

大型商办基坑与地铁车站基坑 交叉施工影响的实例分析

李慧慧, 陈俊辉, 赖小勇, 岑仰润

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 萧政储出【2017】6号地块奥体博览中心商办项目场地中部被在建杭州地铁6号线博览站分隔成西侧近江基坑与东侧远江基坑。由于地铁车站位于商办基坑场地中间,两个项目在施工空间上及施工工序上均存在交叉、相互影响的问题。商办基坑围护结构需考虑与地铁车站相互交叉施工带来的影响,需充分考虑在建地铁车站的保护要求。采用了Midas GTS NX及Plaxis两种软件对商办项目与杭州地铁6号线博览站交叉施工影响进行了数值模拟计算,且与地铁车站地连墙理正计算结果进行了对比,结果显示地铁车站地连墙位移、弯矩、剪力变化趋势一致,数值接近。研究结果有望为今后类似工程设计和施工提供参考和借鉴。

关键词: 商办项目; 基坑开挖; 地铁车站; 交叉施工; 有限元; 影响分析

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0069-13

Analysis of the influence of cross construction between large-scale commercial foundation pit and subway station foundation pit

LI Hui-hui, CHEN Jun-hui, LAI Xiao-yong, CEN Yang-run

(Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: Xiao Zheng Chu Chu 【2017】 No. 6 Plot Olympic Sports Expo Center Commercial Office Project site is divided into the west near river foundation pit and the east far river foundation pit by the Hangzhou Metro Line 6 Expo Station under construction. Due to the subway station being located in the middle of the commercial foundation pit site, there are issues of intersection and mutual influence between the two projects in terms of construction space and processes. The commercial foundation pit enclosure structure needs to consider the impact of cross construction with subway stations, and fully consider the protection requirements of subway stations under construction. Midas GTS NX and Plaxis software are used to carry out numerical simulation calculation on the impact of the intersection construction between the commercial office project and the Hangzhou Metro Line 6 Expo Station, and the results are compared with the results of the subway station diaphragm wall calculated by Lizheng software. The results show that the subway station diaphragm wall displacement, bending moment, shear force change trends are consistent, and the values are close. The research results are expected to provide reference and inspiration for similar engineering design and construction in the future.

Key words: commercial projects; excavation of foundation pits; subway stations; cross construction; finite element analysis; impact analysis

0 引言

随着社会经济的快速发展,越来越多的城市正在加强城市轨道交通的建设。由于城市环境复杂,地面和地下建筑密集分布,城市轨道交通建设中与建筑相邻的项目越来越多。由于地铁线大多位于繁

华地段,地铁站大多位于市政道路的交叉口,往往与既有建筑相邻,又经常与相邻的深基坑工程交叉,增加了施工的难度和风险。因此,分析深基坑工程与地铁工程交叉施工所造成的相互影响,以及如何采取施工安全防护和变形控制措施,成为迫切需要深入研究的热点。

徐良仲等^[1]以杭州地铁6号线海洋公园站旁侧某商业项目基坑工程为例,通过Plaxis有限元软件建立了三维模型,对商业项目基坑、已建地铁车站主体结构、在建地铁车站附属结构等进行了模拟,分析了深基坑开挖对邻近既有地铁设施的影响,并通过施工过程的评估,预测基坑后续变形。邢巍巍^[2]以南京地铁7号线在建永春路站旁新基坑开挖为工程背景,根据工程施工方案和地质条件,利用Midas GTS NX软件建立了三维有限元模型,通过对在建地铁车站基坑开挖过程中的变形模拟,得出车站周边地层水平位移、垂直位移、侧墙弯矩和垂直位移的分布规律;通过将基坑开挖过程中控制点的变形值与实际监测数据进行比较,得出结论:采用现有施工方案,在建地铁站关键控制点开挖过程中的变形符合规范要求。基于此提出了减少基坑开挖与地铁施工相互干扰的措施。杨溢军^[3]以苏州某工程为例,采用Midas/GTS分析了基坑工程分区分期开挖、架设支撑及回筑地下室及上部结构施工对邻近建设中的轨道交通车站工程的影响,综合考虑了各种因素影响下的在建车站围护及主体结构的内力、变形,最终提出相应的保护措施及施工对策。童琳等^[4]在地铁站与平行相邻的大型基坑工程同时施工的情况下,将确保两个基坑的安全作为施工的难点。为满足严格控制变形的要求,介绍了施工顺序安排和采取的技术措施。最终,在信息化建设的指导下,两个大型基坑均按要求顺利完成。任亚亮^[5]针对相邻深基坑开挖中存在的交叉工况问题,分析了施工过程中的主要风险。通过计算地铁车站基坑围护结构的允许变形值,确定了车站基坑在相邻基坑开挖影响下的变形控制标准。笔者采用有限元数值模拟方法得到了受影响车站基坑支护桩的差异变形,验证了措施的有效性和方案的可行性。陈涛^[6]基于Midas GTS NX,对南京某在建地铁站旁的新基坑开挖进行了研究。根据该项目的施工计划,在地铁站底板、中板和顶板施工完成三种工况下,比较分析了新基坑开挖对地铁站围护结构和支撑的影响。通过对比分析,确定了新建基坑的风险控制点和对地铁车站有重大影响的工况。丁习富等^[7]以莞惠线新城站附近某城市控制中心深基坑工程为背景,在利用理正软件对基坑支护结构进行验证计算的基础上,结合有限元软件Midas SWS和Plaxis,建立了深基坑在实际开挖条件下存在渗流场和位移场的三维数值模型。以最大限度地减少相

邻车站的变形和基坑结构的应力为目标,对基坑开挖方法进行了优化,并对新城站地铁基坑开挖的影响评价进行了分析。叶翔等^[8]引用的案例绍兴国际会展中心一期B区工程2号馆深基坑与绍兴地铁1号线客运中心站深基坑相邻,由于两个基坑的施工周期重叠,形成了同步施工状态,存在重大技术问题困难和安全风险。为保证工期,双方施工单位利用地铁基坑工作面窄、长的特点,建筑基坑由东向西,地铁基坑在平面上由西向东同步交错施工,建筑物基坑底板封闭后,将采取更换和加固支撑的措施,提前拆除部分支撑,以确保建筑主体与地铁深基坑同步开挖。曹洋^[9]通过对某在建地铁站附近深基坑工程周边环境的分析,确定地铁站侧基坑支护系统采用斜桩和悬臂桩,另一侧采用斜桩、桩支护和桩锚支护。Midas GTS NX是一个大型有限元分析软件,用于分析在建地铁在基坑开挖中的最不利位置。由此可见,基坑开挖对在建地铁的影响在可控范围内,设计方案安全可靠。李辉^[10]以西北某城市地铁基坑及周边地块基坑同步开挖为工程背景,研究了两个基坑在不同开挖条件下的变形规律和趋势,并根据现场实测数据进行对比分析。

本文以杭州市萧山区某大型商办基坑与其场地中部在建的地铁车站基坑交叉施工案例为分析对象,采用了MIDAS GTS NX及PLAXIS两种软件对交叉施工影响进行了数值模拟计算,且与地铁车站地连墙理正计算结果进行了对比。相关研究结果有望为今后类似工程设计和施工提供参考借鉴。

1 项目概况

萧政储出【2017】6号地块奥体博览中心商办项目位于杭州市钱江世纪城核心区域,项目东北至博奥路,东南至杭州国际博览中心,西南至规划道路,西北至规划道路,详见图1。项目总用地面积为32 294 m²,地下车库总建筑面积34 500 m²。项目地块由2幢高层组成(塔楼T1为地上33层,地下2层,框筒结构,塔楼T2为地上43层,地下2层,框筒结构)。

项目下设2层整体地下室,其中地下1层、地下2层与奥体中心游泳馆相连,地下1层与国际博览中心相连。基础形式暂定采用钻孔灌注桩。基坑面积约为20 968 m²,周长约为967 m,基坑开挖深度为12.50~14.02 m(计算至承台垫层底,局部算至底板垫层底)。基坑场地中部被在建杭州地铁6号

线博览站分隔成西侧近江基坑与东侧远江基坑, 项目与邻近地铁车站的位置关系如图 2 所示。

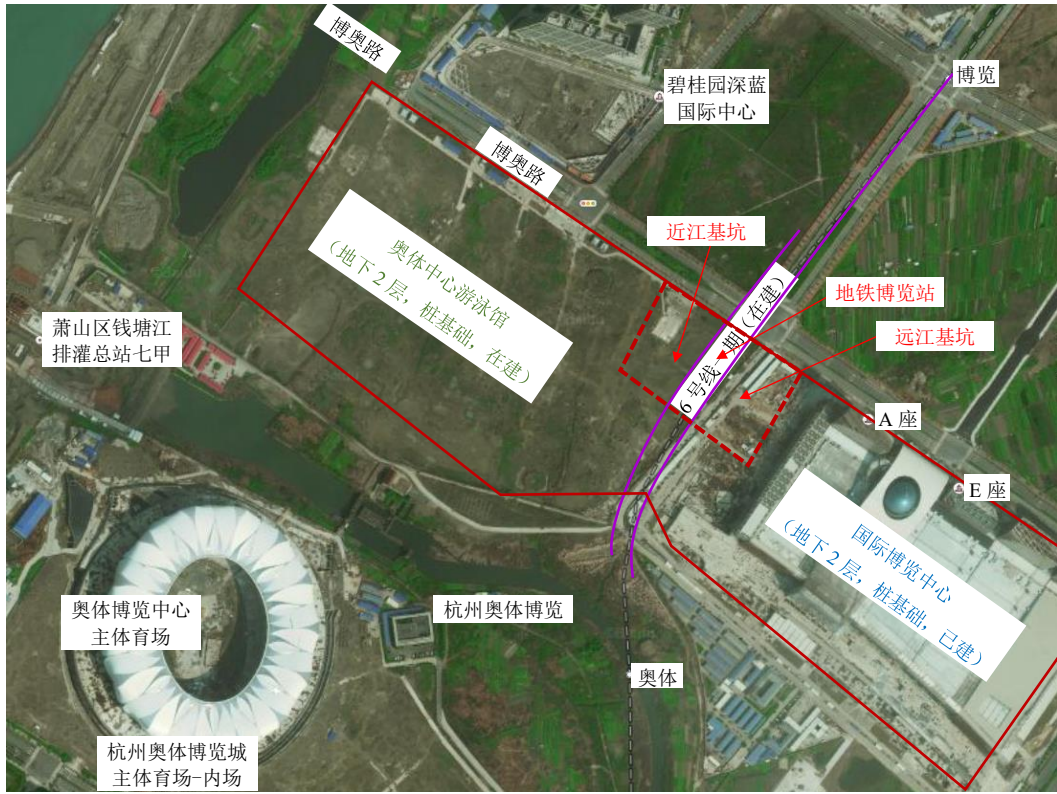


图 1 项目位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the project location

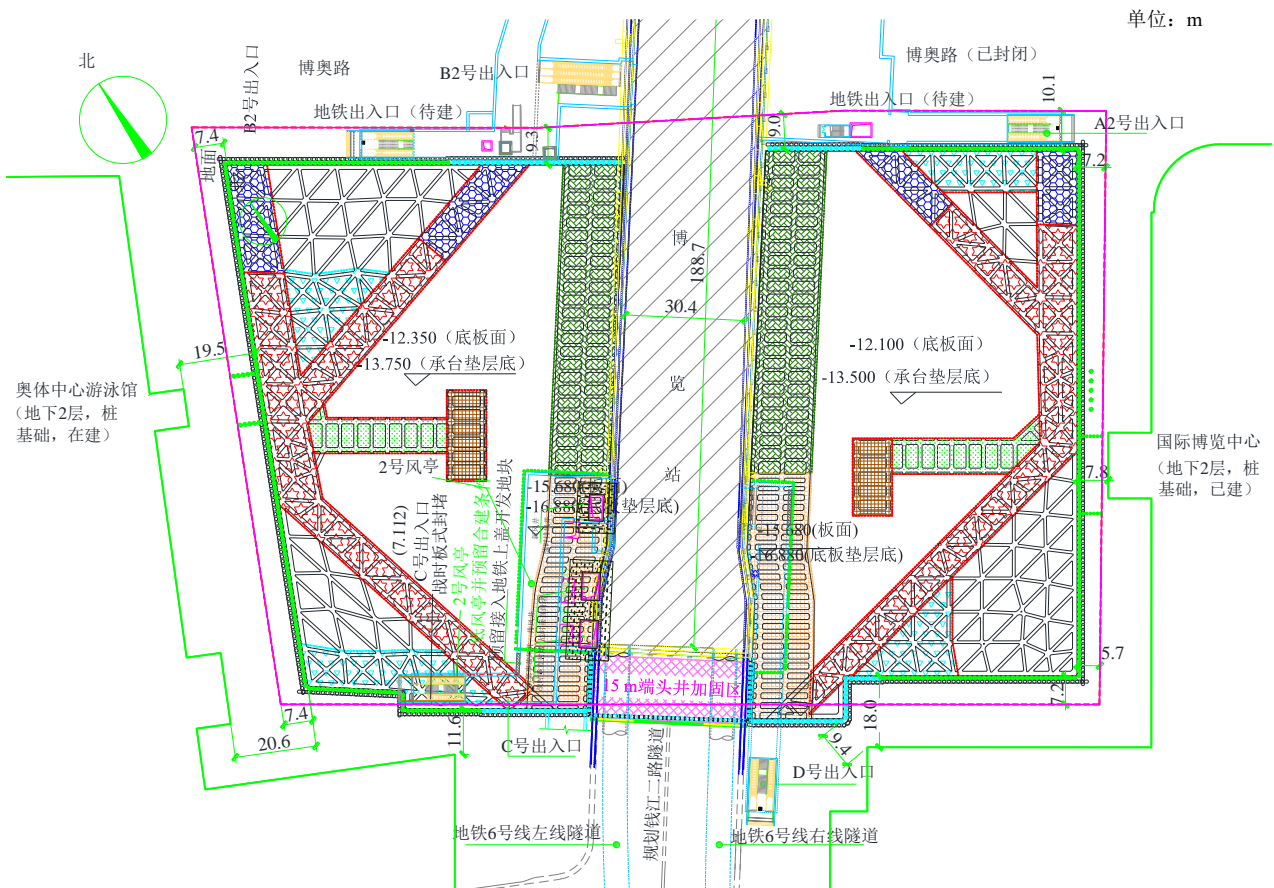


图 2 项目与邻近地铁车站的位置关系

Fig. 2 Location between the project and adjacent subway station

博览站为地下3层岛式车站，下1层为规划的钱江二路公路隧道，下2层为站厅层，下3层为站台层。商办基坑普遍开挖底绝对标高为-6.45~-6.20 m，基坑底位于粉土层中，地铁车站底绝对标高为-16.637~-18.672 m，车站底位于基坑底以下约10 m。公路隧道位于博览站下1层位置，平面轮廓线与车站轮廓重叠。商办项目被博览站分隔开的地下室通过最南端盾构始发区下部的连接通道来连通。地铁车站与公路隧道、地下室连接通道的相互空间关系详见图3。

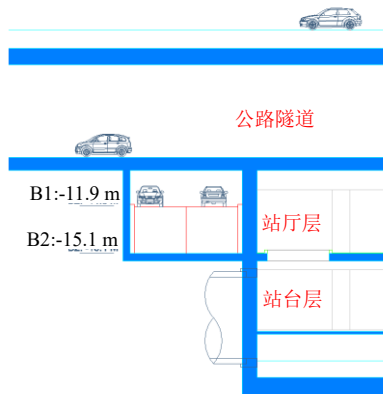


图3 地铁车站与公路隧道的相互空间关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the spatial relationship between subway station and highway tunnel

基坑周边环境较为复杂，保护要求较高。场地中间为同时施工的地铁6号线博览站，东侧为已建中国博中心，西侧为在建奥体中心游泳馆，南侧下伏公路隧道及盾构区间，北侧为城市主干道博奥路。地铁博览站及奥博区间为基坑开挖过程中的重点保护对象，应针对它们采取有效的保护措施。

2 工程地质条件

商办项目基坑开挖深度影响范围内由上至下分布有：①杂填土、②~③粉土及粉砂、④淤泥质粉质黏土等。上部的粉土层、粉砂层渗透性好，应对基坑的防渗止水、抗管涌等措施予以充分考虑。同时淤泥质土强度低、压缩性高，应保证淤泥质土层的坑底抗隆起稳定性系数满足规范要求。商办项目场地内土层的物理力学参数如表1所示。拟建场地地下水类型为第四系孔隙潜水、承压水及基岩裂隙水。孔隙潜水主要赋存于场区浅部粉、砂性土层内；孔隙承压水主要赋存于下部⑦粉砂、⑧圆砾内，上覆④~⑤黏性土是相对隔水层；基岩裂隙水主要赋存于基岩风化裂隙中，地下水连续性差，对商办项目工程建设影响不大。

表1 典型土层物理力学参数

Table 1 Typical physical and mechanical parameters of soils

层号	土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	含水量 $w/\%$	直剪固快峰值强度指标		渗透系数	
				c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	水平 $k_H/(\text{cm}/\text{s})$	垂直 $k_V/(\text{cm}/\text{s})$
①	杂填土	18.0	—	5.0	15.0	—	—
② ₁	黏质粉土	18.6	30.0	7.4	30.0	1.92×10^4	1.20×10^4
② ₂	砂质粉土	18.6	29.7	9.0	30.7	1.66×10^4	9.71×10^5
② ₃	砂质粉土	18.8	29.0	9.5	31.3	2.44×10^4	1.54×10^4
③ ₁	黏质粉土	18.7	32.1	12.3	18.8	1.90×10^4	1.05×10^4
③ ₂	砂质粉土	18.6	30.6	9.6	30.3	1.84×10^4	1.09×10^4
③ ₃	粉砂	19.4	23.5	3.4	33.6	2.69×10^4	1.67×10^4
④	淤泥质粉质黏土	17.5	41.9	13.6	9.8	3.09×10^7	1.34×10^7
⑤ ₁	粉质黏土	19.1	27.9	34.6	18.4	4.67×10^7	2.47×10^7
⑤ ₂	粉质黏土	19.0	27.9	32.0	16.3	6.23×10^7	3.08×10^7
⑦	粉砂	19.3	24.1	3.7	33.3	2.21×10^4	1.33×10^4

3 商办项目基坑围护方案

3.1 基坑工程难点

(1) 商办项目基坑与地铁站厅无缝对接，博览站总计有4个出入口及1个风亭位于商办项目红线内，其中风亭及2个出入口位于地库范围内，且开

挖深度深于地下室的开挖深度，因此围护体系设计时应做整体考虑。

(2) 需考虑商办基坑与地铁车站相互交叉施工带来的影响。由于地铁博览站位于商办基坑场地中间，车站施工需要利用商办基坑内部场地，反之被占用场地所在位置的工程桩、围护结构等施工需要地铁方腾挪出来，因此两个项目在施工空间上存

在交叉、相互影响的问题; 另外施工工序安排上, 商办基坑目前正在施工围护桩, 计划近期开始土方开挖, 而地铁博览站现已开始土方开挖, 因此这两个项目在施工工序上也存在交叉、相互影响的问题。

3.2 总体围护方案

(1) 采用顺作法的总体方案。

(2) 围护体系采用钻孔灌注桩结合外侧三轴水泥土搅拌桩止水帷幕, 基坑内设置钢筋混凝土水

平支撑。围护结构典型剖面如图 4 所示。

(3) 支撑体系采用角撑+对撑的支撑平面布置形式。

(4) 与地铁施工协调处理: 在地铁车站地连墙周围布置 15 m 宽的施工栈桥作为地铁车站施工平台, 两者同时施工区域通过采取该措施大大减少相互影响。

(5) 电梯井深坑高差处理: 采用水泥石重力式挡墙。

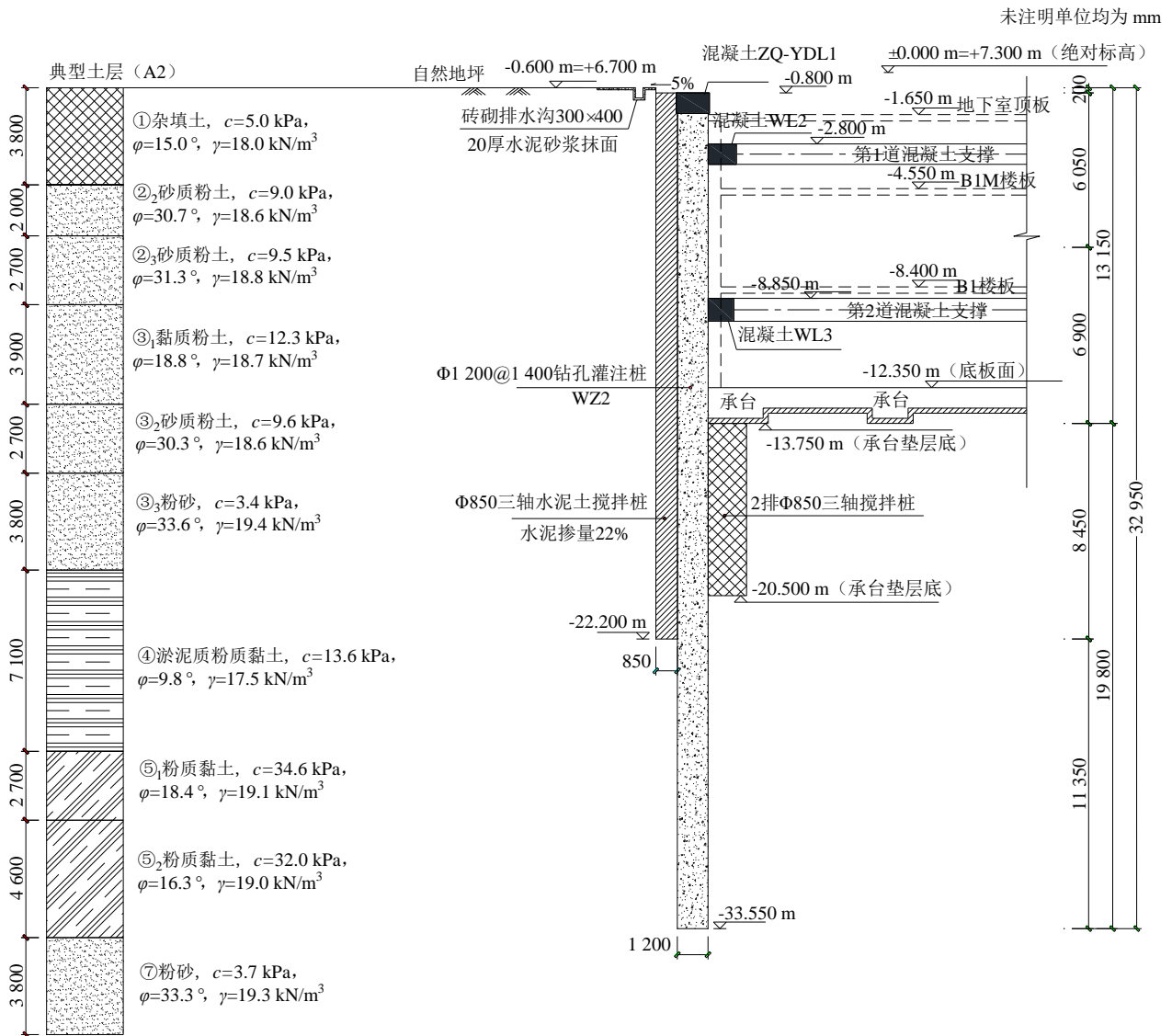


图 4 商办项目地下 2 层区域围护结构典型剖面图

Fig. 4 Typical profile of the bracing structure of the underground second floor area of the commercial office project

3.3 典型支护剖面复核验证

选取商办项目地下 2 层区域围护结构典型剖面以及地铁附属结构区域围护结构典型剖面, 采用理正深基坑支护结构设计计算软件进行围护结构在不同工况下的内力及变形计算、基坑整体稳定验算、抗倾覆稳定验算及抗隆起稳定验算。

两个典型剖面稳定性计算结果如表 2~3 所示。

商办项目地下 2 层区域围护结构典型剖面以及地铁附属结构区域围护结构典型剖面基坑开挖深度为 13.15~14.02 m, 围护墙最大位移为 22.35~27.14 mm, 约为 0.2%H, 符合浙江省《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014) [11] 一级基坑的

支护结构变形控制值(0.2%~0.5%H)的规定。

3.4 交叉施工工况图

图5~6为两个典型剖面内力位移包络图。

交叉施工工况如图7所示。

表2 商办项目地下2层区域围护结构典型剖面稳定性计算结果

Table 2 Stability calculation results of typical sections of the underground second floor area bracing structure for commercial projects

计算项目	计算值	规范要求值	是否满足
整体稳定安全系数	1.988	1.35	满足
抗倾覆安全系数	1.452	1.20	满足
抗隆起安全系数	3.024	1.80	满足

表3 地铁附属结构区域围护结构典型剖面稳定性计算结果

Table 3 Stability calculation results of typical sections of subway auxiliary structure area bracing structure

计算项目	计算值	规范要求值	是否满足
整体稳定安全系数	2.098	1.35	满足
抗倾覆安全系数	1.627	1.20	满足
抗隆起安全系数	3.152	1.80	满足

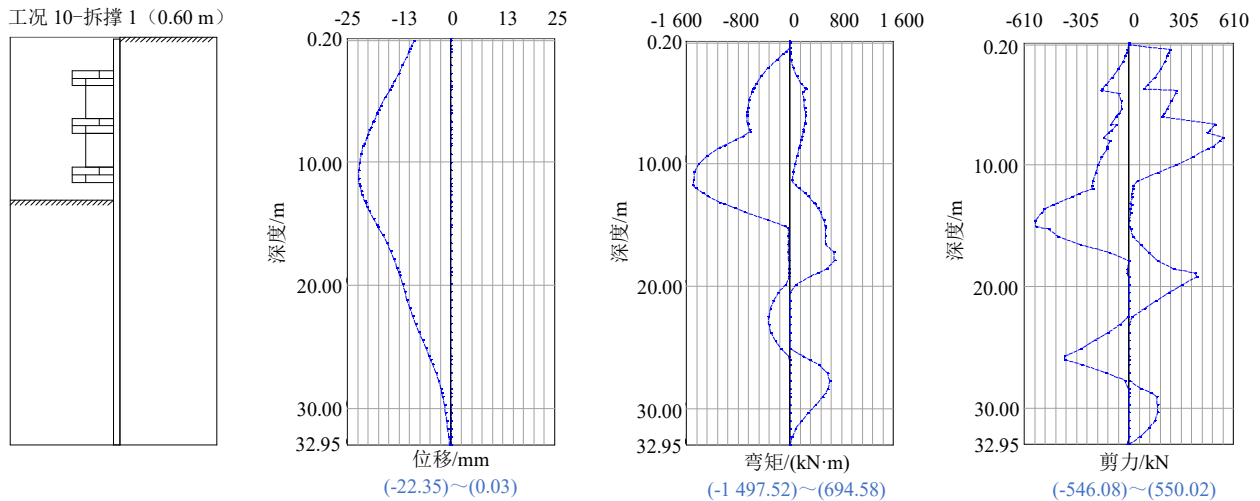


图5 商办项目地下2层区域围护结构典型剖面内力位移包络图

Fig. 5 Envelope diagram of internal force and displacement of typical section of the underground second floor area bracing structure of the commercial office project

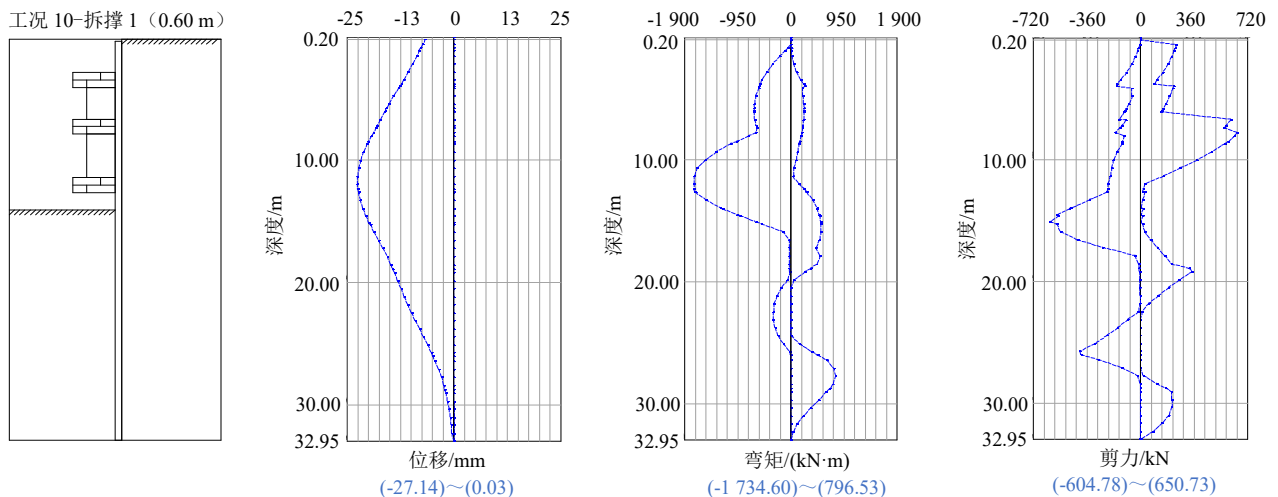
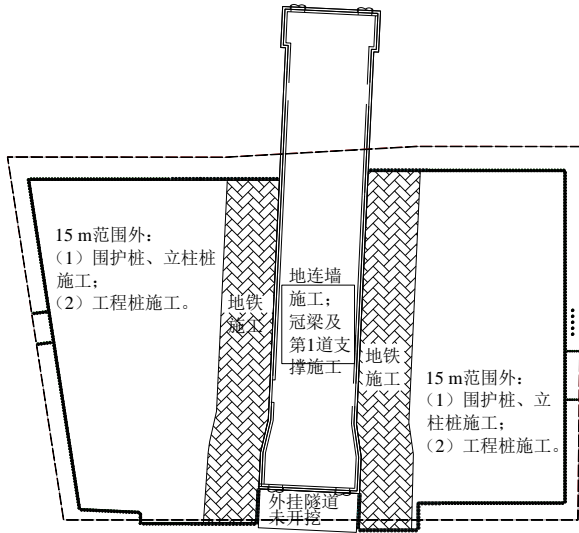


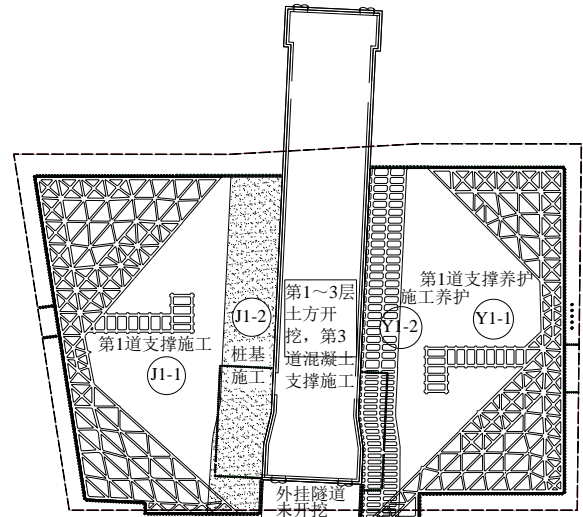
图6 地铁附属结构区域围护结构典型剖面内力位移包络图

Fig. 6 Envelope diagram of internal force and displacement of typical section of subway auxiliary structure area bracing structure



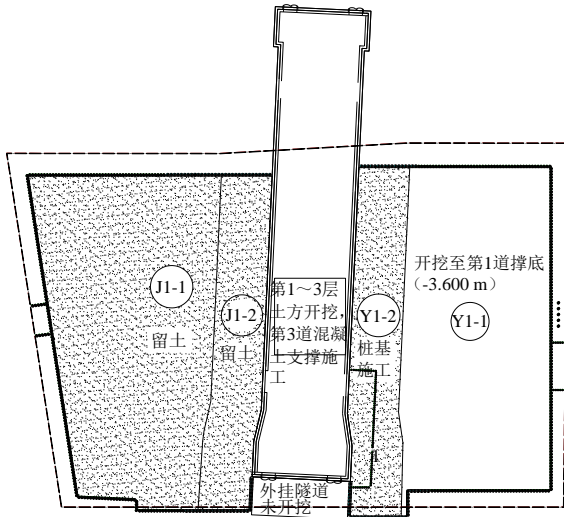
本项基坑: 围护桩、立柱桩施工, 工程桩施工;
地铁基坑: 地连墙施工, 冠梁及第1道支撑施工。

(1) 工况一



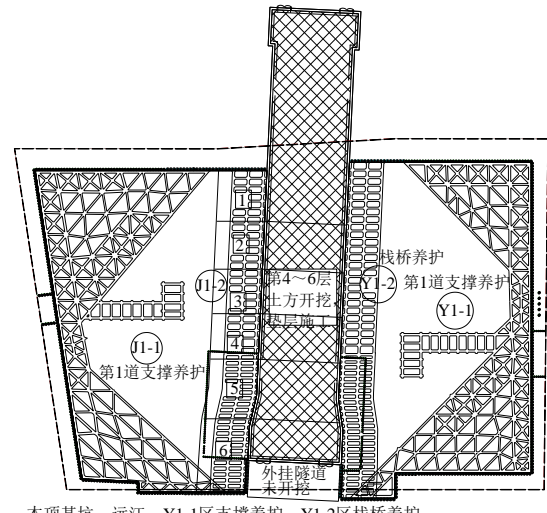
本项基坑: 远江: Y1-1区支撑养护, Y1-2区栈桥养护;
近江: J1-1区进行第1道支撑施工, J1-2区进场桩基施工;
地铁基坑: 第1~3层土方开挖, 第3道混凝土支撑施工。

(4) 工况四



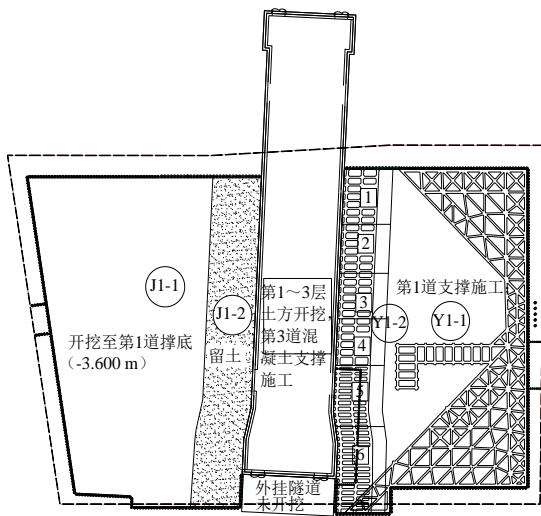
本项基坑: 远江: Y1-2区进场进行桩基施工, Y1-1区按照分层分块要求开挖至第1道撑底 (-3.600m); 近江: 暂未挖土;
地铁基坑: 第1~3层土方开挖, 第3道混凝土支撑施工。

(2) 工况二



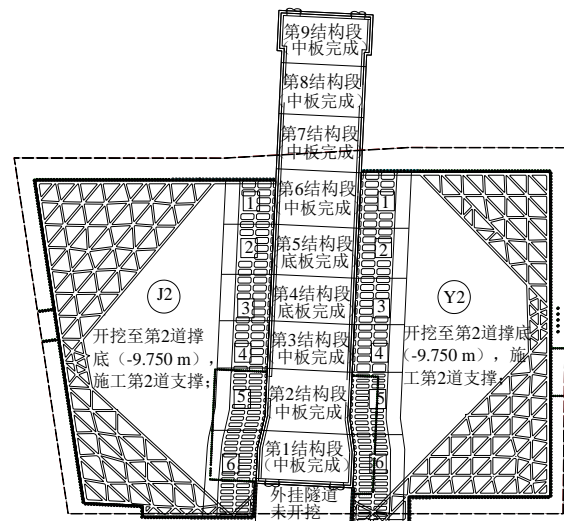
本项基坑: 远江: Y1-1区支撑养护, Y1-2区栈桥养护;
近江: J1-1区进行支撑养护, J1-2区按照1~6区的顺序开挖至第1道撑底 (-1.400m), 施工栈桥并养护;
地铁基坑: 第4~6层土方开挖, 施工底板垫层。

(5) 工况五



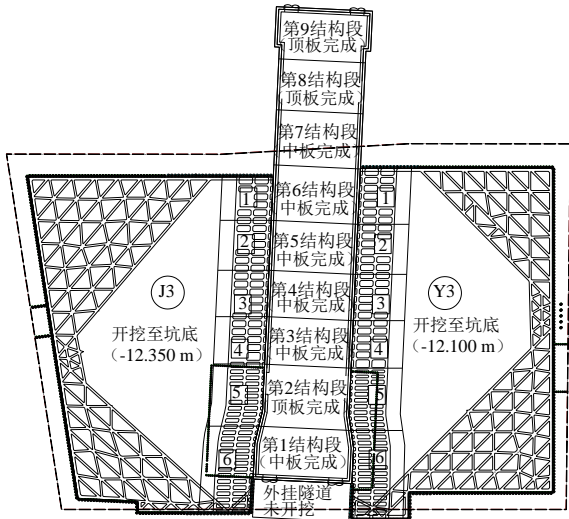
本项基坑: 远江: Y1-1区进行第1道支撑施工, Y1-2区按照1~6区的顺序开挖至第1道撑底 (-1.400m), 施工栈桥; 近江: J1-1区按照分层分块要求开挖至第1道撑底 (-3.600m), J1-2区留土;
地铁基坑: 第1~3层土方开挖, 第3道混凝土支撑施工。

(3) 工况三



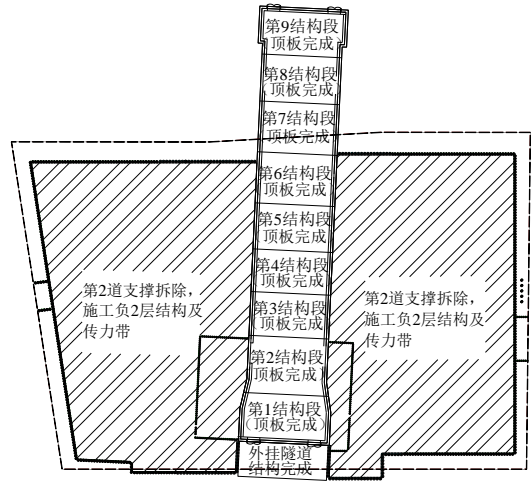
本项基坑: J2和Y2按照分层分块要求对称开挖至第2道撑底 (-9.750m), 施工第2道支撑; 其中地铁15m范围 (J1-2和Y1-2) 按照1~6区的顺序开挖;
地铁基坑: 第1~9结构段进行主体结构施工, 部分结构段中板完工。

(6) 工况六



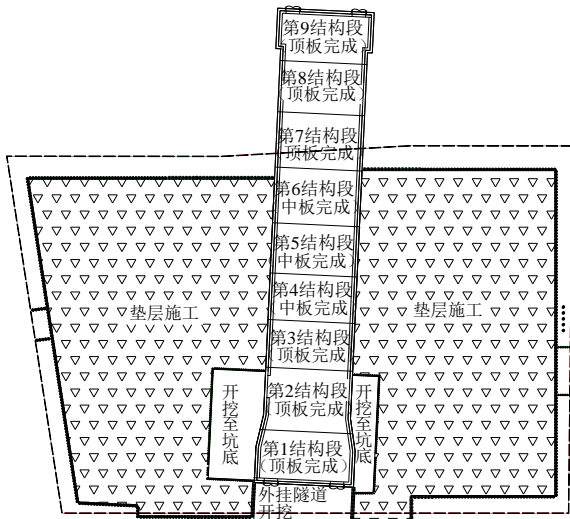
本项基坑：J3和Y3按照分层分块要求对称开挖至坑底（-12.350 m和-12.100 m）；其中地铁15 m范围（J1-2和Y1-2）按照1~6区的顺序开挖；
地铁基坑：第1~9结构段进行主体结构施工，部分结构段顶板完工。

(7) 工况七



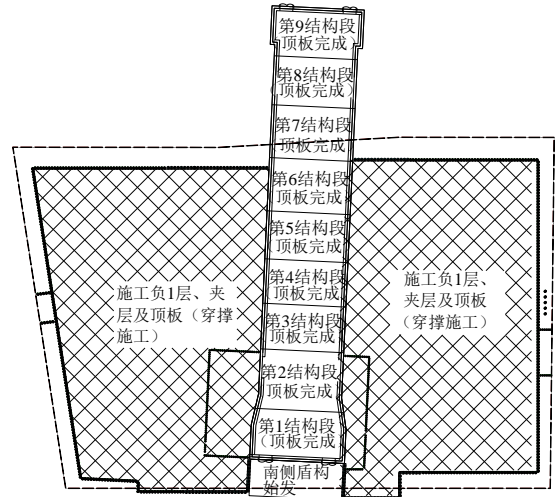
本项基坑：近江和远江侧基坑第2道支撑拆除，施工负2层结构及传力带；
地铁基坑：第1~9结构段主体结构施工完毕，南端外挂隧道结构完成。

(10) 工况十



本项基坑：近江和远江侧施工基础底板及传力带；
地铁基坑：第1~9结构段进行主体结构施工，部分结构段顶板完工，南端外挂隧道开始开挖。

(8) 工况八

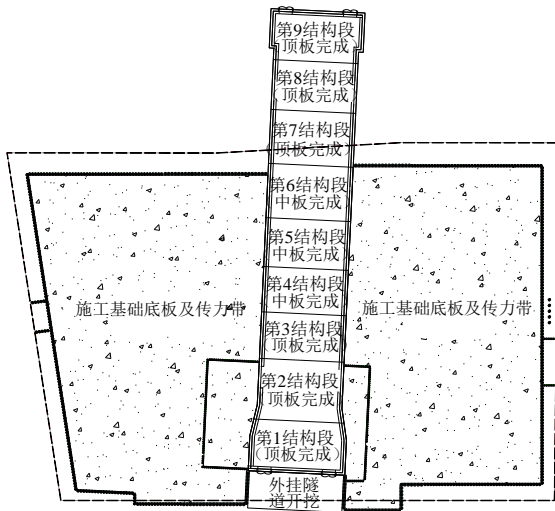


本项基坑：近江和远江侧基坑施工负1层、夹层和地下室顶板（穿撑施工）；
地铁基坑：第1~9结构段主体结构施工完毕，南侧盾构始发。

(11) 工况十一

图7 商办基坑与地铁车站交叉施工工况图

Fig. 7 Cross construction working condition diagram of commercial foundation pit and subway station



本项基坑：近江和远江侧施工基础底板及传力带；
地铁基坑：第1~9结构段进行主体结构施工，部分结构段顶板完工，南端外挂隧道开始开挖。

(9) 工况九

4 有限元数值模拟

4.1 三维 Midas 数值分析

本次模拟土体材料本构模型采用修正摩尔-库伦模型，它可以考虑土体的压缩硬化和剪切硬化特性，屈服面随塑性应变的发生而扩张。大量用于基坑开挖、盾构隧道推进等工程的有限元模拟，模拟结果与实际情况吻合较好。

围护桩按照抗弯刚度相等的原则等价为一一定厚度的地连墙进行内力分析。商办基坑围护墙、地铁车站结构（地连墙）、公路隧道均采用板单元模拟；栈桥、支撑、地铁车站柱采用梁单元模拟；地铁车站基础桩采用植入式梁单元模拟。主要模型参数详见表4~5。模型约束条件为通过在模型底部施

加完全约束, 两侧竖向边界施加滑动约束来实现。模拟工况详见表 6, 主要工况下地铁车站地连墙内力位移计算结果详见表 7, 主要工况下地铁车站结

构板最大竖向位移计算结果详见表 8。在 Midas GTS NX 中建立模型如图 8 所示, 模型长 300 m, 宽 270 m, 高 70 m。

表 4 土体 HSS 模型参数
Table 4 Parameters of soil mass's HSS model

序号	岩土名称	E_s/MPa	E_{50}/MPa	E_{oed}/MPa	E_{ur}/MPa	G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$
1	杂填土	(4.00)	(4.00)	4.00	20.00	60.00	1.5×10^{-4}
2	粉土	10.60	10.60	10.60	53.00	159.00	1.5×10^{-4}
3	粉砂	10.38	10.38	10.38	51.90	155.70	1.5×10^{-4}
4	淤泥质粉质黏土	3.09	3.09	3.09	24.72	74.16	1.5×10^{-4}
5	粉质黏土	6.58	6.58	6.58	32.90	98.70	1.5×10^{-4}
6	粉砂	10.68	10.68	10.68	53.40	160.20	1.5×10^{-4}
7	圆砾	30.00	30.00	30.00	150.00	450.00	1.5×10^{-4}
8	砂砾岩	50.00	50.00	50.00	250.00	750.00	1.5×10^{-4}

注: (1) 上表中参数为根据土性对土层进行归并后得出; (2) 表中()内的数值为土层参数经验值。

表 5 结构材料参数
Table 5 Structural material parameters

名称	材料类型	轴向刚度 $EA/(\text{kN}/\text{m}$ 或 $\text{kN})$	抗弯刚度 $EI/(\text{kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ 或 $\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	泊松比
车站 800 mm 厚地连墙	弹性	34.500×10^6	2.880×10^6	0.20
车站顶板	弹性	37.950×10^6	3.830×10^6	0.20
车站中板	弹性	31.050×10^6	2.100×10^6	0.20
车站底板	弹性	41.400×10^6	4.970×10^6	0.20
车站框架柱	弹性	37.800×10^6	—	0.20
1 m 地连墙	弹性	22.500×10^6	1.880×10^6	0.20
钢筋混凝土支撑	弹性	18.000×10^6	—	—
地下室底板	弹性	30.000×10^6	2.500×10^6	—

表 6 三维数值模拟施工步骤表
Table 6 Table of construction steps for 3D numerical simulation

施工工况	本基坑	地铁基坑
初始阶段	自重应力场平衡	
工况一	围护桩、立柱桩施工	地连墙施工, 冠梁及第 1 道支撑施工
工况二	远江: 栈桥区域桩基施工; 其余区域开挖至第 1 道撑底	第 1~3 层土方开挖, 第 3 道混凝土支撑施工
工况三	远江: 栈桥区域开挖至第 1 道撑底, 施工栈桥; 其余区域进行第 1 道支撑施工	第 1~3 层土方开挖, 第 3 道混凝土支撑施工
工况四	近江: 栈桥区域留土; 其余区域开挖至第 1 道撑底	
工况四	远江: 支撑及栈桥养护	第 1~3 层土方开挖, 第 3 道混凝土支撑施工
工况四	近江: 栈桥区域桩基施工; 其余区域进行第 1 道支撑施工	
工况五	远江: 支撑及栈桥养护	第 4~6 层土方开挖, 施工底板垫层
工况五	近江: 栈桥区域开挖至第 1 道撑底, 施工栈桥	
中间步	将地铁开挖过程中产生的位移清零	
工况六	开挖至第 2 道撑底, 施工第 2 道支撑	主体结构施工, 部分结构段中板完工
工况七	开挖至坑底	进行主体结构施工, 部分结构段顶板完工
工况八	施工底板垫层	主体结构施工, 部分结构段顶板完工; 南端外挂隧道开始开挖
工况九	施工基础底板及传力带	主体结构施工, 部分结构段顶板完工; 南端外挂隧道开始开挖
工况十	拆除第 2 道支撑, 施工负 2 层结构及传力带	主体结构施工完毕; 南端外挂隧道结构完成
工况十一	拆除第 1 道支撑, 施工负 1 层、夹层和地下室顶板	主体结构施工完毕; 南侧盾构始发

表7 主要工况下地铁车站地连墙内力位移计算结果

Table 7 Calculated results of internal force and displacement of subway station diaphragm wall under main working conditions

主要工况	车站地连墙(最大值)		
	水平位移/mm	弯矩/(kN·m/m)	剪力/kN
三	3.96	551	298
五	5.91	743	487
九	5.61	1 464	551
十一	5.59	1 479	687

表8 主要工况下地铁车站结构板最大竖向位移计算结果

Table 8 Calculated results of maximum vertical displacement of subway station structural plate under main working conditions

主要工况	车站结构板最大竖向位移/mm			
	顶板	负1层板	负2层板	底板
九	—	4.59	4.91	4.29
十一	4.54	4.59	4.91	4.29

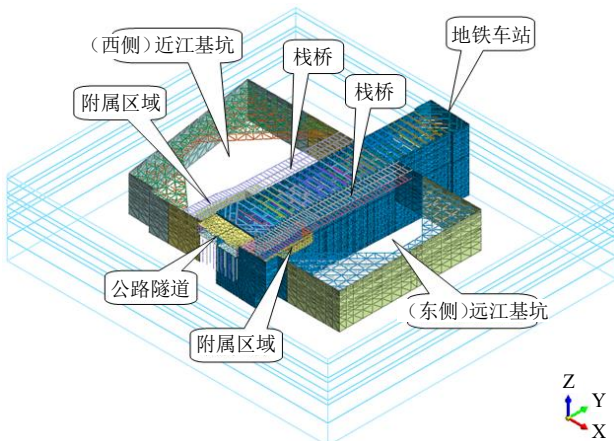


图8 三维 Midas 数值计算模型

Fig. 8 Three-dimensional Midas numerical calculation model

4.2 三维计算结果

本次分析使用 Midas GTS NX 软件对本基坑对紧邻的地铁6号线博览站的影响进行了三维有限元分析,计算了基坑施工对车站的水平位移、竖向位移、弯矩、剪力等的影响。通过对数值计算结果的整理分析研究可知,基坑开挖对车站的影响较小。

5 商办基坑开挖对地铁车站结构影响计算

5.1 车站地连墙受力验算

车站总长约190 m,标准段总宽约31 m,地下连续墙厚1 m,围护墙深度57.25 m。采用北京理正深基坑辅助设计软件(7.0版)对地铁博览站主体结

构标准段地下连续墙配筋进行验算,结果如表9所示。

表9 地铁车站主体结构标准段地下连续墙配筋验算结果

Table 9 Checking calculation results of reinforcement for underground continuous walls in the main structure standard section of subway station

对应位置	计算配筋面积	实际配筋面积
基坑内侧纵筋	9 959	10 723
基坑外侧纵筋	6 933	8 210

结果显示车站地连墙配筋满足要求。

5.2 车站墙体裂缝计算

采用北京理正结构设计工具箱软件(7.0版)对车站墙体裂缝进行计算。

根据三维有限元数值计算结果,车站地连墙弯矩最大值为1 479 kN·m,剪力最大值为687 kN。

裂缝宽度验算,按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[12] 7.1.2条采用公式如下:

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (2)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (3)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_p}{A_{te}} \quad (4)$$

式中: α_{cr} 为构件受力特征系数; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数,当 $\psi < 0.2$ 时,取 $\psi = 0.2$,当 $\psi > 1.0$ 时,取 $\psi = 1.0$,对直接承受重复荷载的构件,取 $\psi = 1.0$; σ_s 为按荷载准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋应力或按标准组合计算的预应力混凝土构件纵向受拉钢筋等效应力; E_s 为钢筋的弹性模量; c_s 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离,当 $c_s < 20$ 时,取 $c_s = 20$,当 $c_s > 65$ 时,取 $c_s = 65$; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率,对无粘结后张构件,仅取纵向受拉普通钢筋计算配筋率,在最大裂缝宽度计算中,当 $\rho_{te} < 0.01$ 时,取 $\rho_{te} = 0.01$; A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积,对轴心受拉构件,取构件截面面积,对受弯、偏心受压和偏心受拉构件,取 $A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f$,此处, b_f 、 h_f 为受拉翼缘的宽度、高度; A_s 为受拉区纵向普通钢筋截面面积; A_p 为受拉区纵向预应力筋截面面积; d_{eq} 为受拉区纵向钢筋

的等效直径, 对无粘结后张构件, 仅为受拉区纵向受拉普通钢筋的等效直径; d_i 为受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径; 对于有粘结预应力钢绞线束的直径, 其中 d_{p1} 为单根钢绞线的公称直径, n_1 为单束钢绞线根数; n_i 为受拉区第 i 种纵向钢筋的根数, 对于有粘结预应力钢绞线, 取为钢绞线束数; v_i 为受拉区第 i 种纵向钢筋的相对粘结特性系数。

上述参数取值如下:

$$\alpha_{cr} = 1.9$$

$$h_0 = h - a = 6000 - 35 = 5965 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sq} = \frac{M_q}{0.87h_0A_s} =$$

$$6.30 \times 10^8 \div 0.87 \div 5965 \div 603 = 201.3231 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{te} = 0.5bh = 0.5 \times 1000 \times 6000 = 3000000 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{te} = A_s \div A_{te} = 603 \div 3000000 = 0.0002$$

$$\rho_{te} = 0.0002 < 0.01, \text{ 取 } \rho_{te} = 0.01$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \times 2.2 \div 0.01 \div 201.3231 = 0.3897$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} = 28.00 \text{ mm}$$

$$\omega_{max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) =$$

$$1.9 \times 0.3897 \times 201.3231 \times (1.9 \times 25 + 0.08 \times 28 \div 0.01) \div 200000 = 0.202 \text{ mm}$$

即最大裂缝宽度: $0.20 \text{ mm} < \omega_{max} = 0.30 \text{ mm}$, 满足要求。

6 地铁车站两侧不同步开挖产生的不平衡力影响分析

6.1 计算概况

采用的分析计算模型网格划分如图 9 所示。

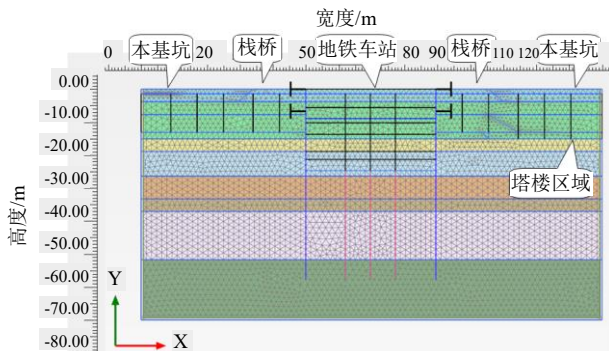


图 9 地铁车站两侧不同步开挖二维模型网格划分图

Fig. 9 Grid division diagram of two-dimensional model for asynchronous excavation on both sides of subway station

针对后续土方开挖过程中可能出现的车站两侧不同步开挖, 选取工况六及工况七 2 个工况进行不平衡力影响分析。按远江基坑先开挖, 且车站两侧至多只相差 1 个开挖工况来考虑。模拟工况详见表 10。

表 10 数值计算施工步骤表

Table 10 Numerical calculation construction procedure table

施工工况	近江基坑	远江基坑
工况六	开挖至第 2 道撑底, 施工第 2 道支撑	开挖至大地库坑底
工况七	开挖至大地库坑底	开挖至塔楼坑底

6.2 计算结果

2 个工况下的地铁车站围护墙内力位移计算结果详见表 11~12。

表 11 工况六地铁车站围护墙内力位移情况一览表

Table 11 Table of internal force and displacement of the retaining wall of metro station under condition 6

计算项目	最大水平位移	最大弯矩	最大剪力
	S_{max}/mm	$M_{max}/(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$	Q_{max}/kN
近江侧地连墙	3.02	2 621	1 118
远江侧地连墙	5.65	2 767	1 137

表 12 工况七地铁车站围护墙内力位移情况一览表

Table 12 Table of internal force and displacement of the retaining wall of metro station under condition 7

计算项目	最大水平位移	最大弯矩	最大剪力
	S_{max}/mm	$M_{max}/(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$	Q_{max}/kN
近江侧地连墙	5.64	2 175	761.0
远江侧地连墙	6.49	2 150	745.4

结果显示, 车站两侧地连墙的水平位移及受力有较明显的不平衡情况, 先行开挖区域的地连墙变形及内力大于后开挖区域的地连墙。

6.3 结果分析

通过对上述结果进行对比分析, 可见当车站两侧土方高差较大时 (高差 $\geq 2 \text{ m}$), 车站两侧地连墙的水平位移及受力不平衡也较明显。若第 2 道支撑以下土方开挖过程中出现车站两侧不同步情形时, 评估意见如下:

(1) 地铁车站两侧 15 m 宽栈桥下部土方要求严格对称开挖;

(2) 车站两侧 15 m 以外至多只能相差 1 个开挖工况, 比如: 近江基坑开挖至第 2 道支撑底时, 远江基坑只能开挖至大地库坑底, 不得再往下开挖; 且两侧高差不得超过 6 m。

7 结 论

(1) 本文对商办基坑与地铁车站交叉施工的影响进行了有限元分析, 计算了基坑施工对轨道交通设施的水平位移、竖向位移、弯矩、剪力等的影响。经与车站地连墙理正计算结果对比, 地连墙位移、弯矩、剪力变化趋势一致, 数值接近。

(2) 采用北京理正深基坑辅助设计软件对地铁博览站主体结构标准段地下连续墙配筋进行了验算, 车站地连墙配筋(受力)满足要求。采用了北京理正结构设计工具箱软件计算出车站墙体最大裂缝宽度也满足要求。

(3) 针对后续土方开挖过程中可能出现的车站两侧不同步开挖, 选取工况六及工况七2个工况进行不平衡力影响分析。分析得出当车站两侧土方高差较大时, 车站两侧地连墙的水平位移及受力不平衡也较明显。故建议第2道支撑以下土方按后浇带分区施工, 车站两侧同步开挖, 严格控制地铁车站两侧受力平衡。

参考文献

- [1] 徐良仲, 赖小勇, 李慧慧. 基于已有实测数据的深基坑开挖对邻近地铁车站影响的实例简析[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 238-245.
XU Liang-zhong, LAI Xiao-yong, LI Hui-hui. Case study on impact of deep excavation on adjacent subway tunnels based on the existing measured data[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 238-245.
- [2] 邢威威. 新建基坑对邻近在建地铁车站结构的影响研究[J]. 公路与汽运, 2020(5): 145-149, 152.
XING Wei-wei. Research on the influence of newly built foundation pit on the structure of adjacent subway stations under construction[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(5): 145-149, 152.
- [3] 杨溢军. 新建基坑工程对苏州地铁某在建车站影响分析研究[J]. 广东建材, 2016, 32(12): 45-48.
YANG Yi-jun. Analysis and research on the impact of new foundation pit engineering on a station under construction in Suzhou Metro[J]. Guangdong Building Materials, 2016, 32(12): 45-48.
- [4] 童琳, 茅利华. 地铁车站深基坑与紧邻的深基坑工程同步施工技术[J]. 建筑施工, 2007, 29(8): 579-580.
TONG Lin, MAO Li-hua. Synchronized construction technology for deep foundation pit engineering between subway station and adjacent one[J]. Building Construction, 2007, 29(8): 579-580.
- [5] 任亚亮. 基坑工程施工对邻近在建地铁车站基坑围护结构安全影响分析[J]. 科学技术创新, 2021(20): 120-122.
REN Ya-liang. Analysis of the safety impact of foundation pit construction on the surrounding structure of adjacent subway stations under construction[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(20): 120-122.
- [6] 陈涛. 新建深基坑工程对邻近在建地铁车站深基坑的影响研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2021(2): 40-42.
CHEN Tao. Research on the impact of new deep foundation pit engineering on the deep foundation pit of adjacent subway stations under construction[J]. Engineering Technology, 2021(2): 40-42.
- [7] 丁习富, 师海, 孟小伟. 深基坑开挖与紧邻在建地铁车站影响优化分析[J]. 山西建筑, 2014, 40(15): 54-56.
DING Xi-fu, SHI Hai, MENG Xiao-wei. The optimization analysis of foundation excavation and the subway station nearby under construction[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(15): 54-56.
- [8] 叶翔, 李正青, 史松波, 等. 绍兴国际会展中心与地铁车站毗邻深基坑同步施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(13): 37-42, 46.
YE Xiang, LI Zheng-qing, SHI Song-bo, et al. Synchronous construction technology of Shaoxing international convention and exhibition center foundation excavation and adjacent subway station deep foundation excavation[J]. Construction Technology, 2022, 51(13): 37-42, 46.
- [9] 曹洋. 深基坑开挖对在建地铁车站变形影响分析[J]. 建材与装饰, 2018(51): 2-4.
CAO Yang. Analysis of the influence of deep foundation pit excavation on the deformation of subway stations under construction[J]. Construction Materials & Decoration, 2018(51): 2-4.
- [10] 李辉. 地铁与紧邻地块深基坑同步开挖相互影响分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 65-69.
LI Hui. Mutual influence analysis of simultaneous excavation of subway and adjacent block deep foundation pits[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019,

36(4): 65-69.

[11] 浙江省住房和城乡建设厅. 建筑基坑工程技术规程: DB33/T 1096—2014[S]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2014.

Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban Rural Development. Technical Specification for Building Foundation Excavation Engineering: DB33/T 1096—2014[S]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University Press, 2014.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国

国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 2015年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. 2015 Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.



(上接第 5 页)

CHEN Wen-ping. Supporting design and deformation rule study of deep foundation pit[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.

[9] 赵乃志, 陈桂凤, 高文韬, 等. 不同开挖工况下软土基坑阳角壁变形及坑角效应[J]. 四川建材, 2020, 46(4): 57-58.

ZHAO Nai-zhi, CHEN Gui-feng, GAO Wen-tao, et al.

Research of the deformation of positive corner wall for soft soil excavation and corner effects under different excavation conditions[J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(4): 57-58.

[10] 徐中华, 王卫东. 深基坑变形控制指标研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 619-626.

XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Deformation control criteria of deep excavations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 619-626.