

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0850

基于块石形状数据库的土石混合体模型 随机生成方法

赵鑫曜^{1,2}, 陈建功^{1,2}, 张海权^{1,2}, 杨泽君^{1,2}, 胡日成³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045;
3. 广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510000)

摘 要: 提出了一种土石混合体模型随机生成的方法。利用 MATLAB 数学处理软件, 对块石数字图像进行边界提取、平滑, 规则化等处理后, 得到块石形状坐标和块石形状参数。在此基础上, 通过采集、处理大量块石样本数字图像, 建立含有大量岩石样本形状坐标与形状参数的数据库。之后在建模区域内, 基于一定规则要求, 对数据库样本进行选取, 并对选取样本进行缩放、旋转, 并根据规则进行随机放置。重复上述过程, 直到满足含石量要求, 从而得到土石混合体随机生成模型。然后利用有限元软件自带程序或语言, 将模型导入有限元软件进行建模、分析。该方法结合了随机生成与数字图像处理技术的特点, 弥补了规则化随机生成块石形状真实性不足的缺点, 同时避免了数字成像技术的数据单一性。该方法满足了土石混合体随机建模所要求的空间位置随机性与块石形状多样性, 可以直接生成符合现实块石形状并具有良好的随机性的土石混合体模型, 对于土石混合体工程结构的规律与一般性研究, 有良好的应用前景。

关 键 字: 土石混合体; 数据库; 数字成像技术; 随机生成

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)12-4691-07

Random generation of soil-rock mixture models by rock shape database using digital imaging technology

ZHAO Xin-yao^{1,2}, CHEN Jian-gong^{1,2}, ZHANG Hai-quan^{1,2}, YANG Ze-Jun^{1,2}, HU Ri-cheng³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Joint Engineering Research Center for Prevention and Control of Environmental Geological Hazards in The TGR Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: This paper provides a method of random generation of soil-rock mixture using digital imaging technology and rock form database technology. By MATLAB program, the boundary extraction, boundary smoothness and regularization to rock images can be obtained. After those process, the coordinate of block nodes and shape parameters needed for database construction can be extracted. The database of rock shape can be built with massive of rock samples coordinate and shape parameters. Under some constraint conditions, the data of specific rock samples could be selected from the database. After rotation and zooming, by the random distribution rule, the rock samples can be placed in a 2D space of specific shape. These are the circulation processes of model establishment. When the block proportion reached the setting limit, the soil-rock mixture model establishing finished. As to import the model into ABAQUS, a program using PYTHON language was used to realize the process. This random distribution method can take many parameters such as particle diameter, shape parameters and block proportion in consideration. It also avoids the fiction of rock shape in general soil-rock mixture random distribution and the difficulty of model data acquisition with digital imaging technology. This method provides a good way to study the general law of soil-rock mixture physical and mechanical properties.

Keywords: soil-rock mixture; database; digital imaging technology; random distribution

收稿日期: 2017-04-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.51638002)。

This work was supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51638002).

第一作者简介: 赵鑫曜, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事地下工程与边坡工程等方面的研究工作。E-mail: xyzccc8915@qq.com

1 引言

在西部地区尤其是三峡库区广泛分布着滑坡堆积体、崩塌堆积体,这类地质体主要由坚硬的块石和较为软弱的土混合而成,其中的块石一般较坚硬、形状不规则且粒径较大。Medley 等^[1]将其命名为 BIMrocks (block in matrix rocks),国内油新华^[2-3]等学者将其称为土石混合体 (S-RM, soil-rock mixture)。随着西部的开发建设,土石混合体边坡及地基成为了工程中常见的一种工程地质情况,了解和掌握土石混合体的工程特性是岩土工程界近年来的研究热点^[4-7]。土石混合体数字图像处理技术是基于所采集的土石混合体数字图像,通过图像识别和矢量化处理得到块石矢量图或坐标文件,输入到有限元分析软件,进行力学分析的技术。岳钟琦等^[8]基于数字图像处理技术,对沥青混凝土中粗骨料的形状、尺寸、分布等进行了研究;何春灿等^[9]基于数字图像技术,建立了软硬岩石模板库,并利用 PFC2D 颗粒流软件,对含有不同硬度岩石的土石混合体细观损伤模式与力学特性进行了分析;徐文杰等^[10]基于数字图像技术,进行了土石混合体边坡有限元稳定性分析。随机生成技术是土石混合体模型建立的主要方法,其主要手段是基于随机生成原则,以凸多边形或者其他规则图形代替真实岩体轮廓,建立土石混合体模型并进行分析。张森等^[11]基于颗粒流半径扩大法分析了含石量对于边坡稳定性的影响。丁秀丽等^[12]采用蒙特卡罗法生成土石混合体随机模型,对非饱和土石混合体进行了细观数值模拟分析。张抒等^[13]利用最大似然估计法进行概率分布类型拟合,建立了土石混合体随机模型。

土石混合体一般基于单一数字图像、CT 图像处理技术随机生成凸多边形块石颗粒来建立细观模型,不能真实地反映块石形状。本文基于数字图像处理技术,在实际块石形状的基础上建立块石数据库,提出一种新的土石混合体模型随机生成的方法。本方法克服了凸多边形或规则图形的随机生成形状的不真实性,同时降低了数字成像技术获取数据的成本。

2 块石形状数据库建立

2.1 块石边界识别与平滑

本文利用数字图像处理技术来采集块石的样本图像,由于外界环境因素的影响,通过数码相机获取的图像通常存在大量的图像噪音,难以直接用于数字图像处理分析。为此,必须利用图像处理软

件对原始图像进行预处理:首先应将背景修正为白色,然后将块石内部填充黑色,由于每次摄影一般将获取多个块石规则摆放图像,故还需将块石颗粒分出,最终单一图片仅显示单一块石(见图 1(a)、1(b)),便于批量识别提取边界。数字图像通过预处理后,在块石的边界位置灰度值存在突变,可采用 MATLAB 中内嵌 Canny 边缘检测算法^[14]提取边缘点的像素点,即可得块石边缘的所有坐标,块石边界识别效果如图 1(c)所示。由 Canny 算法能够识别每个边界像素的坐标,但由此得到的边界形状呈锯齿状,同时组成边界的单元为像素点,无法用于有限元模型,故应对由 Canny 算法获得边界像素点进行平滑化,得到由多段直线段组成的边界。

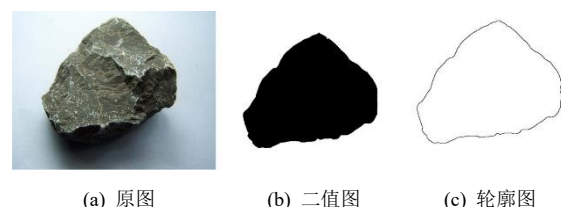


图 1 块石图像边界提取示意图
Fig.1 Image processing of rock and boundary extraction

平滑化采用以直代曲的方法,即以直线段代替原本块石边界的曲线段,并获取该曲线段距离直线段最远的点,记为 $d_{\max}$,当 $d_{\max}$ 小于拟合精度控制阈值 $[d]$ 时,则可以用直线段近似逼近曲线段,本文中 $[d]$ 取 $0.01D$, D 为等效直径。

$$D = 2\sqrt{A/\pi} \quad (1)$$

式中: A 为块石投影面积。

平滑化实现方法具体如下:

(1) 计算块石的等效直径 D 。

(2) 如图 2 所示,任取块石边界上一点,记为 A_0 ,以 A_0 点为起点,记起点为 A ,在块石边界上逆时针依次搜索点 B_i ,计算曲线 AB_i 上的点至直线 AB_i 的最大距离 $d_{\max}$,若 $d_{\max} < 0.01D$,则继续搜索,若 $d_{\max} \geq 0.01D$,则取对应搜索点的前一点作为最终的搜索点 B_i ,以直线 AB_i 拟合曲线 AB_i 。

(3) 计算曲线 B_iA_0 上的点至直线 AB_i 的最大距离 $d_{\max}$,若 $d_{\max} \geq 0.01D$,则以 B_i 点代替 A 点,重复步骤 (2);若 $d_{\max} < 0.01D$ 时,以直线 B_iA_0 拟合曲线 B_iA_0 ,结束。

此时块石边界变为由封闭直线段端点组成的角点坐标集,坐标数量较 Canny 算法直接识别坐标数量大大减少,满足有限元建模的要求。为了方便

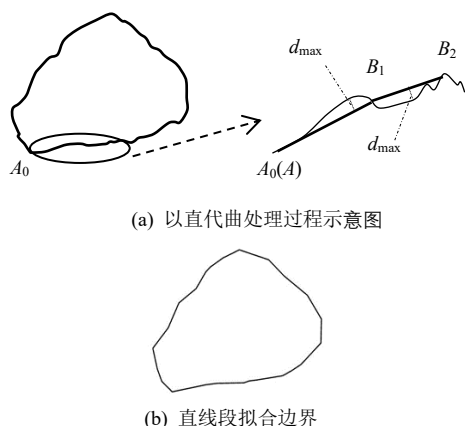


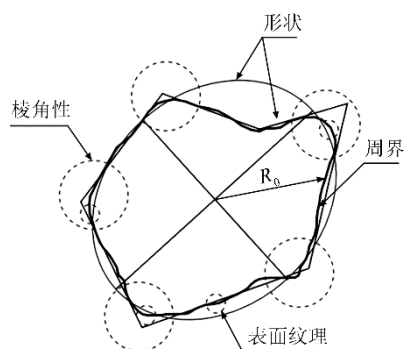
图 2 块石边界拟合示意

Fig.2 The algorithm of boundary fitting of rock

生成土石混合体的随机模型时的参数控制，还需提取块石形状的特征参数。

2.2 块石形态特征参数提取

块石的形态特征参数大致分为 3 类^[15]：形状（form）、棱角性（roundness/angularity）及表面纹理（surface texture）。如图 3 所示，形状特征反映块体整体宏观外部形态；棱角性表示岩石边界角点变化的剧烈程度，反映块体中观形态；表面纹理表征块体表面的粗糙程度，反映块体局部细观形态。

图 3 块石形状、棱角性、表面纹理示意图^[16]Fig.3 The sketch of size, roundness, surface texture of rock^[16]

为了便于研究块石形状特征参数对土石混合体物理力学性质的影响，本文基于前人研究，提取了 4 种块石形状参数用于建立块石数据库。

(1) 等效直径 D

(2) 长短轴比 S_{ab}

$$S_{ab} = X_a / X_b \quad (2)$$

式中： X_a 为块石的长轴； X_b 为块石的短轴。长短轴比 S_{ab} 为块石长轴与短轴的比值，用于表示块石的

条状性（见图 4(a)）。

(3) 面积差异比 S_{cp}

$$S_{cp} = A_c / A_p \quad (3)$$

式中： A_c 为块石边界与面积当量椭圆边界围成的面积； A_p 为面积当量椭圆面积，其值等于块石面积。

通过作与块石面积相等，长轴相等，形心重合的当量椭圆，可得到块石边界和当量椭圆边线围成的面积即差异面积 A_c ，差异面积 A_c 与当量椭圆面积 A_p 的比值即为面积差异比 S_{cp} （见图 4(b)）。

(4) 棱角指数 AI

$$AI = \sum_{i=1}^N Ai = \sum_{i=1}^N d_i / l_i \quad (4)$$

式中： l_i 为第 $i-1$ 个角点和第 $i+1$ 个角点连线的长； d_i 为角点 i 到相邻角点之间连线的距离。棱角指数 AI 通过对各角点的棱角系数 d_i / l_i 求和得到，角点的棱角系数为角点到相邻角点连线的距离 d_i 与相邻角点之间连线长度 l_i 的比值，棱角系数越大，表示该角点越尖锐（见图 4(c)）。

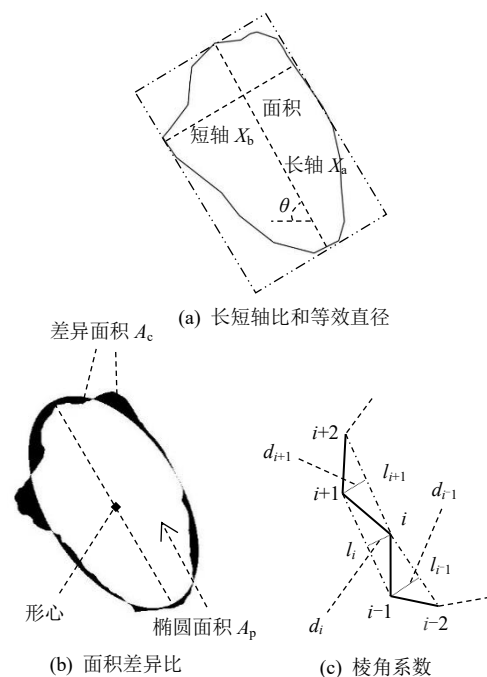


图 4 颗粒形状参数计算示意图

Fig.4 The calculation of various rock's shape parameter

2.3 块石数据库建立

用于有限元随机分布建模的块石数据库需满足块石形状参数的多样性要求，为此需要大量的块石样本。本文以重庆万州天仙湖地区采集的块石标

本为样本,利用前述的处理手段,共获取 3 433 个块石的样本坐标数据与形状参数。为方便块石随机取用时的参数统一化,在数据库录入块石样本数据之前,还需对块石样本数据进行规则化处理,即将所有的块石样本的长轴-水平夹角、短轴长度、形心坐标进行规则化处理,具体处理方法如下:

(1) 形心归零化处理,平移块石坐标,将块石形心移动至 (0, 0) 坐标,得到形心归零的块石形状数据,方便随机分布时的计算。

(2) 长轴水平化处理,旋转块石,将其长轴旋转至位于水平位置,方便随机提取时块石倾角控制。

(3) 短轴归一化处理,改变块石大小,将块石缩放至短轴长度为一个单位长度的大小,便于在随机分布时块石颗粒尺寸、级配控制。

经过上述处理后,输出块石图像,以及规则化角点坐标集与规则化颗粒面积,分别命名为“n.jpg”“Rock_n.txt”和“A_n.txt”,其中“n”对应输入块石图像编号。并将各个块石数据所对应的 4 种形状参数录入数据库,分别命名为:“Rock_D_n”、“Rock_Sab_n”、“Rock_Scp_n”、“Rock_AI_n”。部分块石及形状参数如表 1 所示。

表 1 部分块石及形状参数
Table 1 Rock size and the corresponding parameters

S_{ab}	S_{cp}		
	0.1	0.2	0.3
	$AI=2$	$AI=1$	$AI=1.7$
1			
	$AI=1$	$AI=2$	$AI=2.1$
1			
	$AI=1$	$AI=1$	$AI=1.8$
2			
	$AI=2$	$AI=2$	$AI=1.4$
2			

2.4 随机建模方法

土石混合体随机建模,需满足块石形状随机性、块石空间位置随机性以及研究参数可控性的要求。本节基于前文所述块石数据库,利用 MATLAB 软件,编写了土石混合体随机生成程序。该程序满足土石混合体随机建模时所需的 3 个特性,且根据之前提取的形状参数,可对特定条件下土石混合体进行随机建模。其基本思路是首先确定土石混合体模型参数和建模区域,然后从库中抽取块石样本,抽

取规则可根据数据库已有参数进行筛选,或直接全库随机提取;随后对提取的块石进行缩放、旋转,并将其按一定随机方法放置于建模区域中;最后重复以上流程直到块石面积达到建模要求含石量为止。随机建模实现具体流程如下所示:

设定建模区域、粒径阈值、含石量,颗粒级配等参数,颗粒级配通过控制一定粒径范围内颗粒生成面积百分比实现。

(1) 从数据库中随机提取块石,读取其形状参数,根据需要,设定各个参数阈值,进行筛选,直至提取到满足需要的块石,记为序号 m 。

(2) 读取该块石的规则化长轴长度(由于短轴归一化,长轴长度等于长短轴比)和规则化颗粒面积,根据阈值随机生成一缩放因子 N_m ,对这两个数据进行缩放,并记录缩放后的面积、长轴长度以及缩放因子。

(3) 重复步骤(1)、(2),直到步骤(2)中记录的块石总面积达到含石量要求时截止,记全部满足要求块石数为 M 。为了增加后续计算效率,将此时的块石序号以及参数按长轴从大到小的顺序进行排列。

(4) 按照重新排列后的顺序读取块石角点坐标,每次循环读取一组,序号记为 i ,并设置一个随机旋转变换矩阵 $[A_i]$,以及一个位于建模范围内的随机坐标 (d_{i1}, d_{i2}) ,进行空间随机分布。

(5) 对所读取的块石角点坐标集乘以随机旋转变换矩阵 $[A_i]$,以旋转块石,然后将旋转后的块石角点坐标乘以与之相对应缩放因子 N_i 以完成块石缩放,最后将完成旋转、缩放的块石角点坐标加上随机坐标 (d_{i1}, d_{i2}) 以完成块石的随机放置。

(6) 完成上述步骤后,进行块石空间位置判断,即进行块石间的重叠判断和块石是否在建模区域内的判断。块石间的重叠判断采用 MATLAB 的内置函数“inpolygon.m”,此函数的作用是判断角与多边形的位置关系,如果结果恒正,则节点位于多边形内,否则位于多边形外。将步骤(5)对要放置的块石所有角点坐标与已放置的所有块石进行位置关系判断,以此确定该块石随机放置是否成功。若所放置块石与已放置块石无重叠,且该次放置块石角点坐标全部位于建模范围内,则存储该次放置块石角点坐标;若有重叠或块石角点坐标位于建模范围外,则回到步骤(5)重新计算;首次放置块石无需进行重叠分析,只需判定块石所有角点是否位于模型生成范围内即可。

(7) 重复步骤(4)~(6),直到所有块石数

据已成功放置于建模范围内且无重叠现象, 此时块石随机分布过程完成, 输出步骤 (5) 存储的全部块石角点坐标为.txt 文件, 随机建模成功。

随机生成流程图如图 5 所示。随机建模完成后, 此时文件为大量块石角点坐标文件所组成的.txt 文件集, 通过编写的 PYTHON 程序输入到 ABAQUS CAE 并绘制多个由数条封闭曲线构成的面域, 建立模型进行计算分析 (见图 6)。

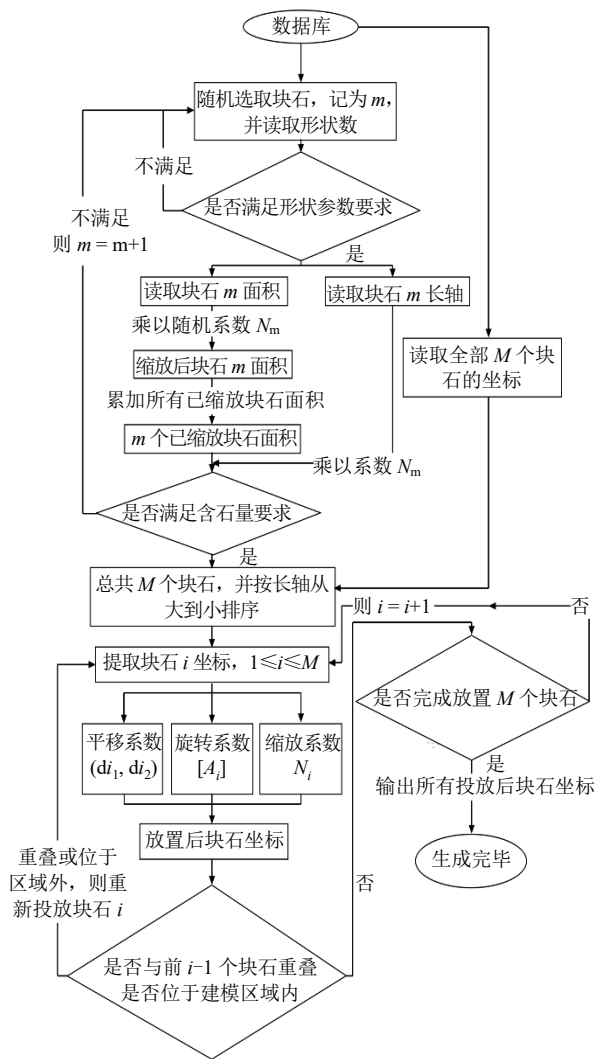


图 5 随机生成实现流程图

Fig.5 Flow chart of random generation

3 算 例

为验证模型实用性, 将图 6 中 60%含石量的 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 土石混合体试件模型, 作一个双轴数值试验模拟, 采用 ABAQUS 建模。块石尺寸分布如表 2 所示, 土石体参数如表 3 所示。模型块石阈值采用徐文杰等^[17]提出的 $0.05 L_{AC}$, $L_{AC} = 100\text{ cm}$, 故最小阈值为 5 cm , 最大阈值选用 20 cm 。本构模型采用

摩尔-库仑模型, 网格单元采用 CPE4R 单元, 控制单元大小 1 cm , 单元总数为 18 283, 其中块石单元数为 11 024, 土体单元数为 7 259。

模型如图 7 所示, 模型底部边界施加水平、垂直约束。试验步骤为, 首先于模型侧边界施加围压进行固结, 然后轴向加压进行压缩。得到偏应力-轴向应变曲线如图 8 所示。

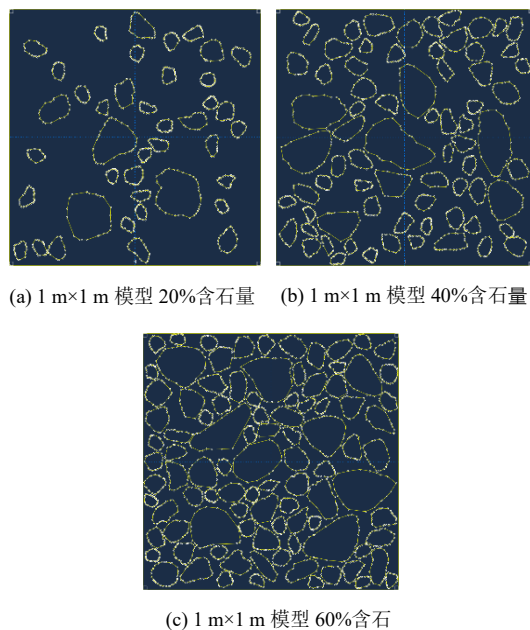


图 6 ABAQUS 模型示意图

Fig.6 ABAQUS model image

表 2 块石尺寸分布

Table 2 Block size distribution

块石颗粒分布/cm	5~10	10~15	15~20
含量百分比/%	55	10	35

表 3 模型土、石物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of SRM model

成分	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /MPa	泊松比 μ	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
块石	2.42	1 090	0.2	36	1 200
土体	1.98	207	0.3	20	69



图 7 有限元单元网格图

Fig.7 Finite element mesh graph

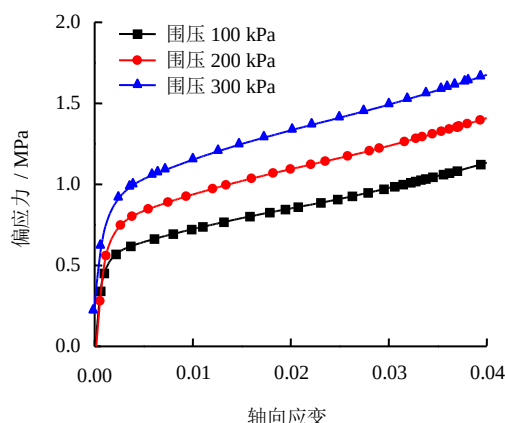
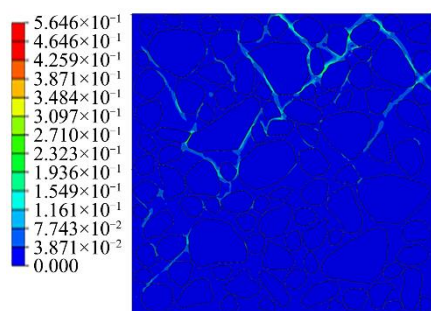
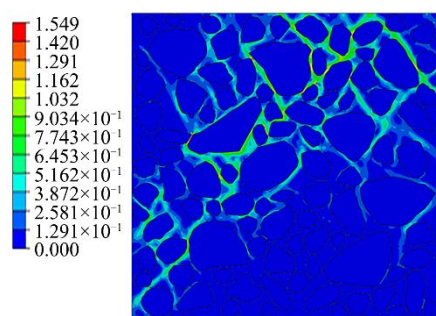


图8 偏应力-轴向应变曲线
Fig.8 Curves of deviatoric stress and axial strain

图9为模型塑性区发展云图。结果显示：塑性区沿土石分界面发展，大尺寸块石对塑性区发展有明显阻挡作用。土石混合体式样模型在双轴压缩下大致呈现斜 45° 角塑性发展形式，大量衍生塑性区发育，与金磊等^[4]试验研究中所得破坏方式类似。



(a) 偏应力-轴应变曲线突变时间节点塑性云



(b) 模型完全压坏时间节点塑性云

图9 模型塑性区发展云图
Fig.9 Nephograms of plastic zone growth

4 结 论

本文从数据库的角度，基于数字图像处理技术，

提出了一种土石混合体模型随机生成的方法。

(1) 对块石数字图像进行边界提取、平滑，规则化等处理后，得到块石形状坐标和块石形状参数。

(2) 通过采集、处理大量块石样本数字图像，建立了含有大量岩石样本形状坐标与形状参数的数据库。

(3) 对数据库样本进行选取，并对选取样本进行缩放、旋转，并根据规则进行随机放置，直到满足含石量要求，从而得到土石混合体随机生成模型。

本方法利用随机生成与数字图像处理技术的特点，在实际块石形状的基础上进行随机生成，满足了土石混合体随机建模所要求的空间位置随机性与块石形状多样性，可以直接生成符合现实块石形状的土石混合体模型，对于土石混合体边坡或者其他工程结构的规律与一般性研究，有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] MEDLEY E, GOODMAN R E. Estimating the block volumetric proportions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks)[C]//1st North American Rock Mechanics Symposium. [S. l.]: [s. n.], 1994: 851—858.
- [2] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2001.
YOU Xin-hua. Stochastic structural model of the earth-rock aggregate and its application[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2001.
- [3] 油新华, 汤劲松. 土石混合体野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1537—1540.
YOU Xin-hua, TANG Jin-song. Research on horizontal push-shear in-situ test of soil and rock-mixture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10): 1537—1540.
- [4] 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.
- [5] 沈辉, 罗先启, 毕金锋. 土石混合体渗透侵蚀特性数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1497—1504.
SHEN Hui, LUO Xian-qi, BI Jin-feng. Numerical simulation of internal erosion characteristics of block in

- matrix soil aggregate[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1497—1504.
- [6] 唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对土石混合体剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 93—103.
- TANG Jian-yi, XU Dong-sheng, LIU Hua-bei. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 93—103.
- [7] 陈立, 张朋, 郑宏. 土石混合体二维细观结构模型的建立与数值流形法模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2402—2411.
- CHEN Li, ZHANG Peng, ZHENG Hong. Mesostructure modeling of soil-rock mixtures and study of its mesostructural mechanics based on numerical manifold method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2402—2411.
- [8] YUE Z Q, MORIN I. Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures[J]. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 1996, 23(2): 480—489.
- [9] 何春灿, 胡新丽, 龚辉, 等. 基于软硬石模板库的土石混合体细观损伤与力学特性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2993—3002.
- HE Chun-can, HU Xin-li, GONG Hui, et al. Analysis of mesoscopic damage and mechanical behaviors of soil-rock mixture based on template database of soft and hard rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2993—3002.
- [10] 徐文杰, 王玉杰, 陈祖煜, 等. 基于数字图像技术的土石混合体边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 28(增刊 1): 341—346.
- XU Wen-jie, WANG Yu-jie, CHEN Zu-yu, et al. Stability analysis of soil-rock mixed slope based on digital image technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008(Supp.1): 341—346.
- [11] 张森, 曾亚武, 夏磊. 块石含量对土石混合体边坡稳定性影响的数值研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5): 83—87.
- ZHANG Sen, ZENG Ya-wu, XIA Lei. Numerical study on the influence of rock block proportion on SRM slope's stability[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2016, 33(5): 83—87.
- [12] 丁秀丽, 张宏明, 黄书岭, 等. 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 Xiu-li, ZHANG Hong-ming, HUANG Shu-ling, et al. Research on mechanical characteristics of unsaturated soil-rock mixture based on numerical experiments of mesostructured[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(8): 1553—1566.
- [13] 张抒, 唐辉明. 基于细观统计规律的土石混合体随机模型研究[J]. 人民长江, 2015, 46(16): 48—52.
- ZHANG Shu, TANG Hui-ming. Research on soil-rock mixture stochastic model based on mesostructural statistical characteristics[J]. **Yangtze River**, 2015, 46(16): 48—52.
- [14] CANNY J. A Computational approach to edge detection[J]. **Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on**, 1986, 8(6): 679—698.
- [15] ISO. ISO9276-6: 2008: Representation of results of particle size analysis -- Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology[C]. Geneva, Switzerland: ISO, 2008.
- [16] BARREN P J. The shape of rock particles, a critical review[J]. **Sedimentology**, 1980, 27(3): 291—303.
- [17] 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—57.
- XU Wen-jie, HU Rui-lin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2009, 36(4): 50—57.