

综合交通枢纽地下深基坑分坑设计与变形分析

杨益平

(宁波枢纽建设开发有限公司, 浙江 宁波 315012)

摘要: 为了深入认识基坑群开挖对自身及周边环境的影响,探索有效的基坑群开挖变形控制措施,确保工程安全与高效实施。基于宁波市枢纽空铁一体主体工程综合交通中心(GTC)项目,按照“风险可控、成本最优、施工便利、工期节省”的原则,提出了合理的基坑群分坑与围护结构设计方案。通过对基坑群分区开挖的典型剖面进行数值建模分析,结果表明:合理的分坑方案以及围护体系加强措施对该类深大基坑群安全开挖具有显著效果。研究成果可为软土地区类似大规模基坑群设计与分坑优化提供参考。

关键词: 基坑工程;基坑群;有限元模拟;分坑措施

中图分类号: TU753

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0287-04

Pit Division Design and Deformation Analysis of Underground Deep Foundation Pit for Comprehensive Transportation Hub

YANG Yiping

(Ningbo Hub Construction and Development Co., Ltd., Ningbo 315012, China)

Abstract: In order to further understand the impact of excavation of the foundation pit group on the pit and the surrounding environment, the effective deformation control measures for excavation of foundation pits are explored to ensure the safety and efficient implementation of the project. Based on the Comprehensive Transportation Center (GTC) Project in the Ningbo Hub Air-Rail Integrated Main Project, a reasonable design scheme for the pit division and enclosure structure of the foundation pit group is proposed according to the principles of "controllable risk, optimal cost, convenient construction and time-saving". The numerical modeling analysis is conducted on the typical profiles of the zone excavation of the foundation pit group. The results show that a reasonable pit division scheme and the reinforcement measures for the enclosure system have had significant effects on the safe excavation of this type of deep and large foundation pit group. The research results can provide a reference for the design and pit division optimization of similar large-scale foundation pit groups in soft soil areas.

Keywords: foundation pit engineering; foundation pit group; finite element simulation; pit division measures

0 引言

随着城市化进程不断加快,地下综合交通枢纽的建设规模与复杂性日益增加。面对大面积、多深度的地下空间开发问题,对整体基坑进行分块设计是目前普遍采用的方式。但基坑分坑后共用围护结构的相邻基坑施工导致的相互影响也有所不同^[1-5]。由于施工过程中的相互作用与风险控制问题十分突出,基坑群建设问题也成为了地下交通枢纽建设中需关注的主要问题之一。因此,有必要深入分析基坑群开挖对自身及周边环境的影响,研究有效的基坑群开挖变形控制措施,为确保工程安全与高效实

施提供科学依据。

对于常规的软土深基坑,国内外已进行了数十年的工程实践,并基于大量实测数据提炼出许多实用的经验公式与统计结论^[6-7]。而对于基坑群目前研究主要有 2 个方面:一是关于相邻基坑存在下的土压力问题^[8-11],多位学者分别基于简化模型分析、库仑土压力理论以及极限平衡法等手段得出了相邻基坑间有限土体土压力的理论解;二是基坑群施工的相互影响问题^[12-15],既有研究中多运用数值模拟的方法,分析不同施工顺序、基坑间距、围护方案等多种因素对基坑变形与稳定性的影响,结果表明基坑群的开挖对基坑内力、变形以及周围环境均有较大影响,应对重点位置的围护结构进行加强,以满足基坑安全与变形控制要求。

本文基于宁波市枢纽空铁一体主体工程综合交

收稿日期: 2025-02-18

作者简介: 杨益平(1985—),男,硕士,高级工程师,从事枢纽片区建设工程设计、施工及前期等管理工作。

通中心(GTC)项目案例,主要探讨基坑群施工设计方案,并利用有限元软件分析基坑群相互作用影响规律,以指导后续基坑群信息化施工,为软土地区类似案例的开发建设积累实践经验。

1 工程概况

宁波市枢纽空铁一体主体工程综合交通中心(GTC)项目占地面积约26 hm²,基坑开挖面积约17.38万m²,GTC普遍地下二层区挖深达20.30 m,中部9号线落深区挖深达27.84~28.35 m,局部地下一层区挖深约12.20 m,配套业务用房基坑挖深约6.25~6.95 m,外接地下通道挖深约6 m,各区域挖深示意图如图1所示。

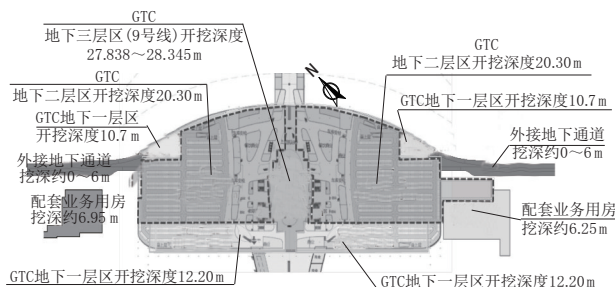


图1 基坑挖深平面分布示意图

根据岩土工程勘察报告,基坑开挖范围内主要以淤泥质土等深厚软土为主,如图2所示。

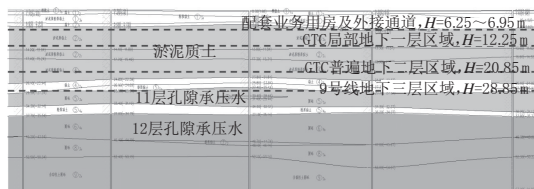


图2 典型地质剖面图

该项目属于超大深基坑工程,其主要面临着以下3个难点与特点:(1)基坑规模大、开挖深度差异大;(2)基坑分区建设筹划时应遵循先深后浅的原则,并兼顾基坑分区间相互影响、主体结构先后顺序、施工组织安排等,通过合理分区,以加快项目的整体实施进度;(3)场地地质条件复杂,基坑开挖面为软弱淤泥质土层,深层面临多层承压水问题。

2 基坑分区方案比选

基于不同挖深的区域分布现状,结合不同区域的功能分布及工期要求,提出3种分坑方案。

方案一:如图3所示,本方案考虑存在地上结构的中间的天之穹区域和两侧的旅客过夜用房区域,单独拆分独立的基坑先行实施(即图3中的①序基坑),相互之间设置两道临时隔断作为缓冲区基坑

(即图2中的②序基坑),待①序基坑地下室结构回筑至±0.000后再开挖②序基坑、西北侧及东北侧③序基坑,最后待②序基坑地下室结构回筑至±0.000后再开挖南侧③序基坑。

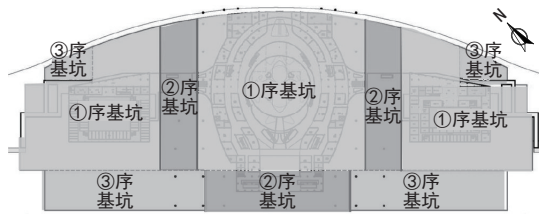


图3 基坑分坑方案一

方案一的优势在于基坑分坑实施可降低基坑实施风险;基坑工程实施前紧后松,可在前期投入大量力量主攻关键线路的基坑工程,后续在实施其他基坑时可同步进行①序基坑范围内的地上结构,分坑更具合理性和灵活性。

方案二:以方案一为基础,考虑挖深最深的9号线落深区域独立成坑,与存在地上结构的两侧旅客过夜用房区域间设置缓冲区,9号线区域和旅客过夜用房区域所在基坑先行实施(见图4中①序基坑);待①序基坑地下室结构回筑至±0.000后再开挖②序基坑,最后待②序基坑地下室结构回筑至±0.000后再开挖③序基坑。

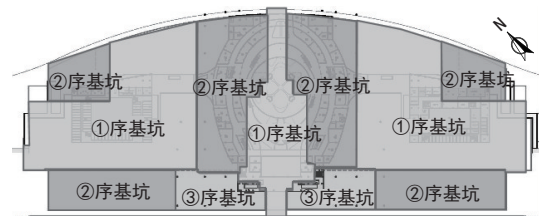


图4 基坑分坑方案二

方案二具备方案一的优点,且由于地铁9号线落深区所在的①序基坑面积相对较小,故①序基坑实施时间较方案一更快,有利于加快整个项目的实施进度。

如图5所示,方案三中旅客过夜用房所在的②序基坑需待①序基坑出地面后再施工,旅客过夜用房建设工期受影响;且工程总工期预计比方案一慢。但造价为3个方案中最低。

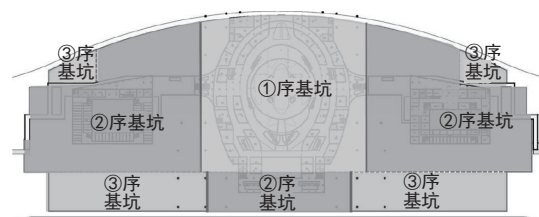


图5 基坑分坑方案三

按照“风险可控、成本最优、施工便利、工期节省”的原则综合考虑,项目最终选用方案二。

3 基坑总体方案设计

为便于区分,结合前述分坑方案二,将①、②、③序开发次序的基坑进一步细化为 A、B、C 三大类,梳理各区编号如图 6 所示。

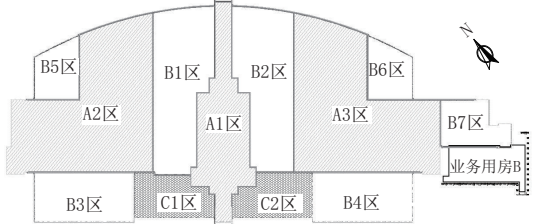


图 6 场地分区分块示意图

从项目安全性、经济性、环境条件、施工工期的综合角度考虑,整体采用板式支护结合止水帷幕+水平内支撑的支护形式。

A1 区:普遍区域挖深为 27.838~28.345 m,挖深较深,最终采用“1 200 mm 厚地下连续墙+六道钢筋混凝土水平支撑”的围护形式。为隔断深层承压水,墙深达到 70 m。

A2、A3 区:普遍区域挖深为 20.3 m,最终采用“1 000 mm 厚地下连续墙+四道钢筋混凝土水平支撑”的围护形式。地下连续墙兼作为悬挂式止水帷幕,帷幕深度超过 50~58 m,并在坑内采取减压降水措施。

B 区和 C 区:与 A 区相邻侧利用 A 区先行施工的围护体,其他侧根据基坑深度,采用 1 000 mm 厚地下连续墙或 $\phi 1000@1200$ 钻孔灌注桩。

在深基坑工程水平内支撑的选择方面,钢筋混凝土支撑具有刚度大,变形控制能力强,对复杂工况具有更好的适应性。此外,强化后的首道钢筋混凝土支撑还可作为后续施工挖、运土栈桥和材料堆场,是解决施工场地狭小,提高出土效率的一种主要技术手段;而装配式钢支撑更适合于较规则基坑,且在施工速度和灵活性上具有优势。结合项目实际情况,各区域支撑体系选型如图 7 所示。

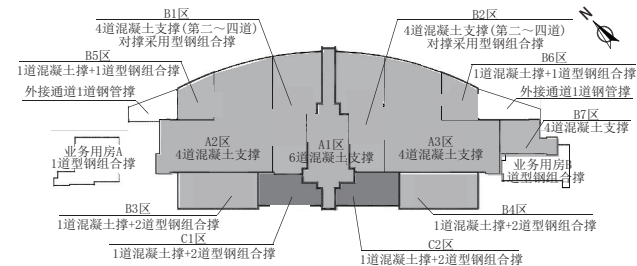


图 7 各分区支撑道数分布示意图

4 基坑分区典型剖面数值模拟与分析

采用有限元法基坑分坑的影响进行分析,其中土体本构采用 HS 模型。为考虑基坑分区开挖的复杂工况下的围护体变形分析,根据设计的开挖方案,选取 GTC 车库基坑东西向长剖面 A-A 进行分析,详如图 8 所示。

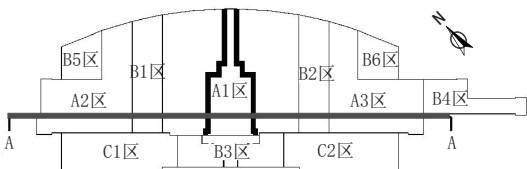


图 8 基坑典型计算剖面的位置示意图

图 9 至图 12 分别为 GTC 地下车库 A 区开挖至基底工况、A 区回筑完成工况、B 区开挖至基底工况、B 区回筑完成工况的围护结构及邻近土体的水平位移计算结果。计算结果汇总至表 1。

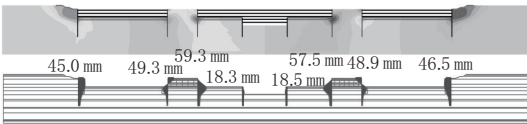


图 9 A 区基坑开挖至基底时水平位移云图

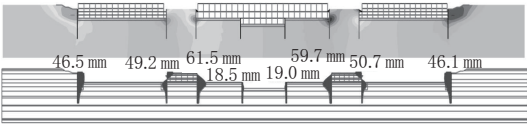


图 10 A 区基坑回筑完成时水平位移云图

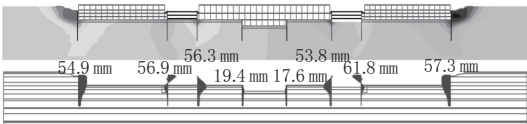


图 11 B 区基坑开挖至基底时水平位移云图

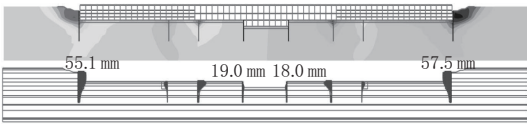


图 12 B 区基坑回筑完成时水平位移云图

在 A 区基坑开挖工况完成时,由于东西两侧的围护体刚度相对较大,对应的变形为 45.0~46.5 mm;但由于中隔墙的围护体刚度较东西两侧外围围护体小,故中隔墙变形偏大,侧向变形量为 48.9~59.3 mm,且由于邻近 A2、A3 区的中隔墙受邻近外侧土体推挤作用,故较邻近 A1 区的中隔墙变形相对偏大;9 号线落深区的挖深较小,且两侧围压为有限宽度土压力,故其两侧的围护体变形量偏小,约为 18.3~18.5 mm。在 A 区基坑回筑工况完成时,基坑围护体的变形略有增加,变形的变化量不超过 5 mm。在 B 区基坑开

表 1 剖面 A—A 围护墙体最大侧向变形计算结果汇总 单位:mm

工况	A2 区西 侧排桩	A2—B1 区 中隔墙	B1—A1 区 中隔墙	9 号线 西侧围护	9 号线 东侧围护	A1—B2 区 中隔墙	B2—A3 区 中隔墙	A3 区东 侧排桩
A 区基坑开挖至基底时	45.0	49.3	59.3	18.3	18.5	57.5	48.9	46.5
A 区基坑回筑完成工况	46.5	49.2	61.5	18.5	19.0	59.7	50.7	46.1
B 区基坑开挖至基底时	54.9	56.9	56.3	19.4	17.6	53.8	61.8	57.3
B 区基坑回筑完成工况	55.1	—	—	19.0	18.0	—	—	57.5

挖工况完成时,由于 B 区开挖卸土,东西两侧围护体进一步向坑内变形,变形值增加至 54.9~57.3 mm;邻近 A2、A3 区的中隔墙受邻近外侧土体推挤作用,变形也进一步增加至 56.9~61.8 mm;邻近 A1 区的中隔墙受邻近 B 区卸土影响,墙体变形回复至 53.8~56.3 mm,9 号线落深区的围护体变形影响较小,变形量为 17.6~19.4 mm。在 B 区基坑回筑工况完成时,围护的变形量略有增加,但变化量不超过 1 mm。

5 结 论

本文依托宁波市枢纽空铁一体主体工程综合交通中心(GTC)项目,研究了基坑群整体布局与围护设计方案,主要结论如下。

(1)面对超大面积深基坑工程,合理的分坑策略与高效的施工组织是工程顺利推进的关键。该工程结合不同区域的开挖深度、功能分布及工期需求,制定了科学的分坑和施工方案。

(2)围护结构及止水帷幕选型需结合各侧基坑开挖深度、环境保护等级综合确定;支撑体系则需要根据基坑形状不同,采取合适的布置形式,确保达到建设安全与变形控制的目标。

(3)模拟结果表明,在 A 区基坑开挖工况完成时,由于该处围护结构在设计阶段已有所加强,对该阶段的位移控制效果显著。然而,由于中隔桩刚度较低以及挤土效应,在 B 区基坑开挖至基底时,B2—A3 区中隔墙最大位移达 61.8 mm。随着 B 区基坑回筑完成,围护体变形变化量控制在 1 mm 以内,结构

变形趋于稳定。

参考文献:

[1] 吴兴龙,朱碧堂.深基坑开挖坑周土体变形时空效应初探[J]. 土工基础,1999(3):5-8.

[2] 魏海.软土地区相邻基坑相互影响的数值模拟[D]. 太原:太原理工大学,2011.

[3] 薛澳,丁立,董月英.不同间距情况下相邻基坑施工的相互影响[J]. 现代城市轨道交通,2005(4):28-30.

[4] 丁智,王金艳,周勇,等.邻近基坑同步施工相互影响实测分析[J]. 土木工程学报,2015,48(增刊2):124-130.

[5] 陈小雨.相邻深大基坑安全距离研究及交叉施工影响分析[D]. 杭州:浙江工业大学,2018.

[6] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[M]. Turkey: Middle East Technical University, 1969.

[7] 徐中华,王建华,王卫东.上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报,2008(8):81-86.

[8] 王文杰,曾进群,陈小丹.深基坑开挖中有限土体土压力计算方法探讨[J]. 矿产勘查,2005,8(3):30-31.

[9] 金亚兵,刘吉波.相邻基坑土条土压力计算方法探讨[J]. 岩土力学,2009,30(12):3759-3764.

[10] 李峰,郭院成.基坑工程有限土体主动土压力计算分析研究[J]. 建筑科学,2008(1):15-18.

[11] 邵鹏,朱春柏,潘静杰,等.基坑群间有限土压力及支护结构相互作用研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):187-195.

[12] 林海.相邻双基坑开挖相互影响性状分析[D]. 福州:福州大学,2013.

[13] 冀侠荣,魏青,路霞.相邻深基坑同期施工的相互影响问题研究[J]. 河南科学,2010,28(4):456-459.

[14] 王显星.开挖卸载对相邻基坑围护结构内力的影响[J]. 铁道建筑技术,2005(2):46-48.

[15] 沈健,胡耘,王惠生.软土基坑群工程环境影响效应研究[J]. 岩土工程技术,2024,38(2):143-148.