

引用本文:仲志武. 十字斜交换乘车站基坑优化方案对比[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(1): 150-158.

ZHONG Zhiwu. Comparison of foundation pit optimization schemes of cross oblique transfer station[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 150-158.

DOI: 10.19815/j.jace.2021.08062

十字斜交换乘车站基坑优化方案对比

仲志武

(中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

摘要:天津市轨道交通 6 号线与 8 号线的换乘车站平面呈十字斜交状, 两车站基坑深度较大且深度不同, 支护方案复杂, 施工风险较高, 同时由于管线切改问题导致原有施工方案无法推进。针对该换乘车站提出水平斜撑、暗挖逆作法、预留土方三种优化方案, 通过有限元模拟和理论分析相结合的方法对这些方案分别从结构安全、施工技术、施工工期三个方面进行了对比分析。结果表明: 对于复杂异形斜交换乘车站, 换乘节点采用水平斜撑方案会导致围护结构变形受力不均匀, 渗漏风险高; 采用暗挖逆作法方案虽然结构受力简单, 但施工难度较大, 设备投入高, 工期较长; 预留土方方案将换乘车站分为若干独立基坑, 若合理统筹施工顺序, 技术上更为安全可靠, 工期更优; 研究成果可为其他复杂条件下斜交换乘车站施工方案的设计和选择提供借鉴, 对促进重大轨道交通工程建设具有一定意义。

关键词:换乘车站; 优化方案; 数值模拟; 基坑开挖

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)01-0150-09

Comparison of foundation pit optimization schemes of cross oblique transfer station

ZHONG Zhiwu

(China Railway 18th Bureau Group Corporation Limited, Tianjin 300222, China)

Abstract: The plane of the transfer station of Tianjin Rail Transit Line 6 and Line 8 is cross oblique. The depths of the foundation pit of the two stations are large and different, the support schemes are complex, the construction risk is high, and the original construction scheme cannot be promoted due to the problem of pipeline cutting. Aiming at the transfer station, three optimization schemes of horizontal bracing, reverse excavation and reserved earthwork were put forward. Through the combination of finite element simulation and theoretical analysis, these schemes were compared and analyzed from three aspects of structural safety, construction technology and construction period. The results show that for the complex special-shaped transfer station, the horizontal bracing scheme will lead to uneven deformation of the retaining structure and high risk of leakage. Although the structure by reverse excavation is simple, but the construction is difficult, equipment investment is high, and construction period is long. The reserved earthwork scheme divides the transfer station into several independent foundation pits.

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目 (2020-C64)

作者简介: 仲志武 (1971-), 男, 高级工程师, E-mail: 1258812224@qq.com.

If the construction sequence is reasonably coordinated, it is technically safer and more reliable, and the construction period is better. The research results can provide reference for the design and selection of the construction scheme of oblique transfer station under other complex conditions, and have certain significance for promoting the construction of major rail transit projects.

Key words: transfer station; optimization scheme; numerical simulation; foundation pit excavation

0 引言

随着城市地铁网的快速发展和加密建设,地铁线路上下交错的情况不断增多,换乘节点也越来越多。例如正在建设的天津地铁 7 号线,共有地铁站 21 个,设置 11 处换乘车站,换乘车站数量达到了车站总数的一半以上。中国以往的地铁建设对换乘车站的建设重视不够,影响了城市交通综合效益的发挥。随着城市轨道交通规划越来越合理,越来越超前,地铁换乘车站也越来越多。地铁换乘车站施工往往要根据远期规划为其他线路预留接口,由于线路地面环境和地形不同,纵向不断加深,相交角度越来越多样化,基坑形状越来越复杂,施工难度也越来越大。此外,换乘车站基坑自身变形及渗漏等风险较高,对周边环境的潜在影响也较大。

地铁换乘车站基坑常用的施工方法有明挖顺筑法、暗挖逆作法、复合盖挖法等^[1-6]。换乘车站的施工问题有不少学者从不同角度展开了研究。雷蒙^[7]以成都地铁骡马市站换乘节点的施工为例,研究了开挖对既有结构变形、应力、沉降的影响。王怀东等^[8]以南京地铁上海路换乘车站为例,研究了采用无覆土下穿运营地铁站技术的风险管控措施。高太平等^[9]以北京地铁 19 号线新宫站基坑工程为例,分析了狭长基坑开挖施工过程中的阳角效应。张光建等^[10]以杭州地铁 1 号线滨江站为背景,研究了基坑开挖过程中支撑轴力的变化规律。孙九春^[11]对换乘节点处“坑中坑”的施工问题,从土压力平衡角度总结了两种常用的施工方案。赵广民等^[12]基于天津地铁 3 号线和 6 号线换乘车站北站工程实例,提出了新建车站施工期间的风险应对措施。Wang 等^[13]以济南地铁烈士陵园站深基坑工程为例,通过现场监测研究了深基坑开挖支护变形规律。

对换乘车站的力学研究,常用的方法有现场监测和数值模拟。胡安峰等^[14]采用有限元软件 ABAQUS 模拟节点基坑的施工过程,对计算值与实测数据进行了比较。Liao 等^[15]通过数值分析方

法优化上海地铁换乘节点的施工方案,将既有车站的变形控制在 10 mm 以内。Wang 等^[16]对济南市某地铁车站基坑开挖过程中监测到的深层水平位移、支护轴力和桩身表面沉降等数据进行了分析。Xu 等^[17]根据郑州地铁换乘车站紫荆山站基坑开挖及主站结构施工的监测数据,分析了深基坑开挖对环境的影响。Liu 等^[18]采用 FLAC3D 数值模拟软件,研究了地铁车站深基坑开挖变形特征。Zhang 等^[19]采用 FLAC3D 数值模拟软件研究了武汉地铁积玉桥站深基坑支护系统的变形特性。Bai 等^[20]采用 MIDAS GTS 软件对天津地铁 2 号线青年路站开挖后不同施工步骤模拟预测基坑变形。

从前述研究来看,已有换乘车站的研究内容主要集中在新建地铁车站对既有地铁车站的影响问题上,而对换乘节点各车站同期建设的研究较少。此外,对复杂异形斜交换乘车站在施工工期、造价、施工风险、对环境影响控制等方面的设计及施工方案优化的研究较少。天津地铁 6 号线与 8 号线的换乘车站绿水道站的基坑平面为复杂的十字斜交形式,基坑深度较大,最深处达到近 27 m。另外,围护结构形式复杂,存在较多薄弱点,易发生渗漏风险,且支护体系变形及受力复杂。

本文以天津地铁 6 号线与 8 号线的换乘车站为依托,针对实际施工条件的限制,在原有设计方案的基础上提出了三种优化方案,并对这几种方案的施工难度、基坑受力变形特征、工期等方面进行全面对比分析,确定了最优方案。本文研究内容可以为复杂斜交换乘车站的方案优选提供参考,推动中国城市轨道交通建设快速健康发展。

1 工程概况

1.1 工程地质及水文地质条件

天津地铁 6 号线与 8 号线的换乘车站绿水道站位于天津市河西区绿水道与微山路交口处,场地土质条件软弱,基坑变形较难控制,且地层中存在较为深厚的粉土粉砂承压含水层,基坑发生渗漏的风险

较高。根据勘察资料,该车站岩性主要为粉质黏土、淤泥质土、粉砂、砂质粉土等。潜水含水层主要赋存于人工填土层、第Ⅰ陆相层、第Ⅰ海相层的黏性土及粉土中,含水层水平、垂直向渗透性差异较大,当局部地段夹有粉砂薄层时,其富水性、渗透性相应增大。上部潜水、地下水埋藏较浅,勘测期间本段地下水静止水位埋深 0.44~5.30 m(高程-2.85~1.89 m)。第一承压含水层主要赋存于⑧₂、⑨₂、⑩₂ 砂质粉土、粉细砂层中。第二承压含水层主要赋存于⑪₂、⑪₄ 砂质粉土、粉砂层中,其间夹有多层黏性土相对隔水层。承压水的渗透补给与潜水水力联系紧密,排泄以相对含水层中的径流形式为主,同时以渗透方式补给深层地下水。第一承压含水层水头大沽标高为-1.54 m。第二承压含水层水头大沽标高为-1.82 m。

1.2 工程简介

换乘车站平面为复杂的十字斜交形式,如图 1 所示。6 号线车站为地下三层岛式车站,双柱三跨矩形框架结构,车站长度 246.825 m,标准段宽 23.3 m,端头井宽 27.55 m,标准段基坑深 24.12 m,端头井基坑深 26.128 m;顶板覆土厚 3.56 m,车站纵向由小里程至大里程方向为坡度 0.2%的下坡。8 号线渌水道站为地下两层车站,双柱三跨矩形框架结构,车站全长 316.0 m(含换乘节点);标准段宽 23.1 m,端头井宽 27.95 m,标准段基坑深 17.47 m,端头井基坑深 19.375 m,顶板覆土厚 3.56 m,车站线路纵向由小里程至大里程方向为坡度 0.2%的下坡。6 号线与 8 号线车站的纵向剖面位置关系如图 2 所示。

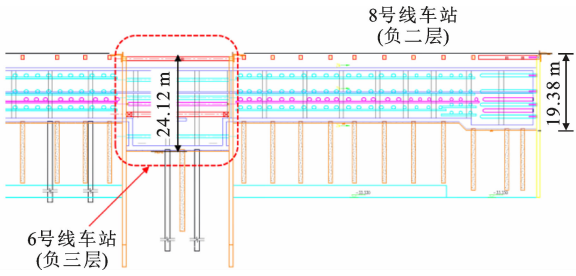


图 2 基坑纵向剖面

Fig. 2 Longitudinal profile of foundation pit

1.3 周边环境

6 号线渌水道站沿渌水道布置,8 号线渌水道站沿微山路布置,周边环境复杂,主要相邻的建筑物有惠众家园小区、社会实践教育中心、泓春园小区、泓沪园小区,如图 3 所示。8 号线渌水道站东北侧为 110 kV 高压电塔车站。此外,车站范围内,存在较多地下管线,管线切改工作较为复杂。

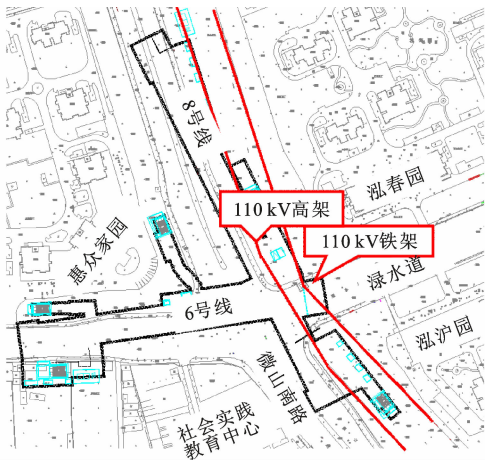


图 3 管线分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pipeline distribution

2 工程方案

2.1 原有工程方案

初步设计中,基坑分期如图 1 所示,其中 6 号线渌水道站为一个独立基坑(负三层),8 号线渌水道站为两个独立基坑(负二层)。施工步序为 6 号线基坑围护结构封闭后,先进行基坑开挖施工,以换乘节点为界,分三个工作面开挖。6 号线基坑开挖的同时,8 号线基坑从两侧端头井向中间开挖,换乘节点两侧预留土方抵抗换乘节点支撑受力,待换乘节点处主体结构封顶达到设计强度后才能将预留土方挖除。

原工程方案的施工进度安排如下:从 2019-05-05 开始一期基坑(6 号线)的施工准备工作,至

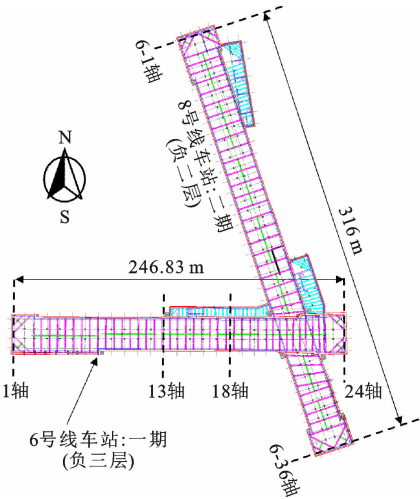


图 1 渌水道换乘车站平面图

Fig. 1 Plan view of Lushuidao transfer station

2020-08-30 完成一期基坑(6 号线)主体结构施工,至 2020-09-15 完成二期基坑(8 号线)主体结构施工,总工期合计 499 d。

由于 2019 年 7、8 月份无停电日,涿水道站东侧 110 kV 高架电缆切改预计 2019 年 9 月 15 日才能完成。涿水道站东侧 110 kV 高架电缆位置如图 3 所示,受其保护距离的影响,110 kV 不完成入地,别的管线切改存在极大安全风险及施工难度,将导致该站整体工期严重滞后,为确保该站整体工期要求,拟对该站施工筹划进行优化。

2.2 优化方案

2.2.1 优化方案一:斜撑方案

(1)在 6 号线车站 13 轴增加分隔墙,将 6 号线车站分成两个独立的封闭基坑,分一、二期进行施工,如图 4 所示。无需等 6 号线东侧基坑围护结构封闭就可以进行 6 号线一期土方开挖。

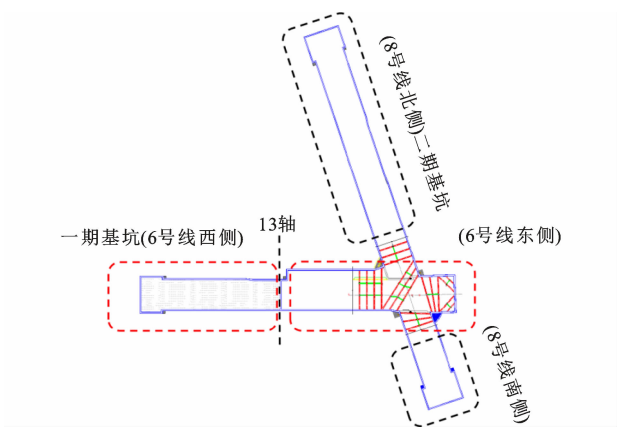


图 4 优化方案一示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optimization scheme 1

(2)6、8 号线换乘节点增加混凝土水平斜撑,支撑的平面布置如图 4 所示。此方案可以实现 6、8 号线同时开挖,无需等换乘节点主体结构完成后再开挖 8 号线南侧和北侧靠近换乘节点处土方。该方案下文简称为斜撑方案。

2.2.2 优化方案二:暗挖逆作法方案

(1)在 6 号线车站 18 轴增加分隔墙,将 6 号线车站分成两个独立的封闭基坑,分一、二期进行施工。同样,无需等 6 号线东侧基坑封闭就可以进行 6 号线一期土方开挖。

(2)6、8 号线换乘节点采用暗挖逆作法施工,如图 5 所示。利用结构板作为支撑,可以实现 6、8 号线同时开挖,无需等换乘节点主体结构完成即可开挖 8 号线靠近换乘节点处土方。该方案下文简称逆作法方案。

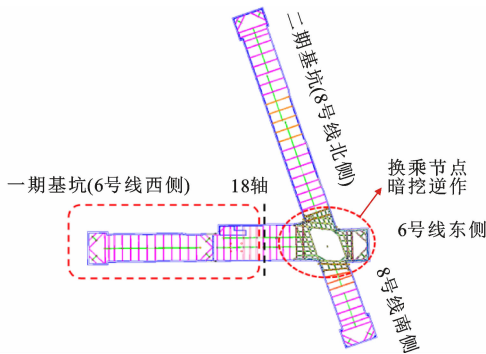


图 5 优化方案二示意图

Fig. 5 Schematic diagram of optimization scheme 2

2.2.3 优化方案三:预留土方方案

(1)在 6 号线车站 13 轴设置分仓墙,将 6 号线分成一、二期两个独立封闭基坑,分两期基坑进行开挖。6 号线斜穿 8 号线,将 8 号线分成两个独立基坑。本方案共分四个独立封闭基坑,平面布置如图 6 所示。

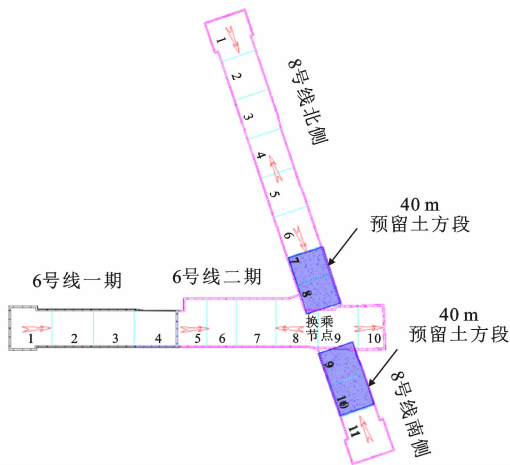


图 6 优化方案三示意图

Fig. 6 Schematic diagram of optimization scheme 3

(2)6 号线车站基坑一期先行施工,二期先开挖换乘节点部位,从换乘节点向两侧开挖。8 号线北侧基坑从两端(端头井、换乘节点)向中间开挖,南侧从换乘节点向南端头井开挖,8 号线在换乘节点连接两侧预留 40 m 土方,待 6 号线换乘节点负一层主体结构顶板完成后,两侧开始对称开挖,换乘节点处 6 号线地连墙随着开挖,从上往下逐层破除。该方案下文简称预留土方方案。

3 有限元模拟

3.1 有限元模型介绍

采用大型岩土有限元分析软件 PLAXIS 3D 建立换乘车站三维模型进行计算分析。以 6 号线轴线

方向为 X 轴,垂直 6 号线方向为 Y 轴,竖直方向为 Z 轴建立空间直角坐标系。为消除模型边界效应,边界尺寸取 3 倍~5 倍基坑深度,因此 X 轴方向长度为 531 m,Y 轴方向为 584 m,Z 轴方向为 81 m。模型计算采用 10 节点四面体单元,单元数 166 872 个,节点数 288 412 个。模型顶面为自由面,无约束;模型底面每个方向均约束;模型 4 个侧面均只约束法向,其余方向自由无约束。

计算中土体本构采用 HS-Small 模型(小应变硬化模型)。土体参数来自工程地质勘查报告和工程经验取值,具体数值见表 1。本节以优化方案三(预留土方法)为例对数值模型进行说明,按照前文所述施工工序模拟开挖过程,换乘车站的三维有限

元模型如图 7 所示。本方案的关键环节为在换乘节点两侧预留土方,在数值模拟中,通过将两侧的预留土方设置成阶梯型来简化处理,得到该部分的有限元模型见图 8。

3.2 计算结果与实测数据比较

根据数值计算及工程经验判断(下文会展开说明),该基坑采取方案三进行施工。施工过程中对基坑周边的土体位移进行监测。对监测数据初步整理,选择 6 号线一期基坑的 2 号、12 号测点分析围护结构的水平变形,6 号、8 号测点分析地表土体沉降,并将计算结果与实测数据进行比较,所得结果如图 9、10 所示。可以看到,数值模拟与现场实测的结果比较接近。

表 1 模型土体参数
Table 1 Soil parameters of model

| 土层编号 | 土类型 | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | e | c'/kPa | $\varphi'/(^{\circ})$ | $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$ | $E_{\text{ed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$ | $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$ | $G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$ | $\gamma_{0.7}$ | m |
|------|------|--|-------|-----------------|-----------------------|----------------------------------|---|---|-------------------------------|----------------|-----|
| 1 | 杂填土 | 18.20 | 0.890 | 12.40 | 16.10 | 7.88 | 7.88 | 47.30 | 127.72 | 0.000 2 | 0.8 |
| 2 | 粉质黏土 | 19.46 | 0.720 | 9.54 | 28.59 | 9.56 | 10.36 | 96.10 | 259.56 | 0.000 2 | 0.8 |
| 3 | 淤泥质土 | 18.40 | 1.048 | 19.60 | 11.60 | 9.18 | 9.18 | 59.67 | 161.11 | 0.000 2 | 0.8 |
| 4 | 粉质黏土 | 19.80 | 0.720 | 13.95 | 56.66 | 12.98 | 9.10 | 66.19 | 178.70 | 0.000 2 | 0.8 |
| 5 | 粉砂 | 20.00 | 0.600 | 7.20 | 33.60 | 28.08 | 28.08 | 147.53 | 398.34 | 0.000 2 | 0.5 |

注: γ 为土体重度; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; E_{50}^{ref} 为三轴试验参考围压下 50%强度的割线模量; $E_{\text{ed}}^{\text{ref}}$ 为固结仪试验在参考围压下切线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载/重加载参考模量; G_0^{ref} 为小应变时的参考剪切刚度; e 为孔隙比; m 为模量应力水平相关幂指数; $\gamma_{0.7}$ 为初始剪应变。

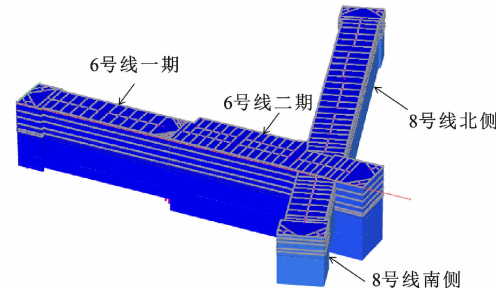


图 7 换乘车站有限元模型

Fig. 7 Finite element model of transfer station

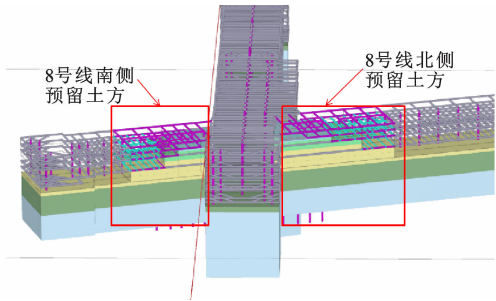


图 8 换乘车站预留土方位置

Fig. 8 Reserved earthwork location of transfer station

现场实测得到 2 号、12 号测点围护结构的水平位移最大值分别为 23.18 mm 和 22.32 mm,埋深分别为 -16 m 和 -17 m,数值模拟得到的最大值分别

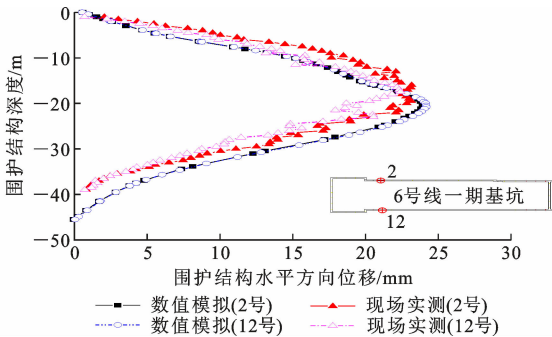


图 9 2 号、12 号测点位置围护结构水平位移曲线
Fig. 9 Horizontal displacement curves of retaining structure at measuring points 2 and 12

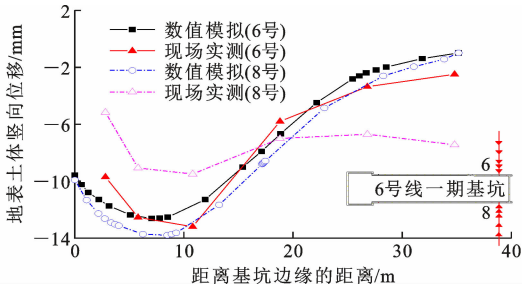


图 10 6 号、8 号测点位置地表土体沉降曲线
Fig. 10 Settlement curves of surface soil at measuring points 6 and 8

为 23.94 mm 和 24.18 mm,埋深均为-20.8 m,曲线吻合效果好。实测得到距离基坑边缘 10.8 m 处 6 号、8 号测点地表土体沉降均达到最大值,分别为 13.2 mm 和 9.5 mm。数值模拟得到的沉降最大值分别为 12.62 mm 和 13.79 mm,发生在距离基坑边缘 7.05 m 和 8.47 mm 的位置。由于现场监测点的布置较为分散,地表土体沉降曲线的数据点较少,但是从总体上看,数值模拟与现场实测的结果趋势一致。由此可得,施工前进行数值模拟分析十分必要,并且结果可靠,与该方案的施工结果相差不大。

3.3 不同施工方案的模型比较

本文比较的三种施工方案,即斜撑、逆作法、预留土方方案的差异主要体现在车站斜交位置,因此需要对该部位重点分析,三种方案的局部有限元模型如图 11 所示。

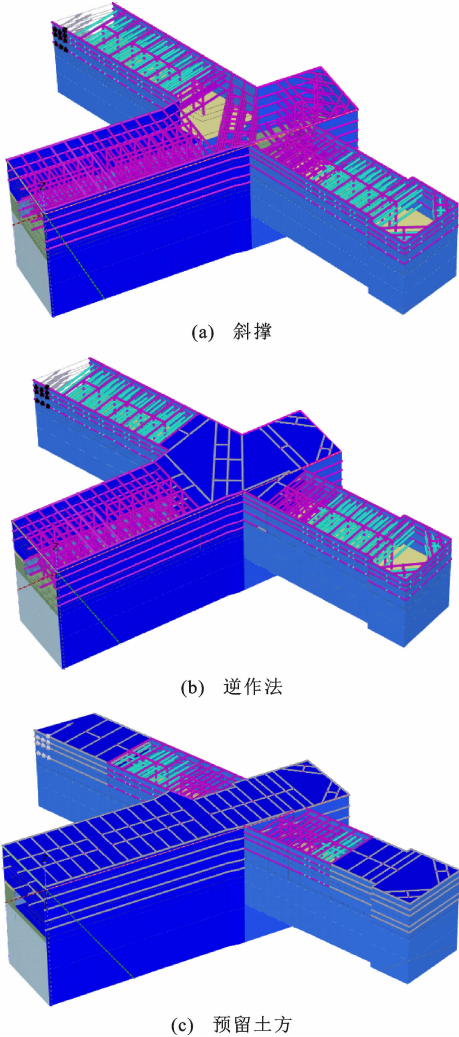


图 11 不同施工方案的局部有限元模型
Fig. 11 Partial finite element models of different construction schemes

4 优化方案对比分析

4.1 结构安全分析

6 号线与 8 号线车站基坑地连墙的连接位置存在 4 处基坑阳角,地连墙形状不规则,同时 6 号线与 8 号线车站基坑深度不同。在换乘节点处变形及受力较为复杂,具体结构受力和变形不确定,因此在 4 处阳角位置选择 8 个测点对围护结构的水平变形进行分析,测点位置如图 12 所示。根据围护结构变形的一般特点,对 1 号、4 号、5 号、8 号测点围护结构沿 y 方向的变形进行分析,对 2 号、3 号、6 号、7 号测点围护结构沿 x 方向的变形进行分析,计算结果如图 13、14 所示。

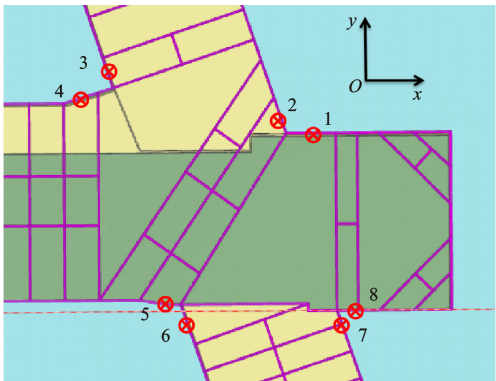


图 12 测点位置分布

Fig. 12 Distribution of measuring points

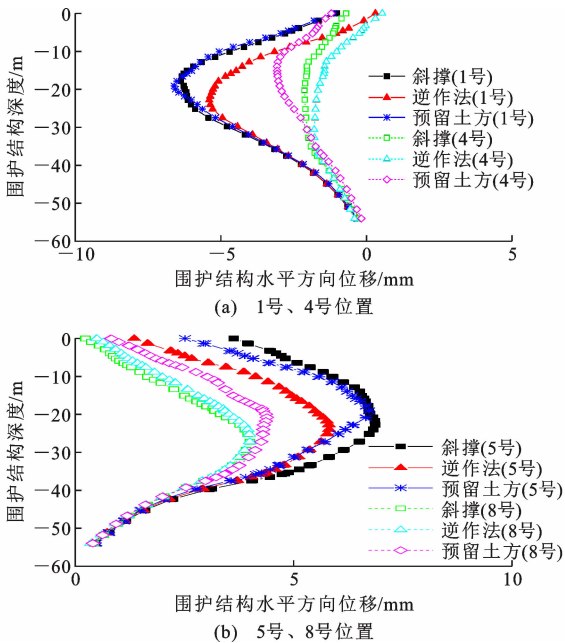


图 13 围护结构沿 y 方向的水平位移曲线
Fig. 13 Horizontal displacement curves of retaining structure along y -axis

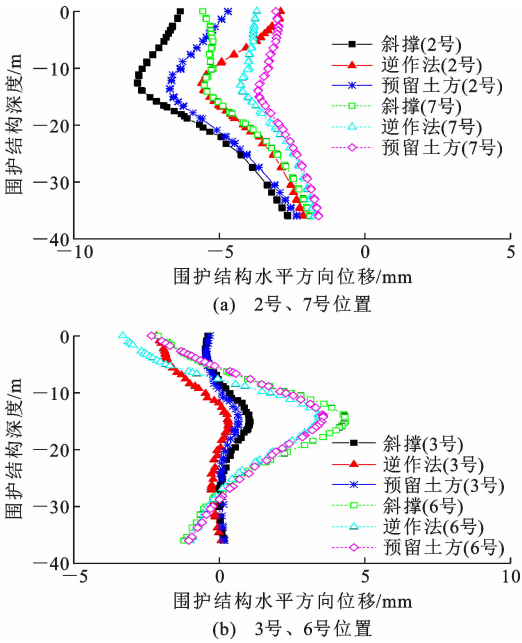


图 14 围护结构沿 x 方向的水平位移曲线
Fig. 14 Horizontal displacement curves of retaining structure along x -axis

在 1 号与 5 号位置采用逆作法方案变形控制效果最佳,围护结构的水平位移最大值小于另外两种方案,斜撑方案与预留土方方案的变形最大值接近。在 4 号与 8 号位置预留土方方案使围护结构产生了更大变形,最大值比斜撑方案大 0.5~1 mm。在 2 号、3 号与 6 号位置预留土方方案影响居中,斜撑方案变形最大,逆作法变形最小。在 7 号位置预留土方方案的变形小于斜撑方案和逆作法,结构安全性最好。由此看来,预留土方方案多数情况可优化斜撑方案的结构受力,能够有效控制围护结构的变形。

从施工过程来看,逆作法和预留土方方案的基坑支护形式相对简单,类似的工程经验丰富,结构安全性能够得到保障。在换乘节点处采用斜撑、对撑以及连系梁的支撑组合,支撑形式复杂。为进一步观察支撑的受力情况,对斜撑方案中的 3 道斜撑进行内力分析,支撑轴力情况如图 15 所示。三道斜撑轴力值分布不均,轴力绝对值最大值和最小值分别为 4 496 kN 和 634 kN。轴力分布不平衡,结构安全性差。

4.2 施工技术分析

方案一中支撑形式种类多,支撑结构受力复杂,同时异形地连墙和基坑阳角较多,增加了施工难度和渗漏风险,不再对其进一步讨论。

方案二在换乘节点处采取暗挖逆作法施工,在封闭状态下盖挖土方受层高、中间支柱和降水井的

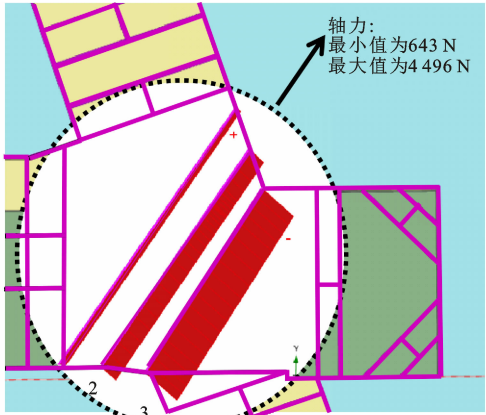


图 15 斜撑轴力
Fig. 15 Axial force of diagonal brace

影响,闭锁的空间使大型机械设备难于进场,带来了施工作业上的不便,目前尚缺小巧、灵活及高效的暗挖设备。同时,需要解决水平运输和垂直运输问题,施工效率较低。暗挖逆作法的中柱是永久结构,施工精度要求较高,而且对围护结构和中间柱的沉降控制严格,施工难度较大。

方案三采取明挖法施工,施工工序简单,施工管理方便,施工场地开阔,大型机械和运输工具使用方便,施工进度较快。同时,施工降排水容易,结构防水简单,质量可靠。

4.3 施工工期分析

经统计,方案二 6 号线一期的施工时间是 2019-05-05~2020-01-10,为期 250 d;6 号线二期及 8 号线施工时间是 2019-10-06~2020-08-18,为期 317 d;中间交叉工期不做重复叠加计算,总工期合计为 471 d。方案三 6 号线一期的施工时间是 2019-12-28~2020-08-19,为期 235 d;6 号线二期及 8 号线北侧、南侧的施工时间是 2020-01-10~2021-01-31,为期 387 d;总工期合计 400 d。

经比较,方案二和方案三的工期均较初始方案减少,达到了工期优化的目的,其中方案三工期更优,比方案二减少 60 d 左右。

4.4 实际施工效果

如前文所述,现场监测数据表明 2 号、12 号监测点围护结构的水平位移最大值分别为 23.18 mm 和 22.32 mm,此外,实测得到 6 号线一期基坑围护结构的水平位移最大值为 24.36 mm,围护结构变形不超过基坑深度的 0.14%。通过采取预留土方方案可有效控制围护变形,且施工进度较快,对周围环境影响较小,可创造良好的经济效益与环境效益。

5 结 语

(1)对于十字斜交换乘车站,换乘节点处如果采用水平斜撑,支撑受力不均匀,结构安全性差,且异形地连墙施工难度大,容易出现渗漏风险,因此十字斜交换乘车站中不宜在换乘节点处使用水平斜撑。

(2)换乘节点处如果采用暗挖逆作法,结构受力简单,工程经验丰富,但相较于明挖法,施工难度较高,设备投入较大,工期也会大幅增加。

(3)将十字斜交换乘车站分为 4 个基坑施工,每个基坑的支护体系都较为简单,施工难度较小,风险较低,并且经过合理统筹工序,工期较其他方案可大幅缩短,因此,本文中的换乘车站采用该方案施工。

(4)选择施工方案时,应综合分析施工方案的技术难度及设备要求,在保证施工安全的前提下,尽量缩短工期,节省工程造价。本文车站的方案优化可为类似复杂十字斜交换乘车站的设计提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 刘毅,张勇,袁青,等.邻近边坡地铁车站基坑顺逆结合施工稳定性分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(6):873-881.
LIU Yi,ZHANG Yong,YUAN Qing,et al. Analysis on the stability of bias metro station pit excavated through the combination method of bottom-up and top-down technology[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition),2019,51(6):873-881.
- [2] 刘宝奎,尚艳亮,隆卫,等.城市繁华区大规模 T 形盖挖地铁车站基坑开挖出土技术研究[J].施工技术,2020,49(7):9-12,103.
LIU Baokui,SHANG Yanliang,LONG Wei,et al. Research on excavation technology of large scale T-type covered subway station foundation excavation in downtown area[J]. Construction Technology,2020,49(7):9-12,103.
- [3] 刘亮.T 型换乘地铁车站续建基坑开挖对运营结构的影响分析及对策[J].隧道建设,2015,35(3):244-249.
LIU Liang. Analysis on influence of cutting of foundation pit on existing structure:case study on cutting of a T-shaped transfer metro station[J]. Tunnel Construction,2015,35(3):244-249.
- [4] 孔超,陈书勇,张俊儒,等.流变地层地铁换乘站复合盖挖法施工力学分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):128-135.

KONG Chao,CHEN Shuyong,ZHANG Junru,et al. Study on mechanical theory of compound cover method for metro transfer station in rheological stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(1):128-135.

- [5] MUHAMMAD R A T M,RAJASEKARAN C. Performance of deep excavation for an underground metro station constructed by top-down method: a case study[J]. Sustainable Construction and Building Materials,2019,25:611-618.
- [6] 刘泽.承压水地层中施工换乘车站盖挖半逆作法的关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2014.
LIU Ze. The study of transfer subway key construction technology and semi-inversed cover excavation method in confined water layer[D]. Chengdu: South-west Jiaotong University,2014.
- [7] 雷蒙.成都地铁骡马市换乘站开挖对既有结构影响研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
LEI Meng. Study on the influence of excavation on the existing structure of Chengdu metro Luomashi transfer station[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2018.
- [8] 王怀东,刘方明,彭红霞.新建地铁站基坑临近及无覆土下穿运营地铁站安全技术措施研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(11):1836-1845.
WANG Huaidong,LIU Fangming,PENG Hongxia. Safe construction technologies for newly-built metro station foundation pit closely crossing underneath adjacent operation metro station[J]. Tunnel Construction,2018,38(11):1836-1845.
- [9] 高太平,闫建龙,沈宇鹏,等.北京地铁 19 号线新宫站狭长基坑阳角效应分析[J].铁道建筑技术,2018(11):62-66.
GAO Taiping,YAN Jianlong,SHEN Yupeng,et al. Analysis of the external corner effect of narrow deep foundation pit in Xingong station of Beijing subway line 19[J]. Railway Construction Technology,2018(11):62-66.
- [10] 张光建,姚小波,胡瑾.地铁换乘车站基坑支撑轴力监测与数值模拟[J].岩土工程学报,2014,36(增 2):455-459.
ZHANG Guangjian,YAO Xiaobo,HU Jin. Monitoring and numerical simulation of axial forces of struts for foundation pit of a metro transfer station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(S2):455-459.
- [11] 孙九春.基于土压力平衡设计的地铁预留十字换乘节点车站施工方案研究[J].施工技术,2017,46(22):

- 105-107.
- SUN Jiuchun. Research on construction scheme of metro reserved cross transfer station based on earth pressure balance design[J]. Construction Technology, 2017, 46(22): 105-107.
- [12] 赵广民, 何树宪, 朱佳友. 基于地铁运营安全的 X 形垂直换乘车站分期施工研究[J]. 施工技术, 2016, 45(9): 106-108.
- ZHAO Guangmin, HE Shuxian, ZHU Jiayou. Construction research by stages of X-shape vertical transfer station based on safety of subway operation[J]. Construction Technology, 2016, 45(9): 106-108.
- [13] WANG Z, WANG C. Analysis of deep foundation pit construction monitoring in a metro station in Jinan city[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(2): 813-822.
- [14] 胡安峰, 张光建, 王金昌, 等. 地铁换乘车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增): 77-81.
- HU Anfeng, ZHANG Guangjian, WANG Jinchang, et al. Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure excavation of a metro transfer station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S): 77-81.
- [15] LIAO S, FAN Y, SHI Z, et al. Optimization study on the reconstruction and expansion of an underground rail transit center in Shanghai soft ground[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 38, 435-446.
- [16] WANG Z C, GUO X P, WANG C. Field monitoring analysis of construction process of deep foundation pit at subway station[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(2): 549-559.
- [17] XU P, HAN Y W, DUAN H H, et al. Environmental effects induced by deep subway foundation pit excavation in Yellow River alluvial landforms[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(6): 1587-1594.
- [18] LIU Y L. Numerical analysis of the deformation law of deep foundation pit of subway station by FLAC 3D[J]. Advanced Materials Research, 2014, 915-916: 62-67.
- [19] ZHANG H Z, FENG Y F. Study on the deformation characteristics of supporting system of deep foundation pit in subway station construction[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-249: 546-551.
- [20] BAI Y, CUI P B, WU J B, et al. Study on simulation analysis of excavation deep foundation pit in Qingnian Road station of Tianjin subway line 2[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 580-583: 1112-1115.