

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.096



# 基于 Python 语言和 Abaqus 平台的边坡可靠度计算 自动化算法开发

任斌斌<sup>1,3</sup>, 苏立君<sup>1,2,3</sup>, 张崇磊<sup>1,2</sup>, 谢奇峻<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室; 中国科学院、水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;  
2. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学 人工智能学院, 北京 100049)

**摘要:**可靠度方法因其更符合边坡岩土体的非均匀性及失稳破坏的不确定性特征, 受到科研及工程设计人员的重视。然而, 目前没有成熟且能够用于可靠度分析的随机有限元软件, 而跨平台的随机场生成和稳定性分析增加了可靠度分析的难度, 从而限制了其推广应用。基于 Python 语言和 Abaqus 平台, 开发了一套能自动计算边坡可靠度的随机有限元算法。在给定边坡几何参数及土体抗剪强度参数的均值、相关距离和变异系数前提下, 利用该算法可自动实现非平稳随机场的离散及边坡失效概率的计算; 该程序有效地解决了多种软件交互使用的稳定对接和子程序编写等难题; 与经典的边坡算例进行对比, 计算结果验证了该方法的可靠性。

**关键词:**非平稳随机场; 自动化程序; 边坡可靠度; 失效概率

中图分类号: TU431 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)05-0067-06

## A slope reliability automated algorithm based on python language and abaqus platform

Ren Binbin<sup>1,3</sup>, Su Lijun<sup>1,2,3</sup>, Zhang Chonglei<sup>1,2</sup>, Xie Qijun<sup>1,2</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes; Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, P. R. China; 2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, P. R. China; 3. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

**Abstract:** Based on Python and Abaqus platform, a stochastic finite element algorithm program was developed. The program can automatically discretize the non-stationary random field and calculate the failure probability when the geometric parameters of the slope and the mean, correlation distance and variation coefficient of the soil shear strength parameters are provided. The algorithm is used to calculate the benchmark slope examples, and the results verify the reliability of the proposed method. Moreover, the program can also effectively solve the complex problems of multiple software interaction and subroutine compilation. The program is then redeveloped on Abaqus platform, which is a widely applicable finite element software. It was beneficial to the popularization of the program in practical engineering applications.

**Keywords:** non-stationary random field; automated algorithm; slope reliability; failure probability

收稿日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(41790432, 41761144077)

作者简介: 任斌斌(1993-), 女, 主要从事边坡可靠度研究, E-mail: renbinbin16@mails.ucas.edu.cn。

苏立君(通信作者), 男, 研究员, 博士, E-mail: sulijun1976@163.com。

Received: 2019-01-14

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41790432, 41761144077)

Author brief: Ren Binbin(1993-), main research interest: slope reliability, E-mail: renbinbin16@mails.ucas.edu.cn.

Su Lijun (corresponding author), professor, PhD, E-mail: sulijun1976@163.com.

可靠度分析法采用可靠度指标(失效概率)代替安全系数进行边坡稳定性分析<sup>[1-4]</sup>,是一种非确定性方法,更加符合边坡岩土体的非均匀性及失稳破坏不确定性。但由于可靠度分析法的计算相对复杂,目前在岩土工程分析和设计中的应用尚处于研究和探索阶段。

目前的可靠度方法研究和应用中,蒙特卡洛模拟<sup>[5-6]</sup>应用较为广泛。已有学者基于随机场理论,使用蒙特卡洛模拟进行边坡稳定性研究。宋永东<sup>[7]</sup>运用 Matlab 离散随机场,利用 Excel 作为衔接手段,将离散后的土体强度参数导入有限差分软件 Flac3D,计算边坡的稳定性;胡金政等<sup>[8]</sup>用 Flac3D 建模,利用 Fish 语言将离散场与网格单元一一对应,反复  $N$  次,进行边坡稳定性计算,最后使用 Matlab 读取计算结果;曹少刚<sup>[9]</sup>使用 Matlab 编写程序,得到能够表现土体参数空间变异性的一系列随机变量,然后使用 Flac3D 计算边坡的安全系数;蒋水华<sup>[10]</sup>利用有限元软件 Abaqus 和 GeoStudio 编写接口程序,计算边坡的可靠度指标;Griffiths 等<sup>[11]</sup>使用 Fortran 语言编写耦合随机场理论与边坡可靠度分析软件;王新<sup>[12]</sup>使用 Matlab 获取离散随机场,然后与 Abaqus 模型相结合进行边坡的可靠度计算;袁葳等<sup>[13]</sup>以随机场理论为基础,使用 Abaqus 提供的用户子程序接口编写随机有限元程序,使用 Python 脚本进行后期处理。

上述研究在“随机有限元程序”应用方面取得了一定的进展,但仍然存在不足。首先,使用 Flac3D 与 Matlab 计算时,对不同的土体参数进行敏感性或影响程度分析时,需要在两者之间进行数以万次反复转换,计算量较大且耗时较长;其次,调用 Abaqus 内核进行批处理时,并没有涉及地应力迭代过程,这将导致计算结果存在一定的误差;最后,使用 GeoStudio、Abaqus 与 Matlab 相结合时,有限元软件与编写程序所使用的语言不一致,会降低原程序的计算效率。

本文利用 Abaqus 脚本建模使用的 Python 语言编写程序,将有限元建模、随机场赋值和强度折减计算有机结合起来,进行批量自动化运算,实现高效精确的边坡可靠度分析。

## 1 土体参数的非平稳随机场

Phoon 等<sup>[14]</sup>指出,土体的强度是各向异性的,可以从两个方向对土体的强度进行分析。对正常固结土来说,在垂直方向上,从地表开始,土体的强度随深度加深逐渐增加;在水平方向上,土体的强度是与深度无关的随机波动量。由于非平稳随机场能够合理地模拟土体强度参数随埋深逐渐增加的特征,因此,许多学者进行了相关研究。Li 等<sup>[15]</sup>通过式(1)研究了土体黏聚力随有效应力及固结比的变化关系。

$$s_u/\sigma_v' = (0.23 \pm 0.04)OCR^{0.8} \quad (1)$$

式中: $s_u$ 、 $\sigma_v'$ 和 OCR 分别表示土体的黏聚力、有效应力及固结比。Jiang 等<sup>[16]</sup>考虑土体抗剪强度参数的随机波动量服从对数正态分布,将其随深度的变化关系表示为式(2)。

$$s_u(x, z) = s_{u0} + t\sigma' \exp[\omega(x, z)] \quad (2)$$

式中: $s_u(x, z)$ 为某位置处的土体黏聚力; $t$ 为比例因子; $\omega(x, z)$ 服从正态分布。Griffiths 等<sup>[11,17]</sup>、Der Kiureghian 等<sup>[18]</sup>等利用式(3)建立非平稳随机场,研究边坡的失效概率。

$$c_z = c_0(\mu_{c_{u0}} + \rho z)/\mu_{c_{u0}} \quad (3)$$

式中: $c_z$ 为某深度处的土体黏聚力; $c_0$ 为由非平稳随机场得到的土体黏聚力值; $\mu_{c_{u0}}$ 为地表处黏聚力均值; $\rho$ 为比例因子; $z$ 为特定的土体深度。

相对于式(1)和式(2),式(3)的认可度较高,因此,使用式(3)将平稳随机场转化为非平稳随机场,研究土体参数的空间变异性对边坡可靠度影响。

## 2 自动化计算流程

### 2.1 前期处理

非平稳随机场的形成通过以下 4 步来实现,如图 1 所示。

1)Abaqus 平台模型网格划分。首先,给定边坡,在 Abaqus 平台下划分网格,得到各个单元所对应的初始节点及节点坐标,并将其导出。

2)Python 读取数据并对单元排序。将步骤 1)导出的单元重新排序,保持节点序号不变,目的是使离散后的随机场变量能够批量赋值给对应的边坡单元。

3) 平稳随机场。主要包括随机场的离散和有限元的结合,利用中心点法离散随机场,得到一系列随机变量,然后按照边坡的实际空间位置,将随机变量映射到步骤 2) 得到的有限元单元中。

4) 非平稳随机场。非平稳随机场与土体参数实际分布比较接近,将步骤 3) 得到的平稳随机场转化为非平稳随机场。

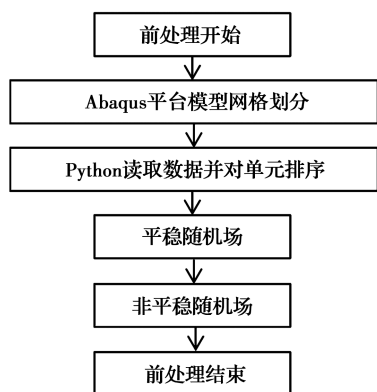


图 1 自动化程序的前处理部分

Fig. 1 The preprocessing part of the automation program

## 2.2 求解过程

求解过程包括 7 步,如图 2 所示。

1) Python 形成初始 Inp 文件。将边坡的几何参数、材料信息及随机场数据写入 Inp 文件,该文件称为初始 Inp 文件。

2) Inp 文件进行初次运算。该步骤的主要目的是平衡地应力。在初始 Inp 文件中,有施加土体重力的分析步骤。边坡在初始状态下,由于自重作用,存在与重力相平衡的应力状态,因此,在进行数值模拟时,需要在边坡开始运算之前建立相应的应力场。

3) 提取初始应力生成 Rpt 文件。经过步骤 2) 的初始运算,得到一系列包含各个单元应力的 Job 文件,然后使用 Python 编写的脚本文件,提取各个单元的内力,并生成包含各个应力提取代码的 Rpt 文件。

4) 地应力平衡的 Csv 文件。在 Abaqus 平台上运行步骤 3) 得到 Rpt 文件,得到与每种情况相对应的 Csv 文件,以便平衡地应力。

5) 地应力平衡。模型的地应力平衡结果符合要求后,程序自动调用提前编写的命令读取 Csv 文件。

6) 得到最终的 Inp 文件。在初始 Inp 文件中加入强度折减法的分析步,得到最终的 Inp 文件。

7) Abaqus 强度折减法运算。调用 Abaqus 求解器得到最终包含边坡变形、应力和场变量等信息的 Job 文件。

8) 计算边坡的失效概率。根据  $P_f = N_{fs < 1} / N$  ( $P_f$  表示边坡的失效概率;  $N_{fs < 1}$  表示安全系数小于 1 的数量;  $N$  表示总的计算次数) 输出边坡的失效概率。

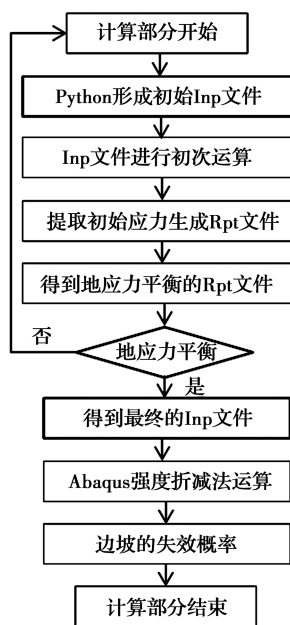


图 2 自动化程序的求解过程

Fig. 2 The solving part of the automation program

## 3 算例验证

为验证编写的自动化算法程序的精度,采用经典边坡算例。边坡尺寸如图 3 所示,坡高比为 1:2。黏聚力均值为 15 kPa,标准差为 4 kPa,水平相关距离为 38 m,竖向相关距离为 3.8 m。在随机场理论中,相关距离是指土体中任意两点性质不相关的最小距离,是土体的天然特性。土体天然密度  $\rho$  为 2 000 kg/m<sup>3</sup>,变形模量为 10 MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ <sup>[17]</sup>。为简化计算,只考虑黏聚力生成的随机场,内摩擦角为 0°。

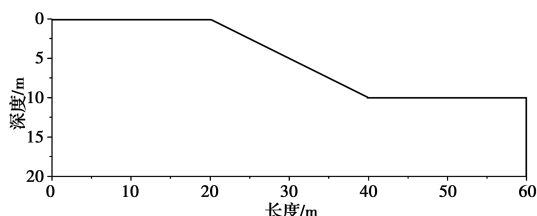


图 3 典型边坡几何尺寸

Fig. 3 Size of slope

边坡采用平面应变单元 CPE4,共划分 910 个单元,971 个单元节点,土体失效模式采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。边界条件为约束边界的侧向位移及底部的水平及竖向位移。Der Kiureghian 等<sup>[18]</sup>和 Huang 等<sup>[19]</sup>指出单元尺寸与相关距离之比应小于 0.25。单元水平长度为 2 m,高度为 0.5 m,其中,单元水平长度/水平相关距离=2/38=0.05<0.25,单元高度/竖向相关距离=0.5/3.8=0.13<0.25,单元尺寸符合要求。

地应力平衡是岩土工程数值模拟过程中的重要内容,根据一般岩土工程对地应力平衡的要求,土体变形小于  $10^{-4}$  m 即可满足工程实际要求<sup>[20]</sup>,非均匀随机场下自动化程序计算的边坡地应力平衡结果如图 4(a)所示,土体变形最大值所在的量级为  $10^{-5}$  m,满足要求。在非均匀随机场下边坡的失效变形模式如图 4(b)所示,为圆弧形面,符合规律。



Fig. 4 Slope deformation map

图 5 为黏聚力在非平稳随机场下的变化规律及均值线性趋势图。由于图 5 可知,本程序计算的结果与 Jiang 等<sup>[17]</sup>的非平稳随机场下土体的黏聚力值均在其均值线性趋势线的右边。这是因为将平稳随机场转化为非平稳随机场,并没有将土体强度参数随深度增加的趋势分量与波动分量分开,波动分量并不明显。而假定的土体强度参数分布为对数正态分布,由对数正态函数的频率分布图可知,均值右侧的随机变量远多于左侧数据,因此,由随机场得到的

随机变量大多浮动在线性趋势的右侧。

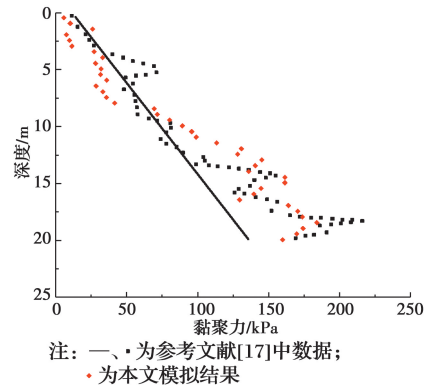


图 5 黏聚力随深度的变化关系

Fig. 5 The relationship between cohesion and depth

根据自动化程序得到 10 000 组安全系数的散点图,如图 6 所示,安全系数大多分布在 1~3 之间。经统计得出,安全系数的均值为 1.967,标准差为 0.479,最小值为 0.716,最大值为 3.86。根据安全系数的分布直方图以及拟合的正态分布,可知安全系数服从正态分布。

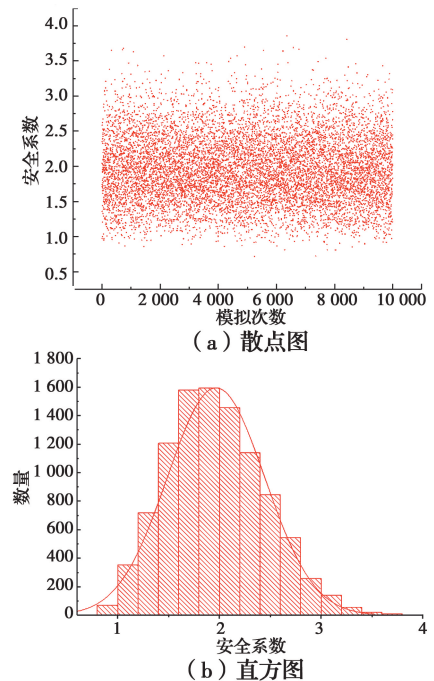


图 6 安全系数分布图

Fig. 6 Factor of Safety Distribution

图 7 为不同模拟次数下对应的边坡失效概率,可知,当模拟次数在 1 000~10 000 之间时,由自动化程序得到的该边坡失效概率曲线趋于稳定,此时,所对应的边坡的失效概率为 7.2%。Jiang 等<sup>[17]</sup>采用同样土体参数计算得到边坡失效概率为 5.28%,

误差来源主要为失效概率计算方法的偏差, Jiang 等<sup>[17]</sup>采用子集模拟法计算边坡的失效概率,而本文使用蒙特卡洛模拟法。子集模拟是一种求解失效概率的近似方法,所得到的结果是近似结果,而蒙特卡洛模拟是检验其他方法的依据,并且两者结果仅相差 1.92%,可以认为本文的计算结果准确。

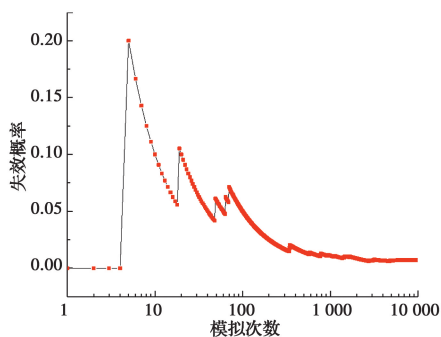


图7 边坡的失效概率趋势图

Fig. 7 Trend Chart of Slope Failure Probability

## 4 结论

基于 Abaqus 开放接口,使用 Python 语言进行二次开发,编写随机有限元脚本文件,用以计算边坡的可靠度。当边坡的几何形状确定后,只需运行几个特定的脚本文件,便可利用该程序求解基于随机场理论的边坡可靠度,使用方便。主要结论如下:

1) 该程序能够使用随机场理论自动计算边坡的失效概率。

2) 当土体黏聚力服从对数正态分布时,边坡的安全系数分布比较集中,服从正态分布。使用随机场理论计算边坡的稳定性时,边坡失效时的滑动面为圆弧面,符合规律。

3) 计算边坡的失效概率时,蒙特卡洛模拟次数较大时,计算得到的失效概率逐渐趋于稳定,在计算未知边坡的失效概率时,不必过多设置模拟次数,以免耗时过长,可以近似认为边坡失效概率曲线稳定时,对应的失效概率为边坡的实际失效概率。

### 参考文献:

[1] HUANG J, GRIFFITHS D V. Determining an appropriate finite element size for modelling the strength of undrained random soils [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 69: 506-513.

[2] LOW B K. Reliability analysis of rock slopes involving

correlated nonnormals [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(6): 922-935.

- [3] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(5): 507-518.
- [4] LI D Q, CHEN Y F, LU W B, et al. Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables [J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(1): 58-68.
- [5] LOW B K, LACASSE S, NADIM F. Slope reliability analysis accounting for spatial variation [J]. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2007, 1(4): 177-189.
- [6] CHO S E. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(7): 975-984.
- [7] 宋永东. 考虑岩土体强度参数空间变异性的边坡可靠度研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- SONG Y D. Study on slope reliability considering spatial variability of rock and soil strength parameters [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [8] 胡金政, 张洁, 陈宏智, 等. 基于随机场理论的强降雨条件下花岗岩残积土边坡的稳定性分析[J]. *南方能源建设*, 2017, 4(3): 107-114.
- HU J Z, ZHANG J, CHEN H Z, et al. Stability of completely decomposed granite slopes under intense rainfall infiltration based on the random field theory [J]. *Southern Energy Construction*, 2017, 4(3): 107-114. (in Chinese)
- [9] 曹少刚. 土体参数空间分布对边坡稳定性影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- CAO S G. Study on the influence of spatial distribution of soil on slope stability [D]. Xi'an: Xi'an University of Technolog, 2017. (in Chinese)
- [10] 蒋水华. 水电工程边坡可靠度非侵入式随机分析方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- JIANG S H. A non-intrusive stochastic method for slope reliability in hydroelectricity engineering [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)
- [11] GRIFFITHS D V, HUANG J, FENTON G.

- Probabilistic slope stability analysis using RFEM with non-stationary random fields[C]//Geotechnical Safety & Risk V, 2015:704-709.
- [12] 王新. 基于二维随机场理论的非均质边坡稳定分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.  
WANG X. Stability analysis of heterogeneous slope based on two-dimensional random field theory [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 袁葳, 常晓林, 段寅, 等. 考虑抗剪强度参数空间变异性的边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3899-3908.  
YUAN W, CHANG X L, DUAN Y, et al. Stability analysis of slope considering spatial variation of shear strength parameters [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(11): 3899-3908. (in Chinese)
- [14] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612-624.
- [15] LI D Q, QI X H, PHOON K K, et al. Effect of spatially variable shear strength parameters with linearly increasing mean trend on reliability of infinite slopes [J]. Structural Safety, 2014, 49: 45-55.
- [16] JIANG S H, HUANG J S. Modeling of non-stationary random field of undrained shear strength of soil for slope reliability analysis [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(1): 185-198.
- [17] GRIFFITHS D V, ZHU D S, HUANG J S, et al. 6th Asian-Pacific[C]//Symposium on Structural Reliability and its Applications, May 28-30, 2016, Shanghai, China.
- [18] DER KIUREGHIAN A, KE J B. The stochastic finite element method in structural reliability [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1988, 3(2): 83-91.
- [19] HUANG J, GRIFFITHS D V. Determining an appropriate finite element size for modelling the strength of undrained random soils [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69:506-513.
- [20] 代汝林, 李忠芳, 王姣. 基于 ABAQUS 的初始地应力平衡方法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2012, 29(9): 76-81.  
DAI R L, LI Z F, WANG J. Research on initial geostress balance method based on ABAQUS [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012, 29(9): 76-81. (in Chinese)

(编辑 邓云)