

深厚软土地区窄基坑抗隆起稳定性分析

陆腾腾

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 窄基坑抗隆起稳定性分析是基坑设计中亟待解决的问题之一, 进一步研究窄基坑隆起破坏模式和稳定性验算方法, 对工程安全和节约造价具有长远意义。采用Plaxis有限元软件基于强度折减法模拟窄基坑隆起破坏并详细分析计算结果, 提出新的窄基坑圆弧滑动破坏模式并推导出相应的抗隆起安全系数计算公式, 结合福州深厚软土地区某窄基坑工程实例分析, 进一步验证了公式的合理性。

关键词: 窄基坑; 抗隆起稳定性; 强度折减法; 理论公式

中图分类号: TU46

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0122-06

Analysis on Anti-heave Stability of Narrow Foundation Pit in Deep Soft Soil Areas

LU Tengteng

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The anti-heave stability analysis of narrow foundation pits is one of the urgent problems to be solved in foundation pit design. Further research on heave failure mode and stability verification methods of narrow foundation pits has the long-term significance for engineering safety and cost savings. Based on the strength reduction method, the Plaxis finite element software is used to simulate the heave failure of narrow foundation pits and to analyze the calculation results in detail. A new arc sliding failure mode for narrow foundation pits is proposed and the corresponding calculation formula for the anti-heave safety factor is derived. Based on the case analysis of a narrow foundation pit project in the deep soft soil area of Fuzhou, the rationality of the formula is further verified.

Keywords: narrow foundation pit; anti-heave stability; strength reduction method; theoretical formula

0 引言

窄基坑抗隆起稳定性分析是基坑设计中亟待解决的问题之一^[1]。尤其是深厚软土地区的窄基坑, 抗隆起稳定性往往决定了支护结构的嵌固深度。现行规范^[2]推荐了两个基于极限平衡法的基坑抗隆起安全系数计算公式, 一是基于地基承载力失效破坏模式的计算公式, 二是基于圆弧滑动失稳破坏模式的计算公式, 但均未考虑基坑宽度的影响。按规范公式验算窄基坑抗隆起稳定性, 所需支护结构嵌固深度往往偏大进而造成浪费, 忽视该问题又会带来工程安全隐患。因此, 进一步研究窄基坑隆起破坏模式和稳定性验算方法, 对工程安全和节约造价具有长远意义。

本文针对深厚软土地区的窄基坑, 采用Plaxis有

限元软件建立数值模型分析窄基坑隆起破坏模式, 提出新的圆弧滑动失稳破坏模式并推导出相应的抗隆起稳定系数计算公式, 结合工程实例分析进一步验证了公式的合理性。

1 窄基坑抗隆起稳定性分析探讨

首先要明确窄基坑的定义。在实际工程中, 市政管道、管廊、地道以及地铁等开挖较深的狭长基坑均可称为窄基坑, 但在基坑抗隆起分析中需要更严格的定义。郑刚等^[3]基于不连续布局优化法分析发现在滑动面碰到对侧墙体后, 随着基坑宽度的减小, 滑动面安全系数迅速大幅度增加, 并据此提出以滑动面碰到对侧支护结构的宽度为临界宽度, 宽度小于临界宽度的基坑即为窄基坑。王洪新^[4]基于现行规范推荐的以最下层支点为圆心(图1中O点)的隆起失稳滑动圆弧(图1中ABC段), 推导临界宽度 B_{cr} 计算公式为

收稿日期: 2025-06-25

作者简介: 陆腾腾(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事结构设计工作。

$$B_{cr} = \sqrt{(L + S)^2 - S^2} \tag{1}$$

式中: L 为支护结构嵌固深度; S 为最下道支撑到基坑底的距离。当基坑宽度小于临界宽度 B_{cr} 的基坑即为窄基坑,应考虑对侧支护结构对基坑稳定性的有利作用。

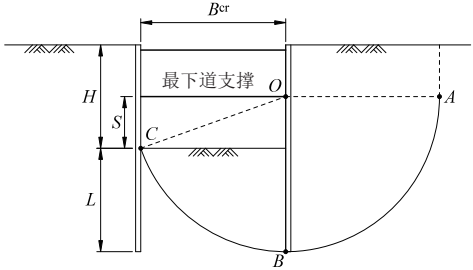


图1 窄基坑临界宽度示意图

张飞等^[5]基于离心模型试验,发现随着基坑开挖深度的增加,围护墙底端向坑内方向移动,最终基坑呈圆弧滑动失稳模式破坏,刘炀镔等^[6]设计的离心模型试验也发现了类似的规律。宋二祥等^[7]基于有限元分析结果发现随着支护结构嵌固深度增加,基坑隆起破坏从地基承载力失效破坏模式过渡到圆弧滑动失稳破坏模式再转变到凸挤破坏模式,并提出对于一般嵌固深度可采用圆弧滑动公式验算抗隆起稳定性。王洪新等^[8]总结国内外基坑工程,发现地基极限承载力失效的隆起破坏基本没有发生过,圆弧滑动失稳多次发生是控制基坑设计的重点。陈孝湘等^[9]基于有限元分析结果,提出窄基坑隆起破坏模式不再是理想的圆弧滑动破坏,设计分析时应选用其他更合适的破坏模式来分析窄基坑抗隆起稳定性。

根据现有研究结论,可以认为圆弧滑动失稳模式更适用于基坑抗隆起稳定性分析,但需要针对窄基坑改进圆弧滑动面。

目前的改进滑动面主要有两种。一是提出新的滑动面形态,王成华等^[10]提出基坑外土体仍按圆弧滑动而基坑内土体沿梯形破坏的滑动面。阳吉宝等^[11]提出抛物线形滑动面。二是移动滑动圆弧的圆心位置。王洪新^[4]提出窄基坑滑动圆心沿最下道支撑平移至其与支护结构底部和对侧基坑底部连线的垂直平分线的交点处(图2中 O_1 点,滑动面为 A_1BC_1)。俞建霖等^[12]提出圆心沿支护结构下移至与支护结构底部和对侧基坑底部连线的垂直平分线的交点处(图2中 O_2 点,滑动面为 A_2BC_2)。应宏伟等^[13]提出圆心沿支护结构下移至距离支护结构底部等于基坑宽度的位置(图2中 O_3 点,滑动面为 A_3BC_3),一

些学者在该假设圆心基础上做了进一步研究^[14-16]。李林等^[17]提出圆心移动到距离支护结构底部等于一半基坑宽度的位置(图2中 O_4 点,滑动面为 A_4BC_4)。滑动圆弧半径均为圆心至支护结构底部的距离。

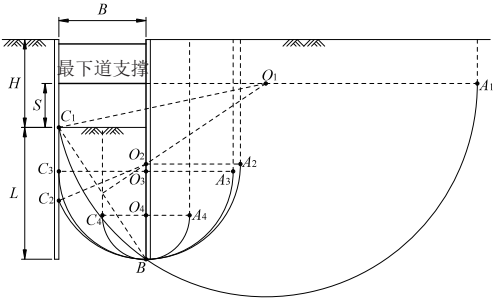


图2 窄基坑改进滑动圆弧示意图

上述关于滑动面形态和圆心位置的改进,均是基于基坑几何形状的假设。一是因为实际工程中难以辨别隆起破坏土体的滑动面形态,二是因为影响基坑抗隆起稳定性的因素比较多,简单的极限平衡法难以综合考虑。基于强度折减的有限元分析法可以克服上述缺陷,Plaxis有限元软件在基坑抗隆起分析中应用广泛^[18-20]。采用Plaxis有限元软件建立数值分析模型,进一步研究深厚软土地区的窄基坑隆起踢脚破坏的滑动面形态和圆心位置。

2 有限元数值模拟分析

2.1 输入参数

文献^[18]采用Plaxis有限元软件模拟分析珠三角某地管廊基坑的抗隆起稳定性,数值模拟结果与现场实测结果比较吻合,该模型参数是一组可靠参数。土层物理力学参数和有限元HS模型参数见表1和表2。

表1 土层基本物理力学参数表^[18]

土名	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e_0	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E_{s1-2}/MPa	ν
淤泥	16.0	1.5	16.9	9.0	2.4	0.2

注:原文中未提供 γ 和 e_0 值,表中为淤泥土常见参数取值。

表2 HS模型参数表^[18]

土名	m	R_f	K_0	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{swd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$
淤泥	0.8	0.9	0.84	3.6	2.4	19.2

采用拉森Ⅳ型钢板桩支护和 $\phi 406\text{ mm}$ 钢管支撑,参数见表3。

表3 支护结构参数表

支护结构	$EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1})$
拉森Ⅳ型钢板桩	48.6×10^5	8.2×10^4
$\phi 406\text{ mm}$ 钢管撑	5.2×10^5	/

2.2 模型及计算结果

基于上述输入参数建立有限元模型,基坑宽度6 m,开挖深度6 m,设置两道支撑,最下道支撑距离基坑底部3 m,基坑分层开挖至坑底后对土体进行强度折减。根据式(1)计算可得支护结构嵌固深度大于3.7 m时为窄基坑。

图3~图5为支护结构嵌固深度分别为4/8/12 m对应的基坑隆起破坏时的塑性区云图。可以清晰地看出土体破坏面为过支护结构底部的圆弧形,双侧滑动形态近似于“ω”。另外,可以看出基坑外土体塑性区发展范围较窄,并未贯通至最下道支撑深度处。



图3 嵌固深度4 m基坑塑性区云图

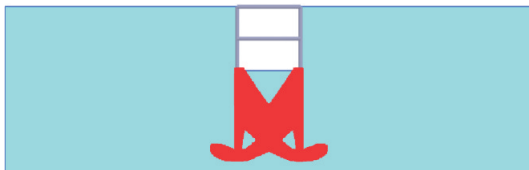


图4 嵌固深度8 m基坑塑性区云图

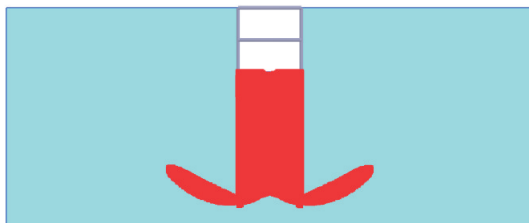


图5 嵌固深度12 m基坑塑性区云图

图6~图8为支护结构嵌固深度分别为4/8/12 m对应的基坑隆起破坏时的支护结构水平位移图。可以看出支护结构仍是绕最下道支点转动。

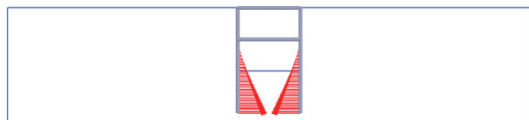


图6 嵌固深度4 m支护结构水平位移示意图(放大5倍)

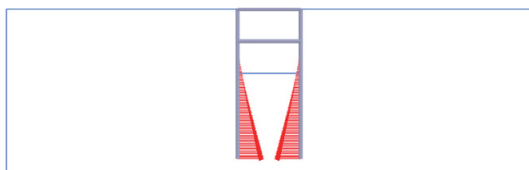


图7 嵌固深度8 m支护结构水平位移示意图(放大1.5倍)

根据隆起破坏模式特点,特征点选取支护结构底端点和基坑底部中心点。图9~图11为支护结构嵌固深度分别为4/8/12 m对应的基坑隆起破坏时的

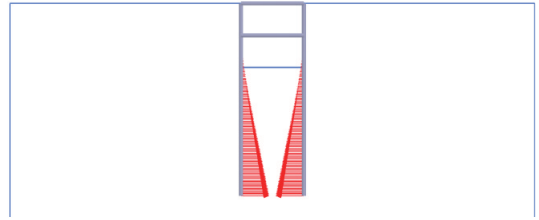


图8 嵌固深度12 m支护结构水平位移示意图

基坑土体滑动特征点位移与强度折减系数 F_s 关系图。可以看出两个特征点位移趋势协调一致,图中拐点对应的强度折减系数 F_s 可以作为抗隆起安全系数 K_s 。

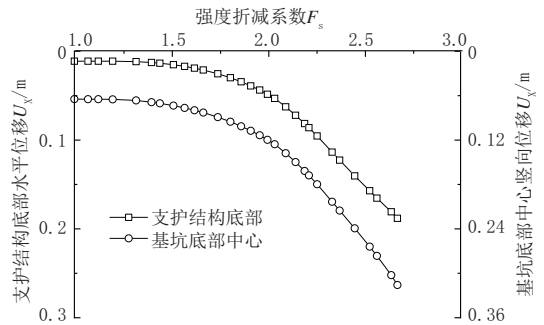


图9 嵌固深度4 m特征点位移与强度折减系数关系

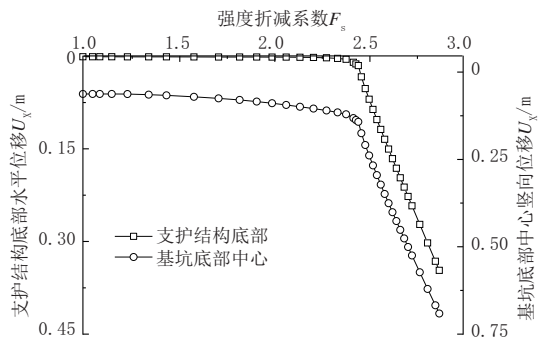


图10 嵌固深度8 m特征点位移与强度折减系数关系

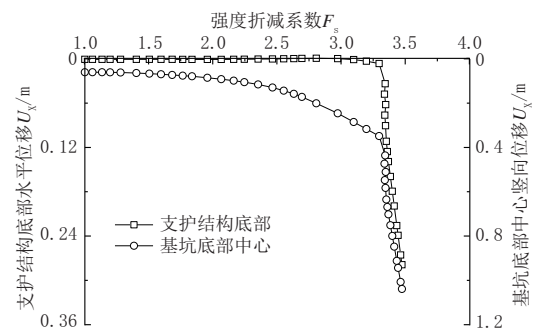


图11 嵌固深度12 m特征点位移与强度折减系数关系

2.3 有限元模型计算结果分析

综合分析上述窄基坑有限元模型计算结果,可以总结出如下规律。

(1)基坑发生隆起破坏时,滑动面仍为绕最下道支点过支护结构底部的圆弧形。

(2)基坑发生隆起破坏时,基坑内土体已发生塑性破坏,而基坑外土体塑性破坏区仅限底部一部分。

(3) 基于强度折减法, 支护结构底端点和基坑底部中心点可以作为位移特征点, 位移与强度折减系数 F_s 关系图中的拐点对应的 F_s 可以作为抗隆起安全系数 K_s 。

3 圆弧滑动计算公式改进

3.1 圆弧滑动改进公式

基于有限元分析结果, 提出如图 12 所示基坑隆起破坏圆弧滑动面, 即绕最下道支点 O 点转动的圆弧 BCD , B 点距离支护桩水平距离等于基坑宽度 B 。窄基坑隆起滑动圆弧与对侧支护结构相交于 D 点。对侧支护结构及其后的土压力限制了滑弧进一步发展, 并且限制了 AB 段深度范围内的土体塑性发展。因此, 窄基坑形成了圆弧 BCD 滑动面, 基坑内土体在

两侧支护结构的作用下向上隆起破坏。

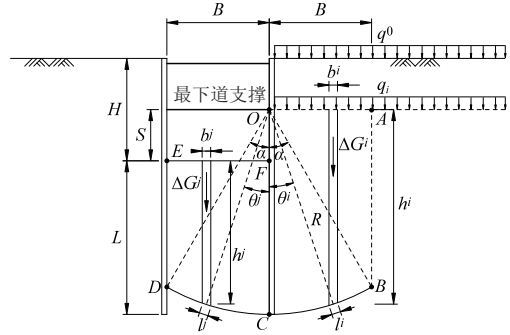


图 12 窄基坑圆弧失稳改进滑动面示意图

圆弧半径 R 和夹角 α 计算公式为

$$R = l_{OC} = L + S \quad (2)$$

$$\alpha = \angle COD = \angle COB = \arcsin \frac{B}{L + S} \quad (3)$$

窄基坑抗隆起安全系数计算公式为

$$K_s = \frac{\sum_{\alpha}^0 [c_i l_i + (q_i b_i + \Delta G_i) \cos \theta_i \tan \varphi_i] + \sum_{\alpha}^0 (c_j l_j + \zeta \Delta G_j \cos \theta_j \tan \varphi_j) + \zeta c_j l_{DE}}{\sum_{\alpha}^0 (\Delta G_i \sin \theta_i) + \sum_{\alpha}^0 (\zeta \Delta G_j \sin \theta_j)} \quad (4)$$

$$q_j = q_0 + \gamma(H - S) \quad (5)$$

$$\Delta G_i = \gamma b_i h_i \quad (6)$$

$$\Delta G_j = \gamma b_j h_j \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{B}{B_{cr}} \quad (8)$$

$$l_{DE} = \sqrt{(L + S)^2 - B^2} - S \quad (9)$$

针对窄基坑, 式(4)在现行规范中的计算公式基础上改进了两个地方, 一是圆弧滑动范围从最下道支撑水平面到基坑底水平面的圆弧, 调整为夹角 2α 对应的圆弧段; 二是考虑土体向上隆起时与支护结构之间的摩阻力。另外, 考虑到基坑内土体在双侧支护结构挤压下受力的复杂性, 本文提出折减系数 ζ , 将基坑内土体自重和与支护结构之间的摩阻力进行折减。折减系数 ζ 可以理解为基坑内土体抗力发挥系数, 当基坑宽度趋近于 0 时, ζ 趋近于 0, 当基坑宽度 B 大于临界宽度 B_{cr} 时, 基坑抗隆起安全系数不再随着基坑宽度增加而增大, ζ 则取 1, 滑动面退化为如图 13 所示滑动面。

此时改进公式(4)便退化为

$$K_s = \frac{\sum [c_i l_i + (q_i b_i + \Delta G_i) \cos \theta_i \tan \varphi_i]}{\sum \Delta G_i \sin \theta_i} \quad (10)$$

式(10)与现行规范推荐公式一致, 仅基坑后土体滑动圆弧夹角稍小一些。

3.2 改进公式抗隆起稳定系数计算

基于前文所述土体和支护结构参数, 计算开挖

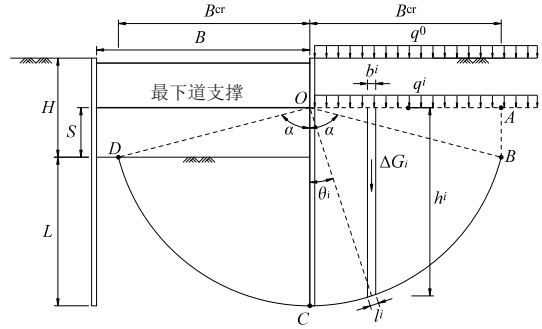


图 13 圆弧失稳改进滑动面示意图

深度 6 m, 宽度 6 m, 设置两道支撑且最下道支撑距离基坑底部 3 m 的基坑, 在不同支护结构嵌固深度下的抗隆起安全系数, 当嵌固深度大于 3.7 m 时为窄基坑。图 14 为分别采用有限元、改进式(4)和现行规范推荐公式的计算结果。可以看出, 改进式(4)更接近有限元计算结果, 而且改进公式计算结果比有限元较小, 这是因为改进公式未考虑支护结构抗弯能力等有利因素。

基于前文所述土体和支护结构参数, 计算开挖深度 6 m, 支护结构嵌固深度 8 m, 设置两道支撑且最下道支撑距离基坑底部 3 m 的基坑, 在不同基坑宽度下的抗隆起安全系数, 基坑临界宽度为 10.6 m。图 15 为分别采用有限元、改进式(4)和现行规范推荐公式的计算结果。可以看出, 当基坑宽度大于临界宽度时, 有限元、改进式(4)和现行规范推荐公式的计算结果均为固定值, 不随基坑宽度的增加而增

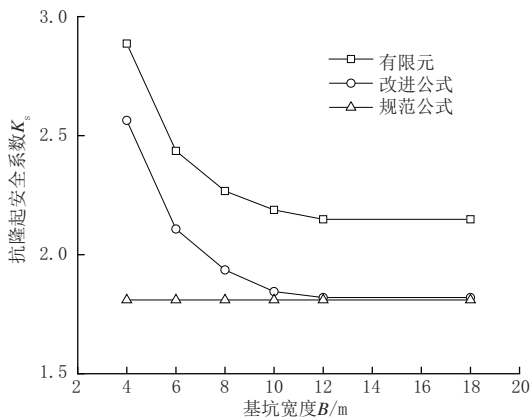


图 14 嵌固深度与抗隆起安全系数关系

加,且改进式(4)和现行规范推荐公式的计算结果基本一致;当基坑宽度小于临界宽度时,改进式(4)和有限元计算的抗隆起安全系数随着基坑宽度的减小而增加,且规律基本一致。

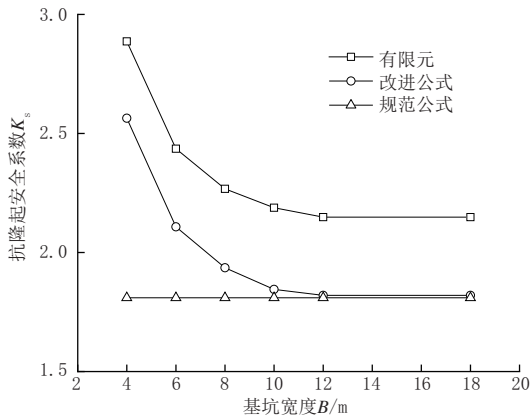


图 15 基坑宽度与抗隆起安全系数关系

上述计算结果分析可以验证采用改进式(4)计算窄基坑抗隆起安全系数相比于现行规范推荐公式更为准确。

4 工程实例分析

福州某管线迁改工程,其中一段污水管采用DN1000的钢筋混凝土管,基坑宽度3.3 m,最大开挖深度6 m,基坑安全等级二级。根据地勘揭示,场地表层是3 m厚的杂填土,下卧15 m厚的淤泥,往下是7 m厚的粉质黏土。各土层物理力学参数见表4。淤泥HS模型参数见表5。

表 4 土层基本物理力学参数表

土名	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e_0	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	E_{s1-2}/MPa
杂填土	18.5	/	15	10	/
淤泥	15.9	0.920	13.7	5.5	1.8
粉质黏土	18.7	1.897	27.1	17.0	5.0

有限元、改进式(4)和现行规范推荐公式计算抗隆起安全系数结果见表6。

表 5 淤泥 HS 模型参数表

土名	m	R_f	K_0	$E_{s0}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$
淤泥	0.5	0.9	0.9	2.7	1.8	19.2

表 6 抗隆起安全系数计算结果

支护结构	有限元	改进公式	规范公式
长 12 m 拉森Ⅳ型钢板桩	1.795	1.671	0.972
长 15 m 拉森Ⅳ型钢板桩	2.154	1.930	1.085

可以看出,采用有效长度15 m的拉森Ⅳ型钢板桩支护,有限元模型和改进式(4)计算结果均大于现行规范安全等级二级基坑要求的抗隆起稳定安全系数1.9,而现行规范推荐公式计算结果仅1.085,经试算钢板桩需打穿淤泥进入粉质黏土层现行规范推荐公式计算结果才能满足要求。施工图设计采用15 m钢板桩作为该段基坑支护结构,既确保施工安全又节约了造价。本工程目前已进入施工阶段,该段基坑开挖后并未出现基坑隆起现象。

5 结 语

本文采用Plaxis有限元软件基于强度折减法模拟窄基坑隆起破坏并详细分析计算结果,提出新的窄基坑圆弧滑动破坏模式并推导出相应的抗隆起安全系数计算公式,结合工程实例进一步分析有限元、改进公式和现行规范推荐公式计算结果,得出以下结论:

- (1)窄基坑隆起破坏滑动面仍是绕最下道支点为圆心的圆弧形,受对侧支护结构的影响圆弧范围变小。
- (2)相比于现行规范推荐公式,本文改进公式与有限元计算结果更为吻合,更符合基坑宽度和支护结构嵌固深度对抗隆起安全系数影响的规律。
- (3)在实际工程中应用本文改进公式计算窄基坑抗隆起稳定安全系数,既可以确保施工安全又可以节约造价。

本文分析了深厚软土地区窄基坑抗隆起稳定性,所提改进公式可以推广应用于窄基坑支护结构嵌固深度的设计。

参考文献:

[1] 郑刚,甄洁,程雪松,等. 基坑坑底抗隆起稳定性研究现状与展望[J]. 建筑结构, 2024, 54(20): 129–142.

[2] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].

[3] 郑刚,俞丹瑶,程雪松. 考虑土体强度不均匀性时宽窄基坑坑底隆起稳定研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 1–4.

[4] 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, 37(增刊2): 433-441.
- [5] 张飞, 李镜培, 孙长安, 等. 软土狭长深基坑抗隆起破坏模式试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2825-2832.
- [6] 刘扬镇, 夏才初, 徐晨, 等. 窄基坑围护墙插入深度优化解析及离心实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 593-607.
- [7] 宋二祥, 付浩, 李贤杰. 基坑坑底抗隆起稳定安全系数计算方法改进研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3): 109-118.
- [8] 王洪新, 陈建军, 刘翼山. 基坑抗隆起稳定安全系数实用计算分析与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 3223-3230.
- [9] 陈孝湘, 赵金飞, 唐自强, 等. 基于强度折减法的狭长基坑坑底抗隆起稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊1): 59-64.
- [10] 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.
- [11] 阳吉宝. 窄基坑抗隆起稳定性安全系数计算新方法[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊2): 1495-1503.
- [12] 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.
- [13] 应宏伟, 王小刚, 张金红. 考虑基坑宽度影响的基坑抗隆起稳定分析[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 118-124.
- [14] 王洪新. 考虑支撑作用的基坑抗隆起稳定安全系数计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 41(5): 2559-2571.
- [15] 沈铨杰. 管道沟槽等窄条形基坑隆起稳定性计算方法[J]. 城市道桥与防洪, 2021(7): 321-324; 332.
- [16] 施琦. 考虑空间效应的狭长型沟槽基坑稳定性计算方法研究, 城市道桥与防洪, 2021(8): 283-285; 295.
- [17] 李林, 黄奕鹏, 苏宁川. 狭窄基坑抗隆起稳定性计算方法的改进研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊1): 74-81.
- [18] 卢瀚. 淤泥区狭长基坑抗隆起稳定性分析[J]. 城市道桥与防洪, 2022(12): 248-251.
- [19] 李璐娟, 贾鹏蛟, 申晓明, 等. 软土地区地铁基坑插入比优化研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 77-83.
- [20] 孟凯琪, 刘志良, 徐亮, 等. 基于隆起变形分析的基坑坑底抗隆起稳定性可靠度分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(3): 705-714.

(上接第 121 页)

(2) 隧道拱顶土体竖向位移随着扁平率的增加而降低, 在扁平率为 0.5~0.6 区间降幅较大, 0.6~0.7 区间降幅较大;

(3) 整体而言, 在扁平率为 0.6~0.65 区间, 隧道初支轴力和弯矩较小;

(4) 扁平率在 0.5~0.55 区间时, 隧道初支与临时支撑交接处弯矩较大, 而在 0.6~0.65 区间, 该处弯矩显著减小;

(5) 扁平率对初支弯矩的影响要大于对初支轴力的影响;

(6) 综合以上分析, 超宽断面隧道设计便频率建议控制在 0.6~0.65 区间。扁平率低于 0.6 时, 隧道拱顶竖向变形和初支内力均较大; 扁平率过高则会导致隧道开挖断面较大, 不经济。

参考文献:

[1] 施有志, 李建锋, 李汪颖, 等. 扁平超大断面隧道的施工力学特征

及其动力稳定性分析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 1023-1029.

[2] 曲海峰. 扁平特大断面公路隧道荷载模式及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

[3] 吴梦军, 黄伦海. 四车道公路隧道动态施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 3057-3062.

[4] 王希宝, 袁松, 蒋长伟. 高地应力硬岩隧道内轮廓形式优化分析[J]. 路基工程, 2023(5): 142-148.

[5] 陈卫忠, 王辉, 田洪铭. 浅埋破碎岩体中大跨隧道断面扁平率优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1389-1395.

[6] 曾中林. 单拱四车道公路隧道断面设计优化与施工力学研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.

[7] 曾宜江, 杨小礼. 单拱四车道公路隧道断面的优化[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2008, 26(5): 616-620.

[8] 郭新新, 汪波, 王永琪, 等. III 级围岩四车道隧道扁平率的合理取值[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1792-1799.

[9] 韩艳红, 赵智, 张良. 扁平率对大跨度隧道二衬结构力学特性的影响分析[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2020(9): 49-52.

[10] 王昆, 王育平. 扁平率对浅埋大跨度隧道围岩稳定性的影响[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(6): 150-155.