

DOI: 10.11779/CJGE2019S1001

考虑土体强度不均匀性时宽窄基坑坑底隆起稳定研究

郑刚^{1,2}, 俞丹瑶², 程雪松^{*1,2}, 潘军², 王若展²

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 在基坑坑底隆起稳定性分析中, 准确的破坏模式及滑动面是确定安全系数的基础。然而, 基坑坑底隆起破坏模式种类繁多且形式各异。传统的经典基坑坑底隆起稳定分析以及规范分析方法在破坏模式及滑动面的选取上均存在差异和局限性。基于不连续布局优化法, 首先研究了土体强度不均匀性对不同宽度基坑坑底隆起稳定性的影响。结果表明, 软土层厚度较大且土体强度沿深度逐渐增长时, 宽基坑坑底隆起滑动面并不覆盖整个坑底, 即相当于软土层下部存在一硬土层, 限制了滑动面向下延伸。进一步, 分析了围护结构长度及抗弯强度对破坏模式及安全系数的影响, 并提出以滑动面触碰围护结构来区分宽窄基坑。在宽基坑中, 当围护结构嵌固深度较小时, 失稳破坏滑动面并不通过桩底, 此时应用绕最下道支撑的圆弧滑动模式时应适当修正滑动面半径。对于窄基坑, 应用圆弧滑动模式时需修正坑内滑动面, 以考虑窄基坑的空间效应对安全系数的提高作用。

关键词: 基坑; 极限分析; 非均质软黏土; 滑动面; 抗隆起稳定性

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0001-04

作者简介: 郑刚(1967—), 男, 贵州贵阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程的教学与科研工作。
E-mail: zhenggang1967@163.com。

Basal heave stability of wide and narrow excavations considering non-homogeneous features of soft clay

ZHENG Gang^{1,2}, YU Dan-yao², CHENG Xue-song^{1,2}, PAN Jun², WANG Ruo-zhan²

(1. MOE Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Tianjin 300072, China; 2. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In the analysis of the basal heave stability of excavations, the reasonable failure mode and the slip surface are the basis for determining the safety factor. However, there are many different types of basal heave failures. The traditional stability analysis methods and the existing codes have differences and limitations in terms of the failure mode and slip surface. Based on the discontinuity layout optimization method (DLO), the influences of non-homogeneous soil strength and excavation width on the basal heave failure mode are investigated. The results show that the soil inhomogeneity should be considered in the basal heave stability analysis. Furthermore, the influences of the length and bending strength of the retaining piles on the slip surface are analyzed, and the method to distinguish the wide and narrow excavations is proposed. For the wide excavations, when the retaining structures are short, the slip surface is below the toe of the retaining structures, and the slip surface should be adjusted when the circular slip method is used. For the narrow excavations, the slip surface should also be modified to consider that the space effect is benefit for the basal heave stability.

Key words: excavation; upper bound analysis; non-homogeneous soft clay; slip surface; basal heave stability

0 引言

沿海地区通常广泛分布强度低、变形能力差以及渗透性低的深厚软黏土, 此类地层中的深基坑工程开挖失稳事故时有发生^[1-2]。在基坑工程在朝着“深、大、长”方向发展的同时, 基坑失稳垮塌案例的破坏模式及滑动面难以确定, 传统的基坑隆起稳定性分析方法存在着诸多局限。因此, 研究深基坑开挖的安全稳定性具有重要的理论意义和实践意义。

传统基坑坑底隆起稳定性分析方法中的 Terzaghi 等^[3]公式和 Bjerrum 等公式^[4]采用均质黏土不排水抗剪强度进行分析。然而, 天然土体的沉积作用导致土体强度沿深度方向存在不均匀性。秦会来等^[5]选用

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805407); 天津市自然科学基金项目(18JCQNJC07900); 天津市科技计划项目(16YDLJSF00040)

收稿日期: 2019-04-30

*通讯作者 (E-mail: cheng_xuesong@163.com)

Prandtl 机构建立了考虑两层土的非均质软土基坑坑底隆起稳定性分析的计算公式。

在基坑工程实践中, 中国规范采用同时考虑了土体 $c-\varphi$ 强度的基坑隆起稳定性分析方法^[6], 包含 Prandtl 等地基承载力模式和基于圆弧滑动模式的分析法, 计算中没有考虑基坑宽度的影响^[7]。工程经验表明, 有利的空间效应可使窄基坑围护结构的入土深度适当减小^[7]。同时, 对于失稳滑动面及滑动面中心位置等问题, 规范仍存在不同规定, 有待进一步研究。

本文采用不连续布局优化法 (DLO) 对软土基坑坑底隆起稳定性进行研究, 对基坑宽度、围护结构嵌固深度、土体不排水抗剪强度分布等对基坑坑底隆起稳定性及其破坏模式的影响进行了探讨。

1 不连续布局优化法与模型验证

不连续性布局优化法 (DLO) 的工作原理为: 通过潜在不连续滑移线连接域内节点, 根据材料达到极限状态, 沿最小能量耗散路径破坏的方法, 确定临界不连续滑移线。

本文对比了 Faheem 等^[8]建立的强度折减有限元模型。由图 1 及图 2 可知, 两种模型的数值和滑动面形态及大小基本一致。

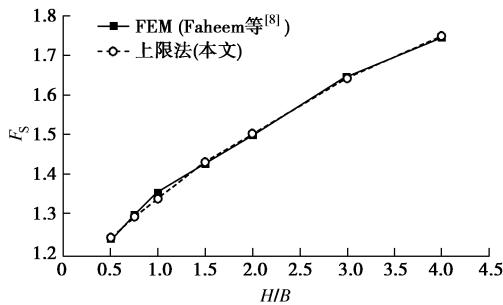


图 1 安全系数 F_s 随 H/B 的变化规律

Fig. 1 Variation of safety factor F_s with H/B

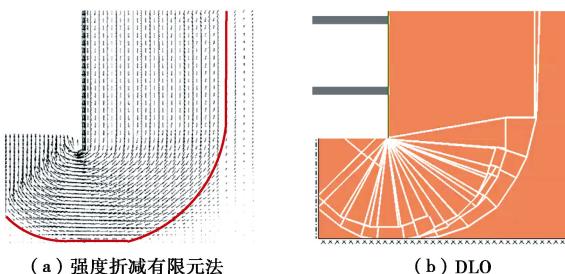


图 2 强度折减法得到节点位移场与 DLO 得到的滑动面对比
Fig. 2 Comparison between strength reduction method and DLO

2 无嵌固深度时土体强度分布对坑底隆起破坏的影响

Faheem 等^[8]模型的土体不排水强度均为常数, 但在天然土体中, 不排水强度沿深度呈增长趋势^[9]。因此, 为合理考虑实际情况, 认为土体不排水抗剪强度

S_u 沿深度线性增长, 表达公式为

$$S_u = c_{\text{ref}} + c_{\text{inc}} \times Z, \quad (1)$$

其中, c_{ref} 为初值, c_{inc} 为增长率, Z 为土体深度。

本文模型的几何参数如图 3 所示。为探究土体强度对基坑坑底隆起稳定性分析的影响, 本节共分析 3 种工况, 计算工况如表 1 所示。

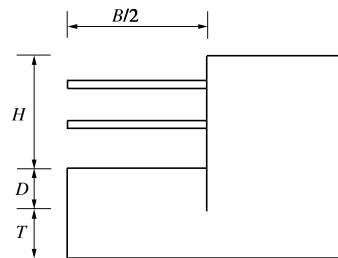


图 3 模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model

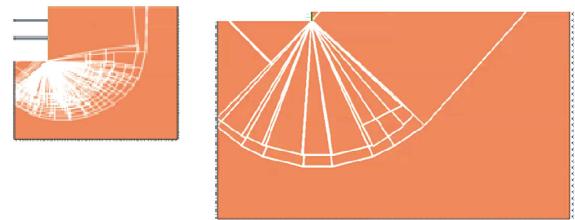
表 1 考虑不同工况的模型参数

Table 1 Model parameters considering different conditions

参数	S_u 为常数	S_u 沿深度线性增长	S_u 的初值和增长率变化
H/m	9	9	9
H/B	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 1.0	0.01, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 1.0	0.05, 1.0
S_u/kPa	35	$S_u=0.92h+22.2$	见图 6, 7

2.1 土体抗剪强度 S_u 为常数

均质土体条件下, 不同基坑宽度的滑动面如图 4 所示。由于软土层足够厚, 滑动面均覆盖整个坑底。当 $B=180$ m 时, 滑动面底部位于坑底以下约 145 m, 向坑外延伸已达 300 m。显然, 在软土层厚度较大时, 均质土体条件在基坑较宽时并不合理。



(a) $H/B=1$ (b) $H/B=0.05$

Fig. 4 Sliding surfaces for different H/B when $S_u=\text{constant}$

2.2 土体抗剪强度 S_u 沿深度线性增长

当取 $S_u=0.92y+22.2$ ^[10], 如图 5 所示, 滑动面不再随基坑宽度的增加而持续增大。由于土体深度越大, 强度越高, 基坑失稳破坏的滑动面穿越较深土层时遇到的阻滑力越大, 与软土层下部存在硬土层类似。

2.3 S_u 的初值和增长率变化对抗隆起稳定性的影响

当 S_u 的初值和增长率变化时, 由图 6 可见, 对于宽基坑 ($H/B=0.05$), 随着不排水强度增长率的提高, 即下卧硬土层埋深更浅, 基坑滑动面半径迅速减小并趋于定值。然而对于窄基坑 ($H/B=1.0$), 由图 7 可见, 虽然整体规律与宽基坑相同, 但其基坑滑动面半径本

身较小, 因此影响程度远小于宽基坑。该现象再次验证了分析基坑稳定性时(尤其针对宽基坑), 考虑土体不排水强度 S_u 随深度变化的必要性。

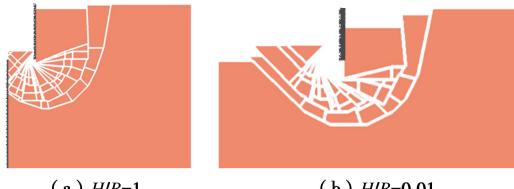


图 5 $S_u=0.92y+22.2$, 不同 H/B 条件下的滑动面

Fig. 5 Sliding surfaces for different H/B when $S_u=0.92y+22.2$

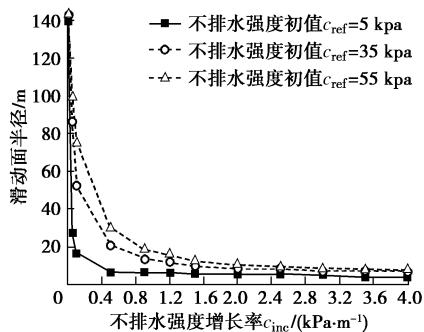


图 6 滑动面半径随增长率 c_{inc} 的变化规律

Fig. 6 Variation of radius of sliding surfaces with c_{inc}

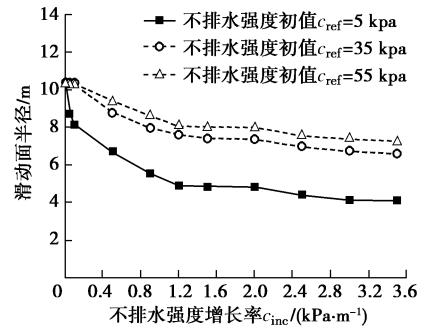


图 7 滑动面半径随增长率 c_{inc} 的变化规律

Fig. 7 Variation of radius of sliding surfaces with c_{inc}

3 考虑嵌固深度时宽基坑的破坏模式

本节对不同支护结构嵌固深度对基坑坑底隆起失稳破坏滑动面的影响进行分析。由工程经验可知, 不考虑围护桩的破坏可能会高估基坑坑底隆起稳定安全系数, 且破坏模式存在误差。因此, 考虑工程常用范围内的围护桩抗弯强度, 取为 $M_p=1000\sim 3000 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$, 土体不排水抗剪强度 $S_u=0.92y+22.2$ 。不同嵌固深度及抗弯强度下的失稳滑动面如图 8 所示。

可以看出: ①随着嵌固深度增加, 滑动面增大。当围护桩较短时, 滑动面位于桩底以下一定距离; 桩较长时, 滑动面接近桩底; ②随着桩抗弯强度增大, 滑动面增大; ③围护桩较长且抗弯强度较小时, 桩在最下道支撑及坑底以下各有一个塑性铰。

对比地基承载力模式计算方法可以看出, 各类不考虑墙体破坏而仅考虑桩底下部土体强度的地基承载

力模式与实际破坏形态不符, 该模式具有一定局限性。

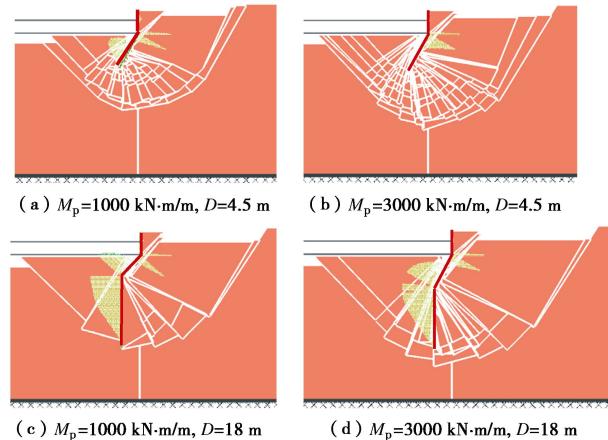


图 8 不同条件下的滑动面

Fig. 8 Sliding surfaces under different conditions

对比圆弧滑动模式计算方法下的滑动面可以看出: 绕坑底旋转的圆弧滑动模式不适合; 绕最下道支撑旋转且滑动面过桩底的圆弧滑动模式在嵌固深度较大时适合, 较小时不适合。

4 考虑嵌固深度时窄基坑的破坏模式

如图 9 所示, 围护结构具有一定的插入深度时, 例如 $D/H=1.0$, 随着基坑宽度逐渐变窄, 基坑内的滑动面与坑底交点逐渐靠近对称轴, 大约 $B=55.2 \text{ m}$ 时, 滑动面碰到基坑中部。随后滑动面向对侧延伸, 大约 $B=18 \text{ m}$ 时, 滑动面碰到对侧墙体。随后继续减小基坑宽度, 滑动面安全系数迅速大幅度增加。因此, 可以按照滑动面是否碰到另一侧墙体作为宽窄基坑的判断依据。以滑动面碰到对侧墙体为临界宽度基坑, 左侧为窄基坑, 右侧为宽基坑。在基坑设计中, 抗隆起稳定性验算公式忽略基坑宽度这个影响因素是不合理的。

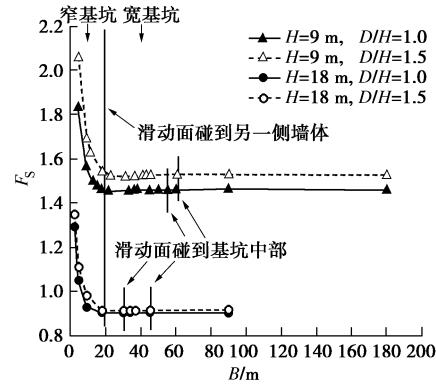


图 9 安全系数 F_S 随基坑宽度的变化规律

Fig. 9 Variation of safety factor F_S with excavation width

在窄基坑条件下, 取土体不排水抗剪强度 $S_u=0.92h+22.2$, 不同围护桩嵌固深度及抗弯强度下的失稳滑动面如图 10 所示。可以看出, 窄基坑与宽基坑的变化规律相似; 但由于窄基坑的空间效应, 桩始终只在最下道支撑处有一个塑性铰。

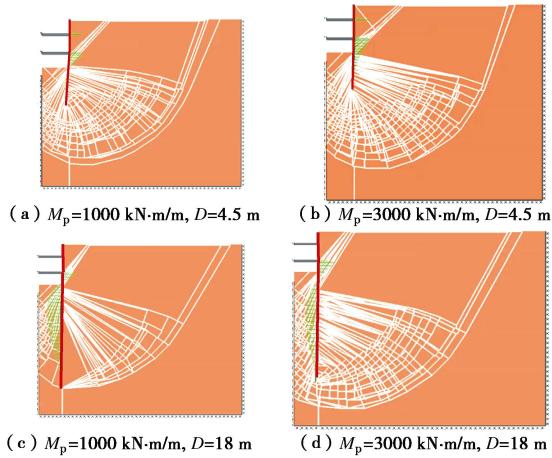


图 10 不同条件下的滑动面

Fig. 10 Sliding surfaces under different conditions

与宽基坑相同,各类不考虑墙体破坏而仅考虑桩底下部土体强度的地基承载力模式均不适合。同时,绕坑底旋转的圆弧滑动模式不适合,绕最下道支撑旋转且滑动面过桩底圆弧滑动模式在嵌固深度较大时适合,较小时不适合,但整体不能反映基坑宽度对滑动面的影响。

5 结 论

本文在已有关于基坑坑底隆起稳定性分析的基础上,通过研究土体强度、基坑宽度、围护结构参数变化对基坑坑底隆起稳定性的影响,主要考虑了滑动面形态及安全系数两方面,可得主要结论如下:

(1) 对于均质且无限厚度的软土,无论基坑宽度多大,滑动面均覆盖整个坑底,这一结果在基坑较宽时是不合理的。因此,软土层厚度及基坑宽度均较大时,需要考虑土体强度在深度上的不均匀性。

(2) 当土体不排水强度随深度增长时,基坑失稳破坏的滑动面穿越较深的土层时遇到的阻滑力较大,此时滑动面将不再随基坑宽度的增加而无限增大,类似于软土层下部存在一个虚拟硬土层,不同宽度基坑的滑动面半径趋于一致。此外,基坑安全系数与土体强度基本为线性关系。

(3) 当研究基坑坑底隆起破坏时,可以按照滑动面是否碰到另一侧墙体作为宽窄基坑的判断依据。对于宽基坑,基坑隆起破坏形式与绕最下道支撑圆弧滑动模式接近,滑动面在围护桩嵌固深度较大时过桩底,较小时在桩底以下一定深度。因此,对于围护桩嵌固深度较小的情况,应用绕最下道支撑的圆弧滑动模式时应适当修正滑动面半径。对于窄基坑,应用绕最下道支撑的圆弧滑动模式时,需要进一步修正坑内滑动面,以考虑窄基坑的空间效应对安全系数的提高作用。

参考文献:

[1] 郑刚,程雪松,刁钰,等.无支撑多级支护结构稳定性

与破坏机理分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(4):304-314.(ZHENG Gang, CHENG Xue-song, DIAO Yu, et al. Analysis of the stability and collapse mechanism of Non-Prop and Multi-Stage retaining structure[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(4): 304 - 314. (in Chinese))

- [2] 郑刚,王凡俊,孙宏宾,等.软土地区CFG桩群孔效应引发的地表沉降[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017(8):20-29.(ZHENG Gang, WANG Fan-jun, SUN Hong-bin, et al. Surface settlement caused by borehole group effect of CFG piles in soft soil[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017(8): 20 - 29. (in Chinese))
- [3] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 1948.
- [4] BJERRUM L, EIDE O. Stability of struttated excavations in clay[J]. Géotechnique, 1956, 6(1): 32 - 47.
- [5] 秦会来,黄茂松,王卫东.非均质软土基坑抗隆起稳定性极限分析方法[J].岩土力学,2008,29(10):2719-2724.(QIN H L, HUANG M S, WANG W D. Limit analysis method for basal stability of braced excavation against upheaval in heterogeneous soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2719 - 2724. (in Chinese))
- [6] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2009:136-142.(LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 136 - 142. (in Chinese))
- [7] 王洪新.基坑的尺寸效应及考虑开挖宽度的抗隆起稳定安全系数计算方法[J].岩土力学,2016(增刊2):433-441.(WANG Hong-xin. Size effect of foundation pits and calculation method of safety factor of heave-resistant stability considering excavation width[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(S2): 433 - 441. (in Chinese))
- [8] 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: 141 - 163.
- [9] 王洪新.对基坑抗隆起稳定安全系数的改进[J].岩土力学,2014,35(增刊2):30-36.(WANG Hong-xin, Improvement on safety coefficient of heave-resistant stability of excavations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 30 - 36. (in Chinese))
- [10] CHEN R P, LI Z C, CHEN Y M, et al. Failure investigation at a collapsed deep excavation in very sensitive organic soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(3):04014078.

(责编: 黄贤沙)