

土压平衡盾构穿越复杂建构筑物施工技术

徐经纬

(上海隧道工程有限公司,上海市 200000)

摘要:近年来,我国城市轨道交通建设项目日益增多,城区复杂环境下的地铁施工项目更为常见,越来越频繁出现极近距离穿越建构筑物项目,工况愈加复杂,对盾构施工工艺提出更加精细化要求,以上海轨道交通14号线9标静安寺站~黄陂南路站区间隧道盾构推进施工为例,分析施工过程中关键施工工艺,为类似极限、复杂工况下的盾构穿越施工项目提供借鉴和参考。

关键词:城区;复杂环境;近距离;地铁隧道;精细化施工

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)03-0171-05

0 引言

近年来我国地铁隧道工程建设稳步增长,伴随而来的是越来越多的近距离极限穿越施工工况,如何能够在尽可能降低对既有建构筑物影响的基础上,高质量完成盾构推进施工任务,成为越来越多盾构施工从业者钻研的课题。林恭新^[1]针对盾构穿越高架桥墩和公寓小区施工过程中,从盾构选型,盾构施工的保护措施,以及应急措施方面进行了优化,并采用泡沫剂对不良土层进行改良,取得了较好的沉降控制效果。张福民^[2]在盾构穿越皮革厂房施工过程中,通过对厂房下部预埋注浆管注浆,很好的控制的建筑物变形沉降。黄宏伟,张冬梅通过对国内外大量施工实测监测数据的分析,总结分析了盾构施工周边环境的变化规律^[3];钟长平等通过对广州2-8号线的13个标段进行全阶段的施工总结,对整个盾构施工流程进行详细分析,总结整理了大量成熟的施工技术^[4];郭银波,黄忆龙通过对盾构同步注浆技术在工程实例中的应用,总结分析了同步注浆对周边环境不同影响^[5]。

本文主要从前期准备、分阶段穿越、施工参数设定及自动化监测等方面描述盾构穿越建构筑物的施工控制措施,精细化控制尽可能降低对建构筑物的影响。

1 工程概况

1.1 工程简述

上海轨道交通14号线9标静安寺站—黄陂南

路站区间在长乐路重庆南路路口上跨世博电力隧道($\phi 6200$ 盾构法圆隧道),呈约 80° 角斜交状态,并紧邻侧穿重庆南路南北高架桩基($\phi 800$ 钻孔灌注桩,桩长48m; $\phi 550$ PHC管桩,桩长45m)。穿越里程范围为:SK18+842.399~SK18+874.339,约976~1003环;下行线XK18+839.796~XK18+872.166,约973~1000环。盾构穿越后10m到达黄陂南路站。

1.2 工程地质

穿越时隧道顶覆土埋深为10m,与世博电缆隧道结构顶最小竖向净距为2.2m,与重庆南路南北高架桩基最小水平间距为1.1m。穿越段隧道中心标高-9.4m,断面土层主要为④淤泥质黏土及⑤₁₋₁灰色黏质粉土夹粉质黏土层,世博电力隧道位于⑤₁₋₂粉质黏土及⑤₄灰绿色粉质黏土层,隧道与世博电缆隧道和南北高架桩基相对位置关系见图1。

根据地质资料,本工程施工时主要涉及的主要土层为:④淤泥质黏土及⑤₁₋₁灰色黏质粉土夹粉质黏土层,土层特性见表1。

1.3 周边环境

盾构穿越南北高架及世博电力隧道段位于长乐路重庆南路路口,地面交通繁忙。路口北侧为广场公园,南侧为金鹿大楼,周边环境状况见图2~图4。

2 关键施工工艺

2.1 前期准备工作

2.1.1 现场踏勘及资料收集

(1)穿越南北高架踏勘及资料收集

在穿越施工前通过相关部门配合到盾构穿越段的南北高架进行现场踏勘,了解南北高架结构现状。

收稿日期:2023-07-03

作者简介:徐经纬(1972—),男,学士,高级工程师,从事轨道交通建设及工程管理工作。

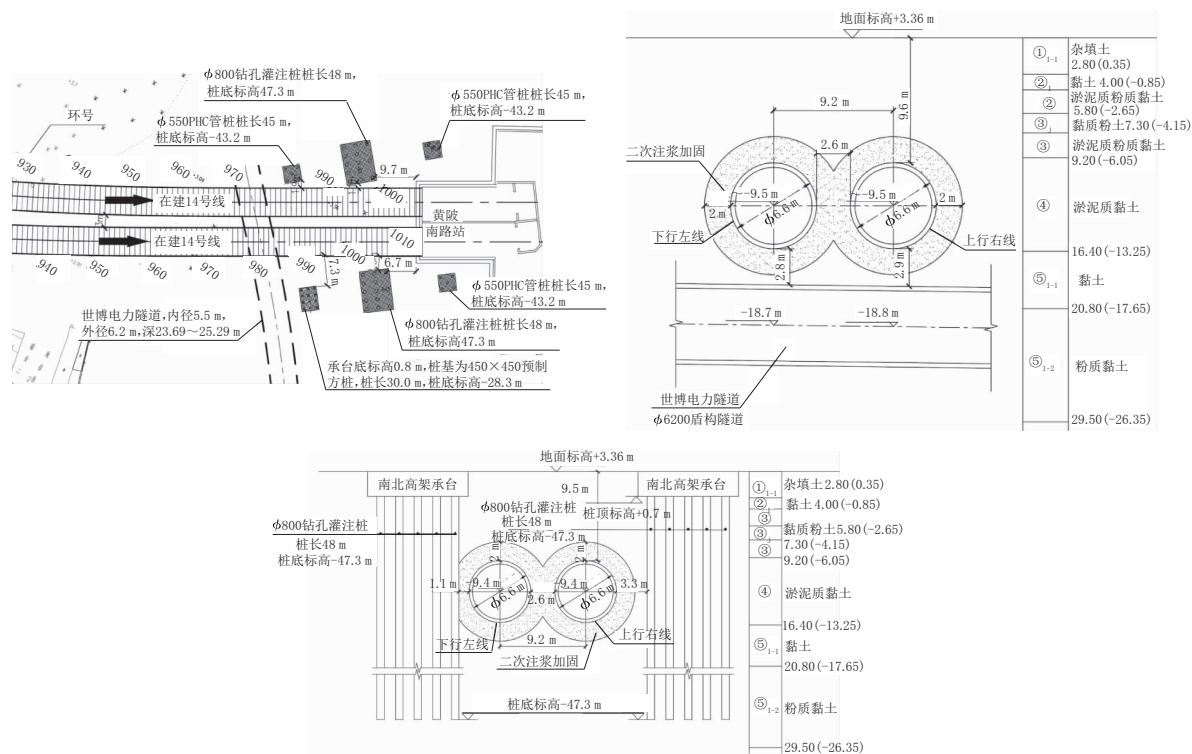


图 1 区间隧道穿越电力隧道及南北高架平、剖面图

表 1 土层特性表

层号	土层名称	土层描述
① ₁₋₁	杂填土	表层为混凝土路面或人行道地砖,其下以碎砖、碎石、三合土等为主,含大量建筑垃圾杂物
② ₁	灰黄色黏土	层顶埋深约 0.9~2.8 m,层厚 0.5~2.3 m,静力触探 P _s 平均值约 0.54 MPa,中等~高等压缩性。局部区域缺失
③	灰色淤泥质粉质黏土	层顶埋深约 2.7~4.3 m,层厚 2.8~6.1 m,静力触探 P _s 平均值约 0.48 MPa
③ ₁	灰色黏质粉土	层顶埋深约 3.6~5.8 m,层厚 0.7~2.5 m,静力触探 P _s 平均值约 1.29 MPa,标准贯入击数 N 平均值约 6.7 击,土质不均;呈松散状态,中等压缩性。除两端近车站区域缺失外,沿线大部分区域均有分布
④	灰色淤泥质黏土	层顶埋深约 8.0~9.5 m,层厚 6.0~8.6 m,静力触探 P _s 平均值约 0.63 MPa
⑤ ₁₁	灰色黏质粉土夹粉质黏土	层顶埋深约 15.7~17.4 m,层厚 1.3~6.7 m,静力触探 P _s 平均值约 2.20 MPa,标准贯入击数 N 平均值约 12.1 击,含云母,在正常地层沉积 I-2 区及古河道沉积 II 区呈透镜体夹层状分布
⑤ ₁₋₁	灰色黏土	层顶埋深约 15.0~16.5 m,层厚 1.4~7.1 m,静力触探 P _s 平均值约 0.95 MPa,除在里程 SK18+010~SK18+820 段受第⑤ ₁₁ 层影响,该层缺失或厚度较薄外,沿线其他区域该层遍布,且分布较稳定
⑤ ₁₋₂	灰色粉质黏土	层顶埋深约 17.0~22.8 m,层厚 1.4~10.5 m,静力触探 P _s 平均值约 1.39 MPa,除在里程 SK18+130~SK18+180 段,由于第⑤ ₁₁ 层厚度较厚,该层缺失外,沿线其他区域该层遍布
⑤ ₂	灰色黏质粉土夹粉质黏土	层顶埋深约 19.0~30.5 m,层厚 1.6~16.5 m,静力触探 P _s 平均值约 2.63 MPa,标准贯入击数 N 平均值约 12.3 击,含云母,局部砂性较重,土质不均;中等压缩性。在正常地层沉积 I-2 区及古河道沉积 II 区均有分布,正常地层沉积 I-2 区厚度较薄,且粘性较重;古河道沉积 II 区厚度较厚,且局部砂性较重。
⑤ ₃₋₁	灰色粉质黏土	层顶埋深约 24.0~37.9 m,层厚 1.6~12.3 m,静力触探 P _s 平均值约 2.38 MPa,中等压缩性。古河道沉积 II 区大部分区域有分布;正常地层沉积 I 区仅在与古河道沉积 II 区交界区域零星分布,且厚度较薄
⑤ ₃₋₂	粉质黏土	层顶埋深约 36.4~37.5 m,层厚 8.0~8.6 m,静力触探 P _s 平均值约 4.50 MPa,呈稍密~中密状态,中等压缩性。仅在近黄陂南路站区域有分布
⑤ ₃₋₃	灰色粉质黏土	层顶埋深约 45.0~45.5 m,层厚 3.2~7.0 m,静力触探 P _s 平均值约 3.67 MPa,仅在近黄陂南路站区域有分布
⑤ ₄	灰绿色粉质黏土	层顶埋深约 39.2 m,层厚 2.5 m,夹多量粉性土,土质不均;中等压缩性。仅在古河道沉积 II 区近静安寺站局部区域有分布
⑥	暗绿色粉质黏土	层顶埋深约 26.9~31.7 m,层厚 1.8~4.7 m,静力触探 P _s 平均值约 2.86 MPa,中等压缩性。正常地层沉积 I 区均有分布
⑦ ₁₋₂	草黄~灰黄色粉砂	草黄~灰黄色粉砂,层顶埋深约 30.2~41.7 m,层厚 2.1~12.0 m,静力触探 P _s 平均值约 10.88 MPa,标准贯入击数 N 平均值约 34.2 击,呈中密~密实状态,中等压缩性。正常地层沉积区均有分布,且厚度较厚;古河道沉积 II 区在里程 SK18+140~SK18+320、SK18+610~SK18+670 有分布,但厚度较薄
⑦ ₂₋₁	灰色粉砂夹粉质黏土	层顶埋深约 40.0~40.8 m,层厚 1.2~3.2 m,静力触探 P _s 平均值约 4.13 MPa,仅在古河道沉积区近静安寺站区域有分布

表 1 (续)

层号	土层名称	土层描述
⑦ ₂₋₂	灰黄~灰色粉砂	层顶埋深约 38.0~52.5 m,层厚 7.0~14.0 m,静力触探 Ps 平均值约 18.03 MPa,标准贯入击数 N 平均值大于 50 击,沿线遍布,古河道沉积Ⅱ区层顶埋深有一定起伏
⑧ ₁	灰色黏土	层顶埋深约 50.6~54.9 m,层厚 5.1~10.7 m,静力触探 Ps 平均值约 2.91 MPa,含云母、土质尚均匀

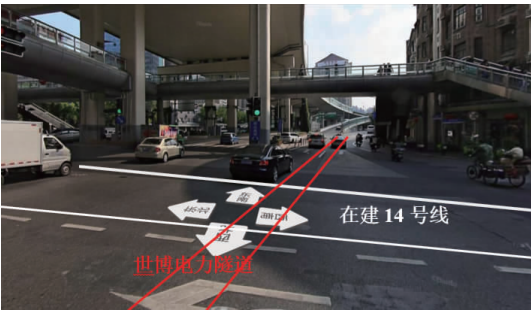


图 2 区间隧道穿越南北高架及世博电力隧道及位置关系



图 3 路口北侧广场公园



图 4 路口南侧金鹿大楼

因为南北高架目前处于通车状态,施工前应 与路政局取得联系,获取相关数据,对南北高架现状进行了解。

(2)穿越世博电力隧道踏勘及资料收集

在穿越施工前通过相关部门配合到盾构穿越段的电力隧道结构内部进行现场踏勘,了解电力隧道的管片结构和隧道现状。因为电力隧道已经投入运营,施工前到电力隧道运营管理部门联系,取得该线路运营期间(近期)监测的资料数据,以进一步了解该结构的变形情况。

2.1.2 管片预留注浆孔

考虑到盾构施工过程中,对隧道上方地面以及

目前运营中的电力隧道、南北高架周边土体均会造成扰动,为了对周边土体变形进行控制,在管片原有注浆孔的左右两侧分别各增加一个注浆孔,后期若地面或电力隧道、南北高架出现较大沉降,可及时利用进行二次注浆,增设注浆孔位置见图 5。

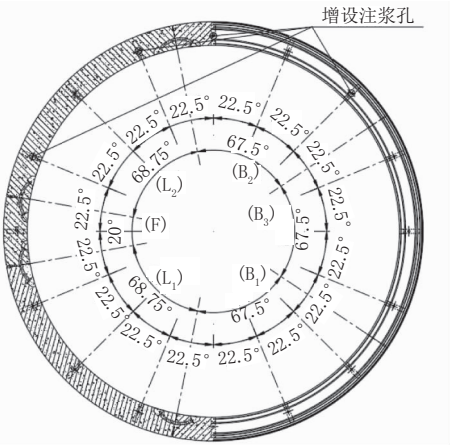


图 5 新增注浆孔示意图

2.1.3 盾构机选型

本区间隧道施工选用性能优异的铁建重工盾构机,考虑到本工程特殊性,前期与盾构机厂家深入沟通,对不适用于本工程的部件进行调整优化,保证设备以优异的性能投入使用,成为攻城利器。本工程盾构机针对性优化主要有以下几点。

(1)注浆设备采用德国施维英注浆泵代替原有同步注浆泵,型号 KSP 12,安装计数器,采用计数的 方式计算流量以保证同步注浆量的精确把控。

(2)盾构机配置了盾构掘进姿态实时测量系统, 利用先进的测量、电子传感器和计算机技术,计算盾 构机的位置、姿态和趋势信息,并与设计隧道轴线进 行比较,以直观的方式图文并茂地给盾构机操控人 员实时地提供信息,实时纠偏,减少盾构纠偏带来的 土体扰动。

(3)针对穿越段有④淤泥质黏土、⑤₁₋₁ 黏土土层, 盾构机配置了泡沫剂添加系统,必要时可对渣土进 行有效改良,保证掘进施工顺利进行。

2.2 分阶段穿越

由于盾构穿越世博电力隧道和南北高架后 10 m 即到达黄陂南路站,综合考虑盾构穿越施工的工程 特点和周边环境信息,按照前、中 2 个阶段对整个穿

越施工过程进行划分。

(1)盾构穿越前试推进阶段

此阶段主要用于摸索施工规律,结合设计文件及施工监测信息,主要针对盾构机推进速度、刀盘贯入度、刀盘转速、土仓压力设定、同步注浆总量和注浆比例等施工参数动态调整,力求精细化施工。对该过程中出现的异常情况进行总结并制定合理的整改措施,并在施工过程中对应对措施有效性进行检验。

(2)盾构穿越阶段

前一阶段的施工参数已基本确定,本阶段根据监测情况进行调整,这个穿越阶段对施工过程的监控进一步加强,施工参数单单次调节幅度不宜过大,需勤调勤测。

盾构在穿越建构筑物施工过程中,需配置专业技术人员现场实施监控各项施工参数,通常试验段的选择跟穿越段施工工况非常相似,因此在试验段取得良好应用效果的参数设定不应频繁更改,需统计分析人工及自动化监测数据,总结变化规律,掌握趋势,在深度分析研判的基础上,轻微调整。确保穿越过程中电力隧道和南北高架的安全,穿越阶段划分见图6。

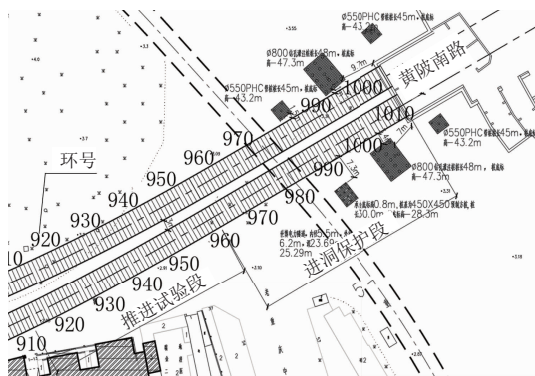


图6 穿越阶段划分图

(3)由于上、下行线穿越南北高架后即进入进洞施工段,为确保电力隧道、南北高架和盾构进洞的安全,特设盾构进洞保护阶段。

2.3 施工参数设定

(1)施工参数的设定主要在试验段完成,试验段的主要工作就是通过监测数据和各项施工参数的对比分析,总结各个参数间的相互关系,以及某项施工参数调整幅度的大小对周边环境的影响表现以及影响大小,保证周边环境地层损失率低于1‰。

(2)盾构穿越段根据区间隧道设计要求:施工阶段地面沉降控制值为 $-10 \sim 5 \text{ mm}$,南北高架立柱单次沉降量报警值不大于 $\pm 2 \text{ mm}$,累计沉降量控制值

不大于 $\pm 5 \text{ mm}$;世博电力隧道单次沉降量报警值不大于 $\pm 5 \text{ mm}$,累计沉降量控制值不大于 $\pm 10 \text{ mm}$ 。

2.4 施工监测

2.4.1 常规测量

盾构穿越南北高架桩基及世博电力隧道时,重视轴线数据测量。

(1)隧道轴线平面测量

当盾构穿越南北高架桩基及世博电力隧道时,采用精密的测量仪器,同时加大频率,经常复核盾构姿态,保证盾构机始终沿设计轴线推进。

(2)隧道沉降监测

在隧道推进试验段就开始加强对隧道沉降变形的监测。在穿越南北高架桩基的过程中,每5环为一点。对穿越段投影范围内均需进行每天监测1次,持续至监测数据基本无变化,此时可按照一般监测方式进行。

(3)地面测量

盾构穿越南北高架期及世博电力隧道间,高架结构、隧道轴线、周边环境监测工作都需升级,避免关注穿越建构筑物本身,忽略周边环境的情况发生。

2.4.2 高架监测

由于施工的穿越区处于不稳定的软土地层,所以穿越施工必定会扰动土层而使隧道盾构周围土体一定的区域内产生变形(或局部的短时间隆起),南北高架承台桩基和隧道外边的净距最小约为 1.56 m 。在一定程度上影响高架结构的稳定性。因此,为使隧道盾构的施工能顺利进行,又同时使穿越段高架处于安全的运行状态,就要在施工过程中,对一定范围内的高架承台和立柱进行状态的监测,以利用监测所得的数据指导隧道盾构施工。

2.4.3 电力隧道自动化监测

由于隧道盾构施工连续进行,但电力隧道运营时,隧道内不准任何人员入内,所以光学仪器观察高程的方法在本次任务中不能作为主要手段采用。必须用一种自动仪器进行连续的观测。

本工程监测选用静力水准测量系统和数据自动采集系统完成上述要求的任务。

为保证监测数据的连续性及准确性,本工程监测选用“电水平尺”(EL Beam Sensor)和数据自动采集系统。

该设备采用电解质倾斜传感器作为关键组成部分。电子水平尺的测量原理是伴随着监测范围内的沉降变化,安装在设备内的电解质会产生水平偏差,

通过水平偏差的幅度来反映该位置沉降变化的大小,该设备的测量灵敏度高,且稳定性好,是很好的监测设备。

该设备的组成相对简单,主要为电解质、传感器、和空心直尺,其中空心直尺是电解质和传感器的安装载体,使用时根据监测范围和施工需求可选择具体安装支数进行相连,根据监测方向确定安装方向和角度。工作时,由数据自动采集器读取所有电水平尺的信号可定时地自动完成数据采集。将此数据传送到计算机中,借助专用的处理程序,就可得监测对象连续的位移曲线。

静力水准仪测点布置。在靠近 1 号工作井,距离 1 号工作井南边线 78 m 处布置基本观测零点,然后依次间隔 15 m、15 m、15 m、5 m、5 m、5 m、5 m、15 m、15 m,在隧道内设置 9 个沉降观测点,一共布置 10 个静力水准观测仪,分别为 S0~S10。

监测点布置见图 7。

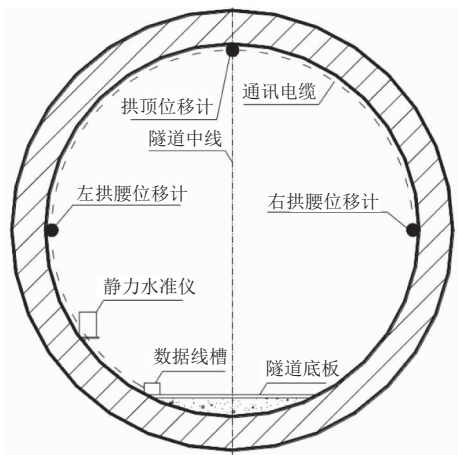


图 7 监测点布置位置示意图

2.5 二次注浆

本工程盾构穿越电力隧道施工过程中,盾构机盾尾脱出电力隧道投影区域后,项目部通过该段管片预留注浆孔压注双液浆,以稳定电力隧道的后期变形,双液浆配比见表 2。注浆范围为穿越段及穿越段前后各 10 m 区域,注浆过程中注浆压力控制不超过 0.5 MPa,二次注浆量控制为每孔压注 0.2 m³,共计 10 个增设注浆孔,即每环压注量约为 2 m³。

表 2 二次注浆浆液配比(重量比)

A 液		B 液
42.5 级水泥 /kg	水 /L	水玻璃 /L
1000	1000	250

3 分析总结

根据监测数据对上海轨道交通 14 号线 9 标静

安寺站—黄陂南路站区间隧道盾构穿越南北高架监测数据分析,盾构穿越南北高架桩基过程中由于高架采用深桩基础,盾构推进过程中对其基本无影响,但是需要通过高精度测量手段保证盾构掘进轴线精准,避免因测量误差导致刀盘切削桩基情况发生。

穿越电力隧道施工过程中由于盾构上穿施工,当盾构机切口到达时,受到切口压力影响,电力隧道呈现轻微下沉趋势,因此上穿施工过程中必须根据当前覆土埋深及地下水位精准设置切口压力值,减小对穿越建构筑物的影响。

当盾尾通过时,电力隧道沉降数据主要依赖于同步注浆充填密实度的影响,当同步注浆压注量不足或填充不够均匀密实时,电力隧道呈现上浮趋势,同步注浆过量压注,则出现下沉趋势,因此需严格计算同步注浆量,并采用多点注浆,本次施工过程中采用 110%填充系数时电力隧道沉降情况基本稳定,类似工程施工可参考本次施工经验,结合工程地质情况,在试验段即确定合适的填充系数。

当盾构机完全通过电力隧道后,由于上部卸载以及周边扰动土体的重新固结,电力隧道呈现上浮趋势,项目部后期通过增设注浆孔管片开孔压注双液浆,保证周边土体填充更为密实,且固结时间缩短,极大降低了电力隧道的沉降。

最终,待本次穿越结束并在建隧道稳定后,电力隧道累计最大沉降为 +8.38 mm,满足设计及相关规范要求,圆满完成穿越施工任务。

4 结 语

上海轨道交通 14 号线 9 标静安寺站—黄陂南路站区间隧道盾构穿越电力隧道及南北高架后,经后期持续监测,在建隧道、电力隧道变形、南北高架及地面周边环境沉降变形稳定,所有数据均在设计及相关规范要求范围内,可为后续城区地铁隧道穿越复杂建构筑物施工提供宝贵的经验。

参考文献:

[1] 林恭新.穿越不同建筑物的隧道工程盾构施工控制技术[J].中国市政工程,2013(164):28-33.
[2] 张福民.盾构穿越建筑物施工技术[J].建筑科学,2010(8):72-74.
[3] 黄宏伟,张冬梅.盾构隧道施工引起的地表沉降及现场监控[J].岩石力学与工程学报,2001,20(10):1814-1820.
[4] 钟长平,等.广州地铁二/八号线拆解段盾构隧道工程施工技术研究[M].广州:人民交通出版社,2011.
[5] 郭银波,黄忆龙.注浆技术在地铁土建工程中的应用[J].铁道建筑技术,2002(2):72-74.