

北京地铁浅埋暗挖施工法

王梦恕

(铁道部隧道工程局 洛阳 471009)

提 要

本文介绍浅埋暗挖法施工技术在北京地铁复兴门折返线工程中的应用。该技术以新奥法原理为基础、结合工程实践,对地层进行注浆加固、正台阶环行开挖、网构拱架支护、施工监测、信息反馈和复合衬砌等一整套施工技术和工艺,在覆跨比为0.7的浅埋大跨度、无胶结、无自稳的砂卵石地层中安全建成,控制了地表沉降,最大沉降量不超过30mm,沉降一时间曲线拐点最大斜率为1/589,地层损失系数为4.13%,本工程为城市修建地铁开辟了一条新路。

关键词: 浅埋暗挖法, 注浆加固, 复合衬砌, 地表沉降。

一、前 言

北京市为缓和市区地面交通,从1965年起,经过二十年的努力,分两期施工先后修建了I、II两条地下铁道,总长为40km(图1)。



图1 北京地下铁道环线运行图
Fig.1. The ringline operation of Beijing subway

鉴于I、II两条线路在复兴门所处的高差达5m,互不连接,以致造成两线的客运量极不平衡,亟待解决,以缓和市区交通,为此提出在复兴门修建折返线,使I、II线连成整体。

北京市地铁工程在修建I、II期地铁时,城市尚未发展,采用明挖法施工是完全合理的,但是,随着城市的繁荣,势逼带来在繁华街道下的地铁如何

施工的新课题。根据北京复兴门地铁折返线工程所处的地理位置和断面多变的特点,在工期短、地表沉陷要求严格的情况下,我们提出了“浅埋暗挖法”施工方案,并与明挖方案就以下四个方面进行了比较:

1. 关于拆迁占地面积比较,表1是长度为358m的折返线比较,其中拆迁费暗挖法施工只有明挖法的 $1/100$,暗挖法占地仅为明挖法的 $1/13$ 。

表1 拆迁数量对比

Tab. 1. Comparison of quantities of dismantling and movement.

项目 方法	占地面积 (m^2)	伐树 (棵)	毁草坪 (m^2)	移灯杆 (根)	拆迁费 (万元)
明挖	20000	500	8000	14	1000
暗挖	1570	3	1570	0	6

2. 施工期间对交通的影响,假若采用明挖法施工,必然会造成车辆改道、慢行,通行能力大大降低,按施工一年半的时间计算,由于车辆阻塞造成时间延续带来的损失约330万元,车辆增加停车次数的损失费用约2833万元,根据全国公交系统统计,车速每降低 1 km/h ,损失运输能力12%,在复兴门折返线处,车速将由平均 17 km/h 降至 $5\sim 7\text{ km/h}$,潜在损失近8000万元左右。

3. 工程投资比较,358m长的折返线工程,暗挖法投资1703万元,而明挖法需3237万元,暗挖投资仅为明挖投资的47.4%。

4. 施工对市民的干扰比较,358m长的折返线工程,采用明挖法扰民范围为 12 km^2 ,暗挖法扰民仅 0.002 km^2 。

根据上述比较,显然明挖法比暗挖法有不少缺点,最后裁决,选用暗挖法方案。

二、复兴门折返线工程简介

1. 地理位置和工程数量

折返线工程位于复兴门内大街国宾大道之下,拱顶至路面,土层厚度 $9\sim 12\text{ m}$,该地面每天来往车辆 $5\sim 7$ 万辆,自行车30万辆,地下管网密布,纵横交错,工程全长 358.20 m ,折合单线隧道长 1058 m ,由南北两条正线和一条折返线组成(图2),隧道断面变化复杂,包括有单线隧道 445 m ,双线隧道 262 m ,由南北两线过渡的渡线隧道 43 m ,不同跨度、高度的断面形式达33个,隧道开挖跨度由 6.96 m 到 14.86 m 不等,覆跨比(覆盖层厚度/钢跨)为 0.67 ,属于非常浅埋型。

隧道断面与覆盖深度关系见图了,辅助导坑设有一座直径 5.5 m 、深 22 m 的竖井和一条长 54 m 的联络通道,通道与折返线成 45° 相交,是出碴、运料的唯一途径。

主要工程量有:开挖土方 5.6 万 m^3 ,喷射混凝土 8000 m^3 ,铺设塑料板防水层 2.7 万

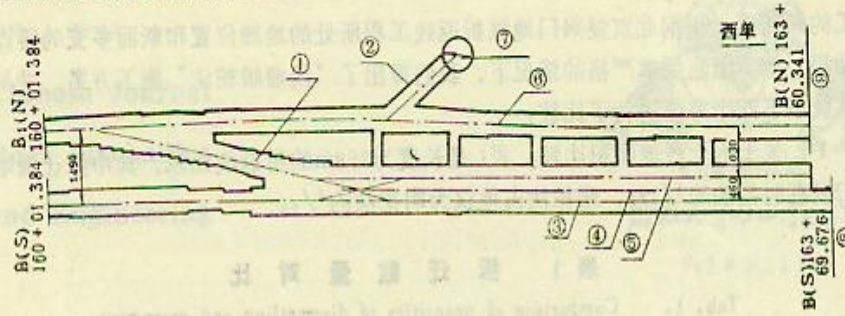


图2 折返线工程平面布置图

Fig.2. The plan layout of switchover line project at Beijing subway

- ① 联络通道 Connection tunnel
- ② 渡线 Crossover line
- ③ 南正线中线 Center line of South track line
- ④ 隧道中心线 Center line of tunnel
- ⑤ 折返线中线 center line of Switchover line
- ⑥ 北解线中线 Center line of north track line
- ⑦ 竖井φ5.5m shaft φ5.5m
- ⑧ 结构设计终点

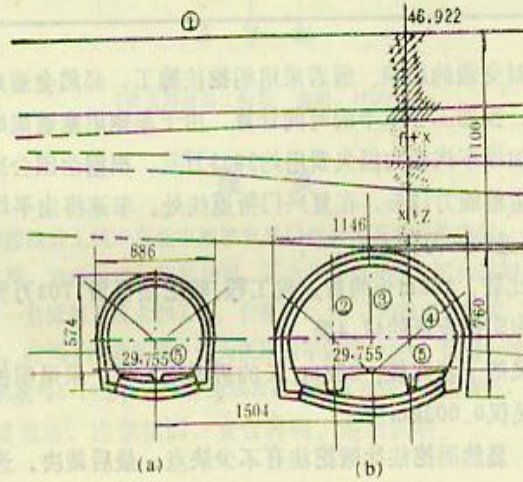


图3 隧道横断面

Fig.3. Section of tunnel

- (a) 单线隧道 Single track tunnel
- (b) 双线隧道 double track tunnel

- ① 路面
- ② 折返线中线
- ③ 隧道中线
- ④ 南正线中线
- ⑤ 轨顶面

m², 浇筑衬砌混凝土1.3万m³ (包括道床混凝土)。

2. 地质条件

隧道处于第四纪冲积洪积层中, 主要由粉细砂及砂砾石组成, 该地层松散、无自稳能力, 地下水位很低, 距地面23m, 隧道位于地下水位以上。

三、浅埋暗挖法施工

由于工程位置极为重要, 施工中必须确保安全, 考虑到浅埋暗挖和地层软弱、几乎没有自稳能力的特点, 因此我们根据洞室跨度不同, 采取不同的施工方法, 对单线、双线隧道采用小导管超前预注浆稳定工作面, 应用压注浆, 以密实胶结地层; 对大跨度、变断面、覆盖浅地段则采用深孔、前进式劈裂注浆加固围岩, 再应用小导管超前注浆来稳

定地层，做到万无一失，防塌防沉。

1. 在施工方法和施工工艺上，我们严格掌握以下原则

(1) 开挖进度严格控制循环进尺，长度一般在0.5~0.75m，不允许超过1m，以防局部塌方高度过大。

控制台阶的开挖长度，应充分利用地层纵向承载拱作用，单线 <1.5 倍洞径，双线、渡线 <1 倍洞径，台阶开挖后要及时封闭，纵向落底长度不允许大于1m，落一环，封一环。

(2) 坚持先加固，后开挖；重视施工量测，以量测资料进行反馈指导施工。

(3) 尽快进行开挖后的支护工序，用较强的初期支护手段，在围岩变形稳定后，再进行后期浇筑衬砌。

(4) 初期支护采取先排管、后注浆、再开挖，注浆一段，开挖一段、支护一段、封闭一段，也就是我们培训工人所讲的“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”的十八字施工原则。

2. 施工方法

(1) 单线和双线断面采用正台阶开挖法施工，开挖顺序见图4。拱顶I部开挖高度2.2m，然后顺着拱外弧线II部进行环状开挖，并留核心，再将钢拱架嵌入，挂网喷混凝土。这样施工的优点是既便于操作，又减少了围岩受扰动的范围，一旦发生坍塌，也容易进行处理，此外，还便于网构拱架快速架上，使其能在较短时间内将顶部支护完毕，从而创造一个安全的洞内施工环境。

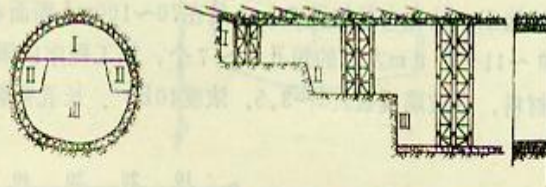


图4 单线和双线隧道开挖施工顺序图

Fig.4. The excavation Construction Sequences of single and double track tunnel

II部开挖是在距I部约5~7m处进行，拱圈两侧成“品”字形开挖，同时将网构拱架接至起拱线处，并在该处安装长2m的滞孔锚管，成45°角向地层外下方打入，进行管内注浆，加强拱脚与围岩的联系，以防止落底时发生掉拱事故。

III部开挖包括两侧边墙，仰拱及中部核心的全部开挖，均采用S-50型单臂掘进机，配备两立方米矿车作业，纵向落底长度为1m，要快速开挖、快速支护、快速封闭成环。

(2) 渡线大跨度断面采用单侧臂导坑正台阶法施工(图5)，它是将大跨度变为小跨后进行正台阶施工的，它避免了采用双侧臂导坑法(眼睛工法)所带来的工序复杂、造价增大、进度缓慢等缺点，也可避免由于施工精度不高，引起网构拱架联结困难的缺点。

3. 施工工艺

根据断面不同，我们主要采用小导管超前和长管深孔劈裂两种不同的预注浆形式，

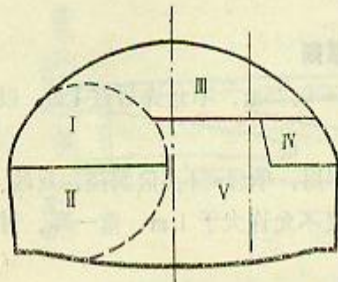


图5 大跨度隧道断面单侧导坑正台阶施工顺序

Fig.5 The excavation sequences of long-span Crosssection tunnel by one-side heading step.

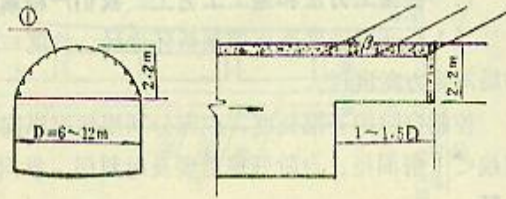


图6 超前小导管布置图

Fig.6. Layout of small pilot guide pipe for leadin-grout
①小导管超前 Small steel tub ahead.

(1) 小导管超前预注浆：采用直径40mm、长3.5m的小导管，导管沿上半断面周边布设，排管间距0.2~0.3m，仰角5~10°（图6），浆材选用水泥—水玻璃双液浆，水灰比为0.8:1.1~1:1，水玻璃浓度为35~40Be'，水泥浆与水玻璃体积比为1:0.6~1:1凝胶时间一分钟左右，七天注浆后的胶结强度可达5~15MPa，在隧道轮廓外形成0.6~1.2m厚硬壳，这就大大地改善了喷射混凝土的作业，也降低了喷射时的回弹，使初期支护时间从6~8小时缩短到2~3小时。

(2) 长管深孔前进式劈裂预注浆：大断面处由于小导管注浆加固范围有限，在大断面开挖时易受上部地面车辆的动载影响，引起较大的沉陷，因此，我们在波线区段采用了长孔劈裂预注浆法施工，钻孔布置如图7，一般在70~100m²断面布孔12~18个，其中17m左右的长孔6~11个，8m左右的短孔6~7个，施工程序以隔孔钻、注为原则，浆材也采用两液材料，水玻璃模数3.3~3.5，浓度40Be'。长孔劈裂预注浆法不仅

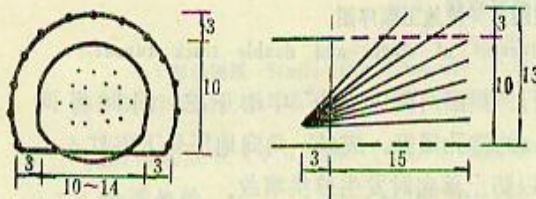


图7 预注浆孔眼布置图(单位, m)
Fig.7. Layout of pregrouted drilling.

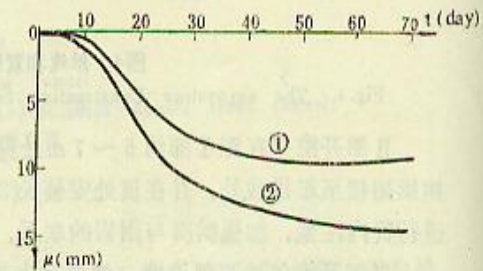


图8 两种注浆方式对地表沉陷影响
Fig.8. Influence of ground settlement by different grouting methods

①长孔劈裂预注浆 length drilling by crack pregrouted
②小导管超前预注浆 small steel tub ahead by pregrouted.

可以较传统的注浆法节约浆材70%左右，且能控制地表下沉，比小导管注浆法可减少1/2~2/3地表下沉量，图8为北正线采用小导管预注浆和南正线采用长孔劈裂预注浆加固围岩后，开挖所引起的地表一时间沉陷曲线对比图。

四、施工监测及其结果

在施工期间,为了掌握和控制施工质量,以便根据实测信息的反馈来指导施工;我们配合开挖,埋设了多种监测设备,测得大量有价值的数,为工程得以安全可靠提供了保证。

1. 监测布置

根据量测目的和要求,测试项目分两大类:

(1) 了解地表下沉和隧道围岩变形的有五种测试系统(图9),分别应用瑞典产WALD-3型精密水准仪,国产WRM-3型多点位移计、美国产西雅图测斜仪 SINCO 30325M型。

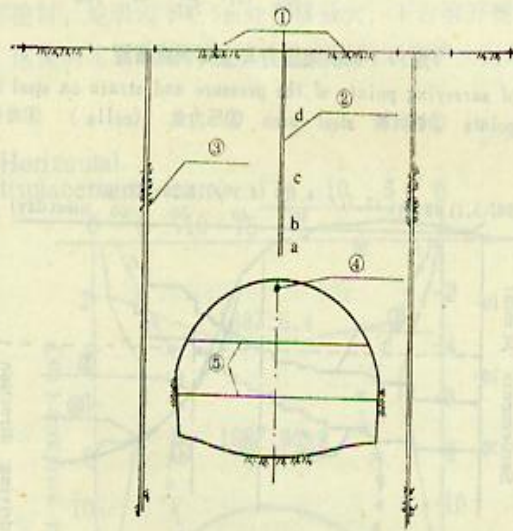


图9 地表下沉与隧道围岩变形测点布置

Fig.9. Layout of surveying points of ground settlement and tunnel surrounding rock deformation

- ①地表下沉测点 measure points of the settlement of ground surface
- ②多点垂直位移测点 measure points of the multiple vertical deformation
- ③水平位移测点 measure points of the horizontal deformation
- ④拱顶下沉测点 measure points of the arch top settlement
- ⑤围岩收敛测线 measure line of surrounding rock convergence

(2) 支护上的应力和压力量测是作为了解围岩和支护动态,进行理论分析和变更设计的主要依据,图10为钢拱架上的压力与应变测点布置图,另外还有拱脚压力量测、振动量测和必要土体物理参数的测试。

2. 地表下沉

图11是在桩号B(s)161+96处测量断面中心点 S_{20} 的地表下沉量随时间变化的实测曲线。

通过对大量地面量测点的数据整理分析,我们对地表下沉得出以下规律:

(1) 隧道开挖过程中,地表纵向沉陷规律为:在开挖面前1.5~2.0倍洞径处,地

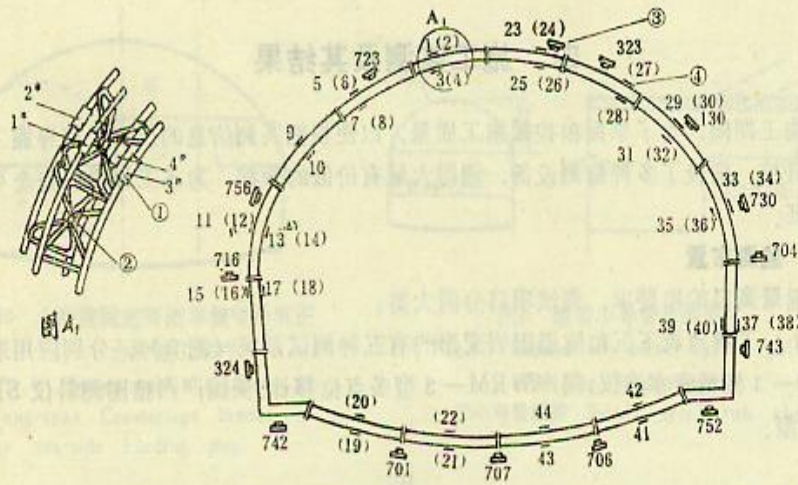


图10 钢拱架压力与应变测点布置

Fig.10. Layout of surveying points of the pressure and strain on steel arch support
 ①测点 measure points ②钢拱架 steel arch ③压力盒 (cells) ④应变片 (strain)

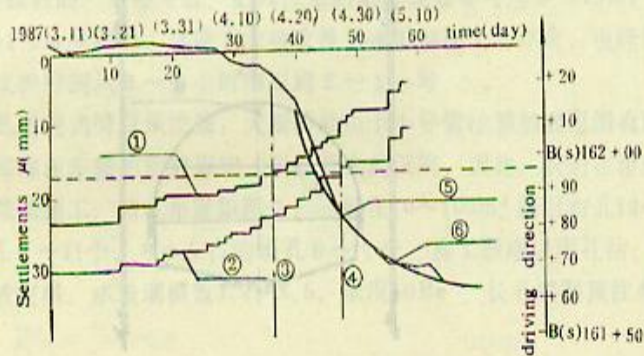


图11 开挖过程中地表下沉与时间关系曲线

Fig.11. Curves of the settlement of ground surface with time during excavation
 ①上台阶开挖时间-距离曲线 Curve of time-distance during up step excavation
 ②下台阶开挖时间-距离曲线 Curve of time-distance during lower step excavation
 ③过上台阶 through up step
 ④过下台阶 through lower step
 ⑤地而下沉-时间曲线 Curve of the settlement of ground surface with time
 ⑥回归曲线 Curve of switchover

表开始下沉，且向上隆起的最大值为 2~3 mm，试以 5° 测点为例 (图12)，在开挖面前方 2 倍洞径处地面上拱，变位量达 3.24 mm，这表明地层具有较好的整体弹性特征。

当在开挖面前 0.5 倍洞径时，地表下沉速率明显增大，平均为 0.41 mm/day，占总沉陷量的 10%~13%；当上台阶开挖面通过测点时，沉陷呈急剧变化，速率为 1.69 mm/day 到 2.63 mm/day，沉陷量达 20.39 mm，占总沉陷量 48% 左右；当下台阶通过并及时封闭仰拱后，沉陷速率随即降到 0.48 mm/day，下沉量 9.77 mm，占总沉陷量 26% 左右；当下台阶开挖超过测点 2.0 倍洞径时，沉陷趋于基本稳定，沉陷量约 2.4 mm，占总沉陷量 6%，最后，总沉陷量的 8%~10% 将由后期衬砌承担。

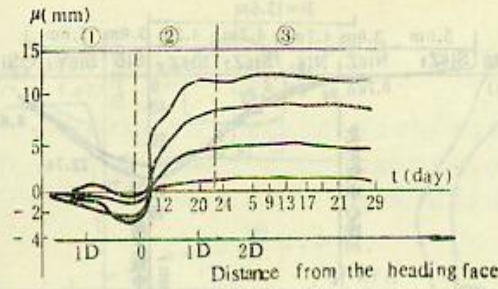


图12 地表多点位移计实测垂直沉陷一时间曲线

Fig.12. The measured curve of vertical settlement-time by the multiple rod extensometer
①前期变形段 ②急剧变形段 ③稳定阶段

(2) 垂直隧道轴线的水平位移量测随深度的变化曲线见图13, 水平位移一般指向隧道内侧, 上台阶开挖时, 地表以下4.5m处位移最大, 下台阶开挖后, 最大水平位移点出现在墙中附近, 这说明水平侧压力是随开挖断面的不断扩大而增大, 最后趋于一个常数。

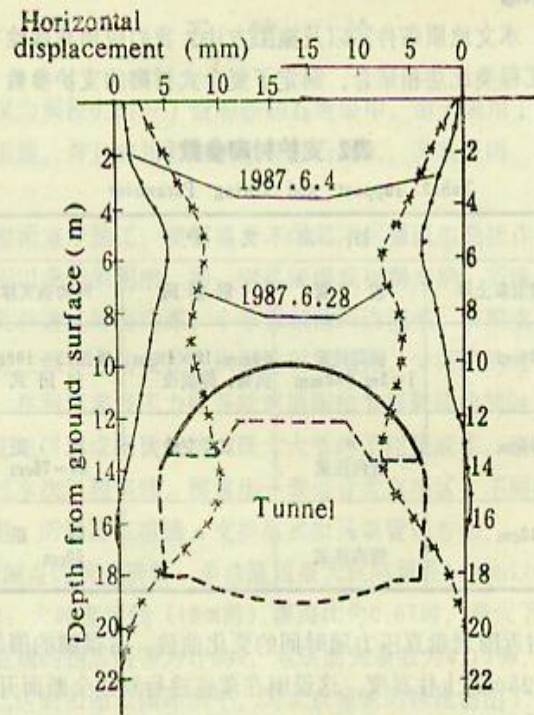


图13 地表水平位移随深度变化曲线

Fig.13. Curve of horizontal displacement-depth at the ground

图14是地表下沉的横向分布规律, 可见是以开挖隧道的南正线的中心线为中心呈正态分布, 其影响范围约30m, 相当于洞径的2~3倍, 该曲线的回归方程为:

$$S = 25.98877 \exp - 0.01918y^2 \text{ (mm)}$$

(3) 洞内拱顶及收敛量测是衡量洞室结构稳定的重要指标, 每5m设一量测断面,

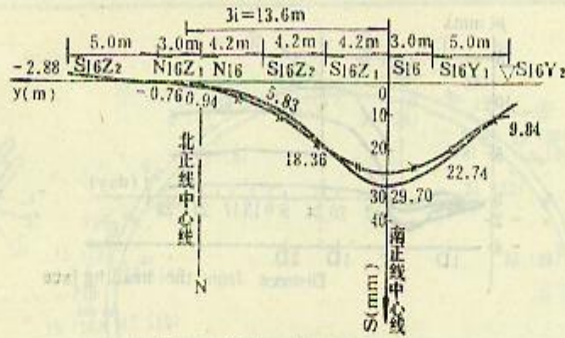


图14 横断面地表沉降曲线

Fig.14. Curves of ground settlement of the section

— 实测曲线 measured curve
 ••• 回归曲线 switchover curve

其规律为：拱顶的最大沉降量在开挖面后0.5~1倍洞径的范围；上台阶开挖引起拱顶沉降量占总沉降量74%，而下台阶仅引起22%的沉降量，这也正是我们应用变位分配法指导施工的依据。

3. 支护受力状态

根据工程规模、水文地质条件，以及施工方法，我们应用非线性有限元采用增量加载方法进行电算和工程类比法相结合，制定了复合式衬砌的支护参数（表2）

表2 支护衬砌参数

Tab.2. support and lining Parameter

项目	初期支护				二次衬砌厚度
	喷混凝土厚	锚管	钢筋网	网构钢支撑	
单线	30cm	拱脚处设 l=2m, φ40mm	φ6mm, 10×10cm 拱墙、仰拱设	纵距75~100cm 封闭式	35cm
双线	35cm	管内注浆	双层交错	纵距 50~75cm	40cm
渡线	40cm	管内注浆	"	纵距 50cm	45cm

图15测出拱脚附近围岩垂直压力随时间的变化曲线，右拱脚的围岩最大垂直压力为0.08MPa，相当于4.25m的土柱高度，这说明在落底进行双线全断面开挖和封闭后，只有部分地层重量作用在支护上，由此可见，尽管我们是在松散土层，甚至砂砾石地层进行大断面开挖，只要处理好周边围岩并预先加固，则围岩的承载拱还是存在的，量测资料还表明，径向压力不大，一般只有0.01~0.02MPa。

从对初期支护的拱脚压力量测看出，地层荷载通过喷层和拱架传到拱脚的垂直力为184kN，相当于0.608MPa，反称松动土柱高2.2m，说明上台阶施工后，压力并非全部都是土柱的作用。

图16是网构拱架应力在喷混凝土后共同受力时的应力实测结果，看出整个隧道断面

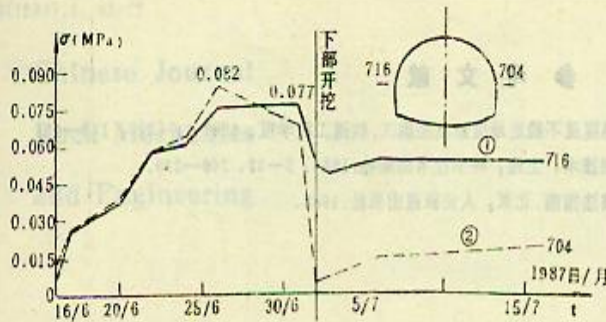


图15 拱脚压力随时间变化曲线

Fig.15. Curves of pressure-time at the spring of tunnel

- ① 左拱脚 Left spring
② 右拱脚 Right spring

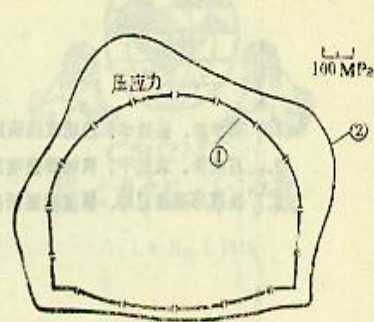


图16 拱架应力量测

Fig.16. Stress measurement of arch support

- ① 钢拱架 steel arch support
② 实测应力 (压) measured stress (pressure)

全部处于小偏心受压状态,说明所设计的隧道轮廓是合理的,拱架接头受力也不大。

五、结 论

1. 在埋深仅为洞径0.67~1倍的砂砾石地层中,由于采用了超前导管、各种预注浆等一系列有效措施,并且应用新奥法原理进行施工,实践证明,本工程的施工方法是成功的。

在松散、浅埋洞室中施工,拱部锚杆不但起不到锚固和悬挂作用,反而会在安装过程中扰动地层,所以我们采用喷、网、钢拱架组成初期支护,实践证明是合理的。

2. 长管深孔前进式劈裂注浆、小导管超前周边注浆、初期支护背后充填注浆、拱脚锚管提高承载力注浆等方法控制软弱地层不塌方、少沉降的重要手段,特别是采用中压劈裂注浆法,在利用浆液压力劈开软弱层面和节理裂隙的同时,又进行浆液填充,密实地层,从而使地层形成网状结构,既大大节约了注浆成本,也满足了工程需要。

3. 我们通过本次工程实践,摸索出一套适合北京城区,不同跨度、浅埋暗挖的施工工艺、施工原则、防塌防沉措施、支护型式和反馈管理方法。

根据近112个测点的统计资料:单线隧道最大沉降量在15mm以内;双线隧道最大沉降量在30mm以内;大跨度渡线(15m跨),覆跨比为0.67时,最大下沉值在36mm以内;沉降距离—时间曲线的拐点斜率为1/589;地层损失系数为4.13%,这些数字同国外相似情况对比,均已达到和超过国际水平,为北京地铁的修建创出了一条新路。

致谢:该文在总结过程中,得到中科院武汉岩土所周思孟同志的指导和帮助,特此表示感谢。

参 考 文 献

1. 王梦恕、张建华, 浅埋双线铁路隧道不稳定地层新奥法施工. 铁道工程学报, 1987;14 (2): 176—191
2. 石来德、袁礼平, 机械参数电测技术, 上海: 科学技术出版社, 1980; 5—32, 209—239.
3. 铁道部基建总局, 铁道隧道新奥法指南. 北京: 人民铁道出版社, 1988.

The Boring Excavation Method and Construction in Beijing Metro

Wang Mengshu

(Tunnel Engineering Bureau, Loyang, Henan, 471009)

Abstract

This paper describes the application of the boring excavation method in construction of Beijing Metro. The method based on NATM includes strata grouting, ring bench cut, lattice arch center for support, measurement feedback, and composite lining. The metro was constructed in cohesionless ground of sand and gravel with 0.7 of overburden/span ratio. Undoubtedly, the construction of Beijing Metro will be helpful for similar engineering in the near future.