

考虑土性参数空间变异性的边坡可靠性分析

丁旺¹ 赵东峰²

1.长沙理工大学土木与环境工程学院 湖南 长沙 410114

2.中交第三公路工程局有限公司 北京 101300

【摘要】：在传统边坡可靠性分析中，通常将土性参数视为均质材料，而忽略了其参数的空间变异性，从而导致失效概率的估计产生偏差。为此，首先引入随机场理论，基于 Karhunen-Loève 级数展开法生成土性参数随机场。其次，在 FLAC3D 中编写基于二分法的强度折减计算程序，导入随机场模型，实现边坡安全系数自动计算。最后通过蒙特卡洛法计算边坡失效概率，并以某不排水饱和黏土边坡为例，开展考虑土性参数空间变异性的边坡可靠性分析。结果表明：边坡可靠性分析计算结果与算例吻合良好，验证了所编程序的正确性。忽略土体参数的空间变异性，会导致无法反映土体局部软弱区的控制作用，影响边坡安全状态的评估。边坡安全系数累积概率分布曲线呈单调递增的“S”形，随机场下的边坡安全系数符合对数正态分布的特征。

【关键词】：边坡；随机场；空间变异性；蒙特卡洛法；可靠度分析

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.071

引言

近年来，我国滑坡等地质灾害频繁发生，造成了巨大的经济损失。边坡可靠性分析一直是岩土工程领域的研究热点，其分析结果的合理性对实际工程的安全具有重要影响。

在有关边坡可靠性分析的方面，一些学者取得了很多有益的成果，如舒苏荀等^[1]针对传统区间模型包络范围过大且边界规则的问题，基于传统区间与 PCA 区间模型构建多边凸集模型，计算了边坡的非概率可靠度。徐善进等^[2]基于临界滑动场与概率密度权重，考虑任意滑动面及参数不确定性，建立任意滑动面安全系数与土体参数的显式关系，开展了边坡可靠性分析。郝建斌等^[3]改进人工蜂群算法，结合支持向量机构建边坡安全系数预测模型，进行了边坡可靠性分析，显著提升了计算效率。这些研究在一定程度上考虑了土体参数的不确定性，然而在实际工程中，土体在长期的地质变化过程中，其强度参数通常具有空间变异的特性，许多研究显示土体的参数空间变异性对边坡可靠性分析有着不可忽视的影响^[4]。

鉴于此，首先通过拉丁超立方采样法抽取输入样本点，基于 KL 级数展开法离散土体参数随机场。在 FLAC3D 中导入参数随机场，计算边坡安全系数，进而得到边坡失效概率。最后，结合某边坡算例分析土性参数空间变异性对边坡可靠性的影响。以期在实际边坡工程的可靠性分析计算提供一定参考。

1 土体空间变异性模拟

基于随机场理论模拟土体的空间变异性，采用指数型自相

关函数作为理论自相关函数^[5]，其表达式为：

$$\rho(\tau_h, \tau_v) = \exp\left(-\frac{\tau_h}{l_h} - \frac{\tau_v}{l_v}\right) \quad (1)$$

式中： τ_h ， τ_v 是两点在水平和竖直方向的距离； l_h 和 l_v 是水平和竖直自相关距离。

采用 KL 级数展开法进行土体参数随机场的离散，表达式为：

$$\hat{H}(x, y) = \mu + \sigma \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} \varphi_i(x, y) \xi_i \quad (2)$$

式中： x 和 y 为点的横坐标和纵坐标； μ 和 σ 是参数均值与标准差； M 为展开项数； λ_i 和 $\varphi_i(x)$ 是第 i 个特征值与特征函数； ξ_i 是第 i 个独立标准正态随机变量。

采用对数随机场^[6]模拟空间变异性，表达式如下：

$$H^{LN}(x) = \exp(\mu_{\ln x} + \sigma_{\ln x} \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} f_i(x) \xi_i) \quad (3)$$

式中： $\sigma_{\ln x}$ 和 $\mu_{\ln x}$ 为对数化均值与标准差，其表达式为：

$$\sigma_{\ln x} = \sqrt{\ln(1 + (\sigma/\mu)^2)} \quad (4)$$

$$\mu_{\ln x} = \ln \mu - \sigma_{\ln x}^2 / 2 \quad (5)$$

式中： μ 和 σ 是土体参数随机场的均值与标准差。

采用期望能比率因子 ε 衡量随机场离散精度^[7]，表达式如下：

【作者简介】姓名：丁旺；民族：汉族；性别：男；出生年月：2002.08；籍贯：湖南益阳；学历：硕士；研究方向：岩土工程。

姓名：赵东峰；民族：汉；性别：男；出生年月：1981.01；籍贯：河北；学历：大学本科；职称：高级工程师；研究方向：路桥。

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i}{\sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i}{L_h L_v} \quad (6)$$

式中： L_h 和 L_v 分别为随机场空间的水平和竖直长度。

2 失效概率计算

采用蒙特卡洛法进行边坡失效概率的计算,采用安全系数为1作为临界判别标准,当Fs大于1时,边坡处于稳定状态,反之边坡则视为不稳定,故其功能函数表达式为:

$$g(x) = Fs(x) - 1 \quad (7)$$

式中: g 为功能函数值, Fs 为边坡安全系数。

边坡失效概率为:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_g(x_i) \quad (8)$$

式中: N 为样本量; $I_g(x_i)$ 为指示函数; 当 g 小于 0 时, $I_g(x_i) = 1$, 反之, $I_g(x_i) = 0$ 。

失效概率变异系数的计算表达式为:

$$\delta_{P_f} = \sqrt{\frac{(1-P_f)}{NP_f}} \quad (9)$$

3 边坡可靠性分析

以文献^[8]中的单层不排水饱和黏土边坡为例,如图1所示,边坡坡度为26.6°,坡高为5 m。考虑土体不排水抗剪强度的空间变异性,均值为23 kPa,变异系数为0.3,水平自相关距离为20 m,竖直自相关距离为2 m,采用指数型自相关函数,土体其他参数取值如表1所示,重力加速度 g 取为10 m/s²。

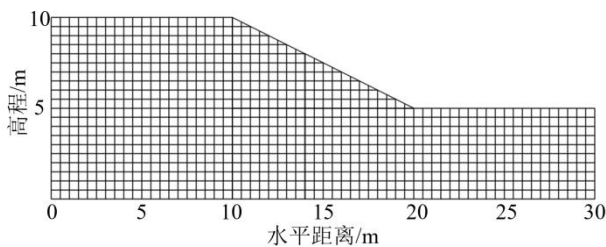


图1 计算模型剖面图

表1 土体材料参数

土体	均值	变异系数
不排水抗剪强度/kPa	23	0.3
弹性模量/MPa	100	-
泊松比	0.3	-
重度/(kN/m ³)	20	-

首先不考虑土体的参数空间变异性,进行确定性分析,计算得到的边坡安全系数为1.3359,与文献中的结果1.336接近,

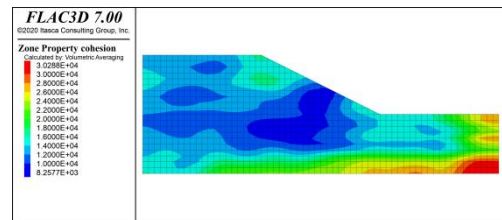
验证了计算模型的正确。

通过2000次拉丁超立方抽样进行边坡安全系数计算,表2为文献与本文边坡可靠度分析结果对比,本文计算得到边坡的失效概率为0.107,与文献中两种方法进行对比,相对误差仅仅为2.88%和0%,安全系数的均值和标准误差也较小,验证了本文考虑土性参数空间变异性的边坡可靠性分析方法的正确性。

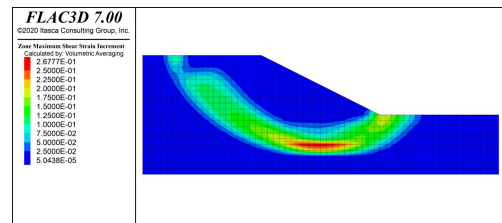
表2 计算结果对比

方法	样本	均值	标准差	Pf	β
本文 LHS	2000	1.244	0.2076	0.107	1.240
文献 LHS	2000	1.24	0.205	0.104	1.259
文献 CNN-LHS	100	1.236	0.203	0.107	1.243

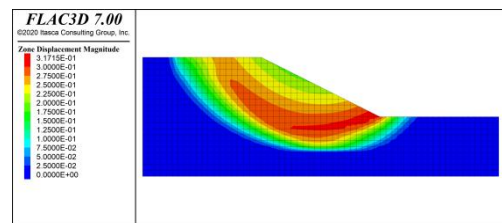
图2为安全系数0.6953对应的不排水抗剪强度随机场、位移和最大剪切应变增量云图。其中图2(a)反映了土体抗剪强度参数的空间变异性,不同区域的值大小不一。从图2(b)中可以看出,最大剪切应变集中形成的带状区域即为剪切带,其贯通程度与边坡失稳直接相关。图2(c)中位移最大区域呈弧形条带状分布,从坡顶延伸至坡脚。



(a)抗剪强度随机场



(b)最大剪切应变增量云图

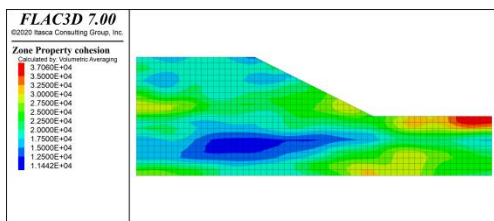


(c)位移云图

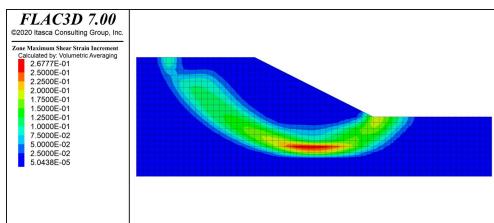
图2 安全系数0.6953

图3为安全系数1.039对应的不排水抗剪强度随机场、位

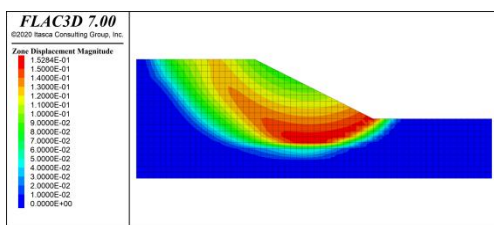
移和最大剪切应变增量云图。对比图2,参数随机场的空间分布不同,边坡的位移及应变响应也随之差异显著,滑动面沿最不利的薄弱区发育,剪出口位置和剪切带宽度改变。忽略土体参数的空间变异性,无法反映局部软弱区的控制作用,可能导致对边坡安全状态的错误判断。



(a)抗剪强度随机场



(b)最大剪切应变增量云图



(c)位移云图

图3 安全系数 1.039

对 2000 个边坡安全系数进行概率统计分析,绘制其频数直方图,对数正态分布拟合曲线和累积概率分布曲线,如图 4

所示。安全系数的频数直方图呈单峰右偏分布,两侧频数逐渐递减。对数正态拟合曲线与直方图的轮廓十分吻合,安全系数的累积概率分布曲线呈单调递增的“S”形,表明随机场下边坡安全系数的概率分布可以用对数正态分布较好地拟合。

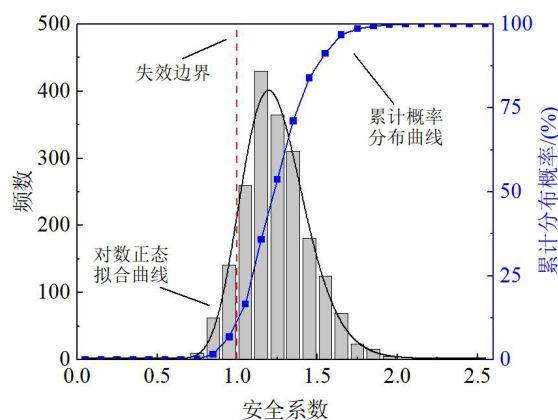


图4 安全系数计算结果统计图

4 结论

本文引入随机场理论,基于 FLAC3D 和蒙特卡洛法,对二维不排水饱和黏土边坡进行可靠性分析,得出以下结论:

(1) 使用 FISH 语言编写了基于二分法的强度折减程序,将计算结果与算例进行比对,两者相对误差极小,验证了程序实现的正确性。

(2) 不排水抗剪强度的空间变异性会显著影响边坡的位移与应变,若忽视这一特征,则无法捕捉局部软弱区对边坡可靠性的影响,从而可能对边坡的安全状态做出错误评估。

(3) 随机场下边坡安全系数的频数分布与对数正态拟合曲线高度吻合;累积概率分布曲线呈“S”形,其概率分布特性可用对数正态分布较好地描述。

参考文献:

- [1] 舒苏荀,杨志权,龚文惠,等.基于多边形模型的边坡非概率可靠性分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2025,47(6):13-20.
- [2] 徐善进,卢坤林,梅一帆,等.基于构造滑动面正应力分布边坡可靠性分析方法研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025,48(3):418-425+432.
- [3] 郝建斌,魏兴梅,王芬.基于 MABC-SVR 的边坡可靠性分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(2):161-167.
- [4] Cho E S.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.
- [5] 蒋水华,李典庆,周创兵,等.考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J].岩土工程学报,2014,36(3):508-518.
- [6] 邓志平,钟敏,潘敏,等.考虑参数空间变异性及基于高效代理模型的边坡可靠度分析[J].岩土工程学报,2024,46(2):273-281.
- [7] 刘亚栋,刘贤,黎学优,等.基于强度折减采样与高斯过程回归的空间变异土坡自适应可靠度分析[J].岩土工程学报,2024,46(05):978-987.
- [8] 姬建,姜振,殷鑫,等.边坡随机场数字图像特征 CNN 深度学习及可靠度分析[J].岩土工程学报,2022,44(8):1463-1473.