

# 北京地铁敞口式盾构掘进对砂层土体扰动规律研究

张 箭<sup>1</sup>, 王树英<sup>1</sup>, 阳军生<sup>1</sup>, 张细宝<sup>2</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中铁五局集团有限公司, 湖南 长沙 410205)

**摘 要:** 敞口式盾构在砂层掘进时会扰动周围土体, 易引起地层坍塌. 以北京地铁6号线2期敞口式盾构施工段为工程背景, 阐述了国内首台挤压式敞口盾构机机体构造及开挖工序, 通过地表沉降和地中水平位移监测, 研究了盾构掘进对砂层的扰动特征. 结合盾构掘进参数分析, 探讨了减少土体扰动的控制措施. 研究表明, 盾构接近测孔区阶段, 土体变形规律最复杂; 通过和刚脱离测孔区阶段是土层变形控制的重要环节; 盾构隧道轴线两侧1.5倍洞径范围内是土体扰动主要区域. 所得结论可为砂土地层敞口式盾构施工地层位移控制提供可鉴参考.

**关 键 词:** 敞口式盾构; 砂质地层; 开挖工序; 地层扰动; 变形特征

**中图分类号:** U 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0572-06

## Soil Disturbance of Beijing Subway Constructed by Open-Face Shield Tunneling Method in Sandy Stratum

ZHANG Jian<sup>1</sup>, WANG Shu-ying<sup>1</sup>, YANG Jun-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Xi-bao<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. China Railway Wujia Group Corporation, Changsha 410205, China. Corresponding author: ZHANG Jian, E-mail: zhangj0507@163.com)

**Abstract:** The open-face shield tunneling the sand stratum can affect the surrounding soil and may cause collapse with excessive deformation. Based on the open-face shield construction of NO. 2 Beijing's Metro of Line 6, the structure and the comprehensive excavation system of the domestic first open-face shield was explained. The law of disturbance was analyzed by monitoring subsidence and horizontal displacements of the soil. Some measures to reduce soil disturbance were also presented. Results showed that the deformation law of the soil is the most complicated when the shield approaches to the monitoring holes. It is important to have a good control on the soil deformation when the shield is passing through and leaving monitoring holes. The range of the disturbance area can be 1.5 times the hole diameter from the shield. The conclusion can be used as a reference for controlling the deformation induced by shield construction in sandy stratum.

**Key words:** open-face shield; sandy stratum; excavation system; soil disturbance; deformation characteristics

北京地区地铁建设规模较大, 地层主要以含漂石、卵石的砂质地层为主, 密闭式盾构在掘进过程中刀盘磨损严重、寿命周期短、施工成本较高. 敞口式盾构机械化程度虽不高, 但其设备及施工成本较密闭式低, 且无需渣土改良, 环保无污染, 并不受大粒径漂石、孤石、桩基等地下障碍的限制. 因此, 无水条件下, 可较好地适应北京地区砂

质地层, 获得良好的技术经济效益.

目前, 国内外已有盾构掘进过程中土体扰动特性研究的文献报道, 但多限于土压<sup>[1-5]</sup>和泥水<sup>[6-9]</sup>盾构, 关于敞口式盾构掘进地层扰动的研究很少, 其中 Standing 等<sup>[10]</sup>分析了敞口式盾构掘进引起的地层损失原因; Dimmock 等<sup>[11-12]</sup>研究了黏土地层敞口式盾构不同施工工序地层变形规

收稿日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51208516); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014zzts045).

作者简介: 张 箭(1989-), 男, 安徽芜湖人, 中南大学博士研究生; 阳军生(1969-), 男, 湖南永兴人, 中南大学教授, 博士生导师.

律,提出地层损失计算新方法. Farrokh 等<sup>[13]</sup>对隧道支护施作时间进行探讨,并研究了其与停机时间和掘进速度的关系.

北京地铁 6 号线 2 期某段位于通州郊区,沿线大部分为市政道路、农田、蔬菜大棚和树林,行人及车流量较小,选取该段作为敞口式试验段. 本文以此工程为依托,阐述了国内首台敞口式盾构机构造及其掘进工艺,通过现场实测及理论分析对盾构掘进过程中砂质地层土体扰动特征进行研究,分析盾构掘进参数规律,提出减少土体扰动的控制措施. 研究成果为今后类似敞口式盾构机的设计和施工提供参考.

1 工程概述

北京地铁 6 号线二期土建 15 标郝家府站—东部新城站(简称郝—东区间)区间长 1 257. 45 m,其中,隧道内径 6 m,左右线净距 9 m. 选取右线 K41+182. 356~K41+570. 650 段作为敞口式盾构施工试验段,盾构机长 9. 15 m,开挖直径 6. 22 m,隧道顶板埋深约为 8. 8~10. 3 m.

如图 1 所示,试验段地层自上而下依次为杂填土①、粉质黏土②、粉土②<sub>1</sub>、粉细砂(②<sub>3</sub>,③<sub>3</sub>)和中粗砂(④<sub>4</sub>,⑤<sub>1</sub>)地层,盾构穿越地层物理力学参数见表 1. 为保证开挖面稳定,沿线路一侧均匀布置降水井降水,使盾构作业处于无水状态.

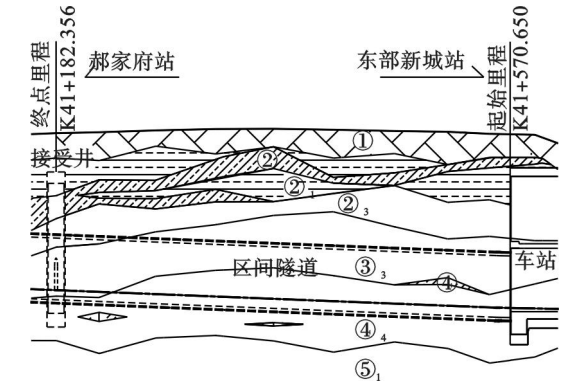


图 1 地质纵断面图  
Fig. 1 Geological profile

表 1 岩土材料参数  
Table 1 Parameters of soils

地层 编号	岩土 名称	密度 g·cm <sup>-3</sup>	固结快剪	
			黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
② <sub>3</sub>	粉细砂	2. 00	0	16
③ <sub>3</sub>	粉细砂	2. 05	0	25
②	粉质黏土	1. 89	30	16
④ <sub>4</sub>	中粗砂	2. 08	0	30

2 敞口式盾构构造及掘进工艺

2. 1 前仓改造

隧道穿越地层主要为冲洪积层粉细砂和中粗砂地层,该地层软硬不均,施工中易涌水、涌砂、超挖,不易成拱. 隧道试掘进阶段采用支挡式敞口盾构施工,掘进过程中开挖面自稳性较差,土方超挖量大,故现场对支挡式敞口盾构机进行改造,即在盾构前仓焊接钢板进行分仓. 将开挖面分成大小不等的 10 个临空面,使得开挖面单一土体自然坡分成 3 级自然坡,以增大盾构机与砂层间摩擦,增加土体稳定性,改造后盾构构造见图 2.

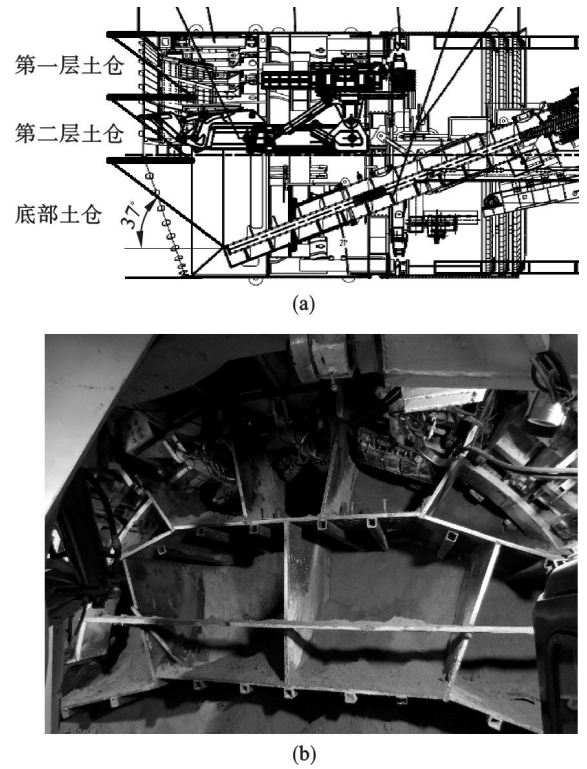


图 2 盾构分仓效果图  
Fig. 2 Working sketch of shield  
(a)—分仓侧面图; (b)—分仓正面图.

2. 2 盾构掘进工艺

改造后敞口盾构机掘进工艺与支挡式不同,经试验段摸索,形成了一套较完整的开挖工序循环,其主要过程如下:

- 1) 盾构掘进前采用人工挖掘方式对第一和第二层 9 个土仓内土体进行放坡,并使得各仓土体坡顶在盾壳或仓板前端内部且能保持稳定,避免超挖.
- 2) 采用改造后小型挖机进行底部土仓内土体放坡挖掘;在土体坡顶不出其上方仓板且土体保持稳定的前提下,尽量进行挖掘.

3) 盾构机推进过程中,土体受挤向各仓内移动,挖机和工人以推进前的土体状态为目标动态出土,使得推力不能过大且掘进速度不能过慢;出土过程中尽量保持匀速推进,避免时推时停,对土体造成重复扰动;掘进过程中需及时出渣,以减少盾构推进阻力。

4) 为避免土体脱离盾尾后发生较大沉降,掘进过程中做好同步注浆工作。

5) 单环推进结束前至少 10 ~ 20 cm 行程停止土体挖掘,以保证管片拼装过程中掌子面稳定;下一环掘进前,再将掌子面土体修整至推进前状态;推进 1.2 m 后,进行管片拼装。

6) 拼装完成后,按照上述过程循环施工。

### 3 现场实测分析

#### 3.1 测点布置说明

为研究敞口式盾构掘进各阶段对土体的扰动规律,在该区域进行地表沉降和土体测斜测试。沿隧道轴线每隔 5 m 布置一个地表沉降点,并在 K41 + 520, 390, 370 和 310 断面布置横向地表沉降点;布置 K41 + 281 (D1) 和 K41 + 259 (D2) 两测斜断面,测点具体布置情况如图 3 所示。

#### 3.2 地表沉降

1) 横断面沉降槽。图 4 为试验断面 K41 + 520, 390, 370 和 310 横向地表沉降槽,由图可知:盾构刚分仓改造完 (K41 + 520),施工工序混乱,地表沉降最大值达 181 mm;施工工序优化后(如 K41 + 310),地表最大沉降减小为 48 mm;隧道轴线两侧 1.5 倍洞径范围内土体沉降值较大。

2) 地表沉降变化规律。图 5 为试验断面 K41 + 390, 370 和 310 地表沉降变化曲线,沉降发展规律为:轻微隆起(切口距试验断面 -20 ~ -12 m)、快速沉降(切口距试验断面 -9 ~ 0 m)、缓慢沉降(盾构通过期间)、快速沉降(盾尾脱离试验断面)、后期沉降(盾尾距试验断面大于 9 m)。

#### 3.3 D1 断面土层水平位移

D1 断面共埋设两根测斜管 (CX1 和 CX2), 分别距隧道轴线 0 和 9 m。从图 6a(纵向以盾构掘进方向为正)和图 6b(横向以向隧道内部移动为正)可以看出:盾构接近试验断面时,前方土体一直处于挤压状态;当盾构临近时(距离试验断面 -7 ~ -3 m),隧道拱顶标高以上土体进入卸荷区域,出现小幅度的反向回弹;盾构机分仓改造后,上半部临空面尺寸相对较小,掘进过程中对土体挤密效应更明显,但整体变形不大。

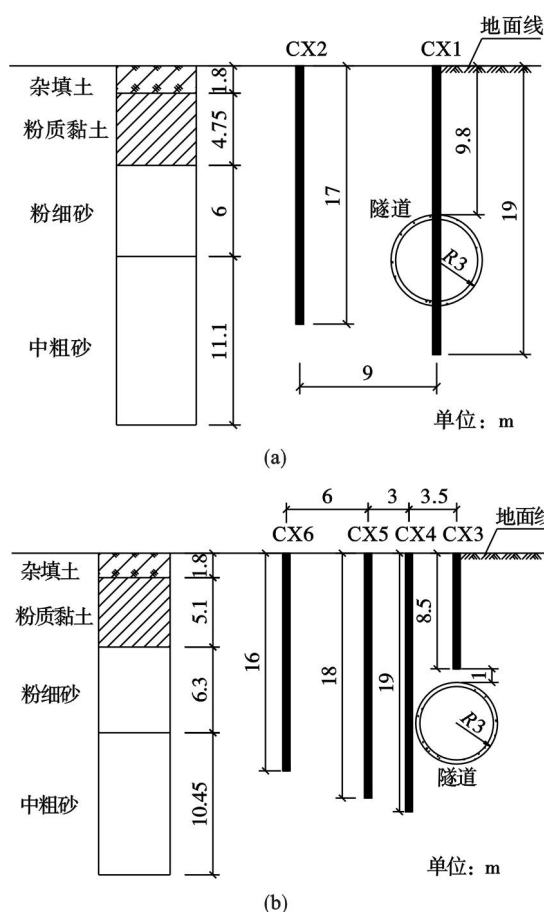


图 3 测斜管布置图

Fig. 3 Layout of inclinometer tubes

(a)—D1 断面测斜管纵断面布置图;  
(b)—D2 断面测斜管纵断面布置图。

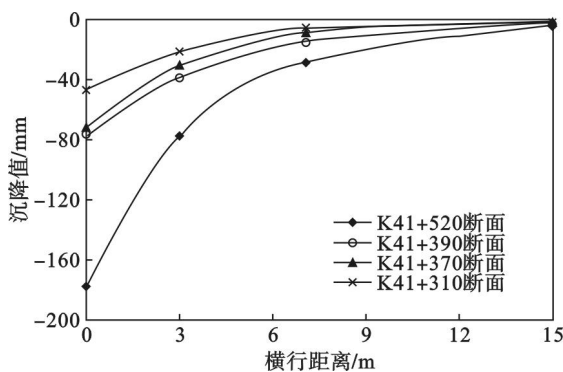


图 4 横断面地表沉降槽

Fig. 4 Settlement in cross sections

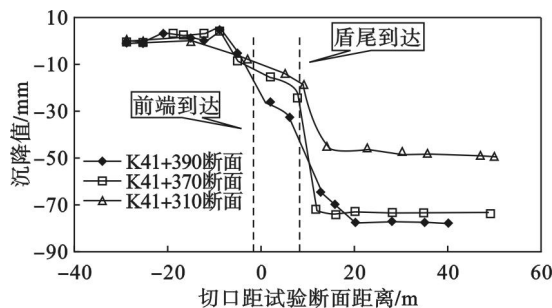


图 5 地表沉降变化曲线

Fig. 5 Surface subsidence curves



腰标高处土体变形最大,最大变形为 32.0 mm. CX5 和 CX6 孔整体变形较小.

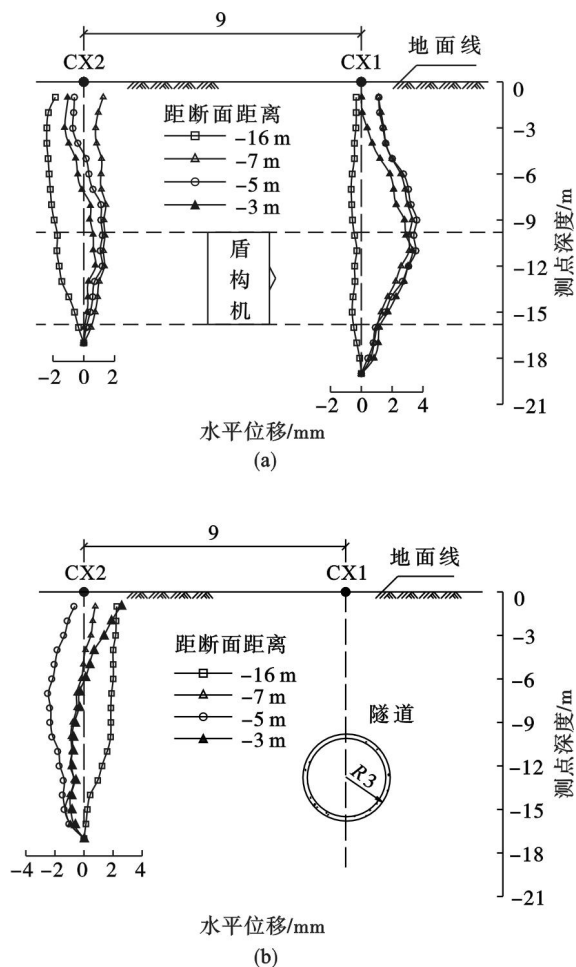


图6 D1断面测孔土层水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement along monitoring tubes in cross-section D1

(a)—土层纵向水平位移; (b)—土层横向水平位移.

### 3.4 D2断面土层水平位移

D2断面共埋设4根测斜管,分别距离隧道中心0,3.5,6.5和12 m.盾构掘进过程中,CX3测管发生折断,这里不作讨论.为清楚分析土体变形特征,选择具有代表性的几个阶段进行讨论.

1) 盾构接近测孔区.由图7a可知,与D1断面相似,土体纵向位移规律为:与掘进方向同向变形(切口距试验断面-16~-5 m);与掘进方向反向变形(距试验断面-5~0 m).

图7b为测孔垂直隧道轴线方向发生的水平位移,其位移规律为:背离隧道方向变形(切口距试验断面-16~-9 m);向隧道方向变形(距试验断面-9~0 m).

2) 盾构通过测孔区.由图8a可知,这一阶段土层的变形较上一阶段更大.盾构通过D2断面过程中,盾构侧面土体沿隧道掘进方向移动,这主要由盾构机壳与砂层摩擦力引起. CX4孔隧道拱

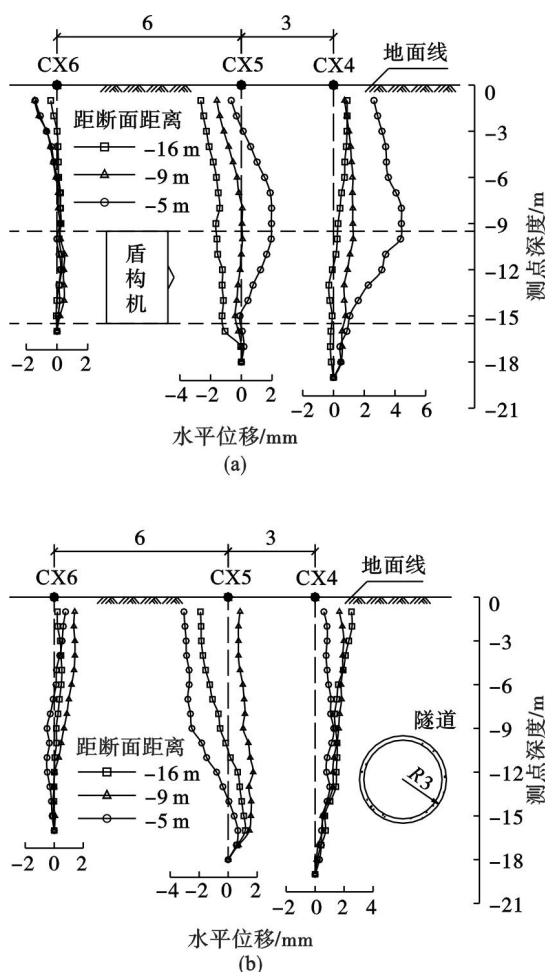


图7 盾构到达前D2断面测孔土层水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement along monitoring tubes in cross-section D2 before shield arriving

(a)—土层纵向水平位移; (b)—土层横向水平位移.

由图8b可知,盾构侧面地面以下10~14 m范围内,土体横向挤压作用明显,发生背离隧道的移动; CX4孔隧道拱腰标高处土体变形最大,最大变形为-14.2 mm.

3) 盾构脱离测孔区.由图8a知,盾构刚脱离测孔区时,受前方盾构周边土体拖曳影响, CX4孔处土体继续沿隧道推进方向移动,拱腰标高处土体变形为11.0 mm; CX5和CX6测孔土体均发生轻微回落,但变化不大.

由图8b可知,盾构脱离测孔区时, CX4孔拱腰标高以上土体发生较大幅度的回落,最大变形为47.6 mm,发生在地面以下8 m的位置.

总的来说,盾尾脱离断面后,主要变形瞬时完成,后期变形较小;隧道轴线两侧1.5倍洞径外土体扰动不明显.

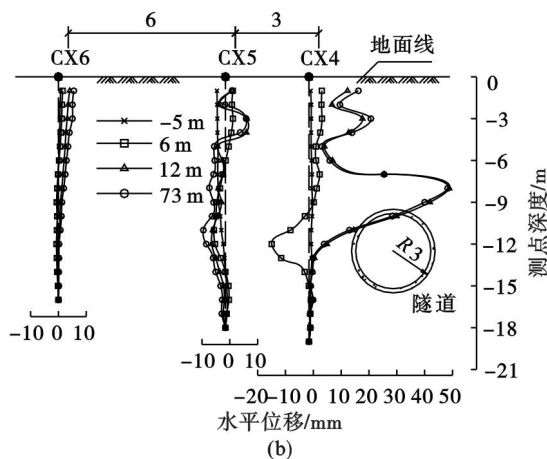
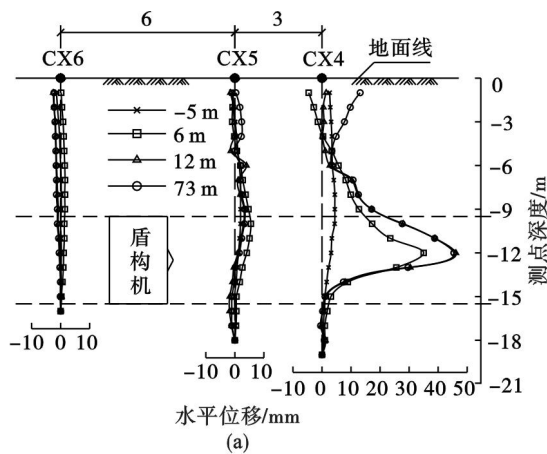


图 8 盾构通过及远离后 D2 断面测孔土层水平位移  
Fig. 8 Horizontal displacement along monitoring tubes in cross-section D2 when shield passing through and leaving

(a) 一侧测斜孔土体纵向水平位移;  
(b) 一侧测斜孔土体横向水平位移.

## 4 敞口式盾构掘进对砂层扰动的分析

### 4.1 扰动特征探讨

结合敞口式盾构掘进工艺及实测数据,可将盾构掘进引起的土体扰动大致分为三类,如图 9 所示,下面从 4 个阶段分别进行探讨.

1) 盾构到达前. 当切口距试验断面较远时,主要通过力的传递对土体产生扰动,其扰动程度相对微弱. 而当盾构接近试验断面时,前方土体变形规律较为复杂;当切口距试验断面约 0.5 ~ 1.5 倍洞径时,土体与仓板之间摩擦力大于土体的被动土压力,前方土体经历加载阶段,产生如图 9 所示的挤压扰动区,使得附近土体前移和向四周扩散;当盾构临近时(距离小于 0.5 倍洞径),土体沿仓板间空间进入盾构机内部,并随着螺旋输送机排出.

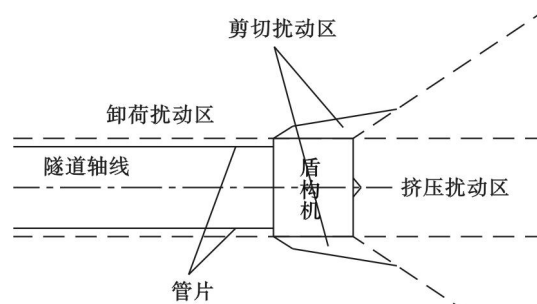


图 9 盾构掘进扰动平面图  
Fig. 9 Disturbed zones induced by shield tunneling

2) 盾构通过期间. 盾构通过过程中,受盾壳摩擦和剪切作用影响,在盾构周边(距隧道轴线约 1 倍洞径)产生如图 9 所示的剪切扰动区,使得周边土体沿隧道掘进方向及垂直隧道轴线向外的方向移动,因砂土内摩擦角较大,力的传递距离有限,导致该扰动区范围较其他区域更小,但扰动范围内土体受扰动程度较大.

3) 刚脱离盾尾期间. 盾尾通过后,周边土体(距隧道轴线约 1 倍洞径)迅速向空隙填充. 此时主要形成图 9 中卸荷扰动区,该区内土体力学参数降低,此阶段是土层扰动程度控制的重要环节.

4) 盾构远离期间. 对砂质地层而言,盾尾脱出一段时间后,后期变形较小. 此阶段卸荷扰动区内土体力学参数随土体的固结有所增加.

### 4.2 掘进参数控制

敞口式盾构掘进过程中,通过优化盾构推力、掘进速度及螺旋输送机转速等掘进参数,可减少施工对土体的扰动.

盾构推力是敞口式盾构施工中对正面及周围土体扰动的最主要的原因之一,实际施工中,应根据地表监测数据,调整推力大小,统计结果表明,本工程中推力设定为 25 ~ 26 MN 较为合适.

当盾构掘进速度较大,壁后注浆不及时,会增大地表最终沉降量;掘进速度较慢时,对地层扰动程度增大;同时,盾尾脱离试验断面时,按照原设计,超挖处空隙不能完全填充,导致地表沉降较大. 根据掘进时地表监测数据及掘进参数统计,掘进速度宜控制在 30 mm/min 左右.

本工程中敞口式盾构与砂土接触面积较大,若出土不及时,易因阻力过大无法推进;若出土过快,易破坏仓内土体坡脚稳定性,引起前方土体的坍塌. 为确保掘进正常,本工程中转速宜设为 8 ~ 9 r/min.

## 5 结 论

1) 盾尾刚脱离试验断面时地表沉降最大,约占总沉降 60%,建议以后类似工程实时关注同步注浆作业;改造后盾构掘进引起的地表沉降仍较大,但对地表无重要构筑物的砂质地层仍具良好适用性。

2) 重点分析了盾构到达前、通过期间、盾尾脱离和盾构远离 4 个阶段土体变形规律。盾构到达前,前方土体变形规律最复杂,而盾构通过及刚脱离阶段扰动程度最大,是土层变形控制的重要环节。

3) 敞口式盾构掘进过程中切口前方 1.5 倍洞径及隧道轴线两侧 1.5 倍洞径范围内是土体扰动主要区域。

4) 当盾构推力为 25~26 MN,掘进速度约为 30 mm/min,螺旋输送机转速为 8~9 r/min 时,可以减少对土体的扰动。

5) 敞口式盾构试验段长度有限,但实测数据仍能揭示地层变形一般规律,对以后类似工程安全施工具有参考价值。另外,现场未对土体应力变化进行测试,有待后期通过数值模拟进一步反演分析。

### 参考文献:

- [1] Gioda G, Locatelli L. Back analysis of the measurements performed during the excavation of a shallow tunnel in sand [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1999, 23(13): 1407-1425.
- [2] 姜忻良,崔奕,李园,等. 天津地铁盾构施工地层变形实测及动态模拟[J]. *岩土力学*, 2005, 26(10): 1612-1617.  
(Jiang Xin-liang, Cui Yi, Li Yuan, et al. Measurement and simulation of ground settlements of Tianjin subway shield tunnel construction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(10): 1612-1617.)
- [3] Kim S H, Jeong G H, Kim J S. Predicted and measured tunnel face behavior during shield tunneling in soft ground [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2006, 21(3/4): 264-267.
- [4] Wang L T, Gong G F, Shi H, et al. Modeling and analysis of thrust force for EPB shield tunneling machine [J]. *Automation in Construction*, 2012, 27: 138-146.
- [5] Delisio A, Zhao J, Einstein H H. Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lotschberg base tunnel [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2013, 33: 131-142.
- [6] Anagnostou G, Kovari K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1994, 9(2): 165-174.
- [7] 袁大军,尹凡,王华伟,等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10): 2074-2080.  
(Yuan Da-jun, Yin Fan, Wang Hua-wei, et al. Study of soil disturbance caused by super-large diameter slurry shield tunneling [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2074-2080.)
- [8] Li Y, Emeriault F, Kastner R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2009, 24(4): 472-481.
- [9] 张忠苗,林存刚,吴世明,等. 泥水盾构施工引起的地面固结沉降实例研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(3): 431-440.  
(Zhang Zhong-miao, Lin Cun-gang, Wu Shi-ming, et al. Case study of ground surface consolidation settlements induced by slurry shield tunneling [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(3): 431-440.)
- [10] Standing J R, Burland J B. Unexpected tunneling volume losses in the Westminster Area, London [J]. *Géotechnique*, 2006, 56(1): 11-26.
- [11] Dimmock P S, Mair R J. Volume loss experienced on open-face London clay tunnels [J]. *Proceeding of the Institution of Civil Engineerings-Geotechnical Engineering*, 2007, 160(1): 3-11.
- [12] Dimmock P S, Mair R J. Estimating volume loss for open-face tunnels in London Clay [J]. *Proceeding of the Institution of Civil Engineerings-Geotechnical Engineering*, 2007, 160(1): 13-22.
- [13] Farrokh E, Rostami J, Laughton C. Analysis of unit supporting time and support installation time for open TBMs [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(4): 431-445.