

考虑土体强度参数深度依赖性的非平稳随机场边坡滑动深度和体积分析

曾勇¹, 李亚军¹, 严俊², 田振华²

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 基于随机有限元方法(RFEM)和 Monte-Carlo 模拟, 建立了能够模拟具有深度依赖性的土体强度参数边坡或具有软弱夹层边坡的非平稳随机场模型。通过辐射扫描方法获取最危险滑动面, 得到非平稳随机场边坡滑动深度和滑动体积。将该方法与均质边坡和平稳随机场边坡获得的滑动深度和滑动体积进行对比, 研究土体强度参数深度依赖性的非平稳随机场边坡的不同坡度和各向异性对滑动深度和滑动体积的影响。结果表明: 基于 RFEM 的非平稳随机场滑动深度和滑动体积结果为地质灾害风险及后果评估提供了一个参考分析的新角度; 参数的深度依赖性程度越高(变化率 b 越大), 则边坡平均滑动深度和滑动体积越小; 在大坡度滑坡风险后果评估中, 可以基于均质边坡分析结果进行初步预估; 在非平稳随机场中, 随着各向异性的增大, 所有坡度边坡的滑动体积变异系数增大; 不同坡度下, 水平方向的相关程度越大, 则土体内软弱夹层的不确定性越强, 滑动体积的变异系数也不断增大。
关键词: 土体抗剪强度参数; 空间变异性; 深度依赖性; 边坡滑动深度和体积; 非平稳随机场; 随机有限元方法
中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2023)03-0174-10

Sliding depth and volume analysis of non-stationary random field slopes considering depth-dependent soil strength parameters

ZENG Yong¹, LI Yajun¹, YAN Jun², TIAN Zhenhua²

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on the random finite element method (RFEM) and Monte-Carlo simulations, a non-stationary random field model is established for the simulation of slopes with depth-dependent soil strength parameters or slopes with weak interlayers. The most likely failure surface is obtained by the radiation scanning method, and the sliding depth and volume of the non-stationary random field slope are simulated. Then the sliding depth and volume obtained by this method are compared with those of the homogeneous slope and the stationary random field slope, so as to study the influence of the non-stationary random field slope with the depth-dependent soil strength parameters on the sliding depth and volume under different slope angles and anisotropy conditions. The results indicate that the study of non-stationary random field sliding depth and volume based on RFEM provides a referential analysis angle for the geological hazard risk and consequence evaluation. The higher the depth dependence of the parameter (the greater the change rate b), the slower the average sliding depth and volume of the slope gradually decreases. In the process of evaluating the risk consequences of a large slope landslide, a preliminary estimation can be made based on the results of the homogeneous slope analysis. In a non-stationary random field, as the anisotropy increases, the variation coefficient of the sliding volume at all angles increase. Under different slope angles, the greater the correlation of the soil slope in the horizontal direction, the greater the uncer-

收稿日期:2022-02-24; 修回日期:2022-07-30

基金项目:资源环境与灾害监测山西省重点实验室开放课题(2023-S01); 国家自然科学基金青年基金项目(41807228); 中央高校基本科研业务费项目(2652019321)

作者简介:曾勇(1998—),男,江西赣州人,博士研究生,从事岩土工程风险评估相关研究。

通讯作者:李亚军(1987—),男,山西忻州人,博士,副教授,博士生导师,从事岩土结构稳定性分析和岩土工程风险评估等相关研究。

tainty of the weak interlayer in the soil slope, and the larger the variation coefficient of the sliding volume.

Key words: soil shear strength parameter; spatial variability; depth dependence; slope sliding depth and volume; non-stationary random field; random finite element method (RFEM)

1 研究背景

土性参数在岩土工程中具有显著的空间变异性^[1-2]。袁葳等^[3]基于土体不排水抗剪强度参数具有的空间变异性,利用 Weibull 随机场分析了边坡的稳定性;陈朝晖等^[1]、王旭等^[4]采用有限元极限分析方法求解了空间变异性边坡的稳定可靠性上限和下限问题。一般认为,土体参数的空间变异性是由土体沉积时间和空间变化、地质应力作用、风化沉积程度和埋藏条件等一系列地质作用的差异性所造成的^[3]。在一系列物理性破损和重组、化学和生物作用慢慢固结沉积后,土体参数的数值随深度不断增加,这种随深度变化的趋势在土体强度参数中表现得尤为突出,这些参数具有深度依赖性,并且呈现出趋势性和波动性^[2,5]。在实际的边坡工程中,大量土体原位测试或试验数据统计均表明土体强度参数的特征参数沿埋深呈一定规律的变化^[6]。

非平稳随机场是工程实践中表征具有一定空间变化趋势的土体强度的重要途径,如杨亮等^[7]基于非平稳随机场研究了水泥土堤坝边坡。在非平稳随机场的研究中,Griffiths 等^[8-9]、Zhu 等^[10]和 Dyson 等^[11]基于线性增加的不排水抗剪强度,系统性地分析了一系列非平稳随机场的稳定性,并以图表的形式给出了可供查阅的无量纲稳定数。豆红强等^[12]以 FLAC 为平台建立非平稳随机场模型,研究了无限长边坡的稳定性。蒋水华等^[13]、陈朝晖等^[6]对单层和多层非平稳随机场模型进行了深入研究,并提出了改进的土体参数深度变化率 b 对边坡稳定性可靠度的影响。

然而,在非平稳随机场分析中,大多讨论了边坡失效概率等的可靠度问题^[7],而针对边坡滑动深度和滑动体积等失效后果指标的系统分析较少。在 Varkey 等^[14]的研究中明确指出了衡量边坡滑动风险的要素,即失效后果和失效概率,二者是滑动风险因素的量化指标。在地质灾害评估时,滑坡极限滑动深度是直观了解滑坡土体方体积的参数,同时考虑滑坡的滑动体积,可在研究滑动深度的基础上充分论证边坡滑动的失效后果及其风险^[15]。所以,本文重点研究了非平稳随机场的滑坡滑动深度和滑动体积相关内容,以均质边坡、平稳随机场边坡的结果

作为对照,得到具有深度依赖性的土体强度参数边坡临界滑动时的滑动深度和滑动体积结果,评估具有深度依赖性的边坡的失效后果,以补充和完善地质灾害风险及后果评估体系。

2 非平稳随机场模拟

已有研究表明^[6]:土体参数可以拆分为趋势分量 g 和随机波动分量 ϵ 。假设边坡内某一点 $t = (x, y, z)$,在点 t 处的土体参数 $\xi(t)$ 可用公式(1)表示:

$$\xi(t) = g(t) + \epsilon(t) \quad (1)$$

除了给定的样本已知点外,其余位置 t 处的土体参数未知,可将该参数视为随机变量。在 Burgess 等^[15]的研究中,趋势分量 $g(t)$ 为沿埋深方向的线性函数,波动分量 $\epsilon(t)$ 的均值 $\mu_\epsilon = 0$,标准差 σ_ϵ 为正态平稳随机场。简单说来,平稳随机场中土体参数的平均趋势和统计特性是恒定的,公式(2)~(4)分别表示土体参数 $\xi(t)$ 的期望值、方差和协方差:

$$E\{\xi(t)\} = E\{g(t) + \epsilon(t)\} = g(t) = m \quad (2)$$

$$\text{var}\{\xi(t)\} = \text{var}\{\epsilon(t)\} = \sigma^2 \quad (3)$$

$$\text{cov}\{\xi(t), \xi(t')\} = \text{cov}\{\epsilon(t), \epsilon(t')\} = \sigma^2 \rho(v) \quad (4)$$

式中: m 和 σ^2 为常数; $\rho(v)$ 为与 t 和 t' 的滞后距 v 有关的自相关函数 (autocorrelation function, ACF), v 可用公式(5)表示:

$$v(v_x, v_y, v_z) = |t' - t| \quad (5)$$

公式(2)、(3)只涉及空间内某一点 t 的特定统计性质,可以描述为土体参数的点性质。公式(4)、(5)则表示了空间内两点的交叉矩,描述为土体参数的交叉性质。基于土体参数的相关数学特征,用期望值(均值)、方差、协方差、自相关函数构建平稳随机场^[16]。

在岩土工程研究中,边坡空间区域内的任意两点一般均表现出一定的自相关性,选取土体中的随机两点 $t = (x, y, z)$ 和 $t' = (x', y', z')$,根据公式(3)、(4)得到其样本自相关函数:

$$\begin{aligned} \rho(t, t') &= \frac{\text{cov}\{\xi(t), \xi(t')\}}{\sqrt{\text{var}\{\xi(t)\} \cdot \text{var}\{\xi(t')\}}} \\ &= \frac{\text{cov}\{\epsilon(t), \epsilon(t')\}}{\sqrt{\text{var}\{\epsilon(t)\} \cdot \text{var}\{\epsilon(t')\}}} \end{aligned} \quad (6)$$

经过对比发现,在 Wu 等^[17]、Chen 等^[18]和 Salgado 等^[19]的研究中均采用了上述公式来计算相关系数。但是,利用公式(6)计算时,往往需要大量的实测勘探数据作为支撑才能获取较为准确的数值结果^[20]。一般情况下进行土体参数随机场模拟时,选择特征值和特征函数具有解析解的第一类自相关函数^[1],即简单指数型(SNX):

$$\rho(\tau_h, \tau_v) = \exp\left[-2\left(\frac{\tau_h}{\delta_h} + \frac{\tau_v}{\delta_v}\right)\right] \quad (7)$$

式中: $\delta_h = 2\theta_h$, $\delta_v = 2\theta_v$ 。选取二维平面内的随机两点,用 τ_h 和 τ_v 分别表示二点之间的水平绝对距离和竖直绝对距离。用 δ_h 和 δ_v 分别表示土体参数的水平波动范围和竖直波动范围,用 θ_h 和 θ_v 分别表示土体参数的水平相关距离和垂直相关距离。空间内两点(或者泛指两个事物)都会存在一定的自相关性^[17],两点之间的相对距离越大,这种自相关性显然会越小,当相对距离达到一定程度时,这种自相关性会逐渐减小到趋于 0。波动范围的大小可以用来表示空间自相关程度的大小。研究中常常认为相关距离是相关函数的值在衰减到 e^{-1} 时的距离^[21]。

现研究阶段,常用的随机场离散方法为局部平均细分法(local average subdivision, LAS)、中点法、谱表现法和 K-L(Karhunen-Loève)展开法等^[22]。这些方法中, LAS 法可以对每一个分散的随机场单元参数赋值,得到连续性好、精度高的随机场。LAS 算法被认为是在一维、二维或三维中生成的、齐次高斯随机局部平均过程的一种有效而准确的方法^[22]。更多 LAS 多阶算法相关内容可在相关研究文献^[22]、^[23]中了解到,在此不再赘述,本文随机场也将采用 LAS 生成随机有限元程序。

土体的不排水抗剪强度 s_u 的均值和标准差都有随着深度增加而线性增大的趋势^[10]。Griffiths 等^[8]的研究表明,可以用地表处的土体不排水抗剪强度 s_{u0} 随深度 z 不断线性增大表示 z 处土体的 s_u , 用公式(8)表示:

$$s_u(z) = s_{u0} + b\sigma'_v = s_{u0} + b\gamma z \quad (8)$$

式中: σ'_v 为土体垂直方向上的有效应力, kPa; 斜率 b 表示土体不排水抗剪强度增加的速率; γ 为土的重度, kN/m³。

Griffiths 等^[9]的研究给出了土体强度参数深度依赖性的非平稳随机场模拟,地表处的土体不排水抗剪强度 s_{u0} 仍然适用平稳随机场理论,模拟正态分布随机场,根据公式(8)得到深度 z 处 s_u 的非平稳随机场:

$$s_u(z) = s_{u0}(z) \frac{\mu_{s_u}(z)}{\mu_{s_{u0}}} \quad (9)$$

$$\mu_{s_u}(z) = \mu_{s_{u0}} + b\gamma z \quad (10)$$

$$\sigma_{s_u}(z) = \frac{\mu_{s_{u0}} + b\gamma z}{\mu_{s_{u0}}} \cdot \sigma_{s_{u0}} \quad (11)$$

$$C_{V_{s_u}(z)} = C_{V_{s_{u0}}} = \frac{\sigma_{s_{u0}}}{\mu_{s_{u0}}} \quad (12)$$

式中: $\mu(z)$ 和 $\sigma(z)$ 分别为土体不排水抗剪强度 s_u 的均值和标准差, kPa; 二者均为土体埋深 z 的单调递增函数; C_V 为变异系数。

3 随机有限元方法(RFEM)

随机有限元方法(random finite element method, RFEM)是基于 Monte-Carlo 模拟、针对岩土工程领域(例如边坡)进行随机概率统计计算的一种弹塑性有限元分析方法^[23]。可以用土坡的物理概念来描述这种新颖的有限元分析方法的基本原理:基于土体本身的一些实际物理性质(土体强度参数)构建相应贴切的数学模型(正态或对数正态分布函数), RFEM 将随机场(random field)与有限元模拟(finite element method, FEM)结合在一起,在没有提前定义临界破坏滑移面的情况下(与极限平衡法的区别),模拟土体参数空间变异性和斜坡渐进破坏的过程,直到搜寻到边坡潜在的破坏滑移面。RFEM 方法已经逐渐成为研究非均质边坡不确定性问题的最流行方法之一^[11]。

RFEM 程序的运算过程可以简要地概况为以下 4 个步骤。

步骤 1:生成随机场,例如:使用基于某些土体参数的局部平均细分法(LAS),生成以均值和标准差为特征值的正态或对数正态分布函数,得到对应的土体参数随机场;

步骤 2:将随机场所有特征值随机映射到有限元网格中,模拟给定问题(在本文可以用以解决寻找边坡临界滑动面的问题);

步骤 3:进行传统的有限元分析;

步骤 4:进行蒙特卡洛模拟(Monte-Carlo simulation),重复上述 4 个步骤,根据设定次数进行多个循环,直到输出最终统计量(例如边坡极限滑动深度和体积等)。

4 算例分析

4.1 算例边坡模型

本文基于 Fenton 等^[24]开发的 RFEM 程序建立

随机场模型。为便于初步研究具有深度依赖性的非平稳随机场边坡失效后果的一般规律,选取二维边坡模型进行研究。模型边坡总长度为25 m,总高度为8 m,坡度 $\beta = 45^\circ$,土体重度 γ 取 20 kN/m^3 ,弹性模量 E 取 100 MPa ,泊松比 μ 取 0.3 ;模型边界条件均为实际约束,底部为固定边界。图1为算例边坡模型及对应的边界条件;图2为有限元程序计算 45° 边坡模型的单元格和可视化云图。

图2(a)为边坡模型有限元网格,单元格的尺寸将影响计算的精度和准确性,在保证计算效率的前提下,将单元格的宽度、高度分别设置为 0.50 和 0.25 m ,共拆分出 $1\ 310$ 个区域,每个区域均被赋予符合正态分布函数的随机值(不排水抗剪强度 s_u)。

基于局部平均细分法(LAS),得到图2(b)所示模拟“自然”状态下具有空间变异性的边坡。图2(c)为RFEM程序计算得到的剪切应变不变量,以此呈现边坡最危险滑动面所在的位置。图2(d)显示了边坡滑动过程中整体滑动破坏的变形量。

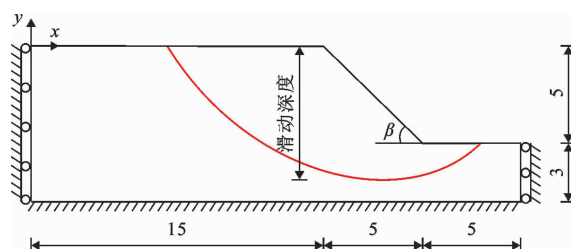


图1 45° 边坡模型及对应的边界条件(单位:m)

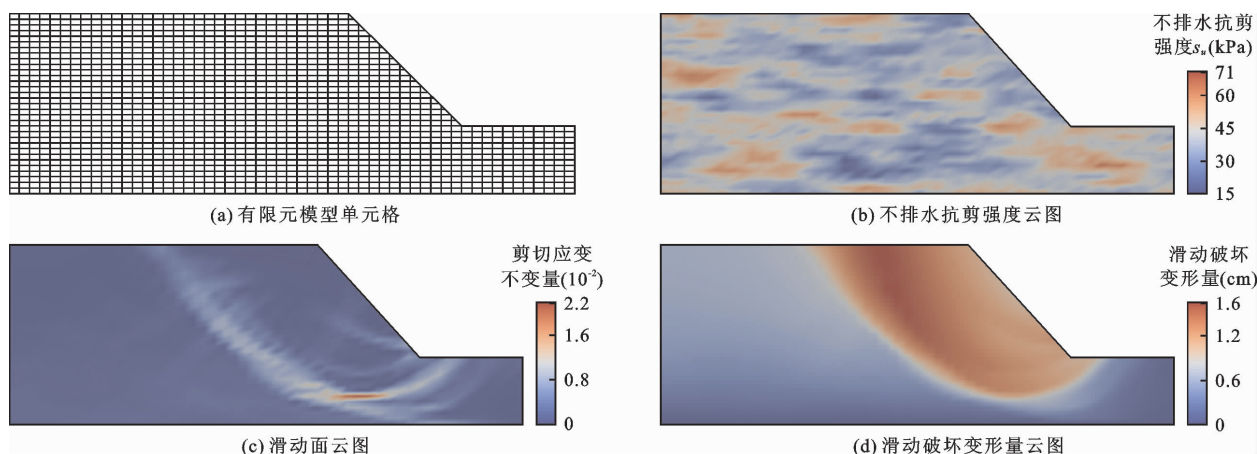


图2 有限元程序计算 45° 边坡的单元格和可视化云图

4.2 算例参数定义和数值选取

4.2.1 各向异性 一般地,各向异性表示空间内两点在水平和垂直方向上的相关性差异程度。已有研究^[25-26]给出了各向异性程度值 ξ 的定义,即水平方向相关距离与垂直方向相关距离的比值,可表达为:

$$\xi = \frac{\theta_h}{\theta_v} \quad (13)$$

蒋水华等^[16]研究总结了国内外一些土体抗剪强度参数水平和垂直相关距离的实例取值范围,一般来说,饱和黏性土坡的垂直相关距离 θ_v 取值在 $0.1 \sim 3.0 \text{ m}$ 范围内较为合适;水平相关距离 θ_h 取值在 $1 \sim 50 \text{ m}$ 范围内较为合适。所以,本文选取垂直相关距离 $\theta_v = 1 \text{ m}$,水平相关距离 θ_h 分别取值为 $1, 2, 4, 8, 12, 16, 50 \text{ m}$,对应的各向异性值 ξ 分别为 $1, 2, 4, 8, 12, 16, 50$ 。

4.2.2 边坡坡度 Yuan等^[27]基于Taylor绘制稳定数图表,得到了改进的边坡稳定数曲线。该曲线呈现出了深层(坡趾)破坏和浅层(坡面)破坏的临

界坡度分界线,其对应的均质边坡临界坡度为 $\beta_E = 53.6^\circ$,可见边坡坡度的选取是需要通过慎重考虑的。本文考虑土体强度参数的空间变异性及深度依赖性时边坡坡度是间接性影响因素,所以,选取具有代表性的4组坡度 $\beta = 27^\circ, 45^\circ, 63^\circ$ 和 72° (竖直与水平方向坡比为 $1:2, 1:1, 2:1$ 和 $3:1$)。

4.2.3 滑动面、滑动深度和滑动体积 本文采用的RFEM程序通过辐射扫描方法^[26]获取滑动破坏面:通过列举反演确定最合适的辐射原点 $O(x_0, y_0)$,从 O 点出发向边坡坡趾辐射,通过计算找到辐射线与有限元单元格交汇的剪切应变不变量的最大值点,经顺时针旋转并重复这一过程,连接所有最大值点,直至获得一条较为平滑的轨迹,该轨迹即为边坡的潜在滑动面。图3为RFEM程序4组坡角的边坡滑动面示意图的随机实例,该图进一步验证了RFEM程序在搜索潜在滑动面时的准确性。

自然破坏形成的滑坡滑动面最低点与坡顶之间的垂直距离定义为该滑坡滑动面的滑动深度^[26]

(depth of the failure surface)。图 1、图 2(c)、2(d) 和图 3 直观地显示了滑动深度和滑动体积。为了使结论更加一般化和更具有普适性,对滑动体积进行归一化处理(normalization),不妨假设边坡的归一化滑动体积 V_N 为无量纲量,即滑动面上部滑动体的体积 V' 与边坡模型总体积 V 的比值:

$$V_N = \frac{V'}{V} \quad (14)$$

4.3 确定性分析

在进行有限元确定性分析时,均质边坡不排水

抗剪强度 s_u 的均值 $\mu = 40$ kPa,标准差 $\sigma = 0$ 。如图 4 所示,RFEM 可以得到 4 组坡度边坡滑动面的具体位置和滑动深度,图 4 中弧线表示边坡土体的剪切应变不变量的最大值线(最危险滑动面)。表 1 列出了该 4 组坡度均质边坡的滑动深度,这一数据可较为准确地描述前人^[26]研究均质边坡时获得的滑坡滑动深度,表 1 还给出了 4 组坡度边坡的总体积 V 、均质边坡模型下的滑动体积 V' 和归一化滑动体积 V_N 。需要说明的是,后续内容中描述的滑动体积均指无量纲归一化量 V_N 。

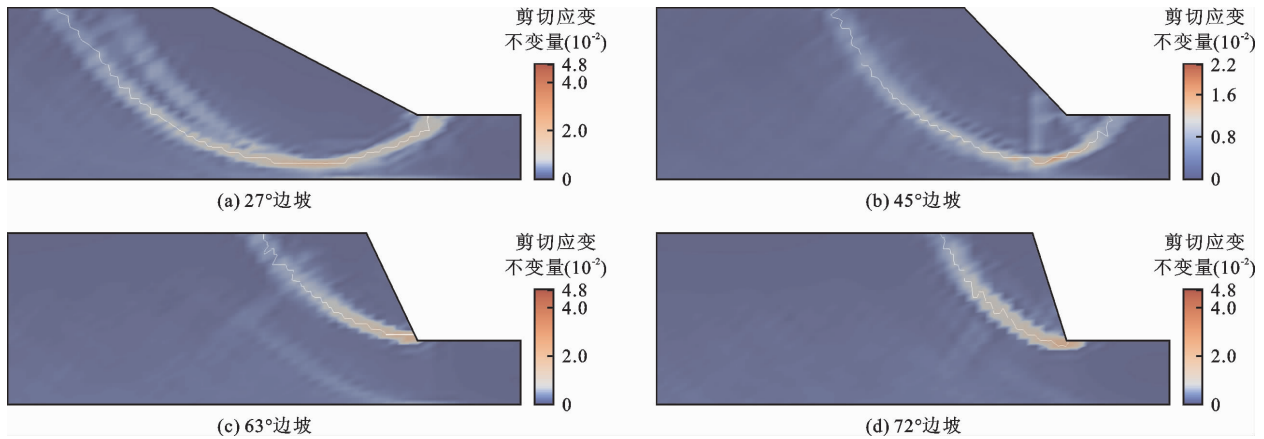


图 3 RFEM 程序 4 组坡角的边坡滑动面示意图

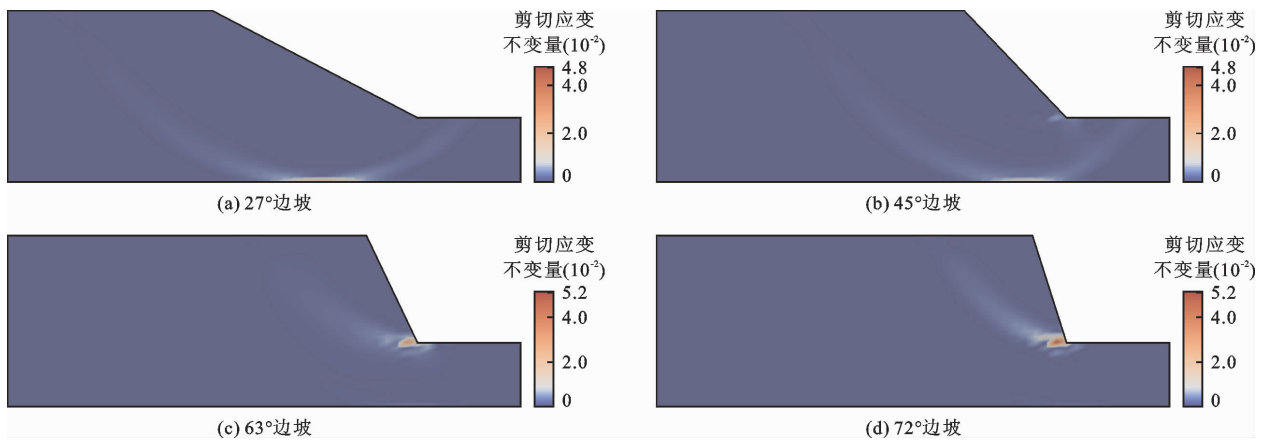


图 4 RFEM 程序 4 组坡角的土体剪切应变不变量最大值线

表 1 4 组坡度均质边坡的滑动深度和滑动体积

边坡坡度/(°)	滑动深度/m	总体积 V/m^3	滑动体积 V'/m^3	归一化滑动体积 V_N
27	8	150.00	101.5	0.677
45	8	162.50	84.7	0.521
63	5	168.75	16.8	0.099
72	5	170.80	7.1	0.042

4.4 不确定性分析

在不确定性随机分析中,为了更好地揭示非平稳随机场的相关规律,建立具有空间变异性的平稳随机场模型 Model 0 作为参照,根据公式(9)~(12),假设 Model 0 中 s_u 的均值 $\mu = 40$ kPa,标准差 $\sigma = 8$ kPa,变异系数 C_v 为 0.2,不排水抗剪强度变化率 $b = 0$ 。为了对非平稳随机场进行充分必要的研究,使对比研究更具有说服力,同时建立两个非平稳随机场模型

Model 1 和 Model 2,分别选取不排水抗剪强度变化率 $b = 0.125$ 和 $b = 0.250$ 。在参数数值选取时,保证了两个非平稳随机场均值和标准差的中值与平稳随机场保持一致,即当 $z = 4$ m 时, $\mu = 40$ kPa, $\sigma = 8$ kPa。图 5 为随机场模型 Model 0、Model 1 和 Model 2 的土体不排水抗剪强度参数统计值随深度的变化关系,满足公式(10)和(11)相关规律。

在不确定性分析中,基于上述参数的定义和取值,将 3 个模型对应的 4 组坡度和 7 组各向异性值设定输入 RFEM 程序中,对每一组确定参数经过验证均值和标准差趋于平稳的 300 次 Monte - Carlo 模

拟(共计 25 200 次模拟),得到对应的滑动深度和滑动体积。

图 6 为 Model 0、Model 1 和 Model 2 的不排水抗剪强度有限元模型的典型示例。由图 6(a)、6(c)、6(e)可看出,Model 0 中的红色和蓝色区域在深度方向上分布均匀(红色至蓝色表示不排水抗剪强度由大到小变化),Model 1 和 Model 2 的红色区域则在深度方向上逐渐增大;由图 6(b)、6(c)、6(f)可知,滑动面均是沿着相应图 6(a)、6(c)、6(e)中的蓝色区域生成的,Model 0、Model 1 和 Model 2 模型的滑动面在逐渐上移。

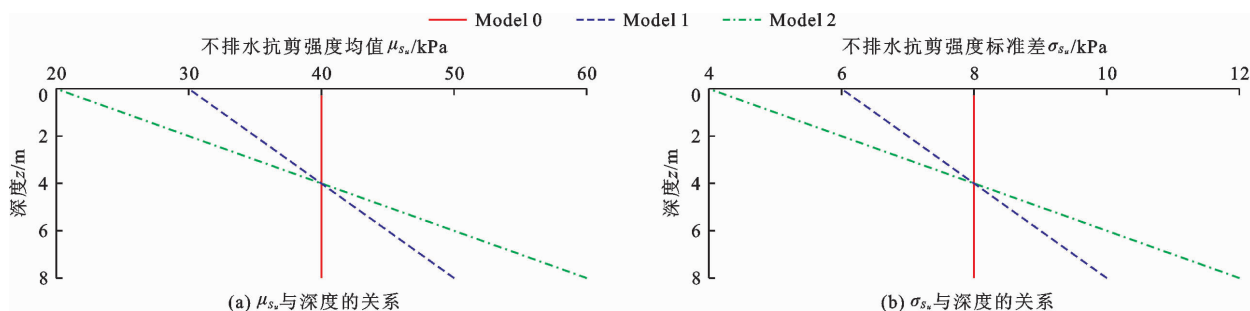


图 5 3 个随机场模型土体不排水抗剪强度参数统计值随深度的变化关系

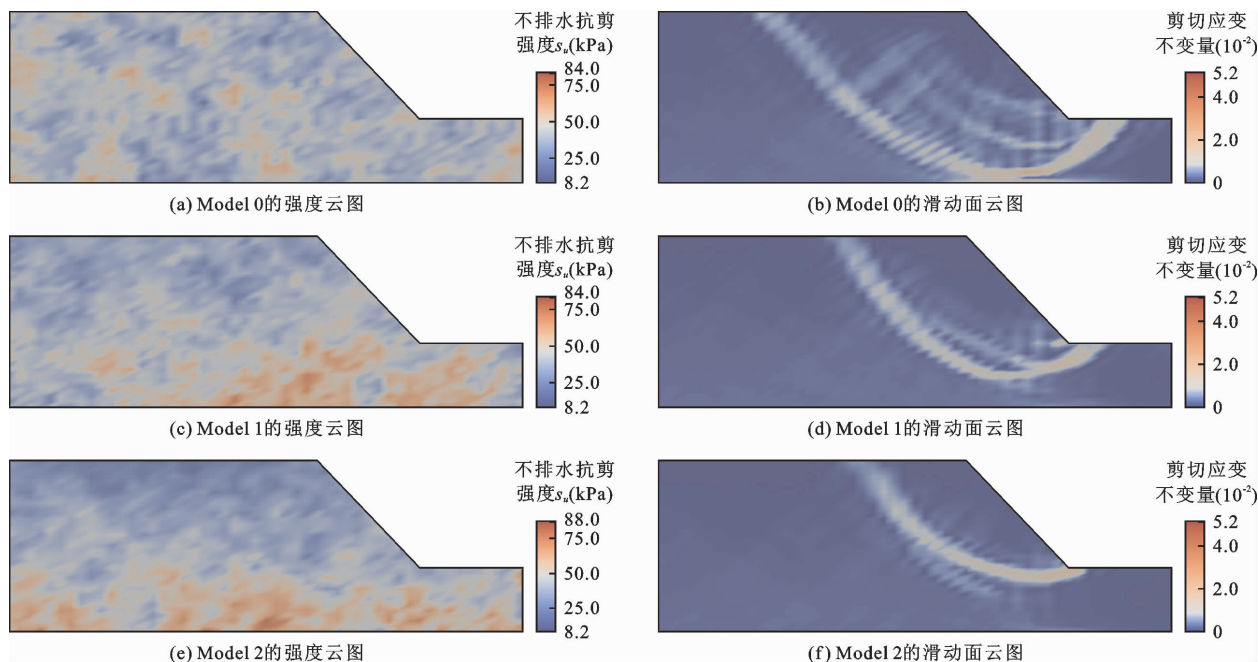


图 6 45°边坡 3 个随机场模型的不排水抗剪强度和滑动面云图

4.4.1 小坡度(平缓)边坡分析 为了便于研究边坡深层滑动破坏的一般规律,本节针对 27°和 45°小坡度的随机场边坡进行计算分析。为了直观地了解到每一组确定的参数下得到的 300 次 Monte - Carlo 模拟实现后的滑动深度和滑动体积结果,图 7 给出了 Model 0、Model 1 和 Model 2 模型在各向异性值 ξ

$= 1$ 、坡度 $\beta = 27^\circ$ 时的滑动深度和滑动体积的频数分布直方图,滑动体积正态分布拟合曲线与随机场的统计结果吻合度较高。

分析图 7 可知,边坡各向异性值 $\xi = 1$ 、坡度 $\beta = 27^\circ$ 条件下,不排水抗剪强度深度变化率 b 由 0 增加到 0.250 时,边坡滑动深度和滑动体积的均值

在逐渐减小。综合而言,其他条件不变时,不排水抗剪强度参数的深度依赖性越高(变化率 b 越大),边坡潜在平均滑动深度和体积呈现一致性(一定程度的正相关)。

为了更加具体地分析滑动深度和滑动体积的一致性,图8给出了各向异性值 $\xi = 1$ 、坡度 β 分别为 27° 、 45° 条件下3个随机场模型的 Monte - Carlo 结果散点图及其拟合曲线。

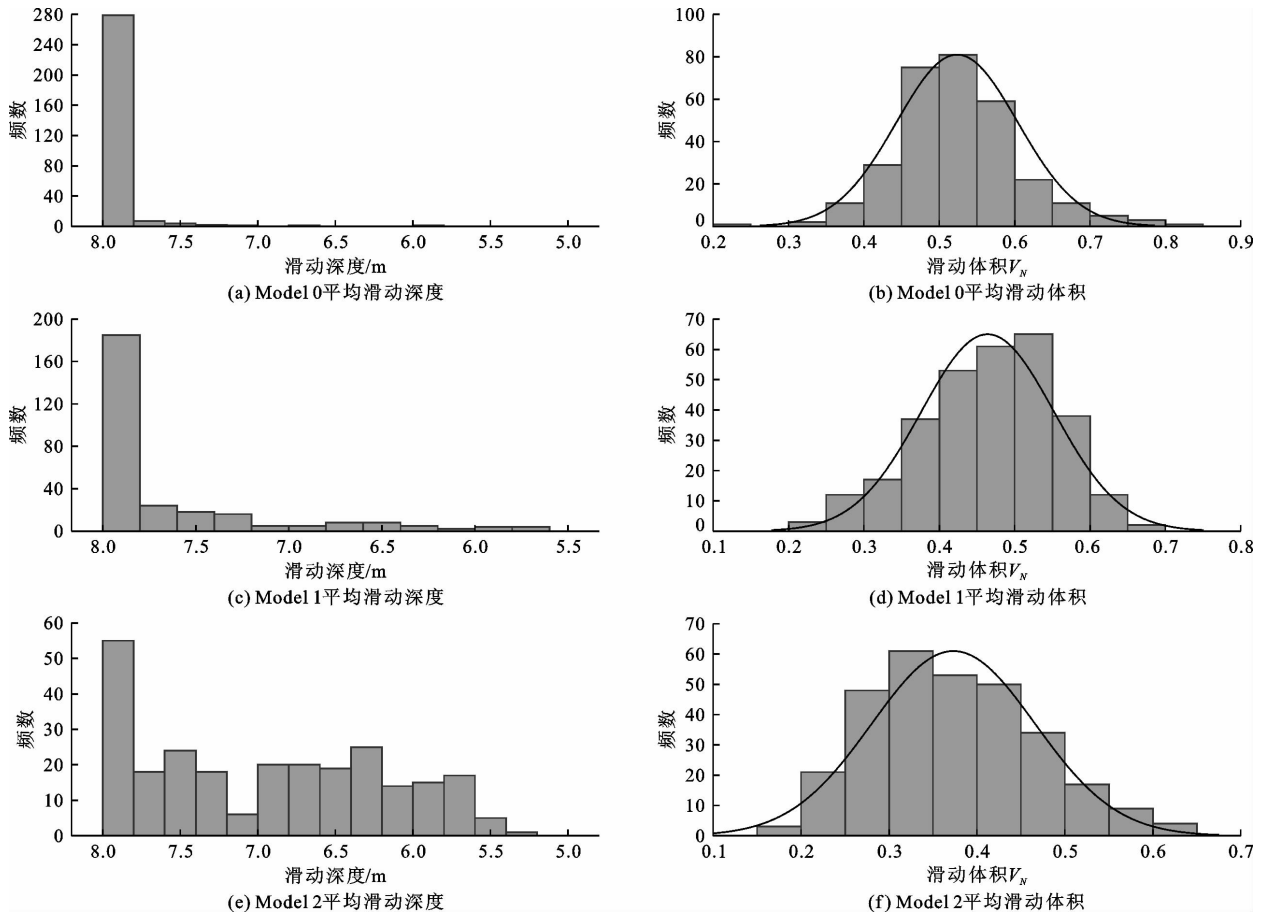


图7 27° 边坡3个随机场模型滑动深度和滑动体积的频数分布直方图($\xi = 1$)

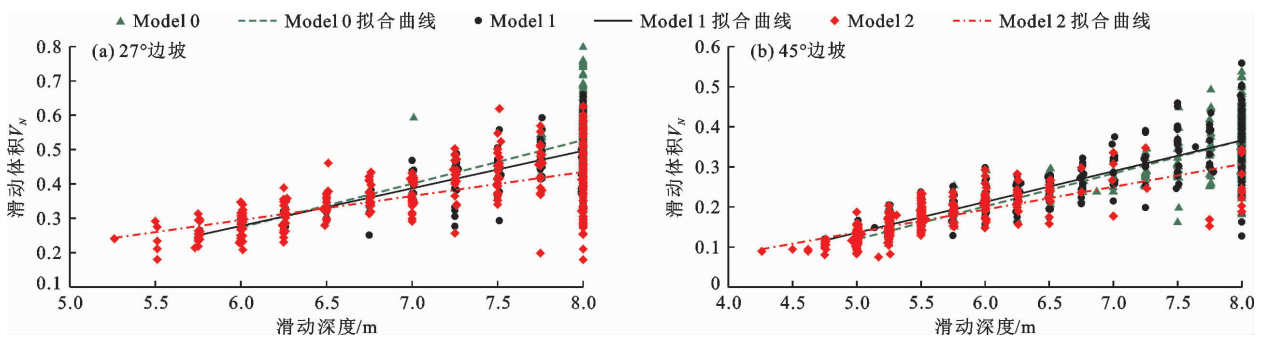


图8 3个随机场模型 Monte - Carlo 结果散点图及其拟合曲线($\xi = 1$)

综合分析图7、8,当深度依赖性程度增大时(变化率 b 增大时),边坡最危险滑动面在逐渐向浅层移动,深层滑动的概率在逐渐减小,滑动深度和滑动体积在逐渐减小,二者具有一定程度的正相关。

基于固定坡度的边坡,不仅需要考虑到参数深度依赖性对滑坡的滑动深度和滑动体积的影响,空

间变异性(各向异性)对滑动深度和滑动体积的影响也不容忽视。

当坡度 β 分别为 27° 和 45° 时,Model 0、Model 1、Model 2 随机场边坡和均质边坡4组土体强度参数边坡的滑动深度和滑动体积随着各向异性的变化规律如图9所示。

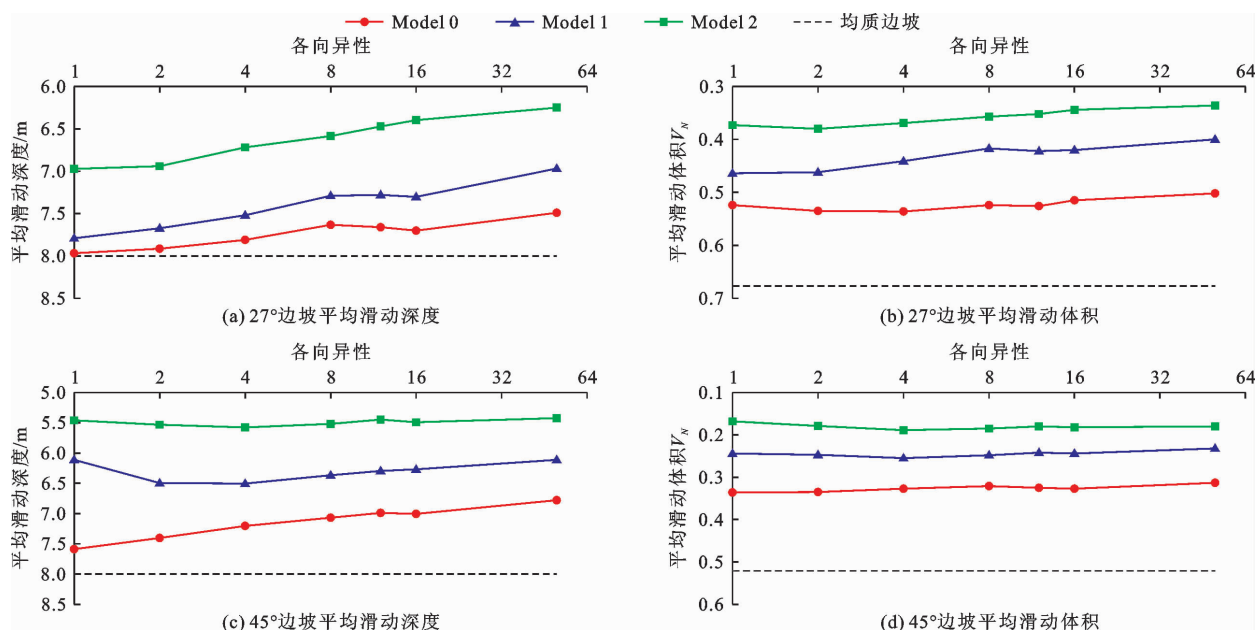


图9 4组土体强度参数边坡的滑动深度和滑动体积随着各向异性的变化规律($\beta = 27^\circ$ 、 45°)

由图9可知,均质边坡的滑动深度和滑动体积明显较大,而在考虑土体强度参数深度依赖性、不排水抗剪强度深度变化率 b 由0增加到0.250时,边坡平均滑动深度和滑动体积在不断减小。说明用均质边坡来研究工程实况过于理想化,一般情况下土体具有一定的软弱夹层和自然因素的沉降挤压趋势,仅仅使用均质模型来研究小坡度(平缓)边坡的滑动深度和滑动体积得到的结果是偏大、过于保守的,对实际灾害评估的准确性不高。

根据图9(a)、9(c)可知,边坡平均滑动深度随着各向异性的增加在不断减小;根据图9(b)、9(d)可知,边坡平均滑动体积随着各向异性的增加基本保持不变。由于各向异性值的增加是通过增大水平相关距离来实现的,边坡土体在水平方向上的相关性在不断增大,较好地表征了软弱夹层沿水平方向延伸的相关性,增大各向异性虽然使得在竖直方向的滑动深度减小,却增大了水平方向的滑动范围,二者的影响互相制约,使得滑动体积的变化基本保持稳定。从图9中 27° 与 45° 边坡的对比发现,无论各向异性如何变化,边坡坡度越大,滑动深度和滑动体积均越小。

综合分析图9了解到,滑动体积在正态分布的拟合度较高。从自然土体的实际出发,探究这种变化原因:当坡度不断增大时,随着各向异性的增大,即水平方向的相关程度在不断增加,土坡内的软弱夹层不确定性增强。

4.4.2 大坡度(陡峭)边坡分析 为便于研究边坡沿坡脚浅层滑动的一般规律,本节针对 63° 和 72° 大

坡度的随机场边坡进行计算分析。图10给出了Model 0、Model 1和Model 2模型在各向异性值 $\xi = 1$ 、坡度 $\beta = 63^\circ$ 时的滑动深度和滑动体积的频数分布直方图。

大坡度(陡峭)边坡普遍为浅层滑动,如图10(a)、10(c)、10(e)所示,滑动深度为4.5~5 m的概率较大。但是,在平稳随机场Model 0中(图10(a)),仍然有较大概率率为深层滑动,这也导致了其滑动体积分布范围较广,进而使得正态分布拟合度较小。从非平稳随机场模型Model 1和Model 2中可以发现,随着不排水抗剪强度深度变化率 b 的增大,滑动深度和滑动体积均在减小。总体而言,当不排水抗剪强度深度变化率 b 从0增大到0.250时,滑动深度和滑动体积均在减小,预测的实际结果较为集中。

当坡度 β 分别为 63° 和 72° 时,Model 0、Model 1、Model 2随机场边坡和均质边坡4组土体强度参数边坡的滑动深度和滑动体积随着各向异性的变化规律见图11。

由图11可知,大坡度(陡峭)边坡的各向异性对滑动深度和滑动体积影响较小。在随机场分析时,若只考虑空间变异性(各向异性),即Model 0的情形,分析得到的结果与均质边坡和非平稳随机场的结果不相符,可能导致较大的预测误差。非平稳随机场的滑动深度和滑动体积与均质边坡结果较为相符。因此,在滑坡风险后果评估过程中,如实际条件有限或时间紧迫,可以基于均质边坡分析结果进行初步预估,所得结果亦较为准确。

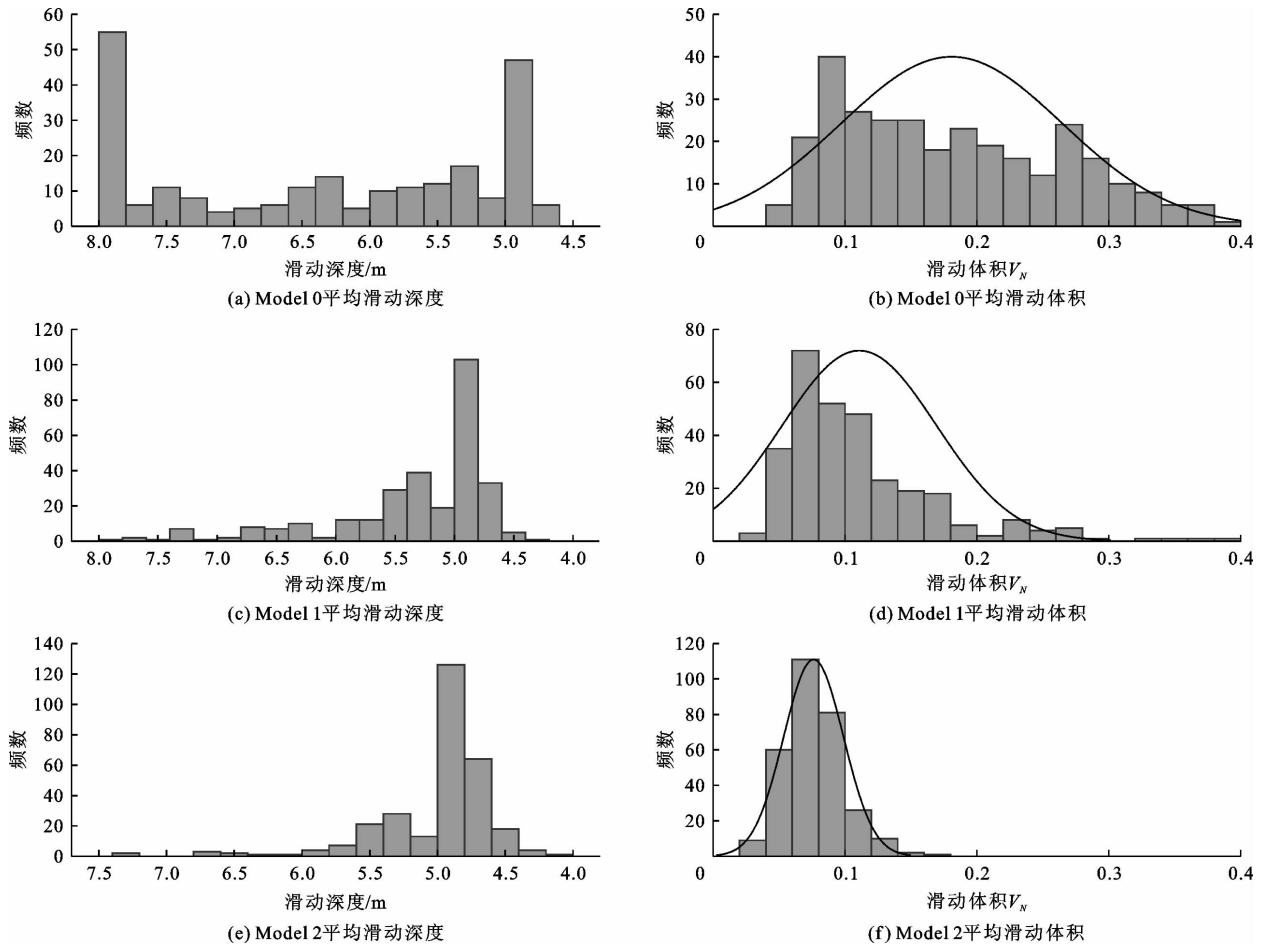


图 10 63°边坡 3 个随机场模型滑动深度和滑动体积的频数分布直方图 ($\xi = 1$)

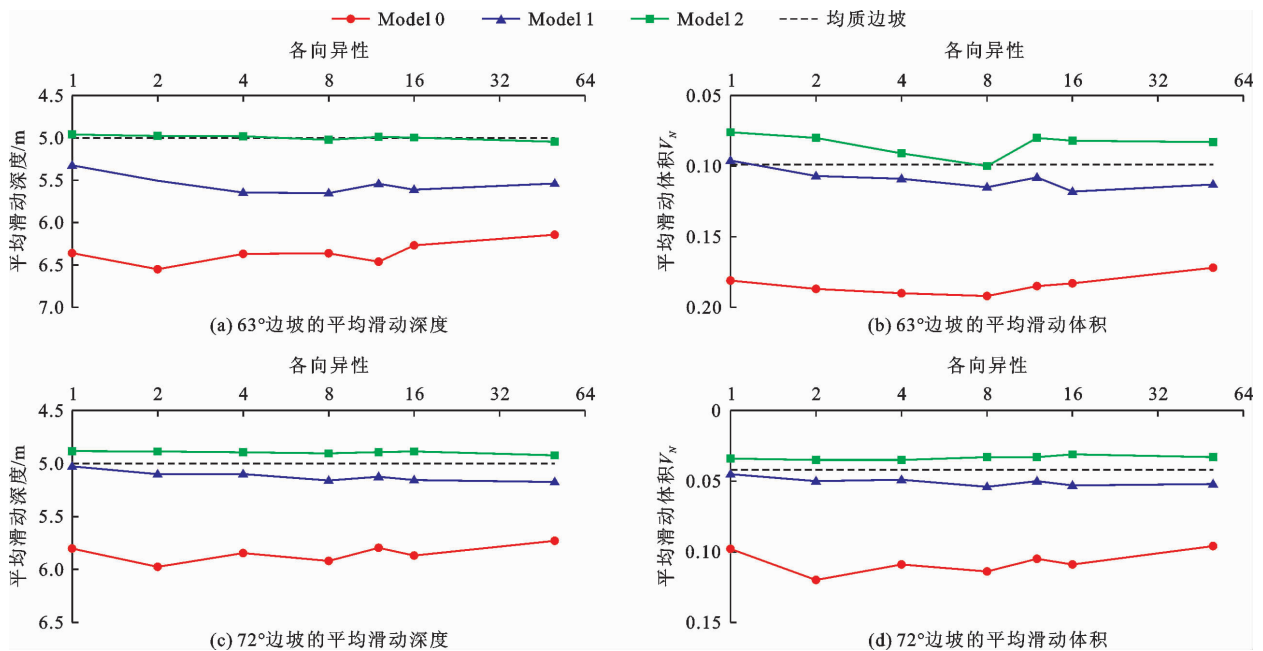


图 11 4 组土体强度参数边坡的滑动深度和滑动体积随着各向异性的变化规律 ($\beta = 63^\circ, 72^\circ$)

5 结 论

(1) 建立了模拟具有深度依赖性的土体强度参

数边坡或具有软弱夹层边坡的随机有限元非平稳随机场模型,基于随机场模拟结果讨论了不同坡度的滑动深度和滑动体积,为地质灾害风险及后果评估

体系中不同各向异性值或不排水抗剪强度变化率边坡工况提供了分析的新角度。

(2)分析27°和45°坡度的滑坡失效后果时,仅考虑均质边坡的结果是保守的。考虑土体强度参数的空间变异性和非平稳性时,尤其在45°和63°边坡中,滑坡失效后果的不确定性较大,在工程实践中要重点考虑。

(3)对于不同坡度的随机场边坡,随着参数的深度依赖性程度增大(变化率 b 增大),边坡平均滑动深度和滑动体积逐渐减小。在大坡度滑坡风险后果评估过程中,可以基于均质边坡分析结果进行初步预估。

(4)在非平稳随机场中,随着各向异性的增大,边坡土体在水平方向上的相关性不断增大,较好地表征了软弱夹层沿水平方向延伸的相关性,软弱夹层不确定性增强,增大了水平方向的滑动范围。

参考文献:

- [1] 陈朝晖,雷坚,黄景华,等.考虑参数空间变异性的边坡稳定可靠性有限元极限分析[J].岩土工程学报,2018,40(6):985-993.
- [2] LI Yajun, QIAN Cheng, FU Zhongzhi, et al. On two approaches to slope stability reliability assessments using the random finite element method [J]. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4421.
- [3] 袁威,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.
- [4] 王旭,刘东升,宋强辉,等.基于极限平衡法的边坡稳定性可靠度分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):839-844.
- [5] HICKS M A, LI Yajun. Influence of length effect on embankment slope reliability in 3D[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, 42(7): 891-915.
- [6] 陈朝晖,黄凯华.土质边坡可靠性分析的分层非平稳随机场模型[J].岩土工程学报,2020,42(7):1247-1256.
- [7] 杨亮,刘辉,章荣军,等.基于非平稳随机场的水泥土堤坝边坡可靠度分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(5):78-86.
- [8] GRIFFITHS D V, HUANG J, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis using RFEM with non-stationary random fields[C]// Geotechnical Safety and Risk V, 2015.
- [9] GRIFFITHS D V, YU Xue. Another look at the stability of slopes with linearly increasing undrained strength [J]. Géotechnique, 2015, 65(10): 824-830.
- [10] ZHU Desheng, GRIFFITHS D V, HUANG J, et al. Probabilistic stability analyses of undrained slopes with linearly increasing mean strength [J]. Géotechnique, 2017, 67(8): 733-746.
- [11] DYSON, A P, TOLOOIYAN A. Probabilistic investigation of RFEM topologies for slope stability analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 114: 103129.
- [12] 豆红强,王浩.非平稳随机场下饱和渗透系数空间变异性的无限长边坡稳定概率分析[J].土木工程学报,2017,50(8):105-113+128.
- [13] 蒋水华,曾绍慧,杨建华,等.不排水抗剪强度非平稳随机场模拟及边坡可靠度分析[J].岩土力学,2018,39(3):1071-1081.
- [14] VARKEY D, HICKS M A, VARDON P J. An improved semi-analytical method for 3D slope reliability assessments [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111: 181-190.
- [15] BURGESS J, FENTON G A, GRIFFITHS D V. Probabilistic seismic slope stability analysis and design [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(12): 1979-1998.
- [16] 蒋水华,李典庆,曹子君,等.考虑参数空间变异性的边坡可靠度及其敏感性分析多重响应面法[J].防灾减灾工程学报,2015,35(5):592-598.
- [17] WU Shihhsuan, OU Changyu, CHING Jianye, et al. Reliability-based design for basal heave stability of deep excavations in spatially varying soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(5): 594-603.
- [18] CHEN Jinjian, ZHANG Lianyang. Effect of spatial correlation of cone tip resistance on the bearing capacity of piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(3): 494-500.
- [19] SALGADO R, KIM D. Reliability analysis of load and resistance factor design of slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(1): 57-73.
- [20] 钱雪晋,蔡征龙.考虑块石随机空间分布的土石混合体边坡稳定性研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):200-205.
- [21] 王占盛,陈健,戎虎仁,等.土性参数各向异性随机场的表征与建模方法[J].计算力学学报,2021,38(1):29-36.
- [22] HE Pengpeng, FENTON G A, GRIFFITHS D V. Calibration of resistance factors for bearing resistance design of shallow foundations under seismic and wind loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59(7): 1243-1253.
- [23] 李亚军,刘斯宏,傅中志,等.多层地基土坡的随机有限元模型不同参数比较分析(英文)[J].岩土工程学报,2014,36(1):162-169.

(下转第192页)

- comprehensive evaluation considering misjudgment losses: a case study[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15: 421.
- [20] ZHANG Xuan, WANG Chengbing. Safety risk assessment of highway tunnel deep shaft construction[J]. *Science Discovery*, 2018, 6(6): 593–598.
- [21] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物地下开挖工程施工规范: SL 378—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [22] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道风险评估与管理暂行规定(铁建设[2007] 200号)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [23] 欧智勇, 傅鹤林, 黄震, 等. 浅埋暗挖隧道施工风险综合评价方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(9): 2368–2377.
- [24] 中华人民共和国国务院. 生产安全事故报告和调查处理条例(国务院令 493号)[S]. 北京: 国务院, 2007.
- [25] 何乐平, 徐应东, 胡启军, 等. 基于博弈论-云模型的软岩隧道大变形风险评估[J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(6): 85–94.
- [26] 陆丽丽, 靳春玲, 贡力, 等. 基于改进 G2-AEW-UMT 模型的引水隧洞结构安全评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 172–178.
- [27] LI Shucai, WU Jing, XU Zhenhao, et al. Unascertained measure model of water and mud inrush risk evaluation in karst tunnels and its engineering application[J]. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21: 1170–1182.
- [28] 靳春玲, 李燕, 贡力, 等. 基于 UMT 模型的幸福河绩效评价及障碍因子诊断[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1466–1476.

(上接第 183 页)

- [24] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Risk assessment in geotechnical engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [25] LI Yajun, FENTON G A, HICKS M A, et al. Probabilistic bearing capacity prediction of square footings on 3D spatially varying cohesive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(6): 04021035.
- [26] 曾勇, 李亚军, 刘翔宇, 等. 岩土参数空间变异性对滑坡滑动深度的影响[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(1): 167–175.
- [27] YUAN Wei, LI Zonghong, NIU Jiandong, et al. Rapid calculation method for the factor of safety of a uniform slope[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(7): 06020012.

