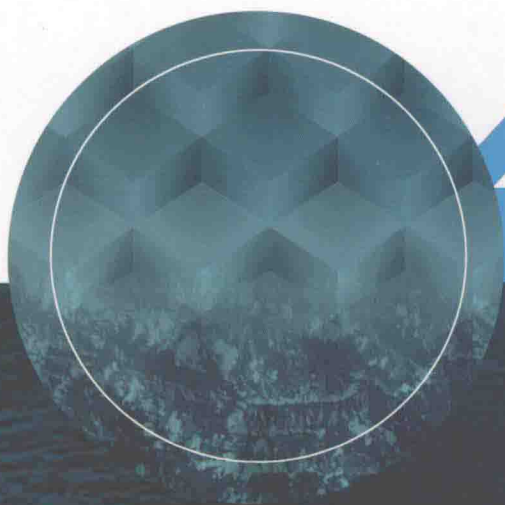


BINHAI RUANTUDICENG
RENGONG DONGTU WULI LIXUE
TEXING YANJIU JI YINGYONG

滨海软土地层

人工冻土物理力学特性研究及应用

陈斌 岳丰田 张春进 石荣剑 林乃山 李文勇 著



BINHAI RUANTUDICENG
RENGONG DONGTU WULI LIXUE
TEXING YANJIU JI YINGYONG

中国矿业大学出版社

滨海软土地层人工冻土 物理力学特性研究及应用

陈 斌 岳丰田 张春进 著
石荣剑 林乃山 李文勇



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以宁波轨道建设中的冻结法施工工程为基础,介绍了滨海地区软土地层的基本物理力学性质和冻结法施工过程,总结了滨海地区软土地层冻结法施工最新的研究成果。

本书可供从事岩土工程和地下工程学习、研究的师生及其他科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

滨海软土地层人工冻土物理力学特性研究及应用/
陈斌等著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2018. 12
ISBN 978 - 7 - 5646 - 4267 - 9

I. ①滨… II. ①陈… III. ①海滨—软土地区—铁路
路基—冻结法施工—冻土物理力学性质—研究—宁波
IV. ①U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 299005 号

书 名 滨海软土地层人工冻土物理力学特性研究及应用
著 者 陈 斌 岳丰田 张春进 石荣剑 林乃山 李文勇
责任编辑 吴学兵
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83884103 83885105
出版服务 (0516)83995789 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 12.25 字数 218 千字
版次印次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷
定 价 45.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

人类正在向地下、海洋和宇宙开发。向地下开发包括地下资源、地下能源和地下空间三个方面。地下空间开发已成为世界发展的趋势,专家预测 21 世纪将是地下工程的世纪。随着城市地下工程的日益发展,出现了注浆法、地下连续墙、旋喷桩、降低水位法、板桩法等施工方法。和这些方法相比,冻结法加固具有封水效果明显、适应性广、施工简便、环境污染小等优点,因此冻结法在城市地下工程建设中越来越受到重视,已被广泛应用于地基基础工程、城市地铁、隧道工程、水利工程等市政工程的建设及抢险工程中。

滨海地区软土地层普遍具有天然含水量高、压缩性大、强度低、渗透性差等特点,在软土地层进行冻结施工是冻结法面临的新问题。本书基于大量的基础试验,结合宁波滨海地区轨道建设中的冻结法施工经验,介绍了滨海地区软土地层的基本性质和冻结法施工特点,以及针对滨海地区软土地层的最新研究成果,包括原状土和重塑土的单轴抗压强度试验及其他力学参数试验、软土地层的冻土力学模型研究、冻土物理力学参数在冻结设计和施工中的应用及宁波地区冻结法施工实例等。

本书的特点如下:

- (1) 主题明确、内容全面、言简意赅。
- (2) 本书的理论分析和试验为工程提供了理论依据,促进了相关理论的发展。
- (3) 对工程实例的内容叙述详细,为同类工程提供了参考。

本书的出版对我国当前的冻结工程的推广應用和地下工程的建设具有较高的指导意义和促进作用。

衷心感谢宁波市轨道交通集团有限公司等相关单位的领导和专家长期以来给予的支持和鼓励。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏或错误之处,恳请有关专家和广大读者不吝批评指正。

作 者

2018年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 人工冻结法	1
1.2 人工冻结法在软土地层中的应用	3
1.3 滨海地区软土地层的特点	4
1.4 人工冻土的物理力学参数	9
第 2 章 原状土样的冻土物理力学特性	12
2.1 概述	12
2.2 人工冻土的单轴抗压强度	15
2.3 人工冻土的弯拉强度	21
2.4 人工冻土的导热系数与导温系数	23
2.5 人工冻土的比热容	28
2.6 人工冻土的结冰温度	29
2.7 冻土的冻胀融沉参数研究	33
第 3 章 重塑土样的人工冻土强度图谱	50
3.1 概述	50
3.2 重塑土冻土单轴抗压强度测试	53
3.3 人工冻土弯拉强度测试	65
第 4 章 水泥改良地层的冻土物理力学参数	76
4.1 概述	76
4.2 水泥改良后的力学性能	77
4.3 水泥改良后地层的冻胀融沉特性	91

第 5 章 低温冻土力学模型研究 ·····	115
5.1 概述 ·····	115
5.2 冻土单轴压缩试验 ·····	116
5.3 液氮冻结人工冻土的本构模型 ·····	125
第 6 章 冻土物理力学参数在冻结设计中的应用 ·····	154
6.1 冻土帷幕控制参数 ·····	154
6.2 冻土帷幕其他影响参数 ·····	154
6.3 冻土帷幕结构计算 ·····	155
6.4 冻土帷幕受力的数值计算 ·····	156
6.5 冻结法设计 ·····	160
6.6 冻结孔布置及制冷设计 ·····	166
6.7 冻结施工技术要点 ·····	167
第 7 章 冻土物理力学参数在冻结施工中的应用 ·····	168
7.1 工程概况 ·····	168
7.2 工程与水文地质 ·····	169
7.3 总体施工方案 ·····	172
7.5 冻结效果分析 ·····	177
参考文献 ·····	183

第1章 绪 论

1.1 人工冻结法

地层人工冻结技术起源于天然冻结现象。早在19世纪初期,俄国人在西伯利亚利用天然冻结层开凿立井采金。1862年英国首先利用地层人工冻结技术加固基坑。1883年德国工程师博茨舒在阿尔巴里德煤矿采用冻结法开凿深103 m的井筒,并获得了冻结法凿井的专利。从此,该项技术广泛应用于许多国家的工程建设中,美国常利用冻结法进行基础加固,苏联在地铁隧道工程中曾多次使用冻结技术作为加固措施,许多西欧国家将冻结法采用于桥涵和隧道工程加固施工,日本大阪交通局在该市地铁5号线工程中,采用冻结法冻结土体 70 m^3 ,确保盾构顺利出洞。我国自1955年在波兰专家的帮助下采用冻结法建设了开滦林西矿风井以来,冻结法凿井在我国得到了广泛推广,解决了深厚表土层中建井的技术难题。据统计,目前国外有9个井筒穿越的表土层厚度超过400 m,最深的土层厚度为571 m(苏联雅科夫列夫铁矿主井),冻结最大深度为930 m(英国博尔比钾盐矿主井)。我国已采用冻结法施工了超过1100个井筒,累计冻结长度已超过300 km,其中最大井筒直径10.5 m(内蒙古纳林河二号煤矿新副井),最大土层冻结深度754.96 m(山东万福煤矿副井),最大冻结深度950 m(甘肃核桃峪煤矿副井),均为世界纪录。

冻结法是利用人工制冷技术,使地层中的水冻结,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施工的特殊施工技术。其实质是利用人工制冷临时改变岩土性质以固结地层。

冻结使土体的物理力学性质发生了突变。与未冻土相比,冻土的性质发生了较大的改变,主要表现在以下几个方面:

- (1) 黏聚力增大,强度提高。

(2) 土中水结冰,使原来松散含水土体成为不透水土体。

(3) 压缩量明显减小。

(4) 体积增大。

不透水和较高承载力正是土工工程所需要的,是对工程有利的。上述性质的改变使得人工冻土成为一种临时的承载结构,在这一临时承载结构的保护下,可以顺利完成岩土体工程的施工。因而人工冻结地层技术成为施工地下工程的一种重要方法。

人类正在向地下、海洋和宇宙开发。向地下开发包括地下资源、地下能源和地下空间三个方面。地下空间开发已成为世界发展的趋势,专家预测 21 世纪将是地下工程的世纪。随着城市地下工程的日益发展,出现了注浆法、地下连续墙、旋喷桩、降低水位法、板桩法等施工方法。和这些方法相比,冻结法加固软土具有以下优点:

(1) 封水效果明显。冻结加固使土体中的大部分水结冰,这不仅提高了土的强度,使结构体强度均匀,而且其阻水效果是其他方法所无法比拟的。

(2) 适用范围广。适用于任何含一定水量的松散岩土层,在复杂工程、水文地质如软土、含水不稳定层、流砂、高水压及高地压地层条件下冻结技术有效、可行。如我国北京地铁“复-八”线“大北窑-热电厂”区间有南北两条东西走向隧道,南隧道顶部有 2 m 厚的粉细砂层,降低水位后开挖,引起地表塌陷,采用冻结法施工,成功地控制了地层位移;2003 年上海明珠二期漕西路连接段基坑漏水堵漏工程,开始用注浆法,不但没有封住水,还造成地面房屋不均匀变形,后采用液氮冻结,很好地解决了该问题。相比较冻结法而言,注浆、地下连续墙等方法对地质条件的适应能力差,并易于对周边环境造成较大影响。

(3) 冻结加固土体均匀,整体性好。冻结加固体的形状、大小可以根据需要灵活设计,可以把设计的土体全部冻成冻土,形成地下工程施工帷幕。而土层注浆和深层搅拌桩,只是对土体局部进行加固,加固范围不易控制,加固体强度不均匀。

(4) 施工方便、简单。人工土冻结法基本不受支护范围和支护深度的限制,完全以地层本身形成支护体系,且冻结加固体形状可根据工程需要灵活设计,既可形成圆筒形加固体,又可形成棚拱形加固体,冻结范围大至整个街区,小至局部抢险工程。而注浆、地下连续墙加固对深度有一定的限制。

(5) 环境污染小。冻结工程施工最大的污染是钻孔时的少量泥浆排出;冻结过程不向地层注入任何有害物质;冻结工程完毕后,地层自然融化恢复原有状况,不会在地层留下有碍于其他工程施工的地下障碍物。作为一种“绿色”施工方法,冻结法符合当今环境岩土发展趋势。

(6) 经济上比较合理。国外的工程实践表明,冻结工程成本与其他施工(如注浆和旋喷)处于相同的数量级,而且随着加固深度的加大,冻结法的经济性越来越明显。

基于以上优点,冻结法在城市地下工程建设中越来越受到重视,已经被应用于地基基础工程、城市地铁、隧道工程、水利工程等市政工程的建设及抢险工程中。

1.2 人工冻结法在软土地层中的应用

虽然人工冻结法施工技术经过多年的发展已经成熟,也取得了令人可喜的成就,但冻结法本身也存在着缺点,例如冻土本身的冻胀与融沉,这就会给工程和周边环境带来危害。土体的冻胀是指随着温度的降低,热交换过程的进行,当土体温度达到土中水的结冰点时,便产生冻结,伴随着土中孔隙水和迁入水的结晶体、透镜体、冰夹层等形成的冰侵入土体,引起土体体积的增大,导致地表产生不均匀上升。当变形受约束或不许变形时,冻土就会对约束物产生推力即冻胀力。

随着冻结法在我国沿海地区的应用,我国沿海地区广泛分布着深厚的第四纪潟湖相、滨海相等海相沉积软土层,主要为淤泥和淤泥质土,其特点是天然含水率大、孔隙比大、压缩系数高、强度低,并具有蠕变性、触变性等特殊工程性质,多数含有一定的有机物质,工程地质条件较差。人工地层冻结法的施工对象更多是海相沉积软土,而冻结法在海相软土层中的应用,仍有一系列亟待解决的问题。这些问题主要体现在以下几方面:

(1) 缺乏基础参数(热物理与力学)及可借鉴的工程经验

由于人工地层冻结技术在海相软土层中的应用相对较少,导致目前在海相软土层中的冻结设计与施工仍然参照其他普通土层的经验。然而,海相软土层是第四纪后期地表流水所形成的沉积物质,多数分布于海滨、湖滨、河流沿岸等地势比较低洼地带,或长期受地质作用而被海水侵入,形成的陆海交错及海积黏性土超复沉积模式。这种海相软土层属于特殊地层,且多数含有海水,由于海水中含盐而导致海相软土层中含盐。与通常条件下的冻结加固工

程相比,这将会导致海相软土层的冻结温度降低、冻结强度降低、冻结帷幕的交圈时间延长,甚至会出现无法交圈等问题。因此,目前既缺乏相应成熟的工程经验,又缺少相应的基础数据,主要是人工冻结条件下海相软土的热物理、力学参数等,因此有必要开展相关试验研究工作,来指导人工地层冻结法在海相软土层中的应用。

(2) 缺乏人工冻结条件下海相软土的冻胀特性规律

冻土的冻胀主要是水力梯度作用下的直接水分迁移和温度梯度等驱动下的水分间接迁移导致的冰分凝的宏观表现。海相软土层中含有海水,这种含有海水的土体并不等同于一般盐渍土。通常所说的盐渍土或者浸盐土,其含盐成分单一、含盐量高,而相比于通常所说的盐渍土,含盐成分复杂是海相软土层的特点。海相软土较之于一般盐渍土,就冻胀特性与冻胀规律而言,是否有着不同于一般盐渍土的冻胀特性,将对冻结法的施工有着至关重要的影响。因此,对海相软土层在人工冻结条件下冻胀特性规律展开研究,必将为在此基础上所开展的冻胀控制打好基础。

1.3 滨海地区软土地层的特点

软土一般是指在静力或缓慢流水环境中以细颗粒为主的近代沉积物,其直径小于 0.1 mm 的颗粒一般占土样质量的 50% 以上。这类土的物理特性大部分是饱和的,含有机质,天然含水率大于液限,孔隙比大于 1。当天然孔隙比大于 1.5 时,称为淤泥,天然孔隙比大于 1 而小于 1.5 时,则称为淤泥质土。工程上将淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土、冲填土、杂填土和饱和含水黏性土统称为软土。软土地层还包括软土与砂土、碎石土、角砾土及块土等形成的互层。因此,软土地层还可包括除岩石以外的所有含有软弱土层的土层,以下是一些滨海地区软土地层的特点。

(1) 天津地区软土

渤海湾西岸的天津滨海新区在早更新世、中更新世时期主要以陆地相沉积为主,海洋作用甚微;晚更新世与全新世以来,海洋作用加强,渤海湾西岸以海相沉积为主,形成了天津地区比较典型的海陆交互相地层。全新世中期形成的第一海相层主要以淤泥质软土为主,是天津地区主要的软土地基,也是滨海地区工程地质问题较集中的层位。主要淤泥及淤泥质土特性如下:②-1 层淤泥:灰色、灰褐色,流塑状,高塑性,土质不均匀,含少量碎贝壳,局部混多量的粉土、粉砂团块,夹粉土薄层。该土层广泛分布,底高程位于 -8.0 ~ -10.0 m。②-2 层

淤泥质黏土:灰色,软塑状,土质不均匀,混少量碎贝壳及粉土团块,间粉土薄层。该层广泛分布,层位较稳定,层底高程在 $-11.5\sim-15.0\text{ m}$ 。

该地区土样分析资料统计结果表明,不同类型软土的含水率与天然孔隙比之间存在较好的相关关系:①天然孔隙比随天然含水率的增加而增加;②天然含水率与重度呈自然对数相关关系。

天津塘沽新港地基土系第四纪全新世滨海沉积,地面下 $2\sim4\text{ m}$ 为吹填土和杂填土,在地面下 10 m 以上的土层基本上为淤泥质土, 10 m 深度以下至 18 m 大多为黏土和粉质黏土,夹薄层粉砂, 18 m 以下为粉土和粉砂。

(2) 上海地区软土

在上海的第四系地层中,对工程建设有直接影响的地层是 135 m 以内的土层,包括暗绿色硬土层及其以下的晚更新统和暗绿色硬土层上部的全新统。通常意义上的上海软土是指暗绿色硬土层以上的土层,其中对工程影响比较大的软土为第3层淤泥质粉质黏土和第4层淤泥质黏土。上海地区软土层均有分布,仅在崇明岛西北部因受后期②③层砂质粉土侵蚀而缺失。软土层埋藏深度滨海相陆域地区变化不大,大部分地区埋深在 4 m 左右。西部湖沼平原区埋深在 $4\sim8\text{ m}$ 之间,岩性上部以③层淤泥质粉质黏土为主,下部为④层淤泥质黏土。而东部南汇河口、砂嘴、砂岛地区埋深在 12 m 左右,崇明、横沙、长兴等河口沙岛区埋深最深,在 $12\sim20\text{ m}$ 之间,因受后期粉土侵蚀,缺失③层土,仅分布有④层淤泥质黏土。软土的厚度在 $10\sim20\text{ m}$ 不等,通常有⑥层暗绿色硬土层分布地区,其厚度一般约 $10\sim15\text{ m}$,仅西部、南部基岩残丘分布区和北部嘉定与宝山接壤地区,其厚度明显变薄,一般为 10 m 左右;而无暗绿色硬土层分布地区,如古黄浦江、吴淞江支流河道地带一般厚度约 $15\sim20\text{ m}$,唯长江河口地区其厚度小于 10 m 。

上海软土地基的沉降量大,固结历时长,施工期完成的沉降量仅占总沉降量的 $20\%\sim30\%$,竣工后的沉降包括次固结沉降将延续很长的时间。第④层淤泥质黏土是上海地区最软弱、压缩性最大的土层,其次为第③层淤泥质粉质黏土层。

(3) 杭州地区软土

杭州的第四纪全新世沉积地貌特征和上海是相似的。距今 $1.2\text{ 万年}\sim1.0\text{ 万年}$ 以来,全新世早期气候由寒冷转为温暖,长江三角洲受镇江海侵的影响范围很广,杭州在当时也受到了海侵的影响,致使海水面不断上升,漫延至转塘、九溪一带,沉积了杭州地区的第二软土层——浅海、潮谷相淤泥质土,包括厚度 $5\sim8\text{ m}$ 的淤泥质粉质黏土和厚度 $2\sim10\text{ m}$ 的淤泥质黏土。

其后,距今 8 000~7 000 年,海侵达到最大限度,规模也达最大,也是最后一次海侵,此时沉积的杭州地区第一软土层为滨海相、海湾相淤泥质土,顶板高程 2.0~0.0 m、厚度 3~6 m 的淤泥质黏土以及在其下的厚度为 8~10 m 的淤泥质粉质黏土层。

杭州软土属我国沿海地区典型的软弱土,其工程特性如下:① 天然含水率高,孔隙比大,多呈流塑状,为灰色静水或缓慢流水还原环境沉积,大都属于淤泥质黏土、淤质黏土。② 压缩性高,随土性而异。淤质黏土有极高的压缩性,淤泥质黏土具有高压缩性,一般黏土有中等~高压缩性。③ 强度低,土体无侧限抗压强度小,抗剪强度低。④ 渗透性差,渗透系数小。⑤ 具有较强的结构性,灵敏度高,上部荷载一旦超过土体自身结构屈服应力,絮状结构遭到破坏,则土的强度明显降低,甚至呈流动状态,致使沉降量骤增,土体变形表现出较大的突发性和灵敏性,给工程建设造成极大的危害。

杭州软土是我国典型的软土。在工程力学强度和变形特征上,比天津、上海等北部地区差,而比温州、福州等南部地区好,符合我国软土“北强南弱,依次变化”的总趋势,而在土性上则复杂多变。

(4) 温州地区软土

温州位于浙江省东南沿海地区,东濒东海,南接福建,瓯江下游汇入东海的温州湾岸边,海岸线长达 355 km,是我国著名的软黏土地区。温州地理位置东经 $120^{\circ}40'$,北纬 $27^{\circ}40'$,其间广泛分布着 20~70 m 巨厚的第四纪潟湖相、溺谷相和滨海相等海相沉积软土层,是我国典型的巨厚软土发育地区之一。地表的填土和表土层非常薄,淤泥埋藏深度为 2~4 m,淤泥和淤泥质土层的厚度达 30 m 或者更厚一些,淤泥的孔隙比高达 1.7~2.6,其工程地质特性一般表现为含水率大、强度低、压缩性大、透水性差、土质不均匀等特点。

软土结构性是指土颗粒和孔隙的性状、型式(或称组构)及颗粒之间相互作用。温州软土具有较强的结构性,主要表现在两个方面:① 高孔隙比:薄壁土样的孔隙比可达 1.9 左右。② 强透水性:其竖向固结系数 C_v 最高可达 $4.04 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$,是同等条件下重土样的 9 倍左右。

地层分布如下:

① 淤泥:含水率一般大于 55%,少数在 31.1%~55%;孔隙比大于 1.5,少数小于 1.5;湿密度小于 1.7 g/cm^3 ;干密度小于 1.1 g/cm^3 ,个别大于 1.1 g/cm^3 ;液限大于 40%,少量的略小于该数值;塑限大于 20%,少量的在 17.5%~20%之间;塑性指数大都大于 17;液性指数大于 1.1;黏粒含量大于

40%，少数在30%~40%之间；粉粒含量大于35%；比重大于2.71；压缩系数大于 1.0 MPa^{-1} ，压缩模量在1.3~3.0 MPa之间；原状无侧限抗压强度小于45 kPa；竖向固结系数小于 $2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；竖向渗透系数小于 $4.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ；水平向渗透系数小于 $5.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ；灵敏度大多在3~8之间，属于灵敏土。

② 淤泥质黏土：含水率一般为37%~56%；孔隙比为1.0~1.5，个别小于1.0；湿密度为 $1.67 \sim 1.85 \text{ g/cm}^3$ ；干密度为 $1.06 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ ；液限40%~50%；塑限18.9%~30%；塑性指数17.7~25.3；液性指数1.0~1.7；黏粒含量20%~60%；粉粒含量32%~54%；比重2.69~2.76。压缩系数 $0.57 \sim 1.5 \text{ MPa}^{-1}$ ；压缩模量在1.6~4.2 MPa之间；原状无侧限抗压强度大于13 kPa；竖向固结系数小于 $4.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；竖向渗透系数小于 $4.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ；水平向渗透系数小于 $5.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ；灵敏度大多在2~4之间，属于中等灵敏土。

③ 淤泥质粉质黏土：含水率一般为35%~50%；孔隙比为1.0~1.4，个别小于1.0；湿密度为 $1.7 \sim 1.86 \text{ g/cm}^3$ ；干密度为 $1.14 \sim 1.37 \text{ g/cm}^3$ ；液限30%~45%；塑限18.6%~30%；塑性指数大于11~17.7；液性指数1.09~1.85；黏粒含量23%~48%；粉粒含量35%~62%；比重2.7~2.75。压缩系数 $0.5 \sim 1.5 \text{ MPa}^{-1}$ ；压缩模量在2.0~3.8 MPa之间；原状无侧限抗压强度小于70 kPa；竖向固结系数小于 $5.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；竖向渗透系数小于 $8.4 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ；水平向渗透系数小于 $5.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ；灵敏度大多大于4，属于灵敏土。

(5) 广州地区软土

广州地处珠江三角洲中部，毗邻珠江出海口。广州软土的分布厚度由西北向东南逐渐加大，由老城区内厚度5 m左右向南至番禺南沙厚度加大至30 m左右。广州软土具有典型的三角洲软土的性质，由于江水与海潮的复杂交替作用，淤泥与薄层砂交错沉积。其主要特性如下。

① 厚度变化大：广州地区岩层面起伏大，软土层由西北向东南逐渐加厚，厚度在5~30 m之间，分布很不均匀。软土层一般为淤泥层、淤泥质土夹砂层、淤泥质黏土层。

② 含水率高、孔隙比大：广州地区软土天然含水率为50%~80%，有的高达100%，液限一般为40%~60%，天然含水率随液限的增大而增大。天然孔隙比一般为1.0~2.0，饱和度接近100%。

③ 渗透性较好：全国大部分地区淤泥和淤泥质土的渗透系数一般为

$10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/s, 而广州软土的渗透系数一般为 10^{-6} cm/s。这是由于广州软土中夹有较多的粉砂, 约占 11%, 粉粒(0.075~0.005 mm)含量约占 40%, 黏粒(小于 0.005 mm)约占 49%, 且软土层中夹有厚度不等的薄层粉、细砂、粉土层。广州软土较其他三角洲相成因的软土(如上海软土)的渗透性较好。

④ 压缩性高: 广州淤泥和淤泥质土压缩系数 $1.1 \sim 2.5 \text{ MPa}^{-1}$ 之间。而上海软土在 $0.2 \sim 1.65 \text{ MPa}^{-1}$ 之间。

⑤ 抗剪强度低: 广州软土天然状态十字板抗剪强度 u 一般小于 15 kPa, 快剪黏聚力为 4~15 kPa, 内摩擦角 $4^\circ \sim 12^\circ$, 固结快剪黏聚力约为 12 kPa, 内摩擦角 $5^\circ \sim 12^\circ$ 。

⑥ 触变性中等: 广州软土的灵敏度 S_r 一般为 2~4, 属中等灵敏土。

⑦ 含有蒙脱石、有机质: 通过大量的 X 衍射分析得出广州软土的矿物成分为大量的石英和斜长石、少量的钠长石、伊利石和高岭石, 微量的蒙脱石。广州软土的有机质含量较高, 一般为 2% 左右。由于蒙脱石和有机质的存在, 使这类软土含水率高(50%~80%)、液限值高(40%~60%)。

(6) 深圳地区软土

深圳是 20 世纪末新开发的特区城市, 在城市建设中揭示了各种类型的软土。深圳地区的软土主要为淤泥、淤泥质黏性土(混淤泥质土的粉细砂)及含泥炭质黏性土。该淤泥层属第四纪的海相沉积层, 广泛地分布于深圳西部的沿海地区和伶仃洋东岸, 厚度一般为 3~10 m, 并呈流塑状, 黑灰色, 含有 5%~10% 的有机质。其工程特性是含水率高, 孔隙比大, 压缩性很高, 抗剪强度和渗透性都很低。其中, 含水率、孔隙比、液限、塑性指数、液性指数、压缩系数随深度的增加数值逐渐减小; 密度、土粒密度、压缩模量随深度的增加而逐渐增大。

(7) 宁波地区软土

宁波软土具有以下典型特征: 典型的软土厚度大于 25 m, 颜色为灰色或深灰色, 软塑~流塑状态。天然含水率高(34%~58%), 土体几乎完全饱和(饱和度均大于 94%), $w > w_L$, $I_L > 1$, 呈流塑状态; 快剪强度指标 $\varphi = 1.1^\circ \sim 5.9^\circ$, $c = 3.0 \sim 7.6$ kPa; 固结快剪强度指标 $\varphi = 14.7^\circ \sim 25.4^\circ$, $c = 3.0 \sim 8.0$ kPa; 塑性指数 I_p 高达 26.4, 液限 36.1%~45.2%, 平均值为 41.0%, 液性指数为 1.02~1.94; 压缩系数均值为 0.76 MPa^{-1} , 压缩模量均值为 2.87 MPa, 属于高压缩性软土; 抗剪强度低, 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 离散性较大; 渗透系数在 10^{-8} cm/s 数量级内; 水平向固结系数为 $(2.48 \sim 5.78) \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$; 竖向固结系数为 $(2.32 \sim 3.8) \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$; 无侧限抗

压强度为 11.3~28.0 kPa;灵敏度为 1.3~5.0。垂直向渗透系数均值为 2.12×10^{-7} cm/s,水平向渗透系数均值为 3.94×10^{-7} cm/s,水平向渗透系数大于垂直向渗透系数。

与其他地区软土相比,宁波软土与国内外软土具有异同性。相同点是软土普遍具有天然含水率高、压缩性大、强度低、渗透性差等特点,不同之处在于宁波软土的抗剪强度指标变化范围大,这一点与温州软土具有相似性,另外宁波软土工程地质性质往往劣于北部的天津、上海软土,而优于南部的温州、湛江、广州软土。

宁波软土具有典型的海绵结构和层理结构,这主要是由于宁波的地理位置(东海之滨,杭州湾南岸,甬江、姚江和奉化江三江交汇口)和软土地质成因(自第四纪中期开始,在多次海陆变迁历史中,堆积的一套由陆相到海陆交互的松散沉积物,成因有海积、冲海积、滨海沼泽相沉积)所决定的。土层分布在垂向上分选性明显。从灵敏度方面看,宁波软土为 3~5,中等灵敏度,属灵敏性土。另据研究,宁波软土严重受扰动后强度可降低 70%~80%,因此,施工过程中应尽量避免扰动。另外,宁波软土的应力、应变状态,还具有随时间而变化的性质,即流变性,经长期变形破坏的土体,其抗剪强度仅为一般抗剪强度的 40%~50%。

1.4 人工冻土的物理力学参数

人工冻结法是利用人工制冷技术,将天然岩土变为冻岩土,从而形成具有强度较高、稳定性较好、不透水的临时支撑结构——冻结壁,用以抵抗地压、水压等外部荷载,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进施工的特殊施工技术。

人工冻结过程中,随着天然岩土变为冻岩土,其物理力学性质将发生显著变化。因此,为了确保冻结法施工过程的安全,必须给冻结壁的设计和施工提供准确可靠的冻土物理力学参数,从而确定合理的冻结壁厚度、冻结时间以及隧道开挖过程中应注意的事项。

1.4.1 人工冻土热物理指标

人工冻土热物理指标,包括土层的比热、导热系数、冻结温度和人工冻土的冻胀率、冻胀力。

(1) 比热、导热系数、冻结温度

土的比热,表示单位质量的土体在温度改变 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所需要的热量。土层的导热系数表征了冻土体传导热量的能力,冻土结构不同,导热系数不同。本参数测定目的在于掌握冻土的发展速率,为确定冻结时间和计算冻结壁厚度提供基本参数。冻结温度即为土中水的冻结温度,土中水分子在土颗粒表面力场的作用下吸附在土颗粒表面,当土体温度低于自由水的冻结温度时,土中水开始冻结,其数值主要受到土本身性质如土颗粒的矿物成分、含水率、含盐量以及外界压力的影响。

(2) 冻土冻胀率和冻胀力测定

冻土的冻胀率和冻胀力两个指标,主要是用于衡量冻土由天然状态变化为冻结状态下其体积发生的变化情况,以及当体积变化受限时对外产生的作用力。其中,冻胀率试验又称自由冻胀试验,表示轴向无约束冻胀试验,即样品在轴向可以自由膨胀。在试验过程中,按规定要求的时间测量样品轴向位移与时间的关系,并得到样品的最大冻胀量 δ_{\max} 。样品的最大冻胀量 δ_{\max} 与样品原长的比值为样品的冻胀率。

冻胀力试验又称有约束冻胀试验,表示样品在零位移约束下进行冻土的冻胀试验,在样品的上端施加纵向约束,并用荷重传感器测量冻土的冻胀约束力,同时记录试验过程中冻土的冻胀约束力的发展与时间的关系,得到冻土最大冻胀约束力 σ_{\max} 。

1.4.2 人工冻土力学指标

根据规范要求,冻土的力学指标包括冻土单轴抗压强度和弯拉强度。

(1) 冻土单轴抗压强度

冻土单轴抗压强度是一种短时荷载下的强度,是冻土试验中最直观、最基本的试验内容,也是目前设计部门进行冻结壁设计的主要依据。试验设备为 WDT-100 冻土试验机,试验按应变控制加载方式进行,应变速率控制在 1% 。为了克服加载时间长短对试验结果的影响,冻土无侧限抗压强度取试样破坏时的加载时间大约等于 $(30\pm 5)\text{s}$ 的强度值。

冻土的弹性模量表示冻土在弹性变形阶段,其应力和应变成正比例关系(即符合胡克定律),其比例系数称为弹性模量。本次试验取抗压强度的一半与其所对应的应变值的比值为弹性模量。冻土的泊松比是指冻土在单向受拉或受压时,横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值,也叫横向变形系数,它是反映材料横向变形的弹性常数。

(2) 冻土弯拉强度