

考虑基坑宽度及软弱土层厚度的基坑抗隆起稳定可靠度研究

孟凯琪¹, 王铭浩¹, 焦力², 李亮^{1,*}, 徐亮¹, 胡俊³, 高原⁴

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛市房地产业事业发展中心, 青岛 266071;
3. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228; 4. 青岛新华友建工集团股份有限公司, 青岛 266101)

摘要: 坑底隆起破坏是导致基坑失稳的关键因素之一。对坑底隆起的影响因素展开研究工作, 分析基坑宽度以及软弱土层厚度对坑底隆起变形以及基坑抗隆起稳定可靠度的影响规律。首先, 建立不同工况的基坑开挖有限元模型, 获取坑底不同特征点的隆起变形值, 分析其变形规律, 进而构建基于隆起变形限值的坑底抗隆起失效极限状态函数, 最后采用蒙特卡罗法对坑底进行概率分析。数值模拟结果表明: 当软弱土层厚度足以使隆起破坏滑动面贯通时, 窄基坑的坑底两侧隆起变形大, 中间小, 宽基坑隆起变形规律与之相反; 两种类型基坑坑底隆起变形都随基坑宽度增加而增大。改变软弱土层厚度, 坑底各特征点隆起变形值随之变化, 当为窄基坑时, 坑底隆起变形依旧是中间小, 两侧大; 当基坑为宽基坑时, 随软弱土层厚度增加, 隆起变形随之增大, 且坑底中心隆起变形逐渐超过两侧隆起变形; 依据变形规律得到不同宽度基坑隆起破坏滑动面贯通时的软弱土层厚度。坑底抗隆起稳定可靠度与基坑宽度、特征点位置以及软弱土层厚度有关, 坑底的稳定状态以及可靠度最低的特征点位置随基坑宽度以及软弱土层厚度变化而变化。

关键词: 基坑工程; 基坑抗隆起稳定可靠度; 响应面法; 坑底隆起变形值; 可靠度

中图分类号: TU471 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)04-0035-10

Study on the basal-heave stability and reliability of foundation pit considering excavation width and thickness of soft soil layer

MENG Kaiqi¹, WANG Minghao¹, JIAO Li², LI Liang^{1,*}, XU Liang¹, HU Jun³, GAO Yuan⁴

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;
2. Qingdao Real Estate Development Center, Qingdao 266071, China;
3. School of Civil and Architectural Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;
4. Qingdao Xinhua Construction Engineering Group Co. Ltd., Qingdao 266101, China)

Abstract: Basal-heave is one of the key factors affecting the stability of foundation pit. This study aims to investigate the influence of excavation width and the thickness of soft soil layer on the basal-heave deformation and basal-heave stability and reliability. Firstly, finite element models are established for different working conditions to obtain the substrate deformation data of the characteristic points at the bottom of the foundation pit and analyze their deformation laws. Secondly, the limit state functions are established in terms of acceptable basal-heave deformation. Finally, the Monte Carlo method is used to perform probabilistic analysis of the pit bottom. Numerical simulation results show that for narrow pits, when the

收稿日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(51968019)

作者简介: 孟凯琪(1999—), 女, 山东东营人。硕士, 研究方向为基坑稳定。E-mail: mengkaiqi2021@163.com。

* 通信作者: 李亮(1977—), 男, 山东济南人。博士, 教授, 主要从事岩土工程防灾减灾方面的研究。E-mail: liliang@qut.edu.cn。

thickness of the soft soil layer is sufficiently enough to guarantee the complete generation of failure zones, there are large deformations on the two sides of the foundation pits and small deformations in the middle. Conversely, for wide pits, there are large deformations in the middle of the foundation pits and small deformations on the two sides. For both types of pits, the deformation of basal-heave increases with the increase of pit width. Changing the thickness of the soft soil layer, the deformation of each characteristic point changes accordingly, and the basal-heave deformation remains small in the middle and large on both sides for narrow pits. With the increase of the thickness of the soft soil layer, the value of basal-heave deformation at each characteristic point of the pit bottom increases, and the basal-heave deformation at the center of the pit bottom gradually exceeds deformation at both sides for wide pits. According to the deformation law, we can obtain the thickness of the soft soil layer when the thickness is sufficiently enough to guarantee the complete generation of failure zones. The stability and reliability of basal-heave is hinged on the width of pits, the location of each characteristic point and the thickness of the soft soil layer. The stability of the pit bottom and the location of the characteristic point with the lowest reliability index varies with the width of the pit and the thickness of the soft soil layer.

Key words: foundation pit engineering; basal-heave stability and reliability of foundation pit; response surface method; deformation value of foundation pit; reliability index

随着地下空间开发逐渐深入,基坑失稳问题亦层出不穷^[1],其中坑底隆起破坏又是基坑失稳事故的主要诱因之一^[2],因此正确评价坑底抗隆起稳定对基坑工程具有重要意义。

基坑坑底隆起失稳的评价指标主要有抗隆起稳定安全系数以及隆起变形值,当前学者已经取得了丰硕的研究成果。余建霖等^[3]推导出考虑基坑宽度的抗隆起稳定安全系数计算方法,同时探讨了基坑开挖宽度、支护结构嵌入深度等因素对基坑坑底抗隆起稳定性的影响;王成华等^[4]运用 ABAQUS 软件,考虑了窄基坑对墙体的影响,提出梯形破坏模式;肖伟等^[5]运用 ABAQUS 软件结合抗倾覆稳定理论以及圆弧滑移理论,分析了基坑开挖深度、宽度以及支护结构嵌入深度的内在联系;郑刚等^[6]总结了坑底隆起的变形规律以及工程效应;王浩等^[7]分析研究了不同宽度基坑的变形规律,同时对比分析了不同变形控制措施对不同宽度基坑坑底隆起的加固效果;伍浩等^[8]根据传统土体压缩与回弹试验,推导出大面积基坑开挖工程的基坑开挖总回弹量、分层土体回弹量以及回弹模量的简化计算式。

对坑底的不确定性分析因不能考虑基坑土体参数的变异性,无法合理地评估基坑坑底抗隆起稳定可靠度,为此很多学者开展了基于确定性分析结果的概率分析研究工作。GOH 等^[9]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;ZHANG 等^[10]依据有限元极限分析得到的抗隆起稳定安全系数,引入蒙特卡罗法等进行概率分析,提出了存在地下水的基坑开挖过程中渗透系数、土壁界面强度系数的各向异性对坑底隆起稳定性的显著影响。

坑底抗隆起稳定的影响因素主要包括:基坑开挖宽度、深度、支护结构嵌入深度等,当前软弱土层厚度对坑底隆起变形规律的研究较少,同时联合基坑开挖宽度以及软弱土层厚度两种影响因素对坑底隆起变形规律的研究更加匮乏,因此本文分析了基坑开挖宽度、软弱土层厚度以及联合两种影响因素对坑底隆起变形规律的影响,考虑土体参数变异性,结合响应面法与蒙特卡罗法,研究了不同基坑宽度、不同软弱土层厚度对坑底抗隆起稳定可靠度的影响。

1 基于坑底隆起变形的基坑抗隆起失效极限状态函数

基坑工程主要集中在市区,施工环境复杂,开挖变形对周围环境影响显著,因此本文采用坑底隆起变形值构建坑底抗隆起失效极限状态函数。数值分析法可以综合考虑基坑形状、尺寸、地下水以及支护结构

等因素对隆起变形的影响,在基坑工程中得到了广泛应用^[7]。PLAXIS 2D 内置有更适用于模拟基坑开挖工程的硬化土模型^[11],本文采用 PLAXIS 2D 有限元分析软件建模并对坑底进行隆起变形分析。依据《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB 50202—2018)^[12] 布置监测点,作为本文研究的特征点。依据《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2019)^[13] 将坑底隆起变形的监测预警值 $d_{\max} = 25 \sim 35 \text{ mm}$ 作为隆起变形限值,建立以下极限状态函数:

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

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 为坑底隆起变形的影响因素, $X = x_1, x_2, \dots; d_{\max}$ 为监测预警值; $d^c(X)$ 为坑底隆起变形值。

确定坑底抗隆起失效极限状态函数后,利用传统的可靠度分析方法,如一次二阶矩法^[14]、蒙特卡罗法^[15]等进行可靠度分析,本文采用蒙特卡罗法估算可靠度 β ^[15],进行坑底抗隆起稳定可靠度分析。

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (2)$$

式中: β 为可靠度; μ_G 为 N 个极限状态函数值的均值; σ_G 为 N 个极限状态函数值的标准差; N 为总的抽样次数。

均值代表这 N 个极限状态数值的平均水平,标准差代表这 N 个极限状态数值的波动大小, β 越大,表示基坑的稳定程度越高。 N 过小时,得到的 β 具有偶然性,不能准确表达坑底抗隆起稳定的可靠程度; N 过大时,需要的计算时间较长,影响工作效率。在具体应用式(2)时,一般需对 N 进行敏感性分析,以确定合理 N 值。

2 基于响应面法的坑底隆起变形值计算

对坑底进行抗隆起可靠度分析时,蒙特卡罗法的精度与样本数量有关,一般情况下,需要产生大量的随机样本进而通过反复使用 PLAXIS 2D 进行有限元分析得到计算结果,导致计算效率较低,本文采用响应面法构建 X 与 d^c 之间的关系,即式(3),在验证并保证精度的基础上代替有限元计算获得 d^c ,减少有限元的计算次数,节省计算成本。

响应面法是岩土工程可靠度分析中常用的一种方法^[16],本文以二阶不含交叉项的多项式响应面为例,建立坑底隆起变形值与岩土体参数之间的关系式:

$$d_r^c(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n d_i x_i^2 \quad (3)$$

式中: $d_r^c(X)$ 为响应面模拟的某特征点隆起变形值; X 为坑底隆起变形的影响因素, $X = x_1, x_2, \dots; a, b_i, d_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为待定系数,总计 $2n+1$ 个,采用中心点复合设计法确定各待定系数值。

响应面模拟的特征点隆起变形值为有限元计算值的近似值,因此在利用响应面法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

根据工程地质勘察报告以及相关文献^[17] 确定土体参数的统计值以及分布类型,然后设计不同开挖宽度及软弱土层厚度的基坑,根据支护设计以及施工方案建立不同工况下的 PLAXIS 2D 数值模型,获取坑底各特征点隆起变形值。依据第 2 节所介绍的响应面法,构建随机变量与坑底隆起变形值之间的响应面,依据响应面计算所得的隆起变形值与监测预警值建立坑底抗隆起稳定的极限状态函数,利用经过验证精度的响应面代替复杂的有限元计算,最后利用蒙特卡罗法进行基坑坑底抗隆起稳定可靠度 β 的计算,计算流程如图 1 所示。

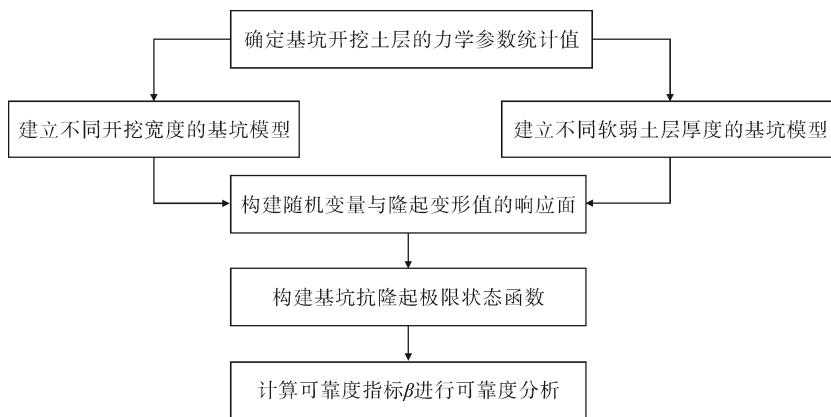


图 1 坑底抗隆起稳定可靠度分析流程

4 算例分析

4.1 工程概况

考虑如图 2 所示的基坑开挖模型,自上而下分布的土层分别为:填土层(0~−3 m),粉质黏土层(−3~−15 m),粉砂层(−15~−37.2 m),中等风化泥质粉砂层(−37.2~−50 m),各土层土体参数的平均值如表 1 所示。开挖深度为 10 m,为研究基坑开挖宽度对坑底隆起变形的影响,取

$$B = kH \tag{4}$$

式中: B 为基坑开挖宽度; k 为系数,取 $k = 0.5, 0.8, 1, 2, 3, \dots, 10$ 等 12 个不同数值以研究基坑开挖宽度对坑底隆起变形的影响; H 为基坑开挖深度。

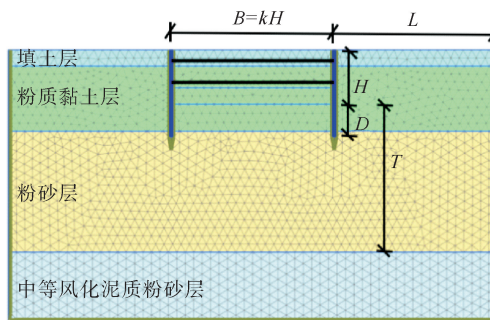


图 2 基坑开挖模型

B —开挖宽度; H —开挖深度; L —支护结构距模型边界的距离; D —支护结构嵌入深度; T —软弱土层厚度

表 1 土体参数均值

编号	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	17.0	6.780×10^3	6.000×10^3	5.478×10^4	5	22
2	粉质黏土	18.0	9.040×10^3	8.000×10^3	7.304×10^4	15	20
3	粉砂	17.0	1.130×10^4	1.000×10^4	4.000×10^4	1	31
4	中等风化泥质粉砂	24.8	7.007×10^5	7.007×10^5	2.100×10^6	200	28

注: 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[17]研究结论,各土层 $E^{50} = (0.5 \sim 1.7)E^{\text{oad}}$, $E^{\text{ur}} = (1.4 \sim 11.9)E^{\text{oad}}$ 。

基坑围护结构采用 16 m 深、0.35 m 厚的地连墙以及 2 道钢结构内支撑支护,支撑水平间距为 5.0 m,钢支撑的轴向刚度为 4.8×10^6 kN;地连墙轴向刚度为 1.2×10^7 kN/m,抗弯刚度为 1.2×10^5 $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ 。采用明挖顺作法施工工艺,具体如表 2 所示。

4.2 有限元计算模型边界及网格密度确定

采用 PLAXIS 2D 进行基坑开挖有限元数值

表 2 开挖过程对应的有限元模拟施工阶段

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

模拟,土层采用 15 节点平面应变单元模拟,土体本构选用土体硬化模型(HS 模型)^[17]。采用板单元模拟支护结构,界面单元模拟支护结构与土体的相互作用,锚杆单元模拟内支撑。基于文献研究^[18],支护结构边缘到模型边缘的水平距离 $L \geq 2H$,本文取 $L = 3H$ 。模型两侧约束水平位移,底部约束水平与垂直位移。

网格划分对计算结果以及计算时间具有显著影响,本文以 $B = H, 3H, 6H$ 的基坑为例,研究网格划分对计算结果的影响,计算结果如表 3 所示。以超细网格划分下坑底隆起值为基准,计算各种网格下结果的相对误差 δ ,分析可知,基坑开挖宽度越小时,网格划分对计算结果影响越大,综合考虑 3 种基坑,采用细、中等程度的网格划分时,计算结果与超细网格划分时的结果更为接近,但中等程度网格划分具有明显的时间优势,因此综合考虑计算结果的准确性以及计算成本,本文采用中等程度的网格。

表 3 网格划分对计算结果的影响

网格粗糙程度	$B=H$		$B=3H$		$B=6H$	
	$\delta/\%$	计算时长/s	$\delta/\%$	计算时长/s	$\delta/\%$	计算时长/s
高度粗糙	4.42	14.40	0.49	17.19	0.16	16.90
粗糙	2.18	23.94	0.02	23.72	0.05	26.93
中等	0.54	24.28	0.10	27.78	0.05	46.70
细	0.24	68.35	0.05	83.04	0.05	72.38
超细	—	134.63	—	129.72	—	157.14

4.3 基坑坑底隆起变形值的确定性分析

4.3.1 基坑开挖宽度对坑底隆起变形规律的影响

基坑的开挖宽度、下覆软弱土层厚度对基坑抗隆起稳定性以及变形有显著影响,因此本文选取 12 种不同的开挖宽度 B 以分析 B 对坑底隆起变形规律的影响,为消除下覆软弱土层厚度对坑底隆起变形的影响,借鉴文献^[18]中提出的临界深度 T_c ,其含义为: $D=0$ 时,为保证滑动面贯通,基坑开挖面到坚硬岩层的深度,取 $T_c = B/\sqrt{2}$ 。本文取 $T = T_c + D$,其中, T 为基坑开挖面距坚硬岩层的深度,即软弱土层厚度, m ; T_c 为临界深度, m ; D 为支护结构嵌入深度, m 。

在坑底选取一系列特征点计算其隆起变形值,结果如图 3 所示。由图 3 可得,坑底隆起变形以坑底中心为对称轴,呈对称分布; $B=0.5H, 0.8H, H$ 时,基坑两侧坑底隆起变形较大,中间渐小; $B=2H \sim 10H$ 时,坑底中心隆起变形较大;随着基坑开挖宽度增大,坑底隆起变形逐渐增大。基坑坑底隆起主要由两部分组成,一部分是基坑卸荷导致土体回弹,另一部分是支护结构向坑内移动导致隆起^[19],分析可得,当基坑较窄时,基坑卸荷量相对较少,坑底隆起变形主要由基坑支护结构向内移动而产生,因此,坑底两侧隆起变形比中心大;当基坑宽度较大时,基坑卸荷量相对较大,坑底隆起变形受基坑卸荷量的影响较大。验证了以 $B/H = 2$ 作为判别宽窄基坑的合理性。

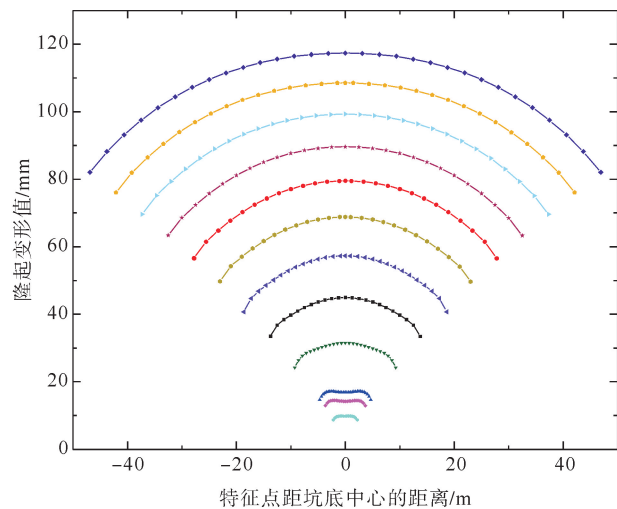


图 3 滑动面贯通时基坑宽度对隆起变形的影响

— $B=0.5H$; — $B=0.8H$; — $B=H$; — $B=2H$; — $B=3H$; — $B=4H$;
— $B=5H$; — $B=6H$; — $B=7H$; — $B=8H$; — $B=9H$; — $B=10H$

4.3.2 软弱土层厚度对坑底隆起变形规律的影响

文献[20]研究发现,当 $T < 0.7B + D$ ($0.7B \approx B/\sqrt{2}$) 时,抗隆起稳定安全系数随 T 的增大逐渐增大;当 $T > 0.7B + D$ 时,抗隆起稳定安全系数随 T 的增大波动较小,因此基坑开挖面距坚硬岩层的厚度亦影响坑底隆起变形值。为研究软弱土层厚度对坑底隆起变形规律的影响,基坑开挖面距坚硬岩层的厚度为

$$T = aT_c + D \tag{5}$$

式中: a 为系数,且 $a = 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.5$ 。

由图 3 可见,坑底隆起变形以坑底中心为对称轴呈对称分布,因此本文取一半宽度的基坑进行研究。选取 $B = H, 3H, 6H, 10H$ 4 种宽度的基坑,在坑底选取一系列监测点作为特征点,根据式(5)改变 a 值,计算不同 T 下,特征点的隆起变形值,计算结果如图 4 所示。

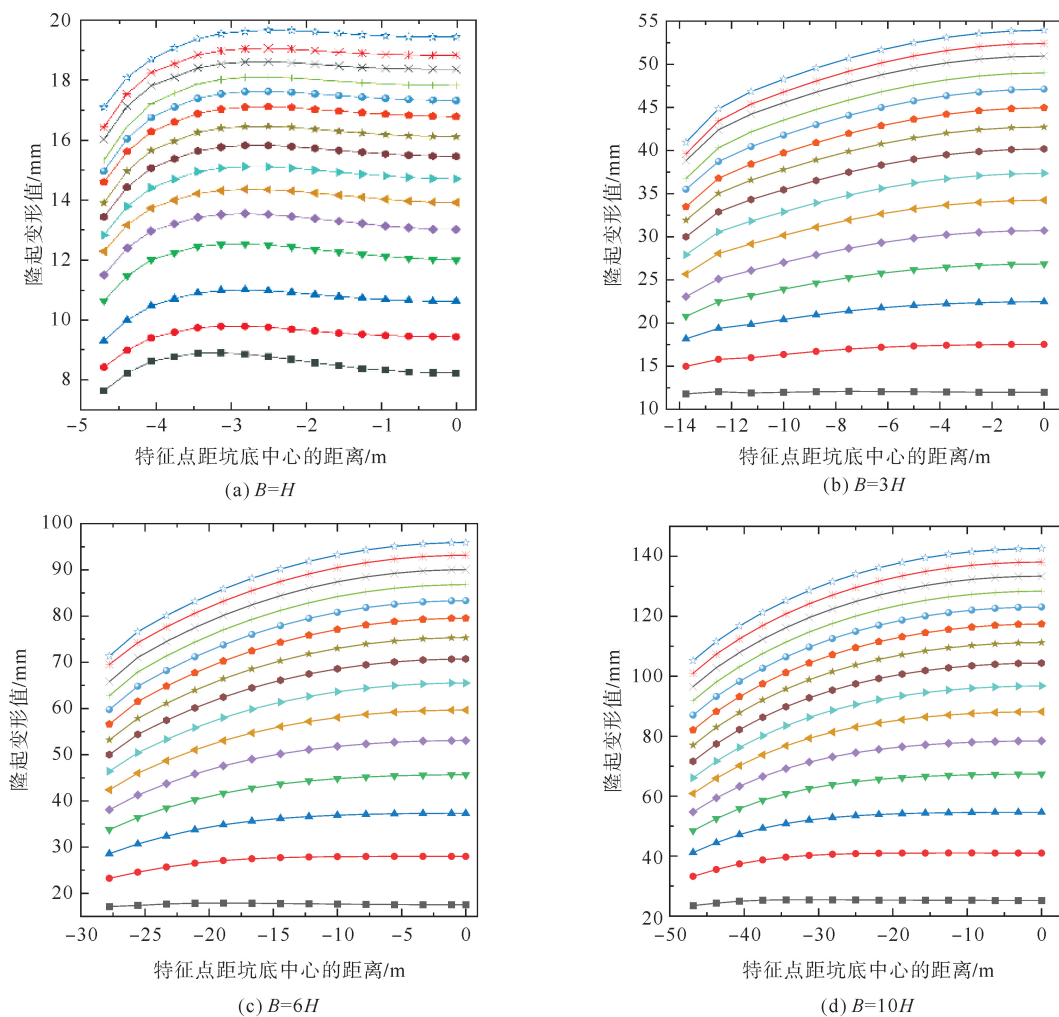


图 4 不同宽度基坑下软弱土层厚度变化对各特征点隆起变形值的影响
 \blacksquare - $a=0.1$; \bullet - $a=0.2$; \blacktriangle - $a=0.3$; \blacktriangledown - $a=0.4$; \blacklozenge - $a=0.5$; \blacktriangleright - $a=0.6$; \blacktriangleleft - $a=0.7$; \blacklozenge - $a=0.8$;
 \blacktriangleright - $a=0.9$; \blacktriangleleft - $a=1.0$; \blacklozenge - $a=1.1$; \blacktriangleright - $a=1.2$; \blacktriangleleft - $a=1.3$; \blacklozenge - $a=1.4$; \blacktriangleright - $a=1.5$

由图 4 可得,各特征点隆起变形值都随软弱土层厚度增加而增大。当 $B = H$ 时,改变开挖面距坚硬岩层的距离,坑底隆起变形仍然是两侧较大,中间稍小。当 $B = 3H, 6H, 10H, a = 0.1$ 时,变形值随特征点距坑底中心的距离变化波动不大,而且,两侧的变形值略大于坑底中心;当 $a = 0.2 \sim 0.4$ 时,变形值随特征点位置变化波动不大,而此时,坑底中心隆起变形值最大;当 $a = 0.5 \sim 1.5$ 时,变形值随特征点距坑底中心的距离减小明显增大,坑底中心点为隆起变形值的最大点,可认为当 $a = 0.5$ 时,滑动面已经贯通,

坚硬岩层不再阻碍坑底表面的隆起。分析可得,当 $B/H < 2$ 时,基坑卸荷量相对较少,基坑隆起变形主要由基坑支护结构向内移动而产生,因此,无论隆起破坏滑动面是否贯通,仍然是基坑两侧隆起变形较大;当 $B/H \geq 2$ 时,当基坑开挖面距坚硬岩层距离较近时,隆起破坏滑动面无法贯通,坚硬岩层阻碍坑底表面隆起,基坑两侧隆起变形稍大于坑底中心,随基坑开挖面距坚硬岩层的距离增大,隆起破坏滑动面逐渐贯通,坑底中心点隆起变形值逐渐超过其余特征点。

4.4 基于响应面法和蒙特卡罗法的抗隆起稳定可靠度分析

4.4.1 响应面建立

土体容重变异性较小^[21],一般将其视为定值。经前期相关性分析,筛选出 E_2^{ur} 、 φ_2' 、 E_3^{50} 、 φ_3' 为随机变量,其中下标为土层编号,详见表 1。各随机变量的均值、标准差以及分布类型如表 4 所示。在坑底选取一系列监测点作为特征点,构建式(1)所示的极限状态函数,取 $d_{max} = 25 \text{ mm}$,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。随机抽取 100 个样本来验证构建响应面的精度,以 $B = 3H$,坑底中心点作为特征点为例,变形值的散点图如图 5 所示。由图 5 可知,有限元计算结果与所构建响应面的预测结果基本一致,拟合决定系数 $R^2 = 0.9987$ 。 R^2 越接近于 1 表明拟合效果越好,响应面的计算精度越高,因此对于本文研究而言,该响应面可以代替复杂的有限元计算。针对其余特征点构建的响应面,经分析,拟合决定系数均在 0.9 以上,限于篇幅,不再赘述。

表 4 随机变量统计参数

参数	$E_2^{ur}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\varphi_2'/(^{\circ})$	$E_3^{50}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\varphi_3'/(^{\circ})$
均值	73 040	20	11 300	31
变异系数	0.100	0.200	0.085	0.150
标准差	7 304.00	4.00	960.50	4.65
分布类型	对数正态	对数正态	对数正态	对数正态

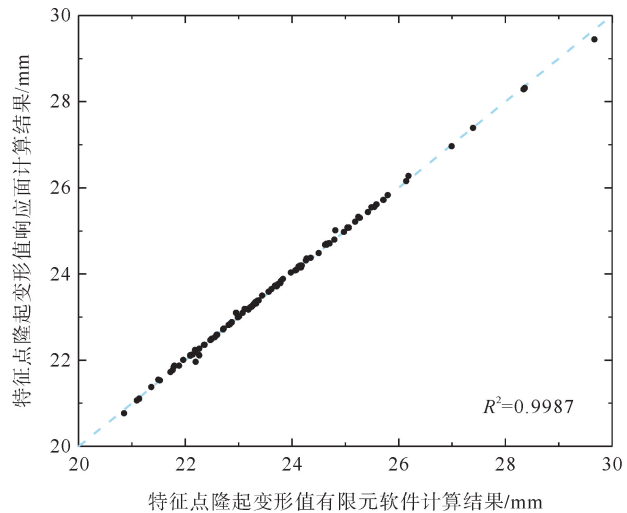


图 5 坑底中心点隆起变形响应面精度验证

4.4.2 蒙特卡罗法敏感性分析

以 $B = H, 3H, 6H, 10H$ 4 种基坑为例,进行蒙特卡罗抽样次数敏感性分析,以确定合理 N 值,计算结果如图 6 所示。由图 6 可得,当 $N = 10^1 \sim 10^2$ 时,计算结果波动较大;当 $N = 10^2 \sim 10^3$ 时,计算结果在小范围内波动;当 $N = 10^3 \sim 10^5$ 时,计算结果趋于稳定。为保证计算结果准确性,本文取 $N = 10^6$ 。

4.4.3 软弱土层厚度以及基坑尺寸对抗隆起稳定可靠度的影响

通过前文分析可知,基坑坑底隆起变形值以及最大值发生位置与基坑宽度以及软弱土层厚度都有关,对各特征点隆起变形值的确定性分析无法考虑土体参数的变异性,因此本节依据表 4 中各

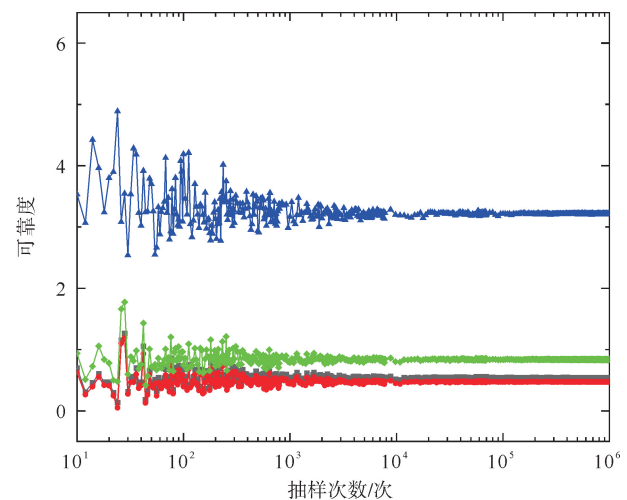


图 6 蒙特卡罗抽样次数敏感性分析

—▲— $B=H$; —■— $B=3H$; —●— $B=6H$; —◆— $B=10H$

随机变量的均值、变异系数以及土体参数的分布类型生成 N 个样本,借助 4.4.1 建立的响应面,研究相同软弱土层厚度下基坑尺寸对抗隆起稳定可靠度的影响。取 $B=H$ 、 $3H$ 、 $6H$ 、 $10H$ 4 种不同宽度的基坑,基坑开挖面与坚硬岩层的距离分别取 7、24 m。计算结果如图 7 所示,点线图为不同工况下各特征点的可靠度 β ,条形图为各工况下最小可靠度 β_{\min} 。

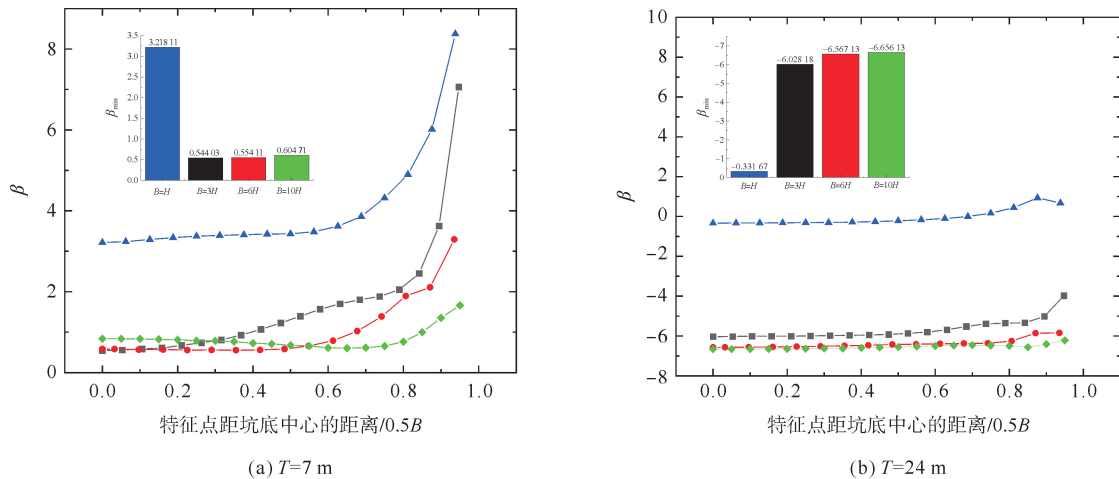


图 7 不同宽度基坑抗隆起稳定可靠度分析

—▲— $B=H$; —■— $B=3H$; —●— $B=6H$; —◆— $B=10H$

当 $T=7$ m 时(图 7(a)),由图中点线图可知,随特征点距坑底中心的距离越远,可靠度先增加再降低再升高,甚至当基坑宽度为 $6H$ 、 $10H$ 时,可靠度最低的特征点在与坑底中心有一定距离处,分析可得,开挖面距坚硬岩层的距离较短,隆起滑动面未贯通,隆起破坏最危险位置在距坑底中心一定距离处,并非坑底中心。由图中条形图可知,当基坑宽度为 H 时,可靠度 β 最高,当基坑开挖宽度为 $3H$ 、 $6H$ 、 $10H$ 时,可靠度 β 近似,且当基坑开挖宽度为 $3H$ 时,可靠度 β 最低,分析得,此时隆起滑动面未形成,坚硬岩层阻挡了滑动面的贯通,因此当基坑开挖宽度为 $3H$ 、 $6H$ 、 $10H$ 时,随基坑开挖宽度增加,可靠度 β 没有明显降低。

当 $T=24$ m 时(图 7(b)),由图中点线图可知,随着 4 种基坑特征点与坑底中心的距离增加,可靠度呈增长状态,仅当基坑开挖宽度为 H 时,两侧可靠度略有降低,4 种基坑可靠度最低的位置都在坑底中心,分析可得当基坑开挖宽度为 H 时,基坑开挖宽度较窄,坑底隆起变形受两侧支护结构向内移动影响较大,因此会在基坑两侧出现可靠度降低的情况,当 $T=24$ m 时,隆起滑动面贯通,隆起破坏最危险处在坑底中心。由图中条形图可知,各基坑 $\beta < 0$,可见此时基坑坑底已处于危险状态,当基坑宽度为 H 时,可靠度 β 最高,当基坑开挖宽度为 $3H$ 、 $6H$ 、 $10H$ 时,可靠度 β 近似,且当基坑开挖为 $10H$ 时,可靠度 β 最低,分析得,此时隆起滑动面贯通,随基坑宽度增加,可靠度降低。

通过以上分析可得坑底抗隆起稳定可靠度与基坑开挖宽度以及软弱土层厚度都有关,因此在工程实践中,在关注基坑开挖宽度对坑底隆起稳定性影响的同时,应进行好地质勘探,结合开挖宽度以及软弱土层的厚度,分析坑底隆起变形规律,依据实际工程,针对不同基坑,对坑底不同位置进行相应的防护,预防坑底隆起破坏的产生。

由图 7 可知,当基坑开挖宽度为 $10H$ 时,各特征点的可靠度最低,现筛选出该基坑,选取坑壁附近以及坑底中心两个特征点,改变其支护结构(即地连墙)的厚度以及嵌入深度,观察不同支护结构参数情况下,坑底隆起的变形情况,计算结果如图 8 所示。由图 8(a)可知,坑底中心隆起变形值几乎不随地连墙厚度变化而变化,而临近坑壁的特征点,隆起变形值随基坑地连墙厚度的增加线性减小,因此,加大地连墙的厚度可以改善基坑两侧的隆起变形。由图 8(b)可知,坑底中心以及临近坑壁的特征点都几乎不随地连墙嵌入深度的增加而变化,因此增加地连墙嵌入深度几乎不会改善坑底的隆起变形。究其原因,该基坑开挖宽度较大,土体卸荷量较大,因此坑底的回弹变形比较严重,增加支护结构的厚度、嵌入深度等,对坑底隆

起变形没有较大改善效果。因此在实际工程中,可根据业主的成本控制范围以及坑底不同位置的允许变形范围,综合考虑土体参数以及支护结构参数,进行支护优化,改善坑底隆起变形,提高坑底抗隆起稳定可靠程度。

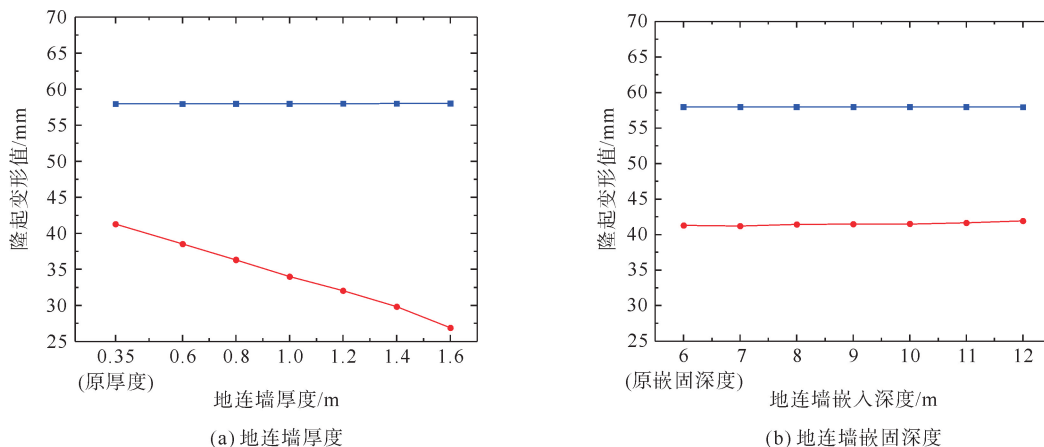


图 8 支护结构参数对特征点隆起变形值的影响

—●— 临近坑壁特征点; —■— 坑底中心特征点

5 结论

本文首先针对不同宽度以及不同软弱土层厚度的基坑进行坑底隆起变形的确定性分析,得到各不同基坑的坑底隆起变形规律,接着基于蒙特卡罗法结合有限元数值模拟与响应面法对不同基坑进行可靠度分析,通过基坑案例,验证了该方法的适用性,得到以下结论:

1) 当软弱土层厚度较大时,窄基坑($B < 2H$),坑底两侧隆起变形较大,中间渐小;宽基坑($B \geq 2H$),坑底中心隆起变形较大,且随基坑开挖宽度增加,坑底隆起变形不断增大。

2) 对比分析 4 种不同开挖宽度的基坑,改变软弱土层厚度,当基坑为窄基坑时,坑底隆起变形依旧是中间小,两侧大;当基坑为宽基坑时,随软弱土层厚度增加,开挖面距坚硬岩层的距离增加,隆起破坏滑动面逐渐贯通,坑底各位置隆起变形值增加,且坑底中心隆起变形值逐渐超过两侧隆起变形值。

3) 坑底抗隆起稳定可靠度与基坑宽度以及软弱土层厚度都有关。当基坑为窄基坑时,软弱土层厚度较小时,坑底两侧可靠度明显高于坑底中心;而当软弱土层厚度较大时,坑底两侧可靠度与坑底中心差异不明显。当基坑为宽基坑时,不同软弱土层厚度的基坑,坑底的稳定状态不同,当软弱土层厚度较小时,坑底可靠度最低的位置在距坑底中心一定距离处;当软弱土层厚度较大时,坑底中心可靠度最低。

4) 增加地连墙的厚度,可以改善基坑两侧的隆起变形,而增加地连墙的嵌入深度对基坑两侧以及坑底中心的隆起变形均没有改善作用。

参考文献(References):

- [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(S1): 338-342.
ZHANG Kuangcheng, LI Jimin. Accident analysis for “08. 11. 15” foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 338-342.
- [2] 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 Lizhong, LIU Yajing, LONG Fan, et al. Collapse of deep excavations for metro lines in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1603-1611.
- [3] 俞建霖,龙岩,夏霄,等. 狭长型基坑工程坑底抗隆起稳定性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(11): 2165-2174.
YU Jianlin, LONG Yan, XIA Xiao, et al. Basal stability for narrow foundation pit[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(11): 2165-2174.
- [4] 王成华,张天宝. 窄长基坑隆起破坏模式及其稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(8): 276-281.
WANG Chenghua, ZHANG Tianbao. The failure patterns and stability analysis of basal heave of long narrow foundation pits[J]. Sci-

- ence Technology and Engineering, 2017, 17(8): 276-281.
- [5] 肖伟, 路轶, 杨严禄, 等. 考虑尺寸效应的狭窄型基坑稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4105-4112.
XIAO Wei, LU Yi, YANG Yanlu, et al. Stability analysis of narrow foundation pit considering size effect[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 4105-4112.
- [6] 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.
ZHENG Gang, DOU Huagang. 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.
- [7] 王浩, 贾敏才, 杨修晗. 基坑变形的尺度效应及控制措施研究[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(1): 69-74.
WANG Hao, JIA Mincai, YANG Xiuhuan. Influence of size effect on deformation of foundation pit and control measures[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(1): 69-74.
- [8] 伍浩, 王毅军, 王海, 等. 大面积基坑开挖回弹简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 361-366.
WU Hao, WANG Yijun, WANG Hai, et al. Simplified calculation method for rebound of large area foundation pit excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 361-366.
- [9] 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.
- [10] ZHANG T T, BAROTH J, DIAS D. Deterministic and probabilistic basal heave stability analysis of circular shafts against hydraulic uplift[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 150: 104922.
- [11] 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 Xiaoli, MA Yue, GUO Guanqun, et al. Applicability of PLAXIS2D used for numerical simulation in foundation pit excavations[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(4): 19-25.
- [12] GB 50202—2018, 建筑地基基础工程施工质量验收规范[S].
GB 50202—2018. Code for acceptance of construction quality of building foundation[S].
- [13] GB 50497—2019, 建筑基坑工程监测技术规范[S].
GB 50497—2019. Technical code for monitoring of building excavation engineering[S].
- [14] 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 Xiaoliang, TAN Xiaohui. 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.
- [15] 杨林德, 徐超. Monte Carlo 模拟法与基坑变形的可靠度分析[J]. 岩土力学, 1999(1): 16-19.
YANG Linde, XU Chao. Monte Carlo simulation and reliability analysis on the deformation of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999(1): 16-19.
- [16] 许英, 姜华峰, 马国山. 基于响应面法的边坡稳定可靠度分析[J]. 水运工程, 2009(11): 55-58.
XU Ying, JIANG Huafeng, MA Guoshan. Reliability analysis on stability of slopes based on response surface method[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(11): 55-58.
- [17] 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(中英文), 2021, 43(6): 38-47.
LIU Weihuang, ZHU Huailong, HE Sijin, 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.
- [18] FAHEEM H, CAI F, UGAI K, et al. Two-dimensional base stability of excavations in soft soils using FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(2): 141-163.
- [19] 刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J]. 地下工程与隧道, 1996(2): 2-7.
LIU Guobin, HOU Xueyuan. Residual stress analysis method for soft soil pit upheaval deformation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1996(2): 2-7.
- [20] 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.
- [21] 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(S2): 4188-4204.
ZHANG Wensheng, LUO Qiang, JIANG Liangwei, 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(S2): 4188-4204.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)