

超大直径泥水盾构穿越砂性地层地表沉降控制研究

何国军

上海隧道工程有限公司 上海 200032

摘要: 地表沉降控制是超大直径泥水盾构施工中的重要环节,但由于各项参数的动态调整,实施过程十分复杂。本文在全断面砂层中依据控制变量法和地表沉降监测数据开展试验段掘进,分析主要调整参数刀盘转速、同步注浆、切口压力对地表沉降的影响。结果表明主要地表沉降量发生在盾构切口前0.5D及盾体上方,刀盘转速在控制沉降中为次要因素,同步注浆充填系数为1.3~1.5,注浆压力控制在0.8MPa时较为合理,侧向土压力系数取值应接近静止土压力系数,可以有效减小地层损失率,控制地表沉降。

关键词: 泥水盾构;地表沉降;刀盘转速;同步注浆;切口压力

Study on Ground Surface Settlement Control of Super-large Diameter Slurry Shield through Sandy Strata

Guojun He

Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China

Abstract: Ground surface settlement control is an important part of super-large diameter slurry shield construction, but the implementation process is very complex due to the dynamic adjustment of various parameters. Based on the control variable method and the ground surface settlement monitoring data in the sandy strata, this paper analyzes the influence of the main adjustment parameters, such as cutter head speed, synchronous grouting, and slurry pressure on the ground surface settlement. The results show that the main surface settlement occurs 0.5D before the cutter head and above the shield body. The cutter head speed is a secondary factor in controlling the settlement. The filling coefficient of synchronous grouting is 1.3~1.5, and the slurry pressure is controlled at 0.8MPa. The slurry pressure coefficient should be close to the static earth pressure coefficient, which can reduce the formation loss rate effectively and control the ground surface settlement.

Keywords: Slurry shield; Ground surface settlement; Cutter head speed; Synchronous grouting; Slurry pressure

引言:

泥水平衡盾构是将泥浆注满盾体开挖隔舱的前部区域,以支撑隧道开挖面。挡板与盾构压力舱胸板之间的区域(工作舱)内,泥浆的液位处在工作舱中轴线附近,开挖面所需要的支护压力由工作舱上部的压缩气垫提供,调节工作压力时更加快速精确,在大直径隧道以及长距离隧道工程中应用广泛^[1]。

大直径盾构意味着开挖面更大,对周围土体造成影响加大,更难以实现对地表沉降的精确控制^[2]。梁荣柱等^[3]运用弹性力学Mindlin解,与工程实际比对后得出

盾构期间地表沉降位移公式,可以基本反映盾构施工地层变形特点;包雨生等^[4]通过数值计算反演分析,给出大直径隧道控制地表沉降的合理注浆压力范围;罗兴财等^[5]对某隧道地层损失进行预估后,通过控制出渣量对地层沉降进行了有效控制。

但是泥水平衡盾构掘进过程是各项参数的动态调整过程,盾构推力、刀盘扭矩、进排泥流量、注浆量、工作舱压力等参数均在不断变化,实施地层沉降控制十分复杂,目前没有规范指导,控制效果的好坏基本取决于施工方的施工经验和管理水平。本文依托南京建宁西路过江通道超大泥水盾构隧道工程,在全断面砂性地层中展开研究,评价本工程地层损失情况,结合地表沉降监测数据,分析主要调整参数刀盘转速、切口压力、同步

作者简介: 何国军,1971年生,男,工程师,大学本科,主要从事地下工程与隧道的施工和技术管理工作。

3. 监测测点布置

正常掘进段, 监测点沿盾构隧道轴线上方地表布设, 纵向测点的布设间距为10m (5环), 横向断面测点根据周边环境和地质条件布设, 垂直于隧道轴线, 断面布设间距为50m (25环)、每个断面13个测点, 断面测点的设置范围为隧道中心轴线两侧各30m范围。

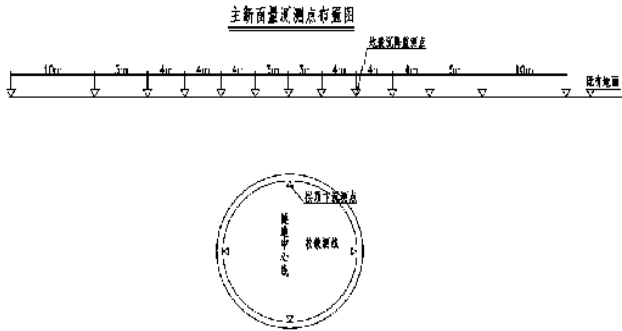


图5 断面测点布置图

Figure 5 Layout of section measuring points

二、地表沉降控制

盾构始发后, 前一百环为试掘进段, 先根据理论和以往施工经验确定试掘进参数, 再按照实际工程状况进行调整, 确定掘进参数合理范围。在试掘进的基础上, 盾构司机已经熟练掌握盾构机的操作方法和机械性能, 能够快速落实各项参数指令, 保证了数据分析的精确度。本文研究区间为试掘进完成后70环全断面砂层, 在均一地质条件下开展试验, 更有利于分析出各项参数指标对地表沉降的影响。

1. 刀盘转速影响分析

在推进速度保持一致的情况下, 刀盘转速越快, 贯入度越小。在岩层中, 较高的转速可以保持低贯入度, 减小比能值, 提升破岩能力^{[6][7]}。而在一般土层中, 则用较低转速使贯入度增大, 增加切削土体面积, 从而提高推进效率, 降低刀具磨损。本工程依据前一百环的试推进情况, 在该试验段中, 刀盘转速设定在1.1r/min左右。

图6中标记“x”处为盾构切口(即盾构机刀盘与土体的接触面, 为盾构机主体的最前端)位置, 选取注浆量和侧向土压力系数保持一致而刀盘转速调整为1r/min、1.1r/min、1.2r/min的三种工况进行对比分析。

从图6中可知随着刀盘转速的提高, 刀盘转速1.2r/min时的整体沉降量比1r/min时增加近1mm, 整体沉降量呈现增大趋势。刀盘转速提高对土体扰动程度加剧, 势必会造成沉降量增大, 但是小范围内调整影响幅度很小, 对控制地表沉降效果有限。

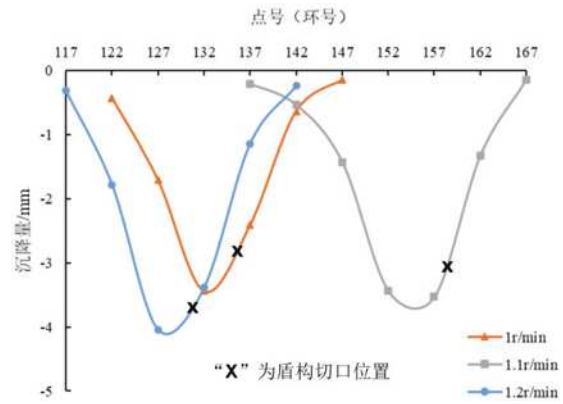


图6 不同刀盘转速地表沉降对比图

Figure 6 Comparison of ground surface settlement at different cutter head speeds

2. 同步注浆影响分析

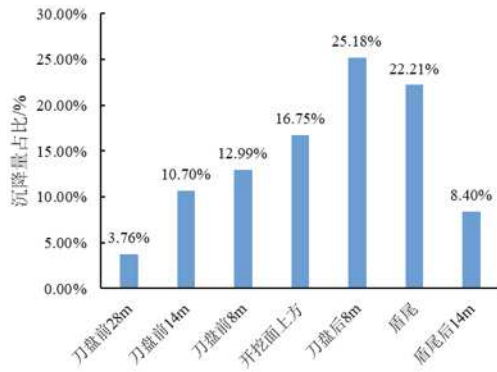
在盾构掘进时, 通过同步注浆填补管片与地层之间的建筑空隙, 及时支撑管片周围的土体, 从而减小地表沉降。本工程每环理论注浆量为 26.46m^3 , 实际注浆量按充填系数1.3~1.8压注, 即 $34.4\text{m}^3\sim 46.6\text{m}^3$ 。注浆量计算公式见式(1)。

$$V_{\text{实际}} = k * V_{\text{理论}} = k * \left[\frac{\pi(D-d)^2}{4} * W \right] \quad (1)$$

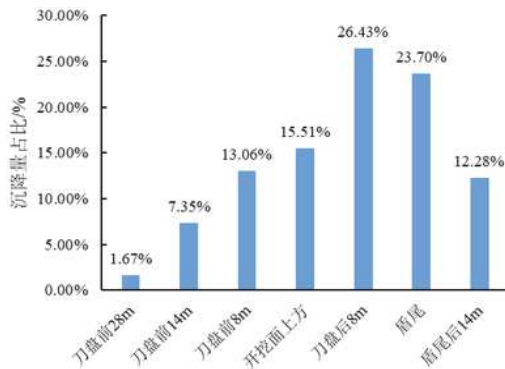
式中: $V_{\text{实际}}$ 为实际注浆量(m^3); $V_{\text{理论}}$ 为理论注浆量(m^3); k 为充填系数; D 为隧道开挖直径(m); d 为管片外径(m); W 为管片宽度(m)。

同时压浆时应控制注浆压力, 当注浆压力达到设计压力, 注浆量达到设计注浆量的80%以上时结束注浆, 防止压力过大造成土体隆起等负面影响。工程所处位置静止水土压力最小为0.4MPa, 最大为0.5MPa, 注浆管阻压力为0.3MPa, 最小注浆压力即为最小静止水土压力与管阻压力之和0.7MPa。同步注浆管路位于盾构机盾尾处, 盾尾刷内会持续压注密封油脂阻隔外部泥水、浆液进入, 盾尾密封油脂压力最大为1.5MPa, 通常保持在1.2MPa以上, 为了避免同步浆液压力过大穿透盾尾密封, 注浆压力要小于1.2MPa, 所以实际注浆压力保持在0.8MPa左右。

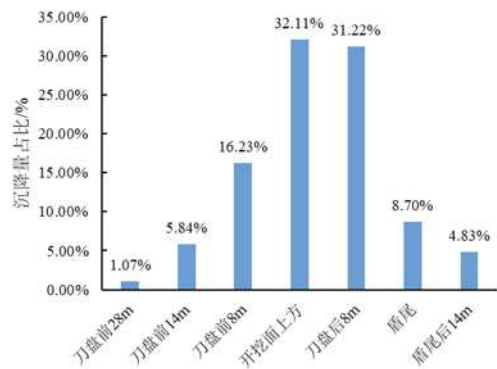
选取100~170环内相隔30米的117环、132环、147环、162环测点共计四个测点, 取完初始值后, 在盾构机刀盘距离测点28m时开始监测, 直至盾体完全通过测点14m后停止监测(盾体长度约为14m)。图中沉降量占比定义方法为: 刀盘位置从前一节点推进至当前节点位置时的点位沉降量累计值/该点位停止监测时的最终沉降值。



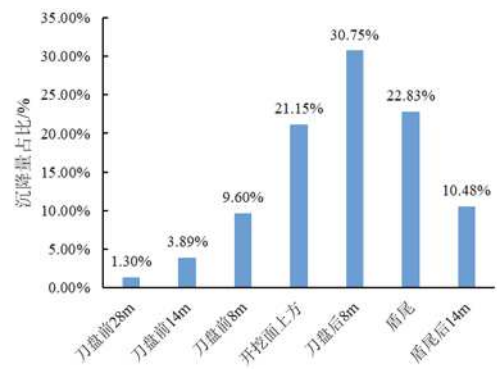
(a) 117测点沉降量占比图



(b) 132测点沉降量占比图



(c) 147测点沉降量占比图



(d) 162测点沉降量占比图

图7 不同测点沉降量占比图

Figure 7 Percentage of settlement at different measuring points

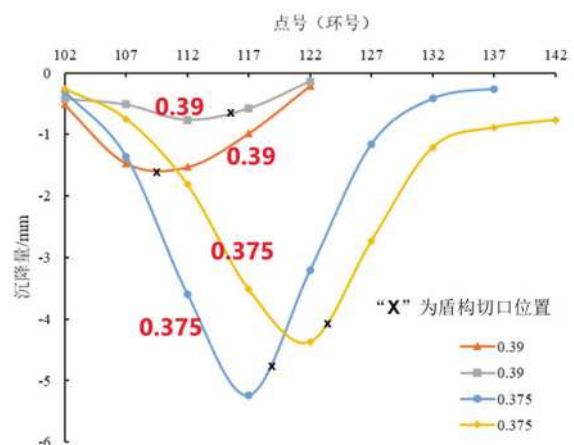
分析点位的沉降量占比可以明确最大地表沉降在盾构推进时的具体位置。从图7中可以看出各测点从刀盘前8m(约0.5D)至盾尾期间地表沉降量占比均在70%以上,主要沉降均发生在盾构切口附近及盾体上方。盾体上方沉降量(从开挖面上方至盾尾部分)占比在50%左右,盾构开挖面直径15.07m,而盾尾直径为14.96m,盾体呈圆台形有利于减小推进时盾体与土体之间的水平摩擦力,这是盾构推进力设定中不可忽视的一部分^{[8][9]},同时也满足了盾构机的转弯需求,但也会形成一定的建筑空隙从而引发地表沉降。此空隙的填充可采用克泥效工法^[10]应对盾体上方沉降,多在需严格控制变形情况如下穿重要管道或建筑物时使用。

从初始值采集完成至测点位于刀盘前28m期间有三个测点沉降占比在2%以内,一个测点在4%以内,考虑到测量误差,由此估算盾构推进方向影响范围在28m以内,约为2D(开挖直径)。

从盾尾至盾尾后14m期间地表沉降量在10%左右,盾体通过后依然会对土体造成一定程度的扰动,即盾尾处进行同步注浆过程中地表沉降较小,建筑空隙得到及时填充。本实验段采用充填系数1.3~1.5,注浆压力控制在0.8MPa,通过分析地层沉降占比情况验证了本工程注浆量及注浆压力的合理性。

3. 切口压力影响分析

泥水加压平衡盾构开挖面所需要的支护压力由工作舱上部的压缩气垫提供,切口压力调节通过改变工作舱压力实现。本工程理论切口压力采用水土分算,通过调整侧向土压力系数控制切口压力。全断面砂层理论静止土压力系数为0.45,下图分别选取试验段中106环~117环(图5a)、162环~170环(图5b)两个阶段绘制沉降量对比图,两个阶段内仅改变侧向土压力系数,其余参数注浆量、刀盘转速等保持不变。



(a)

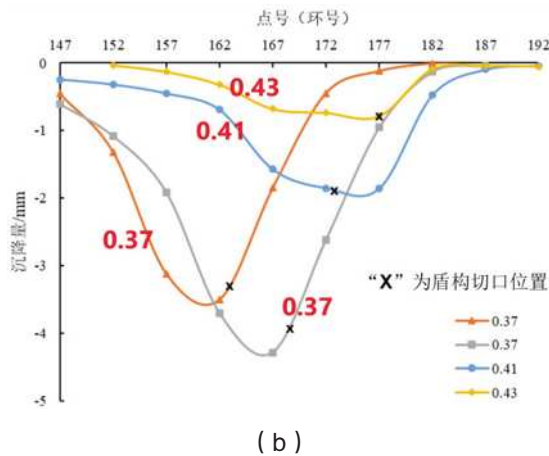


图8 不同侧向土压力系数沉降量对比图

Figure 8 Comparison of settlement with different lateral earth pressure coefficients

图8中标记“x”处为盾构切口位置，相同侧向土压力系数对应切口沉降量差值在1mm以内，考虑到推进姿态细微差别和不均匀土质，符合一般规律。最大沉降量均产生在盾构切口位置附近，沿切口附近向两侧呈现正态分布。图(a)中系数由0.39下降为0.375，整体沉降量增大约4mm，系数下调导致沉降量显著增大。图(b)中系数由0.37上升为0.43，整体沉降量减小约3mm，系数上升明显抑制地表沉降，达到0.43时地表有隆起趋势，最大沉降量在1mm以内。本工程在全断面砂层内侧向土压力系数接近静止土压力系数时，对控制沉降最为有效。

三、地层损失率计算

Peck^[11]于1969年系统提出地层损失概念，他认为施工引起地表沉降在不排水情况下发生，地表沉降沿横截面方向呈现近似正态分布的钟形曲线。通过计算地层损失率，可以评价工程参数选取是否合理，及时调整参数，控制地表沉降，提高工程质量。

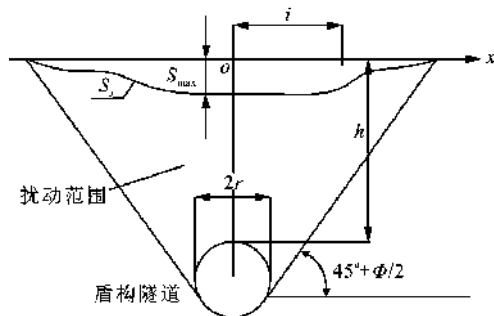


图9 Peck 曲线图

Figure 9 Peck curve

计算本隧道地层损失率，结合吴昌胜^[12]、罗兴财^[5]等对其他地区大直径隧道施工地层损失统计情况与本工程数据进行汇总见下表。

表2 不同地区地层损失数据分析

Table 2 Analysis of formation loss data in different areas

地点	土质	样本数	H/D	S_{max}	$\eta/\%$	$\bar{\eta}/\%$
上海	粉质黏土、淤泥质黏土、粉土	22	1.17~3.17	2.5~52.9	0.02~0.72	0.21
北京	粉质黏土、粉土、粉细砂、中粗砂	34	1.03~2.34	6.6~36.4	0.08~1.04	0.40
武汉	黏土、粉土、粉质黏土、粉细砂、中粗砂	14	1.05~4.09	5.1~77	0.29~3.36	1.28
杭州	粉砂夹粉土、淤泥质粉质黏土、粉细砂、圆砾	25	1.80~2.74	7.5~34.32	0.10~1.02	0.39
南京	淤泥质粉质黏土、粉土	9	1.13~3.50	21.9~92.2	0.22~3.30	0.96
本工程	淤泥质粉质黏土夹杂粉砂、粉砂	16	1.31~2.52	23.06~66.1	0.45~1.29	0.91

注：H为隧道轴线埋深(m)；D为隧道开挖直径(m)； S_{max} 为隧道中心线处最大地表沉降量(mm)； η 为地层损失率(%)； $\bar{\eta}$ 为地层损失率平均值(%)。

大直径隧道在实际施工中地层损失率较中小直径隧道往往更小，这是因为相同地表沉降时更大的开挖直径意味着 η 计算值更小，同时大直径盾构内部空间充足，可以在设计生产中做出针对性改进^[13]。上海、北京、杭州等地工程地层损失率平均值均在0.5%以内，地表沉降量控制良好。武汉工程3.36%的地层损失率主要是由于下穿既有铁路时列车对地层频繁施加动荷载，而南京工程3.30%则是由于两条并行隧道间的相互影响。本工程最大1.29%的地层损失率发生在连续降低侧向土压力系数至0.36阶段，在侧向土压力系数升高至静止土压力系数阶段，地层损失率降低至0.45%，地表沉降得到明显控制。

四、结语

本文在全断面砂层中依据控制变量法和地表沉降监测数据开展试验段掘进，分析主要调整参数刀盘转速、切口压力、同步注浆对地表沉降的影响，对类似工程有良好的借鉴作用。主要结论如下：

(1) 随着刀盘转速的提高地表沉降量有所增大，但影响有限，在控制地表沉降中为次要考虑因素。

(2) 同步注浆应根据注浆量和注浆压力两个因素确定，通过分析地层沉降占比情况验证了注浆量及注浆压力的合理性。本工程注浆充填系数为1.3~1.5，注浆压力控制在0.8MPa。

(3) 主要沉降量发生在盾构切口前0.5D(开挖直

径)范围及盾体上方,切口压力对沉降量控制起重要作用,在全断面砂层内侧向土压力系数接近静止土压力系数时,地层损失率最小,对控制沉降最为有效。

参考文献:

[1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (ZHOU Wenbo. Shield tunnel construction technology and its application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.

[2] 袁大军, 尹凡, 王华伟, 黄清飞, 肖衡. 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 Dajun, YIN Fan, WANG Huavei et al. Study of soil disturbance caused by super-large diameter slurry shield tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2074-2080.

[3] 梁荣柱, 夏唐代, 林存刚, 俞峰. 盾构推进引起地表变形及深层土体水平位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 583-593. LIANG Rongzhu, XIA Tangdai, LIN Cungang et al. Analysis of ground surface displacement and horizontal movement of deep soils induced by shield advancing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3):583-593.

[4] 包雨生, 李策, 梁敏飞, 王士民. 大直径泥水平衡盾构穿越砂性地层沉降控制分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(12): 136-140. BAO Yusheng, LI Ce, LIANG Minfei et al. Research on ground settlement control of large-diameter slurry shield through sandy strata[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(12): 136-140.

[5] 罗兴财, 周小文, 张盛红. 盾构施工地层损失控制方法及实例[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(02): 12-18. Luo Xingcai, Zhou Xiaowen, Zhang Shenghong. Method and case study of ground loss control in shield tunneling construction[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2022, 39(02): 12-18.

[6] 龚秋明, 何冠文, 赵晓豹, 张浩, 苗崇通, 姚羲和, 李晓昭. 不同贯入度对掘进机滚刀破岩效率的影响[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 62-68. GONG Qiumin, HE Guanwen, ZHAO Xiaobao et al. Influence of penetration on the rock-breaking efficiency of a TBM cutter[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 62-68.

[7] 温森, 孔庆梅, 杨圣奇, 盛桂林, 赵丽敏. 不同

围压下节理岩体中TBM滚刀破岩效率研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(3): 148-154. WENG Sen, KONG Qingmei, YANG Shengqi, et al. Efficiency of rock breaking by TBM cutters in a joint rock mass with different confining pressures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(3): 148-154.

[8] 林存刚, 张忠苗, 吴世明, 等. 软土地层盾构隧道施工引起的地面隆陷研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2583-2590. (LIN Cungang, ZHANG Zhongmiao, WU Shiming, et al. Study of ground heave and subsidence induced by shield tunnelling in soft ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2583-2590.

[9] 唐晓武, 朱季, 刘维, 等. 盾构施工过程中的土体变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 417-422. TANG Xiaowu, ZHU Ji, LIU Wei, et al. Research on soil deformation during shield construction process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 417-422.

[10] 刘阳君, 杨智麟, 羊涛, 张瑞铎, 陈立, 李学坤. 克泥效工法在盾构长距离小净距随行下穿大直径污水管工程中的应用[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 1193-1199. Liu Junyang, Yang Zhiling, Yang Tao, et al. Application of clay shock method in long-distance shield engineering with small clear distance underneath sewage pipe[J]. Modern tunnelling technology, 2020, 57(S1): 1193-1199.

[11] PECK R B. Deep excavation and tunneling in softground[C]// Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City: 1969: 225-290.

[12] 吴昌胜, 朱志铎. 不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2257-2265. WU Changsheng, ZHU Zhidu. Comparative study on ground loss ratio due to shield tunnel with different diameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2257-2265.

[13] 羌培. 超大直径土压平衡盾构最佳施工参数匹配研究[D]. 上海: 上海大学, 2015. QIANG Pei. The research of perfect matching of tunneling parameter for super large diameter earth pressure balance machine[D]. Shanghai: Shanghai University, 2015.