

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.033

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

朱泽奇, 盛 谦, 程红战, 李建贺, 卞晓曼

(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, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 通过对土石粒径界限、块石分布规律与粒径分布频度的研究, 基于直接生成法建立了土石混合体的三维随机模型, 形成了一套较为完整的、操作性强的三维随机模型构建方法。在此基础上, 将三维随机模型构建方法与 FLAC^{3D} 随机建模方法相结合, 建立与真实土石混合体具有相同统计规律的有限差分模型, 开展室内直剪数值仿真试验研究, 获取了不同垂直压力下的剪应力-位移曲线和相应的剪切带分布, 探讨了土石混合体的剪切破坏特性与土石相互作用机制。剪切过程中由于土体产生的不同程度的剪切变形以及块石在摩擦作用下发生的水平或旋转运动, 导致土石混合体的剪切带表现出明显的不规则和不连续特点, 其剪应力-位移曲线具有应变硬化特点。研究表明, 三维随机模型能够反映土石混合体的宏观力学性质和微观破坏机制, 可作为力学性质研究的有效载体。

关键词: 土石混合体; 直接法; 随机模型; 数值仿真; 剪切带

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)04-1188-07

3D stochastic model and numerical simulation of soil-rock mixture based on direct method

ZHU Ze-qi, SHENG Qian, CHENG Hong-zhan, LI Jian-he, BIAN Xiao-man

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

Abstract: From the study of the particle size boundary, rock distribution and particle frequency, a three-dimensional (3D) stochastic model of soil-rock mixture is generated by using the direct method. A set of relatively complete and easily operational method is developed for building the 3D stochastic model. Moreover, a finite-difference model is established with the same distribution as natural soil-rock mixture by combining the newly developed building method and FLAC^{3D} random modeling method. Then, direct shear tests and its numerical simulations are performed to obtain shear stress-displacement curves under different vertical pressures, which is further applied to explore shear failure characteristics of soil-rock mixture and the interaction mechanism between soil and rock. Due to different levels of shear deformation of soil and the horizontal or rotational motion of stone under the friction action, the shear band of soil-rock mixture shows obviously irregular and discontinuous features in the shear process, and the shear stress-displacement curve exhibits significant strain hardening behavior. This study shows that the 3D stochastic model can be used to well represent macroscopic mechanical properties and microscopic failure mechanisms of soil-rock mixture, which can be served as a model to explore the mechanical property.

Keywords: soil-rock mixture; direct method; stochastic model; numerical simulation; shear band

1 引 言

我国西南地区分布着大量由滑坡堆积、崩塌堆积、残积层、冰渍堆积、坡积物等组成的松散堆积体, 这些堆积体主要形成于第四纪^[1]。堆积体物质

成分以土夹砾石或块石以及砾石或块石夹土等混合介质组成, 结构杂乱无章、分选性差、粒间结合力差、透水性强, 既不同于一般的岩体, 又不同于一般的土体, 而是介于土体与岩体之间的一种特殊的地质体, 一些学者将具有以上特征的第四纪堆积体

收稿日期: 2015-05-15

基金项目: NSFC-云南联合基金重点支持项目(No. U1402231); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2015CB057905); 国家自然科学基金面上项目(No. 51279202)。

This work was supported by the NSFC-United Fund Key Support Project of Yunnan (U1402231), the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program)(2015CB057905) and the General Program of National Natural Science Foundation of China(51279202).

第一作者简介: 朱泽奇, 男, 1980 年生, 博士, 副研究员, 主要从事特殊岩土体力学性质方面的研究工作。E-mail: zqzhu@whrsm.ac.cn

统称为土石混合体^[2]。

土石混合体中岩块尺寸大小不一、形状各异且空间分布杂乱无章。例如震后滑坡或崩塌形成的土石混合体,最大块石粒径可以达到10~20 m,最小块石粒径仅几个毫米。目前对这类非均质、非连续和非线性的混合材料,现有的岩土力学理论和室内试验方法尚难以准确描述和概化其真实力学特性。围绕土石混合体力学特性研究,近年来主要有油新华^[3]、徐文杰^[4]、侯红林^[5]和刘衡秋^[6-7]等开展了原位大型直剪试验研究,为工程区松散堆积体稳定性评价提供了可资借鉴的强度参数值。但大型原位试验很难有代表性且操作难度较大、试验费用高,因此,很多学者通过现场取样、颗粒分析,在室内制备不同含石量、不同结构以及含水率的土石混合体试样,利用室内剪切试验研究土石混合体力学特性的诸多影响因素^[8-11]。这些研究有利于揭示土石混合体细观结构与宏观力学性质的相互作用机制,但目前很多结论还没有形成共识。

在土石混合体理论研究方面,蒋洋等^[12]对传统K-G模型进行改进,并通过大量室内土石混合料直剪试验获取模型参数,建立了粗粒土石混合料的本构模型。周博等^[13]将土石混合体等效为理想的二元介质混合材料,基于均匀化理论研究了土石混合体应力-应变关系。这些理论模型对土石混合体进行了宏观等效,在工程应用上具有一定的实用性,但无法考虑土石混合体的细观结构效应以及由此而产生的在力学特性上的显著差异。

近年来,随着科学技术水平的发展,基于数字图像处理技术的有限元及离散元数值模拟分析也被广泛应用于土石混合体力学特性的研究中。如:岳中琦^[14]、徐文杰^[15]和廖秋林^[16]等利用图像处理技术对数字照片进行二值化处理,建立土石混合体的平面几何模型,并对所建立的模型进行数值计算,研究了土石混合体的细结构力学特征。丁秀丽等^[17]利用PFC^{2D}程序详细分析了土石混合体建模的过程,并且对该土石混合体模型进行了双轴压缩模拟试验,与均质土体试验结果进行了对比分析。这些方法可以较为真实地再现土石混合体的细观结构,无疑是最为可靠的研究手段,但目前图形技术主要应用于二维建模,在三维真实细观模型构建方面还面临诸多技术瓶颈。

碎石在土石混合体中的位置、含量、大小形状具有空间上的随机性,但同时也满足统计学特征。Li^[18]和李世海^[19]等在这一方面进行了富有成效的研究工作。本文在这些研究工作的基础上,提出了

一种更加方便实用的土石混合体三维随机模型构建方法,利用这一方法建立了典型土石混合体有限差分数值模型,开展了室内剪切试验的数值仿真,并与相应的力学试验结果进行了对比验证,得到了一些有益的结论与认识。

2 直接生成法

已有的块石生成技术遵循的是概率统计理论方法,认为块石参数(如位置、大小)服从某种随机分布形式,在根据样本获得其分布形式的数学表达式以后,再设法(如利用求解反函数的方式)在计算机上生成服从这种分布形式的随机数,以模拟块石的空间分布。这种方法在工程中的实用性往往受到很大限制,原因在于:

(1) 一些块石参数(如位置)的分布形式可能非常复杂,很难寻找到满足精度要求的数学表达式来描述其分布特征。

(2) 对于复杂的分布形式,不能保证利用反函数法求出的块石参数随机数具有足够的精度,尤其是在块石的粒径分布方面。

而建立在离散数学理论基础上的块石模拟方法——直接法可以用来模拟几乎是任何情况下的块石空间分布。用直接法生成块石的精度,从理论上讲,主要取决于取样的精度。利用直接法生成某一个块石随机数的步骤如下:

(1) 针对一定尺寸的土石混合体试样,根据含石量、块石粒径分布的统计规律,求块石在其变化区间内出现的频度,由此可以计算出试样区间内需要生成的块石总数目 n 。

(2) 利用 Monte-Carlo 法生成 n 个在 $[0, 1]$ 范围内服从均匀分布的随机数,在试样区间内随机生成块石单元,作为块石的“基质单元”。

(3) 统计不同粒径块石的频度分布规律,确定某一粒径范围内块石的数量 n_i 。以基质单元为中心,将块石近似为某一几何特征体,在相应的块石粒径范围内随机生成 n_i 个完整块石。

(4) 以同样方法生成所有粒径的块石。三维空间块石生成完成之后,还应对块石粒径以及含石量等参数进行校核。关于块石粒径分布,可通过筛分试验成果获得相关概率分布形式,如果没有相关资料,则应通过计算三维随机模型的块石体积含量来进行验证,以检验直接生成法的可靠性。

(5) 对于基质单元距离较近的情况,可先对基质单元进行定位,然后切剖面观察,如果有块石重合的情况出现,则进行手动修改(在FLAC^{3D}中可

通过修改土石力学参数来实现)。

FLAC^{3D}程序同时提供了在[0, 1]区间内服从正态分布和均匀分布的两个随机“籽”。显然,直接法和FLAC^{3D}模拟土石混合体的技术思路之间有着很好的结合点。另外,FLAC^{3D}模型中的每一个单元都有一个特定的序号,结合FLAC^{3D}的其他建模功能,使得对每一个单元赋以不同的力学参数值成为可能。类似地,这些力学参数值可以服从任意给定的数学分布形式,也可以遵循离散分布特征,因此,对于土石混合物这一类复杂地质体,应用基于FLAC^{3D}的直接法进行三维建模具有独特的优势,也更加方便高效。

3 三维随机模型

本文以金沙江溪洛渡水电站库区岸坡为工程背景,对甘海子、付家坪子、牛滚凼、双龙坝和沙泥湾等多个重点岸坡的土石混合物开展了调查研究。为了使建立的三维随机模型可以满足土石混合体的物质结构统计学规律,下面将就三维随机模型构建中的一些关键技术问题进行介绍。

3.1 土石粒径界限与网格临界尺寸

在土石混合物不同的研究尺度内,需要在绝对粒径界限的基础上使用相对粒径界限将土石混合物最终概化成二元结构。组成土石混合体的物质多来源于冲积、坡积、冰积等地质体,在风化及地下水流的冲刷、搬运等作用下,粗细颗粒的响应不相同。最终表现为土石混合物中粗、细颗粒分选性不同,往往存在颗粒级配的缺失,其表现为颗粒级配分布概率出现双峰值,颗粒分维表现为二重分维特点。一般根据这一特点确定土、石粒径界限 d_c ,这也是土石混合物力学特性研究的基本工作之一。

为了确定土石混合体的物质组成和土石粒径分布规律,针对甘海子、付家坪子、牛滚凼、双龙坝和沙泥湾等多个岸坡大型原位直剪试验完毕后剪切盒中的试样进行了筛分试验,相关土石混合物颗粒级配如图1所示。在此基础上,对不同粒径范围的土石颗粒进行了分布统计,限于篇幅,图2仅给出了较为典型的土石混合物粒度分布直方图。从图中可以看出,岸坡土石混合体的粒度分布直方图均表现出明显的双峰态,谷点对应的粒径都在2~4 mm左右。具体确定土石粒径界限 d_c 可考察某一土石混合体的粒度分布双峰态特征,将双峰之间对应的粒径作为划分土石的阈值。

d_c 不但是划分土石二元结构的界限值,还是三维网格划分的最大单元尺寸临界值。因为土的颗粒

相对较小,可视为填充在块石之间的连续体;而块石在空间中是离散的,其最小粒径为 d_c ,如果网格单元尺寸大于 d_c ,则无法准确描述块石的分布。

3.2 块石基质单元

针对溪洛渡库区岸坡土石混合物取样物质,将在室内进行不同含石量的试样制备,开展不同垂直压力下的剪切试验,剪切盒尺寸为200 mm×200 mm×150 mm(上剪切盒高100 mm,下剪切盒高50 mm)。为了相关开展力学试验的数值仿真,三维有限差分模型的建立以剪切盒尺寸为依据,网格临界尺寸 d_c 根据对图2的分析确定为2~4 mm,为保证建模精度,将网格尺寸定为2 mm。

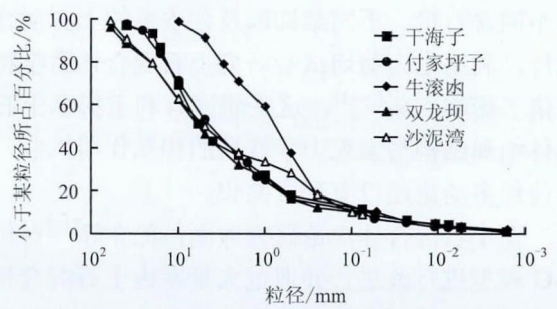
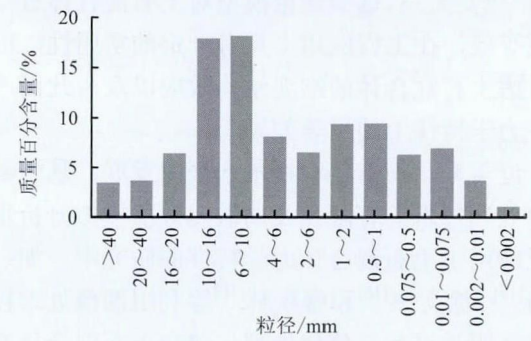
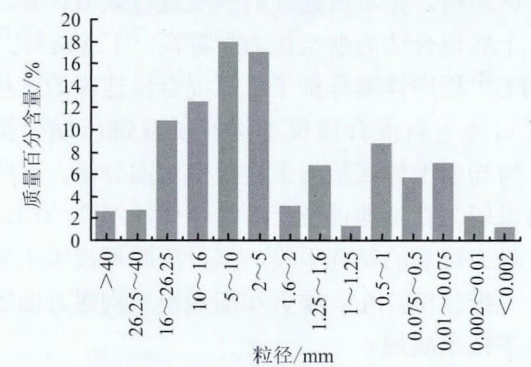


图1 岸坡土石混合物颗粒级配图
Fig.1 Curves of particle size distribution of soil-rock mixture from a bank slope



(a) 干海子



(b) 付家坪子

图2 典型土石混合物粒度分布直方图
Fig.2 Frequency histograms of size distribution of the typical soil-rock mixture particle

从图 1 的颗粒级配曲线可以得到土石混合体不同粒径范围内颗粒的质量含量。因为在有限差分网格中土与石的相对含量是用体积来衡量的，为了方便建立数值模型，需将质量含量转化为体积含量。以甘海子土石混合体为例，表 1 列出了不同粒径范围内块石的含量。根据土和石的密度，可计算得到相应块石粒度组的体积含量，但这样的估算有一定的误差，因为土的体积加上块石的体积之和并不一定等于土石混合体的总体积，实践中往往前者小于后者，因此，计算得到的块石体积含量偏大。通过室内物理指标测量与估算，甘海子土石混合体的块石体积含量大约比其质量含量小 1%~3%，且块石粒径越大，二者之间的差别也相应增大。遵循这一原则，本文对块石的体积含量进行了相应的估算。拟建立的有限差分模型体积为 $6 \times 10^6 \text{ mm}^3$ ，根据块石体积含量可以计算不同粒径范围块石占有的网格体积（见表 1）。

表 1 甘海子土石混合体块石含量与数量

Table 1 Numbers and contents of rock in the soil-rock mixture in Ganhaizi

粒径 /mm	质量含量 /%	体积含量 /%	估算体积含量 /%	网格体积 /(10^4 mm^3)	数量 /个
4~6	8.0	7.7	6	36	5 028
6~10	18.1	17.4	16	96	3 576
10~16	17.8	17.1	15	90	754
16~20	6.4	6.1	4	24	63
20~40	3.5	3.3	1	6	5

筛分试验对块石的粒径分析结果是由块石的最小粒径线性值决定的，不规则颗粒粒径线性值是指可直接观测到的粒径指标，常用长轴 A 、中轴 B 、短轴 C 来表示，如图 3 所示。为了估算某一粒径范围内所含块石的数量，本文将块石假设为近似圆柱体形状，底面直径为短轴 C ，圆柱高为长轴 A ，相关体积计算公式为

$$V = \alpha \pi (C/2)^2 A \quad (1)$$

式中： α 为折减系数，取 0.95； A 和 C 分别对应筛分试验中的上一级和本级筛孔径。式 (1) 计算的体积是某一粒径范围内块石的平均体积，根据表 1 中块石占有的网格体积可以估算该粒径范围内含有块石的数量，这些结果一并列表 1。

假设块石在空间中的位置服从均匀分布，以块石的总数量 n 为目标数，将 FLAC^{3D} 提供的在 [0, 1] 区间内服从均匀分布的随机数，分配到有限差分网格生成过程中，生成 n 个在空间中随机分布的网

格单元（尺寸 2 mm），称为块石基质单元。

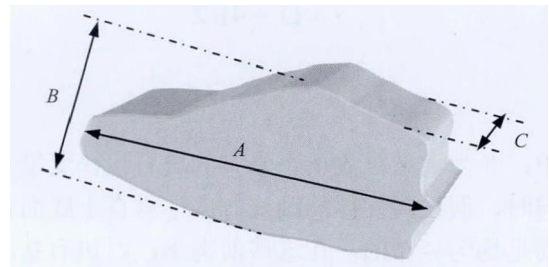


图 3 颗粒粒径测量示意图

Fig.3 Schematic of measurement of particle size

3.3 完整块石生成

根据表 1 中块石粒径与频度的关系，计算不同粒径的块石在试样空间中出现的概率，如图 4 所示。对图中的数据进行拟合，发现不同粒径块石的频率满足对数正态函数。根据正态函数与对数正态函数的转换关系，只要生成一组满足一定要求（期望值与方差约束条件）的正态分布随机数，通过转换关系，可以生成满足图 4 中对数正态分布的一组随机数。

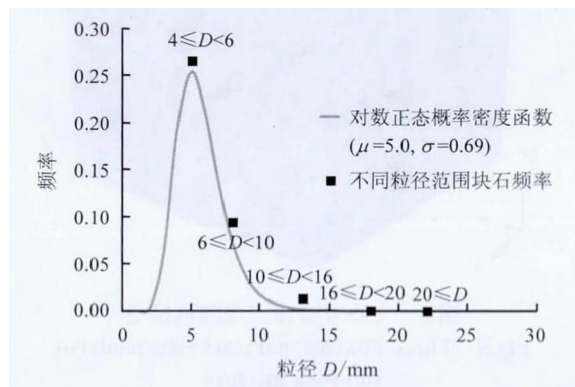


图 4 不同粒径块石的频率分布

Fig.4 Frequency distributions of rock blocks with different particle sizes

如果 x 是服从正态分布 $N(\mu, \sigma)$ 的随机变量，则 $Y = e^x$ 服从对数正态分布，其数学期望和方差分别为

$$E(Y) = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (2)$$

$$\text{Var}(Y) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2} \quad (3)$$

因此，只要根据式 (2)、(3) 的约束条件生成一组正态分布随机数，即可生成一组相应的对数正态分布随机数。

假设块石在空间的形状近似为圆柱体，它的大小尺寸由底面半径 r 和柱高 h 控制。以 4~6 mm 粒

径范围的块石为例, 本文给出了 r 和 h 的表达式为

$$r = (Y + 4)/2 \quad (4)$$

$$h = (Y + 6)/2 \quad (5)$$

式中: Y 为满足对数正态分布的块石粒径变量。与此同时, 假设圆柱体的轴线方向(垂直于底面)在空间是均匀分布的, 在这些前提下, 以块石基质单元为中心, 以大小、方向满足一定分布规律的几何体(圆柱体)为包络范围, 可生成某一粒径范围内的所有块石。图 5 给出了根据表 1 的含石量与块石分布规律生成的三维随机模型, 经过检验, 其体积含石量约为 40%, 与真实值较为接近, 且块石粒径分布也基本符合统计规律, 说明按照本文的直接生成法构建的三维随机模型与真实土石混合物具有一致的统计特征, 可作为力学性质研究的有效载体, 且相关模型生成技术简单方便, 可操作性强。

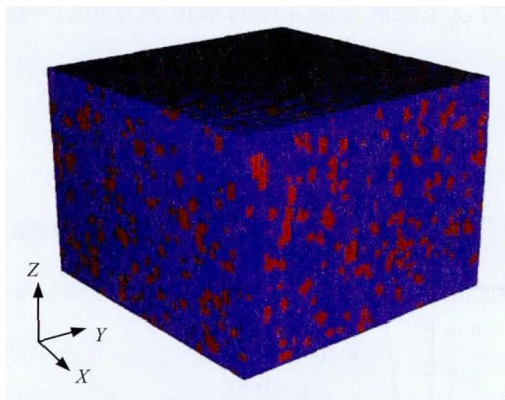


图 5 土石混合物三维随机模型

Fig.5 Three-dimensional stochastic model of soil-rock mixture

4 数值仿真试验

本文将基于有限差分程序 FLAC^{3D} 开展相关室内剪切试验的数值仿真模拟, 数值模型如图 5 所示, 包含 75×10^4 单元。并根据甘海子土石混合体的颗粒分析结果, 制作不同含石量的室内剪切试样 ($200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$), 典型剪切试验的应力-应变曲线如图 6 所示。

计算模型中的土与石两种介质均采用 M-C 弹塑性本构。相关模型参数主要通过室内物理力学试验以及参考文献[20]获取, 并以图 6 中的垂直压力 158 kPa 的直剪试验曲线为目标进行试算和校核, 得到修正后的力学参数列于表 2。数值模拟采用位移控制方法对试样进行加载, 并记录加载过程中的力与位移以及它们之间的关系。

表 2 甘海子土石混合物细观材料参数

Table 2 Parameters of the soil-rock mixture in Ganhaizi

材料	变形模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	密度 /(g/cm ³)
土	5	0.3	30	20	2.10
石	500	0.2	1 000	45	2.64

图 6 给出了不同垂直压力条件下的直剪试验与数值仿真得到的剪应力-位移曲线(曲线附近标注的数字为施加的垂直应力)。从图中可以看出, 计算曲线表现出一定的应变硬化, 与测试曲线较为吻合, 说明三维随机模型可以较好地反映土石混合体的变形与强度特性, 但对于试验测试中的峰后强度特性, 数值模拟的效果不佳。这是因为本文中对于土和石这两种介质均采用的是经典弹塑性模型, 无法考虑岩土材料的峰后力学特性。

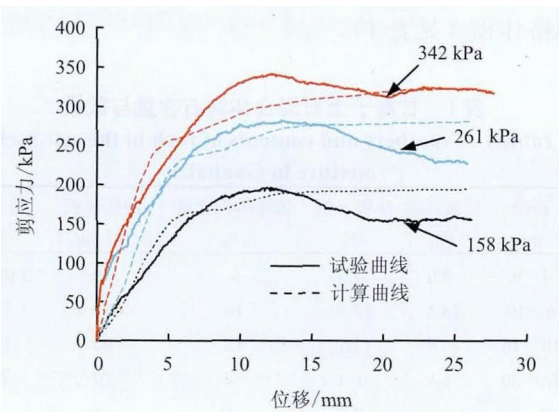


图 6 含石量 40% 的土石混合物剪应力-位移曲线

Fig.6 Curves of shear stress-displacement of soil-rock mixture with a content of 40% in rock

图 7 以剪应变分布表征剪切试验中的剪切带, 也即剪切破坏面, 给出了垂直压力 158 kPa 下的直剪试验, 在 $Y=0.1 \text{ m}$ 剖面上的剪切带分布云图。图 8 为相应的剪切带三维空间分布图。

从图 7、8 中可以看出, 由于块石的存在, 土石混合体的剪切带表现出明显的不规则和不连续特点。剪应变在靠近剪切力作用的端面附近有一定的应变集中, 剪切带从两端逐渐向中间发展, 并且主要形成于土体中。由于土体产生的不同程度的剪切变形, 导致其紧邻或包裹的块石在摩擦作用下发生水平或旋转运动, 这是造成一般土石混合物剪切破坏面不平整的主要原因之一。这一因素同时对土石混合物抗剪强度也有较大影响, 因为颗粒在剪切面或剪切带中发生移动或滚动, 甚至翻越邻近颗粒, 一般会发生剪胀变形, 继而导致应力值增高, 这也从细观尺度解释了为什么图 6 中的剪应力-位移计

算曲线具有应变硬化特点。相关认识可以得到一些已有研究成果的佐证^[15,21],说明基于直接法的三维随机模型可以较好地反映土石混合体宏观力学性质,同时也有利于从细观的角度来探讨土石混合体的剪切破坏机制。

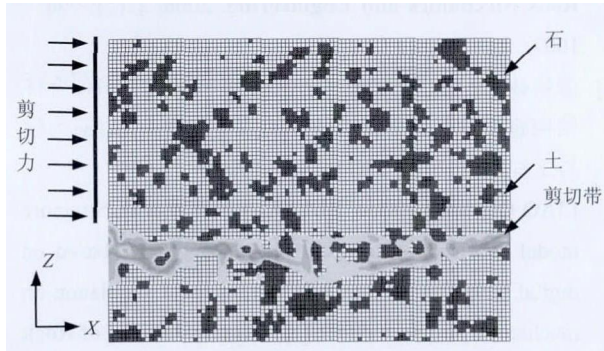


图7 块石分布与剪应变云图

Fig.7 Contours of rock distribution and shear strain

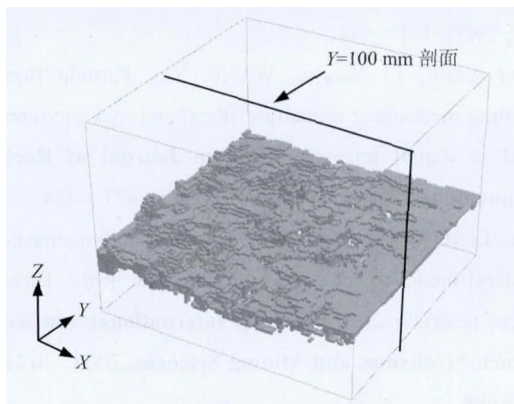


图8 剪切破坏面三维空间分布

Fig.8 3D distribution of the shear failure plane

5 结论

(1) 通过对土石粒径界限、块石分布规律与粒径分布频度的研究,基于直接生成法建立了土石混合体的三维随机模型,形成了一套较为完整的、操作性强的三维随机模型构建方法,相关三维随机模型与真实土石混合体具有一致的统计特征,可作为力学性质研究的有效载体。

(2) 数值仿真结果与试验测试曲线较为吻合,进一步对剪切破坏过程中的剪切带分布特征进行了细观尺度的研究,探讨了土石混合体的剪切破坏特性与土石相互作用机制,获得了一些有益的认识,同时也说明三维随机模型可以较好地反映土石混合体的宏观力学性质和细观破坏机制。

目前的一些认识是初步的,由于土石粒径界限与网格临界尺寸的限制,目前该三维随机建模方法还仅限于室内力学试验数值仿真的阶段。下一步的

工作将以三维随机模型为基础,开展不同含石量的土石混合体力学性质研究,进一步揭示土石相互作用机制及其对宏观力学性质的影响规律。

参考文献

- [1] 丁秀美. 西南地区复杂环境下典型堆积(填)体斜坡变形及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
DING Xiu-mei. Study of the deformation and stability of typical debris & embankment slope with complicated environment in southwest China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [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: 北方交通大学, 2001.
YOU Xin-hua. Research on stochastic structure model and its application of soil-rock-mixture[D]. Beijing: Northern 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. Soil-rock-mixture experimental study of field level clipper[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10): 1537—1540.
- [4] 徐文杰, 胡瑞林, 曾如意. 水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 14(4): 496—501.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, ZENG Ru-yi. Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 14(4): 496—501.
- [5] 侯红林, 赵德安, 蔡小林, 等. 黄河二级阶地洪积碎石土剪胀特性分析[J]. 西部探矿工程, 2006, (3): 22—24.
HOU Hong-lin, ZHAO De-an, CAI Xiao-lin. Gravel soil dilatancy characteristic analysis of the second terrace of Yellow River Pluvial[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2006, (3): 22—24.
- [6] 刘衡秋, 胡瑞林, 曾如意. 云南虎跳峡两家人松散堆积体的基本特征及成因探讨[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 100—106.
LIU Heng-qiu, HU Rui-lin, ZENG Ru-yi. Study on the basic characteristics and causes of loose deposit of Liangjiaren engineering of Hutiao-valley[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(1): 100—106.
- [7] 谭儒蛟, 胡瑞林, 刘衡秋, 等. 虎跳峡工程区松散堆积体原位直剪试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(6): 53—55.
TAN Ru-jiao, HU Rui-lin, LIU Heng-qiu. In-situ shear

- test study on loose deposit of Hutiao-valley[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2005, 33(6): 53—55.
- [8] LINDQUIST E S. The strength and deformation properties of melange[D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [9] 李维树, 邬爱清, 丁秀丽. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的影响因素研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(1): 56—60.
LI Wei-shu, WU Ai-qing, DING Xiu-li. Study on influencing factors of shear strength parameters of slide zone clay in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 56—60.
- [10] 李维树, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1338—1342.
LI Wei-shu, DING Xiu-li, WU Ai-qing, et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges Reservoir bank slopes under influence of impounding[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1338—1342.
- [11] 武明. 土石混合非均质填料力学特性试验研究[J]. *公路*, 1997, (1): 40—42.
WU Ming. Research on nonhomogeneity mechanical properties of earth-rock mixture[J]. *Highway*, 1997, (1): 40—42.
- [12] 蒋洋, 王操, 柴贺军. 土石混合料 K-G 模型参数试验研究[J]. *公路交通科技*, 2008, (3): 44—49.
JIANG Yang, WANG Cao, CHAI He-jun. Test study on K-G model parameters of soil-stone mixture[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, (3): 44—49.
- [13] 周博, 卢自立, 汪华斌, 等. 基于均匀化理论的土石混合体应力应变关系[J]. *地质通报*, 2013, 32(12): 2001—2007.
ZHOU Bo, LU Zi-li, WANG Hua-bin, et al. Stress-strain relationship of soil-rock mixture based on homogenization theory[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12): 2001—2007.
- [14] 岳中琦, 陈沙, 郑宏, 等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(6): 889—897.
YUE Zhong-qi, CHEN Sha, ZHENG Hong, et al. Digital image processing based on a finite element method for geomaterials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6): 889—897.
- [15] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体含量与抗剪强度关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(5): 996—1007.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi, et al. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(5): 996—1007.
- [16] 廖秋林, 李晓, 朱万成, 等. 基于数码图像土石混合体结构建模及其力学结构效应的数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(1): 155—162.
LIAO Qiu-lin, LI Xiao, ZHU Wan-cheng, et al. Structure model construction of rock and soil aggregate based on digital image technology and its numerical simulation on mechanical structure effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(1): 155—162.
- [17] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像处理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 of digital image[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(3): 477—484.
- [18] LI X, LIAO Q L, HE J M. In-situ tests and stochastic structural model of rock and soil aggregate in the Three Gorges reservoir area, China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 494—498.
- [19] 李世海, 汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(2): 172—177.
LI Shi-hai, WANG Yuan-nian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D-DEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(2): 172—177.
- [20] 周剑, 张路青, 戴福初, 等. 基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊 1): 2650—2659.
ZHOU Jian, ZHANG Lu-qing, DAI Fu-chu. Based on the direct shear test soil-rock-mixture bond particle model of a landslide numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Supp. 1): 2650—2659.
- [21] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
GUO Qing-guo. The engineering properties and application of coarse grained soil[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1998.