

坑中坑基坑支护结构失稳模式影响分析

周俊杰

(安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 坑中坑作为工程中常见基坑形式, 二次开挖引发的土体应力二次释放, 会显著改变基坑整体稳定性。以南京某坑中坑基坑为工程背景, 基于 Plaxis 有限元软件, 采用 Hardening-Soil 土体本构模型与强度折减法, 揭示坑中坑失稳破坏机制, 系统分析外墙插入比与坑趾系数对基坑稳定系数的影响。研究表明: 内坑开挖会在特定外墙插入比与坑趾系数组合下, 改变基坑整体滑裂面形态, 形成两类差异化隆起破坏模式; 外墙插入比增大可有效提升基坑稳定系数并使其趋于稳定; 坑趾系数变化直接对应不同失稳模式, 是控制坑中坑安全稳定系数的关键影响参数。

关键词: 坑中坑基坑; 强度折减法; 稳定性分析; 失稳破坏模式。

中图分类号: U416.1; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0362-04

Analysis on Impact of Instability Modes on Pit-in-pit Foundation Pit Support Structures

ZHOU Junjie

(Anhui Transport Consulting and Design Institute Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: A pit-in-pit foundation pit is a common form in engineering. The secondary release of soil stress caused by secondary excavation will significantly change the overall stability of the foundation pit. Taking a pit-in-pit foundation pit project in Nanjing as the engineering background, based on Plaxis finite element analysis, the Hardening-Soil constitutive model and strength reduction method are used to reveal the instability and failure mechanism of pit-in-pit structure, and systematically analyze the influences of the embedded ratio of the external wall and the pit toe coefficient on the stability factor of the foundation pit. The results show that under the specific combinations of the embedded ratio of the external wall and the pit toe coefficient, the excavation of the inner pit will change the whole sliding surface form of the foundation pit to form two differentiated uplift failure modes. The increase of the embedded ratio of the external wall can effectively enhance the stability factor of the foundation pit and stabilize it. The variations in the pit toe coefficient directly correspond to different instability modes, and are the key influence parameters to control the pit-in-pit safety and stability factors.

Keywords: pit-in-pit foundation pit; strength reduction method; stability analysis; instability failure mode

0 引言

随着我国城市建设的快速发展, 为节约城市建设用地, 城市隧道等地下空间构筑物日益增多, 基坑开挖深度逐步加深, 开挖形式也愈发复杂。坑中坑基坑是指在外基坑开挖并达到稳定状态后, 在其坑内进行二次开挖形成内坑的基坑形式^[1-2], 常见于隧道泵房基坑开挖、挖方路基隧道开挖等工程场景。

目前, 基坑稳定性的主要计算方法包括 Terzaghi 法^[3]、“汪夏法”^[4]、行业规程法^[5-6]、等圆弧滑动模式。

但当前针对坑中坑基坑稳定性分析的研究较为有限, 相关规范中尚未明确涉及坑中坑基坑的稳定性分析方法^[5-6], 导致实际工程中往往忽略内坑的影响, 或仅单纯依据外坑开挖进行计算^[1, 7]。由于对内坑开挖对外坑稳定性的影响估计不足、支护设计不合理、整体稳定性验算不规范, 导致坑中坑基坑工程事故频发^[1-2]。

稳定性是基坑支护设计中需重点关注的核心特性。申明亮等^[8]研究表明, 面积比、深度比、坑趾系数、内墙插入比等参数对坑中坑基坑应力场具有显著影响。韩同春等^[7]发现, 内坑的存在会显著减小围护结构所受的被动土压力, 不利于基坑整体稳定性, 并指出内坑存在一个影响外坑稳定性的最不利位置。

收稿日期: 2026-02-28

作者简介: 周俊杰(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路工程设计工作。

然而,目前关于坑中坑开挖引起的失稳破坏模式的研究较少。坑中坑的施工改变了外坑开挖施工形成的二次应力场^[3-4],导致土体应力重新分布^[8-11],进而可能改变基坑潜在的失稳破坏模式,此时若沿用常规基坑计算方法,极易引发工程安全隐患^[12-14]。基于此,本文以某实际坑中坑基坑工程为背景,借助有限元弹塑性分析模型,对抗中坑基坑的失稳破坏模式展开深入探索,为工程设计与施工提供理论支撑。

1 坑中坑基坑有限元模型建立与分析

1.1 建立有限元模型

依托南京市江北新区某隧道项目为研究对象,选取隧道敞口段坑中坑基坑作为算例建立 Plaxis 模型,为了提高计算效率,采用平面二维对称模型(见图 1),基坑平面尺寸为 50 m×30 m,单次开挖深度与支撑结构竖向间距为 1 m,采用折减系数 R_{inter} 反应接触面与土体强度参数之间的关系。

基坑支护边界条件:采用有限平面二维模型,底

部水平竖向均固定,两侧仅限制水平位移,基坑支护采用预制桩+内撑的支护体系,支护结构与土体之间的相互作用采用接触单元进行模拟。

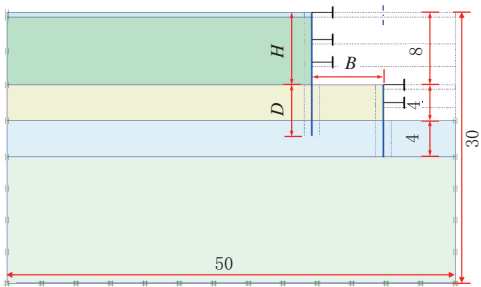


图1 有限元模型示意图(单位:m)

在有限元分析过程中,理想的弹塑性土体本构模型无法模拟坑中坑基坑开挖卸载过程,为了更为精确的模拟基坑土体“加载-卸载”行为,使用能够同时考虑剪切硬化和压缩硬化的 HS(hardening soil)土体模型,土体会表现为刚度下降,同时产生塑性应变^[15],计算结果更为合理的反应墙体变形与土体隆起。

土体物理力学参数见表 1,支护结构相关参数见表 2,内支撑相关参数见表 3。

表 1 土体物理力学参数

序号	土层名称	厚度/ m	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	标准排水三轴试验 割线刚度 $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	固结试验切线 刚度 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	卸载/重新加载 刚度 $E_{ur}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	泊松比 ν	侧压力 系数 K_0	黏聚力 c / kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$	R_{inter}
1	填土	1	17.6	6.41	6.41	19.23	0.28	0.698	10.5	17.6	0.9
2	粉质黏土	15	19.4	8.41	8.41	25.23	0.31	0.479	12.7	31.4	0.95
3	粉砂、粉土	8	19.2	20.0	20.0	60.0	0.28	0.478	8.0	31.5	1.0
4	粉砂、粉土	8	19.4	30.0	30.0	90.0	0.26	0.450	5.0	33.4	1.0
5	砂土	28	19	40.0	40.0	120	0.33	0.508	6.8	29.5	1.0

表 2 支护结构相关参数

名称	厚度/ mm	轴向刚度 EA / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	抗弯刚度 EI / ($\text{kN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1}$)	泊松比 ν
外墙	800	2.4×10^7	1.28×10^6	0.167
内墙	600	1.80×10^7	5.40×10^5	0.167

表 3 内支撑相关参数

类型	特性	轴向刚度 EA / kN	支撑间距 L_s / m	等效长度/ m
钢筋混凝土	弹性	3.0×10^7	6	12
钢管支撑	弹性	1.2×10^7	6	8

1.2 基于有限元强度折减法的稳定性分析

利用 Plaxis 有限元分析软件 Phi/c 分析模块进行强度折减计算,即将土体强度参数和内摩擦角参数,逐步进行折减(除以一强度系数 F),得到新的土体参数和折减系数,进行试算,直到土体达到临界状态(有限元计算不收敛),以此得到强度折减后的增量位移等值图,等值线梯度大的区域表明土体位移发

展迅速,可以近似视为基坑的潜在滑裂面^[16],同时获得基坑对应的强度折减系数 F 即为安全稳定系数。

外墙插入比 λ (外基坑开挖深度 H 与外坑坑底以下支护结构入土深度 D 之比)与坑趾系数 $\alpha(B/H$ 即内外坑距离与外坑开挖深度之比)是区别于传统基坑主要特征,分别考虑二者对基坑坑底隆起稳定性的影响,见图 2。

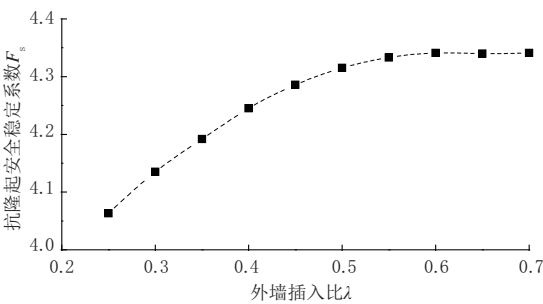


图2 外墙插入比 λ 与安全系数 F_s 关系图

坑中坑基坑抗隆起安全稳定系数 F_s 随外墙插入比 λ 的增加而增大,主要是由于插入土体部分结构深度越大,基坑滑动圆弧面越长,土体自身抗滑力增大,安全系数越高;但随着插入比的进一步增加, F_s 增大幅度减小,说明支护结构插入深度对于结构安全稳定影响具有临界效应, $\lambda = 0.5$ 为插入比对 F_s 影响的临界值;当 $\lambda < 0.25$ 时,强度折减后隆起破坏点出现在外坑位置,说明过小的插入比对内坑的稳定性没有影响,可以视为单坑支护。

为了进一步探究隆起破坏机理,假定坑趾系数 $\alpha = 1.0$,通过模型云图可进一步验证外墙插入比对基坑失稳影响的原因。

如图3所示,外墙插入比为0.25时,内坑开挖前后的隆起失稳滑裂面形式变化不大:墙后滑裂面基本为竖直滑裂面,墙底滑裂面为以最下道支撑交点为圆心的圆弧。说明外墙插入比较小时,坑中坑基坑以外坑隆起失稳为主要形式。图4、图5所示分别为外墙插入比0.5与0.7时内坑开挖前后的失稳形式,开挖前,失稳形式为在外坑范围内形成绕墙底的圆弧形滑裂面;内坑开挖后,失稳范围增大且滑裂面延伸至内坑坑底,其圆心移至内外墙间。说明外墙插入比较大时,外坑稳定性增大,但内坑开挖引起基坑隆起破坏模式发生变化,其潜在危险滑裂面延伸至内坑坑底。

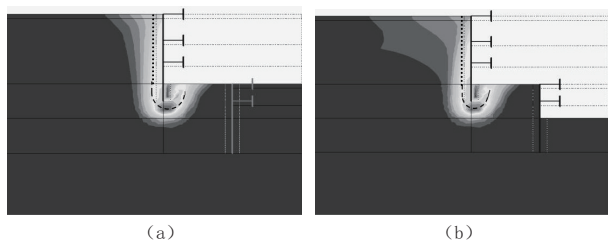


图3 插入比 $\lambda=0.25$ 时内坑开挖前后失稳形式

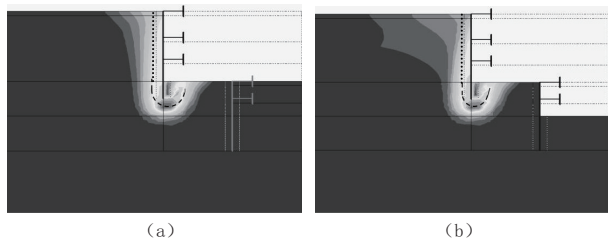


图4 插入比 $\lambda=0.5$ 时内坑开挖前后失稳形式

当坑趾系数 $\alpha < 1.0$ 时,抗隆起安全稳定系数 F_s 随 α 的增大而增加,主要是因为外坑台宽的增加会使滑动圆弧面增大,致使承受抗滑土体的范围增加,安全系数增大;当坑趾系数 $\alpha > 1.0$ 时,内、外坑之间的联合抗滑能力减小,并逐渐形成内、外两个抗滑圆弧面,单一的圆弧面失稳即会导致基坑失稳,因此安

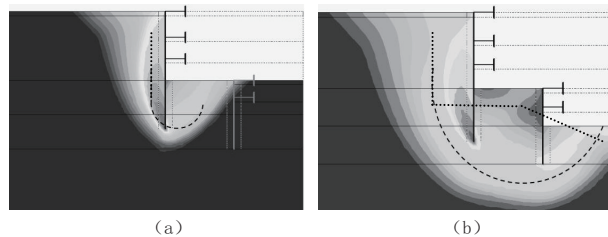


图5 插入比 $\lambda=0.7$ 时内坑开挖前后失稳形式

全稳定系数会逐渐减小(见图6)。

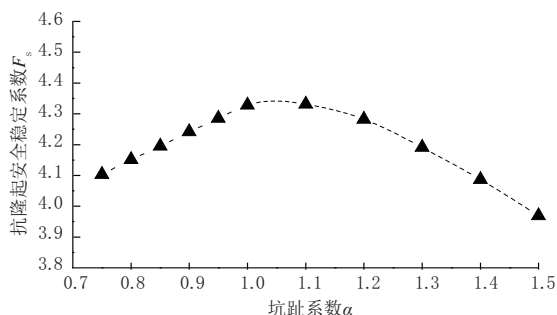


图6 坑趾系数 α 与安全系数 F_s 关系图

假定外墙插入比 $\lambda = 0.5$,通过有限元模型可进一步验证坑趾系数对基坑失稳影响的原因。

图7为不同坑趾系数的坑中坑开挖失稳形式。内坑未开挖时(见图7(a)),其失稳滑裂面为直线与绕墙底的圆弧组成,与规范^[5-6]假设的形式一致。当坑趾系数为0.75时(见图(b)),内坑开挖后其圆弧滑裂面半径增大并延伸至坑底,滑裂面的圆心移至内外墙间。坑趾系数增大至1.0(见图(c)),圆弧滑裂面半径略有增大。当坑趾系数增大为1.5时(见图(d)),滑裂面仅在内外坑各自一定范围内形成,无法形成贯通的圆弧形滑裂面,其失稳形式与单一基坑相同。

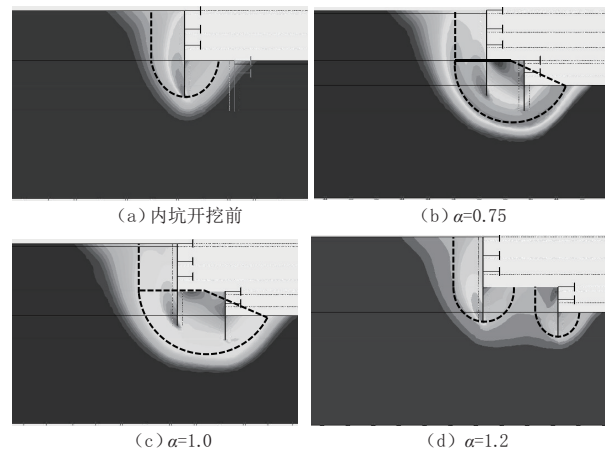


图7 不同坑趾系数的坑中坑基坑失稳形式

2 结 语

对坑中坑基坑开挖支护进行定性与定量分析,研究支护参数对失稳破坏模式和基坑变形的影响,

主要得到以下结论:

(1)外墙插入比和坑趾系数是影响坑中坑危险滑裂面的主要因素。外墙插入比较小时,主要形式为外坑局部失稳,可按单一基坑验算稳定性;外墙插入比较大时,滑裂面半径增大并延伸至内坑坑底,形成贯通的滑动面。坑趾系数较小时,滑裂面半径随坑趾系数增大而增大,形成贯通内坑坑底的滑裂面;坑趾系数大于 1.5 时,坑中坑抗隆起稳定性可按单一基坑进行验算。

(2)安全稳定系数 F_s 随外墙插入比 λ 的增大而增加,且 λ 对 F_s 的影响存在临界值,超过临界值后 λ 对结构稳定影响较小;坑趾系数 α 较小时,内、外支护结构附近土体能够联合进行抗滑作用,安全系数随 α 的增加(抗滑面增大)而提高,坑趾系数 α 较大时,内、外支撑附近土体分别进行抗滑作用,安全系数随 α 的增加(单一抗滑面减小)而降低。

参考文献:

[1] 徐为民,屠毓敏.某工程坑中坑塌滑原因分析及加固设计[J].岩土力学,2010,31(5):1555-1558.
[2] 龚晓南.关于基坑工程的几点思考[J].土木工程学报,2005,38(9):99-102.
[3] Terzaghi K.Theoretical soil mechanicals[M]. New York: John Wiley &

Sons, 1943.

[4] 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.
[5] DG/TJ08-61—2010 基坑工程技术规范[S].
[6] GB 50007—2012 建筑地基基础设计规范[S].
[7] 韩同春,谢灵翔,刘振.坑中坑条件下基坑有限土体的被动土压力计算[J].岩土力学,2018,39(12):4404-4412.
[8] 申明亮,廖少明,周小华,等.坑中坑基坑应力场的参数化分析[J].岩土工程学报,2010(增刊2):187-191.
[9] 徐意智,廖少明,周小华,等.上海软土坑中坑型基坑围护的等效深度算法[J].岩土力学,2012,33(9):2736-2742.
[10] 彭俊仁,万琪伟,丁海滨,等.基于强度折减的坑中坑稳定分析方法[J].地下空间与工程学报,2023,19(增刊1):381-390;398.
[11] 陶志刚,秦可,米蒙,等.基坑开挖扰动变形特征及控制效果模拟分析[J].科学技术与工程,2023,23(9):3820-3830.
[12] 张京伍,张海洋,李明东,等.基坑抗隆起稳定性研究新进展[J].科学技术与工程,2022,22(29):12695-12705.
[13] 檀昆,朱亚林,李勇海,等.基于正交试验的坑中坑加固效果影响因素分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(4):493-499;519.
[14] 徐意智,廖少明,周小华,等.上海软土坑中坑型基坑围护的等效深度算法[J].岩土力学,2012,33(9):2736-2742.
[15] 侯新宇,蔺彦玲,薛必芳,等.坑趾系数对坑中坑基坑变形影响的敏感性分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(1):257-263.
[16] 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.

(上接第 361 页)

参考文献:

[1] 闫静雅,张子新,黄宏伟,等.桩基础荷载对邻近已有隧道影响的有限元分析[J].岩土力学,2008(9):2508-2514.
[2] 路平,郑刚.立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2):923-927.
[3] 张戈.软土地区桩基施工对紧邻运营地铁隧道的位移控制[J].都市轨道交通,2016,29(6):93-98.
[4] 丁智,张霄.桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的数值分析[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(2):390-399.
[5] 徐涛,王凯,蒋玉龙.桥台桩基施工对邻近地铁区间隧道的影响分析[J].路基工程,2016(2):129-133.
[6] 张玉伟,翁木生.大厚度湿陷性黄土地层浸水条件下承载桩基对邻近隧道的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(8):2040-2050.
[7] 郭力,李太杰.城市桥梁桩基施工对既有盾构隧道的影响研究[J].公路工程,2019,44(5):118-122;187.

[8] 靳军伟,李新潮,付魁,等.桩基挤土过程对地铁隧道影响的多因素分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(10):2603-2611.
[9] 赵焕,郭丹烽,张雄健,等.桥桩施工对邻近既有地铁隧道影响研究[J].市政技术,2020,38(6):146-152.
[10] 王洪德,全浩.桩基施工对既有通车隧道扰动影响分析[J].大连交通大学学报,2021,42(4):72-76.
[11] 尚继科,方建平,马亮,等.人行天桥施工和运营对既有隧道的影响研究[J].广东土木与建筑,2022,29(5):82-85.
[12] 陈福江,段蓉蓓,张鑫,等.近距离桩基施工对既有盾构隧道的振动影响分析[J].现代隧道技术,2023,60(1):140-148.
[13] 方万进,李炎,李真颜.桥梁施工对既有区间隧道结构的影响分析研究[J].中国市政工程,2024,5(236):39-42.
[14] 刘俊玲,刘海苹.基于 MIDAS/GTS NX 的人行过街天桥建设对地铁隧道的影响分析[J].黑龙江工程学院学报,2024(1):21-26.
[15] 关国轻.桩基施工与承载对既有盾构隧道非线性变形影响研究[J].施工技术(中英文),2025,54(1):46-53.