

文章编号: 1005-0523(2024)03-0020-09



地铁车站狭长基坑支撑异常轴力分析

刘利国¹, 罗家文^{2,3}, 朱碧堂^{2,3}

(1. 中铁四局集团有限公司, 安徽 合肥 230023; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013;
3. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】研究地铁车站狭长型基坑施工过程中第一道支撑轴力过大的问题。【方法】通过土体小应变刚度硬化模型(HSS)有限元分析,对车站基坑土方的开挖方式、钢支撑安装质量差、钢支撑未及时受力等情况进行精细化模拟,分析其对第一道支撑轴力的影响。【结果】结果表明:采用盆式开挖对第一道支撑的轴力影响显著,相较分层开挖的情况增大45%,应及时安装对应位置的钢支撑;安装钢支撑的预应力未达到设计值时,会导致开挖到底时的顶层支撑轴力增大,增大幅度在10%以内,底层支撑轴力减小。【结论】在地铁车站狭长基坑开挖过程中应限制盆式超挖;温度变化对支撑轴力的影响不能忽视;安装下层钢支撑预应力达不到设计值时,会导致开挖到底时的顶部支撑轴力偏大。

关键词: 狭长型基坑; 支撑轴力; 土体小应变硬化模型; 盆式开挖

中图分类号: U231.4; TU52

文献标志码: A

本文引用格式: 刘利国, 罗家文, 朱碧堂. 地铁车站狭长基坑支撑异常轴力分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(3): 20-28.

Analysis of Abnormal Strut Axial Forces for Narrow and Long Deep Excavation of Metro Stations

Liu Ligu¹, Luo Jiawen^{2,3}, Zhu Bitang^{2,3}

(1. China Railway No.4 Group Co., Ltd., Hefei 230023, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Engineering R&D Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】The purpose of this paper is to address the issue of excessive axial force in the first support of a narrow and long deep excavation of metro stations during construction. 【Method】Through the method of finite element analysis using the hardening soil model with small strain stiffness (HSS), the excavation method of the station pit, poor quality of steel support installation, and the untimely stressing of the steel support are simulated in a refined way to analyze the influence on the axial force of the first support. 【Result】The results show that the use of basin excavation has a significant effect on the axial force of the first support, which increases by 45% compared with the case of layered excavation, and the corresponding position of the steel support should be installed in time; when the prestress of the installed steel support does not reach the design value, it will lead to an increase in the axial force of the top support at the end of the excavation, with an increase of 10% or less, and a decrease in the axial force of the bottom support. 【Conclusion】Basin over-excavation should be strictly limited during excavation of narrow and long deep excavation of metro stations; The effect of tempera-

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208343, 52020105003)

ture changes on support axial forces cannot be ignored; when the prestressing force of the installed lower steel support fails to reach the design value, it will lead to a large axial force of the top support at the bottom of excavation.

Key words: narrow and long deep excavation; strut axial force; hardening soil model with small strain stiffness; basin excavation method

Citation format: LIU L G, LUO J W, ZHU B T. Analysis of abnormal strut axial forces for narrow and long deep excavations of metro stations[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 20–28.

【研究意义】近年来为了满足工程需要,地铁车站基坑工程的规模呈现向“深、大、长”发展的态势^[1-2]。地铁基坑为满足地铁车辆编组的停靠和乘客上下换乘效率的要求,一般长度大于200 m、宽约20 m,开挖深度17~26 m,属于狭长型基坑,长边效应和坑角效应明显^[3],周围环境复杂,既有建筑构筑物易受到基坑开挖引起的土体应力释放影响,已成为目前地铁施工的突出问题^[4]。为此保证支护结构的安全稳定和降低施工对周围环境的影响,控制施工过程中支护结构的内力和变形^[5-6]具有重要的研究意义。

【研究进展】内支撑是基坑支护结构的重要组成部分,主要分为混凝土支撑和钢支撑两种。对于上覆土层不高,地下二层岛式地铁车站,通常选用混凝土支撑作为第一道支撑,下部支撑采用钢支撑的支护形式^[7-8],进而充分利用了混凝土支撑强度高、承载力强和钢支撑拆装速度快等优势。但受到地铁施工环境的复杂性等多方面因素的影响,支撑轴力的实测值和设计值会出现一定的差异现象^[9]。对于支撑轴力异常的现象,国内外学者进行了多方面的分析。肖振焯等^[10]通过轴力监测分析并结合CEB90模型提出一套轴力修正方法,提出非荷载因素对轴力监测有很大影响。熊栋栋等^[11]通过对比钢支撑安装时和千斤顶卸力后实测钢支撑轴力,发现钢支撑安装时受到安装偏差、偏心等原因无法达到设计预应力值。曹雪山等^[12]通过有限元分析提出钢支撑预加轴力与地连墙水平位移最大值呈负相关。Blackburn等^[13]指出由温度变化引起的轴力可达支撑轴力的40%,在特殊条件下温度对支撑轴力的影响不能忽略。金亚兵等^[14]采用弹性抗力法对支撑轴力的温度变化进行计算,得出支撑轴力的变化率为232.14 kN/℃,表明支撑轴力受到温度的影响较大。徐昭辰等^[15]结合某基坑工程中混凝土支撑轴力监测值预警的情况指出,混凝土徐变、收

缩和弹性模量会影响混凝土支撑轴力大小,其中混凝土徐变最为显著。雷亚伟等^[16]指出,由于存在土拱效应,基坑局部超挖会对临近超挖区的支护结构内力产生较大影响。目前国内外学者对支撑轴力的研究主要集中于支撑本身的物理特性,并取得一定的进展,但现有研究对现场施工环境对支撑轴力的影响考虑较少。

【创新特色】为明确施工现场土方开挖的实际情况和钢支撑的受力状态对支撑轴力的影响,本文采用有限元计算软件,考虑基坑施工过程中出现的盆式超挖、钢支撑安装预应力过小和钢支撑起部分支撑作用等因素,对基坑开挖过程中出现的顶部支撑轴力过大的情况进行假设与分析。

【关键问题】针对开挖过程中支撑轴力过大的现象,本文基于南昌某地铁基坑的实际施工情况,通过有限元计算软件(PLAXIS 2D/3D)模拟和分析基坑施工过程中出现的工况对支撑轴力的影响情况,判断出现轴力过大的原因,为相关工况及研究提供参考。

1 工程概况

车站为地下二层岛式站台车站,采用明挖顺筑法施工。明挖基坑长度为285 m,标准段宽度为22.7 m,基坑深度约17.8 m,插入比0.7。明挖围护结构采用地下连续墙+内支撑的支护形式,其中第一道为混凝土支撑,截面尺寸为800 mm×1 000 mm,第二、三道为钢支撑,截面尺寸为800 mm×20 mm。地下连续墙厚度为800 mm,平均嵌固深度约1 m。车站场地附近的无地表水体,稳定水位埋深为8.4~11.3 m。车站标准段围护结构及土层分布情况和参数如图1所示,由上至下的土层依次为素填土、粉质黏土、细砂、中砂、粗砂、砾砂、圆砾。车站位于昌东赣江冲积平原内,地层主要为上部的黏性土层和下部的富水砂层,为典型的二元地质富水砂层结构,

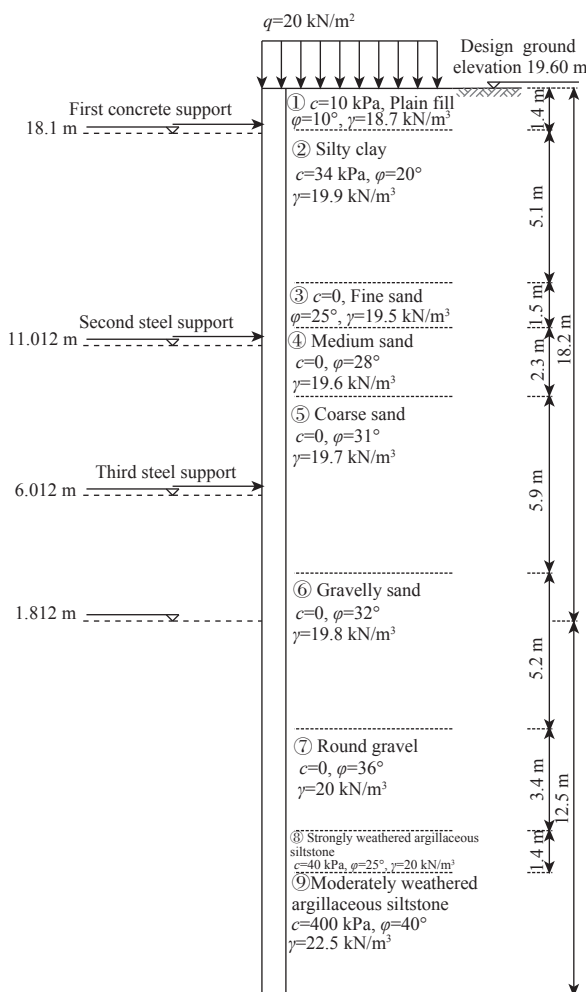


图1 标准段基坑横剖面图

Fig. 1 Standard cross-section of excavations

参照地质水文条件,将其分类为Ⅰ类地层。

基坑各项参数的监测是确保基坑稳定性和安全性的重要手段,结合相应规范和周边环境风险等级,本车站基坑自身风险等级为二级,监测等级为二级^[17]。在日常监测中,出现部分第一道混凝土支撑轴力监测出现异常的情况,其轴力大小和现场施工情况如图2所示,基坑施工方向由图中右侧向左侧进行,A~F区代表不同的施工进度,分别对应:中板施工完成、中板钢筋绑扎、基坑开挖到底、基坑开

挖9~14 m、基坑开挖3~9 m、基坑土方未开挖。其中点1-1至点15-1为混凝土支撑轴力监测点和某天轴力监测的大小,F区未开挖故未对点1-1至点4-1的轴力大小进行统计。

混凝土支撑轴力出现异常的监测点位主要集中在基坑右侧基坑开挖到底的区域,考虑到A区和B区的第三层钢支撑已拆除,选取位于C区基坑开挖到底时的9-1和10-1混凝土轴力监测点位作分析计算。

2 有限元模型建立

采用PLAXIS有限元软件对现场基坑开挖中出现的情况进行模拟,选取C区的基坑标准段进行建模计算。基坑断面有限元模型如图3所示,模型长宽高为50 m×150 m×70 m,地表标高取零,地下连续墙选择板单元,混凝土支撑和钢支撑选取点对点锚杆单元,结构与土体接触选择界面单元,模型侧面设置法向约束,顶面自由,底面为完全固定约束。在开挖过程中的降水使用稳态地下水渗流模拟,关闭 $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 方向地下水渗流计算的模型条件。

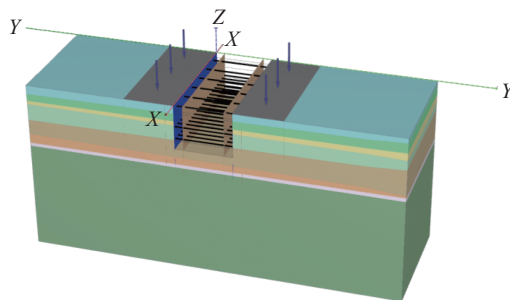


图3 基坑断面有限元模型

Fig. 3 Finite element model of excavations cross-section

研究表明,土体小应变刚度硬化模型(HSS)较好的反映了土体刚度的变化规律^[18],模拟基坑开挖时的变形规律^[19-22]与实际相近,但不同地区的土层参数相差较大。针对HSS模型参数的选取,王凌等^[23]提出的取值方法能够很好的模拟南昌河流阶地内基坑开挖情况,采用表1所示的取值方法对土体小应变模型的参数进行选取,其中砂土变形模量

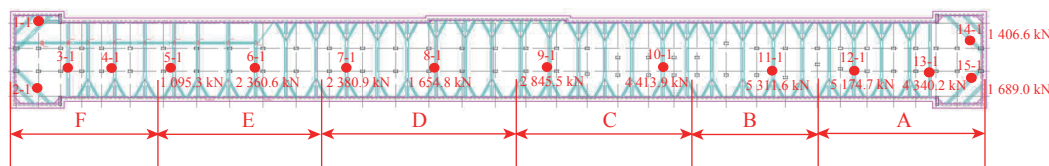


图2 基坑混凝土支撑轴力监测点分布与轴力大小

Fig. 2 Distribution of axial force monitoring points and axial force of concrete support in excavations

表1 HSS模型参数取值方法
Tab.1 Methods for parameterization of HSS model

Model parameter	Physical meaning	Parameter value methods
Stiffness-related parameters		
E_{50}^{ref}	consist of the reference secant modulus value	$E_{50}^{\text{ref}} = 1.5 \text{ N}$
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	Loading-unloading modulus value	$E_{50}^{\text{ref}} : E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 1:1$
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	Reference tangent modulus value	$E_{50}^{\text{ref}} : E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 1:3$
Strength-related parameters		
c'	encompass the effective cohesion	c' and ϕ' reference to the geological exploration report
ϕ'	Effective internal friction angle	
ψ	Dilation angle	$\phi' - 30^\circ$
K_0	Initial static lateral pressure coefficient	$1 - \sin \phi'$
p^{ref}	Reference stress	100 kPa
ν_{ur}	Loading-unloading Poisson's ratio	0.2
R_f	Failure ratio	0.7
m	Power exponent of stiffness-stress level correlation	0.5
Small strain parameters include the initial dynamic shear modulus value		
G_0^{ref}		$G_0^{\text{ref}} = \rho V_s^2$
Shear strain corresponding to the initial dynamic shear modulus at 70% strain		
$\gamma_{0.7}$		$(1 \sim 4) \times 10^{-4}$

E_{50}^{ref} 取 1.5 倍的标准贯入击数,黏土取对应 $E_{s1.2}$ 大小^[24], $\gamma_{0.7}$ 砂土取小值,黏性土取大值。土体初始剪切模量 G_0^{ref} 采用式(1)计算

$$G_0^{\text{ref}} = \rho V_s^2 \tag{1}$$

式中: ρ 为土体密度; V_s 为土体剪切波速。表2为土体HSS模型参数的取值大小。

为验证模型参数选取的准确性,选取混凝土支撑轴力在正常情况下的监测点 9-1 所在断面进行计

表2 土体模型参数
Tab.2 Soil model parameter

Soil layer	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$	$G_0^{\text{ref}} / \text{MPa}$
① Plain fill	11.25	11.25	33.75	1×10^{-4}	45.48
② Silty clay	7.93	7.93	23.79	4×10^{-4}	74.78
③ Fine sand	18.00	18.00	54.00	1×10^{-4}	60.05
④ Medium sand	20.97	20.97	62.91	1×10^{-4}	142.90
⑤ Coarse sand	21.05	21.05	63.15	1×10^{-4}	153.70
⑥ Gravelly sand	33.00	33.00	99.00	1×10^{-4}	199.90
⑦ Round gravel	56.00	56.00	168.00	1×10^{-4}	303.20

算,对应围护结构侧向变形监测点 ZQT12 和 ZQT13。由于前期施工时北侧为出土处,将开挖的土方集中在北侧基坑内,导致出现墙顶向基坑外位移的情况,开挖情况如图4所示,故对应有有限元计算中的土方开挖如图5所示。



图4 开挖6 m时现场工况
Fig. 4 Site conditions at 6 m of excavation

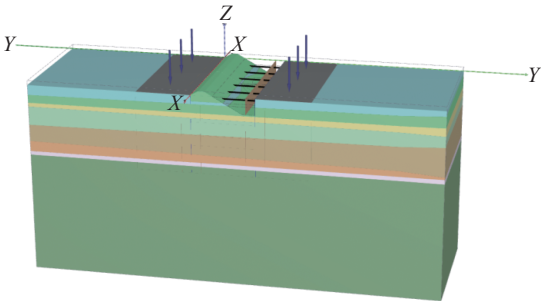


图5 开挖6 m时有限元工况
Fig. 5 Finite element conditions for excavation at 6 m depth

图6为基坑开挖到底时地下连续墙的侧向变形实测与模拟对比图。实测 ZQT13 最大变形为 18.35 mm,深度-15.0 m,采用土体小应变刚度硬化模型(HSS)有限元模拟的最大变形为 18.60 mm,深度为-14.8 m,两者的最大变形相近且对应的深度相近,误差在 5%以内,两者的地连墙横向位移变形曲线形状相同,均为内凸型。而对于 ZQT12 实测值与模拟值变形曲线大致相同,均出现在深度为 0 时变形向基坑外的情况,两者地连墙最大变形分别为 16.67 mm 和 16.22 mm,对应深度为-16.0 m 和-15.4 m。通过模拟值和实际变形量的对比,验证

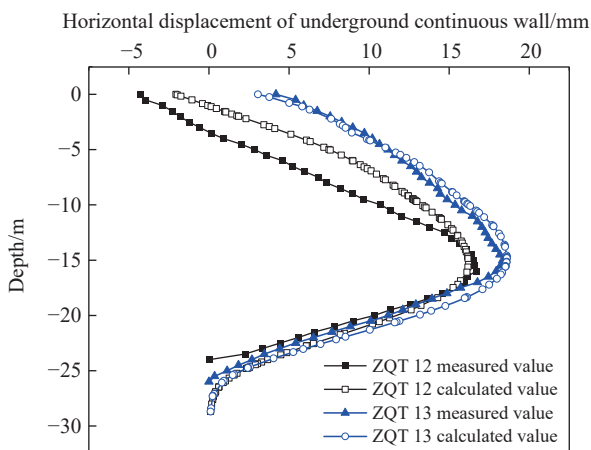


图6 地下连续墙横向变形实测值与模拟值对比
Fig. 6 Comparison of measured and simulated lateral deformation of diaphragm walls

了本次模型参数的准确性,后续的不同施工情况可使用相同的参数进行计算。

3 计算结果分析

3.1 钢支撑预应力安装未达标准值

结合现场工况,在架设钢支撑预加轴力使用的液压千斤顶,没有将钢支撑施加到预定的预加轴力大小,安装后钢支撑的预加轴力仅能达到设计要求的60%。

针对这种情况,在有限元计算中改变架设钢支撑时施加预应力的值,计算开挖到底时每道支撑的轴力大小。如图7所示当没有对钢支撑施加预应力时,混凝土支撑的轴力相对于正常情况施加1 200 kN预应力时高出14%。当预加轴力达

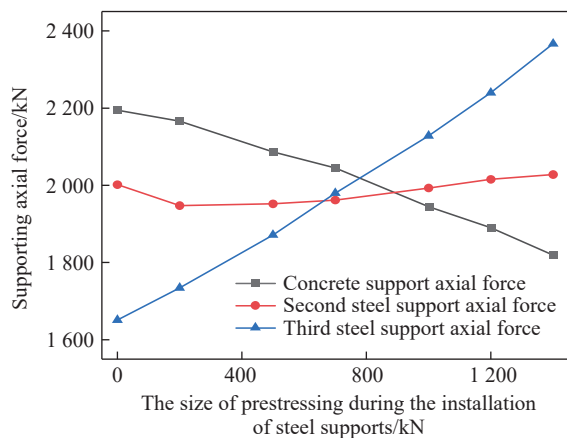


图7 不同钢支撑安装的预应力时的支撑轴力
Fig. 7 The axial force of the support when prestressed with different steel supports is installed

到设计值40%时,混凝土支撑的轴力在开挖到底时高出正常情况10.3%。

混凝土支撑的轴力与钢支撑的预加轴力呈反比,但预加轴力过大时会导致下部支撑轴力过大。施加的钢支撑预应力达不到设计值时,会对混凝土支撑的轴力产生一定影响。相反,当混凝土支撑轴力过大时,可以提高下方钢支撑安装时的预加轴力,能一定程度减小混凝土支撑的轴力。

3.2 钢支撑发挥部分作用

在监测过程中,存在钢支撑的轴力在某个定值下稳定的情况。考虑可能出现钢支撑与地连墙连接质量差,引起钢支撑无法及时受力。针对该情况,在有限元模拟中使第二道钢支撑的轴力为一定值,即开挖过程中该支撑的轴力不变,计算其他支撑的轴力变化情况。

计算结果如图8,可以看出当第二道钢支撑轴力发挥部分作用时,对混凝土支撑轴力影响较大,混凝土支撑承担了更多开挖土方引起的轴力。结合现场工况当钢支撑轴力在1 200.0 kN时,对应的混凝土支撑轴力为3 214.9 kN,相较于正常的开挖情况更大。与实际监测的混凝土轴力4 413.9 kN情况不符合。钢支撑发挥部分作用是导致混凝土轴力增大的影响因素之一。

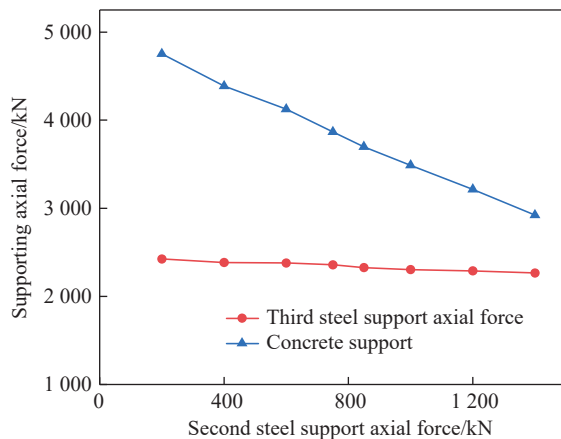


图8 第二道钢支撑仅能承担部分力时的支撑轴力
Fig. 8 The second steel support bears only part of the supporting axial force when the resultant force is partial

3.3 温度导致的支撑轴力大小波动

温度变化对支撑轴力大小的影响较为明显,《建筑基坑支护技术规程》(JG J120—2012)要求在支护结构设计中考虑温度应力的变化。表3为同一天内不同的室温条件下测量的支撑轴力大小,此时

现场基坑施工条件基本不变,可以视为支撑轴力仅受温度变化影响。可以看出,在室温为 17 ℃时测量的轴力相较于室温为 20 ℃时测量的轴力小,单位温度下的混凝土支撑轴力平均变化量为 149.1 kN。轴力最大变化发生在监测点 11-1,增大 542.5 kN,相较于室温为 17 ℃时增大了 8.5%。

为计算温度对支撑轴力的影响,假定支护结构和土之间相互作用且变形协调,采用文献[16]提出的计算方法,选择混凝土轴力监测点 10-1 处的断面进行计算。通过并联弹簧分析模型,计算得到 3 道支撑在温度提升 1 ℃时的轴力增量分别为： $N_i(1)=98.09\text{ kN}$ ， $N_i(2)=54.83\text{ kN}$ ， $N_i(3)=63.6\text{ kN}$ ，计算结果基本相近,理论计算的支撑轴力小于实测值的 12%左右,主要是因为温度的统计是基于整个区域的天气预报,与实际的温度存在一定的偏差,导致存在一定误差。基于实测轴力变化量和计算轴力变化量,可见当温度出现 10 ℃以上的变化时,会导致支撑轴力出现较大的波动情况,温度对支撑的影响不能忽视。

表3 不同温度下实测混凝土支撑轴力大小
Tab.3 The axial force of concrete supports measured at different temperatures

Concrete support monitoring points	Measured axial force of atmospheric temperature 17 ℃/kN	Measured axial force of atmospheric temperature 21 ℃/kN	Axial force variation /kN	Unit temperature axial force variation/(kN/℃)
5-1	1 095.3	1 456.9	361.6	90.4
6-1	2 360.6	2 676.3	315.6	78.9
7-1	2 380.9	2 872.7	491.7	122.9
8-1	1 654.8	2 136.6	481.8	120.4
9-1	2 845.5	4 280.7	380.6	95.1
10-1	4 413.9	4 864.8	450.9	112.7
11-1	5 311.6	5 854.1	542.5	135.6
12-1	5 174.7	5 646.7	472.0	118.0
13-1	4 340.2	4 774.8	434.6	108.6
14-1	1 406.6	2 125.9	490.8	122.7
15-1	1 689.0	2 184.2	495.1	123.7
Average value				111.75

3.4 基坑预留土对支撑轴力的影响

预留土是基坑支护的一种手段,采用合理的预留土坡可以起到较好的临时支护作用,通常适用于大型基坑中,对狭长型基坑支护效果的研究较少。图9为施工现场某日的开挖情况,现场采用分层分步开挖施工,并选择使用预留土作为临时支护。由



图9 现场土方开挖施工图
Fig. 9 On-site earthwork excavation construction drawing

于现场土方开挖和钢支撑安装的队伍分属不同的单位,存在未及时安装钢支撑而向下开挖土方的情况,仅在钢支撑支座处留有 1 m 左右的土坡顶宽度方便钢支撑安装。本文将该种施工情况简称为盆式超挖,对该情况进行分析。

现场的土方开挖情况大致可以分为以下 4 种,对应图 10 中的②③④⑤。工况 2 预留土顶部宽度、底部宽度和高度分别为 0,7.0,3.5 m,预留土底部对应第二道钢支撑安装处,开挖深度为 9 m。工况 3 预留土顶部宽度、底部宽度和高度分别为 1,10,6 m,预留土顶部深度对应第二道钢支撑安装对应深度-8.9 m,底部开挖深度为-14.9 m,保留 1 m 宽度方便现场施工人员安装第二道钢支撑。工况 4 为工况 3 安装钢支撑后,将两侧预留土体开挖至第三道钢支撑处,预留土底部开挖深度仍为-17 m,预留土

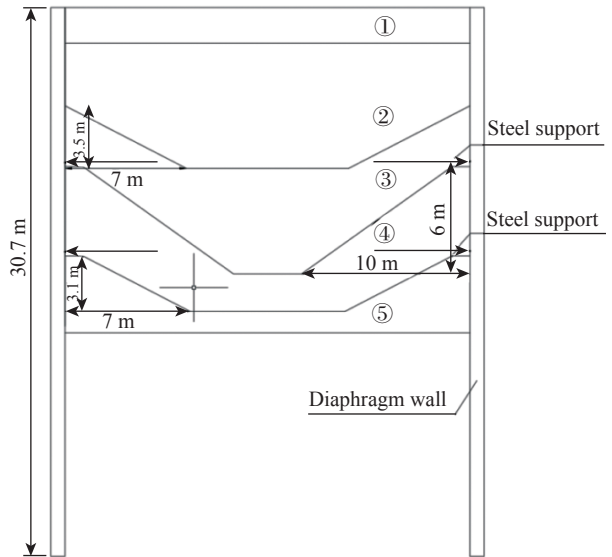


图10 开挖工况
Fig. 10 Excavation condition

顶部宽度、底部宽度和高度分别为1.0, 7.0, 3.1 m。工况5为安装第三道钢支撑后向下开挖到基坑底面-18.2 m。

结合以上工况在有限元分析中建立相应的计算模型如图11所示,并考虑现场钢支撑预加轴力达不到标准值的情况,比较不同的开挖方式对第一道支撑轴力的影响。混凝土支撑轴力的变化情况如图12所示,采用盆式超挖的混凝土支撑轴力随开挖深度的增大而增大,在开挖到底时,混凝土支撑轴力达到最大值3 645.0 kN,而采用正常的分层开挖时的混凝土支撑轴力为1 828.4 kN。对比实测数据较为接近,存在一定的偏差,但现场基坑监测点在工况2时测定的混凝土支撑轴力为3 321.8 kN,相应的盆式超挖的轴力大小为3 167.8 kN,也较为接近于实际情况。可见盆式超挖对第一道支撑轴力产生较大的影响。

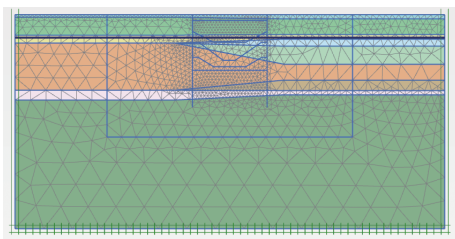


图11 盆式超挖计算模型

Fig. 11 Calculation model of basin excavation method

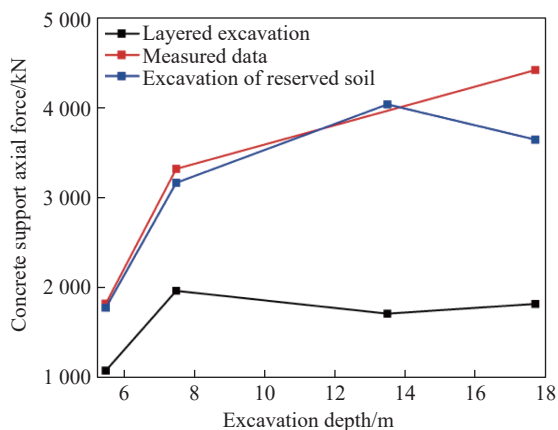


图12 混凝土支撑轴力大小

Fig. 12 Magnitude of axial force in concrete support

4 结论

对于顶部支撑轴力异常的情况,采用有限元数值分析和理论公式计算,对现场实际的施工情况进

行了研究,得出以下结论:

1) 在基坑开挖时采用盆式超挖会引起顶部支撑轴力过大的情况,应对盆式超挖进行限制。

2) 安装下层钢支撑时的预应力大小同顶部支撑轴力呈负相关,当顶部支撑轴力过大时,可适当提高下部钢支撑安装时的预加轴力。

3) 当钢支撑与地连墙连接质量差引起钢支撑无法及时受力时会引起邻近支撑轴力增大的情况。

4) 出现10℃以上的温度变化时应密切关注支撑的受力状态,做好防护措施。

参考文献:

- [1] 尹利洁, 李宇杰, 朱彦鹏, 等. 兰州地铁雁园路站基坑支护监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 111-116.
YIN L J, LI Y J, ZHU Y P, et al. Monitoring and numerical simulation of support for foundation pit at Yanyuan road station of Lanzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 111-116.
- [2] ZHANG Y, YI L, ZHANG L, et al. Causation identification and control measures of deformation by integrated dewatering-excitation process simulation of a t-shaped deep foundation pit[J]. Water, 2022, 14(4): 535.
- [3] 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 J Y, CHEN C. Response of settlement and displacement of adjacent buildings of excavations to corner effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2238-2246.
- [4] 李福林. 软土地区狭长型深基坑开挖引起深层土体变形分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 121-127.
LI F L. Analysis on the deep soil deformation induced by construction of narrow long excavation pit in soft ground area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6): 121-127.
- [5] 秦会来, 黄俊, 李奇志, 等. 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 23-26.
QIN H L, HUANG J, LI Q Z, et al. Influencing factors for deformation of deep foundation pits in thick mud stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 23-26.
- [6] 张浩, 吴志鸿, 张峰, 等. 深基坑混凝土支撑轴力精确性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1): 342-348.
ZHANG H, WU Z H, ZHANG F, et al. Accuracy analysis

- on axial force of concrete support in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 342-348.
- [7] 冯超元, 张勇. 佛山软土地区狭长型基坑长边效应研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 106-110.
FENG C Y, ZHANG Y. Long side effect in long and narrow foundation pit of soft soil area in Foshan[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2018, 35(7): 106-110.
- [8] 张坤勇, 张梦, 孙斌, 等. 考虑时空效应的软土狭长型深基坑地连墙变形计算方法[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2389-2399.
ZHANG K Y, ZHANG M, SUN B, et al. A calculation method for deformation of diaphragm wall of narrow deep foundation pit in soft soil considering spatio-temporal effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 2389-2399.
- [9] 张哲. 基坑混凝土支撑轴力监测数据异常情况分析与探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36(8): 976-981.
ZHANG Z. Analysis and discussion of monitoring data anomaly of axial force for concrete support of foundation pit[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(8): 976-981.
- [10] 肖振烨, 李素贞, 崔晓强. 基于应变监测的基坑钢筋混凝土支撑轴力修正方法[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(11): 8-18.
XIAO Z Y, LI S Z, CUI X Q, et al. Study on force correction method of reinforced concrete brace shaft in foundation ditch based on strain monitoring[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(11): 8-18.
- [11] 熊栋栋, 杨钊, 廖正根. 地铁深基坑钢支撑预加轴力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1049-1055.
XIONG D D, YANG Z, LIAO Z G. Analysis on pre axial force of steel support in deep foundation pit of subway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 1049-1055.
- [12] 曹雪山, 额力素, 曹怀玉. 深基坑钢支撑预加力对围护墙变形影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(3): 33-39.
CAO X S, E L S, CAO H Y. Influence of Inner steel strut prestress on the retaining wall deformation of deep excavation[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, 37(3): 33-39.
- [13] BLACKBURN J T, FINNO R J. Three-dimensional responses observed in an internally braced excavation in soft clay[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2016, 133(11): 1364-1373.
- [14] 金亚兵, 沈翔, 劳丽燕. 温度变化对深基坑内支撑轴力和变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1417-1425.
JIN Y B, SHEN X, LAO L Y. Variation of axial force of steel struts in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1417-1425.
- [15] 徐昭辰, 王强, 章定文, 等. 基坑混凝土支撑轴力监测值修正方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6): 48-54.
XU Z Z, WANG Q, ZHANG D W, et al. Correction method of axial force monitoring value of concrete strut in excavation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 48-54.
- [16] 雷亚伟, 郑刚, 程雪松, 等. 局部超挖对悬臂排桩基坑支护体系安全性能的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 70-78.
LEI Y W, ZHENG G, CHENG X S, et al. Influence of partial over-excavation on safety performance of excavation retained by cantilever contiguous retaining piles[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2020, 37(9): 70-78.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
MINISTRY OF HOUSING AND URBAN-RURAL DEVELOPMENT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Technical specification for urban rail transit engineering monitoring: GB 50911-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [18] LIAO S M, WEI S F, SHEN S L. Structural responses of existing metro stations to adjacent deep excavations in Suzhou, China[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016: 04015089.
- [19] 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. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258-264.
- [20] YANG J, X. Q. G U. Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on grain size[J]. Géotechnique, 2013, 63(2): 165-179.
- [21] 管飞. 基于HSS本构模型的软土超大型深基坑3D数值

- 分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 177-180.
- GUAN F. 3D numerical analysis for a ultra-large deep excavation in soft clay based on HSS constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 177-180.
- [22] 张骁, 肖军华, 农兴中, 等. 基于HS-Small模型的基坑近接桥桩开挖变形影响区研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 263-273.
- ZHANG X, XIAO J H, NONG X Z, et al. Analysis of influenced zone of foundation pit excavation adjacent to bridge pile foundation using HS-Small constitutive model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 263-273.
- [23] 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, 38(3): 31-40.
- [24] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-Small模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.
- WANG W D, WANG H R, XU Z H. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excava-

tions in Shanghai area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1766-1774.



第一作者: 刘利国(1989—), 男, 工程师, 研究方向为地铁车站及隧道方面施工。E-mail: 429657119@qq.com。



通信作者: 朱碧堂(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为地下空间技术开发。E-mail: btangzh@hotmail.com。

(责任编辑: 李根)