

国家自然科学基金重点项目(50534040) 资助
国家科技支撑计划项目(2006BAB16B01)

深厚表土层中 冻结壁稳定性研究

 王文顺 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金重点项目(50534040) 资助
国家科技支撑计划项目(2006BAB16B01)

深厚表土层中冻结壁稳定性研究

王文顺 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要论述深厚表土层中冻结壁的稳定性和其工程应用。全书共五章,分别研究了深厚表土层中冻结壁的物理力学特性以及深部和浅部表土层中冻结壁的区别;采用有限元分析软件模拟了深厚表土层中冻结壁的稳定性和利用大型多功能竖井模拟试验台,对深厚表土层中的冻结壁进行了物理模拟试验;在理论分析、数值模拟、物理模拟和工程实测的基础上,提出了深厚表土层中冻结壁稳定性的判定方法。

本书可供从事冻结法凿井研究、设计、施工技术人员和工程项目管理人员参考,也可供从事岩土工程、地下建筑和隧道工程的高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深厚表土层中冻结壁稳定性研究/王文顺著. —徐

州:中国矿业大学出版社,2011.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0879 - 8

I. ①深… II. ①王… III. ①冻结法(凿井)—研究

IV. ①TD265.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 219494 号

书 名 深厚表土层中冻结壁稳定性研究

著 者 王文顺

责任编辑 杨 洋

责任校对 张海平

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)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 10.75 字数 191 千字

版次印次 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

在我国的能源结构中,煤炭所占比例超过70%,而煤田赋存的地质条件差别较大,有些矿区处于复杂的地质条件下,为了满足国民经济发展的要求,又不得不在地质条件复杂的矿区建设矿井以开采煤炭。像兖州矿区、淮北矿区、淮南矿区、徐州矿区、大屯矿区、平顶山矿区、永夏矿区、巨野矿区等均被深厚表土所覆盖,在这些矿区建设矿井只能采用特殊的凿井方法——冻结法和钻井法,其中冻结法一般情况下不受井筒直径和深度限制,因此应用更为广泛。

冻结壁是冻结法凿井的临时支护结构物,要起到隔绝地下水和抵抗水土压力的作用,必须要有足够的强度和稳定性。冻结壁是冻结工程的核心,其强度和稳定性关系到工程成败和经济效益。

我国自1955年首次采用冻结法凿井技术以来,已施工立井近500个,总延米达74 km以上。我国已基本具备采用冻结法通过约400 m厚冲积层建设井筒的能力,但是几个深冻结井在建设或生产期间,外层井壁破裂、井筒缩径、冻结管断裂等问题时有发生。

目前,采用冻结法通过400 m深冲积层建设井筒还存在不少理论与技术上的问题。显然,用冻结法通过深厚(400~600 m)冲积层建设井筒,将面临更多、更复杂的理论与技术难题。

冻结壁的设计取决于以下三个方面:①对冻土力学性质的认识;②对施工工艺和施工条件的认识;③外层井壁。冻结壁设计理论从最初的无限长弹性厚壁筒理论、无限长弹塑性厚壁筒理论、无限长理想塑性厚壁筒理论等逐步发展为有限长厚壁筒理论和冻结

壁有限变形理论等,相应地有拉麦公式、多姆克公式、里别尔曼公式、维亚洛夫公式等计算公式,但这些公式均不适用于特厚冲积层冻结壁的设计和计算。同时,由于冻结土体的体积随冻结壁的厚度成平方关系增长,因此冻结壁的设计关系着巨额的冻结费用和工程安全,也给项目的管理工作带来了巨大的压力和潜在的风险。

冻结壁(特别是深厚冲积层冻结壁)的强度和稳定性的直观表现就是冻结壁的变形,因此研究冻结壁的变形规律是研究冻结壁设计理论的基础和提出冻结壁设计理论的前提。

数以千计的地下工程实践表明,在含水不稳定土层中施工,人工冻结方法有其突出的优点,其适应性强、可靠性高、对环境无污染、设备简单,因此具有较好的经济效益和社会效益。所以,深厚表土层中冻结壁稳定性研究为冻结法凿井在深厚表土层中的开发与应用提供理论支持,为获得安全、经济、合理的冻结壁设计和施工技术研发奠定较好的应用理论基础。

基于此,本书主要研究内容为:

① 分析了深厚表土层中冻结壁的物理力学特性以及深部和浅部表土层中冻结壁的区别。

② 采用 ANSYS 有限元分析软件模拟了深厚表土层中冻结壁的稳定性的稳定性。

③ 成功利用大型多功能竖井模拟试验台,按冻结壁受载历史,针对表土深度在 400~700 m 的冻结壁进行了物理模拟试验,获得了深厚表土层中冻结壁稳定性与主要影响参数之间的关系,并分别给出了砂层和黏土层冻结壁稳定性与各影响因素的函数表达式。

④ 在理论分析、数值模拟、物理模拟和工程实测的基础上,提出了深厚表土层中冻结壁稳定性的判定方法,分别获得了可供设计和施工应用或参考的砂层和黏土层冻结壁厚度的时空计算公式,为深厚表土层中冻结壁的设计奠定了理论基础。

⑤ 结合深厚表土层中冻结壁稳定性的时空效应,分别就砂层冻结壁和黏土层冻结壁厚度计算对多姆克公式进行了修正,拓展了多姆克公式的使用范围。

⑥ 在物理模拟和工程实测的基础上,进一步研究了深厚表土层中厚黏土层冻结壁的稳定性与冻结壁厚度之间的关系,获得了经济、安全的冻结壁厚度判定方法。

感谢崔广心教授、周国庆教授、杨维好教授在本书成稿过程中的大力支持和鼎力相助!

本书不足之处,敬请批评指正。

作 者

2010年10月

目 录

1 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 冻土物理力学性质研究	6
1.2.2 冻结壁厚度计算方法研究	15
1.2.3 冻结壁模型或模拟试验研究	22
1.2.4 冻结壁稳定性的工程实测研究	27
1.2.5 冻结壁数值分析研究	29
1.3 主要研究内容及实施方案	31
1.3.1 主要研究内容	31
1.3.2 实施方案	31
1.4 研究的目的与意义	31
1.4.1 研究的目的	31
1.4.2 研究的意义	32
1.4.3 研究的创新点	32
2 深厚表土层中冻结壁稳定性理论分析	33
2.1 深厚表土层中冻结壁物理力学特性	33
2.2 深厚表土层中冻结壁力学模型	33
2.2.1 平面弹性厚壁筒	33
2.2.2 平面弹塑性厚壁筒	35
2.2.3 平面塑性厚壁筒	38
2.2.4 空间厚壁筒	39
2.3 冻土强度及其试验方法	41
2.4 冻结壁稳定性研究	43
2.5 本章小结	45

3 深厚表土层中冻结壁稳定性数值模拟研究	46
3.1 前言	46
3.2 计算模型假设和简化	48
3.2.1 基本假设和简化模型	48
3.2.2 模型边界条件	48
3.3 模型参数确定	48
3.3.1 几何参数	48
3.3.2 冻土本构模型及其参数	49
3.4 有限元计算模型	49
3.5 计算方案	50
3.5.1 准则及取值范围	51
3.5.2 计算方案	52
3.6 计算结果与分析	54
3.6.1 径向变形	54
3.6.2 工作面底鼓	64
3.7 本章小结	70
4 深厚表土层中冻结壁稳定性的模拟试验研究	72
4.1 模拟试验简介	72
4.2 相似准则导出	73
4.2.1 冻结温度场数学模型及准则	73
4.2.2 掘进过程中冻结壁稳定性相似准则	75
4.3 相似模化	76
4.3.1 原型资料	76
4.3.2 深度模拟	76
4.3.3 确定几何缩比 C_l	77
4.3.4 掘进段高模拟	77
4.3.5 时间缩比 C_r	78
4.3.6 温度缩比 C_t	78
4.4 试验设备	78
4.4.1 试验台	78
4.4.2 冻结与温度控制系统	79
4.4.3 加载与稳压系统	79

4.4.4	测试系统	80
4.5	试验安排与主要试验步骤	83
4.5.1	试验安排	83
4.5.2	主要试验步骤和试验材料	84
4.5.3	预压固结	85
4.5.4	高压下冻结	85
4.5.5	暴露冻结壁并安装位移计	86
4.5.6	调整冻结壁厚度和平均温度	86
4.6	中砂冻结壁稳定性研究	87
4.6.1	中砂冻结过程中温度场	87
4.6.2	中砂冻结壁径向变形	91
4.6.3	中砂冻结壁径向变形与诸参数关系	95
4.6.4	冻结中砂层工作面底鼓	97
4.6.5	中砂层工作面底鼓与诸参数关系	101
4.7	黏土冻结壁稳定性研究	102
4.7.1	黏土冻结过程中温度场	102
4.7.2	黏土冻结壁径向变形	104
4.7.3	黏土冻结壁径向变形与诸参数关系	112
4.7.4	冻结黏土层工作面底鼓	114
4.7.5	黏土层工作面底鼓与诸参数关系	120
4.8	本章小结	123
5	深厚表土层中冻结壁稳定性综合研究	124
5.1	工程实测研究	124
5.1.1	工程概况	124
5.1.2	去回路盐水温度实测	126
5.1.3	测温孔温度实测	126
5.1.4	井帮温度实测	130
5.1.5	井内冻土发展厚度实测	130
5.1.6	冻结壁径向变形实测	130
5.2	砂层冻结壁稳定性	132
5.2.1	实测砂层冻结壁厚度和平均温度	132
5.2.2	砂层冻结壁径向变形计算	133

5.2.3	砂层冻结壁综合对比研究	135
5.3	黏土层冻结壁稳定性	137
5.3.1	黏土层同一段高内连续实测结果分析	137
5.3.2	黏土层冻结壁径向变形计算	140
5.3.3	径向变形与冻结壁厚度关系	141
5.3.4	黏土冻结壁综合对比研究	142
5.4	工作面底鼓综合研究	145
5.5	本章小结	146
6	主要结论和建议	148
	参考文献	151

1 绪 论

1.1 问题的提出

煤炭是我国重要的一次能源,是我国的长期主要能源^[1],在国民经济中具有重要的战略地位。而我国各地的煤田地质条件差别较大,有些矿区被复杂的地层覆盖,所以为了满足国民经济发展的要求,不得不在地质条件复杂的矿区建设矿井以开采煤炭。

兖州矿区、淮北矿区、淮南矿区、徐州矿区、大屯矿区、平顶山矿区、永夏矿区、巨野矿区等均被厚表土覆盖^[2],其中华东地区的巨野煤田,其第三及第四系表土层厚度普遍达 500~600 m,最深处超过 700 m。在这些矿区建设矿井只能采用特殊的凿井方法——冻结法和钻井法,其中冻结法因不受井筒直径的限制,应用更为广泛^[2-5]。

冻结法主要应用于矿山深厚表土层的立井开凿工程中。它起源于天然冻结,由于人工制冷技术的发展和运用,从而产生了工程冻结。

1862 年,英国南威尔士在建筑基础施工中,首次使用人工制冷技术加固土壤。1883 年,德国工程师波茨舒(F. H. Poetsch)在德国阿尔巴里得煤矿用冻结法开凿了深度为 103 m 的井筒,获得了冻结法凿井技术的专利^[3]。

1955 年,我国从波兰引进冻结法凿井技术与设备,由开滦煤矿和波兰凿井队合作,在林西风井首次采用了冻结法凿井,并获得了成功。该井筒净直径为 5 m,井筒冻结深度为 105 m。

随后冻结法在我国被不断推广和使用,经过矿井建设者和科技人员的不懈努力,已经在 200 m,300 m,400 m 及更深的富水表土层中成功地建设了大批矿井^[4-7]。自 1955 年至今,已用冻结法施工立井近 500 个,总延米超过 80 km^[5]。

实践表明,在含水不稳定土层中施工,人工冻结法有其突出的优点,其适应性强、可靠性高、无污染、设备简单等,因此具有较好的经济效益和社会效益。

一般冻结表土层厚度标志着冻结法凿井的技术水平,主要使用冻结法凿井国家的最大冻结深度,见表 1-1^[3,5]。由表 1-1 可知,我国在深厚表土中使用冻结法凿井的技术水平已名列前茅。

国外表土层厚度超过 400 m 的部分冻结井筒见表 1-2^[3,5]。国外采用冻结法在深达 600 m 的表土层中开凿井筒的报道只有法国别林格石炭矿^[8]。因此,从国外的资料和经验中寻找解决深厚表土层中冻结壁稳定性的方法,成果很有限^[2]。

表 1-1 使用冻结法凿井主要国家的最大冻结深度

国 别	英国	加拿大	波兰	苏联	中国	比利时	德国	法国	荷兰
最大冻结深度/m	930	915	860	800	650	638	628	550	338
表土层厚度/m	<100	<100	<350	<350	567.7	<200	<350	<300	<300

表 1-2 国外表土层深度超过 400 m 的部分冻结井筒

序 号	国 别	井 筒 名	净径/m	表土层厚度/m
1	苏 联	雅科夫列夫矿铁矿 2 号井	7.5	571
2	苏 联	扎波罗兹铁矿 1 号井风井	6.0	410
3	德 国	维尔德风井	6.0	540
4	德 国	索菲亚·雅可巴 8 号井	4.0	543.5
5	德 国	莱茵贝格井	7.0	<510
6	德 国	劳贝克 3 号风井	6.5	423
7	比利时	候泰灵井	4.99	580
8	波 兰	莱格尼查和格沃古夫铜矿	7.5	400
9	加拿大	雅伯 1 号井	5.5	377~477
10	法 国	别林格石炭矿	5.8	608~622

国内表土层深度超过 350 m 的深冻结井的情况见表 1-3^[4,5]和图 1-1,其中 2005 年建设完成的山东巨野矿区龙固煤矿副井以 567.7 m 的表土层厚度和 650 m 的冻结深度位居国内第一,在世界范围内也位居前列,该井筒净直径 7.0 m^[5]。

由表 1-3 和图 1-1 可知,在我国已建成的表土层厚度超过 350 m 的 23 个冻结井筒中,有 19 个井筒的表土层厚度均在 400 m 左右,只有 4 个井筒表土层厚度超过 500 m,其中超过 550 m 的冻结井筒仅 1 个。因此,我国已基本具

备用冻结法建设表土层厚度在 400 m 左右井筒的能力,但是采用冻结法施工表土层厚度超过 500 m 的井筒仍处于探索阶段。

表 1-3 国内表土层深度超过 350 m 的深冻结井筒一览表

序 号	井筒名称	净直径/m	表土层厚度/m	备 注
1	潘三煤矿东风井	6.5	358.5	已建成
2	元氏煤矿副井	6.0	360.7	已建成
3	陈四楼煤矿主井	5.0	369.0	已建成
4	梁宝寺煤矿主井	5.5	370.9	已建成
5	梁宝寺煤矿风井	5.0	371.0	已建成
6	梁宝寺煤矿副井	6.5	371.6	已建成
7	陈四楼煤矿副井	6.5	374.5	已建成
8	金桥煤矿副井	5.0	376.1	已建成
9	金桥煤矿主井	4.5	376.4	已建成
10	涡北煤矿副井	6.5	410.5	已建成
11	涡北煤矿风井	5.0	413.2	已建成
12	涡北煤矿主井	5.0	413.9	已建成
13	程 村 副 井	5.0	426.8	已建成
14	程 村 主 井	4.5	429.9	已建成
15	济 西 主 井	4.5	457.8	已建成
16	济 西 副 井	5.0	458.5	已建成
17	赵楼煤矿风井	6.5	471.0	已建成
18	赵楼煤矿主井	7.0	473.0	已建成
19	赵楼煤矿副井	7.2	475.0	已建成
20	丁集煤矿副井	8.0	525.3	已建成
21	丁集煤矿风井	7.5	528.7	已建成
22	丁集煤矿主井	7.5	530.5	已建成
23	龙固煤矿副井	7.0	567.7	已建成
24	郭屯煤矿主井	5.0	587.4	建设中
25	郭屯煤矿副井	6.5	583.1	建设中
26	郭屯煤矿风井	5.5	563.6	建设中
27	赵固一矿主井	5.0	518.0	建设中

续表 1-3

序 号	井筒名称	净直径/m	表土层厚度/m	备 注
28	赵固一矿副井	6.5	518.0	建设中
29	花园煤矿主井	4.5	476.8	建设中
30	花园煤矿副井	5.0	476.8	建设中
31	顾北煤矿主井	7.6	464.0	建设中
32	顾北煤矿副井		约 470	筹建中
33	顾北煤矿风井		约 470	筹建中
34	郛城煤矿主井		约 520	筹建中
35	郛城煤矿副井		约 520	筹建中
36	杨营煤矿主井		约 480	筹建中
37	杨营煤矿副井		约 480	筹建中
38	万福煤矿		约 714	筹建中

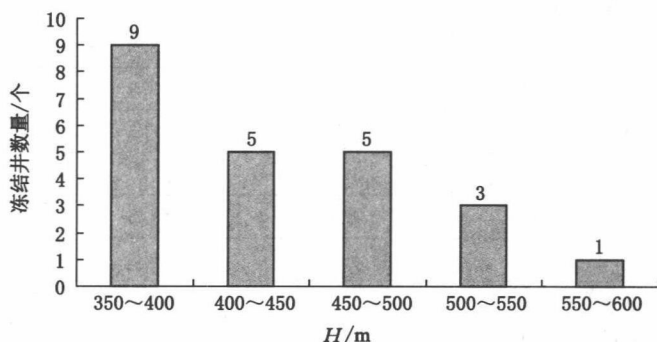


图 1-1 23 个表土层深度超过 350 m 的深冻结井区间分布

在建设或生产期间,几个深冻结井的冻结壁或井壁出现了一系列工程问题。例如:陈四楼煤矿主井井壁于运营期在表土与基岩交界处发生了破裂,副井井壁也濒临破裂;金桥煤矿生产期间副井井壁于垂深 220~240 m 处发生破裂,水砂涌入矿井,造成淹井事故,损失超过 2 亿元人民币;安徽淮南矿务局谢桥煤矿主井在掘至垂深 145 m 时,井帮温度为 -3.5°C ,井帮变形较大,工作面底鼓严重,现浇外壁被挤裂,副井掘砌到 230 m 黏土层时,发生冻结管断裂事故,漏失的盐水融化了黏土层底板砂层冻结壁,导致透水涌砂淹井;1994 年黑龙江双鸭山矿务局东荣三号煤矿风井由于断管再次导致淹井事故;梁宝

寺煤矿主井在建设过程中,在垂深大概 300 m 处,外层井壁破裂,井筒缩径,冻土进入井内,不得不回填井筒,重新施工。

在国际上,德国、波兰、苏联等国家也不同程度地发生过冻结管断裂事故,有的融化冻结壁,有的造成淹井事故。例如,1983 年德国灰克瑟立井井筒掘砌到深 188 m 以下黏土层时,断管 14 根,占冻结管总数的 $2/3$ 以上;波兰留宾铜矿 L-1 号井,当井筒掘砌到深度 184 m 以下的黏土层时,断管 33 根,漏失盐水融化冻结壁,造成淹井事故;苏联扎波罗兹一矿 2 号井,冻结深度 410 m,当井筒在 143~265 m 的厚黏土层中掘砌时,发生断管并导致淹井;加拿大雅伯一号井断管 32 根^[2]。研究证明,冻结管断裂多发生于冻结壁产生较大位移之后,而冻结壁变形是导致冻结管断裂的主要原因之一^[2,9]。

上述由于表土层厚度的增加带来的工程问题已经到了影响工程正常进行和工程建设成败而非解决不可的地步,其主要原因是随着表土层厚度的增大,一些尚未解决的技术问题和理论问题日益凸现,如冻结壁厚度的确定、冻结壁稳定性以及冻结壁对外层井壁的变形压力问题、冻结管断管问题、湿土的冻结温度、掘进段高与诸参数间的关系、井壁厚度和结构设计中外载的确定、高强度材料研制与应用、井壁开裂和漏水问题、井壁破裂问题等都是矿井建设者及地下工程领域同行、专家所共同关注的问题^[2]。

随着我国经济的发展,对煤炭的需求量日益增加,正在开发和待开发的矿区,其表土层正向深厚方向发展。在山东、安徽、河南和河北等省,据资料统计,有 8 处以上煤田埋藏在 400~700 m 厚的表土层之下,如此深厚的表土层在国际上也是罕见的。在这些煤田中,规划建设的井筒数量已超过 50 个,规划煤炭生产设计能力已突破 50 Mt/a,其中正在开发的山东巨野煤田埋深为 600~1 200 m,其上覆盖有 500~700 m 的第四系和第三系地层,黏土层累计厚度占总厚度的 80% 以上^[10],并且第三系黏土多具强膨胀性、含水量较低、冻结速度慢、冻土的强度低,是冻结施工的难点和关键,同时也带来一些极具挑战性的施工和技术难题,其施工难度和建设风险随表土层厚度的增大而急剧增大。与此同时,由于冻结土体的体积随冻结壁的厚度成平方关系增长,冻结壁的设计牵涉到巨额的冻结费用和工程安全。例如,巨野矿区每个井筒的冻结壁施工费用预计将达到 7 000 万~9 000 万元。因此,冻结壁是冻结工程的核心,其强度和稳定性关系到冻结工程的成败和经济效益。

冻结壁的设计一方面取决于对冻土力学性质的认识,另一方面取决于对施工工艺和施工条件的认识,以及外层井壁。但是,对于一般冻结壁的设计,我国目前尚无完整、统一的规范或规程可循。对于深厚表土层中冻结壁的设计

计,国内外均处于探索阶段,究竟采用何种理论才能保证冻结壁既满足强度和稳定性的要求,又能经济合理,是困扰建井工作者的一大难题,也是一个急待研究的重要课题。

综上所述,本书将结合当前正在进行和即将进行的深冻结凿井工程,开展“深厚表土层中冻结壁稳定性研究”,是研究冻结壁设计理论的基础和提出冻结壁设计理论的前提,为在深厚表土层中采用冻结法开凿井筒提供可靠的理论依据。因而本课题的研究不仅具有重要的理论意义,而且具有重要的工程应用价值。

1.2 国内外研究现状

实际工程中的冻结壁,是一个非均质、非各向同性的非线性体,随着地压的逐渐增大,由弹性体、黏弹性体向黏弹塑性体过渡的近似筒体。当盐水温度和冻结管布置参数一定时,如果冻结壁的强度和稳定性不够,将导致冻结壁变形过大,从而引发冻结管断裂、盐水漏失、冻结壁融化,还可能使外层井筒因受到过大的冻结壁变形压力而最终破裂^[2]。

冻土是黏弹塑性体,在外力作用下,不仅产生弹塑性变形,而且产生蠕变。但至今尚无能反映冻结壁变形和蠕变的成熟理论^[2]。影响冻结壁变形的因素很多,主要有冻土的物理力学性质、冻结壁厚度、水平地压、初始竖直地压、冻结壁暴露段高、冻结壁段高暴露时间、掘进半径、冻土变形系数、冻土变形强化系数等^[2,9,11-15]。因此,国内外学者分别从冻土的物理力学性质、冻结壁本构关系和设计原则等方面进行了理论分析、模拟试验、工程实测、数值分析等研究,现分述如下。

1.2.1 冻土物理力学性质研究

冻土的基本成分主要有固体矿物颗粒、黏塑性冰包裹体、液相水(未冻水和强结合水)和气态包裹体(水汽和空气)等^[16]。

冻土性质不仅取决于矿物颗粒的尺寸和形状,而且取决于矿物颗粒表面的物理化学性质。

冰是冻土的重要成分,具有强烈各向异性,在荷载作用下,甚至在极小的应力下都会经常出现黏塑性变形(流动变形)。当外界温度和压力变化时,冰的性质(组构和黏滞性)均可能发生显著变化,从而决定了冻土性质的不稳定性。

冻土中未冻水的含量随着温度的下降而减小,同时每一种土都有其十

分固定的未冻水含量曲线。冻土中未冻水含量及其在外界作用下的变化,多方面制约着冻土的物理力学性质,在冻土物理学和冻土力学中具有重要意义。

苏联、西德等国家和我国兰州冰川冻土研究所、中国矿业大学、煤炭科学研究总院北京建井研究所、原东北工学院等单位的不少学者进行了大量的冻土强度、冻土本构关系的研究工作,为冻土强度的研究做出了一定的贡献。

据报道(苏联科学院西伯利亚分院冻土研究所,1988年),有记载的“冻土力学”始于16世纪对高纬度地区的永冻土、季节冻土和冰川进行的观察和研究。随着经济和科学技术的发展,大型、多层建筑物在冻土区出现,因此需要研究对建筑物的影响,即要求对冻土的力学性质进行研究以服务于建筑业,由此产生了“冻土力学”。世界上第一篇研究冻土力学的论文诞生于1930年^[2,16]。1937年,冻土力学的奠基人——苏联学者H. A. 崔托维奇出版《冻土力学原理》后,冻土力学正式成为一门年轻的学科。从《冻土变形研究》的出版至1971年《冻土力学》的出版,标志着冻土力学在世界科学界已占有一席之地。冻土力学作为冻土区工程的基础理论,随着冻土区交通、建筑、水利等工程的发展而发展,现已基本能解决冻土区建筑物的基础工程问题^[2]。

1.2.1.1 含水土体的冻胀

含水土体在形成冻土的过程中伴随着水分迁移和冻胀现象。在此领域进行过深入研究的著名学者主要有:维亚洛夫(俄罗斯)、叶尔绍夫(俄罗斯)、坦卡基(S. Takagi,美国)、安德逊(D. M. Anderson,美国)、希尔(D. Hill,加拿大)、伏库达(M. Fukuda,日本)、徐学祖(中国)、吴紫汪(中国)和程国栋(中国)等。

当土体的冻胀受到约束时会产生冻胀力,有关这方面研究的文献和计算公式均很多,但受到地区、土性和特定试验条件的限制,多服务于高纬度或高海拔的寒区建筑物基础。而深厚表土层中的人工冻土无论其生成环境和力学性能,还是受载历史都与天然冻土有着很大的差别,难以直接沿用现有的成果。因此,有关深厚表土层中含水土体冻胀的研究,目前仍处于以试验及实测研究为主的阶段,尚未达到按理论模型求解的程度^[2]。

1.2.1.2 冻土强度和流变特性

由于寒区军事和民用建设的需要,苏联早在20世纪30年代初、北美在50年代初、我国在60年代初就开始进行了这方面的研究,并逐步建立了冻土的蠕变及强度理论^[83,84,87,115]。