

DOI: 10.11779/CJGE201912005

拱北隧道管幕冻结法管间冻结封水效果实测研究

胡向东^{1, 2}, 李忻轶^{*1, 2, 3}, 吴元昊^{1, 2}, 韩磊^{1, 2}, 张成斌^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 基于现场实测数据, 对拱北隧道管幕冻结法暗挖工程不同阶段的管间实际冻结封水效果进行了分析。对于积极冻结期的两种不同交圈模式, 利用单管公式对管间冻土厚度进行计算, 结果表明在工程允许的时间内管幕间冻土即可形成交圈, 从而说明管幕具有初步的封水性能。交圈后, 利用双管公式对管间冻土厚度进行计算, 结果显示冻土帷幕发展并不均匀, 纵向上靠近中间的冻土发展好于端部的, 横向上靠近下部的冻土发展好于上部的, 此外台风等自然灾害对于地表附近冻土的影响是可控的。对于开挖期, 管间温度实测数据表明: 试开挖期间对施工进度的严格精细控制有利于减小管间冻土的弱化; 正式开挖期间开挖热扰动对于接近紧挨开挖面的冻土造成显著影响, 而稍远一些的冻土则几乎不受影响。考虑 20 cm 的折减后, 冻土帷幕仍能保持足够的冻土厚度以达到封水效果。研究验证了管间封水效果, 论证了工法的合理性, 为以后类似工程的开展提供了借鉴和指导。

关键词: 港珠澳大桥; 管幕冻结法; 封水效果; 温度场; 实测研究

中图分类号: TU459.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)12-2207-08

作者简介: 胡向东(1961—2018), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程、人工地层冻结方面的工作。E-mail: anton.geotech@tongji.edu.cn。

Effect of water-proofing in Gongbei Tunnel by freeze-sealing pipe roof method with field temperature data

HU Xiang-dong^{1, 2}, LI Xin-yi^{1, 2, 3}, WU Yuan-hao^{1, 2}, HAN Lei^{1, 2}, ZHANG Cheng-bin^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The actual water proofing effect between the pipes at different stages of the freeze-sealing pipe roof (FSPR) method is analyzed based on the field measured data. For the two different intersection patterns in the active freezing period, the thickness of the frozen soil between the steel pipes is calculated by the single-pipe formula. The results show that the frozen wall can form the intersection within the time allowed by the project, so that the frozen wall has initial water sealing performance. After the intersection, the thickness of the frozen soil between the pipes is calculated by the double-pipe formula. The results show that the development of the frozen soil wall is non-uniform. The development of the frozen soil near the middle in the longitudinal direction is better than that at the end, and the development of the frozen soil near the lower part in the lateral direction is better than that near the upper part. In addition, the impact of natural disasters such as typhoons on the near surface soil is proved controllable. During the excavation period, the measured data of the inter-tube temperature indicate that the strict and fine control of the construction schedule during the test excavation is beneficial to reduce the weakening of the frozen wall between the pipes, and the thermal disturbance during the official excavation has a significant impact on the frozen soil close to the excavation surface while the frozen soil slightly far from the excavation surface is almost unaffected. The frozen soil wall can still maintain enough frozen soil thickness to achieve the sealing effect considering the reduction of 20 cm. The study has verified the effect of water proofing between pipes and demonstrated the rationality of the FSPR method, which may provide reference and guidance for similar projects in the future.

Key words: Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; freeze-sealing pipe roof method; effect of water-proofing; temperature field; field study

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478340)

收稿日期: 2019-01-30

*通讯作者 (E-mail: 734756727@qq.com)

0 引言

管幕法作为一种能够有效控制开挖施工对周边土体扰动的地下结构支护技术,自1971年在日本出现以来^[1],已经在国内外地下工程中得到了广泛应用^[2-6]。对于一般管幕法而言,由于受地下水影响较小且为直线管幕,管间土体无需考虑止水或者采用管间锁扣注浆的形式进行止水。而港珠澳大桥连接线拱北隧道暗挖段由于客观条件限制需采用曲线管幕^[7],且考虑到拱北口岸区域地质条件复杂,砂土、淤泥质土、黏土交错分布以及地下水补给丰富的情况,常规方法很难保证管间止水效果。为此,暗挖段采用了“曲线管幕法+人工地层冻结法”相结合的浅埋暗挖隧道超前预支护体系^[8],即“管幕冻结法”。

在管幕冻结法中,管幕支护组合结构是主要承重支护体系,人工地层冻结形成的冻土帷幕则主要起到顶管管间止水作用。管幕冻结作为在国内外首次运用到实际工程中的新工法,国内学者胡向东及其团队通过数值模拟^[9-10]、多种物理模型试验^[11-13]、现场原型试验^[14-16]、温度场解析求解等^[17]多种方法,对其冻结控制效果及相关力学特性进行了较为系统性的研究。而针对管幕冻结法中管间冻结止水效果的分析较少^[18],更缺乏管间冻结止水效果的实测数据验证。

本文基于工程现场温度实测数据,根据管幕冻结法布管规律,分析了积极冻结期冻土交圈情况及交圈后管间冻土发展情况,以及开挖期间热扰动对管间冻土的影响。通过对工程各阶段管间冻结止水效果的实测数据分析,验证了曲线管幕冻结法管间的冻结止水效果,以期为今后类似工程的开展提供借鉴和指导。

1 管幕冻结及温度监测方案

1.1 管幕支护体系

拱北隧道采用上下叠层大断面暗挖隧道方案下穿拱北口岸,该暗挖段全长255 m,开挖断面高约19 m,宽约20 m,断面面积达345 m²,埋深仅5~6 m。隧道周围先采用36根直径1620 mm钢管幕作为超前支护,后采用冻结法对管幕间距约35 cm的土体进行管间止水。整个管幕支护体系及开挖分区如图1所示,其中奇数编号管幕沿径向向内偏移约30 cm。在冻结开始之前,奇数顶管内填充混凝土,偶数顶管为空管幕。填充混凝土的实管幕一方面提高了整个支护体系的强度和刚度,另一方面也有利于冻结开始后向四周传递冷量。空管幕既可在冻结施工过程中作为检修通道,方便冻土监测,又可在冻结施工完成后为融沉注浆提供施工平台,空顶管待隧道施工完成后会及时填

充混凝土。在建设后期开挖时,采用分台阶开挖的方式,从上至下分为A、B、C、D、E共5个台阶,14个分区进行开挖。

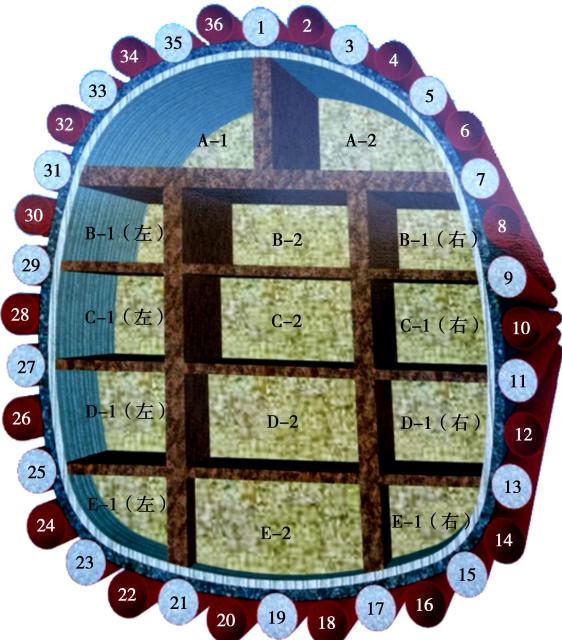


图1 管幕支护体系示意图

Fig. 1 Schematic of pipe roof support system

1.2 冻结方案

管幕冻结法中,密布的管幕主要起承载作用,冻土帷幕主要用于封水。因此,冻结方案的设置与一般的冻结法存在差异。冻结时既要考虑管间止水的要求又要考虑地表沉降与隆起的控制,即:冻土帷幕的最小厚度必须满足顶管间封水的要求;冻土帷幕的最大厚度必须满足地表变形对土体冻胀的要求。经过分析,胡向东等提出管幕冻结法“冻起来,防冻胀,抗弱化”的三大理念^[14],并基于该理念,建立了圆形冻结管、异形加强管和限位管组成的全新冻结方案。

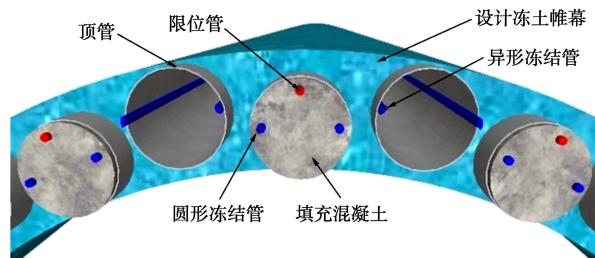


图2 冻结方案示意图

Fig. 2 Schematic of freezing scheme

如图2所示,在36根管幕中的每一个奇数管内,在管边缘靠中间位置布设两根Φ108圆形冻结管作为主要冷源,靠近冻土帷幕外边缘位置布设一根Φ159限位管用于控制冻土厚度;而在偶数管内,也在管边

缘靠中间位置布置异形冻结管以达到加强冻结、保障管间有效封水的目的。

1.3 温度测点布置

在整个暗挖施工过程中, 采用同济大学冻结法课题组研发的冻结法远程测温系统进行土体温度和冻结管盐水去回路温度的监测^[19]。对于土体温度的监测, 沿暗挖段隧道纵向布置 32 个测面, 每两个测面间隔约 8 m。每个测面的测温点分为管壁温度测点以及管外土体温度测点。

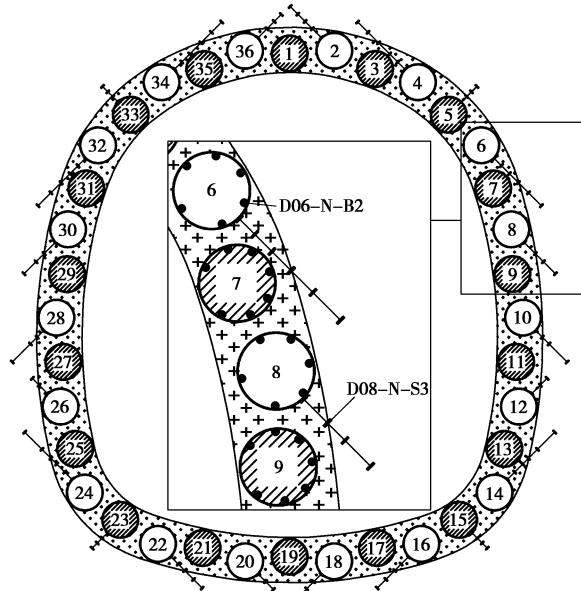


图 3 测点布置示意图

Fig. 3 Layout of measuring points

第 N 个测面的测点布置如图 3, 考虑到冻结管布置情况, 奇数管内有 7 个管壁测点, 偶数管内有 6 个管壁测点; 管外土体测点是从各个测面的全部偶数管与 4 根奇数管 (#5 管、#15 管、#23 管、#33 管) 管内向外打测温孔, 并在孔内布置 3~7 个温度测点。结合各个测点的温度即可判断冻土帷幕的发展变化情况。测点命名规则为: D+管幕编号-测面号-B/S(B 代表管壁测点, S 代表管外土体测点)+测点顺序 (土体测点为自外向内, 管壁测点则是顺时针, 最外侧的作为起始)。例如, D08-15-S3 表示 #8 顶管第 15 测面自外向内第三个土体测点; D06-24-B2 表示 #6 顶管第 24 测面, 从该顶管最外侧管壁测点开始, 顺时针方向第 2 个管壁测点。

下文将对不同阶段, 多个区域的实测数据进行分析, 图 4 为所选取分析区域及测点的示意图, 其中黑色框 (A1、A2) 区域为积极冻结期交圈阶段所选区域, 蓝色框 (A3、A4) 为交圈后选取的分析区域, 红色框 (A5、A6) 为开挖期间所选分析区域。

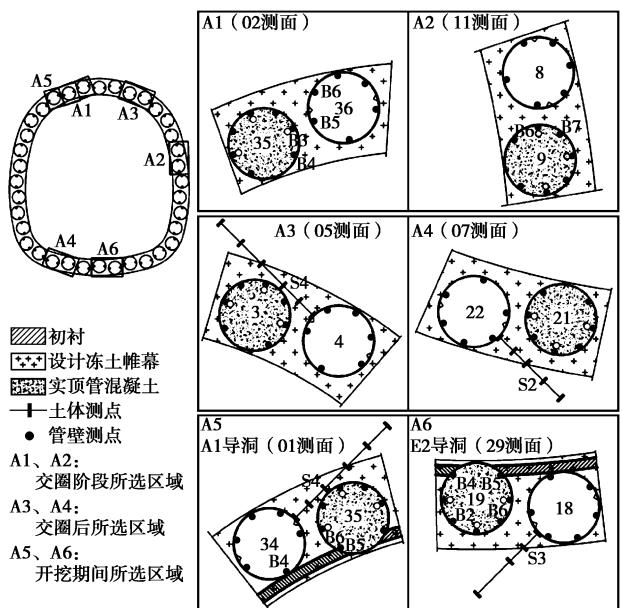


图 4 分析区域及所用测点示意图

Fig. 4 Layout of regions and measuring points

2 积极冻结期封水效果分析

工程从 2016 年 2 月中下旬起陆续开启各区域冻结管的盐水循环, 在 2016 年 6 月 20 日前后进行了小型试开挖, 而后于 2016 年 8 月 20 日前后大规模破墙, 开挖速度明显加快。本文将冻结机组开启至 8 月 19 日视作土体的积极冻结期。影响管幕冻结法管间止水效果的关键因素是冻土厚度。由于隧道断面大, 埋深浅的特点, 冻土沿隧道横断面径向分布并不均匀; 从隧道纵向看, 隧道两端附近的冻土分布情况与隧道中部的冻土分布情况也不相同。因此, 用于判断止水效果的冻土厚度应是管间局部的冻土厚度, 该厚度在同一时间对于不同部位的管幕的厚度差别可能很大。

由实测温度求解冻土厚度的通常做法是基于土体测点的温度值, 进行线性插值得到冰点的位置, 从而算出冻土厚度。上述做法虽然简便可行, 但缺乏物理依据, 且对于本工程, 在冻结后期, 当冻土的发展范围已超出测温孔底部以外时, 上述差值方法误差会加大。因此, 本文结合无限大区域内少量冻结管稳态温度场解析解研究成果^[20-21], 以管间土体实测数据为基础, 在积极冻结不同时段分别运用单管和双管稳态温度场解析解公式对两顶管管间的冻土厚度进行求解, 相关示意图如图 5, 6 所示。

单管公式为

$$T = T_0 + \frac{\ln \frac{r}{\xi}}{\ln \frac{r_0}{\xi}} (T_f - T_0) \quad (1)$$

公式 (1) 中 r 为任意点 M 到冻结管中心的距离,

T 为该点的温度, r_0 为冻结管半径, T_0 为土体冻结温度, T_f 为冻结管表面温度, ξ 为冻土边界到冻结管中心的距离。

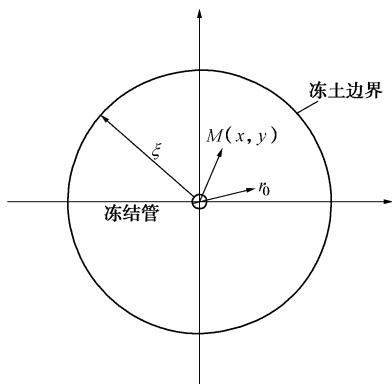


图 5 单管模型示意图
Fig. 5 Model of a single pipe

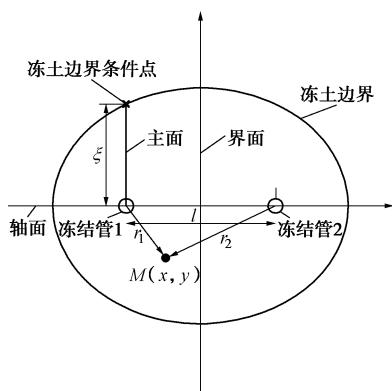


图 6 双管模型示意图
Fig. 6 Model of two pipes

双管公式为

$$T = T_0 + \frac{\ln \frac{r_1}{\xi} + \ln \frac{r_2}{\sqrt{\xi^2 + l^2}}}{\ln \frac{r_0}{\xi} + \ln \frac{l}{\sqrt{\xi^2 + l^2}}} (T_f - T_0) \quad (2)$$

公式 (2) 中 r_1 和 r_2 分别为 M 点到 1 号和 2 号冻结管中心的距离, r_0 为冻结管半径, T_0 为土体冻结温度, l 为两管间距, T_f 为冻结管表面温度, ξ 为假设的 1 号冻结管中心沿 y 方向 (正面) 到冻土边界的距离。

2.1 冻土初期交圈

冻土帷幕的交圈时间是冻结法中一个很有参考意义的时间点, 其说明了冻土帷幕初步形成整体, 具有一定封水性。能否在工程要求的时间内实现交圈也是判定管幕冻结法这一新工法是否合理的标准之一, 需要说明的是, 这里所说的“交圈”不一定是指一般冻结工程中两冻结管管间冻土的交圈, 也有可能是冻土与相邻顶管的交圈 (如图 7 交圈模式 1 的情况)。

在实际施工中, 冻结管的开启时间不完全相同, 各个圆形冻结管先开启, 而后为了加快冻结速度陆续开启其他异形加强管。交圈可以归为两种模式: 一种如图 7 (a) 所示, 圆形冻结管在异形冻结管开启之前, 冻土就已经从实顶管发展至相邻的空顶管形成交圈; 另一种如图 7 (b) 所示, 在异形管开启之前, 冻土尚未发展到相邻空顶管, 在异形加强管开启后, 圆形和异形加强管配合下, 冻土形成交圈。

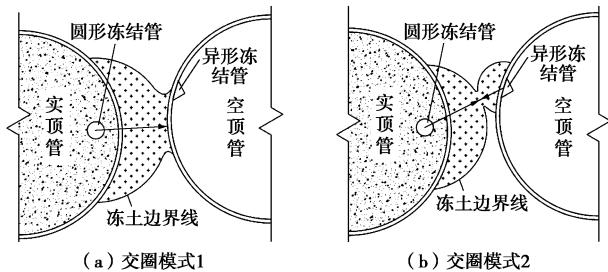


图 7 交圈模式示意图

Fig. 7 Intersection mode

首先选取图 4 中 A2 区域 #8 与 #9 顶管第 11 测面进行冻土交圈研究, 该区域埋深与进深都很大, 周围也不存在明显热源。如图 8 所示为交圈模式 1 下测点温度与相应计算冻土厚度随时间变化情况, 当 #9 顶管的两根圆形冻结管于 3 月 11 日正式开启后, 测点 D09-11-B6 与 B7 温度迅速下降, 通过上文提到的单管公式计算得到只开启 #9 圆形冻结管时冻土厚度随时间变化情况, 经过计算, 3 月 19 日左右冻土已经达到交圈所需厚度, 此时 #8 顶管的异形加强管尚未开启, 此情况即为交圈模式 1。

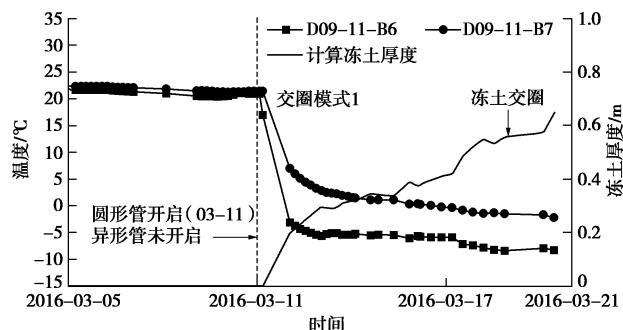


图 8 交圈模式 1 下测点温度、计算冻土厚度随时间变化

Fig. 8 Temperatures of measuring points and calculated thicknesses of frozen soil in overlap mode 1

而对于有些区域, 特别是隧道上部或者纵向端部区域, 由于相对接近地表, 土体初始温度较高、边界散热较快, 同时一些区域会受到上部排水管等既有人造物的热扰动影响, 上方区域交圈速度相对较慢, 形成交圈模式 2 的情况。如图 9 是图 4 中 A1 区域 #35 与 #36 顶管第 2 测面的测点温度与计算冻土厚度随时间

变化情况。该区域位于东区上方端部, 圆形冻结管在2月下旬就已经开启, 但直到3月23日#36顶管中的异形加强管开启前, 仅采用#35顶管中的圆形冻结管尚未使得顶管间土体形成交圈模式1的情况。而开启异形管后, 管间冻土在2根冻结管的作用下迅速发展, 在之后约4 d的时间, 通过交圈模式2完成该区域土体的交圈。

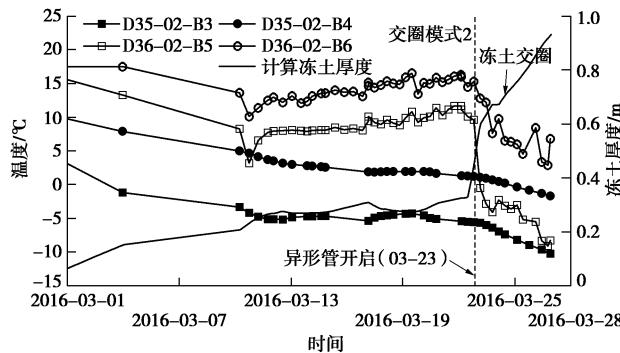


图9 交圈模式2下测点温度、计算冻土厚度随时间变化

Fig. 9 Temperatures of measuring points and calculated thicknesses of frozen soil in overlap mode 2

上面2个区域的边界条件差异很大, 前者周围土体较厚, 热扰动较小, 后者接近土体边界, 外接热扰动影响大。两者代表了不同区域前期冻结交圈的不同情况。对于热扰动较少的区域, 仅开启圆形冻结管其交圈速度已经很快, 往往在开启圆形冻结管后, 10 d内冻土即可发展至相邻空顶管形成交圈, 冻土帷幕发展速度可满足工程要求。对于散热较为严重的区域, 仅依靠圆形冻结管快速形成交圈是较慢的, 开启异形加强管后, 两种冻结管配合下, 交圈速度明显加快, 也可以满足冻结工程对交圈的要求。

2.2 交圈后冻土帷幕发展情况

交圈后, 冻土继续发展, 采用如前所述的双管公式对管间冻土厚度进行计算。图10(a), (b)分别为图4中A3和A4区域内管间测点温度、相应支路盐水温度及通过双管公式计算得到的冻土厚度随时间的变化情况。

整体上看, 盐水温度是冻土发展趋势的主要影响因素。如图10, 初期测点温度下降, 冻土平稳发展, 但在5月中上旬至6月初, 由于冷冻机组维护等要求, 盐水温度整体升高, 导致该时间段土体测点温度下降速度放缓, 甚至小幅回升, 冻土发展停滞; 盐水温度重新调低后, 冻土重新开始发展。其中, 在7月30日至8月1日3 d时间内, 受到台风“妮姐”影响工程停电停工, 测点温度都有一定回升, 对比图10(a), (b), 处于上部端部的A3区域受到台风影响较大, 下部A4区域受到的影响较为有限。



(a) #3、#4顶管02测面区域冻土发展情况



(b) #21、#22顶管09测面区域冻土发展情况

图10 盐水、测点温度及顶管间计算冻土厚度随时间变化

Fig. 10 Temperatures of brine and measuring points and calculated thicknesses of frozen soil vs. time

此外与图10(b)相比, 图10(a)所示区域整体而言冻结效果不如图10(b), 主要原因除了A3区域距离地面较近外, 还因为在其附近位置上方有一根排水管道, 其水体流动导致了很大的热量交换。图10(b)所示区域则埋深和进深较大、外界热扰动很小, 冻土发展稳定, 在正式开挖前计算冻土厚度达到4.5 m, 冻结效果良好。大多数区域土体冻结情况都与图10(b)类似。

前文计算所得为开挖前理论冻土厚度, 考虑到开挖时位于开挖界限内的冻土会被挖除, 应根据设计资料, 对冻土厚度进行相应折减。通过双管公式, 对正式开挖前一天多个部位顶管间冻土厚度进行计算, 同时考虑开挖折减, 结果见表1, 2。

表1 上部土体选取测点及相应冻土厚度

Table 1 Thicknesses of frozen soil wall calculated by selected measuring points of upper soil

东区端部		中区		西区端部	
选取测点	冻土厚度/m	选取测点	冻土厚度/m	选取测点	冻土厚度/m
D02-01-S4	1.56	D36-10-S3	3.42	D36-26-S3	2.49
D02-04-S4	1.45	D36-13-S3	2.78	D36-28-S3	2.72
D36-01-S4	0.84	D36-14-S3	3.07	D36-29-S3	2.19
D36-03-S4	0.43	D36-15-S3	2.62	D36-31-S3	1.35
D36-05-S4	0.52	D36-20-S3	2.74	D36-32-S3	0.96

表1 反映出东区端部土体在端部散热及上方有热

源的影响下,冻土厚度非常小,冻结情况较差,而西区端部也有一小段土体冻土厚度相对较小。中间区域则冻结情况良好,冻土厚度均超过 2.5 m。由表 2 可知,中部和下部土体几乎都达到了 2 m 以上的冻土厚度。就整个断面而言,开挖前管间冻土均已交圈,管间封水要求能够满足。

表 2 中下部土体选取测点及相应冻土厚度

Table 2 Thicknesses of frozen soil wall calculated by selected measuring points of middle and lower soil

东区端部		中区		西区端部	
选取测点	冻土厚度/m	选取测点	冻土厚度/m	选取测点	冻土厚度/m
D16-01-S3	3.69	D16-08-S3	4.17	D16-29-S3	2.05
D16-02-S3	2.58	D16-13-S3	5.03	D16-30-S3	1.64
D16-03-S3	2.23	D16-14-S3	3.72	D16-31-S3	2.66
D30-01-S3	2.31	D30-08-S3	3.71	D26-29-S1	2.73
D30-02-S3	3.70	D30-10-S3	5.85	D26-30-S1	2.93
D30-03-S3	3.85	D30-13-S3	3.16	D26-31-S1	2.32
D30-04-S3	3.05	D30-16-S3	2.30	D26-32-S1	2.00

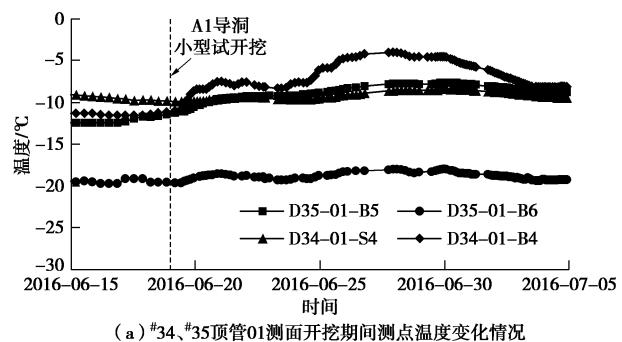
3 开挖期间管间封水效果分析

工程于 2016 年 6 月 20 日前后进行了小型试开挖,而后于 2016 年 8 月 20 日前后大规模破墙,开挖速度加快,次年 4 月 10 日正式贯通,由于隧道断面大,开挖速度较慢,过程一直持续到次年 4 月份。开挖过程中,各种工序如焊接、喷射初衬混凝土等都会对冻土产生不可忽视的热扰动。本文选取了两个典型区域(图 4 中 A5、A6),分析其相应测点温度随时间变化情况,来估计开挖热扰动对管间冻土的影响。

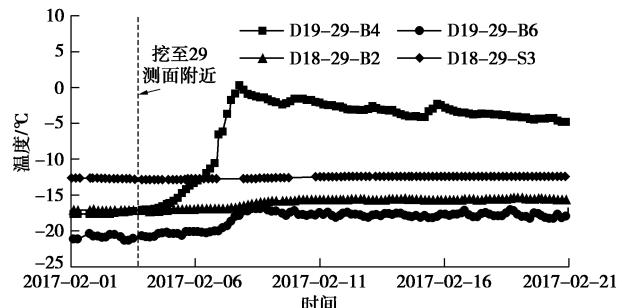
图 11 (a) 是试开挖期间 A1 导洞的#34 与#35 顶管第 1 测面(图 4 中 A5 区域)的测点温度随时间变化情况,可以看到从 6 月 19 日试开挖开始,测点 D34-01-B4 的温度值从-12℃迅速上升至-8℃,至 6 月 28 日左右上升至最高值约为-5℃,随后逐渐下降,最终保持在-10℃左右。测点 D35-01-B5 的升温及降温规律类似,只是幅度不如前面所述的测点大。其余测点随时间变化趋势受开挖影响很小。结合图 4 分析区域测点布置图可知,最靠近开挖面的 B4 与 B5 测点确实受到了开挖热扰动的影响,但全程温度低于冻土融点,说明试开挖期间#34 与#35 顶管管间冻土温度有一定上升但基本未融化,试开挖对冻土的影响有限。分析其原因,试开挖时施工进度与正常开挖相比较慢,且其开挖面较小,开挖控制较为精细,这样相应的空气热侵蚀以及施工热扰动较小。

图 11 (b) 为正式开挖期间, #18 与#19 顶管间 29 测面(图 4 中 A6 区域)测点温度随时间变化情况。可以看到,测点 D29-29-B4 温度受开挖影响最大,最高温度上升至 0℃左右。D29-29-B5 温度变化情况与

B4 几乎一样,故未放在图中。结合图 4 中 A6 区域测点布置图可知,B4 和 B5 位于开挖边界上,其周围的冻土因超挖而被挖除,即顶管在这些点附近的部分会暴露在空气中。因此 B4 和 B5 测点在开挖期间温度会急剧升高,超过冻土的融点。其余测点受到的影响则非常有限,上图中的 B6 测点是除 B4 与 B5 测点外最接近开挖面的测点,升温幅度不超过 5℃,即使在峰值时仍能保持-15℃以下的低温,其周围的冻土所受影响很小,而更外部的冻土所受影响则几乎可以忽略不计。



(a) #34、#35 顶管 01 测面开挖期间测点温度变化情况



(b) #18、#19 顶管 29 测面开挖期间测点温度变化情况

图 11 开挖时测点温度趋势图

Fig. 11 Temperatures of measuring points during excavation

大部分的管间测点温度变化情况与图 11 (b) 类似,最靠近开挖面的测点会受到影响,稍远一些的测点则几乎不受影响。若将开挖期间空气温度设定为 30℃,接近开挖面的土体近似看作线性温度场分布,则对上述多种情况的土体进行插值分析后,可以得到,开挖期间产生的热扰动导致冻土厚度的削弱程度往往不到 20 cm。与 2 m 以上的冻土厚度相比,此削弱对冻土管间封水效果的影响很有限,因此开挖期间冻土管间止水效果也是有保证的。

4 结论与建议

本文针对拱北隧道管幕冻结法暗挖工程,基于工程现场实测温度数据,就管间冻结止水效果问题对积极冻结期的管间冻土厚度及开挖期的管间温度变化情况进行了分析,得到的结果如下。

对于积极冻结期:

(1) 顶管间冻土交圈模式可归为两种: 一种是圆形冻结管单独开启的时间段内, 冻土已从实顶管发展至相邻的空顶管形成交圈; 另一种是圆形冻结管单独开启的时间段内未交圈, 后来异形加强管开启后迅速实现交圈。两种交圈模式都能在工程允许的时间内完成, 从而使管幕具有初步的封水性能。

(2) 交圈后, 不同隧道断面相比, 靠近中间的冻土帷幕发展好于端部的; 同一隧道断面相比, 靠近中下部的冻土帷幕发展好于上部的。

对于开挖期:

(1) 试开挖期间对施工的精细控制有利于减小管间冻土的弱化。

(2) 正式开挖期间开挖热扰动对于紧挨开挖面的冻土造成显著影响, 而稍远一些的冻土则几乎不受影响。

(3) 开挖热扰动对于管间冻土的削弱是极为有限的, 考虑 20 cm 的折减后, 冻土帷幕仍能保持足够的冻土厚度以达到封水效果。

参考文献:

- [1] COLLER P J, ABBOTT D G. Microtunneling techniques to form an in situ barrier around existing structures[C]// High Level Radioactive Waste Management: Proceedings of the Annual International Conference. Las Vegas: ASCE, 1994: 386 - 394.
- [2] MUSSO G. Jacked pipe provides roof for underground construction in busy urban area[J]. Civil Engineering, ASCE, 1979, **11**(49): 79 - 82.
- [3] DARLING P. Jacking fibre glass in New York[J]. Tunnels and Tunnelling, 1993, **25**(4): 18 - 20.
- [4] 熊谷镒. 台北复兴北路穿越松山机场地下道之规划与设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1997, **25**(增刊 1): 57 - 61. (XIONG Gu-yi. The programme and design of the subway acrossing the Songshan Airport in the North of Fuxin Road in Taipei[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 1997, **25**(S1): 57 - 61. (in Chinese))
- [5] 孙 钧, 虞兴福, 孙 昊, 等. 超大型“管幕-箱涵”顶进施工体变形的分析与预测[J]. 岩土力学, 2006, **27**(7): 1021 - 1027. (SUN Jun, YU Xing-fu, SUN Min, et al. Analysis and prediction on soft ground deformation of a super-large shallow buried “pipe-roofing and box-culvert” jacking project under construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(7): 1021 - 1027. (in Chinese))
- [6] 万 敏, 白 云, 陈文财. 管幕箱涵顶进施工中迎面土压力研究[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(6): 59 - 63. (WAN Min, BAI Yun, CHEN Wen-cai. A study on the front earth pressure during box culvert jacking within pipe-roof[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(6): 59 - 63. (in Chinese))
- [7] 余 晶, 程 勇, 贾瑞华. 港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道方案论证[J]. 现代隧道技术, 2012, **49**(1): 119 - 125, 131. (YU Jing, CHENG Yong, JIA Rui-hua. Option demonstration for the Gongbei Tunnel at the Zhuhai Link of the Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, **49**(1): 119 - 125, 131. (in Chinese))
- [8] 程 勇, 刘继国. 拱北隧道设计方案[J]. 公路隧道, 2012(3): 34 - 38. (CHENG Yong, LIU Ji-guo. Gongbei Tunnel design[J]. Highway Tunnel, 2012(3): 34 - 38. (in Chinese))
- [9] HU Xiang-dong, SHE Si-yuan. Study of freezing scheme in freeze-sealing pipe roof method based on numerical simulation of temperature field[J]. American Society of Civil Engineers, 2012: 1798 - 1805.
- [10] 胡向东, 方 涛. 管幕冻结法在隧道开挖及初期支护过程中温度场数值模拟分析[J]. 中国公路, 2013(增刊): 72 - 79. (HU Xiang-dong, FANG Tao. Numerical simulation analysis of temperature field of freezing-sealing pipe roof method in tunnel excavation and initial supporting process[J]. Chinese Highway, 2013(S0): 72 - 79. (in Chinese))
- [11] 胡向东, 任 辉, 陈 锦, 等. 管幕冻结法积极冻结方案模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2014, **51**(5): 92 - 98. (HU Xiang-dong, REN Hui, CHEN Jin, et al. Experimental study on active freezing acheme model of freeze-sealing pipe roof method[J]. Modern Tunneling Technology, 2014, **51**(5): 92 - 98. (in Chinese))
- [12] HU Xiang-dong, FANG Tao, CHEN Jin, et al. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **72**(2): 55 - 63.
- [13] 胡向东, 邓声君, 汪 洋. 拱北隧道“钢管-冻土”复合结构承载力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1481 - 1490. (HU Xiang-dong, DENG Sheng-jun, WANG Yang. Mechanical tests on bearing capacity of steel pipe-frozen soil composite structure applied in Gongbei Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1481 - 1490. (in Chinese))
- [14] 胡向东, 郭晓东, 王殷铜, 等. 管幕冻结法现场试验研究[C]// 全国水下隧道建设与管理技术交流会, 2015. (HU Xiang-dong, GUO Xiao-dong, WANG Yin-tong, et al. Field test study on freezing technology of freeze-sealing pipe

- roof[C]// National Underwater Tunnel Construction and Management Technology Exchange Conference, 2015. (in Chinese)
- [15] HU Xiang-dong, DENG Sheng-jun, REN Hui. In situ test study on freezing scheme of freeze-sealing pipe roof applied to Gongbei Tunnel in the Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge[J]. Applied Sciences-Basel, 2017, 7(1): 27.
- [16] 任 辉, 胡向东, 洪泽群, 等. 超浅埋暗挖隧道管幕冻结法积极冻结方案试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 320 – 328. (REN Hui, HU Xiang-dong, HONG Ze-qun, et al. Experimental study on active freezing scheme of freeze-sealing pipe roof used in ultra-shallow buried tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 320 – 328. (in Chinese))
- [17] 胡向东, 洪泽群. 管幕冻结特殊布管形式稳态温度场解析解[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 113 – 121, 154. (HU Xiang-dong, HONG Ze-qun. Analytical solution to steady-state temperature field of freeze-sealing pipe-roof with specific freezing pipe arrangement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 113 – 121, 154. (in Chinese))
- [18] 李 剑, 李志宏, 胡向东. 管幕冻结暗挖工法冻结止水效
- 果分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 751 – 758. (LI Jian, LI Zhi-hong, HU Xiang-dong. Analysis on water sealing effect of freezing-sealing pipe roof method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 751 – 758. (in Chinese))
- [19] 胡向东, 刘瑞锋. 基于“一线总线”的冻结法温度监测系统[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 937 – 940. (HU Xiang-dong, LIU Rui-feng. Temperature monitoring system for freezing method based on “1-wire bus”[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 937 – 940. (in Chinese))
- [20] 胡向东, 郭 旺, 张洛瑜. 无限大区域内少量冻结管稳态温度场解析解[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1953 – 1960. (HU Xiang-dong, GUO Wang, ZHANG Luo-yu. Analytical solution of steady state temperature field of a few freezing pipes in infinite region[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11): 1953 – 1960. (in Chinese))
- [21] HU Xiang-dong, ZHANG Luo-yu. Analytical solution to steady-state temperature field of two freezing pipes with different temperatures[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2013, 18(6): 706 – 711.

标准摘录：出版物上数字用法（GB/T 15835—2011） 选用阿拉伯数字情形

（1）用于计量的数字

在使用数字进行计量（将数字用于加、减、乘、除等数学运算）的场合，为达到醒目、易于辨识的效果，应采用阿拉伯数字。

示例 1： -125.03, 34.05%, 63%~68%, 1:500, 97/108
当数值伴随有计量单位时，如：长度、容积、面积、体积、质量、温度、经纬度、音量、频率等等，特别是当计量单位以字母表达时，应采用阿拉伯数字。

示例 2： 523.56 km (523.56 千米)

346.87 L (346.87 升)

5.34 m² (5.34 平方米)

567 mm³ (567 立方毫米)

605 g (605 克)

100~150 kg (100~150 千克)

34~39°C (34~39 摄氏度)

北纬 40° (40 度)

120 dB (120 分贝)

（2）用于编号的数字

在使用数字进行编号（将数字用于为事物命名或排序，但不用于数学运算）的场合，为达到醒目、易于辨识的效果，应采用阿拉伯数字。

示例： 电话号码：9888

邮政编码：100871

通信地址：北京市海淀区复兴路 11 号

电子邮件地址：x186@186.net

网页地址：<http://127.0.0.1>

汽车号牌：京 A00001

公交车号：302 路公交车

道路编号：101 国道

公文编号：国办发[1987]9 号

图书编号：ISBN 978-7-80184-224-4

刊物编号：CN11-1399

章节编号：4.1.2

产品型号：PH-3000 型计算机

产品序列号：C84XB-JYVFD-P7HC4-6XKRJ
—7M6XH

单位注册号：02050214

行政许可登记编号：0684D10004—828

（3）已定型的含阿拉伯数字的词语

现代社会生活中出现的事物、现象、事件，其名称的书写形式中包含阿拉伯数字，已经广泛使用而稳定下来，应采用阿拉伯数字。

示例： 3G 手机，MP3 播放器，G8 峰会，维生素 B₁₂, 97
号汽油，“5·27”事件，“12·5”枪击案