

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021042923081996

文章编号: 1674-599X(2023)04-0070-10

引用格式: 邱力杰, 尹平保, 王礼华, 等. 考虑空间效应的深长基坑围护结构受力与变形分析[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(4): 70-79.

Citation: QIU Lijie, YIN Pingbao, WANG Lihua, et al. Analysis of stress and deformation of retaining structure in deep foundation pit based on spatial effect[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(4): 70-79.

考虑空间效应的深长基坑围护结构受力与变形分析

邱力杰^{1,3}, 尹平保¹, 王礼华², 史豪杰², 陈卓异¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中交一公局第四工程有限公司, 广西 南宁 530031; 3. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410021)

摘 要: 城市道路的下穿改造工程经常需要开挖深基坑, 而深基坑的开挖存在较明显的空间效应。为深入研究深基坑开挖的空间效应对工程围护结构及周边环境的影响, 以深圳市公常路下穿改造工程 K2+000 ~ K2+120 段为工程背景, 开展现场监测和数值模拟研究。采用 Midas GTS 有限元软件, 对其开挖过程进行模拟, 通过参数分析, 探讨超载、围护桩桩径以及钢支撑预加力等因素对深基坑围护结构受力及变形的影响。研究结果表明: 基坑周边超载增大将导致围护桩变形与周边地表沉降的显著增大; 周边超载的变化将影响基坑受力、变形及周边地表沉降。当围护桩桩径大于 0.8 m 时, 其对围护结构弯矩的空间效应影响显著。通过对钢支撑施加预加力, 可调节围护结构弯矩, 减小桩体位移, 控制周边地表沉降值。在该工程中, 钢支撑预加力对基坑的空间效应影响甚微。该研究可为类似基坑工程的设计与施工提供参考。

关键词: 深基坑; 支撑轴力; 监测分析; 数值模拟; 空间效应

中图分类号: TU47

文献标志码: A

Analysis of stress and deformation of retaining structure in deep foundation pit based on spatial effect

QIU Lijie^{1,3}, YIN Pingbao¹, WANG Lihua², SHI Haojie², CHEN Zhuoyi¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. The Fourth Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Nanning 530031, China;

3. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Changsha 410021, China)

Abstract: The excavation of a deep foundation pit is often required for the reconstruction of urban road underpasses, and deep foundation pit excavation has obvious spatial effect. In order to gain an in-depth understanding of the spatial impact of deep excavation on the enclosure structure and the surrounding environment, the on-site monitoring and numerical simulation studies based on the deep foundation pit project of the K2+000~K2+120 section of the Shenzhen Gongchang Road underpass reconstruction project were carried out. Numerical software Midas GTS was used to investigate the effects of overloading, enclosure pile diameter and steel support preloading on stress and deformation of deep foundation pit enclosure structure through parametric analysis. The results shows that overload around the perimeters of the pits deformed the perimeters and caused significant settlement of the surrounding ground. The spatial effects of pit stress, deformation and settlement of the surrounding ground surface were affected by changes in peripheral overload. When the diameter of fender pile was greater than 0.8m, its spatial effect on the bending moment of the surrounding structure was of great importance.

收稿日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878069, 51778067); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50647); 长沙理工大学南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方工程实验室开放基金资助项目(18KE01)

作者简介: 邱力杰(1996—), 男, 长沙理工大学硕士生。

By applying a pre-stressing force to the steel support, the bending moment of the enclosure structure could be adjusted to reduce pile displacement and control the value of the surrounding surface settlement. For this project, the prestressing force of the steel columns did not have a significant effect on the spatial effect of the pit. The study could serve as a reference for designing and constructing similar pits in other areas.

Key words: deep foundation pit; axial force of support; monitoring analysis; numerical simulation; spatial effect

随着中国城市地下空间开发与施工水平的提高,大型地铁车站与长距离明挖隧道等深长基坑工程不断出现。和普通基坑相比,深长基坑的长度、宽度更大,且在施工过程中,为增加施工断面,常采用分段、分层的方式进行开挖。在施工设计过程中,也常将基坑简化为平面进行计算。但深长基坑在开挖面附近的土应力与其余位置的土应力有很大区别,其围护结构的受力与变形存在明显的空间效应。若将深长基坑简化为二维平面进行分析,显然无法准确地反映深基坑的受力与变形的实际情况。因此,有必要考虑基坑的空间效应,对其围护结构进行重新设计。

基坑的空间效应是指由于基坑与其支护体系受力状态的不同,使基坑不同位置的支护结构与受力变形间相互影响,进而发生改变的性质^[1]。目前,学者们主要使用实测数据分析^[2-5]、理论计算^[6-8]及数值模拟^[9-10]等手段,对基坑空间效应进行研究,其研究对象大多是方形、长条形或异形基坑。其中,大型深长基坑多采用分段、分层的方式进行开挖^[11],对采用分段式开挖的深长基坑工程进行空间效应分析的研究相对较少。杨丽春等^[12]以超长基坑为研究对象,考虑其基坑空间效应,分析了开挖方式与开挖长度对基坑围护结构变形及坑底隆起的影响。吴志敏等^[13]分别采用分段、分层开挖的方式,建立了开挖平面为20 m×20 m的基坑数值模型,揭示了在空间效应影响下,深长基坑的变形特点及土钉轴力变化规律。一些学者还对基坑空间效应的影响因素进行研究。俞晓等^[14]通过建立不规则超大深基坑的数值模型,研究了内支撑对基坑空间效应的影响。刘念武等^[15]分析了现场实测数据,研究了在不同基坑围护形式下,基坑围护结构变形及周边地表沉降的空间效应。俞建霖等^[16]研究了基坑尺寸大小对空间效应的影响规律,确定了基坑的临界长宽比。该临界长宽比能决定基坑空间效应

的作用范围。FINNO^[17]通过分析150个基坑的数值模型,得到了基坑长宽比、长度与开挖深度比、围护系统刚度及基坑底抗隆起安全系数4个影响基坑空间效应的主要因素。OU等^[18]基于三维基坑模型中长边围护结构变形的最大值与二维模型中围护结构变形最大值之比,研究了基坑长宽比与距坑角间距对基坑变形的影响。

综上所述,目前对于基坑空间效应的研究多集中在方形或异形基坑的坑角效应分析方面,研究者大多关注基坑设计尺寸大小、基坑施工时序、围护结构刚度等因素对基坑的空间效应影响。采用分段开挖方式进行开挖的深长基坑,在开挖面位置的围护结构上,主要依靠土体与邻近支撑体系来维持其稳定,这与具有较大系统刚度的基坑坑角处的情况有较大区别。因此,对于分段开挖的深长基坑,很有必要开展其围护结构在各影响因素下的受力及变形分析。本研究针对深圳市公常路下穿改造工程深基坑开挖,通过开展现场监测和数值模拟,以围护结构桩体水平位移、围护桩弯矩及周边地表沉降值作为控制指标,分析该基坑周边超载、围护桩桩径以及钢支撑预加力等因素对基坑空间效应的影响。

1 工程概况

深圳市公常路中山大学深圳校区段下穿改造工程位于深圳市光明区新湖街道,全长为3.56 km,其所在区域土体主要由杂填土、有机质黏土、中砂、砂质黏性土、全风化混合花岗岩、强风化混合花岗岩等组成。选取其K2+000~K2+120段基坑进行研究。该基坑长为120.0 m,宽为29.0 m,开挖深度为17.5 m。围护结构采用桩径为1.2 m,桩间距为1.5 m的钻孔灌注桩,0.8 m旋喷桩进行桩间咬接和止水。内支撑结构采用三道支撑,其中,第一道为砼支撑,

其水平间距为9.0 m;第二道和第三道均采用钢支撑,其水平间距均为3.0 m。在该基坑中间,设置520 mm×520 mm的钢格构立柱,该基坑围护结构断面如图1所示。采用明挖顺作法进行基坑施工,对基坑分段、分层开挖,其中,分段长度约为20.0~30.0 m,分层高度约为6.0 m。在开挖过程中,对围护桩挂网喷射混凝土护面,开挖至设计高程后,及时架设钢支撑并施加预加轴力。

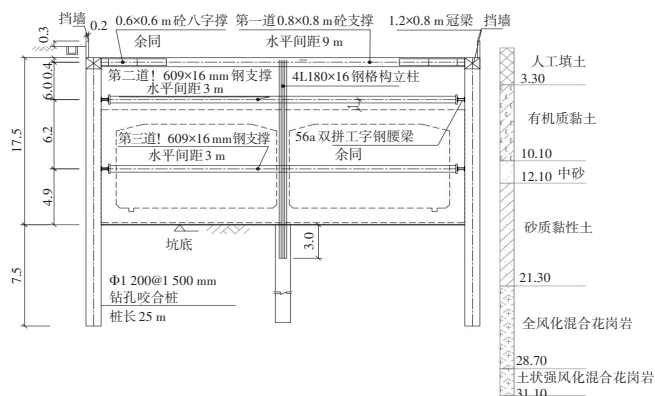


图1 基坑围护结构(单位:m)

Fig. 1 Schematic of propping structure of excavation(Unit:m)

2 围护结构受力与变形数值模拟分析

2.1 计算模型建立及参数设置

采用Midas GTS有限元软件,对K2+000~K2+120段深基坑的开挖过程进行数值模拟。基坑及其围护模型如图2所示。该数值模型的尺寸大小为130 m×170 m×50 m,其中,基坑数值模型的尺寸大小为29 m×116 m×25 m,基坑开挖深度为17.5 m,支护桩嵌固深度为7.5 m。采用梁单元模拟冠梁、砼支撑、钢支撑、钢围檩、立柱桩等;采用板单元模拟围护排桩。考虑该工程的特点,按修正等刚度法^[19]将咬合排桩等效为0.93 m厚的板;采用HS实体单元模拟基坑周围土体。对模型四周施加边界约束,对开挖基坑无支撑面施加法向位移约束。整个数值模型共127 506个单元,74 198个节点。考虑施工车辆对基坑的影响,在坑顶地表施加20 kPa的均布荷载。各土层材料参数见表1。在表1中, γ_{unast} 为有效土重度, E_{50}^{ref} 为三轴切线模量, E_{oed}^{ref} 为固结切线模量, E_{ur}^{ref} 为卸载再加载切线模量, c 为黏聚力, ϕ 为内摩擦角;CL1表示人工填土;CL2表示有机质黏土;CL3表示中砂;CL4表示砂质黏性土;CL5表示全风化混合花岗岩

岩;CL6表示土状强风化混合花岗岩。模型计算工况与实际开挖工况一致,具体施工模拟步骤见表2。

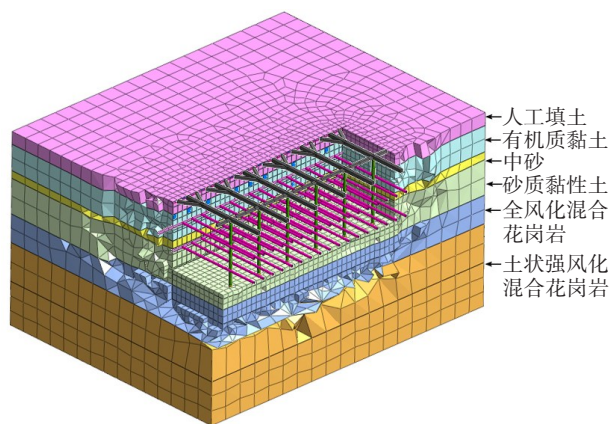


图2 基坑支撑结构及围护结构模型

Fig. 2 Model of support structure and propping structure of excavation

表1 土层参数设置表

Table 1 Table of soil parameters

土层	$\gamma_{unast}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E_{50}^{ref}/$ ($10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$E_{oed}^{ref}/$ ($10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$E_{ur}^{ref}/$ ($10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$c/$ (kPa)	$\phi/$ (°)
CL1	18.3	8	8	24	10	15
CL2	17.5	4	4	12	15	4
CL3	19.5	30	30	90	1	32
CL4	18.5	22	22	66	23	23
CL5	19.0	60	60	180	22	28
CL6	20.0	170	170	510	45	33

表2 施工模拟步骤

Table 2 Construction simulation steps

工序	施工情况
1	考虑土层的初始地应力,进行位移清零。
2	施作围护桩及截水帷幕。
3	降水至基坑底下1.0 m(深度18.5 m)。
4	开挖土层(挖至1.4 m深); 架设第一道砼支撑(深度0.4 m)。
5	开挖土层(挖至7.4 m深); 架设第二道钢支撑(深度6.4 m)。
6	开挖土层(挖至13.6 m深); 第三道钢支撑架设(深度12.6 m)。
7	开挖土层至基坑底(挖至17.5 m深)。

2.2 数值模拟与监测结果对比

采用自动化监测手段对基坑围护桩的桩体水平位移及地表沉降进行监测,测点布置平面和断面

分别如图3~4所示。

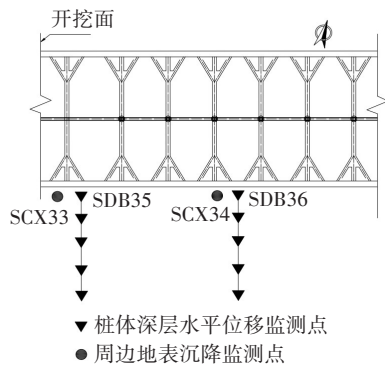


图3 测点布置平面

Fig. 3 Plan view of layout of monitoring points

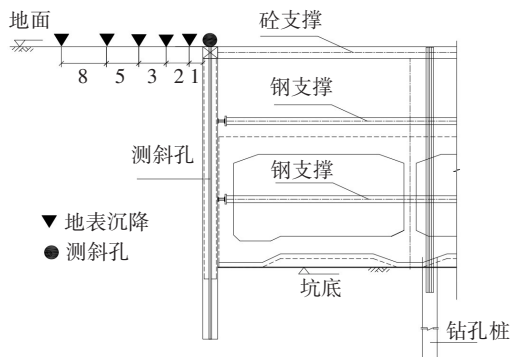


图4 测点布置断面

Fig. 4 Sectional view of layout of monitoring points

将图3中开挖面附近的桩体水平位移测点SCX33及基坑中段测点SCX34的水平位移监测结果及数值模拟结果绘制成曲线,如图5所示。

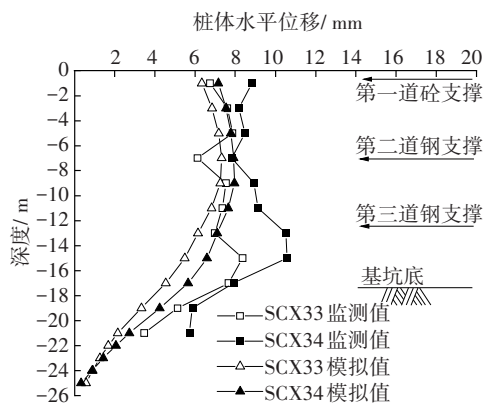


图5 SCX33、SCX34桩体水平位移的变化曲线

Fig.5 Horizontal displacement curves of SCX33 and SCX34

从图5可以看出,SCX33及SCX34监测点的桩体水平位移与有限元模型模拟的数值较接近,表明数值模拟结果能较好地反映实际工程中围护结构的变形情况。其中,最大桩体水平位移监测值均略

大于最大模拟值,这是因为该有限元模型将围护桩等效为地下连续墙进行计算,使得模型的围护结构的整体稳定性更好。对比SCX33及SCX34监测点的桩体水平位移监测值,发现SCX33各深度的桩体水平位移值均小于SCX34的,这是因为开挖面附近未开挖土体与支撑共同作用于基坑围护结构,围护结构变形在开挖面附近的空间效应较为明显。

将图3中开挖面附近桩体水平位移测点SDB35及基坑中段测点SDB36的水平位移的监测结果及数值模拟结果绘制成曲线,如图6所示。

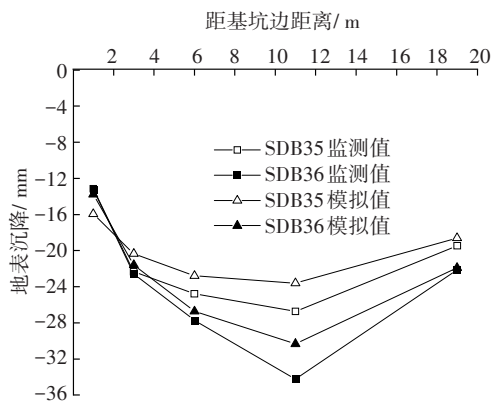


图6 SDB35、SDB36地表沉降变化曲线

Fig. 6 Ground surface settlement curves of SDB35、SDB36

从图6可以看出,SDB35及SDB36监测点的监测结果与数值模拟结果的变化趋势基本一致,其地表沉降最大值的出现位置均在距基坑边11 m附近。SDB35及SDB36监测点的地表沉降监测结果均略大于对应位置的有限元模拟结果,这是由于实际工程中基坑周边不确定荷载较复杂,有限元模型中无法考虑到所有的周边荷载。

从图6中还可以看出,在基坑空间效应的影响下,开挖面附近地表沉降均小于基坑中部的地表沉降。

3 影响因素分析

3.1 影响因素分析方案

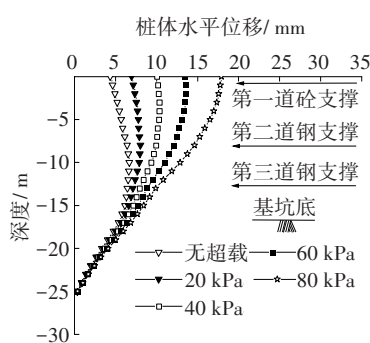
为探讨在空间效应影响下,地面超载、围护桩桩径及钢支撑预加力三因素对基坑围护结构变形、桩身弯矩及地表沉降的影响,制定影响因素分析方案,结果见表3。在表3中,当仅针对某一影响因素进行分析时,仅以该影响因素的参数作为单一变量,其余参数设置与基坑及围护模型参数一致。表3及后续研究均基于基坑开挖土层至基坑底的工况7展开。

表3 影响因素分析方案表

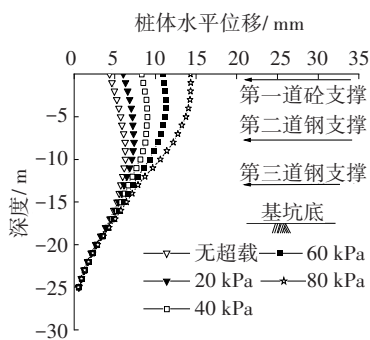
Table 3 Scheme of parameters analysis		
地面超载/kPa	围护桩桩径/m	钢支撑预加力
0、20、40、60、80	0.6、0.8、1.0、 1.2、1.4	10%、20%、30%、40%、50%、 60%、70%、80%设计值

3.2 地面超载的影响

将不同超载情况下,该模型长边中部及端部各控制指标的变化曲线进行对比,结果分别如图7~9所示。



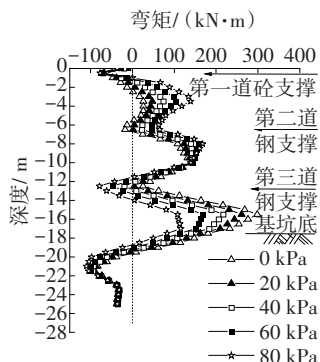
(a) 基坑长边中部



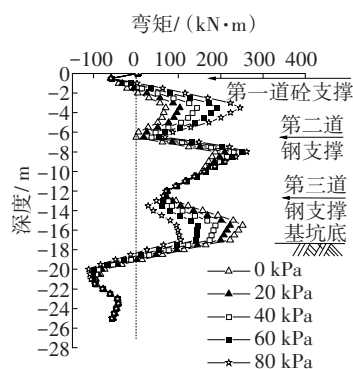
(b) 基坑长边端部

图7 不同超载下围护结构桩体的水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of retaining structure under different surcharge



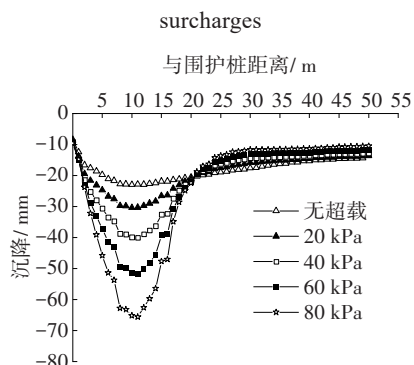
(a) 基坑长边中部



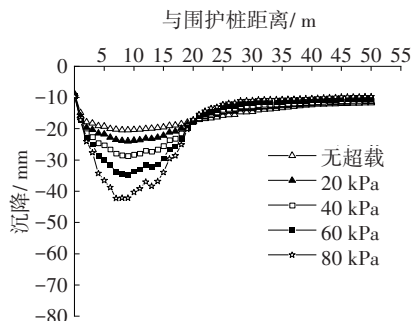
(b) 基坑长边端部

图8 不同超载下围护结构弯矩

Fig. 8 Bending moment of retaining structure under different surcharges



(a) 基坑长边中部



(b) 基坑长边端部

图9 不同超载下周边地表沉降变化情况

Fig. 9 Ground surface settlement under different surcharges

从图7可以看出,基坑周边超载对基坑不同位置的围护结构变形均有较大影响。随着周边超载的增大,基坑开挖面以上的桩体水平位移逐渐增大,桩体最大水平位移的发生位置逐渐上移,支护桩变形曲线逐渐由“凸肚”形转化为前倾形。在支护桩17.5 m深度以下,由于周边土体对围护桩的嵌固作用,支护桩变形较小。基坑端部桩体在不同超载下的水平位移均小于基坑中部的,地面超载的增大将提高空间效应对围护结构变形的限制作用。

对比图8(a)及图8(b)的弯矩,可知:周边超载的变化对基坑中部围护结构弯矩的影响程度大于

其对基坑端部围护结构弯矩的影响程度。

从图9可以看出,随着周边超载的增加,基坑周边施加超载区域(距基坑0~20 m)的地表沉降在不断增加,平均周边超载每增加20 kPa,基坑长边中部、端部的最大沉降点的沉降分别增加约8、4 mm。周边超载的变化对基坑中部的地表沉降影响程度大于基坑端部的。由于基坑端部土体的约束,地表沉降表现出明显的空间效应。

3.3 围护桩桩径的影响

为分析围护桩桩径对基坑空间效应影响,统计在不同桩径下,围护结构桩体水平位移、围护结构弯矩及周边地表沉降的计算结果,其对比曲线分别如图10~12所示。

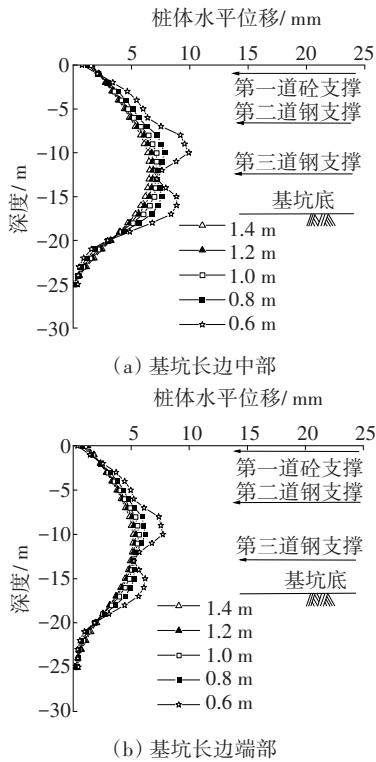
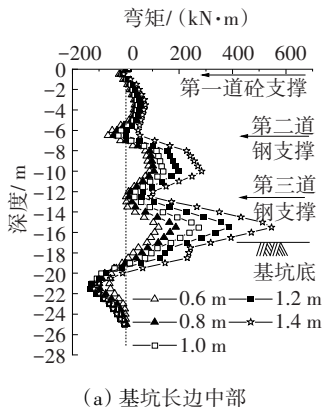
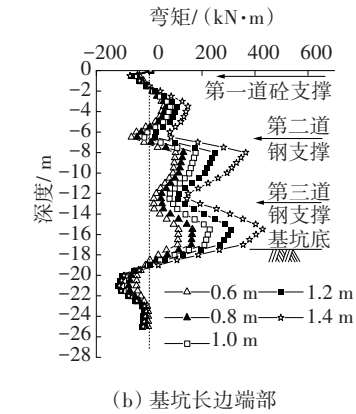


图10 不同桩径的围护结构桩体的水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement of retaining structure under different diameters of the fender pile



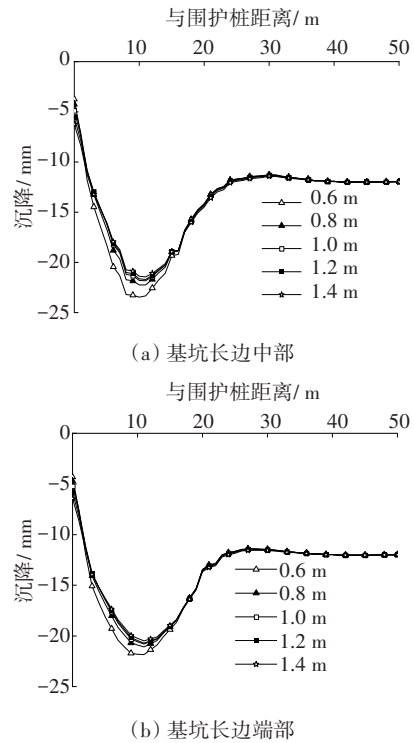
(a) 基坑长边中部



(b) 基坑长边端部

图11 不同桩径的围护结构的弯矩

Fig. 11 Bending moment of retaining structure under different diameters of the fender pile



(b) 基坑长边端部

图12 不同桩径的周边地表沉降变化情况

Fig. 12 Ground surface settlement under different diameters of the fender pile

从图10可看出,随着围护桩桩径的增大,基坑端部及中部的桩体水平位移均逐渐减小,当桩径增大到一定范围后,其对基坑围护结构变形控制的效果逐渐不明显。在不同桩径下,基坑中部及其端部的变形曲线基本一致,表明围护桩桩径的变化对基坑围护结构变形的空间效应影响不大。

从图11可以看出,支护桩桩径的变化对围护结构弯矩影响显著。当围护桩桩径由0.6 m增至1.4 m时,基坑围护结构长边的中部与端部

15.5 m 深度处的弯矩差值分别为 11.8、23.9、45.0、75.8 和 117.8 kN·m。因此,当围护桩的桩径大于 0.8 m 时,桩径对围护结构弯矩的影响较为明显。

从图 12 可看出,围护桩桩径变化对基坑周边地表沉降影响较小。当桩径由 1.4 m 减至 0.6 m 时,基坑中部周边地表沉降最大值减小幅度仅为 8.5%。在不同桩径下,基坑中部及端部最大地表沉降量较近,围护桩桩径的变化对基坑空间效应影响程度较小。

综上所述,围护桩桩径的改变对围护结构弯矩的空间效应影响显著;对周边地表沉降及围护结构水平位移的空间效应影响不大。这是因为桩径变化将直接导致围护结构抗弯刚度的变化,使得围护结构的弯矩随之改变。而围护结构位移、周边地表沉降与支撑刚度及周边土层参数等因素间均有诸多关联,在支撑体系稳定的情况下,桩径对其空间效应影响不突出。

3.4 钢支撑预加力的影响

为分析钢支撑预加力对围护结构的影响,绘制在不同预加轴力下支护桩变形、围护结构弯矩变化及周边地表沉降变化曲线,分别如图 13~15 所示。

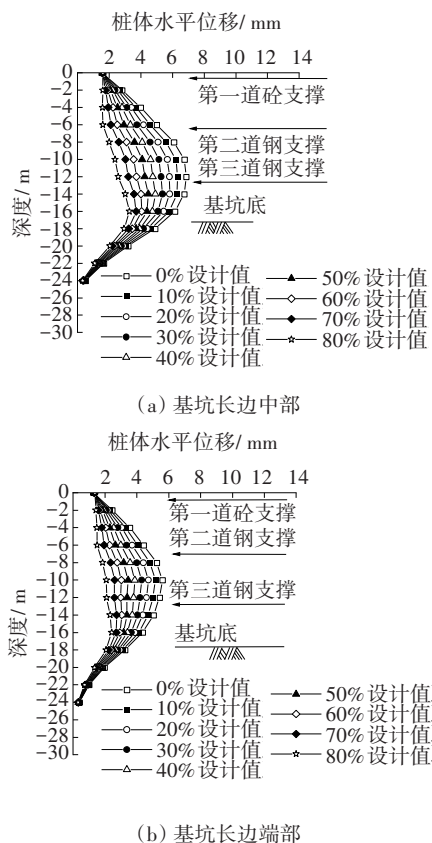


图 13 不同预加力的围护结构桩体的水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement of retaining structure under different pre-axial loads

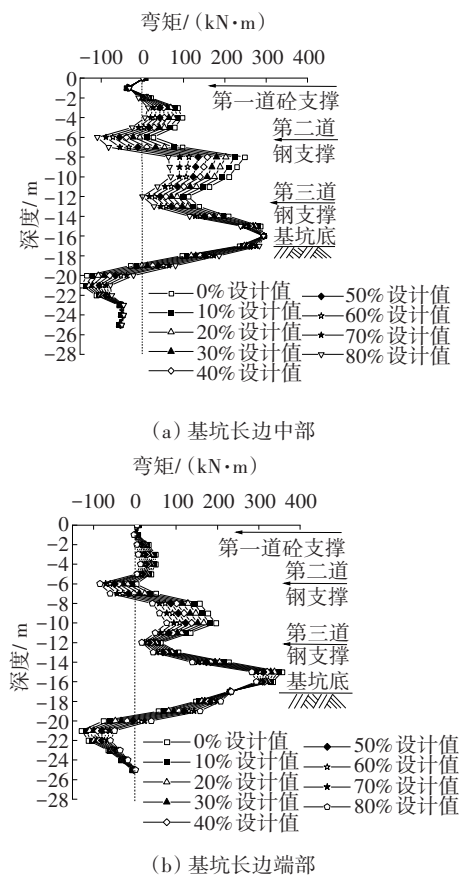


图 14 不同预加力的围护结构的弯矩

Fig. 14 Bending moment of retaining structure under different pre-axial loads

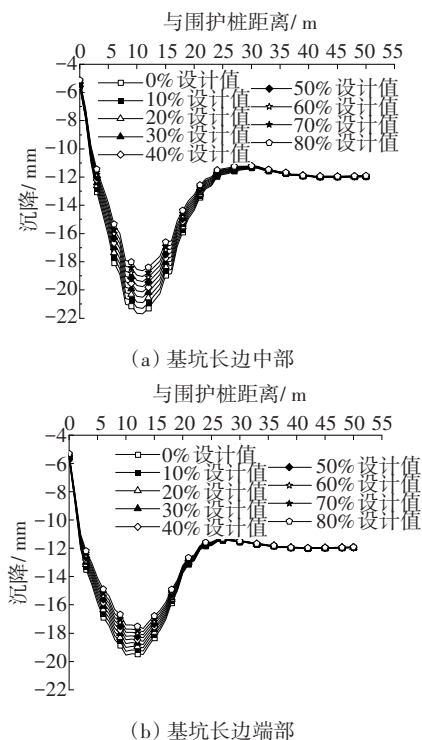


图 15 不同预加力的周边地表沉降变化情况

Fig. 15 Ground surface settlement under different pre-axial loads

从图13可以看出,随着钢支撑预加力的增大,围护桩桩体水平位移逐渐减小,平均每增大10%钢支撑预加轴力,基坑端部及中部桩体水平位移最大值减小约0.4 mm,钢支撑预加力对基坑变形的空间效应影响不显著。

从图14可以看出,两处围护结构弯矩变形趋势相近,随着钢支撑预加轴力的增大,基坑底19 m深度以下,嵌固段围护结构的负弯矩的绝对值逐渐减小,在第一道钢支撑位置的负弯矩的绝对值增大,第二道钢支撑位置的正弯矩减小。在对两个位置的弯矩图进行对比后,可知:当钢支撑预加力由0增加至80%的设计轴力值时,基坑中部、端部围护结构最大正弯矩减小幅度分别为15.8%、4.8%,最大负弯矩绝对值的减小幅度分别为48.1%、39.7%。因此,钢支撑预加力对围护结构弯矩有一定影响,但其对围护结构弯矩的空间效应作用效果不明显。

从图15可以看出,随着钢支撑预加轴力的增大,周边地表沉降逐渐减小,平均每增大10%的设计值预加轴力,基坑端部、中部桩体水平位移最大值减小约为0.39、0.26 mm。这表明钢支撑预加轴力的施加可以减小基坑周边一定范围内的地表沉降,但其对基坑周边地表沉降的空间效应影响效果不明显。

综上所述,钢支撑预加轴力的施加对基坑受力及变形的空间效应影响均不明显,这是该工程因为在现有施工条件下,围护结构及支撑体系已提供较有效的支撑,钢支撑预加轴力对基坑围护结构整体变形与受力影响均不大。

4 结论

本研究以深圳市公常路中山大学深圳校区段下穿改造工程K2+000~K2+120段基坑开挖过程为工程背景,采用Midas GTS有限元软件,对基坑开挖过程进行模拟和计算,通过影响因素分析,得到以下结论:

1) 基坑周边超载对围护桩变形、弯矩及周边地表沉降均有较显著的影响;周边超载的变化,对支护桩变形、桩身弯矩、支撑受力及周边地表沉降的空间效应有明显影响。

2) 围护结构弯矩的空间效应受围护结构桩径

影响显著;桩径对基坑周边地表沉降及围护结构水平位移空间效应的影响不明显。

3) 对于该项目而言,通过调整钢支撑预加轴力值对基坑变形、受力及周边地表沉降的空间效应的影响均不显著。

参考文献(References):

- [1] 付红梅. 基于空间效应长大深基坑变形控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
FU Hongmei. Study on deformation control guideline of large-long-deep foundation pit based on spatial effect [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [2] 程康, 徐日庆, 应宏伟, 等. 杭州软黏土地区某30.2 m深大基坑开挖性状实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 851-863. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0636.
CHENG Kang, XU Riqing, YING Hongwei, et al. Performance analysis of a 30.2 m deep-large excavation in Hangzhou soft clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 851-863. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0636.
- [3] 安辰亮, 冯卫星, 王道远, 等. 车站异形深大基坑施工过程试验研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(1): 13-18.
AN Chenliang, FENG Weixing, WANG Daoyuan, et al. Field test research on the construction process of special-shaped deep and large foundation pit of station [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(1): 13-18.
- [4] 奚家米, 付垒. 基于时空效应的深基坑工程变形规律分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16): 290-297. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.16.046.
XI Jiami, FU Lei. Analysis of deformation law of deep foundation pit based on space-time effect [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(16): 290-297. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.16.046.
- [5] 冯春蕾, 张顶立. 砂卵石地区地铁车站基坑整体变形模式及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊): 4395-4405. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0722.
FENG Chunlei, ZHANG Dingli. The general deformation mode and its application of subway station foundation pit in sandy cobble stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup2): 4395-4405. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0722.

- [6] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 长大深基坑施工空间效应研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1579-1584, 1596. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.05.034.
- LEI Mingfeng, PENG Limin, SHI Chenghua, et al. Research on construction spatial effects in large-long-deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (5) : 1579-1584, 1596. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.05.034.
- [7] 王洪新. 考虑二维和三维尺寸效应的基坑抗隆起稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2144-2152.
- WANG Hongxin. Safety factor of heave-resistant stability considering two-and three-dimensional size effects of foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2144-2152.
- [8] 李大鹏, 唐德高, 闫凤国, 等. 深基坑空间效应机理及考虑其影响的土应力研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(9): 1632-1639, 1720. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.09.013.
- LI Dapeng, TANG Degao, YAN Fengguo, et al. Mechanics of deep excavation's spatial effect and soil pressure calculation method considering its influence[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48 (9) : 1632-1639, 1720. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.09.013.
- [9] 李佳宇, 陈晨. 坑角效应对基坑周围建筑物沉降变形影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2238-2246.
- LI Jiayu, CHEN Chen. Response of settlement and displacement of adjacent buildings of excavations to corner effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2238-2246.
- [10] LEE F H, YONG K Y, QUAN K C N, et al. Effect of corners in strutted excavations: field monitoring and case histories [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124 (4) : 339-349.
- [11] 唐鹏. 紧邻既有地铁高架桥梁深基坑施工开挖方案研究[J]. 公路与汽运, 2020(2): 136-140, 166. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.02.033.
- TANG Peng. Study on excavation scheme of deep foundation pit adjacent to existing subway elevated bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (2) : 136-140, 166. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-2668.2020.02.033.
- [12] 杨丽春, 庞宇斌, 李慎刚. 超长基坑开挖的空间效应[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(2): 541-545. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201502202.
- YANG Lichun, PANG Yubin, LI Shengang. Research on construction spatial effects in long foundation pit [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45 (2) : 541-545. DOI: 10.13278/j. cnki. jjuese.201502202.
- [13] 吴志敏, 屠毓敏. 土钉基坑支护的空间效应研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2178-2182. DOI: 10.16285/j.rsm.2007.10.017.
- WU Zhimin, TU Yumin. Space effect of soil-nailing excavation protection [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (10) : 2178-2182. DOI: 10.16285/j.rsm.2007.10.017.
- [14] 俞晓, 宋雷. 空间效应下不规则深基坑的支护体系变形分析[J]. 武汉科技大学学报, 2020, 43(5): 384-389. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3644.2020.05.010.
- YU Xiao, SONG Lei. Support deformation of irregularly shaped deep foundation pit under spatial effect [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2020, 43 (5) : 384-389. DOI: 10.3969/j. issn. 1674-3644.2020.05.010.
- [15] 刘念武, 龚晓南, 俞峰, 等. 内支撑结构基坑的空间效应及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2293-2298, 2306. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.08.040.
- LIU Nianwu, GONG Xiaonan, YU Feng, et al. Analysis of spatial effects in strutted excavation and related influential factors [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (8) : 2293-2298, 2306. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.08.040.
- [16] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑工程的空间性状分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 21-25. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.1999.01.006.
- YU Jianlin, GONG Xiaonan. Spatial behavior analysis of deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 21-25. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.1999.01.006.
- [17] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (1) : 30-36. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2007)133: 1(30).
- [18] OU C Y, SHIAU B Y, WANG I W. Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise

- Center (TNEC) excavation case history [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37 (2): 438-448. DOI: 10.1139/t00-018.
- [19] 洪源, 彭正坤, 任晨灏, 等. 非等桩径荤素桩组合咬合桩受力计算模型研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37 (1): 75-81. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.011.
- HONG Yuan, PENG Zhengkun, REN Chenhao, et al. Research on the force calculation model of the bored occluding pile composed of unequal diameter reinforced concrete piles and plain piles [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37 (1): 75-81. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.011.
- (责任编辑:李脉;校对:欧兆虎;英文编辑:郭一鹏)

(上接第61页)

- Physical Chemistry C, 2007, 111 (48): 17865-17871. DOI: 10.1021/jp071329a.
- [22] 郑国栋, 张清杰, 邓火英, 等. 不同官能化碳纳米管对MWCNTs-碳纤维/环氧树脂复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32 (3): 640-648. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20150601.001.
- ZHENG Guodong, ZHANG Qingjie, DENG Huoying, et al. Effect of different functionalized carbon nanotubes on mechanical properties of MWCNTs-carbon fiber/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32 (3): 640-648. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20150601.001.
- [23] 赵晨辉, 张广成, 张悦周. 真空辅助树脂注射成型(VARI)研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(1): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2009.01.021.
- ZHAO Chenhui, ZHANG Guangcheng, ZHANG Yuezhou. The development of vacuum assisted resin infusion (VARI) [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(1): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2009.01.021.
- (责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:杜雪明)