

紧邻既有车站和钢便桥的超大异形基坑施工方案优化

陈登伟

(中铁南方投资集团有限公司,广东 深圳 518060)

摘要:随着中国城市地下空间开发密度不断增加,超大基坑施工对紧邻结构正常运营的影响不容忽视。该文依托深圳黄木岗综合交通枢纽工程,研究了超大异形基坑开挖引起围护结构和土体变形,以及紧邻既有车站变形和钢便桥的结构响应,并对该异形基坑开挖施工方案进行优化。结果表明:基坑南北侧围护结构的变形趋势整体一致,但北侧阳角处变形量较大;既有车站围护结构整体发生向坑内位移,最大水平位移达9.4 mm;基坑开挖后钢箱梁桥桩的水平位移较大,最大值达到10.5 mm。通过在负一层加设临时混凝土支撑和坑内钢便桥桥墩上增设钢套筒,保证了整体施工安全。

关键词:超大异形基坑;基坑开挖;紧邻结构;数值计算;变形分析

中图分类号:U416

文献标志码:A

Optimization of Construction Scheme of Ultra-Large Special-Shaped Foundation Pit Adjacent to Existing Station and Temporary Steel Bridge

CHEN Dengwei

(China Railway Southern Investment Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: With the intensifying development density of urban underground space in China, the impact of ultra-large foundation pit construction on the normal operation of adjacent structures cannot be ignored. Relying on the Huangmugang Comprehensive Transportation Hub Project in Shenzhen, this paper studied the deformation of the envelope structure and soil caused by the excavation of the ultra-large special-shaped foundation pit, as well as the structural response of the deformation of the adjacent existing station and the temporary steel bridge. The paper optimized the construction scheme of the special-shaped foundation pit excavation. The results show that the deformation trend of the envelope structure on the north and south sides of the foundation pit is the same as a whole, but the deformation at the external corner on the north side is large. The envelope structure of the existing station as a whole is displaced into the pit, with a maximum horizontal displacement of 9.4 mm, and the horizontal displacement of the steel box girder bridge pile after excavation of the foundation pit is large, with the maximum value reaching 10.5 mm. The overall construction safety is ensured by adding temporary concrete supports on the lower ground and adding steel sleeves on the piers of the temporary steel bridge in the pit.

Keywords: ultra-large special-shaped foundation pit; foundation pit excavation; adjacent structure; numerical calculation; deformation analysis

0 引言

随着中国城市交通的快速发展,建设地下综合

交通枢纽成为解决地铁多线换乘,实现区域交通一体化发展的重要途径。交通枢纽基坑规模大、结构形式复杂,对周围建筑物的运营安全造成很大的影

收稿日期:2024-10-23(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52008263);中国中铁股份公司科技研究开发计划课题(编号:2020-重点-14);中铁南方2020科技研发计划项目(编号:4403012022004346)

作者简介:陈登伟,男,硕士,高级工程师.E-mail:dengweichencrsig@163.com

响^[1-8]。学者们对于基坑紧邻既有结构施工环境影响开展了一系列研究,运用了理论解析^[9]、数值模拟^[10-15]、模型试验^[16]、实时监测^[17-19]等方法。其中,有限元数值模拟是评估临近施工对地铁影响的常用方法,可以较好地模拟基坑施工过程中各工况周围结构的变形沉降情况,从而对特定工程设计出较合理的优化方案,保证基坑及其周围既有结构达到安全可靠状态。然而,目前国内外对于超大异形基坑开挖环境影响研究较少,特别是对周围紧邻的车站、桥梁等既有建(构)筑物正常运营的影响机制的理解不够清晰,因此分析超大异形基坑施工对周围既有结构影响机理意义重大。

本文结合深圳黄木岗综合交通枢纽紧邻既有车站和钢便桥的超大异形基坑施工案例,通过Plaxis建立三维有限元模型,分析超大异形基坑施工对紧邻结构的影响,并提出改进措施对施工方案进行优化,通过现场监测结构进行了验证。

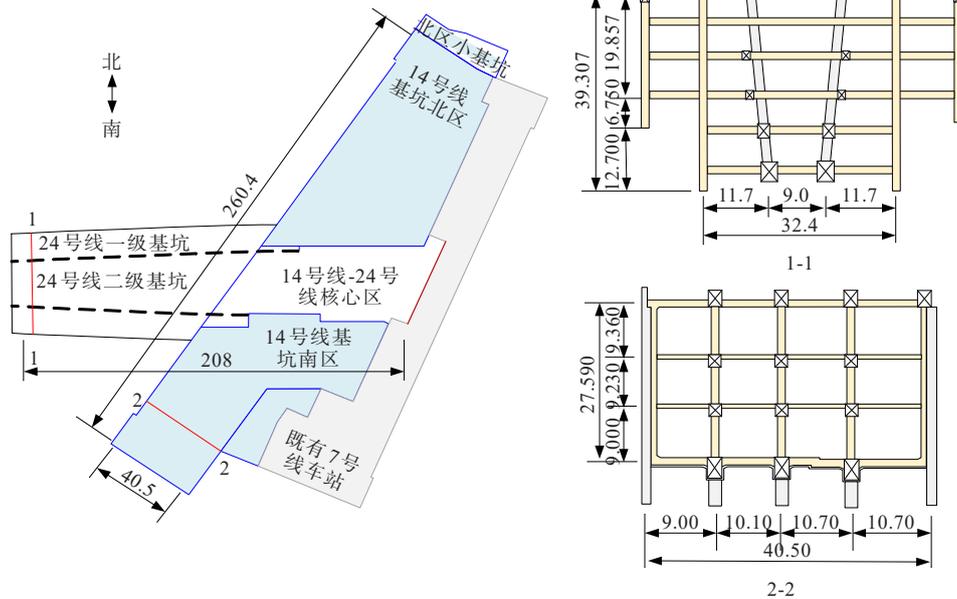


图1 黄木岗综合交通枢纽基坑(单位:m)

Figure 1 Foundation pit in Huangmugang Comprehensive Transportation Hub (unit:m)

1.2 地质条件

图2为东西向(西区地下空间及24号线)地质纵断面图,图3为南北向(14号线)地质纵断面图,地层自上而下依次为人工填土、砾质黏性土、全~微风化燕山期花岗岩,岩土层一般物理力学指标标准值汇总于表1。地下水位位于地表以下5.8m。

1 工程概况

1.1 基坑方案

黄木岗综合交通枢纽工程基坑总面积约为8.6万 m^2 ,其中包括14号线部分(1.64万 m^2 ,地下3层,深约30m)、24号线部分(0.81万 m^2 ,地下4层,深约40m),地下空间开发部分(1.92万 m^2 ,地下1层,深12~16m)。14号线采用盖挖逆作施工,7号线东侧50m轨道交通盖挖。既有7号线为地下3层车站,车站底板埋深与14号线同为30m。既有C出入口横跨枢纽14号线基坑,14号线基坑深约30m,局部40m。围护结构采用地下连续墙,盖挖逆作法施工,其中新建14号线顶板标高17.155~20.845m。笋岗西路东侧轨道交通50m盖挖段基坑深约16.0m,围护结构为0.8m@1.0m钻孔灌注桩,盖挖法施工,主体结构为单层结构,与7号线连接长度约53.7m,开挖施工前,14号线基坑西侧架设临时钢箱梁桥,保证施工期间区域交通正常运行,基坑整体情况如图1所示。

2 有限元模型

2.1 模型概况

为了对枢纽在复杂工况下基坑和既有隧道、钢便桥结构的变形风险进行量化分析,选择24号线基坑、14号线基坑、7号线既有黄木岗地铁车站和临时

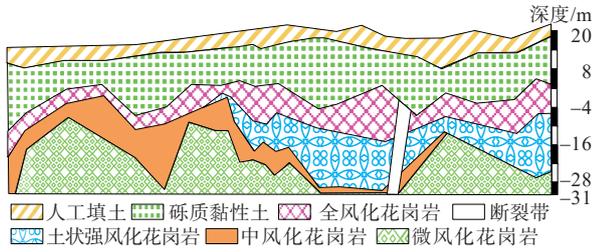


图2 东西向(西区地下空间及24号线)地质纵断面
Figure 2 EW-trending (west underground space and Line 24) geological profile

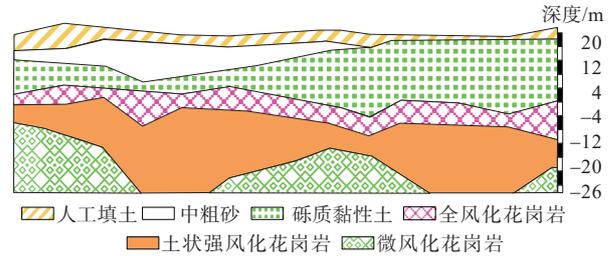


图3 南北向(14号线)地质纵断面
Figure 3 NS-trending (Line 14) geological profile

表1 岩土一般物理力学指标标准值汇总统计

Table 1 Summary of standard values of general physical and mechanical indexes of rock and soil

地层	$w/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$S_r/\%$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$a_s/(\text{MPa}^{-1})$	E_s/MPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa
人工填土	28.6	19.1	95.1	34.5	20.7	0.552	3.5	15.4	27.2
中粗砂	—	19.8	—	—	—	—	—	30.0	3.0
砾质黏性土	23.7	18.6	82.2	33.2	20.1	0.398	4.78	20.3	26.5
全风化花岗岩	17.8	18.4	67.2	29.4	18.1	0.363	5.14	23.5	29.5
土状强风化花岗岩	18.9	18.3	68.6	29.5	18.1	—	—	—	—
中风化花岗岩	—	26.0	—	—	—	—	—	—	—
微风化花岗岩	—	27.0	—	—	—	—	—	—	—

注: w 为天然含水量; γ 为天然重度; S_r 为饱和度; w_L 为液限; w_p 为塑限; a_s 为压缩系数; E_s 为压缩模量; φ 为直剪内摩擦角; c 为直剪黏聚力。

钢箱梁桥作为研究区域。采用Plaxis 3D建立枢纽核心区三维有限元模型,如图4所示。为了减小边界效应的影响,模型边界距离结构的最小距离均大于3倍开挖深度,模型的几何尺寸为450 m×450 m×60 m。四周边界约束法向位移,底部固定。模型顶部边界自由排水,地下水位位于地表以下5.4 m。

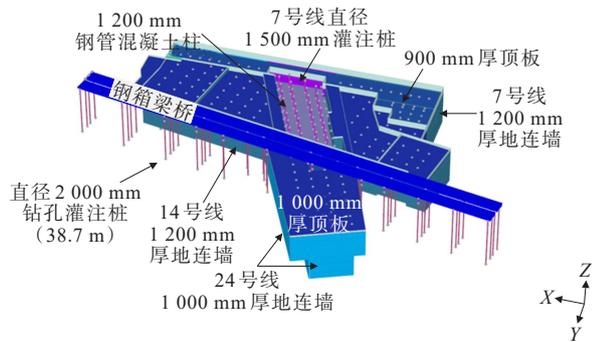


图4 黄木岗枢纽有限元三维模型

Figure 4 Finite element 3D model of Huangmugang Hub

模型土层自上而下分别为填土、填石、花岗岩残积砾质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩以及中/微风化花岗岩。地下连续墙、楼板、结构墙均按照实际几何尺寸,以板单元模拟;排桩按照等效刚度的原则,计算等效厚度后,以板单元模拟。由于板单元只存在计算厚度而没有实际厚度,因此埋置于土体中的结构需要减去土体重度。立柱有钢筋混凝土

立柱与钢管混凝土立柱,分矩形截面类型和圆形截面类型,在两道板撑之间设置梁单元模拟立柱,其两个连接节点均为刚结。立柱桩采用嵌入式梁单元模拟,顶部为竖向坐标最大值点,与结构刚结,底部嵌于土体中,嵌入式梁单元可以输入桩身摩擦力和桩端阻力,并且桩身有特殊的截面单元来模拟桩土作用,从而更真实地反映桩的力学性能。

2.2 材料参数

2.2.1 地层参数

对于基坑开挖类问题,如果不考虑土体的小应变刚度,会低估挡土墙后的沉降,高估较远范围内的沉降和影响范围。小应变硬化本构模型(HSS)可以很好地处理此类问题,根据勘察数据,填土、填石和微风化花岗岩采用摩尔-库仑模型,其余土层本构模型选用小应变硬化土模型(Hardening Soil-Small model, HSS),详细参数见表2、3。在主要的开挖土

表2 地层参数(摩尔-库仑模型)

Table 2 Parameters of soil layers (Mohr-Coloumb model)

土层	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\Psi/(\text{°})$	E/MPa
素填土	2.0	26	0	15
填石	6.5	35	0	18
微风化花岗岩	800.0	40	18	5 500

注: c 为有效黏聚力; φ 为有效内摩擦角; Ψ 为剪胀角; E 为弹性模量。

层,通过室内试验和旁压试验参数反演,并参考深圳地区典型土层的参数,采用HSS本构模型,采用旁压试验反演得到的参数进行深圳地区基坑开挖类工程实例验证后,确定其计算参数值^[20-21]。

2.2.2 结构参数

地下连续墙、排桩、墙结构、板结构等可采用基于Mindlin理论的板单元来模拟。当其为矩形截面时

输入真实厚度;当其为排桩等其他截面时需要利用刚度等效转换计算,板单元的参数见表4。

支撑体系中立柱、梁、结构柱、钢管混凝土柱、钢管混凝土桩等采用梁单元和嵌入式桩单元模拟,采用等效刚度计算其等效轴向刚度和弯曲刚度,计算公式如式(1)、(2):

$$EA = E_a A_a + E_c A_c \quad (1)$$

表3 地层参数(小应变硬化土模型)

Table 3 Parameters of soil layers (small-strain hardened soil model)

土层	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	$\Psi/(\circ)$	R_f	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{od}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	m	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$
砾质黏性土	8	32	2	0.92	12.75	12.75	43.3	0.72	1.67	90
全风化花岗岩	15	30	0	0.95	15.00	15.00	60.1	0.70	2.00	135
强风化花岗岩	25	33	3	0.95	20.00	20.00	75.0	0.68	2.00	180

注: c 为有效黏聚力; φ 为有效内摩擦角; Ψ 为剪胀角; R_f 为破坏比; E_{50}^{ref} 为三轴压缩试验的参考割线模量; $E_{\text{od}}^{\text{ref}}$ 为固结试验的参考切线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载再加载参考割线模量; m 为刚度应力水平相关幂指数; $\gamma_{0.7}$ 为剪切模量衰减到0.722倍初始剪切模量时的剪应变; G_0^{ref} 为土体在参考应力下的剪切模量。

表4 板单元参数

Table 4 Board unit parameters

名称	厚度 d/mm	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/(10^6 \text{ kPa})$	泊松比 ν
	400/600/700/			
板撑	800/900/1 000/ 1 300/1 700	25	31.5	0.2
地下连续墙	1 000/1 200	5	31.5	0.2
灌注桩	1 310	5	31.5	0.2

$$EI = E_a I_a + E_c I_c \quad (2)$$

式中: A_a 、 I_a 分别为钢管横截面面积和其对重心轴的惯性矩; A_c 、 I_c 分别为钢管内混凝土横截面面积和其对重心轴的惯性矩; E_a 、 E_c 分别为钢管和混凝土的弹性模量。参数取值见表5。

表5 立柱、桩参数

Table 5 Parameters of column and pile

名称	面积 A/m^2	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/(10^6 \text{ kPa})$	惯性矩 I/m^4
坑内立柱	1.140	25	37.0	0.31
桩1	4.900	25	31.5	1.917
桩2	7.069	25	31.5	3.976
立柱KZ-1	1.5×0.9	25	31.5	0.091/0.253
立柱KZ-2	1.3×0.9	25	31.5	0.079/0.165
立柱TK-Z1	1.3×0.8	25	31.5	0.055/0.147

2.3 施工工况和分析步

有限元模型各分析工况对应的分析步设置汇总

于表6。开挖过程中坑内水位随挖随降,考虑到花岗岩残积土具有一定渗透性,采用稳态渗流的排水分析进行计算。

表6 有限元分析步

Table 6 Finite element analysis step

分析步	工况
1	地应力平衡
2	7号线主体结构
3	钢便桥和桥墩、桥下立柱桩(分析步开始时重置位移值)
4	14号线、24号线基坑地连墙和立柱桩
5	14号线基坑南北区顶板
6	14号线核心区和24号线顶板
7	14号线南北区第一层开挖
8	14号线南北区夹层板
9	14号线南北区小基坑开挖
10	14号线中区、24号线第一、二层开挖
11	14号线南北区第三层开挖
12	14号线南北区第四层开挖、底板
13	14号线中区、24号线第三层开挖
14	14号线中区、24号线第四层开挖
15	14号线中区、24号线第五层开挖

3 结果分析

3.1 基坑变形

3.1.1 围护结构变形

图5为围护结构的变形云图。14号线基坑围护

结构最大变形发生在北区北侧,最大位移值为 25.3 mm;24 号线基坑围护结构最大变形发生在北侧一级基坑地连墙中间位置,最大位移达到 31.6 mm。盖挖逆作法施工和分区开挖的施工方案能够较好地控制围护结构的变形,在最大开挖深度接近 40 m 的情况下,围护结构变形整体仍在《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)^[22]、《城市轨道交通工程测量规范》(GB/T 50308—2017)^[23]等规范要求范围以内。24 号线一级基坑地连墙位移较大,主要原因是一级基坑地连墙设计深度较浅,墙底处于全风化花岗岩层和土状强风化花岗岩层,整体风化程度高,力学性质较差;而二级基坑围护结构位移相对较小,特别是在深度 35 m 以下,位移减小至接近 0。这一方面是由于一级基坑逆作施工完成后,结构体系形成,能够为二级基坑提供良好的支撑作用;另一方面,二级基坑所处的土层主要是中、微风化花岗岩层,岩体风化程度较低,力学性质好。

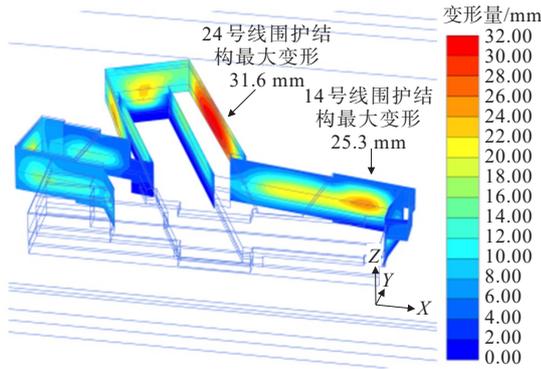


图5 围护结构变形

Figure 5 Deformation of envelope structure

图6为选取的4个典型断面的围护结构水平位移曲线。24 号线南北侧围护结构变形规律较为一致,其中一级基坑水平位移随深度先增大后减小,并在 19.1 m 处达到最大值,二级基坑位移在深度 28 m 位置均维持在 15 mm 左右,但随着深度超过 28 m,围护结构水平位移快速减小,并在底板深度处快速减小至 0。这是因为底板处已经位于中、微风化花岗岩层中,岩体力学性质较好,因此对变形起到较好的约束作用。17.7~24.0 m 深度为一、二级基坑重叠区域,此处由于外侧一级基坑地连墙的遮拦作用,内侧二级基坑的墙体水平位移相对较小,两段地连墙的水平位移在一级基坑墙底(24 m)处趋于一致。

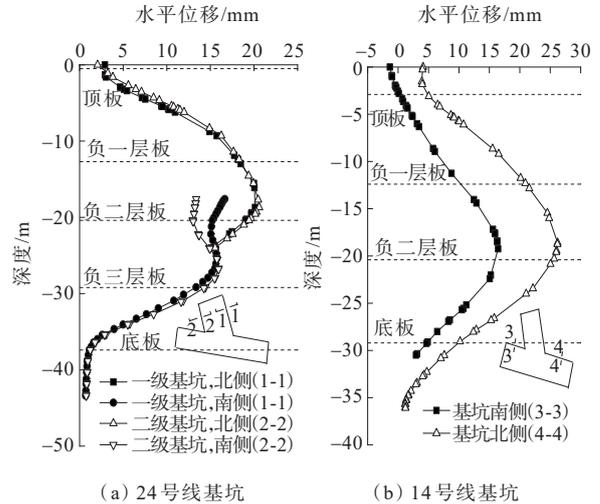


图6 典型断面围护结构水平位移
Figure 6 Horizontal displacement of typical cross-sectional envelope structure

3.1.2 顶板沉降

图7为14、24号线顶板沉降云图。由于采用了盖挖逆作法施工,地连墙施工完成后马上施作顶板,在后续开挖影响下,顶板产生了不同幅度的下沉。其中,14 号线顶板沉降较小,呈现出中心区大,四周较小的特点,最大沉降量出现在北区,沉降量为 17.6 mm。24 号线整体沉降量较大,特别是靠近北侧位置,最大沉降量达到 27 mm。

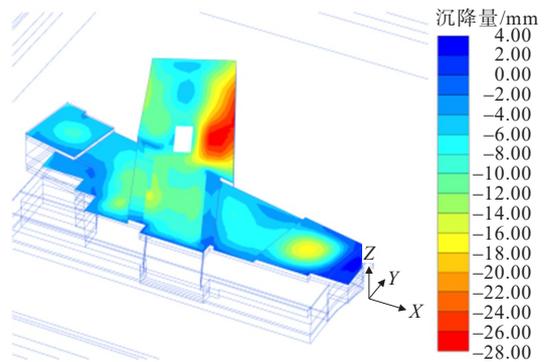


图7 顶板沉降

Figure 7 Top plate settlement

3.2 土体变形

图8为土体沉降云图。坑内土体受卸载影响发生隆起,但由于采用盖挖逆作法施工,随着开挖进行同步施作主体结构,因此坑内土体隆起量较小,24 号线一、二级基坑之间的土体隆起量最大,达到 34.8 mm,基坑坑底隆起量均小于 20 mm。受坑内卸载和降水共同影响,紧邻基坑的外侧土体发生了比较明显的沉降,最大沉降量为 34.8 mm。

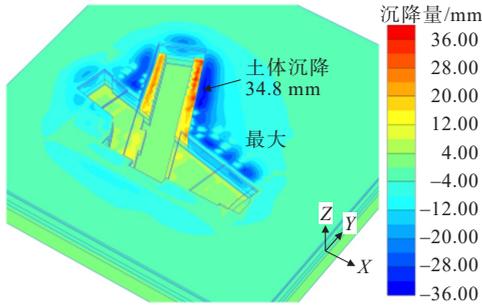


图8 土体沉降

Figure 8 Soil settlement

3.3 既有车站变形

3.3.1 7号线围护结构变形

图9为既有7号线车站围护结构的位移(y方向)。车站中区和南北区中段的位移较大,最大位移出现在中区,最大值为9.4 mm,小于规范控制值^[22-23];车站边缘处受空间效应影响,水平位移较小。远离基坑侧的围护墙受影响稍小,最大水平位移为8.4 mm,与近侧围护结构差别不大。

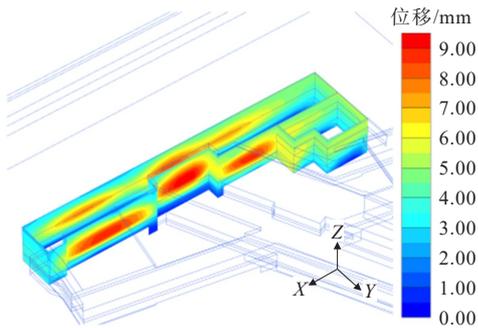


图9 既有7号线围护结构水平位移

Figure 9 Horizontal displacement of envelope structure of existing Line 7

图10为典型断面的围护结构水平位移。两个断面围护结构深度不同,但位移变化规律基本一致。顶板高度处围护结构水平位移很小,随着深度增加,围护结构受基坑卸载的影响更加明显,水平位移逐渐增大,最大水平位移出现在负二层板位置。底板位置的水平位移大幅减小,中区围护结构40 m深度、北区围护结构35 m深度时基本无水平位移。

3.3.2 结构板沉降

图11为既有7号线顶板、负一层板、负二层板和底板的沉降云图。基坑开挖引起既有7号线结构板主体部分的沉降不超过5 mm,北区沉降量大于中区和南区,在车站边缘处基本无沉降。在出入口部分沉降略大,最大沉降值达到9.6 mm。

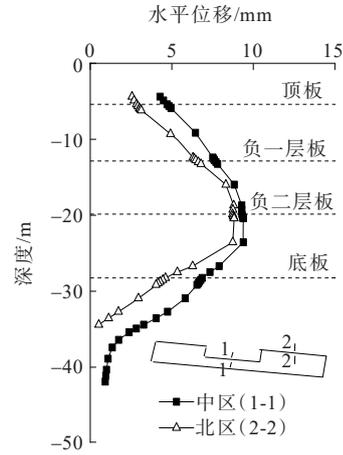


图10 典型断面围护结构水平位移

Figure 10 Horizontal displacement of typical cross-sectional envelope structure

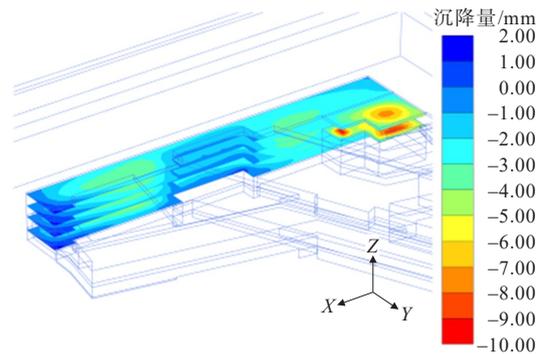


图11 既有7号线结构板沉降

Figure 11 Structural plate settlement of existing Line 7

3.4 钢便桥变形

图12为钢便桥钢箱梁底部钢板的沉降云图。钢箱梁产生最大16.6 mm的沉降,这是由于钢便桥修建完成后上面作用有行车荷载。图13为距离14号线基坑最近的一排钢便桥桥桩的桩顶位移曲线,桥桩整体沉降量较小,最大值出现在14号线北侧基坑中部,沉降量2.3 mm,南侧桥桩的水平位移不超过5 mm,但北侧桥桩水平位移较大,最大值达到了10.5 mm。

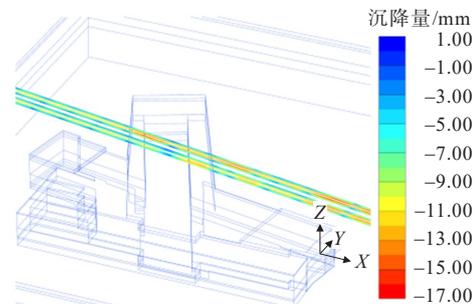


图12 钢便桥沉降

Figure 12 Temporary steel bridge settlement

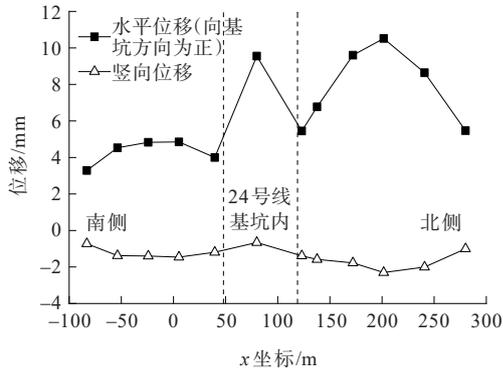


图 13 桥桩位移

Figure 13 Bridge pile displacement

特别需要注意的是,24号线基坑内的桥桩由于上部没有土体的约束作用,水平位移达到了9.6 mm。

3.5 方案优化

3.5.1 加设临时混凝土支撑

在24号线负一层中间高度加设一层临时混凝土支撑,限制一级基坑整体变形。临时支撑在后面的V形柱-临时柱转换后,与临时柱同时拆除。建立优化后的有限元模型,并与优化前的结构变形进行对比。优化后的24号线一级基坑围护结构变形云图如图14所示,土体沉降云图如图15所示。

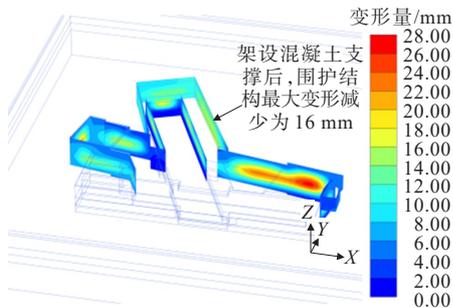


图 14 加设支撑后24号线一级基坑围护结构变形云图

Figure 14 Cloud map of first-level envelope structure deformation of foundation pit of Line 24 after adding support

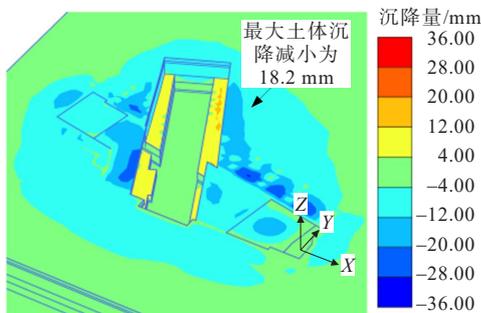


图 15 加设支撑后土体沉降云图

Figure 15 Cloud map of soil settlement after adding support

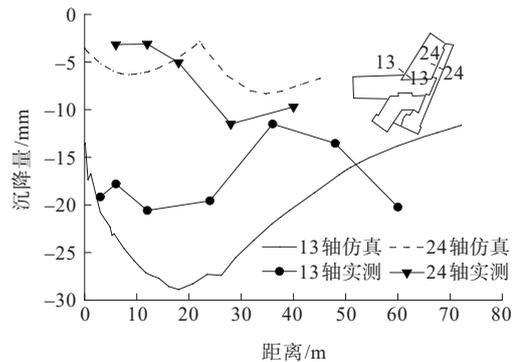
从图14可以看出:在负一层增加临时支撑后,最大围护结构变形减小为16.0 mm(加设支撑前围护结构变形为31.6 mm,见图5),位移控制效果明显;从图15可以看出:该优化方案对土体变形有明显控制作用,土体最大沉降从34.8 mm(图8)减小至18.2 mm。

3.5.2 基坑内钢便桥桥墩增设钢套筒

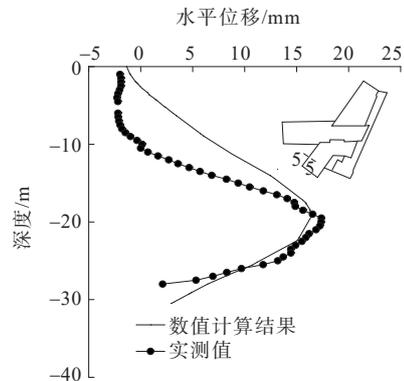
为了减小基坑内钢便桥桥墩失稳风险,在基坑内相邻两根钢便桥桥桩之间增设3道连梁,通过钢套筒将桥桩和钢梁相连。在开挖至对应深度后,进行钢连梁施工,并在钢便桥拆除时统一拆卸。

3.6 实施效果

图16为基坑围护结构仿真分析与现场实测结果对比,加设临时混凝土支撑后,仿真得到的地表沉降与围护结构变形规律和大小均与实测结果较为吻合,说明了数值仿真结果的可靠性。并由现场监测结果可知:基坑内钢便桥桥墩加设钢套筒后,桥桩最大实测水平位移5.6 mm,满足规范要求^[22-23],施工过程安全可靠。



(a) 围护结构沉降仿真与实测结果对比



(b) 围护结构水平位移仿真与实测结果对比

图 16 仿真分析与现场实测结果对比(基坑围护结构)

Figure 16 Comparison between simulation analysis and field measurement results (envelope structure of foundation pit)

4 结论

基于深圳市黄木岗综合交通枢纽紧邻既有车站和钢便桥的超大异形基坑施工的工程案例,建立三维有限元模型,对基坑变形、紧邻既有车站变形和钢便桥变形进行研究和分析,并提出相应优化方案,得出以下结论:

(1) 基坑南北侧围护结构的变形趋势整体一致,但与北侧相比南侧变形更大,由于北侧14、24号线的地连墙呈钝角相交,而南侧两条线的地连墙呈锐角相交且14号线南侧墙体较短,空间效应北侧比南侧更为明显。坑内卸载时,坑外土压力可以较为充分地作用在围护结构上。

(2) 通过既有车站变形可以看出:车站中区和南北区中段的位移较大,最大位移出现在中区,最大值为9.4 mm,远离基坑侧的围护墙受影响稍小,最大水平位移为8.4 mm,与近侧围护结构差别不大。随着开挖深度的增加,围护结构受基坑卸载的影响更加明显,水平位移逐渐增大,最大水平位移出现在负二层板位置。

(3) 由于行车荷载的作用,钢便桥产生最大沉降为16.6 mm,14号线基坑附近钢便桥桥桩整体沉降量较小,最大沉降量为2.3 mm,南侧桥桩水平位移不超过5 mm,北侧桥桩水平位移最大值为10.5 mm。

(4) 通过数值模拟分析,可通过增设临时混凝土支撑和基坑内钢便桥桥墩增设钢套筒进行方案优化,对于结构的位移以及稳定性控制效果明显。采用优化方案后,围护结构最大变形从31.6 mm减小至16.0 mm,基坑周围土体最大沉降从34.8 mm减小至18.2 mm。

参考文献:

References:

- [1] 谷淡平,凌同华,殷枝荣,等.便桥荷载作用下深基坑地下连续墙变形特性分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1781-1791.
GU Danping, LING Tonghua, YIN Zhirong, et al. Analysis of deformation characteristics of diaphragm wall in deep foundation pit under load of temporary bridge[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6):1781-1791.
- [2] 李小雪,雷可,谭忠盛,等.城市地下空间施工风险因素耦

合效应研究[J].土木工程学报,2021,54(1):76-86.

- LI Xiaoxue, LEI Ke, TAN Zhongsheng, et al. Study on coupling effect of risk factors in urban underground space construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1):76-86.
- [3] 张振波,宋太森,郑筱彦,等.基坑风险评估的全客观过程层析分析计算方法[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):991-997,1043.
ZHANG Zhenbo, SONG Taisen, ZHENG Xiaoyan, et al. Total objective process chromatographic analysis and calculation method for risk assessment of foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2):991-997,1043.
- [4] CHEN R P, MENG F, LI Z C, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58:224-235.
- [5] 钟翰虎,李聪,李雨林,等.偏压荷载下深基坑支护结构非对称变形与控制技术研究[J].中外公路,2022,42(1):34-37.
ZHONG Hanhu, LI Cong, LI Yulin, et al. Research on asymmetric deformation and control technology of supporting structure of deep foundation pit under eccentric load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1):34-37.
- [6] 赵良云,卜铭,徐茂虎,等.温度作用下深基坑钢支撑自伺服系统轴力研究[J].中外公路,2021,41(4):36-40.
ZHAO Liangyun, BU Ming, XU Maohu, et al. Study on axial force of steel supporting self-servo system in deep foundation pit under temperature load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4):36-40.
- [7] 李浩,贺祖浩,杨钊,等.软弱地层临近深基坑工程房屋沉降注浆控制研究[J].中外公路,2021,41(1):26-30
LI Hao, HE Zuhao, YANG Zhao, et al. Study on grouting control for settlement of neighboring buildings with deep foundation in soft ground layer[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1):26-30.
- [8] 胡风明,宋健,闫磊,等.危岩带下深基坑开挖关键技术及仿真分析[J].中外公路,2020,40(4):11-15.
HU Fengming, SONG Jian, YAN Lei, et al. Key technology and simulation analysis of deep foundation excavation in dangerous rock band[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4):11-15.
- [9] 王志杰,周飞聪,周平,等.基于强近接大型基坑单侧开挖卸载既有车站变形理论研究[J].岩石力学与工程学报, 2020, 39(10):2131-2147.

- WANG Zhijie, ZHOU Feicong, ZHOU Ping, et al. Research on deformation theory of existing stations based on single side excavation and unloading of large foundation pits with strong close connection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2131-2147.
- [10] 齐朋, 张宇奇, 王宁. 深基坑围护结构横向位移监测和数值模拟分析[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 38-42.
QI Peng, ZHANG Yuqi, WANG Ning. Lateral displacement monitoring and numerical simulation analysis for retaining system of deep foundation pit[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 38-42.
- [11] 马凯伦, 董明礼, 曹义, 等. 两侧双基坑开挖对密贴地铁车站的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊2): 1043-1048.
MA Kailun, DONG Mingli, CAO Yi, et al. Influence of excavation of double foundation pits on both sides of the metro station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(sup 2): 1043-1048.
- [12] 信磊磊, 杜一鸣, 郑刚. 两侧深基坑开挖对邻近地铁车站及隧道变形影响的优化分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(5): 84-90.
XIN Leilei, DU Yiming, ZHENG Gang. Optimal analysis of influences on deformation of adjacent metro station and tunnel due to deep pit bilateral excavations[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(5): 84-90.
- [13] 胡瑞青, 戴志仁, 李储军, 等. 砂卵石地层基坑开挖对侧方地铁交叉隧道和车站的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(12): 118-124.
HU Ruiqing, DAI Zhiren, LI Chujun, et al. Analysis of influence of foundation pit in sandy cobble stratum on side metro crossing tunnel and station[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(12): 118-124.
- [14] 旷庆华. 同深基坑开挖引起紧邻地铁车站变形特性研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(5): 130-132, 137.
KUANG Qinghua. Study on characteristics of subway station deformation induced by excavation of adjacent deep foundation pit[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(5): 130-132, 137.
- [15] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818-823.
GAO Meng, GAO Guangyun, FENG Shijin, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 818-823.
- [16] 冉启仁, 王旭, 王博林, 等. 基坑开挖对邻近建筑桩基弯矩和变形影响的模型试验[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊1): 132-137.
RAN Qiren, WANG Xu, WANG Bolin, et al. Model tests on influences of excavation of foundation pits on bending moment and deformation of pile foundation of adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(sup 1): 132-137.
- [17] 刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576.
LIU Nianwu, CHEN Yitian, GONG Xiaonan, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576.
- [18] LIU G B, HUANG P, SHI J W, et al. Performance of a deep excavation and its effect on adjacent tunnels in Shanghai soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(6): 04016041.
- [19] LIANG R Z, WU J, SUN L W, et al. Performances of adjacent metro structures due to zoned excavation of a large-scale basement in soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117: 104123.
- [20] 朱旻, 陈湘生, 张国涛, 等. 花岗岩残积土硬化土模型参数反演及工程应用[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1061-1072.
ZHU Min, CHEN Xiangsheng, ZHANG Guotao, et al. Parameter back-analysis of hardening soil model for granite residual soil and its engineering applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1061-1072.
- [21] 刘继强, 朱旻, 郝琨, 等. 上方基坑施工引起新运营隧道变形与病害分析[J]. 中外公路, 2024, 44(3): 202-210.
LIU Jiqiang, ZHU Min, HAO Kun, et al. Deformation and damage characteristics of a newly operated tunnel caused by above foundation pit construction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(3): 202-210.
- [22] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司. 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, 2014.
Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd.. Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [23] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司. 城市轨道交通工程测量规范: GB/T 50308—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd.. Code for urban rail transit engineering survey: GB/T 50308—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.