

X形冻结管温度场变化规律研究

胡俊^{1,2}, 张皖湘², 李艳荣¹

(1. 海南大学土木建筑工程学院, 海南海口 570228; 2. 中铁时代建筑设计院有限公司, 安徽芜湖 241001)

摘要:为解决现有冻结管单管冻结能力不强致使增加循环冷媒介质用量和施工耗电的问题,可将传统圆形截面设计成异形截面。对X形截面冻结管作一简单介绍,运用有限元软件对X形截面冻结管单管冻结时的温度场变化规律进行研究,同时与圆形、方形、工字形、T形和Y形冻结管单管冻结时的温度场进行对比分析,主要得出结论为:虽然X形等异形冻结管为非圆形截面,但其冻土帷幕温度也是以冻结管为圆心呈同心圆分布,离冻结管越近温度越低;冻结20天时,X形冻结管-10℃圆形冻土帷幕半径发展到200mm,冻结30天时发展到240mm,冻结40天时达到约300mm;与圆形冻结管相比,异形冻结管在保证冻结效果的基础上可大大减少施工耗电量,经济效益显著。

关键词:X形冻结管;人工冻结法;异形冻结管;温度场模拟

中图分类号:TU472.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)03-0069-06

Study on the Change Rule of Temperature Field of X-shaped Freezing Tube/HU Jun^{1,2}, ZHANG Wan-xiang², LI Yan-rong¹ (1. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou Hainan 570228, China; 2. China Railway Shidai Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhu Anhui 241001, China)

Abstract: To improve the freezing ability of single pipe of existing freezing pipe for the situation of circulation refrigerant medium dosage and construction power consumption. The traditional circular section of freezing pipe may be designed into special-shaped ones. The paper briefly introduces the freezing pipe with X-shaped section and made the study on the change rule of temperature field while freezing pipe with X-shaped section being frozen by finite element software. At the same time, by the comparative analysis on the temperature fields of circular-shaped, square-shaped, I-shaped, T-shaped and Y-shaped single pipes, the conclusion was drawn that although the sections of X-shaped and other shapes of freezing pipes are noncircular, the temperature of frozen soil is concentric mode distribution with freezing pipe as the center, the nearer to the freezing pipe is, the lower the temperature. While being frozen 20, 30 and 40 days, the radius of -10℃ circular frozen wall were to 200mm, 240mm and 300mm respectively around X-shaped freezing pipe. Compared with circular freezing pipe, the special-shaped ones have advantages of greatly reducing construction electricity consumption.

Key words: X-shaped freezing pipe section; artificial freezing method; special-shaped freezing pipe; simulation of temperature field

0 引言

人工冻结技术在城市地下工程建设中的应用越来越多,它是通过在地层中插入冻结管,在冻结管中通低温冷媒介质,将土体中的水结成冰,形成冻土帷幕,在冻土帷幕的支护下开挖修筑内部结构,其不受支护深度和范围的限制,是城市地下工程建设中非常重要的一个辅助工法^[1-4]。传统的冻结管均为形状单一的圆形管,致使单管冻结能力不强,极大地增加了循环冷媒介质用量和施工机械能耗,同时,采用单一的圆形冻结管其受力特性也比较单一。

为了解决现有的冻结管单管冻结能力不强,致

使极大地增加了循环冷媒介质用量和施工机械能耗的问题,将传统圆形截面设计成异形截面,可解决上述问题。异形截面可以有多种形式,如X形、方形、工字形、三角形、T形和Y形等。本文对X形冻结管的截面形式和施工工艺作一简单介绍,运用有限元软件对X形截面冻结管单管冻结时的温度场发展规律进行研究,同时与圆形、方形、工字形、T形和Y形冻结管单管冻结时的温度场进行对比分析,论证采用X形冻结管施工的可行性,为今后类似工程设计提供理论和技术参考依据。

收稿日期:2015-04-24; 修回日期:2015-12-14

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(编号:2015M580559);留学人员科技活动择优资助启动类项目(编号:人社厅函[2014]240号);海南省教育厅高等学校科研项目(编号:Hnky2015-10)

作者简介:胡俊,男,汉族,1983年生,讲师,博士(后),从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作,海南省海口市美兰区人民大道58号, hj7140477@hainu.edu.cn。

1 X形冻结管简介

1.1 截面形状

X形冻结管是利用一种截面如字母X形的冻结管外壁代替传统的圆形外壁,冻结管外壁在地层中形成X形空腔,在其中心部位放入供液管,同时在冻结管头部设置回液管,冷介质从供液管流入,经回液管流出,如此循环在地层中形成冻土帷幕,如图1所示。冻结管材质通常为无缝低碳钢管,也可以采用PVC、PPR、ABS、PE等塑料管。与传统圆形冻结管技术相比,X形冻结管具有较大的单位体积材料比表面积,因而可以在不增加工程量的前提下大大提高单管冻结能力,从而提高性价比。其外周长、循环冷介质用量少,该项技术具有施工实用性强、施工质量控制方便、加固效果好且经济性优越等突出优点,具有较大的推广应用价值^[5-6]。冻结管截面形状还可以为方形、工字形、T形和Y形,如图2所示。

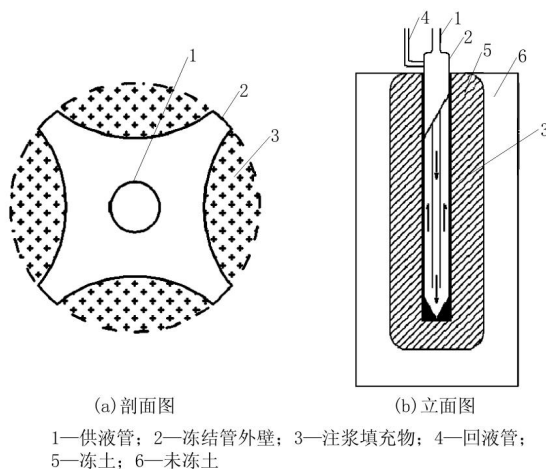


图1 X形冻结管示意图

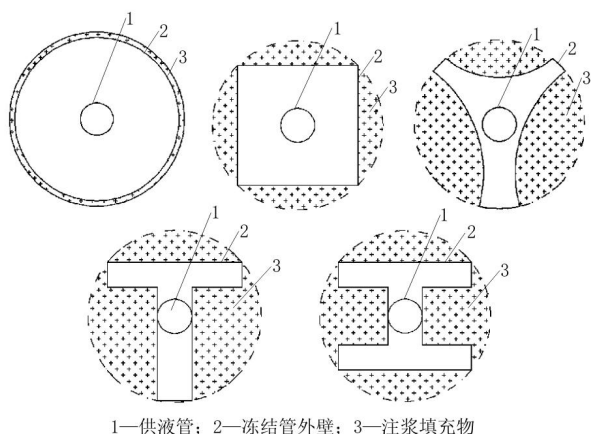


图2 其它截面形式冻结管示意图

1.2 施工工艺

1.2.1 施工流程

施工流程如图3所示。

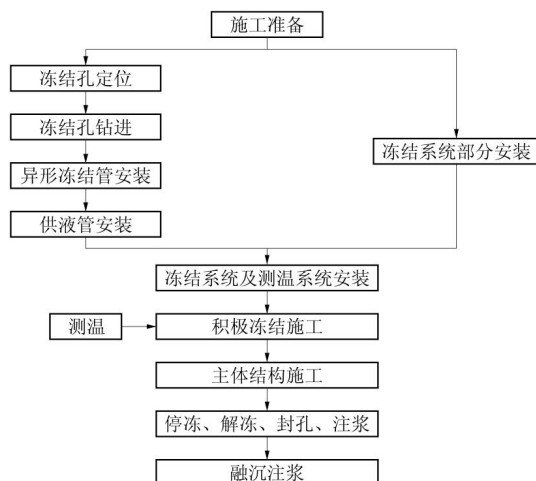


图3 异形冻结管冻结施工工艺流程图

1.2.2 施工注意事项

(1) 依据施工基准点,按冻结孔施工图布置冻结孔。孔位偏差 >100 mm。

(2) 水平钻孔使用MD-60A型钻机,垂直钻孔选用GXY-1型钻机钻进。水平钻孔前要安装孔口管及孔口密封装置。当第一个孔开通后,没有涌水涌砂可继续钻进,但以后钻孔仍要装孔口装置,以防突发涌水涌砂现象出现;若涌水涌砂较厉害,还应注水泥浆(或双液浆)止水。

(3) 为了保证钻孔精度,开孔段是关键。钻进前5 m时,要反复校核钻杆垂直度,调整钻机位置,并采用减压钻进,检测偏斜无问题后方可继续钻进。

(4) 冻结管下入孔内前要先配管,保证冻结管同心度。焊接时,焊缝要饱满,保证冻结管有足够强度,以免拔管时冻结管断裂。下好冻结管后,采用经纬仪灯光测斜法检测,然后复测冻结孔深度,并进行打压试漏。

(5) 试压不合格的冻结管必须进行处理达到密封要求后方可使用。可逐根提出孔内管,并用泥浆泵对逐个焊缝打压,找出泄漏焊缝及原因,及时处理,并作好记录,二次下入后仍须自检。

(6) 在冻结管内下入供液管。供液管底端连接150 mm长的支架,Ø12 mm钢筋焊接。然后安装去、回路羊角和冻结管端盖。

(7) 冻结管安装完毕后,用木塞等堵住管口,以免异物掉进冻结管。

(8) 测温孔施工方法与冻结管相同。

2 温度场数值模型的建立

2.1 计算基本假定

假定土层具有均匀的初始温度场,初始温度取 18 ℃(一般地层 10 m 以深恒温带温度为 15 ~ 20 ℃);土层为一层,视为均质、热各向同性体;忽略水分迁移的影响。

2.2 计算模型和参数选取

本文分别建立 X 形、圆形、方形、工字形、T 形和 Y 形冻结管单管冻结时的二维温度场数值模型,选取了九节点网格划分格式,网格划分后的计算模型如图 4 所示。整个二维温度场几何模型为直径为 1 m 的圆形,在圆形中心布设不同形状的冻结管,不同形状冻结管的外接圆直径都为 127 mm,即异形冻结管布设在钻孔直径为 127 mm 的圆中,与该圆外接。模型几何尺寸如图 4 所示。

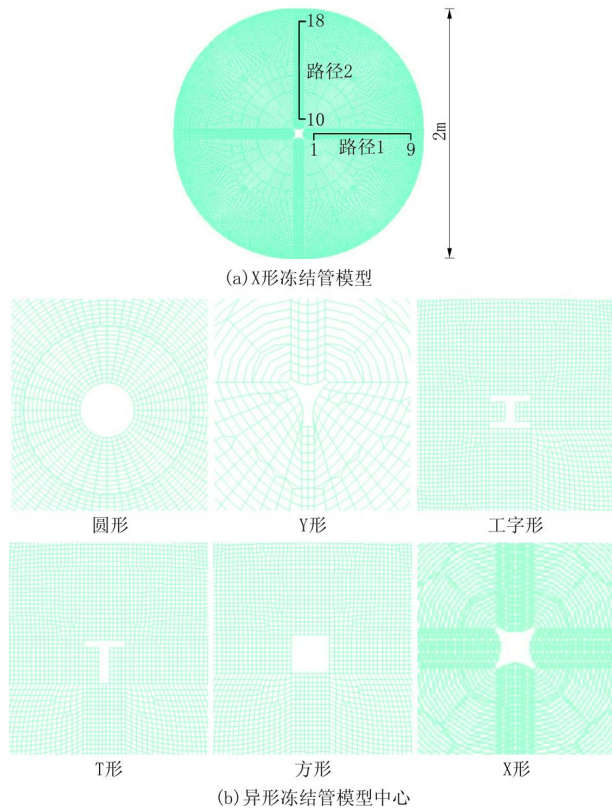


图 4 网格划分后模型及研究路径示意图

模型的材料参数如表 1 所示,依据为相关报告及试验^[7-10]。

冻结前地层初始温度取 18 ℃。直接将温度荷载施加到冻结管管壁上,冻结管管壁为热荷载边界,以盐水温度作为边界荷载,积极冻结期间盐水降温计划见表 2。根据降温计划,取冻结时间步长为 40 天,

表 1 土体材料参数

密度/ (kg·m ⁻³)	含水 量/ %	导热系数/(kJ·m ⁻¹ ·d ⁻¹ ·℃ ⁻¹)		比热/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)		相变 潜热/ (×10 ⁸ J·m ⁻³)	冻结 温度 区间/ ℃
		未冻土	冻土	未冻土	冻土		
1880	16.8	118	179	1.53	1.61	1.20	[-1,0]

表 2 盐水温度降温计划

时间/d	温度/℃	时间/d	温度/℃
0	18	15	-28
1	0	20	-28
5	-15	30	-28
10	-28	40	-28

每步时间长为 24 h。采用带相变的瞬态导热模型。

2.3 研究路径

为了更好地研究 X 形及其它异形冻结管单管冻土帷幕的温度场变化与分布规律,分别设置了 2 条路径(如图 4 所示)。路径 1 和路径 2 分别设置在水平和垂直方向,从距离模型边界 100 mm 开始,每隔 100 mm 设置一个分析点,每条路径有 9 个分析点。

3 温度场模拟结果与分析

3.1 X 形冻结管

3.1.1 冻土帷幕温度场等值线

图 5 为 X 形冻结管不同冻结时间温度场计算等值线图。可以看出:虽然 X 形冻结管为非圆形截面,但是其冻土帷幕温度也是以冻结管为圆心呈同心圆分布,离冻结管越近温度越低。随着冻结时间的增加,冻土帷幕厚度逐渐增加。到冻结 20 天时,-10 ℃ 圆形冻土帷幕半径约发展为 200 mm;冻结 30 天时发展到 240 mm;到了冻结 40 天时,-10 ℃ 圆形冻土帷幕半径达到约 300 mm。

3.1.2 路径分析

3.1.2.1 路径 1。

路径 1 设置在水平方向,每隔 100 mm 设置一分析点,为 1—9 号分析点,其温度随时间变化曲线如图 6 所示。可以看出:靠近冻结管的 1 号分析点降温最快,冻结 2 天时温度就降到 0 ℃;剩下各点离冻结管越远降温越慢;8、9 号分析点降温过程比较一致,在冻结 40 天时,温度才降温到 0 ℃。

图 7 为路径 1 上各点不同时间的温度空间分布曲线。可以看出:路径 1 上不同时间的温度都是离冻结管越近温度越低;降温速度先快后慢,由盐水降温计划所决定;冻结 40 天时各点温度低于 0 ℃,说

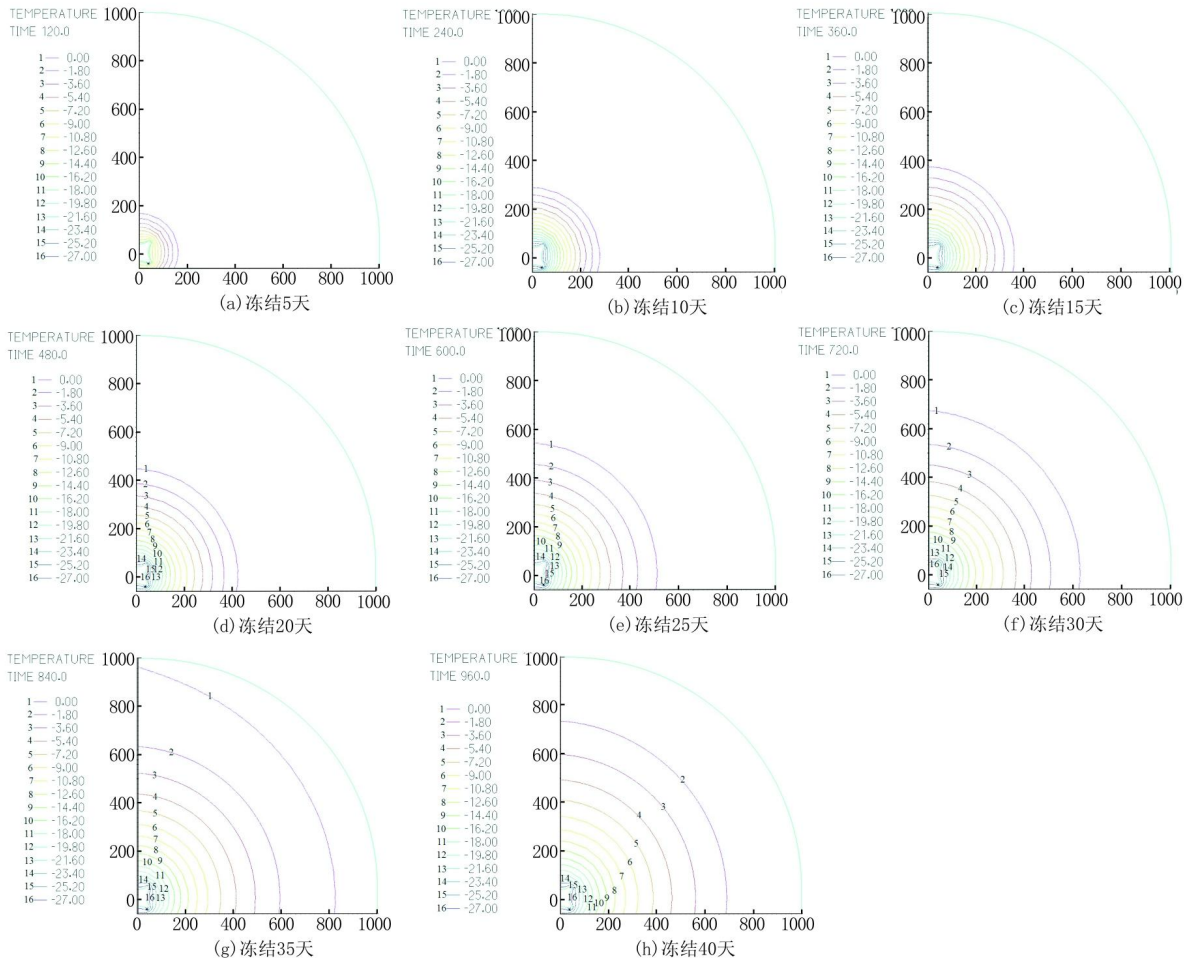


图5 X形冻结管不同冻结时间温度场计算等值线(单位:mm)

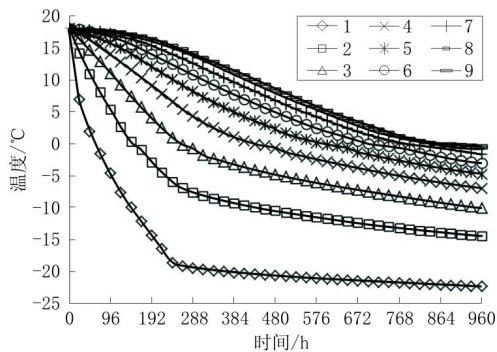


图6 路径1上分析点温度随时间变化曲线

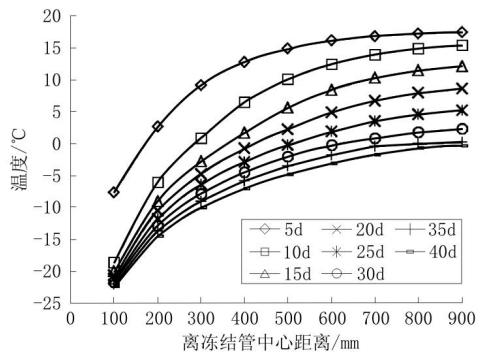


图7 路径1上各点不同时间的温度空间分布曲线

明此时0℃的圆形冻土帷幕半径>900mm。

3.1.2.2 路径2。

路径2设置在垂直方向,每隔100mm设置一个分析点,为10—18号分析点。路径2上各点温度随时间变化曲线如图8所示,不同时间的温度空间分布曲线如图9所示。可以看出:路径2的降温过程及规律与路径1基本一致。

3.2 与其它异形冻结管的对比分析

3.2.1 冻土帷幕温度场等值线

图10为异形冻结管冻结40天时温度场计算等值线图。可以看出:虽然方形、工字形、T形、Y形等异形冻结管同X形冻结管一样为非圆形截面,但是其冻土帷幕温度都是以冻结管为圆心呈同心圆分布,离冻结管越近温度越低。随着冻结时间的增加,

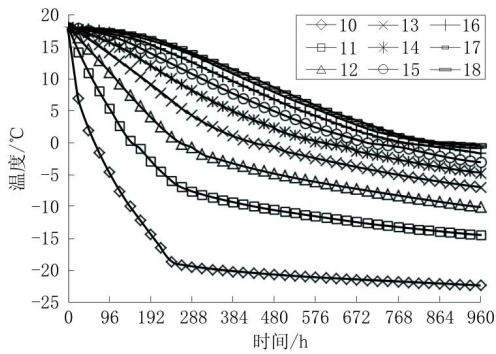


图 8 路径 2 上分析点温度随时间变化曲线

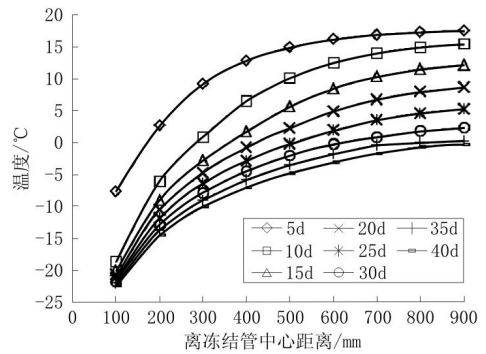


图 9 路径 2 上各点不同时间的温度空间分布曲线

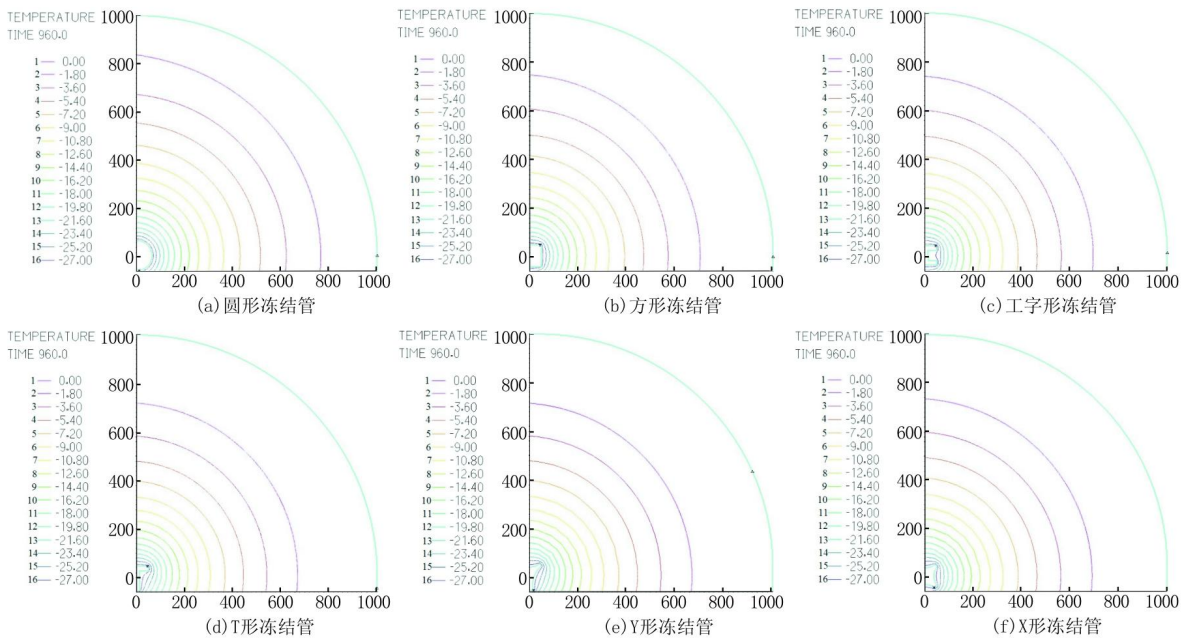


图 10 异形冻结管冻结 40 天时温度场计算等值线图

冻土帷幕厚度逐渐增加。冻结 40 天时,圆形冻结管单管冻结形成的冻土帷幕半径最大,约为 800 mm;方形、工字形和 X 形冻结管形成的冻土帷幕基本一致,半径约为 700 mm;Y 形和 T 形冻结管形成的冻土帷幕最小,为椭圆形,在水平方向长度为 660 mm,在竖直方向长度为 700 mm。与圆形冻结管相比,其他异形冻结管的截面面积较小,从而使循环冷媒介质用量大大减少,但是最终形成冻土帷幕的半径只相差约 100 mm,可见异形冻结管在保证冻结效果的基础上可大大减少施工耗电量,经济效益显著。

3.2.2 路径分析

图 11 为异形冻结管冻结 40 天时路径 1 和 2 上各点温度空间分布曲线。可以看出:圆形冻结管在路径上的温度最低,T 形冻结管的温度相对最高;在靠近冻结管的位置圆形冻结管与 T 形冻结管的温

差将近 3 °C,离冻结管越远温差越小;总体上看,异型冻结管形成的冻土帷幕基本一致。

4 结论

本文对 X 形冻结管的截面形式和施工工艺作了简单的介绍,运用有限元软件对 X 形截面冻结管单管冻结时的温度场发展规律进行了研究,同时与圆形、方形、工字形、T 形和 Y 形冻结管单管冻结时的温度场进行了对比分析,主要得出以下结论。

(1) 与传统圆形冻结管技术相比,X 形等异形冻结管具有较大的单位体积材料比表面积,因而可以在不增加工程量的前提下大大提高单管冻结能力,从而提高性价比。

(2) 从温度场等值线可知,虽然 X 形等异形冻结管为非圆形截面,但是其冻土帷幕温度也是以

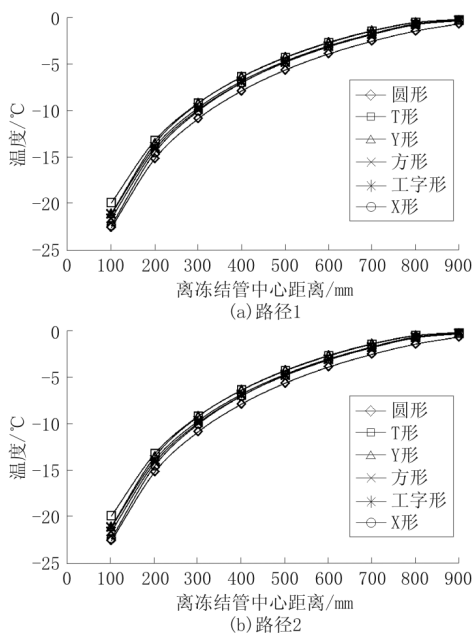


图 11 异形冻结管冻结 40 天时路径上各点的温度空间分布曲线

冻结管中心为圆心呈同心圆分布,离冻结管越近温度越低。冻结 20 天时,X 形冻结管 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 圆形冻土帷幕半径发展为 200 mm;冻结 30 天时发展到 240 mm;冻结 40 天时达到约 300 mm。

(3) X 形冻结管路径 1 和 2 上不同时间的温度都是离冻结管越近温度越低;降温速度先快后慢,由盐水降温计划所决定;冻结 40 天时各点温度低于 0

$^{\circ}\text{C}$,说明此时 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的圆形冻土帷幕半径 $>900\text{ mm}$ 。

(4) 与圆形冻结管相比,其他异形冻结管的截面面积较小,从而使循环冷媒介质用量大大减少,但是最终形成冻土帷幕的半径只相差约 100 mm,可见异形冻结管在保证冻结效果的基础上可大大减少施工机械能耗,经济效益显著。

参考文献:

- [1] 胡俊,杨平.大直径杯型冻土壁温度场数值分析[J].岩土力学,2015,36(2):523-531.
- [2] 胡俊.盾构隧道端头垂直冻结加固不同冻结管直径的温度场数值分析[J].铁道建筑,2014,9:57-60.
- [3] 胡俊,刘勇,李玉萍.冻结水泥土搅拌桩温度场数值分析[J].森林工程,2015,31(5):118-123.
- [4] 胡俊,杨平,董朝文,等.盾构始发端头化学加固范围及加固工艺研究[J].铁道建筑,2010,15(2):47-51.
- [5] 胡俊,李艳荣,佳琳.一种 X 型冻结管:中国,201520064490.1[P].2015-07-08.
- [6] 胡俊,张皖湘,汪磊,等.X 形冻结管及其在冻结施工中的应用方法:中国,201510153146.4[P].2015-08-26.
- [7] 胡俊.水泥改良前后土体冻结温度及力学特性试验研究[J].铁道建筑,2013,18(4):156-159.
- [8] 胡俊,刘勇,李玉萍.方形与圆形冻结管单管冻结温度场数值对比分析[J].森林工程,2015,31(4):152-157.
- [9] 董慧,胡俊,刘勇.冻融水泥土力学特性试验研究[J].森林工程,2015,31(5):114-117.
- [10] 胡俊.高压砂性土地铁大直径盾构始发端头加固方式研究[D].江苏南京:南京林业大学,2012.

(上接第 68 页)

可以看出,3 根试桩试验结果,随着试验拉力的增加,抗拔力逐渐发挥并未如其它材料屈服曲线一样发生屈服,表明桩基抗拔计算参数较为保守。

5 结论

本文通过沿海地区复杂地层基坑支护工程中抗拔桩实例,介绍了抗拔桩施工技术及抗拔桩试验研究,主要结论如下。

(1) 抗拔桩在沿海地区填石地层中施工,勘察报告提供桩基抗拔参数计算抗拔承载力较为保守,应通过现场实测的方式确定桩基抗拔承载力特征值较为安全。

(2) 旋挖钻孔工艺施工抗拔桩采取填石夹填土层成孔技术、桩端岩心取样技术与桩基清孔技术等关键技术,保证了抗拔桩成孔质量。

(3) 试验结果表明,长护筒 + 冲孔钻机 + 旋挖

钻机施工抗拔桩能够完全满足抗拔设计要求。

参考文献:

- [1] 吴江斌,王卫东,王向军.软土地区多种桩形抗拔桩侧摩阻力特性研究[J].岩土工程学报,2010,32(S2):93-98.
- [2] 黄茂松,任青,王卫东,等.深层开挖条件下抗拔桩极限承载力分析[J].岩土工程学报,2007,29(11):1689-1695.
- [3] 刁钰,郑刚,许杰,等.不同加载条件下抗拔桩静载试验分析[J].岩土工程学报,2011,33(S2):464-470.
- [4] 张建新,仲晓梅,黄媛媛.超深基坑开挖对桩承载性状的影响分析[J].土木工程学报,2007,40(S1):395-400.
- [5] JGJ 94-2008,建筑桩基技术规范[S].
- [6] 赵伟,吴旭君,王召磊,等.旋挖灌注桩在(深圳)沿海复杂地层中的应用实例[J].岩土工程学报,2013,35(S2):1196-1199.
- [7] 朱世平,杜高恒,何世鸣,等.抗拔(浮)桩的发展历程和研究方向[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(5):5-7,11.
- [8] 何世鸣,郭跃龙,赵晓东,等.部分粘结预应力抗拔(浮)桩的优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(7):39-43.
- [9] 周治国,唐孟雄,董晓斌,等.嵌岩旋挖扩底抗拔桩工程应用研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3838-3843.