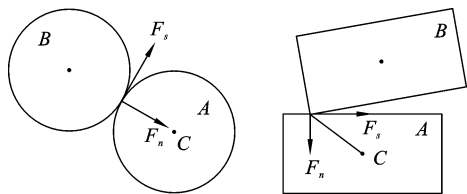


图 14 不同形状块石颗粒间相互作用示意图

Fig. 14 Schematic diagram of interaction between rock blocks

(2) 能量演化分析

为了反映不同块石形状的土石混合体试样在大三轴数值试验过程中颗粒之间相互接触咬合和摩擦滑移的特征,可以从试验过程中应变能和摩擦功随轴向应变的发展规律中进行探究. 现将土石混合体数值试验过程中的应变能和摩擦功与轴向应变的关系曲线绘出,分别如图 15 和图 16 所示.

从图 15 可以看到,块石形状为球体、正方体和

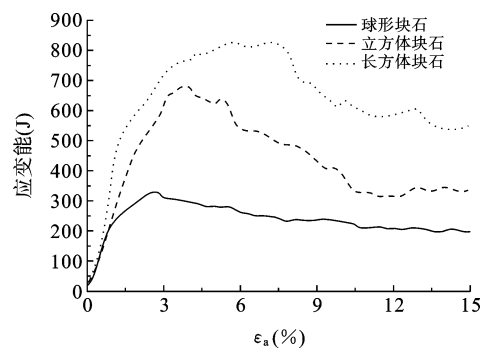


图 15 应变能与轴向应变关系曲线

Fig. 15 Strain energy and axial strain relationship curves

长方体的土石混合体试样的应变能随轴向应变均为先增加后减小,这与试样先发生剪缩后发生剪胀是一致的. 块石形状为球体、正方体和长方体的土石混合体试样的应变能在开始加载时基本相同,但随着轴向应变的继续增加,应变能开始依次增大,差异也

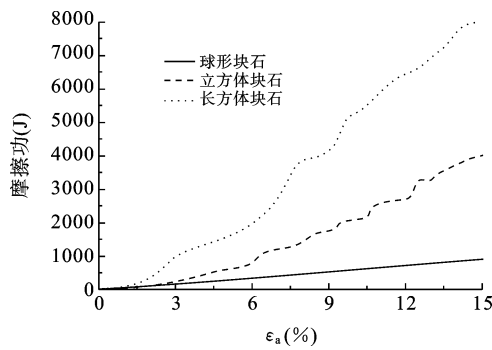


图 16 摩擦功与轴向应变关系曲线

Fig. 16 Frictional work and axial strain relationship curves

越来越明显,这在一定程度上说明了试样中块石颗粒间接触咬合的程度是依次增强的.

从图 16 可以看出,块石形状为球体、正方体和长方体的土石混合体试样的摩擦功依次增大,说明试样中颗粒之间摩擦滑移越来越剧烈,这与已有颗粒材料的研究结果^[20]是一致的.不同形状块石颗粒在剪切过程中的运动机理如图 17 所示,如前所述,球形块石颗粒间结构相对不稳定,更容易发生旋转,进而相互偏离,所以块石为球体的土石混合体试样中块石颗粒平均旋转量大,而摩擦功相对较小,随轴向应变近似呈线性缓慢增加;正方体块石和长方体块石颗粒棱角分明,另外由于数值模型是由球体重叠填充而成,所以其表面存在细微的凹凸,这可以很好地表征实际块石颗粒表面的粗糙不平,这样在正方体和长方体颗粒间接触面上摩擦滑移与接触咬合交替进行,在摩擦功随轴向应变发展的曲线上就出现了多个平稳段与陡升段相交替出现的现象,而长方体较正方体更为扁平细长,接触面积更大,这种摩擦滑移过程更频繁,所以其摩擦功较含正方体块石的土石混合体试样进一步提高,其应力应变曲线峰后段也表现出更为明显的波动特征.

通过块石颗粒旋转和能量演化的分析可以知道:块石颗粒平均旋转量、应变能以及摩擦功的演化规律与图 6 中各块石形状试样的宏观应力应变响应对应的.当含石量为 80% 时,块石为球体、正方体、长方体的土石混合体试样中块石颗粒间相互作用越来越强,粒间结构也越来越稳定,所以其峰值强度和残余强度也越来越高.

对于图 7 中给出的结果,当含石量从 30% 增加到 80% 时,虽然含石量大大增加,块石颗粒间已发

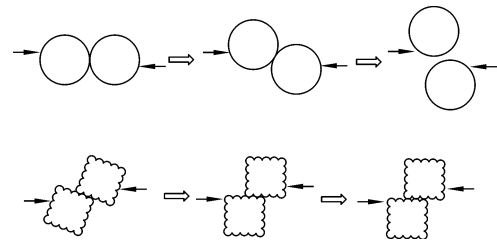


图 17 不同形状块石颗粒运动机理示意图

Fig. 17 Schematic diagram of movement mechanisms of rock blocks of different shape

生明显的相互作用,可以提高试样的强度,但同时胶结土体基质含量大大减少,胶结作用变弱,这又会降低试样的强度,最终的结果取决于两者哪一个作用更强.对于球形块石,颗粒间相互作用不强,结果是两者作用近似,所以应力应变曲线变化不大;而对于正方体块石,由于棱角和表面粗糙等的存在,使得块石颗粒间相互作用大大增强,明显超过由胶结基质含量减少所损失的强度,所以其峰值强度和残余强度均大幅提升.

5 结论

本文对不同含石量的含有不同形状块石的胶结土石混合体的大三轴试验进行了颗粒流数值模拟,获得了其宏观力学响应,并分低、高含石量两种情况从细观水平上对块石形状影响的作用机理进行了深入地分析,获得了一些有意义的结论,对于土石混合体中实际不规则块石的建模、土石混合体变形破坏机理的研究及土石混合体强度参数的确定等均有一定的参考价值.

(1) 含石量为 30% 时,块石为球体的土石混合体试样的峰值强度、残余强度和破坏应变均比块石为正方体和长方体的试样大,而块石为正方体和长方体的试样的应力应变关系基本一致.

(2) 当含石量为 80% 时,块石为正方体和长方体的土石混合体试样的峰值强度、残余强度和破坏应变均比块石为球体的试样大幅提高;块石为长方体的试样的峰值强度与块石为正方体的试样相比略有提高,但不明显,而残余强度提高明显.

(3) 低含石量的胶结土石混合体中块石分散在胶结土体基质中,其力学特性主要由胶结土体基质和土石界面接触特性决定,在加载过程中,试样中微

裂纹起始于土与块石颗粒间,而在土基质中扩展. 正方体和长方体块石颗粒的棱角分明,在其棱角边缘处容易出现应力集中,造成块石与土颗粒接触处黏结更容易发生破裂,加速了微裂纹的发生和扩展.

(4) 对于高含石量的土石混合体,块石颗粒之间可以充分接触、咬合,其力学特性主要由块石颗粒之间的相互作用所决定. 球形块石颗粒的平均旋转量的三个分量均显著大于正方体块石和长方体块石颗粒. 正方体块石颗粒与长方体块石颗粒相比绕 X 轴和 Y 轴的平均旋转量基本相同,绕 Z 轴的平均旋转量稍大. 颗粒平均旋转量的关系与宏观应力应变响应关系基本一致.

(5) 对于高含石量的土石混合体,块石形状为球体、正方体和长方体对应的应变能和摩擦功均依次增大. 块石形状为正方体和长方体特别是长方体的土石混合体试样摩擦功-轴向应变曲线出现了多个平稳段与陡升段相交替出现的现象,反映了块石颗粒间相互接触、咬合与相对摩擦、滑移交替出现,块石结构不断调整的内在机制.

参考文献

- [1] 徐文杰,胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质,2009,36(4):50-56. (Xu W J, Hu R L. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2009,36(4):50-56. (in Chinese))
- [2] 赫建明. 三峡库区土石混合体的变形与破坏机制研究[D]. 北京:中国矿业大学,2004. (He J M. Study of Deformation and Failure Mechanisms of Soil-Rock Aggregate in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Beijing:China University of Mining and Technology, 2004. (in Chinese))
- [3] 丁秀丽,张宏明,黄书岭,卢波,张群. 基于细观数值试验的非饱和土石混合体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(8):1553-1566. (Ding X L, Zhang H M, et al. . Research on mechanical characteristics of unsaturated soil-rock mixture based on numerical experiments of mesostructure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(8):1553-1566. (in Chinese))
- [4] 赵金凤,严颖,季顺迎. 基于离散元模型的土石混合体直剪试验分析[J]. 固体力学学报,2014,35(2):124-134. (Zhao J F, Yan Y, Ji S Y. Analysis of direct shear test of soil-rock mixture based on discrete element model[J]. Chinese Journal of solid Mechanics ,2014, 35(2):124-134. (in Chinese))
- [5] 金磊,曾亚武,李欢,李晶晶. 基于不规则颗粒离散元的土石混合体大三轴数值模拟[J]. 岩土工程学报,2015,37(5):829-838. (Jin L, Zeng Y W, Li H, Li J J. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture based on DEM of irregularly shaped particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(5):829-838. (in Chinese))
- [6] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D]. 北京:北方交通大学,2001. (You X H. Stochastic Structural Model of the Earth-rock Aggregate and its Application[D]. Beijing: Northern Jiaotong University,2001. (in Chinese))
- [7] 薛亚东,刘忠强,黄宏伟. 砂砾石混合物抗剪强度特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(6):75-79. (Xue Y D, Liu Z Q, Huang H W. Experimental analysis on shear strength characteristics of sand-gravel mixtures[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2012,34(6):75-79. (in Chinese))
- [8] Li Y R. Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2013. 72(3-4):371-381.
- [9] Li Y R, Huang R Q, Chan L S, Chen J. Effects of particle shape on shear strength of clay-gravel mixture [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2013. 17(4):712-717.
- [10] Kalender A, Sonmez H, Medley E, Tunusluoglu C, Kasapoglu K E. An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils[J]. Engineering Geology,2014. 183:65-79.
- [11] Graziani A, Rossini C, Rotonda T. Characterization and DEM modeling of shear zones at a large dam foundation[J]. International Journal of Geomechanics,2012. 12(6):648-664.
- [12] Cho G C, Dodds J, Santamarina J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(5):591-602.
- [13] Zeng Y W, Jin L, Du X, Gao R. Refined modeling and movement characteristics analyses of irregularly shaped particles [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2015, 39(4):388-408.

- [14] Itasca Consulting Group, Inc. Universal Distinct Element Code Version 3.1[M]. Minneapolis; Itasca Consulting Group, 2006.
- [15] Sun S R, Xu P L, Wu J M, Wei J H, Fu W G, Liu J, Debi Prasanna Kanungo. Strength parameter identification and application of soil-rock mixture for steep-walled talus slopes in southwestern China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(1):123-140.
- [16] Medley E W. The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (bim-rocks)[D]. Dept. of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley, CA, 1994.
- [17] 周健,王家全,曾远,张姣. 土坡稳定分析的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(1):86-90. (Zhou J, Wang J Q, Zeng Y, et al. . Simulation of slope stability analysis by particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1):86-90. (in Chinese))
- [18] Cho N, Martin C D, Sego D C. A clumped particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(7):997-1010.
- [19] Nouguiet-Lehon C, Cambou B, Vincens E. Influence of particle shape and angularity on the behavior of granular materials: a numerical analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(14):1207-1226.
- [20] Kozicki J, Teichman J, Mroz Z. Effect of grain roughness on strength, volume changes, elastic and dissipated energies during quasi-static homogeneous triaxial compression using DEM[J]. Granular Matter, 2012, 14(4):457-468.

ANALYSIS ON MESO-MECHANISMS OF INFLUENCE OF ROCK BLOCK SHAPE ON MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTED SOIL-ROCK MIXTURE

Lei Jin¹ Yawu Zeng¹ Jingjing Li²

⁽¹⁾ School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072)

⁽²⁾ State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430071)

Abstract In order to explore the meso-mechanisms of influence of rock block shape on mechanical properties of cemented soil-rock mixture (SRM), Spherical, cubic and cuboid-shaped rock blocks are taken into consideration. SRM with cubic rock blocks are compared with that with spherical rock blocks to explore the influence of block angularity. SRM with cuboid-shaped rock blocks are compared with that with cubic rock blocks to explore the influence of block sphericity. Firstly, numerical models of cubic and cuboid-shaped rock blocks are constructed based on a 3-D DEM refined modeling technology for irregularly shaped particles. Then, 3-D DEM stochastic models of cemented SRM with 30% and 80% rock block proportion (RBP) are established, whose block shape is spherical, cubic and cuboid-shaped respectively. Then, a particle flow simulation of large scale triaxial tests of SRM is conducted to obtain strength and deformation characteristics of SRM with different rock block shape and RBP. Finally, Meso-mechanisms of influence of rock block shape on mechanical properties of cemented SRM with low and high RBP is intensively analyzed. The results show that RBP and rock block shape both significantly affect the mechanical behaviors of SRM and there is complicated interaction of the two factors. The evolution of micro-crack, mean rotation of rock blocks, strain energy and frictional work can well reflect the meso-mechanisms of influence of rock block shape.

Key words cemented soil-rock mixture (SRM), 3-D DEM, rock block shape, meso-mechanisms, particle rotation