

文章编号: 1005-0523(2023)02-0022-08

不同空间形态下的坑中坑变形特性分析

郑凯

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 基于南昌艾溪湖隧道坑中坑基坑工程案例, 利用数值计算软件研究分析坑中坑不同空间形态下的基坑变形特性, 并提出基坑变形影响率, 综合判定各坑中坑空间形态参数对于基坑变形的敏感性。研究表明: 影响坑中坑变形特性的空间形态特征要素主要为内外坑相对大小、相对位置和围护结构插入比; 具体敏感性关系为: 相对深度 > 相对位置 > 外坑围护结构插入比 > 内坑围护结构插入比 > 相对宽度。

关键词: 坑中坑; 空间形态; 变形特性; 数值模拟

中图分类号: U452

文献标志码: A

本文引用格式: 郑凯. 不同空间形态下的坑中坑变形特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(2): 22-29.

Analysis on Deformation Characteristics of Pit-in-Pit in Different Spatial Forms

Zheng Kai

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Based on the foundation pit engineering case of the pit in the pit of Nanchang Aixihu tunnel, the deformation characteristics of the pit in different spatial forms of the pit are studied and analyzed by using the numerical calculation software. The influence rate of foundation pit deformation is proposed, which can be used to comprehensively judge the sensitivity of pit spatial shape parameters to foundation pit deformation. The results show that the influence factors of the spatial form characteristics of the deformation characteristics of the pit in pit are mainly the relative size, relative position of the inner and outer pits and the insertion ratio of the enclosure structure. The specific sensitivity relationship is as follows: relative depth > relative position > insertion ratio of the outer pit enclosure structure > insertion ratio of the inner pit enclosure structure > relative width.

Key words: pit in pit; spatial form; deformation characteristics; numerical simulation

Citation format: ZHENG K. Analysis on deformation characteristics of pit-in-pit in different spatial forms[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(2): 22-29.

近年来,随着城市建设的突飞猛进,各类城市地下综合体、交通枢纽及叠层隧道^[1]等复杂工程相继产生,伴随着的各类特殊基坑也应运而生,如超深、超大、异性、偏载、坑中坑等基坑工程^[2]。其中坑中坑这类特殊基坑工程,逐渐引起了学者们的关

注。龚晓南^[3]系统总结了基坑工程设计与施工的几点思考,并呼吁要重视坑中坑对于基坑围护结构变形的影响;李连祥^[4]应用 Plaxis 3D 有限元分析软件研究了不同开挖距离以及空间效应影响下基坑围护结构水平位移变化规律;陈乐意^[5]重点研究了坑

中坑的计算深度及内外坑间距对于围护结构变形影响;侯新宇^[6]开展了坑趾系数对于坑中坑变形特性的敏感性分析;王新^[7]开展了台宽比对于坑中坑变形特性的敏感性分析;申明亮^[8]提出了面积比、深度比、坑趾系数及挡墙插入比 4 个参数,并进行了坑中坑应力场的参数化分析;孙毅^[9]提出了虚拟开挖线和功能土体的概念,并用以分析坑中坑地层变形的力学机理。以上研究均局限于基坑变形的某单项反应特征,但坑中坑基坑的变形是复杂的,是受多因素影响和有多方面表现特征的,这些研究缺乏对于坑中坑不同空间形态参数的系统性总结,也缺乏对于基坑变形特性的综合分析。

本文结合工程实例,引入基坑变形影响范围、地表沉降和围护结构水平位移 3 项变形特征指标,采用数值计算法和参数影响分析法深入探究坑中坑基坑空间形态对于坑中坑变形特性的影响,发现规律,找出坑中坑最优空间关系。

1 工程案例与计算模型

1.1 工程概况

南昌艾溪湖隧道工程穿越艾溪湖中部,全长

2 664 m,采用围堰明挖法施工,因隧道主体为公轨叠层共建结构,围护结构采用了典型的坑中坑基坑型式,上部为市政公路隧道基坑,下部为预埋地铁隧道基坑^[10]。

1.2 坑中坑设计参数

由于坑中坑基坑变形特性多变且复杂,会受到内外坑大小、相对位置及围护结构插入深度等空间形态特征因素影响,本文参照上述工程案例,对研究问题适当简化,总结如下坑中坑空间形态和变形特性参数,详见图 1。

1) 影响因子:能够表现坑中坑空间形态关系的特征要素,主要为内外坑基坑大小、相对位置和围护结构长度^[11],本文分别引入尺寸影响因子(α),位置影响因子(ε)和围护结构影响因子(ξ)表达坑中坑这 3 方面空间形态特征,具体各参数因子释义见表 1。

2) 反应因子:能够反映不同坑中坑空间形态对于基坑变形特性影响的特征要素,本文选取基坑地表沉降影响范围(L),最大地表沉降值(S_{max})和围护结构最大水平位移 (Y_{max})3 项变形特性指标作为反应因子,具体各反应因子释义见图 1。

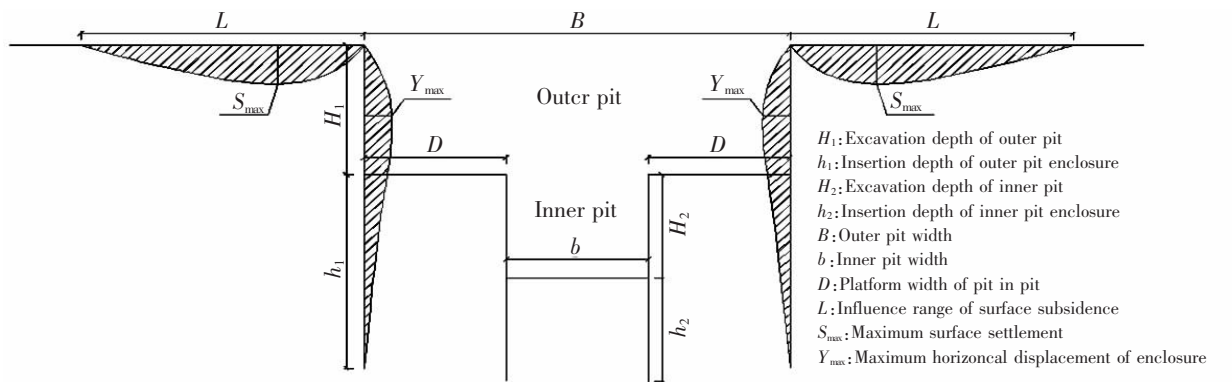


图 1 坑中坑空间形态及变形特性示意图

Fig.1 Cross section view of spatial morphology and deformation characteristics of pit in pit

表 1 坑中坑空间形态特征要素影响因子

Tab.1 Influence factors of pit in pit spatial morphological characteristics

Influence factor	Representation symbol	Calculation formula	Interpretation
Size influence factor	α_1	$\alpha_1=b/B$	Excavation width ratio of inner and outer pits
	α_2	$\alpha_2=H_2/H_1$	Excavation depth ratio of inner and outer pits
Position influence factor	ε	$\varepsilon=D/H_1$	Pit toe coefficient (ratio of pit abutment width in pit to excavation depth of outer pit)
Enclosure influence factor	ξ_1	$\xi_1=h_1/H_1$	Insertion ratio of outer pit envelope
	ξ_2	$\xi_2=h_2/H_2$	Insertion ratio of inner pit enclosure

1.3 数值计算模型

1) 模型参数: 诸多研究证明 HS (hardening-soil model) 模型能够更有效真实地模拟基坑土体开挖卸载时土体应力场的动态变化^[12]。基坑开挖时, 坑中坑土体的应力场变化要比常规基坑应变量变化表现得更为复杂, 理想弹塑性模型^[13]难以满足坑中坑开挖模拟的要求, 本文选取 HS 硬化塑性模型进行数值分析, 模型尺寸充分考虑尺寸效应影响, 设计为 250 m×50 m, 土层参数和支护参数选取均基于艾溪湖隧道坑中坑工程案例实

际参数取值, 详细各参数取值及计算模型见表 2, 表 3, 表 4 和图 2。其中: γ 为重度; c' 为摩擦角; φ' 为内摩擦角; E_{50}^{ref} 为土体割线弹性模量; E_{oed}^{ref} 为土体切线压缩模量; E_{ur}^{ref} 为土体卸载-再加载模量; μ 为泊松比; 支护桩采用板单元模拟, 由公式 $\frac{1}{12}(D+t)h^3 = \frac{1}{64}\pi D^3$ 进行刚度等效代换; D 为桩直径; t 为两桩间隔距离; h 为等效板的厚度; E_A 为单位长度轴向刚度; E_I 为单位长度抗弯刚度; L_S 为支撑间距。

表 2 土层参数表

Tab.2 Calculation parameters of soil layer

Number	Solum	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^3)$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	E_{50}^{ref}/Mpa	E_{oed}^{ref}/Mpa	E_{ur}^{ref}/Mpa	μ
1	Muddy silty clay	17.5	7.06	3.69	3.13	3.13	9.39	0.28
2	Silty clay	19	49.92	22.63	7.07	7.07	21.21	0.35
3	Medium sand	19.7	0	32	25	25	75	0.26
4	Gravelly sand	20	0	35	32	32	96	0.24
5	Round gravel	20	0	36	35	35	105	0.2
6	Strongly weathered argillaceous siltstone	20	40	25	40	40	120	0.3
7	Moderately weathered argillaceous siltstone	23.12	50	40	80	80	240	0.29

表 3 围护结构计算参数表

Tab.3 Building envelope parameters list

Enclosure structure form (C30 concrete)	Equivalent thickness	E_N/GN	$E_I/(\text{GN}/\text{m}^2)$	μ
Underground diaphragm wall (800 mm)	800	24	1.28	0.167
Bored pile (800 mm×1 000 mm)	510	15.3	0.33	0.167

表 4 支撑计算参数表

Tab.4 Supporting structure parameters list

Support type	Characteristic	E_N/GN	L_S/m	μ
Concrete support (800 mm×1 000 mm)	Elasticity	24	24	9
Steel support ($\phi 609$ mm)	Elasticity	15.3	12.1	3

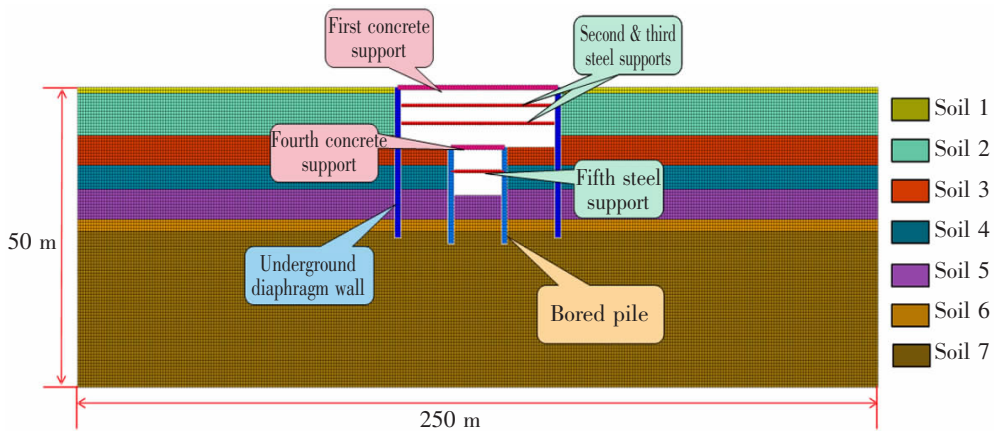


图 2 坑中坑数值计算模型

Fig.2 The numerical calculation model of pit in pit

2)基准模型与初始模型:为研究多个变量对于基坑变形特性的影响,采用控制变量法进行分析,需分别设置基准模型和初始模型。基准模型:选取艾溪湖隧道坑中坑标准横断面设计参数作为模型参数;初始模型:选取基准模型外坑参数作为模型参数,内坑各项参数为 0(表示无内坑作用时计算模型),具体各参数设置见表 5。

表 5 基准模型与初始模型坑中坑设计参数

Tab.5 The pit in pit design parameters of baseline model and initial model

Model	H_1	h_1	B	b	D	H_2	h_2
Baseline model	10	10	30	10	10	8	8
Initial model	10	10	30	0	0	0	0

3)基坑变形影响率:为综合分析各坑中坑空间形态参数对于基坑变形特性的敏感性,引入基坑变形影响率 $\beta_i, \beta_i = \Delta\delta / \delta_0$ 。其中: $\Delta\delta$ 为各实验组相对于初始模型基坑变形的增量; δ_0 表示初始模型的基坑变形量。 β_i 计算取值见表 6,其中 S_{max0}, Y_{max0} 为基准模型的计算结果。

表 6 基坑变形影响率计算表

Tab.6 The calculation table of deformation influence

Influence rate of foundation pit deformation	Representation symbol	Calculation formula
Influence rate of influence range of foundation pit surface settlement	β_1	$\beta_1 = \Delta L / L_0$
Influence rate of maximum surface subsidence	β_2	$\Delta S_{max} / S_{max0}$
Influence rate of maximum horizontal displacement of enclosure structure	β_3	$\Delta Y_{max} / Y_{max0}$

基于以上模型参数,经过数值计算可得到基准模型和初始模型的计算结果见表 7。

表 7 基准模型与初始模型坑中坑变形特性计算结果

Tab.7 The calculation results of pit in pit deformation characteristics (baseline model and initial model)

Model	L	β_1	S_{max}	β_2	Y_{max}	β_3
Baseline model	10	10	30	10	10	8
Initial model	10	10	30	0	0	0

2 坑中坑土体开挖变形机理

坑中坑的开挖变形特性主要与应力场变化以及基坑围护和坑台土体的约束作用密切相关^[14-15]。

2.1 坑中坑开挖卸载应力场变化

坑中坑工程的空间形态与施工特点明显区别于传统基坑,开挖卸载引起的土体应力场变化也比传统基坑更复杂,具体为内外坑分两阶段开挖引起了坑中坑支护结构受力和扰动区土体应力变化,进而引起基坑变形。

如图 3,图 4,当第 1 阶段外坑开挖时,开挖区 1 土体卸载,外坑支护结构产生坑内侧向位移,引起扰动区 1 土体水平应力减小,竖向应力基本保持不变,扰动区 2 和扰动区 3 土体上部卸载,竖向应力减小,水平应力也适当减小;当第 2 阶段内坑开挖时,内外坑支护结构均产生坑内侧向位移,扰动区 1 土体仍旧保持水平应力减小,竖向应力基本不变,扰动区 2 土体侧向卸载,水平应力减小,竖向应力基本不变,扰动区 3 土体上部卸载,竖向应力和水

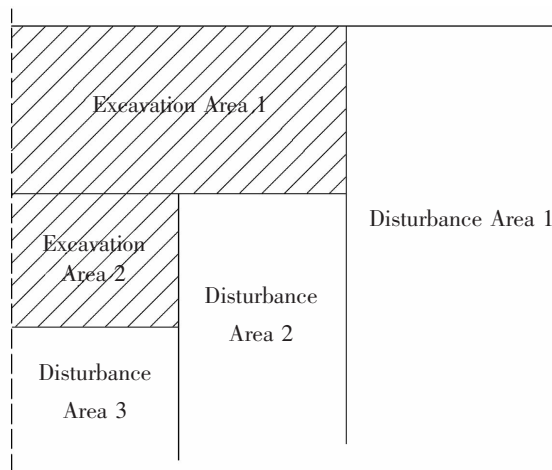


图 3 坑中坑开挖应变场变化区域划分示意图

Fig.3 Regional division of strain field change caused by pit in pit excavation

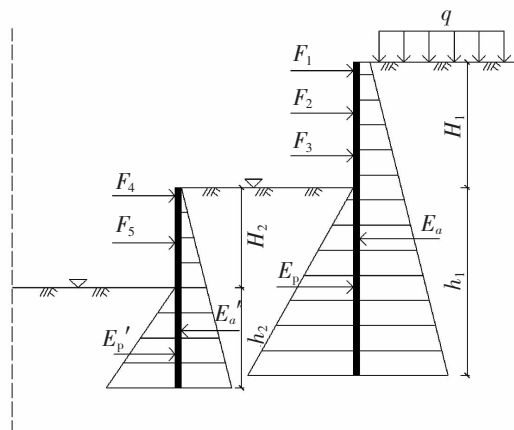


图 4 坑中坑支护结构受力示意图

Fig.4 Stress diagram of pit in pit support structure

平应力均有所减小^[16]。区别于传统单坑基坑,坑中坑基坑第2阶段内坑开挖使得内外坑支护墙体间土体由第1阶段外坑开挖时的主动区变为了内坑开挖时的主动区,引起了外坑支护墙体被动土压力(E_p)减小,而内坑支护墙体的主动土压力(E_a')增大^[23], E_p 的减小和 E_a' 的增大与坑中坑的空间形态特征密切相关, E_p 和 E_a' 的应力场变化最终会反映到坑中坑的变形特征上。图4中 E_p, E_p' 分别为外坑,内坑的被动土压力; E_a, E_a' 分别为外坑,内坑的主动土压力, F_i 为支撑轴力。

2.2 “功能土体”的约束作用

坑中的变形特性由于内外坑开挖卸载使得未开挖土体的应力场重新分布和未开挖土体对于围护墙体产生不同约束作用所引起的。内坑开挖降低了外坑围护结构内侧处在内坑开挖深度范围内这部分土体的约束作用,但并未完全解除这部分土体的约束作用。为了更清晰地表示这部分土体的约束作用,引用孙毅^[12]提出的“功能土体”的概念,因空间形态关系的不同“功能土体”表现出不同的约束作用,具体可细分为以下三种类型:①梯形分布;②强三角形分布;③弱三角形分布^[8]。

“功能土体”的高度(H_b-H_a)与 H_2, D, θ 三个参数直接相关,这直接反映在坑中坑的空间形态参数及地层参数上。同时另一方面内外坑围护结构插入深度也表现出围护结构的抗变形能力,有效的坑中坑支护体系亦可对未开挖土体的产生一定约束^[18]。

3 不同空间形态坑中坑变形特性参数分析

3.1 基坑相对大小对于坑中坑变形的影响分析

基坑的相对大小主要表现为坑中坑内外坑的相对宽度和深度,为了研究这两个因素对于坑中坑变形特性的影响,基于基准模型分别调整内坑宽度(为避免台宽变化影响,保持左侧台宽不变,变形特性取左侧土体及围护结构计算取值)和深度(为避免内坑围护结构插入深度影响,保证深度变化时内坑基坑围护结构插入比不变),进行数值计算,计算结果见表8和表9。

由表8,表9可知,在台宽不变,基坑内外坑支护稳定时,基坑的相对宽度对于坑中坑变形特性基本未产生影响,基坑的地表沉降影响范围和最大沉降值与基准模型计算结果一致,仅围护结构最大水平位移随着基坑相对宽度增大而缓慢增加;基坑的

表8 基坑相对宽度对于坑中坑变形的参数分析结果
Tab.8 Analysis results of influence of parameters on deformation of pit in pit caused by relative width of foundation pit

Result	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5	Group6	Group7
b	3	6	9	10	12	15	18
α_1	0.10	0.20	0.30	0.33	0.40	0.50	0.60
L	36	36	36	36	36	36	36
β_1	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
S_{\max}	5.0	5.0	5.1	5.2	5.2	5.2	5.3
β_2	0.06	0.06	0.09	0.11	0.11	0.11	0.13
Y_{\max}	6.3	6.4	6.4	6.5	6.5	6.5	6.6
β_3	0.09	0.10	0.10	0.12	0.12	0.12	0.14

表9 基坑相对深度对于坑中坑变形的参数分析结果
Tab.9 Analysis results of influence of parameters on deformation of pit in pit caused by relative depth of foundation pit

Result	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5	Group6	Group7
H_2	2	4	6	8	10	12	14
α_2	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
L	24	28	32	36	64	78	90
β_1	0.09	0.27	0.45	0.64	1.91	2.55	3.09
S_{\max}	4.7	4.7	4.8	5.2	9.2	13.4	19.4
β_2	0	0	0.02	0.11	0.96	1.85	3.13
Y_{\max}	5.9	5.9	6	6.5	11.6	16.8	24.3
β_3	0.02	0.02	0.03	0.12	1.00	1.90	3.19

相对深度对于坑中坑变形特性基产生显著影响,基坑的地表沉降影响范围、最大地表沉降值及围护结构最大水平位移均随着基坑相对深度的增加而显著增大。这种情况主要是由于基坑相对深度增加,“功能土体”逐渐表现从梯形分布转变为弱三角形分布,抗变形能力降低,而当基坑台宽一定且支护足够稳定,基坑相对宽度对“功能土体”高度基本无影响,因而未表现出很明显的变形特征。

3.2 基坑相对位置对于坑中坑变形的影响分析

基坑的相对位置可通过坑中坑趾脚系数进行表达,为了研究此因素对于坑中坑变形特性的影响,基于基准模型调整内坑台宽(取左侧台宽进行模型调整计算和结果取值),进行数值计算,计算结果见表10。

由表10可知,基坑的相对位置对于坑中坑变

表 10 基坑相对位置对于坑中坑变形的参数分析结果
Tab.10 Analysis results of influence of parameters on deformation of pit in pit caused by relative position of foundation pit

Result	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5	Group6	Group7
D	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5
ε	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
L	57	54	46	36	28	22	22
β_1	1.59	1.45	1.09	0.64	0.27	0	0
S_{\max}	10.7	9.9	6.7	5.2	4.8	4.7	4.7
β_2	1.28	1.11	0.43	0.11	0.02	0	0
Y_{\max}	13.4	12.3	8.7	6.5	6	5.9	5.8
β_3	1.31	1.12	0.50	0.12	0.03	0.02	0

形特性也产生了较大影响,基坑的地表沉降影响范围、最大地表沉降值及围护结构最大水平位移均随着基坑趾脚系数的增加而逐渐减小,且变化速率逐渐减小,变形值逐渐趋于稳定。这种变化情况主要是由于基坑趾脚系数增加,“功能土体”逐渐表现从弱三角分布转变为梯形分布,抗变形能力增强。

3.3 基坑围护结构插入比对于坑中坑变形的影响分析

基坑围护结构的插入比主要为坑中坑内坑围护结构的插入比和外坑围护结构的插入比,为了研究这两个因素对于坑中坑变形特性的影响,基于基准模型分别调整内外坑围护结构的插入深度,进行数值计算,计算结果见表 11,表 12。

表 11 基坑外坑围护结构插入比对于坑中坑变形的参数分析结果

Tab.11 Analysis results of influence of parameters on deformation of pit in pit caused by insertion ratio of outer pit enclosure structure of foundation pit

Result	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5	Group6	Group7
h_1	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5
ξ_1	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
L	46	40	38	36	36	36	36
β_1	1.09	0.82	0.73	0.64	0.64	0.64	0.64
S_{\max}	7.1	6	5.5	5.2	5.2	5.2	5.2
β_2	0.51	0.28	0.17	0.11	0.11	0.11	0.11
Y_{\max}	8.9	7.5	6.8	6.5	6.5	6.5	6.5
β_3	0.53	0.29	0.17	0.12	0.12	0.12	0.12

表 12 基坑内坑围护结构插入比对于坑中坑变形的参数分析结果

Tab.12 Analysis results of influence of parameters on deformation of pit in pit caused by insertion ratio of inner pit enclosure structure of foundation pit

Result	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5	Group6	Group7
h_2	2	4	6	8	10	12	14
ξ_2	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
L	40	38	37	36	36	36	36
β_1	0.82	0.73	0.68	0.64	0.64	0.64	0.64
S_{\max}	5.6	5.4	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2
β_2	0.19	0.15	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11
Y_{\max}	7.6	6.7	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
β_3	0.31	0.16	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12

由表 11,表 12 可知,基坑的内外坑围护结构插入比对于坑中坑变形特性也产生了一些影响,影响主要体现在当内外坑围护结构插入深度不足时,随着内外坑围护结构插入比的增加,基坑的地表沉降影响范围、最大地表沉降值及围护结构最大水平位移逐渐减小,当内外坑围护结构达到适当的插入深度(且外坑围护结构插入比影响效果更大,内坑围护插入比仅对围护结构最大水平位移产生了影响,对地表沉降影响范围和最大沉降值基本无影响),基坑稳定时,随着插入比增加,坑中坑变形特性基本维持稳定。这种变化情况的原因主要是有效的坑中坑支护体系可对未开挖土体的产生约束,进而对坑中坑的变形特征产生影响,初期支护不足,随着围护结构插入深度增加,支护结构抗变形能力增强,基坑变形特性逐渐减小,而当围护结构达到足够深度时,基坑变形已达到稳定,随着围护深度继续增加不再引起基坑变形特征的进一步变化。

3.4 参数敏感性分析

综合以上各坑中坑空间形态特征参数影响因子对于基坑变形特性反应因子的计算结果,研究分析各个参数因子对于坑中坑 3 项变形特性(包含地表沉降影响范围、地表最大沉降值和围护结构最大水平位移)的敏感性,具体如图 5,图 6 和图 7 所示。

由以上各坑中坑空间形态影响因子对于 3 个基坑变形特性反应因子敏感性分析曲线不难看出,影响坑中坑变形特性的空间形态特征影响因子敏感性关系为:相对深度>相对位置>外坑围护结构插入比>内坑围护结构插入比>相对宽度。

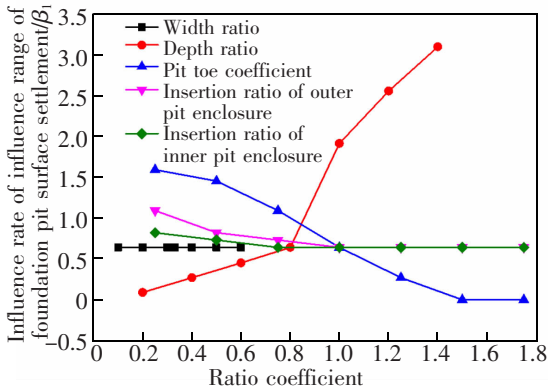


图5 地表沉降影响范围参数敏感性分析曲线

Fig.5 The parametric sensitivity analysis curve of the influence range of surface subsidence

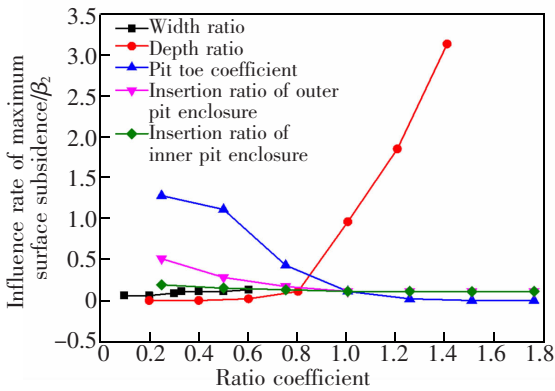


图6 地表沉降最大沉降值参数敏感性分析曲线

Fig.6 The parametric sensitivity analysis curve of the maximum settlement value of surface subsidence

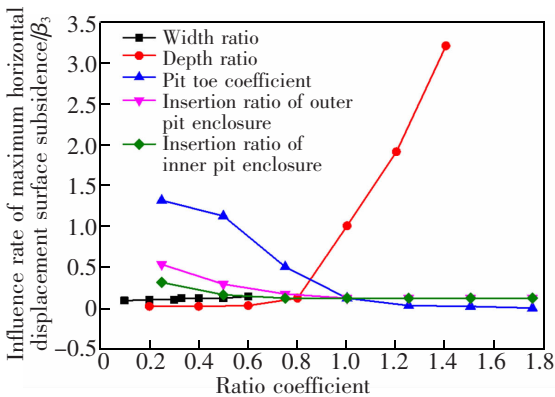


图7 围护结构最大水平位移值参数敏感性分析曲线

Fig.7 The parametric sensitivity analysis curve of the maximum horizontal displacement of envelope structure

4 结论

1) 影响坑中坑变形特性的空间形态特征主要为:相对大小、相对深度和围护结构插入比,可分别利用内外坑深度比、宽度比、趾脚系数、围护结构插入比等影响因子来进行表述;

2) 坑中坑变形特性的各空间形态特征影响因子敏感性关系为:相对深度>相对位置>外坑围护结构插入比>内坑围护结构插入比>相对宽度;

3) 进行坑中坑工程设计与施工时,可基于坑中坑空间形态关系,优化内坑位置,合理设计内坑深度及围护结构插入比,维持适当台宽,充分发挥内外坑支护及坑台土体的约束作用,可在保证坑中坑基坑安全性基础上实现支护最优设计。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 112-113.
QIAN Q H. Meet the upsurge of urban underground space development in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 112-113.
- [2] 刘国彬, 侯学渊. 基坑工程发展的现状与趋势[J]. 地下空间, 1998, 18(5): 400-405, 412.
LIU G B, HOU X Y. Present situation and trend of development of foundation engineering[J]. Underground Space, 1998, 18(5): 400-405, 412.
- [3] 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.
GONG X N. Considerations on foundation pit engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 99-102.
- [4] 李连祥, 张永磊, 扈学波. 基于 PLAXIS 3D 有限元软件的某坑中坑开挖影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 254-261.
LI L X, ZHANG Y L, HU X B. Finite element analysis of A Pit-in-pit excavation based on PLAXIS 3D[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 254-261.
- [5] 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.
CHEN L Y, LI J P, LIANG F Y, et al. Numerical analysis for effect of pit in foundation pit on lateral displacement of supporting structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 59-61.
- [6] 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.
HOU X Y, LIN Y L, XUE B F, et al. Sensitivity analysis of the onfluence of pit toe coefficient on pit in pit deformation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineer-

- ing, 2017, 13(1):257-263.
- [7] 王新. 台宽比对坑中坑基坑变形的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, (2):374-379.
WANG X. Influence of width-ratio of soil inits on pit-in-pit's deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, (2):374-379.
- [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, (S2):187-191.
SHEN M L, LIAO S M, ZHOU X H, et al. Parametric analysis on stress field of pit in pit excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, (S2):187-191.
- [9] 孙毅, 张顶立, 房倩, 等. 北京地区坑中坑工程地表沉降预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(1):3491-3498.
SUN Y, ZHANG D L, FANG Q, et al. Research of prediction method for surface subsidence of pit-in-pit projects in beijing area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(1):3491-3498.
- [10] 袁聪聪, 詹刚毅, 侯世磊, 等. 桩距对双排钢管桩围堰的受力变形影响分析 [J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(02):45-52.
YUAN C C, ZHAN G Y, HOU S L, et al. Influence of pile distance on force deformation of double-row steel pipe pile cofferdam[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2):45-52.
- [11] 申明亮. 坑中坑基坑施工的空间效应研究[J]. 建筑施工, 2015(6):648-649.
SHEN M L. Research on spatial effect of pit-in-pit foundation construction[J]. Building Construction, 2015(6):648-649.
- [12] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1):258-264.
XU Z H, WANG W D. Deformation behavior of deep excavations retained by bored pile wall in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1):258-264.
- [13] 吴小斌, 罗元喜, 何亮, 等. 土体小应变硬化模型的深基坑变形特性数值分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(3):53-55.
WU X B, LUO Y X, HE N, et al. Numerical analysis of deformation characteristics of deep foundation pit based on small strain hardened soil[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(3):53-55.
- [14] 钱天平. 坑中坑对基坑性状影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
QIAN T P. Effect of pit-in-pit on behaviors of excavation [D]. Hangzhon: Zhejiang University, 2012.
- [15] 王凌, 张声宇, 张跃明, 等. 南昌河流阶地内地铁车站基坑变形研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3):31-40.
WANG L, ZHANG S Y, ZHANG Y M, et al. Study on deformation of deep excavation for metro stations in river terraces in nanchang[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021(3):31-40.
- [16] 侯新宇, 刘松玉, 童立元. 地铁换乘站坑中坑开挖变形特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(6):1289-1294.
HOU X Y, LIU S Y, TONG L Y. Deformation characteristics in pit-in-pit of metro interchange station[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2011, 41(6):1289-1294.
- [17] 霍军帅, 宫全美, 陈娟. 坑中坑基坑围护结构变形特性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(S1):139-142.
HUO J S, GONG Q M, CHEN J. Analysis of the deformation of retaining structure of pit-in-pit excavation[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(S1):139-142.
- [18] 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):2053-2059.
FENG T G, XIONG Z H, YU B. Influence of pit-in-pit excavation on lateral deformation of cantilever retaining structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11):2053-2059.



作者简介:郑凯(1981—),男,高级工程师,研究方向为隧道与地下工程设计。E-mail:003933@crfsdi.com。

(责任编辑:姜红贵)