

软土地区地铁车站矩形顶管法施工方案研究*

张中杰 黄爱军 王春凯

(上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,200125,上海//第一作者,正高级工程师)

摘要 对上海轨道交通14号线静安寺站工程,提出了软土地区车站总体布置方案,重点研究了采用矩形顶管法施工所涉及的管片几何断面、管节材料、拼装方式、接缝防水、抗震性能等关键内容并给出了解决方案。经分析,站台层顶管横断面取 $8.85\text{ m}\times 7.65\text{ m}$,可采用钢管节+后浇钢筋混凝土结构型式的复合管节;顶管管节纵缝采用刚接接头,环缝采用改进型的F型承插口;暗挖段防水关键在于环缝防水处理,施工阶段采用承插口处弹性密封垫与钢套环挤压防水,使用阶段采用后浇的一体型钢筋混凝土结构防水。经有限元模拟分析表明,14号线静安寺站两端明挖、中间顶管法施工的车站结构可以满足抗震要求。

关键词 软土地区;地铁车站;矩形顶管法;钢-混凝土复合材料;抗震性能

中图分类号 TU94⁺1; U213.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.07.035

Construction Scheme of Rectangular Pipe Jacking Method for Metro Station in Soft Soil Area

ZHANG Zhongjie, HUANG Aijun, WANG Chunkai

Abstract Based on the project of Jing'an Temple Station on Shanghai metro Line 14, a general layout plan of metro station built in the soft soil area is proposed. In which, the geometric section, pipe materials, assembling mode, waterproof and seismic capability in the station construction by adopting the rectangular pipe jacking method are mainly studied. Through analysis, when the cross section of pipe jacking at station floor takes $8.85\text{ m}\times 7.65\text{ m}$, the composite pipe joint of steel pipe joint+post cast reinforced concrete structure should be adopted. The longitudinal joint of pipe jacking joint should adopt rigid connection, and the improved "F" connector is used in the circumferential joint. The key point of waterproof in the undermining section lies in the waterproof treatment of the circumferential joint, and the waterproof at the construction stage depends on the squeeze of elastic gasket and the steel ring, and the waterproof at the service stage depends on the post cast reinforced

concrete structure. The results of finite element simulation show that the structure of Jin'an Temple Station on Shanghai metro Line 14 built with open excavation at both ends and pipe jacking in the middle could meet the seismic performance requirements.

Key words soft soil area; metro station; rectangular pipe jacking method; steel concrete composite; seismic capacity

Author's address Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., 200125, Shanghai, China

上海是典型的软土地区,地下水位高、土体强度低。随着城市地下空间的大体量开发利用,留给后续开发的限制条件越来越多^[1]。传统的地铁车站建设需要在市政道路下进行开挖修建,对社会交通、地下管线、周边环境造成较大的负面影响,已无法完全满足中心城区地铁车站的建设要求。因此如何突破传统、创新施工方法,以更环保的暗挖方式建设地铁车站已成为亟需解决的难题。

1 上海轨道交通14号线静安寺站总体布置

上海轨道交通14号线静安寺站(见图1)位于城市核心区的华山路与延安中路交叉路口,沿华山路南北向布置,为地下3层车站。车站主体下穿延安路高架桥,站址东侧为静安寺主变电站、伊美广场、静安公园,西侧为会德丰大厦、上海国际贵都大饭店,北端头邻近已运营的上海轨道交通2号线盾构隧道,周围环境非常复杂。采用传统明挖法施工将影响华山路、延安路这两条主干道的交通,且道路下方有大量市政管线,搬迁难度很大。经研究,明挖法总工期需70个月,管线改迁费用达2亿元,且存在低净空超深地下连续墙施工、紧邻高架桥桩施工的风险。为克服上述困难,本文对静安寺站采用暗挖法的建设方案进行了

*上海市优秀学术/技术带头人计划项目(17XD1422000)

研究。

静安寺站沿华山路分为 A、B、C 三个分区(见图 1)。其中,对交通、管线和工期影响最大的过延安路段(B 区)采用暗挖法施工,A、C 区采用明挖法施工并兼作暗挖工作井。

在满足现行消防规范中疏散楼梯间距要求的前提下,结合高架位置、地面交通、管线分布等因素确定暗挖段(B 区)长度为 82 m。为尽量减小暗挖横断面尺寸以降低施工对周边环境的影响,暗挖段采用分离岛式站台布置形式,根据客流计算采用 4.6 m 站台宽度。

暗挖施工方法选择时,盾构法与顶管法均是软土地区较成熟的施工方法。考虑到顶管法结构刚度较大,管节接缝少,变形和不均匀沉降较小,故拟采用顶管法施工。

根据车站建筑功能的要求,暗挖段(B 区)共分 3 条顶管通道,站厅层为 1 条内净空为 8.44 m×3.78 m 的顶管连通 A、C 区的公共区(见图 2、图 4);站台层上、下行线各采用 1 条大断面类矩形顶管,两者之间通过 4 条联络通道进行横向连通(见图 3、图 4)。



图 1 静安寺站总平面图

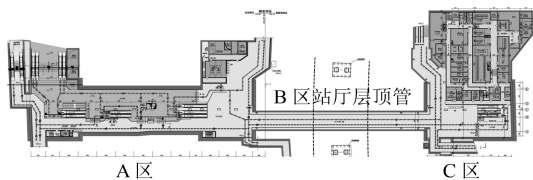


图 2 静安寺站站厅层建筑布置图

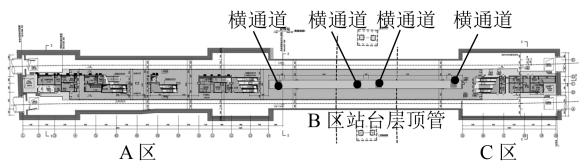


图 3 静安寺站站台层建筑布置图

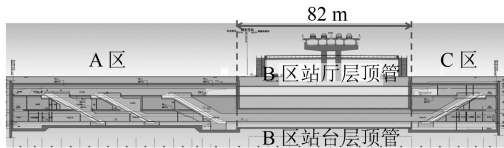


图 4 静安寺站纵断面布置图

站台层顶管段埋深约 15 m,断面位于第④层灰色淤泥质黏土、第⑤₁₋₁层灰色黏土,其中,第④层呈流塑状,⑤₁₋₁层呈软-流塑状,均具有含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性高等特点。暗挖段横断面如图 5 所示。其地层特性如表 1 所示。

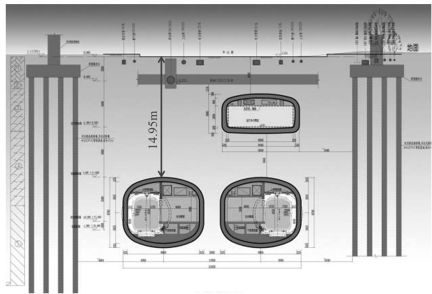


图 5 静安寺站暗挖段横断面图

表 1 地层参数表

| 土层名称 | 含水量/ 量/% | 重度/ (kN/m ³) | 固结快剪 | | 无侧限 抗压强 度/kPa | 静止侧 压力 系数 |
|-----------------------|-------------|-----------------------------|-------------|--------------|---------------------|-----------------|
| | | | 黏聚 力/kPa | 内摩擦 角/(°) | | |
| ② ₁ 黏土 | 33.1 | 18.3 | 21 | 17.0 | 76 | 0.50 |
| ③淤泥质粉质黏土 | 42.5 | 17.3 | 12 | 15.0 | 41 | 0.55 |
| ④淤泥质黏土 | 50.5 | 16.7 | 14 | 11.5 | 38 | 0.60 |
| ⑤ ₁₋₁ 黏土 | 38.5 | 17.8 | 17 | 13.0 | 72 | 0.52 |
| ⑤ ₁₋₂ 粉质黏土 | 34.8 | 18.0 | 17 | 17.5 | 83 | 0.50 |

2 顶管法施工地铁车站的关键技术

顶管法施工的地铁车站,应重点研究顶管的几何断面、管节材料、拼装方式、防水性能等关键技术内容,以满足施工和运营的要求。

2.1 车站横断面宽度和高度

地铁限界应根据车辆轮廓尺寸、线路特性、施工精度等因素进行综合比选,确定一个既能保证列车运行安全,又不增加隧道空间的经济合理断面^[3]。因此暗挖车站断面宽度尺寸的确定,需要考虑设备限界、管线敷设空间、曲线段的加宽以及暗挖施工误差等因素。

上海轨道交通 14 号线采用 A 型车,根据限界要求,线路中心线距离站台边缘 1 570 mm,距离设备限界最外侧为 1 765 mm^[4]。考虑到不小于 400 mm 的管线敷设空间(本工程取 415 mm)、200 mm 的装修层厚度、4 600 mm 的站台宽度,以及直线段不计曲线加宽等因素,顶管横断面净宽度合计为 8 550 mm。结合顶管施工工艺要求,同时考虑 150 mm 的施工误差,得到顶管横断面总宽度为 8 850 mm。

顶管段横断面高度主要受管节受力、设备布置、叠交顶管施工净距、明挖段建筑布置等多方面因素的影响。

站台层顶管覆土较厚,采用拱形断面以减小结构内力。通过不同矢高比(拱形段的矢高与跨径之比)、宽高比(整个横断面的宽度与高度之比)的受力分析对比发现,当横断面矢高比增大或宽高比减小时,管节的正、负弯矩均变小。顶管段作为车站主体的一部分,横断面高度尚需统筹考虑上排热风道、下排热风道、电缆通道、通风管及其他设备的布置空间,并兼顾站台层顶管与站厅层顶管之间的施工净距、明挖工作井的开挖深度等因素,综合考虑后内净高取 7 650 mm,拱部半径约 8.3 m。

站台层顶管段的横断面布置如图 6 所示。

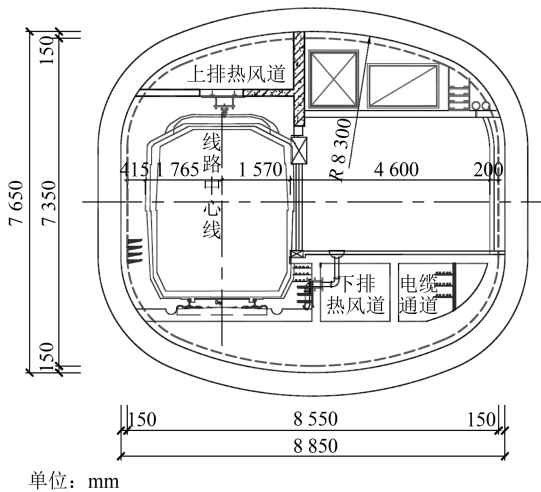


图 6 站台层顶管段横断面尺寸

2.2 管节材料

顶管管节可采用钢筋混凝土、钢、铸铁、钢-混凝土复合等材料。常规顶管工程从工程造价的角度考虑,一般优先采用钢筋混凝土管节,但在大开孔部位或构件尺寸偏大难以进行运输作业等情况下,钢筋混凝土管节往往无法适用。

本工程站厅层顶管采用常规的钢筋混凝土管节。站台层横断面几何尺寸较大,需设置横向联络通道。通过管节质量、施工运输、结构耐久性等多方面综合考虑,采用钢管节+后浇钢筋混凝土结构型式的复合管节(见表 2)。其中顶管施工阶段为钢管节,顶管贯通后浇筑钢筋混凝土形成复合管节。

表 2 管节材料对比表

| 项目 | 管节材料 | | | |
|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 钢筋混凝土 | 钢 | 铸铁 | 钢-混凝土 |
| 质量/t | ≈89 | ≈48 | ≈48 | ≈48(不含后浇钢筋混凝土) |
| 制作 | 简单 | 简单 | 复杂 | 简单 |
| 防腐 | 好 | 一般 | 好 | 较好,内部后浇混凝土起到保护隔离作用 |
| 防水 | 一般,环缝易渗漏水 | 一般,环缝易渗漏水 | 一般,环缝易渗漏水 | 较好,内部后浇混凝土兼具防水功能 |
| 施工效率 | 略快 | 略快 | 略快 | 一般,内部后浇混凝土施工较复杂 |
| 运输 | 每环分成 2 块,约 5 m 宽,需占用 2 车道 | 每环分成 2 块,约 5 m 宽,需占用 2 车道 | 每环分成 2 块,约 5 m 宽,需占用 2 车道 | 每环分成 2 块,约 5 m 宽,需占用 2 车道 |
| 占用场地 | 地面拼装、翻身、吊装至井下 | 地面拼装、翻身、吊装至井下 | 地面拼装、翻身、吊装至井下 | 地面拼装、翻身、吊装至井下 |
| 造价 | 一般 | 较高 | 较高 | 较高 |

注:质量按 2 m 管节进行计算

钢管管节由背板、纵向肋板、横向肋板等构件组成。管节环宽为 2 m,纵向肋板间距约 480 mm,横向加劲肋板间距约 500 mm(见图 7)。后浇混凝土标号采用 C35,抗渗等级为 P10,钢筋混凝土结构纵向贯通。



图 7 钢管管节示意图

2.3 管节拼装方式

本工程位于华山路与延安中路交叉路口,地处中心城区,交通繁忙,车流量巨大,为管节运输带来一定困难。设计中将单环管节在弯矩较小处分为两块,单块宽度约为 5 m,单块质量约为 24 t,以解决运输的困难。同时,为便于工厂流水化生产,单环管节两个分块完全相同。管节分块如图 8 所示。

单块管节运输至现场后配对合拢,连接成整环后吊入工作井进行推进施工。为增强管节的结构刚度和防水性能,接头采用焊接处理,焊缝在接头位置兜绕成环,以达到刚接接头的要求。管节在工厂预制时,纵缝位置预留焊接坡口,以便于现场焊接施工(见图 9)。

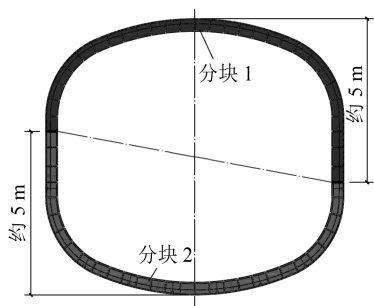


图8 管节分块示意图

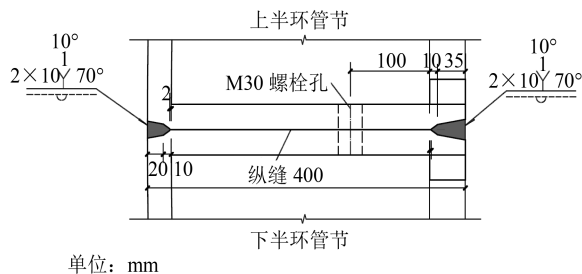


图9 管节纵缝节点

考虑到管节施工推进时调节姿态的需要,环缝处采用 F 型承插口接头设计。为提高使用阶段顶管段的整体刚度,环缝处整环设计 24 个 M30 高强螺栓进行连接(见图 10)。

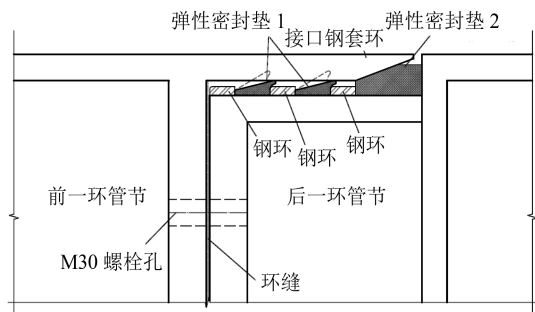


图10 管节环缝节点

2.4 管节防水

本工程暗挖段作为地铁车站的一部分,防水等级为一级。

暗挖段防水关键在于环缝防水处理。施工阶段,管节环缝在 F 型承插口处设计了 3 道弹性密封垫加强防水,必要时还可在管节接口处注聚氨酯,将前一环钢套环与后一环管节雄口处的空隙填充,起到彻底隔绝外侧水土的作用。使用阶段,管节环缝处设置“凹槽”,在后浇钢筋混凝土时使环缝接头位置形成 250 mm 厚的钢筋混凝土结构(见图 11)。通过钢筋混凝土结构的自防水能力,达到防水要求。

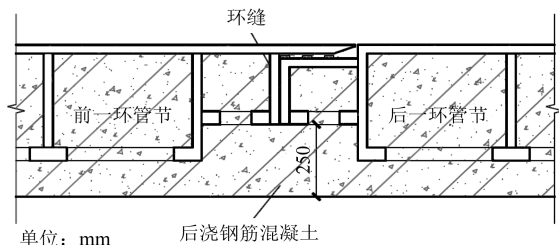


图11 使用阶段管节环缝防水节点

3 抗震分析

静安寺站采用两端明挖法、中间顶管法施工,因结构纵向断面差异性大,导致车站结构刚度突变,以及平面和竖向均出现不规则状态。

为分析车站的抗震性能,采用有限元软件 ABAQUS 建立整体三维空间有限元模型(见图 12)。明挖结构及顶管管节采用壳单元进行模拟,柱采用梁单元模拟,土体采用实体单元模拟。

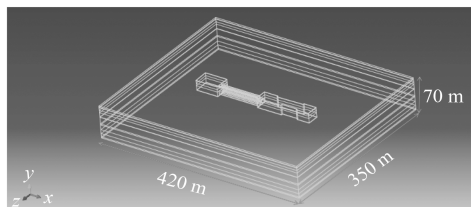


图12 静安寺站有限元模型

为更好地研究暗挖段结构的地震响应,选取内力值较大部位作为关键断面,即 4 处联络通道所在断面以及顶管与车站的 2 个接头断面,共 6 个关键断面(见图 13)。

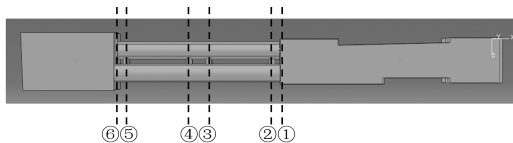


图13 计算断面位置示意图

采用时程分析法,进行设防烈度及罕遇地震工况的验算。在计算中考虑不同方向地震动对车站结构地震响应的的影响,除了输入水平横向的地震动外,还考虑水平、纵向和竖向地震动对结构响应的的影响,共分 3 个工况:静力+水平横向地震动,静力+水平双向地震动,静力+三向地震动。

顶管管节在其与明挖段以及联络通道连接处等刚度剧变位置有明显的应力集中现象。罕遇地震作用下,各个关键断面处的最大层间位移角为 1/1582,小于规范要求的 1/250(见图 14)。

(下转第 171 页)

按照目前每年开盖检查车门的周期进行计算,全年针对 54 列列车车门进行系统修检修任务共需 10 044 人工 h。

5.2 优化后

优化后,平均每天开展 2 列列车系统修,因此,除 3 月份、6 月份、9 月份、12 月份外的剩余 8 个月中,每列列车系统修可节约 1~2 人,每天根据检修车数的不同可节约 2~4 人,全年可节约 3 888 人工 h。若改为每年按照 3 个月开盖检查 1 次的周期进行计算,全年针对车门进行系统修检修共需约 6 156 人工 h。

此外,全年除 3、6、9、12 月份之外的其他月份与此 4 个月作业人数差距较大的情况,可通过调整系统修可变包、专项修及普查改造的作业安排来确保各月作业人数保持一致。

6 结语

本文通过 FMECA 分析法,以地铁检修人车比

压缩以及人力成本的管控为目的。通过梳理 2016 年至 2017 年执行系统修后的车门故障数据,对车门系统的 33 个部件情况进行分析,并对其中 7 个重点部件进行了详细研究,最终确立了将车门检修周期从每月一检修调整为每三月一检修的优化方案。预计优化后全年能节约 3 888 人工 h,充分实现了优化人员配置、控制人车比的目的。

参考文献

- [1] 全国六西格玛管理推进工作委员会.六西格玛管理评价准则[M].北京:中国标准出版社,2007.
- [2] 何帧,张志红.精益与六西格玛的比较研究[J].工业工程,2006(1):1.
- [3] 巴尼 M,麦卡锡 T.总裁读:新六西格玛[M].摩托罗拉大学,译.北京:中国人民大学出版社,2003.
- [4] 周海京,遇今.故障模式、影响及危害性分析与故障树分析[M].北京:航空工业出版社,2003.
- [5] 王绍印.故障模式和影响分析[M].广州:中山大学出版社,2003.

(收稿日期:2018-07-27)

(上接第 166 页)

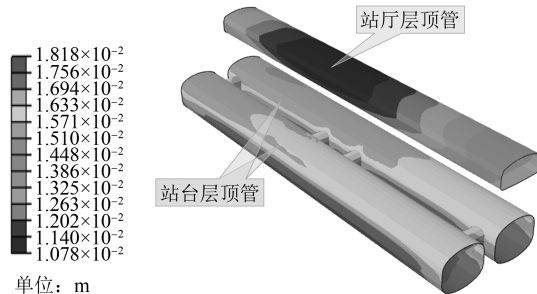


图 14 顶管段结构抗震计算位移云图

通过上述计算分析,车站两端采用明挖法、中部采用顶管法的施工方案,可以满足抗震要求。

4 结语

14 号线静安寺站是上海首个采用暗挖法实施的地铁车站,已于 2017 年 1 月正式开工建设。本文在提出暗挖车站站型及总体布置的基础上,进一步对软土地区地铁车站的矩形顶管法施工方案进行研究,主要得到以下结论:

1) 站顶层顶管断面宽度应考虑设备限界、管线敷设空间、曲线段加宽、施工误差等因素;断面高度应考虑管节受力、设备布置、叠交顶管施工净距、

明挖段建筑布置等因素。本工程采用 A 型车,横断面尺寸取 8.85 m×7.65 m。

2) 站台层超大类矩形顶管可采用钢管节+后浇钢筋混凝土结构型式的复合管节。

3) 顶管管节纵缝采用刚接接头,环缝采用改进型的 F 型承插口;暗挖段防水关键在于环缝防水处理,施工阶段采用承插口处弹性密封垫与钢套环挤压防水,使用阶段采用后浇的一体型钢筋混凝土结构防水。

4) 两端明挖、中间顶管法实施的地铁车站结构可以满足抗震要求。

参考文献

- [1] 朱合华,骆晓,彭芳乐,等.我国城市地下空间规划发展战略研究[J].中国工程科学,2017(6):12.
- [2] 朱久川,王文军.大直径盾构开挖修建地铁车站的探索[J].城市道桥与防洪,2013(5):184.
- [3] 张春飞.地铁限界设计分析[J].北方交通,2008(8):160.
- [4] 上海市城市建设设计研究总院.上海市轨道交通 14 号线静安寺站暗挖专题研究报告[R].上海:上海市城市建设设计研究总院,2015.

(收稿日期:2018-08-08)