

DOI: 10.11779/CJGE201812018

# 基于三维柔性薄膜边界的土石混合体大型三轴试验 颗粒离散元模拟

金 磊<sup>1, 2</sup>, 曾亚武<sup>2</sup>

(1. 湖北理工学院土木建筑工程学院, 湖北 黄石 435003; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 为了有效模拟土石混合体室内大型三轴试验侧向柔性乳胶膜的力学行为, 提出了一种可行的三轴试验侧向柔性薄膜边界的三维离散元模拟方法, 即三维组合墙法。结合已开发的不规则块石及土石混合体三维离散元建模方法, 建立了可考虑柔性薄膜边界的土石混合体大型三轴试样三维离散元模型。引入平行黏结模型以更好地模拟胶结土石混合体中颗粒间的胶结作用, 通过开展大型三轴数值试验逐一全面地标定了无胶结土石混合体和胶结土石混合体数值模型的细观力学参数。分析了无胶结土石混合体和胶结土石混合体数值试样的变形破坏过程及特征, 并与室内试验结果进行了对比。结果表明: 所提出的三维柔性薄膜边界建模方法原理简单, 参数较少, 易于实现, 且能节省计算资源; 基于三维柔性薄膜边界的土石混合体大型三轴试验颗粒离散元模拟能较好地再现土石混合体的应力 - 应变特征、无胶结土石混合体的鼓肚变形破坏特征、胶结土石混合体变形局部化的过程及其剪切带的细观结构特征。

**关键词:** 土石混合体; 大型三轴试验; 三维柔性薄膜边界; 颗粒离散元; 变形破坏特征

**中图分类号:** TU411      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2018)12-2296-09

**作者简介:** 金 磊(1989-), 男, 博士, 主要从事复杂岩土体三维颗粒离散元建模及其变形破坏机理等方面的研究工作。E-mail: whujinlei@whu.edu.cn。

## Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture using DEM with three-dimensional flexible membrane boundary

JIN Lei<sup>1, 2</sup>, ZENG Ya-wu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to effectively simulate the mechanical behavior of lateral flexible latex film used in large-scale triaxial tests on soil-rock mixture (SRM), a feasible three-dimensional discrete element (3-D DEM) modeling method, named 3-D wall-arrangement method for the flexible membrane boundary, is proposed. In conjunction with the previously developed 3-D DEM modeling method for irregularly shaped rock blocks and SRM, the 3-D DEM models of SRM large-scale triaxial specimens are constructed. Then, the parallel-bond model is introduced to better simulate the cementation in cemented SRM, and the meso-mechanical parameters of numerical specimens are calibrated comprehensively by conducting a series of numerical large-scale triaxial tests. Finally, the deformation and failure processes and characteristics of numerical specimens of uncemented and cemented SRMs are analyzed and compared with the results of the corresponding laboratory experiments. The results show that the proposed modeling method for three-dimensional flexible membrane boundary presents many obvious advantages including simple principle, fewer parameters, convenient implementation and saving computing resources. The stress-strain characteristics of SRM, bulging deformation of uncemented SRM, deformation localization process and meso-structural characteristics of shear band of cemented SRM are all well reproduced by carrying out the DEM simulation of large-scale triaxial test on the constructed and calibrated SRM model with the developed three-dimensional flexible membrane boundary.

**Key words:** soil-rock mixture; large-scale triaxial test; three-dimensional flexible membrane boundary; granular discrete element simulation; deformation and failure characteristic

## 0 引言

土石混合体 (Soil-rock mixture, 简称 SRM) 是由

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41272342); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目 (T201823); 湖北理工学院校级科研项目 (18xjz14R)

收稿日期: 2017-10-16

较大的块石、细粒土体和孔隙等所构成的一种非均质、非连续、非线性的复杂地质体, 具有独特的力学性质。国内外诸多水电工程、交通工程建设中都遇到了这种特殊地质体, 其稳定性直接影响着工程的安全施工与正常运行。因此, 研究土石混合体的变形破坏机理对于地质工程防灾减灾具有重要的意义。

土石混合体变形破坏机理研究现已成为岩土工程领域一个热点问题, 同时也是一个难点问题。目前主要的研究方法有现场大型推剪试验、室内大型直剪试验和三轴试验及其数值模拟。数值模拟方法主要包括有限元法、有限差分法和离散元法等。其中, 颗粒离散元法在探究岩土材料变形破坏的细观机理方面表现出显著的优越性, 基于颗粒离散元的大型双轴或三轴数值试验作为一种重要的研究手段正被越来越多的学者所采用。

丁秀丽等<sup>[1]</sup>、石崇等<sup>[2]</sup>基于数字图像处理技术生成了土石混合体真实细观结构的二维颗粒流模型, 并进行了双轴试验颗粒离散元模拟。Graziani 等<sup>[3]</sup>、田湖南等<sup>[4]</sup>将块石简化为圆形、三角形和四边形等建立了土石混合体随机细观结构的二维颗粒离散元模型, 并开展了双轴数值试验研究。王新<sup>[5]</sup>采用球体模拟块石和土颗粒, 建立了土石混合体大型三轴试验三维颗粒离散元模型, 并进行了大型三轴数值试验。金磊等<sup>[6-7]</sup>提出了一种不规则块石的三维离散元建模方法, 建立了土石混合体大型三轴试样三维离散元模型, 对大型三轴试验进行了颗粒流模拟, 分析了块石含量和形状对土石混合体力学性能影响的细观机理。值得注意的是上述研究成果中所建立的大型三轴试验模型的侧向边界均是直接采用刚性的直线墙(二维)或圆柱墙(三维)来进行模拟。

室内三轴试验中的侧向边界是柔性乳胶膜, 其作用是既能允许试样发生自由变形同时又能施加和维持一定的围压, 其行为对试样的力学特性和破坏模式均有较大的影响。Cheung 等<sup>[8]</sup>分别利用其自行开发的柔性薄膜边界和 PFC 中的圆柱形墙边界开展了颗粒材料三轴试验的颗粒离散元模拟, 对比分析发现这两种边界条件下试样的应力分布和破坏模式都明显不同, 采用不可变形的刚性圆柱墙边界时试样边缘易出现应力集中且会限制变形局部化或剪切带的自由发展, 从而使得破坏模式与室内三轴试验的结果相比有明显差异。因此, 在三轴试验数值模拟中对侧向柔性薄膜的合理模拟并使其能够最大限度地接近实验室实际情况, 对于岩土体三轴试验宏观应力应变特性和破坏模式的准确模拟及微观结构演变的进一步研究等都是至关重要的。

Xu 等<sup>[9]</sup>提出在土石混合体双轴试样模型的两侧

加上一定厚度的光滑颗粒集合体来模拟柔性薄膜。但该法可能存在一些问题, 如这部分薄膜颗粒在试样加载后发生较大变形时是否还能保证试样边界处受到均匀的围压; 另外这种方法也使得模型中的颗粒数量大大增加, 降低了计算效率, 尤其是三维情形。

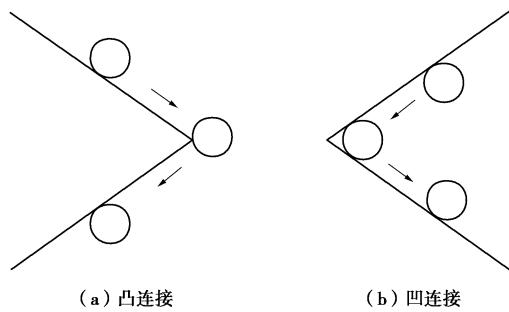
为了更有效地模拟土石混合体大型三轴试验中侧向柔性薄膜的力学行为, 本文在综合分析已有柔性膜边界模拟方法的基础上, 提出一种简单高效的三轴试验侧向柔性薄膜三维离散元模拟方法——三维组合墙法, 在此基础上利用已开发的不规则块石及土石混合体大型三轴试样三维离散元建模方法<sup>[10]</sup>, 建立考虑柔性膜边界的土石混合体大型三轴试样三维离散元模型; 开展大型三轴数值试验, 分别标定无胶结土石混合体和胶结土石混合体模型的细观力学参数; 分析无胶结土石混合体和胶结土石混合体的变形破坏特征, 并与室内试验结果进行对比以验证所建模型的可靠性, 从而为进一步开展数值模拟深入探究土石混合体变形破坏的细观机理提供有利条件。

## 1 三维柔性薄膜的离散元模型

### 1.1 PFC<sup>3D</sup> 中墙(Wall) 的简介

颗粒离散元软件 PFC<sup>3D</sup> 中一般是采用墙单元来作为模型边界, 因此有必要介绍一下墙的相关背景知识。PFC<sup>3D</sup> 中提供了标准墙和广义墙两种墙。标准墙是平面, 可分为有限平面和无限平面两种, 而广义墙指的是圆柱面或螺旋面等其他形式的曲面。在这些类型的墙中, 有限平面墙应用最广, 它是由指定的可构成一个多边形的一系列顶点来定义的。有限平面墙只有一侧处于激活状态, 即只有一侧可以与颗粒发生相互作用, 激活一侧由这些顶点的定义顺序按右手法则确定, 或者说从激活一侧去观察平面墙, 这些顶点是按逆时针顺序来定义的<sup>[11]</sup>。

假设现在有两个平面互相连接, 一个球沿着一个平面运动到另一个平面, 接触点的过渡方式将取决于相邻的两个平面的连接方式, 如图 1 所示。由图可见, 当两个平面相对于激活一侧为凸连接, 球与平面的接触点能平稳地从第一个平面经顶点过渡到第二个平面上, 任何时刻球与一个平面只会有一个接触; 而当两个平面相对于激活侧为凹连接, 则球运动到连接处时总是会发生与两个平面同时接触的情形。针对这两种情况的差异, PFC<sup>3D</sup> 中也采用了不同的处理方式, 针对凸连接可将这两个平面作为一个墙单元来处理; 而针对凹连接则必须将这两个平面分别定义为两个不同的墙单元, 因为一个墙与一个颗粒在任何一个时刻只能有一个接触<sup>[11]</sup>。

图 1 PFC<sup>3D</sup> 中相邻两个平面的连接方式Fig. 1 Connection of two adjacent planes in PFC<sup>3D</sup>

## 1.2 柔性薄膜模拟方法回顾

在室内三轴试验中，边界条件主要包括端部的刚性加载板和侧向的柔性薄膜。端部的刚性加载板可直接采用上节介绍的平面墙来模拟，只需要将其刚度设置的较颗粒大一些即可模拟其刚性特征，而柔性薄膜的有效模拟则比较复杂，尤其是三维模拟。

在已有的岩土材料三轴试验离散元模拟中，国内外学者们提出了多种模拟柔性薄膜的方法。最初的也是最简单最常用的方法是直接采用刚性墙来进行模拟，这对直剪试验非常适合，但它不能有效地模拟柔性薄膜的实际行为。早期另一种常用的方法是采用周期边界<sup>[12]</sup>，所谓周期边界指的是颗粒从试样一侧脱离的同时在另一侧增加一个相同的颗粒。显然，这种方法的边界被视为是无限的，从而消除了边界的影响，但它不能体现试样在边界处的破坏形式。

近年来，一些研究者开始尝试采用新的模拟方法。Wang 等<sup>[13]</sup>和蒋明镜等<sup>[14]</sup>提出将颗粒用接触黏结联结成颗粒串来模拟胶结砂土双轴试验中的侧向柔性薄膜（柔性联结颗粒法）。Bono 等<sup>[15]</sup>和 Cil 等<sup>[16]</sup>进一步开发了三维的柔性联结颗粒串薄膜边界并应用于胶结砂土三轴试验的三维颗粒离散元模拟中。这种采用柔性联结的颗粒串来直接模拟柔性薄膜的方法比较接近实际薄膜的行为，应用效果也较好。但这种方法一方面需要额外增加颗粒来模拟薄膜，另一方面，这种方法对三维情形比较复杂，尤其是当试样加载后发生侧向膨胀变形时需要实时在颗粒串中增加颗粒或按一定算法增大颗粒半径来模拟薄膜的扩展，这也使得该方法实现起来比较困难。

Cheung 等<sup>[8]</sup>提出用试样边界处在理论上与薄膜相接触的范围内的颗粒作为边界颗粒，然后通过给这些边界颗粒施加一定的力来维持所需要的围压从而可以间接模拟薄膜的行为（边界区域颗粒法）。因此，这种方法无需增加额外的薄膜颗粒就能较好地模拟薄膜的作用。然而，在模拟过程中试样变形会引起原来的边界颗粒产生位移而可能不再属于边界颗粒，所以计

算过程中需要不断更新判断边界颗粒和计算所需施加的力，这将大大增加计算时间，且该算法在三维情形下的实现也相当复杂。

Zhao 等<sup>[17]</sup>提出用一系列高度较小的圆柱面（常规三轴试验）或平面墙（平面应变试验）堆叠组合来模拟侧向薄膜，并成功地用于常规三轴试验和平面应变试验的离散元模拟中。在 PFC<sup>3D</sup> 中，堆叠墙中的每一个墙都可以独立运动，从而可以在一定程度上允许试样自由变形，而围压则可以通过采用数值伺服机制控制每个墙的运动方向和速度来施加和维持<sup>[11]</sup>。由于 PFC<sup>3D</sup> 中墙的计算相对于颗粒的计算要简单得多，因此这种方法相对于柔性联结颗粒法和边界区域颗粒法算法更为简单、易于实现且计算效率也大大提高。

然而，Zhao 等提出的薄膜模型仍存在一些不足，一方面其只在竖向上进行了墙的堆叠，对于三轴试验这可以模拟竖向上不同高度处的差异变形，但无法模拟试样在横向不同方向上的差异变形。另外，模型中每个圆柱形墙都是没有厚度的，若其数量不足够多，试样变形过程中上下相邻两墙的错开距离较大时颗粒就可能会逃逸出去；若圆柱形墙数量太多，则不仅会降低计算效率，而且部分墙单元可能会因没有颗粒接触导致数值伺服机制失效。针对这些不足，本文在该法的基础上提出一种更加完善的三轴试验柔性薄膜离散元模拟方法，即三维组合墙法，以更好地模拟室内三轴试验中柔性薄膜的实际行为。

## 1.3 柔性薄膜模拟的三维组合墙法

基于已提出的不规则块石和土石混合体三维离散元建模方法<sup>[10]</sup>，本文建立了与文献[18]中室内大型三轴试验相对应的各含石量（Mass block proportion，简称 MBP）的土石混合体大型三轴试样三维离散元模型，如图 2 所示，图中青色的团粒（Clumps）表示土颗粒，浅蓝色的团粒表示块石颗粒。为了更好地模拟土颗粒的形态及提高计算效率，在建模时将土体颗粒简化为由两个球相切组成的团粒来模拟，粒径小于 10 mm 的土颗粒由 10~20 mm 粒组的土颗粒进行等量替代，其他同文献[10]。

在上述所建立的土石混合体数值试样中，侧向边界是一个刚性的圆柱形墙。为了允许数值试样在轴向不同高度处及横向不同方向上都能自由变形，本文提出的方法是：将该圆柱形墙在轴向即高度上进行分层，每层高度相同；同时，在横向将圆形的横截面用外切正多边形近似替代。考虑到计算效率，通过不同分层数和不同边数多边形的对比表明：在高度上分 7 层、横截面上用外切正 24 边形时可满足本文模拟的需要，这样原来的圆柱形墙边界就可以由 168 个平面墙单元按圆柱形排列组合来代替，如图 3 所示。

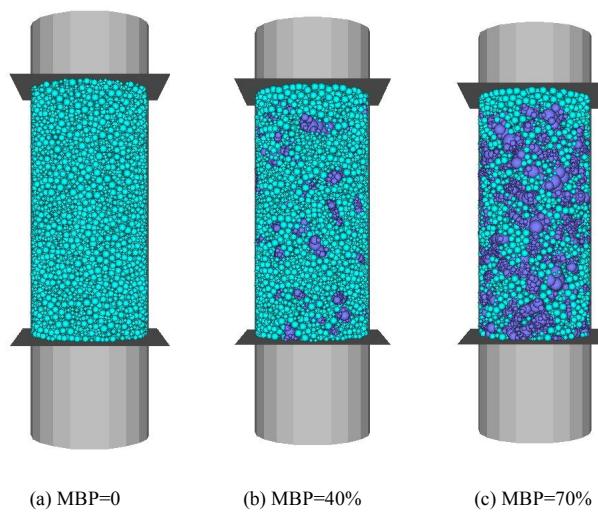


图2 土石混合体大型三轴试样三维离散元模型

Fig. 2 3-D DEM models for large-scale triaxial specimens of SRM

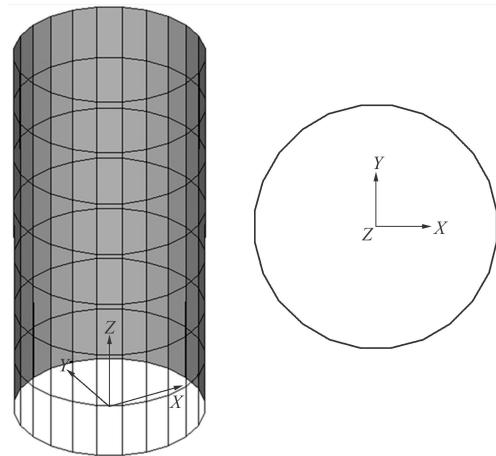


图3 圆柱形边界的平面墙组合替代

Fig. 3 Arrangement substitute of plane walls for cylindrical boundary

在 PFC<sup>3D</sup> 中围压是通过数值伺服机制控制每个墙的运动方向和速度来施加和维持的<sup>[11]</sup>。当对数值试样加载后, 试样会出现变形, 为了维持设定的围压, 这些平面墙单元会发生运动, 这里只允许各墙单元能独立的进行径向运动, 以此来模拟薄膜的变形。为了防止轴向上( $z$  向)相邻的两个墙单元之间错开距离较大造成颗粒从边界逃逸出去, 需将各平面墙单元沿径向外延伸, 即要采用一定厚度的长方体单元来模拟, 本文模型中各平面墙单元向外延伸试样半径的  $1/5$  长度, 如图 4(a) 所示。另一方面, 当试样发生变形后, 横截面上相邻的两个墙单元可能会脱开, 这也可能会造成颗粒从模型中逃逸, 若采取不断添加新墙单元的方法则计算量增加且实现起来也比较复杂。实际上, 只要将各墙单元在环向上向两端相应延伸一定长度就能方便且有效地解决这一问题, 本文模型中各墙单元

在环向上各自向两端延伸原来长度的一倍, 如图 4(b) 所示。

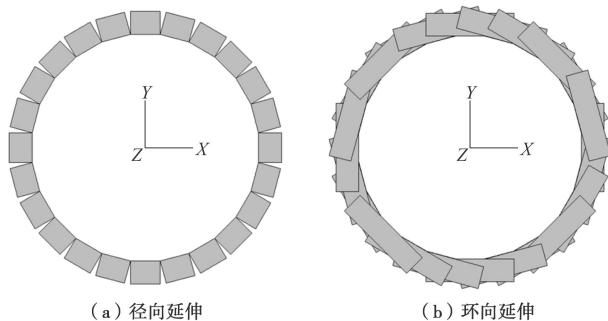


图4 柔性薄膜模型中平面墙单元延伸为长方体单元

Fig. 4 Plane walls arranged to model flexible membrane boundary extended into cuboids

由 1.1 节可知 PFC 中的墙单元只有平面和圆柱面等, 并无长方体的墙, 这里长方体的薄膜单元需由 6 个平面墙作为长方体的 6 个面来模拟。但实际上在数值试验过程中只有内侧的面和上下两个面可能与颗粒发生相互作用, 因此只要生成这 3 个面即可。根据图 1 所示平面墙的两种连接方式可知这里每个薄膜单元的 3 个组成平面为凸连接, 故可作为一个墙单元来处理, 这样一个薄膜单元指的就是由 3 个面组成的一个墙单元。由所有薄膜单元所形成的三维柔性薄膜边界模型及单个薄膜单元如图 5 所示。

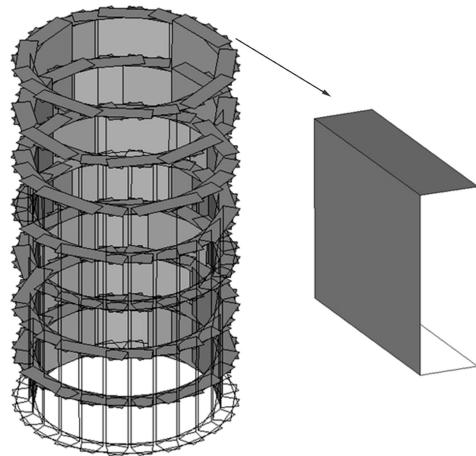


图5 三维组合墙法生成的三轴试验柔性薄膜模型

Fig. 5 Flexible membrane model in triaxial tests generated by 3-D wall-arrangement method

三轴试验中顶部和底部的刚性板可直接由方形的平面墙单元来模拟, 不过也要进行一定的延伸以防试样变形后颗粒逃逸, 图 6(a) 示出了含石量为 40% 的土石混合体大型三轴试样离散元模型, 其中原来建模时采用的圆柱形墙已替换为三维组合墙柔性薄膜边界。这里, 需要注意的是在后续加固压及试样体变计算时都需要得到墙的有效面积, 所谓墙的有效面积指

的就是与颗粒集合体有作用的那部分面积，其等于有效宽度与有效高度的乘积。其中，有效宽度为薄膜模型中内层相邻角点间的距离，如图 6 (b) 所示，初始的有效宽度即是图 3 中外切正 24 边形的边长，加围压及剪切阶段各墙单元会发生位移，其位移量可由 PFC<sup>3D</sup> 内置的 FISH 函数  $w_x(wp)$  和  $w_y(wp)$  获得，内层各角点位置相应更新，由新的角点坐标可求得此时的有效宽度。有效高度对于中部各层薄膜单元即为其高度，但最上一层和最下一层薄膜单元则要扣除加载板移动的距离。

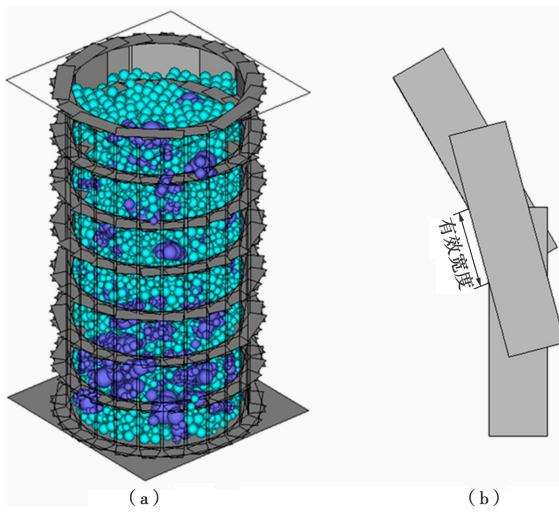


图 6 采用三维柔性薄膜边界的土石混合体大型三轴数值试样及薄膜单元有效宽度示意图

Fig. 6 Numerical large-scale triaxial specimen of SRM with 3-D flexible membrane boundary and schematic diagram of valid membrane width

从提出的三维柔性薄膜模型的建模方法可以看到，该建模方法较其他方法相比原理更简单，参数较少，易于实现，且能节省计算资源、提高计算效率。

## 2 模型细观力学参数的标定

### 2.1 无胶结土石混合体细观力学参数标定

考虑到室内试验中土石混合体的组成结构特征，选取线性接触刚度模型和滑移模型来模拟无胶结土石混合体颗粒之间的接触本构行为<sup>[11]</sup>。因此，无胶结土石混合体大型三轴试样离散元模型需要确定的细观力学参数有两套，分别是块石颗粒的法向刚度、法切向刚度比、细观摩擦系数和土体颗粒的法向刚度、法切向刚度比和细观摩擦系数。

本文采用的细观力学参数标定步骤是：首先，开展含石量为 100% 的土石混合体即块石集合体的大型三轴数值试验并与相应的室内试验结果对比来标定块石颗粒的细观力学参数；接着，利用已标定的块石颗粒参数，通过开展含石量为 40%、围压为 0.1 MPa 的

无胶结土石混合体的大型三轴数值试验并与相应的室内试验结果对比来标定土颗粒的细观力学参数；最后，采用标定的块石和土颗粒细观力学参数，对含石量为 40%、围压为 0.2 MPa 的无胶结土石混合体的大型三轴试验进行数值模拟，并与相应的室内试验结果进行对比，以此来验证所建立的颗粒模型和所标定的细观力学参数的可靠性。

按上述方法所确定的无胶结土石混合体的颗粒细观力学参数如表 1 所示。另外，上下边界墙的法向刚度和切向刚度均设为  $1.0 \times 10^8$  N/m，摩擦系数设为 0.5；而所有侧向柔性薄膜墙单元的法向刚度都设为  $2.8 \times 10^5$  N/m，切向刚度和摩擦系数均设为 0。

表 1 无胶结土石混合体离散元模型的细观力学参数

Table 1 Meso-mechanical parameters of uncemented SRM model

颗粒	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	法向刚度 $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	法切向 刚度比	摩擦 系数
土	2600	2.8e6	1.5	0.41
块石	2870	1.0e7	1.0	0.45

采用上述细观参数时数值试验和相应室内试验的应力-应变曲线对比如图 7 所示，图中图例与文献[18]中的规定一样表示试验条件，后面加上 DEM 表示该室内试验相应的数值试验。

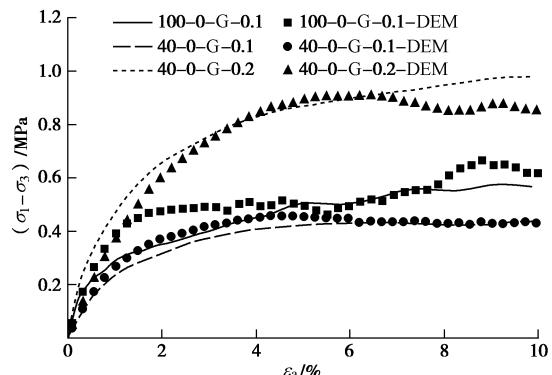


图 7 无胶结土石混合体细观力学参数标定的对比曲线

Fig. 7 Comparison curves for calibration of meso-mechanical parameters of uncemented SRM

由图可见，含石量为 100%、块石形状为碎石、围压为 0.1 MPa 的无胶结土石混合体数值试验与相应的室内试验结果相比，初始模量和峰值强度比较接近，只是数值试样发生明显屈服时的应变要大一些；含石量为 40%、块石形状为碎石、围压为 0.1 MPa 的无胶结土石混合体数值试验与相应的室内试验结果匹配的较好；采用标定的参数所进行的含石量为 40%、块石形状为碎石、围压为 0.2 MPa 的无胶结土石混合体数值试验与相应的室内试验结果总体上匹配的也较好。因此，可以认为所建立的数值模型和标定的细观力学参数是比较可靠的。

## 2.2 胶结土石混合体细观力学参数标定

胶结土石混合体的土颗粒间及土-石颗粒间形成了一定量的胶结物, 这使得其峰值强度和初始模量较相同条件下无胶结土石混合体试样有大幅提高, 且峰后具有明显的应变软化特性<sup>[18]</sup>。文献[2, 7]均采用接触黏结模型来模拟胶结土石混合体颗粒间的胶结作用, 但该模型无法模拟胶结试样较无胶结试样初始模量的大幅提高。为此, 本文采用更能反映胶结物力学特性的平行黏结模型来进行模拟<sup>[11]</sup>。胶结土石混合体的细观力学参数标定就是在上述无胶结土石混合体的一套颗粒细观力学参数的基础上再添加一组合适的平行黏结参数即可。

平行黏结模型由 5 个参数定义, 即法向刚度  $\bar{k}_n$  和切向刚度  $\bar{k}_s$  (量纲: 应力/位移); 法向强度  $\bar{\sigma}_c$  和切向强度  $\bar{\tau}_c$  (量纲: 应力); 黏结半径  $\bar{R}$ 。其中, 黏结半径是通过设置平行黏结半径因子  $\bar{\lambda}$  并通过下式确定:

$$\bar{R} = \bar{\lambda} \min(R^{[A]}, R^{[B]}) , \quad (1)$$

式中,  $R^{[A]}$ ,  $R^{[B]}$  分别为相互胶结的两个颗粒的半径。

Potyondy 等<sup>[19]</sup>给出了岩石颗粒离散元模拟中所用平行黏结模型参数的标定方法和步骤。由于平行黏结模型参数较多, 需要通过一定的假设来减少需要标定的参数数量, 一般方法是将平行黏结的法向强度和切向强度的比值及半径因子设为 1.0; 将法向刚度和切向刚度的比值与颗粒的法切向刚度比设为相同。另外, 法向刚度可由平行黏结的弹性模量确定, 而平行黏结的弹性模量一般与颗粒间接触模量取相同值。将颗粒间的弹性接触作用看成是一个两端在颗粒球心处的弹性梁, 它的半径视为两个颗粒的平均半径:

$$\tilde{R} = \frac{R^{[A]} + R^{[B]}}{2} , \quad (2)$$

长度为

$$L = 2\tilde{R} = R^{[A]} + R^{[B]} . \quad (3)$$

由弹性梁的理论推导可得出颗粒间接触模量  $E_c$  和颗粒法向刚度  $k_n$  之间的关系为

$$k_n = 4E_c \tilde{R} . \quad (4)$$

颗粒间平行黏结也可作为一个弹性梁处理, 其弹性模量和法向刚度的关系为

$$\bar{k}^n = \frac{\bar{E}_c}{L} . \quad (5)$$

确定了颗粒的法向刚度后根据式(2)~(5)就可以确定平行黏结的法向刚度了, 根据法切向刚度比可进一步确定平行黏结的切向刚度, 相关公式的推导详见参考文献[11]。

对于本文所研究的胶结土石混合体, 其平行黏结的法向刚度和切向刚度也可采用上述方法确定, 其法向强度和切向强度的比值也设为 1。但值得注意的是

平行黏结半径因子即黏结的半径反映了颗粒间胶结物含量的多少, 岩石中胶结物含量较高, 所以其半径因子取 1.0。而胶结土石混合体中颗粒间胶结物相对较少, 故其半径因子应小于 1.0。由室内试验中胶结土石混合体和无胶结土石混合体力学特性的对比可知, 颗粒间形成的一一定含量的胶结使得试样模量和强度都有明显提高<sup>[18]</sup>。为此, 这里通过调节平行黏结的法向强度使得数值试样的强度达到相应室内试样的强度, 通过调节半径因子来同时调整数值试样的强度和模量, 经多次调试即可确定合适的平行黏结法向强度和半径因子。

根据胶结土石混合体室内试样中颗粒间的胶结情况, 本文暂且忽略块石与块石颗粒间的胶结, 只考虑土颗粒间和土-石颗粒间的胶结并对其分别进行了标定, 具体过程是: 首先, 根据含石量为 0 的胶结土石混合体即均质胶结土体的大型三轴试验结果来确定土颗粒间的平行黏结参数; 然后, 基于已确定的土颗粒间平行黏结参数, 根据含石量为 40% 的胶结土石混合体的大型三轴试验结果进一步确定土-石颗粒间的平行黏结参数; 最后, 采用已标定的平行黏结参数和颗粒细观力学参数对含石量为 70% 的胶结土石混合体大型三轴试验进行数值模拟, 并与相应的室内试验结果进行对比验证, 如图 8 所示。所标定的结果是: 土-土颗粒间平行黏结半径因子为 0.2、法向强度为 10.7 MPa; 土-石颗粒间平行黏结半径因子是 0.4、法向强度为 9.4 MPa。

从图 8 可以看到, 均质胶结土体数值试验的应力-应变曲线与相应室内试验结果有一定差异, 具体表现为初始压密阶段不明显且峰后软化较室内试验更显著, 但初始模量和峰值强度吻合较好。含石量为 40% 和 70% 的胶结土石混合体的数值和室内试验曲线总体上是吻合的。

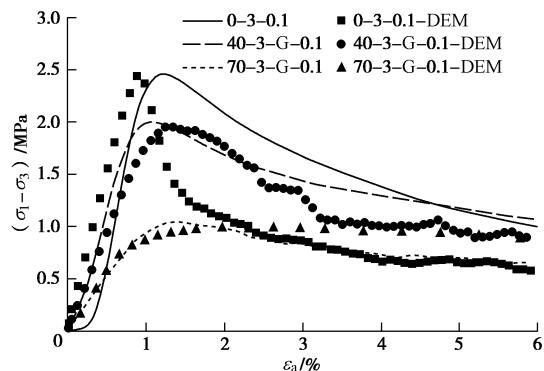


图 8 胶结土石混合体细观力学参数标定的对比曲线

Fig. 8 Comparison curves for calibration of meso-mechanical parameters of cemented SRM

由于土石混合体颗粒离散元模型中需要标定的细

观力学参数相对较多,且模型中土颗粒级配和形状都进行了一定程度的简化,所以局部的宏观力学响应与室内试验结果存在一定偏差。但总的来说,本文所建立的土石混合体数值模型和标定的颗粒及黏结细观力学参数是比较合理的,能够再现土石混合体主要的宏观应力-应变特征。

### 3 土石混合体的变形破坏特征

图 9 分别示出了含石量为 40% 的无胶结土石混合体和胶结土石混合体室内大型三轴试样的破坏形态。由图可见,无胶结土石混合体试样中部有轻微的鼓起,两端未见明显的变形;而胶结土石混合体试样剪胀显著,形成了明显的局部化剪切带<sup>[18]</sup>。文献[6, 7]中采用刚性的圆柱形墙边界来模拟土石混合体大型三轴试验的侧向柔性薄膜均未能再现上述无胶结土石混合体和胶结土石混合体的变形破坏特征。基于所提出的三维柔性薄膜模型和所标定的细观力学参数,通过大型三轴试验的数值模拟,本文获得了土石混合体的变形破坏过程及特征。



(a) 40-0-G-0.2



(b) 40-3-G-0.2

图 9 土石混合体室内大型三轴试样的破坏形态

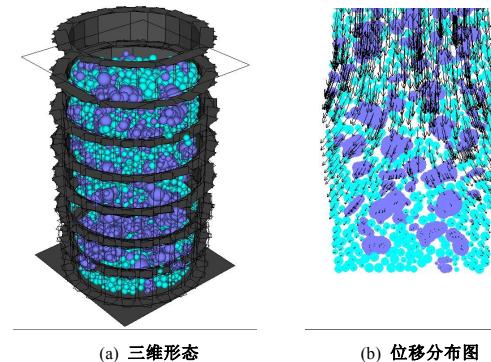
Fig. 9 Failure modes of laboratory SRM specimens

图 10 (a) 给出的是含石量为 40% 的无胶结土石混合体数值试样的三维破坏形态。由图可见,试样发生了一定的鼓肚变形,这与图 9 (a) 所示相应室内无胶结土石混合体试样的破坏形态是一致的。

图 10 (b) 进一步示出了试样从加轴压开始到试验结束时中间纵截面上的颗粒平动位移分布图。由图可见,上部颗粒主要是向下运动,而中部颗粒分别向两侧与轴向约呈 45° 往左下和右下运动,呈现出两个共轭的剪切带,所以宏观的破坏形态为中部的鼓肚变形破坏。

图 11 给出的是含石量为 40% 的胶结土石混合体数值试样在加载到峰值应力  $P_u$  的 50% 时、峰值应力  $P_u$  时和试验结束 (End) 时 3 个时刻的微裂纹分布图。这里给出的仍是中间纵截面图,图中微裂纹用八边形

表示,黑色八边形表示张拉破裂,红色八边形表示剪切破裂。

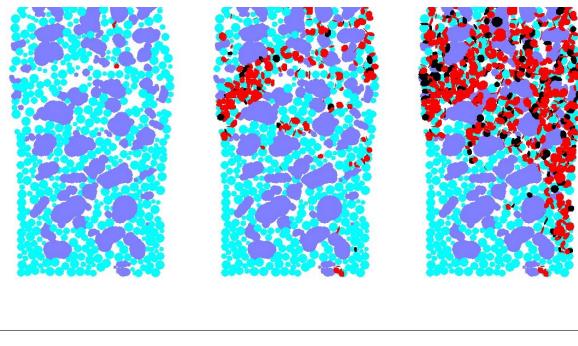


(a) 三维形态

(b) 位移分布图

图 10 无胶结土石混合体数值试样的变形破坏特征

Fig. 10 Deformation and failure characteristics of numerical uncemented SRM specimens

(a) 50% $P_u$ (b)  $P_u$ 

(c) End

图 11 胶结土石混合体数值试样的变形破坏过程及特征

Fig. 11 Deformation and failure processes and characteristics of numerical cemented SRM specimens

由图 11 可得:

(1) 当加载到峰前 50% $P_u$  时,试样中形成的微裂纹很少,多出现在块石附近,且主要为剪切微裂纹。这是因为,块石与土体强度和刚度差异较大,在外荷载作用下两者界面处易产生应力集中,土石颗粒易发生错动,形成剪切微裂纹。

(2) 当加载到峰值应力  $P_u$  时,试样中微裂纹数明显增加,并且已开始在土体中绕过块石扩展,并呈现出一定的局部化趋势。

(3) 加载结束时,试样的破坏集中于中上部,形成了明显的局部化剪切破坏带,剪切带较宽且剪切面绕过了较大的块石。将数值试样的剪切带与图 9(b)所示相应的室内试样剪切带进行对比可以看到两者的破坏特征是基本相同的。

通过上述分析可以看到基于本文所建立的三维柔性薄膜模型可以较好地模拟出无胶结土石混合体的鼓肚变形破坏特征与胶结土石混合体变形局部化的过程及其剪切带的细观结构特征,同时也进一步验证了本

文所建立的土石混合体大型三轴试样三维离散元模型的合理性和优越性。

## 4 结 论

(1) 提出了一种三轴试验三维柔性薄膜模型的建模方法, 即三维组合墙法, 该建模方法原理简单, 参数较少, 易于实现, 且能节省计算资源、提高计算效率。

(2) 引入平行黏结模型来模拟胶结土石混合体中颗粒间的胶结物, 分别给出了无胶结土石混合体和胶结土石混合体模型细观力学参数的标定方法, 通过开展大型三轴数值试验, 全面地标定了模型的细观力学参数, 与室内试验结果进行对比表明所建模型能较好地再现室内试样的宏观应力应变特征。

(3) 基于三维柔性薄膜模型的土石混合体大型三轴数值试验能较好地模拟出无胶结土石混合体的鼓肚变形破坏特征与胶结土石混合体变形局部化的过程及其剪切带的细观结构特征。

本文提出的基于三维柔性薄膜边界的土石混合体大型三轴试验颗粒离散元模型为土石混合体变形破坏机理的精细化模拟奠定了坚实基础。另外, 这一整套方法也可用于其他岩土材料三轴试验的颗粒离散元数值模拟中, 当然模型中涉及的参数可能需要进行适当调整。

## 参考文献:

- [1] 丁秀丽, 李耀旭, 王 新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 477 - 484. (DING Xiu-li, LI Yao-xu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 477 - 484. (in Chinese))
- [2] 石 崇, 王盛年, 刘 琳, 等. 基于数字图像分析的冰水堆积体结构建模与力学参数研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3393 - 3399. (SHI Chong, WANG Sheng-nian, LIU Lin, et al. Structure modeling and mechanical parameters research of outwash deposits based on digital image analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3393 - 3399. (in Chinese))
- [3] 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.
- [4] 田湖南, 焦玉勇, 王 浩, 等. 土石混合体力学特性的颗粒离散元双轴试验模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3564 - 3573. (TIAN Hu-nan, JIAO Yu-yong, WANG Hao, et al. Research on biaxial test of mechanical characteristics on soil-rock aggregate based on particle flow code simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3564 - 3573. (in Chinese))
- [5] 王 新. 土石混合体力学特性影响因素及破坏机制研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2010. (WANG Xin. Research on influence factors of mechanical characteristics and failure mechanism of soil-rock mixture[D]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [6] 金 磊, 曾亚武, 李 欢, 等. 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 Lei, ZENG Ya-wu, LI Huan, et al. 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))
- [7] JIN L, ZENG Y W, XIA L, et al. Experimental and numerical investigation of mechanical behaviors of cemented soil–rock mixture[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(1): 337 - 354.
- [8] 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.
- [9] XU W J, HU L M, GAO W. Random generation of the meso-structure of a soil–rock mixture and its application in the study of the mechanical behavior in a landslide dam[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 86: 166 - 178.
- [10] 金 磊, 曾亚武, 叶 阳, 等. 不规则颗粒及其集合体三维离散元建模方法的改进[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1273 - 1281. (JIN Lei, ZENG Ya-wu, YE Yang, et al. Improving three-dimensional DEM modeling methods for irregularly shaped particles and their assembly[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1273 - 1281. (in Chinese))
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. Universal distinct element code version 3.1[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2006.
- [12] THORNTON C. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media[J]. Géotechnique, 2000, 50(1): 43 - 53.
- [13] WANG Y H, LEUNG S C. Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations[J]. Journal of

- Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(7): 992 – 1004.
- [14] 蒋明镜, 张望城, 孙渝刚, 等. 理想胶结砂土力学特性及剪切带形成的离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2162 – 2169. (JIANG Ming-jing, ZHANG Wang-cheng, SUN Yu-gang, et al. Mechanical behavior and shear band formation in idealized cemented sands by DEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2162 – 2169. (in Chinese))
- [15] BONO D, MCDOWELL G R, WANATOWSKI D. Discrete element modelling of a flexible membrane for triaxial testing of granular material at high pressures[J]. Géotechnique Letters, 2012, **2**(4): 199 – 203.
- [16] CIL M B, ALSHIBLI K A. 3D analysis of kinematic behavior of granular materials in triaxial testing using DEM with flexible membrane boundary[J]. Acta Geotechnica, 2014, **9**(2): 287 – 298.
- [17] ZHAO X L, EVANS T M. Discrete simulations of laboratory loading conditions[J]. International Journal of Geomechanics, 2009, **9**(4): 169 – 178.
- [18] 金 磊, 曾亚武, 张 森. 块石含量及形状对胶结土石混合体力学性能影响的大型三轴试验[J]. 岩土力学, 2017, **38**(1): 141 – 149. (JIN Lei, ZENG Ya-wu, ZHANG Sen. Large-scale triaxial tests on effects of rock block proportion and shape on mechanical properties of cemented soil-rock mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(1): 141 – 149. (in Chinese))
- [19] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, **41**(8): 1329 – 1364.

## 第九届深基础工程发展论坛（第一号通知）

深基础工程发展论坛是由中国建筑业协会深基础与地下空间工程分会、中国工程机械工业协会桩工机械分会、中国工程机械学会桩工机械分会及中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础专业委员会联合主办。论坛主题紧扣行业发展方向、环节丰富多彩、规模逐年攀升，专业化、市场化突出，堪称工程界、学术界每年一度的高级论坛，是国内具有较大影响力的深基础工程领域交流与合作的最佳平台。

第九届论坛定于 2019 年 3 月下旬在江苏无锡召开。本届论坛旨在面向新时代深基础工程的发展需求，将围绕该领域勘察、设计、施工、科研、装备生产制造中面临的关键技术和产融合作进行探讨和交流。

**主办单位：**中国建筑业协会深基础与地下空间工程分会；中国工程机械工业协会桩工机械分会；中国工程机械学会桩工机械分会；中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础专业委员会。

**承办单位：**北京金山基础工程咨询有限公司。

**论坛主题：**新时代引领深基础工程新发展。

**征文内容：**

（1）深基础与地下空间工程先进理念与设计

超大超深基坑及地下结构建造关键技术深基坑工程的事故预防与处理对策；机械化建造装配式大型矩形断面地下工程综合技术研究；地下基础设施非开挖修复及地下空间开发技术；城市地下空间综合体一体化规划设计施工管理关键技术；城市地下停车场规划施工技术。

（2）桩基础绿色高效施工技术

桩基础绿色高效施工技术、设备与软件的创新发展；海上风电基础工程设计面临的挑战；桩基检测技术、新设备应用。

### （3）软弱地基处理技术

软弱地基处理技术的最新进展和工程应用；复合地基理论与实践新发展；岩溶复杂地质地基处理技术的研究与应用；软土地基排水固结与加固的新材料、新设备与测试技术的发展围海造陆工程的环境监控与生态保护。

### （4）其他

国家和地方标准规范研讨；国家重大工程案例研究；典型工程事故案例剖析。

论坛录用论文将在《第九届深基础工程发展论坛论文集》上刊登，并由国家出版社正式出版。论文字数不宜超过 8000 字（包括图表、公式），页数控制在 6 页以内，采用全文投稿方式，要求以电子邮件方式向组委会提供全文电子文档。论文格式严格参照附件，请务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及 E-mail。

①论文要有一定的学术价值或应用推广价值，可以是已正式发表或尚未发表的学术研究论文及经验报告。如论文已发表，须在文中予以详细说明（发表时间、发表刊物），论文不收取版面费、评审费。②本届论坛采用先投稿、先审、先推荐的原则。③所有论文将由论坛学术委员会统一组织进行评审，评选出优秀论文一、二、三等奖，并由主办方、承办方颁发证书和奖金。④投稿邮箱 zgjcg@vip.163.com，请注明“第九届深基础工程发展论坛会议投稿”，电话 010-80771169，郭亚红 18210293639，贾景燕 13810551979。⑤2018 年 12 月 31 日提交论文截止；2019 年 1 月 1 日发出第二号通知，开始接受报名；2019 年 1 月 31 日开始向作者发出修改（录用）意见的通知；2019 年 3 月下旬会议召开。⑥联系方式：张德功 13910861502，沙安 13701097952，黄志明 18017903317，郭传新 13501215039，孙金山 18612335855，辛鹏 15295025088。

（大会组委会 供稿）