

人工地层冻结应用研究进展和展望*

Development and prospect of research on application of artificial ground freezing

陈瑞杰 程国栋 李述训 郭兴民 朱林楠

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州, 730000)

文 摘 随着地下工程的不断增加, 国内外对人工土冻结应用研究日益重视。对国际人工土冻结应用研究的发展进行了回顾, 分析了目前人工土冻结研究面临的任务和要解决的主要问题, 对进一步提高国内人工土冻结应用研究水平阐述了看法。

关键词 人工地层冻结, 地下工程, 应用研究

中图法分类号 P 642. 1

作者简介 陈瑞杰, 女, 1963 年生, 理学博士, 中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室学术秘书。

Chen Ruijie Cheng Guodong Li Shuxun Guo Xingmin Zhu Linnan

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

Abstract Artificial ground freezing (AGF) will be used extensively with the increase of underground construction. Great attention is being attracted to the research on its application. The development of research on application of AGF are reviewed here. The state-of-art and the prospect, especially the main problems, of the application of AGF are analyzed.

Key words artificial ground freezing, underground construction, application

1 引 言

随着社会经济的不断发展, 人口的不断增长和空间的相对缩小, 开发地下空间已经成为人类扩大生存空间的重要手段和发展趋势。专家预测 21 世纪是建设地下工程的世纪。各种地下工程如矿山工程、深基础建筑及地下室、城市地铁和河底、海底及穿山隧道等正在兴建或计划兴建中, 并且呈现不断增加的趋势。与之俱来的深基础和坑壁等的支护成为十分突出的问题。

人工土冻结法由于基本不受支护范围和支护深度的限制, 以及能有效防止涌水以及城市挖掘、钻凿施工中相邻土体的变形而受到越来越多的重视, 并将是完成地下工程的主要技术手段之一。完善和发展人工土冻结理论和技术体系将不仅具有重要的社会效益, 而且具有良好的经济前景。国外许多国家如德国、法国、美国、加拿大、英国和俄罗斯等, 研究和应用人工土冻结技术起步较早, 积累了许多成功经验^[1]。现在许多较大规模的国际工程技术公司如 Freeze Wall Inc., Moretrench, RKK-Soil Freeze Technologies 等, 在地下工程建设中使用着人工土冻结支护方法, 并且发展很快。我国于 1955 年首次使用人工冻结法凿井并获成功, 此后经过 40 多年的实践, 具有了有一定技术水平的冻结法凿井施工、设计队伍^[2, 3], 预测在新的世纪里人工冻结法将在我国地下工程领域发挥更大作用。

2 人工土冻结应用研究进展

人工土冻结的目的主要是为了增强土体的稳定性、减少变形和隔断地下水。传统和较普遍的人工土冻结是使用盐溶液间接致冷法, 就是将盐溶液用氨压缩方法致冷后, 做为冷媒在土体内埋设的管道中循环, 吸收土体热量, 增加自身显热, 不断循环制冷, 直到土体冻结, 达到加固和稳定土体的目的。发展和使用较晚的人工土冻结方法还有直接致冷法, 即不需循环制冷, 如使液氮或干冰等在土体内发生相变, 直接做为冷媒吸收土体热量, 使土体降温致土中水分冻结, 形成冻土体。

与盐溶液人工冻结法相比, 液氮人工冻结法具有深低温、冻结速度快、冻结强度高、无污染等优点。近年来受到关注并越来越多地被用于人工土冻结, 尤其是在西欧^[4]。

2.1 人工土冻结应用

人工土冻结的应用开始于上个世纪。英国工程师南威尔士 1862 年在建筑基础施工中, 首次使用了人工冻结技术加固土壤。1883 年人工土冻结法首次在德国阿尔里德煤矿井筒施工中应用并获得成功, 至 1900 年人工冻结法用于矿山施工次数已达 60 次以上^[1]。人工土冻结在城市土木工程中的应用始于 1886 年瑞

* 到稿日期: 1998- 11- 02

典 24 m 长的人行隧道建设工程。在此后的一个多世纪里,人工土冻结法在许多国家的煤矿、隧道、地铁和建筑基础等领域中得到不断应用和发展。人工土冻结法在土木工程建设中的应用范围和规模也日益扩大,例如 1906 年横断法国塞纳河底地铁工程,1942 年巴西 26 层大厦不均匀下沉的调整,1968 年英国的上水道管渠隧道工程,1973 年美国的湖底取水竖井安装工程^[1]。

进入 90 年代以来,国际上对人工冻结的应用更为广泛。1991 年在西班牙巴伦西亚地铁建设中,钻凿在地下水位以下进行,同时使用了几种支护处理方法,结果表明传统的支护方法都不能令人满意,土冻结方法最为灵活、方便^[5],能有效地避免涌水。

美国威斯康森州密尔沃基市在建设输洪大直径深隧道时,起始段为从地表到隧道含多种地下土层的一段 50 m 深竖井,施工中传统的支护方法出现了很多问题,于是用土冻结法形成了一个直径 6.1 m 的冻土围堰和三个相邻的柱状冻土槽,在钻凿和建设阶段,利用弹性理论和含时非线性有限元分析,根据土的刚性和蠕变参数,对冻土围堰的应力和应变进行了评价,实测冻土围堰变形与计算结果吻合较好^[6]。

德国 Dusseldorf 市中心火车站附近,扩展的地铁要经过几座居民建筑和闹市街道,隧道顶部与建筑基础间只有很小一段距离,在三段各 40 m 长的隧道施工中使用了人工土冻结支护法^[7]。其中两条钻凿面积为 45 m² 的隧道冻土墙厚度为 1.5 m,钻凿面积为 96 m² 的隧道冻土墙厚度为 2.2 m。室内实验证明为了达到足够的强度和足够的抗变形性能,土的饱和度必须在 60% 以上。该隧道横断面一部分在地下水位以上,一部分在地下水位以下。于是施工中人工抬升第四纪砂砾中水分,以保证冻土墙足够的强度。该工程中认为隧道所处地层为非冻胀敏感性的第四纪砂砾层和冻胀量比较小的第三纪细砂,没有现场实测冻胀数据。施工中对上部建筑物的下沉进行了监测,整个施工过程的最大沉降量仅有 13 mm。

日本名古屋市在建造地下输电隧道时,需垂直连接两个不同直径的隧道,于是在连接处应用了人工冻结法,历时 323 d^[8]。计算最小冻土厚度为 2.0 m,钻凿时发现实际冻土厚度均大于这个厚度。施工前利用有限元方法对冻结墙的变形进行了数值计算,最大冻胀量计算结果与实测结果吻合得很好,但位移沿水平方向分布的计算结果与实测结果差别较大,考虑已有隧道的冻胀变形后计算结果与实测结果吻合较好。为降低融沉破坏,在自然融化期使用了化学灌浆,融化半年后,测得融化下沉仅为 2~3 mm。

液氮人工冻结用于加固地层在国外始于 60 年代,在近十年报道的液氮人工冻结工程实例中,较著名的有德国慕尼黑地铁,美国肯塔基州大型机械经过 Green River 700 m 的冲积平原^[9]等。未见正式报道的有巴黎塞纳河地铁、意大利比萨斜塔纠斜等。1991 年德国 Eisbach 河底三个平行隧道施工时出现坍塌,使用了液氮人工冻结法^[4]。

1994~1995 年间,德国在诸如横穿铁路的下水管道等几项施工中成功的利用了液氮人工冻结法^[10],并开发出了自动控制硬件。这个系统不需要控制软件和特殊界面,可以控制 40 个冻结管,32 个输入通道可以测量土体内部温度以及施工隧道的氧气浓度等。由于液氮相对成本较高,其应用不如盐溶液方法那么多,目前多数用于工程抢险。

我国于 1955 年首次在开滦林西风井使用盐溶液冻结法凿井并获成功^[11],之后便在全国推广使用。目前盐溶液人工土冻结法已成为一种较成熟的凿井手段。仅安徽两淮地区已有 36 个煤矿的 111 个矿井在施工中使用了人工冻结法,全国则已有 392 个。冻结深度在 300 m 以上的有 19 个,最大冻结深度达 435 m^[12]。

自 70 年代初首次应用于北京地铁建设工程后,除凿井外的其它人工冻结工程实例为数较少^[13]。上海地铁 1 号线在几个旁路建设中,由于喷浆等方法不能到达隧道底部而出现一个盲区,发生工作面塌方和涌水,传统技术加固失败。于是在隧道内对盲区实施了人工冻结法。对泄水井实施人工冻结时,则将氟立昂冷冻站设在地面。为减少冻胀采取了快速冻结,融化过程灌浆也减少了融化下沉。观测得到最大冻胀和最大融沉量分别为 3.1 cm 和 2.7 cm。1992 年在上海地铁隧道施工中利用液氮人工土冻结法与盐溶液冻结相结合,形成了 520 m³ 的长方形冻结土体。

随着国际社会对地球环境的日益重视,人工土冻结技术逐渐被用于环境保护中,如化学、生物和放射性污染物的掩埋隔绝处理等。冻土墙不透水,密封性、热稳定性和化学稳定性好,可以原位修复,使人工土冻结成为目前著名有效的隔绝处理技术。J. G. Dash 对不同污染物在冰和冻土内的分子扩散计算表明冻土分子扩散泄漏速度非常缓慢,这是由于低温下冻土内未冻水膜变薄和分子扩散系数降低的缘故。并提出土的含水量在 14%~18%,冻土的中心最低温度在 -35℃ 和 -37℃ 之间为最佳^[14~16]。美国能源部对该处理技术进行了室内试验和野外试点,这项技术在美国已获得专利,被称作 CRYOCELLTM,并被美国能源部指定为十大补救技术之一。

2.2 人工土冻结应用研究进展

可以说人工土冻结应用研究是随人工冻结凿井逐渐发展起来的,是以天然条件下冻土的物理力学性质的研究为基础的。第二届国际人工土冻结会议(1978年在挪威召开)上的大量论文从不同侧面、不同角度、应用不同的方法研究论述了人工冻结凿井工程施工过程的各种技术和物理力学参量。立井冻结壁形成规律^[17](为中译本)一书全面论述了人工冻结凿井中的冻结壁形成规律,特别是其中的热学问题,给出了近似求解冻结管放热系数和热流的方法,并且在模拟实验的基础上分析了各种参量对冻结壁形成规律的影响^[18,19]。

研究冻结井壁的形成规律和冻结壁的温度变化特征,采用的方法主要是分析方法、数值方法(主要是有限元法)、实验方法和现场实测。前三种方法通过求解数值模型,给出问题的解析解或数值解,或者根据微分方程定解问题得到的相似准则而设计的模型实验资料,给出准则变量之间的函数表达式,提供工程设计使用。现场实测则是根据实测资料归纳总结,给出经验公式或数据为施工设计提供依据。

人工土冻结方法在国际上已经很普遍,发表的有关学术论文和报告也比较多,但由于地层冻结机制和冻土结构物力学性质的复杂性,还难以形成统一的设计方法和规则^[20]。不同的地质特征和工程性质的差异,使这项技术成为综合性工程技术。基于冻土的物理力学性质,针对工程要求,设计冻结过程,包括制冷站和冻结管的布设,冻结墙厚度以及平均温度,利用数值计算方法对冻胀和融沉进行预报预测,并采取相应措施加以控制。

然而冻土作为非均匀、各向异性材料,冻土体应力场和变形的计算非常复杂。要解决这一问题不仅要研究它在复杂应力状态下的蠕变、强度规律,而且需进行现场实测研究,验证调整计算模型,以更好地与实际情况相吻合^[21]。

1995年英国学者 John S Harris^[22]出版了土冻结应用(*Ground freezing in practice*)一书,该书在综述土冻结过程的基础上,讨论了人工土冻结方法与其它岩土工程方法的关系及其特殊的作用,对人工土冻结施工、设计来讲是一本较实用的参考书。

人工冻结中往往需要预测冻结土体随时间的发展,以及维持冻结所需的能量。由于复杂的几何形状,特别是包含土中水的相变,使冻结过程的热计算相当复杂。这是含有相变的移动边界问题。目前只有简单几何形状和条件的移动边界问题有精确解。为解决这个问题使用了数值方法和其它近似方法。主要的数值

方法特别是有限差分近似法和有限元方法。有限元法的优点是可以适用于复杂的几何形状。并且在近似分析中把过程看作准静态。Holden 曾结合前人的结果进行了计算^[23]。

对人工土冻结而言,由于必须考虑热传导、相变、水分迁移和土体冻胀,使数值分析中的自由度很大,方程也十分复杂^[20]。

目前土冻结理论中有较成熟的关于冻结速度、冻结温度场及均匀温度下冻土强度的计算方法^[24],但冻土结构物特别是非均匀温度场的冻土体的强度和稳定性分析离应用还有一定差距。特别是深部冻土的力学特性有待进一步的研究。现在的设计在结构计算上,冻土壁的安全系数取值明显偏大。

我国自 50 年代开始利用人工土冻结凿井技术后,1964 年开始对冻结壁和井壁进行压力和温度的综合实测,积累了大量现场实测资料,在基础理论和应用研究方面也取得了很大进展,北京煤炭科学院冻结技术设备研究方面取得了进展。有限元分析方法用于解人工冻结壁温度场^[5];丁德文对其中的热学问题进行了研究,给出了不同冻结期的数值模型,并对不同冻结期温度场的计算方法进行了探讨,给出了不同冻结期的近似解和数值解^[25]。1981 年中国科学院兰州冰川冻土研究所与煤炭部两淮煤炭总公司合作历经 6 年,对人工冻结壁的工程性质进行了系统研究,编辑出版了“冻结凿井冻土壁的工程性质”一书。

人工土冻结模型实验研究方法可以模拟冻土结构物的物理力学变化规律,因此受到越来越多的重视。1994 年淮南矿业学院和中煤特殊工程公司用盐溶液冻结法联合开展了深软冻土墙的模拟试验,对这种冻结法施工深软土基坑在理论上进行了可行性分析,提出了冻土墙的保温隔热措施,以及直墙形冻土墙拱形化等。

中科院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室于 1996 年开展了液氮人工冻结地基模型实验^[26,27],基坑原型 80 m 长、30 m 宽、20 m 深,取其 1/4,几何相似比为 1:10。该项研究对液氮冻结管与周围土体的换热以及液氮耗量进行了分析;在相似理论设计基础上,分析了冻结墙的变形规律,根据实验结果,冻土墙的最大位移点在墙跨中间底部;结果还认为液氮沸腾段为最佳换热区,并且其长度与液氮输入强度成正比,冻结管的液氮输入强度一定时,尽量多的串联冻结管并非如预期效果那样好。

目前国内沿海及南方属于软土地基的许多城市在地下施工中正在逐步重视和考虑使用人工冻结法,这也将促进国内人工土冻结应用研究的进一步发展。

3 人工土冻结应用研究展望

专家断言,以英吉利海峡越海隧道为里程碑,建筑工程已开始进入地下工程时代。人工土冻结技术的支护、隔水作用,以及几乎不受深度的限制,将会受到越来越多的重视,使其发挥特有的作用和优势。各种含水松软地层的隧道、地铁和地铁车站、排水泵房、地铁主干道间的联系通道的施工,矿山工程和海港工程中都将有广阔的应用前景。随着人类对环境的日益重视,在特殊垃圾掩埋和废料处理方面也将发挥其特有的作用。

完善和发展人工土冻结理论和技术体系不仅具有重要的社会效益,而且具有良好的经济前景,是致力于该领域学者们的重要任务。

冻土是由土、冰、水和气组成的多元多相空隙介质,是一种特殊材料。一方面冻土是非均匀、各向异性的,其力学性质除了土的自身物理性质外,主要取决于土中胶结冰的性质。影响冻土强度的主要因素有温度、压力、应变速率以及冰晶的结构等。目前大量实验得出了冻土强度随温度的变化关系,而具有非均匀温度的人工冻结壁强度特性是很复杂的,与平均温度下冻土的强度性质有很大区别。另一方面,土冻结时发生的水分迁移和冻胀,模拟实验能较好地反应这一性质,在计算中也应加以考虑和处理。

近年来数值仿真分析在岩土工程中得到了广泛应用^[28],可以预测,该方法将在人工土冻结领域得到更多的应用,并发挥重要作用。

在厚表土层的地下工程中(一般认为50 m以下),学者们发现和认识到土对结构物的外载尚难以确定,并且土的物理力学参数随深度变化^[29],施工过程是一个卸载再加载的过程,常规的力学试验方法有很大误差,于是逐步提出了深土力学的研究任务和特点。与此对应,在深部人工土冻结工程中,要研究的人工冻土结构物处于高围压状态,施工过程同样是卸载再加载的过程,深部冻土的力学行为因此也不同与一般的冻土力学行为。深部冻土力学行为的研究将主要包括深部冻土物理力学参数与深度的关系;实验探索高围压条件下形成冻土试件在卸载或变载情况下的本构关系、破坏准则;深部土中土、冻结壁、工程结构物间力学、热学耦合作用等^[29]。

目前,我国人工土冻结方法在人工冻结凿井中得到了广泛应用,在城市地下建筑以及隧道等工程中还没有达到普及,除了一定的社会原因如工程部门的观望态度等,主要是理论和技术储备还有一定的差距,直墙形冻结壁的强度及稳定性比圆筒形冻结壁要复

杂,特别是随着施工深度的增加,遇到的问题也越来越多。

根据目前国际人工土冻结应用发展趋势^[3],未来人工土冻结应用研究将主要集中在如下几个方面:

(1) 融土和冻土物理力学参数的精确化,系统化,特别是寻求这些参数随深度的变化规律。

(2) 非均匀温度场冻土结构物的强度和稳定性评价。

(3) 开发大型数值仿真分析软件包,对大型人工土冻结工程进行预测预报。

(4) 开展室内模型实验,分析验证数值计算模型。

(5) 开展人工土冻结工程现场实测,对数值计算模型进行进一步验证。

(6) 开展人工土冻结工程界面研究,包括人工冻结对环境的影响,土体冻胀融沉对周围工程建筑物的影响等。

(7) 建立可靠的技术支撑系统,包括致冷、循环冻结系统和精确的自动监测系统。

(8) 建立科学的经济和技术评价体系。

参 考 文 献

- 1 木下诚一著. 冻土物理学. 王 昇, 张志权译. 长春: 吉林科学技术出版社, 1985
- 2 虞 相, 王正廷, 苏立凡. 我国地层冻结技术的新发展——纪念冻结法凿井40周年. 见: 中国地层冻结工程40周年论文集. 1995
- 3 陈湘生, 徐兵壮. 我国人工冻土物理力学性质试验研究的现状与展望. 见: 中国地层冻结工程40周年论文集. 1995
- 4 Rebhan D. New experience and problems with LIN ground freezing. In: Ground Freezing91. Rotterdam: Balkema, 1991
- 5 Rojo J L, Novillo A, Alocen J R. Soil freezing for the Valencia underground railway work. Ground Freezing91. Rotterdam: Balkema, 1991
- 6 Joseph A Sopko Tr, John A Shster, et al. Frozen earth cofferdam design. Ground Freezing91. Rotterdam: Balkema, 1991
- 7 Peter Jodan, Helmut Hab. Use of artificial ground freezing in three sections of the Dusseldorf subway. In: Ground freezing, Proc 7 ISGF. 1994
- 8 Katayama H, Joushima M, Tanaka M, et al. Application of freezing method for widening an existing tunnel. Ground Freezing97. Rotterdam: Balkema, 1997
- 9 Derek Maishman, Powers J P, Lunardini V J. Freezing a temporary roadway for transport of a 3000ton dragline. 5th Int Symp on Ground Freezing, 1988
- 10 Buinger A. Application of artificial ground - freezing

- with liquid nitrogen (LIN)/new control hardware. In: Ground freezing, Proc Of 8th ISGF. 1996
- 11 中国矿业学院主编. 特殊凿井. 北京: 煤炭工业出版社, 1980
- 12 Zhang Wen, Pang Rongqing. Application of ground freezing technique in Lianghui coal mine area of China. In: Ground Freezing97. Rotterdam, Sweden: Balkema, 1997
- 13 Chen Xiangsheng, Liu Jianhang, Zhu Husheng, et al. Application of AGF to Shanghai Metro 1. In: Ground Freezing97. Rotterdam, Sweden: Balkema, 1997
- 14 Dash J G. Ice technology for hazardous waste management. Waste Management, 1991, **11**(4): 208~ 210
- 15 Dash J G. Ground freezing for management of hazardous wastes. In: Ground Freezing94. Rotterdam: Balkema, 1994
- 16 Dash J G. Frozen soil barriers for hazardous waste confinement. In: Ground Freezing97. Rotterdam, Sweden: Balkema, 1997
- 17 纳斯诺夫 И Д, 苏普利克 М Н 著. 立井冻结壁形成规律. 陈文豹, 伍期建, 梁惠生译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981
- 18 郭兰波. 竖井冻结壁温度场的有限元分析. 北京: 中国矿业学院学报, 1981(3): 183~ 187
- 19 李述训. 人工冻结凿井中热学问题计算方法评价. 世界冰川冻土, 1982(3): 23~ 32
- 20 Kunieda T, Sato T, Ido S. Numerical case studies of ground freezing for the construction of drain pump chambers. In: Ground Freezing91. Rotterdam: Balkema, 1991
- 21 吴紫汪, 马 巍著. 冻土强度与蠕变. 兰州: 兰州大学出版社, 1994
- 22 John S Harris. Ground Freezing in Practice. Thomas Telford Publishing, 1995
- 23 Holden J T. Heat transfer in artificial ground freezing. In: Ground Freezing97. Rotterdam, Sweden: Balkema, 1997
- 24 徐学祖, 邓友生等. 冻土中水分迁移的实验研究. 北京: 科学出版社, 1991
- 25 丁德文. 冻结壁变化的数学模型及其计算. 科学通报, 1982(14): 1471~ 1473
- 26 Chen Ruijie, Zhu Linnan. On the heat exchange of freeze pipe with liquid nitrogen in ground freezing. In: Int Symp on Ground Freezing97. Rotterdam, Sweden: Balkema, 1997
- 27 Zhu Linnan, Chen Ruijie. Large- scale model test on the artificial freezing of foundation with Liquid Nitrogen. In: Int Symp on Ground Freezing97. Rotterdam, Sweden: Balkema, 1997
- 28 李 宁, 陈 波, 李永刚等. 奥地利岩土工程软件 FINAL 的应用与开发. 岩石力学与工程学报, 1997, **16**(5): 1~ 10
- 29 崔广心. 深土冻土力学—冻土力学发展的新领域. 冰川冻土. 1998, **20**(2): 97~ 100