

北京地铁盾构施工遇到的工程地质问题*

姜厚停 龚秋明 周永攀 马 超

(北京工业大学 建筑工程学院 北京 100124)

摘 要 近年来,盾构法施工广泛地应用于北京地铁建设中。然而,由于北京地区地质条件复杂,面临许多工程地质问题。本文在分析总结北京地区工程地质、水文地质条件以及盾构施工特点的基础上,讨论了盾构施工所遇到的工程地质问题,探讨盾构施工与工程地质条件之间的关系,为复杂地质条件下的盾构施工提供参考。

关键词 地质条件 盾构施工 工程地质问题 北京地区

中图分类号:U455.43 文献标识码:A

ENCOUNTERED ENGINEERING GEOLOGICAL PROBLEMS OF SHIELD TUNNELING IN BEIJING SUBWAY CONSTRUCTION

JIANG Houting GONG Qiuming ZHOU Yongpan MA Chao

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract At present, Tunneling Boring Machines (TBMs) are extensively used to meet the demands for excavation of urban tunnels in Beijing, but many engineering problems were encountered during tunneling because of geological complexity. In this paper, based on the characteristics of the engineering geology and TBM excavations, the engineering geological problems in Beijing were discussed, and the relations between shield TBM excavations and the characteristics of the engineering geology were analyzed, from which TBM excavations should be better understood.

Key words Characteristics of engineering geology, Shield TBM excavation, Engineering geological problems, Beijing area

1 引 言

北京地区盾构技术的研究与开发应用始于 20 世纪 50 年代末期,但在很长的时间内没有得到实质性的发展和应用,直到 20 世纪末在大力发展地铁交通的背景下才得以迅速地发展,目前盾构机已成为北京地铁建设的主力军^[1~2]。根据北京市的规划,

2015 年北京将建成 561km 的轨道交通线路,已建成的北京地铁 4 号线、5 号线、10 号线一期和机场线的地铁隧道大多采用盾构法施工。正开工建设的地铁有 9 号线、6 号线、8 号线二期、10 号线二期、亦庄线、大兴线、房山线、七号线、十四号线等 11 条线(图 1),其中大兴线、15 号线一期、亦庄线、昌平线和房山线隧道施工已经基本结束,7 号线、14 号线刚开始动工。这 11 条地铁隧道开挖也广泛采用盾

* 收稿日期:2010-07-06;收到修改稿日期:2010-08-12。

基金项目:北京市教育委员会科技计划面上项目(KM200910005010)。

第一作者简介:姜厚停,从事岩土工程、地下工程等领域的研究工作。Email: jianghouting@emails.bjut.edu.cn

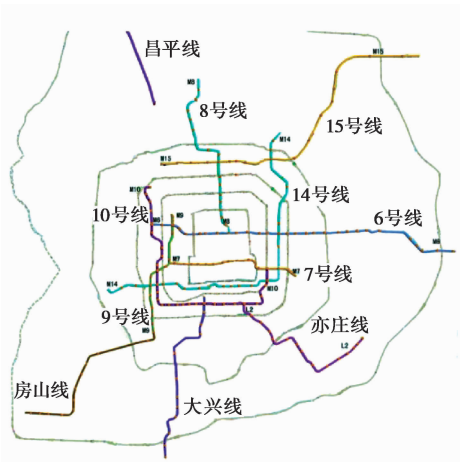


图1 北京在建地铁工程线路图

Fig. 1 Beijing metro under construction map

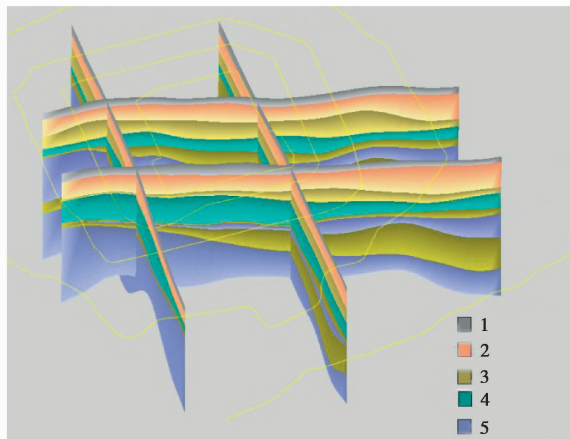


图2 北京城区第四系地层典型剖面

Fig. 2 Typical profile of Quaternary strata in Beijing area

1. 人工填土; 2. 粉土、砂土层; 3. 黏性土层;
4. 砂土层; 5. 砂、卵石石层

构机施工。

2 北京地区的地层情况与水文地质特点

北京地区北部和西部靠山,东部和南部连接华北平原,处于平原与山区的连接地带;城区位于平原地区的边缘,为一个不完整的盆地。北京地区的主体构造是早第三纪前的断裂及断裂控制的断块构造,它决定了北京平原区第三纪末期的古地形。在此基础上,自第四纪以来受新构造运动的影响,山区不断抬升,平原强烈下降且接受了巨厚的第四纪河流沉积物。在北京平原区的不同地区,由于受断裂活动的影响和地理环境限制,第四纪沉积物的厚度有明显的差异,形成了复杂的地层情况与水文地质特点。

2.1 地层条件

第四纪地层对隧道建设影响最大,其地层在平原区主要是洪积、冲积物;由于河流的频繁改道,形成多级冲洪积扇地,使地质条件较为复杂。总的趋势,沉积地层厚度由西向东逐渐增大,岩相分布由山地平原具有明显的过渡特征,第四系地层典型剖面图如图2所示。西部各大河流冲积扇顶部以厚层砂土和卵石、砾石为主;向东的大部分范围过渡地层是黏性土、粉土与砂土、卵石、砾石土互层;再向东则以厚层黏性土、粉土为主。总之,北京地区的地层包括如下三种典型土层:砾石/卵石地层、砂土地层和粉土/黏土地层,地铁工程均修建在此三种典型地层或由此形成的混合地层中,使得盾构施工面临

着较多的困难。

2.2 水文地质条件

北京地区地下水的分布从山麓地带到平原区也具有不同的特征。含水层岩性的粒度由西向东逐渐变细,西部以砂卵石、砾石层含水为主,一般为单水层;东部则以砂土层含水为主,可能存在4~5层甚至更多。单个含水层的厚度由西向东度逐渐变薄,西部一般30~40m左右,东部一般10~20m。工程中常遇到的地下水主要有三层,即上层滞水、潜水和承压水。上层滞水埋藏于填土、粉土及粉质黏土层中,潜水埋藏于砂、砾、卵石层中,水位一般在自然地表以下15~35m左右;承压水埋藏于砂、砾、卵石层中,埋深多在35m以下^[3,4]。

3 盾构法施工原理

盾构法施工是一种暗挖隧道施工方法,具体施工过程是(图3):刀盘掘削的土体进入土舱,充分混合后形成理想塑流性状态,通过控制盾构机推进速度和螺旋排土器的转速来调整土舱内渣土的土压力,以平衡掌子面上的土压力和水压力,确保掘进过程中掌子面稳定,同时螺旋排土器将渣土排出以实现连续掘进;一环掘进完毕后,千斤顶收缩,管片拼装器安装管片。与传统的暗挖法相比,盾构机能自动完成掘削土层、输送渣土、管片支护等施工全过程,具有施工速度快、对周围土层扰动小等优点。

盾构机能顺利施工的关键在于土舱内形成具有

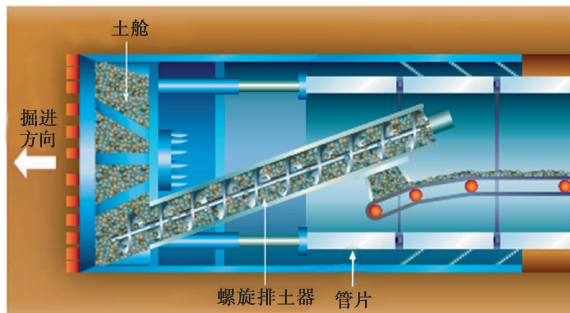
图3 掘进机工作原理简图^[6]

Fig. 3 Diagram of shield excavation



图4 砾石/卵石地层

Fig. 4 Gravel/pebble layer

理想塑流性状态的土体,易于控制排土,而且为掌子面提供持续、足够的土压力。所谓理想塑流性土体^[5],即开挖土体需具备以下4个基本条件:(1)良好的塑性变形特性;(2)优良的黏稠性能;(3)较小的内摩擦角;(4)较低的渗透性(渗透系数)。

4 盾构施工所遇到的工程地质问题

北京在建地铁线路分布广泛,隧道穿越的地层地质情况复杂,如10号线、7号线、14号线西侧部分区间和9号线全线穿越的地层大多为砾石层及卵石层。地质勘探资料表明,砾石/卵石层粒径为20~70mm,含砂量25%~35%,尤其是随机分布着大直径漂石/砾石。此种地层其基本特征是结构松散、胶结程度不高,砾石/卵石之间点对点传力,地层反应灵敏,成拱性差,对卵石缺乏约束力^[7](图4)。此外,10号线、7号线、14号线东侧部分区间,8号线,大兴线,亦庄线等大部分盾构区间均处于砂土层或砂土/黏土地层形成的混合地层中。施工所面临的许多工程地质问题引发了社会各界的广泛关注,因此系统、全面地研究盾构法施工所遇到的工程地质问题是十分迫切和必要的。

4.1 开挖面的失稳问题

开挖面失稳问题是盾构施工面临的最常见的,也是危害最大的施工问题之一。如9号线某盾构区间在穿越卵石地层时,土舱内的土压力平衡很难建立,掌子面土压力过低,从而导致出土量增大,地层过量损失,引起地表塌陷。砾/卵石地层在未受扰动情况下,土层颗粒依靠摩擦咬合作用维持土体颗粒的力学平衡,保持区域土体稳定^[8,9],在盾构机推力和刀盘转动切削的作用下,砾石或卵石之间的受力比较集中,使得土层扰动较大;另一方面,由于此类

地层塑流性差,在土舱里不易形成连续的土体压力,导致掌子面土压力起伏不定,加剧了对地层的扰动。较大的土层扰动使得掌子面前方和上方的卵石间的力学平衡遭到破坏,如果土层不能及时得到压力补充,则卵石或较大的砾石会相继松动,造成较大的地表沉降,严重时将会产生较大的空洞区域,引起掌子面和周围土层的坍塌。

除了地层扰动外,富水的砂/砾/卵石地层也容易引起开挖面的失稳。此类地层具有较强的渗透性,土体在螺旋排土器中不易形成“土塞”,一方面造成难于调节土舱土压力,另一方面高地下水压力还会引发“喷涌”事故,造成开挖面失稳破坏,严重影响施工安全。如9号线军事博物馆站~东钓鱼台站盾构区间穿越玉渊潭段隧道开挖时,由于该段地层富含地下水,只好采取玉渊潭放水后再进行盾构施工的方法,以减少地下水对盾构施工的影响。

从现场施工情况来看,黏性土地层中引起的开挖面失稳情况相对较少,此类地层经过合适的土体改良后渣土能达到较好的塑流性状态,满足盾构施工的要求。

4.2 盾构机磨损问题

砂/砾/卵石地层本身具有较高的摩擦性,尤其是砾/卵石地层对刀具、刀盘以及螺旋排土器的磨损十分严重。其中刀盘磨损主要发生在刀盘的外周部位,尤其以刀盘与盾壳间隙位置磨损最为严重;刀具以非正常磨损为主,滚刀刀圈偏磨、刀圈脱落,边缘刮刀磨损破坏速度快等;螺旋排土器的螺旋叶片、外筒磨损量较大,它们之间的间隙变大等,这些都严重影响机具的工作效率和寿命。减小磨损的最有效方法是土体改良,其改良效果直接影响到盾构机的掘进速度、掘进成本,甚至工程的成败。大量土体改良试验证明^[10,11],砂/砾/卵石土体经过选择合

适的添加剂进行改良后,土体塑流性基本能达到盾构施工的要求,相应的摩擦性也大大减小。

另外,松散的卵石/砾石会随着刀盘的转动堆积在刀盘前方和土舱内底部,阻碍渣土的进入和排出,在刀盘进土口处及土舱内均形成泥饼,使得盾构机推力和刀盘扭矩过大,掘进速度慢,甚至会发生卡住刀盘和螺旋排土器的现象,损坏盾构机。如10号线二期工程某盾构区间穿越卵石地层时盾构推力为14000~16000kN,掘进速度为6~10mm·min⁻¹,经常出现无掘进速度,并且频繁出现螺旋机扭矩过大,出土困难的现象,最终使得前方土体挤压密实造成盾构刀盘完全不能转动。两次开舱均发现,在土舱内及刀盘进土口已存在泥饼,而且非常坚硬密实(图5),同时在土舱内、土舱周围及螺旋机进土口处堆积有大量的卵石。



图5 进土口处的泥饼

Fig. 5 Soil cakes near the opening

黏土地层中掘进也会在刀盘中部和土舱内形成坚硬的泥饼,堵塞刀盘开口和土舱,大大降低了掘进速度,增加盾构机运行负荷。但与砾、卵石地层情况不同的是,盾构机磨损较轻。如果使用合适的添加剂进行土体改良,以及合理的盾构运行参数,则完全可以避免产生泥饼,顺利掘进。

4.3 大漂石破碎问题

北京盾构施工沿线所遇到的大漂石多出现在城区西北部,处于永定河冲洪积扇中,大多夹杂在卵石地层内。如北京地铁10号线二期孟家村一前泥洼以及前泥洼一西局盾构区间内,人工探井表明普遍分布粒径大于200mm的漂石,在盾构隧道开挖的深度中漂石含量普遍在37.7%~77.8%,探井中揭露的最大漂石长度达500mm以上(图6)。

由于大漂石的存在,盾构机在开挖大漂石时不能通过刀盘开口和螺旋输土器排出土舱;又因漂石

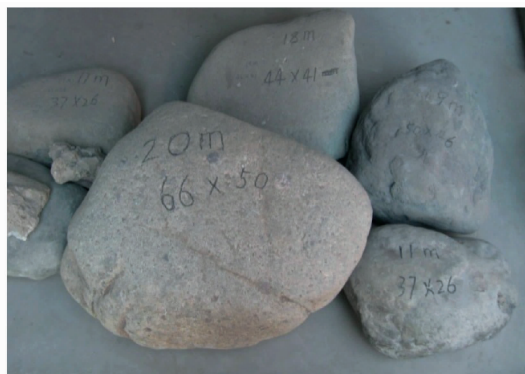


图6 漂石

Fig. 6 The boulders

之间的咬合性差,盾构开挖时漂石可能随着刀盘的转动而在刀盘前方滚动,很难破碎,因此可能造成以下问题:(1)盾构刀盘和刀具容易与大漂石发生碰撞,造成刀盘及刀具的非正常磨损及破坏,导致刀具维修和更换频繁,严重影响施工速度和效率;(2)大漂石会滞留在盾构机刀盘前方和四围,在推进过程中刀盘会受力不均产生变形,造成主轴承或主轴承密封受损、盾构机负载加大等不良后果;(3)大漂石使得盾构机位置和姿态控制困难,尤其在曲线施工时盾构机姿态更难控制;(4)不能破碎的漂石需要人工清除,增加了施工风险。

4.4 其他问题

北京城区因历史悠久,自然形成的地层结构受人为扰动比较大,城内地下分布有许多埋埋的河、湖、沟、坑,还有厚度分布不均的人工填土(炉灰,垃圾,房渣土等等)分布更加没有规律,土质不均匀,对地铁安全施工影响比较大。如大兴线某盾构区间隧道上方的人工填土在地面荷载作用下,产生较大沉降,均超过30mm,日沉降速率达10mm以上,现场环境如图7所示。

上层滞水埋藏于填土、粉土及粉质黏土层中,主要分布于东北部及南部,与地表水联系密切,补给来源主要是大气降水、管道漏水以及生活用水(尤其在平房区)等的渗漏,主要以蒸发和向下渗漏补给下层潜水方式排泄。大兴线、15号线以及6号线等所在的部分盾构区间影响较大,如大兴线某区间盾构穿越砂土层时因隧道上方距结构顶板约8m位置处的雨水方沟底板破裂,雨水渗入地层,使土体强度降低、自稳性下降,导致地表塌方(图8)。



图7 人工填土引起的地表沉降

Fig. 7 Ground settlement caused by artificial fill



图8 雨水渗漏引起的地表塌方

Fig. 8 Ground collapse caused by the leakage of rainwater

5 总 结

北京地区地质情况复杂多变,其中砂、卵石地层中所引发的工程地质事故最多,造成的损失也最大。此类地层施工中应严格控制好盾构机运行参数,密切关注土舱里土压力的变化情况,保证提供维持掌子面稳定所需的土压力,尽量减轻对土层的扰动。重视土层的土体改良,增加泥浆的使用以补充土体中的细颗粒成分,减轻盾构机的磨损。严格控制排土量,防止超挖,及时有效的进行背后注浆以及二次注浆,防止地表沉降过大。

大漂石的处理措施有限,且清理过程费时费力,如开舱人工清除,地面挖竖井人工清除,对大漂石周边土层进行地面预加固盾构机破岩等,深受地质条件和地表建筑的影响,总体施工效果不理想。目前尚未找到切实有效的处理方法,只能改进盾构机刀盘设计,防止大漂石进入土舱,并且设置足够的滚刀加强刀盘破岩能力。对于刀盘前方不能破碎的漂石,则最好能进行人工清除。

致谢 感谢北京市勘察设计研究院在本文撰写过程中提供的地质资料。

参 考 文 献

- [1] 乐贵平,江玉生.北京地区盾构施工技术.都市轨道交通.2006,**19**(2):45~49.
Le Guiping,Jiang Yusheng. Shield tunneling in Beijing area. Urban rapid rail transit. 2006,**19**(2):45~49.
- [2] 汪国锋.北京地铁十号线土压平衡盾构土体改良技术应用研究[J].现代隧道技术.2009,**46**(4):77~82.
Wang Guofeng. Soil improvement technologies and implementation for Epb shield in Beijing subway line 10. Modern Tunneling Technology, 2009,**46**(4):77~82.
- [3] 张在明,孙保卫,徐宏声.地下水赋存状态与渗流特征对基础抗浮的影响[J].土木工程学报.2001,**34**(1):73~78.
Zhang Zaiming,Sun Baowei,Xu Hongsheng. Effect of characteristics of ground water distribution and seepage on anti-uplift analysis of building foundations. China Civil Engineering Journal. 2001,**34**(1):73~78.
- [4] 罗文林,韩焯,刘炜.北京地区基坑支护技术现状研究[J].岩土工程学报.2006,11,**28**(增):1534~1537.
Luo Wenlin,Han Xuan,Liu Wei. Studies on present status of retaining structures for deep excavation in Beijing. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2006. 11, **28**(s1):1534~1537.
- [5] 姜厚停,龚秋明,闫鑫.土压平衡盾构施工中泡沫改良圆砾地层试验研究[J].现代隧道技术.2008,(增):187~190.
Jiang Houting,Gong Qiuming,Yan Xin. Use of chemical foam for earth pressure balanced shields excavation in gravel layers. Modern Tunnelling Technology, 2008,(s1):187~190.
- [6] Qiu Ling Feng. Soil conditioning for modern EPBM drives [J]. Tunnels & Tunneling International. 2004. **12**: 18~2.
- [7] 龚秋明,高明忠,姜厚停.成都地铁卵石地层盾构施工浅析[J].市政技术.2009,**27**(增2):184~186.
Gong Qiuming,Gao Mingzhong,Jiang Houting. Analysis of shield tunneling in gravel layers during Chengdu subway construction. Municipal Engineering Technology. 2009, **27**(s2):184~186.
- [8] 郭秀琴.砂卵石地层盾构法隧道施工技术[J].铁道建筑技术.2008,**3**:37~42.
Guo Xiuqin. Shield-Tunneling construction technology in sandy cobble ground. Railway Construction Technology. 2008, **3**:37~42.
- [9] 丛恩伟.北京地铁10号线砂卵石地层盾构法隧道施工关键技术[J].铁道标准设计.2008,**12**:168~171.
Cong Enwei. Key studies for Epb shield in sandy cobble layer in Beijing subway line 10. Railway Standard Design. 2008,**12**:168~171.
- [10] 龚秋明,姜厚停,闫鑫.圆砾地层土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J].北京工业大学学报.2009,**26**(s1):56~62.
Gong Qiuming,Jiang Houting,Yan Xin. Soil conditioning for earth pressure balanced shields excavation in gravel layers. Jour-

nal of Beijing University of Technology. 2009, (s1): 56 ~ 62.

- [11] 闫鑫, 龚秋明, 姜厚停. 土压平衡盾构施工中泡沫改良砂土的试验研究[J]. 地下空间与工程学报. 2009, 6(3): 449 ~ 453.
Yan Xin, Gong Qiuming, Jiang Houting. Soil conditioning for

earth-pressure balanced shields excavation in sand layers. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2009, 6(3): 449 ~ 453.

(上接第 125 页)

- [8] 李丽慧, 杨志法, 张路青, 等. 关于龙游石窟斜顶“设计”中工程科学问题的探讨. 岩石力学与工程学报, 2005, (2): 336 ~ 343.
Li Lihui, Yang Zhifa, Zhang Luqing, et al. On the engineering scientific problems about the inclined roof design of LongYou Grottoes. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, (2): 336 ~ 343.
- [9] 杨志法, 李丽慧, 张路青, 等. 关于龙游石窟 4 号洞 4-2 号岩柱长期抗剪强度反分析问题的讨论. 工程地质学报, 2005, (1): 62 ~ 67.

Yang Zhifa, Li Lihui, Zhang Luqing, et al. On the back-analysis of Long-term shear strength of No. 4-2 pillar in No. 4 Cavern in Longyou Caverns. Journal of Engineering Geology, 2005(1): 62 ~ 67.

- [10] Gaimei Guo, Lihui Li, Zhifa Yang, et al. Weathering mechanism of the Cretaceous argillaceous siltstone caverns, Longyou, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 64(4): 397 ~ 407.
- [11] Itasca Consulting Group Inc. User's Manual (Version 3.0) of FLAC3D[M]. 2005.