

澳门轻轨延伸线横琴线隧道盾构区间施工关键技术研究

马 强

(中国土木工程集团有限公司,北京 100038)

摘要:以澳门轻轨延伸线隧道盾构区间施工为研究背景,针对盾构隧道穿越建(构)筑物、盾构接收以及联络通道冷冻法施工3个方面的施工关键技术展开研究,盾构穿越建(构)筑物段,采用MJS工法桩加固隔离,并控制土压力、盾构推力等掘进参数,运用二次注浆控制地表变形;盾构接收段分5个阶段控制盾构推力、推进速度和刀盘转速等掘进参数;联络通道冷冻法施工段则从冻结范围、冻结孔布置、泄压孔布置以及制冷参数方面提出了相应的施工技术。结果表明:所提出的施工关键技术保证了隧道盾构区间的顺利贯通,该成果可为类似条件地铁盾构隧道提供参考。

关键词:澳门轻轨;横琴线;盾构施工;下穿建筑;联络通道;盾构接收;冷冻法

中图分类号:U231⁺.3;U455.43

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)02-0054-08

doi:10.13402/j.gcjs.2024.02.024

Research on key technology of shield section construction of hengqin line tunnel of macao light rail extension line

MA Qiang

(China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the research background of the construction of the shield section of the Macao LRT extension line tunnel, the key construction technologies of the shield tunnel crossing buildings (structures), the shield reception and the freezing construction of the connecting passage are studied. The shield tunnel crossing buildings (structures) section is reinforced and isolated by the MJS construction method piles, and the excavation parameters such as earth pressure and shield thrust are controlled, and the surface deformation is controlled by secondary grouting. The shield receiving section controls the tunneling parameters such as shield thrust, propulsion speed and cutter head speed in five stages. The freezing method construction section of the connecting passage puts forward the corresponding construction technology from the freezing range, freezing hole layout, pressure relief hole layout and refrigeration parameters. The research results show that the proposed key construction technologies ensure the smooth penetration of the tunnel shield section, and the research results can provide a reference for the metro shield tunnel under similar conditions.

Key words: Macao light rail; hengqin line; shield construction; underpass buildings; liaison channel; shield receiving; freezing method

为缓解日益严重的城市地面交通拥堵问题,大量的城市地铁得以修建。盾构法因其机械化作业程度高、施工安全性高、地层适应性强、施工噪音和污染小等特点,成为地铁区间隧道施工中应用最为广泛的工法之一^[1-2]。地铁区间隧道作

为长距离的线性工程,在高度开发的城区地下穿越时,穿越的环境风险点总多,加之地质环境的复杂性,使得盾构施工面临诸多挑战,研究盾构穿越敏感风险点、复杂地质条件下的掘进参数等关键施工控制技术具有十分重要的意义^[3]。

收稿日期:2023-03-22

作者简介:马 强(1992—),男,工程师,从事科技管理工作。

李天野^[4]应用数值模拟的手段研究了盾构隧道下穿高速铁路桥梁的扰动效应,计算的扰动模型中考虑了地层损失率的影响,指出盾构下穿后桥梁墩基在深度方向上的变形较大,而横向偏移量则几乎为零;陈志敏等^[5]研究了富水砂砾和粉质黏土地层条件下,盾构区间隧道穿越密集建构筑物时建筑物的沉降规律,研究采用了数值分析的方法模拟了施工过程,并针对计算结果提出了注浆加固和筏板加固的方案;王兴龙等^[6]研究了软土地区盾构法施工的综合管廊施工问题,针对渗漏风险极高的高频盾构接收技术展开研究,提出了改良洞门密封装置及补强加固的施工方

案;周天豪等^[7]针对不具备地面加固条件下的盾构接收问题,运用冻结法的施工方案加固地层,盾构在接收过程中先在冷冻土体内推进,借助钢套筒过渡环完成接收,研究成果已成功应用于苏州地铁6号线的施工中。

综合现有文献可知,大量的研究主要集中在盾构区间穿越风险点的变形控制和盾构接收方面,对于盾构区间面临穿越敏感建筑、特殊环境和复杂地层时的具体施工方法和控制参数较少涉及。基于此,本文以澳门轻轨延伸线隧道盾构区间施工为研究背景,对盾构隧道穿越建(构)筑物、盾构接收以及联络通道冷冻法施工3个方面的施工关键技术进行研究,研究成果可以为复杂地质条件下盾构穿越密集建筑物的施工、临近周边建筑的地铁联络通道冷冻施工提供参考。

1 工程背景

澳门轻轨延伸横琴线是广珠城际与澳门轻轨无缝换乘重要配套工程,同时也是内地及珠三角地区联系澳门的重要客运通道。如图1所示,澳门轻轨延伸横琴线包含澳门侧和横琴侧,起于澳门函城边检大楼中轴空间 HE1 站(高架站),出站后由高架沿莲花大桥南端转为地下线向西下穿十字门水道,上岸后在珠海横琴口岸中间禁区内设 HE2 站(地下站),与广珠城际车站接驳换乘,全线长约为 2.20 km,包含两座车站和 1 个区间。

澳门侧建设地点位于澳门莲花路(莲花口岸以西,莲花大桥南侧路段)、莲花口岸及莲花口岸以东至澳门轻轨函仔线接驳口。HE1 站~盾构隧道接收井之间具体工程包括盾构接收井、明挖覆盖段、U 型槽(过渡段)、高架桥段、HE1 站。轨道里程约为 1+300~2+136,总长度约为 836 m。

横琴侧建设地点位于横琴口岸过境大厅东侧道路下方。HE-2 站~盾构接收井之间具体工程包括明挖覆盖段、HE2 站、盾构始发井、盾构区间。HE-2 车站长度为 408.8 m,盾构区间轨道里程约为 0+378.635~CK1+284.783,总长度约为 906.148 m,隧道设计为单洞单线双向运营隧道,采用通用型衬砌环,管片内径为 7.0 m、外径为 7.7 m,管片厚度为 350 mm,环宽度为 1.2 m,环向分 6 块,即 3 块标准块(中心角 67.5°),两块邻接块(中心角 68°),1 块封顶块(中心角 21.5°),



图1 澳门轻轨延伸横琴线平面布置

管片,皆为双面楔形);衬砌环环缝采用 16 根 M30 螺栓连接,纵缝采用 12 根 M30 螺栓连接;管片环与环之间采用错缝拼装。隧道覆土厚度约为 9.7~22.1 m,区间纵坡为“V”字坡,隧道出 HE-2 站大里程端后先以平坡敷设,随后以 35.000‰下坡至最低点,后再分别以 11.000‰、34.000‰坡度上坡进入澳门境内盾构工作井。根据盾构物件穿越地层的地质参数以及设计文件等相关要求,结合盾构选型专家会意见,HE2 站~HE1 站盾构区间选择采用 DZ1016 型铁建重工盾构机。

2 隧道盾构区间工程地质特征

场区位于海积平原区,区间西段横琴岛区段原始地形为滨海滩涂,地表现已普遍填土平整,地势平坦开阔,地面一般高程为 2.53~3.53 m(M. S. L.);区间东段为珠江水系十字门水道入海口,在莲花大桥附近水面宽度约为 450~500 m,主航道河底标高约为 -4.48~-6.48 m(M. S. L.)。地层由上至下依次为人工填土、粉砂、淤泥、淤泥质黏土、粉质黏土、细砂、粗砂、生物碎屑、砾砂。区间隧道主要穿越(1-1)淤泥、(1-2)淤泥质黏土、(2-3)粉质黏土、(2-2)细砂。盾构隧洞场区覆盖层物理力学指标如表 1 所示。

对本工程影响较大的浅部孔隙水主要赋存于冲填土(粉砂)层中,该层为场地内浅部主要透水

层及含水层。浅部孔隙水主要受大气降水及地表径流影响,水位受气候、季节变化较大。此外,海洋潮汐对浅部孔隙潜水的补给、径流、排泄亦有一定影响。分布于淤泥层以下的细砂、粗砂及砾砂层透水性及赋水性好,地下水多具承压性。盾构隧道区间段之陆地段盾构掘进时,十字门水道地表水会向洞内补给,施工时需要注意地表水对隧洞开挖及支护的影响。

3 隧道盾构区间下穿(构)建筑物施工技术控制

盾构自 HE2 站盾构始发井以缓和曲线切线始发后,以 210 m 小半径(全长 373 m)后先后下穿边防巡逻道,横琴口岸 F1 区查验平台(侧穿 F1 区桩基础群 3.6~5.1 m),莲花大桥 N 匝道、M 匝道(距离 N 匝道、M 匝道桥桩基础 4.0~7.4 m)、出境匝道高架桥(距离引桥桥桩基础(承台)距离为 2.4~3.56 m),随后朝东北方向下穿十字门水道,上岸后以 530 m 曲线半径转向东,止于澳门莲花路附近环岛中间绿化带处的盾构工作井。因盾构始发前需完成全部地层加固施工,沿线管线均将于区间加固施工开始前完成迁改,故盾构掘进过程中无受影响的地下管线。隧道盾构区间下穿建筑物如图 2、3 所示,图 3 中地质断面中的层底标高单位为 m,其余数值的单位为 mm。

为避免高压旋喷桩施工以及盾构隧道掘进时

表 1 盾构隧洞场区覆盖层物理力学指标

地层代号	名称	状态	土的静止侧压力系数	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	凝聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	标准贯入/击	地基承载力基 本值/kPa	钻孔灌注桩	
										极限侧压力 标准值/kN	极限端阻力 标准值/kN
(0)1-1	填筑土	松散	0.45	19.0	10.00	10.00	5.83	6.2	—	20	650
(0)1-2	冲填土	松散	0.35	19.4	0	27.25	3.97	7.5	—	25	650
(1)1-1	淤泥	流塑	0.72	16.3	4.55	2.72	0.000 38	1.1	40	15	—
(1)1-2	淤泥质黏土	流塑	0.72	17.2	6.87	4.46	0.000 30	2.5	60	24	—
(1)2-3	粉质黏土	可塑	0.43	18.9	23.13	15.92	0.002 69	11.4	120	60	750
(2)2-1	细砂	稍密	0.40	19.0	—	30.1	5	11.4	120	35	900
(2)3-4	中砂	中密	0.35	19.5	—	32.89	40	16.0	200	60	2 000
(2)4-3	粗砂	中密	0.35	20.5	—	35.54	40	21.1	200	85	2 700
(2)5-3	砾砂	中密	0.35	20.1	—	36.02	30	22.1	200	125	2 600
(2)6	生物碎屑	稍密	0.40	—	—	—	—	11.7	40	—	—

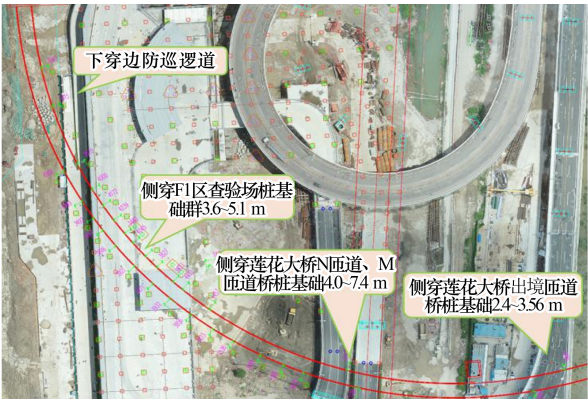


图2 澳门轻轨延伸横琴线盾构区间
下穿建（构）筑物平面示意

对莲花匝道桥的影响，疏散井北侧下穿莲花入境匝道桥段区间加固在区间隧道两侧设置 1 m 宽的 MJS 加固作为隔离桩，竖向加固范围为隧道下半断面，水平加固范围为隧道外扩 0.15 m；隧道外 0.15 ~ 1.15 m 采用 MJS 加固。MJS 加固需提前实施，在达到效果后方可实施内部的旋喷桩加固；其余区间隧道采取注浆加固，水平方向隧道外轮廓 2 m 范围内加固，在小半径范围采取全断面注浆加固（隧道顶以上 3 m 至隧道底 5 m），在直线段采取下半断面加固（隧道中心线至隧道底以下 5 m）。

盾构掘进期间，区间加固区域土体应有 0.8 MPa 以上的承载力。

为确保地面建筑物的安全，在盾构掘进施工时应根据地层条件和掘进状况确定盾构施工技术参数，将掘进对构筑物的扰动降到最低。通过既有建筑物、桥梁道路的掘进速度按 4.8 m/d 控制，根据地质情况及隧道埋深情况，按理论计算公式(1)得到刀盘正面平衡压力^[8-9]。

$$P = k \times k_0 \times \gamma \times h \tag{1}$$

式中： P 为平衡压力，kPa； γ 为土体的平均重度，取 18 kN/m³； h 为隧道顶埋深，m； k_0 为土的侧向静止平衡压力系数，取 0.60； k 为修正系数，其范围为 1.1 ~ 1.3。

在理论计算的基础上，土压力设定可适当提高 0.01 ~ 0.02 MPa。本段区间隧道下穿建筑物覆土厚范围为 10 ~ 18 m，修正系数范围 k 取 1.2 进行土压计算。土压 P_1 (埋深 10 m) = 1.2 × 0.6 × 18 × 10 / 1 000 = 0.129 6 MPa；土压 P_2 (埋深 19 m) = 1.2 × 0.6 × 18 × 18 / 1 000 = 0.234 MPa，正面平衡压力随盾构掘进的进行，隧顶埋深的变化需及时进行调整，确保盾构土压满足要求。

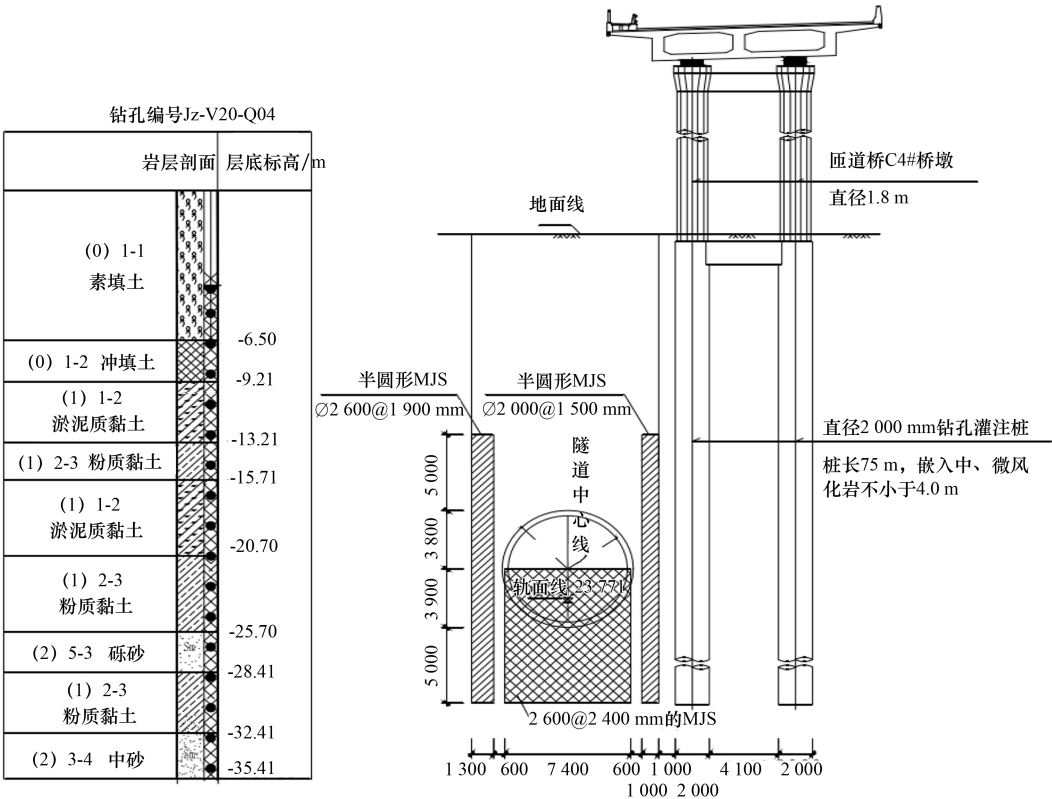


图3 澳门轻轨延伸横琴线盾构区间侧穿桥梁立面

mm

为确保盾构掘进经过后,脱出盾尾的衬砌与土体之间的空隙能够及时填注饱满,以尽可能地降低地层的扰动和地表不均匀沉降量,需要对衬砌背部空隙进行同步注浆^[10]。同步注浆所用的砂浆采用商用砂浆,盾尾同步注浆理论量为 4.44 m^3 ,根据珠海市地方标准要求及施工经验,每环实际注浆量应为理论注浆量的150%~200%,故线路注浆量控制值为 $6.65 \sim 8.88 \text{ m}^3$ 。依据本标段线路埋深及地质情况,注浆压力可取1.1~1.2倍的静止水土压力,始发掘进阶段,初始同步注浆压力设定为0.10~0.15 MPa;正常掘进时注浆压力设定为0.2~0.25 MPa^[11]。

为应对该工程区间下穿地面建(构)筑物,特设计在盾构隧道管片左上侧或者是右上侧部位增设注浆孔,利用注浆孔(位于盾构吊装孔位置)预埋注浆管,在管片脱出盾尾5环位置进行二次注浆,二次注浆采用后注浆的方式,二次注浆管必须穿越同步注浆层,根据现场实际情况确定二次注浆频率及位置。全环新增注浆孔10个,共有16个,考虑对隧道结构影响,根据现场试验,同步注浆的注浆量和注浆压力均应协同同步控制,注浆压力一般不超过0.5 MPa,以连续注浆的方式作业^[12]。

二次注浆位置的选择与注浆对盾构尾部的影响程度、影响范围、是否有沉降或渗漏等因素有关,无特殊情况可以选择盾尾后5环衬砌进行注浆,如果此时盾尾位置出现超限沉降(1次沉降大于1.0 mm)或渗漏,则应采取监控量测措施进行评估,并在盾尾后5~15环衬砌进行加固注浆,以进一步控制工后变形。下穿既有构建筑物时,当日变化量小于2.0 mm时,沉降地段每环注入浆液 1 m^3 ,注浆以单液浆为主。当日变化量在2.0~5.0 mm时,先注入单液浆,后注入双液浆,以双液浆为主,注浆量大于 3 m^3 。当日变化量大于5.0 mm时,立即停止掘进,全力进入抢险阶段^[13]。

4 隧道盾构接收施工技术控制

澳门侧盾构工作井端头覆土约为13.4m,隧道洞身主要位于(1)1-1淤泥层中,为保证盾构接收安全,盾构工作井端1+268.208~1+283.283里程范围采用 $\varnothing 2\,600@1\,900 \text{ mm}$ 的MJS竖向加固和D1 000@800水平WSS加固(图4),

水平加固范围为隧道结构外4.1 m,竖向加固深度为隧道顶以上3 m至隧道底以下5 m。

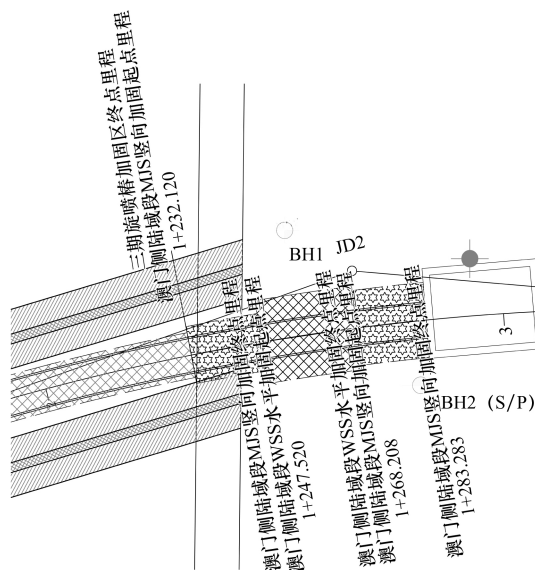


图4 盾构工作井端头加固平面图 m

在盾构接收段内,盾构掘进应时刻监视土仓压力,控制出土量,避免顶进压力的突变造成洞口范围内土体失稳、坍塌风险,同时需要采取一系列的措施来控制出土量并确保盾构施工安全,包括降低推力、减慢推进速度和刀盘转速等。顶进压力逐步减小直至0 MPa。一般而言,接收段盾构机推力控制范围为2 000~6 000 kN,土压控制范围为0~0.06 MPa,刀盘转速控制范围0.6~1.0 rpm,掘进速度控制范围为5~10 mm/min,扭矩小于2 000 kN·m,注浆压力<0.3 MPa。盾构接收段按照盾构机的掘进进程可以大致分为5个阶段,各个阶段的控制要求如下^[14]。

阶段I: 盾构过渡段掘进(离进站洞口50~15 m)

此阶段掘进掌子面与洞口之间的距离超过两倍洞径,对洞口土体的影响较小,为正常隧道掘进与进洞段的过渡转换,因此,该段的土仓压力和掘进速度按常规方法控制即可,并注重控制盾构的姿态,保证盾构掘进中心轴线与设计轴线的偏差控制在 $\pm 20 \text{ mm}$,并在逐步靠近洞口时,掘进速度逐步减至10~20 mm/min。

阶段II: 进站的第一阶段(离进站洞口15~2 m)

此阶段盾构机已掘进进入洞口加固体,为了减少盾构开挖扰动对洞口的影响,应密切关注洞口和地表的变形,盾构机的掘进速度应放缓至1 cm/min,同时避免大顶推压力对加固土体的稳

定性造成破坏，土仓压力应控制不超过 0.6 Bar，压力值应与水压值一致。

阶段Ⅲ：进站的第二阶段(离进站洞口围护结构里程 2 m ~ 20 cm)

此阶段为盾构机出洞的关键阶段，控制不良极易造成洞口垮塌和洞口渗漏，因此在掘进时掘进过程中，应密切关注盾构机刀盘切口的行程，考虑刀盘厚度尺寸，精确定位其具体位置，当盾构机刀盘与维护结构紧贴时，应停止推进，在盾构尾部 3 环衬砌处施作止水箍环，以控制地下水的侵入^[15]。

阶段Ⅳ：进站的第三个阶段(盾构机被推上接收基座 1.0 m)

此阶段为破洞门阶段，启动盾构机前，应清除洞门范围内的残渣及泥土后，随后对洞门范围内的围护结构进行刀盘破除，及时拼装盾尾衬砌管片，此阶段为防浆液从洞门流出，视情况减少或者停止同步注浆。破除洞门时，刀盘的转动速度根据切割情况进行确定，当土仓压力降低为零时，刀盘转至零位停止转动。盾构机通过密封环后立即收紧密封环的扇形压板，清除密封舱内的泥土^[16]。

阶段Ⅴ：进站的第四个阶段(继续拼装管片，盾构机完全推上接收架)

继续收紧密封装置，盾构继续前进，直至盾构机完全推上接收基座，同时恢复盾尾同步注浆，注浆浆液采用双液浆，浆液的胶凝时间为 20 ~ 25 s，以确保管片壁后注浆饱满。盾尾留在最后一环管片 30 ~ 50 cm，在最后 5 环注浆封堵洞门，封堵完

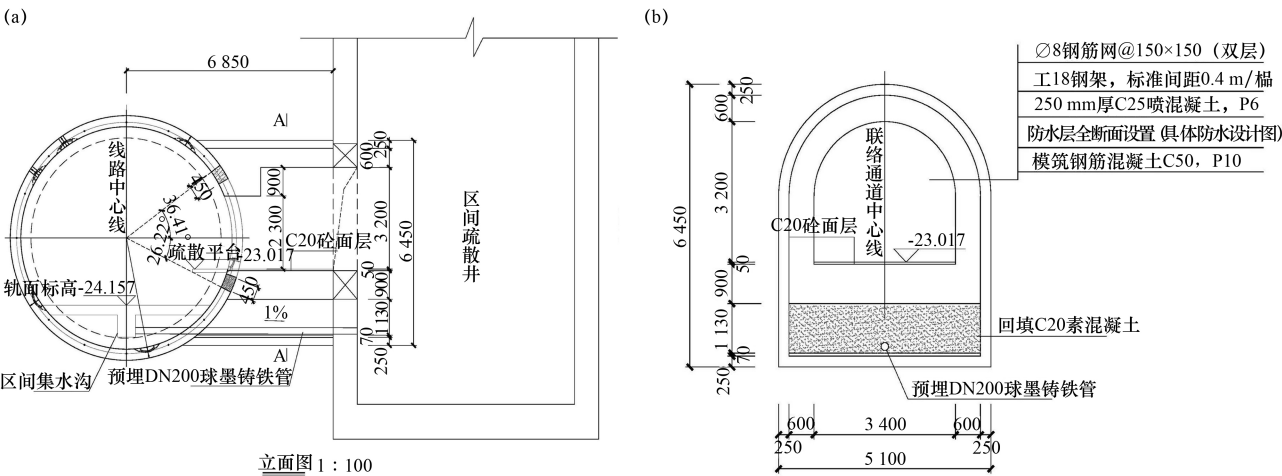
成后盾体全部推上托架。

5 隧道盾构接收施工技术控制

联络通道位于琴海东路东侧的空地正下方。联络通道东侧有高架桥，联络通道距桥墩水平距离约为 20 m，周边无重要管线，联络通道地面位置如图 5 所示。联络通道采用矿山暗挖冻结法施工，施工前需对周围地层采取可靠的加固措施。联络通道结构为曲拱直墙断面。联络通道净宽设计为 3.4 m，门洞净高为 3.25 m。支护结构型式为复合式衬砌，初期支护由 250 mm 厚 C25 喷射混凝土、工字钢钢架、钢筋网组成；二次衬砌采用 600 mm 厚 C50、P10 模筑钢筋混凝土结构。初期支护与二次衬砌间设置全包防水隔离层。联络通道结构如图 6 所示。



图 5 联络通道地面位置



(a) 联络通道纵断面；(b) 联络通道横断面

图 6 联络通道结构

mm

冻结法的关键是保证温度场的稳定以及避免地下水的流失或冻融,因此,在施工前应应对隧道冻结环境进行数值模拟,采取稳态温度场对冻结壁交圈后的温度分布进行演算,施作冻结法时确保冻结区周围 200 m 范围内不进行降水施工,冻结圈内确保无地下水或地表水渗流的情况。联络通道冻结壁厚度控制为 2.5 m,冻结后土体的单轴抗压强度不小于 4.8 MPa,弯折抗拉强度不小于 2.2 MPa,抗剪切强度不小于 2.0 MPa^[17]。为保证冻土温度场平均温度不超过 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$,在冻结壁附近隧道管片内侧敷设保温层,保温层采用阻燃(或难燃)的软质塑料泡沫软板,导热系数不应大于 $0.04\text{ W/m}\cdot\text{h}$,吸水率不应大于 2%,且不得浸泡在水中。保温层厚度不应小于 30 mm,在 5~10 月间施工,敷设范围应超过设计冻结壁外轮廓 1 m 以上。

冻结孔单孔流量不小于 $5\text{ m}^3/\text{h}$;积极冻结 7 d 盐水温度降至 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;积极冻结 15 d 盐水温度降至 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;开挖时盐水温度降至 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,去、回路盐水温差不大于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[18]。冻结加固范围如图 7 所示。

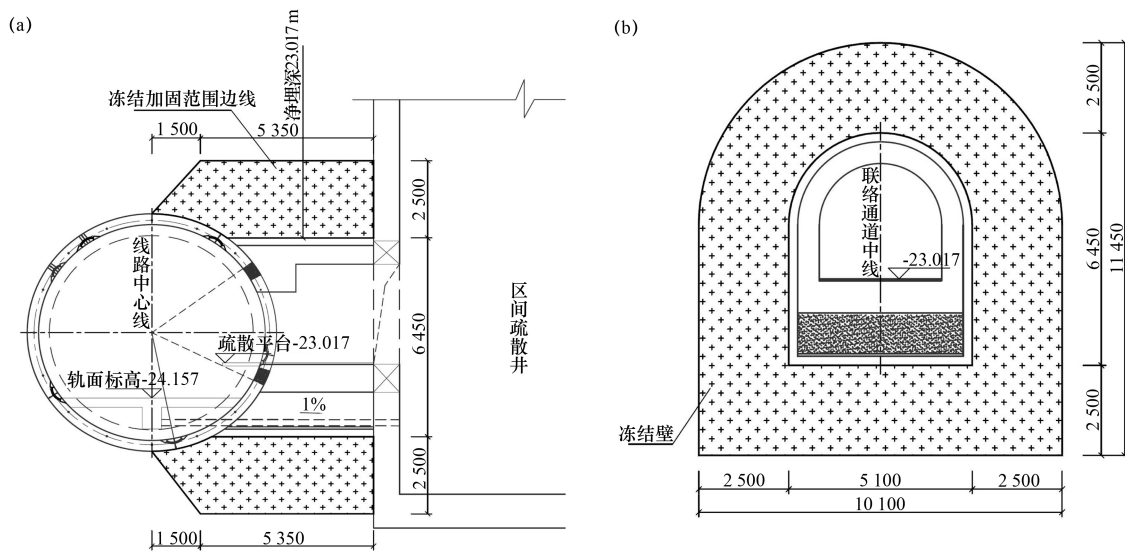
冻结孔从疏散井一侧打孔方式进行施工。冻结孔按上仰、水平、下俯 3 种角度布置。冻结孔施工前必须对要破除的开口位置及高程进行测量,确保定位准确。冻结孔开孔位置误差不大于 100 mm。冻结孔最大允许偏斜为 150 mm。钻孔施工前,应安装可靠、有效的防喷装置;施工冻结孔时的土体流失

量不得大于冻结孔体积,否则应及时进行注浆控制地层沉降。冻结管用 $89\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 低碳钢无缝钢管(GB8163),冻结管接头的抗拉强度不低于母管的 75%,并宜采用加内衬管的对焊连接接头^[19]。冻结孔钻孔施工结束,应根据冻结孔实际开孔位置和偏斜数据绘制冻结孔成孔图,以冻结孔控制间距作为是否需要补孔的依据之一。冻结孔的布置图 8 所示,施工时根据管片配筋情况和旁通道拟钻孔的实际位置,对钻孔孔位作少量调整。

联络通道设计测温孔设计 9 个,目的主要是测量冻结帷幕范围不同部位的温度发展状况,以确保冻结施工的安全和质量把控。测温管选用 $\varnothing 45\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 钢管;测温管长度为 $3.0\sim 4.1\text{ m}$ 。测温孔施工,采用二次开孔的方式,一开用 $\varnothing 63\text{ mm}$ 金刚石取芯钻头,安装孔口管与 DN50 球阀后,进行 $\varnothing 36\text{ mm}$ 金刚石取芯钻头二开开通,安装密封盒砸入 $\varnothing 45\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 测温管。联络通道在冻结帷幕封闭区域内通道均布置两个卸压孔,卸压管选用 $\varnothing 89\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢管,以确保冻结帷幕内的压力有效传递,积极冻结时间一般为 50~55 d,具体时间视冻结效果而定。

6 结 论

(1) 澳门轻轨延伸线隧道盾构区间穿越临近建(构)筑物易引发建筑物沉降、倾斜、设备漏水、土层喷涌和盾构故障风险;盾构接收段为粉砂层



(a) 联络通道地层冻结纵断面; (b) 联络通道地层冻结横断面

图 7 联络通道地层冻结范围

mm

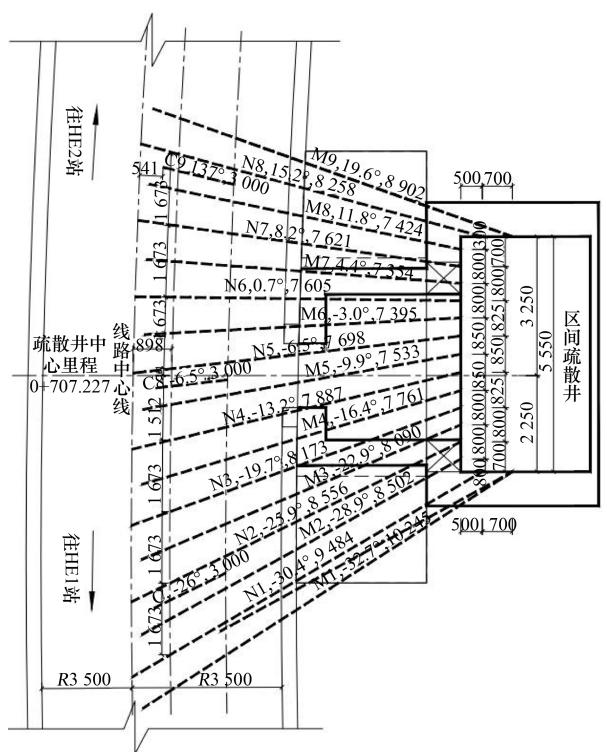


图8 联络通道冻结孔布置 mm

和淤泥层,加固不良或穿越接收不良易引发地下水涌入工作井,导致地面大面积沉降、盾构姿态突变、出洞段轴线偏离等风险;联络通道冷冻法施工易引发土层解冻、砂土突水涌内和洞内坍塌等风险。

(2) 盾构穿越建(构)筑物段采用MJS工法桩加固隔离,并控制土压力、盾构推力等掘进参数,运用二次注浆控制地表变形;盾构接收段分5个阶段控制盾构推力、推进速度和刀盘转速等掘进参数;联络通道冷冻法施工段则从冻结范围、冻结孔布置、泄压孔布置以及制冷参数方面提出了相应的施工技术。

(3) 研究表明,所提出的施工关键技术保证了隧道盾构区间的安全顺利贯通,建(构)筑物的沉降和倾斜控制在限制范围内,其成功经验可为类似地层和类似工况的地铁盾构隧道建设提

供参考。

参考文献:

- [1] 杨荟斯,刘涛,缪红彬,等. 盾构隧道近距离下穿对既有运营隧道影响[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(3): 263-271.
- [2] 乔世杰,李宏安,夏柏如,等. 双线隧道下穿桥桩沉降变形分析及控制措施[J]. 公路, 2020, 65(1): 281-286.
- [3] 陈志敏,范长海,张常书. 地铁盾构下穿建筑群施工地面建筑沉降控制方案及富水砂-黏地层沉降预测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 39-43.
- [4] 王继峰,刺宝成,孟祥丰,等. 盾构隧道下穿铁路框架桥施工变形规律及控制措施[J]. 公路, 2022, 67(3): 373-377.
- [5] 朱斌,王健,徐壮,等. 新建盾构隧道下穿既有构筑物施工的力学机理[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(4): 175-182.
- [6] 高永涛,张鑫磊,李建旺,等. 粉质黏土地层盾构隧道下穿河流地表变形研究[J]. 矿业研究与开发, 2022(6): 42-46.
- [7] 周天豪,邱国勇,王福兴,等. 富水砂层冻结法加固地层结合密闭式钢套筒盾构接收技术[J]. 建筑技术, 2022, 53(9): 1149-1151.
- [8] 王兴龙,陈瑞文,陈炯,等. 软土地区盾构高频次接收施工技术[J]. 施工技术, 2021, 50(14): 55-57.
- [9] 胡浩睿,赵立锋,孙广臣,等. 盾构钢套筒接收技术在苏州地铁富水含砂地层中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 197-203.
- [10] 屈天葵,张效次,廖正根,等. 联络通道冻结质量影响因素分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(Z2): 178-184.
- [11] 唐震东. 线路重叠交叉段下部隧道联络通道冻结法施工对上部隧道的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 92-96.
- [12] 董新平,于少辉,张毅豪,等. 地铁联络通道冻结法施工中涌水成因及防治[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 322-329, 340.