

基于冻结法的复合围护墙温度及受力变形特征分析

诸 颖

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200032)

摘 要: 随着城市地下空间大力发展,既有隧道与新基坑的交叉位置通常会造成地下连续墙的不连续,引起地下水渗流、挡土能力不足等问题。以上海某地铁车站深基坑开挖工程为例,基于人工冻结法构造复合围护墙,实现加固土体和防水密封的双重效果。结合有限元分析方法模拟得到隧道周边土体温度分布情况,开展现场监测研究“冻结法+地下连续墙”复合围护墙的受力和变形特征。通过计算弯矩来评价冻胀对地下连续墙的不利影响,并提出墙体抵抗负弯矩的加固要求。

关键词: 人工冻结法;温度分布;数值模拟;现场监测;冻胀

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)09-0143-04

0 引 言

地下空间开发过程中涌现出大量新建基坑邻近既有隧道的近接工程^[1-2]。国内已经有大量的类似工程实例,姚燕明^[3]以明珠二期张杨路车站紧靠已运营的地铁二号线基坑开挖为例,采取高压旋喷桩对地基进行加固,有效的调整了结构的整体受力;田帅^[4]以某上跨地铁隧道深基坑开挖工程为例,采用三维数值模拟计算和施工监测数据分析的方法,对基底加固+抽条施工的基坑开挖方案进行评估,确保地铁区间隧道的正常运行。

人工冻结法具有加固土体和防水密封的双重效果,已被广泛应用于软土地基地铁交叉口和连通道项目施工中,并可以通过温度特性来判断冻结壁再尺寸和强度上是否满足要求^[5]。郜新军等^[6]基于现场试验,对富水软土层条件下的地铁横通道在冻结法施工中温度场变化和地表变形规律进行研究。于长一^[7]结合某地铁横通道冻土帷幕工程,采用数值模拟方法对人工冻结过程中温度场、位移场的耦合作用进行分析,研究温度场的发展规律及冻结施工对周围环境的影响。因此,人工冻结法在复杂地下环境基坑开挖工程中可以广泛应用,实现加固土体和防水密封的双重效果,但是仍需考虑冻结法施工对周围环境产生的不利影响以及冻结过程温度、土体强度、围护墙受力变形等发展规律。

本文以上海某地铁车站上跨既有隧道的深基坑

开挖工程为例,采用有限元进行热流耦合分析,模拟隧道周边土体温度分布情况;同时在现场开展土体温度、围护墙弯矩和变形、支撑轴力和冻结壁移动的实时监测,得到深基坑开挖过程中“冻结法+地下连续墙”复合围护墙的受力和变形特征,并为同地区类似工程的冻结施工提供参考。

1 工程概况

上海市地铁14号线大世界站位于西藏南路金陵路口,为地下二层换乘车站,基坑开挖深度为15.62 m,与已建成的8号线大世界站形成“T”形换乘。基坑周围建筑物和地下管线分布密集,基坑开挖面下部横穿一根 $\Phi 3\ 200$ 的电力隧道,电力隧道内径和外径分别为2 700 mm和3 200 mm,且基坑底部距隧道顶部只有0.5 m。基坑南北侧围护墙采用“门”字形地下连续墙,隧道正上方和两侧地下连续墙深度分别为15 m和35 m,使得靠近电力隧道两侧0.5 m及底部范围无围护封闭措施。电力隧道与基坑关系见图1、图2。

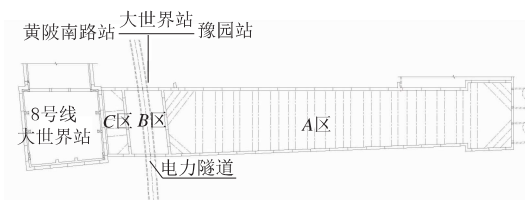


图1 电力隧道及周边基坑平面示意图

2 冻结法设计及开挖方案

考虑到基坑开挖时对电力隧道的保护,将基坑分为A、B、C三个基坑,先进行电力隧道两侧的A、C基坑,再进行B区基坑开挖。根据本工程项目所处土层

收稿日期: 2021-06-03

作者简介: 诸颖(1982—),男,学士,高级工程师,从事土木工程建设工作。

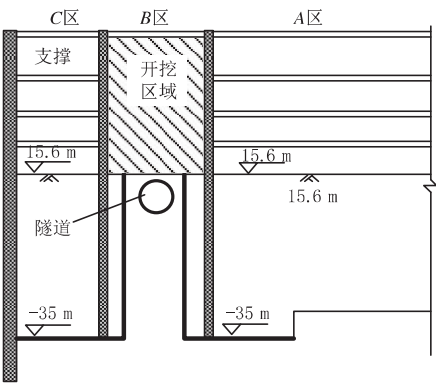


图2 电力隧道及周边基坑剖面示意图

和冻结加固特点,采用垂直和斜向冻结管在基坑南北两侧进行冻结施工,设计冻结有效厚度为3.0 m,平均温度 $T\leq-15^{\circ}\text{C}$ 。南北两侧均沿地连墙外侧,电力隧道两侧布置两排各2个斜向冻结孔,孔深35 m;电力隧道正上方布置一个垂直冻结孔,孔深15.7 m。冻结管选用 $\Phi 127\times 5\text{mm}$ 的R304不锈钢管,供液管规格选用 $\Phi 32\times 3\text{mm}$ 的R304不锈钢管,冻结管内液氮温度 -100°C 。图3为隧道冻结区域示意图。

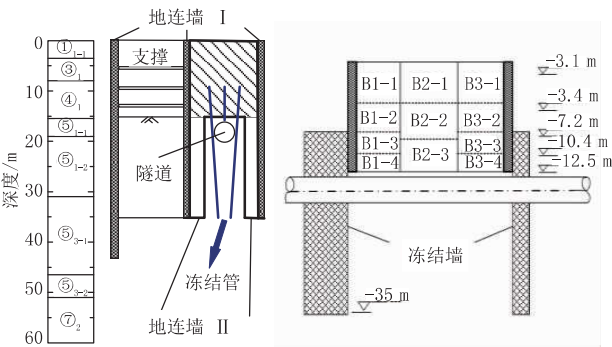


图3 隧道冻结区域示意图

B区基坑内部共设置3个小基坑,坑内围护采用MJS内插H型钢密插,小基坑采用“弹钢琴法”分步施工。基坑开挖不案件节点汇总表1。

表1 基坑开挖关键节点汇总

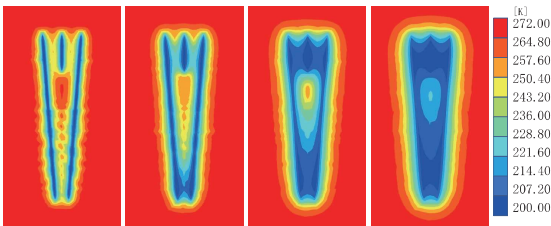
步骤	工况	日期(月/日/年)	持续时间/d
(1)	积极冻结	3/27/2020—5/22/2020	56
(2)	开挖区域 B1-1、B2-1、B3-1	5/23/2020—5/30/2020	64
	开挖区域 B1-2、B3-2	5/31/2020—6/6/2020	71
	开挖区域 B1-3、B3-3	6/7/2020—6/11/2020	76
	开挖区域 B1-4、B3-4	6/12/2020—6/15/2020	80
(3)	区域 B1、B3 的底板和结构施工	6/16/2020—7/12/2020	107
(4)	开挖区域 B2-2、B2-3	7/13/2020—8/1/2020	127
(5)	自然解冻	2020/8/2	

3 数值模拟及温度场分析

基坑积极冻结过程中,对地下水渗流和冻结管热传导的耦合进行分析。基坑冻结过程将消耗大量能量,因此模拟地下水渗流和冻结行为进而为冻结系统进行优化设计^[8]。

模拟地下水渗流和冻结行为过程中不考虑隧道的影响,从全局分析冻结过程隧道周边土体温度场分布和地下水渗流情况。采用PLAXIS2D软件进行热流耦合模拟,关键参数是土体渗透系数、冻结管对流温度控制函数、土体和水的各种温度参数等。计算时初始温度按照 18°C (291K)考虑,土体冻结温度为 -1°C (272K),冻结管考虑对流传热过程,积极冻结时间为50 d。

下面根据数值模拟结果对隧道周边冻结过程进行分析,选取了冻结体顶、电力隧道中部和冻结体第三个标准断面,重点关注冻结壁宽度、断面交圈时间、冻土平均温度三个指标。隧道周边积极冻结期间10 d、19 d、34 d、50 d四个节点的温度场分布见图4。



(a)冻结10 d (b)冻结19 d (c)冻结34 d (d)冻结50 d
图4 隧道周边积极冻结期间10 d、19 d、34 d、50 d四个节点的温度场分布图

参考相似土层导热系数比热容等参数,对冻结管水平截面进行温度场计算。计算得到断面一处积极冻结约19 d开始交圈,冻结50 d时冻结壁宽度约9.6 m;断面二处积极冻结约34 d开始交圈,冻结50 d时冻结壁宽度大10.2 m;断面三处积极冻结约10 d开始交圈,冻结50 d时冻结壁宽度约6 m,积极冻结50 d时冻结壁厚度可满足开挖要求。三个断面冻结区随着时间平均温度见表2。

表2 三个断面冻结区随着时间平均温度

断面	冻结区平均温度/ $^{\circ}\text{C}$			
	10 d	19 d	34 d	50 d
断面一	-11.5	-17.9	-23.6	-30.0
断面二	-5.9	-16.0	-26.1	-42.1
断面三	-13.2	-19.4	-23.5	-28.5
平均温度		-21.475		

4 现场监测及结果分析

为分析基坑冻结过程和开挖过程复合墙温度及受力变形特征,需对冻结区域土体温度、地连墙测斜和内力、和支撑轴力等进行现场监测。

4.1 测温孔监测分析

为了解围护结构范围内不同部位的温度发展状况,以便采取相应的控制措施。本项目分别在B区北侧、南侧各布置4个测温孔,北侧为N-T1、N-T2、N-T3、N-T4,南侧为S-T1、S-T2、S-T3、S-T4。测温点埋深依次为9.8 m、11.8 m、13.8 m、15.8 m、17.9 m、20 m、25 m、30 m、35 m。布点见图5。

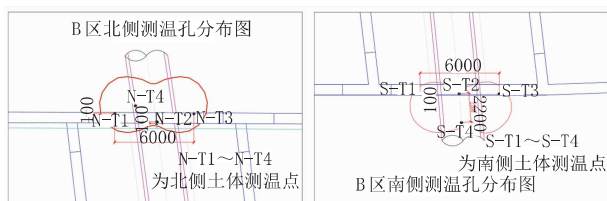


图5 基坑南北侧测温孔平面布置图

B区基坑南侧以S-T3测温孔为研究对象,分析不同深度处土体温度的变化规律。由图6可知,基坑施工全过程中冻结步骤依次为积极冻结、维护冻结、间歇冻结、维护冻结^[9],积极冻结天数为45~50 d,确保冻结土体达到所需强度和厚度值。综合比较土体冻结的主要技术指标,南侧土体平均温度为 -15°C ,北侧土体平均温度为 -20°C ,符合北侧开挖环境复杂难度大的特点,与温度场的耦合分析预测的冻结温度相近,整体满足控制标准。

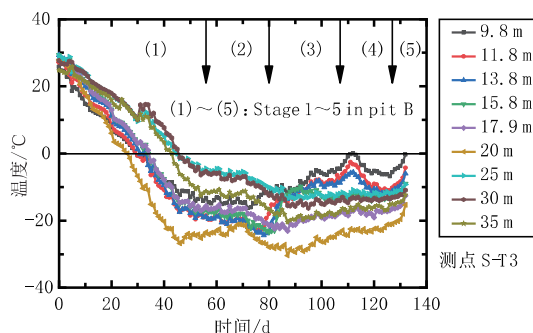


图6 测温孔S-T3不同深度处温度随时间变化曲线图

4.2 冻结土和地连墙典型工况下竖向侧移分析

常规基坑开挖过程中,卸荷作用会导致地连墙和土体向坑内移动^[10]。然而冻结法施工会对连续墙和坑外土体的变形产生影响,最直观的情况为冻结使得土体体积发生冻胀,改变常规基坑中土体和墙体的变形协调关系。因此有必要对冻结土和连续墙进行侧向变形监测,观察“冻结+地连墙”复合墙的变形协调关系,为类似工程提供借鉴和参考价。隧道

正上方冻结土和连续墙典型工况下竖向变形曲线见图7。

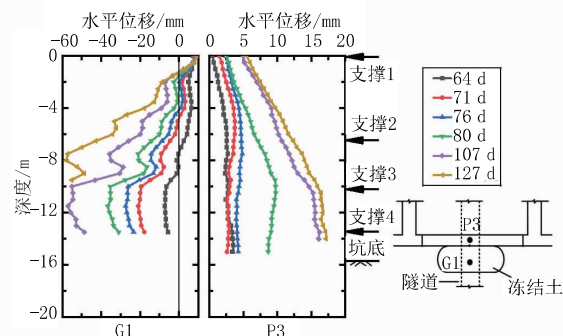


图7 隧道上方冻结土和连续墙的竖向变形分布曲线

由图7可知,上部未冻结区域土体在基坑开挖卸荷作用下有向坑内侧移的趋势;然而冻结区域土体的平均温度为 -15°C ,基坑开挖卸荷引起冻结土向坑内移动的能力较弱,使得冻结土和连续墙之间产生间隙,随着承压水向间隙不断迁移和冻结,间隙内冰的体积不断膨胀造成围护墙和冻结壁进一步地向坑内和坑外方向移动。同时围护墙整体抗侧移刚度比冻结土大,所以冻结土的侧向变形近似为墙体侧向变形的3~4倍。不过,实际情况中体积膨胀是发生在空间范围内,会引起地表隆起和周围结构物的位移响应,此部分仅分析了冻胀作用下土体和围护墙的侧向变形规律,更进一步的研究有望在后续的数值模拟、试验等方面展开。

4.3 地下连续墙弯矩监测分析

为了掌握冻结过程、基坑开挖过程、自然解冻过程中围护墙体的受力特征,需要对墙体内部弯矩进行测量,在基坑开挖侧和挡土侧对应位置处安装钢筋应力计,断面位置沿墙身竖向由上至下2 m、5 m、8 m、11 m、14 m、18 m、24 m、30 m分别布置,钢筋计可以用于测量围护结构沿深度方向的应力,进而换算成弯矩。不同工况下墙体剖面弯矩分布曲线见图8。

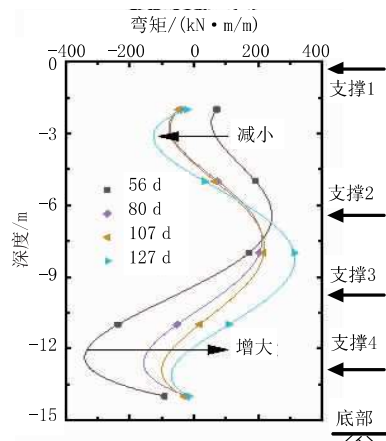


图8 不同工况下隧道上部墙体弯矩分布曲线

由图8可知:地下连续墙上最大弯矩发生截面随着开挖深度的增加逐渐下降,上部和下部两端的弯矩整体上呈现单调减小和增长趋势,中部弯矩变化趋势相对复杂。同时在基坑积极冻结期间和前期开挖阶段,冻结区域墙体负弯矩较大,后期随着基坑自然融化(解冻过程),冻结区域墙体的弯矩不断减小。在实际施工过程中,需要加大对围护墙负弯矩的关注,迎土面同样需满足配筋需求,保证墙体能够抵抗一定的负弯矩,从而保证基坑安全开挖。

5 结 论

本文以上海某地铁车站上跨既有隧道的深基坑开挖工程为例,使用人工冻结法对隧道周边土体进行处理,实现加固土体和防水密封的双重效果。

数值模拟的温度场分布结果与现场实测结果吻合,冻结最薄弱处断面积积极冻结约34 d开始交圈,冻结50 d时冻结壁厚度可满足开挖要求;随着承压水向间隙不断迁移和冻结,其内部体积的膨胀造成围护墙和冻结壁进一步地向坑内和坑外方向移动,开挖完成后冻结土的侧移量约为墙体侧移的3~4倍;通过计算弯矩来评价冻胀对地下连续墙的不利影响,并提出墙体抵抗负弯矩的加固要求,使墙体能

够抵抗一定的负弯矩,保证基坑安全开挖。

参考文献:

- [1] 郭典塔,周翠英,谢琳.紧邻地铁区间隧道基坑开挖对隧道结构的影响浅析[J].现代隧道技术,2014,51(4):88-95.
- [2] Chen J J,Zhu Y F,Li M G,etc.2015. Novel Excavation and Construction Method of an Underground Highway Tunnel above Operating Metro Tunnels[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 28(6): 1943-5525.
- [3] 姚燕明,孙巍.深基坑开挖对共用连续墙的既有车站结构内力影响的空间分析[J].岩土工程学报,2006(S1):1411-1414.
- [4] 田帅.复杂环境下基坑上跨运营地铁隧道的保护方案研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(S2):196-203.
- [5] Fan WH,Yang P.Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage[J].Transportation Geotechnics, 2019(20):100250.
- [6] 郜新军,李铭远,张景伟,等.富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021(40):1-10.
- [7] 于长一.地铁联络通道冻结法施工数值模拟分析[D].天津:天津大学,2014.
- [8] 杨笑.粗粒土地层人工冻结过程中的温度场研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
- [9] 李剑.管幕冻结施工工法研究与应用[D].陕西西安:长安大学,2015.
- [10] 钟俊辉,尹培林,滕超,等.福州软土地区地铁车站基坑墙体变形特性分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(S2):821-827.

~~~~~  
(上接第133页)

相对位置进行观测,以控制中跨节段的提升高程,直至拱肋提升至设计位置。

## 5 结 语

连续刚构钢管拱桥在桥梁建设领域广泛应用,其跨度逐步加大,对施工技术提出了更高的要求,为推动拱桥建设事业的发展,有必要从拱桥基本特点入

手,探讨相适应的施工技术,采取行之有效的质量控制措施。

### 参考文献:

- [1] 莫昀锦.大跨度钢筋混凝土箱型拱桥缆索吊装施工技术[J].智能城市,2020(6):194-195.
- [2] 董海军,丁振宇.跨高速公路系杆拱桥钢管拱安装施工技术分析[J].安徽建筑,2020(8):53-54,86.