

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.009

坑中坑开挖影响下的基坑稳定性研究

杨 才^{1,2}, 王世君¹, 丰土根²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010;

2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 坑中坑开挖对于悬臂式支护结构基坑稳定系统有诸多影响, 内坑的开挖会引起基坑被动区土体抗力损失, 增大坑外土体的剪切变形趋势, 降低基坑整体稳定性。采用强度折减有限元法, 对坑中坑的三个主要影响因素: 坑址系数、深度比、面积比进行了控制变量研究, 研究表明: 对比三种失稳判据下的稳定安全系数, 基坑整体稳定安全系数与坑址系数呈正相关关系, 与深度比和面积比呈负相关关系, 据此建议在坑中坑开挖过程中, 要尽量避免内坑紧邻外坑坑壁开挖、内坑过度深挖、内坑面积过大开挖。

关键词: 坑中坑; 强度折减法; 稳定性; 失稳判据

中图分类号: TU93⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)02—0052—04

Foundation Pit Stability Under the Influence of the Pit in Pit Excavation

YANG Cai^{1,2}, WANG Shijun¹, FENG Tugen²

(1. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Pit in pit excavation has many effects to the cantilever retaining structure foundation pit's stability system. Pit in pit excavation will cause the loss of soil's resistance in passive zone, and increase the trend of soil's shear deformation, at the same time reduce the overall stability of foundation pit. In this paper, by using strength reduction finite element method, three main factors of pit in pit pit site coefficient, depth ratio, area ratio were analyzed. Research results shows that: comparing the stability safety factor under three kinds of instability criterion, this paper suggests using the run through of plastic zone optimization criterion. The stability safety factor of foundation pit is positively related to pit toe coefficient, and is negatively related to the depth ratio and area ratio. Therefore, in the process of pit excavation, pit in pit's excavation being adjacent to the outer wall, excessive digging and the size being too large should be avoided.

Keywords: pit in pit; strength reduction; stability; instability criterion

基坑工程是岩土工程中一个重要的研究课题, 我国很多城市基础建设中, 出现了一种特殊的基坑类型——坑中坑。坑中坑是指在已经开挖的基坑内部二次开挖形成内嵌的小坑, 例如地下室、承台、扶梯坑、电梯井、集水井等结构形成的小坑。通常把外部的大基坑称为外坑, 二次开挖形成的小坑称为内坑。目前, 很多工程设计人员以及研究学者对坑中坑开挖进行了研究, 吴铭炳等^[1]对软土地区坑中坑基坑支护设计计算深度取值进行了探讨。陈乐意等^[2]通过对软土地区某坑中坑基坑的数值模拟探讨了开挖计算深度及坑中坑位置对维护结构侧移的影

响。徐意智等^[3]提出了围护结构侧移影响率的概念, 总结了坑中坑开挖的影响, 并与实际工程对比论证了等效方法的可行性。徐飞飞等^[4]建立了坑中坑三维有限元模型, 分析了不同条件下坑中坑开挖对外坑围护结构的影响。

上述学者的研究焦点集中于对坑中坑围护结构变形的分析, 鲜有文章对坑中坑整体稳定性进行系统的分析。因此有必要对基坑的整体失稳破坏进行深入研究, 从而提出坑中坑工程设计指导建议, 保证基坑工程的安全。

1 坑中坑有限元分析方法

1.1 强度折减法

强度折减,就是将土体的抗剪强度以一定的倍数逐渐进行折减,当折减到一定的倍数时,如果土体正好破坏,则此时折减的倍数即折减系数成为安全系数^[5-8]。

土的强度指标为 c 和 φ ,强度折减的本质就是强度指标的折减。设破坏时的折减系数为 F_r ,则折减强度为

$$\tau_r = \frac{\tau_f}{F_r} = \frac{\sigma \tan \varphi + c}{F_r} = \sigma \frac{\tan \varphi}{F_r} + \frac{c}{F_r} \tag{1}$$

令
$$\varphi_r = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F_r}\right), \quad c_r = \frac{c}{F_r} \tag{2}$$

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi_r + c_r \tag{3}$$

强度折减法在大型有限元分析软件 ABAQUS^[9-10]中可以通过以下步骤实现:

- (1) 定义场变量(强度折减系数 F_r)。
- (2) 定义随场变量变化的材料模型参数。
- (3) 在分析开始指定场变量的大小,建立平衡应力状态。
- (4) 在后续分析步中线性增加场变量 F_r ,按照失稳评价标准确定安全系数。

1.2 坑中坑参数定义

基于申明亮等^[11-12]提出的 4 个几何参数中前 3 个重要参数:坑趾系数、面积比和深度比,这三个影响因素的组合 (χ, α, β) 可以明确的描述任意一个坑中坑的位置、深度及大小。其中各参数的定义见图 1,对坑中坑各参数作如下定义:坑趾系数 $\chi = d/H$;深度比 $\alpha = h/H$;面积比 $\beta = b/B$;

各参数具体含义如下:
 d 为内坑与外坑坑壁之间的水平距离; H 为外坑开挖深度; h 为内坑的开挖深度; b 为内坑开挖宽度; B 为外坑开挖宽度。

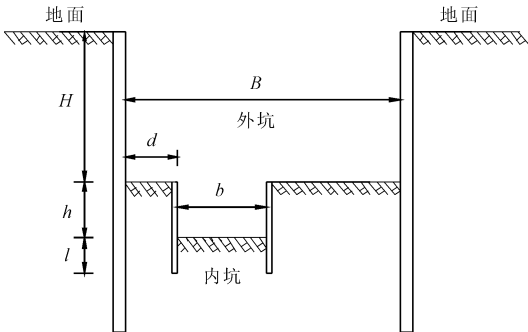


图 1 坑中坑参数示意图

1.3 模型参数

土层为均质土,土性参数黏聚力为 18.6 kPa,内摩擦角为 20°,弹性模量为 40 MPa,泊松比为 0.35。采用 Mohr – Coulomb 模型(M – C)进行弹塑性分析^[13],模型左右侧边界距开挖面 3 倍开挖宽度,下边界距坑底 6 倍开挖深度。地表为自由边界;左右侧约束 X 向位移, Y 向可自由移动;底边界采用固定约束。有限元计算模型如图 2 所示。外坑开挖深度为 8 m,开挖宽度为 20 m,外坑悬臂式支护结构埋深 8 m,保持内坑围护结构埋深与开挖深度相等,内坑开挖深度 h 、开挖宽度 b 为变量。外坑围护结构厚 1.0 m,内坑围护结构厚 0.6 m,弹性模量均为 2×10^{10} Pa,泊松比为 0.2。土体及外坑围护结构采用四节点四边形平面应变积分单元(CPE4)非关联流动法则,采用均匀网格。内坑围护结构采用二维一阶梁单元(B21)。土体与围护结构之间的相互作用采用接触面单元来模拟,这样能更真实的反映工程实际情况^[14]。

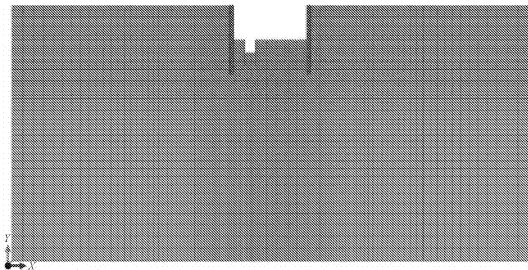


图 2 坑中坑有限元模型

表 1 坑中坑影响因素组合

序号	变量	(χ, α, β)
1	χ	(0.00,0.375,0.15)
2		(0.25,0.375,0.15)
3		(0.50,0.375,0.15)
4		(0.75,0.375,0.15)
5		(1.00,0.375,0.15)
6	α	(1.20,0.375,0.15)
7		(0.25,0.125,0.15)
8		(0.25,0.250,0.15)
9		(0.25,0.375,0.15)
10		(0.25,0.500,0.15)
11	β	(0.25,0.625,0.15)
12		(1.00,0.375,0.20)
13		(0.75,0.375,0.40)
14		(0.50,0.375,0.60)
15		(0.25,0.375,0.80)
16		(0.00,0.375,1.00)

1.4 计算步骤

本文为了简化分析,假定不考虑分层开挖及基坑降水的影响,选取悬臂式支护结构(不考虑内支撑)进行计算。基坑开挖的具体实现步骤如下:

- (1) 建立土体与悬臂式支护结构模型。
- (2) 初始地应力平衡。
- (3) “激活”悬臂式支护结构。
- (4) 加地面以上超载。
- (5) “杀死”各层土体单位,模拟开挖过程。
- (6) 调整内坑尺寸及位置,重复以上步骤计算。

2 坑中坑开挖对整体稳定性影响分析

2.1 坑趾系数的影响

为分析坑趾系数对基坑整体稳定性的影响,取深度比 α 为 0.375,面积比 β 为 0.15,而坑趾系数取值分别为 0.00,0.25,0.50,0.75,1.00,1.20,并绘制三种失稳判据下稳定安全系数与坑趾系数的关系曲线,如图 3 所示。笔者曾对现有常用的三种边坡失稳判据进行了对比研究,并提出了一种根据塑性应变变量级判定边坡失稳的塑性区贯通优化判据,并验证了其适用性与优越性,因此本文采用塑性区贯通优化判据所得的稳定安全系数进行分析^[15-17]。

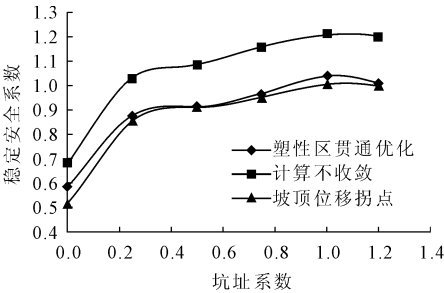


图 3 三种失稳判据下稳定安全系数与坑趾系数的关系曲线

由图 3 可知两者呈正相关关系,三种失稳判据下稳定安全系数随着坑趾系数的增大而逐渐增大。当未开挖内坑时稳定安全系数为 1.190,在坑趾系数为 0,坑中坑紧贴外坑围护结构时,稳定安全系数为 0.584,安全系数降低了 50.9%,可见内坑的开挖对基坑的整体稳定性影响非常大,此时必须采取相应的支护加固措施。当坑趾系数逐渐增大,也就是内坑距离外坑壁越远,基坑安全系数随之增大,当居于外坑中间时,有内坑情况下稳定安全系数达到最大为 1.004,因此内坑的开挖位置应合理选取,尽量远离外坑坑壁。

2.2 深度比的影响

为分析深度比对基坑整体稳定性的影响,取坑

趾系数 χ 为 0.25,面积比 β 为 0.15,而深度比 α 取值分别为 0.125,0.250,0.375,0.500,0.625,并绘制三种失稳判据下稳定安全系数与深度比的关系曲线,如图 4 所示。

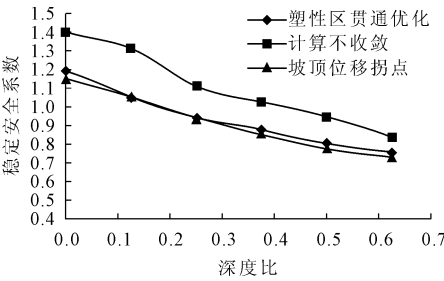


图 4 三种失稳判据下稳定安全系数与深度比的关系曲线

由图 4 可知两者呈负相关关系,三种失稳判据下稳定安全系数随着深度比的增大而减小。当深度比为 0.125 时,稳定安全系数为 1.046,相对于不开挖内坑情况时的稳定安全系数 1.190,降低了 12.1%,当深度比为 0.625 时,稳定安全系数只有 0.755,相对于深度比为 0.125 时的稳定安全系数,降低了 27.8%,可见内坑的深度比对基坑的整体稳定影响很大。通过分析,在外坑围护结构附近开挖较深的坑中坑时,基坑被动区土体会对围护结构产生抗力损失,加大围护结构向坑内位移的趋势,继而发生基坑的整体失稳。因此,在实际工程中尽量避免在外坑围护结构附近开挖深度比较大的坑中坑,若必须在外坑围护结构附近开挖深度比较大的坑中坑时,应当采取必要的加固措施,保证坑中坑基坑的安全。

2.3 面积比的影响

面积比与坑趾系数并不是相互独立的,坑趾系数随面积比改变而改变。将内坑保持在外坑的居中位置处,以此消除内坑两侧坑趾系数不相等对分析带来的影响。

为分析面积比对基坑整体稳定性的影响,取深度比 α 为 0.375,面积比 β 取值分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0,并绘制三种失稳判据下稳定安全系数与面积比的关系曲线,如图 5 所示。

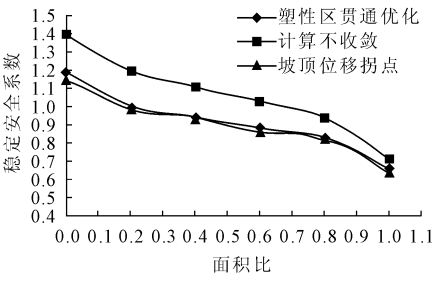


图 5 三种失稳判据下稳定安全系数与面积比的关系曲线

由图 5 可知两者呈负相关关系,三种失稳判据下的稳定安全系数随面积比的增大而减小。当面积比为 0.2 时,稳定安全系数为 1.000,随着面积比的增大,稳定安全系数减小,当面积比达到 1.0 时,即外坑开挖了一层,稳定安全系数减小至 0.657,相对降低了 34.3%。故面积比对外坑围护结构变形的影响同样非常显著。经分析,大面积的坑中坑开挖将引起基坑被动区土体抗力损失,本质上同样减小了外坑围护结构的有效嵌固深度。基坑内部大面积卸荷加大了坑外土体剪切变形的趋势,让基坑滑塌成为可能,进而降低了基坑的整体稳定性。工程实际中,应当尽量控制坑中坑的开挖面积,不得乱挖,更不得超挖。

3 围护结构变形与基坑稳定性关系

围护结构最大侧移增长百分比为 ξ ,用以表示基坑围护结构变形; $\xi = (\delta - \delta_0)/\delta_0 \times 100\%$,其中 δ_0 为外坑开挖完毕时其围护结构的最大侧移值, δ 为内坑开挖完毕时外坑围护结构的最大侧移值。对于悬臂式支护结构,支护结构的变形与基坑整体稳定性关系密切。坑中坑开挖影响下围护结构变形与稳定安全系数值见表 2。

表 2 外坑围护结构变形与安全系数值				
序号	变量	(χ, α, β)	$\xi/\%$	k
1	χ	(0.00,0.375,0.15)	28.02	0.584
2		(0.25,0.375,0.15)	18.06	0.877
3		(0.50,0.375,0.15)	10.64	0.913
4		(0.75,0.375,0.15)	6.09	0.962
5		(1.00,0.375,0.15)	3.77	1.036
6		(1.20,0.375,0.15)	2.69	1.004
7	α	(0.25,0.125,0.15)	5.92	1.046
8		(0.25,0.250,0.15)	13.02	0.941
9		(0.25,0.375,0.15)	18.06	0.877
10		(0.25,0.500,0.15)	25.13	0.802
11		(0.25,0.625,0.15)	34.71	0.780
12		(1.00,0.375,0.20)	3.83	1.000
13	β	(0.75,0.375,0.40)	6.22	0.941
14		(0.50,0.375,0.60)	11.09	0.884
15		(0.25,0.375,0.80)	19.53	0.828
16		(0.00,0.375,1.00)	30.88	0.657

由表 2 可以看出:围护结构最大侧移增长百分比 ξ 与稳定安全系数 k 随着坑中坑影响因素的变化,有着同样的发展规律。围护结构桩顶位移越大,围护结构作用发挥越大,预示基坑整体稳定性降低,

稳定安全系数变小;围护结构的变形也是基坑外侧土体变形的结果,随着基坑的开挖,基坑被动区发生抗力损失。当抗力损失达到一定程度,就会和常规边坡一样,由于力与力矩的不平衡,发生滑塌现象,基坑外侧土体挤压围护结构,致使围护结构发生较大变形。

4 结 论

本文采用强度折减有限元法对悬臂式支护结构基坑进行了整体稳定性分析,通过控制单一变量研究了坑中坑开挖位置、开挖深度、开挖面积对基坑整体稳定性的影响,得出了几点有益的结论:

(1) 三种失稳判据得出的基坑稳定安全系数是不同的,以塑性区贯通优化判据得出的安全系数和以坡顶位移拐点判据得出的安全系数很接近,以计算不收敛判据得出的安全系数明显大于其他两种判据。

(2) 基坑稳定安全系数随着坑趾系数的增大而逐渐增大,随着深度比的增大而减小,随面积比的增大而减小,因此在内坑开挖过程中,要尽量避免内坑紧邻外坑坑壁开挖、内坑过度深挖、坑中坑的开挖面积不宜过大。

(3) 悬臂式围护结构顶部的最大侧移变化规律与基坑整体稳定性相统一,基坑发生失稳是一个动态的过程,围护结构的变形由于基坑外侧土体的滑动引起的。基坑稳定性越差,围护结构的支护作用发挥越大,发生的变形也会越大。

参考文献:

[1] 吴铭炳,林大丰,戴一鸣,等.坑中坑基坑支护设计与监测[J].岩土工程学报,2006,28(S1):1569-1572.

[2] 陈乐意,李镜培,梁发云,等.坑中坑对基坑围护结构水平位移影响数值分析[J].岩土工程学报,2008,30(S1):59-61.

[3] 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计算法[J].岩土力学,2012,33(9):2736-2742.

[4] 徐飞飞,崔梓萍,徐意智,等.坑中坑的基坑变形分布及其变化规律[J].地下空间与工程学报,2012,8(S1):1376-1380.

[5] 裴利剑,屈本宁,钱闪光.有限元强度折减法边坡失稳判据的统一性[J].岩土力学,2010,31(10):3337-3341.

[6] 李永亮,周国胜,李永鹏.有限元强度折减法边坡失稳判据的适用性研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):125-129.

4 结论

(1) 通过建立红黏土边坡现场监测系统平台,获取了边坡在气候作用下的湿热特性,边坡的湿热特性受大气作用影响显著,且随着深度的增加,对边坡的影响逐渐减弱。

(2) 边坡土体含水率的监测结果表明:土体含水率主要受降雨和蒸发的影响,边坡位置不同,其含水率也不同,坡脚处含水率大于坡顶和坡中。

(3) 土体温度主要受大气温度和太阳净辐射量的影响,温度的变化和大气温度及太阳辐射的变化趋于一致,且旱季比雨季时的温度变化幅度大,土温由表层到深层的迁移变化存在明显的滞后性,土体温度的变化可以间接反映土体含水率的变化。

(4) 通过有限元模拟软件进行数值模拟,得出气候作用下边坡土体温度场的影响,并与实际监测数据对比,在合理的范围内存在一定的误差,此有限元数值模型可用于桂林红黏土边坡的研究中。

参考文献:

- [1] 詹良通,吴宏伟,包承纲,等.降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J].岩土力学,2003,24(2):151-158.
- [2] Fredlund D C. State of the Art: Analytical methods for slope stability analysis [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides. Toronto, 1984.
- [3] Fredlund D G, Krahn J. Comparison of slope stability analysis methods of analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14(3):439-439.
- [4] Gasmo J, Hrizuk K, Rahardjo H, et al. Instrumentation of

an unsaturated residual soil slope[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, 22(2):134-143.

- [5] 张士林.大气降雨强度下水入渗规律研究[J].岩土工程技术,2003(5):281-285.
- [6] Craig W H, Bujang B K H, Merrifield C M. Simulation of climatic conditions in centrifuge model tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 1991, 14(4):406-412.
- [7] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等.大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(7):1065-1073.
- [8] 陈建斌,孔令伟,郭爱国,等.大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J].水利学报,2007,38(6):674-682.
- [9] 陈颢,曾亚武.边坡稳定性分析的离散元极限平衡法研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):113-119.
- [10] 王百升,倪万魁,郭叶霞.多种因素作用下非饱和黄土边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):159-162.
- [11] 陈昌富,秦海军.考虑强度参数时间和深度效应边坡稳定性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2009,36(10):1-6.
- [12] 干湿循环下非饱和压实粘土边坡响应的模型试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [13] 陈星,李建林,王家成.基于FLAC3D的边坡地震反应分析[J].中国农村水利水电,2010(1):59-62.
- [14] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等.边坡地震稳定性分析探讨[J].地震工程与工程振动,2010,30(2):173-180.
- [15] 陈善雄,陈守义.考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J].岩土力学,2001,22(4):447-450.
- [16] 王忠福,李冬冬,万天同.基于滑坡变形分区的锁固型滑坡稳定性分析研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(6):35-40.

(上接第55页)

- [7] 杨才,王世君,丰土根.基于塑性区开展的边坡失稳判据研究[J].中国科技论文,2016(11):1461-1464.
- [8] 李博,王洪滨,姜彤,等.基于PIV技术的静压桩沉桩过程中桩周粉土位移场的试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):91-96.
- [9] 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010:391-411.
- [10] 朱向荣,王金昌.ABAQUS软件中部分土模型简介及其工程应用[J].岩土力学,2004,25(S2):144-148.
- [11] 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,2010,32(S2):187-191.
- [12] 申明亮,廖少明,邵伟.考虑内坑影响的坑中坑基坑被动土压力叠加算法[J].上海交通大学学报,2012,46(1):79-83.

- [13] 李垠,苏凯,李杰. Mohr - Coulomb 等面积圆屈服准则在边坡稳定分析中的应用[J].大地测量与地球动力学,2009,29(1):135-139.
- [14] 丰土根,熊中华,余波.坑中坑开挖对悬臂式支护结构侧移的影响分析[J].岩土工程学报,2013,35(11):2053-2058.
- [15] 宋二祥.土工结构安全系数的有限元计算[J].岩土工程学报,1997,19(2):1-7.
- [16] 栾茂田,武亚军,年延凯.强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J].防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.
- [17] 沈玉涛.软土地区深大基坑分区开挖力学效应数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):23-27.