



地铁车站不同施工方案比选研究

纪玉田, 宗明奇, 谭现江, 邓朝普

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100000)

摘要:与传统浅埋暗挖法对比,横向盖洞法对最小覆土厚度无特殊要求,解决了超浅埋车站暗挖施工问题。为深入探讨横向洞盖法与传统PBA工法的区别,文章以济南某换乘站为研究对象,介绍了两种工艺的施工工序,通过有限元软件建立两种工艺的数值模型,对比了横向洞盖法与PBA工法施工全过程的沉降规律,并系统探讨了顶管刚度、顶进范围等参数的影响规律。研究表明:和PBA工法相比,横向洞盖法有着施工精度高、工作面多且大、造价低、速度快、受力合理、传力清晰等优点;两种工法在整个导洞开挖时的沉降分别占总沉降的87.4%和75.6%,是地表沉降控制的重点;横向洞盖法的地表整体沉降小于PBA工法,且当顶班覆土深度在7 m以内时,横向洞盖法对控制地表沉降有明显优势,故对于本项目顶(板覆土深度约为3.9~4.4 m),横向洞盖法更加合适;从整体来看,改变横向洞盖法中钢管外径不会对施工阶段的地表沉降造成较大的影响,随着钢管外径的改变,地表沉降波动范围为0~2 mm;地表沉降在提高侧向顶进距离时表现出先快速增大后趋于稳定的规律。

关键词:横向洞盖法; PBA工法; 地表沉降; 导洞开挖; 数值计算

中图分类号: U231.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)06-0015-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.06.071

Comparison and selection of different construction schemes for subway stations

Ji Yutian, Zong Mingqi, Tan Xianjiang, Deng Chaopu

(Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: Compared with the traditional shallow buried underground excavation method, the horizontal cover hole method has no special requirements for the minimum soil cover thickness, solving the problem of underground excavation construction in ultra shallow buried stations. In order to deeply explore the differences between the transverse tunnel cover method and the traditional PBA construction method, a transfer station in Jinan is taken as the research object. Firstly, the construction processes of the two processes are elaborated, and then numerical models of the two processes are established using finite element software. The settlement laws of the entire construction process of the transverse tunnel cover method and the PBA construction method are compared. And the influence laws of parameters such as pipe jacking stiffness and jacking range were systematically explored. The research results indicate that compared with the PBA construction method, the transverse tunnel cover method has advantages such as high construction accuracy, multiple and large working faces, low cost, fast speed, reasonable stress, and clear force transmission; The settlement of the two construction methods during the excavation of the entire pilot tunnel accounts for 87.4% and 75.6% of the total settlement, respectively, making them the focus of surface settlement control; The overall surface settlement of the horizontal tunnel cover method is smaller than that of the PBA construction method, and when the top cover soil depth is within 7 m, the horizontal tunnel cover method has obvious advantages in controlling surface settlement. Therefore, for the top of this project (with a soil cover depth of about

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 山东省重点研发计划(2021CXGC011203); 山东省自然科学基金项目(ZR2020ME258、ZR2020QE269)

作者简介: 纪玉田(1988—),男,工程师,从事城市地下空间方面的研究。

3.9~4.4 m), the horizontal tunnel cover method is more suitable; Overall, changing the outer diameter of the steel pipe in the horizontal tunnel cover method will not have a significant impact on surface settlement during the construction phase. As the outer diameter of the steel pipe changes, the fluctuation range of surface settlement is 0~2 mm; When increasing the lateral jacking distance, surface subsidence exhibits a pattern of first rapidly increasing and then stabilizing.

Key words: horizontal hole cover method; PBA construction method; surface subsidence; Pilot tunnel excavation; numerical calculation

目前地铁车站施工方法主要分为:明挖法、盖挖法和暗挖法(地铁车站主要为浅埋暗挖法)^[1]。其中,明挖法施工简单、技术最为成熟、工程造价低、施工速度快,在各大城市应用最为广泛,但明挖法施工对道路交通影响大,涉及管线改迁量多,对社会影响较大^[2~3]。盖挖法能够在一定程度上减少对道路的占用时间,但避免不了大规模的交通导改及管线改迁^[4]。浅埋暗挖法施工具有施工占地面空间小,对周边环境的影响小,基本不影响地面交通,能够避免大量管线改迁等优点,在城市地铁建设中得到大量应用,其中具有代表性的工法为PBA工法,但其有着施工周期长、刚度较弱、施工作业面少等缺点^[5]。王文涛^[6]以乌鲁木齐某地铁站为例,分析PBA工法施工过程中地表沉降的变化趋势。陈炳春等^[7]通过数值模拟的方式分析了PBA工法开挖导洞阶段初期支护的变形情况,为支护变形的控制提供了指导。由于车站受周边环境条件限制,覆土厚度较浅,部分与既有明挖车站接驳的换乘站覆土厚度不足5 m,传统暗挖工艺难以满足施工需求。针对上述问题,国内部分学者提出了一种新工法,即横向洞盖法,郭馨阳^[8]对横向洞盖法的施工工艺进行了介绍,并对比了地铁站施工中PBA工法和横向洞盖法的结构受力、地表沉降等,但当前关于横向洞盖法在地铁站施工中的研究仍然较少。

基于此,为掌握横向洞盖法对地表沉降的影响程度,以便于制定合适的施工方案,本文通过建立数值模型对比分析了横向洞盖法和PBA工法整个施工阶段内地表沉降的变化趋势,并探究横向洞盖法中顶管刚度和顶进范围对地表沉降的影响,以期可为相关工程提供参考。

1 工程概况

1.1 地铁车站概况

本站为地下二层双柱岛式站台车站,车站有

效站台长度为140 m,站台宽度为15 m。有效站台中心里程为右DK25+213.075,车站设计起点为右DK25+093.817,设计终点里程为右DK25+365.177。车站外包总长度为273 m(其中换乘节点已实施,长度约为31.15 m),标准段外包总宽度为24.1 m,顶板覆土厚度约为3.9~4.4 m。车站主体部分采用横向洞盖(暗挖)法施工。车站附属结构包括4个出入口、2组风亭和1个安全出口,出入口分设于交叉路口的西北、东北、东南3个象限,风亭分设车站东西两端,出入口跨路段采用暗挖施工,其余采用明挖法施工。车站小里程端接暗挖区间;大里程端接盾构区间,左、右线均为盾构接收。

1.2 周边构建筑物概况

本站为换乘站(L型换乘),车站西侧为已运营的地铁车站,北侧为1号风道及6号出入口;西北侧为中石化加油站,附近无其他重要建构筑物。本站主体上方供电管沟因管底标高与顶管冲突,需永久改移并人工破除管沟结构,其他部分管线需改移,地铁站周围建筑情况如图1所示,临近既有轨道交通的部分:1)车站主体,2)3号风道及出入口,3)F出入口。



图1 地铁站周围建筑情况

1.3 工程地质概况

拟建场地主要分布有:杂填土、黄土、粉质黏土、碎石土、中风化石灰岩(破碎)、中风化石灰岩。溶洞:全充填,充填物为粉质黏土,褐红

色, 含少量碎石, 勘察期间未发现地下水。本场工程地质及地水文地质条件较好, 适合采用暗挖工法, 具体如图 2 所示。

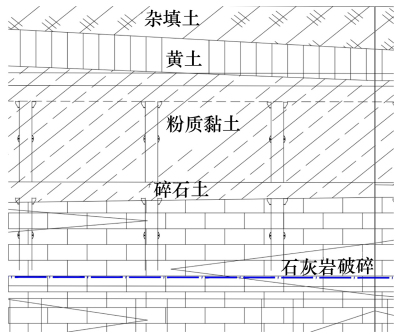


图 2 地质情况示意

2 PBA 工法与横向洞盖法施工工序对比

2.1 PBA 工法

根据建造模式可将 PBA 工法分成 3 种类型 (图 3), 分别为单层导洞大直径桩支撑支柱法、导洞长桩法和导洞条基法。以较为典型的导洞长桩法为例介绍其施工工法, 其主要施作步序: 1) 设置导洞拱部超前支护结构, 同时进行注浆提高地层承载力, 采用台阶法施工纵向导洞, 相邻导洞相互错开; 2) 在边导洞内施工边桩及冠梁, 在中间导洞内施工中立柱 (桩) 及中纵梁; 3) 导洞间土体开挖, 同步进行拱部超前支护结构; 4) 导洞间土体开挖完成后后退式施工顶板结构, 结构施工时分段拆除结构范围的支护结构; 5) 分层开挖土体至中板以下; 6) 施工中板及负一层侧墙; 7) 开挖剩余土体; 8) 施工剩余结构。

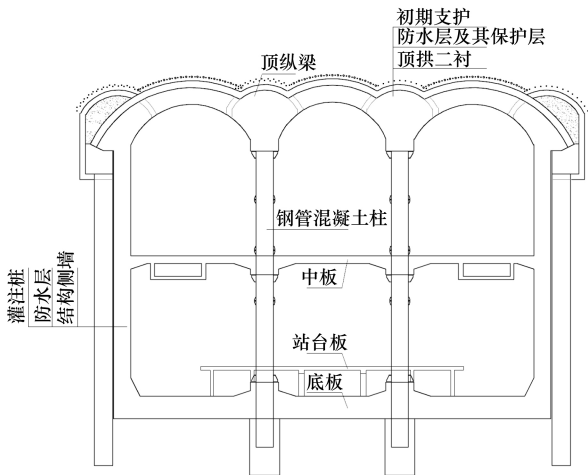


图 3 PBA 工法支护结构示意

2.2 横向洞盖法

为弥补地铁站施工中 PBA 工法施工周期长、刚度较弱、施工作业面少等缺点, 建筑从业者对其进行了优化, 提出了横向洞盖法。和 PBA 工法相比, 横向洞盖法有着施工精度高、工作面多且大、造价低、速度快、受力合理、传力清晰等优点。横向洞盖法主要分为两大步 (图 4), 首先为地面施作顶管工作坑, 沿车站横向打设顶管, 而后进行暗挖施工; 暗挖步序与 PBA 工法类似, 主要为: 1) 台阶法施工纵向导洞; 2) 边桩、中立柱等竖向支撑体系施做; 3) 导洞间土体开挖; 4) 顶板施做; 5) 开挖至中板以下; 6) 施做侧墙及中板; 7) 开挖剩余土体; 8) 施工剩余结构。

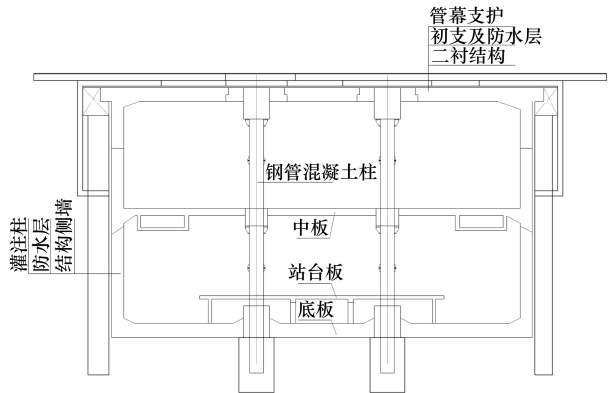


图 4 横向洞盖法示意

3 数值分析

3.1 建立数值模型

参考车站尺寸, 将模型的尺寸的长、宽、高分别设置为 140、80、50 m, 考虑到随着洞室的开挖, 施工对围岩影响逐渐降低, 模型两侧可视作无水平位移, 但不能忽略因自重形成的固结效应, 仅考虑竖向位移, 模型底部自由度设置约束, 顶部不约束。使用理想线弹性模型模拟钢管混凝土柱、边桩、初期支护、二衬等结构材料, 使用平面应变单元模拟土体, 使用梁单元模拟顶管和初期支护。建立的横向洞盖法车站模型共有 20 622 个节点, 20 698 个单元; PBA 模型共有 19 952 个节点, 20 073 个单元, 表 1 所示为结构材料相关参数, 表 2 所示为土层相关参数, 两种工法数值模型如图 5、6 所示。

3.2 施工过程地表沉降分析

地铁站施工时的一个重点控制因素即为地表沉

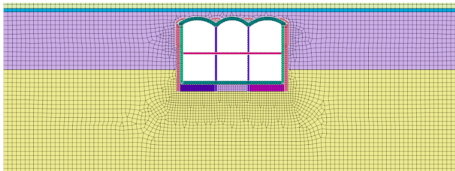


图 5 PBA 工法模型

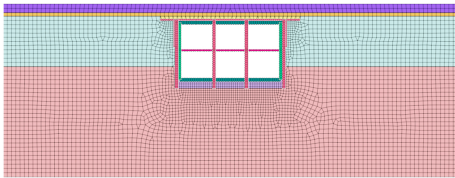


图 6 横向洞盖法模型

降, 为了更加清晰的反映出 PBA 法和横向洞盖法施工时地表沉降变化趋势, 通过数值模拟计算得出两种工法的地表沉降云图, 具体如图 7 所示; 将地表沉降结果取点整理成曲线, 具体如图 8 所示。

由图 7 和图 8 可知: 横向洞盖法施工全过程

地面累计沉降值为 18.5 mm, 低于 PBA 工法的 21.9 mm。从图中可以看出横向洞盖法沉降最大点出现在车站边跨位置, 主要原因为导洞及导洞间土体开挖之前, 顶管已经存在且承担上方全土柱荷载, 竖向支撑体系施做后地面沉降主要取决于顶管自身的抗变形能力, 由于车站边跨大于中跨, 导致边跨沉降最大。PBA 工法最大沉降位置同样发生在边跨, 但相对不明显, 主要原因为 PBA 工法导洞间土体开挖与初支架设无法同步进行, 该工况土体会发生一定程度的应力释放, 各跨由此导致的竖向位移大于顶管结构的变形, 中跨的竖向位移在各工况累计后接近于边跨。

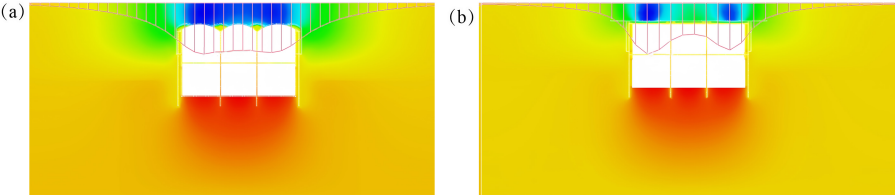
从图 8 中能够看出: 两种工法在整个导洞开挖过程中地铁车站均呈现不断下沉的规律, 横向洞盖法和 PBA 工法在导洞开挖时的沉降分别为 16.27、

表 1 结构材料相关参数

结构类型	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	材料类型	弹性模量/MPa	泊松比	厚度/m
回填边导洞	24.0	C20	25 500	0.2	—
拱顶初支	25.0	C25	28 000	0.2	0.350
导洞初支	25.0	C25	28 000	0.2	0.350
边桩	25.0	C30	30 000	0.2	1.000
桩顶冠梁	25.0	C30	30 000	0.2	—
二衬拱顶	25.0	C40	33 500	0.2	0.900
顶(底)纵梁	25.0	C40	33 500	0.2	—
侧(端)墙	25.0	C40	33 500	0.2	0.800
底板	25.0	C40	33 500	0.2	1.000
顶管	78.5	HPB335	2 100 000	0.2	0.402(管径)
柱子	25.0	C50	34 500	0.2	0.800

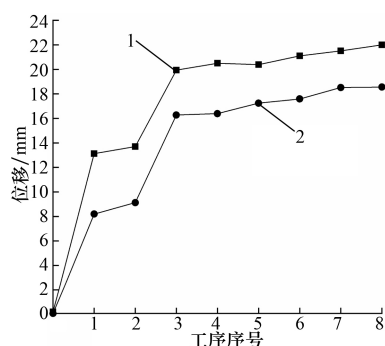
表 2 土层相关参数

土层类型	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)	压缩模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa
杂填土	16.5	10	6.0	0.20	8
黄土	18.7	26	7.2	0.32	12
粉质黏土	19.4	14	7.3	0.35	24
碎石土	26.8	35	106.0	0.25	9
中风化石灰岩	19.0	40	35.0	0.20	11



(a) PBA 工法; (b) 横向洞盖法

图 7 PBA 工法和横向洞盖法地表沉降云图



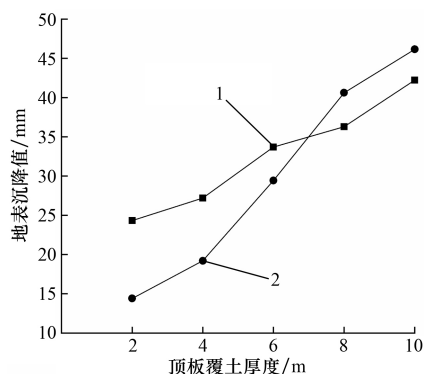
1—PBA工法; 2—横向洞盖法。

图8 两工法施工过程中地表沉降变化趋势

19.93 mm, 占总沉降的 87.9% 和 91%。这是由于两种工法在导洞施工工况时均无竖向支撑结构, 需充分利用土体自身承载能力抵抗竖向位移, 因而该工况沉降量较大, 是地表沉降控制的重点, 故要在开挖导洞前进行超前支护, 并及时注浆加固, 以最快的速度完成封闭成环。从整体也能够看出, 在当前项目车站拱顶埋深范围下, 横向洞盖法对地表沉降造成的影响小于 PBA 工法, 表明此时前者对地表沉降的控制力更强。

3.3 拱顶埋深对地表沉降的影响

为了分析地铁车站拱顶埋深对地表沉降的影响, 通过在两种工法模型中设置不同的顶板覆土深度(2、4、6、8、10 m)来对地表沉降进行计算, 具体计算结果如图9所示。



1—PBA工法; 2—横向洞盖法。

图9 拱顶埋深对地表沉降的影响

由图9可知: 横向洞盖法和 PBA 工法在不同顶板覆土深度下的地表沉降变化趋势基本相同, 均随着埋深的提高而提高。同时因为横向洞盖法是由顶盖结构承担上方全部土荷载, 地表沉降受顶板覆土影响大, 整体曲线略陡于 PBA 工法。而对于 PBA 工法, 当覆土厚度较大时存在一定的土

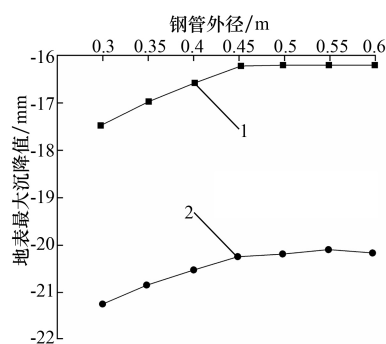
拱效应, 故能够发现当顶板覆土小于 7 m 时横向洞盖法对地表扰动相对较小, 覆土大于 7 m 时 PBA 对地表扰动相对较小, 所以对于本项目顶板覆土深度约为 3.9~4.4 m 时, 选择横向洞盖法作为施工方式是较为合理的。

4 地表沉降受横向顶管刚度及长度的影响

在横向洞盖法中抗弯刚度和顶管长度对施工过程中地表的沉降有较大的影响。通过设置不同的抗弯刚度和顶管长度来分析其对地表沉降的影响程度。

4.1 顶管刚度的影响

通常情况下, 钢管自身力学性质和加固长度对其加强效果起主要作用, 而钢管的刚度主要由钢管管径决定的。此次分析在材料和长度一致的情况下, 地表沉降受钢管外径的影响程度。此次模拟依次将钢管外径 D 设置为 0.6、0.55、0.5、0.45、0.4、0.35、0.3 m。考虑开挖导洞过程中沉降值较大, 故此次仅对完成导洞开挖后和完成车站施工阶段后的地表沉降变化进行了分析, 模拟计算得出两阶段在钢管外径不同时地表沉降变化趋势, 具体如图10所示。



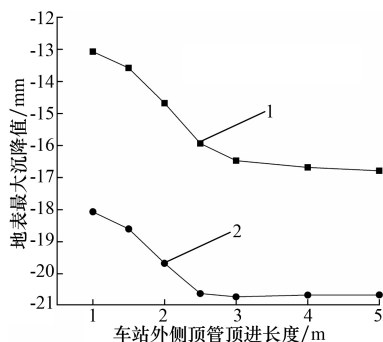
1—完成导洞开挖后; 2—余下结构施工完成后。

图10 钢管外径不同时地表沉降变化趋势

由图10可知: 当钢管外径在 400 mm 以内时, 随着管径的增大, 地表沉降表现出明显降低的规律; 当钢管外径超过 450 mm 时, 随着管径的增大, 地表沉降减小不明显; 同时能够看出, 完成导洞开挖后和完成车站施工阶段后的地表沉降变化规律大致相同。考虑到增大顶管直径会增加造价并加大施工难度, 实际工程中建议采用直径 450 顶管。

4.2 横向顶管超出车站长度的影响

为了分析横向顶管超出车站长度对地表沉降的影响,选择顶管壁厚和外径分别为 16 mm 和 400 mm,并在模型中车站两侧超出长度分别设置为 1、1.5、2、2.5、3、4、5 m 来计算对地表沉降的影响规律。与上节相同,同样仅对完成导洞开挖后和完成车站施工阶段后的地表沉降变化进行了分析,模拟计算得出两阶段在顶管超出车站长度不同时的地表沉降变化趋势,具体如图 11 所示。



1—完成导洞开挖后; 2—余下结构施工完成后。

图 11 钢管顶进范围不同时的地表沉降变化趋势

由图 11 可知:本次所研究地铁项目中地表沉降在增加顶管超出车站长度时表现出先快速减小后趋于稳定的规律。综合考虑施工对地面的影响、造价、工期等因素,横向顶管超出车站的长度不宜超过 3 m。

5 结 论

为了掌握不同施工工法对地表沉降的影响程度,便于制定合适的施工方案,通过建立数值模型对比分析了横向洞盖法和 PBA 工法整个施工阶段内地表沉降的变化趋势,并探究了横向洞盖法中顶管刚度和长度对地表沉降的影响,主要得出以下结论:

(1) 横向洞盖法和 PBA 工法在整个导洞开挖过程中地铁车站均呈现不断下沉的规律,且导洞

开挖阶段的沉降值较大,是地表沉降控制的重点;两种工法在不同顶板覆土深度下的地表沉降变化趋势基本相同,均随着埋深的提高而提高;当顶板覆土小于 7 m 时横向洞盖法对地表扰动相对较小,覆土大于 7 m 时 PBA 工法对地表扰动相对较小,故在当前项目车站拱顶埋深范围下,横向洞盖法对地表沉降造成的影响小于 PBA 工法,对地表沉降的控制力更强。

(2) 当钢管外径在 450 mm 以内时,随着管径的增大,地表沉降表现出显著降低的规律;当钢管外径超过 450 mm 时,随着管径的增大,地表沉降降低不明显;地表沉降在增加横向顶管长度时表现出先快速下降后趋于稳定的规律,这表明横向顶管超出车站的长度不宜超过 3 m。

参考文献:

- [1] 王凌,朱正宜,钟彦之. 明挖法地铁车站结构设计探讨[J]. 建筑技术开发,2018,45(16):69-71.
- [2] 王远六,易领兵,杜明芳,等. 砂卵石富水区域盾构小净距穿越单洞双线暗挖站施工技术[J]. 合肥工业大学学报,2023,46(8):1109-1114.
- [3] 谢阳辉. 论明挖法技术在地铁车站施工的应用[J]. 建筑工程技术与设计,2016(36):111.
- [4] 王健,马红涛,王水海. 明挖车站跨路口局部盖挖逆作法施工技术研究[J]. 现代隧道技术,2022,59(S2):125-130.
- [5] 王新明. 试论地铁车站盖挖逆作法施工技术[J]. 环球市场,2018(32):295.
- [6] 王文涛. 岩石地层机械法开挖 PBA 工法地铁车站地面沉降分析[J]. 工程机械与维修,2023(4):93-95.
- [7] 陈炳春,邓刚,董文广. PBA 工法上导洞施工初期支护变形数值模拟分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(S2):63-68.
- [8] 郭馨阳. 地铁车站横向洞盖法施工与 PBA 工法施工力学特性对比分析[D]. 北京:北京交通大学,2020.