

建筑工程 特殊施工与加固技术

JIANZHU GONGCHENG
TESHU SHIGONG YU JIAGU JISHU

吴纪宁 等编著

建筑工程特殊施工 与加固技术

吴纪宁 等编著



机械工业出版社

本书通过具体事例的形式着重介绍了建筑工程施工中涉及的基坑支护、桩基工程、主体结构、工程测量与检测、工程装饰与节能等方面的一些较为特殊的施工方法和加固补强措施。

在建筑工程施工过程中经常会遇到诸如施工条件不理想、施工材料匮乏、施工中遭遇突发事件等不利情况，要求工程技术人员凭丰富的施工经验，开动脑筋、谋求对策，以解决问题。希望本书能给读者一些启发。

本书可供工程技术人员、管理人员、业主等学习；也可供高等院校工业与民用建筑及相关专业的师生学习。

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑工程特殊施工与加固技术/吴纪宁等编著. —北京: 机械工业出版社, 2008

ISBN 978-7-111-25283-2

I. 建… II. ①吴… ②富… III. 建筑工程-工程施工-加固
IV. TU746.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 156727 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 闫云霞 版式设计: 霍永明 责任校对: 姚培新

封面设计: 马精明 责任印制: 邓 博

北京双青印刷厂印刷

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.75 印张 · 515 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-25283-2

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 68327259

封面无防伪标均为盗版

前言

《三国演义》中有这样一段描述：曹操兵屯渭北，征讨西凉之军马超，因立不起栅栏，只能取渭河沙土堆筑土城，可沙土不实，筑起便倒，无法御敌。京兆贤士蒯子伯献策，“朔风一起，必大冻矣，驱兵运土泼水，比及天明，土城可就”。是夜北风大作，操驱兵担土泼水，随筑随冻，天明沙水冻紧，土城筑成，犹如神助。

虽然，这个堆筑土城的施工案例发生在二千多年前的古战场上，但在那次建设活动中却蕴涵着不平凡的智慧！用现代工程建设的眼光来看，这个冰土城墙的堆筑成功是因为采用了一个绝妙的施工方案。在两军交战的战场上要在最短的时间内完成一座城墙建设工作确实是一件非常困难的事，而且他们还缺乏必要的建筑材料和施工工具，冰土城墙的施工方案巧妙地利用了变化的气候条件，并因地制宜地充分利用当地现有的自然资源和建设材料。因此，就该筑城工程而言，冰土城墙施工方案应该是在当时和当地条件下能够采用的最佳方案。

在现代工程建设中，有许多工程项目所面临的施工环境和条件往往是不尽如人意的，特别是遇到抢险救灾等工程，施工条件甚至会很苛刻，要在规定的施工时间内完成工程的施工任务，施工管理者除应具备相当丰富的专业知识之外；还要求他们善于开动脑筋，大胆设想，充分利用现有资源和施工条件，敢于采用类似于“冰土筑城”的智慧来解决施工中出现的难题，这就是编者希望通过本书表达的内涵。

编者多年来在施工实践中积累了点滴经验，曾小结成文，先后发表于有关的专业期刊和专业会议文集，现将其综合，又参考了大量资料，汇总成为本书。在编写过程中得到吴同教授的指点和富鸣高级工程师的大力支持和协助。此外，还得到贾循明、张元宁、吴永宁、吴元清、黄毅华、刘一凡、苏宁珍等人的帮助，在此一并表示感谢！

限于水平和时间，本书错误和不妥之处在所难免，恳请同行和广大读者批评指正。



2007年12月1日于南京

目 录

前言

第1章 地下工程支护和边坡防护 1

- 1.1 土层加固的特殊方法——冻结法 1
- 1.2 冻结法加固土层两个特例 14
- 1.3 土层锚杆特殊的成孔方法——爆破法 25
- 1.4 一桩两用的支护桩——挤压钻孔搭接排桩 30
- 1.5 水泥搅拌桩的特例——SMW 工法 36
- 1.6 高边坡防护软措施——植物护坡 49

第2章 桩基施工与加固 61

- 2.1 特殊直径的桩——钢筋桩 61
- 2.2 钻孔灌注桩的特殊形态——多节挤扩支盘灌注桩 66
- 2.3 静压桩施工的挤土问题 74
- 2.4 倒置式桩基施工工艺预防挤土桩的倾斜 83
- 2.5 管桩缺陷的补强——桩芯加固技术 87
- 2.6 人工挖孔桩施工中遇到的特殊问题的处理 91

第3章 模板、脚手架与吊装工程 101

- 3.1 特殊的圆柱模板——平板玻璃钢圆柱模板 101
- 3.2 免拆除一次性外模板——快易收口网、FRP 模壳 105
- 3.3 免拆除一次性内模板——高强复合轻质薄壁管 114
- 3.4 双重作用的保温模板 124

- 3.5 塔吊使用的特例——增加支点法 132

- 3.6 悬挑外脚手架 137

第4章 主体结构施工与加固 146

- 4.1 混凝土结构特殊的缝——后浇带 146
- 4.2 混凝土结构加固的特殊布——碳纤维布 153
- 4.3 升板与升模工艺的结合——柔性配筋逐层升模现浇柱 165
- 4.4 升模升网法整体顶升网架 169
- 4.5 防射线混凝土 177
- 4.6 绿化混凝土 183

第5章 施工测量与监测 194

- 5.1 AutoCAD 辅助施工测量放线 194
- 5.2 大体积混凝土温度监测 205
- 5.3 复杂环境下的深基坑施工监测 213
- 5.4 钢筋混凝土墙板的竖向裂缝 229

第6章 装饰、节能与工艺优化 240

- 6.1 清水混凝土 240
- 6.2 混凝土板面一次成型施工技术 257
- 6.3 能源工程与结构工程的有机组合——地源热泵 262
- 6.4 临时施工道路与永久道路合二为一的安排 289
- 6.5 城市建设与雨水收集及利用 298
- 6.6 结构钢筋成型工厂化——钢筋焊接网 311

参考文献 326

第1章 地下工程支护和边坡防护

1.1 土层加固的特殊方法——冻结法

1.1.1 冷冻法的简史

人工利用冷冻方法有目的地为建设施工服务成功的案例发生在中国古代,早在二千多年前的三国年代,曹操远征西凉讨伐马超,在缺乏建设城墙的材料的条件下,采纳并选择了天然冷冻技术,就地取材,适时地利用天气降温,将水和土分层混合冻结,仅仅用了晚上就筑成了一道坚固的冰土城墙,有效地抵御了敌军的来犯。到了近代,煤炭建设者们还将人工冻结技术应用于矿山井筒开挖建设,从20世纪80年代中期开始,冻结围护技术逐渐从矿山建设推广到各类市政工程的应用中,在北京、上海、广州以及南京的城市地铁施工中,采用冻结技术成功的完成了一些隧道建设施工。

在国外也有许多人工利用冷冻技术为房屋建设施工服务的成功案例。在1862年的英国威尔士,当时在建筑基础施工中,利用人工制冷技术对土壤进行加固,有效地防止了边坡塌方。以后,在德国阿尔巴里煤矿中采用冻结法成功地建造了井筒。在日本的东京地铁建设中,在德国的埃森地铁和芬兰的赫尔辛基铁路地下人行过道施工中均采用了冷冻法施工技术。

1.1.2 冻结法的概念及主要技术特点

1. 冻结法的概念

冻结法主要是利用人工制冷技术,使地层土层中的自由水冻结,并将土层中矿物质颗粒胶结成致密整体冻土,使土的强度和稳定性增强,并具有止水的性能。

对地下土层实施冻结是通过冻结管来完成的。将冻结管放置在土层内,冻结管内的冷冻媒流入进管和回管,通过与地层进行冷、热交换,将冷量传递给周围地层,而将地层中热量带走,由此使冻结管周围地层由近向远不断降温,逐渐使地层中的水变成冰,把原来松散或有空隙的土层矿物颗粒通过冰胶结在一起,形成不透水的冻土柱。若干个这样的冻结管排列起来,通过冻结管内的冷媒不断循环,使这些冻结管周围土都冻成冻土柱。随着冻土柱半径不断扩展,相邻冻土柱就会相连形成冷冻墙。

一旦土层中形成了冻结壁,在冻结壁的保护下就可以安全地进行隧道、竖井以及基坑开挖等施工。

2. 冻结法施工技术的分类

在地下工程施工中有竖向开挖施工,也有水平或者斜向开挖施工,根据地下工程的开挖需要,可以将冻结法分为垂直冻结技术、水平冻结技术和斜式冻结技术三种。

(1) 竖向冻结主要用来隔绝来自侧向的地下水以及抵御侧向的土压力,例如:矿山中

开凿竖井筒、深基坑施工中的支护工程等均属于竖向孔冻结技术。

(2) 水平冻结技术主要用来隔绝来自上部和侧向的地下水以及抵御上部和侧向的土压力,例如:城市地下铁道的隧道施工等。

(3) 斜式冻结技术主要用来隔绝来自上部和侧向的地下水以及抵御土上部和侧向的土压力,例如:城市倾斜隧道或者是地铁之间倾斜连接通道等隧道施工。

3. 岩土冻结方法

在工程施工中,人为地对岩土实施冻结的方法主要有低温盐水和液氮法这两种方法。

(1) 低温盐水法。低温盐水法又称为间接冻结法,是以氨、氟利昂或其他物质作为制冷工质,经过制冷压缩机对制冷工质进行压缩、节流膨胀的反复循环做功,将盐水降至负温,由负温盐水作为传递冷量的媒介,将冷量传递给需要冻结的岩土层,达到冻结局部岩土的目的。间接冻结法是由氟利昂(或氨)循环系统、盐水循环系统、冷却水循环系统三大循环系统构成,见图 1-1-1。

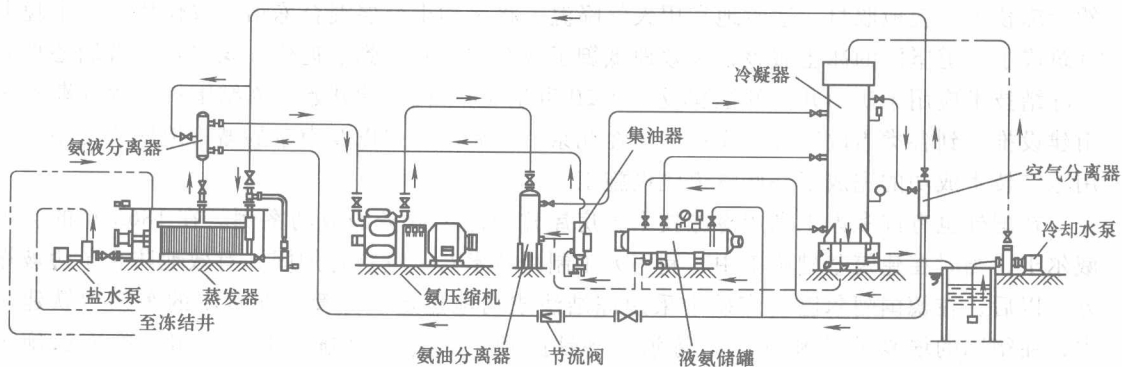


图 1-1-1 低温盐水冻结法循环系统

使用低温盐水法制冷通常可获得 $-20^{\circ}\text{C} \sim -35^{\circ}\text{C}$ 的低温盐水。

(2) 液氮法。液氮法又称为直接冻结法,主要采用液氮作为冷源物质。液氮在 1 个标准大气压下的蒸发温度为 -196°C ,因此,采用液氮法制冷可获得 -196°C 低温盐水。采用液氮进行冻结土壤具有快速和便利的优点(图 1-1-2)。

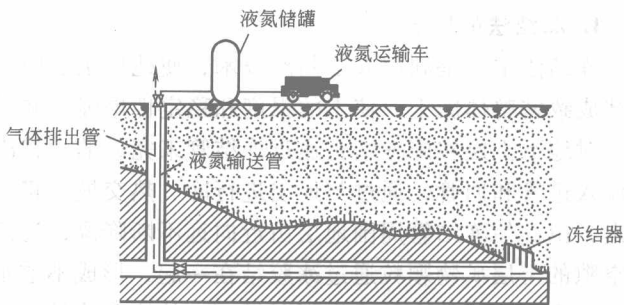


图 1-1-2 液氮法冻结土体示意图

4. 冷冻方式的选择

低温盐水法和液氮法两种方

法既可独立应用,也可组合应用,在工程实践中具体选择采用何种形式的冷冻方式需要根据施工现场的环境、支护的要求、工程施工的工期要求以及资金情况等诸多因素来确定。由于低温盐水法和液氮法分别在设备器材要求、用电要求、冷冻速度、现场的操作管理复杂程度和所需要的投入费用等方面差异较大,因此,需要进行认真比较后根据实际情况来选择,见两种冷冻方式的选择表 1-1-1。

表 1-1-1 低温盐水法与液氮法进行冻结施工的比较表

冻结方法	介质温度/℃	设备器材	现场用电	冷冻速度	操作管理	所需费用
低温盐水法	-20 ~ -35	全套冷冻设备	上百千瓦 2、3 个月	2、3 个月	较复杂	以电费为主
液氮法	-196	液氮储罐及运输车	几乎不用电	几天	较简单	消耗液氮费用高于盐水法

5. 冻结法技术主要特点

地下空间施工方法主要有暗挖法（即新奥法）、逆作法、盾构法、非开挖埋管技术等，冻结法仅仅是地下工程施工方法中的其中一种比较特殊的施工方法。由于城市建设规模的扩大，地下建设所面临的地质环境越来越复杂，对地下施工技术的要求也越来越高，冻结法施工具有加固效果可靠、封水性能良好、适应广泛、应用灵活等种种优点，使得这些年来冻结法在城市地下施工中逐渐显现出其特有的生命力，这主要体现在以下几个方面：

（1）冻结法加固岩土能增加土体的强度和稳定性。地层经过冻结之后，受冻的地层抗压强度明显提高，根据实验冻土瞬时极限抗压强度可达到 2~10MPa，见表 1-1-2、表1-1-3。

表 1-1-2 冻土瞬时极限抗压强度参考值 (单位：MPa)

温 度/℃	砂	砂 土	黏 土
-2.0	4.8	3.8	1.7
-4.0	7.8	6.8	2.7
-6.0	10.0	9.0	3.6
-8.0	12.0	11.0	4.5
-10.0	13.8	12.5	5.4
-12.0	15.1	13.8	
-14.0	16.0		

表 1-1-3 冻土瞬时极限抗拉强度参考值 (单位：MPa)

含 水		土壤的组成/g		冻土极限抗拉强度		
		水	砂	-10℃	-15℃	-20℃
水的饱和度(%)	100	165	1000	2.0	3.9	5.2
	75	125	1000	1.5	2.2	4.3
	50	83	1000	0.7	2.0	3.3

（2）冻结法加固岩土具有良好的止水性能。岩土经冻结后，土中矿物质颗粒胶结成致密的整体冻土，冻土具有很好的封水效果，可保证开挖工作面在不渗、不漏的无水条件下作业；并且其适应性也很强，这种方法可以适用于多种地层和各种复杂的地下工程，尤其适用于含水量大、地质软弱、采用其他方法加固有困难的地层或难于施工的地下工程。

（3）冻结法加固岩土具有良好的整体性能。在冷冻之前，地下土中矿物质颗粒是分散的、相互关联性差的土层，不具备抵御侧压力和止水的能力；但岩土经过冻结之后，在冻结体内部不会存在缝隙，并形成是一个完整的支护体。冻结体是一个整体，在冻结体的掩护下，可以保证隧道掘进和基坑开挖过程施工的安全。

(4) 冻结法特别适合在含水量大的软弱地层中采用。在城市中进行地下工程施工, 常会遇到含水量较高的软弱地层, 采用其他方法来加固土体难于奏效。另外, 城市地区周边情况复杂, 原有的建筑物以及光缆、电缆管线的阻碍影响了其他方案的采用。而采用冻结法的一个前提就是土壤中需要具有一定的含水量, 土中的一定量的含水率也是保证冻结效果的前提, 一旦土壤的颗粒与土中的自由水经过冻结, 冻土就形成了一个整体, 它就具有一定的抗压强度和阻水的能力。

(5) 采用冻结法对周围环境没有污染。采用钢筋混凝土支护桩、岩土锚杆需要浇筑大量的护壁桩, 并在地层中设置大量的土锚杆, 基础施工结束之后, 这些钢筋混凝土支护桩和土锚杆将失去作用而成为多余的弃物, 影响今后的地下管道以及地下构筑物的建设和施工; 而采用化学浆液加固法更会影响周围环境。冻结法实施过程中对土体进行冷冻, 施工结束后对土体进行解冻, 解冻后的土壤仍然恢复到原来的状态, 不会对周围的环境产生污染, 这一点是其他任何方法无法与之相比的。

1.1.3 冻结法加固岩土的原理

1. 原理

采用人工冻结技术, 首先需要在准备冻结的地层中钻孔, 在钻孔的位置上安装冻结器和盐水循环系统 (见图 1-1-3), 然后利用人工制冷手段 (低温盐水法或者液氮法) 提供冷源, 通过在冻结器中低温循环, 带走岩土热量, 使岩土中的水结冰, 将天然岩土变成冻土, 形成整体性好、强度高、不透水的临时固结体, 达到加固和稳定地层、隔断地下水与施工作业面的联系, 从而达到安全、无水的施工的目的。当地下工程施工完成后, 就可以停止供冷, 冻结地层便开始逐步返回到原始的温度状态, 土层解冻后就可以回收冻结管, 整个冻结过程完成。

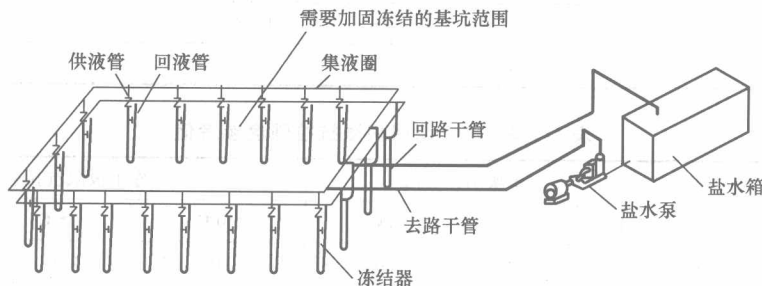


图 1-1-3 冻结器和盐水管路系统

2. 冻结过程

冻土的形成实际上是土中自由水结冰的过程, 源源不断的冷源将土壤中的固体颗粒胶结成整体的物理状态。土中自由水的冻结过程可划分为 5 个时间段, 见图 1-1-4。

(1) 冷却段: 通过冻结器向土层供冷, 土体温度逐渐降到冰点。

(2) 过冷段: 土体温度达到 0°C 以下, 但土层中的自由水尚未结冰, 呈现出过冷的现象。

(3) 突变段: 自由水过冷后, 一旦结晶就立即放出结冰潜热, 出现升温现象。

(4) 冻结段: 温度上升到接近 0°C 时稳定下来, 土体中的自由水结冰, 将矿物质颗粒胶结成整体, 形成冻土。

(5) 维持冷却段：随着温度的降低，冻土的强度逐渐增大。

土壤冻结是随时间变化而变化的复杂的热过程。土中孔隙水是逐渐冻结的，实际上在任何负温下的冻土内部总有土颗粒薄膜水保持未冻状态与冰共存。在一定的温度范围内，土壤处于由融土经塑性过渡到坚硬的冻土的中间状态，而不同土壤过渡状态的温度是不同的，常见土壤冻结过渡状态的温度见表 1-1-4。

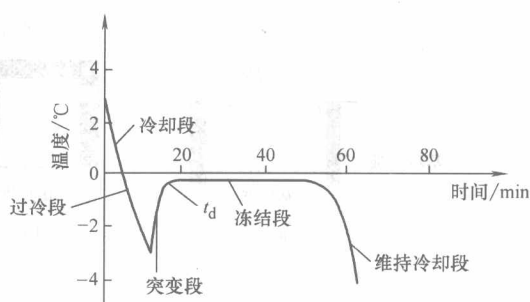


图 1-1-4 岩土中自由水冻结过程曲线

表 1-1-4 典型土壤冻结过渡状态的平均温度

(单位:℃)

土 壤	融态向塑性状态过渡	坚硬地冻结状态
砂	0 ~ -0.25	低于 -0.25
砂质黏土	-0.5 ~ -1.5	低于 -1.5
黏土	-1.0 ~ -3.0	低于 -3.0
重黏土	-2.0 ~ -4.0	低于 -4.0

1.1.4 冻结法的设计与选择

1. 冻结方案采用必须充分论证

冻结法施工虽然是一种稳定围岩和阻隔地下水的好方法，但是它同时也是一种比较复杂的、耗电电能比较多的特殊施工方法。在确定冻结法方案之前，必须要对构筑物的设计、施工场地的水文地质、地下障碍物分布、冻结站的选址、电力和器材的供应等多方面的情况进行详细的调查，做出多种施工方案的经济分析比较，并经过充分论证以确定所采用的冻结施工方案为最佳方案。

2. 冻结法施工方案的确定

一旦确定选择冻结法对地层进行加固，其地下部分的施工工序主要有地层钻孔、埋设冻结管、积极冻结、维持冻结和进行地下工程施工等，为保证冻结能达到设计的目的，施工前必须对施工环境等条件进行多方面调查，因地制宜，确定合理的冻结施工方案。在确定冻结方案时需要调查的内容主要有：

(1) 水文地质条件调查。主要是了解施工场地及附近地区的地层分布、地层的土质情况、含水率、地下水的流速和含盐量等水文地质参数，确认本工程是否适合采用冻结法。

(2) 冻结壁的形式选择。根据地下构筑物的埋深、走向和形式，选择冻结壁的形式。常用冻结壁的形式有竖向冻结壁（见图 1-1-5a）、水平冻结壁（见图 1-1-5b）和斜式冻结壁（见图 1-1-5c）三种。

三种冻结壁的适用范围和特点见表 1-1-5。

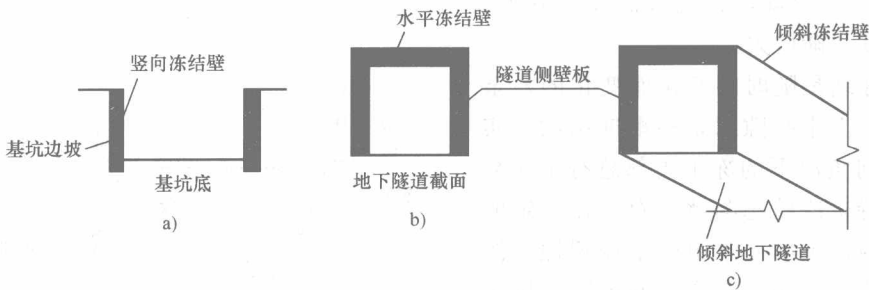


图 1-1-5 冻结壁的常见形式
a) 竖向冻结壁 b) 水平冰结壁 c) 倾斜冻结壁

表 1-1-5 常用冻结壁的形式

冻结壁	工 艺 特 点	适 用 范 围	备注
竖向冻结壁	冻结管自地表垂直向下穿入地层,通过对冷冻液循环深度的控制,实现由地面到地下某个深度连续冻结或对地下某一深度含水不稳定地层的局部冻结	1. 含水地层内的工作竖井施工 2. 位于埋深较浅的含水地层中的水平隧道或倾斜度不大的隧道施工	
水平冻结壁	冻结管在地层中围绕隧道前进的方向水平排列,在含水软弱地层中冻结形成水平的冻结体、覆盖或者环绕等待施工的隧道	适用于含水软弱地层中水平隧道	
斜式冻结壁	冻结管在地层中围绕倾斜隧道前进方向排列,在含水地层中形成倾斜的冻结体	适用于含水软弱地层中倾斜隧道	

(3) 冻结壁厚度的设计。冻结壁的厚度主要是受埋深和地面荷载状况的影响,在对于地下施工周期较短、施工现场量测监控技术较好,能准确地掌握冻结壁的受力和运行状态的情况下,为了节省电能,也可以设计选择较小的冻结壁厚度,但这必须是在保证支护安全的前提下。

另外,冻结壁是具有弹塑性的粘滞体,在外荷载作用下呈现弹性和塑性变形,在持久的外荷载作用下,会产生塑性变形并引起应力松弛,从而造成冻土壁蠕变。因此在冻土层开挖和开挖面暴露时间过长的情况下,就必须考虑冻土壁的蠕变对开挖安全性的影响(图 1-1-6)。

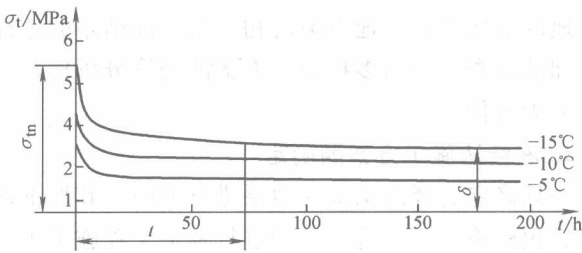


图 1-1-6 冻细沙土的强度松弛曲线

如果冻结壁的塑性区塑性变形超过允许值,冻结壁和冻结管可能会遭受破坏,所以,设计采用的冻结壁厚度前提是既要能满足强度条件,又要能满足变形条件的要求。在城市地下工程的施工中,冻结壁的强度必须满足开挖面暴露、开挖后地下工程的结构混凝土达到设计强度之前,以及各施工阶段岩土冻结壁必须具有稳定和止水的性能要求。

(4) 制冷系统的选用。除了抢险等特殊工程施工情况需要采用液氮进行速冻之外,在一般情况下多数选择采用低温盐水法的制冷设备进行冻结施工。制冷冻结系统由氟利昂(氨)循环系统、盐水循环系统和冷却水循环系统等三大部分组成。

对于氟利昂（氨）循环系统，首先要根据地层冻结深度和冻结规模，考虑冷量损失系数（与季节、冻结管线长度、管路保温条件有关，常取 1.10 ~ 1.25）计算出冻结站所需的制冷量。根据工程对制冷量的要求可以进一步选定制冷机组，并进行冻结站的设计。

（5）冷冻媒介输送的方式。冷冻媒输送的方式主要有两种，并联方式和串联输送方式，如图 1-1-7 所示。

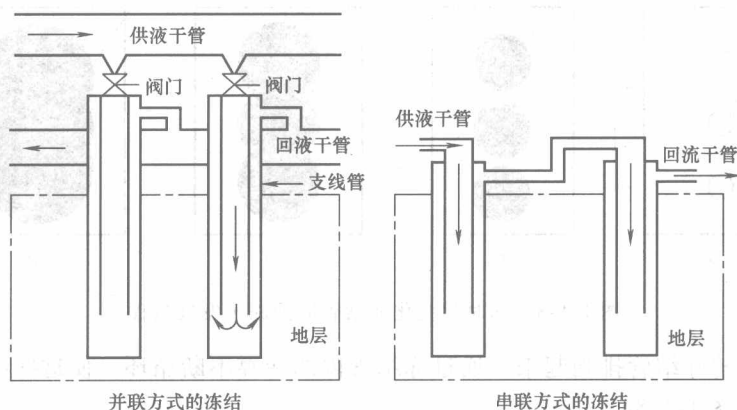


图 1-1-7 冷冻媒介输送方式示意图

（6）钻孔孔位的配置。

① 冻结器钻孔孔位的具体位置和深浅是按冻结孔布孔方案来确定的，根据设计需要形成冻结壁的强度和止水能力大小来确定冻结管分布范围和冻结管之间的间距。当设计确定了冻结管的位置后，即可采用在地层中钻孔，并按设计要求的位置和深度安装冻结管。可根据钻机的性能、冻结深度、上层压力、冻结时间和钻孔技术综合确定冻结孔的开孔间距和钻孔的允许偏斜率。

② 冻结管的作用：管体置于地层钻孔内，用来输送低温盐水，与地层直接进行热交换，使冻结管周围的土体温度降低，自由水冻结，形成足够强度的冻结壁。冻结管一般选用直径 127 ~ 139mm，壁厚 5 ~ 10mm 的钢管，目前常选用 127mm × 7.5mm 的无缝钢管，也可以根据城市地下工程的实际情况减小冻结管的直径。

③ 在城市地下工程施工中，特别是在水平冻结的情况下，为保证所施工地下构筑物的尺寸，避免对相邻建筑物造成损害和减少地面的沉降，对孔的允许偏斜率的要求较高，钻孔的偏斜率一般小于 5%。

（7）冻结时间的确定。

① 对土层实施冻结主要有积极冻结阶段、维护冻结阶段两个阶段：

积极冻结阶段：利用人工制冷技术对地下土层进行冷冻并形成冻结壁，使冻结土体达到设计所要求的强度、稳定性和隔绝地下水与地下工程的联系等目的，并将地层中的冻结壁扩展到设计厚度的工作阶段。

维护冻结阶段：让受冻的土体一直保持着设计要求的低温，使冻结壁厚度不改变，并持续维持着设计所要求的强度、稳定性和止水效果，为安全进行地下工程提供保证。

② 冻结连续墙形成的过程经历了这样几个阶段：

在冻结前，同一深度的地层具有相同的原始温度。

冻结开始以后,通过地层内冻结管中的冷媒与进管、回管与地层相连(见图1-1-8a),和地层进行热交换,将冷量传递给周围地层,而将地层中热量带走,由此使冻结管周围地层由近向远不断降温,逐渐使地层中的水变成冰,把原来松散或有空隙的地层通过冰胶结在一起,形成不透水的冻土柱(见图1-1-8b)。

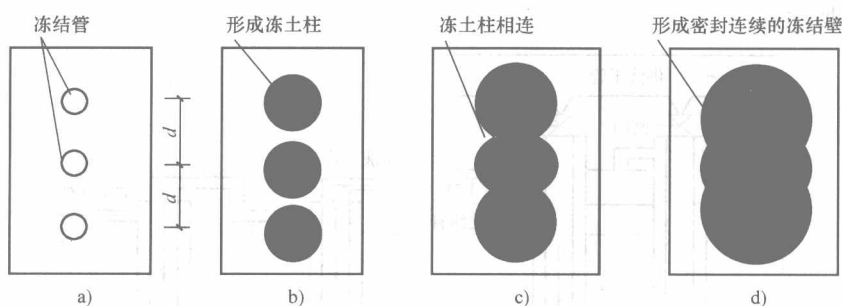


图1-1-8 随时间变化冻结管周围冻土发展过程

若干个这样的冻结管排列起来,通过冻结管内的冷媒不断循环,使这些冻结管周围土都冻成冻土柱(见图1-1-8c)。

随着冻土柱半径不断扩展,相邻冻土柱就会相连,彼此通过冰紧密结合在一起,形成密封连续的冻结壁(见图1-1-8d)。

从冻结连续墙发展形成的过程中可以知道,冻结壁的交通时间主要与冻结孔的间距、盐水温度、土层性质、冻结管直径、地层原始温度等因素有关。根据有关实验资料,冻结壁的交通时间随着冻结孔间距的增大而延长,随着地层土体颗粒的直径的增大和冻结管直径的加大而缩短,不同的冻结孔的间距在不同的冻结土质条件下冻结孔交通的参考时间见表1-1-6。

表1-1-6 冻结壁交通时间(参考值)

冻结孔间距/m		1.0	1.3	1.5	1.8	2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5
冻结孔交通时间/d	粉细砂	10	15	22	35	44	58	67	82	94	114	128
	细中砂	9.5	14	21	33	42	55	64	78	89	108	121
	粗砂	8.5	13	19	30	37	49	57	70	80	97	109
	砾石	8	12	18	28	35	46	54	66	75	91	102
	砂质黏土	10.8	16	23	37	46	61	70	86	99	120	134
	黏土	11.5	17	25	40	51	67	77	94	108	131	147
	钙质黏土	12	18	26	42	53	70	80	98	113	137	154

注:盐水温度为 -25°C ;冻结管直径为159mm。

冻结壁交通以后,相邻冻结圆柱体的相交界面的温度会在冻结的过程中继续降低,该部分的冻结壁厚会逐渐增大,见冻结壁的等温线示意图1-1-9所示。

经过积极冻结、维护冻结两个阶段,完成地下结构物的施工以后,冻结站可以停止工作。冷量的供应停止后,地层温度会自然升高,冻结壁会自然解冻。

3. 供冷时间的安排及工序优化

开始实施对土层冻结的供冷时间是:开始启动制冷机械将土层的温度降低至设计温度,这属于积极冻结阶段时间;然后实施开挖或施工更需要继续对土层持续进行供冷,保证冻结

壁的设计要求,这个时间需根据地下工程施工的时间来确定,这个时间段属于维护冻结时间。因此,供冷时间等于积极冻结时间加上维护冻结时间。

采用冻结法方案在冻结过程中需要消耗大量的电能,无论是积极冻结还是维护冻结,只要需要使岩土维持设计要求的冻结壁,施工现场每天就需要不间断地供冷并消耗能量,因此,一旦设计确定了采用冻结法的施工方案,就必须仔细全面考虑施工工序的衔接和安排。冻结法工序优化的主要原则是:在保证冻结效果的前提下尽量缩短实际冻结时间。为了能达到这个目标,需要做好以下两方面的工作:

(1) 现场冻结工作要求全过程稳定,不出现间断情况。准备工作的要点是:

① 冻结设备机械性能良好,运行过程中不出现机械故障,如果出现故障,现场有在规定时间内完成修复的应急预案。

② 冻结管线敷设达到设计的深度,位置满足设计要求,冻结管冷热传递性能良好,效率高。

(2) 在开始启动对土层的冻结之后,开挖、进行地下结构的施工持续不断,前后工序连续完整,不出现人为的间断、停顿而延长维护冻结时间。

在实施冻结法方案过程中,特别是施工开挖、各步骤的衔接、选择抗冻混凝土的配比和制定必要的养护措施等方面,尽量协调好,减少等待时间,加快施工速度,尽快完成开挖施工内容,缩短和减少维护冻结期的时间段,这对降低冻结法的实施成本有很重要的作用。

1.1.5 冻结法的施工

1. 冻结法施工阶段

冻结施工主要分为冻结设备安装、现场积极冻结、现场维护冻结、解除冻结这四个阶段,具体施工程序见图1-1-10。

(1) 冻结设备安装阶段。冻结设备安装包括冻结站安装、冻结管的埋设、设备调试并运转等几个主要环节,低温盐水法的设备安装内容主要有:

① 设备和器材。制冷设备及附件主要包括:制冷压缩机、冷凝器与蒸发器、盐水循环系统等。

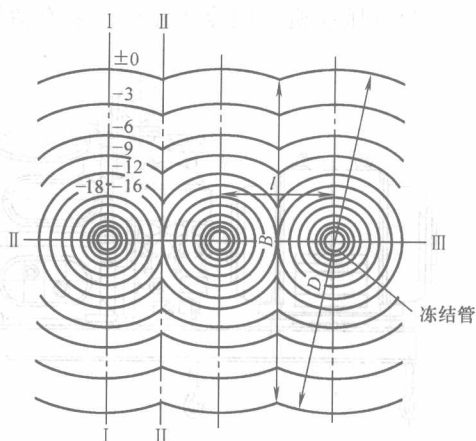


图 1-1-9 冻结壁的等温线示意图

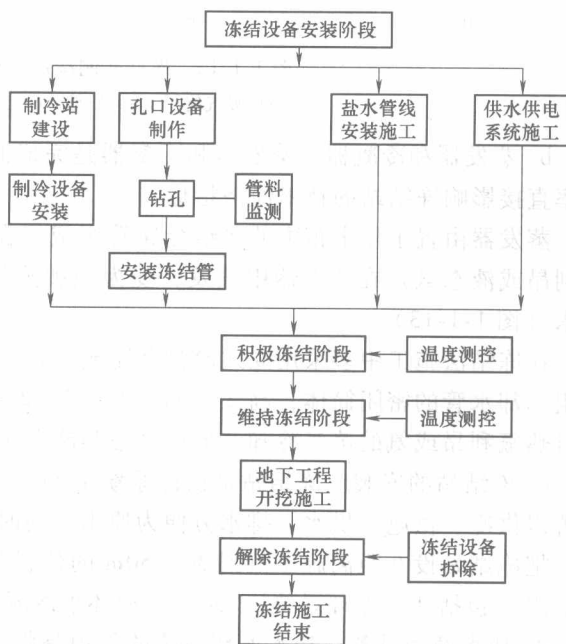


图 1-1-10 冻结施工工艺流程图

a. 制冷压缩机。制冷压缩机主要有活塞式和螺杆式两种，见图 1-1-11。

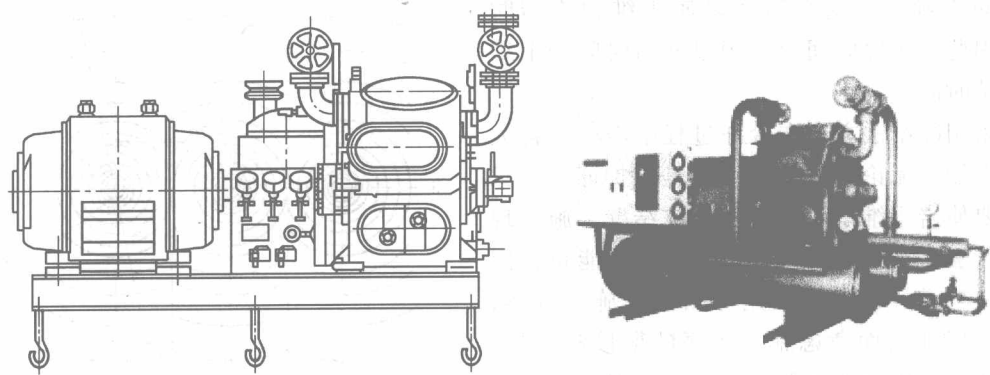


图 1-1-11 活塞式压缩机

螺杆式压缩机是回转式压缩机的一种，它只有旋转运动部件，没有往复运动机件，动平衡性能好，几乎无振动。它体积小重量轻，适合作为移动制冷设备。螺杆式制冷压缩机工作原理见图 1-1-12。

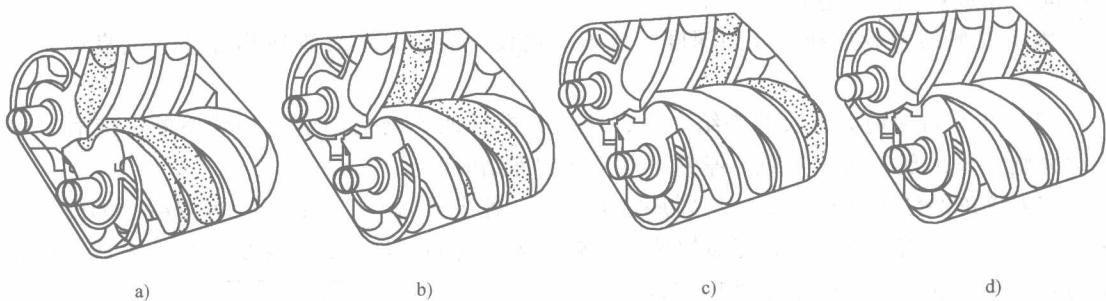


图 1-1-12 螺杆式制冷压缩机工作原理示意图

a) 吸气终了 b) 压缩 c) 压缩终了 d) 排出

b. 蒸发器和冷凝器。蒸发器和冷凝器是完成制冷循环所必需的辅助设备。它们的换热效率直接影响冻结站的技术经济指标。

蒸发器由置于盐水箱中的多组金属管组成。在制冷循环中，压缩后的液态工质（液态氟利昂或液态氨）在蒸发器中蒸发，变为饱和蒸气，吸收周围管路中盐水的热量形成低温盐水（图 1-1-13）。

在冻结法施工中多采用立式冷凝器完成气态工质到液态的转换。立式冷凝器是一个装有多组冷却水管的密闭筒体，高 2~3m，直径 1~2m。冷凝水从筒体内的冷却管通过，使筒内的过热氟利昂或氨的蒸气冷却并形成气态和液态混合物（图 1-1-14）。

c. 冻结站的安装。冻结站是供冷系统的核心，也是实施冻结法的核心部分，冻结站的位置以供冷、供电、供水、排水方便为原则，同时也要兼顾工程施工布置和进出材料要求，一般把冻结站设在距离施工范围 30~50m 的位置为宜。冻结站的建设主要需要考虑布置冷冻机组（包括盐水循环系统）、站外区循环水冷凝器和储水池的布置。

d. 盐水循环设备。盐水循环系统的作用是将通过蒸发器得到冷量的低温盐水输送到需要冻结的地层中的冻结器，并将吸收了地层热量的升温盐水通过管路送回蒸发器，完成利用

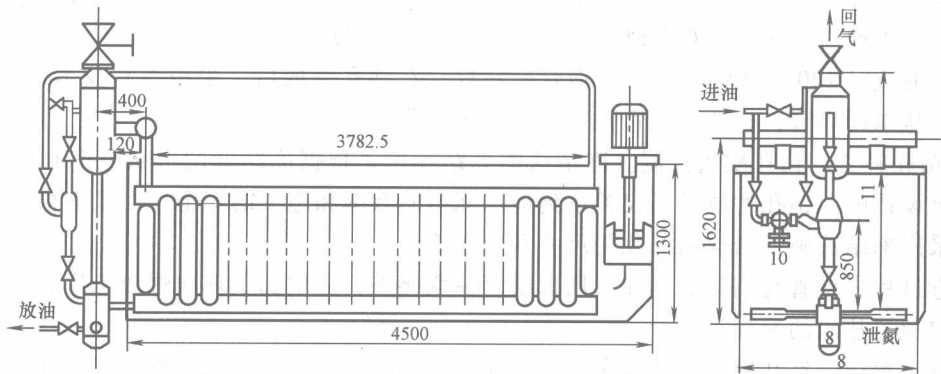


图 1-1-13 液氮蒸发器示意图

盐水作介质的热交换循环。

盐水循环系统主要设备有盐水泵、盐水管、配液及集液环、冻结器等。在一般保温情况下，冷量损失占冻结站总制冷量的 20% ~ 25%，所以为了降低能量消耗，盐水循环系统应有良好的保温措施。配液器和集液环设在冻结工作面附近，使去、回盐水管路阻力相等，配液均匀。

② 冻结管。常用的冻结管由直径 127mm 或直径 139mm 的无缝钢管制成（图 1-1-15）。

a. 冻结管的埋设。冻结管通过在地层中预先钻孔，钻孔设备主要包括：钻机、钻具等。

b. 钻机。根据垂直冻结、水平冻结或斜向冻结的不同冻结方式和冻结长度的需要，可选用不同形式的钻机。

c. 钻具。钻具主要是指常规钻杆、特殊钻杆、钻杆联接器材和钻头。常采用的矿井钻杆（内加厚或外加厚的钢管）或石油钻杆（截

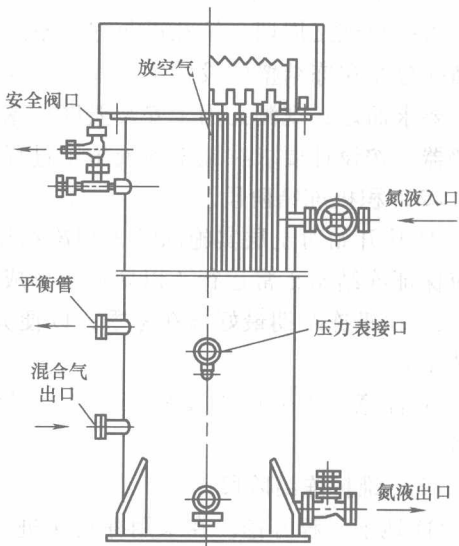


图 1-1-14 立式冷凝器示意图

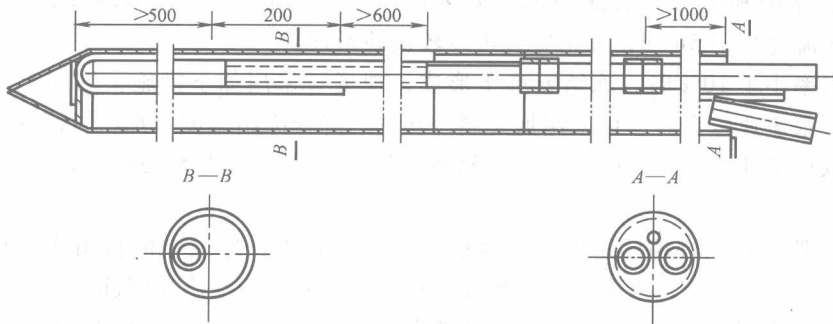


图 1-1-15 冻结管示意图

面外方型的钢杆)在钻孔工序完成后,需要提升钻杆,换装冻结管。为提高成孔效率、避免塌孔、减小地面沉降,煤炭科研单位已研制出钻杆、冻结管合一的专利技术——采用装有特殊钻具的直径120~140mm的无缝钢管做钻杆,在钻孔完成后,采用专利技术封闭管端,然后装入盐水循环管,把钻进钢管直接变成为冻结器。

③ 钻孔施工。钻孔质量控制。冻结法的冻结孔位是根据冻结壁的形状范围和现场水文地质情况设计的,钻孔的质量不仅关系到地层冻结的效率和施工的安全,而且在很大程度上关系到采用冻结法施工结构物的几何尺寸和内在质量。

钻进过程中钢管与钢管之间除采用螺纹管箍联接外,还增加了环向焊接工序,密封性能更好,避免了盐水的泄漏。

钻进过程中,钻孔容易发生偏斜,特别是水平钻孔和斜井钻孔,掌握钻进角度比较困难,对冻结效果的影响很大,对地下工程的施工也有一定的影响。为了避免钻孔过程中出现偏斜,可采用陀螺测斜仪来检查钻孔的偏斜度,发现偏斜,随时纠偏。

为缩短施工周期,钻孔可与冻结站的安装同时进行。钻孔可分为冻结孔和观测孔两类。冻结孔分布在冻结壁的设计中心线上,其孔径、间距和设计倾角依地层的土质、水文条件、工程要求而定;观测孔用于安装温度传感器、土压传感器、土层位移传感器等。孔隙水压力传感器,按设计要求在施工前或施工过程中钻孔布设。

(2) 积极冻结阶段。

① 从开始对土层实施冻结直到冻结壁达到设计厚度,这个阶段为积极冻结期。在此期间应保证冻结站正常运行,以期尽快形成冻结壁,给后续的开挖和结构物施工创造条件。

② 积极冻结期最好选在冬季,以便充分利用自然低温环境降低能耗、提高冻结站的制冷效率。

③ 注意合理采用正反盐水循环,经常观测土层的冻结温度,合理掌握好开挖的最好时机。

(3) 维护冻结阶段。

① 地下工程开挖。在采用冻结法进行地下工程施工中,在施工过程中要特别注意对以下几个要素的控制:

a. 水中含有一定的盐分时,水溶液的结冰温度要降低。当地层含盐或受到盐水侵害时都会降低冰点,其程度与溶解物质的数量成正比。采用冻结法时,首先要测量出地层中水溶液的低溫冰盐共晶点,以确定冻结法施工方案中的冻结温度。

b. 地层含水率和地下水流速对冻结效果的影响。一般情况下,只要地层含水率大于10%、地下水流速小于6m/d,冻结壁就可以较快地形成。

地层含水率小于10%时,冻结壁难于形成,现场可采用如下措施:增加土体湿度,以利冻结;地下水流速过大时,可采用加大制冷功率、降低冻结温度、加密上流区域冻结管的分布或者采取地下注浆方法封闭土层中的部分空隙和孔洞,以减缓解地下水流动的方法完成冻结。

c. 地层冻胀融沉对环境的影响。在地层的冻结过程中,地层中的自由水变成冰,体积会膨胀(增大约9.07%),土中的自由水要迁移。而冻结后的地层在解冻过程中,土体中的冰会融为水,体积要减小,自由水也要发生迁移。在砂性地层中,孔隙水的移动比较容易完成,但在黏土、或淤泥质地层中,自由水的移动比较困难,所以黏土、或淤泥质地层中的冻