

冷冻管直径对冻土冻结影响规律的试验研究

戚波¹, 赵大军¹, 潘殿琦², 袁鹏¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130021; 2. 长春工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要:近年来冻结施工方法越来越多地使用在城市土木工程施工中,但由于受冻土冻结理论基础的缺失和研究方法的局限,长时间以来人们对冻结法的设计始终没有找到较为理想的方案,参数变量选取遇到很大困难,同时在施工阶段没有较为标准统一的技术规范参照,使得该工法的实际应用往往出现工程量浪费、施工混乱和工程质量无保障等情况,而其中冷冻管直径是主要影响参数。通过同轴管土体冻结试验的研究,采用不同直径的冷冻管进行冻结试验,利用 Fluent 模型分析冻结过程的温度场分布规律,确定了最优冷冻管管径的选择方法,为冻结法的设计及施工提供依据。

关键词:冻土温度;冷冻管直径;影响规律;试验研究;数值模拟

中图分类号: TU753.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)08-0075-05

Experimental Study on the Influence Law between Frozen Soil and Freezing Tube Diameter/QI Bo¹, ZHAO Da-jun¹, PAN Dian-qi², YUAN Peng¹ (1. Construction Engineering College of Jilin University, Changchun Jilin 130021, China; 2. Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China)

Abstract: In recent years, freezing construction method has been increasingly used in urban civil engineering construction; however, due to the insufficient theoretical basis on permafrost freezing and the limitation of research methods, the ideal scheme for freezing method design has not been found for a long period of time, great difficulties were encountered in parameters variable selection. And there were no relatively unified technical standard as reference in the construction, which causes large engineering quantity waste and construction chaos with no quality assurance for this construction method. Freezing tube diameter is the main influencing parameter. Through the research on the soil freezing tests in coaxial tubes of different tube's diameter, the distribution law of temperature field in the freezing process was analyzed by using Fluent model, the selection method for optimal freezing tube diameter is finally determined, which provides the basis for the design and construction of the freezing method.

Key words: permafrost temperature; diameter of freezing tube; influence law; experimental study; numerical simulation

人工冻结法^[1]是利用冻土强度远大于融土这一特性,进行地下工程施工的一种方法。通过人工制冷技术,使地层中的水结冰,把天然岩土变成冻土,增加其强度和稳定性,隔绝地下水与地下工程的联系,以便在冻结壁的保护下进行地下工程掘砌施工。冻结法具有封水性、复原性、绕障性、强度高、适应性强、施工方便、环保无公害等特点,是一种技术可靠、工艺成熟的方法。它可在密集建筑区和现有工程建筑物下施工,不需进行基坑排水,可避免因抽水引起地基沉降造成对周围建筑物的不利影响。基坑越深、开挖体积越大,冻结法施工越具优越性。

圆形单管^[2]冻结规律的探究是进行冻土研究的一个基础,在本文中我们以 HDPE(高密度聚乙烯)管代替传统无缝钢管作为冷凝管进行冷冻管管

径与冻土冻结范围影响规律的研究,在含水率、冷冻液负温及制冷机组泵量一定的情况下,以粉质粘土地层为例,采用不同直径的冷冻管进行试验,并采集土体冻结温度随冻结时间变化的试验数据,以大量的数据对冻土冻结范围进行计算分析,并结合 Fluent 软件建立模型模拟,比较不同管径冷冻管冻结影响范围及其规律,最终得到适应粉质粘土层的工程数据,并确定对于冻结土体达到最终冻结范围冻土最终强度所需要的最佳管径的参考依据。

1 单孔冷冻管温度场理论分析

1.1 基本假定

为了便于进行单孔冻结管温度场的理论分析,采用如下基本假定:

(1) 土体均匀连续, 为各向同性的粘弹塑性材料;

(2) 研究的土体位于地下水位以下, 认为土体是饱和的多孔介质材料, 且为均质和各向同性, 并忽略汽相迁移;

(3) 在饱和土中除冻结管提供的热源外, 不存在其它热源或热汇, 假设水和土的热动态平衡是瞬时发生的, 即土粒骨架和周周流动的水具有相同的温度;

(4) 液相通过对流运输热量, 液相和固相通过热传导运输热量;

(5) 土体和冰晶均不可压缩;

(6) 忽略未冻含水量的影响(实际土中的未冻含水量很少), 忽略由粘性应力造成的每单位流体体积的能量耗散率。

1.2 不同直径冷冻管对冻结范围的影响规律分析^[3]

由于不同直径冷冻管, 单位时间内冷冻液流速、管壁与冻土接触面积不同, 故在一定冻结时间内, 对于最终冻结范围的影响也存在差异。对于同轴冷冻管, 泵量一定, 管径越大, 其外表面与冻土单位接触面积越大, 同时管横截面积大, 冷冻液流速低, 热交换充分, 冻结影响效果越好。假设单位体积冷冻液载冷量一定, 故一定时间管径越大, 冷冻液传递冷冻能量多, 冻结影响范围大。

2 试验概况

本次试验采用高密度聚乙烯(HDPE)管, 共3组试验。以乙二醇作为制冷循环介质, 通过低温制

冷循环机供冷, 使试验土样(粉质粘土)冻结, 经过GPRS温度采集系统采集温度数据, 分析研究其冻结范围、冻结时间的关系。

2.1 试验设备器材

(1) LT-60A2型低温制冷循环器, 循环泵量75 L/min(max), 泵压1 bar(10^5 Pa)。

(2) 不同直径高密度聚乙烯(HDPE)管材若干。

(3) JK63-200型塑料管道热熔对焊机。

(4) GPRS静态数据采集仪, 测温探头及数据线若干。

2.2 试验过程

2.2.1 管材选取^[4]

综合考虑管材经济性及性能, 本次试验选用高密度聚乙烯(HDPE)管材。

2.2.2 土样制备

本次试验土样为粉质粘土, 容重 $\gamma = 19.0$ kN/m³, 试验时将土样烘干并碾碎, 分层铺设至冻土试验玻璃缸内, 加水养护一周, 保证其均匀且测定含水率恒定为23%。

2.2.3 测温点设置

本次试验沿着水平方向布置温度传感器。在冷冻液进出口管道处分别布置1个测温点; 在冷冻管的附近沿着平行于玻璃缸面板方向布置3个测温点; 在冷冻管的附近沿着玻璃缸对角线方向布置5个测温点(如图1所示)。

2.2.4 试验过程

冷冻液为浓度62%的乙二醇水溶液, 负温控制为 -35 °C, 冻结时间为180 h, 室温 20 °C, 共进行

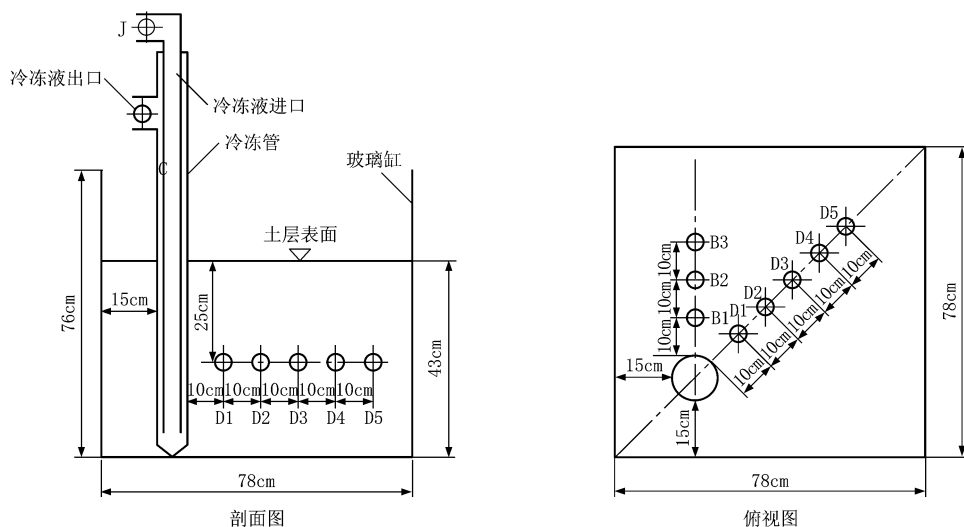


图1 测温点埋设示意图

以下3组试验:

(1) 冷冻管外径/内径为 $\varnothing 90/32$ mm, 即外管 $\varnothing 90$ mm, 壁厚 8.2 mm, 内管 $\varnothing 32$ mm, 壁厚 3.0 mm, 记录冻土温度变化;

(2) 冷冻管外径/内径为 $\varnothing 75/32$ mm, 壁厚 6.8/3.0 mm, 记录冻土温度变化;

(3) 冷冻管外径/内径为 $\varnothing 63/32$ mm, 壁厚 5.8/3.0 mm, 记录冻土温度变化。

表1 $\varnothing 90$ mm 冷冻管直径在含水率 23% 冷冻液负温 -35 $^{\circ}\text{C}$ 时对角线方向冻结数据

水平距离 /cm	时间/h									
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
10	20.8	-4.02	-12.20	-16.80	-19.30	-21.10	-22.10	-23.30	-24.00	-24.40
20	16.3	12.90	6.51	1.67	-1.59	-4.48	-6.02	-7.92	-9.64	-10.00
30	15.6	18.90	14.90	11.10	6.84	2.93	0.81	-2.17	-4.59	-4.56
40	16.0	18.10	16.70	14.80	12.10	8.63	6.63	4.50	3.53	3.44
50	16.9	18.60	20.50	18.50	15.90	13.60	11.90	10.70	9.69	9.13

根据直径 90 mm 冷冻管冻结温度记录, 建立 180 h 土体最终冻结温度 y 与距管壁水平距离 x 间回归方程, 以下为冷冻管管径为 90 mm 的冻结回归方程:

$$y = 0.5483^3 - 5.9907x^2 + 27.331x - 46.064$$

$$R = 0.9971$$

式中: x ——水平向距离, cm; y ——冻结温度, $^{\circ}\text{C}$; R ——相关系数。

同理依据 63 mm 管径、75 mm 管径冻结记录, 建立对应回归方程。设定冻结锋面 $y = 0$ $^{\circ}\text{C}$, 求解回归方程, 计算冻结范围 x , 得到数据如表 2 所示。

表2 不同管径所对应的冻结时间与冻结影响范围 cm

管径/ mm	时间/h								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
63	9.58	13.16	15.78	18.93	22.16	25.72	29.55	30.79	31.31
75	10.61	14.17	17.63	20.56	24.31	27.32	30.42	33.07	33.62
90	11.73	15.50	18.68	21.55	24.97	27.55	32.20	35.60	35.51

数据显示, 随时间增长, 土体温度逐渐降低, 在 100 h 前 0 $^{\circ}\text{C}$ 冻结锋面沿水平向移动较快, 之后冻结速冻逐渐降低, 在 160 h 以后各点温度变化趋于平缓, 冻结 180 h 温度基本不再变化, 此时认为达到最终冻结范围。其中 63 mm 管径 180 h 最终冻结范围 31.31 cm, 75 mm 管径最终冻结范围 33.62 cm, 90 mm 管径最终冻结范围 35.51 cm。

图 2 是外径分别为 63、75、90 mm 冷冻管在冻结 20~180 h 间所达到的最终冻结范围。由图中的关系分析得, 同一管径冻结影响范围随时间增加而

每组试验结束, 均对试验土样进行升温 and 加水养护, 以保证下次试验顺利进行。

3 试验结果分析

综合 3 组试验采集的温度数据, 以第一组试验为例进行数据的处理及回归分析。表 1 为冷冻管直径为 90 mm 在对角线方向冻结温度随冻结时间变化的试验数据。

增加, 由于冷冻液负温一定, 一定时间后冷冻液与土体热交换达到动态平衡, 冻结范围不再增加, 达到最终冻结状态。同时在相同冻结时间内, 不同冷冻管直径, 冻结效果不同, 其中直径越大, 冻结速率越快, 其所能达到的最终冻结范围也较大。

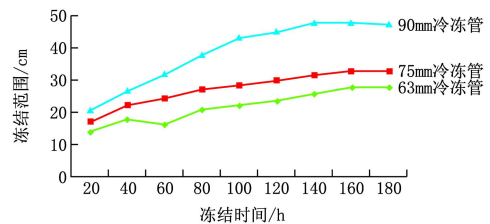


图2 不同管径冷冻管在各时间段最终冻结范围曲线图

4 Fluent 模型模拟分析

本次模拟分析使用同轴式冷冻管, 暂不考虑内管液体流动传热影响, 将模型简化为仅外管作用与土体进行热交换。分别建立管径 110 mm 模型及管径 90 mm 对比模型, 分析管径变化与冻结温度场关系。此外建立了实际应用冻结管模型, 分析管内液体流动状态对传热的影响。

4.1 模型建立

(1) 利用 Gambit 2.3.16 建立冷冻管外径/内径 $\varnothing 110/32$ mm, 壁厚 10.0/3.0 mm 冻结纵向剖面试验模型, 划分网格, 定义计算域。模型如图 3 所示。

(2) Fluent 计算求解, 启用能量方程, 选用 Laminar 层流计算模型, 基本求解器和操作环境保持系统默认设置。材料定义, 乙二醇冷冻液参数^[5], 密度

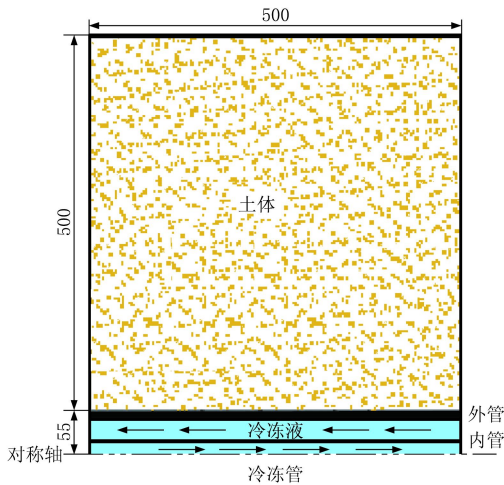


图3 Ø110mm 冷冻管模型图

1104.6 kg/m³, 浓度 61.2%, 粘度 0.09344 kN/(m·s), 导热系数 0.307 W/(m·°C), 比热 2884 J/(kg·°C); 粉质粘土参数^[6], 密度 1900 kg/m³, 含水率 20%, 导热系数 0.84 W/(m·°C), 比热 2775 J/(kg·°C); 高密度聚乙烯管材参数, 密度 965 kg/m³, 导热系数 0.517 W/(m·°C), 比热 2292.4 J/(kg·°C)。边界条件设置, 冷冻液进口采用速度进口, 流速 0.225 m/s, 冷冻液温度 -35 °C, 出口采用压力出口, 其他边界条件均设置为该区域材料属性。

(3) 设置求解方式并迭代计算残差。

4.2 模拟结果分析

经过 Fluent 迭代计算收敛后, 110 mm 管径最终冻结温度云图及温度检测曲线如图 4、图 5 所示。

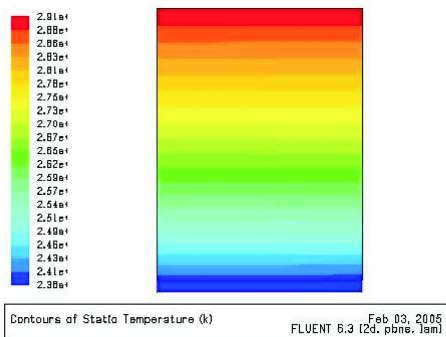


图4 Ø110 mm 管径冻结温度云图

根据模型模拟结果显示, 冷冻液入口温度 -35 °C, 低温液体开始与周围土体不断进行热交换, 土体温度逐渐降低, 冻结并形成冻结壁, 随冷冻液继续循环, 冻结壁沿水平方向向外迁移, 在冻结一定时间后热交换达到平衡状态, 即认为达到最终冻结状态, 此时 0 °C 土体冻结锋面在距管轴外壁 38.75 cm 处。

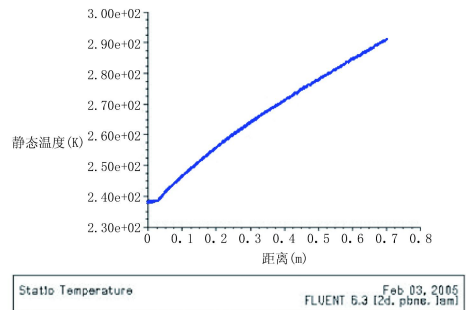


图5 埋深 25 cm 处水平方向温度检测曲线

对于 90 mm 管径的 Fluent 模拟, 最终得到的冻结范围为 36.59 cm。

对比分析表 3 数据可知, 计算模型由 Fluent 软件计算结果基本符合试验情况, 可利用软件对试验过程进行简化, 进一步分析管径的变化对于温度场的影响。同时通过本次模拟的 Ø110 mm 管径得到最终冻结范围数据, 以及试验 Ø90、75、63 mm 三组管径所得数据可以基本确定冻结范围与冷冻管管径间冻结规律, 即在相同的条件下, 随冷冻管管径的增大其最终冻结范围也随之增大。

表3 冻结试验与模拟对照数据

模型及 试验组别	冷冻管管径/ mm	最终冻结范围(距管外壁)/ cm
Fluent 模型一	110/32	38.75
Fluent 模型二	90/32	36.59
第一组试验	90/32	35.51
第二组试验	75/32	33.62
第三组试验	63/32	31.31

另外建立了对实际应用冷冻管模型, 外管直径 140 mm, 壁厚 12.7 mm, 设计孔深 10 m, 分别在流量 75、375、750 L/min 三种不同条件下进行冻结模拟, 得到进出口温度数据如表 4 所示。

表4 进口温度 -35 °C 不同流量进出口温度数据

流量/ (L·min ⁻¹)	流速/ (m·s ⁻¹)	进口水温/ °C	出口水温/ °C	温差/ °C
750	1.33	238.150	238.162	0.012
375	0.67	238.150	238.167	0.017
75	0.13	238.151	238.171	0.020

数据表明, 随着流速降低, 进出口温差呈增长趋势, 但变化很小, 均在 0.02 °C 以下。由此, 在冷冻液流动路径较短时(设计孔深较浅), 管内液体流速对传热损耗影响较小, 即液体流动状态对换热效率影响较小。但当管内流速达到超低速, 或设计冻结孔为深孔时, 管内冷媒热交换充分, 流速对温度传热影

响逐渐增大。

5 结论

(1)通过试验数据处理分析,依据不同管径的冻结规律,建立并得到了冻结温度与影响范围的回归方程。针对粉质粘土地层冻结法设计,可利用相应管径对应的回归方程计算分析其冻结范围。同时简化的 Fluent 模型计算结果,通过与试验数据对比,基本符合实际土体冻结状况,因此利用该模型进行土体冻结状态的分析验证是有效可行的。

(2)综合分析在城市建筑施工中,其设计孔深较浅,管内冷媒流动状态对换热效率影响较小。在冻温、泵量、土体含水率等条件一定的前提下,对于工程常用直径在 63 ~ 140 mm 范围内的冷冻管,其中管径越大,其外表面与冻土单位接触面积越大,同时管横截面积大,载冷量多,冷冻液流速低,热交换充分,故冻结速率越快,一定时间内冻结影响范围也越大。

(3)土体冻结范围与冷冻管管径基本呈线性增长关系,实际工程中在综合考虑灵敏度规律,相邻孔间距,冻结效率,钻孔施工难易程度,孔径要求及施工成本,管材用量及成本等因素下,应尽量选用较大直径的冷冻管进行工程施工。

(上接第70页)

地勘单位招聘本科毕业生,改变钻探技术人员不足且无接班人的现状。

(3)各地勘单位每年要将一定数量的资金用于钻探工程质量工作,安排有钻探施工经验、有责任心的人管理钻探生产,逐步提高钻探工程质量和钻探技术水平。地勘单位在做好钻探质量和效率工作的同时,还要按照 HSE 管理体系的要求做好健康、安全和环境保护工作。

7 结语

当前各地质勘查单位对钻探工程的管理方式不尽相同,重视程度也不一样。若想高质量完成各种条件下的岩心钻探工程,需要各级领导重视并加强钻探工程管理工作。

参考文献:

[1] DZ/T 0227—2010,地质岩心钻探规程[S].

参考文献:

- [1] 李晶岩,付丽.人工冻结技术应用进展[J].山西建筑,2009,35(7).
- [2] 刘冬生.地源热泵试验台及同轴套管换热器传热模型研究[D].吉林长春:吉林大学,2005.
- [3] 蒋斌松,王金鹤,周国庆.单管冻结温度场解析计算[J].中国矿业大学学报,2009,38(4):463-466.
- [4] 万宝青,等.PVC-U,PE80,PE100三种给水管材在工程应用中的比较[A].全国新技术新工艺新材料在自来水管网的应用研讨会[C].北京,2004.
- [5] ASHRAE手册2005[Z].
- [6] 刘为民,何平,张钊.土体导热系数的评价与计算[J].冰川冻土,2002,24(6):770-773.
- [7] 张瑞,汪仁和.冻结距离对温度场影响的灵敏度分析[J].安徽理工大学学报,2008,28(2).
- [8] 杨世铭,陶文铨.非稳态热传导(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [9] 胡向东,白楠,余锋.单排管冻结温度场 ТРУИЯК 和 БАХОЛДИН 公式的适用性[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(7).
- [10] 毛良根.任意冻结管分布下冻土温度场计算方法研究[D].上海:同济大学,2007.
- [11] 张惠,康士延.FLUENT 14 流场分析自学手册[M].北京:人民邮电出版社,2014.
- [12] 付宁宁.热管在油浸式变压器中温度场分布的 Fluent 数值模拟[D].天津:河北工业大学,2007.
- [13] 彭第.基坑冻土挡墙强度及其影响因素的实验研究[D].吉林长春:吉林大学,2012.
- [2] 陈保忠.甲魁煤田绳索取心液动锤钻进施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(12):25-26,31.
- [3] 赵华.SYZX 系列绳索取心液动锤在新余梅山煤矿易斜深孔防斜钻进中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(9):27-29.
- [4] 陈显,韩栋材,靳二举.绳索取心液动锤钻进技术在利比里亚邦山铁矿详查中的应用与探索[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(2):44-46,50.
- [5] 孙德学,陈伟,张元清,等.沉积岩松软地层深孔绳索取心钻探技术实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(1):16-19.
- [6] 陈风云,谷天本.西平铁矿深孔绳索取心钻探技术应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(6):16-19.
- [7] 马汉臣,余伟,王年友.HSE 可退式捞矛在重庆鱼泉锰矿 ZK1010 号孔孔内事故处理中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(2):15-18.
- [8] 张远丰,魏洪章.煤田地质勘探工程监理工作中的要点论述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(10):73-77.
- [9] 张珏,孙德学,秦殿才,等.HSE 管理体系在地质钻探施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(10):78-80.