

# 上软下硬地层中盾构施工对地表沉降影响 分析及施工控制技术

丁 健 冷 建

(中交第三航务工程局有限公司, 200032, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 针对盾构穿越上软下硬复合地层(软土层与岩层复合地层)地表沉降难以控制的问题,以福州地铁4号线工程为依托,通过理论分析加实践验证的方法研究了盾构在上软下硬地层中掘进时,土仓压力、掘进速度、顶推力和扭矩等典型施工参数对地表沉降的影响。结果表明:盾构穿越上软下硬地层的地表沉降中,瞬时沉降占总沉降比重较高,沉降控制更应着重于瞬时沉降控制;土仓压力控制方面,应选取土仓内上部区域作为土压力控制值,并且提出了土仓压力、掘进速度等参数的建议值;利用合理的渣土筛分鉴定方法可以便捷、准确地判断开挖面的工程地质状况,可作为调整盾构施工相关参数的依据。

**关键词** 地铁;盾构施工;上软下硬地层;施工技术;地表沉降

中图分类号 TU714

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.050

## Analysis of Shield Construction Influencing Ground Settlement and Construction Control Technology in Upper-soft and Lower-hard Stratum

DING Jian, LENG Jian

**Abstract** Targeting the issue that ground settlement of shield structure tunneling through the upper-soft and lower-hard stratum (compound stratum of soft soil and rock) is difficult to control, based on Fuzhou Metro Line 4 engineering, the influence of typical construction parameters including soil pressure, excavation speed, jacking force and torque on ground settlement when shield structure tunneling in the upper-soft and lower-hard ground is researched through theoretical analysis and practical verification. Results show that the instantaneous settlement accounts for a higher proportion of the total settlement when the shield passes through the upper-soft and lower-hard ground, and the settlement control should focus more on the instantaneous settlement control. In terms of soil pressure control, the upper area should be selected for soil pressure control value, and the suggested value of the soil pressure, tunneling

speed and other parameters are put forward. Reasonable muck identification methods can quickly and accurately determine the engineering geological conditions of the excavation surface and provide a basis for the selection of relevant shield construction parameters.

**Key words** metro; shield construction; upper-soft and lower-hard stratum; construction technology; ground settlement

**Author's address** CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., 200032, Shanghai, China

在城市轨道交通建设过程中,会遇到非常复杂的地质环境。在我国福建、广东等东南沿海地区存在着大量上软下硬复合地层(软土层与岩层复合地层,软岩层与硬岩层复合地层),盾构机在复合地层中掘进时,确定地层扰动影响因素、优化掘进参数、控制地表沉降等,对城市地下空间开发和轨道交通建设具有重要的作用<sup>[3-4]</sup>。目前已有众多针对盾构机掘进施工对地表沉降影响的研究,文献[5]首次提出了估算隧道开挖引起地表沉降的 Peck 公式。之后,文献[6-7]对 Peck 公式进行了补充和完善。此外,室内模型试验和有限元计算方法因其具有便捷、灵活的特性也越来越广泛地被应用于地表沉降影响研究中<sup>[8-11]</sup>。调研分析表明,现有的研究大多侧重于理论计算分析和室内模拟研究,存在与实际工程施工结合不够紧密等问题;同时,针对盾构穿越上软下硬复合地层的系统性研究也是不足的。

本文以福州地铁4号线会展中心站至林浦站工程为依托,分析盾构穿越上软下硬复合地层(本文中分析的上软下硬地层为软土层与岩层的复合地层)时,土仓压力、掘进速度、顶推力和扭矩等各项施工参数对地表沉降的影响,并据此提出了相应的施工控制措施。

## 1 工程概况

福州地铁4号线会展中心站至林浦站区间总长

1 552 m, 区间埋深 19.5 ~ 21.0 m, 期间需穿越一段上软下硬复合地层, 掘进段地层主要为②<sub>4-1</sub> 淤泥、②<sub>6</sub> 粉质黏土、③<sub>4</sub> 淤泥质土、⑤<sub>3</sub> 残积砂质黏性土(硬塑)、⑥<sub>1</sub> 全风化花岗岩、⑦<sub>1</sub> 全风化花岗岩(砂土状)、⑦<sub>2</sub> 强风化花岗岩(碎块状)、⑧<sub>1</sub> 中风化花岗岩, 地质断面图如图 1 所示。其中, 上软下硬复合地层中(图中虚线间区域, 环号为 70 环—240 环之间), 上覆较软土层为粉质黏土、强风化花岗岩(砂土状), 下部硬岩层为强风化花岗岩(砂土状、强风化花岗岩(碎块状)。主要土层参数如表 1 所示。

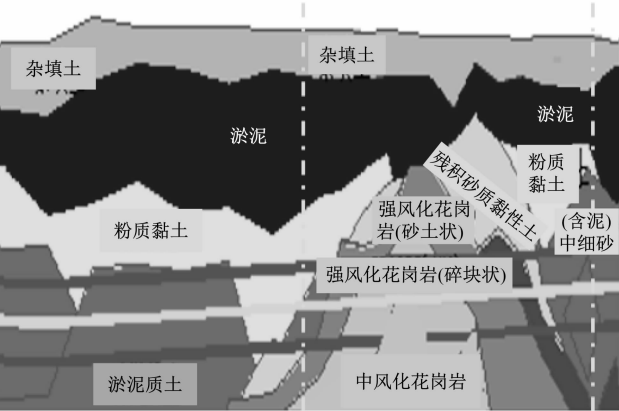


图 1 上软下硬复合地层地质断面图  
Fig. 1 Geological section of upper-soft and lower-hard compound stratum

表 1 主要土层参数表 Tab. 1 Main soil layer parameters					
土层名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	含水率 /%	孔隙比	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /(kPa)
② <sub>4-1</sub> 淤泥	16.3	57.1	1.651	2.9	5.6
② <sub>6</sub> 粉质黏土	19.1	25.8	0.760	11.7	23.0
③ <sub>4</sub> 淤泥质土	17.5	42.1	1.194	5.1	12.4
⑤ <sub>3</sub> 残积砂质黏性土(硬塑)	18.1	28.7	0.854	9.4	19.2
⑥ <sub>1</sub> 全风化花岗岩	19.0	27.0	0.825	20.0	25.0
⑦ <sub>1</sub> 强风化花岗岩(砂土状)	19.0	\	\	28.0	30.0
⑦ <sub>2</sub> 强风化花岗岩(碎块状)	20	\	\	\	\
⑧ <sub>1</sub> 中风化花岗岩	25	\	\	\	\

## 2 地表沉降影响分析及施工控制技术

### 2.1 地表沉降变化趋势

为比较盾构分别在上软下硬地层和软土层中

掘进时对地表沉降影响的差异, 选取埋深相同的盾构隧道区间进行分析。选取的埋深均为 19.5 ~ 21.0 m。地表沉降随时间发展曲线如图 2 所示。由图 2 可见, 盾构穿越软土层时, 地表沉降会随时间变化而不断增大, 这是由于盾构开挖后软土被重塑并重新固结, 后续会随着时间的增长而最终趋于稳定。盾构开挖引起的地表沉降, 主要是由开挖土体导致的地层损失所引起的瞬时沉降以及扰动土体所引起的工后固结沉降两部分构成。从图 2 还可以看出, 软土地层的总沉降中, 工后沉降(开挖 10 天)相对瞬时沉降(开挖当天)占比更大。与盾构穿越软土层类似, 盾构穿越上软下硬土层时, 沉降也会随着时间的增长而不断发展, 并最终趋于稳定。所不同的是, 穿越上软下硬层时的工后沉降占总沉降的比重相对较低, 因此, 对于穿越上软下硬土层的沉降控制, 更应侧重于开挖瞬时沉降控制, 严格控制开挖导致的地层损失。

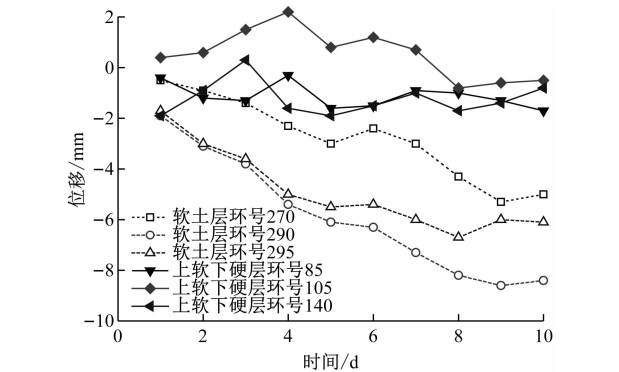


图 2 地表沉降随时间发展曲线  
Fig. 2 Time-history curve of ground settlement

### 2.2 地层损失分析

本文采用地层损失率作为衡量地层损失的标准。地层损失率定义为地层开挖损失(实际开挖体积减去理论开挖体积)与理论开挖体积之比。地层损失率可以衡量盾构对地层的超挖情况, 进而分析其对地表沉降的影响。图 3 比较了盾构穿越上软下硬层和软土层中, 不同地层损失率下地表沉降的变化情况。由于在穿越上软下硬层的地表总沉降中, 瞬时沉降占主导作用, 因此在后续的沉降分析中, 均选取为开挖当天的瞬时沉降。从图 3 中可以看出, 在软土地层和上软下硬地层中, 随着地层损失率的增加, 沉降不断增大, 并且上软下硬地层的地层损失率要明显大于软土层的。因此, 盾构在上软下硬地层中掘进时, 地层损失的控制是重点, 也是

难点。本工程盾构掘进时,通过选用合理的施工参数、严格控制盾构姿态、减少超挖、及时注浆和控制注浆压力等方法,较好地控制了地层损失率,减少了盾构施工对地表沉降的影响。

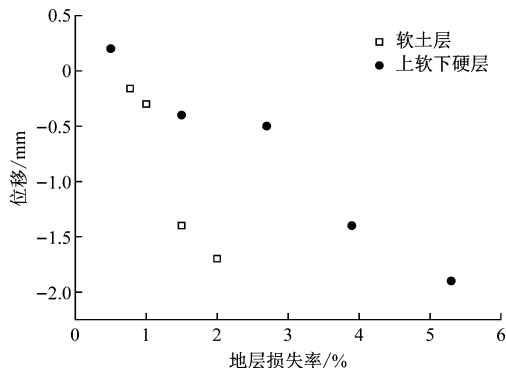


图3 地层损失率对地表沉降的影响

Fig. 3 Influence of stratum loss rate on ground settlement

## 2.3 土仓压力对沉降影响

本工程采用的土压平衡盾构机在土仓中布置了上、中、下三排土压力传感器,每排左右各一个,将土仓分为上部、中部和底部三个区域。盾构掘进时,开挖面上部有小部分区域土体处于主动土压力状态,其余区域土体均为被动土压力状态。当选用上部区域控制土压力时,有利于减小周围土体的扰动,降低对周围环境的影响。此外,上部区域的土压力传感器离地表最近,地表沉降对上部区域的控制土压力设置最为敏感。当盾构开挖面附近地表沉降超出允许范围时,选择调整土仓上部区域控制土压力,可以达到最快控制沉降的效果。因此,本工程采用土仓上部区域的土压力传感器来设置控制土压力。

盾构穿越软土地层时,土仓内需要维持足够的土压力,避免因开挖面压力过大致使坍塌,进而导致地表沉降。盾构穿越上软下硬地层时,开挖面地质不均匀,岩石部分强度高,不易切削,为保护刀具需降低掘进速度,长时间的掘进对软弱地层部分的稳定性很不利,因此需要保持较高的土仓压力。图4为地表沉降随土仓压力变化的分布图。从图4中可以看出,上软下硬地层中,由于地层物理力学性质差异很大,土仓控制压力波动范围(0.16~0.20 MPa)明显大于软土层的(0.21~0.23 MPa)。本工程采用上部土压力控制沉降,将土仓压力控制在0.16~0.20 MPa之间,将地表沉降控制在合理范围内(控制要求为最大沉降30 mm)。如果需要进

一步控制地表沉降,可以适当增加土仓压力,在切口范围内,使土仓压力总值大于切口前方土压力总值。这样有利于在切口达到前,前方土体受到一定的挤压力,形成相应位置地表的微量上抬,抵消后期的沉降。

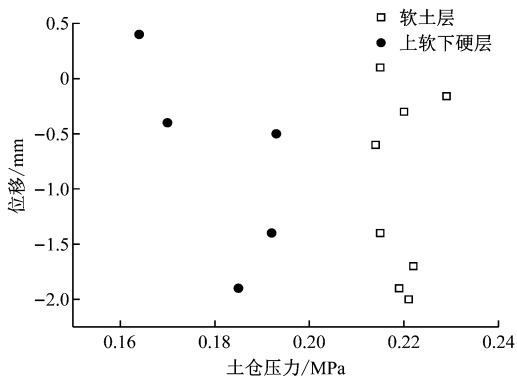


图4 土仓压力对地表沉降发展影响

Fig. 4 Influence of soil pressure on ground settlement development

## 2.4 掘进速度对沉降影响

对于刀盘前方土体,盾构掘进速度的增加将会引起刀盘面板前方土体的挤压作用,使刀盘前方土体的超孔隙水压力增加,加剧刀盘前方土体的扰动。对于盾构壳体周围的土体,掘进速度的增加会导致盾构壳体在土层中某点停留的时间减少,这就减小了对上部土体的扰动以及其下卧层土体的固结沉降。因此,盾构掘进速度的增加将会加剧盾构前方土体的扰动,同时也会减小盾构周围土体的扰动。

图5为不同掘进速度下地表沉降的变化分布图。从图5中可以看出:在上软下硬层中的掘进速度要明显小于软土层中的掘进速度;此外,在两种地层中,随着掘进速度的增加,地表沉降也显著增大。在上软下硬层中,盾构掘进速度控制在10 mm/min内,地表沉降将会显著降低。综上所述,盾构穿越上软下硬层时,建议将掘进速度控制在10 mm/min内,并视情况适当调整减小。

## 2.5 顶推力和扭矩对沉降影响

土压平衡盾构机顶推力与盾构掘进速度、刀盘扭矩大小密切相关,对土层扰动具有直接影响作用。顶推力过大会导致开挖面土体受挤压作用而发生背离刀盘的移动,引起开挖面前方土体隆起。顶推力过小则会影响掘进速度,降低施工效率,严

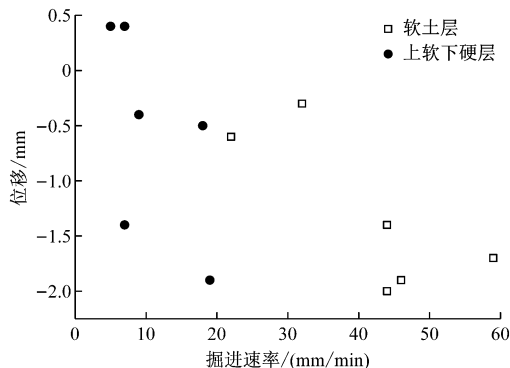


图5 掘进速度对地表沉降发展影响

Fig. 5 Influence of excavation speed on ground settlement development

重的还会导致开挖面失稳坍塌。因此,盾构掘进过程中,需要密切关注盾构顶推力和刀盘扭矩这两个关键掘进参数的变化情况。顶推力必须留有足够地余量,总顶推力  $F_e$  一般可按公式(1)进行估算。

$$F_e = 0.25\pi D^2 P_1 \quad (1)$$

式中:

$D$ ——盾构外径,m;

$P_1$ ——单位开挖面上的经验顶推力,闭胸式盾构的一般为 1 000 ~ 1 500 kN/m<sup>2</sup>,敞开式盾构的可取 700 ~ 1 100 kN/m<sup>2</sup>。

刀盘驱动扭矩计算较为复杂,且应有安全余量,扭矩储备系数一般为 1.5 ~ 2.0。根据国内外盾构设计的普遍经验,刀盘扭矩的标准值可按公式(2)进行计算。

$$T = K_a D \quad (2)$$

式中:

$T$ ——刀盘设计扭矩;

$K_a$ ——扭矩系数,土压平衡盾构的可取 100 ~ 300。

根据公式(1)和公式(2),并结合现场施工工艺和地质情况,确定了本工程中的盾构总推力控制范围为 16 000 ~ 21 000 kN,刀盘扭矩控制范围为 1 400 ~ 2 000 kN·m,并且尽量保持较低的扭矩。图6和图7分别为顶推力和刀盘扭矩对地表沉降的影响分布图。从图6~7中可以看出:当盾构从软土层进入上软下硬地层中时,顶推力和刀盘扭矩都提升明显:在上软下硬地层中,由于局部存在的硬岩会使刀具磨损严重,降低顶推力和刀盘扭矩会减小刀具所受的冲击力,从而使盾构掘进更加平稳连续,减小了对地表沉降的影响。本工程中,盾构在上软下

硬层掘进时,顶推力以保持土仓压力为目的,兼顾控制推进速度,刀盘扭矩以低扭矩、保护刀具为准则,保证了良好的盾构施工效率,并且合理控制了地表沉降。

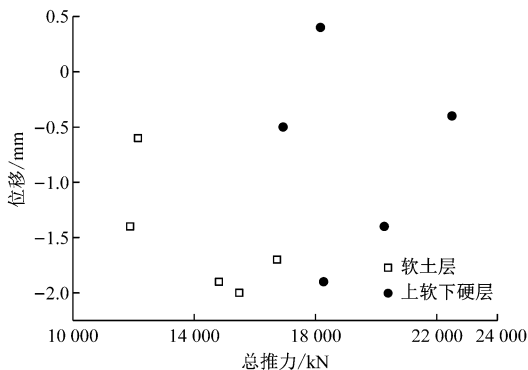


图6 总顶推力对沉降发展影响

Fig. 6 Influence of total jacking force on ground settlement development

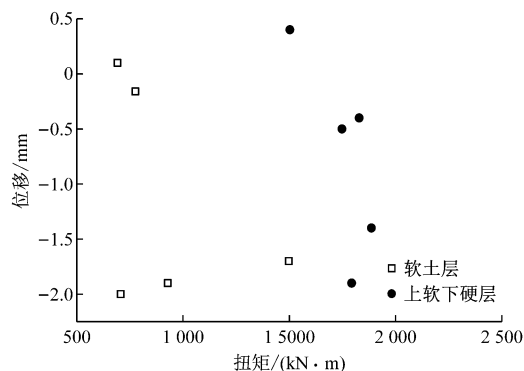


图7 盾构在不同地层掘进施工中扭矩对沉降发展影响

Fig. 7 Influence of torque on ground settlement development of shield tunnel construction in different strata

### 3 渣土鉴定

盾构掘进中的许多参数并不能通过盾构机自身的数据采集系统收集和提供,例如刀具的磨损程度等,并且实际的工程地质勘探也存在一定的精度误差。除了开仓检查或通过超前钻孔采集工作面土样直接获得相关信息之外,通过对渣土的筛分和鉴定可以便捷、准确地判断开挖面的工程地质状况,为相关施工参数选取提供依据。本工程的盾构掘进过程中,对施工渣土重点进行了筛分、鉴定和留样,既为盾构施工参数调整提供依据,也为后续的深入研究留下了试样。本工程中,对渣土的具体鉴定方法包括:①在盾构穿越上软下硬复合地层时,通过对渣土成分特征进行鉴定,并与地质报告

进行对比,补充完善穿越土层信息,实时调整盾构参数。②对渣土颗粒组合特征进行鉴定,如果渣土以细颗粒和小岩块为主,一种可能是工作面的围岩可能以全风化、强风化岩层以及第四系的土层为主;另一种可能是刀具已严重磨损,滚刀除了起到对岩层的压碎作用外,更多的是起到碾碎作用。③检查渣土中是否含有断面土层以外的颗粒或碎屑,以此判断开挖面是否存在坍塌现象。

## 4 结语

本文依托于福州地铁4号线工程,分析了盾构施工穿越上软下硬复合地层时对地表沉降的影响及相关施工控制关键技术,具体结论如下:

1) 对于盾构穿越上软下硬地层的地表沉降而言,工后沉降占总沉降比重较低,沉降控制更着重于瞬时沉降控制。上软下硬地层中的地层损失要明显大于软土层的,随着地层损失的增加,开挖沉降不断增大。

2) 在土仓压力控制方面,应选取土仓内上部区域作为土压力控制值。盾构穿越上软下硬层时,建议将掘进速度控制在10 mm/min内,并视情况适当调整。顶推力以保持土仓压力为目的,刀盘扭矩以低扭矩、保护刀具为准则,两者协调可以合理控制地表沉降。

3) 合理的渣土筛分鉴定方法可以便捷、准确地判断开挖面的工程地质状况,为相关施工参数选取提供依据。

## 参考文献

- [1] 赵昕, 顾保南. 2018年中国城市轨道交通运营线路统计和分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(1):7.  
ZHAO Xin, GU Baonan. Statistical analysis of urban rail transit lines in 2018 China[J]. Urban Mass Transit, 2019(1):7.
- [2] 张德峰. 富水流砂地层隧道围岩止水加固方案及变形分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011(6):14.  
ZHANG Defeng. Analysis of water stop reinforcement and deformation of surrounding rock in water-rich quicksand stratum[J]. Urban Mass Transit, 2011(6):14.
- [3] 赵震洋, 王丹丽. 地铁与现代大城市的可持续发展[J]. 地下空间, 1999(3):207.  
ZHAO Zhenyang, WANG Danli. Metro and sustainable development of modern cities[J]. Underground Space, 1999(3):207.
- [4] 尤显明, 杨书江. 短距离硬岩及上软下硬地层盾构法施工技术[J]. 城市轨道交通研究, 2007(5):3.  
YOU Xianming, YANG Shujiang. Construction technology in extra-short distance hard rock and upper-soft lower-hard ground[J]. Urban Mass Transit, 2007(5):3.
- [5] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// State-of-the-Art Report. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica, 1969:225.
- [6] CELESTINO T B, GOMES R A M P, BORTOLUCCI A A. Errors in ground distortions due to settlement trough adjustment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(1):97.
- [7] O'REILLY M P, NEW B M. Tunnelling induced ground movements: predicting their magnitude and effects[C]// Proceedings of the 4th International Conference of Ground Movements and Structures, July 8-11, 1991, University of Wales College of Cardiff. London: Pentech Press, 1992:671.
- [8] 陈仁朋, 李君, 陈云敏, 等. 干砂盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011(1):117.  
CHEN Renpeng, LI Jun, CHEN Yunmin, et al. Large-scale tests on face stability of shield tunnelling in dry cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(1):117.
- [9] 汤旅军. 干砂和饱和砂性土中盾构开挖面稳定数值和离心试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
TANG Lyujun. Numerical investigations and centrifugal model tests on face stability of shield tunnel in dry and saturated sandy soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [10] SENENT S, JIMENEZ R. A tunnel face failure mechanism for layered ground, considering the possibility of partial collapse[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47(3):182-192.
- [11] 乔金丽, 张义同, 高健. 考虑渗流的多层土盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010(5):1497.  
QIAO Jinli, ZHANG Yitong, GAO Jian. Stability analysis of shield tunnel face in multilayer soil with seepage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(5):1497.

(收稿日期:2021-12-11)