

换乘枢纽处后建基坑设计及对周边环境的影响分析*

孙 波

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

摘 要 [目的] 针对换乘枢纽区域后续建设的基坑开挖工程, 面临周边环境高度敏感、工程边界条件复杂、施工制约因素众多及既有结构保护难度显著等技术挑战, 有必要深入分析换乘枢纽处后建基坑的设计方案及其对周边环境的影响。[方法] 以位于深厚粉砂地层中的某高铁与地铁换乘枢纽处的明挖地下空间工程项目为例, 阐述了基坑的总体设计方案。利用有限元软件, 对该基坑施工的全过程进行了三维数值模拟, 评估了地下空间施工活动对周边既有结构可能产生的影响。随后, 将模拟结果与现场监测数据进行对比分析, 验证了设计方案的合理性, 并对设计过程中的经验进行了系统总结。[结果及结论] 换乘枢纽区域的基坑工程需全面考量周边环境条件、各单体建筑的平面布局与开挖深度, 协调各参建单位, 优先采用共建方案, 以缩减临时工程量, 实现多方利益最大化。TRD(渠式切割水泥土连续墙) 结合内插型钢支护体系, 在止水方面表现出色, 适用于基坑深度适中但透水层深厚、周边环境复杂且止水要求严苛, 需将止水帷幕延伸至不透水层的基坑工程。此外, 换乘枢纽处的后建基坑工程应充分考虑先建各单体的保护范围, 通过科学的基坑分段与开挖顺序, 有效减轻对既有结构的不利影响。

关键词 轨道交通; 换乘枢纽; 后建基坑工程; 基坑共建; 渠式切割水泥土连续墙 + 内插型钢支护; 分坑设计

中图分类号 TV551.4⁺2:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.012

Post-construction Foundation Pit Design at Interchange Hub and Impact Analysis on Surrounding Environment

SUN Bo

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

Abstract [Objective] The excavation work for the subsequent foundation pit at interchange hub area faces technical challenges such as highly sensitive surrounding environments, complex project boundary conditions, numerous construction constraints, and significant difficulties in protecting existing structures. Therefore, it is essential to analyze the design plan for the subsequent foundation pit at the interchange hub and its impact on the surrounding environment in depth. [Method]

Using an open-cut underground space engineering project of high-speed railway and metro interchange hub located in deep silty soil layers for case study, the overall design scheme of the foundation pit is introduced. Finite element software is used to perform a 3D numerical simulation of the entire construction process, evaluating the potential impact of underground space construction activities on the surrounding existing structures. The simulation results are then compared with on-site monitoring data to verify the reasonableness of the design plan and systematically summarize the experiences gained during the design process. [Result & Conclusion] It needs to fully consider surrounding environmental conditions for the foundation pit project in the interchange hub area, the layout of individual buildings and excavation depth, coordinate the involved construction units, and prioritize the adoption of a co-construction plan to reduce temporary engineering work and maximize the interests of all parties. TRD (trench-cutting re-mixing deep wall method) + inserted steel bracing system performs excellently in water retention, and is suitable for foundation pit projects with moderate depth, thick permeable layers, complex surrounding environments, and stringent water retention requirements, where the water curtain must extend to the impermeable layer. Furthermore, the subsequent foundation pit construction at interchange hub should be fully integrated into the protection scope of the previously constructed individual buildings. Through scientific segmentation and excavation sequencing, the adverse impact on existing structures can be effectively mitigated.

Key words rail transit; interchange hub; post-construction foundation pit engineering; foundation pit co-construction; TRD + inserted steel bracing; split pit design

随着我国地铁建设的迅猛推进和城市开发强度的持续提升, 在既有地铁车站与区间隧道周边开展地下空间开发的活动日益频繁。此类施工活动打破了原有的地应力平衡状态, 导致既有结构承受额外的内力和变形, 对轨道交通的安全运营构成了严峻挑战。尽管当前关于在既有隧道和车站周边

* 国家重点研发计划项目(2022YFC3800900)

进行基坑开挖的工程实践及研究已相对丰富,主要针对外部环境相对单一的场景^[1-5],然而,针对综合换乘枢纽区域基坑开挖的研究分析却相对匮乏。随着换乘枢纽功能需求的不断提升,此类工程案例将不断涌现,其复杂性与既有结构保护难度亦随之增大。

本文以深厚粉砂地层中的某高铁与地铁换乘枢纽地下空间工程为实例,阐述了基坑的总体设计方案。借助有限元软件 MIDAS GTS,构建了三维数值模型,深入分析了地下空间施工活动对周边既有结构的影响。通过与现场监测数据的对比分析,验证了设计方案的合理性与有效性,并对设计过程中的宝贵经验进行了系统总结。本研究成果可为同类工程提供有益的参考与借鉴。

1 工程概况

1.1 周边环境条件

余杭高铁北广场地下空间工程坐落于余杭区南苑街道,地理位置优越,项目总建筑面积达 25 880 m²,基坑普遍开挖深度为 8.90 m。该地下空间工程主要包括地下一层停车场及商业配套区域。图 1 为余杭高铁北广场地下空间工程的平面布置图。

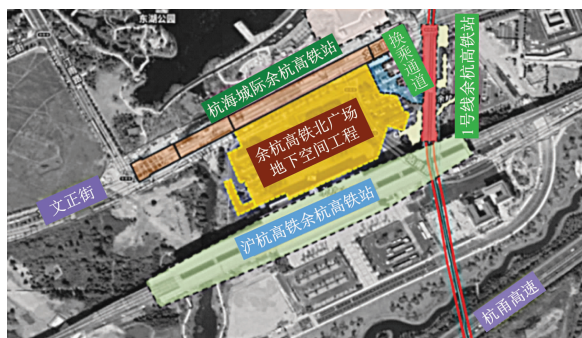


图1 余杭高铁北广场地下空间工程平面布置图

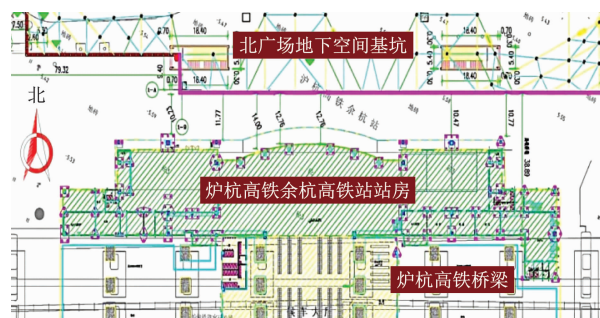
Fig.1 Layout of Yuhang High-speed Railway Station North Square underground space engineering plan

本项目周边环境错综复杂,北侧紧邻在建的杭海城际余杭高铁站,该站为地下三层结构,总长为 480 m,总宽为 22 m,底板埋深约为 25 m,采用 1 000 mm 厚的地下连续墙作为围护结构,墙深达 51 m。目前,杭海城际余杭高铁站主体结构已竣工,但其南侧附属结构(包括 H1 和 H2 号出入口、A 号合建出入口及其子结构 A1 和 A2)尚未施工,且均位于本工程范围内。

项目东北角紧邻杭海城际换乘通道,该通道连

接杭海城际余杭高铁站地下二层与既有运营的杭州地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)余杭高铁站地下一层。换乘通道为地下一至两层结构,底板埋深介于 9.5 ~ 18.1 m,围护结构采用 600 mm 或 800 mm 厚的地下连续墙,墙深为 25.0 ~ 40.0 m。目前换乘通道已施工完成。

项目东侧为 1 号线余杭高铁站,其主体结构为地下两层车站,总长为 176.0 m,总宽为 20.7 m,底板埋深约为 16.20 m;围护采用厚 800 mm 的地下连续墙,墙深约为 30.2 m;1 号线区间隧道内径为 5.5 m,管片厚度为 350 mm,隧道顶埋深约为 9.50 m。目前 1 号线正处于运营状态。沪杭高铁站房及桥梁的基础平面图如图 2 所示。



注:数值单位为 m。

图2 沪杭高铁站房和桥梁基础平面图

Fig.2 Plan of Shanghai-Hangzhou High-speed Railway station building and bridge foundation

项目南侧毗邻运营中的沪杭高铁余杭高铁站站房及其桥梁。站房采用高架形式,基础结构主要由管桩构成,管桩直径为 50 cm,长度介于 22 ~ 24 m 之间,桩端嵌入④粉砂层,整体基础结构相对薄弱。高铁桥墩的桩基设计为摩擦桩,桩长范围在 55 ~ 59 m 之间。北广场地下空间与沪杭高铁桥梁桥墩的最小距离约为 41.3 m,而与站房建筑外边缘的最小距离约为 12.4 m。

项目西侧为现有农田与乔司港河道,基坑与现有河道的最近距离约为 22.3 m,河道宽度约为 21.0 m,水深在 1.0 ~ 1.5 m 之间。

1.2 工程地质及水文概况

场地土层自上而下依次分布着①杂填土、②黏质粉土、②₂砂质粉土、④粉砂、⑤粉质黏土、⑥黏土、⑦粉质黏土夹粉土、⑧黏土、⑨粉质黏土,各土层物理力学参数见表 1。场内地下水主要为第四系孔隙潜水,储存于浅部①杂填土、②层粉土与中部④粉砂之中,含水量丰富,渗透性良好。

表 1 各土层物理力学参数指标

Tab.1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

层号	岩土名称	重度/ (kN/m^3)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	水平渗透系数/ (cm/s)	垂直渗透系数/ (cm/s)
①	杂填土	19.0	7.0	15.0		
② ₁	黏质粉土	18.68	12.2	22.4	9.3×10^{-4}	7×10^{-4}
② ₂	砂质粉土	19.03	7.1	27.8	3.4×10^{-4}	2.1×10^{-4}
④	粉砂	19.21	6.1	28.4	4.3×10^{-3}	3.2×10^{-3}
⑤	粉质黏土	18.42	17.2	16.7	6.3×10^{-5}	4×10^{-5}
⑥	黏土	18.95	50.9	20.5	4.3×10^{-6}	3.1×10^{-6}
⑦	粉黏夹粉土	18.59	25.8	17.3		
⑧	黏土	18.73	45.7	19.4		
⑨	粉质黏土	18.57	38.3	16.9		

2 设计方案

2.1 基坑总体设计方案

余杭高铁北广场地下空间工程坐落于既有杭海城际铁路、杭州地铁 1 号线及沪杭高铁所围成的区域内。该地下空间基坑范围内还包括在建的杭海城际铁路附属结构,且这些附属结构的基坑深度显著超过原地下空间的基坑深度。因此,本工程不仅涉及地铁车站附属结构的深基坑,还包含宽大的地下空间工程基坑,这使得基坑的总体设计方案显得尤为重要。图 3 为余杭高铁北广场地下空间的平面图。

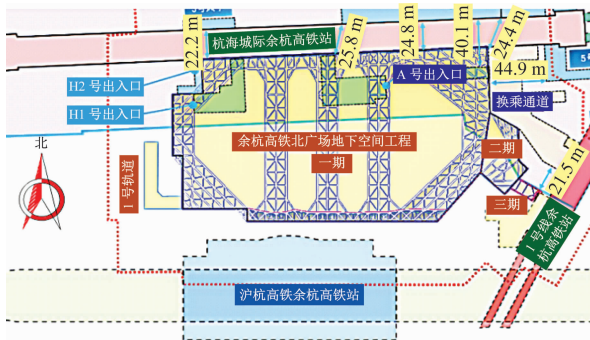


图 3 余杭高铁北广场地下空间平面图

Fig.3 Plan of Yuhang High-speed Railway Station North Square underground space

余杭高铁北广场地下空间的北侧紧邻杭海城际铁路余杭高铁站主体。为了节约工程造价并缩短工期,经过相关参建单位的综合协调与考量,决定采用基坑共建方案。余杭高铁站主体、两层附属结构及换乘通道的基坑深度均明显大于地下空间基坑的深度。综合考虑后,共建方案确定为:首先进行 H2 结构和换乘通道的施工,待两者施工完成后,北广场地下空间基坑北侧将借用余杭高铁站主体和 H2 结构的围护地下连续墙,东北角则借用换

乘通道的围护地下连续墙,共计借用围护结构长度约 350 m。

杭海城际铁路余杭高铁站附属结构 A1、A2、H1 位于余杭高铁北广场地下空间基坑范围内,共建方案如下:基坑整体开挖至北广场地下空间坑底后,进行地下空间底板结构的浇筑。待底板结构强度满足要求后,再开挖共建范围内的 A1、A2、H1 号附属基坑(作为坑中坑处理)。余杭高铁北广场地下空间与杭海城际附属基坑的共建示意图见图 4。

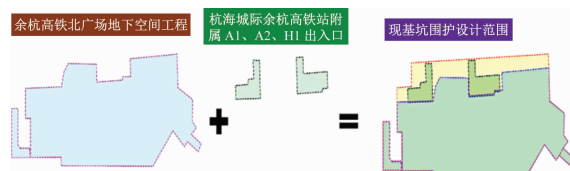


图 4 北广场地下空间与杭海城际附属基坑共建示意图

Fig.4 Diagram of North Square underground space and Hangzhou-Haining Intercity Railway affiliated foundation pit co-construction

对于北广场地下空间工程,通过借用杭海城际余杭高铁站的地下连续墙,显著减少了临时围护结构的工程量,并有效增加了地下空间的使用面积。同时,对于杭海城际附属结构而言,仅需单独施工北广场地下空间工程中的坑中坑部分,使得附属基坑的深度大幅减少,从而大幅降低了工程费用。经精确计算,采用基坑共建方案共节省工程造价约 1 600 万元。

另外,为确保既有 1 号线的安全,结合大基坑的具体形状,大基坑被划分为一期、二期、三期 3 个子基坑进行支护设计,具体布局见图 3。施工遵循一期基坑→二期基坑→三期基坑的顺序。经过分坑设计,一期基坑位于既有 1 号线 50 m 保护范围线之外,有效降低了大基坑对 1 号线可能产生的负面

影响。

2.2 TRD(渠式切割水泥土连续墙)+内插型钢支护方案

余杭高铁北广场地下空间西侧紧邻乔司港河道,工程场地土层主要由深厚的粉土和粉砂层构成,含水量高且渗透性强,而不透水层(⑥层黏土)的埋深较大,约为30 m。鉴于工程周边环境的敏感性,基坑围护结构必须采取严格的止水措施,以防止坑外地下水通过围护桩间或桩底流入基坑内部,进而避免因坑外地下水位下降导致既有结构产生过大变形。

经过综合比较,地下空间基坑创新性地采用了TRD+内插型钢的围护结构。TRD工法是一种通过链锯式切割土体并灌注水泥浆,从而形成等厚水泥土地下连续墙的工艺。本基坑将TRD的止水帷幕与内插型钢相结合,在TRD水泥土浆液尚未硬化前插入型钢。待主体施工完成后,型钢可拔出并回收。与地下连续墙和咬合桩相比,TRD+内插型钢具有施工速度快、造价经济的优势。与常规的SMW(水泥土搅拌桩墙)工法桩相比,TRD具有施工深度大、垂直度偏差小、止水效果好以及内插型钢间距可根据实际需求灵活调整的优点。鉴于本基坑位于深厚的粉砂土层中,且周边环境复杂、保护要求高,止水帷幕需深入不透水层,因此采用TRD作为止水帷幕能够满足桩底进入不透水层等要求。型钢的插入深度可根据基坑深度进行计算确定,无需插入至TRD墙底部,下部TRD素墙仅作为止水措施使用,具体支护方案见图5。

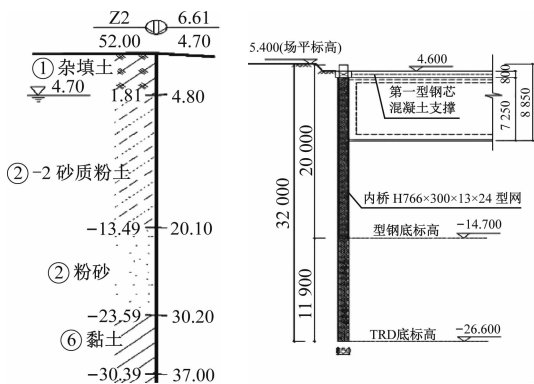


图5 TRD+内插型钢支护方案

Fig. 5 TRD + inserted steel bracing scheme

TRD+内插型钢工法适用于基坑深度适中,但透水层深厚、周边环境复杂且止水要求高,需将止水帷幕延伸至不透水层的基坑工程。

3 施工对周边建构筑物的影响

采用有限元软件 Midas GTS 进行弹塑性分析,所建模型的尺寸为 600 m × 450 m × 45 m。土体采用 HSS(小应变硬化)模型进行模拟,基坑支护墙和车站结构则采用弹性模型进行模拟,而内支撑则通过梁单元进行模拟。根据本基坑的围护设计方案,主要施工工况步骤包括:一期基坑开挖及内部结构施工→二期基坑开挖及内部结构施工→三期基坑开挖及内部结构施工。

杭海城际余杭高铁站主体结构、H2 附属结构以及换乘通道均与本地地下空间共享地下连续墙,因此基坑开挖对它们的影响较为明显。利用三维有限元软件进行计算,结果显示:施工全部竣工后,余杭高铁站主体结构的最大水平位移达到 8.79 mm,该位移发生在地下空间北侧中部的坑底附近,最大沉降值为 0.11 mm。换乘通道的最大水平位移为 6.58 mm,最大沉降值为 3.14 mm,而在车站主体与换乘通道的交接处,差异沉降值为 0.36 mm(见图6)。这些变形数据均符合相关规范^[6]的要求。

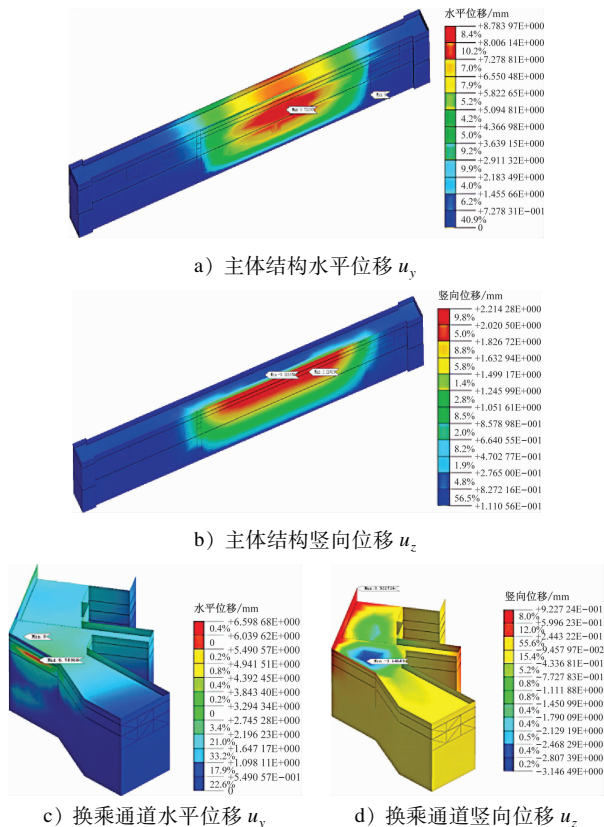


图6 杭海城际既有结构变形云图

Fig. 6 Nephogram of Hangzhou-Haining Intercity Railway existing structure deformation

目前,1 号线正处于运营状态,对变形的影响十分敏感。根据三维有限元软件的计算结果,施工完成后,1 号线车站主体结构的最大水平位移为 1.03 mm,最大沉降值为 0.18 mm;区间隧道的最大水平位移为 1.20 mm,最大沉降值为 0.27 mm;而在 1 号线车站与区间隧道的交接处,最大差异沉降值为 0.08 mm(见图 7)。这些变形同样满足相关规范^[6]的要求。

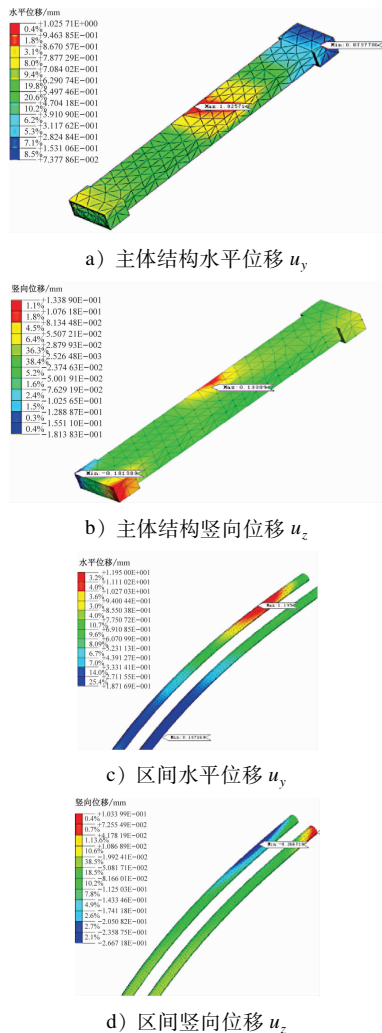


图 7 1 号线既有结构变形云图

Fig. 7 Nephogram of Line 1 existing structure deformation

沪杭高铁目前也在运营中,对变形控制的要求较为严格。三维有限元软件的计算结果显示:施工完成后,站房承台在 y 方向(横桥向,坑内方向)的最大位移为 1.455 mm,上浮最大值为 0.72 mm,沉降最大值为 0.582 mm,而站房相邻柱基的差异沉降最大值为 0.501 mm(见图 8 a)及图 8 b));高铁桥墩台顶在 y 方向(横桥向,坑内方向)的最大位移为

0.925 mm,最大沉降值为 0.095 mm(见图 8 c)及 8 d))。这些变形均符合相关规范^[7-8]的要求。

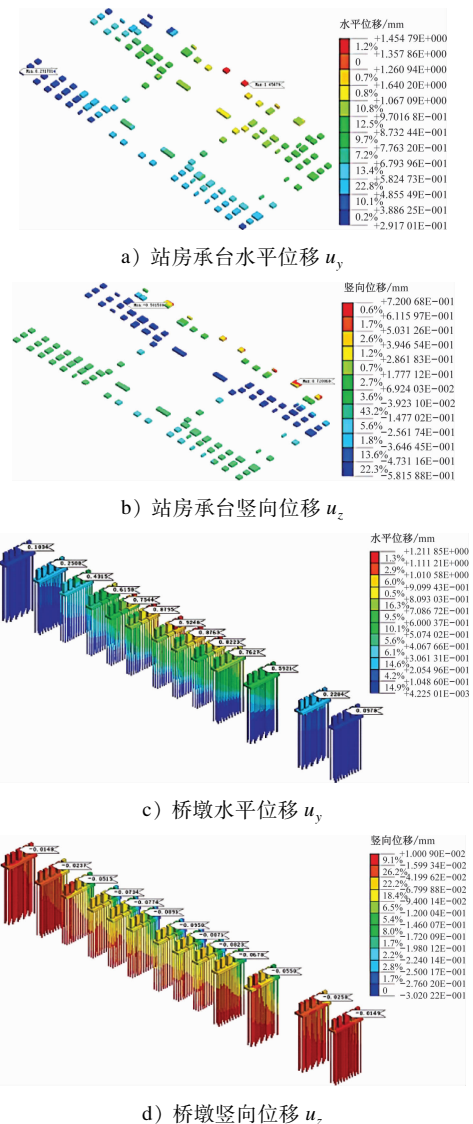


图 8 沪杭高铁既有结构变形云图

Fig. 8 Nephogram of Shanghai-Hangzhou High-speed Railway existing structure deformation

表 2 列出了施工完成后,部分既有结构关键点的监测数据与数值分析结果的对比。从表中可以看出,虽然少数监测结果略大于数值计算结果,但总体误差在可控范围内,这也间接验证了本文数值分析结果的可靠性。

综上所述,余杭高铁北广场地下空间工程在开挖及结构回筑过程中,对周边既有杭海城际主体结构、运营中的 1 号线、沪杭高铁站房及桥墩的结构变形均控制在标准范围内。

表 2 施工监测与数值分析结果对比表

Tab.2 Comparison table of construction monitoring and numerical analysis results

单位:mm

项目	地下空间 围护结构 变形	杭海城际			1 号线		沪杭高铁				
		车站主体 结构水平 位移	车站与 H2 交接处差 异沉降	车站与换 乘通道交 接处差异 沉降	车站主体 结构水平 位移	区间水平 位移	车站与区 间接口处 差异沉降	站房承台 水平位移	站房承台 竖向位移	桥墩台顶 横桥向 位移	桥墩台顶 竖向位移
分析结果	9.24	8.79	0.47	0.36	1.03	1.2	0.08	1.455	0.72	0.925	0.095
监测结果	10.00	8.90	0.90	0.70	1.10	2.1	0.30	1.500	0.90	1.000	0

4 结语

本文以深厚粉砂地层中的某高铁地铁换乘枢纽处的后建地下空间工程为研究对象,详细阐述了基坑的总体设计方案。通过采用有限元软件 Midas 进行模拟分析,评估了施工活动对周边既有结构的影响,进而验证了总体设计方案的合理性与经济性。基于上述研究,得出以下结论:

1) 在换乘枢纽处的基坑工程中,需全面考量周边环境条件、各单体建筑的平面布置及其深度,并协调各参建单位,优先采用共建方案,以有效减少临时工程投入,实现多方共赢的局面。

2) TRD + 内插型钢支护体系展现出优异的止水性能,特别适用于基坑深度适中,但透水层深厚、周边环境复杂且止水要求高,需将止水帷幕延伸至不透水层的基坑工程。

3) 对于换乘枢纽处的后建基坑工程,需充分考虑先建各单体的保护范围,通过科学合理的基坑分坑策略与开挖工序安排,最大限度地降低对既有结构的不利影响。

参考文献

[1] 高广运,高盟,杨成斌,等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 453.
GAO Guangyun, GAO Meng, YANG Chengbin, et al. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 453.

[2] 张治国,黄茂松,王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1373.
ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1373.

[3] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1421.
WEI Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit

excavation on below existed shield tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1421.

[4] 徐文腾. 软土地区近接既有地铁隧道明挖基坑施工技术分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
XU Wenteng. Analysis of construction technology about open-excavated foundation pit near existing subway tunnel in soft soil area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.

[5] 朱斌. 换乘车站基坑开挖及区间暗挖下穿施工对既有地铁站的变形控制及影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 176.
ZHU Bin. Deformation control and influence analysis of inter-change station foundation pit excavation and interval covered under-passing excavation on existing metro station[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 176.

[6] 浙江省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通设施结构安全保护技术规定:DB 33 T 1139—2017[S]. 杭州:浙江省住房和城乡建设厅,2017.
Department of Housing and Urban-Rural Development of Zhejiang Province. Technical regulations for safety protection of urban rail transit facilities; DB 33 T 1139—2017[S]. Hangzhou: Department of Housing and Urban-Rural Development of Zhejiang Province,2017.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation; GB 50007—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.

[8] 国家铁路局. 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程: TB 10182—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
National Railway Administration. Technical specification for highway and municipal engineering under crossing high speed railway; TB 10182—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.

· 收稿日期:2024-03-05 修回日期:2024-05-08 出版日期:2025-03-10
Received:2024-03-05 Revised:2024-05-08 Published:2025-03-10

· 通信作者:孙波,高级工程师,bosun20041016@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license