

坑中坑开挖对悬臂式支护结构侧移的影响分析

丰土根^{1, 2}, 熊中华^{1, 2*}, 余波^{1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 悬臂式支护结构比内撑式支护结构对变形更为敏感, 坑中坑开挖将对悬臂式支护结构侧移产生较大影响。利用有限元计算程序, 建立坑中坑有限元模型并作全面数值模拟研究, 得到了坑中坑不同开挖位置、深度及大小对围护结构变形的影响规律, 并探讨了相应的变形控制措施。结果表明: 外坑围护结构最大侧移随坑趾系数的增大而减小, 并且坑趾系数存在临界值, 最大侧移随着深度比和面积比的增大而增大; 围护结构侧移受深度比影响最大, 坑趾系数次之, 面积比最小; 增大内坑围护结构刚度和入土深度对抑制外坑围护结构变形增大的作用不明显, 相反, 内坑设置支撑能起到显著的作用。

关键词: 悬臂式支护结构; 坑中坑; 坑趾系数; 面积比; 深度比; 有限元

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)11-2053-07

作者简介: 丰土根 (1975-), 男, 浙江金华人, 博士后, 教授, 主要从事岩土工程教学科研工作。E-mail: tgfeng75@163.com。

Influence of pit-in-pit excavation on lateral deformation of cantilever retaining structure

FENG Tu-gen^{1, 2}, XIONG Zhong-hua^{1, 2}, YU Bo^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

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

Abstract: The cantilever retaining structure is more sensitive to the deformation than the internal bracing retaining structure. The excavation of pit-in-pit will bring great impact on the cantilever retaining structure. By using the finite element program to establish pit-in-pit models and to perform comprehensive numerical simulation studies, the deformation characteristics of the outer pit are studied in the cases of different positions, depths and areas of the inner pit excavation. Moreover, the measures to control the deformation are also discussed. The results show that the maximum lateral deformation on cantilever retaining structure increases with the decrease of pit toe coefficient which has a critical value. However, they perform completely opposite in terms of depth ratio and area ratio. The depth ratio has the greatest impact on the lateral deformation of cantilever retaining structure, while the area ratio has the least impact on it. The increase of the stiffness and embedded depth of cantilever retaining structure has no significant effect in inhibiting the increase of the deformation of the retaining structure of the outer pit. However, it performs completely opposite if the inner pit has internal bracing.

Key words: cantilever retaining structure; pit-in-pit; pit toe coefficient; area ratio; depth ratio; finite element

0 引言

坑中坑也称作内坑, 是为了容纳地下室、承台、电梯井等结构物而在已经开挖的基坑(外坑)内部进行二次开挖所形成的内部小坑。坑中坑的开挖扰动基坑被动区应力场, 导致被动区土体抗力损失, 对基坑安全造成不利影响。而现有的基坑工程规范及行业标准^[1-3]中都没有提到坑中坑问题, 工程设计人员对坑中坑认识不足, 常常低估甚至忽略坑中坑的影响, 导致了一些基坑事故^[4-5]。龚晓南^[6]曾结合上海基坑事故呼吁对坑中坑工程进行深入研究。现有坑中坑文献大致

都是通过监测分析、施工经验等方式来陈述坑中坑问题^[7-8], 也有少数文献探讨了坑中坑计算理论, 获得了一些有价值的成果。

申明亮等^[9]对坑中坑基坑应力场进行了参数化分析, 结果表明对基坑应力场影响最大的是面积比, 其次是坑趾系数、深度比, 影响最小的是插入比。并且

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51009054); 教育部科学技术研究重点项目 (109077); 江苏省自然科学基金项目 (BK2010513)

收稿日期: 2013-04-22

*通讯作者

指出坑趾系数存在一个转折点, 在坑趾系数小于该值的时候应力基本呈减小趋势。徐意智等^[10]针对坑中坑基坑计算深度选取的困难, 提出了等效深度、等效深度系数以及等效影响角的概念, 并且论证了这种等效的可行性。

鲜有文献全面分析坑中坑开挖位置、深度、及大小的随机性对外坑变形的影响, 也没有提出具有针对性的变形控制措施。设计上忽视坑中坑对基坑变形的影响容易造成工程事故, 过分夸大其影响又势必造成极大的浪费。因此从统筹基坑工程安全性, 同时又兼顾其经济性的角度来看, 有必要对坑中坑不同的开挖位置、开挖深度及大小对外坑变形的影响进行全面数值模拟研究, 并根据研究成果探讨相应的变形控制措施, 为优化设计提供参考。

1 坑中坑参数及有限元模型

1.1 参数介绍

典型坑中坑基坑如图 1 所示, 采用文献[9]的方法对坑中坑各参数作如下定义: ①坑趾系数 $\alpha \chi=d/H$, 其中 d 为内坑坑壁到外坑坑壁的距离 (取较短者), H 为外坑开挖深度; ②内、外坑深度比 $\alpha=h/H$, 其中 h 为内坑开挖深度; ③内、外坑面积比 $\beta=b/B$, 其中 b 为内坑开挖宽度, B 为外坑开挖宽度。

(χ , α , β) 三个参数的组合, 基本可以描述内外坑的相对位置、内坑的深度及大小。

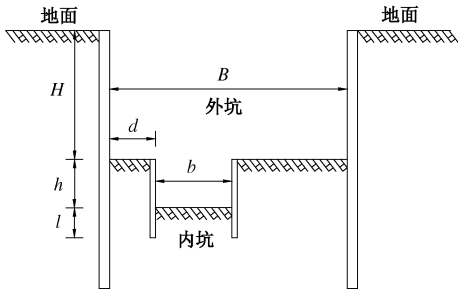


图 1 坑中坑示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pit-in-pit

1.2 有限元模型

计算程序采用求解高度非线性问题能力十分优异, 对岩土工程具有较强适用性的 ABAQUS 有限元软件, 运用 Mohr-Coulomb 模型进行弹塑性分析。各土层力学参数指标如表 1 所示, 计算模型如图 2 所示, 暂考虑二维情况。外坑开挖深度 8 m, 开挖宽度 20 m, 外坑围护结构入土深度 8 m, 内坑围护结构入土深度与开挖深度保持相等。内、外坑围护结构均采用钻孔灌注桩, 弹性模量为 20 GPa, 泊松比为 0.2。计算时将离散的灌注桩按照等刚度原则转化为板状围护结构型式, 外坑围护结构等效厚度取 1.0 m, 内坑围护结

构等效厚度取 0.6 m。土体和外坑围护结构采用 CPE4 单元, 内坑围护结构采用 B21 单元。为了真实反映土体与围护结构之间的相互作用, 采用接触面单元进行模拟。约束模型左右边界的水平位移, 约束底部边界的水平和竖向位移。基坑开挖分为 4 个步骤: step1 开挖至-2 m; step2 开挖至-5 m; step3 开挖至-8 m; step4 开挖坑中坑。

表 1 土层力学参数指标

Table 1 Mechanical parameters of soils

层号	岩土名称	重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 (kPa)	内摩 擦角 ($^{\circ}$)	弹性 模量 (MPa)	泊松比
1-3	素填土	18.6	15	20	5.0	0.32
2-1	粉质黏土	18.9	30	13	6.8	0.30
2-2	淤泥质粉质 黏土	18.0	13	11	4.8	0.34
2-3	淤泥质粉质 黏土	18.1	14	14	5.6	0.32
3-1	粉细砂	18.9	—	—	10.5	0.28

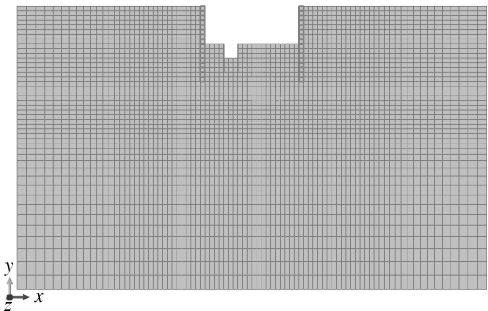


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

Step1~3 外坑围护结构侧移曲线如图 3 所示。由图 3 可知围护结构侧移随着开挖深度的增加而增大, 各开挖步围护结构最大侧移均发生在基坑顶部处, 围护结构侧移值沿着深度方向逐渐减小, 基本呈现三角形分布。外坑开挖完毕后, 围护结构最大侧移值为 45.32 mm。

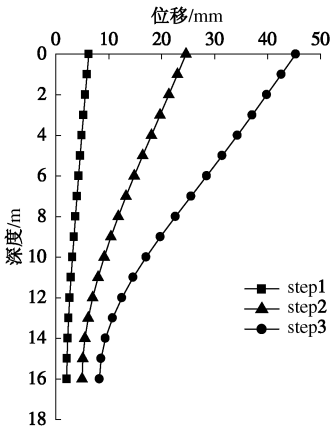


图 3 Step1~3 围护结构侧移曲线

Fig. 3 Lateral deformation on cantilever retaining structure of Steps1~3

2 内坑开挖对围护结构侧移的影响

悬臂式支护结构最大侧移值通常发生在围护结构顶部, 而基坑工程变形控制中关心的往往是围护结构最大侧移值, 故只需分析坑趾系数、深度比及面积比对围护结构最大侧移的影响即可。引入参数最大侧移增长百分比 ξ , $\xi=(\delta-\delta_0)/\delta_0\times 100\%$, 其中 δ_0 为外坑开挖完毕时其围护结构的最大侧移值($\delta_0=45.32\text{ mm}$), δ 为内坑开挖完毕时外坑围护结构的最大侧移值。采用控制变量法进行分析, 共计算了 16 种 (χ, α, β) 的组合, 得到相关数据如表 2 所示。

表 2 影响因素组合及相关数据

Table 2 Combination of influencing factors and related data				
序号	变量	(χ, α, β)	δ/mm	$\xi/\%$
1	χ	(0.00,0.375,0.15)	58.02	28.02
2		(0.25,0.375,0.15)	53.51	18.06
3		(0.50,0.375,0.15)	50.15	10.64
4		(0.75,0.375,0.15)	48.08	6.09
5		(1.00,0.375,0.15)	47.03	3.77
6		(1.20,0.375,0.15)	46.54	2.69
7	α	(0.25,0.125,0.15)	48.00	5.92
8		(0.25,0.250,0.15)	51.22	13.02
9		(0.25,0.375,0.15)	53.51	18.06
10		(0.25,0.500,0.15)	56.71	25.13
11		(0.25,0.625,0.15)	61.05	34.71
12	β (居中)	(1.00,0.375,0.20)	47.06	3.83
13		(0.75,0.375,0.40)	48.14	6.22
14		(0.50,0.375,0.60)	50.35	11.09
15		(0.25,0.375,0.80)	54.17	19.53
16		(0.00,0.375,1.00)	59.32	30.88

2.1 坑趾系数的影响

将坑趾系数 χ 设置为变量, 并保持深度比 $\alpha=0.375$, 面积比 $\beta=0.15$, 即 $(h=3\text{ m}, b=3\text{ m})$ 。 χ 取值依次为 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.20, 得到最大侧移增长百分比 ξ 随坑趾系数 χ 变化的曲线, 如图 4 所示。

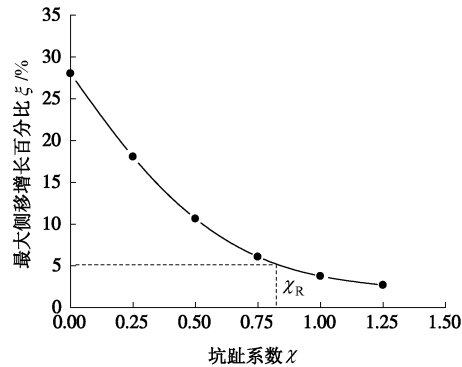


图 4 ξ 与 χ 关系

Fig. 4 Relationship between ξ and χ

由图 4 可知最大侧移增长百分比 ξ 与坑趾系数 χ

呈反相关, 随着 χ 的增大, ξ 逐渐变小, 并且曲线逐渐变缓。当 $\chi=0$, 即内坑贴紧外坑坑壁开挖时 ξ 最大, 达到 28.02%。当 $\chi>1.00$ 时, $\xi<5\%$, 此时 ξ 也随着 χ 的增大而减小, 但是减小的幅度已非常小。若把最大侧移增长百分比 $\xi\leq 5\%$ 作为坑中坑开挖导致围护结构变形增量的可接受范围, 那么当 $\chi<\chi_0$ 时, 必须采取措施来抑制围护结构变形的增大, 而当 $\chi\geq\chi_0$ 时则没有必要采取控制措施。因此坑趾系数 χ_0 可以看作是基于基坑安全性和经济性而设定的一个临界值。显然 χ_0 并不是一个定值, 受基坑开挖深度、地质条件、施工条件以及内坑开挖位置、深度、大小的影响。本模型 $\chi_0\approx 1$, 即内坑在距离外坑壁一倍外坑开挖深度范围内开挖时对围护结构变形影响较大, 而在该范围之外影响很小。

2.2 深度比的影响

将深度比 α 设置为变量, 保持坑趾系数 $\chi=0.25$, 面积比 $\beta=0.15$ 。 α 取值依次为 0.125, 0.250, 0.375, 0.500, 0.625, 得到最大侧移增长百分比 ξ 与深度比 α 关系曲线, 如图 5 所示。

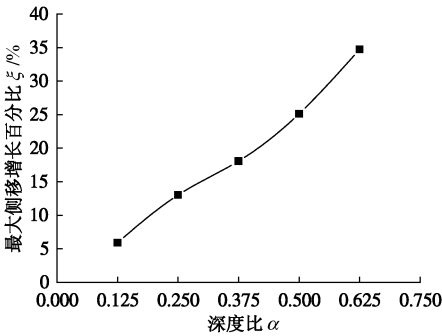


图 5 ξ 与 α 关系

Fig. 5 Relationship between ξ and α

由图 5 可知最大侧移增长百分比 ξ 与深度比 α 呈正相关。随着 α 的增大, ξ 也逐渐增大, ξ 随 α 增大的“速度”基本维持在一个较高的水平不变。当 $\alpha=0.625$ 时, $\xi=34.71\%$, 比较表 2 中序号 11 和 16 的两个组合可知, 开挖 5 m 深的内坑所产生的围护结构侧移增量甚至超过开挖 3 m 厚的整层土体所产生的侧移增量, 可见深度比对围护结构侧移的影响非常显著。究其原因不难发现, 深度比的影响本质上相当于减小外坑围护结构有效入土深度的影响, 临近外坑坑壁开挖较深的内坑不但削弱外坑被动区土体对围护结构的抗力, 而且降低被动土压力合力作用点, 进而加大围护结构向基坑内部倾覆的趋势。工程中不建议在临近基坑坑壁处开挖较深的内坑, 如设计需要开挖深坑时必须采取措施来抑制外坑围护结构侧移的进一步增大。

2.3 面积比的影响

由于面积比与坑趾系数是相关的,面积比的改变将导致坑趾系数的改变。为尽量减小坑趾系数对分析面积比影响的干扰,将内坑设置为居中位置,即保持内坑两侧坑趾系数相同。将面积比 β 设置为变量,保持深度比 $\alpha=0.375$, β 取值依次为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0,得到最大侧移增长百分比 ξ 与面积比 β 关系曲线,如图 6 所示。

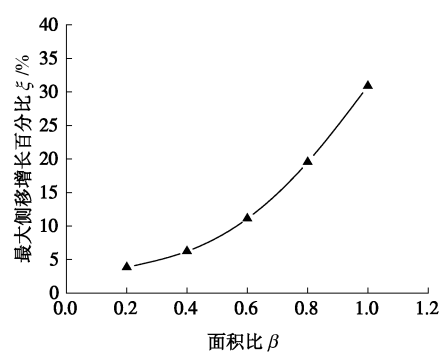


图 6 ξ 与 β 关系

Fig. 6 Relationship between ξ and β

由图 6 可知 ξ 与 β 呈正相关,当 $\beta \leq 0.4$ 时, ξ 的增大较为平缓,当 $\beta > 0.4$ 时, ξ 迅速增大, ξ 总体呈现随 β “加速”增大的趋势。当 β 达到极值 1.0 时, $\xi=30.88\%$,可见面积比的影响也是非常显著的。面积比的影响与深度比类似,也将减小外坑围护结构的有效入土深度。此外,大面积的内坑开挖不仅降低基坑抗隆起稳定性,而且大面积的垂向卸荷增大上下土面应力差,使基坑外围土体产生侧向剪切应变,增大围护结构侧向位移趋势。实际工程中,在不更改原有设计的情况下,建议尽量缩减内坑的开挖面积。

2.4 χ, α, β 影响的程度比较

由 2.1~2.3 的分析得到了坑趾系数 χ 、深度比 α 、面积比 β 中各单因素“纵向比较”下外坑围护结构变形的发展趋势。为比较外坑围护结构变形对 χ, α, β 三个参数的敏感程度,将三者的对围护结构变形的影响作“横向比较”。

假设某初始内坑开挖时外坑围护结构最大侧移增长百分比为 ξ_0 ,以该初始内坑为基准,当内、外坑距离减小 Δd 时最大侧移增长百分比为 ξ_χ ,内坑开挖深度增加 Δd 时最大侧移增长百分比为 ξ_α ,内坑开挖宽度增加 Δd 时最大侧移增长百分比为 ξ_β ,并记

$$\Delta \xi_i = \xi_i - \xi_0, \quad (i = \chi, \alpha, \beta).$$
 (1)

那么在相同的尺寸改变(Δd)条件下,比较 $\Delta \xi_\chi, \Delta \xi_\alpha, \Delta \xi_\beta$ 的大小可作为区分 χ, α, β 三个参数对外坑围护结构变形影响程度大小的标准。将初始内坑取为(0.375, 0.375, 0.15)时,尺寸改变 Δd 取为 1 m;

初始内坑取为(0.5, 0.25, 0.10)时,尺寸改变 Δd 取为 2 m,相关数据如表 3 所示。

表 3 横向比较相关数据

Table 5 Related data of horizontal comparison					
初始	变量	(χ, α, β)	$\xi_i/\%$	$\Delta \xi_i/\%$	
(0.375,0.375,0.15)	χ	(0.25,0.375,0.15)	18.06	4.01	
	$\xi_0=14.05\%$	α	(0.375,0.50,0.15)	20.29	6.24
	$\Delta d=1\text{ m}$	β	(0.375,0.375,0.20)	14.46	0.42
(0.5,0.25,0.10)	χ	(0.25,0.25,0.10)	12.31	5.45	
	$\xi_0=6.85\%$	α	(0.50,0.50,0.10)	15.22	8.36
	$\Delta d=2\text{ m}$	β	(0.50,0.25,0.20)	7.23	0.38

由表 3 可知,在上述“横向比较”标准下,所取 2 个不同的初始内坑均有 $\Delta \xi_\alpha > \Delta \xi_\chi > \Delta \xi_\beta$,可见 3 个参数对外坑围护结构变形的影响程度是深度比最大,坑趾系数次之,面积比最小。其中坑趾系数影响比深度比影响稍小,而面积比影响要比坑趾系数、深度比影响小很多。这与文献[9]指出的 3 个参数对应应力场影响程度大小关系是不同的,可见 3 个参数对位移与应力的扰动并不是对应的。根据围护结构位移对 χ, α, β 的敏感程度大小关系,建议在坑中坑设计与施工时,应当遵从能不深挖则不深挖,尽量远离外坑坑壁开挖,能增大面积比则尽量减小深度比或增大坑趾系数的原则。

3 变形控制措施及其效果评价

前面已经分析了内坑不同开挖位置、深度及大小对外坑围护结构变形的影响,外坑围护结构变形增量在较小的坑趾系数、较大的深度比、较大的面积比时均相当可观,予以忽略将有可能导致基坑事故,因此有必要探讨外坑围护结构变形的控制措施。从外坑本身出发可采取的变形控制措施较多,比如直接增大外坑围护结构的刚度、增加围护结构入土深度、设置外坑支撑,坑内外土体加固等。本文将着重探讨不同内坑支护条件下外坑围护结构变形的发展规律,探讨相应的变形控制措施及其效果。

3.1 内坑围护结构刚度

提升围护结构刚度是增强围护结构抗变形能力的方法之一。首先分析内坑围护结构刚度改变对抑制外坑围护结构变形的效果,通过改变围护结构厚度的方法来实现围护结构刚度的改变。内坑分别取为(0.25, 0.500, 0.15)、(0.50, 0.375, 0.15),依次将 2 个内坑围护结构厚度 c 取为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 m,得到外坑围护结构最大侧移值增长百分比与内坑围护结构厚度的关系曲线,如图 7 所示。

由图 7 可知,内坑围护结构刚度的增大,能够减

小外坑围护结构最大侧移增量, 但是减小的幅度非常之小。组合为 (0.25, 0.500, 0.15) 的内坑围护结构厚度从 0.4 m 增加到 1.2 m 时, 外坑围护结构最大侧移增长百分比仅从 27.75% 减小到 22.66%, 而组合为 (0.50, 0.375, 0.15) 的内坑围护结构最大侧移增长百分比更是几乎不变。可见增大内坑围护结构刚度来抑制外坑围护结构变形增大的办法非常不理想, 建议工程实际中开挖深度 5 m 以内的内坑在保证内坑本身安全的前提下, 采用 0.6 m 或 0.8 m 厚围护结构即可, 盲目增大厚度, 不仅收效甚微, 而且造成极大的浪费。

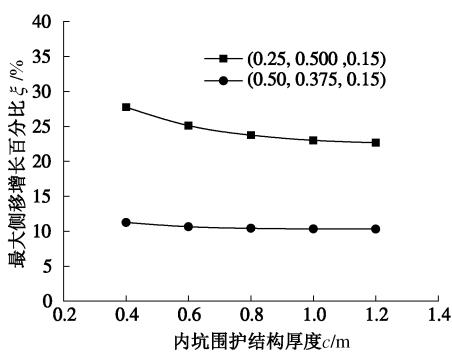


图 7 ξ 与 c 关系

Fig.7 Relationship between ξ and c

3.2 内坑围护结构入土深度

定义围护结构插入比 $n=l/h$, 其中 h 为内坑开挖深度, l 为内坑围护结构入土深度, 则插入比越大, 入土越深 (前文插入比均为 $n=1$)。内坑分别取为 (0.25, 0.500, 0.15)、(0.50, 0.375, 0.15), 围护结构厚度均为 $c=0.6$ m。依次将两个内坑围护结构插入比 n 取为 0.5, 0.67, 1.0, 2.0, 得到外坑围护结构最大侧移值增长百分比与内坑围护结构插入比的关系曲线, 如图 8 所示。

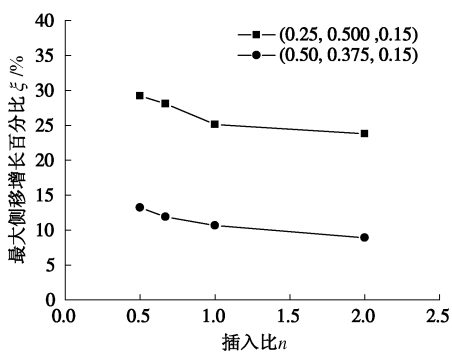


图 8 ξ 与 n 关系

Fig. 8 Relationship between ξ and n

由图 8 可知, 内坑围护结构插入比 n 越大, 外坑围护结构最大侧移值增长百分比 ξ 越小, 但是减小幅度较小, n 从 0.5 增大到 2.0 时, 内坑 (0.25, 0.500, 0.15) 的 ξ 值仅从 29.22% 减小到 23.77%, 而内坑 (0.50, 0.375, 0.15) 也仅从 13.22% 减小到 8.91%。因此增加

内坑围护结构入土深度对抑制外坑变形增大是有作用的, 但是与增加内坑围护结构刚度一样, 作用十分有限。同样, 从经济性的角度来看, 内坑围护结构插入比也不宜设置过大, 工程实际中建议保持在 $n=1.0$ 即可。

3.3 内坑支撑

设置内支撑也是常用的变形控制方法, 内坑分别取为 (0.25, 0.500, 0.15)、(0.50, 0.375, 0.15), 内坑围护结构厚度均为 $c=0.6$ m, 围护结构插入比均为 $n=1.0$ 。在两个内坑顶部分别设置一道支撑, 弹性模量为 20 GPa, 得到有、无支撑时外坑围护结构最大侧移增长百分比 ξ 及变形抑制率 η 如表 4 所示。

表 4 内坑支撑及相关数据

Table 4 Inner support of pit-in-pit and related data			
组合	状态	$\xi/\%$	$\eta=(\xi_{\text{无}}-\xi_{\text{有}})/\xi_{\text{无}}\times 100\%$
(0.25,0.500,0.15)	无支撑	25.13	—
	有支撑	4.33	82.78%
(0.50,0.375,0.15)	无支撑	10.64	—
	有支撑	1.11	89.56%

由表 4 可知, 2 个内坑在设置支撑的情况下比无支撑的情况下外坑围护结构最大侧移增量抑制率高达 82.78% 和 89.56%。显然由于支撑对内坑围护结构位移的阻止作用, 内、外坑坑壁之间的土体水平位移受到约束, 进而基坑被动区土体获得足够的抗力来抑制外坑围护结构的侧移。可见内坑设置支撑对抑制外坑围护结构侧移增大具有显著的作用, 因此若对基坑变形要求较高, 内坑设置支撑应当是优先考虑的办法。

4 工程实例

以南京城西干道综合改造工程集庆门段隧道基坑工程为例, 其周边环境复杂, 重要构筑物较多, 对变形控制要求极为严格, 基坑最深部位如图 9 (a) 所示, 泵房坑中坑如图 9 (b) 所示。基坑西侧分布有秦淮河驳岸及集庆门大桥桥墩, 驳岸岸顶标高约 3.8~5.8 m, 桥墩距基坑边约 0.1~2.0 m。东侧为明城墙, 城墙宽约 16 m, 高约 12 m, 距基坑边约 13 m。基坑东西两侧通过钢便桥连接, 方便车辆通行。基坑开挖深度 1.0~10.8 m, 泵房坑中坑处于基坑开挖最深部位, 挖宽 3.0 m, 挖深 4.0 m, 紧贴基坑坑壁开挖。外基坑支护结构采用钻孔灌注双排桩, 桩径 1.2 m, 入土深度约 29 m。泵房坑中坑支护结构采用直径 1.0 m 灌注桩, 入土深度约 7 m。

泵房坑中坑位置是基坑较为危险部位之一, 为及时反映该部位基坑变形情况, 在泵房中间位置布置有一个桩体水平位移监测点。现场测斜数据如图 10 所示, 外部基坑开挖完毕时泵房位置围护结构最大侧移

为 19.59 mm。泵房坑中坑开挖前原本计划在坑中坑顶部设置一道工字钢支撑,但由于施工人员未按照先撑后挖原则,待坑中坑开挖约 2 m 深时才设置钢支撑。这期间观测到的外部基坑围护结构最大侧移值为 23.55 mm,位移增量达 3.96 mm,最大侧移增长百分比为 20.21%。设置钢支撑后,直到泵房坑中坑开挖完毕,外部基坑围护结构最大侧移值为 24.63 mm,最大侧移增长百分比为 25.73%。可见,设置钢支撑前泵房坑中坑开挖对外部基坑围护结构侧移影响较大,而钢支撑后,围护结构侧移未见随坑中坑开挖深度的增加而急剧增大,相反围护结构最大侧移增长百分比只增加 5.52%。这也印证了设置支撑对抑制外坑围护结构变形确实是具有显著作用的,另外也应该看到尽管内坑围护结构直径达 1.0 m,插入比达到 1.75,但对抑制外坑围护结构变形作用并不明显。

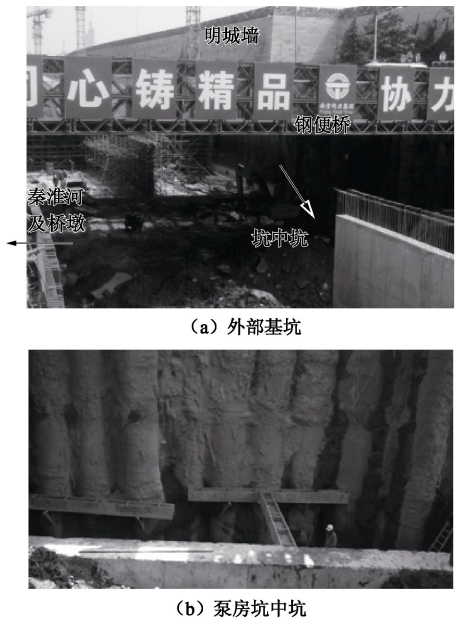


图 9 施工现场视图

Fig. 9 View of construction site

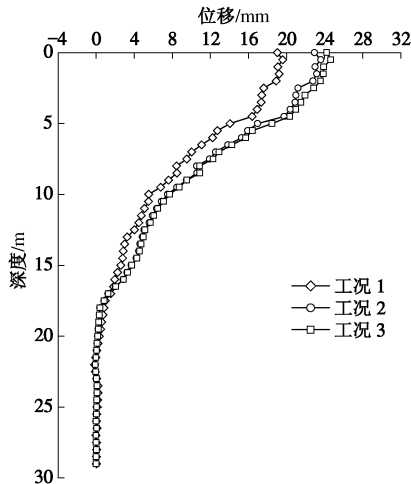


图 10 围护结构侧向位移

Fig. 10 Lateral deformation on cantilever retaining structure

图 10 中,工况 1 表示外坑开挖完毕;工况 2 表示内坑开挖 2 m 深(未设支撑);工况 3 表示内坑开挖完毕(工况 2 完成后立即设置内坑支撑)。

5 结 论

坑中坑开挖不当将导致外坑围护结构产生较大变形,通过有限元计算程序分析了坑中坑开挖对外坑围护结构变形的影响,得到如下 5 点结论。

(1) 悬臂式支护结构最大侧移随着坑趾系数的增大而减小,当坑趾系数超过某值时,最大侧移减小幅度很小。即坑趾系数存在一个临界值,超过该临界值时内坑开挖对外坑围护结构变形影响较小。

(2) 悬臂式支护结构最大侧移随着深度比的增大而增大,开挖较深的内坑将大幅减小外坑围护结构有效入土深度,严重影响基坑稳定性。

(3) 悬臂式支护结构最大侧移随着面积比的增大而加速增大,大面积内坑开挖不仅减小外坑围护结构有效入土深度,而且增大坑外土体向坑内位移的趋势。

(4) 悬臂式支护结构变形受深度比影响最大,坑趾系数次之,面积比影响最小。

(5) 对抑制外坑围护结构变形效果而言,在内坑设置支撑比增大内坑围护结构刚度和入土深度的作用要显著。其原因在于内坑设置支撑相对另外两种方式能显著抑制内、外坑坑壁之间的土体水平位移,进而显著抑制外坑围护结构的侧移。

参考文献:

- [1] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ 120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 1999. (in Chinese))
- [2] CECS 96: 97 基坑土钉支护技术规程[S]. 1997. (CECS 96: 97 Specification for soil nailing in foundation excavations[S]. 1997. (in Chinese))
- [3] DG/TJ 08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海, 2010. (DG/TJ 08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. Shanghai, 2010. (in Chinese))
- [4] 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 - 1559. (XU Wei-min, TU Yu-min. Landslide analysis and reinforcement design of the pit-in-pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1555 - 1559. (in Chinese))
- [5] 付文光, 杨志银, 刘俊岩, 等. 复合土钉墙的若干理论问题、兼论《复合土钉墙基坑支护技术规范》[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2291 - 2304. (FU Wen-guang,

- YANG Zhi-yin, LIU Jun-yan, et al. Some theoretical questions of composite soil nailing wall and discussion on technical code for composite soil nailing wall in retaining and protection of excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 2291 - 2304. (in Chinese))
- [6] 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 Xiao-nan. Considerations on foundation pit engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(9): 99 - 102. (in Chinese))
- [7] 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**(增刊): 1570 - 1572. (WU Ming-bing, LIN Da-feng, DAI Yi-ming, et al. Design and monitoring of retaining of pits in foudation-pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S0): 1570 - 1572. (in Chinese))
- [8] 陈 畅, 邸国恩, 王卫东. 软土基坑工程坑中坑支护的设计方法[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊): 286 - 290. (CHEN Chang, DI Guo-en, WANG Wei-dong. Design of retaining system of local deep excavations in foundation pits in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S0): 286 - 290. (in Chinese))
- [9] 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**(增刊): 187-191. (SHEN Ming-liang, LIAO Shao-ming, ZHOU Xiao-hua, et al. Parametric analysis on stress field of pit in pit excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S0): 187 - 191. (in Chinese))
- [10] 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. (XU Yi-zhi, LIAO Shao-ming, ZHOU Xiao-hua. A computation method of equivalent depth for pit-in-pit excavation structural design in soft ground of Shanghai[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2736 - 2742. (in Chinese))

新版《加筋土挡墙工程图集》出版发行

由重庆市公路学会组织编绘的《加筋土挡墙工程图集》已出版, 替代已停止使用的 1997 年人民交通出版社出版的旧版《加筋土挡墙工程图集》。

新版《加筋土挡墙工程图集》有重大修改和创新设计, 执行及国际多个行业技术规范, 设计荷载提高, 安全系数加大, 使用范围更广。适用于公路、建筑等加筋土挡墙工程。新《图集》最大亮点是设计了工厂化生产的玻璃钢面板、镀锌钢面板、每块面板质量仅 6~30 kg, 适宜长短距离运输。解决了现场预

制混凝土面板费时、费工、费力的缺点, 安装快捷、简便、缩短了施工工期。

新版《图集》包括 3 种填料, 5 种内摩擦角各 10 种不同高度的等断面、台阶形断面设计图。设计人员可以从中任意组合、选择 200 种以上的加筋图挡墙设计图。是广大土木工程技术人员不可或缺的工具书。

新版《图集》由重庆市人民出版社、重庆出版集团出版, 精装本, 每册定价 99 元。

(重庆永固建筑科技发展有限公司 供稿)