

地铁联络通道冻土帷幕薄弱部位及其成因分析*

董新平¹ 井景凤² 王余飞¹ 张毅豪¹

(1. 郑州大学水利与土木学院, 450001, 郑州; 2. 洛阳市轨道交通集团有限责任公司, 471009, 洛阳//第一作者, 副教授)

摘要 提出将冻土帷幕演变过程的关键阶段细分, 并计算冻土帷幕温度场冻结锋面和特征等温线坐标的冻土帷幕整体性状确定性分析方法, 对冻结帷幕薄弱部位、特征及成因进行了研究。结果表明: 联络通道冻结管单侧开孔和放射状布置形式, 使得冻土帷幕局部区域的冻结壁厚度和平均温度存在薄弱点; 辅助冻结侧的冻结壁厚度大于其设计值, 平均温度较低, 而主冻结侧的冻结壁厚度小于其设计值, 平均温度较高; 联络通道泵站下部冻结管相交区域冻结壁形成最晚, 第 II 冻结壁厚度最薄; 联络通道拱部与边墙的角部连接区域冻结壁交圈时间最长, 辅助冻结侧边墙冻结管间距较大区域的冻土帷幕厚度最薄。冻结法施工时, 测温孔位置和长度的设计应覆盖薄弱点, 施工中应对薄弱点进行重点监控。

关键词 地铁; 联络通道; 人工地层冻结法; 冻土帷幕

中图分类号 U455.49

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.005

Weak Parts and Cause Analysis of Frozen Soil Wall in Metro Cross Passage

DONG Xinping, JING Jingfeng, WANG Yufei, ZHANG Yihao

Abstract The key stages subdivision of frozen soil wall evolution process, the deterministic analysis method of frozen soil wall overall properties for calculating frozen soil wall temperature field freezing front and characteristic isothermal coordinate are put forward, so as to study the wall weak parts, characteristics and the causes. Results show that the cross passage freezing pipe single side hole and the radius layout format create weak points in frozen wall thickness and average temperature in part of the frozen soil wall. The supporting frozen side wall thickness is larger than its design value, the average temperature is relatively low, while the main frozen side wall thickness is smaller than its design value and the average temperature is relatively high. The frozen wall in the freezing pipe crossing section under the cross passage pumping station bottom forms the latest, and the II frozen wall thickness is the smallest. The

frozen wall closing time of the connection area between cross passage arch and side wall corner is the longest. Supporting frozen side wall freezing pipe with larger spacing has the thinnest frozen soil wall. When freezing construction method is applied, location and length design of temperature measuring holes should cover weak points, and the weak points should be emphatically monitored in the construction.

Key words metro; cross passage; artificial ground freezing method; frozen soil wall

First-author's address School of Hydraulic and Civil Engineering, Zhengzhou University, 450001, Zhengzhou, China

AGF(人工地层冻结)法为地铁联络通道的主要施工方法之一, 尽管其工艺已较为成熟, 但因冻结失败导致工程事故的案例仍并不少见^[1]。如: 2003 年上海轨道交通 4 号线联络通道的涌水事故, 2005 年高雄捷运橘线联络通道泵站的流砂事故, 均导致已建盾构隧道垮塌; 2014 年北京某联络通道 1 月 15 日开始冻结, 3 月 12 日冻结壁仍不交圈^[2]。上述事故均与冻土帷幕的局部缺陷有关。

任何冻土帷幕局部缺陷的发生均不是偶然的, 通常是多种因素综合作用的结果。对其进行多方位、多角度综合研究是事故防治的有效手段。文献[3-9]从管片散热、地下水、地层、冷排管形式、冻结管位置误差等方面研究了冻土帷幕缺陷产生的原因。冻结管布置形式对冻土帷幕温度场有重要影响^[3], 冻结管布置有双排水平布置、双排放射布置、单排放射布置、双排+单排放射布置等形式。国内采用最多的是冻结管倾斜放射布置形式, 且拱部和底部为双排管, 边墙为单排管, 实际冻结管开孔位置需避开管片接头, 这使得冻结管间距在纵向和横向上呈现变化趋势。本文重点对冻结管布置形式影响进行研究, 并从冻土帷幕温度场整体性状层面

* 河南省 2021 年科技发展计划项目(212102310482); 洛阳市轨道交通科技研发课题(201903141); 中建 7 局科技研发课题(CSCEC7b-2020-Z-17)

探究冻结失败的可能原因。

1 工程概况

某城市地铁 1 号线在 DK21 + 972. 000 处设 1 座联络通道兼废水泵房,隧道埋深为 15. 3 m,所处地层为②₉₂卵石、③₉₃卵石层。其中,卵石地层中漂石占 20% ~ 40%,最大粒径为 400 mm,渗透系数为 80 ~ 120 m/d。卵石层为强透水层,且和附近河流有水力联系,水量丰富。

该联络通道采用矿山法 + AGF 法施工。冷冻站布置在盾构隧道右线(南侧),冻结管布置剖面如图 1 所示。其中,冻结孔 69 个(φ 89 mm),长 2. 5 ~ 11. 1 m;测温孔 8 个(浅孔 φ 32 mm,深孔 φ 89 mm),长 2. 0 ~ 6. 0 m。

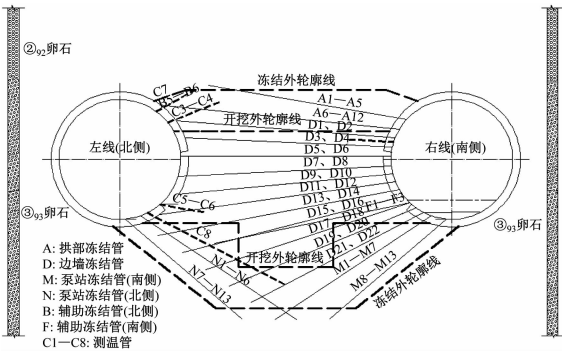


图 1 冻结管布置图
Fig. 1 Layout of freezing pipe

2 计算模型及参数选取

2.1 计算模型和边界条件

考虑对称性,以左线盾构隧道中心线和联络通道中心线交叉点作为原点,沿左线盾构隧道走向(z 轴负向)建立分析模型(见图 2)。

左、右线盾构隧道管片外径为 3. 1 m,内径为 2. 75 m,管片厚 0. 35 m。联络通道中心位置处左、右线盾构隧道的中心线距离为 15. 0 m。联络通道开挖宽度为 3. 8 m,冻结壁设计厚度为 1. 9 m。

自盾构隧道与联络通道交界中心,沿着左、右线盾构隧道 z 轴负向 2. 85 m 范围内,在盾构隧道管片表面敷设保温层。该位置按绝热面处理,其余位置盾构隧道管片设为对流边界。

2.2 参数选取

根据盾构区间的地质勘察报告,主要计算参数见表 1。

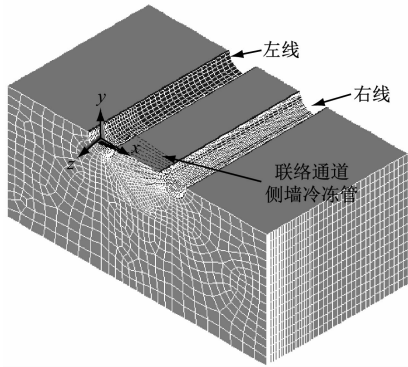


图 2 AGF 温度场分析模型
Fig. 2 Analysis model of AGF temperature field

表 1 不同温度下卵石地层的热力学参数
Tab. 1 Thermodynamic parameters of gravel at different temperatures

温度/ ℃	焓/ (J/m ³)	导热系数/ (W/(m·℃))	比热容/ (J/(m·℃))
-30	0	2. 5	850
-1	$5. 97 \times 10^7$	2. 5	850
0	$1. 73 \times 10^8$	1. 9	1 100
23	$2. 14 \times 10^8$	1. 9	1 100

3 冻土帷幕纵向分布特征及薄弱部位

3.1 冻土帷幕性状定量分析

为对冻土帷幕整体性状进行定量评价,本文采用以下方法:

1) 将冻结壁发展演变过程按照关键特征温度细化分为 4 个阶段:I 阶段——第 I 冻结区(即 - 1 ~ - 10 ℃带状冻结区域)形成,III 阶段——第 II 冻结区(即 - 10 ~ - 20 ℃带状冻结区域)形成,IV 阶段——第 III 冻结区(即 < - 20 ℃过度冻结区域)形成。第 II 冻结区(冻结壁)的形成及其厚度的发展过程是 AGF 施工的关键控制指标。

2) 对冻结帷幕特征等温线(如 - 1 ℃、- 10 ℃、- 20 ℃)的坐标进行计算。根据联络通道开挖轮廓线、冻土帷幕外轮廓线坐标,计算得到冻结壁位置及其厚度,并对其进行后续比较和性状评价。

3.2 拱部冻土帷幕

第 45 天时 $z = 0$ 剖面处模型的温度场分布如图 3 所示。图 3 中,根据坐标信息绘制了冻结壁外轮廓线(线 1、线 4)和联络通道开挖轮廓线(线 2、线 3)。

由图 3 可见,冻结壁的温度在纵向上不均匀,左

线盾构隧道侧(北侧)主要位于第Ⅱ冻结区,右线盾构隧道侧(南侧)主要位于第Ⅰ冻结区。

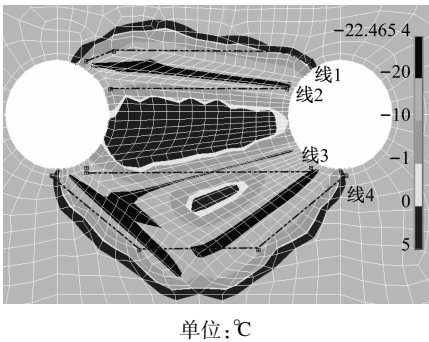


图 3 $z=0$ 剖面处模型的温度场分布
Fig. 3 Temperature field distribution of model at profile $z=0$

冻结壁的温度在纵向上不均衡导致拱部冻结壁厚度在纵向上发生变化。以第 45 天为例,计算第Ⅱ冻结区坐标,沿隧道纵向分布如图 4 所示。

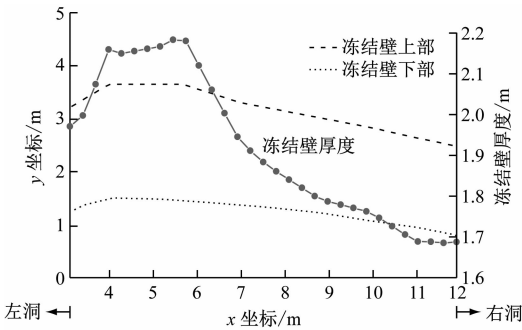


图 4 隧道拱部不同位置处的冻结壁厚度
Fig. 4 Frozen wall thickness at different places of tunnel arch

由图 4 可见,拱部冻结壁从北侧向南侧厚度不均衡,距离左线隧道外侧 1~3 m 位置的冻结壁厚度最大,达 2.2 m 左右;在右线隧道开挖处,冻结壁厚度最小,约 1.7 m。

由于拱顶冻结管以 $6^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 上挑,使得南侧冻结管与开挖边界距离较近,故开挖边界温度较低;而在靠近北侧区域,由于冻结管与冻结边界较近,则冻结边界温度较低。

3.3 泵站区域冻土帷幕

$z=0$ 剖面处泵站下部区域冻结管编号、冻结壁外轮廓线及节点编号,如图 5 所示。

冻结管 M4、N4 的冻结壁交圈控制节点 310 的温度变化如图 6 所示。由图 6 可见,节点 281 和 282 的冻结历程基本一致;节点 310 第Ⅰ阶段的开始时间为第 10 天,比邻近节点 281 晚 3 d,该节点需 18 d 左右才能进入第Ⅰ冻结阶段。

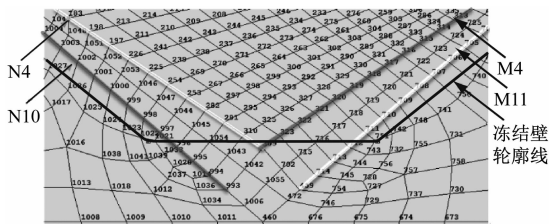


图 5 泵站区域冻结管的位置及节点编号
Fig. 5 Freezing pipe location and node numbering at pumping station area

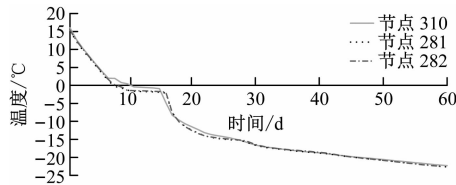


图 6 泵站区域冻结圈温度-时间关系曲线
Fig. 6 Frozen wall closing temperature-time relationship curve at pumping station area

冻结管 M4 和 N4 的闭合处(见图 5)是整个泵站区域的薄弱位置,该位置冻结壁的形成最晚。

4 冻土帷幕横向分布特征及薄弱部位

以 $x=7.5$ m 剖面为例,对联络通道边墙进行冻结分析。冻结壁演变如图 7 所示。

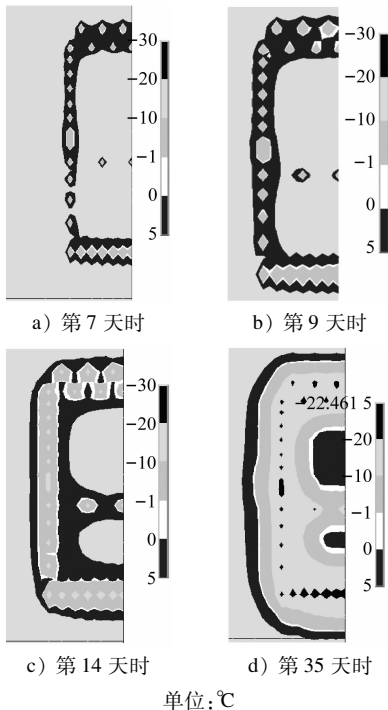


图 7 $x=7.5$ m 剖面冻结壁随时间演变云图
Fig. 7 Evolutionary nephogram of profile $x=7.5$ m of frozen wall evolving over time

冻土帷幕随时间演变具有以下特点:

1) 联络通道拱部和底部采用双冻结管设计,冻结壁厚度较厚,而边墙是单层冻结管设计,冻结壁厚度相对较薄。

2) 第 18 天时,可完成联络通道中部区域第 I 阶段冻结壁交圈,其顺序依次为:底板 M 冻结管→侧墙 D 冻结管→底板与侧墙连接区域→拱部区域→拱部与侧墙连接区域(A6 与 D1、A12 与 D2)。拱部与边墙连接区域的冻结壁交圈时间最长,最容易成为涌水点。

第 45 天时,剖面 $x=5.0\text{ m}$ 、 $x=7.5\text{ m}$ 、 $x=12.0\text{ m}$ 冻结线与联络通道开挖轮廓线坐标对比,如图 8 所示。

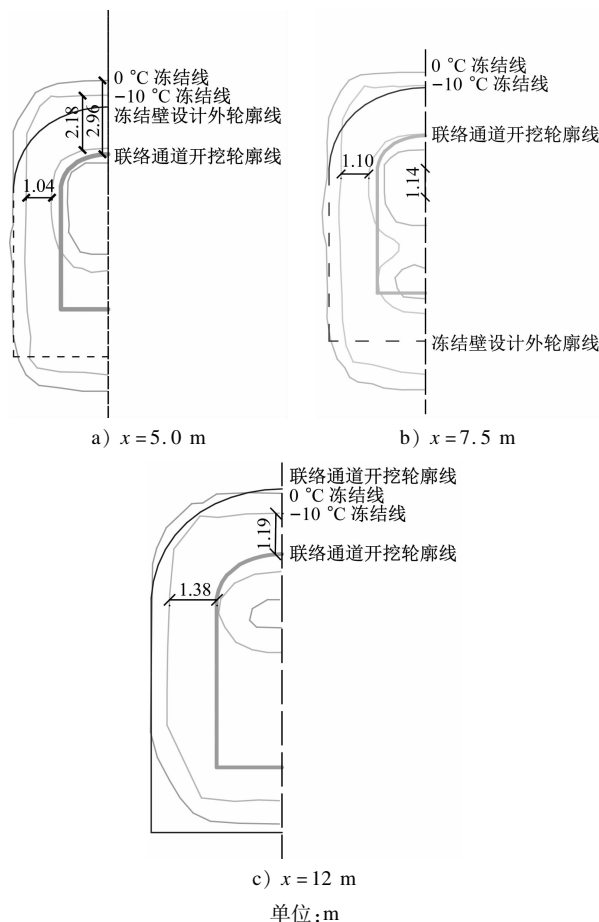


图 8 不同剖面处冻结壁厚度比较

Fig. 8 Comparison of frozen wall thickness at different profiles

由图 8 可见,3 个剖面的第 I 冻结锋线($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结线)均可以满足 1.9 m 冻结壁厚度的设计要求,但第 II 冻结锋线则局部不满足该要求:拱顶、底板的第 II 冻结锋线($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结线)处有效冻结壁厚度为 $1.19\sim 2.18\text{ m}$,而侧墙处冻结壁厚度为 $1.04\sim$

1.38 m 。冻结壁厚度的薄弱截面位于侧墙,其中左线 $x=5\text{ m}$ 处的冻结壁厚度最薄($y=-0.45\text{ m}$),即联络通道北侧边墙部位冷冻管 D5、D6 和 D7、D8 之间区域(冻结管间距相对较大)是冻土帷幕的薄弱位置。

5 结语

1) 冻土帷幕整体性状定量评价方法可以准确揭示出任意时刻冻结壁、特征等温线等与联络通道开挖轮廓线 and 设计冻土帷幕之间的空间相对关系,便于实时监测冻土帷幕在纵向和横向的整体性状特征。

2) 联络通道冻结管单侧开孔和放射状布置形式,使得冻土帷幕整体性状在局部区域的冻结壁厚度和平均温度上存在薄弱点,增加了 AGF 法施工的控制难度。

3) 辅助冻结侧冻结壁厚度大于其设计值,平均温度较低;而主冻结侧冻结壁厚度小于其设计值,平均温度较高。主冻结侧的拱顶位置是冻结壁的薄弱点。

4) 联络通道泵站下部区域冻结管相交部位是冻结薄弱位置,该区域冻结壁形成最晚,第 II 冻结壁厚度最薄。

5) 联络通道拱部与边墙的角部连接区域冻结壁交圈时间最长,辅助冻结侧边墙部位冻结管间距较大区域的冻结壁厚度最薄,为冻土帷幕薄弱部位。

6) 采用 AGF 法施工时,尤其在强透水性地层、附近有水源等高风险条件下,测温孔位置和长度的设计应覆盖薄弱点,施工中应对薄弱点进行重点监控。

参考文献

- [1] 杨太华. 越江隧道工程联络通道冻结法施工风险分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010(6): 1201.
YANG Taihua. Risk analysis of freezing method applied to adjacent passage construction of cross-river tunnel project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010(6): 1201.
- [2] 李方政, 罗富荣, 韩玉福, 等. 复杂条件下地铁联络通道冻结壁不交圈原因的分析及治理[J]. 工业建筑, 2015(11): 187.
LI Fangzheng, LUO Furong, HAN Yufu, et al. Cause analysis and countermeasure research for unclosed freezing wall of subway contact passage under complex conditions[J]. Industrial Construction, 2015(11): 187.

(下转第 29 页)