

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221002001

基于隆起变形分析的基坑坑底抗隆起稳定可靠度分析*

孟凯琪¹, 刘志良¹, 徐亮¹, 李春立¹, 李亮¹, 于忠福²,
高原², 李辉³

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛新华友建工集团股份有限公司, 山东 青岛 266101;
3. 青建集团股份公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 采用土体硬化(Hardening Soil)模型,在PLAXIS 2D中建立基坑开挖数值模型,在获取坑底特征点隆起变形数据的基础上构建坑底隆起变形超限失效模式对应的极限状态函数,为提高计算效率,应用响应面法代替有限元计算快速获取坑底特征点隆起变形值,结合蒙特卡罗模拟方法进行坑底抗隆起稳定性可靠度分析,分析结果表明:第三层土的卸载再加载模量 E_3^u 以及有效内摩擦角 φ_3' 的变异性对坑底抗隆起稳定性影响显著;第一层土的有效黏聚力 c_1' 、有效内摩擦角 φ_1' 、割线模量 E_1^{50} 、切线模量 E_1^{oed} 以及第二层土的有效黏聚力 c_2' 的变异性对坑底抗隆起稳定性影响较小,但相对而言,第二层土的有效黏聚力 c_2' 对坑底抗隆起稳定性的影响较大;对于坑底土体为粉砂的深基坑来说,对坑内土体进行加固可以有效约束坑底隆起变形。

关键词: 基底隆起稳定性; 硬化土模型; 响应面; 蒙特卡罗法

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2024)03-0705-10

Reliability Assessment of Basal-heave Stability Based on Deformation Analysis

MENG Kaiqi¹, LIU Zhiliang¹, XU Liang¹, LI Chunli¹, LI Liang¹, YU Zhongfu²,
GAO Yuan², LI Hui³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2. Qingdao Xinhua Construction Engineering Group Co., Ltd., Qingdao 266101, China;

3. Qingjian Group Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

Abstract: A numerical model of excavation was established in PLAXIS 2D using the Hardening Soil model. Based on the heaving deformation data at characteristic points at the bottom of the excavation, a limit state function corresponding to the over-limit failure mode of heaving deformation was constructed. To enhance the computational efficiency, the response surface method (RSM) was employed, replacing finite element calculations to quickly derive heaving deformation values at the characteristic points. Combined with the Monte Carlo simulation method (MCS), the reliability of the anti-

* 收稿日期: 2022-10-02; 修回日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778313)资助

作者简介: 孟凯琪(1999—), 女, 硕士研究生。主要从事基坑稳定性可靠度研究。E-mail: mengkaiqi2021@163.com

通信作者: 李亮(1977—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程防灾减灾研究。E-mail: liliang@qut.edu.cn

heaving stability at the bottom of the excavation was conducted. The results show that the variability in the unloading-reloading modulus (E_3^{ur}) and effective internal friction angle (φ_3') of the third soil layer significantly impacted basal-heave stability. The variability in the effective cohesion (c_1'), effective internal friction angle (φ_1'), secant modulus (E_1^{50}) and tangential modulus (E_1^{ed}) of the first soil layer and the effective cohesion of the second soil layer (c_2') had a smaller impact on basal-heave stability. However, the effective cohesion of the second soil layer (c_2') exhibited a relatively large influence on basal-heave stability. For deep excavations with silty soils at the base, reinforcing the soil within the excavation effectively constrains base heaving deformation.

Keywords: Basal-heave stability; hardening soil model; response surface method; Monte Carlo simulation method

0 引言

基坑失稳^[1-3]是影响安全施工的重要风险源之一,其中坑底隆起破坏又是基坑失稳事故的主要诱因之一^[4],因此,正确评价坑底抗隆起稳定对基坑工程安全具有重要意义。当前业界主要采用安全系数来评价坑底抗隆起稳定,其计算方法主要包括基于地基承载力的方法和基于圆弧滑动面的力矩方法^[5],由于坑底抗隆起稳定安全系数的确定性分析不能考虑基坑土体参数的变异特性,因此无法合理地评估基坑坑底抗隆起稳定可靠度。为此,许多学者基于确定性分析的抗隆起稳定安全系数构建基坑失效极限状态函数,开展了大量的研究工作。A. Goh^[6]等利用图表法得到基坑系统可靠度,提出当土体参数变异系数不同时,相同的安全系数会有不同的风险水平;侯晓亮等^[7]采用改进一次二阶矩的方法分析了土性指标的均值和变异系数对基坑抗隆起稳定可靠度指标的影响;A. Goh^[8]等利用图表法,考虑了土体参数变异系数,使用改进的太沙基安全系数计算公式来评估基坑坑底隆起失效概率;曹净等^[9]在传统 Monte Carlo 法中引入 Copula 理论,考虑抗剪强度指标的相关关系并通过算例证明了考虑抗剪强度相关关系后的基坑失效概率会大幅度降低;吴贤国等^[10]实现了基于 Copula 理论的深基坑系统失效可靠度的分析过程,得出抗滑移稳定、抗倾覆稳定以及抗隆起稳定中,抗隆起稳定为主要失效模式的结论。由于基坑工程中内支撑系统以及围护结构对抗隆起稳定安全系数的增强作用,所得抗隆起稳定安全系数往往偏高,基于安全系数的基坑抗隆起稳定可靠度分析无法直接得到基坑抗隆起稳定的失效概率,只能通过可靠性指标

β 进行特例下的换算得到,对于具有一般概率密度函数分布的土体参数而言,则无法直接得到其失效概率。

另一方面,基坑失稳的直观表现是基坑空间变形超限。郑刚等^[11]总结了基坑隆起的变形规律以及工程效应;章润红等^[12]利用图表法探讨地面沉降超过既定阈值的概率,同时发现挡墙刚度、地面沉降阈值大小、土体特性变化系数以及地下水下降深度对失效概率有不同程度的影响,因此在基坑抗隆起稳定性分析中坑底的隆起变形不容忽视。

鉴于当前基坑抗隆起稳定安全系数的评判标准不唯一^[13],本文考虑了土体参数变异性,考虑坑底隆起变形,结合响应面法与蒙特卡罗模拟方法,研究了基坑坑底抗隆起稳定可靠度问题以及土体参数变异性对其可靠度的影响,同时针对坑底为粉砂的深基坑提出加固措施,有效约束坑底隆起变形。

1 基于坑底隆起变形的基坑抗隆起失效极限状态函数

除采用抗隆起稳定安全系数来评价坑底隆起失效以外,坑底隆起变形大小亦能在一定程度上反映坑底隆起失效与否。当前,预测坑底隆起变形的的方法主要包括分层总和法、残余应力法、自重应力抵消法以及数值分析法等。其中数值分析法因其能够合理考量基坑形状以及尺寸、支护结构种类以及应力路径、地下水等众多因素^[14],在基坑工程中得到了广泛应用^[15-16]。由于 PLAXIS 2D 中内置了更适用于模拟基坑开挖工程的硬化土模型^[17],因此本文采用 PLAXIS 2D 有限元分析软件对基坑开挖进行模拟,并获取坑底隆起变形值。参照《建筑基

坑工程监测技术规范》^[18](GB 50497—2009)中,坑底隆起监测点布设方案,选取监测点,并依据其给出的坑底隆起变形的监测预警值来确定坑底隆起变形限值,建立基坑抗隆起失效极限状态函数:

$$G(X)=d^{\max}-d^c(X) \quad (1)$$

式中, $G(X)$ 为坑底抗隆起失效极限状态函数, $G(X)>0$ 表明基坑未发生抗隆起失效, $G(X)<0$ 表明基坑发生抗隆起失效, $G(X)=0$ 表明基坑处于抗隆起失效极限状态; X 为影响坑底隆起变形的参变量,譬如坑外土体的黏聚力、内摩擦角、割线模量、切线模量以及卸载再加载模量等; d^{\max} 为基于监测预警值确定的坑底隆起变形限值; $d^c(X)$ 为某一工况下坑底特征点发生的隆起变形值,由PLAXIS 2D计算或采用足够精度的响应面确定。

确定坑底隆起失效极限状态函数之后,利用传统的可靠度分析方法,如一次二阶矩法^[7]、蒙特卡罗法^[9]等进行可靠度分析。本文采用蒙特卡罗法进行坑底抗隆起稳定可靠度分析,其基本思路为:首先产生一定数量(譬如 N 个)的随机变量样本,然后逐一计算随机变量样本值对应的极限状态函数值(譬如公式(1)),若某一随机变量样本下对应的极限状态函数值小于0,则称该样本为失效样本,最后统计失效样本的个数为 m ,则当 N 足够大时,基坑抗隆起失效概率 P_f 可近似由式(2)估算:

$$P_f = \frac{m}{N} \quad (2)$$

式中, m 为失效样本数目; N 为总的抽样数目。

$$\delta_{P_f} = \sqrt{\frac{(1-P_f)}{NP_f}} \quad (3)$$

式中, δ_{P_f} 为失效概率变异系数。

失效概率的变异系数越小,计算结果越精确,如公式(3),在某一确定失效概率变异系数下, N 的合理确定与目标失效概率有关,因此目标失效概率越小,合理 N 值愈大^[19]。在具体应用公式(2)时,一般需对 N 进行敏感性分析,以确定合理 N 值。

2 基于响应面法的基坑坑底隆起变形值计算

应用蒙特卡罗法进行坑底抗隆起可靠度分析时,需要反复使用PLAXIS 2D计算不同 X 下坑底特征点的 d^c 并结合公式(1)以确定坑底抗隆起失效与否,计算效率较低,为提高效率,本文采用响应面法

构建 X 与 d^c 之间的近似模型,在验证并保证精度的基础上代替有限元计算获取 d^c 。

响应面法在岩土工程可靠度分析中得到了广泛应用^[20-22]。其主要思路是,利用较为简单的数学模型构建岩土结构的某响应(譬如坑底特征点的位移 d^c)与岩土体变量之间的关系,以二阶不含交叉项的多项式响应面为例:

$$d_r^c(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n d_i x_i^2 \quad (4)$$

式中, $d_r^c(X)$ 为响应面模拟的坑底特征点隆起变形值,是 $d^c(X)$ 的近似值; $X=x_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 为随机变量; $a, b_i, d_i(i=1,2,\dots,n)$ 为待定系数,总计 $2n+1$ 个,响应面的构建过程即为待定系数的求解过程。

本文采用中心点复合设计法设计实验点求解待定系数。以 d^c 为例,选取各变量的均值 μ_{x_i} 作为中心实验点,在各变量均值附近($\mu_{x_i} \pm \omega \sigma_{x_i}$)产生其余 $2n$ 个实验点,在各变量均值附近($\mu_{x_i} \pm \omega \sigma_{x_i}$)产生其余 $2n$ 个实验点, σ_{x_i} 为各变量的标准差,根据文献^[23], ω 对响应面的构建影响不显著,通常取 $\omega=2$ 。将 $2n+1$ 个实验点依次输入PLAXIS 2D获取特征点隆起变形值,分别记为 $d_r^c(X_i), i=1,2,\dots,2n+1$ 。通过求解线性方程组即可确定待定系数,即构建公式(4)所示的响应面。必须指出的是,构建的响应面 $d_r^c(X)$ 为 $d^c(X)$ 的近似函数,仅在 $2n+1$ 个实验点上完全一致,在应用 $d_r^c(X)$ 代替 $d^c(X)$ 进行可靠度分析之前必须进行响应面的精度验证,具体在后文算例分析时说明。

3 基于变形分析的坑底抗隆起稳定可靠度分析

本文提出的基于响应面法与蒙特卡罗法相结合的坑底抗隆起稳定性可靠度分析流程如图1所示。

根据工程地质勘察报告以及相关文献确定随机变量(譬如各土层土体黏聚力、内摩擦角、变形模量等)个数以及随机变量的统计值,然后根据支护方案以及施工方案建立PLAXIS 2D数值模型进行有限元数值模拟,获取坑底的隆起变形值。利用第2节所介绍的响应面法,建立随机变量与坑底特征点隆起变形值的响应面代替复杂的有限元模拟计算,最后利用蒙特卡罗法进行基坑坑底隆起失效概率的计算。

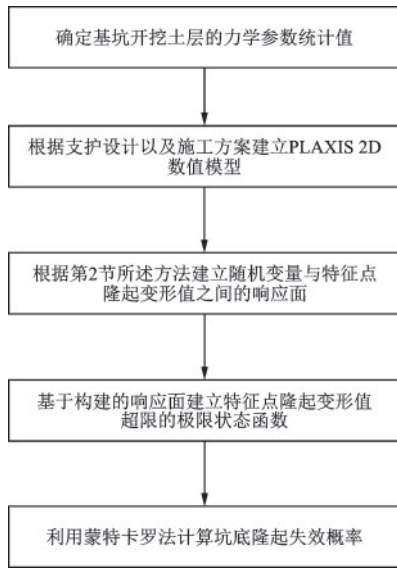


图1 坑底抗隆起稳定可靠度分析流程

Fig.1 Flowchart of basal-heave stability and reliability analysis

4 算例分析

4.1 工程概况

考虑如图2所示的基坑开挖,开挖深度为10 m,

开挖宽度为20 m,基坑围护结构采用16 m深、0.35 m厚、弹性模量为30 GPa的地连墙以及两道钢结构内支撑支护,支撑水平间距为5.0 m,钢支撑的抗压刚度为 4.8×10^6 kN。采用明挖顺作法施工工艺,采用PLAXIS 2D进行基坑开挖有限元数值模拟,计算模型如图2所示,其中,模型两侧约束水平位移,模型底部约束水平与垂直位移。土层采用15节点平面应变单元模拟,土体本构模型选用土体硬化模型(HS模型)^[24-25]。支护结构采用板单元模拟,结构与土体的相互作用采用界面单元模拟,内支撑采用锚杆单元模拟,土体参数的均值见表1,基坑开挖过程通过五个施工阶段来模拟,具体开挖工序详情见表2。

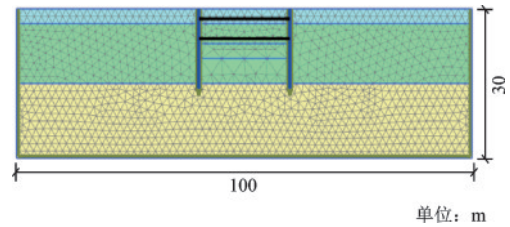


图2 基坑开挖模型

Fig.2 Excavation model diagram of the foundation pit

表1 土体参数均值

Table 1 Mean values of soil parameters

参数土层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$E^{50}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$E^{\text{oad}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$E^{\text{ur}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$c'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\varphi'/(^{\circ})$
1 填土	17	6 780	6 000	54 780	5	22
2 粉质粘土	18	9 040	8 000	73 040	15	20
3 粉砂	17	11 300	10 000	40 000	1	31

表2 开挖过程对应的有限元模拟施工阶段

Table 2 Finite element simulation construction stages

施工阶段	开挖标高/m	施工内容
0	0.0	初始地应力分析
1	0.0	地连墙施工
2	-3.0	开挖,在-2 m处施加内支撑
3	-7.0	开挖,在-6 m处施加内支撑
4	-10.0	开挖

表1中, γ 为土体容重、 E^{50} 为标准排水三轴试验中的割线刚度、 E^{oad} 为主固结仪加载中的切线刚度、 E^{ur} 为卸载再加载刚度、 c' 为有效黏聚力、 φ' 为有效内摩擦角。基于文献^[24-26]研究结论,各土层 $E^{50} = (0.5 \sim 1.7) E^{\text{oad}}$, $E^{\text{ur}} = (1.4 \sim 11.9) E^{\text{oad}}$ 。

网格划分对计算结果以及计算时间具有显著影响^[27](表3),采用高粗糙、粗糙、中等、细、超细等不同粗糙程度的网格时,坑底中心点的隆起变形值分别为30.09、29.77、29.68、29.61、29.59 mm,计算时间分别为11.46、15.04、16.42、46.88、70.07 s;鉴于中等、细、超细网格时,坑底中心点的隆起变形值几乎一致,考虑到计算时间,本文采用中等程度的网格。

表3 网格对计算结果的影响

Table 3 Effect of mesh on the calculation results

网格粗糙度	高粗糙	粗糙	中等	细	超细
隆起变形值/mm	30.09	29.77	29.68	29.61	29.59
计算时间/s	11.46	15.04	16.42	46.88	70.07

土体容重变异性较小^[28],一般将其视为定值。经前期相关性分析,筛选出 E_1^{50} 、 E_1^{oed} 、 c'_1 、 φ'_1 、 c'_2 、 E_3^{ur} 、 φ'_3 为随机变量,其中下标为土层编号。各随机变量的均值、标准差以及分布类型见表4。经分析发现,该基坑坑底中心点隆起变形值最大,因此本文选用坑底中心点为特征点,构建公式(1)所示的极限状态函数,该基坑开挖深度为10 m,依据《建筑地基基础工程施工质量验收规范》^[29](GB 50202—2002),属于一级基坑。《建筑基坑工程监测技术规范》^[18](GB 50497—2009)给出了监测预警值 $d^{max}=25\sim35$

mm。根据第2节所介绍的响应面构建方法,对特征点隆起变形值构建响应面,为验证所构建的响应面能否有效地代替有限元分析计算,随机抽取100个样本来验证响应面计算的精度,以有限元软件计算结果为横坐标,响应面计算结果为纵坐标,绘制特征点隆起变形值的散点图,如图3所示。 R^2 为拟合决定系数,其越接近于1表明拟合效果越好,响应面的计算精度越高。由图3可知,特征点的拟合决定系数 $R^2=0.9998$,因此所构建的响应面的计算精度较高,可以用来代替复杂的有限元计算。

表4 随机变量统计参数

Table 4 Random variable statistical parameters

土体	$E_1^{50}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$E_1^{oed}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$c'_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\varphi'_1/(\text{°})$	$c'_2/(\text{°})$	$E_3^{ur}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\varphi'_3/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$
均值	6 780	6 000	5	22	15	40 000	31
变异系数	0.085	0.075	0.2	0.1	0.15	0.1	0.2
标准差	576	450	1	2.2	2.25	4 000	6.2
分布类型	对数正态	对数正态	对数正态	对数正态	对数正态	对数正态	对数正态

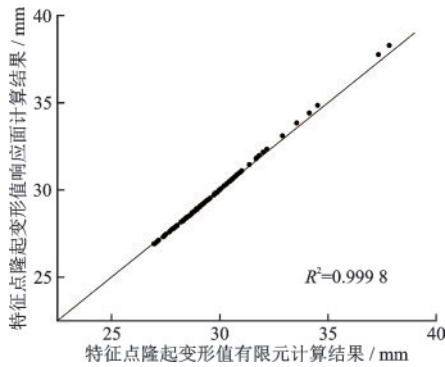


图3 响应面精度验证

Fig.3 Response surface accuracy verification plot

4.2 坑底隆起变形限值对 P_f 的影响

取 $d^{max}=35$ mm,利用上述构建并通过验证的响应面计算特征点隆起变形值。首先进行蒙特卡罗抽样次数敏感性分析,选取合理 N 值,在 $[0\sim10^6]$ 取一系列 N 值,利用本文所提出的方法计算基坑抗隆起失效概率。以抽样次数 N 为横坐标,失效概率 P_f 为纵坐标,绘制 P_f 随 N 变化的曲线图,如图4所示,当抽样次数小于 10^3 时,计算结果波动较大,当抽样次数在 10^3 与 10^4 之间时,计算结果在小范围内波动,当抽样次数在 10^4 与 10^5 之间时,计算结果趋于稳定,为保证计算结果的精度,本文蒙特卡罗抽样次数取 10^6 。

取 $N=10^6$, d^{max} 在25~35 mm取值,分析不同

d^{max} 对基坑抗隆起失效概率的影响,如图5所示, $d^{max}=25$ mm时,基坑抗隆起稳定失效概率接近100%, $d^{max}=30$ mm时,失效概率降低至40%, $d^{max}=35$ mm时,失效概率降至4%左右,由此可见, d^{max} 取值越大,基坑抗隆起稳定失效概率越低,反之亦然。由此可见,在基坑监测预警中,如何确定预警值与基坑抗隆起稳定失效后果的严重性、项目业主对于失效风险的承受能力有关。在工程实践中,要结合项目对失效风险的预期与承受能力合理选择 d^{max} 。另外,在项目施工前期,亦可基于数值模拟手段预测基坑开挖后坑底抗隆起稳定失效概率的变化情况,同时可以探求不同支护方案对于降低坑底抗隆起失效概率的有效性,力求最优支护方案。

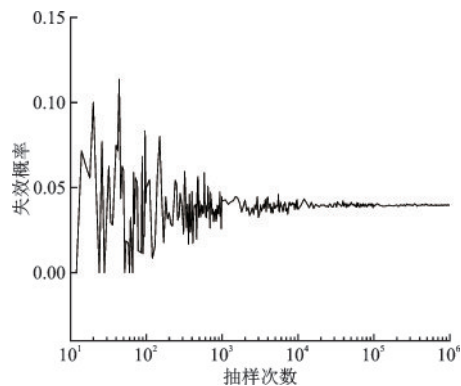


图4 N对失效概率 P_f 的影响

Fig.4 Influence of N on P_f

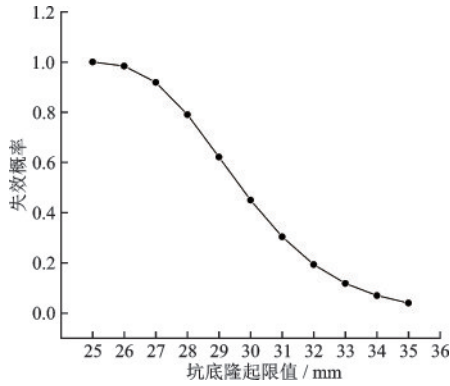


图5 d^{\max} 对 P_f 的影响

Fig.5 Effect of d^{\max} on P_f

4.3 基于Sobol法的土体参数变异性对坑底抗隆起失效概率的影响分析

参数灵敏度分析是指分析各输入参数对输出结果的影响,包括局部分析法(LSA)和全局分析法(GSA),与LSA相比,GSA不仅可以考虑各输入参数的概率分布形式,还可以考虑输入参数之间的交互作用,更适用于参数较多的模型的灵敏度分析。Sobol法^[30-31]是基于方差的全局分析方法,其核心是将定义的目标函数的总方差分解为单个参数以及多个参数相互作用下的方差,以此得到参数的一阶影响指数以及考虑各参数之间交互作用的全局影响指数,文献中给出了详细的计算过程。由于本文采用MATLAB计算软件辅助计算,同时结合了蒙特卡罗的失效概率计算方法,对计算公式进行了改进,步骤如下:

步骤1:确定目标函数。基于利用响应面法构建的基坑抗隆起失效极限状态函数得到的失效概率作为本文研究的目标函数即:

$$Y=f(X)=P_f=\frac{m}{N} \quad (5)$$

式中, m 为 $G(X)=d^{\max}-d_f(X)<0$ 的个数; N 为总抽样数。

步骤2:定义所选取的 E_1^{50} 、 E_1^{od} 、 c'_1 、 φ'_1 、 c'_2 、 E_3^{ur} 、 φ'_3 等7个自变量的上下限取值,在区间内进行两次相互独立的,抽样数为 n 的采样,所得的结果分别为样本矩阵 A 和 B :

$$A=[X_1 \quad \cdots \quad X_7] \quad (6)$$

$$B=[X_1^* \quad \cdots \quad X_7^*] \quad (7)$$

式中, X_1 、 X_1^* 分别为对自变量 E_1^{50} 进行两次采样数为 n 的独立采样得到的列矩阵,同样方法得到其余的 X_i 、 X_i^* 。

在 A 和 B 的基础上构造其余7个矩阵 $AB^i(i=$

$1, \dots, 7)$,即用 B 矩阵的第 i 列替换 A 矩阵的第 i 列,如 AB^1 :

$$AB^1=[X_1^* \quad X_2 \quad \cdots \quad X_7] \quad (8)$$

步骤3:将步骤2采样得到的9个样本矩阵(n 行7列),共计 $9n$ 组样本,分别将这 $9n$ 组样本值作为蒙特卡罗抽样的均值进行 N 次抽样,带入公式(3)计算,以此得到 $9n$ 个失效概率值,即矩阵 Y_A 、 Y_B 、 Y_{AB^1} 、 \dots 。

步骤4:计算一阶影响指数以及总效应指数,公式如下:

$$S_i=\frac{\text{Var}_{X_i}(E_{X_{-i}}(Y|X_i))}{\text{Var}_{(Y)}} \quad (9)$$

$$S_{Ti}=\frac{E_{X_{-i}}(\text{Var}_{X_i}(Y|X_{-i}))}{\text{Var}_{(Y)}} \quad (10)$$

其中,

$$\text{Var}_{X_i}(E_{X_{-i}}(Y|X_i))\approx\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n f(B)_j * \left(f(AB^i)_j - f(A)_j \right) \quad (11)$$

$$E_{X_{-i}}(\text{Var}_{X_i}(Y|X_{-i}))\approx\frac{1}{2n}\sum_{j=1}^n \left(f(A)_j - f(AB^i)_j \right)^2 \quad (12)$$

$$\text{Var}_{(Y)}=\text{Var}\left(\begin{matrix} Y_A \\ Y_B \end{matrix}\right) \quad (13)$$

Sobol全局灵敏度分析方法一般基于蒙特卡罗采样,其计算结果与样本数量 n 有很大的关系,如图6所示,当样本数目取8000时,结果已经趋于稳定,为保证结果的准确性,本文取样本数目为10000。为提高计算效率,采用4.1节中建立的响应面,分析参与响应面建立的7个输入参数对输出结果的影响。即研究 E_1^{50} 、 E_1^{od} 、 c'_1 、 φ'_1 、 c'_2 、 E_3^{ur} 、 φ'_3 ,在 $d^{\max}=30$ mm时对坑底抗隆起失效概率的影响。计算结果如图6所示,分析可得,在参数取值范围内,参数 E_3^{ur} 以及 φ'_3 对于抗隆起失效概率的影响比较显著,其他参数灵敏度小于0.01^[32],为非敏感参数,而且参数的全局灵敏度均大于一阶灵敏度,表明参数之间的交互作用对抗隆起失效概率也会产生一定的影响。由于 E_3^{ur} 以及 φ'_3 对失效概率的影响很大,使得其余参数对失效概率的影响不直观,因此,取 $E_3^{\text{ur}}=40000$ 、 $\varphi'_3=31$ 作为固定值,计算其余5个参数的一阶灵敏度,具体结果如图7所示,分析可得,剩余参数对失效概率的影响相对大小关系为: $c'_2 > \varphi'_1 > E_1^{\text{od}} > E_1^{50} > c'_1$ 。

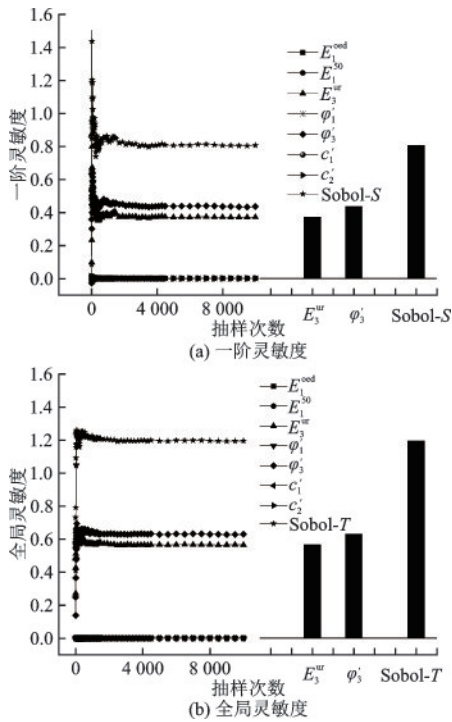


图6 样本数量对灵敏度的影响以及各参数灵敏度

Fig.6 Influence of sample size on sensitivity and sensitivity of each parameter

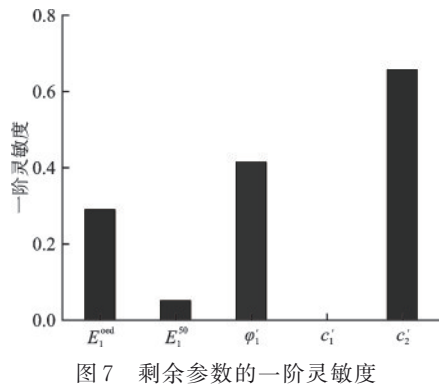


图7 剩余参数的一阶灵敏度

Fig.7 First-order sensitivity of remaining parameters

同时分析上述7个参数,变异系数变化对失效概率的影响趋势,取 $d^{\max}=30\text{ mm}$,采用4.1节中建立的响应面进行分析,各参数的均值保持不变,变异系数自0.01起,以0.01增量依次增至0.3,在研究某一参数对失效概率的影响时,其余参数取均值,变异系数取0,以土体参数变异系数为横轴,坑底抗隆起失效概率为纵轴,绘制结果如图8所示。分析得, ϕ_3' 对失效概率的影响很大,但其对失效概率的影响几乎不受变异系数增大的影响,当其变异系数为0.01~0.05时,失效概率从35%增长到45%左右,但当变异系数超过0.05后,失效概率趋于稳定; E_3^{ur}

其变异系数变化对坑底抗隆起稳定性的影响次之,并且失效概率基本呈线性增长规律,但是在参数该均值下,对失效概率的影响不是很大,当变异系数增加到0.3时,失效概率仅为0.8%,坑底仍处于较稳定状态。

通过以上参数的灵敏度分析以及其变异系数变化对失效概率的影响研究可得,坑底以及接近坑底的土体参数对基坑坑底抗隆起稳定失效概率的影响比较大,坑底土体的优劣直接影响坑底抗隆起稳定性。

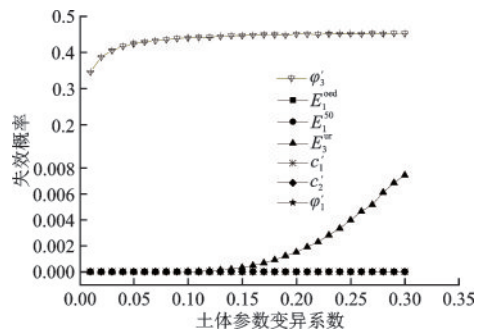


图8 失效概率随土体参数变异系数变化

Fig.8 Probability of failure varies with the coefficient of variation of soil parameters

4.4 基坑支护结构对坑底抗隆起失效概率的影响

研究基坑支护结构对坑底抗隆起失效概率的影响,本文设计出四种不同于原方案的支护方案,具体见表5。取 $N=10^6$, d^{\max} 在25~35 mm取值,分析不同支护方案以及 d^{\max} 对基坑坑底抗隆起失效概率的影响。表5原支护方案中,地连墙嵌入深度为6 m,厚度为0.35 m,未施加内支撑预应力,坑内土体未采取加固处理措施。增设的4种支护方案中依次改变地连墙嵌入深度、厚度、施加内支撑预应力、加固土处理坑内土体,具体方案设计参数见表5,加固土参数见表6,其中对坑底土体进行加固的施工模拟为在表2施工模拟阶段中阶段1地连墙施工模拟,更改为地连墙施工,以及将坑底需要加固的土体的材料参数改为加固土的材料参数,此方法就可以实现坑底土体加固的施工模拟^[33]。

采用本文提出的响应面与蒙特卡罗结合的分析方法,计算了不同 d^{\max} 下,坑底抗隆起失效概率的变化曲线,具体如图9所示。由图9可见,不同支护方案下,基坑坑底抗隆起失效概率随 d^{\max} 的变化规律与图5呈现的规律大致相同,即随着 d^{\max} 取值的增加,失效概率逐渐降低。所增设的4种支护方案,都

是在原有支护方案的基础上做了一定的强化,但是与原支护方案相比,支护方案1、2、3对失效概率降低的效果不是很好,甚至, d^{\max} 在 25~32 mm 时,支护方案3下,坑底隆起失效概率小幅度增加。以 $d^{\max}=35$ mm 为例,原支护方案相对应的失效概率为 3.9% 左右,支护方案1、2、3下,坑底抗隆起失效概率稍有改善,仅使失效概率降低到 3.2% 左右,失效概率降低了不足 1%,因此这三种支护方案并未改善坑底隆起变形情况。较于原方案和前三种支护方案,支护方案4采用加固土对坑底进行加固可以有有效的改善坑底隆起变形,降低抗隆起稳定失效概率。不论 d^{\max} 如何取值,支护方案4下坑底抗隆起失效概率均远远小于原支护方案下坑底的抗隆起失效概率,且当 $d^{\max}=35$ mm 时,失效概率降低为 0.4%,坑底已处于相对稳定状态,是4种支护方案中最能有效降低坑底抗隆起失效概率的方案,究其原因,基坑开挖过程中,在基坑强有力的支护系统下,坑底隆起变形主要与基坑土体的参数有关,最主要是与坑底土体的参数有关,在坑底土体为软弱土层时盲目增强支护结构强度,并不会很好地改善坑底隆起变形情况,反而会增加支护成本。分析发现,支护方案以及 d^{\max} 均对坑底抗隆起失效概率有一定的影响。因此,在工程实践中,建议结合业主对基坑失效风险的承受能力、允许变形的阈值以及支护结构成本进行支护方案选择,力求基坑施工的安全、适用。本文提出的响应面结合蒙特卡罗方法,是一种研究支护方案对坑底抗隆起失效概率影响的合理途径,可以有效筛选适用的支护方案,为基坑设计、施工反馈提供技术支持。

表5 支护方案设计

Table 5 Support scheme design table

支护方案	地连墙嵌入深度/m	地连墙厚/m	内支撑预应力/kN	坑内土体加固/m
原方案	6	0.35	0	0
方案1	8	0.35	0	0
方案2	6	0.5	0	0
方案3	6	0.35	450	0
方案4	6	0.35	0	4

表6 加固土参数

Table 6 Reinforced soil parameters

土体参数	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$E^{50}/(kN \cdot m^{-2})$	$E^{oed}/(kN \cdot m^{-2})$	$E^{ur}/(kN \cdot m^{-2})$	$c'/(kN \cdot m^{-2})$	$\varphi'/(^{\circ})$
数土层	22	38 700	38 700	116 100	60	25

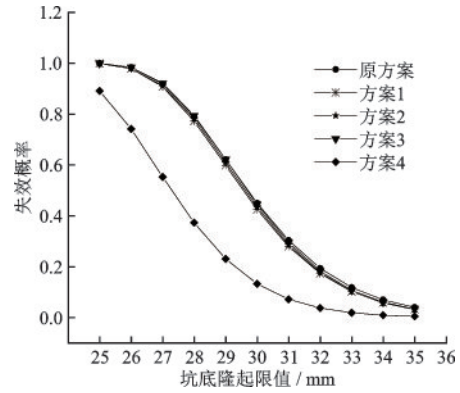


图9 基坑支护结构对 P_f 的影响

Fig.9 Effect of foundation pit support structure on P_f

5 结论

本文基于蒙特卡罗法结合有限元数值模拟与响应面法对基坑坑底抗隆起稳定进行可靠度分析,通过基坑案例,验证了该方法的适用性,同时,对比分析四种支护方案,得到以下结论:

(1) E_3^{ur} (卸载再加载模量) 以及 φ_3' (有效内摩擦角) 与坑底隆起变形相关性较强。

(2) φ_3' 对坑底抗隆起稳定性的影响最大,但其几乎不受变异系数变化的影响; E_3^{ur} 其变异性对坑底抗隆起稳定性的影响次之并且变异系数越大坑底隆起失效的概率越高; c_1' 、 E_1^{50} 、 E_1^{oed} 、 φ_1' 以及 c_2' 对坑底抗隆起稳定性影响比较小,并且相对大小关系为 $c_2' > \varphi_1' > E_1^{oed} > E_1^{50} > c_1'$ 。

(3) 增加地连墙嵌入深度、增加地连墙的厚度、对内支撑施加一定的预应力以及对坑内土体进行加固等支护方案中,坑底土体加固对隆起变形的优化效果较好。

参考文献:

[1] 张旷成,李继民.杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J].岩土工程学报,2010,32(增1):338-342. Zhang K C, Li J M. Accident analysis for "08.11.15" foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup1): 338-342. (in Chinese)

[2] 肖晓春,袁金荣,朱雁飞.新加坡地铁环线C824标段失事后的修复重建(二):修复重建方案的实施[J].现代隧道技术,2010,47(5):71-78. Xiao X C, Yuan J R, Zhu Y F. Recovery work of Singapore MRT circle line c824 nicoll highway collapse

- (part ii): implementation of recovery option[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2010, 47(5): 71-78. (in Chinese)
- [3] 孙海忠.关于上海某基坑坍塌事故的分析研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(增2): 1743-1746.
Sun H Z. Research on one pit collapse in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(Sup2): 1743-1746. (in Chinese)
- [4] 王立忠,刘亚竞,龙凡,等.软土地铁深基坑倒塌分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(9): 1603-1611.
Wang L Z, Liu Y J, Long F, et al. Collapse of deep excavations for metro lines in soft clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9): 1603-1611. (in Chinese)
- [5] 汪炳鉴,夏明耀.地下连续墙的墙体内力及入土深度问题[J]. *岩土工程学报*, 1983, 5(3): 103-114.
Wang B J, Xia M Y. Embedment depth and internal force of diaphragm wall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 5(3): 103-114. (in Chinese)
- [6] Goh A, Kulhawy F H, Wong K S. Reliability assessment of basal-heave stability for braced excavations in clay [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(2): 145-153.
- [7] 侯晓亮,谭晓慧.改进的一次二阶矩方法在基坑抗隆起稳定可靠度评价中的应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(5): 791-795.
Hou X L, Tan X H. Application of advanced first order second moment method to reliability assessment of basal heave stability for braced excavation[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(5): 791-795. (in Chinese)
- [8] Goh A, Zhang W G, Wong K S. Deterministic and reliability analysis of basal heave stability for excavation in spatial variable soils [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 108: 152-160.
- [9] 曹净,高越,刘海明.改进的Monte Carlo法应用于基坑可靠性分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(5): 1565-1572.
Cao J, Gao Y, Liu H M. Application of Monte Carlo method improved in reliability analysis of foundation pit system [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(5): 1565-1572. (in Chinese)
- [10] 吴贤国,王雷,冯宗宝,等.多失效模式下的地铁深基坑系统可靠度分析[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(4): 167-175.
Wu X G, Wang L, Feng Z B, et al. Analysis on the reliability of metro deep foundation pit system under multiple failure modes [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(4): 167-175. (in Chinese)
- [11] 郑刚,窦华港.软土地区深基坑工程存在的变形与稳定问题及其控制:基坑施工全过程的稳定问题[J]. *施工技术*, 2011, 40(9): 1-6, 10.
Zheng G, Dou H G. Stability and deformation problems during deep foundation excavation in soft soil area and their control measures: stability problems during the whole process of excavation construction [J]. *Construction Technology*, 2011, 40(9): 1-6, 10. (in Chinese)
- [12] 章润红, Goh Anthony, 周廷强, 等.考虑空间变异性的基坑降水支护开挖引起地面沉降的可靠度评估[J]. *土木与环境工程学报*, 2021, 43(1): 54-63.
Zhang R H, Goh A, Zhou T Q, et al. Reliability assessment of excavation-induced ground surface settlement with groundwater drawdown considering spatial variability [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(1): 54-63.
- [13] 张旷成,李亮辉.关于抗隆起稳定的计算公式和安全系数取值的考证和研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(增1): 203-211.
Zhang K C, Li L H. Formulate and safety factors for stability of anti-upheaval [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(Sup1): 203-211. (in Chinese)
- [14] 何玉红.考虑塑性发展系数的简化软土基坑回弹变形预测[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(9): 94-98, 103.
He Y H. Simplified prediction of springback deformation in soft soil foundation pit considering plastic development coefficient [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(9): 94-98, 103. (in Chinese)
- [15] 郑刚.软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(1): 1-36, 201.
Zheng G. Method and application of deformation control of excavations in soft ground [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(1): 1-36, 201. (in Chinese)
- [16] 曹力桥.软土地区深基坑开挖坑底隆起的有限元分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增2): 819-824.
Cao L Q. Finite element method analysis of bottom upheaval of deep foundation pits in soft-clay ground due to excavation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup2): 819-824. (in Chinese)
- [17] 刘小丽,马悦,郭冠群,等.PLAXIS 2D模拟计算基坑开挖工程的适用性分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(4): 19-25.
Liu X L, Ma Y, Guo G Q, et al. Applicability of PLAXIS 2D used for numerical simulation in founda-

- tion pit excavations[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(4): 19-25. (in Chinese)
- [18] 建筑基坑工程监测技术规范:GB 50497—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [19] 张璐璐.岩土工程可靠度理论[M].上海:同济大学出版社,2011.
Zhang L L. Geotechnical engineering reliability Theory [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 许英,姜华峰,马国山.基于响应面法的边坡稳定可靠性分析[J].水运工程,2009(11):55-58.
Xu Y, Jiang H F, Ma G S. Reliability analysis on stability of slopes based on response surface method [J]. Port & Waterway Engineering, 2009(11): 55-58. (in Chinese)
- [21] 姜开渝,孟莉.基于响应面的基坑边坡优化研究及应用[J].施工技术,2015,44(21):77-80.
Jiang K Y, Meng L. Application of slope optimization through enumerative algorithm based on response surface [J]. Construction Technology, 2015, 44(21): 77-80. (in Chinese)
- [22] 郟俊彬,邵国建,余杰,等.基于随机响应面法的基坑地连墙可靠度分析[J].河南科学,2020,38(11):1831-1836.
Tan J B, Shao G J, Yu J, et al. Reliability analysis of diaphragm wall in foundation pit based on stochastic response surface method [J]. Henan Science, 2020, 38(11): 1831-1836. (in Chinese)
- [23] 何军涛,张洁,黄宏伟,等.基于多重响应面法的基坑位移反分析[J].岩土力学,2012,33(12):3810-3817.
He J T, Zhang J, Huang H W, et al. Back analysis of displacements of excavation based on multiple response surface method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3810-3817. (in Chinese)
- [24] 许超,赵志伟.北京地区土体硬化模型参数的试验研究及工程应用[C]//2017年全国工程地质学术年会.桂林:中兵勘察设计研究院,2017:143-147.
Xu C, Zhao Z W. Experimental study and engineering application of soil hardening model parameters of Beijing [C]//2017 National Academic Conference on Engineering Geology. Guilin: China Military Survey, Design and Research Institute, 2017:143-147.
- [25] 刘伟煌,朱怀龙,贺斯进,等.土体硬化模型参数试验研究及其在南昌地区基坑工程的应用[J].土木与环境工程学报,2021,43(6):38-47.
Liu W H, Zhu H L, He S J, et al. Experimental study on parameters of hardening soil model for soils and its application in foundation pit engineering in Nanchang [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(6): 38-47. (in Chinese)
- [26] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等.上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J].岩土力学,2021,42(3):833-845.
Gu X Q, Wu R T, Liang F Y, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833-845. (in Chinese)
- [27] Zhang T, Baroth J, Dias D. Probabilistic basal heave stability analyses of supported circular shafts in non-homogeneous clayey soils [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 140:104457.
- [28] 张文生,罗强,蒋良滩,等.基于可靠指标的土体强度参数变异特征及类型划分[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增2):4188-4204.
Zhang W S, Luo Q, Jiang L W, et al. Variation characterization and type classification of soil strength parameters based on reliability index [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup2): 4188-4204. (in Chinese)
- [29] 建筑地基基础工程施工质量验收规范:GB 50202—2002[S].北京:中国计划出版社,2002.
- [30] Sobol I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 55(1-3): 271-280.
- [31] 周云峰,周永潮,郑春华,等.采用Sobol方法的暴雨径流管理模型参数灵敏度分析[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(2):347-354.
Zhou Y F, Zhou Y C, Zheng C H, et al. Sensitivity analysis of parameters of storm water management model with Sobol method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(2): 347-354. (in Chinese)
- [32] Tang Y, Reed P, Werkhoven K V, et al. Advancing the identification and evaluation of distributed rainfall-runoff models using global sensitivity analysis [J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): 1-14.
- [33] 夏梦然.深基坑基底注浆加固效果数值模拟分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(1):64-69.
Xia M R. Numerical simulation analysis of jet grouting effect of deep excavation bottom [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 64-69. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)