

复合地层中大直径盾构下穿建筑物群施工技术

叶至盛¹ 杨凤梅²

(1. 中电建铁路建设投资集团有限公司, 100044, 北京;

2. 中国电建华东勘测设计研究院有限公司, 310014, 杭州//第一作者, 高级工程师)

摘要 鉴于城市轨道交通区间下穿建筑物过程中沉降不易控制、安全风险大的现状,结合某大直径盾构区间下穿建筑物群的工程案例,总结出渣土改良方法、掘进控制参数、出土量控制及综合注浆等成套施工技术,大直径盾构掘进中遇地层变化和土仓结泥饼问题的处理方法,以及大直径盾构在复合地层中采用的泥膜护壁带压开仓换刀技术,有效控制了建筑物和地表沉降。对盾构机下穿段进行了数值模拟分析,并与其监控量测结果进行了对照,验证了上述工程技术措施的可行性。

关键词 大直径盾构; 复合地层; 下穿; 建筑物群

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.008

Construction Technology of Large-diameter Shield Structure Undercrossing Building Group in Compound Stratum

YE Zhisheng, YANG Fengmei

Abstract In view of the situation that settlement is hard to control and safety risk is high when urban rail transit interval undercrosses buildings, combined with the engineering case of certain large-diameter shield structure interval undercrosses building group, a complete set of construction technologies are summarized, including residue improvement measures, tunneling control parameters, excavation volume control and comprehensive grouting, treatment measures of stratum change and mud cake formation in soil chamber during large-diameter shield structure tunneling, and the mud membrane method adopted by large-diameter shield structure for opening and changing tools in the composite stratum. The set of technologies effectively controls building and ground surface settlements. After numerical simulation analysis of TBM (tunnel boring machine) in undercrossing section, and compared with the monitoring measured result, the feasibility of the above engineering technology measures is verified.

Key words large-diameter shield structure; composite stratum; undercrossing; building group

First-author's address Power China Railway Construction

Investment Group Co., Ltd., 100044, Beijing, China

盾构穿越复合地层过程中对建(构)筑物影响规律尤为复杂。盾构机外径、水文地质条件、基础型式等因素对其动态施工过程中地表沉降、建筑物沉降会产生极大的影响,这对盾构施工技术措施及信息化管理提出了较高的要求。

本文以某盾构区间下穿建筑物群为例,详细介绍盾构穿越建筑物群前、中、后采取的施工技术措施。通过数值模拟分析和精心施工组织,配合先进的监测技术,结合现场试验段调整后的盾构掘进参数,成功实施并穿越建筑物群^[1-4]。

1 工程概况

1.1 下穿段与建筑物群的关系

以盾构机下穿建筑物群区段(以下简称“下穿段”)为研究对象。采用海瑞克盾构机,开挖直径 8.63 m,全长 110 m。刀盘采用六辐条+六面板的复合式刀盘,刀盘面板率为 36.5%,中心开口率为 46.5%。盾构管片采用外径 8.3 m、内径 7.5 m、厚 0.4 m、宽 1.8 m 的钢筋混凝土管片,每环由 7 块管片组成,采用错缝拼装。

建筑物群修建于 2000 年,为 3 层砖房;其基础为柱下独立基础,埋深为 2 m。盾构机穿越区间位于曲线半径为 1 200 m 的左转圆曲线,处于坡度为 22‰下坡段。盾构机共穿越 8 栋砖房,从砂卵石黏土复合地层开始穿越第 1 栋砖房,到掘进至中风化泥岩地层穿越完成第 8 栋砖房。隧道埋深约 26 m,隧道顶部与房屋基础底部最小竖向净距约 24 m。盾构隧道与建筑物群关系示意图 1。

1.2 地质条件

隧道穿越地层主要为全断面砂卵石、砂卵石-泥岩、泥岩等地层。勘察期间车站范围地下水位埋深为 3.89~7.15 m,平均渗透系数为 0.44 m/d,属弱-

2) 泡沫。采用分散型泡沫剂进行渣土改良。分散型泡沫剂为 2.5% ~3.0% 泡沫剂与 97.0% ~97.5% 的水混合成的泡沫溶液。同时单根泡沫管液体流量不小于 30 L/min,气体流量为 250 ~300 L/min。

3) 聚合物。在第 208 环—第 250 环的掘进过程中,由于地下水较大,易造成螺旋机出现喷涌现象。在该段土层掘进过程中,每 m³ 水中加入 40 g

聚丙烯酰胺以防喷涌。第 250 环后,随着黏土及泥岩的增加未再添加聚合物,在每 m³ 水中加入 2.5 kg 分散剂,可有效防喷涌。

2.2.2 掘进参数

如表 1 所示,盾构机掘进过程中的总体参数显示正常;仅在第 261 环—第 263 环、第 276 环—第 277 环掘进过程中,盾构机参数异常。

表 1 盾构机穿越不同地层时的参数统计
Tab.1 Parametric statistics of TBM crossing different strata

管片环号	地层	厚度/m	掘进速度/ (mm/min)	推力/MN	扭矩/ (kN/m)	刀盘转速/ (r/min)	土仓压力/ 10 ⁻¹ MPa	每环加水量/ m ³
第 208 环— 第 239 环	砂卵石	6.6 ~7.6	50 ~70	18.0 ~28.0	4 500 ~9 000	1.60 ~1.65	2.4 ~2.6	7 ~10
	黏土	0.8 ~1.0	50 ~70	18.0 ~28.0	4 500 ~9 000	1.60 ~1.65	2.4 ~2.6	7 ~10
第 240 环— 第 257 环	砂卵石	5.2 ~6.6	50 ~65	16.0 ~18.0	4 000 ~6 500	1.60 ~1.65	2.4 ~2.6	8 ~10
	黏土	0 ~0.8	50 ~65	16.0 ~18.0	4 000 ~6 500	1.60 ~1.65	2.4 ~2.6	8 ~10
	泥岩	0 ~2.1	50 ~65	16.0 ~18.0	4 000 ~6 500	1.60 ~1.65	2.4 ~2.6	8 ~10
第 258 环— 第 307 环	砂卵石	0 ~5.2	50 ~60	18.5 ~28.5	5 500 ~7 500	1.60 ~1.75	2.4 ~2.8	25 ~30
	泥岩	2.4 ~8.6	50 ~60	18.5 ~28.5	5 500 ~7 500	1.60 ~1.75	2.4 ~2.8	25 ~30
第 308 环— 第 316 环	泥岩	8.6	50 ~60	25.0 ~28.0	7 000 ~8 500	1.80 ~1.85	3.0 ~3.2	25 ~30

2.2.3 复合地层出土量控制

盾构掘进过程中,对每箱渣土箱内的渣土高度进行测量。设专员收集每环洞内实际出土量、龙门吊起吊渣土量等数据资料。每环根据出土量及龙门吊起吊渣土量进行双控,分析是否超方;同时对前后 3 环出土量及起吊渣土量,核实是否有突变情况。若发现超方后渣土管理专员立即根据“信息全报,分级处理”的原则通知相关人员进行超方处置。

在盾构机穿越建筑物群期间,因地层变化较大,出土量逐步由 128 m³ 增加至 170 m³,在掘进过程中要求每环分上、下半环从皮带机上随机取渣样进行清洗和分析,并将现场渣样分析结果作为调整松散系数的依据。松散系数由砂卵石地层的 1.2 逐步调整至泥岩地层的 1.6。下穿段地层变化统计见表 2。

2.2.4 综合注浆

1) 同步注浆及二次注浆:为了保证管片壁后注浆饱满,同步注浆量均大于 11.8 m³,超过理论建筑间隙的 1.64 倍;同时在掘进过程中将二次注浆进行常态化管理,管片脱出盾尾 7 ~10 环后及时进行二次注浆。二次注浆材料为水、普通硅酸盐水泥,水

表 2 下穿段地层变化统计

Tab.2 Statistics of undercrossing section stratum change

地层名称	管片环号	说明
砂卵石及黏土	第 208 环— 第 239 环	第 216 环渣土中黏土明显增多
砂卵石、黏土及泥岩	第 240 环— 第 257 环	第 253 环后渣土泥岩明显增多
砂卵石及中风化泥岩	第 258 环— 第 307 环	第 260 环—第 263 环地层变化较大,松散系数不易判定
中风化泥岩	第 207 环— 第 332 环	

灰比为 0.8:1.0 ~1.0:1.0。根据现场试验,确定二次注浆压力为 0.2 ~0.5 MPa。二次注浆点位优先选择盾构刀盘 3.9 点位以上的注浆孔,点位之间错位布置,保证管片壁后注浆饱满。若注浆后止水效果不佳,可适当增加注浆量,并同时注入水玻璃,水泥浆液与水玻璃比例为 1:1。

2) 中盾注泥:通过盾构机自带的中盾注泥系统,及时填筑盾体与土层的间隙,隔离开挖与注浆腔,起到预防浆液前窜等功能。同时,为减少穿越建筑物造成的沉降,采用螺杆泵注入泥浆。泵的设计流量为 58 L/min。每环的泥浆理论注入量为 1.09 m³,实际注入量为 2.3 m³(推进时间为 40

min),能达到良好的隔离效果。

3) 深孔注浆:在1号台车顶部搭设平台,在盾构机穿越建筑物过程中,采用 $\phi 42.0$ mm、壁厚3.5 mm的钢花管进行洞内深孔注浆加固。注浆材料采用水泥浆液。特殊情况下采用水泥-水玻璃双液浆,水灰比为0.8:1.0~1.0:1.0,水泥浆和水玻璃的体积比为1:1~2:1。根据现场试验,注浆压力控制在0.05 MPa以下。防止管片破损,深孔注浆范围为:管片上方 180° 范围为3 m,管片下方 180° 范围为0.5 m。

2.2.5 姿态控制

1) 盾构机姿态:盾构机水平姿态保持在10~30 mm,竖向姿态控制在-50~-70 mm,且均未出现突变情况。

2) 管片成型姿态:成型管片姿态良好,且未出现较大上浮现象。水平姿态最大为34 mm,发生在第216环;垂直姿态最大为-30 mm,发生在第228环。

2.3 盾构机穿越后的控制措施

1) 袖阀管注浆:为了确保房屋安全,采用袖阀管对房屋基础及隧道拱顶上方进行空洞排查以及后注浆加固,确保盾构机穿越房屋的安全性。

2) 空洞探测:为探明已穿越区域的地下情况,组织专业单位采用“微动探测”技术对已掘进隧道中心线上每隔5 m的地层进行空洞探测。MSM(微动探测法)是从圆形台阵采集的地面微动信号中,通过空间自相关法提取其瑞雷面波频散曲线,经反演获取台阵下方S波速度的地球物理探测方法。该方法可用于地震构造探测及场地稳定性评价^[5]。

2.4 盾构机掘进中遇到的问题及处置措施

1) 地层变化:在第261环—第263环土层的掘进过程中,地层变化较快,无法准确判断松散系数,盾构机掘进参数未出现较大变化。但通过渣样分析,发现砂卵石质量分数显著减少(由43.3%减少至33.9%)。掘进过程中未能根据地层变化对盾构掘进参数进行调整,导致出土量不可控,超方约9.3 m³,立即停机进行原因分析。超方后地面及时采用临时围挡进行围蔽。恢复第264环土层掘进时,为了控制出土量将土压由240 kPa加大至260 kPa,盾构机推力由25 MN逐步增加至30 MN,扭矩由6 500 kN·m增加至10 000 kN·m,同时增大了加水量。如图2所示,在第266环土层的掘进过程中,地面在第260环(刀盘位置为第264环)隧道右侧

出现冒泡沫的现象。现场及时采用沙袋进行了围蔽,同时采用篷布进行遮盖,并采用消泡剂消散及斗车进行清运^[6-7]。

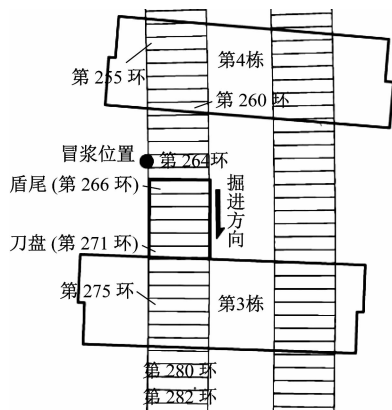


图2 地面冒浆位置示意图

Fig. 2 Diagram of ground slurry blasting location

2) 刀盘结泥饼:在第276环—第277环的掘进过程中推力及扭矩明显增加,推力最大达到31 MN,扭矩最大达到11 MN·m。掘进过程中速度波动较大,且皮带上大块泥团,怀疑土仓内有结泥饼的现象。随后停机对土仓内加入51.3 m³的分散剂水溶液进行泡仓处理,泡仓13 h后恢复掘进。恢复后掘进参数有所好转,推力降低至21 MN,扭矩降低至800 MN·m,速度较稳定。由于第277环泡仓后土仓内存在大量的分散剂水溶液,渣土较稀,出土量不易计算,通过理论计算第278环超方10.8 m³。为了确保地面安全,停机进行地面隐患排查工作。在地面第276环—第278环对应的刀盘位置(第280环—第282环)进行钻孔排查,发现地层较密实,未发现空洞,此时注入水泥浆3.2 t。后续通过带压开仓,验证了结泥饼的判断。

3 下穿段数值模拟结果及分析

3.1 三维计算模型的建立

利用MIDAS-GTS有限元分析软件,根据圣维南原理和实际需要,为消除边界效应,建立下穿段三维计算模型。模型计算范围为360 m×240 m×80 m(长度×宽度×高度),如图3所示。

三维计算模型单元总数158 432个,节点总数268 440个。计算模型网格划分见图3。模型采取的边界如下:①上边界取至地面,为自由面;②其余边界采用固定位移边界,其中4个侧面地层边界限制水平位移,下边界限制竖向位移。

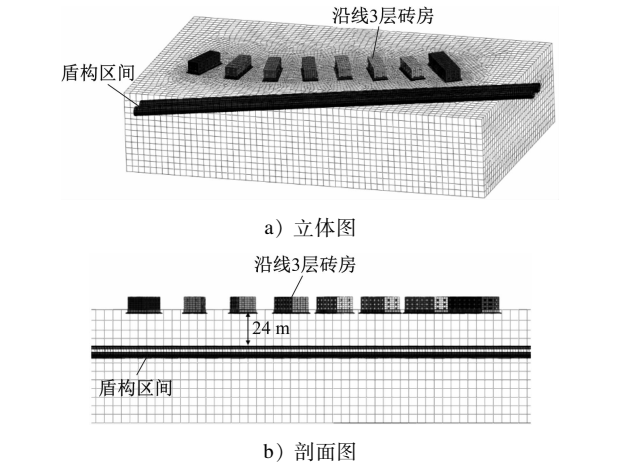


图3 下穿段三维计算模型

Fig.3 Three-dimensional calculation model of undercrossing section

3.2 计算结果分析

沿线三层砖房基础的沉降云图见图4。

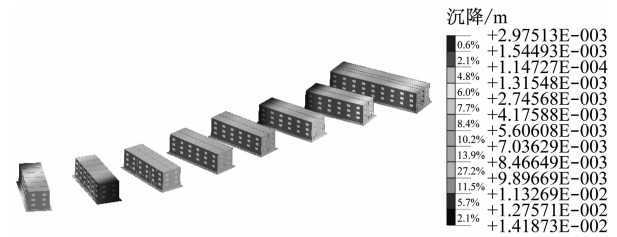


图4 沿线三层砖房的沉降云图

Fig.4 Settlement nephogram of three-storey brick building along the line

根据表3,对1[#]、2[#]、3[#]、7[#]砖房再次进行补强注浆,确保穿越过程中建筑物安全。

表3 沿线三层砖房最大沉降和基础倾斜汇总

Tab.3 Summary of maximum settlement and foundation leaning of three-storey brick building along the line

砖房编号	最大沉降/mm	基础倾斜
1 [#]	12.44	0.000 24
2 [#]	14.18	0.000 35
3 [#]	13.36	0.000 34
4 [#]	10.77	0.000 27
5 [#]	10.36	0.000 26
6 [#]	9.16	0.000 46
7 [#]	13.69	0.000 34
8 [#]	8.36	0.000 21

注:GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》规定,沉降限值取20 mm,允许倾斜取0.002。

4 下穿段监控量测结果及分析

盾构机穿越过程中存在地面及房屋沉降的风险。采用人工观测手段对地表沉降及建筑物沉降进行监测,同时进行全天不间断巡视观察,掌握盾构机穿越建筑物群时周边环境的变形情况,以指导施工,亦为盾构安全穿越提供及时、准确的监测数据支撑。盾构机下穿建筑物群期间的建筑物沉降、地表沉降、地中位移见图5—图7和表4。

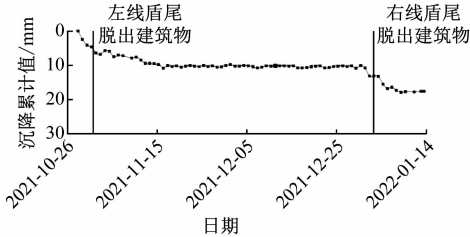


图5 建筑物沉降-时间关系曲线

Fig.5 Curve of building settlement-time relationship

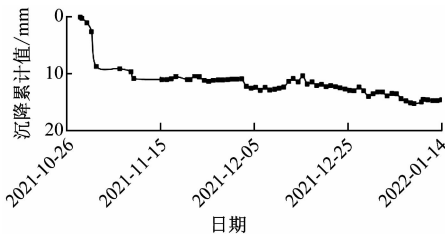


图6 地表沉降-时间关系曲线

Fig.6 Curve of ground settlement-time relationship

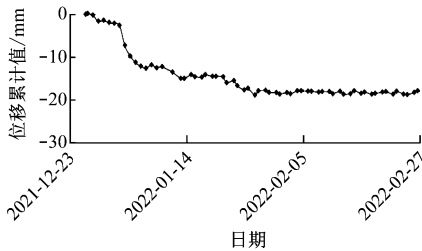


图7 地中位移-时间关系曲线

Fig.7 Curve of middle ground displacement-time relationship

比较表3与表4中的建筑物沉降,可以明显判断通过二次补强注浆的1[#]、2[#]、3[#]、7[#]砖房沉降较小,沉降得到了有效控制,验证了数值模拟的有效性。5[#]砖房沉降偏差约-7.80 mm、8[#]砖房沉降偏差约7.08 mm,考虑为模型地层选择与实际地层偏差(5[#]砖房下方实际地质条件较差,与地勘报告存在一定偏差),即地层不均匀性导致,也可能是盾构机穿越5[#]砖房过程中参数未及时调整或注浆不及时所致。盾构机穿越建筑物群期间建(构)筑物沉降、地表沉

降,以及土体分层竖向位移均在设计要求的控制范围内。目前,各个监测点变化速率均较小,且盾尾脱出后监测点变形趋于收敛,整体处于安全可控状态。

表 4 盾构机下穿建筑物群监测数据统计
Tab. 4 Monitoring data statistics of TBM undercrossing building group

监测项目	监测位置	监测点深度/ m	累计最大沉降 (位移)/mm
建筑物沉降	1#砖房		1.88
	2#砖房		3.50
	3#砖房		6.40
	4#砖房		10.05
	5#砖房		18.10
	6#砖房		9.55
	7#砖房		1.46
	8#砖房		1.28
地表沉降	1#与2#砖房之间		1.24
	2#与3#砖房之间		6.70
	3#与4#砖房之间		10.40
	4#与5#砖房之间		15.10
	5#与6#砖房之间		8.10
	6#与7#砖房之间		1.30
	7#与8#砖房之间		1.10
地中位移	1#与2#砖房之间	8	1.15
	2#与3#砖房之间	8	9.70
	3#与4#砖房之间	8	13.40
	4#与5#砖房之间	8	17.75
	5#与6#砖房之间	8	6.20
	6#与7#砖房之间	6	1.20
	7#与8#砖房之间	4	1.10

注:表中正值表示下沉;建筑物沉降限值为±20 mm,地表沉降限值为±30 mm,地中位移限值为±30 mm。

5 结语

- 1) 大直径盾构在复合地层下穿建筑物群的过程中,采用渣土改良方法、掘进控制参数、出土量控制及综合注浆等成套施工技术,可有效控制建筑物和地表沉降。
- 2) 提出了盾构掘进中遇地层变化和土仓结泥饼问题的处理方法。

- 3) 在复合地层中成功实施了泥膜护壁带压开仓换刀。
- 4) 建议大直径盾构机在穿越复合地层前,通过详细勘察地层,并利用数值软件计算各工况下建(构)筑物的变形情况,对风险较大地层,应进行技术处理后再穿越。

参考文献

[1] 杨友彬. 泥炭质土地区条形基础建筑物群受下穿盾构隧道的影响研究[J]. 施工技术,2018(增刊1):25.
YANG Youbin. Study on the influence of strip foundation of building group in the shield tunnel construction in peat soil area[J]. Construction Technology, 2018(S1):25.

[2] 张亚洲,王善高,闵凡路. 大直径泥水盾构下穿民房建筑物群沉降分析及控制[J]. 防灾减灾工程学报,2016(6):959.
ZHANG Yazhou, WANG Shan'gao, MIN Fanlu. Analysis and control of ground settlement caused by slurry shield tunneling crossing buildings in the Weisanlu Yangtze River Tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016(6):959.

[3] 刘金山. 饱水粉砂地层盾构穿越既有建筑物群施工技术探讨[J]. 铁道建筑技术,2014(10):52.
LIU Jinshan. Approach on construction technology of shield crossing existing building in saturated silt strata[J]. Railway Construction Technology, 2014(10):52.

[4] 胡国喜. 双线盾构隧道连续下穿老旧建筑物群施工技术[J]. 公路,2018(11):319.
HU Guoxi. Construction technologies of double-line shield tunnel passing underneath old buildings[J]. Highway, 2018(11):319.

[5] 高艳华,黄溯航,刘丹,等. 微动探测技术及其工程应用进展[J]. 科学技术与工程,2018(23):146.
GAO Yanhua, HUANG Suhang, LIU Dan, et al. Microtremor detection technology and its new progress in engineering application[J]. Science Technology and Engineering, 2018(23):146.

[6] 刘宣宇,许胜,张凯举,等. 基于启发式动态规划的盾构土压平衡优化控制[J]. 大连理工大学学报,2018(5):526.
LIU Xuanyu, XU Sheng, ZHANG Kaiju, et al. Optimization control for soil pressure balance of shield based on heuristic dynamic programming[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018(5):526.

[7] 王海洋. 富水砂卵石地层土压平衡盾构施工技术研究[D]. 济南:山东大学,2018.
WANG Haiyang. Research on construction technology of earth pressure balance shield in water-rich sandy cobble stratum[D]. Ji'nan: Shandong University, 2018.

(收稿日期:2022-05-16)