



城市地下工程

第十章 冻结法



第一节 概述

概述

冻结法是城市地下工程施工方法中的一种辅助手段

■ 基本方法

在要开凿的井筒周围布置冻结器，采用机械压缩方法制冷，通过低温盐水在冻结器内循环，吸收松散含水地层的热量，使得地层冰冻，逐渐形成一个封闭的能够抵挡水土压力的人工冻结岩体壁。

■ 适用条件

当遇到**涌水、流砂淤泥**等复杂不稳定地质条件的情况时可以采用，以保证安全穿过该段地层。特别适用于在**松散含水表土地层**的土木工程施工。



第二节 地层冻结原理

■ 冻土的形成和组成

冻土的形成是一个物理力学过程，土中水结冰的过程可划分为五个过程：冷却、过冷、突变、冻结、冻土强度增大

■ 地下水对冻结的影响影响

■ 水质对冻结的影响

水中含有一定的盐分时，水溶液的结冰温度就要降低、

■ 水的动态对冻结的影响

土中水流速度对土的冻结速度有较大影响，常规的上层冻结的水流速度一般应小于6米/昼夜。



■ 温度场和冻结速度

冻结池层的温度场

在每个冻结器的周围形成以冻结管为中心的降温区，分为冻上区、融土降温区、常温土层区。

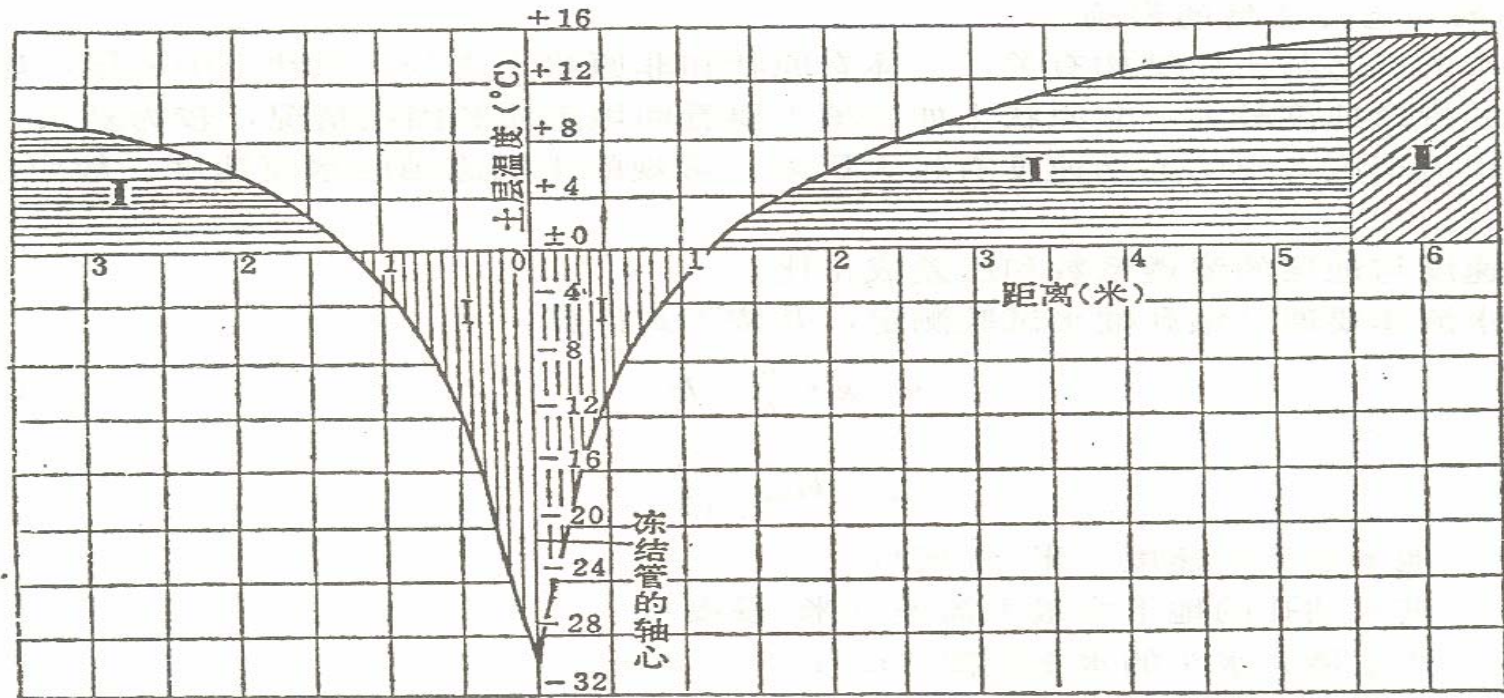


图 10-2 冻结地层温度曲线图



■ 土的冻结速度

- 冻结器间距是影响冻柱交圈和冻结壁扩展速度的主要因素，冻结器间距增大，交圈时间延长，冻结壁扩展速度减慢。
- 冻土圆柱的相交初期；交圈界的厚度发展较快，很快能赶上其他部位厚度。
- 冻结壁扩展速度随土层颗粒的变细而降低，砂层的冻结速度比粘土高。
- 冻结器内的盐水温度和流动状态是影响冻土扩展速度的重要因素。盐水温度降低，冻结速度提高，盐水由层流转向紊流时，冻结速度提高20%~30%。
- 冻结圆柱的交圈时间一般按经验公式推算。



■ 冻胀和融沉

- 土体冻结时有时会出现**冻胀**现象，土体融化时会出现**融沉**现象，其原因是水结冰时体积要增大9.0%，并有水迁移现象。目前人们把土冻结膨胀的体积与冻结前体积之比称**冻胀率**，无约束情况下冻土的膨胀称“**自由冻胀率**”，把不使冻土产生体积变形时的冻胀力成为“**最大冻胀力**”。
- 土的冻胀和土质、含水量及土质结构有密切的关系。像**砂土**、**砾石**这样的动水地层，一般不会出现冻胀现象，冻胀现象主要出现在粘性土质的冻结过程中；**胀缩性粘土**的冻胀量随含水量增加而迅速增加，表现出极大的敏感性。



第三节 人工冻土的力学特性

■ 概述

冻土是一种非弹性材料，在外载荷作用下，应力—应变关系随时间发生变化，其变化有明显的流变特性——蠕变、松弛、强度降低。

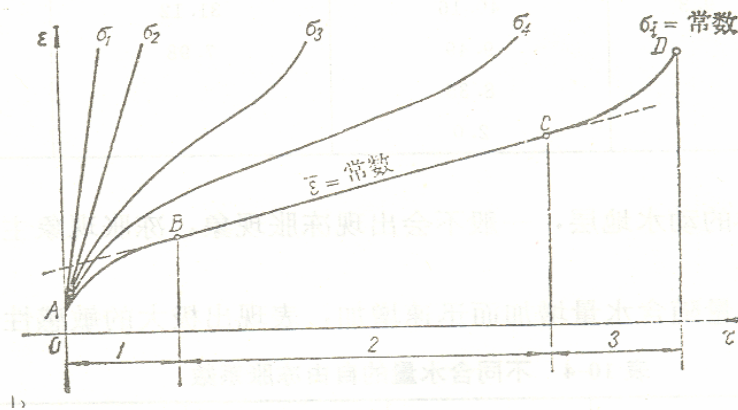


图 10-4 冻土蠕变曲线图



■ 冻土强度

- 冻土的强度是指导致破坏和稳定性丧失的某一应力标准。
- 冻土是一种非均质、各向异性的非弹性材料，有其特殊的受力特征。冻土的破坏形式有塑性破坏和脆性破坏两种。
- 评价冻土蠕变强度一般有两个有意义的强度指标：一是冻土的瞬时强度，通常采用极限强度。二是冻土的长期强度极限（或称持久强度）。
- 工程实践和科学试验都表明，冻土是拉压异性材料，而且围压是冻土蠕变强度和蠕变规律的重要影响因素。



第四节 常规盐水冻结

■ 常规冻结的施工工序

施工工序：冻结孔钻进、冻结器的安装、制冷站和供冷管路的安装、地层冻结试运转、地层冻结运转和维护、土木建筑施工。

■ 冻土壁结构设计

根据施工需要选择**冻结壁的形式**。主要有圆形和椭圆型帷幕；直墙和重力专连续墙；连拱型冻土连续墙。



■ 冻结壁参数设计

设计参数有冻土壁厚度，平均温度，布孔参数；冻结时间。

■ 制冷设计

根据冻结孔数、冻结孔间距、盐水温度、盐水流量、管路保温条件计算冻结需冷量；根据需冷量、设备新旧水平、工作条件计算冻结站的装备制冷量。

■ 辅助系统设计

■ 施工计划和劳动组织



第五节 液氮冻结

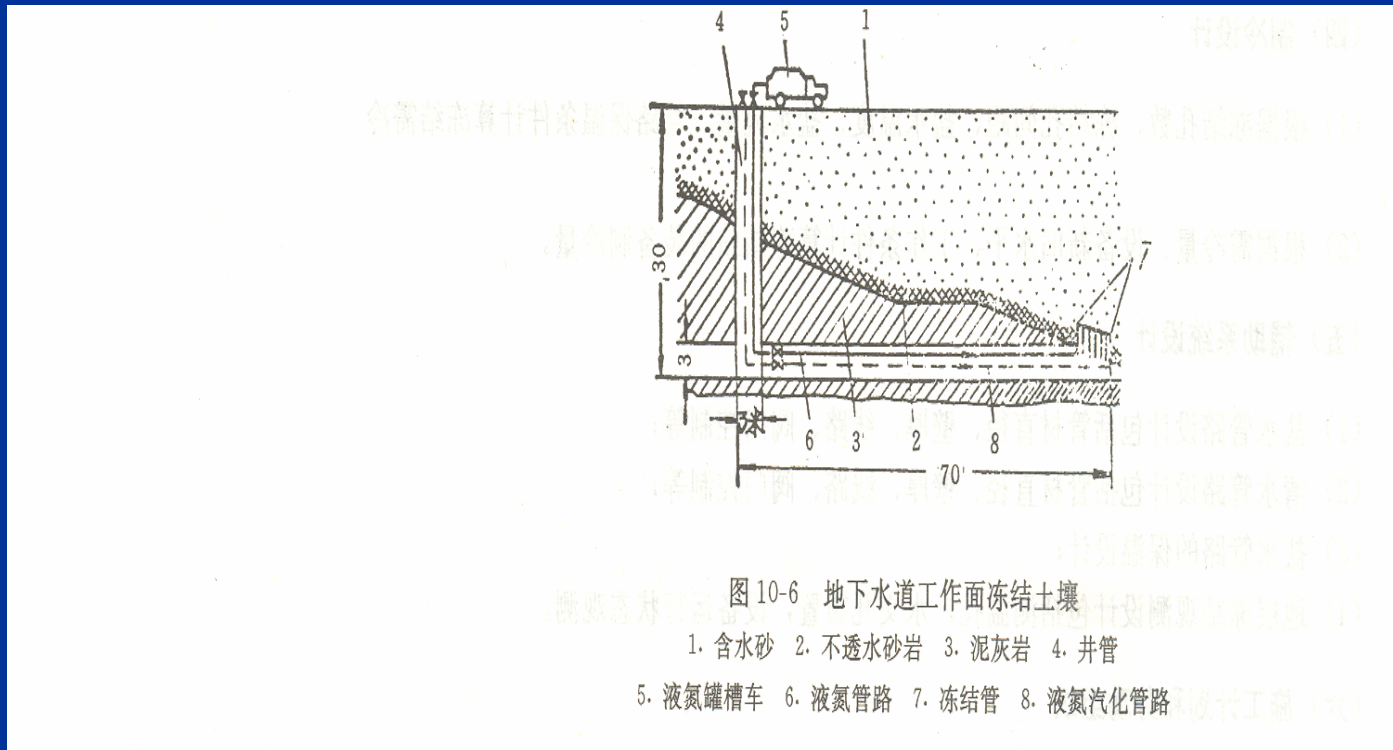
■ 原理与工艺

- 液氮冻结的**优点**是设备简单，施工速度快，适用于**局部**特殊处理和**快速**抢险和**快速**施工。
- 液氮是一种比较理想的制冷剂，无色透明，稍轻于水，惰性强，无腐蚀，对震动、电火花是稳定的，一个大气压下，液氮的汽化温度为 $-195.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，蒸发潜热为 $47.9\text{kcal}/\text{kg}$
- 液氮的**制冷过程**可以很据氮的焓—压图来计算。



■ 液氮冻结的一个例子

巴黎北郊区供水隧道，盖于地下3m深，当前进至70m时，遇到流砂无法通过，遂采用液氮冻结。其工艺系统是液氮自地面槽车经管路输送到工作面，液氮在冻结器内汽化吸热后，气氮经管路排出地面释入大气，冻土速度比常规盐水冻结快10倍。如图





■ 温度分布和冻结速度

根据试验和工程实践得：液氮冻结规律和特征如下：

- 液氮冻结属深冷冻结，冻土温度较常规冻结低，梯度大，冻结器管壁温度达到 -180°C ，而盐水冻结的温度为 $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$ ，温度曲线呈对数曲线分布。
- 冻土温度变化与液氮灌注状况关系很大，温度变化灵敏，液氮槽注量的微小变化引起冻结管附近土温的急剧变化（或上升或下降），停冻后温度上升很快，维护冻结很必要。
- 液氮冻结地层初期冻结速度极快，但随时间和冻土扩展半径的发展而逐渐下降，与常规冻结相比，在 0.5m 冻土半径情况下，液氮冻结的速度能达到10倍以上。



■ 工艺设计和技术经济

1. 液氮冻结**冻结器**的**间距**不宜过大，因为冻结速度随冻土半径的增加，速度下降较快，一般0.5~0.8m。
2. **冻结系数**一般通过理论计算和经验两个方面取值。
3. 灌注状况主要指**液氮流量**和**汽化压力**，但它们最终以冻结器管壁温度变化显现出来。
4. **冻结器的设计**注重供液管和冻结管得匹配和再冷问题，在进行水平道路的顶部冻结时应防止液氮的回流。
5. 冻土的**液氮消耗量**是变化的，初期冻结单位冻土的消耗量较小，后期增大。



■ 冻结法的应用

■ 国外应用情况

苏黎士利马特河下隧道施工

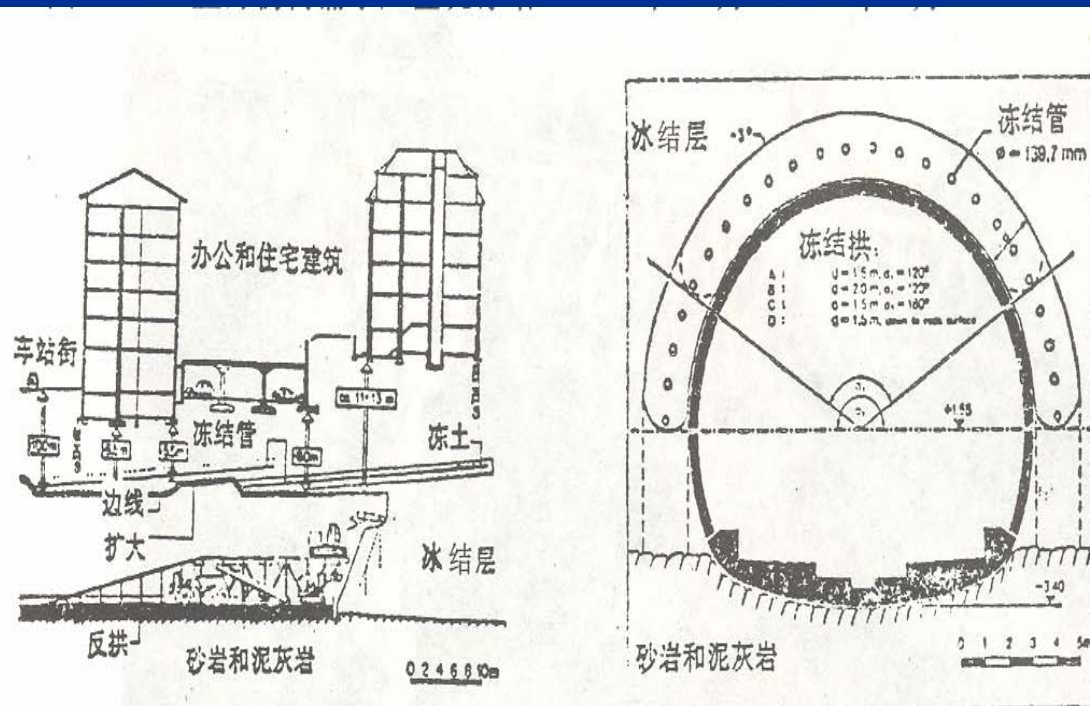


图 10-11 苏黎士河下隧道施工示意



■ 国内情况

上海水厂基坑冻结施工

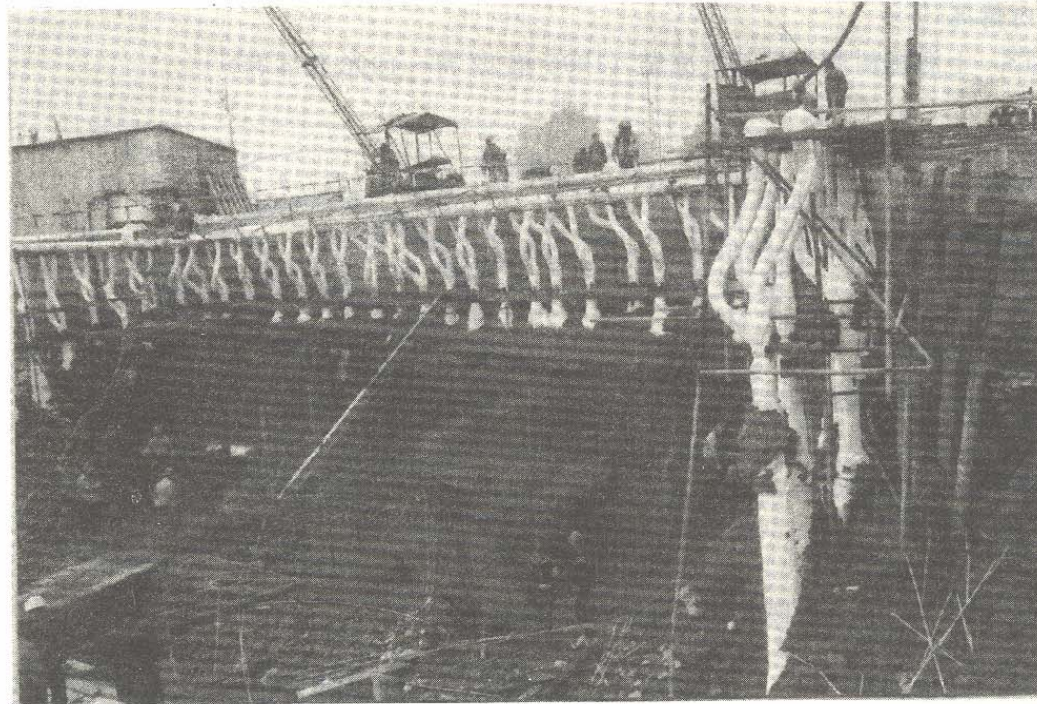


图 10-13 上海水厂基坑冻结施工