

文章编号: 1000-7598-(2007) 06-1156-05

采用矿山法构筑区间盾构隧道渡线段的方案探讨

李兆平¹, 刘 军², 李名淦¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京市市政工程研究院, 北京 100037)

摘 要: 针对北京地区地质条件, 提出了在区间盾构隧道之间采用矿山法构筑渡线隧道的方案, 即先在最大开挖断面处拆除管片, 沿横向扩挖出一条施工通道; 然后在施工横通道侧壁开口, 从大断面向小断面进行渡线隧道的断面渐变段、双联拱段和分离单洞的施工, 从而在两条区间盾构隧道之间采用矿山法完成渡线隧道的施工; 最后, 应用 FLAC 数值计算软件, 探讨了管片拆除及隧道断面扩挖引起的地表沉降和塑性区分布范围。研究结果表明, 针对北京地区的地质条件, 提出的在区间盾构隧道之间采用矿山法构筑渡线隧道的方案具有工程适用性。

关 键 词: 盾构隧道; 渡线隧道; 矿山法; 施工方案; 数值模拟

中图分类号: U231

文献标识码: A

Probe into construction method for connecting tunnel between two shield tunnels

LI Zhao-ping¹, LIU Jun², LI Ming-gan¹

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Beijing Jiaotong university, Beijing 100044, China;

2. Beijing Institute of Municipal Engineering, Beijing 100037, China)

Abstract: A mining construction method being aimed at Beijing region geological condition is brought forward for connecting tunnels based on two shield tunnels. Firstly, part of the shield segments in this maximal connecting tunnel section is taken off and a construction traverse channel is built. Secondly, each part of the connecting tunnel is constructed by regarding the traverse channel as a construction working face. Finally, A numerical simulation with FLAC software is adopted to probe surface subsidence and stratum plastic region distribution after the shield segments being disassembled and the tunnel cross-section being widened. The result indicates that the connecting tunnel between two shield tunnels can be constructed by using mining method; and the construction method is doable to Beijing region geological condition.

Key words: shield tunnels; connecting tunnel; mining method; construction method; numerical simulation

1 引 言

由于地铁路网规划以及区间客运量配置的需要, 区间隧道间必须设置渡线、联络线等分叉线隧道。在国内, 渡线隧道一般采用明挖法或矿山法施工, 当渡线隧道采用此法施工, 一般对渡线段与车站合并采用明挖法施工; 当渡线隧道采用矿山法构筑, 一般都将渡线隧道与区间正线隧道一并构成大跨度隧道, 并同时采用矿山法构筑^[1-3]。如果区间隧道采用盾构法施工, 限于当前国内的施工技术水

平, 只能将渡线段与车站合并施工。目前, 国内在两条盾构隧道之间采用矿山法构筑联络横通道的设计与施工有许多成功的实例^[4-6]。由于国外地铁隧道广泛采用盾构法施工, 渡线隧道一般与正线隧道同时构筑, 并采用异型管片。日本盾构修建技术比较发达, 盾构法是其城市隧道建设施工法的主要方法, 除普通单圆盾构外, 其还掌握双圆盾构、矩形盾构、扩大盾构等施工技术, 并正在发展自由断面盾构、异形断面盾构、分支连接盾构等施工法, 其先进的盾构技术基本可以实现分岔段隧道与区间

收稿日期: 2006-02-13

修改稿收到日期: 2006-07-21

基金项目: 北京市科委重点项目 (No. H030630020330), 北京交通大学校基金项目 (No. 2004SM034)。

作者简介: 李兆平, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 主要从事地下结构设计以及地下工程施工的环境影响等方面的教学与研究工作。

E-mail: Lizhaoping@263.net

一起采用盾构施工法修建^[7]。

目前,国内还没有在盾构隧道之间采用矿山法修筑渡线隧道的工程实例。因此,研究在盾构法隧道的基础上采用矿山法修建渡线隧道的技术,可以为“提升盾构施工的独立性,更好地发挥盾构施工效率高的优点”提出一个很好的解决办法。北京市科委专题立项就两条区间盾构隧道之间采用矿山法构筑分岔段(渡线、联络线等)开展研究。图1为渡线段的平面简图,在图中,左、右线隧道已经采用盾构法建造完毕,需要在左右线隧道之间破除管片,采用矿山法扩挖修建一条渡线隧道,整个渡线段由左右线的两个断面渐变段和中间的分岔段组成。本文探讨的问题是:在区间盾构隧道之间采用矿山法构筑渡线隧道结构的方案。

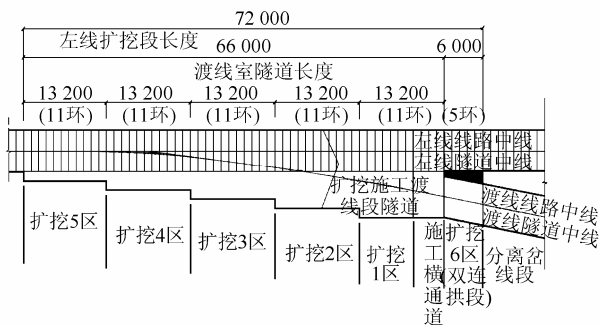


图1 渡线段平面设计图(单位: mm)

Fig.1 Ichnography of the connecting tunnel(unit: mm)

2 确定施工方案的原则

在已经建好的两条盾构区间隧道之间采用矿山法修建渡线隧道,在国内还没有过试验,故下面所提出的技术方案考虑了目前国内的施工技术水平、机械水平等,确定施工方案遵循以下几条原则:

- (1) 所采用的技术方案在具体施工时具有可操作性;
- (2) 施工尽量简便,在现有的技术条件和装备水平下通过一定的技术攻关能够实现;
- (3) 能够保证施工作业的安全;
- (4) 能够把地层沉降控制在限定值范围内;
- (5) 技术方案能够保证建成的分叉隧道结构是稳定的;
- (6) 技术方案能够保证已建成的盾构区间结构稳定、防水完整;
- (7) 技术方案在经济上是合理的。

3 渡线段施工方案

3.1 总体施工顺序

总体施工顺序是:先在最大开挖断面处拆除4

环钢管片,然后沿横向扩挖出一条横向施工通道,安设管棚机,继而在施工通道侧壁开口,从大断面向小断面,按扩挖1~5区的顺序施工;待断面渐变段施工结束后,再在施工通道另一侧壁开口进行双联拱和分离段的施工,从而采用矿山法完成整个渡线段的施工。

3.2 横通道的施工

横通道设置在最大断面处,设置横通道的目的是开辟渡线段施工的工作面。横通道起到承上启下的作用,左侧进行扩挖1区的施工,右侧进行双联拱段的施工,横通道是渡线段施工的关键。根据横通道的特征,将横通道和区间正线交叉部位部位的盾构管片不采用普通的钢筋混凝土管片,而采用4环钢管片,每环宽1.2 m,分12块,预留注浆孔,通缝拼装,便于洞内拆除。钢管片拆除前,架设临时支撑,先对横通道与正洞交叉部位的地层注浆加固,然后拆除横通道与正洞交叉部位的8块钢管片(每环拆除2块),进行横通道开挖。横通道采用台阶法施工,由于开挖高度比较大,因此,横通道分3个台阶开挖。

3.3 各扩挖段施工方法

3.3.1 扩挖1区和2区的施工

由于扩挖1区的断面跨度为13.2 m,2区为12.0 m,扩挖尺寸较大,所以均采用双侧壁导坑法施工。其具体施工步骤如下(见图2):

- (1) 施工前,在施工通道的侧壁沿扩挖断面施作 $\phi 108$ mm或 $\phi 159$ mm大管棚;
- (2) 开挖I部土方,施作“1”部初期支护;
- (3) 开挖II部土方,施作“2”部初期支护;
- (4) 扩挖III部土方,拆除①部管片,施作“3”部初期支护;
- (5) 拆除②部管片,扩挖IV部土方,施作“4”部初期支护;
- (6) 扩挖V部土方,拆除③部管片,施作“5”部初期支护;

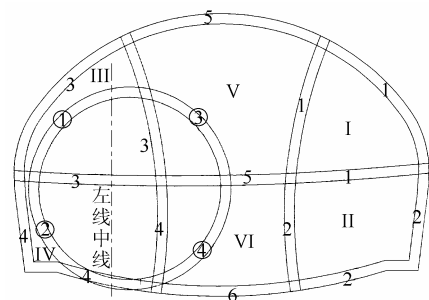


图2 扩挖1区和2区双侧壁导坑法施工步骤

Fig.2 The process for dilated cross-sections 1& 2

(7) 拆除④部管片, 扩挖Ⅵ部土方, 施作“6”部初期支护。拆除 1~2 环管片。

由于扩挖 1 区与右线隧道间隔距离较近, 为确保两隧道间土体的稳定, 在施工此段时, 还应采取注浆加固措施, 以保证左右隧道之间土体的稳定。

3.3.2 扩挖 3 区和扩挖 4 区的施工

扩挖 3 区的断面跨度为 10.60 m, 4 区的跨度为 9.24 m, 因此, 对于扩挖 3 区和扩挖 4 区采取中隔壁法施工。

具体施工步骤如下 (见图 3):

- (1) 扩挖前, 先沿扩挖断面施作大管棚;
- (2) 开挖 I 部土方, 施作“1”部初期支护;
- (3) 开挖 II 部土方, 施作“2”部初期支护;
- (4) 扩挖 III 部土方, 拆除①部管片, 施作“3”部初期支护;
- (5) 扩挖 IV 部土方, 拆除②部管片, 施作“4”部初期支护。

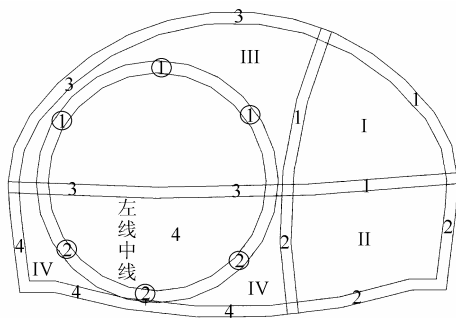


图 3 扩挖 3 区和扩挖 4 区中隔壁法施工步骤图
Fig.3 The process for dilated cross-sections 3 and 4

3.3.3 扩挖 5 区的施工

由于扩挖 5 区断面扩挖量较小, 因此, 可在对扩挖断面采取小导管注浆进行超前支护的前提下, 采用刷帮的方法扩大到设计断面。

3.3.4 扩挖 6 区双连拱段的施工

从可以分离出渡线隧道的位置开始, 按理就可以不用拆除盾构管片, 但考虑到刚开始的一段距离内, 由于渡线隧道与正线之间的土体很薄, 开挖中无法保留, 所以开挖中要挖除。另外, 考虑到施工的方便 (主要是防水层铺设的方便), 需要将分离渡线处开始范围内 (即扩挖 6 区内) 的管片拆除, 故此段设计成双连拱结构型式。

双连拱段的施工步骤主要如下 (见图 4):

- (1) 从施工横通道的另一侧开口;
- (2) 先在双连拱段的拱顶施工大管棚加固地层, 管棚内注水泥砂浆, 以增大管棚的刚度;

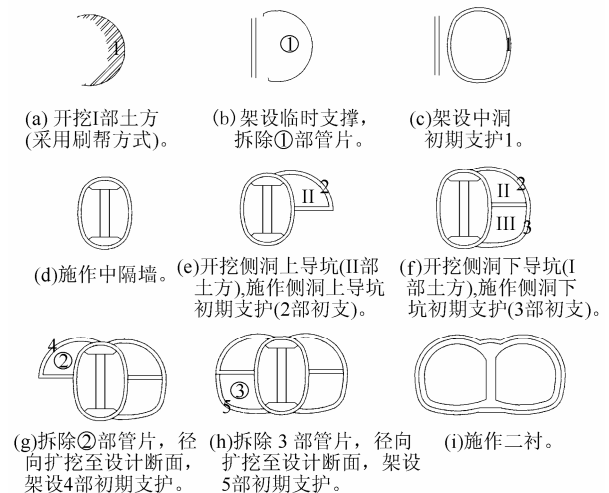


图 4 双连拱段施工步骤图
Fig.4 The process for two-arch tunnel

(3) 采用类似中洞法的顺序进行双连拱段的施工。

在施工双连拱段时, 也要对左右线之间的土体进行注浆加固, 以保证左右隧道之间土体的稳定。

3.4 分离单洞渡线段的施工

当岔线分离出一定距离后, 中间部分的土体在施工中就无需挖除, 这时盾构管片也不必拆除, 可以独立进行单洞渡线段的施工。此时的渡线段为标准单线区间断面, 故采用上下台阶法施工, 上下台阶间隔为 5 m。

该段岔线与左右正线之间土体厚度都较小, 需要对土体进行加固。具体加固措施为: 向土体施作 $\phi 42$ mm 小导管注浆, 小导管间距按 0.5 m 梅花型布置, 长度与土体厚度相同。

3.5 二衬的浇注

断面渐变扩挖段和双连拱段的初期支护施工结束后, 进行二衬的施工, 考虑到断面渐变的特点, 二衬浇注采用钢拱架加组合钢模板。

4 施工力学行为分析

4.1 计算模型

(1) 计算软件

对施工过程的力学模拟通过 FLAC 程序来实现, 该程序适用于材料的弹塑性、大变形分析、流变预测和施工过程的岩土工程的数值模拟。

(2) 工程地质条件

结合北京地铁 10 号线的地质条件数据资料, 经适当简化后, 选取如表 1 所示的土层分布及指标。

表 1 地层物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of strata

地层名称	厚度 / m	密度 / g · cm ⁻³	压缩模量 / MPa	泊松比	黏聚力 / kPa	摩擦角 / (°)
杂填土	2.0	1.65	8	0.35	5	25
粉土填土	2.0	1.95	9.8	0.35	10	24
黏质粉土	9.0	1.90	12.5	0.45	41.6	17
粉细砂	2.7	2.0	19.0	0.27	0.1	25
卵石圆砾	3.0	2.15	70.0	0.18	0.1	40
黏质粉土	7.0	1.90	12.5	0.45	41.6	17
中粗砂	3.0	2.05	35.0	0.25	0.1	35
卵石圆砾	36.5	2.15	70.0	0.18	0.1	40

注：潜水位埋深 13.0 m，承压水位埋深 17.0 m。

(3) 计算域的确定

原有盾构隧道覆土厚度假设为 12.2 m，左右线盾构隧道线间距假定为 16.8 m。故确定计算范围为：上至地面，下至盾构隧道中线以下 50 m 处，横向取两盾构隧道中线两侧各 60 m，沿隧道轴向方向取各节段实际长度，根据以上情况进行网格划分。

(4) 支护措施模拟及参数确定

① 钢筋混凝土盾构管片^[1]：采用弹性单元模拟，弹性模量 $E=34.5$ GPa，泊松比 $\nu=0.17$ 。

② 大管棚预支护：采用等效方法把大管棚支护等效模拟为连续拱壳，用 shell 弹性单元模拟。

③ 超前小导管注浆：把超前小导管注浆当作安全储备，模拟计算中不予考虑。

④ 注浆地层：注浆层采用提高地层参数来模拟，本模型注浆层选用的地层参数如下：密度为 2.2 g/cm³，压缩模量为 30.0 MPa，泊松比为 0.25，黏聚力为 75 kPa，内摩擦角为 50°。

⑤ 格栅钢拱架+喷混凝土：采用拱壳弹性单元模拟，弹性模量取 17.5 GPa，泊松比取 0.20，密度取 2.5 g/cm³。

⑥ 模筑钢筋混凝土二衬：采用弹性单元模拟，弹性模量取 30 GPa，泊松比取 0.20，密度取 2.4 g/cm³。

4.2 单元划分

扩挖 1 区断面最大，也是最不利断面，限于篇幅，本文仅给出计算结果，计算模型网格如图 5 所示，共划分单元 3 049 个，节点总数 6 332 个。

在盾构隧道施工之后扩挖施工之前，把模型中由盾构隧道施工引起的地层位移清除为 0，保留应力场作为后续扩挖施工的初始应力场进行开挖模拟，这样能比较好地模拟因多次开挖对地层的扰动而引起的地层应力的复杂变化。

模拟计算时，按拟定的扩挖步骤，并对土体采

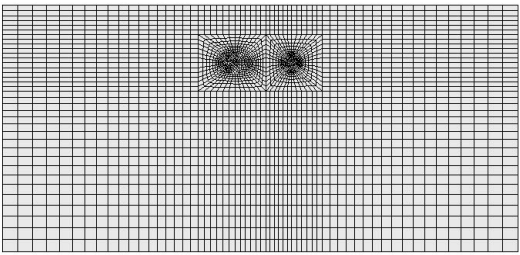


图 5 扩挖 1 区数值计算模型
Fig.5 Calculation model for dilated cross-section 1 of the connecting tunnel

取了 4 种不同预加固措施：(1) 不作任何土体加固；(2) 周围土层预注浆加固土体；(3) 大管棚预支护加固土体；(4) 预注浆加大管棚支护加固土体，比较在这 4 种预加固措施下地面的沉降情况。

4.3 计算结果及分析

通过对扩挖 1 区进行数值模拟计算分析可知，施工完成时，在土体无任何加固情况下，地表最大沉降约为 135 mm；如果仅有大管棚预支护的加固措施，地表最大沉降约为 99 mm；如果仅考虑周围土层预注浆的加固措施，地表最大沉降约为 56.0 mm；如果预加固措施同时采取了周围土层注浆和大管棚预支护，地表沉降进一步减小，此时地表最大沉降约为 41.5 mm。最大沉降点位于扩挖隧道中心线上方地表，4 种预加固措施下的地表沉降横向分布曲线如图 6 所示。因此，在管片拆除及隧道断面扩挖前，必须采取对周围地层预注浆及大管棚支护的联合加固地层措施。

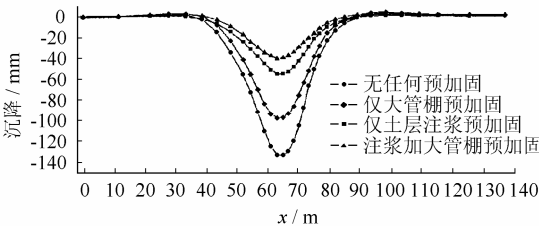
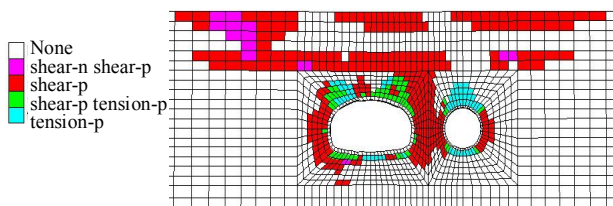


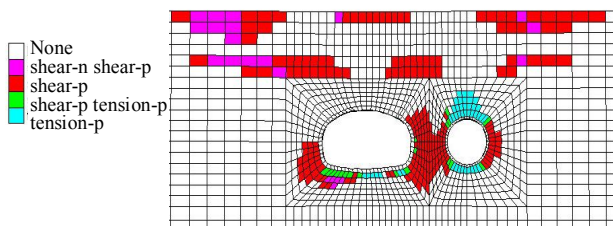
图 6 扩挖 1 区开挖引起的地表沉降横
Fig.6 Surface subsidence curve for dilated cross-section 1

扩挖 1 区在不同预加固措施下，施工完成后的隧道周边地层塑性区见图 7。由塑性区图可见，无预加固和仅大管棚加固两种措施下，隧道周边土层塑性区与上方土层塑性区连通，并通达地表，即隧道上方土层失稳破坏，左右双线隧道间的土体塑性区也连通破坏；仅预注浆的情况下，左右双线隧道间的土体塑性区也连通破坏；注浆加管棚的情况下，没有形成塑性连通区，塑性区主要分布在拱底位置的周围地层。

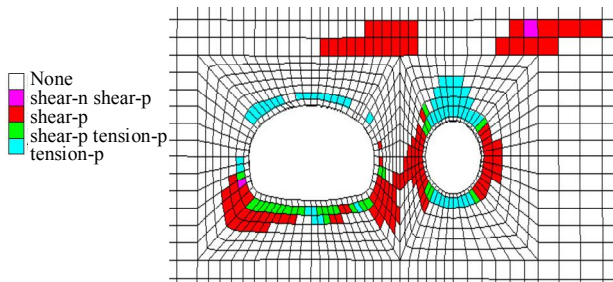
由扩挖 1 区施工后的地表沉降和塑性区分布可知, 大管棚+预注浆加固土体能有效提高地层的稳定性及控制沉降。



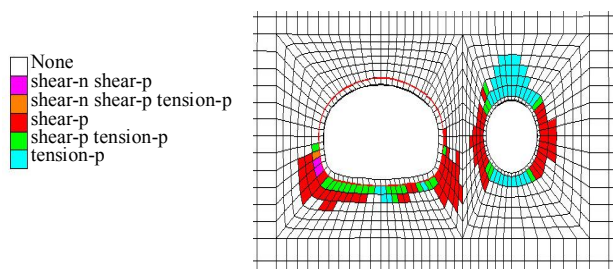
(a) 无任何加固情况下的塑性区分布



(b) 大管棚加固情况下的塑性区分布



(c) 预注浆加固情况下的塑性区分布



(d) 预注浆加大管棚的塑性区分布

图 7 扩挖 1 区开挖后隧道周围地层塑性区分布

Fig.7 Distribution of plastic zones at surrounding stratum of dilated cross-section 1

5 结 论

(1) 对施工方案的数值模拟分析表明, 在充分的预加固措施(预注浆加管棚)、合理的管片拆除和扩挖方式、及时施加并封闭初期支护等条件下, 是可以保证扩挖段施工中的地层稳定和施工的顺利进行。

(2) 数值计算结论从理论上验证了本文提出的在两条区间盾构隧道之间采用矿山法扩挖渡线隧道的施工方案在北京地区的地质条件下具有工程可实施性。

参 考 文 献

- [1] 陈西霞, 刑玲艳. 北京地铁王府井—东单区间折返线及渡线施工方案研究与实施[J]. 铁道建筑, 1999, (2): 2—6.
- [2] 苟明中. 广州地铁二号线公纪区间渡线大跨度隧道设计[J]. 科学技术通讯, 2001, (1): 24—29.
- [3] 马天文. 南京地铁南京站—东井亭区间渡线段隧道施工技术[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(2): 25—27.
MA Tian-wen. Construction of connecting tunnel between Nanjing station and Dongjingting in Nanjing metro[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2003, 40(2): 25—27.
- [4] 曾丰姿, 李兆平, 刘军. 区间盾构隧道联络通道施工对隧道结构和周围地层安全性影响的研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(3): 93—97.
ZENG Feng-zi, LI Zhao-ping, LIU Jun. Study on safety of tunnels structure and stratum stability in construction of traverse channel between two Shield tunnels[J]. *China Safety Science Journal*, 2006, 16(3): 93—97.
- [5] 何川, 张志强. 双线盾构隧道与联络通道复杂结构受力分析[J]. 铁道学报, 2002, 24(6): 89—92.
HE Chuan, ZHANG Zhi-qiang. Research on mechanical behaviour of construction of link line and shield tunnel on No.2 line of Guangzhou metro[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2002, 24(6): 89—92.
- [6] 张志强, 何川. 用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3 211—3 217.
ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Study on construction of cross connection of shield tunnel and connecting aisle by freezing method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(18): 3 211—3 217.
- [7] 尹旅超, 朱振宏等编译. 日本隧道盾构新技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.