复杂环境下地铁纪念堂站暗挖施工风险控制技术

——以广州地铁十三号线二期工程纪念堂站为例

陈巨武，徐顺明

（广州地铁集团有限公司，广州 510330）

摘要：广州地铁工程拱盖法暗挖车站较多，由于暗挖车站顶部存在砂层、淤泥质黏土、粉质黏土等软弱地层，其普遍具有高含水量性、高压缩性、低透水性和低强度等特点，施工阶段易造成较大变形，将会引起隧道坍塌和周边建构筑物设施破坏，造成严重的生命与财产损失，继而造成重大的社会影响。以复杂环境下的纪念堂站为施工风险论述对象，采用合理设计、施工方案，降低施工风险，同时增加地质补勘、深层注浆以及施工监测等方法取得很好效果。对软弱地层暗挖车站进行分析和总结，为暗挖车站施工安全提供依据。

关键词：暗挖车站；拱盖法施工；施工监测；风险控制；施工安全

中图分类号：U231.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671－1807(2024)14－0247－08

广州中心城区征地拆迁十分困难，采用暗挖施工，可以少征地，在繁华地段设地铁车站，暗挖法有着天然优势，不需占用机动车道就能对地铁车站进行施工，但对车站周边环境、地下管线，地面沉降等保护及控制至关重要[1-2]。洞桩法是浅埋暗挖法的一种，自 1992 年在北京地铁复八线首次成功施作以来，已经在全国多个城市的地铁建设中得到了广泛的应用，如北京地铁 7 号线和 10 号线、沈阳地铁 1 号线、哈尔滨地铁 2 号线等[3-4]，暗挖施工主要存在隧道坍塌、管线破损、地面及隧道沉降变形导致路面坍塌等系列风险。设地铁车站，洞桩法有着天然优势，不需占用机动车道就能对地铁车站进行施工，不影响施工场地的上挖法。现以纪念堂站为例，面对广州市中心区主干道下，旁边还有中山纪念堂、广州市总工会大楼等国家重点文物古迹下暗挖施工，控制沉降变形，减小施工风险是施工过程中严控工作，对暗挖施工风险控制进行有效控制[5-9]，取得很好效果。

1　纪念堂工程概况

1.1　工程概况

广州市轨道交通十三号线二期工程纪念堂站，位于广州市越秀区东风东路与解放北路交叉口，西连彩虹桥站，东连仓边路站，沿东风东路呈东西走向敷设，车站为地下二层岛式站台车站，全长 309 m，采用拱盖法工法施工，标准段宽为 23.5 m，埋深 12～14 m，车站设置 3 个临时施工竖井进入车站主体结构施工，竖井开挖采用“倒挂井壁”法施工，横通道、小导洞及主体扣拱开挖采用“矿山法”施工，如图 1 所示。

截至 2024 年 2 月施工进度及沉降情况：纪念堂站站厅层侧墙防水铺设累计铺设完成 575.5 m，设计 575.5 m，完成 100%；侧墙钢筋累积绑扎完成 575.5 m，设计 575.5 m，完成 100%；侧墙本日浇筑完成 0 m，累计浇筑完成 199 m，设计 575.5 m，完成 34.5%。纪念堂 2#、3#横通道已进入车站小导洞施工，小导洞已施工 530 m，完成率 60%。1#竖井已开挖 12 m，正在进行横通道管棚施工。上方地表累计沉降最大值为 101.8 mm（经专家论证，地表沉降控制值调整为 120 mm），小导洞拱顶沉降最大值为 11 mm（控制值为 20 mm）。

1.2　地质情况

横通道及小导洞拱顶位于硬塑残积土层洞身位于碎屑全风化岩层、强风化碎屑岩，拱顶上方覆土地层为粉质黏土层厚约为 2 m、淤泥质土层厚约为 2.4 m、〈2-1〉杂填土层厚约为 6 m。

收稿日期：2024-03-14

作者简介：陈巨武（1973—），男，黑龙江密山人，硕士，高级工程师，研究方向为轨道交通工程；通信作者徐顺明（1971—），男，海南儋州人，硕士，教授级高级工程师，研究方向为工程测量和地铁施工技术管理。

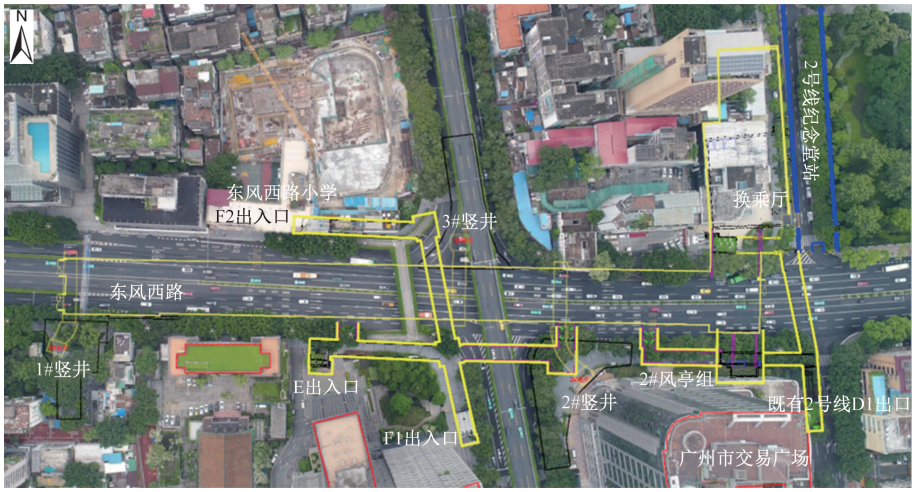


图 1　纪念堂站总平面布置

2　施工风险

根据中心城区地质情况及周边环境，对该区段车站进行了风险评估，主要为横通道、小导洞及洞内成桩施工风险、老旧水管爆管风险、周边建构筑物沉降风险，其对应管控级别及实施情况如表 1 所示。

纪念堂站自 2022 年 3 月 27 日开始进行车站小导洞超前大管棚施工，2022 年 5 月 2 日开始破除首个导洞马头门，开始进入小导洞施工，由于小导洞上方存在淤泥质土层，该地层对下方暗挖施工较为敏感，小导洞施工期间地表测点多次出现沉降速率较大现象，其间多次召开沉降分析会，目前纪念堂站地表沉降控制值为－120 mm，地表沉降最大值为－101.81 mm。分阶段统计各个导洞上方沉降量最大测点如表 2 所示。

3　主要应对措施

3.1　设计方案优化

纪念堂站 2 号横通道拱顶超前预支护原设计方案为超前大管棚，根据地层特点优化为超前管幕。施工过程中，下沉速率明显，将锁脚锚管直径由 ϕ42 mm优化为 ϕ60 mm，根数增加至 4 根/处。

3.2　技术措施

(1)地质补勘。在施工图阶段，针对不良地质区域及软弱地层应利用必要的措施(如补勘等方式)最大限度地获得设计所需的技术参数，准确掌握各项地质参数，如标准贯入度、渗透系数、地基承载力等重要参数，为整个工程的设计和施工提供必要的资料保障。

(2)专家技术论证。对于广州市轨道交通十三号二期工程所采取的工法特殊，加之地层复杂，施工技术难度大，为保证项目施工生产顺利进行，各施工单位成立集团公司层面技术专家组。

在设计方案阶段，通过组织专家咨询会，充分论证设计方案的可行性，选择安全、合理的断面尺寸

表 1　纪念堂站周边管控级别及实施情况

序号	风险名称	管控级别	实施情况	备注
1	东风路老旧供水管沉降爆管风险	一级	正在实施	
2	横通道、小导洞及洞内成桩施工风险	二级	正在实施	
3	周边建(构)筑物沉降风险	三级	正在实施	

表 2　地表沉降量分阶段统计

施工阶段	小导洞管棚施工			导洞开挖			施工期间地表累计沉降量/mm
	沉降量/mm	施工耗时/d	沉降速率/(mm·d^{-1})	沉降量/mm	施工耗时/d	沉降速率/(mm·d^{-1})	
I 号导洞	－36.59	45	－0.81	－54.24	93	－0.58	－90.83
II 号导洞	－60.34	39	－1.55	－41.47	86	－0.48	－101.81
III 号导洞	－47.24	40	－1.18	－45.06	81	－0.56	－92.3

注：施工阶段为各个导洞各阶段沉降量总和。

及支护参数,降低施工风险。

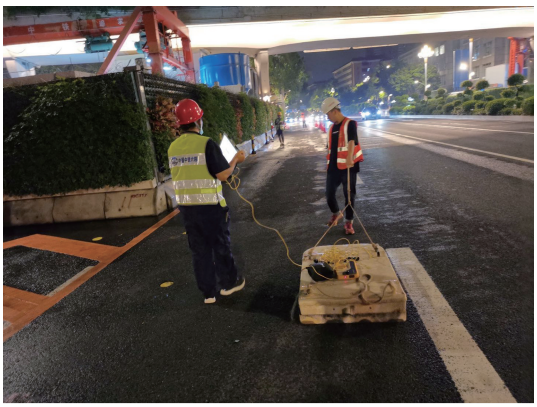
3.3 过程控制措施

根据广州城市轨道交通矿山法工程风险管控要点要求,严格遵循“明地质、管超前、严注浆、弱爆破、短开挖、强支护、快封闭、勤量测、控变形”二十七字方针,全过程坚持信息化施工。

(1)明地质。车站施工前结合现有地质初勘、详勘成果,采用水平超前钻孔、地质雷达等探测方式对现场工程地质条件进行判定。现场探测可有效对前方组段探测范围地质水文情况做出综合预报,从而降低工程开挖风险。如图 2 所示。

(2)管超前。车站小导洞及扣拱超前均采用 ϕ108 mm,t=6 mm 超前大管棚。

管棚成孔方式优化:在首段管棚施工过程中,现场管棚成孔方式为风钻成孔,此方法成孔主要依赖于高压风冲射配合冲击钻成孔,在孔内高压风对周边土层扰动较大,施工前期对应地表立即反应较大沉降,承包商根据地层及现场施工情况、监测情况综合分析后,选用更适合软弱地层中成孔的长螺旋钻杆,施工扰动较小,管棚成孔率大大提高,极大降低管棚施工过程中周边地表的沉降。



(a) 地面雷达探测

(b) 隧道雷达探测

图 2 地面、隧道地质雷达探测

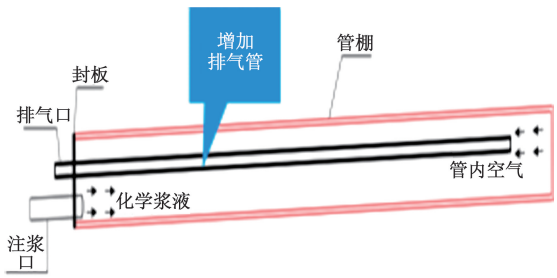
封堵注浆:结合地层失水易收缩,从而引起地面沉降,管棚施工采用“跳钻跳注、一钻一注”的成孔、注浆方式,从而减少地层失水,控制地面沉降,管棚注浆施工时增设排气孔,注浆期间对根据钻孔直径及孔深对理论注浆量进行计算,满足要求后停止注浆,对注浆量不满足要求的管棚段进行补注浆。如图 3 所示。

由于纪念堂站地质不均匀,局部存在较硬岩层夹层,在管棚成孔过程中可能存在偏钻、无法钻进、钻进角度偏差过大等情况,开挖前针对现场施工情况,提前编制《管棚失效处置方案》,保证在开挖过程中遇到异常情况能够及时有效的应对,确保开挖安全,加快封闭时间,降低地表沉降。

(3)严注浆。初期支护封闭后,及时进行初支背后回填注浆,提高初支结构受力,减少地面沉降量。注浆压力控制在 0.2~0.5 MPa,根据实际情况及时调整修正,严防压力太大出现地面隆起现象,安排专人对注浆过程进行旁站,若出现异常,立即停止注浆。

严格落实检查制度:① 在每循环喷锚完成后对上一循环初支背后喷锚情况进行检查,相关检查效果影响资料上传至工作微信群,若存在空洞、不密实等情况,现场要求工人进行补喷并预埋注浆管;② 根据掌子面渗水情况,对初支背后注浆管进行适

(a) 注浆



(b) 排气管示意图

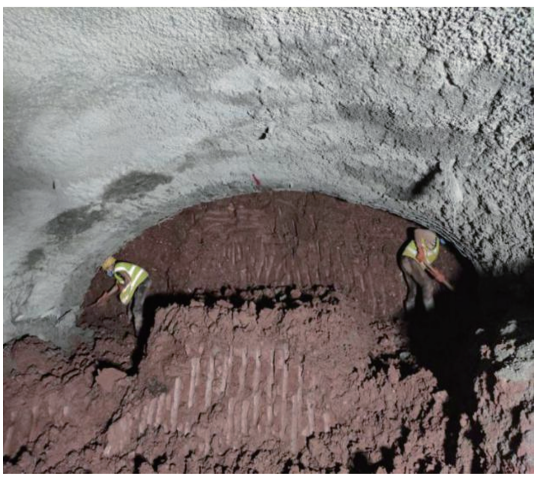
图 3 管棚注浆及排气管示意图

当加密，为后期隧道内渗水点封堵做好准备工作。

二次注浆：针对隧道渗水点附近注浆管进行二次注浆，减少隧道周边土体失水，避免周边土层失水干缩，从而控制地面沉降。

深层注浆：针对沉降较大部位，联系专业地质雷达探测单位对地面及初支背后进行扫描探测，根据探测结果在初支结构上取孔径向打设深层注浆管，进行深层注浆。如图 4 所示。

(a) 初支注浆



(b) 人工修边

(c) 拱架验收

图 4　暗挖隧道注浆、修边及拱架验收

(4)短开挖。纪念堂站暗挖施工均采用“上下台阶预留核心土法”进行开挖，上台阶每循环开挖 0.5 m，台阶长度为 3～5 m，采用人工配合机械开挖。掌子面开挖前必须签发动土作业令，经监理同意后才能开挖作业，施工、监理对开挖全程旁站，严格控制开挖进尺，人工修边、防止超挖，减少对土层的扰动，保证掌子面土体稳定。

(5)强支护、快封闭。①由于暗挖隧道拱脚位于软弱地层中，将原设计 ϕ42 mm 锁脚锚管变更为 ϕ60 mm 锁脚锚管，进一步加强暗挖隧道支护强度，控制围岩变形，减小地面沉降。②设置工序耗时预警机制：现场严格把控工序衔接问题，设置工序耗时预警机制，从人员、材料、机械、施工方法、环境等诸多影响因素多方面着手控制，确保各道工序之间衔接顺畅，确保掌子面及时封闭。③每循环开挖完成后立即进行初喷，对周边围岩快速形成初期支护，进一步降低周边围岩变形情况，从而控制地面沉降。如图 5 所示。

(6)勤量测。现场坚持监控量测数据反馈指导施工原则，通过埋设洞内、地表沉降、收敛、位移、水位监测，周边建(构)筑物变形监测及土体分层竖向

(a) 掌子面初喷

(b) 加强锁脚

图 5　暗挖掌子面初喷与锁脚防护

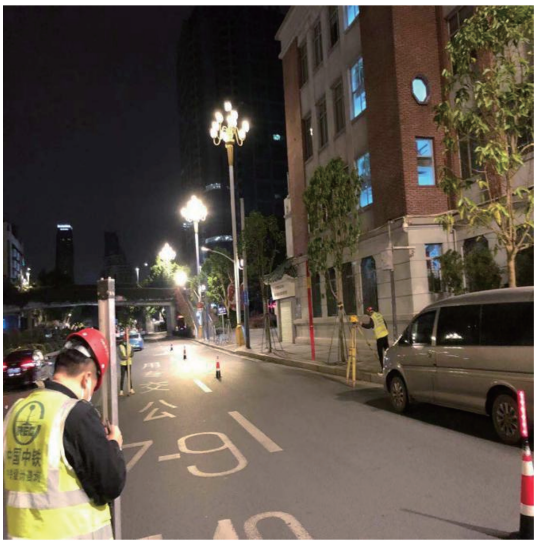
位移监测点,在开挖完成后及时通知监测人员对洞内、洞外进行监测,根据监测数据分析施工过程中可能存在的问题并及时调整。如图 6 所示。

(7)控变形。

纪念堂站变形情况:车站横通道及小导洞施工期间,地表沉降多次出现速率或累计值预警,参建各方及时召开预警分析会并分别于 4 月 29 日、6 月 10 日、7 月 26 日、11 月 15 日四次召开专家论证会,根据专家分析判断,洞内及周边管线、建筑物均处于安全稳定状态,专家建议可适当调整地表沉降控制值,并提出针对性措施。

措施落实情况:针对纪念堂站中导洞区域地层进行地质补勘,于 10 月 25 日已完成中导洞上方补勘孔位 22 个,补勘深度为 11 m。如图 7 所示。洞内初支渗漏点进行深层打孔注浆地面雷达扫描及无空洞现象如图 8 所示。

(a) 洞内监测



(b) 地表监测

图 6　纪念堂站洞内及地表监测

根据补勘揭露地层显示,纪念堂站上方杂填土层厚为 4～6 m,淤泥质土层厚为 2.4～3.5 m,自稳性差,局部夹杂砂层,受到下方施工扰动后极易造成地表较大沉降,管棚施工期间曾出现不明涌水。通过在地面对不良地层进行注浆加固,加固深度为 6～8 m,注浆压力为 1.0～1.5 MPa,抑制住了沉降发展,确保后期施工地面的安全,如图 9 所示。

4　实施效果与原因分析

4.1　实施效果

通过对纪念堂站小导洞施工期间地表沉降最大点位 DC1003 进行分析,地表测点 DC1003 位于 2 号导洞上方,目前累计沉降为－101.81 mm,距离其最近点位 SC04(深层沉降点,埋深为 5.3 m,底部位于地层)目前累计沉降值－21.86 mm,在小导洞施工期间沉降趋势基本一致,在小导洞作业面通过该断面以后,深层测点 SC04 沉降趋势明显变缓,但地表测点 DC1003 沉降趋势依旧很大,深层测点 SC04 与 DC1003 各阶段沉降趋势如图 10 所示。

通过沉降趋势图结合车站地质情况分析,在小导洞施工期间,上方地层受到扰动时,导洞上方土体出现整体沉降,待小导洞作业面通过该断面后,小导洞拱部残积土层在不受到扰动后,较为稳定,但上方杂填土层及淤泥质土层仍不能稳定,沉降周期较长。

通过阶段性监测数据分析得出结论:横通道施工阶段,地表及拱顶均存在整体沉降趋势,各阶段变化趋势一致,下沉速率缓慢,目前安全可控,需要持续进行监测。

4.2　原因分析

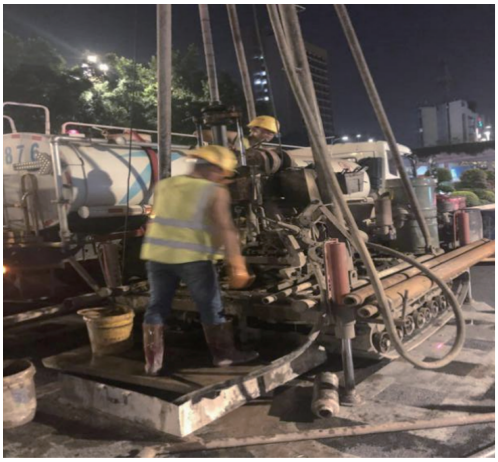
(1)纪念堂站处于广州市“红层”区,拱顶地质为软塑状粉质黏土层,上方淤泥质土层厚为 2.4～3.5 m,杂填土层为 4～6 m,局部夹杂砂层;该地层对下方暗挖施工反应较为敏感,且受到扰动后再次恢复稳定周期较长。

(2)II 号导洞上方测点受到 3 个导洞施工共同影响,故区域地表测点 DC1003 沉降值最大。

(3)管棚及导洞施工期间导致上方淤泥质地层失水干缩,从而引发较大沉降。如图 11 所示。

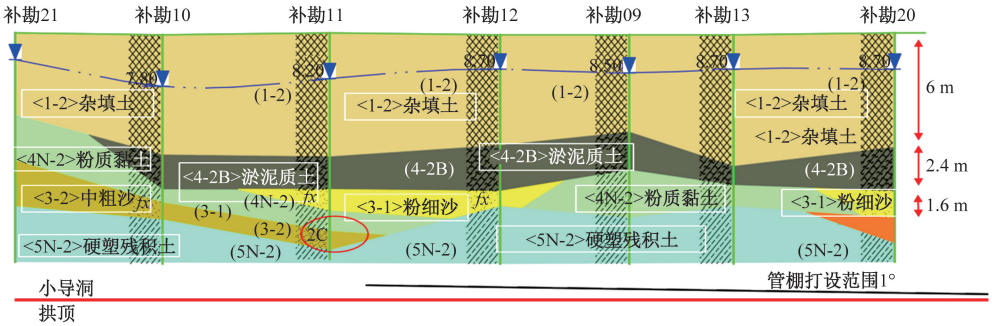
5　结论

经过设计、施工等多方的积极配合,十三号线二期纪念堂站暗挖小导洞全部贯通,在全线 6 座暗



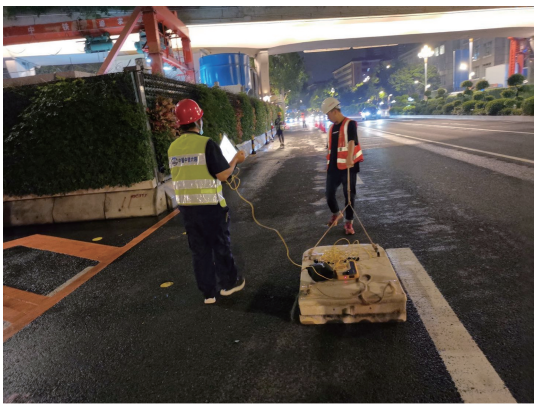
(a) 勘察外业

(b) 岩芯



(c) 柱状图

图 7　纪念堂站地面补充勘察



(a) 地表雷达扫描

(b) 洞内注浆

图 8　地表及洞内地质雷达扫描

(a) 地表注浆

(b) 暗挖上方注浆

图 9　地面注浆预加固

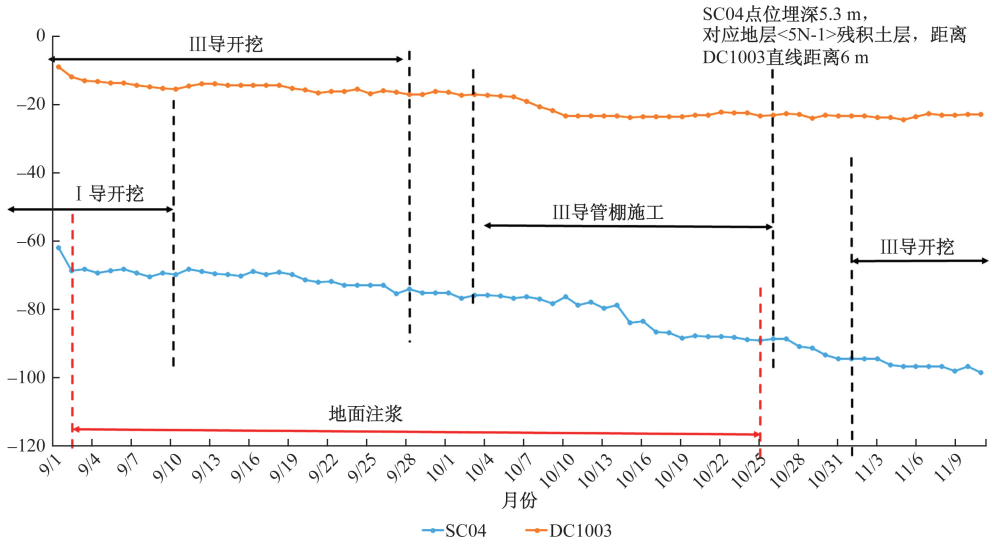
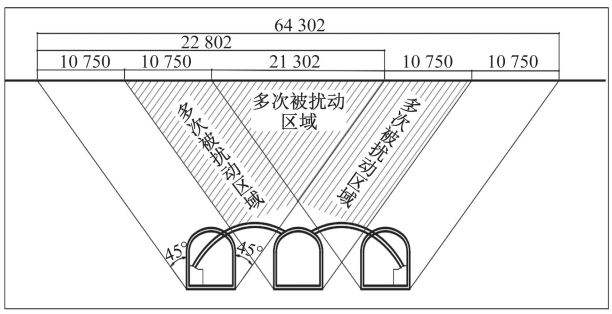


图 10　DC1003 与 SC04 分阶段沉降趋势



(a) 扰动范围示意图

(b) 小导洞暗挖施工贯通

图 11　小导洞扰动范围与暗挖施工贯通

挖车站中首先实现导洞全部贯通，为后续中边桩及扣拱施工提供了条件。结合纪念堂车站的施工沉降处置情况，暗挖施工必须紧密配合设计单位，想方设法摸清地质，根据地层情况优化设计方案；施工过程中严格按图施工，严格按方案落实；加密监测，出现异常，及时分析原因并采取必要应对措施；重视风险管控，认真总结分析所采取控沉措施，做好上下联动、加强应急演练。暗挖施工，无捷径可走，稳扎稳打、确保安全前提下才能保证的进度。

参考文献

[1] 徐顺明，陈建党，陈巨武，等. 广州地铁纪念堂暗挖车站分层与深层土体沉降监测分析[C]//中国土木工程学会 2021 年学术年会. 长沙：中国土木工程学会，2021：1.

[2] 吕建兵，卢鉴钧，李现朋，等. 中心城区富水软弱地层地铁车站洞桩法开挖地表变形规律研究[C]//2022 年工业建筑学术交流会. 广州：广东工业大学土木与交通工程学院，2022：6.

[3] 阮艳妹，李进，袁炳祥，等. 分离岛式地铁车站交叉洞群施工的周边环境效应分析[J]. 科学技术与工程，2023，23(26)：11405-11413.

[4] 詹涛，吴波，吴兵兵，等. 紧邻浅埋暗挖地铁隧道地下密集管线及土层变形[J]. 科学技术与工程，2023，23(11)：4755-4764.

[5] 张丽丽，张旭，成鹤，等. 地铁暗挖隧道密贴下穿污水箱涵变形特征研究[J]. 科学技术与工程，2022，22(20)：8921-8929.

[6] 苏玥，叶斌. 基于上海软土模型暗挖法隧道施工的力学特性[J]. 科学技术与工程，2022，22(25)：11137-11146.

[7] 朱建峰，翟利华，史海欧，等. 洞桩法在广州地铁中的应用及下穿既有隧道可行性评估[J]. 市政技术，2019，37(4)：164-167.

[8] 苏辉. 蒙华铁路万荣隧道粉细砂地层施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文)，2020，40(S2)：225-232.

[9] 衡明欣，徐红玉，何小利. 下穿既有引桥地铁连拱通道施工方案优选[J]. 河南科技大学学报(自然科学版)，2019，40(6)：50-56.

Risk Control Technology for Underground Excavation Construction of SubwayMemorial Hall Stations in Complex Environments: Taking the Memorial Hall Station of Guangzhou Metro Line 13 Phase II Project as an Example

CHEN Juwu, XU Shunming

(Guangzhou Metro Group Co. Ltd., Guangzhou 510330, China)

Abstract: There are many underground excavation stations using the arch cover method in Guangzhou Metro engineering. Due to the presence of weak strata such as sand layer, muddy clay and silty clay at the top of the underground excavation stations, they generally have characteristics such as high water content, high compressibility, low permeability, and low strength. During the construction phase, they are prone to significant deformation, which will cause tunnel collapse and damage to surrounding buildings and facilities, resulting in serious loss of life and property, and subsequently causing significant social impact. Taking the Memorial Hall Station in a complex environment as the object of construction risk discussion, a reasonable design and construction plan was adopted to reduce construction risks, while increasing geological exploration, deep grouting, and construction monitoring methods to achieve good results. The hidden excavation station in weak strata was analyzed and summarized, providing a basis for the construction safety of the hidden excavation station.

Keywords: underground excavation station; arch cover method construction; construction monitoring; risk control; construction safety