

多跨大空间地铁车站暗挖施工方案比选研究^{*}

杜 欣

(中铁十六局集团有限公司, 100018, 北京//高级工程师)

摘 要 在繁华市中心修建地铁,越来越多地出现上跨、下穿既有地铁或管廊结构的现象,尤其是与既有地铁车站衔接的换乘车站施工,设计施工难度大。以某地铁换乘车站施工工程为例,介绍了该工程的概况、地质条件和施工特点,对不同的施工方案进行了分析,确定选用全暗挖法施工。并采用数值模拟的方法,对洞桩(PBA)法开挖工序进行比选,以选出最优的施工方案。

关键词 地铁车站;洞桩法;多跨暗挖施工

中图分类号 TU455.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.014

Comparison and Selection of Underground Excavation Construction Schemes for Multi-span Large Space Metro Stations

DU Xin

Abstract During the construction of metro lines in busy city center, more and more phenomenon of over- or under-passing existing metro or pipe gallery structures is appearing, especially in the construction of transfer stations connected with existing metro stations, of which the design and construction are difficult. Taking the construction project of certain metro transfer station as an example, the background situation, geological condition and construction features of the project are introduced, and different schemes are analyzed. Comprehensive underground excavation is selected for construction. By adopting numerical simulation method, the excavation procedure of PBA (pile-beam-arch) method is comparatively decided as the optimal construction scheme.

Key words metro station; PBA (pile-beam-arch) method; multi-span underground excavation construction

Author's address China Railway 16th Bureau Group Co., Ltd., 100018, Beijing, China

在繁华市中心修建地铁线路,越来越多地出现上跨、下穿既有地铁或管廊结构现象,尤其是与既有地铁车站衔接的换乘车站的施工,具有空间规模

大、结构跨度大、深埋、围护支护复杂且对周边环境影响大的特点,其设计和施工难度很大。本文以北京地铁16号线二里沟站这个新建地铁的换乘车站为例,阐述大空间地铁车站暗挖施工方案的有关比选。

1 北京地铁16号线二里沟站工程概况

1.1 工程设计情况

北京地铁16号线二里沟站位于三里河路和车公庄大街交叉口,与既有6号线二里沟站成“十”字换乘(见图1)。6号线二里沟站为单层暗挖分离侧式站台车站,车站埋深27.93 m,车站覆土17.56 m。16号线二里沟站车站两端采用两层三柱四跨暗挖结构,车站中部上跨6号线车站段采用单层双跨暗挖结构,如图2所示。16号线二里沟站车站全长303 m,车站两端主体双层三柱四跨暗挖段断面高18.36 m,宽29.40 m,覆土深度8.90 m,采用小导管超前注浆加固和洞桩(PBA)法施工。

该车站设置了4个施工竖井,总建筑面积约为3.9万m²,目前是全国在建的最大暗挖车站。车站主体采用单层导洞PBA法施工。设置了5个出入口、4组风亭、2座冷却塔。其中东南象限风道及出入口与百万庄棚户区改造一体化建设。

1.2 地质条件

16号线二里沟站主要处于⑤层卵石,⑥层粉质黏土,⑦层卵石和⑧层粉质黏土。其中最大粒径不小于300 mm,一般粒径为20~60 mm。土层中粒径大于20 mm的颗粒占总质量的60%,以亚圆形,中粗砂填充。车站顶部以上为粉细砂层。含水层主要为⑨层卵石。2011年7月勘察到的水位标高为19.60 m,水位埋深为32.18 m。其地质情况见图3。

1.3 施工特点分析

由于工程项目周边环境复杂,制约施工因素多,加上地质条件特殊、车站结构宽度大、主体结构

^{*} 中铁十六局集团有限公司科技研究开发计划项目(2016-14B)

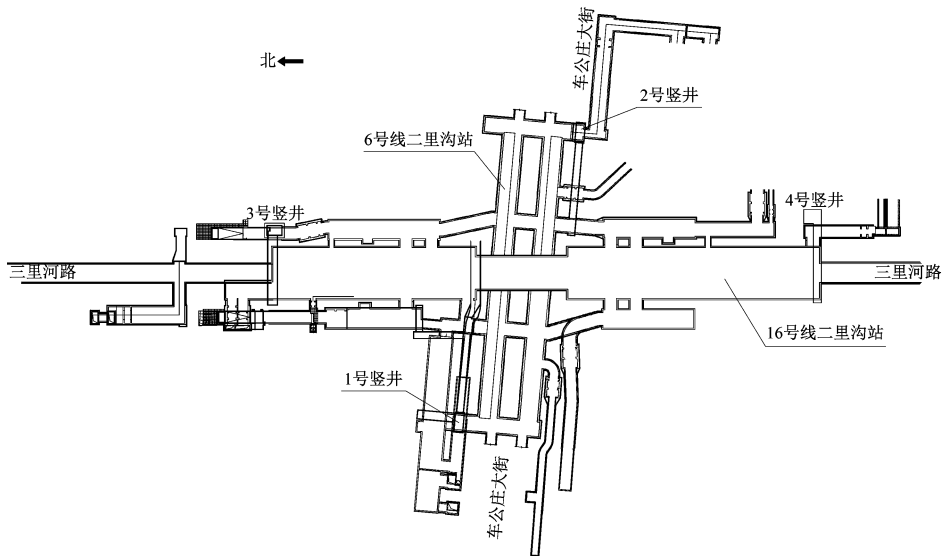
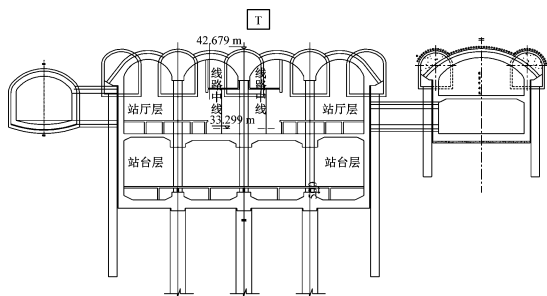


图1 北京地铁16号线二里沟站平面图

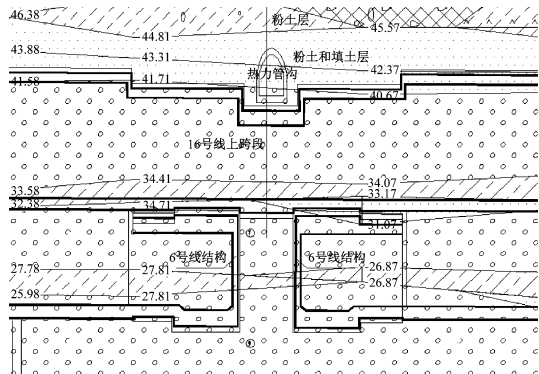
Fig.1 Plan of Beijing Metro Line 16 Erligou Station



注:地面标高为51.400 m; T为热力管沟。

图2 北京地铁16号线二里沟站横断面示意图

Fig.2 Schematic diagram of lateral section of Beijing Metro Line 16 Erligou Station



注:图中数字皆为标高,单位为m。

图3 北京地铁16号线二里沟站中间段地质剖面图

Fig.3 Geological section of the middle section of Beijing Metro Line 16 Erligou Station

与附属结构距离近,故施工工序复杂、施工风险高,给项目施工筹划带来了很大的困难。如:①道路下方浅埋、多跨、大空间地铁车站暗挖施工的开挖步

序复杂。工程施工面积大,采用暗挖技术挖掘的土方和占用的地下空间相较于一般车站要大。②几乎是零间距距离上跨既有线,下穿热力管沟,变形控制难度大。③砂卵石地层洞内狭小空间大直径机械快速成桩技术难度大。④换乘车站需要新建的附属结构多,体量大,施工接口多,施工难度大。

2 主体结构施工方案选择

2.1 明挖+暗挖方案

原施工方案中车站主体采用两端明挖,中间暗挖的方案^[1-2]。围护采用 $\phi 1\,000\text{ mm} @ 1\,500\text{ mm}$ 的钻孔灌注桩,内支撑采用 $\phi 609\text{ mm}$,厚14 mm的钢管支撑^[3],竖向设4道。北京地铁16号线二里沟站原设计剖面示意图如图4所示。

2.2 优化后的全暗挖方案

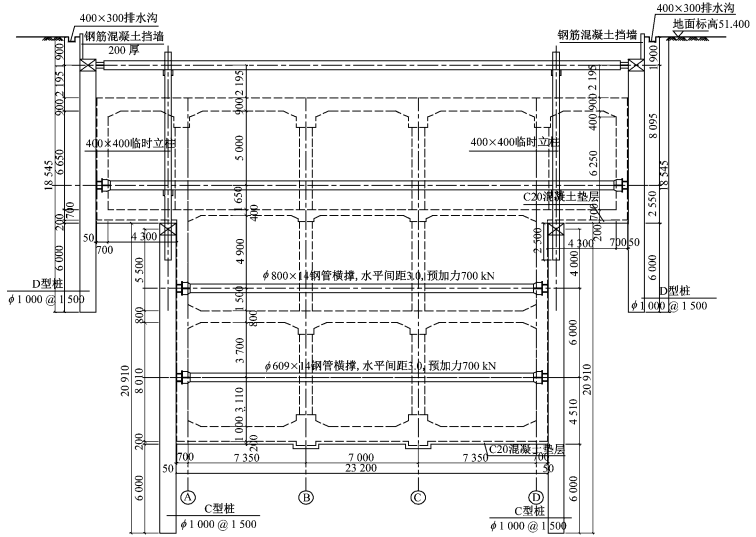
在深入细致做好调查、研究的基础上,超前对各种施工方案进行比较、优化,对各附属结构统一优化规划,具体如表1所示。

2.3 PBA法比选

在确定选用暗施工挖工艺后,对单层导洞PBA法和双层导洞PBA法施工进行比选。两种施工方法的施工工况对比如表2所示。

由表2可知,相较于原设计方案,优化后的方案采用单层导洞PBA法,主体结构全部采用暗挖能节省成本、缩短工期。

该车站两端两层三柱四跨暗挖段的开挖断面为 $18.36\text{ m} \times 29.40\text{ m}$ (宽 \times 高),采用PBA法施工。



注:标高以 m 计,其它尺寸以 mm 计。

图 4 北京地铁 16 号线二里沟站原设计剖面示意图

Fig.4 Schematic diagram of original design section of Beijing Metro Line 16 Erligou Station

表 1 附属结构优化方案

Tab.1 Optimization scheme of ancillary structure

部位	原设计存在的问题	优化方案	优化效果
1 号外挂厅	1 号外挂厅采用明挖三层结构,外挂厅位置与 1 号竖井冲突,需在主体完成后废除 1 号竖井才能进行施工	在竖井的北侧新设横通道,然后向东西两侧进行暗挖施工	节省工期 1 年半
2 号外挂厅	采用明挖施工,外挂厅上方为项目部工人生活区,且需改移多根管线	利用既有的竖井横通道,设置旁通道进入 2 号外挂厅进行暗挖施工	减小管线改移工作量,避免拆除生活区,并可提前施工
3 号风道	3 号风道在 6 号线已预留接口,原方案在车站的东北角接 6 号线的风道,周边环境复杂风险高、征地困难	将 3 号风道调整至西北角,利用 2 号竖井进行施工	减少 1 套临时设施的投入,同时可提前进行施工
5 号外挂厅	5 号外挂厅为西南象限出入口,原方案征用绿地施工明挖段,然后从明挖段向下暗挖施工	将 4 号横通道延长,从 4 号横通道施工 5 号外挂厅及出入口通道的暗挖段	可提前进行施工,一定程度上减缓了工期压力

表 2 单层导洞 PBA 法与双层导洞 PBA 法施工工况对比

Tab.2 Construction conditions comparison between single-layer and double-layer pilot tunnel PBA methods

项目	双层导洞 PBA 法	单层导洞 PBA 法
安全性	桩采用人工挖孔,安全性差,易出安全事故	桩采用机械成孔,人员安全
沉降控制	需开挖上下两层小导洞,尤其下层导洞对地表沉降影响大 ^[4]	只需开挖上层小导洞,对地表沉降影响较小 ^[5]
设备需求	仅需简单提升和运输设备,投入较少	需要洞内成桩专用设备,投入较大
降水需求	降水周期较长	降水周期较短
承载力	承载力受限制	承载力不受限制,可以根据承载力要求调整桩长桩径
造价	人工与机械总成本略低于工程造价预算	与双层导洞洞桩法造价相当
工期	在人员充足的情况下,工期有保证	受设备占用空间影响,设备投入数量有限,无法抢工期

一般地层采用 $\phi 42\text{ mm}$ 、长 $3\ 250\text{ mm}$ 的小导管超前预注浆加固,卵石地层采用 $\phi 25\text{ mm}$ 、长 275 mm 的小导管超前预注浆加固,局部采用双排小导管注浆加固^[6]。

注浆浆液在中砂、粉细砂地层采用改性水玻璃,其余情况采用水泥-水玻璃浆液注浆^[7]。边桩采用 $\phi 1\ 000\text{ mm}\sim\phi 1\ 600\text{ mm}$ 机械成孔桩,中桩采用人工挖孔+机械成孔 $\phi 1\ 000$ 钢管柱。

3 PBA 法单层导洞施工开挖顺序研究

3.1 导洞可行开挖方案

PBA 法施工步骤在横通道内进行导洞施工,导洞采用台阶法施工^[8],小导管超前注浆加固土体,C20 喷射混凝土支护。从西往东小导洞依次编号为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]导洞(见图 5)。为规避 5[#]导洞周边待迁改的大直径给排水管线风险,尽量安排 5[#]导洞

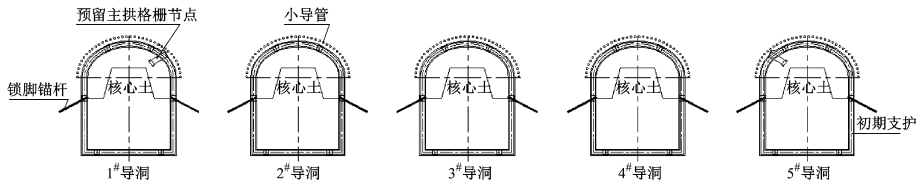


图5 小导洞开挖图

Fig. 5 Diagram of small pilot tunnel excavation

不同导洞开挖方案对地表变形影响的仿真计算结果提取见表 3。

表 3 不同导洞开挖方案对地表变形影响的仿真计算结果
Tab.3 Simulation calculation results of various pilot tunnel excavation schemes influencing ground surface deformation

比较项目	方案 A	方案 B	方案 C
开挖原则	先边导洞	先边导洞	后边导洞
导洞开挖顺序	1 [#] →3 [#] →4 [#] →2 [#] →5 [#]	1 [#] →3 [#] →5 [#] →2 [#] →4 [#]	2 [#] →5 [#] →1 [#] →4 [#] →3 [#]
拱顶最大沉降/mm	7.7	7.6	7.4
地表最大沉降/mm	48.0	49.0	48.0

通过对 3 种不同导洞开挖顺序的数值模拟对比,可以发现是否及时支护对掌子面的稳定性影响较大。当使用超前预注浆加固时,施工引起的拱顶沉降和地表沉降明显减小。通过 3 种不同导洞开挖顺序过程比较,对于软弱地层,通过小导管超前注

浆,可以加固地层,控制施工沉降,对维护掌子面稳定和保障施工安全具有重要意义。导洞从中间开挖,然后间隔开挖导洞可以使其对地表的沉降影响最小,因此,应选择方案 C 的开挖方式。

4 初期支护扣拱顺序变化对地层变形影响

4.1 初期支护扣拱顺序可行方案

在导洞背后回填完成后,沿初期支护扣拱轮廓上方,在横通道墙壁进行超前预注浆加固地层施工。超前预注浆加固地层施工完成后进行初期支护扣拱的开挖支护。施工步骤为:施作超前小导管→马头门开口→开挖土方→架立拱部格栅→预埋背后注浆管→喷射混凝土→拱顶初期支护回填注浆^[10]。

初期支护扣拱开挖顺序如图 6 所示,可分为 2 个方案:方案①按照先两边后中间的原则扣拱,扣拱顺序为 I→IV→II→III;方案②按照先中间后两边的原则扣拱,扣拱顺序为 II→IV→I→III。

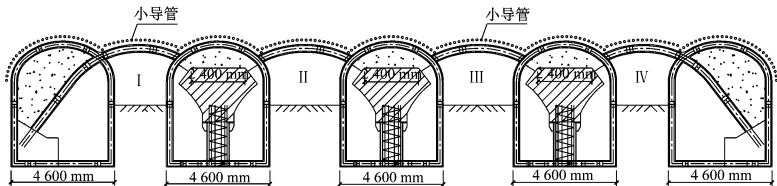


图6 初期支护扣拱开挖顺序示意图

Fig. 6 Schematic diagram of initial support buckle arch excavation sequence

4.2 数值模拟结果分析

PBA 法施工过程中,初期支护扣拱是影响地表沉降的 1 个重要因素^[11]。通过 MIDAS 数值模拟软件对三柱四跨五导洞的 4 个扣拱进行模拟,比较两

种不同的扣拱顺序方案对地表沉降的影响(见表 4、图 7),得出扣拱从外到内对地表的沉降影响为最小,因此,应选择方案①。

表 4 两种扣拱顺序方案的最大沉降对比表

Tab.4 Comparison of maximum settlement between two buckle arch sequence schemes

沉降分类	方案①	方案②
拱顶最大沉降/mm	7.4	8.2
地表最大沉降/mm	58.0	62.0

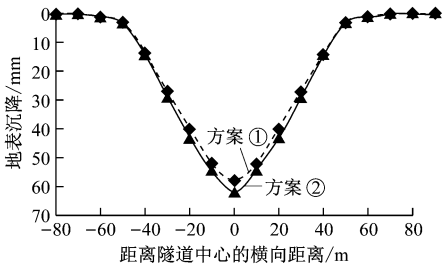


图 7 初期支护扣拱开挖地表沉降图

Fig.7 Ground surface settlement diagram of initial support buckle arch excavation

5 结论

1) 地铁车站采用非 PBA 法施工时,开挖边导洞和中导洞时,最大地表沉降均发生在导洞中线处。中导洞开挖时,下导洞拱顶沉降较大;导洞开挖时,初期支护应尽快封闭成环,以减少地层沉降。在拱扣施工阶段,最大地表沉降发生在拱扣中心线处。

2) 最大地表沉降位置随 3 个阶段的施工顺序不断变化。施工中地表沉降监测应按上述规律在地表布设测点。

3) 3 个阶段中,扣拱施工阶段拱扣处的地表沉降值最大,PBA 法施工对地表沉降起到了控制作用。

4) 跨越既有地铁车站施工时,应对既有地铁车站结构及轨道进行监测,特别是对受影响区段范围内地铁结构宽度大于 0.3 mm 的裂缝及相关病害应加强监测。

参考文献

[1] 李立,袁创辉,伍建. 中国美术馆站外挂厅结构盖挖逆作法设计要点探讨[J]. 隧道建设,2013(12):1022.

LI Li, YUAN Chuanghui, WU Jian. Key design points of out-hung hall structure of China Art Gallery Station constructed by cut-and-cover top-down method[J]. Tunnel Construction, 2013 (12):1022.

[2] 全学让,姚春艳,陈菊. 暗挖车站采用新构筑法设计方案[J]. 现代城市轨道交通,2013(6):44.

TONG Xuerang, YAO Chunyan, CHEN Ju. New method of underground excavation for metro station[J]. Modern Urban Rail Transit, 2013(6):44.

[3] 朱才辉,兰开江,段宇,等. 西安地铁“先隧后井”法横通道施工控制技术研究[J]. 岩土力学,2020(增刊1):379.

ZHU Caihui, LAN Kaijiang, DUAN Yu, et al. The control technology of air shaft cross passage construction in Xi'an subway with “tunnel first then well” method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020(S1):379.

[4] 丁银平. 新疆地铁一号线王家梁站洞桩法施工数值模拟研究[J]. 铁道建筑技术,2018(1):87.

DING Yinping. Numerical simulation study on PBA excavation at Wangjialiang Station of Xinjiang Metro Line 1[J]. Railway Construction Technology, 2018(1):87.

[5] 王峥峥,郭翔宇. 地铁车站洞桩法施工对地层沉降影响研究[J]. 大连理工大学学报,2016(3):257

WANG Zhengzheng, GUO Xiangyu. Research on ground settlement of metro station construction by PBA method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016(3):257.

[6] 张毅,折学森,李楠. 弱膨胀土地区隧道施工工法及塌方原因研究[J]. 公路交通科技,2018(10):82.

ZHANG Yi, SHE Xuesen, LI Nan. Study on tunnel construction scheme in weak-expansive soil area and reason of collapse[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018(10):82.

[7] 王宝林. PBA 工法在北京地铁 19 号线换乘车站施工中的应用[J]. 中国标准化,2017(6):192.

WANG Baolin. Application of PBA construction method in the construction of transfer station of Beijing Metro Line 19[J]. China Standardization, 2017(6):192.

[8] 李金奎,陈朋. 地铁车站洞桩法施工时群洞效应对比分析[J]. 科学技术与工程,2020(14):5737.

LI Jinkui, CHEN Peng. Comparative analysis of group cave effect in construction of subway station by pile-beam-arch (PBA) method[J]. Science Technology and Engineering, 2020(14):5737.

[9] 纪文杰,黄博,姚直书,等. PBA 工法横通道及导洞施工对地表沉降的影响[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2020(1):21.

Ji Wenjie, HUANG Bo, YAO Zhishu, et al. Influence of double connecting tunnel and bidirectional pilot tunnel construction of the Pile-Beam-Arch method on surface settlement[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2020(1):21.

[10] 张庆. 降水导洞在地铁暗挖区间施工中的应用[J]. 现代城市轨道交通,2017(9):24.

ZHANG Qing. Application of dewatering heading tunnel in metro underground excavation section[J]. Modern Urban Rail Transit, 2017(9):24.

[11] 李涛,贾奥运,徐公文,等. 北京地铁车站洞桩法扣拱顺序对地表沉降的影响[J]. 施工技术,2019(1):61.

LI Tao, JIA Aoyun, XU Gongwen, et al. Influence of the arch construction sequences on the surface settlements in Beijing metro station with PBA method[J]. Construction Technology, 2019 (1):61.

(收稿日期:2021-10-08)