

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.009

基于较大块石分布位置的土石混合边坡稳定性研究*

黄献文^{1,2}, 刘顺青¹, 周爱兆¹, 王炳辉¹

(1. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212000; 2. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232000)

摘要: 为了准确分析土石混合边坡的稳定性, 克服传统有限元和颗粒流程序在分析土石混合边坡稳定性上的不足, 提出一种基于原始土石混合边坡的图像识别和块石随机生成技术, 运用此技术生成土石混合边坡模型, 模型中较大块石的尺寸范围为0.1~0.3倍坡高, 并采用强度折减法对5种不同较大块石分布位置的土石混合边坡的稳定性进行了分析研究。结果表明: 不同的较大块石分布位置对土石混合边坡稳定性的影响较大, 影响的大小关系为: 坡脚>坡面>坡顶>坡内>坡后>均质土坡; 在同一较大块石分布类型下, 不同的块石随机位置及排列方式对土石混合边坡的塑性扩展模式有着较大影响。研究结果可为土石混合边坡的设计及施工提供参考依据。

关键词: 土石混合边坡; 有限元; 块石分布; 塑性区; 稳定性

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0063-09

Study on the Stability of Soil-rock Slopes based on the Distributional Location of the Larger Rocks

HUANG Xianwen^{1,2}, LIU Shunqing¹, ZHOU Aizhao¹, WANG Binghui¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China; 2. School of Civil and Architecture Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

Abstract: In order to accurately analyze the stability of soil-rock mixed slopes and overcome the shortcomings of the traditional finite element and particle-flow software in analyzing the stability of soil-rock mixed slopes, a method based on image recognition of original soil-rock mixed slopes and generation of random rocks, was put forward and used to generate slopes with random rock distributions. The size range of the larger rocks in the model is 0.1 to 0.3 times of slope height. The strength reduction method was used to analyze the stability of soil-rock mixed slopes according to five kinds of rock distributions. The results show that the distribution of larger rocks in soil-rock mixed slopes have larger influence on the stability of slope. The main influential factors follow the sequence of slope toe, slope surface, slope crest, inside slope, behind slope and on uniform soil slope, based on the distribution of larger rocks. The random location and arrangement of rocks have great influence on the plastic zone propagation mode of soil-rock mixed slopes under the same rock distribution type. This research can provide reference for the design and construction of soil-rock mixed slopes.

Keywords: soil-rock mixed slopes; finite element, rock distribution; plastic zone; stability

* 收稿日期: 2018-02-25; 修回日期: 2018-04-11

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究项目(17KJB560003)、国家自然科学基金项目(51579119)资助

作者简介: 黄献文(1994-), 男, 博士研究生。主要从事土动力学及数值模拟方面的研究。Email: 994310735@qq.com

通讯作者: 刘顺青(1985-), 男, 讲师, 博士。主要从事土石混合边坡及数值模拟方面的研究。Email: sqljust@just.edu.cn

引言

土石混合体形成于第四纪以后,是岩体在自然条件下,受地质构造、物理分化、化学变质作用与土体混合形成的一种分布广泛的地质体,其主要包括具有一定形状、强度的岩体块石及强度相对较低的土体,是一种极端不均匀的岩土材料^[1]。土石混合体在我国大部分山区均有分布,尤其是在西部山区,在川藏公路的7个大型滑坡事故中,6个为土石混合边坡,易滑坡土方量达3亿 m^3 ^[2];此外,在攀西地区816个滑坡事故中,土石混合边坡占500个,占总数的61.3%^[3-4]。由此可见,该类地质体极易发生滑坡等地质灾害,严重威胁人们的生命财产和国家的经济建设。然而,对于内部结构复杂、组成材料离散性较大的土石混合体,设计人员依旧采用传统的极限平衡法^[5]和基于均匀连续假设的有限元强度折减法,将土石混合体假设为一种均质材料,作为土质边坡来计算。徐文杰等^[6]和张群^[2]通过对土石混合边坡破坏模式的研究和模拟,发现块石存在对边坡稳定性和破坏模式存在影响,但并未对块石分布特点及其对边坡稳定性的影响进行详细分析。

伴随着计算软件和数值计算方法的不断发展,非均质材料的力学特性已经可以被很好的考虑,其方法主要包括:材料颗粒离散化分析的离散元^[7]和设有接触面的有限元^[8]。离散元软件可以准确的分析出非均质材料的力学特性和变形破坏特点,W.J. Xu等^[9]就土石混合材料的力学特性进行了模拟,与试验结果误差很小。但对土石混合边坡而言,离散元软件庞大的计算单元数据,使得一般计算机很难对其进行计算分析,因此,考虑设有接触面的有限元软件显得更加便捷、快速。

在模型构建方面主要有两种常用的计算方法:一种是对实体结构进行CT扫描,通过重塑原始结构对模型进行重建^[10-11]。李长圣等^[12]通过CT扫描重建原始结构,与试验结果相比,计算结果较为准确。但其复杂的前期工作,使得工程中很难实现。另一种是根据一些可测参数或者相关参数,比如含石量、分布特性规律等,借用分析软件,对原结构进行近似模拟^[13-14],通过反复分析,获取统计结果。相比之下,在误差允许的范围,通过相关参数来模拟土石混合边坡实际情况显得更加便捷。在土石混合边坡稳定性计算中,通过对当地已有滑坡的土

石混合边坡进行拍照,提取其含石量、块石大小、块石面积等敏感参数,随机生成对应的土石混合边坡。Z.M.Wang等^[15]通过随机程序的编写完成了混凝土内部骨料的随机生成;J.Chen等^[16]通过Matlab程序的编写,实现了沥青混合料中多边形骨料随机生成。但其均存在石子生成级配无法控制、生成速度慢、与有限元软件兼容性差等缺陷。

基于上述理由,本文提出了一种考虑较大块石分布位置的土石混合边坡生成方法,并对生成边坡的稳定性进行了分析。其主要实施过程包括:先通过Photoshop和Matlab对原始边坡岩土体处理和分折,获得土石混合边坡块石含量、级配等参数,然后通过随机投放不同直径圆形基料的方式来生成土石混合体初始模型,再通过畸变系数和多边形最大边数的设定,获得带有棱角的多边形文件;再通过VBA的多线函数绘制出对应的块石边界轮廓线;最后将数据导入到MIDAS GTS中,通过设置对应的土石参数来建立对应的土石混合边坡模型,并用有限元强度折减法对边坡塑性区发展模式进行分析。研究结果可为土石混合边坡的设计及施工提供参考依据。

1 块石随机生成系统

为获得统计意义上用于工程分析的土石混合边坡模型,本文以徐文杰等^[6]分析的土石混合边坡为例,通过自编图片分析程序对其含石量、畸变均值进行提取,输入至程序(图1)中,其主要流程包括:计算各级配下块石面积、生成随机圆基料、控制畸变系数和最多边数,最终确定满足级配特点和畸变参数的随机模型。

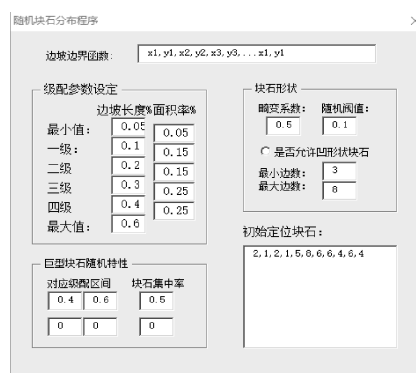


图1 随机块石分布程序界面

Fig.1 Interface of the random block distribution program

1.1 块石粒径及面积率

土石混合物中的块石级配按照块石的累积筛余量进行计算。块石尺寸根据与边坡高度 H 的相对大小分别为 $0.05\sim 0.1H$ 、 $0.1\sim 0.2H$ 、 $0.2\sim 0.3H$ 、 $0.3\sim 0.4H$ 、 $0.4\sim 0.6H$ ，本文计算所用较大块石尺寸范围为 $0.1\sim 0.3H$ 。为了从已有边坡中获得对应含石量以及对应的畸变参数，首先对边坡进行高清拍照(图2)，再借助Photoshop软件，从块石与土体基色差异的角度对块石轮廓进行识别、区分，生成具有封闭边界轮廓的块石(图3)。

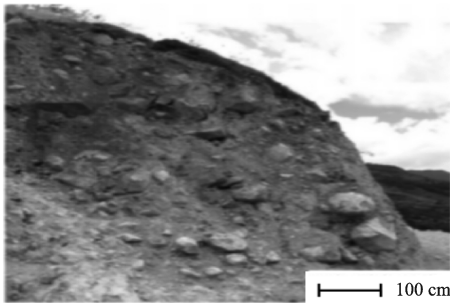


图2 原始边坡^[6]

Fig.2 Photograph of the original slope^[6]

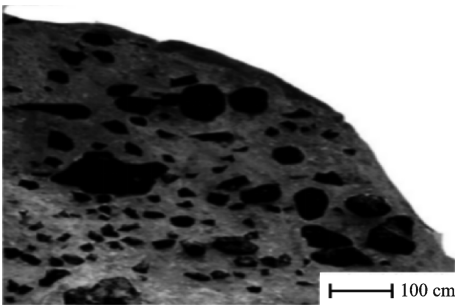


图3 Photoshop处理后边坡

Fig.3 Photograph of the slope processed by Photoshop

因为块石数量较多，人工计算其含石量和畸变系数工作量较大，因此借助Matlab软件，通过编写对应代码，对块石的边界矩阵、含石量、畸变系数进行提取，其计算原理如下：首先，对预处理图片进行精细网格划分(图4)，在图像上形成100 000个具有明确位置坐标的点，通过对细小网格内颜色值RGB的识别，编写对应的数组，其格式为： $50, 20, 1, 1$ [表示坐标位置(50, 20)，是(否)块石，是(否)在边界区域内]，再通过块石网格数量与边界内网格数量的对比，计算出块石含量。

块石级配和畸变系数的判定，其计算流程包括：检查相邻微单元是否包括块石单元，判断块石

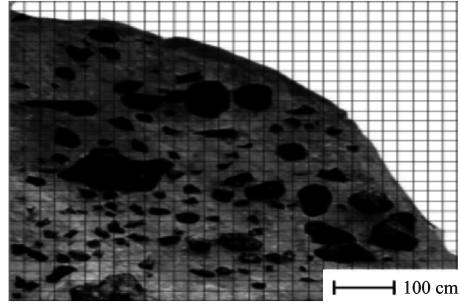


图4 Matlab划分网格

Fig.4 Mesh generation in Matlab

的整体性(图5)，并在微单元数组中写入对应块石编号；然后通过对同一块石中非相邻点尺寸，找出最大直径点，通过对4个点X、Y坐标均值计算，计算出圆形位置(图6)，然后计算出最大、最小外接圆直径 d_{max} 、 d_{min} ，畸变系数为 d_{min}/d_{max} ，块石尺寸为 d_{max} ；最后通过对块石矩阵数据的计算统计，获得对应级配的面积率和畸变系数值 μ 。

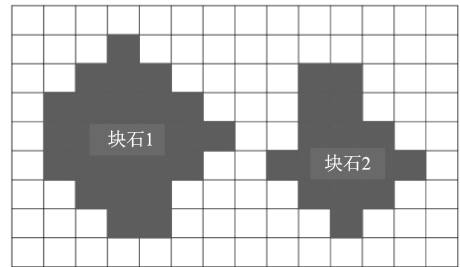


图5 块石识别

Fig.5 Identification of stones

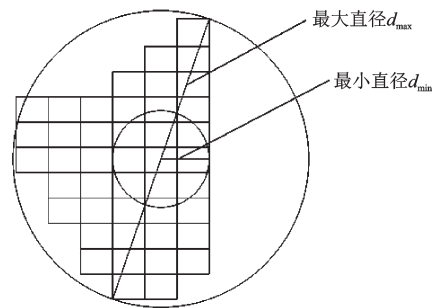


图6 尺寸识别

Fig.6 Size identification

1.2 多边形块石的生成

土石混合边坡图片处理获得了对应级配下块石面积率和畸变系数后，就要生成对应级配段内块石。本文方法是先随机生成一个对应级配的随机

圆,用它来控制骨料的位置和最大直径,其对应的字符串为 x_o, y_o, d ;设置最大直径角为: $\theta(i_{\max})=2\pi rand, \theta(i_{\min})=2\pi rand$ (其中 $rand$ 表示0~1随机值),则其对应的极值点坐标为: $(x_o \pm 0.5d \cos(\theta_{\max}), y_o \pm 0.5d \sin(\theta_{\max}))$ 其中, δ 为 $(x_o \pm 0.5\delta \cos(\theta_{\min}), y_o \pm 0.5\delta \sin(\theta_{\min}))$ 畸变系数控制下的随机边长, $\delta=(1+k(2rand-1))\mu d$; k 为畸变系数变化阈值(取0~0.1)。

控制点生成后,完成块石辅助随机边界点生成,其直径随机函数和角度随机函数分别为: $d_{rand}=\delta+(d-\delta)rand, \theta_{rand}=2\pi rand$,由此可以根据圆心点的坐标计算出不同的块石边界点坐标值,其计算次数应以设置的多边形最多边数($n-4$)为控制标准;由于随机边界点角度随机,因此需对单个块石的所有边界点按照逆时针进行排序。

边界点有理化后的块石面积采用三角形求和法计算,对任意多边形 $A_1, A_2 \dots$,以圆形 (x_o, y_o) 为三角形顶点,底边为 l_{ab} ,则任一三角形面积计算公式为:

$$S_i = 1/2 \begin{vmatrix} x_o & y_o & 1 \\ x_n & y_n & 1 \\ x_{n+1} & y_{n+1} & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

则单个块石的面积值为 $S = \sum S_{i_o}$ 。

2 多边形块石投放

2.1 投放算法

关于多边形块石之间的入侵判断,文献[17]中提出了向量面积法,文献[18]主要采用夹角之和测试法;G.De Schutteg等^[19]则采用了空间分割填充法。三种方法虽然都可以判定块石是否入侵,但计算均较为复杂,本文通过对投放流程的优化,采用直线距离法直接判定块石角点是否入侵随机圆内,简化了复杂的入侵判断流程;又通过投放级配由大到小的顺序,直接避免了随机圆在块石内部的可能性,提高了块石投放效率。

2.2 投放流程

如图7所示,块石投放流程为:①输入初始参数,主要包括边坡轮廓函数,块石级配参数、含石量及畸变参数;②在规定级配内生成随机圆;③判断是否有块石入侵到随机圆中;④按照畸变系数生成

多边形块石,并将单个块石节点数据有理化;⑤绘制对应的块石轮廓图,重复步骤②、③、④、⑤,直至系统生成满足含石量、级配曲线、畸变系数的轮廓图。

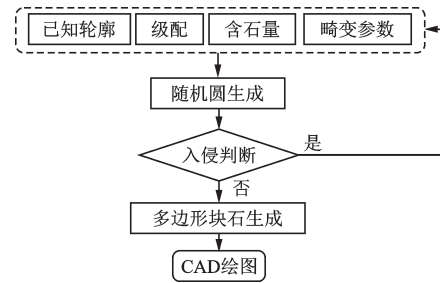


图7 计算流程

Fig.7 Flow chart of calculation

2.3 5种分布位置块石生成

刘海涛等^[20]通过三轴数值压缩试验,发现当试样尺寸与颗粒粒径之比 $L/R < 30$ 时,试样的强度会随着比值变化呈现出较大改变,并结合量纲分析理论获得了 $L/R = 30$ 的计算阈值;而在工程中的土石计算阈值一般取0.05~0.07倍的边坡长度^[21];本文结合MIDAS GTS的计算特点,并通过对不同块石大小的模拟和分析,最终确定以0.1~0.3倍的边坡高度为较大块石的划分标准。

邵帅等^[22]通过对4种不同类型块石分布的土石混合边坡在静态和动态作用下稳定性分析,讨论了块石空间分布对边坡剪切带和稳定性的影响,但其忽略块石形状对有限元网格划分的影响,并未给出块石分布明确的分型标准。通过块石分布对边坡稳定性的影响分析,结合边坡破坏特点,发现较大块石分布在均质土边坡塑性区后侧时对边坡稳定性基本没有影响。因此,按照较大块石分布位置与均质土边坡塑性发展区域及坡面的相对位置,在控制含石量、块石大小的前提下,仅改变较大块石位置,建立了5种不同的块石分布模型(图8)。

3 有限元建模及结果分析

3.1 有限元强度折减理论

如图9所示,强度折减法^[23]中边坡安全系数计算方法为:对土体的抗剪强度参数进行规律性折减。

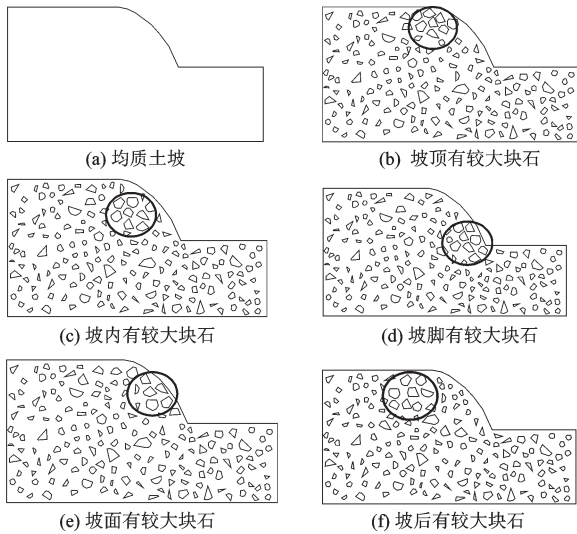


图8 坡体有较大块石分类

Fig.8 Classification of the distributions of rocks

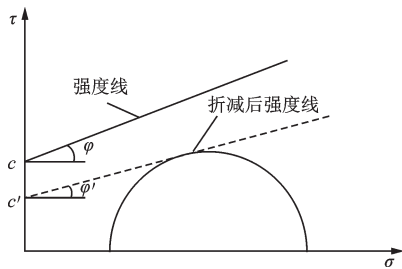


图9 强度折减法计算模型

Fig.9 Diagram of strength reduction method

$$\begin{aligned} c' &= c/F_s \\ \varphi' &= \arctan(\varphi/F_s) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, c, φ 分别为土体的初始黏聚力和内摩擦角; c', φ' 分别为强度折减后的土体黏聚力和内摩擦角。

当边坡恰好处于临界破坏状态时的折减系数即为该边坡的安全系数, 其临界破坏标准主要包括:

- ①非线性程序计算是否收敛;
- ②塑性区是否贯通, 形成完整的塑性带;
- ③位移是否发生突变。

在 MIDAS GTS 软件中以非线性计算是否收敛(能量、位移、内力)为边坡失稳判断的主要依据。其具有无需提前假设滑动面位置和几何形状、能考虑边坡土体变形对稳定性的影响、可以较为准确的计算出滑动带和直接求出安全系数等优点。

3.2 有限元建模计算模型

随机生成的土石混合体边坡块石模型导入有限元软件中, 以三角形单元为基础, 划分网格, 最大

单元尺寸以最小块石尺寸的 0.5 倍为标准。形成单元总数 22 550。在模型的左右边界设置水平约束, 在底部边界同时设置水平约束和竖向约束, 并对土体添加竖向自重荷载。其中, 块石和土体的物理参数取自文献[20], 见表 1。

表 1 土石混合体边坡计算模型参数

Table 1 Parameters of the calculation model of soil-rock mixed slopes

组成	密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ kPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/ $^\circ$
土体	1.80	50.0	0.35	30	24
块石	2.41	2e4	0.2	900	42

3.3 较大块石不同位置下结果分析

通过对 5 种块石分布位置模型的计算, 获得各位置下边坡塑性区及对应的边坡安全系数(FOS)。

以文献[6]中土石混合边坡轮廓线为边界, 建立对应的土质边坡模型。采用强度折减法进行稳定性分析, 获得边坡塑性应变云图, 如图 10 所示。从图 10 中可见, 土质边坡的塑性带较为平滑, 且由坡脚贯穿至坡顶, 有限元强度折减法分析得到的安全系数为 1.213。以均质土坡的塑性带为标准, 对不同块石分布类型的土石混合边坡稳定性进行分析。



图 10 均质土坡

Fig.10 Homogenous slope

由图 11 可知, 较大块石的存在, 使得原本光滑的塑性带分布出现絮乱、分叉, 存在明显的“绕石”效应^[24]。由图 11(a) 所示, 坡顶有较大块石对边坡塑性区的发展影响较大, 坡顶原本明显贯通的塑性区呈现出“倒树根”型, 塑性带仅分布于块石间土体中, 无法形成贯穿、平滑的主塑性带。因而边坡稳定性得以提高, 安全系数由 1.213 提高至 1.320。

如图 11(b) 所示, 当块石堆积在坡体中部时, 边

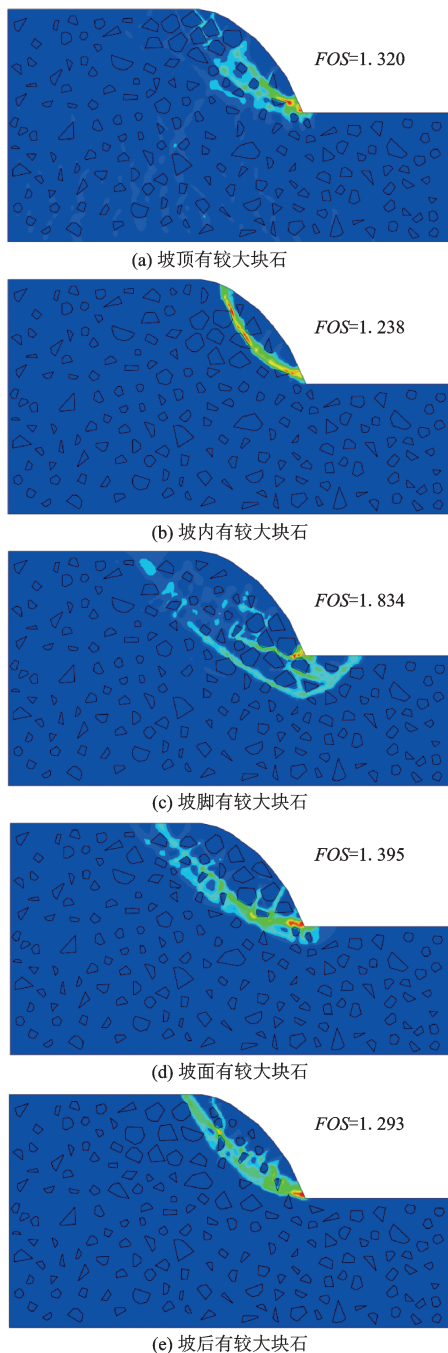


图 11 坡体有较大块石分类计算结果

Fig.11 Calculation results for different rock distributions

坡的稳定性提升最小,安全系数由原先的 1.213 提升至 1.238。从塑性区的发展来看,块石的堆积改变了原始塑性带的位置,使其向坡面偏移,一方面直接减小了塑性贯通带的长度,降低了边坡的稳定性;另一方面,部分块石的棱角进入主塑性区内,增加塑性区的抗滑阻力,两者同时作用,所以土石混合体边坡的稳定性变化较小。

如图 11(c)所示,坡脚有较大块石土石混合边

坡稳定性最好,安全系数由 1.213 提升至 1.834。大量的块石堆积在坡脚,一方面阻断了边坡塑性带的发展,坡脚的塑性带绕过块石堆积区向下发展,增加了塑性区的长度;另一方面,块石较大的密度和较高的强度,显著提高了坡体的抗滑力,使得安全系数提升明显。

如图 11(d)所示,当较大块石主要分布在坡面时,主要对边坡塑性带位置产生影响。大量的块石堆积在边坡坡面上,使得原先滑动带向坡后偏移,一方面改变了边坡塑性带的长度和位置,另一方面块石较高的强度和较大的重度,增加了抗滑力。提高了土石混合边坡的稳定性,安全系数由原先的 1.213 提高至 1.395。

如图 11(e)所示,对于坡后有较大块石,边坡稳定性有较小增加,安全系数由 1.213 上升至 1.293。大量的块石堆积在边坡后侧,使得边坡主塑性带沿着有较大块石边界发展,只有与塑性带接触的部分块石可以对边坡稳定性产生影响,因而坡后有较大块石对边坡的稳定性影响较小。

通过对 5 种块石分布位置下边坡稳定性的分析,发现块石分布位置对边坡稳定性的影响方式、大小各不相同,主要体现在塑性带位置变化、发展趋势以及边坡抗滑力上,其影响关系为:坡脚有较大块石>坡面有较大块石>坡顶有较大块石>坡内有较大块石>坡后有较大块石>均质土坡。

3.4 塑性扩展模式分析

通过对较大块石相对位置的调整,发现塑性区在较大块石堆积的情况下主要存在 3 种塑性扩展模式(图 12)。

如图 12 所示,对于“绕石”型的塑性扩展模式,这将引起塑性带的偏移;对于“分流”型的塑性扩展模式,将引起塑性区的紊乱和分叉,这也是边坡出现多块体滑动的主要因素;“包含”型塑性扩展模式,主塑性带将块石包含其中,引起塑性区范围扩大,塑性带变长、变宽^[24-26]。

为方便分析块石相对位置与较大块石分布类型对边坡稳定性的影响。在相同较大块石分布类型下,对块石相对位置进行 6 次随机重组,然后进行边坡稳定性分析,计算结果如图 13 所示。

由图 13 可知,在相同较大块石堆积类型下,由于块石相对位置的调整,边坡安全系数呈现出不同的离散值,其大小关系为:坡脚有较大块石>坡顶

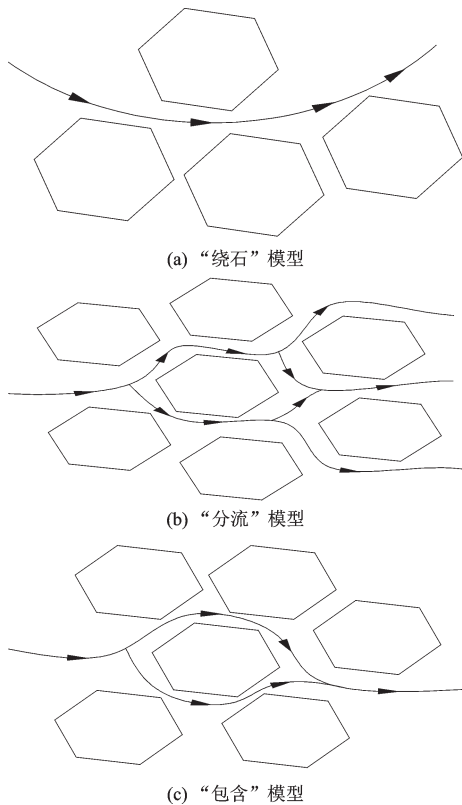


图 12 塑性区发展模型

Fig.12 Propagation model of plastic zones

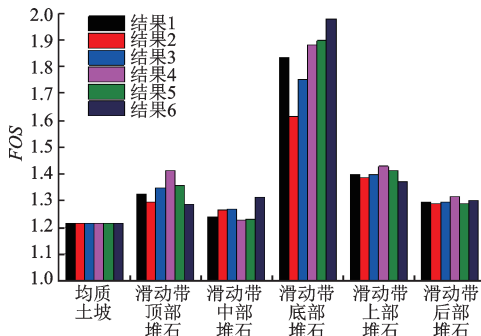


图 13 不同块石分布类型及相对位置下安全系数

Fig.13 Safety factors under different rock distribution type and relative position

有较大块石 > 坡内有较大块石 > 坡面有较大块石 > 坡后有较大块石 > 均质土坡。通过分析,发现这与边坡主导的塑性扩展模式存在较大关系。

当坡脚有较大块石时,安全系数的离散值最大。3种塑性扩展模式均对边坡稳定性有较大影响,但其提高程度不同。当较大块石堆积较为紧密时,边坡塑性区扩展以“绕石”模型为主。此时,坡脚塑性区将上移或者下移,当塑性区上移时,相当于间接降低了边坡高度,边坡稳定性提高较大;当

塑性区下移时,如图 11(c)所示,将极大的延长塑性区的扩展路径,边坡稳定性也将获得较大提高。当较大块石堆积的较稀疏时,坡脚塑性扩展模式以“绕石”或者“分流”模型为主,但这两种模式对边坡安全系数提高较小。因此坡脚有较大块石分布时,由于塑性扩展模式的差异,边坡安全系数体现出较大的离散值。

当坡顶有较大块石堆积时,边坡安全系数离散值较大。3种塑性扩展模式均对边坡稳定性有较大影响,但其提高程度不同。其中“分流”模型和“绕石”模型下的边坡安全系数提高最大,较大块石的存在,使得原本应贯通的塑性带变得絮乱,产生“倒树根”型,无法连接成主塑性带,提高了边坡稳定性;在“绕石”模型下,坡顶塑性带将产生移动,边坡的安全系数提高较小,因此,坡顶有较大块石分布时,塑性扩展模式对边坡稳定性的影响较大。

当坡内有较大块石堆积时,塑性扩展模式主要以“绕石”和“包含”模型为主,较少出现“分流”模型。当塑性扩展模式为“绕石”模型时,塑性区将沿着块石之间的间隙进行发展,块石的棱角将对边坡塑性区发展起到阻碍作用,增强了边坡的稳定性。当塑性扩展模式为“包含”模型时,边坡塑性带将变长、变宽,增加了边坡稳定性。这两种塑性扩展模式对边坡稳定性的提高程度相近,因为在此较大块石分布类型下,边坡稳定系数离散值较小。

坡面有较大块石的情况对边坡稳定性的影响相对较小。在此分布类型下,塑性带扩展模式主要以“绕石”模型为主,较少出现“分流”或者“包含”模型,因此,边坡稳定系数离散值较小。

当坡后有较大块石堆积时,边坡塑性扩展模式主要以“绕石”模型为主,较少出现“分流”和“包含”模型,且该较大块石分布类型对边坡稳定性影响较小。因此,在该较大块石分布类型下,边坡塑性扩展模式对边坡稳定性的离散值最小。

土石混合边坡失稳破坏,其滑动面形成伴随着块石间土体薄弱部分的塑性破坏,当塑性带贯通时,其滑裂面也最终形成。因此对于较大块石分布位置及塑性扩展模式的准确把握有助于准确分析较大块石分布对边坡稳定性的提高程度及预测滑裂面位置,以便实施合理的土石混合边坡设计及施工方案。

4 结 论

(1)发现将土石混合边坡简化为均质土坡的分析方法不合理性,忽略了块石对边坡稳定性及滑动带的影响。

(2)较大块石分布对土石混合边坡稳定安全系数的提高大小顺序为:坡脚>坡面>坡顶>坡内>坡后>均质土坡,准确的分析较大块石分布位置,对于土石混合边坡的稳定性分析和最终滑裂面确定有重要意义。

(3)在同一块石分布类型下,对不同的块石相对位置、排列方式及形状进行调整,研究其塑性扩展模式,发现有“绕石”“分流”“包含”3种主要的扩展形式;块石相对位置的差异对不同较大块石分布位置下的边坡稳定性影响关系的大小顺序为:坡脚>坡顶>坡内>坡面>坡后>均质土坡。

(4)提出了一种土石混合边坡稳定性的分析方法,在无法勘探坡面内部构造的情况下通过大数据模拟边坡的稳定性,其结果较传统的均质土坡算法具有一定的合理性和可靠性。

需要指出的是:本文使用的土体和块石参数差异性较大,是在假设块石是均质的、大刚度材料的前提下,而实际的块石可能存在一定的微裂纹,滑裂面沿着微裂纹进行扩展,本文提供的分析方法尚不足以对此进行分析;本文分析仅考虑了土石混合体在自重荷载作用下的稳定性变化,未考虑降雨入渗及地震作用的影响。

参考文献:

- [1] 康平,穆伟,汪子杰,等.基于强度折减法的某公路边坡稳定性数值模拟[J].土工基础,2012,26(3):47-49,53.
Kang P, Mu W, Wang Z J, et al. Numerical simulation of slope stability of a highway based on strength reduction method [J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26 (3): 47-49, 53. (in Chinese)
- [2] 张群.基于细观机制的土石混合体边坡稳定性研究[D].武汉:长江科学院,2012.
Zhang Q. Study on stability of rock and soil mixture slope based on mesoscopic mechanism [D]. Wuhan: Changjiang Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [3] 廖秋林,李晓,郝钊,等.土石混合体的研究现状及研究展望[J].工程地质学报,2006,14(6):800-807.

Liao Q L, Li X, Hao Zh, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14 (6): 800-807. (in Chinese)

- [4] 徐文杰,胡瑞林,谭儒蛟,等.虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1270-1277.
Xu W J, Hu R L, Tan R J, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of longpan in tiger-leaping area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (6): 1270-1277. (in Chinese)
- [5] 贾东远,阴可,李艳华.岩石边坡稳定性分析方法[J].地下空间,2004(2):250-255.
Jia D Y, Yin K, Li Y H. Stability analysis of rock slope [J]. Journal of Underground Space Science, 2004(2): 250-255. (in Chinese).
- [6] 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,2008,29(增1):341-346.
Xu W J, Wang Y J, Chen Z Y, et al. Slope stability analysis of soil-rock mixed slope based on digital image technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (Sup 1): 341-346. (in Chinese)
- [7] 周健,王家全,曾远,等.颗粒流强度折减法和重力增加法的边坡安全系数研究[J].岩土力学,2009,30(6):1549-1554.
Zhou J, Wang J Q, Zeng Y, et al. Slope safety by methods of particle flow code strength reduction and gravity increase [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (6): 1549-1554. (in Chinese)
- [8] Li X J, Zhang J F, Liu K N, et al. Finite element modeling of geo-material using digital image processing and computerized tomography identification [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8):1331-1334.
- [9] Xu W J, Yue Z Q, Hu R L. Study on the meso-structure and meso-mechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5):749-762.
- [10] 汪海年,张琛,方俊,等.橡胶热再生混合料低温性能与细观特征研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(11):123-128.
Wang H N, Zhang Ch, Fang J, et al. Study on low temperature performance and micro-structure of rubber hot recycled mixture [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2014, 41 (11): 123-128. (in Chinese)

- [11] Gao J, Wen H, Lin Z Y, et al. Geometric model reconstruction through a surface extension algorithm for re-manufacturing of twist blades [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(2):382-390.
- [12] 李长圣,张 丹,王宏宪,等. 基于CT扫描的土石混合体三维数值网格的建立[J]. *岩土力学*, 2014, 35(9): 2 731-2 736.
Li Ch Sh, Zhang D, Wang H X, et al. 3D mesh generation for soil-rock mixture based on CT scanning [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35 (9) : 2 731-2 736. (in Chinese)
- [13] Sadd M H, Dai Q L, Parameswaran V, et al. Micro structural simulation of asphalt materials: modeling and experimental studies [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(2):107-115.
- [14] Dai Q, Sadd M H, Parameswaran V, et al. Prediction of damage behaviors in asphalt materials using a micro-mechanical finite-element model and image analysis[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2005, 131 (7) : 668-677.
- [15] Wang Z M, Kwan A K, Chan H C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. *Computers and Structures*, 1999, 70(5):533-544.
- [16] Chen J, Zhang M, Wang H, et al. Evaluation of thermal conductivity of asphalt concrete with heterogeneous microstructure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 84:368-374.
- [17] 高政国,刘光廷. 二维混凝土随机骨料模型研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(5):710-714.
Gao Zh G, Liu G T. Study on random aggregate model of two-dimensional concrete [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2003, 43(5) : 710-714. (in Chinese)
- [18] 张 剑,金国南,金贤玉,等. 混凝土多边形骨料的数值模拟方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38 (5):581-585.
Zhang J, Jin G N, Jin X Y, et al. Numerical simulation of concrete polygonal aggregate[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2004, 38(5) : 581-585. (in Chinese)
- [19] De Schutte G, Taerwe L. Random particle model for concrete based on Delaunay triangulation [J]. *Material Sand Structures*, 1993, 26(2):67-73.
- [20] 刘海涛,程晓辉. 粗粒土尺寸效应的离散元分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(增1):287-292.
Liu H T, Cheng X H. Dimensional analysis of size effect of coarse-grained soil by discrete element method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Sup 1) :287-292. (in Chinese)
- [21] Lindquist E S. Strength and deformation properties of melange [D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1994.
- [22] 邵 帅,季顺迎. 块石空间分布对土石混合体边坡稳定性的影响[J]. *工程力学*, 2014, 31(2):177-183.
Shao Sh, Ji Sh Y. Effects of spatial distribution of rock and stone on the stability of soil-rock mixed slope [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31 (2) : 177-183. (in Chinese)
- [23] 陈俊新. 基于抗剪强度折减法的边坡稳定性分析[J]. *土工基础*, 2016, 30(4):464-466,475.
Chen J X. Analysis of slope stability based on shear strength reduction method [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2016, 30(4):464-466,475. (in Chinese)
- [24] 李 亮,李彦军,赵炼恒,等. 土石混合边坡块石随机生成方法与稳定性分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(7):170-178.
Li L, Li Y J, Zhao L H, et al. Method for generating random soil rock mixed slope and stability analysis [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2017, 44 (7):170-178. (in Chinese)
- [25] 周 进,乔明叶. 基于非确定性分析法的顺层边坡抗震性研究[J]. *地震工程学报*, 2019, 41(4):925-930.
Zhou J, Qiao M Y. Measurement of the seismic behavior of bedding slopes based on uncertainty analysis [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019, 41 (4) : 925-930. (in Chinese)
- [26] Liu S Q, Huang X W, Zhou A Z, et al. Soil-rock slope stability analysis by considering the nonuniformity of rocks [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018,2018:1-15.

(本文责编:池营营)