

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.03.018

基于构造滑动面正应力分布边坡可靠性分析方法研究

徐善进, 卢坤林, 梅一帆, 贾森林

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 现有确定性分析进行的边坡可靠性分析较少考虑任意形状滑动面及土体参数不确定性对其形状和分布影响。文章提出了基于构造滑动面正应力分布概率密度权重边坡稳定可靠性分析方法, 通过临界滑动场法识别边坡任意滑动面, 并基于构造滑动面正应力分布严格极限平衡法建立安全系数与土体参数间的非线性显式表达式, 结合概率密度权重法进行边坡稳定可靠性评估, 3个典型边坡算例验证了所提方法的合理性。结果表明: 该方法计算的失效概率比现有考虑代表性圆弧滑动面方法所得失效概率均高10%以上; 不考虑任意形状滑动面及土体参数不确定性对其形状和分布影响将会高估边坡稳定可靠性; 同时, 获得的边坡不确定性分析显式极限状态函数具有计算成本低、效率高的优势。该研究成果为任意滑动面的边坡稳定可靠性的严格显式解答提供了新思路。

关键词: 边坡工程; 可靠性; 稳定性; 滑动面正应力; 概率密度权重法; 滑动面

中图分类号: TU432.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)03-0418-09

Study on reliability analysis of slope stability based on constructing normal stress distribution over sliding surface

XU Shanjin, LU Kunlin, MEI Yifan, JIA Senlin

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The reliability analysis of slope stability based on the existing deterministic analysis rarely considers the arbitrary sliding surface and the influence of the uncertainty of soil parameters on its shape and distribution. The reliability analysis method of slope stability based on constructing normal stress distribution over the sliding surface with weighted uniform simulation is proposed. In this method, the critical slip field(CSF) method is used to identify arbitrary sliding surface. For each most dangerous sliding surface, the strict limit equilibrium method for constructing normal stress distribution over the sliding surface is used to establish the nonlinear explicit expression between the safety factor and the soil parameters, and the weighted uniform simulation is combined to achieve the reliability assessment of slope stability. The rationality of the proposed method is verified by three typical slope examples. The results show that the failure probability calculated by this method is more than 10% higher than that calculated by the existing method considering the representative circular sliding surface. If the arbitrary sliding surface and the influence of the uncertainty of soil parameters on its shape and distribution is not considered, the reliability of slope stability will be overestimated. At the same time, the explicit limit state function of slope uncertainty analysis obtained by this method has the advantages of low calculation cost and high efficiency. The research results provide a method for strict explicit solution of the reliability of slope stability with arbitrary sliding surface.

Key words: slope engineering; reliability; stability; normal stress over sliding surface; weighted uniform simulation; sliding surface

收稿日期: 2023-03-31; **修回日期:** 2023-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079121); 安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME149)

作者简介: 徐善进(1992—), 男, 安徽安庆人, 合肥工业大学硕士生;

卢坤林(1980—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: lukunlin@hfut.edu.cn.

由于边坡岩土体介质参数的不确定性,基于确定性理论的边坡安全系数不能完全反映边坡真实的稳定性程度与滑动风险,基于概率与随机理论的边坡可靠性分析日益得到重视。相较于确定性分析方法,依据边坡稳定可靠性分析方法获得边坡可靠性量化指标失效概率或可靠度,对边坡的整体风险水平评估更为真实可靠。在边坡工程可靠性分析中,常见的可靠性分析方法有一阶可靠度法、高阶可靠度法、响应面法、蒙特卡洛法等^[1-4]。

然而,考虑到边坡分层或岩土介质参数的不确定性等因素影响,边坡往往会出现多种失效模式^[5-8],因此对边坡可靠性进行分析时,采用确定性的单一临界滑动面或临界概率滑动面会极大地低估失效概率。文献^[9-10]考虑了边坡多失效模式;文献^[11]结合上、下限法得到边坡失效概率的大致范围;文献^[12]基于大量潜在滑动面建立多重响应面,计算边坡系统失效概率,并识别代表性滑动面;文献^[13]采用二阶多项式构造大量潜在滑动面安全系数与输入参数间的响应面,再结合蒙特卡洛法进行边坡系统可靠度分析。但是实际工程边坡失效概率一般在 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 量级,基于蒙特卡洛法和大量潜在滑动面的边坡系统可靠度分析方法的计算量庞大,使其在工程实际问题中的实用性受到一定约束,并且在构建响应面时,响应面形式的选取往往较为随意,常用的低阶代理模型无法保证精度,而高阶代理模型的构建代价过大。为提高蒙特卡洛法的计算效率,文献^[14]运用重要性抽样方法在大量潜在滑动面的基础上对边坡可靠度进行有效评估;文献^[15]对蒙特卡洛法进行改进,提出在不确定空间内均匀分布样本点,并将样本点的概率密度值作为权重因子,通过逼近最可能失效点和识别失效区域,降低样本点的计算次数和成本,与蒙特卡洛法相比,这种方法保留精度的同时,极大降低计算成本。文献^[16]在此基础上改进对样本点的选取方法,提出依据样本点的权重进行排序,通过设定可靠度指标的收敛准则,避免对权重极低样本点评估。该方法明显降低计算成本,但对非失效域内大量样本点进行评估,存在较大改进余地。文献^[17]在概率密度权重法基础上进行改进,以500组样本计算得到理想的边坡可靠度,其能在保证结果足够精确的情况下,大大提高可靠度分析的计算效率、降低计算成本。另外,这些研究大多假定圆弧形滑动面,忽略了不确定参数对边坡最危险滑动面形状及分布的影响。

为考虑土体参数不确定性对边坡最危险滑动面形状及分布影响并解决构建响应面法不精确的弊端,本文采用临界滑动场法^[18-19]识别边坡任意形状最危险滑动面,针对每条最危险滑动面,基于构造滑动面正应力分布的严格二维极限平衡法^[20-22]构建边坡不确定分析显式极限状态函数,应用概率密度权重法分析边坡稳定可靠性,并通过算例验证所提算法的有效性。

1 滑动面正应力分布边坡可靠性分析

1.1 构造滑动面正应力分布严格极限平衡法

文献^[20-22]基于滑动面正应力假设,提出一种严格极限平衡法的显式解答。计算模型如图1所示,在滑动面 $y=s(x)$ 上,由莫尔-库仑强度准则可得:

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) / F_s \quad (1)$$

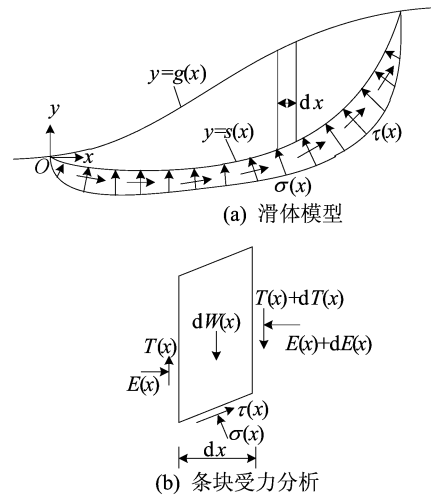


图1 滑体模型及典型条块受力分析

根据滑体的静力平衡条件,可建立水平、竖向以及绕原点力矩的3个平衡方程:

$$\int_a^b (-\sigma' + \tau) dx = 0 \quad (2)$$

$$\int_a^b (\sigma + \tau') dx - \int_a^b \tau dx = 0 \quad (3)$$

$$\int_a^b \tau x dx - \int_a^b [(\sigma' - \tau)s + (\sigma + \tau')x] dx = 0 \quad (4)$$

其中: τ 为土体抗剪强度; σ 为滑动面正应力; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

边坡滑动面正应力分布组成如下:

$$\sigma(x) = \sigma_0(x) + \sigma_1(x) \quad (5)$$

其中: $\sigma_0(x)$ 为滑体体积力和坡面外力对滑动面正应力的贡献,为已知量; $\sigma_1(x)$ 含有2个待定参数,为土条间作用力对滑动面正应力的贡献。

由式(1)~(5)可得安全系数表达式:

$$F_s = \frac{t_2}{3} + \sqrt{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \quad (6)$$

详细推导过程参见文献[20-22]。

1.2 概率密度权重法

概率密度权重法是在蒙特卡洛计算方法基础上改进所得,通过蒙特卡洛法确定不确定性空间范围,用均匀抽样代替随机变量的原有分布类型进行抽样,使样本点均匀布满不确定性空间全域,从而大大降低计算成本。

对于高维问题,概率密度权重法运用蒙特卡洛积分思想得到边坡失效概率 P_f 为:

$$P_f = \frac{\prod L_j}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i) f_X(x_i) = \frac{\sum_{i=1}^N I(x_i) f(x_i)}{N / \prod L_i} \quad (7)$$

又由

$$\int f_X(x) dx \cong \frac{\prod L_j}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) = 1 \quad (8)$$

可得 P_f 为:

$$P_f \cong \frac{\sum_{i=1}^N I(x_i) f(x_i)}{\prod L_i \sum_{i=1}^N f(x_i)} = \frac{\sum_{i=1}^N I W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (9)$$

其中: $\prod L_i$ 为各个随机变量取值区间的长度乘积; N 为样本点数量; $f(x_i)$ 为各随机变量联合概率密度函数; I 为二值变量,在失效域时为 1,在安全域时为 0; W_i 为随机均匀分布样本点的权重因子,为每个样本点 X_i 的所有随机变量 (x_1, x_2, \dots, x_M) 的概率密度函数 $f_j(x_{ji})$ 乘积; M 为随机变量个数。

1.3 最危险滑动面识别

由于土体参数不确定性,必然会导致边坡最危险滑动面的不确定性。然而,基于概率与随机理论的边坡稳定可靠性分析方法是在确定性分析的基础上建立的,忽略最危险滑动面不确定性必然会高估边坡可靠性。因此,本文采用临界滑动场法(critical slip field, CSF)^[18-19]进行任意形状最危险滑动面识别,在此基础上实现基于构造滑动面正应力分布的边坡可靠性分析。CSF 的出发点是对于设定的安全系数 F_s ,逐一求出各状态点的最危险滑动方向 $\tan \alpha$,使最终剩余推力极

大。调整安全系数,使最大的极大剩余推力为 0,得出边坡临界状态下的体内危险滑动方向场如图 2 所示,进而在此基础上追踪出连续的临界滑动场如图 3 所示。

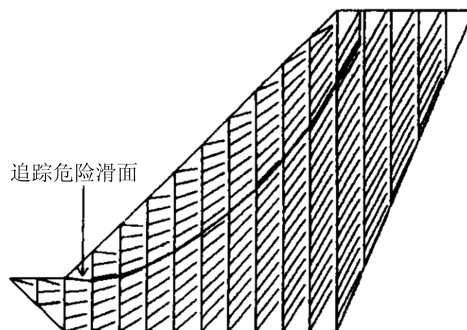


图 2 边坡状态点危险滑动方向

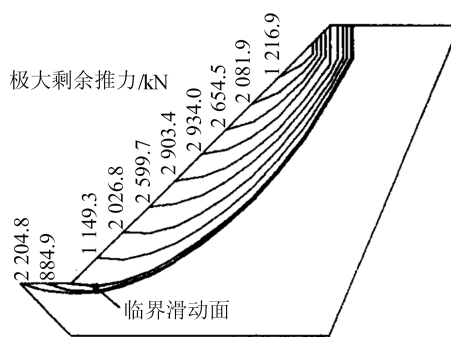


图 3 边坡 CSF 图

1.4 计算流程

影响边坡稳定的因素很多,本文主要考虑土体基本物理力学参数(黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和重度 γ)作为独立随机变量分析边坡稳定可靠性。同时,基于构造滑动面正应力分布严格极限平衡法获得边坡安全系数显示解,建立边坡安全极限状态函数为:

$$Z(X) = F_s - 1 = \frac{t_2}{3} + \sqrt{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - 1 \quad (10)$$

计算流程如图 4 所示,计算步骤为:① 利用 MATLAB 软件均匀抽样生成 N 组土体不确定参数样本点;② 将生成的每组样本点数据导入临界滑动场计算程序,对每组样本点进行边坡任意形状最危险滑动面搜索,并拟合出各最危险滑动面代表函数 s_i ;③ 利用步骤②中所得最危险滑动面 s_i ,编制基于构造滑动面正应力分布严格极限平衡法 MATLAB 计算程序,计算 N 组样本点安全

系数 F_s ; ④ 计算各样本点 $Z(X)$ 并判断其大小, 当 $Z > 0$ 时样本点位于安全域, 当 $Z = 0$ 时样本点处于临界状态面, 当 $Z < 0$ 时样本点位于失效域。计算对应样本点概率密度权重因子 W_i , 按概率密度权重法计算失效概率 P_f 。

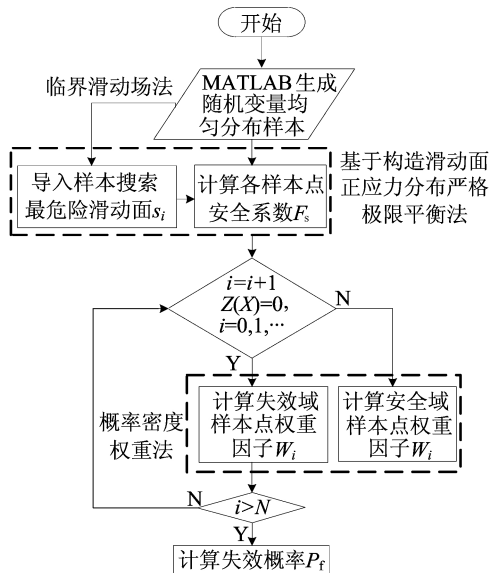


图 4 基于构造滑动面正应力分布边坡可靠性计算流程

2 算例分析与讨论

2.1 算例 1

算例 1 为均质边坡, 其几何尺寸如图 5 所示, 以抗剪强度参数和土体重度作为不确定参数见表 1 所列。通过临界滑动场法识别各组样本点对应任意形状最危险滑动面, 在此基础上运用构造滑动面正应力分布概率密度权重法对该边坡进行可靠性分析。

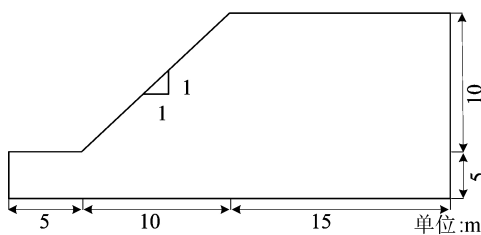


图 5 均质边坡几何尺寸

表 1 算例 1 中土体不确定性强度参数

随机变量	分布类型	均值	变异系数
c/kPa	正态分布	18	0.20
$\varphi/^\circ$	正态分布	30	0.10
$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	正态分布	18	0.05

以样本点数量为 100、200、300、400、500、600、700 分别计算该边坡失效概率, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 随着样本点数量增边坡失效

概率逐渐趋于平稳, 当样本点数量达到 500 后, 失效概率稳定在 1.13% 左右。

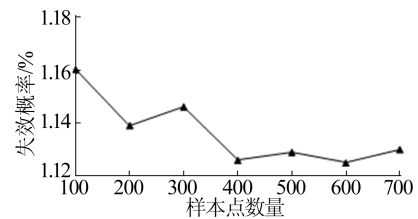
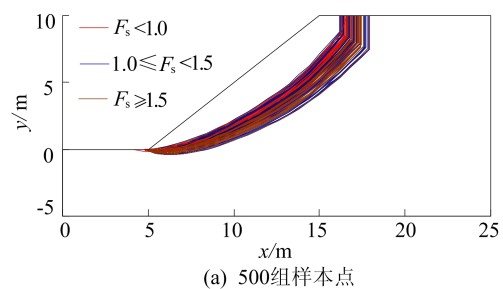
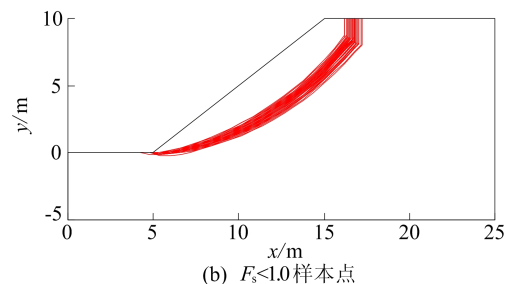


图 6 失效概率随样本点数量变化情况

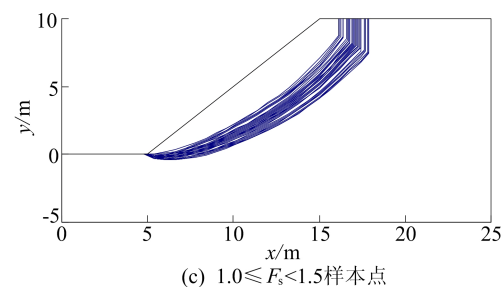
采用 CSF 获得各随机变量样本点对应最危险滑动面分布情况如图 7 所示。



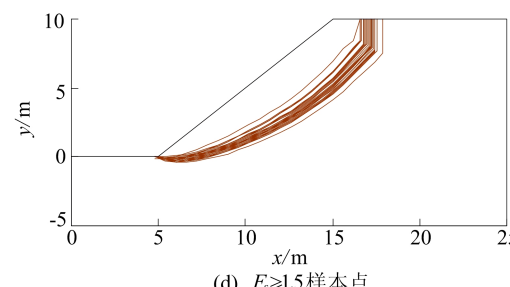
(a) 500组样本点



(b) $F_s < 1.0$ 样本点



(c) $1.0 \leq F_s < 1.5$ 样本点



(d) $F_s \geq 1.5$ 样本点

图 7 不同样本点对应最危险滑动面分布

由图 7 可知, 土体参数的不确定性对均质边坡最危险滑动面的形状和位置影响较小。

500 组样本点不确定空间分布如图 8 所示。图 8 中:红色点位于安全域($g(x)>0$);蓝色点位于极限状态曲面($g(x)=0$)上;粉色点位于失效域($g(x)<0$)。可以发现失效样本点位于不确定空间左前侧区域,土体重度取值均匀分布在其取值范围内,而黏聚力和内摩擦角分布在其取值较小处,这说明黏聚力和内摩擦角占主导地位,土体重度对边坡可靠性影响较小。

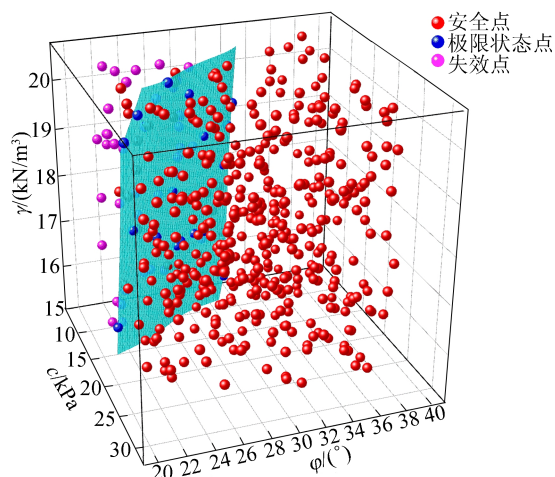


图 8 均质边坡样本点不确定空间分布

将处于临界状态样本点进行拟合得到极限状态曲面,可以看出极限状态曲面很好地分割了安全域和失效域。本文方法所得边坡失效概率 P_f 为 1.13%,与蒙特卡洛法计算结果 1.07% 基本一致,见表 2 所列,验证了本文方法的准确性。

表 2 算例 1 中不同方法边坡可靠性结果比较

计算方法	可靠度指标	失效概率/%	样本数量
本文方法	1.86	1.13	500
蒙特卡洛法	1.94	1.07	20 000

2.2 算例 2

算例 2 引用文献[7]的研究。软土地基上的黏性土路堤边坡尺寸如图 9 所示。由算例 1 可知土体重度对边坡可靠性影响较小,因此算例 2 取每层土体重度为 19 kN/m³,其土体不确定性强度参数见表 3 所列。

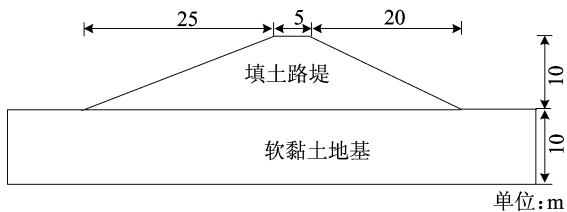


图 9 软土地基上的黏性土路堤边坡几何尺寸

表 3 算例 2 中土体不确定强度参数

随机变量	位置	分布类型	均值	变异系数
c/kPa	路堤	正态分布	10	0.20
	软土地基	正态分布	40	0.20
$\varphi/(\circ)$	路堤	正态分布	12	0.25
	软土地基	定值	0	0

2 层非均质边坡样本点对应边坡最危险滑动面分布情况如图 10 所示,与均质边坡相比,土体参数的不确定性对非均质边坡最危险滑动面的形状和位置都有较大影响。

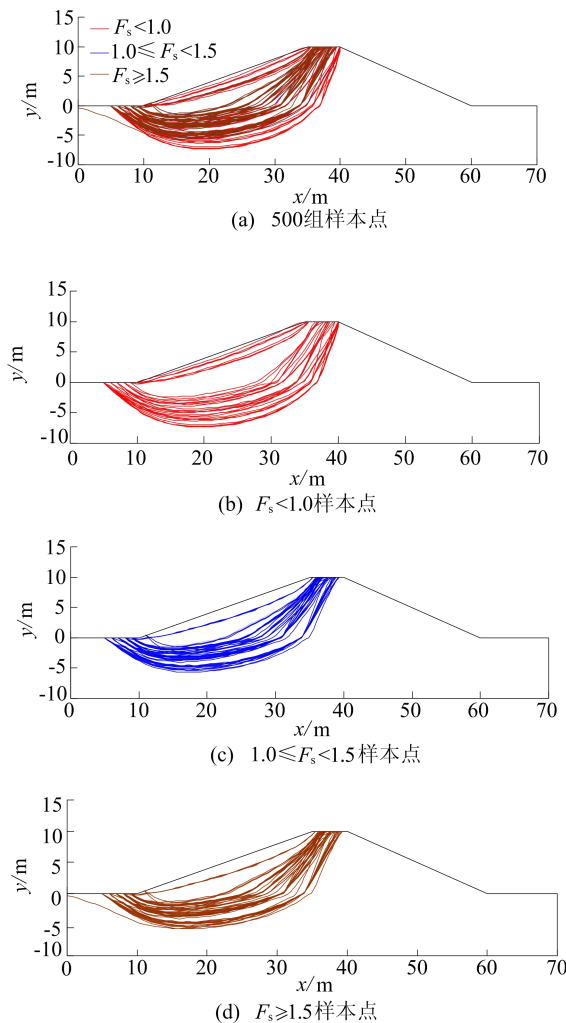


图 10 2 层非均质边坡最危险滑动面分布

2 层非均质边坡 500 组样本点不确定空间分布如图 11 所示,图 11 中曲面为极限状态曲面。从图 11 可以看出,样本点均匀分布整个不确定空间,失效域位于不确定空间底部;失效域内路堤黏聚力和内摩擦角取值均匀充满各自取值范围;软土地基黏聚力取值在失效域和安全域中都有分布,说明该 2 层路堤边坡稳定性更依赖于软土地

基黏聚力,即该边坡可靠性对软土地基黏聚力更为敏感。

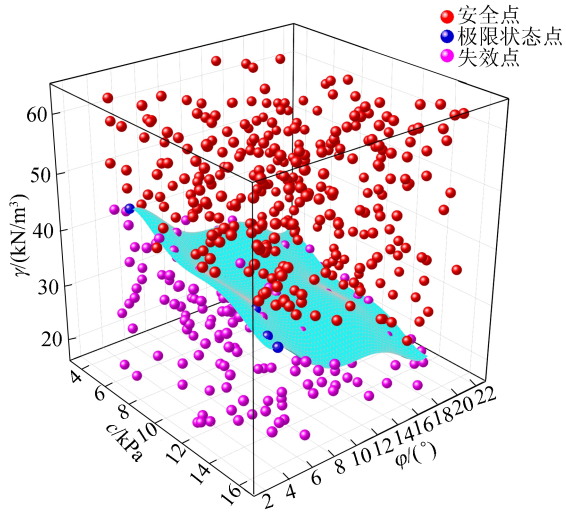


图 11 非均质两层边坡不确定空间样本点分布

通过均匀抽样获得 500 组样本点,采用构造滑动面正应力分布概率密度权重法计算 10 次边坡失效概率 P_f 均值为 36.25%,标准差为 2.21。本文方法与其他方法计算结果比较情况见表 4 所列,本文方法所得边坡失效概率为 36.25%,与概率密度权重法^[17]所得失效概率 32.38%相比,相对误差为 11.95%;且在分层响应面法^[13]、上下限法^[10]计算结果范围内。对比结果说明对于非均质边坡,采用代表性圆弧滑动面低估了边坡失效概率。

表 4 算例 2 中不同方法边坡可靠性结果比较

计算方法	可靠度指标	失效概率/%	标准差
本文方法	0.28	36.25	2.21
文献[17]	0.35	32.38	2.58
文献[13]		31.22~41.84	
文献[10]		27.40~44.70	

2.3 算例 3

算例 3 为 3 层非均质边坡,边坡几何尺寸如图 12 所示,其砂土层的内摩擦角为 38° ,黏聚力为 0。黏土层土体强度参数见表 5 所列,均为独立随机变量,每层土体重度为 18.5 kN/m^3 。

各组样本点对应边坡最危险滑动面分布情况如图 13 所示。从图 13 可以看出,最危险滑动面大多数穿过 3 层土层,少部分只穿过砂土层。土体参数不确定性导致最危险滑动面位置分布及形状影响进一步增大。

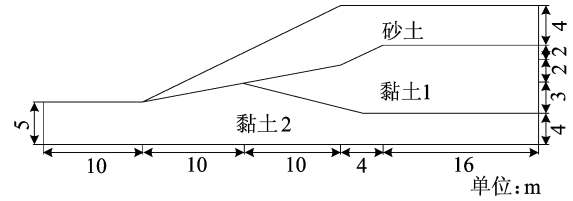
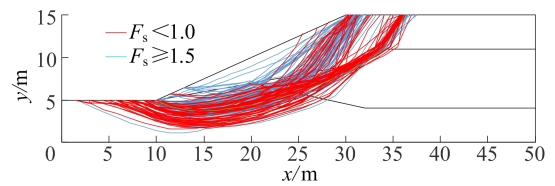


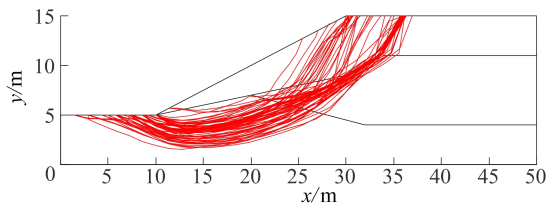
图 12 3 层非均质边坡几何尺寸

表 5 算例 3 中土体不确定强度参数

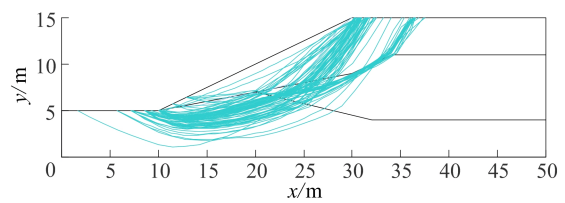
随机变量	砂土层	分布类型	均值	变异系数
c/kPa	黏土 1	正态分布	5.3	0.3
	黏土 2	正态分布	7.2	0.3
$\varphi/^\circ$	黏土 1	正态分布	23	0.2
	黏土 2	正态分布	20	0.2



(a) 500 组样本点



(b) $F_s < 1.0$ 样本点



(c) $F_s \geq 1.0$ 样本点

图 13 3 层非均质边坡不同样本点最危险滑动面分布

针对 3 层非均质边坡案例,将采用圆弧滑动面的不同边坡可靠性分析方法所得结果进行对比见表 6 所列。

表 6 算例 3 中不同方法边坡可靠度结果比较

计算方法	可靠度指标	失效概率/%	标准差	样本数量
本文方法	1.86	1.68	0.13	500
文献[17]	2.17	1.49	0.21	500
文献[12]		1.33		50 000
文献[13]		1.08~1.30		

计算结果表明:采用本文方法得到的边坡失效概率 P_f 均值为 1.68%,标准差为 0.13;比概率密度权重方法^[17]所得失效概率(1.49%)高出 12.8%;比蒙特卡洛法^[12]所得失效概率(1.33%)

高 26.3%;且比分层响应面法^[13]所得失效概率(1.08%~1.30%)范围上限高 29.2%。

上述结果进一步说明对于非均质程度越高的边坡采用代表性圆弧滑动面的边坡失效概率低估程度越大。

2.4 讨论

考虑到内摩擦角的变异性小于黏聚力的变异性^[23]。本节基于算例 2 仅讨论 2 层非均质边坡不同层黏聚力变异性对边坡稳定可靠性影响。黏聚力的变异系数见表 7 所列,具体计算结果如图 14 所示。

表 7 算例 2 中层边坡黏聚力变异系数取值

随机变量	位置	变异系数
c/kPa	路堤	0.1~0.4
	软土地基	0.1~0.4

由图 14 可知:随着软土地基黏聚力变异系数增大,边坡失效概率也随之增大;而当路堤黏聚力变异系数增大时,边坡失效概率增加幅度较小,增加幅度随着路堤黏聚力变异系数增大而减小,这说明该边坡模型稳定可靠性对软土地基黏聚力变异系数更敏感。

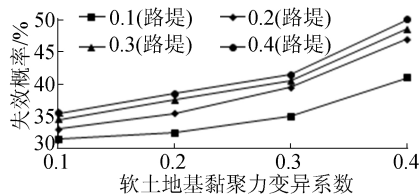


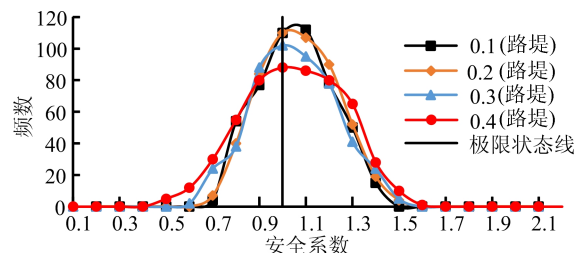
图 14 不同路堤变异系数的失效概率

不同软土地基黏聚力变异系数下安全系数分布如图 15 所示。

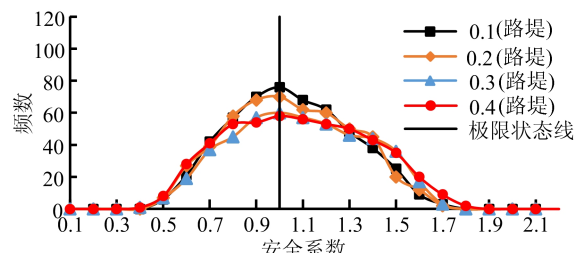
从图 15 可以看出,随着路堤黏聚力变异系数增大,安全系数分布图峰值逐渐减小,形状逐渐变得“矮胖”,且逐渐向极限状态线左侧移动,说明随着路堤黏聚力变异系数增大,路堤黏聚力变异系数取值范围变大,且分布在极限状态线左侧的样本点更多、更小,因此基于本文方法计算的失效概率越大。

同时可以看出,当软土地基黏聚力变异系数逐渐增大时,安全系数分布图峰值随之大幅减小,形状“矮胖”变化趋势显著,而路堤黏聚力变异系数对安全系数分布影响随着软土地基黏聚力变异系数增大而不显著。

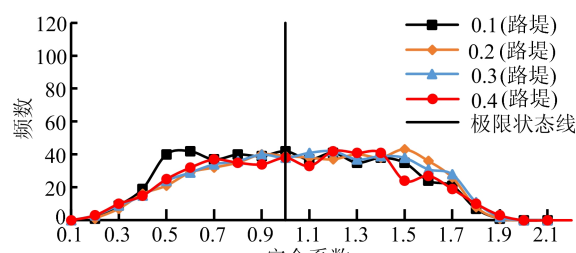
不同路堤黏聚力变异系数下安全系数分布如图 16 所示。



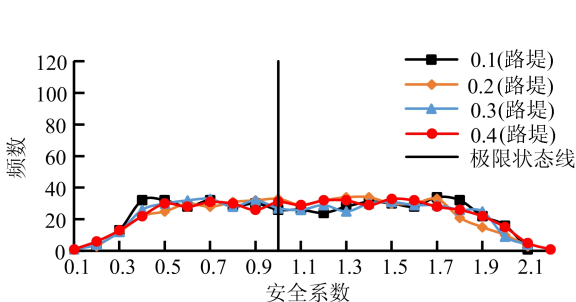
(a) 软土地基黏聚力变异系数为0.1



(b) 软土地基黏聚力变异系数为0.2



(c) 软土地基黏聚力变异系数为0.3



(d) 软土地基黏聚力变异系数为0.4

图 15 不同软土地基黏聚力变异系数下安全系数分布

从图 16 可以看出:随着软土地基黏聚力变异系数的增大,安全系数分布图峰值大幅减小,形状逐渐变得“矮胖”,且逐渐向极限状态线左侧移动;当路堤黏聚力变异系数逐渐增大时,安全系数分布图峰值变化幅度较小,形状“矮胖”变化趋势不显著。进一步证明了该 2 层边非均质坡稳定可靠性对软土地基黏聚力变异系数更敏感。

3 个不同分层边坡算例分析表明,本文方法适用于任意形状滑动面的多层边坡稳定可靠性分析问题。与基于其他极限平衡法的边坡稳定可靠性分析方法相比,本文方法可以获得边坡安全显

式极限状态函数,其求解过程便捷、易于编程实现且不存在收敛性问题;与蒙特卡洛法相比,本文方法所需样本点更小,从而大大降低计算成本。

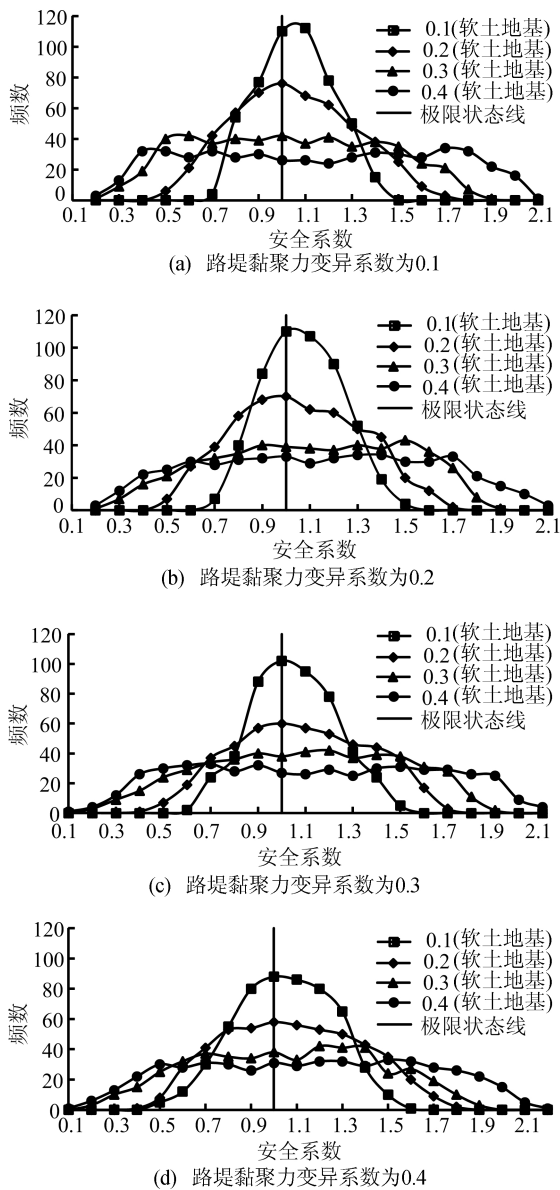


图 16 不同路堤黏聚力变异系数下安全系数分布

3 结 论

本文提出了基于构造滑动面正应力分布严格极限平衡概率密度权重法,考虑了不确定参数对边坡最危险滑动面影响,建立了边坡不确定性分析显式极限状态函数。与其他极限平衡法相比,本文方法求解过程更便捷、易于编程实现且不存在收敛性问题,在考虑任意形状滑动面上具有明显优势。

本文方法对每组样本点进行任意形状最危险滑动面识别,基于识别的任意形状最危险滑动面

建立每组样本点极限状态函数并分别进行计算,充分考虑了不确定参数对边坡最危险滑动面影响。算例分析表明,与采用圆弧滑动面相比,本文方法所得失效概率比其他方法均高 10% 以上,且边坡非均质性越强,差别越显著。

[参 考 文 献]

- [1] LOW B K. Reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normals[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6): 922-935.
- [2] JI J, LOW B K. Stratified response surfaces for system probabilistic evaluation of slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2012, 138(11): 1398-1406.
- [3] HASSAN A M, WOLFF T F. Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 1999, 125(4): 301-308.
- [4] LIU L L, CHENG Y M, PAN Q J, et al. Incorporating stratigraphic boundary uncertainty into reliability analysis of slopes in spatially variable soils using one-dimensional conditional Markov chain model[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118: 103321.
- [5] OKA Y, WU T H. System reliability of slope stability[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(8): 1185-1189.
- [6] HASSAN A M, WOLFF T F. Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 1999, 125(4): 301-308.
- [7] CHOWDHURY R N, XU D W. Geotechnical system reliability of slopes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1995, 47(3): 141-151.
- [8] JI J, LOW B K. Stratified response surfaces for system probabilistic evaluation of slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2012, 138(11): 1398-1406.
- [9] OKA Y, WU T H. System reliability of slope stability[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(8): 1185-1189.
- [10] CHOWDHURY R N, XU D W. Geotechnical system reliability of slopes [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 47(3): 141-151.
- [11] DITLEVSEN O. Narrow reliability bounds for structural systems[J]. Journal of Structural Mechanics, 1979, 7(4): 453-472.
- [12] 李静萍,程勇刚,李典庆,等. 基于多重响应面法的空间变异土坡系统可靠度分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 147-155, 165.
- [13] ZHANG J, ZHANG L M, TANG W H. New methods for system reliability analysis of soil slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(7): 1138-1148.

(下转第 432 页)

- 113-118.
- [4] 肖琦,郝帅,宁喜亮,等.纤维对混凝土抗冻耐久性的影响研究综述[J].混凝土,2018(6):68-71.
- [5] 黄加圣,杨鼎宜,朱振东,等.聚乙烯醇纤维混凝土耐久性性能试验研究[J].混凝土,2019(6):61-65.
- [6] 陈宇良,姜锐,陈宗平,等.复合受剪钢纤维再生混凝土破坏机理及强度计算[J].工程力学,2023,40(3):88-97,128.
- [7] 陈宇良,姜锐,陈宗平,等.钢纤维再生混凝土的直剪力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(9):984-990.
- [8] 邓明科,刘华政,马福栋,等.聚乙烯醇纤维改性高延性混凝土双面剪切试验及剪切韧性评价方法[J].复合材料学报,2020,37(2):461-471.
- [9] 杨萌,黄承逵,刘毅.钢纤维高强混凝土抗剪性能试验研究[J].大连理工大学学报,2005,45(6):842-846.
- [10] 郭艳华,刘建红,李志业.钢纤维混凝土压剪破坏研究[J].建筑材料学报,2008,11(2):152-156.
- [11] 王志亮,杨文敬,吴立朋.超短钢纤维混凝土压剪破坏机理研究[J].铁道建筑,2011(4):145-148.
- [12] 高丹盈,朱海堂,汤寄予.纤维高强混凝土抗剪性能的试验研究[J].建筑结构学报,2004,25(6):88-92,98.
- [13] 陈宇良,张绍松,徐金俊,等.压剪作用下PVA纤维再生混凝土力学性能试验研究[J].材料导报,2023,37(11):112-118.
- [14] 叶学华,许金余,聂良学.不同玄武岩纤维掺量的早强混凝土劈裂拉伸强度研究[J].硅酸盐通报,2015,34(6):1700-1704.
- [15] 王成,李曦彤,葛广华,等.玄武岩纤维掺量对塔里木灌区水工混凝土早龄期力学性能的影响[J].建筑结构,2022,52(增刊1):1037-1042.
- [16] 胡秀月,庞建勇,雷成祥.玄武岩纤维混凝土孔隙结构及在围压下渗透性能研究[J].复合材料科学与工程,2023(1):94-99.
- [17] YU Z P, TANG R, LI F R, et al. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of rubber concrete (RC) with different rubber replacement ratio[J]. Construction and Building Materials, 2021, 288: 123105.
- [18] 余振鹏,黄侨,赵志青,等.自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能[J].复合材料学报,2019,36(8):1984-1994.
- [19] 邓志恒,李作华,杨海峰,等.再生混凝土压-剪复合受力性能研究[J].建筑结构学报,2019,40(5):174-180.
- [20] 杨海峰,杨超,蒋毅,等.钢纤维混凝土压-剪复合性能及损伤本构关系[J].工程力学,2023,40(4):144-151.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 425 页)

- [14] CHING J, PHOON K K, HU Y G. Efficient Evaluation of reliability for slopes with circular slip surfaces using importance sampling[J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 2009, 135(6): 768-777.
- [15] RASHKI M, MIRI M, MOGHADDAM M A. Closure to "a new efficient simulation method to approximate the probability of failure and most probable point"[J]. Structural Safety, 2014, 46: 15-16.
- [16] OKASHA N M. An improved weighted average simulation approach for solving reliability-based analysis and design optimization problems [J]. Structural Safety, 2016, 60: 47-55.
- [17] 姬建,王乐沛,廖文旺,等.基于WUS概率密度权重法的边坡稳定系统可靠度分析[J].岩土工程学报,2021,43(8):1492-1501.
- [18] 朱大勇.边坡临界滑动场及其数值模拟[J].岩土工程学报,1997,19(1):65-71.
- [19] 朱大勇,周早生.边坡全局临界滑动场(GCSF)理论及工程应用[J].土木工程学报,1999,32(3):66-72.
- [20] ZHU D Y, LEE C F. Explicit limit equilibrium solution for slope stability[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(15): 1573-1590.
- [21] 朱大勇,李焯芬,姜弘道,等.基于滑动面正应力修正的边坡安全系数解答[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2788-2791.
- [22] 卢坤林,朱大勇,杨扬.边坡滑动面正应力构成及分布模式[J].岩土力学,2012,33(12):3741-3746.
- [23] 余国,谢谟文,郑正勤,等.基于GIS的边坡稳定性计算方法研究[J].岩土力学,2019,40(4):1397-1404,1412.

(责任编辑 吴 亮)