

承压富水砂土地层桩洞法施工变形控制研究

宋战平^{1,2}, 张丹锋¹, 曲建生^{1,2}, 宋云财²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院 陕西 西安 710055; 2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司 天津 300300)

摘要: 北京地铁 7 号线双井站位于繁华的 CBD 核心区, 车站附近存在复杂的建筑群, 同时地下存在密集的管线分布; 双井车站地层为饱水的砂土互层地层, 受施工扰动变形大. 由于双井站工程特点复杂, 对该车站砂土互层地层采用 8 导洞“桩洞法 (PBA)”施工中地层的变形特点进行了数值模拟分析, 探讨了“8 导洞”中不同的开挖层序和 8 导洞不同的开挖次序引起的车站地层地表的沉降变形特点, 分析了“8 导洞 PBA 法”在扣拱、主体开挖及二次衬砌施工的不同施工阶段砂土互层地层变形的变化. 基于“8 导洞”施工模拟计算结果, 考虑“群洞效应”影响, 提出了“先下后上导、导洞间相互交错”的导洞施工顺序; 制定了同一层导洞错距 10 m, 上下层导洞错距 15 m, 以减少导洞间施工影响的工程措施. 以上基于数值分析建议并实施的工程措施, 满足了承压富水砂土地层“8 导洞 PBA 法施工”地层变形控制的要求, 指导了北京地铁 7 号线双井车站的施工, 取得了良好的效果.

关键词: 地下结构; PBA 工法; 数值模拟; 施工工序; 变形控制

中图分类号: TU31213; TU31211

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)01-0033-06

Study on the deformation control of PBA construction method in pressure water sand stratum

SONG Zhanping^{1,2}, ZHANG Danfeng¹, QU Jiansheng^{1,2}, SONG Yuncai²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an, 710055, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau group CO., LTD. Tianjing, 300300, China)

Abstract: The Shuangjing station of Beijing Metro 7# line is located at core area of CBD, which is near the complex building group and exists intensive underground pipelines. The strata where the station is located at are saturated interbedded soil and sand, which would be deformed greatly under the construction disturbance. Because the project characteristic of Shuangjing station is complicated, this paper carried out numerical simulation for PBA method with 8 pilot tunnels of the station and analyzed the deformation properties of strata interbedded soil and sand in construction process. This paper also discussed the strata subsidence properties corresponding to different excavation sequence of layers and different excavation sequences of 8 pilot tunnels. Further more, analyzed the strata deformation change during difference construction stages of "PBA method with 8 pilot tunnels" such as supporting arc, main body excavation and secondary lining. According to the result of simulation calculation and considering group tunnel effect in construction process, the study proposed the construction sequence of "Lower pilot tunnel first and upper pilot tunnel second, and pilot tunnels staggered". What is more, this paper put forward a construction measure that the distance between pilot tunnels in the same layer of 10 meters, and the distance between upper pilot tunnel and lower pilot tunnel of 15 meters, so as to effectively reduce the interaction between the pilot tunnels in construction process. The proposed measures based on the results of numerical analysis guided the project construction and got satisfied effect, which met the requirements of saturated stratum deformation control of "PBA method with 8 pilot tunnels" of Shuangjing station.

Key words: underground structure; PBA method; numerical simulation; construction process; deformation control

在城市地铁的建设中, 工程施工方法的选取受工程周边的建(构)筑物、工程区域内的地面交通状况、工程所处区域的工程地质和水文地质条件以及建设资金、施工队伍水平和施工机械等多项条件因素的限制, 因此, 不同城市乃至同一城市的不同地段地铁工程施工不尽相同. 地铁车站施工在世界范围内的主要工法有^[1-2]: 明挖法、盖挖法、暗挖法(盾构法、暗挖法)、沉管法以及混合法等. 在以上几种方法中, 明挖法及盖挖法受工程周边建筑物的拆迁, 工程范围内的地下管线等的影响, 且在工程

施工过程中, 工程区域内的地面交通需要中断, 因此在城市中心区域内施工中明挖法和盖挖法受到很大的限制. 而地铁车站的暗挖法可避免工程周边建(构)筑物以及管线的大量拆迁改移工作, 并且能将施工对地面交通的干扰减少到最小的程度, 因此, 在城市中心地区, 当地面建筑物众多, 地面管线较多且施工场地较小, 无法进行大面积的改迁, 移动, 且地面交通必须保持通畅, 甚或城市立交桥下众多桥桩的影响时可优先考虑采用暗挖法进行车站的施工^[3-6]. 地铁车站的桩洞法施工方法 (Pile

收稿日期: 2014-09-26

修改稿日期: 2015-02-08

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (200831800030)

作者简介: 宋战平 (1974-), 男, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和科研工作. E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn

Beam Arch, 简称为 PBA 法)的基本思想是利用先开挖的小导施作结构柱(称为桩),在地下形成梁与柱纵向的支撑体系,以此支撑体系扣拱形成纵向和横向的空间框架支撑体系结构;在该支撑体系结构内进行站厅与站台层的开挖^[7-9]。目前该工法已应用于北京地铁、大连地铁等城市地铁车站的施工中。

北京地铁 7 号线 6 标双井车站总长度 $L=236.7$ m, 建筑面积 $A=22\ 203.25\ \text{m}^2$, 车站底板入土深度 $b=31.5$ m, 为北京市标高最低的车站;此段车站区域地下水含量较为丰富,承压水压力较大,水头高度为 17 m,车站底板下侵其中,车站中板下侵承压水;工程地质、土建施工条件较差,施工方法采用“8 导洞的 PBA 法”施工时,在砂卵石地层进行扣拱施工和车站导洞的施工,层间水最容易造成施工塌方后果;再者,车站位于核心区,周围建筑物较多,交通流量较大,车站附近管线等其他构筑物较多,同时,施工穿越既有线路次数较多。因此,该车站被北京市列为“五个最难车站之一”,为变形控制要求高的高承压富水砂土互层地层中的“8 导洞 PBA”法施工工程,目前国内外尚无高承压富水地层中的“PBA”法施工的案例。为之,文章以北京地铁 7 号线 6 标双井车站 PBA 工法为例,对上下导洞开挖顺序、上导洞和小导洞中的 4 导洞的不同开挖顺序以及车站主体工程开挖引起的土体的变形及其变形特征进行了系统的分析。基于变形分析结果建议了经济、合理的“8 导洞 PBA”施工方案,指导了该工程的施工。

1 工程概况

北京地铁 7 号线双井车站总长 $L=229.6$ m, 标准段宽度 $B=23.1$ m, 高度 $H=16.25$ m, 结构入土深 $b=30.3$ m, 顶板覆土厚度 $d=13.89$ m。该车站的主要施工难点体现为^[10-12]: ①双井车站的结构埋深大,其底板的入土深度达 31.5 m,为当前北京市在建的标高最低的车站;②此段车站区域地下水含量较为丰富,承压水压力较大,水头高度达 17 m 之高,车站中板下侵承压水;③双井车站为砂土互层地层,该车站的工程地质条件差,因此车站采用了“8 导洞的 PBA 法”施工;④双井车站地下建筑物较多,并且有 3 次穿越既有线路 10 号线双井车站;⑤车站周边地形条件较为复杂,位于核心区域,车流量较大;⑥车站地表之下的地下管线较为繁杂,同时管线位于车站结构之上,并且存在较多老管线,施工对其影响极易产生安全问题。

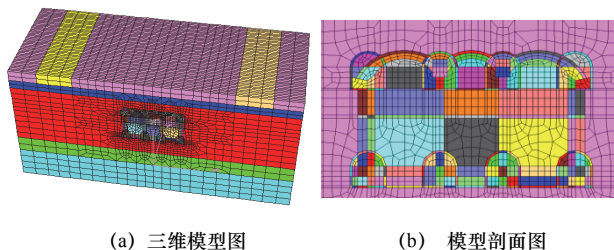
双井车站的“8 导洞 PBA 法”工法中,8 个导洞均位于中粗砂、粉土、细砂以及砂卵石等地层中,地层信息纷繁复杂;勘测资料显示,上层 4 导洞已被潜水层覆盖,同时承压水覆盖下层 4 导洞。开挖难度大,影响支护体系。施工中的涌水、涌砂以及塌方极为容易发生,控制施工安全成为施工的关键。且在车站主体结构施工过程中,一旦沉降变形过大,极易导致上述管线出现渗漏,对车站施工带来不利的影响,增加了施工的风险。因此,车站的“8 导洞 PBA 法”施工中,砂土互层地层的沉降控制是施工的关键。为之,确定了如下数值分析方案:

(1)考虑“8 导洞”开挖的引起的“群洞效应”,优化上下层导洞的开挖次序,模拟不同导洞开挖次序时车站地层的位移变化,确定承压富水砂土层“8 导洞 PBA 法”施工的工艺;(2)承压富水地层的“8 导洞 PBA 法”中同层导洞的开挖次序优化,确定上层 4 导洞和下层 4 导洞的开挖工艺;(3)车站主体工程施工的影响。

2 “8 导洞 PBA”施工影响模拟

2.1 上导洞和下导洞开挖顺序影响的分析

北京地铁双井车站数值模拟分析中,取车站中轴线为 Y 方向,也是导洞的开挖方向,重力方向为 Z 轴方向,车站轴线的水平垂直方向为 X 轴方向。车站模型尺寸设定为 $121\times 50\times 60$ m, 三维计算模型如图 1 所示。



(a) 三维模型图

(b) 模型剖面图

图 1 三维数值计算模型

Fig.1 The numerical computation model

双井车站“8 导洞 PBA 法”施工模拟分析中,地层及工程加固措施条件下的围岩物理、力学性能参数等,根据设计院提供的地质勘察资料,并参考《铁路隧道设计规范》确定。计算分析中涉及的围岩的物理、力学性能参数见表 1、2 所示。根据确定的数值模拟方案,双井车站“8 导洞 PBA 法”施工模拟步骤如下:

(1)“8 导洞”中的上层 4 个导洞先行方案,第一步先进行上层的 4 个导洞开挖,在上层 4 个导洞全部开挖完成后,接着进行下部的 4 个导洞的开挖。上层 4 个导洞中,各导洞错开 10 m 施工。即总体的施

工开挖顺序为①-③-④-②-⑤-⑦-⑧-⑥,导洞编号示意图如图2所示.

表 1 各层围岩物理力学指标
Tab.1 The rock of each layer for physical and mechanical properties index

围岩分层	容重 /kN·m ⁻³	弹性模 量/MPa	泊松 比	内聚力 /kPa	内摩擦 角/°	剪胀角 /°
第一层	16.9	36	0.3	19	28	5
第二层	20.1	86	0.27	9.3	26	5
第三层	20.3	110	0.27	11.6	27	5
第四层	20.6	125	0.27	9.6	31	5
第五层	20.8	132	0.28	10	33	5

表 2 初期支护及加固区物理力学指标
Tab.2 The Initial support and reinforcement of physical index

材料类 型	容重 /kN·m ⁻³	弹模 /GPa	泊松 比	内聚力 /MPa	摩擦 角/°	剪胀 角/°
初期支护	23	26	0.2	—	—	—
加固区	23	0.495	0.25	0.3	50	5

(2)“8导洞”中的下层4个导洞先行方案,第一步先进行下层的4个导洞开挖,在下层导洞全部开挖完成后,接着进行上部的4个导洞的开挖.即总体的施工开挖顺序为⑤-⑦-⑧-⑥-①-③-④-②,导洞编号示意图如图2所示.



图 2 导洞编号示意图
Fig.2 The heading Number Schematic diagram

为直观地表现导洞开挖对于地表沉降的影响大小,选取1个典型的施工工序进行分析.在上层4个导洞先行方案中,选取导洞⑤施工至模型中部位置时,此时Y轴方向上,开挖断面处的坐标为25.0 m.在下层4个导洞先行方案中,选取导洞①施工至模型中部位置时,此时Y轴方向上,开挖断面处的坐标为25.0 m.

图3 (a) 给出了上层导洞先行中,导洞⑤开挖至25.0 m处时的地层变位云图.从图3给出的数值模拟结果可见,在上层导洞⑤开挖至车站中部时,开挖引起的地层变形范围较小,此时开挖引起的地表沉降变形最大位置位于导洞①和导洞②的中间位置,该处的地表累计沉降的最大值为-0.20 cm.

图3 (b) 给出了下层导洞先行中,导洞①开挖至25.0 m处时的地层变位云图.从图3 (b) 给出的数值模拟结果可见,在上层导洞①开挖至车站

中部时,开挖引起的地层变形范围较上层先行开挖小;此时开挖引起的地表沉降变形最大位置同样位于导洞①和导洞②的中间位置,该处的地表累计沉降的最大值为-0.18 cm.

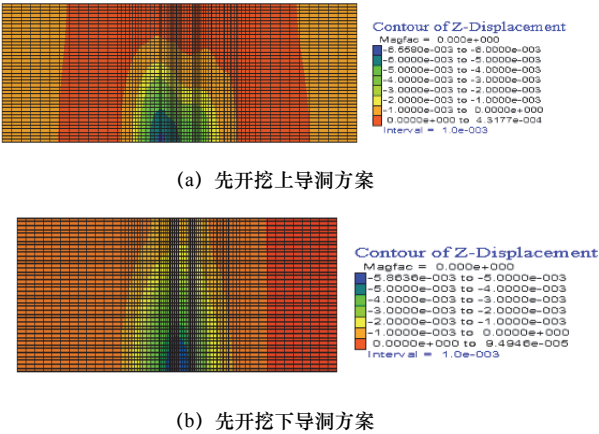


图 3 导洞 1 和导洞 5 开挖至中部时地表变形云图
Fig.3 The different excavation images for surface deformation

图4给出了上下层导洞均施工完成后两种方案地表沉降的变形对比曲线,由图4给出的对比曲线可见:上层4个导洞先行开挖同下部4个导洞先行开挖引起的地表变形曲线的形态和变形数值基本一致,即在不考虑承压水影响下两个方案引起的地表变形相当;但考虑到承压水引起的施工耦合效应,以及承压水对地层的上浮影响,建议施工中宜先开挖下层小导洞.

2.2 导洞错开开挖顺序的影响分析

根据以上在数值分析基础上考虑承压地下水影响的分析,建议双井车站“8导洞PBA法”施工中宜优先进行“8导洞”中的下层4导洞开挖,待下层导洞开挖结束后再进行上层的4个导洞的开挖.以上方案施工可将“群洞效应”的影响降低到最小,但该方案施工时间过长.为加快施工的进度,需要在确保变形可控前提下研究,上下导洞错开开挖的技术方案.为之,对双井车站“8导洞”的上下层及同层开挖的错开距离进行数值模拟分析.分析中的计算模型采用同图1的模型,计算参数采用表1和表2参数.数值模拟分析的方案如下:

(1) 上层4导洞和下层的4导洞在平面上和立面上均错开一定的距离,具体的施工组织为:首先进行小导洞⑤的开挖,在导洞⑤开挖超过10 m后接着进行小导洞⑦的开挖;在导洞⑦开挖8 m后接着进行导洞⑧的开挖,并在导洞⑧开挖8 m后进行导洞⑥的开挖.在下层导洞开挖推进32 m后接着进行上层4个导洞的开挖,即开挖顺序为:⑤-⑦-⑧-⑥-①-

③-④-② (导洞编号见图2), 下层各导洞的错开距离同样为8 m. 各导洞均采用短台阶法开挖, 其上下台阶的错开距离为3 m, 导洞开挖循环进尺取1 m, 随挖随支护.

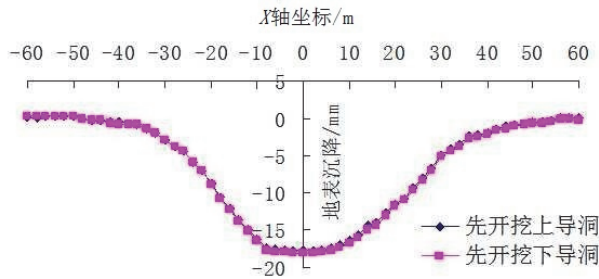
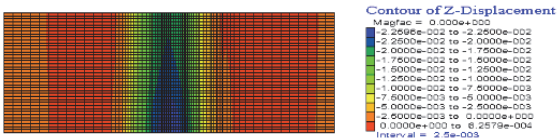


图4 模型中间断面区地表沉降曲线
Fig.4 Surface settlement curve of middle section after all headings completed

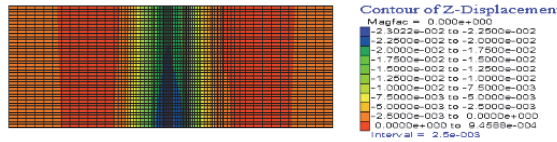
(2) 下层导洞和上层导洞错开距离开挖方案, 各导洞间的施工安排为: 首先进行下层4个导洞中的导洞⑤和导洞⑧的开挖, 在⑤导洞和⑧导洞开挖8 m后进行上层4个导洞中①导洞和④导洞开挖. 在同层的下层导洞中, 在导洞⑤和导洞⑧开挖8 m后进行⑦导洞的施工, 在⑦导洞开挖超过8 m后接着进行⑥导洞的开挖; 在同层的上层导洞中, 在①导洞和④导洞开挖8 m后进行②导洞的开挖, ②导洞进行8 m后进行③导洞的开挖. 各导洞均采用短台阶法开挖, 其上下台阶的错开距离为3 m, 导洞开挖循环进尺取1 m, 随挖随支护. 整体的开挖顺序为: ⑤-⑧-④-①-⑦-⑥-②-③.

分析中为减少边界对计算的影响, 选取模型中间断面进行分析. 图5 (a) 给出了上层4导洞和下层的4导洞在平面上和立面上均错开一定的距离施工时地层的位移变化云图, 图5 (b) 给出了上层导洞和下层导洞错开距离开挖方案时地层的位移云图, 表3给出了两种方案的不同施工阶段位移的最值表. 由图5和表3给出的数值分析结果可见: 上层4导洞和下层的4导洞在平面上和立面上均错开一定的距离开挖方案和下层导洞和上层导洞错开距离开挖方案最终获得的地表沉降量基本一样, 但上、下导洞平面上跳挖错距的开挖方案引起地表沉降最大值较先外后内的导洞错距开挖方案大.

对比分析不同施工阶段地层位移的变化情况, 在先挖层导洞施工完成后, 施工引起地表沉降量约占总累计沉降量的57%左右, 后完层导坑的施工引起的地层变位占总施工累计变形量的43%左右, 因此, 上下层的选取对位移的影响较大, 而同层间的开挖影响较小.



(a) 上、下导洞跳挖错距开挖



(b) 上导、下导错距开挖

图5 导洞全部贯通时地表变形云图
Fig.5 The different excavation method in heading all through time of surface deformation

表 3 各开挖步地表最大沉降量统计表
Tab.3 The different excavation of maximum settlement value statistics

序号	导洞开挖步骤	上、下导洞跳挖错距开挖		上导、下导错距开挖	
		沉降值/mm	沉降率/%	沉降值/mm	沉降率/%
1	①开挖至中部	-1.98	11.1	-2.03	11.2
2	上层导洞贯通导洞⑤	-10.16	45.9	-10.32	45.8
3	开挖至中部	-14.57	24.8	-14.79	24.7
4	导洞全部贯通	-17.82	18.2	-18.09	18.3

2.3 车站主体工程施工的影响

分析双井车站主体施工时地层的位移变化, 车站小导洞围岩和隧道注浆加固围岩的物理力学参数根据设计提供的地勘报告及《铁路隧道设计规范》确定, 其物理力学指标见表1和表4所示. 图6给出了车站主体结构单元划分图. 计算中考虑到边界效应, 此处仅取模型的中间断面 (Y=25 m) 处作为研究对象进行分析.

双井车站主体施工完成后地层位移分布见图7所示, 表5给出了车站“8导洞PBA法”施工中不同施工步序时地表最大沉降值的统计值. 由图7和表5给出的数值计算分析可知, 当桩梁拱的结构施做完成后开始车站主体结构的开挖, 即使卸荷量较大, 对地表位移基本不受影响, 地表沉降基本无变化. 而在车站扣拱结束时, 拱部最大沉降值达到了4.03 cm, 此时车站地表沉降值达到了3.84 cm.

图8给出了双井车站纵向向中心断面位置处的地表在各施工阶段的地表沉降槽曲线, 以车站中线为0位置, 分析施工引起地表沉降变化. 由表5和图8给出的计算结果分析可知, 地表沉降槽曲线基本与 peck 公式^[13-14]相一致, 影响范围在距离车站中

线左右 35 m. 在“8 导洞”施工完成时, 地表沉降最大沉降量为 1.78 cm, 约为施工总累计沉降量的 46%; 在车站扣拱完成时, 地表最大沉降量达到了 3.72 cm, 约为施工总累计沉降量的 93%, 即扣拱和导洞施工引起的沉降量基本相同, 是承压富水砂土互层车站“8 导洞 PBA 法”施工变形控制的关键.

表 4 车站结构模型材料参数表
Tab.4 The model station for structure material parameters

名称	容重 /kN·m ⁻³	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力 /MPa	内摩擦 角/°
注浆加固	220	0.495	0.3	0.3	50
初衬	26	20	0.2	—	—
二衬	27	32.5	0.25	—	—
边桩	23	20	0.2	—	—
冠梁	25	32.5	0.25	—	—
钢管桩	25	33.5	0.25	—	—
钢拉杆	29	200	0.25	—	—

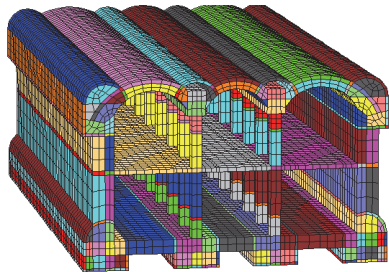


图6 车站结构单元划分图
Fig.6 The map for station structure unit division

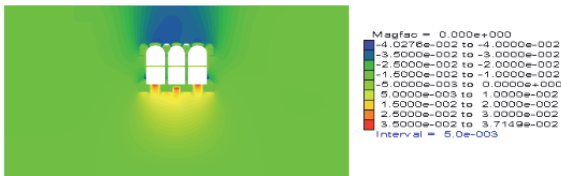


图7 车站主体完工阶段时地层的位移云图
Fig.7 The construction of the main structure completed stage station stratum vertical displacement diagram

基于以上双井车站在扣拱、主体开挖及二次衬砌施工的不同施工阶段砂土互层地层变形变化的数值模拟分析, 考虑“8导洞”开挖引起的“群洞效应”影响, 建议双井承压富水砂土互层地层中“PBA”工法开挖宜按:“先下导后上导、导洞间相互交错”的导洞施工顺序组织施工; 同时, 同一层的4个导洞之间错开距离10 m施工, 上下层导洞之间错距15 m进行施工, 以减少导洞间施工的相互影响. 在各小导洞施工中, 宜采用“超短台阶”的二台阶法快速施工, 且尽量减小支护的封闭成环时间和距离, 以满足施工变形控制的要求. 根据双井车站“8导洞PBA法”数值模拟分析结果, 在整个施工过程中, 小导洞和扣拱施做阶段引起的地层变形在总沉降量当中占了较大比例, 约为45%, 这两步序

在施工过程当中十分关键, 需要加以控制, 为之建议采取一定超前措施限制该两阶段的变形.

表5 各典型施工阶段地表最大沉降值统计表
Tab.5 The typical construction phase of the maximum surface settlement value statistics

序号	施工阶段	地表最大沉降值	占最终沉降比重/%
1	小导洞完成阶段	17.8	46.40
2	边桩、中柱及纵梁完成阶段	19.3	3.90
3	扣拱完成阶段	37.2	46.60
4	主体车站结构完成阶段	38.4	3.10

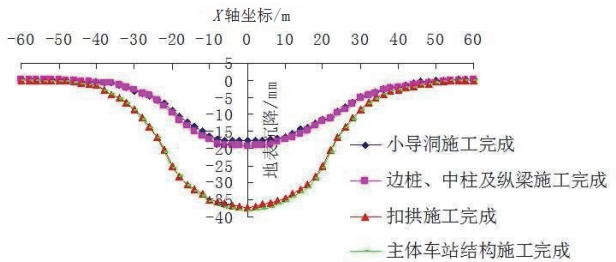


图8 各施工阶段地表沉降槽曲线
Fig.8 The construction phase of surface settlement curve

由于计算中未能考虑高承压地下水的影响, 为确保施工的安全, 根据以往施工经验, 建议在小导洞施工中采取“深孔补偿注浆”的技术措施, 即在施工过程中每完成一次导洞开挖、支护后, 对周边土体及掌子面前方土体进行补充深孔注浆, 以加固开挖扰动土体, 减少开挖造成的地层损失, 即所谓的反复超前深孔注浆补偿位移方法. 考虑到导洞开挖处于承压水层内, 为有效降低地下水引起的危害, 暗挖工程施工前在车站周围打设间距6 m, 深40 m的降水井, 通过抽排降形成区域降水, 从而疏干结构范围内地层积水, 并从总体上切断外围地下水和结构范围地层的联系. 对通过降水井无法疏干的层间滞水, 采取局部真空抽排或小导管注浆的方法治理.

3 结论

针对北京地铁7号线双井车站砂土互层地层“8导洞PBA”工法施工对周边地层及建筑物的影响, 通过数值模拟探讨了“8导洞”中不同的开挖层序和导洞不同的开挖次序引起的车站地层变形特点, 分析了“8导洞PBA法”在扣拱、主体开挖及二次衬砌施工的不同施工阶段砂土互层地层变形特点. 论文的研究可得出如下结论:

(1) 承压砂土地层的“8导洞PBA”工法施工中, 上导洞施工引起的地表变形占总变形量的50%以上, 下导洞施工引起的地表变形占总变形量的40%左右. 考虑导洞上方管线变形控制的要求, 建

议承压富水砂层中导洞宜优先开挖下导洞。

(2) 基于“8导洞”施工数值模拟分析,并考虑开挖引起的“群洞效应”,建议按“先下导后上导、导洞间相互交错;同一层导洞错距10 m,上下层导洞错距15 m”的承压砂土地层PBA施工方法。

(3) 承压砂土地层“8导洞PBA工法”施工引起的地表沉降变形曲线同Peck公式预测曲线基本一致。车站开挖影响范围分布于工程中线左右30 m范围内;但就PBA工法各工序开挖影响而言,导洞施工引起的地表沉降量约为18 mm,占总累计沉降量的45%左右,扣拱完成后地表的沉降量达37 mm以上,约占总累计沉降量的46%。

由于计算中未能考虑高承压地下水的影响,为确保施工的安全,建议在小导洞施工中采取“深孔补偿注浆”、降水疏干以及局部真空抽排和小导管注浆的综合治理措施。

参考文献 References

- [1] 刘钊,余才高,周振强. 地铁工程设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2004:51-57.
LIU Zhao, YU Caigao, ZHOU Zhenqiang. The design and construction of subway engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 51-57.
- [2] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997:5-6.
SHI Zhongheng. The Design and Construction of Subway [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997: 5-6.
- [3] 高辛财,吴林林. 北京暗挖地铁车站设计与施工调研分析[J]. 现代隧道技术,2008,45(S1):67-74.
GAO Xincan, WU Linlin. The research analysis of design and construction in Beijing underground subway station [J]. Modern Tunneling Technology, 2008, 45(S1): 67-74.
- [4] 董惠定,李兆平. 北京地铁车站暗挖施工方法比较及评述[A]. 中国土木工程学会隧道及地下工程分会,中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十三届年会论文集[C]. 北京:中国土木工程学会隧道及地下工程分会,2004:5-6.
DONG Huiding, LI Yaoping. Beijing subway station underground construction method can compare and review [A]. Tunnels and underground engineering branch of China Civil Engineering Society, Proceedings of the 13th annual meeting in Tunnel and underground engineering, 2004: 5-6.
- [5] 王学理. “PBA”洞桩法在地铁暗挖车站中的应用[J]. 现代城市轨道交通,2006,3(1):35-37,43,8.
WANG Xueli. The application of “PBA” hole-pile method in subway undermining method station [J]. Modern Urban Transit, 2006, 3(1): 35-37,43,8.
- [6] 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.
ZHU Zemin. Pile Beam Arch (PBA) construction technology for mined metro stations [J]. Tunnel Construction, 2006, 26(5): 63-65,100.
- [7] 肖茜. 北京地铁车站PBA工法施工对地表沉降影响的研究[D]. 北京:中国地质大学,2014.
XIAO qian. Degree analysis of surface subsidence of Beijing subway station with PBA method [D]. Beijing: China University of Geo-sciences, 2014.
- [8] 马可心. PBA法施工隧道变形规律研究[D]. 北京:中国地质大学,2013.
MA Kexin. The Research of the Deformation Regularity of Tunnels Constructed by the PBA Method [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [9] 贾少春. 北京地铁7号线双井站PBA工法数值分析[J]. 铁道建筑,2013,9(5):80-83.
JIA Shaochun. Numerical analysis on Beijing metro 7 line station of Shuang-jing with PBA Method [J]. Railway Engineering, 2013, 9(5): 80-83.
- [10] 蒙秀林. PBA洞桩法施工技术及控制浅析[J]. 科技创新与生产力,2013,34(3):100-104.
MENG Xiulin. Brief discussion on construction technology and control of PBA [J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2013, 34(3): 100-104.
- [11] 汤寅净. 地铁风道施工对周围环境影响分析及安全风险评估[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
TANG Yinjing. Analysis of Impact on the Environment by Air Channel Construction Assessment of Construction Risk [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [12] 黄佳. 地铁车站施工过程数值模拟及方案优化分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
HUANG Jia. The construction process simulation of subway station and optimization of the scheme [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [13] 任建喜,王松,陈江,等. 地铁车站PBA法施工诱发的地表及桥桩沉降规律研究[J]. 铁道工程学报,2013,180(9):92-98.
REN Jianxi, WANG Song, CHEN Jiang, et al. Study on settlement regulations of ground surface and bridge pier induced by metro station construction with PBA method [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 180(9): 92-98.
- [14] 韩煊,李宁,STANDING J. R. Peck公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学,2007,28(1):23-28,35.
HAN Xuan, LI Ning, STANDING J. R. An adaptability study of Gaussian Equation Applied to Predicting Ground Settlements induced by Tunneling in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23-28,35.

(本文编辑 吴海西)