

洞桩法在广州地铁中的应用及下穿既有隧道可行性评估

朱建峰¹,翟利华^{2,3},史海欧²,梁粤华²

(1. 佛山市铁路投资建设集团有限公司, 广东 佛山 528000; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010;
3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 洞桩法是浅埋暗挖法的一种, 已经在全国多个城市的地铁建设中得到了广泛的应用。然而由于广州地区地下水位埋深较浅的原因, 洞桩法并没有太多的应用先例, 累积的设计经验也相对欠缺。广州地铁某中心城区站因周边环境复杂、设计限制条件多, 无法采用明挖法施工, 同时站体对应土层透水性弱, 所以初步设计拟定采用洞桩法施工。因此, 就设计过程中碰到的一些关键问题进行了论述, 提供了应对的思路和方法, 可为类似工程提供有益的参考。

关键词: 地铁车站施工; 洞桩法; 下穿既有盾构隧道

中图分类号: U 231.4; U 455.4 文献标志码: B 文章编号: 1009-7767(2019)04-0164-05

PBA Tunneling Application and the Feasibility Assessment under the Existing Tunnel in Guangzhou Metro

Zhu Jianfeng, Zhai Lihua, Shi Haiou, Liang Yuehua

洞桩法(即PBA法)是浅埋暗挖法的一种, 自1992年在北京地铁复八线首次成功施作以来^[1], 已经在全国多个城市的地铁建设中得到了广泛的应用, 如北京地铁7号线和10号线、沈阳地铁1号线、哈尔滨地铁2号线等^[2-4]。洞桩法的原理是将传统的地面框架结构施工理论和地下工程暗挖法的施工技术有机结合, 在提前暗挖好的小导洞内施作边/中桩-顶梁-顶拱(pile-beam-arch)并形成一体化的外力支撑体系, 然后在此支撑体系的保护下逐层向下开挖土体和施作永久结构。由于其结构受力明确、施工安全性较高, 对地面沉降控制好且断面利用率高, 所以特别适用于地面交通繁忙、地下管线多、对地面沉降要求较高的城市中心区域。然而由于广州地区地下水位埋深较浅的原因, 洞桩法并没有太多的应用先例。

广州地铁某中心城区站位于华南第一商圈——天河圈中心区域, 周边环境极其复杂, 限制条件繁多, 同时站体侧墙对应位置土层透水性弱, 初步设计拟采用洞桩法施工。笔者将围绕初步设计中碰到的一些关键问题展开论述, 归纳和总结应对这些问题的思路和方法, 以期为类似工程提供有益的参考。

1 工程概况

该车站位于广州市天河区某主干道正下方, 站体

呈东西走向, 下穿既有APM线。车站前后区间分别下穿既有地铁1号线和3号线(正、支线)区间。站点北侧为天河体育中心, 南侧为天河城百货和天环广场等, 西侧为广百百货、广州购书中心以及维多利广场等。站点周边用地主要为商业用地和居住用地。

车站为地下2层岛式站台车站, 外包总长236.7 m, 标准段外包宽25.4 m, 车站轨面埋深约33 m, 拱顶覆土约19 m, 各土层关键参数及简化厚度见表1。

表1 广州地铁某车站土层关键参数表

土层 编号	土层名称	层厚/ m	弹性模 量/MPa	泊松 比	重度/ (kN/m ³)	K ₀	孔隙 比
① ₂	杂填土	3.0	10	0.30	17.5	0.429	0.75
④ _{N-1}	粉质黏土	1.0	12	0.38	18	0.613	0.90
⑤ _{N-1}	残积粉质黏土	10.9	17	0.35	20	0.538	0.72
⑦ ₃	强风化砂岩	5.4	90	0.25	22	0.333	0.67
⑨ ₃	微风化砂岩	1.8	6 250	0.20	26	0.010	0.01
⑨ ₁	微风化砾岩	4.4	7 500	0.20	26	0.010	0.01
⑨ ₃	微风化砂岩	4.5	6 250	0.20	26	0.010	0.01
⑨ ₁	微风化砾岩 以下部分		7 500	0.20	26	0.010	0.01

2 车站施工方法确定

2.1 车站施工方法比选

车站上方道路为广州市东西向主干道, 现状地面交

通拥堵,不允许封路占道开挖。如需占道,则需按照“占一还一”的原则编制交通疏解方案,以减少对现状交通的影响。另一方面,该车站上方为BRT体育中心站,该站客流量非常大,为众多公交线路的始末站,改移难度较大,改移将对沿线居民的出行造成重大影响。

同时,该主干道路面下方管线密集,且为大型地下管线。主要控制性管线有: $\varnothing 1\text{ 200 mm}$ 污水管2条、 $\varnothing 1\text{ 200 mm}$ 给水管1条、 $\varnothing 529\text{ mm}$ 中压燃气管1条、 $\varnothing 800\text{ mm}$ 给水管2条、 $1\text{ 200 mm} \times 350\text{ mm}$ 的110 kV电缆沟1条、军用光缆多条,另外还有多组10 kV电力管和多组电信光缆,管线迁改困难。

鉴于上述原因,若采用明挖法或盖挖法施工,对

城市交通影响会非常大,管线迁改费用极高、迁改时间漫长。若采用明、暗挖结合法施工,即站台与站厅分离,站台暗挖、站厅明挖,则明挖站厅仍需临时占地和永久征地,但车站周边地下空间有限,基本没有面积较大的空闲地块;同时,站台与站厅分离的建筑功能较差,消防疏散能力弱。综合比选,该车站主体结构拟采用全暗挖法施工,最大限度地降低对地面交通、地下管线及APM线的影响,仅竖井和部分附属结构需临时占地和永久征地,同时,较好地满足了车站功能和消防疏散能力的要求。另外,该车站埋深大,拱顶主要位于强风化至中风化地层,也为采用大断面矿山法施工提供了条件。施工方法详细对比分析见表2。

表2 施工方法技术经济对比

对比项目	明挖法	盖挖法	暗挖法
对交通的影响	占道面积大,影响时间长	占道面积较小,影响时间较短	不占道,不影响交通
对地下管线的影响	车站范围管线迁改量大	车站范围管线拆迁量大	对管线影响小
对周围建筑的影响	施工对居民的干扰和对建筑物的影响较大	施工对居民的干扰和对建筑物的影响较小	施工对居民的干扰和对建筑物的影响小
施工难度	施工技术成熟,难度小	较大	大
施工速度	快	较慢	慢
施工复杂程度	简便	复杂	较简便
防水质量	好	较好	差
工期	短	较长	较长
安全性	高	较高	差

2.2 暗挖车站开挖方式选择

对于大跨度浅埋暗挖车站,开挖方式主要有:双侧

壁导坑法(眼镜工法)、中洞法、侧洞法、洞桩法、拱盖法等。各种开挖方式的对比见表3。

表3 浅埋暗挖车站各种开挖方式对比表

对比项目	双侧壁导坑法	中洞法	侧洞法	洞桩法	拱盖法
地面沉降	较小	较大	较大	较小	小
施工安全性	中等	中等	较高	高	中等
断面利用率	中等	中等	中等	高	高
防水质量	较好	较好	柱顶防水差,有集水槽	柱顶防水差,有集水槽	好
施工环境	一般	较好	较好	导洞内稍差	好
工效	工序转换多,工效低	较低	低	较低	高
受力条件	较好	较好	较好	较差	好
废弃工程量	较大	中等	大	较大	较小
造价	高	中等	高	较低	较高

从表3可以看出,中洞法、侧洞法容易引起较大的地面沉降,而该车站位于广州市主干道正下方且周边建筑林立,需要严格控制沉降,因此该项目不宜采用中洞法、侧洞法开挖。双侧壁导坑法工序转换多且临时

支护拆除复杂,而该项目开挖作业面较狭窄,无法提供机械进场开挖空间,因此双侧壁导坑法也不适合。对比洞桩法和拱盖法,由于该车站地质条件一般且开挖过程不允许降水导致地层的自稳时间减小,开挖风险

及施工难度高,因此该车站拟采用相对安全的洞桩法进行施工。

3 计算模型与计算简图

该车站主体结构横向为框架结构,纵向结构断面与荷载分布无突变,底板的地基承载力均匀,因此主体框架结构的受力分析可简化为平面问题。

1)设计采用“荷载-结构”模型(见图1),主体结构按平面框架进行内力分析,沿车站纵向取1延米作为计算单元。单元结构断面计算应考虑最高水位和最低水位2种工况,取最不利内力情况进行配筋。

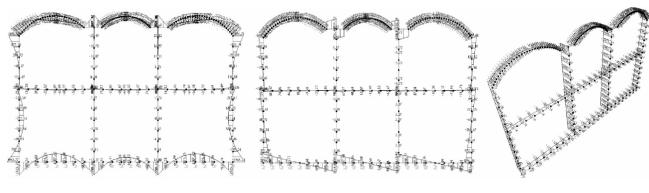


图1 平面计算内力图

2)侧壁和底板的土体以受压弹簧来模拟。如果弹簧反力超过地基承载力则取消相应弹簧并用最大地基反力代替。

3)边桩和内衬墙按重合结构考虑。两者靠在一起,相互平整贴合但不连接,中间设置隔离层,内、外墙所产生的垂直方向变形相互不影响,但水平方向变形相同。

4)结构计算按永久荷载、可变荷载、施工荷载和偶然荷载等各种组合工况进行。侧向水土压力取静止土压力,采用水土分算,水土压力共同作用于主体结构侧墙上。

根据计算结果,拟定主要结构尺寸见表4。

表4 标准段主要结构尺寸拟定表

类别	材料	尺寸/mm
车站主体结构	初支	C25早强混凝土P6 300/350
	拱顶	C35钢筋混凝土P10 900
	底板	C35钢筋混凝土P12 1 200
	中板	C35钢筋混凝土 400
	外墙	C35钢筋混凝土P12 1 000
	顶纵梁	C35钢筋混凝土P10 2 000×2 800
	中纵梁	C35钢筋混凝土 1 400×1 000
	底纵梁	C35钢筋混凝土P12 2 000×2 600
	中柱	钢管混凝土柱C60 直径1 200,钢管壁厚20
	站台板及其他内部结构板	C35钢筋混凝土 200

4 洞桩法开挖下穿既有APM线可行性评估

该车站下穿既有APM线,两者垂直净距约3.5 m。APM线为盾构隧道,外径为6.0 m。根据GB 50652—2011《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》两者相对位置判断为非常接近^[5],需要利用有限元模拟对开挖导致的APM线沉降进行评估。

4.1 主要支护参数

该车站采用洞桩法开挖,其中小导洞采用台阶法施工,辅助施工措施主要有:

- 1)拱部采用Φ42 mm超前小导管注浆,小导管环距300 mm、纵距1.5 m;
- 2)拱肩及边墙上Φ22 mm砂浆锚杆呈梅花形布置,间距1 m×1 m;
- 3)下穿APM线时,采用Φ108 mm自进式大管棚支护,大管棚环距400 mm,之间配合Φ42 mm超前小导管注浆。

4.2 模拟软件及方法

目前,地下结构常规和公认的计算方法有2种,即荷载-结构模型和地层-结构模型。地层-结构模型认为地下空间结构体系是由围岩和支护共同组成的,围岩既是荷载的来源,又是支护的重要组成部分,它以地下结构和周围岩土介质为分析对象,从地层的初始应力出发,采用岩体力学方法计算围岩和支护对围岩应力和位移场的作用。地层-结构模型适用于几何形状、围岩初始应力状态及地质条件等较为复杂的地下工程,尤其是需要考虑围岩的各种非线性特征和施工过程对隧道稳定性的影响时,采用地层-结构模型较为有利。

4.2.1 模拟范围

该次计算即采用了三维地层-结构模型,计算软件为Midas CTS NX,如图2所示。模型采用壳体单元来模拟导洞初支和APM线盾构隧道,采用实体单元来模拟土体和其他构件。模拟范围按以下规则拟定:

- 1)高度自隧道顶部到地面,桩底部往下约1B(B为车站宽度);
- 2)沿车站横向宽度约取为5b(b为最大扣拱跨度);
- 3)沿车站纵向长度约取为4D(D为APM线隧道直径)。

4.2.2 模拟采取的简化措施

该模型依照施工步骤进行模拟,直至导洞初支拆除及扣拱完成。该模拟工作体量大、复杂程度高。为了在保证结果可信度的同时节省模拟及计算时间,该次模拟采取了以下简化措施:

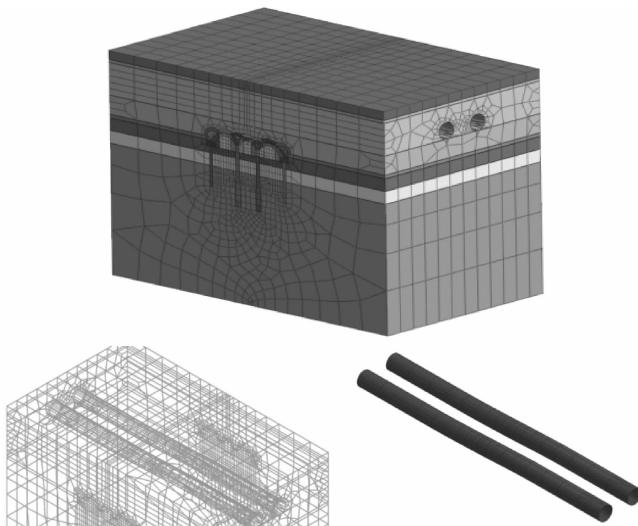


图2 洞桩法模拟下穿既有APM线三维地层-结构模型

1)对于APM线隧道、导洞初支/二衬等应用线弹性结构模型。

2)对填土和粉质黏土等弹性模量较小同时在APM线洞身以上的土层采用线弹性模型(以避免计算结果不收敛)。

3)对其他土层采用莫尔-库仑(M-C)模型。

4)将边桩墙及中间桩/柱折算成连续的墙体。由于至扣拱完成均未设计桩身土体开挖,故折算原则为轴向压缩相等。

5)超前支护/加固措施、边桩墙和中间桩/柱、扣拱初支和喷射混凝土的硬化采用改变材料力学参数来实现,导洞开挖、导洞初支和扣拱二衬采用单元钝化/激发来实现。

6)由于要控制计算时长,所以将导洞开挖步距(由设计定的0.75 m)扩大到2 m(正下方区域时)和4 m(进入正下方区域时)。

7)该次计算过程中,考虑开挖阶段应力释放比例为0.4:0.3:0.3,即在开挖及紧随的2个分析步骤中应力占总释放应力的40%、30%和30%。

4.3 模拟结果及讨论

既有文献指出,在洞桩法施工过程中,导洞施工和扣拱施工是引起地层变形的2个主要阶段,且两者的沉降量与变形总量之间存在一定的比例关系;得到扣拱施工完成时的沉降量可以大致推导出变形总量^[6-7]。

导洞施工完成的标志是导洞喷混凝土初支硬化,从模拟结果可见,导洞和扣拱施工完成时地表沉降量分别为2.9 mm和4.7 mm(见图3),两者的小关系符合既有文献总结出的规律。同时,根据两者引起的沉降

量可以推测APM线隧道最终变形量约为7.5 mm(见图4),满足GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》^[8]中既有线隧道最大10 mm沉降的要求。因此判断洞桩法施工下穿既有APM线是可行的。

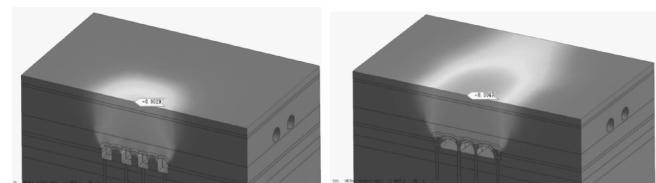


图3 导洞和扣拱施工完成时地表沉降量云图

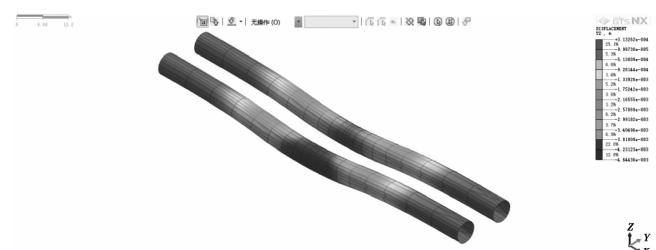


图4 既有APM线沉降量云图(最大值4.6 mm)

5 结论与体会

广州地铁某中心城区站由于周边环境复杂且限制条件多无法使用明挖法施工,而站体对应土层透水性弱,初步设计拟采用洞桩法施工。笔者就初步设计过程中碰到的一些关键问题,如车站施工方法的确定和下穿既有APM线可能引起的沉降等,进行了论述,提供了解决问题的思路和方法,证实了洞桩法在该项目中应用的可行性,为类似工程提供了有益的参考。

随着设计的不断推进和现场施工的开展,更多的资料和测量数据将会被提供,上述分析计算的准确性也会被进一步校验。同时,对于洞桩法施工在广州地区的应用还有很多问题有待论证和解决,如广州地区地层与洞桩法的适用性分析、岩石强度带来的成桩效率等。这些研究成果和经验将会被系统化地归纳和总结,为洞桩法在广州地区的进一步推广应用提供坚实的理论基础。**MET**

参考文献:

- [1] 罗富荣.北京地铁浅埋暗挖技术的发展[J].现代城市轨道交通,2007(2):31-34.
- [2] 张文锦.北京地铁七号线达官营站洞桩法开挖数值模拟研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2014(2):55-60.

(下转第171页)

(上接第 167 页)

- [3] 朱泽民. 地铁暗挖车站洞桩法(PBA)施工技术[J]. 隧道建设, 2006, 26(5):63-65, 100.
- [4] 曹坎嵩. 沈阳地铁一号线沈阳站洞桩法施工技术研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
- [5] 中国土木工程学会, 等. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范:GB 50652-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 韦京. 复杂环境条件下 PBA 工法地铁车站结构和施工方案优化研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
- [7] 李亮. 城市洞桩法地铁车站施工控制研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [8] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司. 城市轨道交通工程监测技术规范:BG 50911-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.

收稿日期: 2019-04-01

基金项目: 科技部国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201204); 广东省城市轨道交通建造新技术企业重点实验室资助项目(2017B030302009)

作者简介: 朱建峰,男,高级工程师,学士,主要从事城市轨道交通工程技术研究和技术管理工作。