

土体参数空间变异性对滑坡稳定性影响分析

田雨¹, 赵付万², 眭素刚^{3,4}, 陈刚¹, 龚红胜¹, 周贲¹

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南省公路工程监理咨询有限公司, 昆明 650021;

3. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 昆明 650224;

4. 云南省岩土工程与地质灾害重点实验室, 昆明 650224

摘要: 由于自然界中土体参数空间分布具有差异性, 在滑坡稳定性分析中, 传统方法对同一层岩土体赋值统一参数, 忽视了空间变异性的计算结果难免会存在较大的误差。为此, 研究考虑土体参数空间水平变异性, 基于地质统计学中的区域化变量理论, 以云南省柳树塘滑坡为工程背景, 选取克里金插值法、反距离加权插值法和径向基函数插值法, 通过插值黏土层和粉质黏土层中黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 值等参数, 分别获取该层土体未知点处参数值, 结合数值模型分析传统方法和插值法赋值参数的滑坡变形情况。研究结果表明: 滑坡变形分析中考虑参数空间水平变异性明显优于传统方法; 对于土体强度参数黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 值的空间水平变异性, 反距离加权插值法较径向基函数插值法和克里金插值法好。

关键词: 空间变异性; 插值法; 滑坡稳定性分析; 数值模拟

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

Analysis of the Impact of Spatial Variability of Soil Parameters on Landslide Stability

TIAN Yu¹, ZHAO Fuwan², SUI Sugang^{3,4}, CHEN Gang¹, GONG Hongsheng¹, ZHOU Ben¹

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Highway Engineering Supervision and Consultancy Co., Ltd., Kunming 650021, China;

3. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metal Industry Co., Ltd., Kunming 650224, China;

4. Key Laboratory of Geotechnical Engineering and Geological Hazards, Kunming 650224, China

Abstract: Due to the variability in the spatial distribution of soil parameters in nature, traditional methods in landslide stability analysis assign uniform parameters to the same layer of soil and rock, neglecting spatial horizontal variability, which inevitably leads to significant errors in calculation results. Thus this paper considers the spatial horizontal variability of soil parameters and, based on the theory of regionalized variables in geostatistics, selects the Liushutang landslide in Yunnan Province as the engineering background. It employs Kriging interpolation, inverse distance weighted interpolation, and radial basis function interpolation to interpolate parameters

收稿日期: 2024-10-08 改回日期: 2024-10-24

基金项目: 云南省重点研发计划(202203AC100003); 云南省基础研究专项(202301AS070008)

第一作者: 田雨(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程地质。E-mail: tian_y2024@163.com

通讯作者: 陈刚(1981-), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为水文地质及地质灾害。E-mail: chen_kust@qq.com

引文格式: 田雨, 赵付万, 眭素刚, 等. 土体参数空间变异性对滑坡稳定性影响分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(2): 20-30.

TIAN Yu, ZHAO Fuwan, SUI Sugang, et al. Analysis of the impact of spatial variability of soil parameters on landslide stability[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(2): 20-30.

such as cohesion (c) and internal friction angle (φ) in clay and silty clay layers, thereby obtaining parameter values at unknown points within these layers. These values are then used in combination with numerical models to analyze the landslide deformation when parameters are assigned using both traditional methods and interpolation methods. The research results indicate that considering the spatial horizontal variability of parameters in landslide deformation analysis is significantly superior to traditional methods. For the horizontal spatial variability of soil strength parameters, such as cohesion (c) and internal friction angle (φ), the inverse distance weighted interpolation method performs better than radial basis function interpolation and Kriging interpolation.

Key words: Spatial variability; Interpolation method; Landslide stability analysis; Numerical simulation

0 引言

作为天然材料的岩土体, 经过漫长的地质演化结合物理化学等综合作用后, 同一区域, 在不同的历史时期不仅形成的岩土层类型不同, 仅仅同一层相近位置的物理力学参数也会有所不同, 即土体属性在空间中会存在空间变异性^[1-3]。

当研究区域岩土体参数较为均一时, 考虑参数空间变异性往往对结果影响较小。当岩土体参数出现高度非均值的情况, 不连续面和较弱的材料可能会显著削弱工程岩土结构(如边坡、隧道和基础)的稳定性^[4-6]。传统的确定性分析用安全系数来评价边坡的稳定性, 不能充分考虑岩土体的不确定性^[7-8]对边坡稳定性的相对重要性, 导致部分边坡即使安全系数很高却还是发生失稳破坏^[9]。因此, 本研究仍然采用均值参数对工程进行分析, 其结果将会与实际情况产生较大误差。

Lumb 做了大量研究统计后证实岩土体材料的参数存在着空间上的差异变化^[10-11], 这种差异性即岩土体所体现出的空间变异性。尽管岩石和土壤中每一点的物理特性都是固定值, 但在实际工程中不可能做到对每一点进行取样^[12], 然而大量统计结果表明, 岩土体参数具有一定统计特征^[13-14]。对于岩土参数所表现出来的空间变异性, 可以利用随机场理论和地质统计学中的区域化变量理论两种方法进行描述, 进而开展相应的岩土工程稳定性分析。

Vanmarcke 创造性地提出了随机场模型来描述岩土体参数空间变异性^[15]。近年来学术界在此方面取得了较为丰富的成果^[16-18], 但其涉及试验数据类型较多、计算量庞大、计算效率低下等缺陷, 并且实际工程要考虑成本、时间等因素, 施工单位在满足相关规范前提下, 所做试验不一定能满足随机场模拟的

需求。故现阶段考虑岩土体参数空间变异性多数都只是对简单滑坡体进行空间变异性研究, 将岩土体强度参数的空间变异性应用于实际边坡工程研究较少^[19]。由于随机场理论通常用均值、变异系数和波动范围等描述参数空间变异性, 这就导致随机场模拟出来的参数与实际试验点位置处的参数值并不一定相同。其结果可能导致本该发生变形的区域反而变得稳定。

本文从实际工程出发, 基于空间变异性考虑同一位置处模拟后参数值与实际值相同, 采用随机变量来表示岩土体参数, 常用方法有 midpoint 法、加权积分法、K-L 级数展开法、局部平均细分法以及插值法等。尽管局部平均法因对实测数据的要求较低, 且计算具有收敛快、精度高的特点, 广泛应用于工程领域尤其是岩土工程领域中^[20-21], 但是在精度方面, 只要选择合适的插值函数, 插值法通常会表现出更好的效果^[22]。同时经插值法生成的参数满足同位置试验参数值一致的要求, 并且插值法因为简单易懂、易于实现, 可以快速且有效地分析大量数据等优点被广泛使用, 尤其是在岩土工程中应用较为广泛的克里金插值法^[23-24], 反距离加权插值法对滑带土黏聚力的插值同样表现出较好的效果^[19]。因此, 本文以云南省柳树塘滑坡为例, 基于地质统计学中常见的空间插值法——克里金插值法、反距离加权插值法和径向基函数插值法, 考虑参数空间水平变异性。

1 滑坡地质概况

滑坡区(H1)位于永胜县西南侧柳树塘村庄北部山腰, 滑坡位置坐标为东经 100°42'58", 北纬 26°35'17", 如图 1(a)所示。滑坡在平面上呈现半圆形, 地势呈北高南低, 上陡下缓, 滑坡主滑方向为

188°, 滑坡坡角平均为 26°, 最大坡角为 35°。滑坡前后缘高差约 103 m, 主轴长约 220 m, 宽为 180~220 m, 厚为 10~25 m, 平面面积约为 33 588 m², 体积约为

5.896×10⁵ m³。滑坡上布置 ZK01~ZK30 共计 30 个钻孔, 另布置 JC01、JC02、JC03 和 JC04 共 4 个监测点, 这 4 个监测点的位移方向与坡向一致, 如图 1(b) 所示。

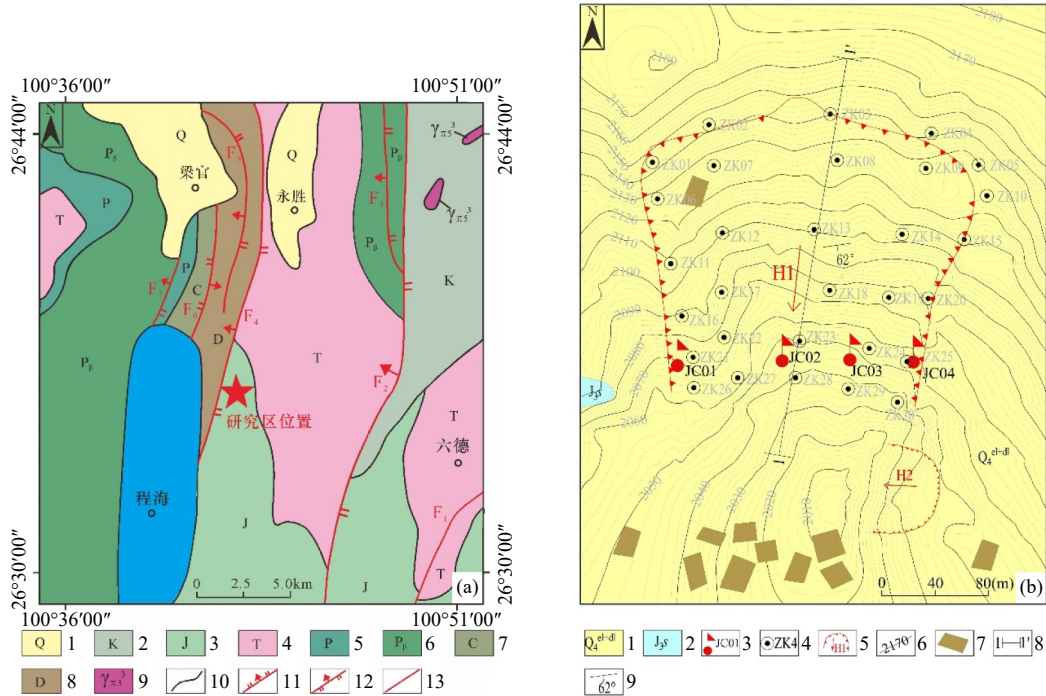


图 1 柳树塘滑坡工程区域地质构造和地质平面图

注: 图(a)为滑坡所在区域地质构造, 1. 第四系; 2. 白垩系; 3. 侏罗系; 4. 三叠系; 5. 二叠系; 6. 二叠系玄武岩; 7. 石炭系; 8. 泥盆系; 9. 燕山期花岗岩; 10. 地质界线; 11. 正断层; 12. 逆断层; 13. 主干断层。图(b)为在 2 m 等高线间隔的地图上滑坡区的地质特征, 1. 第四系残坡积层; 2. 侏罗系上统蛇甸组; 3. 监测点位置及编号; 4. 钻孔位置及编号; 5. 滑坡边界; 6. 等高线; 7. 建筑; 8. 剖面线; 9. 岩层产状

1.1 滑坡区地层岩性

滑坡区出露地层相对简单, 主要为第四系全新统残坡积层(Q₄^{el+dl})及侏罗系上统蛇甸组(J_{3s}), 如图 2 所示。

第四系出露的岩性浅表层为黏土, 局部含少量砾石, 黏土层厚 2.3~13.6 m; 较深者为粉质黏土, 局部可见漂石, 粉质黏土层厚 4.5~17.4 m。侏罗系上统蛇甸组岩性为浅紫色中厚层状细粒石英砂岩夹泥

质砂岩、砂质页岩, 岩层倾向为 172°, 倾角为 62°。

1.2 滑坡区特征

该滑坡滑动迹象明显, 有明显滑坡后缘。两侧地形均为陡坎; 滑坡体横、纵向均呈台阶状, 台高 0.5~2 m, 坡面高低不平, 滑坡平台有向下缓倾的现象。滑坡为土质滑坡, 其滑动面为土石界面, 纵向上滑面呈折线形, 总体倾斜方向近南北向, 倾角 15°~35°, 深 10~25 m; 滑面主要沿第四系残坡积层(Q₄^{el+dl})与侏罗系砂岩分界面发育, 滑床主要为侏罗系砂岩, 如图 2 所示。

该地区水文地质资料表明, 地下水主要为碎屑岩类裂隙水与松散岩类孔隙水, 碎屑岩类裂隙水以节理裂隙发育的砂岩层为主要含水层, 主要接受大气降水补给; 松散岩类孔隙水, 主要接受大气降雨垂直补给和上游基岩裂隙水侧向补给, 地下水径流方向与坡向一致。

综上, 滑坡由上到下可分为黏土层(厚 2.3~13.6 m)、粉质黏土层(厚 4.5~17.4 m)和中风化砂岩层。根据现有地质资料, 并参考已有研究成果^[25], 滑坡模型各岩土层材料参数综合取值见表 1。

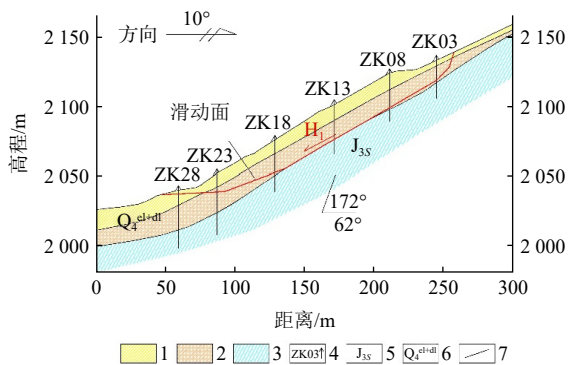


图 2 柳树塘滑坡 1-1'地质剖面图

1. 黏土; 2. 粉质黏土; 3. 砂岩; 4. 钻孔; 5. 侏罗系上统蛇甸组; 6. 第四系残坡积层; 7. 地层界线

表 1 滑坡体物理力学参数表

滑坡结构	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	黏聚力 c / kPa	密度 / kg/m^3	泊松比 u	压缩模量 / MPa	弹性模量 / MPa
黏土	22.328	37.16	2005	0.302	7.86	—
粉质黏土	21.147	40.44	2001.5	0.271	7.64	—
砂岩	41.343	9740	2650	0.260	—	11118.7

1.3 滑坡区参数空间变异性

滑坡区 30 个钻孔取样试验所得黏聚力 c 及内

摩擦角 φ 统计见表 2。

整合表 2 中内容统计于表 3。由表 3 可知, 黏土层参数变异系数均达 7% 以上, 粉质黏土层参数在 5% 左右。由于该区域村落、农田较为集中, 人类活动对地质环境影响较为强烈; 另一方面, 该区域已经历过滑动, 对滑体内部结构, 表层土体等造成一定影响。最终导致地表黏土层变异性大于粉质黏土层。

表 2 各钻孔所得土体强度参数

钻孔编号	黏土黏聚力 c / kPa	黏土内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	粉质黏土黏聚力 c / kPa	粉质黏土内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	钻孔编号	黏土黏聚力 c / kPa	黏土内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	粉质黏土黏聚力 c / kPa	粉质黏土内摩擦角 $\varphi / ^\circ$
ZK01	43.9	23.77	42.64	21.5	ZK16	44.97	22.57	47.08	22.27
ZK02	47.52	23.8	—	—	ZK17	41.1	20.33	43.17	22.62
ZK03	—	—	43.76	23.13	ZK18	47.12	21.05	44.84	21.66
ZK04	47.72	22.21	44.94	22.55	ZK19	49.8	21.86	—	—
ZK05	47.75	22.16	—	—	ZK20	40.91	22.28	46.6	20.07
ZK06	46.44	20.46	49.18	22.44	ZK21	43.25	18.92	—	—
ZK07	47.19	21.93	46.81	22.53	ZK22	39.04	18.79	50.2	23.7
ZK08	42.71	21.33	—	—	ZK23	—	—	45.86	23.07
ZK09	45.67	22.92	—	—	ZK24	—	—	48.68	22.76
ZK10	—	—	47.9	22.02	ZK25	—	—	48.31	19.52
ZK11	41.64	18	46.76	22.05	ZK26	39.34	20.03	—	—
ZK12	47.98	20.28	—	—	ZK27	36.54	20.55	49.31	21.29
ZK13	43.9	20.86	42.44	22.61	ZK28	40.07	23.12	—	—
ZK14	46.84	22.57	—	—	ZK29	—	—	49.24	20.93
ZK15	43.76	23.15	—	—	ZK30	43	23.78	—	—

表 3 抗剪强度参数描述统计

滑坡结构	抗剪强度参数	统计个数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
黏土层	黏聚力 c / kPa	24	49.8	36.54	44.09	3.44	7.80%
	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	24	23.8	18	21.53	1.63	7.57%
粉质黏土层	黏聚力 c / kPa	18	50.2	42.44	46.54	2.45	5.26%
	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	18	23.7	19.52	22.04	1.07	4.85%

2 数值插值理论方法

插值法通过已知点建立合适函数, 估算出函数在其他点处的近似值, 其最大特点是插值后生成的数据不改变原有位置处数据值。

2.1 克里金插值

克里金法(Kriging)最早由南非矿山地质工程师 D. G. Kriging 和法国统计学家 G. Mantheron 教授共同研究发展, 用于寻找最佳线性无偏差估计量^[26-27]。

克里金算法通过半变差函数提供了一种很好的空间统计和插值算法, 使得克里金法在各个领域应用广泛。但是半变差函数的优劣容易受到观测数据的样本分布、数据量和人为不确定性等因素影响, 且该方法认为空间中不存在规则的连续性变化, 更多的是随机性和结构性, 且插值后的数与空间位置密不可分。该方法利用对权重的确定来使得插值函数处于最优解。

首先克里金插值法的约束条件为:

$$\begin{cases} E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \\ Var[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为坐标; h 为距离; x 与 $x+h$ 处的实测值分别表示为 $Z(x)$ 、 $Z(x+h)$, 测量值 h 处对应的半变异函数表示为 $\gamma(h)$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (2)$$

式中, h 表示距离区段; $N(h)$ 表示被 h 分割的区间数目; x_i 和 x_i+h 所对应的测试值分别为 $Z(x_i)$ 、 $Z(x_i+h)$ 。

将 $\gamma(h)$ 、 h 的值在二维坐标轴表示出来, 得到半变异函数图, 根据图可以将其拟合成纯块金效应模型、球状模型、线性模型、指数模型或高斯模型中的一种。最佳模型可以通过最小误差值确定。

普通克里金公式为:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

式中, $Z(x)$ 表示待插值点值; $Z(x_i)$ 表示第 i 个点的实测值; λ_i 表示第 i 个实测值的权重。 λ_i 满足以下关系式:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i, x_j) - \mu = C(x_i, x) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 (i=1, 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $C(x_p, x_j)$ 为实测数据点间协方差; $C(x_p, x)$ 为实测点与待插值点间协方差; μ 为拉格朗日乘子。

2.2 反距离加权插值法

反距离加权插值法^[28]基本原理为: 在以 X 与 Y 坐标控制平面位置, Z 坐标控制属性值的空间中, 将空间待插值点 $A(X_a, Y_a, Z_a)$ 作为中心点, 在研究领域范围内分布着实测点 $Q(X_p, Y_p, Z_p), i=1, 2, \dots, n$ 。根据实测点加权平均得到待插值点的属性, 权重根据两者间距离大小进行分配, 即

$$Z_A = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^k} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k} \quad (5)$$

式中, $k(0 \leq k \leq 2$ 一般取值为 2) 为距离的幂; d_i 为待插值点与第 i 个实测点间的距离; Z_i 为某 i 实测点的属性值; 其中 k 取值为 2 时, 也称为反距离加权插值法。

当用反距离加权插值法进行插值时有确切和圆滑两种方式, k 值影响着权重大小。 k 较大时, 与实测点距离较近的待测点分配的权重越大; k 较小时则将权重均匀地分配给待测点。当两者为同一点时即重合, 该实测点所分配的权重将为 1.0, 范围内其它待测点将被赋予几乎为 0 的权重, 也就是该待测点属性值即为实测点属性值, 即准确插值。

2.3 径向基函数插值

径向基函数插值(RBF)利用径向基函数逼近样本点的值, 产生一个贯穿所有样本点且总曲率最小的曲面。RBF 的特征是其响应随着距中心点的距离而单调减小。设 n 个训练数据点 g_1, g_2, \dots, g_n 的相应响应为 x_1, x_2, \dots, x_n 。RBF 可以表示为^[29]:

$$g(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \psi(r_i) = \psi(x)^T \omega \quad (6)$$

式中, $g(x)$ 表示未知点 x 处的预测响应; $\psi(r_i)$ 是径向基函数通用表达形式, 主要包括薄板样条函数、高次曲面函数、张力样条函数、反高次曲面函数和规则样条函数, $r_i = \|x - x_i\|$ 是 x 与 x_i 之间的欧氏距离; $\psi(x) = [\psi(r_1), \psi(r_2), \dots, \psi(r_n)]^T$ 是基函数向量; ω_i 表示加权系数的第 i 个元素向量, $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 。

3 土体空间变异性建模

本文主要研究土体参数空间水平变异性, 故对黏土层和粉质黏土层的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等参数进行水平插值。

参数进行插值前需满足正态分布^[30-32]。将所得岩土体强度参数进行统计分析, 并使用 3 种分布模型(正态分布、对数正态分布和威布尔分布)进行拟合(图 3、图 4), 还使用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验(K-S 检验)来研究这 3 种分布模型的拟合精度(表 4)。K-S 检验结果给出参数统计量 D 值, D 值衡量了样本经验分布函数与理论分布函数之间的最大距离。 D 值越小, 样本的分布与理论分布越接近。由表 4 可知, 正态分布 D 值总体上小于其余两种分布模型, 因此认为黏土层与粉质黏土层参数正态分布拟合度较高。

根据图 1(b)中钻孔相对位置, 分别选取克里金插值法、反距离加权插值法和径向基函数插值法等 3 种不同插值法, 在长为 450 m、宽为 350 m 范围内对黏土层和粉质黏土层的黏聚力、内摩擦角参数进行水平方向插值, 插值结果如图 5~图 8 所示。

由于普通克里金插值和径向基函数插值权重考虑建立逼近已知点函数, 而反距离加权插值法权重着重考虑点与点之间的距离关系, 结果导致克里金插值与径向基函数插值的结果较为相似。

4 算例分析

根据柳树塘滑坡地质模型, 建立数值计算模型, 如图 9(a)所示。模型长 450 m, 宽 350 m, 后缘高 221.59 m, 前缘高 107.57 m, 模型由上到下依次为黏土层、粉质黏土层和砂岩层, 采用四面体单元对模型进行网格划分, 网格划分尺寸分别为 2 m、4 m 和 6 m, 模型由 263 074 个节点和 1 397 280 个单元组成, 网格质量能够满足本研究的模拟与分析需求。

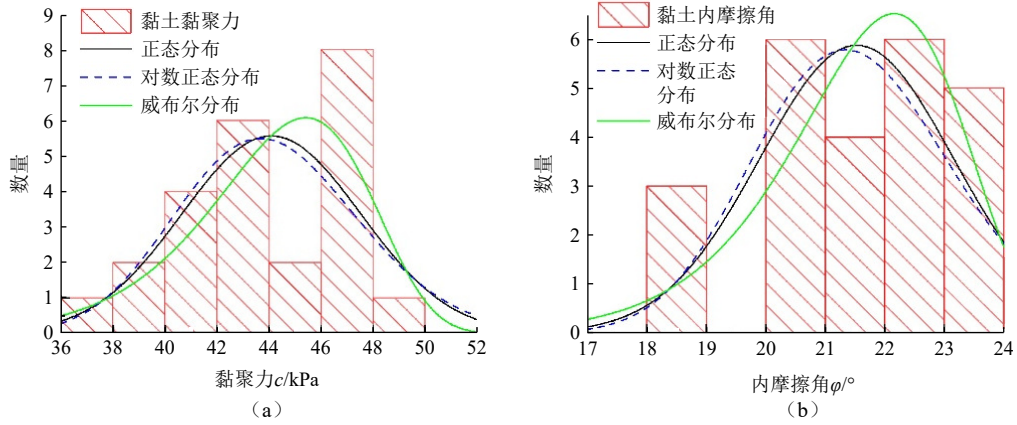


图 3 黏土层强度参数分布图

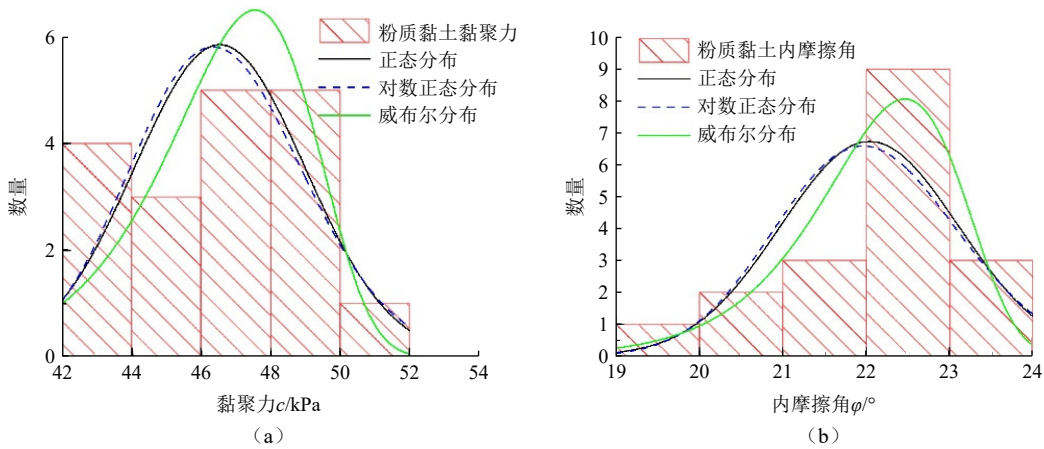


图 4 粉质黏土层参数分布图

表 4 土层强度参数 K-S 检验结果

分布类型	黏土层		粉质黏土层	
	c	φ	c	φ
正态分布	0.08 710	0.08 173	0.09 364	0.10 363
对数正态分布	0.09 358	0.09 220	0.09 352	0.11 299
威布尔分布	0.11 891	0.09 501	0.10 819	0.09 030

4.1 数值分析

本次模型计算采用基于有限差分的 FLAC^{3D} 数

值分析软件, 本构模型选用摩尔-库仑模型。赋值计算时, 传统参数赋值模型计算按照表 1 进行; 考虑参数空间变异性时, 黏聚力和内摩擦角已经插值给出, 利用自编代码将插值后生成的参数文件在对应模型单元中逐一进行赋值, 其余参数与传统法赋值模型计算一致。其中黏土层经反距离加权插值内摩擦角赋值结果如图 9(b)所示。

4.2 滑坡位移变形

图 10 为 4 种不同方法赋值计算结果总位移云

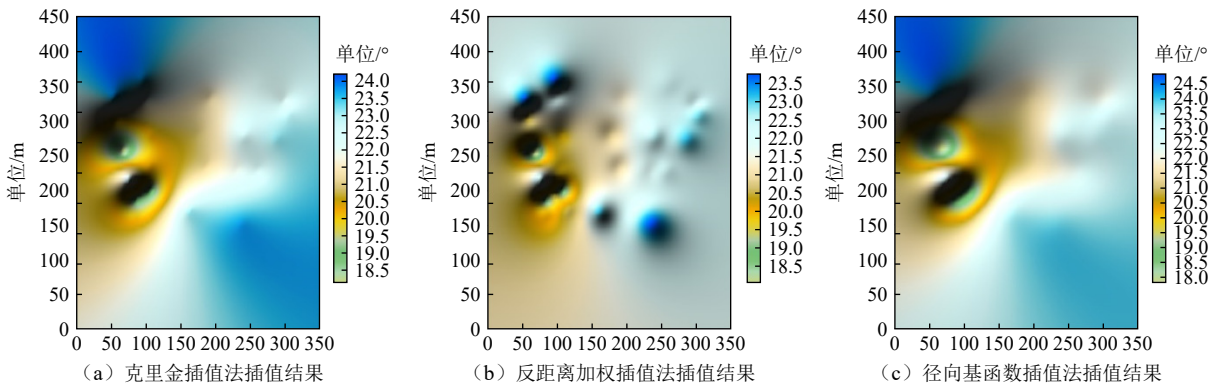


图 5 黏土层内摩擦角空间分布

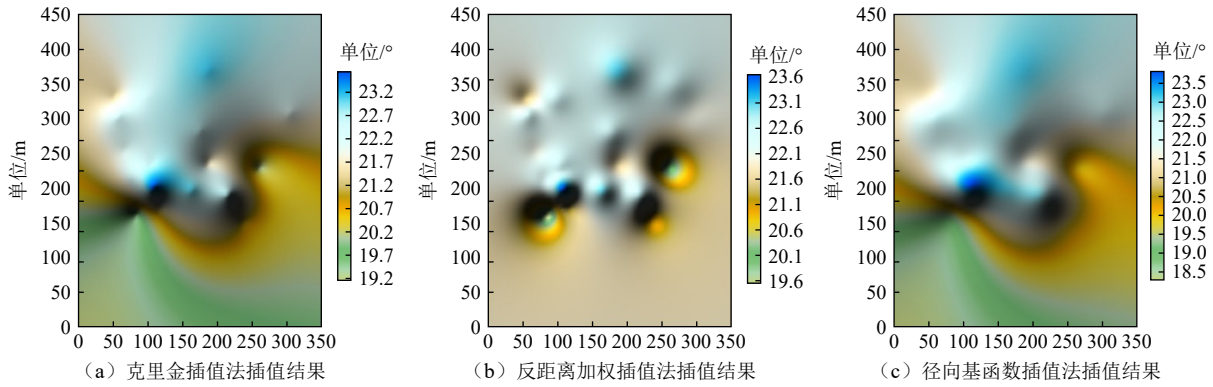


图 6 粉质黏土层内摩擦角空间分布

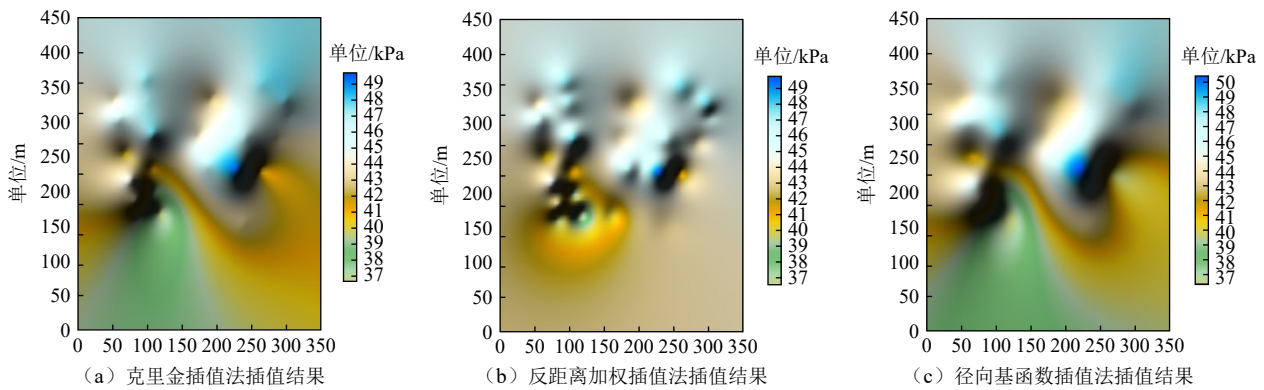


图 7 黏土层黏聚力空间分布

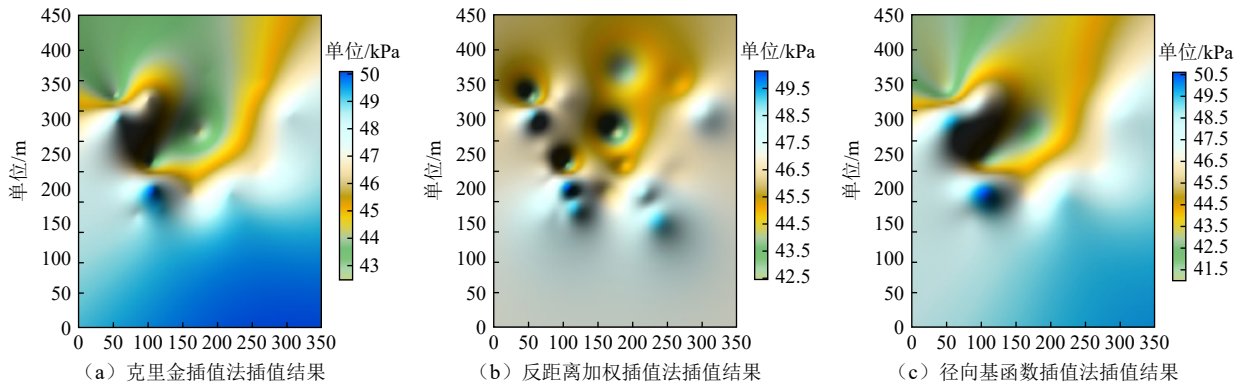


图 8 粉质黏土层黏聚力空间分布

图,为更好展示不同方法计算结果差异性将位移图例量值统一。由图 10 可知,4 种方法计算结果最大位移均发生于滑坡模型中部,且插值法计算结果最大位移均小于传统方法计算结果;由局部放大图可知,传统方法计算结果较大位移量区域明显大于插值法计算结果;受地形等因素影响,同一位置处赋值不同岩土体强度参数,势必会出现不同的结果,传统赋值视同一地层为各向同性,不考虑参数的空间变异性,难免会出现原本位移量较小区域,模型计算显示为大位移区域的现象。由模型计算最大位移量对比,传统方法较插值法计算结果更易发生滑坡

失稳。

由于图 10 中 3 种插值法赋值模型计算结果近似,为更好地对比分析插值法之间差异性,统计滑坡主滑方向(Y 方向)位移如图 11 所示。

由图 11 可知,模型计算结果中 JC01 号监测点最大位移量为 0.017 8 m,明显低于其余监测点位移量,主要因为 JC01 号监测点基本在模型计算位移云图范围外,处于较稳定区域,该点计算位移与实际位移相差仅为毫米级,该点可不予考虑。

除 JC01 号监测点外,其余监测点位移均比实际位移大,其中传统方法计算结果位移与实际位移相

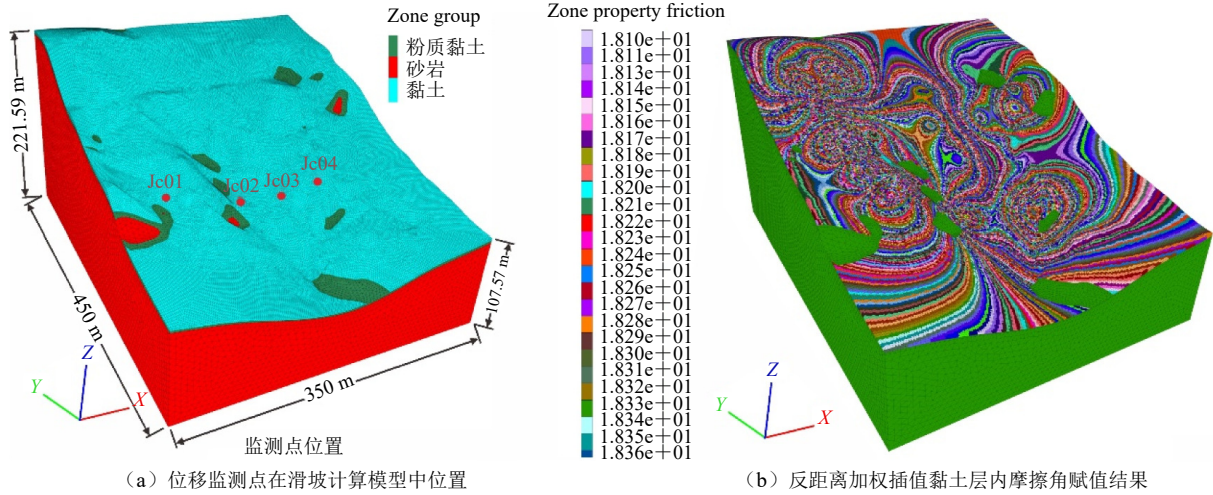


图 9 滑坡数值计算模型

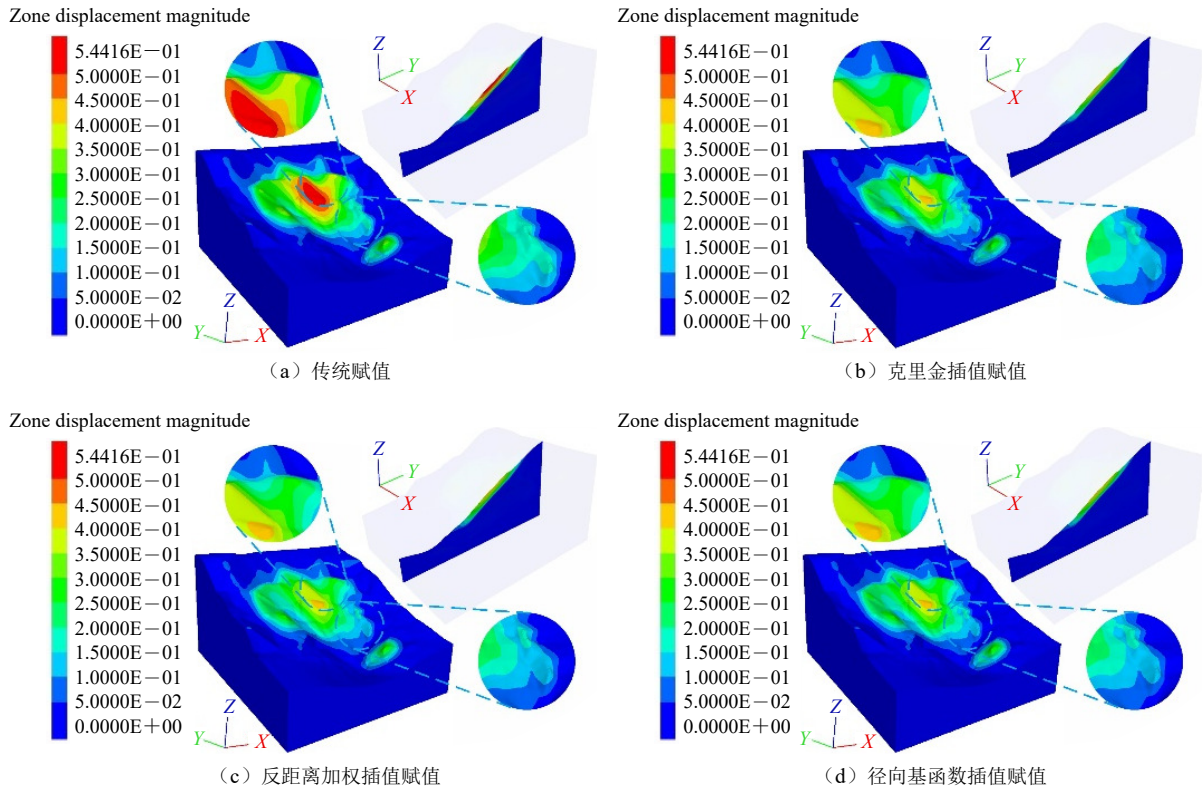


图 10 不同赋值方法计算总位移图(单位/m)

差最大, 相差最大时是插值法计算位移与实际位移之差的两倍有余(JC02 和 JC04 监测点)。

统计不同赋值模型计算下各监测点 Y 方向最终位移与实际位移见表 5。由图 11 及表 5 综合分析可知, 相比于传统赋值而言, 插值法计算结果更加接近实际情况, 其中径向基函数插值法和克里金插值法计算位移较为相近, 两者平均相对误差相差不大, 这与两种插值法所插值后的参数空间分布情况相似有关; 插值法中, 反距离加权插值法较其余两种插值法计算结果与实际位移更接近, 相对平均误差更小。

从位移量上分析, 采用插值法考虑岩土体强度参数空间变异性对滑坡变形分析可行。

4.3 最大剪应变增量

图 12 为 4 种不同方法赋值计算结果最大剪应变增量云图, 剪应变增量值反映了发生剪切变形的可能性。由图 12 可知, 在不同赋值方法下, 剪应变均产生于模型中部, 并呈现出半圆状; 从滑坡纵向切片云图分析, 4 种方法计算结果均出现潜在滑动面; 在滑坡表面, 传统方法计算结果发生剪应变范围连续性略大于插值计算结果; 3 种插值法计算的最大剪

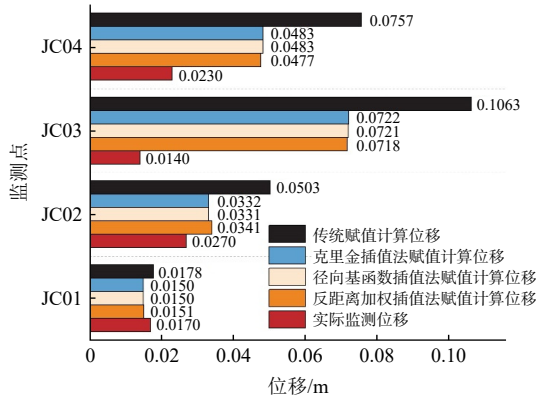


图 11 监测点 Y 方向最终位移

应变增量云图差异不明显, 仅在最大剪应变增量值上有所不同; 其中传统方法计算结果更易发生剪切变形, 反距离加权插值法计算结果最不易发生剪切变形。

4.4 滑坡塑性区

图 13 为不同方法赋值计算结果塑性区云图。塑性区范围决定了滑坡发生极限破坏的可能性, 范围越大发生极限破坏的可能性就越大。由图 13 可知, 该滑坡表面主要以拉伸破坏为主; 传统方法计算结果范围略大于插值法计算结果, 且传统方法计算结果塑性区分布较为凌乱, 不同插值法计算结果相

表 5 监测点最大位移量与实际位移量对比表

Y 方向位移监测点		JC01	JC02	JC03	JC04
实际位移	位移量/mm	17	27	14	23
	位移量/mm	17.80	50.28	106.34	75.68
传统赋值	相对误差	0.047 06	0.862 22	6.595 71	2.290 43
	平均相对误差	2.449 31			
反距离加权插值赋值	位移量/mm	15.15	34.09	71.78	47.67
	相对误差	0.108 82	0.262 59	4.127 14	1.072 61
径向导基函数插值赋值	平均相对误差	1.392 79			
	位移量/mm	15.00	33.09	72.08	48.26
普通克里金插值赋值	相对误差	0.117 65	0.225 56	4.148 57	1.098 26
	平均相对误差	1.397 51			
普通克里金插值赋值	位移量/mm	15.02	33.19	72.17	48.25
	相对误差	0.116 47	0.229 26	4.155 00	1.097 83
普通克里金插值赋值	平均相对误差	1.399 64			

注: 相对误差为计算值与实际值之差的绝对值与实际值之比

似程度较高。

在滑坡中上部放大区域, 主要出现拉伸变形(计算过程阶段)及剪切变形(当前阶段)。图 13(a)中红色区域不连贯且为细长状, 该区域现阶段出现拉伸变形但不强烈; 图 13(b)、(c)和(d)中该区域连贯性好且面积较大, 该区域现阶段表现为拉伸变形且变

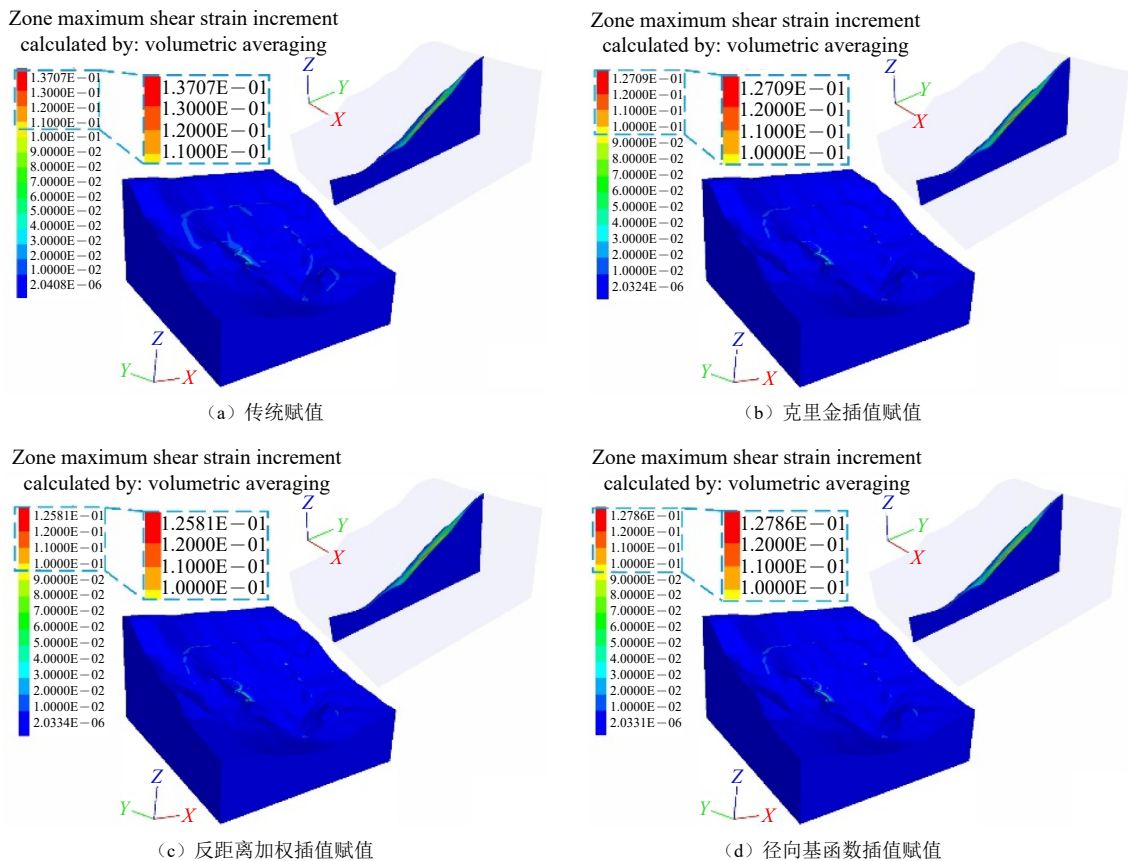


图 12 不同赋值方法计算结果最大剪应变增量云图

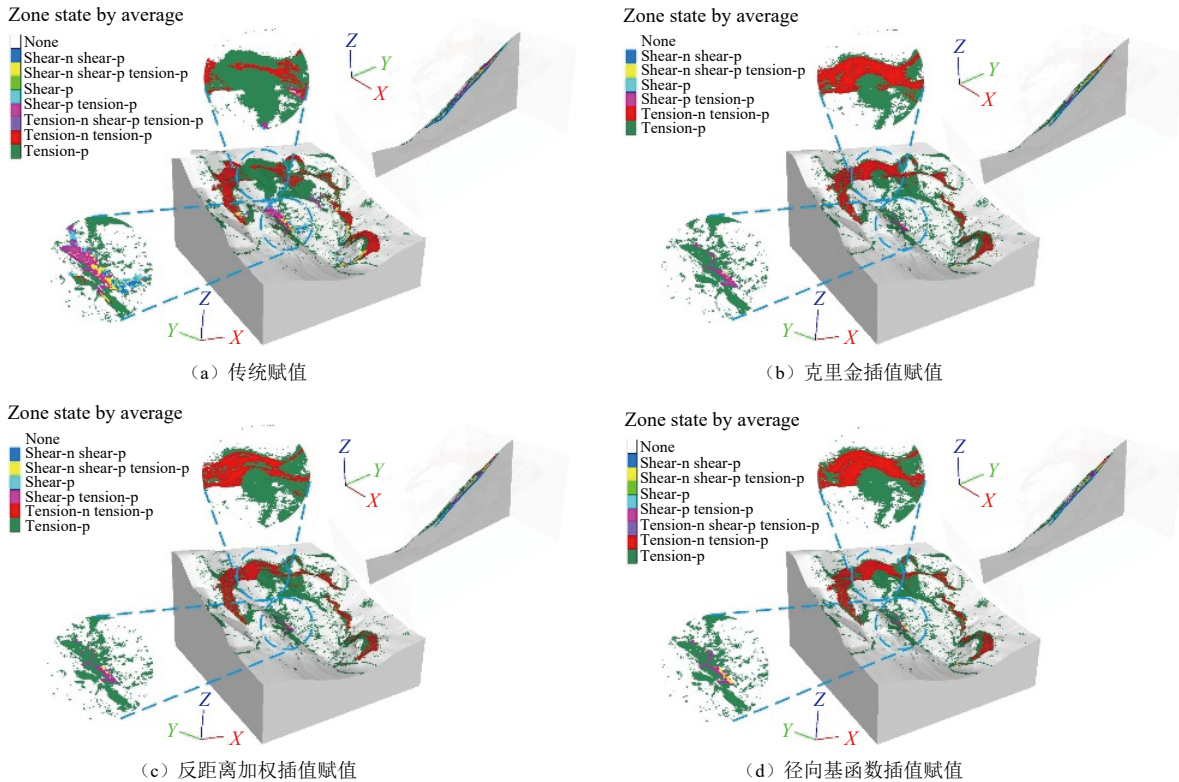


图 13 不同赋值方法计算结果塑性区云图

注: shear 为剪切破坏单元, tension 为张拉破坏单元; n 为 now, 指当前循环中出现; p 为 previous, 表示在以前的循环出现

形塑性区范围大。

4.5 小结

自然界岩土体具有空间变异性, 各点强度参数不可能一致。传统赋值去寻找某一个数来代替这一层的强度参数, 其本身就具有相当大的不确定性, 由此计算出来的结果不可避免会出现过于保守或过于危险的情况。诸多学者^[33-34]考虑参数反演来解决传统方法计算出现偏差较大的情况, 但该方法通常存在多解性, 即不同的模型参数组合可能产生相同的观测数据, 这使得反演结果具有不确定性, 难以确定哪个解是真实的。插值法基于实测数据, 考虑参数空间变异性来拟合地层真实情况, 可以很好地避免这个问题。

上述计算结果从位移、最大剪应变增量及塑性区 3 方面进行分析研究, 考虑参数空间变异性的插值法计算结果相比于传统方法更符合实际情况, 对于滑坡变形分析是可取的。插值法赋值计算结果均小于传统赋值计算结果, 主要由于传统模式下模型土层被认为是各向同性, 其连贯性较强, 整体抗变形能力也就越强, 其不足也十分明显。一旦某处发生失稳, 由于其较强连贯性会导致大范围失稳, 其后缘产生的临空面又为更大范围土体失稳提供条件。考虑空间变异性, 参数赋值离散化较高, 计算模型由各

向同性转变为水平各向异性, 更接近真实地层, 可以减弱土体各向同性带来的影响。

5 结论与讨论

(1) 传统方法计算结果明显高估滑坡位移量, 考虑参数空间变异性更接近实际情况。实际工程中考虑参数空间变异性来分析滑坡, 将有效减少滑坡治理经济成本。

(2) 对于强度参数黏聚力、内摩擦角值考虑空间水平向变异性, 反距离加权插值法较普通克里金插值法和径向基函数插值法更好, 与康田等^[19]所得结论相似。

(3) 考虑参数空间变异性需要大量的勘察数据, 且建模和计算方法复杂, 分析周期较长, 对于小型或结构简单的滑坡并不适用。

本次自编程序将插值法生成的参数文件赋值到对应模型网格, 由于编写程序语言结构特殊性, 导致每次循环只能对一个网格单元赋值, 同时模型网格数量庞大近 140×10^4 个, 致使此次计算时间总体偏长, 因为网格赋值参数时间占总时间 90% 以上。解决编程赋值问题, 将是我们未来的工作之一。同时, 本文也是基于大量钻孔勘察数据支撑, 工作量较大,

这对于实际工程而言并不现实,未来可以考虑根据岩土体成因类型,使用少量实测数据,利用机器学习等人工智能方法辅助生成岩土体空间变异性数据,然后进行滑坡稳定性分析工作。

参考文献

- [1] DIAS Daniel, PAN Qiuqing. Probabilistic evaluation of tunnel face stability in spatially random soils using sparse polynomial chaos expansion with global sensitivity analysis[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(6): 1415-1429.
- [2] NEZHAD M M, FISHER Q J, GIRONACCI E, et al. Experimental study and numerical modeling of fracture propagation in shale rocks during Brazilian disk test[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(6): 1755-1775.
- [3] WANG Y K, SHANG H W, WAN Y K, et al. Reliability analysis of soil slope reinforced by micro-pile considering spatial variability of soil strength parameters[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2024, 36(6): 631-640.
- [4] CHEN F Y, WANG L, ZHANG W G. Reliability assessment on stability of tunnelling perpendicularly beneath an existing tunnel considering spatial variabilities of rock mass properties[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 88: 276-289.
- [5] CHEN L L, CHEN C G, XIA B R, et al. Study on mechanism of formation and expansion of ground caving-in in the eastern Chengchao Iron Mine(Article) [J]. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(8): 2322-2334.
- [6] ZHENG Y, CHEN C G, MENG F, et al. Assessing the stability of rock slopes with respect to block-flexure toppling failure using a force-transfer model and genetic algorithm[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(8): 3433-3445.
- [7] LI Y Q, ZHANG W G. Investigation on passive pile responses subject to adjacent tunnelling in anisotropic clay[J]. *Computers & Geotechnics*, 2020, 127: 1-9.
- [8] ZHANG R H, ANTHONY Teck Chee Goh, LI Y Q, et al. Assessment of apparent earth pressure for braced excavations in anisotropic clay[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(5): 1615-1626.
- [9] HUANG D, SONG Y X, MA G W, et al. Numerical modeling of the 2008 Wenchuan earthquake-triggered Niumiangou landslide considering effects of pore-water pressure(Article)[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 4713-4729.
- [10] LUMB Peter. The variability of natural soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1966, 3(2): 74-97.
- [11] 郑俊杰, 卢嘉泰, 刘洋. 考虑土体空间变异性的加筋路堤变形特征分析 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(7): 7-12, 17.
- [12] YUAN Y L, HU C M, MEI Y, et al. Slope reliability analysis based on curvilinear local averaging of a 2-D random field[J]. *Computers & Geotechnics*, 2021, 137: 104247.
- [13] CHEN D F, XU D P, REN G F, et al. Simulation of cross-correlated non-Gaussian random fields for layered rock mass mechanical parameters[J]. *Computers & Geotechnics*, 2019, 112: 104-119.
- [14] YANG Y, WANG P F, SCOTT J, Brandenberg. An algorithm for generating spatially correlated random fields using Cholesky decomposition and ordinary kriging[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 147: 104783.
- [15] VANMARCKE E H, ASCE M. Reliability of earth slopes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1977, 103(11): 1247-1265.
- [16] 张晋彰, 黄宏伟, 张东明, 等. 考虑参数空间变异性的隧道结构变形分析简化方法 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(1): 134-143, 205-206.
- [17] 盛建龙, 杨博, 翟明洋. 随机场模型下相关距离及参数变异系数对边坡稳定可靠度的影响 [J]. *金属矿山*, 2018, 12: 157-162.
- [18] OGUZ Emir Ahmet, DEPINA Ivan, THAKUR Vikas. Effects of soil heterogeneity on susceptibility of shallow landslides[J]. *Landslides*, 2022, 19(1): 67-83.
- [19] 康田, 薛阳, 欧光照, 等. 考虑滑带土抗剪强度参数空间变异性的黄土坡临江#1滑坡稳定性分析 [J]. *水电能源科学*, 2020, 38(11): 137-140, 8.
- [20] ALAMANIS Nikolaos, PANOS Dakoulas. Simulation of random fields of soil properties by the local average subdivision method and engineering applications[J]. *Energy Systems*, 2021, 12(4): 1-21.
- [21] LIU K, WANG Y Q, HUANG M, et al. Postfailure analysis of slopes by random generalized interpolation material point method [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(3): 1-13.
- [22] 韩宪军. 岩土参数随机场建模及工程应用 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [23] 胡启军, 俞钧耀, 刘明, 等. 基于随机-关联空间插值法的工程岩体力学参数确定 [J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(8): 90-96.
- [24] 王凯, 张少杰, 韦方强. 基于空间插值技术的降雨型滑坡下垫面岩体力学参数取值研究 [J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(5): 207-219.
- [25] 赵付万. 云南红层地区滑坡稳定性评价研究——以云南永胜柳树塘滑坡为例 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [26] SEMKO Arefpanah, ALIREZA Sharafi, FATEMEH Salehi. The soil slope stability in failure with the use of the random process based on the Kriging's interpolation model[J]. *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, 2022, 7(4): 63-72.
- [27] 王长虹, 朱合华, 钱七虎. 克里金算法与多重分形理论在岩土参数随机场分析中的应用 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(S2): 386-392.
- [28] 张传庆, 周辉, 冯夏庭, 等. 局地地应力场获取的插值平衡方法 [J]. *岩土力学*, 2008, 8: 2016-2024.
- [29] LIU Yadong, YANG Zhiyong, LI Xueyou. Adaptive ensemble learning of radial basis functions for efficient geotechnical reliability analysis[J]. *Computers & Geotechnics*, 2022, 146: 104753.
- [30] 崔洁, 江权, 冯夏庭, 等. 岩石抗剪强度参数的理论概率分布形态研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(05): 1261-1274.
- [31] 邹先进, 夏承志, 刘珉玮, 等. 三峡库区粉质黏土抗剪强度参数概率分析 [J]. *湖北工业大学学报*, 2019, 34(5): 92-95.
- [32] 孔令奇, 李翠娟. 岩土参数概率分布的系统推断研究 [J]. *工业建筑*, 2022, 52(1): 129-136, 97.
- [33] ZUO S, ZHAO L H, DENG D P, et al. Back analysis of shear strength parameters for progressive landslides: case study of the Caifengyan landslide, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2022, 81(1): 1-20.
- [34] 薛阳, 吴益平, 苗发盛, 等. 基于随机场-贝叶斯的滑面抗剪强度参数反演 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(6): 1118-1127.