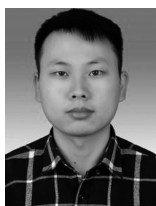


· 地基与基础 ·



# 软土下卧倾斜硬层基坑变形规律 及抗隆起稳定性\*

张海洋<sup>1</sup>, 张京伍<sup>1</sup>, 李衍翔<sup>1</sup>, 李明东<sup>1</sup>, 万愉快<sup>2</sup>

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 受地质构造及地层沉积影响, 实际地层分布并非完全水平。以软土下卧倾斜硬层基坑为研究对象, 通过建立基坑土体非对称有限元模型, 开展倾斜硬层斜面倾角、斜面与支挡结构距离对基坑变形及抗隆起稳定性的影响规律研究。结果表明: 1) 斜面倾角、斜面与支挡结构距离对基坑变形规律及安全系数存在显著影响。2) 倾斜硬层造成基坑两侧软土不对称分布。土层厚度越小支挡结构受到的约束作用越大, 该侧坑底隆起量、支挡结构变形、坑外地面沉降都小于土层厚度大的一侧。

**关键词:** 基坑工程; 倾斜地层; 变形规律; 安全系数; 有限元模拟

**中图分类号:** TU 470.3; U 641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)11-0208-07

## Deformation law and basal heave stability of foundation pit with inclined hard layer lying under soft soil

ZHANG Hai-yang<sup>1</sup>, ZHANG Jing-wu<sup>1</sup>, LI Yan-xiang<sup>1</sup>, LI Ming-dong<sup>1</sup>, WAN Yu-kui<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Due to the influence of geological structure and stratum deposition, the actual stratum distribution is not completely horizontal. Taking the foundation pit with inclined hard layer lying under soft soil as the research object, the influence law of slope angle hard layer and distance between slope and retaining structure on foundation pit deformation and basal heave stability are studied by establishing asymmetrical finite element model of foundation pit. The results show that: 1) The slope angle and the distance between slope and retaining structure have significant influence on the deformation law and safety factor of the foundation pit. 2) The inclined hard layer causes asymmetrical distribution of soft soil on both sides of the foundation pit. The smaller the soil thickness is, the more constrained the retaining structure is. The basal heave of the pit bottom, deformation of the retaining structure and ground settlement outside the pit on the side are all smaller than that on the side with larger soil thickness.

**Keywords:** foundation pit engineering; inclined hard layer; deformation law of foundation pit; safety factor; finite element simulation

基坑工程是为确保地下结构在地下空间施工  
中的稳定及周边环境安全而采取的综合性保护措

施, 在水运工程中的船坞和船闸工程、取排水口  
工程及其他地下工程开发中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2022-02-13

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51869001)

作者简介: 张海洋(1997—), 男, 硕士研究生, 从事基坑工程方向的研究。

通讯作者: 张京伍(1985—), 男, 博士, 讲师, 从事基坑工程方向的研究及教学工作。E-mail: zhangjingwu2010@126.com

软土地区土体具有天然含水率高、压缩性大、灵敏度高、抗剪强度低、孔隙比大及蠕变明显等特点, 该地区基坑开挖支护结构变形大、坑底隆起明显等不利因素造成基坑安全性难以保证, 基坑建造存在较大风险。因此对处于软土地区的基坑变形规律及坑底稳定性开展分析是基坑设计、施工的关键。

针对软土基坑变形问题, 已有学者<sup>[3-5]</sup>对我国东部软土地区的基坑变形规律进行了探究。Lei 等<sup>[6]</sup>通过改进的可动强度设计 (MSD) 计算方法分析软土深基坑支护结构侧移规律, 发现最大侧移峰值在  $0\sim 0.2\%H$ 。秦会来等<sup>[7]</sup>运用有限元分析发现基坑地表最大沉降发生在约  $1.15H$  处, 地表沉降的显著影响范围为  $2.4H\sim 3.0H$ 。基坑抗隆起稳定性研究方法主要包括极限平衡法、极限分析法及数值分析法, 秦会来等<sup>[8]</sup>提出了多块体上限解法求解基坑抗隆起安全系数。孔德森等<sup>[9]</sup>采用强度折减法对软土深基坑工程进行数值分析, 进一步利用数值分析结果拟合公式, 并求得基坑抗隆起安全系数。Huang 等<sup>[10-11]</sup>基于极限分析上限定理, 对坑底隆起破坏机制进行了修正, 能够更准确地分析坑底隆起稳定性问题。当基坑下卧层存在水平硬层时, Chang<sup>[12]</sup>基于 Prandtl 破坏机构, 提出分析黏土基坑抗隆起稳定性的上限法。黄茂松等<sup>[13-14]</sup>及秦会来等<sup>[15]</sup>将 Chang 提出的方法进一步推广到考虑非均质软黏土及土体强度各向异性的条件下进行抗隆起稳定性研究。Goh 等<sup>[16]</sup>通过有限元分析地下连续墙支护的软土基坑开挖稳定性。已有研究多考虑下卧层为软土层或水平硬层, 但在实际工程中地层并不是完全理想的水平。由于地质构造及地层沉积影响, 地层往往呈现不规则或者倾斜分布。现有基坑设计规程<sup>[17-18]</sup>针对基坑抗隆起稳定性分析都立足于均质土层或软弱夹层, 未在抗隆起稳定性验算时考虑实际可能存在的下卧倾斜硬层这一工况。

基于此, 本文以软土下卧倾斜硬层基坑为研

究对象, 基于有限元模拟方法, 探究倾斜硬层倾角、斜面与支挡结构距离对基坑支挡结构变形、地面沉降及抗隆起稳定性的影响规律, 研究成果可为场地存在倾斜地层条件下的地下工程及水运工程中基坑工程设计及施工提供参考。

1 有限元模型建立

建立如图 1 所示的软土下卧倾斜硬层基坑几何模型,  $\alpha$  为下卧倾斜硬层倾角,  $d_1$  为斜面与近端支挡结构底部距离,  $d_2$  为斜面与远端支挡结构底部距离。采用有限元数值软件 PLAXIS 2D<sup>[19]</sup> 进行模拟分析。设定基坑宽度  $B=20.0\text{ m}$ , 开挖深度  $H=16.0\text{ m}$ , 支挡结构嵌固深度  $D=4.0\text{ m}$ 。土体采用 15 节点三角形单元离散, 共生成 747 个单元、6 329 个节点, 图 2 为基坑有限元模型及网格划分。为减少边界效应, 水平方向取基坑边缘与模型边界距离为  $4H$ , 竖向取地面与模型边界距离为  $5H$ , 模型两侧边界施加水平向约束, 底部边界施加固定端约束。相较于 Mohr-Coulomb 模型, 由于硬化土 (HS) 模型考虑了土体卸荷回弹特性, 能较好地反映土体卸荷性质的影响<sup>[20]</sup>, 因此本开挖模拟采用 HS 模型。其涉及到的主要参数包括标准固结排水三轴试验中的割线模量  $E_{50}^{\text{ref}}=15\text{ GN/m}^2$ 、主固结仪加载中的切线模量  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}=7.5\text{ GN/m}^2$ 、卸载-重新加载的刚度  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=45\text{ GN/m}^2$ 。本文 HS 模型中土体参数取值参照文献[21], 密度  $\rho=1.6\text{ t/m}^3$ , 不排水抗剪强度  $c_u=50\text{ kPa}$ , 泊松比  $\nu=0.2$ , 破坏比  $R_f=0.9$ , 与刚度应力水平相关的幂指数  $m=0$ , 支护结构参数见表 1。

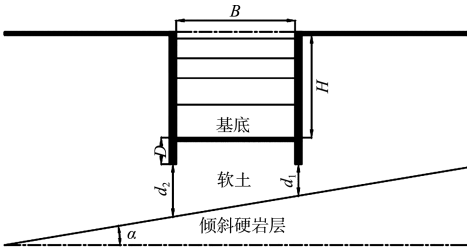


图 1 基坑几何模型

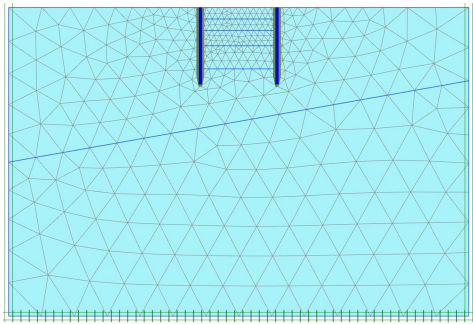


图2 基坑有限元模型及网格划分

表1 支护结构参数

支护结构	$EI / (\text{GN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	$EA / (\text{GN} \cdot \text{m}^{-1})$
支挡结构	4.032	33.6
内支撑	-	2.0

基坑开挖分4个阶段进行模拟，设定地面高程为±0 m，具体施工步骤见图3。第1阶段为开挖至地面以下3.0 m并在-1.0 m处设置第1道内支撑，第2阶段为开挖至地面以下6.0 m并在-4.0 m处设置第2道内支撑，第3阶段为开挖至地面以下10.0 m并在-7.0 m处设置第3道内支撑，第4阶段为开挖至地面以下16.0 m并在-11.0 m处设置第4道内支撑。

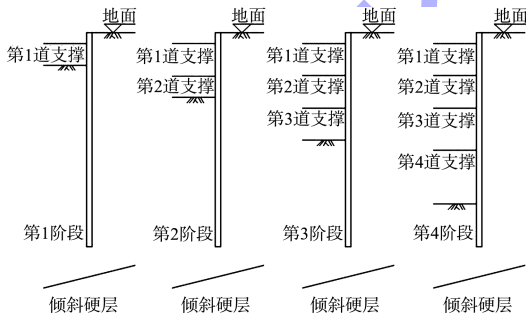


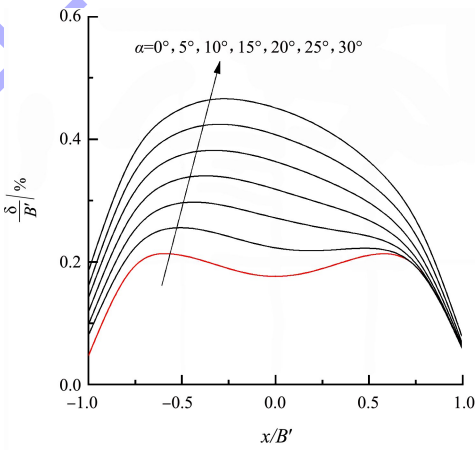
图3 基坑开挖过程

2 下卧倾斜硬层基坑变形规律

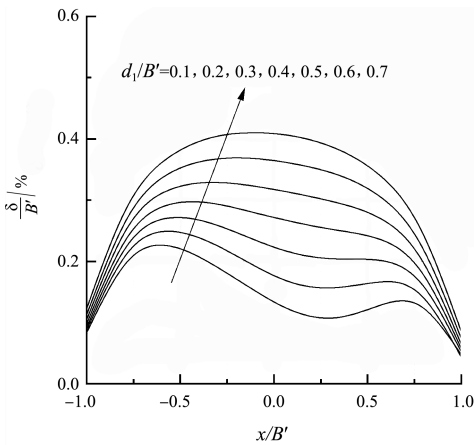
2.1 坑底隆起量分布

图4为软土下卧倾斜硬层基坑坑底隆起量分布变化规律。由图4a)可以看出水平硬层的坑底隆起量分布曲线与倾斜硬层的坑底隆起量分布曲线存在显著区别。主要表现为：水平硬层坑底隆起量分布曲线呈现对称分布，极小值出现在坑底中心处；而倾斜硬层坑底隆起量分布曲线呈现非对称分布，随着倾角 $\alpha$ 增大曲线分布由双峰变成单峰且向坑底中心靠近。这种现象产生的原因是：

随着 $\alpha$ 增大，下卧软土层埋深变大，倾斜硬层对软土约束变小。图4b)为斜面与近端支挡结构距离 $d_1$ 对倾斜硬层坑底隆起量分布曲线的影响规律，当 $d_1/B' (B'=B/2) < 0.6$ 时，坑底隆起量曲线也存在两个非对称峰值；当 $d_1/B' \geq 0.6$ 时，坑底隆起量曲线为对称的“凸”形，隆起量随 $d_1$ 变大逐渐增加。对比图4坑底隆起量分布曲线，发现倾斜硬层的双峰曲线左侧隆起量都大于右侧，形成这一差异的原因是由于坑底右侧距离倾斜硬层更近，倾斜硬层对右侧隆起量约束作用更强。图5总结了坑底最大隆起量 $\delta_{\max}$ 分布规律，相较于水平硬层，软土下卧倾斜硬层会导致 $\delta_{\max}$ 增大，且 $\alpha$ 越大越不利于基坑坑底的稳定；增大 $d_1$ ，两种地层工况下的最大隆起量曲线都逐渐增大。由图5曲线的变化趋势还可以看出，当 $d_1$ 增大到一定值时 $\delta_{\max}$ 趋于定值，此时参数的改变不会对 $\delta_{\max}$ 产生影响。



a)  $d_1/B'=0.3$ 时， $\alpha$ 影响



b)  $\alpha=10^\circ$ 时， $d_1$ 影响

图4 坑底隆起量分布规律

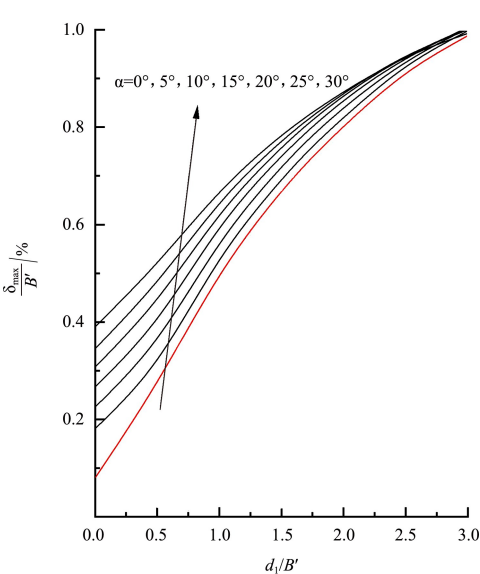
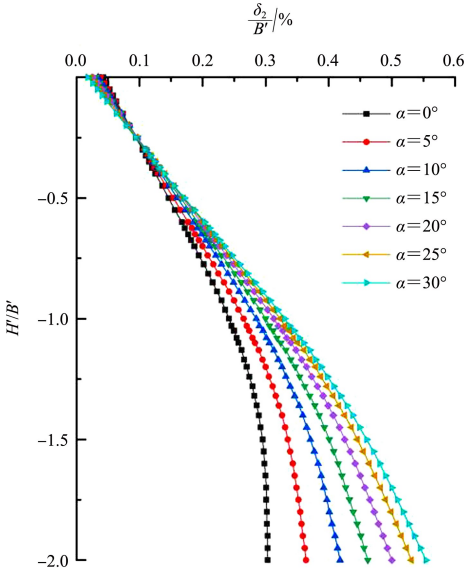


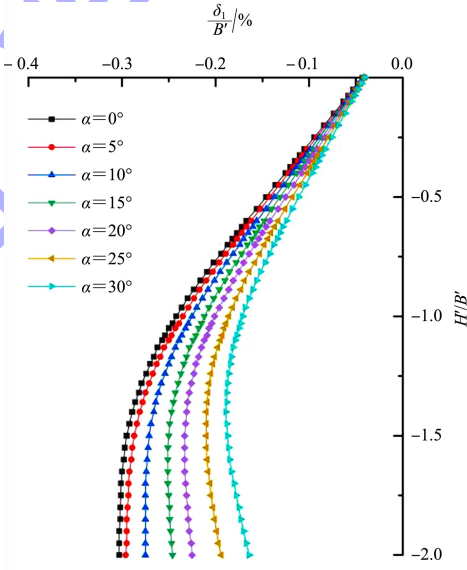
图 5 坑底最大隆起量分布规律

2.2 支挡结构变形

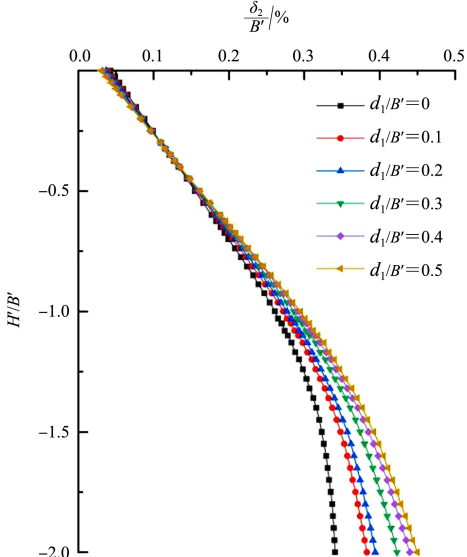
图 6 为软土下卧倾斜硬层基坑支挡结构变形特征，其中图 6a)、6b) 为  $\alpha$  变化对支挡结构变形的影响。当基坑下卧水平硬层时，支挡结构变形随着沿竖向支挡结构深度  $H'$  变大而增大，最大变形位置出现在支挡结构底端附近，支挡结构分布曲线呈现右凸形；右侧支挡结构变形曲线与左侧相互对称。而当基坑下卧地层倾斜硬层时，随着  $\alpha$  变大基坑左侧支挡结构变形逐渐增大，最大变形位置也出现在支挡结构底端；右侧支挡结构变形则随  $\alpha$  变大反而减小，最大变形位置由支挡结构底端移至距底端 1/4 处。图 6c)、6d) 为  $d_l$  变化对支挡结构变形的影响，可以看出，随着  $d_l$  变大左侧支挡结构变形也增大，最大变形位置在支挡结构底端；右侧支挡结构变形则随着  $d_l$  变大而减小，最大变形位置由支挡结构中下部位移至底端，这是由于  $d_l$  变大，基坑右侧软土埋深增大，支挡结构底端受约束作用变小。从图 6 可以看出支挡结构在底端变形最大，在实际工程运用中可以采用对坑底被动区软土进行处理及增大支挡结构刚度、强度等措施进行加固。



a)  $d_l/B'=0.3$ 时 $\alpha$ 对左侧支挡结构影响



b)  $d_l/B'=0.3$ 时 $\alpha$ 对右侧支挡结构影响



c)  $\alpha=10^\circ$ 时 $d_l$ 对左侧支挡结构影响



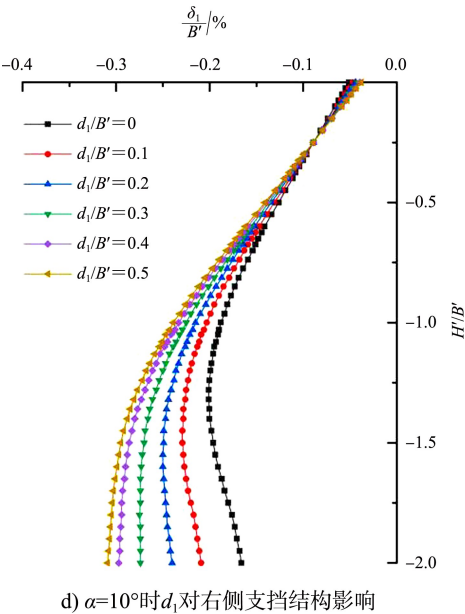


图 6 基坑支挡结构变形特征

图 7a) 为  $\alpha$  和  $d_1$  对基坑左侧支挡结构的最大变形量影响规律。当基坑下卧水平硬层时，支挡结构最大变形量随  $d_1$  增大呈现先增大后趋于不变的趋势；而当基坑下卧倾斜硬层时，支挡结构最大变形量随  $\alpha$  增大而增大，但增大趋势逐渐变缓，说明继续增大该侧软土埋深对支挡结构最大变形量已经不产生影响；同时可以发现随着  $d_1$  变化时，支挡结构最大变形量的趋势与水平硬层相似。图 7b) 为  $\alpha$  和  $d_1$  对基坑右侧支挡结构的最大变形量影响规律。当基坑下卧水平硬层时，支挡结构最大变形量规律随  $d_1$  的变化与左侧支挡结构最大变形量规律基本一致；而当基坑下卧倾斜硬层时， $\alpha$  影响下的右侧支挡结构最大变形量规律与左侧相反，即支挡结构最大变形量随  $\alpha$  变大而减小；进一步随  $\alpha$  和  $d_1$  增加，支挡结构最大变形量曲线由凸形变为线性增加。综合对比图 7a) 和 7b) 可以看出，当软土下卧倾斜硬层时，基坑左侧支挡结构最大变形量均大于右侧支挡结构。造成以上现象的原因同样是由于  $\alpha$  的增大导致基坑两侧支挡结构与倾斜硬层距离的差异扩大，右侧软土埋深变浅，其对该侧支挡结构约束作用变大，变形量小于左侧支挡结构。

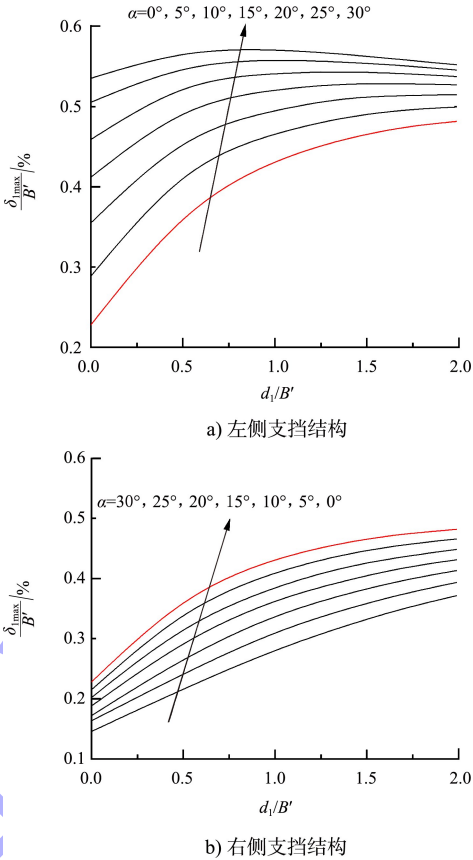


图 7 基坑支挡结构最大变形量影响规律

2.3 地面沉降量

基坑开挖会引起周围地表沉降，进而影响周围建(构)筑物安全，需要进一步开展基坑下卧倾斜硬层对地面沉降影响研究。图 8a)、8b) 给出了  $\alpha$  变化对基坑地面沉降量的影响规律。当基坑下卧水平硬层时，最大沉降量在  $x/B' = -2$  处附近，影响范围在  $2H$  左右；基坑右侧地面沉降量曲线与左侧相互对称。而当基坑下卧地层倾斜硬层时，随着  $\alpha$  变大，基坑左侧远离支挡结构处地面沉降量增加，靠近支挡结构处沉降量呈相反趋势。同时可以看出最大沉降量所在位置逐渐远离支挡结构，沉降影响范围也有所增大；基坑右侧几乎趋势一致，影响较小。当  $\alpha > 10^\circ$  时，倾斜硬层已穿过右侧地面，导致基坑右侧地面沉降量曲线变化异常。图 8c)、8d) 为  $d_1$  对地面沉降量影响的变化规律。随着  $d_1$  增大，基坑两侧地面沉降量增加，最大沉降量位置远离支挡结构。同时可以看出，基坑左侧沉降量始终大于右侧沉降量。

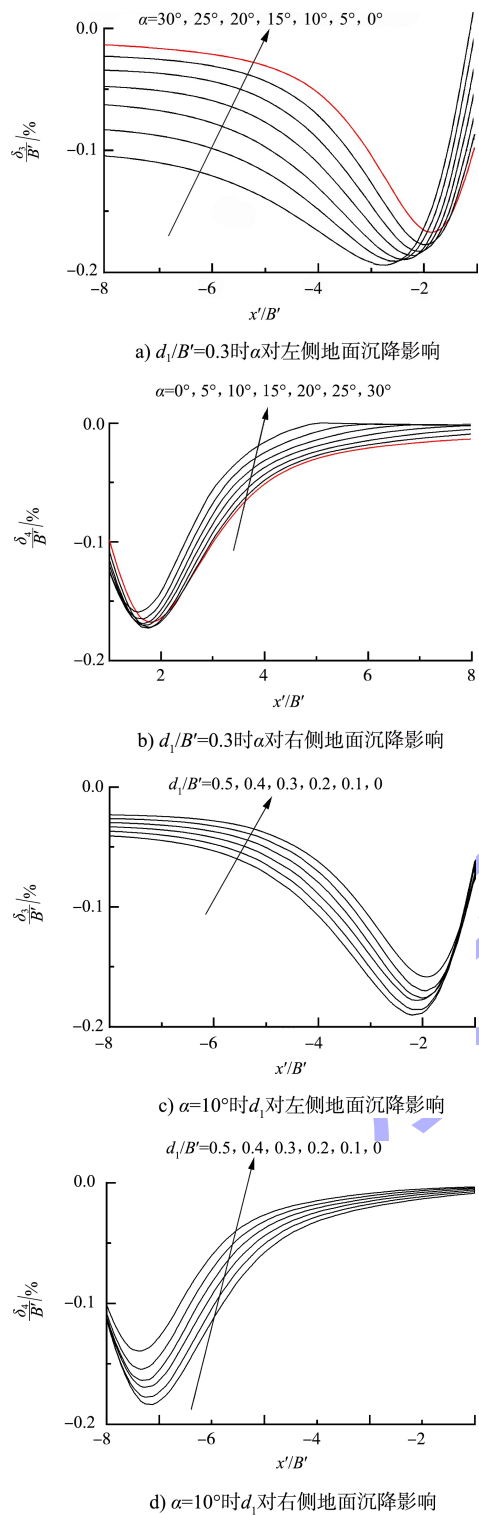


图 8 地面沉降影响规律

3 下卧倾斜硬层基坑抗隆起安全系数

进一步对比分析两种地层工况下的基坑抗隆起安全系数  $F_s$  变化规律，见图 9。可以看出倾角  $\alpha$  和倾斜硬层面与支挡结构距离  $d_1$  对  $F_s$  存在显著影响。基坑下卧水平硬层，当  $d_1/B' < 1.5$  时， $F_s$  随

着  $d_1$  变大而减小；而当  $d_1/B' \geq 1.5$  时，改变  $d_1$  对  $F_s$  基本没有影响，这是由于此时基坑下卧软土层厚度大于  $B/\sqrt{2}$ ，改变软土层厚度对  $F_s$  没有影响。基坑下卧倾斜硬层，当  $d_1/B' < 1.5$  时， $F_s$  随着  $\alpha$ 、 $d_1$  变大逐渐减小； $d_1/B' \geq 1.5$  时，改变  $\alpha$ 、 $d_1$  对  $F_s$  基本没有影响。

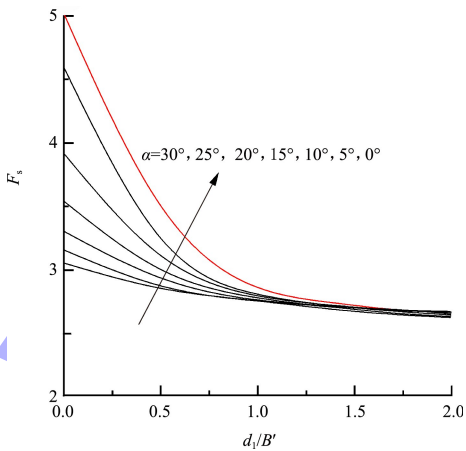


图 9 抗隆起安全系数变化规律

4 结论

- 1) 倾斜硬层工况下的坑底隆起量分布曲线为非对称分布，随倾角  $\alpha$  和斜面与近端支挡结构距离  $d_1$  变大逐渐近似为对称分布。基坑左侧支挡结构变形量及地面沉降量都随倾角  $\alpha$  和斜面与近端支挡结构距离  $d_1$  增大而增大；基坑右侧支挡结构变形量随倾角  $\alpha$  增大而减小，地面沉降随倾角  $\alpha$  增大趋于不变。
- 2) 由于倾角  $\alpha$  影响，基坑右侧支挡结构受到的约束作用大于左侧，导致坑底中心右侧的隆起量、右侧支挡结构变形、地面沉降均小于左侧；增大倾角  $\alpha$ ，坑底中心左侧隆起量、支挡结构变形和地面沉降随之变大，右侧则减小。
- 3) 倾斜硬层工况下的安全系数都小于水平硬层，且随倾角  $\alpha$  增大而变小；当  $d_1/B'$  小于 1.5 时，减小斜面与近端支挡结构距离  $d_1$  坑底抗隆起安全系数大小增加显著；当  $d_1/B'$  大于 1.5 时，改变  $d_1$  变化不明显。

参考文献：

[1] 张逸帆,顾宽海. 澳门某工程取水口水基上基坑设计[J].

水运工程, 2020(5): 20-26.

[2] 汪海生, 陶言祺. 装配式 H 型钢支撑在超深厚软土基坑中的应用[J]. 水运工程, 2020(11): 161-165.

[3] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008(8): 81-86.

[4] 万星, 戈铭, 贺智江, 等. 南京软土地区基坑墙体变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 85-88.

[5] 乔亚飞, 丁文其, 王军, 等. 无锡地区地铁车站深基坑变形特性[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 761-766.

[6] LEI G, GONG X N. Analysis of lateral displacement law of deep foundation pit support in soft soil based on improved MSD method[J]. Advances in civil engineering, 2021, 33: 1-15.

[7] 秦会来, 黄俊, 李奇志, 等. 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 23-26.

[8] 秦会来, 黄茂松. 软土基坑抗隆起上限解法的工程应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 906-909.

[9] 孔德森, 门燕青, 张伟伟, 等. 软土深基坑坑底抗隆起稳定性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 186-190.

[10] HUANG M S, WANG H X, TANG Z, et al. Basal stability analysis of braced excavations in anisotropic and non-homogeneous undrained clay using streamline velocity fields[J]. Acta geotechnica, 2021, 16(4): 1175-1186.

[11] HUANG M S, TANG Z, YUAN J Y. Basal stability analysis of braced excavations with embedded walls in undrained clay using the upper bound theorem[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 79: 231-241.

[12] CHANG M F. Basal stability analysis of braced cuts in clay[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000, 126(3): 276-279.

[13] 黄茂松, 宋晓宇, 秦会来.  $K_0$  固结黏土基坑抗隆起稳定性上限分析[J]. 岩土工程学报, 2008(2): 250-255.

[14] 黄茂松, 余生兵, 秦会来. 基于上限法的  $K_0$  固结黏土基坑抗隆起稳定分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 101-108.

[15] 秦会来, 黄茂松, 王卫东. 非均质软土基坑抗隆起稳定性的极限分析方法[J]. 岩土力学, 2008(10): 2719-2724.

[16] GOH A T C, 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.

[17] 基坑工程手册编辑委员会. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[18] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[19] 陈福全, 吕艳平, 刘毓毓. 内撑式支护的软土基坑开挖抗隆起稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008(2): 365-369.

[20] 刘小丽, 马悦, 郭冠群, 等. PLAXIS2D 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.

[21] GOH A T C. Deterministic and reliability assessment of basal heave stability for braced excavations with jet grout base slab[J]. Engineering geology, 2017, 218: 63-69.

( 本文编辑 武亚庆 )

( 上接第 196 页 )

参考文献:

[1] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 河港总体设计规范: JTJ 166—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

[2] 唐颖, 张志霞, 商剑平. 面向双侧靠船全回转作业的新型煤炭码头通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2015(12): 59-63.

[3] 李云军, 周强, 王荣明. 出口型煤炭码头封闭式堆场通过能力研究[J]. 水运工程, 2008(2): 66-69.

[4] 李娜. 现代内河电煤码头物流系统建模与分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.

[5] 商剑平, 李云军, 魏红彤, 等. 基于计算机仿真技术的大型原油接卸码头通过能力研究[J]. 水运工程, 2015(1): 54-57, 69.

( 本文编辑 王璁 )