

土石混合边坡块石随机生成方法与稳定性分析*

李亮,李彦军,赵炼恒[†],陈嘉祺,黄栋梁,王优,雷志彬

(中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:针对传统边坡稳定性分析方法未考虑土石混合体边坡内部块石的不足,采用 MATLAB 编制相应程序生成一定级配随机块石数据,再通过 AutoCAD 将数据文件转化为图形交互文件,导入 Midas 建立对应的块石边坡网格模型.最后,通过 Midas_to_Flac3d 接口程序,生成 Flac3d 模型,用 Flac3d 内嵌的有限差分强度折减法对块石边坡进行稳定性分析,并探讨土石界面强度等关键参数对土石混合边坡稳定性的影响.计算结果表明,忽略块石的存在将会给边坡稳定性计算结果引起较大的差异,坡体内塑性区并不像均质土坡那样为规则的类圆弧形态,而是在多种塑性区扩展路径的综合作用下呈现出多滑动带现象,滑动带在贯通过程中有明显的绕石效应,滑动带长度较等效均质土坡有明显延长;在所选定接触面参数变化范围内,接触面刚度参数(法向刚度、切向刚度)对边坡安全系数影响较小,而接触面强度参数(摩擦角、粘聚力)对边坡安全系数影响显著.

关键词:土石混合体;边坡;级配块石;随机生成;稳定性分析

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Method for Generating Random Soil-rock Mixed Slope and Stability Analysis

LI Liang, LI Yanjun, ZHAO Lianheng[†], CHEN Jiaqi, HUANG Dongliang, WANG You, LEI Zhibin

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: During the traditional slope stability analysis, soil-rock mixed slope is always regarded as homogeneous soil slope, and rock blocks are neglected. In this paper, a piece of MATLAB code was developed to generate random rock data containing multiple group particle sizes. By using AutoCAD, the generated rock data was converted to interactive graphics files, which can be imported into Midas for model meshing. Then, the Flac3d model was generated through a Midas_to_Flac3d interface program, and was used to analyze the stability of the soil-rock mixed slope by the method of strength reduction finite difference, which was embedded in Flac3d strength reduction finite difference. With the developed Flac3d model, the influence of some key parameters including the soil and rock interface strength on the stability of the soil-rock mixed slope was analyzed. The results show that neglecting rock blocks may lead to large difference in slope stability evaluation. The plastic zone in the heterogeneous slope is not a similar circular arc as the

* 收稿日期:2016-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208522), National Natural Science Foundation of China(51208522);贵州省交通运输厅科技项目(2012122033, 2014122006), Science and Technology Projects of Department of Transportation of Guizhou Province(2012122033, 2014122006)

作者简介:李亮(1962—),男,江苏泰兴人,中南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zlh8076@163.com

homogeneous slope, but under the combined effect of a variety of plastic zone propagation routes, it shows a multi-sliding phenomenon. Meanwhile, there is an obvious rounding rock effect through the process, and the sliding length compared with the equivalent homogeneous soil slope has a significant extension. Within the selected scope of the interface parameter changes, the stiffness parameters (normal stiffness and shear stiffness) have little effect on the factor of safety, but strength parameters (friction angle and cohesion) have significant influence on the slope stability.

Key words: soil-rock aggregate; slope; graded rock; random generating; stability analysis

土石混合体是指由具有一定尺寸且强度较高的块石、强度较低的土体及孔隙构成的一种极端不均匀的松散岩土体^[1-4],土石混合体是一种分布极为广泛且在工程实际中经常遇到的地质材料^[3].据统计,川藏公路沿线八一至然乌段发育的 7 个大型滑坡中有 6 个为土石混合边坡,仅易贡滑坡滑方量多达 3 亿 m^3 ^[5];此外,攀西地区发生的 816 个滑坡中,土石混合体边坡就有 500 个,占 61.3%^[5-6].这种地质体极易发生灾害,严重威胁人们的生命财产安全.然而,由于土石混合体边坡内部结构的复杂性,传统的极限平衡理论在分析其稳定性时存在较大的困难,往往将其视为均匀土质边坡,参数则采用细粒组分的参数来近似代替^[2].这种处理方式无论在边坡结构及参数选择上都进行了很大程度的简化,忽略了土石混合体内部“块石”对边坡稳定性的影响,从而给计算分析带来了极大的差异^[2-3].

随着计算机技术及数值计算理论的发展,考虑材料非均质性的方法在数值模型中的实现成为可能.目前,考虑材料非均质模型的构建方法主要有两种,一种方法是采用图像处理技术,如利用 CT 扫描技术或电子照片直接获得构件截面图像,然后对构件进行模型重建^[7-10];另一种方法则是根据含石量、块石级配等材料属性直接生成特定的非均质数字试件^[10-19].由于数字图像处理技术能够真实反映构件各组分的情况,该方法在沥青混合料、土石混合边坡等需要考虑材料非均质性方面得到了较广泛的应用. Yue 和 Xu 等^[8-9]运用数字图像处理技术,建立土石混合体网格模型,并利用有限元软件进行了数值试验,尽管图形处理技术提供了一种获取非均质数值模型的便捷方法,但该方法仍存在一些不可避免的缺陷.首先,图像处理技术必须以真实的构件为基础,无法提供一个完全数字化的虚拟试验系统;其次,基于图像处理的非均质模型无法对非均质材料本身的属性,如含石量、块石形状等参数进行敏感性分析.与之相反,根据含石量、块石形

状、块石级配等材料属性虚拟生成非均质构件的方法很好地克服了以上不足. Dai 和 Sadd^[11-13]在假设骨料全部为椭圆形的条件下建立了沥青混合料的二维有限元模型;颜可珍^[14]等提出了基于离散单元法确定沥青混合料抗剪参数的方法; Wang 等^[15]通过编制相关程序实现了混凝土内部骨料的随机生成; Chen 等^[16-17]通过编写 MATLAB 代码,生成符合一定级配的多边形骨料,实现了沥青混合料细观模型的生成,并将其导入有限元软件进行分析.然而,由于生成算法较为复杂,与基于图像技术的模型相比,利用虚拟生成的非均质模型对土石混合体边坡稳定性进行的研究极为少见.

基于此,本文通过随机投放不同粒径圆形基骨料的方式生成土石混合体的初始模型,并通过对基骨料设置畸变系数,得到随机棱角度的多边形骨料的顶点,并将其输出为可供 AutoCAD 识别的脚本文件.将数据脚本文件输入到 AutoCAD 中,通过样条曲线将各顶点连接,形成不同形状、不同粒径的封闭骨料,得到随机块石图形交互文件.通过切割得到边坡图形交互文件,将其导入到 Midas. GTS 中,得到随机块石边坡的网格数据,最后通过 Midas_to_Flac3d 接口程序,生成 Flac3d 模型,用 Flac3d 内嵌的有限差分强度折减法对块石边坡进行稳定性分析.

1 土石混合体边坡计算模型

为获得合理的土石混合体边坡模型,为工程建设提供可靠依据,并进一步探讨土石混合体边坡破坏特征,本文在研究过程中拟采用如图 1 所示的技术研究路线.首先,根据块石级配曲线,计算出特定尺寸对应的块石数目,再将颗粒数目输入到编制的 MATLAB 程序中,生成随机块石数据.在此基础上,将块石数据导入 AutoCAD,经过处理后生成可用于 Flac3d 计算的网格文件,为土石混合体边坡的

数值分析提供新的思路。

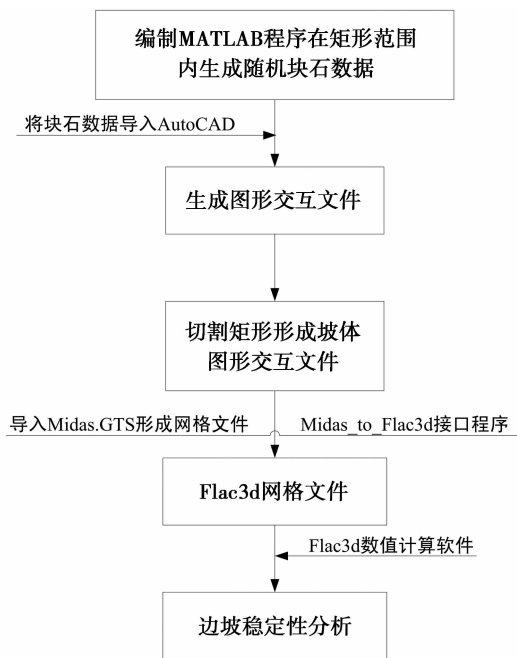


图1 土石混合体边坡稳定性分析流程图

Fig. 1 Process of the soil-rock slope stability analysis

1.1 土石混合体结构的随机生成

图2为MATLAB程序实现的流程图。程序实现过程主要分为3个步骤,即数据输入、块石投放以及块石畸变。

1.1.1 基本参数的输入

首先通过设定粒径区间区分块石类型,程序设定了多组粒径区间以模拟不同大小的块石类型,为提高模拟精度,程序在每个粒径区间内引入随机函数,使块石粒径在区间内服从均匀分布。通过设定初始含石量及每种块石对应的级配系数计算出其对应的块石数量,并设定畸变系数、投放时间阈值、投放区域等程序运行所需参数。

1.1.2 圆形基骨料的投放

在投放区域内随机插入块石中心点坐标,由于较大块石更容易与其他已经存在的块石发生重叠,因此在实际操作中,总是根据骨料级配,优先生成较大粒径的圆形基骨料中心点坐标,并计算当前插入点与投放区域内已经存在的所有点之间的距离。为保证投放效率,程序引入周围点的概念,认为距离小于2倍最大粒径的点为当前点的周围点。计算当前点与周围点之间的距离,当距离小于对应块石粒径之和时,认为当前投放块石会与已投放块石发生重叠,则重新插入当前点,再次进行投放,反之认为当前点和已存在块石不重叠,程序进行下一点投放,直到所有块石投放完成。为保证投放效率,程序

为每一组块石的投放设定一个投放时间阈值,该阈值可根据实际情况进行调整,当含石量较大时可对阈值适度上调。笔者经过多次试验认为当每组块石数目为50~100个时,其值取30s较为合理。

在投放过程中,当前粒组投放时间超过所设定的投放阈值时,则程序跳出当前投放粒组,进行下一粒组的投放,直至投放完成。为保证投放精度,程序在投放完成后将输出实际投放块石的级配曲线与理论级配曲线进行比对,当其误差在可接受的范围内时,认为投放成功。块石级配曲线模拟值与理论值对比如图3所示。

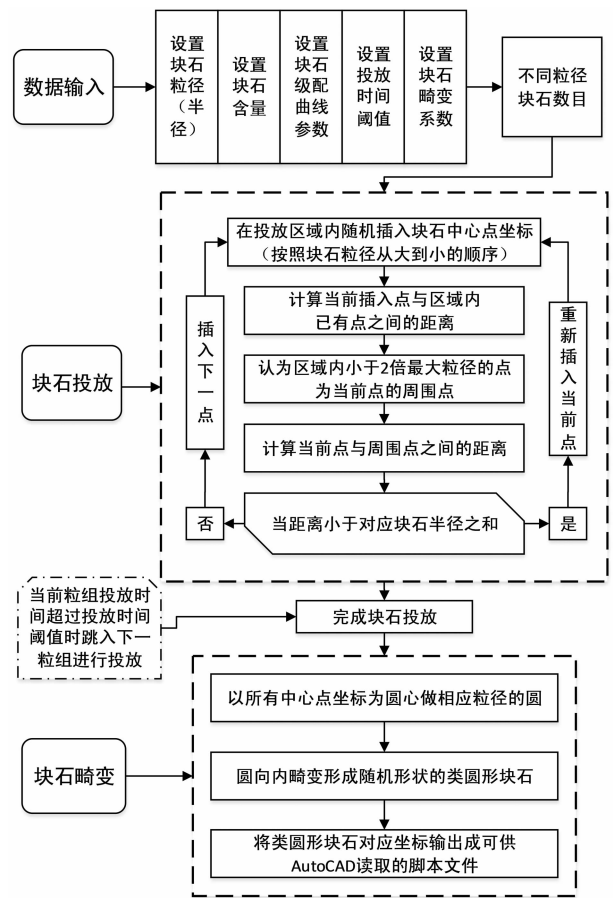


图2 MATLAB程序实现流程图

Fig. 2 Flowchart of MATLAB software

1.1.3 块石畸变

上述内容完成了确保块石不相交情况下圆形基骨料的定位,接下来对圆形基骨料进行畸变,得到随机形状类圆形块石。首先,以中心点坐标为圆心做相应粒径的圆,接着使圆形基骨料沿半径方向向内畸变得随机形状类圆形块石(向内畸变可确保畸变后块石不相交),最后将类圆形块石对应坐标输出成可供AutoCAD读取的脚本文件。

多边形骨料的生成是在圆形基骨料的基础上,

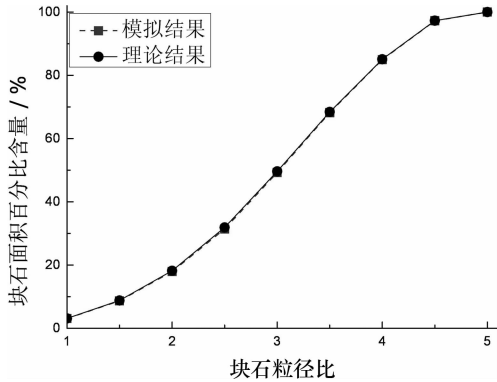


图 3 块石累积面积级配曲线
Fig. 3 Particle size distribution determined by two-dimensional area

以圆形基骨料圆心为中心,取水平半径方向为 0° ,将圆形基骨料等分为 n 份(以 $360^\circ/n$ 为一基本单位,图 4 中 $n=18$),设定畸变系数(图 4 中取畸变系数为 0.1,程序可以通过改变畸变系数来调整块石的棱角度、长宽比等形状参数),再通过 MATLAB 内嵌的 randn 随机函数及正余弦函数,确定随机块石在其不同角度上的坐标值.最后,将得到的坐标值导入 AutoCAD 中,通过样条曲线连接各坐标点,得到块石的几何形状.上述方法与徐文杰等^[1]采用的三角形基骨料延拓方法相比,解除了多边形“凸性”条件的限制,生成的块石具有随机的棱角度,更接近现实中块石的几何形态.

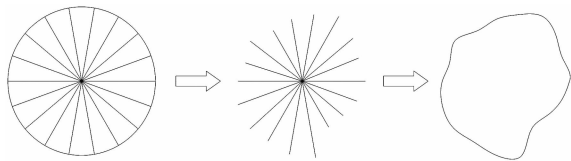


图 4 多边形随机骨料生成过程示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the polygon random aggregate production

1.2 土石混合体边坡数值模型建立

通过对在 AutoCAD 中生成的矩形图形交互文件进行切割,得到对应的块石边坡交互文件,在坡体切割过程中当遇到块石时,对块石也进行切割,以保证坡面的平顺及坡体的含石量.然后,再将块石边坡交互文件导入 Midas. GTS 中进行材料分组和单元划分,得到块石坡体的节点和单元数据文件.最后,再通过 Midas_to_Flac3d 接口程序,将节点、单元数据文件转化为可供 Flac3d 读取的网格文件,用于分析计算.

2 土石混合体边坡稳定性分析

2.1 土石混合体边坡的计算参数

2.1.1 随机块石粒径级配组成

本文边坡计算模型尺寸选取如图 5 所示,边坡块石含量为 40.8%,块石粒径分布在 0.2~0.8 m 区间内的 8 个粒径等级,块石粒径分布如图 6 所示.

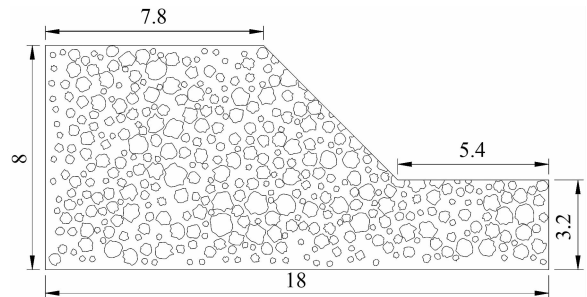


图 5 矢量化土石混合体边坡几何模型(单位:m)
Fig. 5 Vectorized geometry of soil-rock mixed slope(Unit:m)

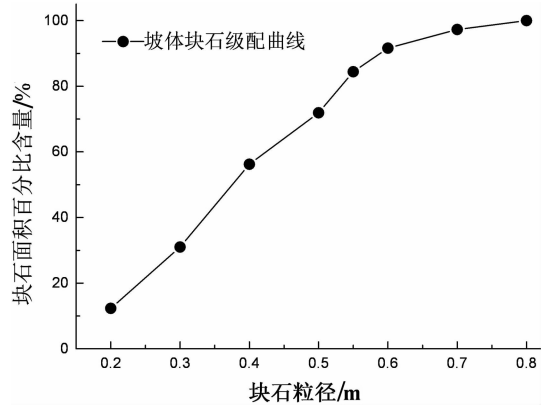


图 6 块石累积面积级配曲线
Fig. 6 Rock size distribution determined by area

2.1.2 土、石数值参数取值

网格划分采用四节点四面体单元,网格划分生成的节点总数为 23 453,单元总数为 69 593.

计算边界条件为:左、右侧面边界采用水平约束;底面边界采用水平、垂直全约束.因为边坡体为土石混合体松散边坡,计算过程中不考虑构造应力作用.构成土石混合体边坡的“土体”和“块石”的物理力学参数见表 1,材料采用 Flac3d 中内嵌的摩尔-库伦模型.

表 1 土石混合体边坡的计算参数^[2]

Tab. 1 Calculation parameters of soil-rock mixed slope^[2]

成分	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	内聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
土体	2.00	50	0.35	8.40	15
块石	2.56	20 000	0.2	268.0	30

2.1.3 土、石界面特性与计算参数

按照工作机理,Flac3d中包含3种类型的接触面,即粘性接触面、滑动性粘结接触面和库伦滑移接触面,按照实际中土石接触情况,本文选取库伦滑移接触面.库伦滑移接触面是一种只有完好和破坏两种状态的粘性接触面.破坏发生时,接触面单元的行为由内摩擦角和粘聚力决定(也包含刚度参数),粘结强度没有设定时其值为0,破坏的粘结单元不能承受有效拉应力^[20].

库伦剪切强度的表达式如下:

$$F_{smax} = cA + \tan\phi(F_n - pA) \quad (1)$$

式中: F_{smax} 为接触面发生相对滑动所需要的切向力; c 为沿接触面的粘聚力; ϕ 为接触面表面内摩擦角; A 为接触面节点代表面积; F_n 为当前时刻法向力矢量; p 为当命令effective=off时为0,否则为孔隙水压力.本文暂没有考虑水的作用,即设置effective=off;为探讨土石混合体界面参数对计算结果的影响,本文采用“控制变量法”,选取13组不同接触面参数,针对“单一参数”逐个进行边坡稳定性分析.界面参数如表2所示.

表2 土石混合体界面强度参数^[20-21]

Tab. 2 Interfacial strength parameters of soil-rock aggregate^[20-21]

编号	法向刚度 /(10 ⁶ kN·m ⁻¹)	切向刚度 /(10 ⁶ kN·m ⁻¹)	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /kPa
1	2.00	2.00	15	10
2	1.00	2.00	15	10
3	0.50	2.00	15	10
4	0.25	2.00	15	10
5	2.00	1.00	15	10
6	2.00	0.50	15	10
7	2.00	0.25	15	10
8	2.00	2.00	10	10
9	2.00	2.00	5	10
10	2.00	2.00	2.5	10
11	2.00	2.00	15	7.5
12	2.00	2.00	15	5
13	2.00	2.00	15	2.5

2.2 有限差分强度折减计算理论

2.2.1 基本原理

强度折减法中边坡稳定的安全系数定义为:使边坡刚好达到临界破坏状态时,对岩、土体的抗剪强度进行折减的程度,即定义安全系数为岩土体的

实际抗剪强度与临界破坏时的折减后剪切强度的比值.强度折减法的要点是利用公式(2)和(3)来调整岩土体的强度指标 c 和 ϕ ,然后对边坡稳定性进行数值分析,通过不断增加折减系数,反复计算,直至其达到临界破坏,此时得到的折减系数即为安全系数.

$$c_F = c/F_{trial} \quad (2)$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}((\tan\phi)/F_{trial}) \quad (3)$$

式中: c_F 为折减后的粘聚力; φ_F 为折减后的摩擦角; F_{trial} 为折减系数.

2.2.2 实现过程

随着数值计算理论的发展,强度折减法在岩土工程实践中的可行性逐渐被得到了证实.目前,存在的困难为无统一的边坡失稳判据,即无统一安全系数数值求解过程的终止条件.现行的边坡失稳判据主要有以下几种^[20]:

- 1)以数值计算的收敛性作为失稳判据;
- 2)以特征部位位移的突变性作为失稳判据;
- 3)以塑性区的贯通性作为失稳判据.

在Flac3d中求解安全系数时,单次安全系数的计算过程主要采用的是第1)种失稳判据.Flac3d主要以力的不平衡比率小于 10^{-3} 作为终止条件.

为了控制整个强度折减法循环计算过程的求解时间,规定在计算过程中,只要满足上述3个标准的中任何一个,便退出当前计算.

2.3 算例计算分析与讨论

为了研究考虑细观结构情况下的土石混合体边坡与简化情况下(视为均质边坡,参数选取土体参数)稳定分析的差异性,本文在研究构成中分别对考虑“块石”存在与否以及进一步的块石间设置接触面与否情况下的边坡进行了算例计算分析.

2.3.1 算例稳定性分析

由于土石混合体边坡内部结构的复杂性,在使用传统的极限平衡理论分析其稳定性时存在较大的困难.本文将利用flac3d内嵌的有限差分强度折减法对土石混合体边坡及其等效均质土坡进行稳定性分析.此外,为进一步验证有限差分强度折减法的计算结果,采用极限平衡法(Bishop法和Janbu法)对均质土坡的稳定性进行了分析,计算结果如图7所示.图8为不同接触面参数下边坡安全系数变化曲线,图9显示了通过有限差分强度折减法获得的等效均质土坡及土石混合边坡潜在滑动面图(图9中对应的接触面参数为编号1对应的参数).

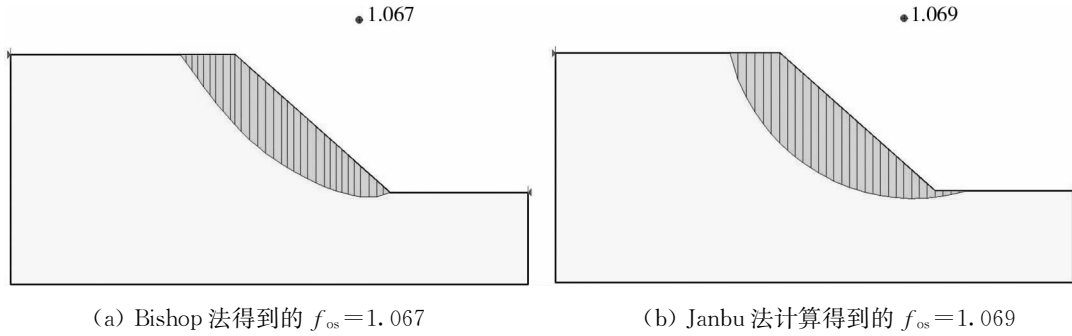


图 7 极限平衡法分析结果

Fig. 7 Results of the analysis by limit equilibrium method

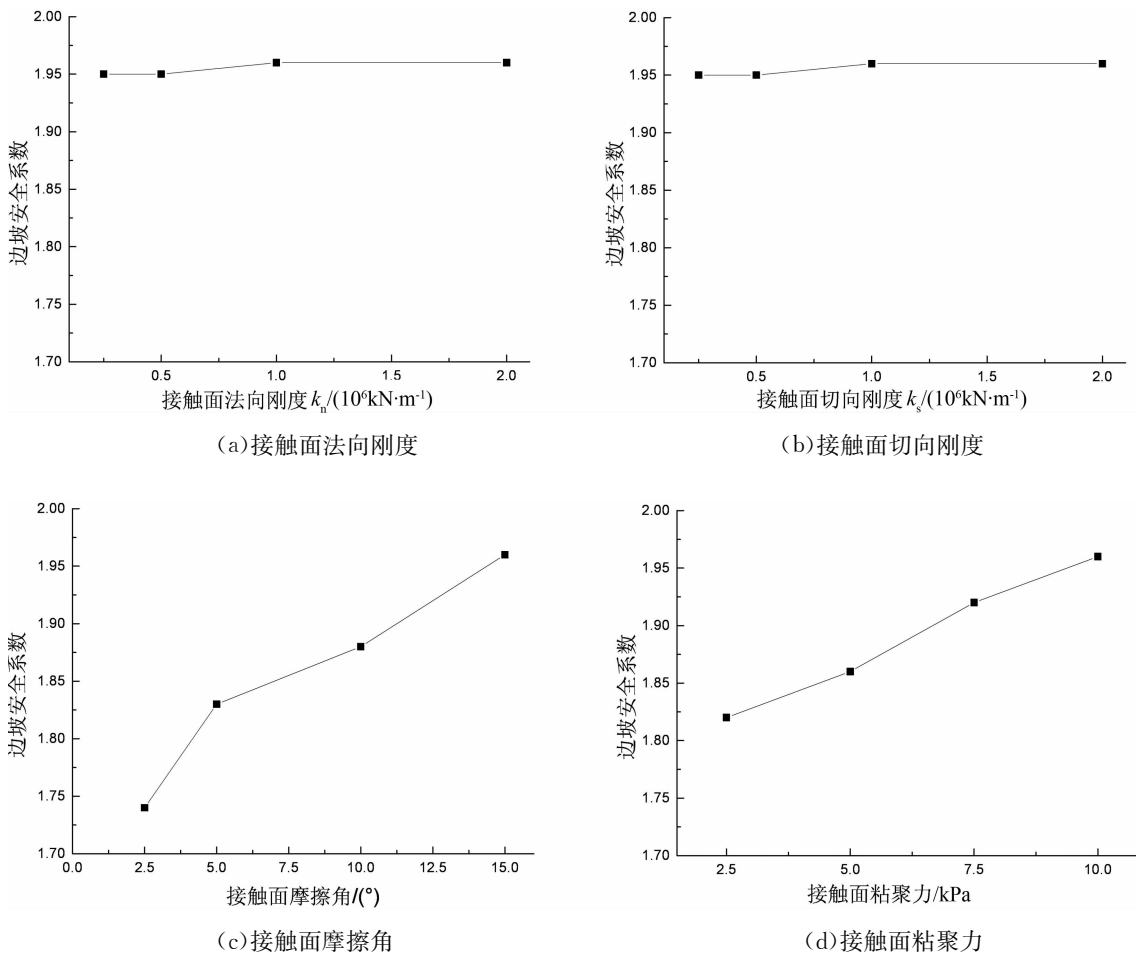


图 8 安全系数随界面参数变化

Fig. 8 Factor of safety's changes with interface parameter

从图 8 可以发现,在选定的参数变化范围内,接触面刚度参数(法向刚度、切向刚度)对边坡安全系数影响较小,即边坡安全系数对接触面刚度参数的变化不敏感.而接触面强度参数(内摩擦角、粘聚力)的变化将引起边坡安全系数的明显改变,且随着接触面强度参数的增大,边坡安全系数增大,即可认为边坡安全系数对接触面强度参数变化较为敏感.

根据上述有限差分强度折减结果可以看出,当土石间接触面完全胶结时,考虑“块石”存在后土石混合体边坡稳定系数($f_{os} = 2.16$,土石间接触面完全胶结)较对应的等效均质土坡的稳定系数($f_{os} = 1.09$, Bishop 法得到的 $f_{os} = 1.067$, Janbu 法计算得到的 $f_{os} = 1.069$)有明显的增大.由于“块石”在坡体内部随机分布,使得边坡塑性区分布较等效均质土坡有明显的改变,滑动面分布较为紊乱,存在明显

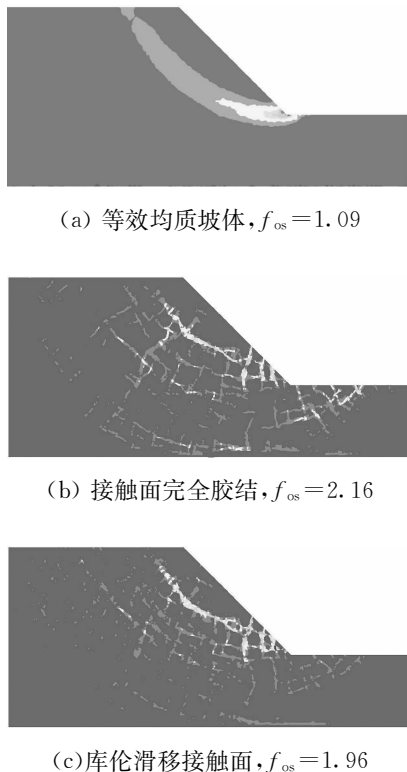


图9 有限差分强度折减分析结果

Fig. 9 Results with strength reduction finite difference

的绕石效应.其塑性区的分布,符合最小抗剪强度原理,且与块石尺寸及其所处的应力水平相关.由于坡脚处有较大粒径块石的存在,使得边坡剪出口的位置后移,这对边坡稳定性较为有利.

土、石为两种性质差别较大的材料,将土石间接触设置为完全胶结无疑将会给边坡稳定性分析带来误差,土石间接触面的设置显得极为必要.在分析当土石间存在库伦滑移接触面时,坡体安全系数($f_{os} = 1.96$)较完全胶结的安全系数($f_{os} = 2.16$)有所减小,塑性区分布范围较完全胶结时有所减小,其滑动面分布较为紊乱,存在明显的绕石效应.

此外,由于块石的存在使得坡体很难像均质土坡一样形成单一的塑性贯通区,而是呈现出多滑动带现象,且塑性区贯通较为困难,绕石效应极为明显.多滑动带的存在,可以有效消耗部分滑动势能,绕石效应又使得滑动剪切带长度增大,分布区域变宽,这种交错分布的不规则剪胀破裂面,在坡体稳定性分析中将提供额外的剪切强度,这对提高边坡稳定性有利.

2.3.2 土石混合体边坡失稳剪切滑动带分析与讨论

经过研究分析,土石混合体主要存在3种塑性

区扩展路径,如图10所示.

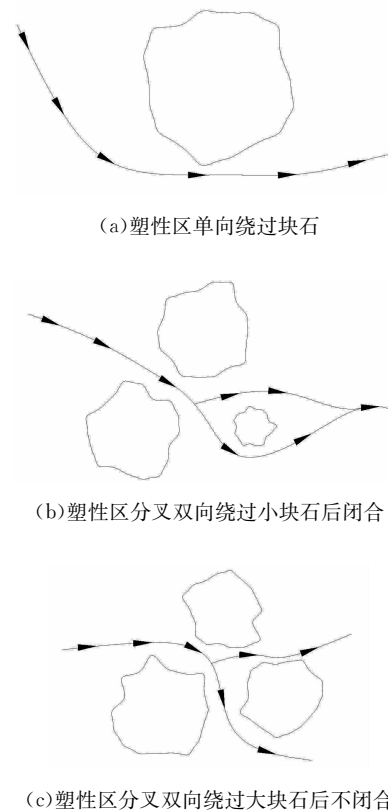


图10 土石混合体主要存在的3种塑性区扩展路径

Fig. 10 Three primarily existing failure propagation routes of soil-rock aggregate

对于图10(a)中塑性区扩展模式,将引起剪切滑动带的偏移;图10(b)中的塑性区扩展模式将引起塑性区范围扩大,剪切滑动带变长;图10(c)中的塑性区扩展模式将引起剪切滑动带分叉,是导致块石坡体多滑动面现象产生的主要因素.

为更直观、细致地分析土石混合边坡塑性区分布特征,现将图9中接触面完全胶结情况下的塑性区云图进行单独分析,如图11所示.

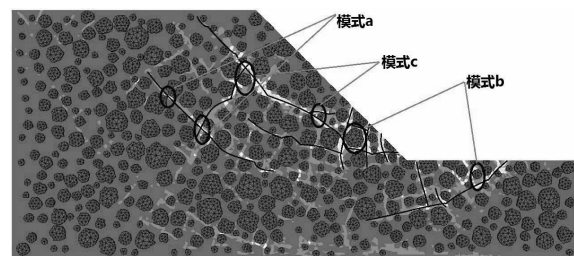


图11 土石混合体边坡塑性区分布云图

Fig. 11 Nephogram of plastic zone of soil-rock mixed slope

通过对其塑性区进行初步划分,找出了坡体内具有代表性的塑性区扩展模式.从图11中可以看

出,在多种塑性区扩展路径的综合作用下,塑性区分布极为紊乱,主要存在3条塑性带(滑面)且其走向大致平行,垂直方向分布有少量的次生塑性带,其长度一般较短.其失稳破坏滑动面形成伴随着块石间软弱带的塑性破坏,当软弱带塑性区域贯通后,其滑动面也最终形成.

3 结论与展望

本文通过 MATLAB 编制相关程序,实现了根据块石级配曲线生成符合一定级配的特定含石量块石数据,再通过 AutoCAD 将数据文件转化为图形交互文件,建立土石边坡数值模型.并通过有限差分强度折减法对其稳定性进行计算分析,得出如下结论:

1)块石的存在使得坡体安全系数有较大提高,传统分析方法将土石混合边坡均质化的处理方式会给计算结果带来极大差异.

2)在选定的参数变化范围内,接触面刚度参数(法向刚度、切向刚度)对边坡安全系数影响较小;而接触面强度参数(内摩擦角、粘聚力)的变化将引起边坡安全系数的明显改变,且随着接触面强度参数的增大,边坡安全系数增大,即可认为边坡安全系数对接触面强度参数变化较为敏感.

3)坡体内塑性区并不像均质土坡那样为规则的类型,而是在多种塑性区扩展路径的综合作用下呈现出多滑动带现象,滑动带在贯通过程中有明显的绕石效应,滑动带长度较等效均质土坡有明显延长.

同时需要指出的是:本文所编制的程序生成的块石为“类圆形”,与现实中块石形状存在一定差异,文中对土、石材料强度参数均采用摩尔-库伦模型参数,具有一定局限性,且仅就边坡在自重状态下的稳定性进行了分析,未考虑边坡在动力荷载及动力与水力多因素耦合下块石边坡的稳定性.同时,本文选用的块石抗剪强度参数与土体抗剪强度参数差异性足够大,边坡破坏的剪切滑动带仅能穿越土体区域;但当选用的块石抗剪强度参数与土体抗剪强度参数差异性不够大时,边坡破坏时剪切滑动的塑性区扩展路径将变得更为复杂,本文所建立的分析模型尚难以分析此类问题.以上不足值得在后续研究中进一步深入探讨.

参考文献

[1] 徐文杰,胡瑞林,岳中崎.土-石混合体随机微观结构生成系

统的研发及其微观结构力学数值试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1652-1665.

XU Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi. Development of random meso-structure generating system of soil-rock mixture and study of its meso-structural mechanics based on numerical test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1652-1665. (In Chinese)

[2] 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 Shuai, JI Shunying. Effects of rock spatial distributions on stability of rock-soil-mixture slope [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 177-183. (In Chinese)

[3] 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 Wenjie, WANG Yujie, CHEN Zuyu, et al. Stability analysis of soil-rock mixed slope based on digital image technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 28(S1): 341-346. (In Chinese)

[4] 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块石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 Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, 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. (In Chinese)

[5] 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,2007,14(6):800-807.

LIAO Qiulin, LI Xiao, HAO Zhao, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates (RSA) [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 14(6): 800-807. (In Chinese)

[6] 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 Wenjie, HU Ruilin, TAN Rujiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of Longpan Tiger-leaping Gorge area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1270-1277. (In Chinese)

[7] 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):2731-2736.

LI Changsheng, ZHANG Dan, WANG Hongxian, et al. 3D mesh generation for soil-rock mixture based on CT scanning [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2731-2736. (In Chinese)

[8] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 375-397.

[9] XU W, YUE Z, HU R. Study on the mesostructure and mesomechanical 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微观特征研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2014,41(11):123—128.
WANG Hainian, ZHANG Chen, FANG Jun, *et al.* Study on low temperature performance and microstructure of rubber hot recycled mixture[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(11): 123—128. (In Chinese)
- [11] DAI Q, SADD M H. Parametric model study of microstructure effects on damage behavior of asphalt samples[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2004, 5(1): 19—30.
- [12] SADD M, DAI Q, PARAMESWARAN V, *et al.* Simulation of asphalt materials using finite element micromechanical model with damage mechanics [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1832(11): 86—95.
- [13] SADD M H, DAI Q, PARAMESWARAN V, *et al.* Microstructural simulation of asphalt materials; modeling and experimental studies[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(2): 107—115.
- [14] 颜可珍,葛冬冬,游凌云.沥青混合料单轴贯入抗剪试验的微观分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(5):113—119.
YAN Kezhen, GE Dongdong, YOU Lingyun. Microscopic analysis of asphalt mixture uniaxial penetration shear test [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(5): 113—119. (In Chinese)
- [15] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. Computers & 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] CHEN J, WANG H, LI L. Determination of effective thermal conductivity of asphalt concrete with random aggregate microstructure [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(12): 04015045.
- [18] 张剑,金南国,金贤玉,等.混凝土多边形骨料分布的数值模拟方法[J].浙江大学学报:工学版,2004,38(5):581—585.
ZHANG Jian, JIN Nanguo, JIN Xianyu, *et al.* Numerical simulation method for polygonal aggregate distribution in concrete [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(5): 581—585. (In Chinese)
- [19] 杜成斌,孙立国.任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用[J].水利学报,2006,37(6):662—667.
DU Chengbin, SUN Ligu. Numerical simulation of concrete aggregates with arbitrary shapes and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 662—667. (In Chinese)
- [20] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC3D基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009:181—184.
CHEN Yuming, XU Dingping. FLAC/FLAC3D basis and engineering examples [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 181—184. (In Chinese)
- [21] 刘蓓.红粘土与混凝土结构接触面力学特性的试验研究[D].长沙:中南大学土木工程学院,2013:38—49.
LIU Bei. The text study on mechanical properties of interface between red clay and concrete structure [D]. Changsha: School of Civil Engineering, Central South University, 2013: 38—49. (In Chinese)