

富水粉细砂层盾构接收综合施工方法<sup>\*</sup>陈昱秉<sup>1</sup> 刘志贺<sup>2</sup> 肖方奇<sup>2</sup> 刘 伟<sup>2</sup> 刘念武<sup>1</sup> 甘晓露<sup>1</sup> 陈生汉<sup>3</sup>

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 310051, 杭州; 2. 中车建设工程有限公司, 100078, 北京;

3. 宏润建设集团股份有限公司, 311202, 上海)

**摘 要** [目的]为了解决郑州地铁 3 号线隧道工程施工中因不明障碍物导致刀盘受损而被迫停工的施工问题,有必要对富水粉细砂土层条件下盾构接收综合施工方法进行研究。[方法]介绍了盾构接收综合施工方案,综合运用了双环冻结法、积极降水、矿山法及盾构空推施工等方法,结合现场监测数据对冻结温度变化特性及关键施工技术进行了分析。[结果及结论]该综合施工方法在处理富水粉细砂土层条件下的盾构接收问题是安全有效的。采用双环冻结法,结合积极降水可以有效防止矿山法隧道的涌水、涌砂病害问题。在对内环冻结壁采用吹蒸汽解冻的过程中,会导致外环冻结壁温度上升约 5℃。当利用盾构空推法通过未完全化冻的矿山法隧道时,最大盾构推力为 26 500 kN,小于盾构推进摩阻力理论计算值,此时的地面位移及隧道变形均满足控制要求。盾构空推时,盾构外壳与内环未完全化冻土体交界处的温度维持在 3℃左右。当矿山法施工穿越冻结区时,距离隧道近处的地层产生了不同程度的沉降,而远离隧道的部分地层沉降趋势较为稳定。

**关键词** 地铁;隧道;盾构接收;施工方法

中图分类号 U442.55

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.026

**Comprehensive Construction Method for Shield Receiving in Water-rich Silty Sand Stratum**CHEN Yubing<sup>1</sup>, LIU Zhihe<sup>2</sup>, XIAO Fangqi<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, LIU Nianwu<sup>1</sup>, GAN Xiaolu<sup>1</sup>, CHEN Shenghan<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, 310051, Hangzhou, China; 2. CRRC Construction Engineering Group Co., Ltd., 100078, Beijing, China; 3. Hongrun Construction Group Co., Ltd., 311202, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] To address the issue of cutterhead damage and subsequent work stoppages caused by unidentified obstructions during the construction of Zhengzhou Metro Line 3

tunnel, it is essential to study comprehensive construction methods for shield receiving in water-rich silty sand stratum.

[Method] A comprehensive construction plan for shield receiving is introduced, incorporating techniques such as the double-ring freezing method, active dewatering, mining methods, and shield empty push construction. The temperature variation characteristics of freezing and key construction technologies are analyzed using on-site monitoring data. [Result & Conclusion] The comprehensive construction plan is proven to be safe and effective for dealing with shield receiving in water-rich silty sand stratum conditions. Adopting double-ring freezing method combined with active dewatering could effectively prevent issues related to water and sand inflows in mining method tunnels. During the steam thawing process of the inner ring freezing wall, the temperature of the outer ring freezing wall increases by approximately 5℃. When employing the shield empty push method through a mining method tunnel that is not fully thawed, the maximum shield thrust is 26 500 kN, which is less than the theoretical value of shield push resistance. At this point, the ground displacement and tunnel deformation all meet control requirements. During shield empty pushing, the temperature at the interface between shield casing and partially thawed inner ring soil remains around 3℃. When crossing the frozen zone using the mining method, different levels of land subsidence are observed near the tunnel, while the soil layer subsidence trend far away from the tunnel remains relatively stable.

**Key words** metro; tunnel; shield receiving; construction method

当盾构在地下掘进时,因复杂的周边环境及地质水文条件问题,盾构受困时有发生。在富水粉细砂地层中,粉细砂的黏聚力较小,自稳性差,容易受扰坍塌。在不良地质及水文条件下,端头加固法、降水施工法、积极冻结法及 MJS(全方位高压喷射)工法等是创造盾构接收条件常用的方法<sup>[1-2]</sup>。在富

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(52078466)

水软弱地层,尤其是饱和粉细砂层中,研究盾构接收问题具有较大的现实意义。

目前,北京、上海、广州、深圳等地的盾构隧道施工已积累了相对成熟的经验和技術,但对于富水粉细砂地层中的施工经验仍较少。针对此类软弱地层的隧道盾构施工,已有文献进行了研究。文献[3]对第三系粉细砂岩深大基坑局部冻结加固设计进行了研究,确定了适用于该特殊地层的冻结方案。文献[4]研究了盾构空推过矿山法隧道段的施工技术,研究表明,对于复杂地质,采用该方法可以较好地保证盾构施工安全和质量。盾构空推法常用于各种盾构接收方案<sup>[5-6]</sup>。

目前,已有研究大多集中于粉细砂层中盾构接收方法的常规运用,针对受困盾构接收的工程实例分析及相应综合施工技术的研究较少。鉴于此,本文以郑州地铁3号线一期工程为例,对受困盾构空推过矿山法隧道及双环冻结法的综合施工方法关键技术进行研究。结合理论计算与实际监测数据,研究冻结帷幕下矿山法施工隧道受力及变形特性,以及双环冻结壁内、外环不同冻结状态下冻结壁温度的变化特性与盾构推力的变化情况。本文研究可为类似富水粉细砂软弱层土压平衡盾构受困的接收解决方案提供借鉴和指导。

## 1 工程概况及地质条件

### 1.1 工程概况

在盾构施工过程中,郑州地铁3号线某地铁站1号盾构机遇不明障碍物停机,工程所用为川崎土压平衡盾构机,拆机后难以维修。因此,经研究决

定在1号盾构机刀盘前约2 m位置处增设一座盾构吊出竖井。

新增竖井位于货运站内,北侧距离铁路约95 m,南侧距离起重机行车轨道约55 m;竖井上方1根埋深约2 m的DN 200 mm消防水管已改迁;竖井结构30 m范围内的货运铁路线已截断,待竖井封顶回填后恢复。

### 1.2 工程地质水文情况

盾构机停机位置隧道顶埋深约为21 m,地质断面与竖井关系示意图如图1所示,其中隧道掌子面为全断面②53细砂层。隧道主要穿越②23粉质黏土、②42粉砂、②53细砂。土层主要物理力学参数如表1所示。

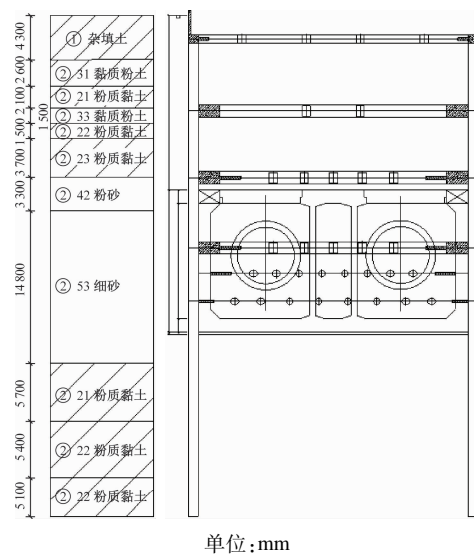


图1 地质断面与竖井关系示意图

Fig. 1 Relation diagram of stratigraphical profile and shaft

表1 土层主要物理力学参数

Tab. 1 Main physical and mechanical parameters of the soil layers

土层名称	天然含水量/%	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa	静止侧压力 系数	渗透系数/ (m/d)	渗透性分析
①1 杂填土	21.2	18.5	—	—	—	0.45	—	弱透水性
②31 黏质粉土	22.4	19.6	12.0	22.5	6.5	0.50	0.40	弱透水性
②21 粉质黏土	25.4	19.6	20.0	13.2	3.8	0.52	0.10	弱透水性
②33 黏质粉土	22.8	19.7	13.5	23.0	8.1	0.46	0.35	弱透水性
②22 粉质黏土	26.8	19.3	21.5	13.5	3.8	0.58	0.10	弱透水性
②23 粉质黏土	31.0	18.6	23.5	14.0	4.6	0.55	0.10	弱透水性
②42 粉砂	—	19.5	—	—	17.0	0.37	5.00	中等透水性
②53 细砂	—	20.0	—	—	26.0	0.34	13.00	强透水性

新增竖井场区地势平坦,无地表水。场地地下

水类型属第四系孔隙潜水,地下水位在地表下

9.0~10.0 m。2017 年勘察期间,在周边钻孔实测地下水位在自然地面下 7.1~9.0 m,水位标高为 78.96~79.12 m。本次补充勘察期间,各勘探孔中实测地下水位在现地面以下 8.0~9.0 m,水位标高 79.01~79.05 m,根据区域资料,场地地下水位年变幅为 1.0~2.0 m,故盾构工作井抗浮设防水位标高采用 84.0 m。

2 盾构接收综合施工方案

2.1 工程风险及应对措施

本工程所处环境复杂且风险较大,具体表现为:盾构工程位于货运站内,南北侧均有铁路隧道且南侧起重机距离新增盾构接收井较近,若盾构隧道施工导致的地层沉降较大可能会引起起重机倾覆;盾构所处地层为富水粉细砂软弱地层,该地质土体软弱且富含地底高承压水,若采用常规盾构接收工艺极易引起突水涌沙,破坏原有盾构隧道结构稳定。

隧道开挖后,地层中的原有应力平衡状态受到破坏,导致隧道周围地层中的应力重分布,使上部地层产生位移,已加固的冻结帷幕及冻结管受到新的附加荷载会产生蠕变变形。若变形量过大,则会引起冻结管断裂,致使冻结不能继续进行,直至冻结帷幕破坏。

常规冻结法接收盾构时要求盾构正常运行且掘进动力稳定,盾构因不明障碍物引起损伤后会导致掘进动力减小且设备结构破坏,若采用常规冻结法可能因设备损伤导致盾构空推作业失败。工程所用盾构为国外引进设备,若拆机会导致盾构永久损坏,引起重大经济损失。

由于常规工艺不能满足施工要求,本工程采用盾构接收综合方法:① 在新增盾构接收井完成施工后,首先采用水平冻结法对地层进行加固,在竖井内施工水平冻结孔;然后,利用盐水循环制冷冻结地层,同时进行盾构机维保等准备工作。② 在接收井内进行盾构基座施工,并安装洞门圈,在新增竖井的东、西两侧打设降水井。③ 当冻结达到设计要求后,经开挖条件验收合格,采用矿山法开挖支护凿除洞门及盾构前方的加固土,直至露出盾构刀盘,之后固定刀盘,在盾构刀盘前方 1 m 所在土层进行 MJS 加固,之后开启降水井积极降水,保证地下水降至隧道底 3 m 以下。④ 内圈冻结管停止冻结,同时吹蒸汽解冻;外圈冻结管继续积极冻结,随

后进行盾构空推,最后封堵洞门完成接收。

2.2 双环冻结法施工设计方案

盾构接收工程采用水平双环冻结法对地层进行加固,先施工冻结孔、测温孔,随后进行管路连接,并进行开机调试,调试正常后开始积极冻结,待冻结壁达到设计要求且验收合格后,方可进行后续工作。盾构所在洞门合计共需施工冻结孔 56 个、测温孔 8 个、泄压孔 2 个,双环施工孔布置示意图如图 2 所示。其中:TK1—TK8 为探孔;N1—N28 为内圈冻结孔;W1—W28 为外圈冻结孔;T1—T8 为测温孔;X1、X2 为泄压孔。冻结系统设计参数如表 2 所示。

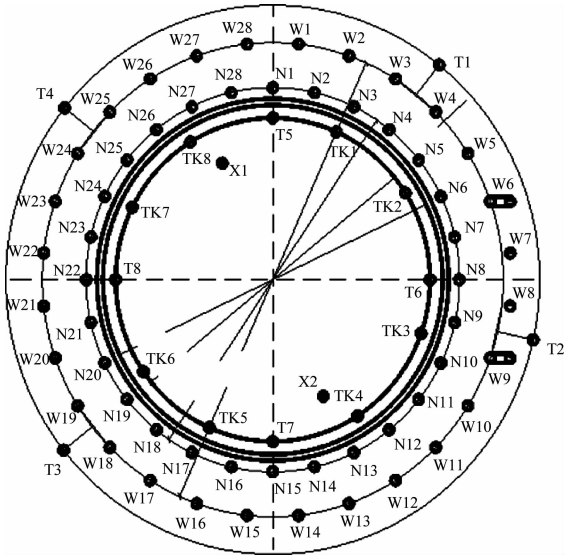


图 2 双环施工孔布置示意图

Fig. 2 Layout diagram of double-ring construction holes

表 2 冻结系统设计参数

Tab.2 Design parameters of freezing system

项目	取值或型号	项目	取值或型号
冻结孔数量/个	56	冻结管管材	φ 89.0 mm × 8.0 mm 低碳无缝钢管
测温孔数量/个	8	测温孔管材	φ 89.0 mm × 8.0 mm 低碳无缝钢管
泄压孔数量/个	2	供液管管材	φ 48.0 mm × 3.5 mm 低碳焊接钢管
造孔总长度/m	688	冷却水总循环量/(m <sup>3</sup> /h)	6.31
设计需冷量/kW	6.31	盐水循环量/(m <sup>3</sup> /h)	92.00

水平冻结孔在地下连续墙(以下简称“地连墙”)上二次开孔,所有冻结孔采用水平钻机跟管钻进法施工。在进行矿山法暗挖隧道前,冻结壁厚度



必须达到 2.1 m 的设计要求,平均温度应低于  $-10^{\circ}\text{C}$ ,主管盐水回路温差应小于  $2^{\circ}\text{C}$ ,隧道洞口钻孔中的冻土与槽壁的界面温度应小于  $-5^{\circ}\text{C}$ 。满足条件后,破除地连墙进行矿山法支护施工。冻结站实际冻结需冷量计算考虑 30% 的损耗率,实际最大新水补充量按冷却水理论消耗量与天气炎热时油冷却器冷却水部分直排考虑。

### 2.3 矿山法施工及控制措施

当冻结温度、冻结壁厚度达到设计要求时,打设 9 个探孔至刀盘;确认加固段无自由水后,搭设洞门支架、地连墙凿除操作平台;凿开地连墙进行开挖施工,洞门处地连墙采取人工用风镐凿除,破除地连墙外层 70 cm 厚的混凝土,然后分台阶二次凿除,再破除剩余 30 cm 厚的地连墙上部;拼装 3 榀拱架,设置临时仰拱,上台阶开挖至刀盘;固定刀盘后,破除下台阶地连墙和土体开挖至刀盘,拱架架设、挂网喷锚,与上台阶形成闭合支撑。

开挖施工在洞门内进行,由地连墙向盾构方向开挖,边开挖边搭建支护结构,开挖过程中做好同步监测工作。初期支护采用型钢钢架加网喷射混凝土;为增加支架的稳定性,相邻两排支架间用钢筋  $\phi 22\text{ mm}@1\,000\text{ mm}$  环向内外交错布置;最后,用喷射混凝土机进行喷射混凝土支护。喷射混凝土强度为 C25,喷射混凝土厚度为 300 mm。

冻结帷幕的发展速度不均衡,冻结土体周围存在暗流水及大量超挖冻土,这会引起冻结帷幕薄弱点的产生,若控制不及时则会造成坍塌。此外,开挖时冻结壁两侧收敛变形大、速度快,冻结壁可能失稳。考虑上述因素,冻结壁暴露长度应不大于 0.8 m,暴露时间应不大于 24 h。开挖时,冻结壁侧壁温度以低于  $-3^{\circ}\text{C}$  为宜,冻结壁收敛应不大于 20 mm。暗挖过程中,监测冻结帷幕的变形情况,根据其变形情况及时调整初期支护方式,使初期支护层与冻结壁之间没有间隙,以有效控制冻结帷幕的变形。盾构机同竖井结构及冻结壁位置关系示意图如图 3 所示。

### 2.4 盾构空推过未完全化冻矿山法隧道

#### 2.4.1 盾构推进摩阻力计算研究

因矿山法暗挖时双环冻结施工致使盾壳与周边土体冻结,可能导致盾构机无法掘进施工,因此需将盾体外壁与冻土接触处进行解冻。本工程隧道顶部覆土厚度为 10.10 ~ 17.63 m,根据常用算法,盾构的外部荷载将按照最大埋深处的土压计

算。工程所取地质及盾构机参数如表 3 所示。

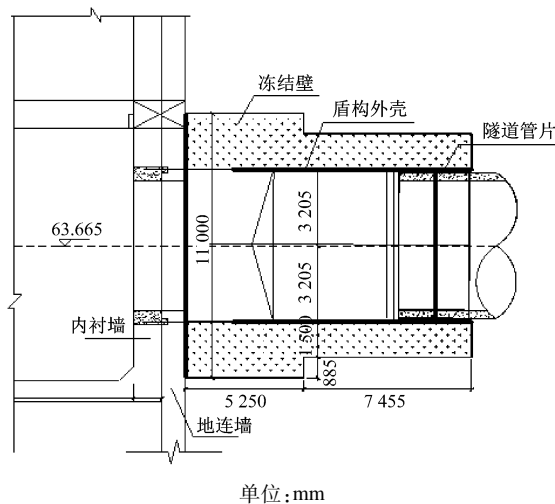


图 3 盾构机同竖井结构及冻结壁位置关系示意图

Fig. 3 Relation diagram of positions between shield machine, shaft structure and frozen wall

表 3 工程所取地质及盾构机参数

Tab. 3 Geological and shield machine parameters adopted in the project

参数	取值	参数	取值
土体重度/( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	12.6	盾构外径/m	12.6
岩土内摩擦角/( $^{\circ}$ )	28.5	盾构主机长度/m	28.5
土体黏结力/kPa	11.5	盾构主机质量/t	11.5
覆土层厚度/m	17.63	盾壳和土体间摩擦因数	0.25
地面荷载/( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	30	盾尾密封摩擦力/kN	10
水平侧压力系数	0.4	管片外径/m	6.2
经验土压力系数	1	周向每 m 密封的摩擦力/kN	10

理论计算最大控制值需大于盾构推进的最大摩阻力,且小于成型隧道管片的极限承载应力。根据文献[7]的相关计算式可知,本工程中,剪切面间距为 9 m,泰沙基松弛土压力  $P_s$  为  $63.720\text{ kN}/\text{m}^2$ ,覆土深度为  $2D$  ( $D$  为盾构外径)时的土压力  $P_q$  为  $161.784\text{ kN}/\text{m}^2$ ,由于  $P_q > P_s$ ,故取  $P_q$  为计算数据。

盾构上部土压力为  $191.784\text{ kN}/\text{m}^2$ ,盾构底部土压力为  $196.470\text{ kN}/\text{m}^2$ ,盾构上、下部的侧压力分别为  $76.720\text{ kN}/\text{m}^2$  和  $78.590\text{ kN}/\text{m}^2$ ,盾构总推力包括盾壳和土层的摩擦力 ( $9\,548.2\text{ kN}$ ),以及盾尾密封的摩擦力 ( $195.0\text{ kN}$ ),即盾构总推力为  $9\,740.2\text{ kN}$ 。考虑盾构在尚未全部化冻的冻土上开始掘进,其阻力按原状土的 3 倍考虑,故盾构的实际阻力应为  $29\,220.6\text{ kN}$ 。当温度达到  $0^{\circ}\text{C}$  时,总推力需控制

在 30 000 kN 内,以确保成型隧道管片的安全,故本工程拟定的最大盾构推力控制值为 30 000 kN。

#### 2.4.2 施工流程

因盾构机长时间停机,以及地下不明障碍物对盾构刀盘所造成的损伤,维保盾构机同时复核盾构姿态,并固定刀盘,在前盾土仓壳体顶部距离土仓胸板 450 mm 处焊接 1 个 15 t 吊耳,在顶部吊点两侧 1.2 m 处土仓壳体上各焊接 1 个 15 t 吊耳,并用 10 t 葫芦与刀盘连接。

冻结壁解冻前,在盾尾后方做止水环箍,当盾体外壁解冻后,割除封堵盾尾的弧形钢板进行试掘进施工,如有必要增加 2 个 100 t 和 4 个 200 t 的千斤顶,以增大盾构推力。在正式空推前先进行试掘进,对 T5、T8 测温孔每 2 h 进行一次测温。当冻结壁温度为  $-25 \sim -5$  °C 时,每上升 5 °C 复推一次;当冻结壁温度为  $-5 \sim 0$  °C 时,每上升 0.5 °C 复推一次。试掘进以盾构向前顶进 1~2 cm 为目标,完成后立即停止掘进。

盾构机空推时,在盾构机前用  $\phi 48$  mm 钢管搭设喷射豆砂和 C25 混凝土的操作平台。盾构推进过程中,在盾构机上部不断向盾尾处喷射豆砂和 C25 混凝土,盾构机两侧间隙采用沙袋堆积至腰部以上。盾构掘进时同步压注商品砂浆,从机头 60° 方向至 320° 方向喷射豆砂和 C25 混凝土至隧道两肩。盾构空推作业完成后,最后 1 环管片采用预埋钢板环及弧形钢板封堵洞门,壁后二次注浆以填充管片和洞圈间隙。盾构机拆解吊出后,切割最后 1 环管片凸出洞门圈范围 30 cm 长的混凝土,并施作洞门环梁。

### 3 施工监测结果分析

#### 3.1 冻结温度变化

本工程的冻结回路与测温孔温度监测记录持续 76 d,测温孔内设置 3 种测点深度,分别为 2.1 m、4.6 m、7.0 m,测温孔 T1—T3 及 T5—T7 温度随冻结时间的变化曲线如图 4 所示。其中:T1—T3 为外环测温孔;T5—T7 为内环测温孔。随着冻结时间的增加,不同深度的土体温度变化趋势大致相同;T1—T3 冻结温度在 40 d 后基本进入稳定阶段,T5—T7 在 30 d 后基本进入稳定阶段。与常规 30 d 积极冻结即进入稳定阶段相比,内环冻结帷幕进入稳定温度需要更长的冻结时间,这可能是由于粉细砂层及其初始温度、冻结帷幕各部分发展速度不平

衡、冻结土体周围有暗流水流过、冻结管盐水泄漏入冻结土体内、大量超挖冻土体等因素导致的。当测温孔温度达到 0 °C 时,即可认为冻结壁交圈,T1—T3 附近冻结壁交圈时间约为 25 d,T5—T7 附近冻结壁交圈时间约为 15 d。

根据 DG/TJ 08-902—2006《旁通道冻结法技术规程》中的圆隧道旁通道应用盐水制冷系统冻结法技术要求:在进入积极冻结 45 d 左右,冻结壁达到设计要求 2.1 m;贴近盾构外仓的内圈冻结壁进入稳定温度阶段会比外圈冻结壁早约 2 d;内、外环不同测温孔初始温度与稳定冻结阶段温度差均约为 5 °C。结合冻结时间与冻结温度可认定,外环冻结帷幕对内环起到了保温促进效果,内环冻结壁进入稳定阶段较外环更快。内环测温孔因矿山法施工于 2020 年 7 月 15 日割除封孔,后期采用人工监测方式对冻结壁测温。

为避免因冻结帷幕与盾构外壳壁形成冻结体影响盾构空推作业,冻结系统于 2020 年 8 月 6 日关闭内环串联支路,采用在隧道内放置 1 台蒸汽发生器向盾体吹蒸汽的方式进行解冻。为保证解冻的均匀性,打开人闸门,在切口处吹蒸汽进行解冻。通过盾体径向孔观测冻土温度,盾体外壁与冻土交界面温度上升至 0 °C 时即可停止解冻,时刻关注冻结管的工作状态,监测冻土内部压力。关闭内环串联支路,采用吹蒸汽解冻法会导致冻结帷幕内圈温度急剧增加(见图 4 a)、图 4 b)、图 4 c)),外环冻结壁在保持稳定的冻结状态下,其温度在 1 d 内均上升了约 5 °C,而外环冻结壁仍保持稳定的冻结状态。解冻工序需时刻关注矿山法隧道的稳定性,防止因冻土化冻所造成的不均匀变形超过控制值,从而破坏 MJS 加固体结构。盾构空推时,盾构外壳与内环未完全化冻土体交界处温度需维持在 3 °C 左右。

#### 3.2 积极冻结期间地面及隧道位移变化

考虑到本工程所处的特殊地层,根据 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》,采用地面沉降变化报警值,以  $\pm 20$  mm 作为累计报警值, $\pm 3$  mm 作为日变量报警值。积极冻结期间,沿隧道掘进中心线选择典型断面位置(与隧道掘进中心线距离为 30 m)布置监测点,监控 14 d 内地面的竖向位移情况,同时在与冻结区起始位置距离 10 m 处设置地面监测点。地面竖向位移随冻结时间的变化关系如图 5 所示。积极冻结期间,冻结区温度随冻结时间下降的同时,因冻土冻胀效应,地面

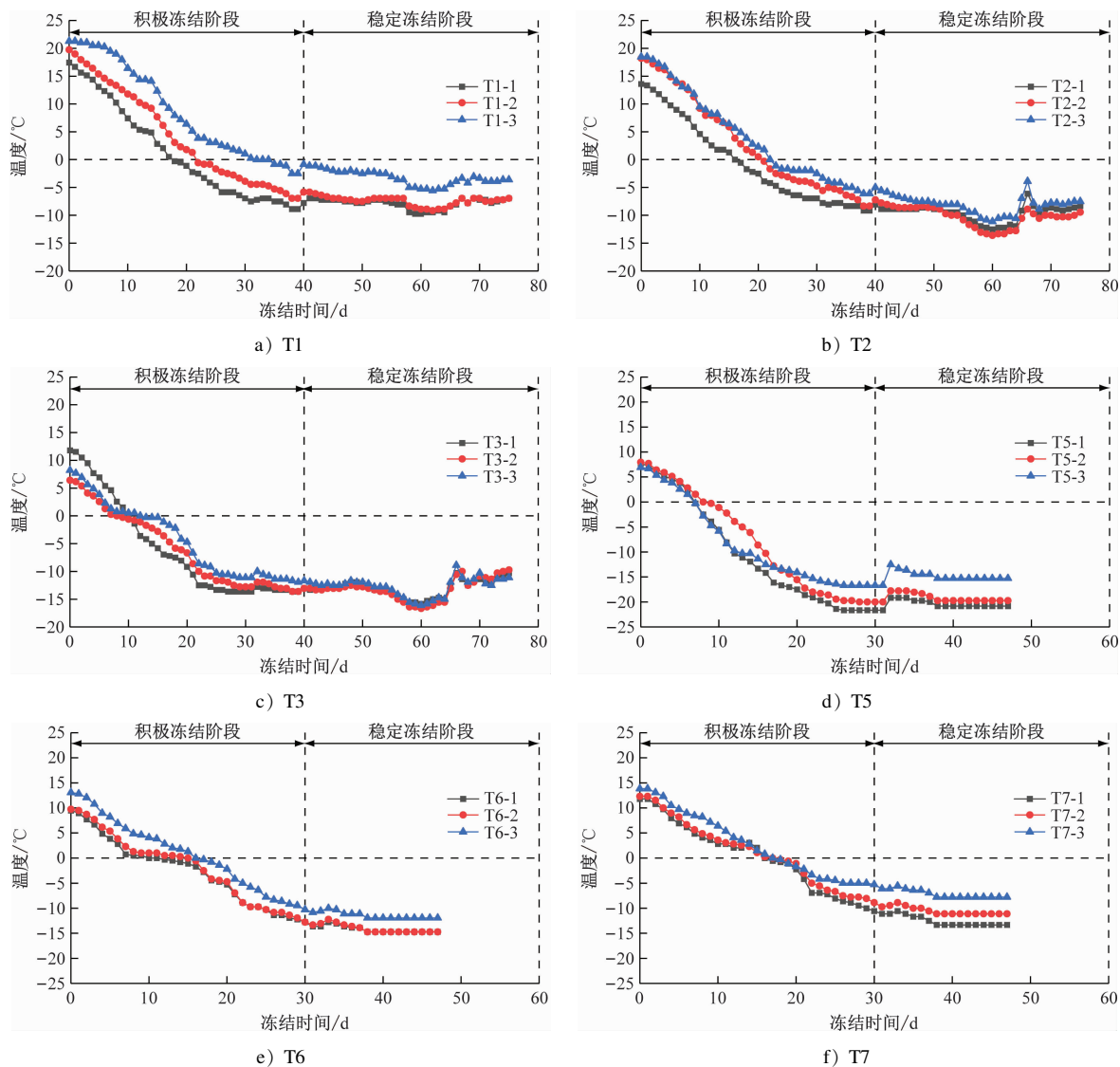
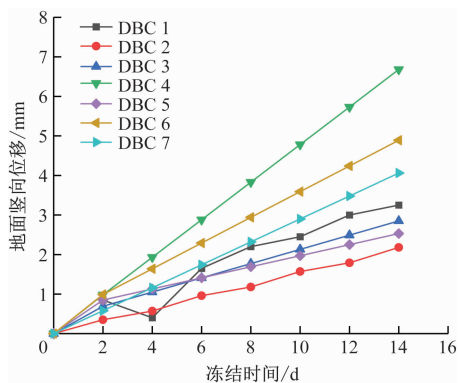


图4 不同测点深度条件下测温孔 T1—T3 及 T5—T7 温度随冻结时间的变化曲线

Fig. 4 Temperature change curves of temperature measuring holes from T1 to T3 and T5 to T7 over time under different measuring point depth conditions



注: DBC 为地面测点。

图5 地面竖向位移随冻结时间的变化关系

Fig. 5 Change relation of ground vertical displacement over freezing time

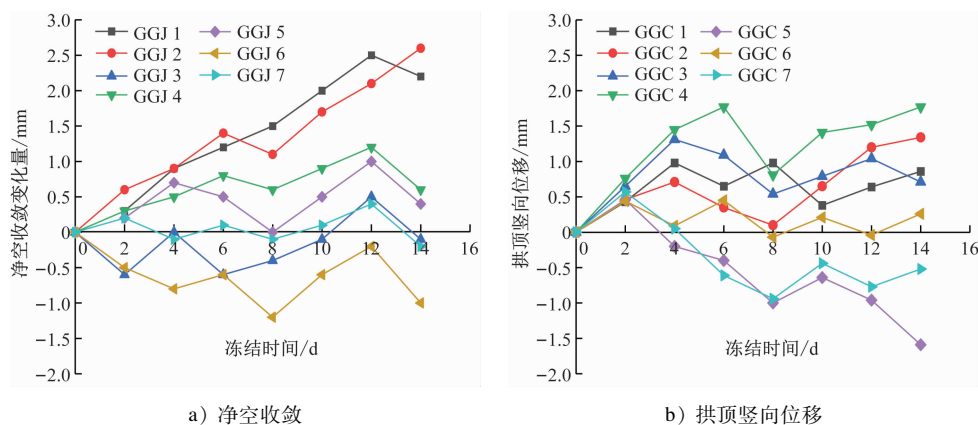
竖向位移呈隆起趋势。当冻结时间为 14 d 时,地面最大竖向位移约为 6.68 mm,地面竖向位移呈线性增加趋势。

积极冻结期间,影响地面竖向位移的施工因素主要包括冻结孔施工改造、冻土冻胀等。在主动冻结过程中,随着土层中的水冻结,冻土体积有所膨胀,导致冻结区隧道隆起变形;冻结结束后,冻土融化,土体强度降低并发生解冻沉降。本工程中,在隧道开挖、初次衬砌完成的 24 h 内,在开挖面 2 m 范围内,隧道断面左、右及顶部设置隧道净空收敛和拱顶竖向位移监测点。利用全站仪进行非接触量测,考虑到积极冻结期间施工环境的复杂性,监测点布置间距为 10 环。隧道净空收敛和拱顶竖向



位移随冻结时间的变化关系如图 6 所示。受冻土冻胀影响,积极冻结期间,隧道净空收敛累计变化量

总体呈现为隧道周围土体向外变形的趋势,最大净空收敛量为 2.6 mm;隧道拱顶变化基本表现为隆起。



a) 净空收敛

b) 拱顶竖向位移

注:GGJ 为两侧腰部测点;GGC 为隧道拱顶测点。

图 6 隧道净空收敛和拱顶竖向位移随冻结时间的变化关系

Fig. 6 Change relation of tunnel clearance convergence and vault vertical displacement over freezing time

结合图 5 和图 6 可以发现,数据监测期间,隧道拱顶最大竖向位移实际监测数据为 1.77 mm,地面竖向位移均在 10 mm 以内,隧道变形均在 5 mm 以内,呈现较稳定的变形趋势。由此可知,双环冻结法的施工方案适用于富水粉细砂层地质,能够保证后续工序的安全进行。

### 3.3 矿山法施工地面位移变化

隧道在利用矿山法对冻结区进行开挖的过程中,为监测地面变形情况,重新布置监测点位:沿隧道开挖中心线冻结区起始位置起 20 m 设置地面监测位置(DBC 7—DBC 12),每个监测位置同时设置 3 个监测点,每个监测位置取 3 组有效数据进行对比。以每个监测位置处的第 3 组监测点数据为例进行分析,矿山法施工后,地面竖向位移随冻结时间的变化关系如图 7 所示。人工暗挖施工过程中,地面呈沉降趋势,地面最大沉降量为 4.5 mm,小于最大控制值。在冻结帷幕下破除地连墙进行人工暗挖后,地层中原有的应力平衡受到破坏,引起隧道周围地层中的应力重新分布,这种重新分布的应力使上部地层产生位移,根据距离隧道的远近不同产生了相应的沉降,远离隧道的部分地层沉降较小,对周边环境基本无影响,远离隧道位置处冻结帷幕段下的隧道暗挖施工所导致的地层沉降变形趋势较稳定。

### 3.4 盾构空推推力变化

本工程的盾构空推作业在未完全化冻的土体中进行,盾构推力应大于理论盾构推进摩阻力,且

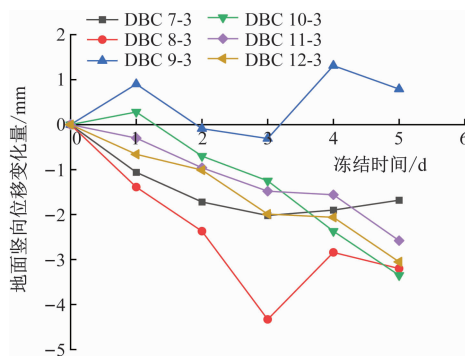


图 7 矿山法施工后地面竖向位移随冻结时间的变化关系

Fig. 7 Change relation of ground vertical displacement over freezing time after mining method construction

小于预制管片的极限承载力。盾构空推推力随时间的变化关系如图 8 所示。盾构极限推力为 26 500 kN,小于理论计算的盾构推进摩阻力和预制管片极限承载力,后续所需盾构推力持续下降,最终保持在 23 000 kN 左右。盾构空推作业时,因施工协调及监测单位问题,可人工观测隧道预制管片变形情况。

## 4 结语

本文以郑州地铁 3 号线一期工程为例,主要分析了隧道左线接收段地质风险、盾构受困原因及处理方法、双环冻结法施工流程及控制措施、温度特性、降水方案设计、冻结帷幕下矿山法施工流程及控制要素,以及盾构空推的可行性。主要获得以下结论:

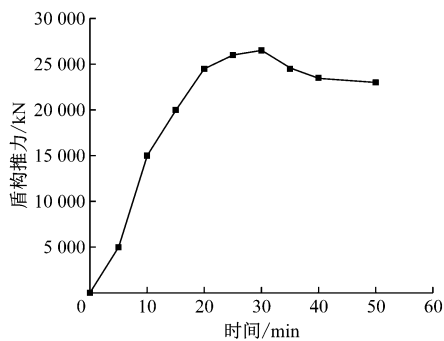


图8 盾构空推推力随时间的变化关系

Fig. 8 Change relation of shield tunneling thrust over time

1) 在富水粉细砂层中,采用双环冻结法、矿山法人工暗挖、积极降水及盾构空推等方法,通过外环冻结壁积极冻结、内环冻结壁未完全化冻的矿山法隧道是安全有效的。

2) 根据监测数据可知,双环冻结法内环冻结壁的温度达到稳定阶段比外环冻结壁的稳定温度低约 $5^{\circ}\text{C}$ ;在进入积极冻结期45 d左右时,冻结壁厚度达到设计要求的2.1 m;采用吹蒸汽解冻法会导致外环冻结壁温度上升约 $5^{\circ}\text{C}$ ;盾构空推时,盾构外壳与内环未完全化冻土体交界处的温度维持在 $3^{\circ}\text{C}$ 左右;双环冻结施工致使地面与隧道均呈现上浮与隆起状态,且变形值均在控制值以内。

3) 本工程实际盾构最大推力小于盾构推进摩阻力理论计算值,最大推力为26 500 kN,达到最大推力后所需盾构推力持续下降,并最终稳定在23 000 kN左右。

4) 富水粉细砂层盾构接收综合方法所涉及的施工方法较多,且避免了拆机作业造成的进口盾构设备永久性结构损伤,较好地降低了施工风险,保证了盾构顺利接收。本文研究的盾构接收综合方法在郑州等富水软弱粉细砂地层中具有很强的代表性,对类似工程具有借鉴和指导作用。

## 参考文献

[1] 徐锦斌,王锋,傅聪,等. 水泥系与垂直冻结法在武汉地铁盾

构接收中的组合应用[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊2): 358.

XU Jinbin, WANG Feng, FU Cong, et al. Combined application of cement system and vertical ground freezing to shield receiving in Wuhan Metro[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 358.

[2] 夏洪波. 富水砂卵石地层长时间降水段大直径盾构施工技术[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(1): 61.

XIA Hongbo. Shield construction techniques for large-diameter shield tunneling in a long-time de-watered section in a rich-watered sandy pebble stratum[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2020, 18(1): 61.

[3] 向亮,尹陇娟. 第三系富水粉细砂岩地层基坑冻结加固研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(1): 81.

XIANG Liang, YIN Longjuan. Study on freezing reinforcement of foundation pit in tertiary water-rich fine sandstone[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(1): 81.

[4] 毕经东,赵得杰. 大直径盾构空推通过矿山法隧道段的施工技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 90.

BI Jingdong, ZHAO Dejie. Research on construction technology of large diameter shield advancing mined tunnel without load[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 90.

[5] 王贺昆. 城市地下隧道盾构空推过矿山法段施工技术[J]. 土工基础, 2016, 30(3): 375.

WANG Hekun. Metro shielded excavation through empty mine gullies[J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(3): 375.

[6] 周灿朗. 粉细砂地层盾构施工地层变形规律分析[J]. 铁道建筑, 2016, 56(3): 79.

ZHOU Canlang. Analysis of stratum deformation law of silty fine sand during shield tunnel driving[J]. Railway Engineering, 2016, 56(3): 79.

[7] 范毅雄. 顶管管顶竖向土压力计算探讨[J]. 特种结构, 2020, 37(6): 66.

FAN Yixiong. Discussion on calculation of vertical soil pressure on jacking pipe[J]. Special Structures, 2020, 37(6): 66.

· 收稿日期:2022-10-12 修回日期:2023-01-06 出版日期:2024-12-10

Received:2022-10-12 Revised:2023-01-06 Published:2024-12-10

· 第一作者:陈昱秉,硕士研究生,501986935@qq.com

通信作者:刘念武,副教授,zjulnw@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

