

深土冻土力学的研究现状与思考

马 巍, 王大雁

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 人工冻结技术在深部地下工程施工中的广泛使用, 使人们更加迫切地认识到对深土冻土力学研究的必要性。本文通过分析目前国内外对深部岩土工程的认识, 在前人对深土及深土冻土理解的基础上, 考虑深土冻土形成过程的特殊性及其受力特点, 从新的角度给出了深土冻土及深土冻土力学的概念, 阐述了深土冻土力学的主要研究内容。最后通过对深土冻土力学研究现状的分析, 从深土冻土室内物理力学试验研究、大型模型模拟研究、理论模型研究以及工程应用等四个角度讨论了目前室内进行深土冻土力学研究所面临的主要问题。

关键词: 深土冻土; 力学性质; 研究现状

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)06-1123-08

作者简介: 马 巍(1963-), 男, 甘肃张家川人, 研究员, 博士生导师, 主要从事冻土力学与寒区工程的研究工作。

E-mail: mawei@lzb.ac.cn。

Status quo and reflections of the deep frozen soil mechanics

MA Wei, WANG Da-yan

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS,
Lanzhou 730000, China)

Abstract: As artificial freezing technique has been widely used in the deep underground construction, more and more people have become aware of the necessity to carry out researches on mechanics of the deep frozen soils urgently. By analyzing the worldwide understanding of deep geotechnical engineering and previous understanding of deep soils and deep frozen soils, a new conception system is provided for the deep frozen soils and mechanics of the deep frozen soils considering the special characteristics of the formation process and stress of the deep frozen soils. The research content and methods are discussed to study the mechanics of deep frozen soils, and the developing status quo of the mechanics of deep frozen soils is presented. Finally, some urgent problems to be solved in this study task are put forward in terms of laboratory physical and mechanical tests, large-scale model simulations, theoretical model and engineering applications of deep frozen soil.

Key words: deep frozen soils; in mechanics of property; research status quo

0 引 言

随着生产力的发展和科技进步以及社会需求的不断增长, 浅表资源的贫化逐渐使世界工程建设转向地下, 地下电站、地下铁道、越江越海隧道、地下市政和深部矿山等建设越来越多, 所遇到的问题也越来越复杂。如何从理论上、技术上安全、有效地解决地下工程所面临的新问题、新情况, 不仅关系到在建工程的施工进度而且关系到工程完工后的安全运营和上部建筑物的稳定。

就目前的工程建设而言, 所有地下工程所面临的首要问题就是如何对深部空间进行开挖, 尤其是在软弱的、含水土层中进行开挖。与现有的、比较成熟的几种地下开挖施工方法相比较, 人工土冻结法由于基

本不受支护范围和支护深度的限制, 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成为地下工程的主要技术手段之一, 从而在许多国家的煤矿、隧道、地铁和建筑基础等领域得到广泛应用^[1-2]。所谓人工冻结技术是指对深部天然土体在原始地压作用下以人工制冷方法将低温冷媒送入具有一定含水率和地下水流速的软弱地层中, 使地层中的水与周围土颗粒发生冻结, 从而形成强度高、弹模大和抗渗性好的冻

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071048); 国家自然科学基金创新群体项目(41121061); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目青年基金类项目(KZCX2-YW-QN307); 冻土工程国家重点实验室课题项目(SKLFSE-ZY-02-3)和国家重点基础研究发展计划(973项目)(2012CB026106)

收稿日期: 2011-05-04

结壁,然后在冻结壁的保护下进行内部开挖和永久支护结构施工的一种特殊地层加固方法。冻结壁的强度和变形是决定人工冻结技术在深部空间开挖过程中应用成败的关键因子,但是,由于近年来开挖深度的逐渐加大,人工冻结技术在深部工程建设实践过程中就遇到了许多难以用经典冻土力学来解释或解决的问题^[3-4],譬如,由于使用经典冻土力学的研究成果去设计深部冻结壁,造成冻结壁径向变形量过大、冻结管断裂、井壁破裂漏水甚至淹井等工程事故,这些工程事故促使许多学者不得不考虑现有冻土力学理论的适用范围、适用条件以及深土人工冻土的形成机理、冻胀、融沉机理和高压力作用下形成冻土的力学特征等科学问题。由此诞生了深土冻土力学的研究,它属于岩土力学研究中的一个新的分支,以深土土力学研究和现有冻土力学为基础,以研究深部冻结壁和井壁受力问题为核心,以研究高压力作用下形成冻土的形成机理、力学特征、本构关系、破坏准则、强度理论为课题,以服务于人工冻结技术在深部空间开挖中的应用为最终使命,来保证深部空间开发的顺利实施。

1 深土冻土工程及深土冻土力学概念

1.1 国内外对深部工程的认识

要研究深土冻土力学问题,首先要弄清楚什么是深部和深土冻土力学。国内外对深部岩土工程的定义很多,有描述的、有指标化的、有理论的、也有工程的。但任何一种定义,都只抓住了深部岩土工程的某些基本特征,刻画了深部岩土工程的某些基本性质。同时,这些定义不仅受到所属土层性质和矿种的影响,还受到国家施工技术水平的影 响。譬如说,在岩石矿区,如果以深度作为深部与浅部的判定指标时,世界上有着深井开采历史的国家一般认为,当矿山开采深度超过 600 m 即为深井开采,但对于南非、加拿大等采矿业发达的国家,矿井深度达到 800~1000 m 才称为深井开采;为了克服以上定义的缺陷,有些专家也提出了以深部岩土工程所遇到岩石力学性质的特殊性作为指标,认为当工程岩石在所定义的深度区间以上表现出深部所特有的非线性力学现象时,就将其作为深部岩土工程^[5]。而对于华东、华中、华北、东北等地区的厚表土层来说,崔广心^[4]根据深厚表土层中建井工程实践和模拟试验研究,在分析深表土中井壁的外载、井壁与土的相互作用,并比较深土与浅土力学特性的区别的基础上,提出深土力学的概念和研究内容,这一研究虽然对深部岩土工程中深部土的特殊性进行了大量的阐述,确立了深土力学研究的重要性和迫切性,但对深部岩土工程并没有给出一个明确的定

义。后来,崔广心^[3]又在人工冻结工程的实践和模拟试验的基础上,提出了不同于常规“冻土力学”(暂称“浅土冻土力学”)的“深土冻土力学”概念,分析浅土冻土力学与深土冻土力学的区别,提出深土冻土力学的研究内容、框架及研究方法,但还是没有明确给出什么是深土冻土工程^[3]。由于目前对深土冻土工程的概念或划分标准不明确,在一定程度上影响了该领域理论与技术研究的发展及交流。因此针对深土工程冻土体——冻结壁所处的特殊应力环境,对其概念及其评价指标进行科学定义,是推动深土冻土力学基础理论研究的当务之急。

1.2 深土冻土和深土冻土力学的概念

深土冻土是对深部松散、不稳定的含水土层进行人工冻结而形成的人工冻结壁。所以对于深土冻土的界定离不开对深土的认识。早在 1999 年,崔广心教授就根据岩土地下工程发展现状及土工试验常用应力水平,将深土界定为 50 m^[4]。这主要是基于以下考虑,从常规土工试验研究来看,应力水平一般都不超过 1 MPa,而地层 50 m 深处的土压力大约为 1 MPa 左右。也就是说,目前常规土力学所研究的关于土的强度准则、破坏特征及本构模型都是在应力水平不超过 1 MPa 的基础上获得的,如果把它们应用于应力水平高于 1 MPa 的工程中,其适用性值得怀疑。另外,从目前对厚表土层覆盖区进行岩土地下工程施工的工艺来看,当表土层厚度不超过 50 m 时,沉井法、板桩法、帷幕法等常规的凿井方法都能使用,而此时对井壁水平地压的确定完全可以用松散体平面挡土墙主动土压力公式^[6]。但是表土层厚度超过 50 m 以后,有些常规的凿井技术应用起来就比较困难,必须采用特殊凿井方法,对井壁地压的确定也应该采用特殊方法。此时如果再以常规土力学的参数来设计,不免会造成井壁横向破裂、冻结管断裂等工程事故。所以,将深土界定为 50 m 是由目前基础土力学研究现状和施工水平决定的。

但对于通过人工冻结技术形成的深土冻土而言,笔者认为,它不仅具有深土的特殊性,而且由于其在形成过程中受到荷载作用,还具有不同于常规冻土的特殊性质。这主要基于以下两个方面的考虑:首先是压力对土体冻结温度的影响,已有研究表明压力的作用将导致土体的冻结温度降低,并且使已冻结土体的孔隙冰发生压融^[7-8],这说明压力的作用改变了冻土中未冻水与冰的比例,从而使深土冻土的物理、力学性质有别于常规冻土。其次是压力对深土冻结过程中水分迁移量、冻胀变形量的影响使其冷生构造与相同条件的无压土相比截然不同,并将进一步影响到深土冻土力学的性质。所以,对深土冻土概念的界定不能简

单地套用深土的定义, 必须要考虑这种冻土的特殊性, 考虑压力对冻土形成过程的作用。基于此, 笔者认为, 深土冻土就是在有地压的环境下以人工冻结的方式形成的冻土。而深土冻土力学就是对这种有压条件下形成冻土的力学参数、强度特性、破坏准则和本构特征、以及与构筑物相互作用的研究, 即关于人工冻结壁的理论。

2 深土冻土力学的研究内容

既然深土冻土力学是关于人工冻结壁的理论, 那么, 对深土冻土力学的研究就离不开对人工冻结壁形成条件、形成特点的认识, 离不开对人工冻结壁受力特点、变形特征的研究, 离不开对人工冻结壁解冻处理以后所引起周围环境变化的评价, 以及与支撑结构物的相互作用。因此, 在基于现有的冻土力学与深土力学研究现状的基础上, 笔者认为, 目前深土冻土力学的研究内容主要分为以下3个方面:

(1) 研究上覆土压力在人工冻土形成过程中的作用: 地层越深, 上覆土压力越大, 将导致深部土的冻结温度(即冰点)降低, 冻结温度降低后, 深土冻土的含冰量和未冻水含量将与相同温度条件的浅表层冻土的含冰量和未冻水含量之间具有极大的差别, 从而导致其物理、力学性质完全不同于相同温度的浅表层冻土的力学性质^[9]。另外, 深部天然地层的应力环境将通过影响冻土形成过程中的水分迁移、冻胀变形而对冻土的微观结构产生影响, 进而在一定程度上影响冻土的力学性状。所以有必要开展上覆土压力在人工冻土形成过程中作用的研究, 为进一步认识深土冻土特殊的力学特征打下基础。

(2) 深土冻土力学强度与变形特征、破坏准则、本构模型的研究: 由于深土冻土力学是关于人工冻结壁的理论, 那么深土冻结以后其力学参数、强度特性、破坏准则和本构特征的研究将决定人工冻结壁设计与施工的成败, 是目前进行深土冻土力学的核心。但是由于目前对较深厚土层下土力学性质研究还在初步探索阶段, 对地球深部地压的确定还未形成较为成熟的理论, 从而影响到目前对深土冻土力学研究时室内试样深部状况的恢复、深部地压的合理确定等问题的回答。不过深土冻土力学的研究可以根据现有的、已经成熟的土力学理论所研究的压力范围, 研究在这一压力作用下, 以三维冻结方式所形成冻土的力学性质, 然后再探索较高压力作用下所形成冻土的力学特性, 以及它们在卸荷作用下的力学行为。

(3) 人工冻结壁在解冻过程中冻土与井壁相互作用研究: 由于冻结壁是一临时支护结构物, 在工程完

工后进行解冻处理。所以冻结壁在解冻过程中及解冻后其强度和变形都会发生很大变化, 这些变化无疑将影响井筒的永久支护结构井壁的安全与稳定, 同时影响上部建筑物的稳定性, 所以, 人工冻结壁在解冻过程中冻土与井壁的相互作用问题是深土冻土力学研究不可缺少的一部分内容。

3 深土冻土力学的研究现状

深土冻土力学是随着人工冻结技术在深部矿井开挖中的应用发展起来的, 工程实践为深土冻土力学的研究提出了新方向, 新问题。纵观近20 a来, 深土冻土力学的发展主要围绕以下3个方面展开: ①开展冻结壁形成过程中温度场、位移的研究以确定冻结壁厚度; ②开展室内深土冻土力学参数研究以确定深部冻结壁的强度与变形; ③开展冻结壁融化阶段土与结构相互作用研究以评价人工冻结技术对永久井壁和上部建筑物的作用。现就以上3个方面来阐述在深土冻土力学的研究现状。

(1) 冻结壁形成过程中温度场与冻结壁位移的研究。在冻结法凿井中, 冻结壁温度场的变化影响着冻结壁厚度和平均温度的大小, 从而决定着冻结壁的强度与变形, 而强度与变形是判定冻结壁稳定性的重要参数, 直接关系到冻结凿井的速度与成败。所以对冻结壁形成过程中温度场和变形的研究一直是深部矿井建设研究的重点, 许多学者通过工程实测、室内模拟实验和数值分析等方法研究冻结壁形成过程中温度场与位移场的变化, 提出冻结冷量的估计方法, 给出冻结壁厚度计算公式, 分析井壁破裂原因, 探讨防止井壁破裂与冻结管断裂措施^[10-13]。但是随着地下工程建设深度的增加, 上覆地压也随之增高, 冻结过程中遇到的问题越来越复杂, 直接的工程实测难度加大, 所以, 目前, 对此问题的研究越来越多的借助于室内物理模拟和数值分析方法, 然后通过部分工程实测数据进行验证。譬如, 由于地下水渗流对冻结壁形成的影响在理论分析上有一定难度, 在目前工程实测技术尚不完备的情况下, 杨平等^[14]通过利用多孔介质热运移理论及达西定律建立了考虑地下水流时冻结峰面发展的数学模型, 计算分析了冻结过程中温度场及地下水流场的变化规律; 获得了冻结孔布置间距极限值与地下水流速、饱和砂原始温度、冻结管外表面温度、冻结管管径及未冻饱和砂导热系数间的关系。并指出干密度、含水率与比热不影响冻结孔布置间距极限值大小, 但影响冻结壁发展快慢。郭瑞平等^[15]采用现场实测与数值模拟相结合的综合研究方法, 对深部厚黏土层冻结凿井时冻结壁的位移和底鼓在时间上和空间上

进行了全域性的研究,从而找出了冻结管断裂的主要原因。周晓敏等^[16]借助模型试验,通过人工控制饱和砂层的水渗流状态,开展水渗流对常规人工地层冻结工程问题的研究,提出缩小冻结孔间距是抑制水流对交圈时间影响的最有效手段。周国庆^[17]、周金生等^[18]首先通过对冻结细粒土的数值分析,指出与连续冻结相比,间歇冻结在冻结锋面推进速度、冻结区温度、平均冷率和未冻结区的温度梯度等方面的不同有利于抑制冻胀的产生和发展,后来又通过室内试验来证明土体冻胀的发展变化规律及冻胀控制与冻结模式之间的关系,为有效控制人工冻结过程中土体的冻胀现象提供有效的措施。冻结温度场是一个含有相变的温度场,具有移动的内热源和复杂的边值条件,在整个地层冻结过程中冻结温度场随时间和空间而变化,是一个不稳定温度场,加之目前对高压土体冻结过程认识不足,所以,对冻结壁形成过程中温度场和冻结壁位移的研究,还有很长的路要走。

(2) 室内深土冻土力学试验研究及理论探索。室内深土冻土力学试验是获得冻结壁设计所需的物理、力学参数的前提,也是进一步建立深土人工冻土强度准则和本构模型的基础。目前人工冻结技术在深井开挖中的应用越来越广泛,并且开挖深度也越来越深,随便借用常规冻土力学的研究参数去设计冻结壁已不符合当前的需要,这早已被许多塌井工程所证实。室内研究深土冻结后的力学性质是一种较为理想的研究手段。近年来,岩土工程专家、学者开始关注这一问题,并在这方面做了许多较为深入的探索,但大多都是运用常规冻土力学的研究手段,没有考虑深土冻结过程的特殊性和形成后受力状态的特殊性。为此,崔广心等^[7]通过试验证实了上覆土压力对深土结冰温度的作用,马巍等^[8]利用先进的电镜扫描技术,观测到较高压力对冻土中孔隙冰的压融现象,这些研究不仅从现象上而且从有压土的成冰机理上阐明了土体冻结对压力的依赖性,并指出这一依赖性就是导致深土冻土力学性质与相同成分的常规冻土完全不同的实质原因,因此,在工程实际中是无法将浅部冻土力学的成果外延应用到深土冻土的。后来,崔广心^[3, 19]又通过分析深土冻土与浅部冻土的成因及其在工程中的作用,从冻结方式、受载历史、承载结构、应力路径等4个方面详细论述了它们之间的区别与联系,阐述了上覆土压力对深土冻土物理力学性质的影响,最终提出了深土冻土力学研究的基本框架。为了完善这一理论框架,马金荣^[20]运用自行研制的高压 K_0 固结仪,模拟研究了300 m深度范围内不同应力路径下砂土和黏土的 K_0 固结特性和剪切特性,取得了深土在加、卸载过程 K_0 值和深土特性指标 c 、 ϕ 值沿深度的变化规

律;马巍等^[21]通过对 K_0 排水固结试验、等压排水固结试验、等压不排水固结试验和先冻结后固结试验进行三轴试验,探索了室内进行深土冻土力学研究的研究方法,提出 K_0 排水固结试验方式是适合于研究深土冻土力学性质最为理想的室内试验模式。并以这一试验方法为依据,就增加轴压和卸除围压两种不同应力路径对深土冻土的破坏强度和破坏应变进行比较,进一步用理论证明了按增压试验的强度指标进行冻结壁稳定性设计时,随着开挖深度的增大,导致冻结壁坍塌和冻结管的断裂的原因^[22]。任何事物都不是独立存在的,它们之间既有区别又有联系,深土冻土与浅部冻土也一样,它们之间既存在差别,肯定也存在联系。为了找出深土冻土力学与浅部冻土力学之间的联系,Wang等^[23]将深土冻土力学试验模式下所得到冻土的力学性质与常规冻土力学实验方法下所得到的结果进行比较,在两者的强度和两者变形之间建立了一种函数关系,这就为将现有的一些研究成果直接应用于深土冻土力学研究中打下了基础。同时,王大雁等根据前人提出的实验方法,就深土冻土的应力-变关系,深土冻土实际的弹性变形范围以及深土冻土的初始刚度和强度特征等做了详细的试验研究^[24-26]。通过这些研究,给出了Duncan-Chang双曲线模型的修正方程以描述深土冻土在轴向加载条件下的应力-应变行为;阐明各影响因素对深土冻土的弹性变形范围的影响并提出冻土中孔隙冰对初始围压变化的响应是影响初始围压对冻土初始刚度大小的主要因素的论点;最后以冻土的单轴压缩强度作为反映深土冻土中孔隙冰对土颗粒胶结程度的指标,给出了以冻土的单轴压缩强度与未冻土的内摩擦角来确定深土冻土破坏强度的函数关系式。这些研究不仅完善和发展了深土冻土力学理论,而且丰富和充实了现有的冻土力学理论。

(3) 冻结壁与井壁相互作用研究。在冻结法凿井中,冻结壁是一临时支护结构物,修建它的目的主要是为了承受土压力、隔绝地下水的流入,使人们在冻结壁的保护下进行凿井和井筒的修建工作,待工程完工后做解冻处理。但由于冻结引起的土体冻胀和冻土融化引起的土体沉降,以及冻融循环对原始地层引起的结构性破坏,给不同时期的井壁带来了众多不同的特殊附加荷载,使得井壁的破裂漏水事故、灾害频频发生,对厚表土覆盖矿区的开发、开采构成威胁^[28]。这一特殊附加荷载一般是指施工期间冻结壁作用于井壁上的冻结压力和冻结壁在融化过程中对井壁产生的融沉附加力。所以,开展以冻结压力与冻结壁融沉附加力为核心的冻结壁与井壁相互作用研究是解决井壁漏水问题的关键。

在中国,冻结井筒井壁结构及其设计方法的发展

和演变过程, 始终是围绕着如何有效抵御各种因冻结法施工造成的井壁特殊荷载进行的。对这一问题的研究方法无外乎是工程实测、理论分析、数值模拟和物理模拟。工程实测作为一种最为直接、最可靠的科学研究手段^[27-28], 在 20 世纪六七十年代国内建井高潮中曾广泛应用开展冻结压力研究, 取得了大量的成果。但这些实测多在 300 m 深度以内的冲积层中开展, 深度超过 400 m, 甚至接近 600 m 的特厚冲积层中冻结压力的工程实测研究直到近年来才刚刚开始。最近, 王衍森等^[29]通过对巨野矿区龙固矿、郭屯矿、郓城矿共 5 个矿区冻结法施工过程中, 取得的冻结压力实测数据进行汇总分析, 获得了最大冻结压力发生的位置, 给出冻结压力的增长规律; 汪仁和等^[30]在淮南某煤矿开展了冻结壁冻融过程中内、外部冻胀力和孔隙水压力的现场实测研究, 获得了多圈管冻结壁形成与融化过程中冻结壁内部冻胀力发展特性和孔隙水压力变化规律。在理论研究方面, 经来旺等^[31-32]从物理学中的热胀冷缩原理出发, 结合弹性力学中的热弹性理论及土力学中的 Winkler 地基模型, 推断出冻结壁解冻期立井井壁应力的分布规律, 并根据应力成分的分析, 阐述温度变化对井壁应力分布的影响。荣传新等^[32-33]基于黏弹性理论, 建立了一个适用于深厚冲积层的考虑冻结壁与外层井壁以及周围土体共同作用的黏弹性计算模型, 同时模型中也考虑了冻结壁的蠕变变形, 获得了冻结壁外荷载表达式和冻结壁的应力分布规律以及外层井壁冻结压力解析式和应力分布规律。但是这些现场实测研究由于测试手段的局限性常常将井壁与冻结壁隔离开, 未考虑其相互作用, 而理论研究方面, 由于对深土冻土力学参数、本构关系、强度准则的研究还不成熟, 在选用的力学参数等指标时常将常规冻土力学的研究成果作为依据, 使模型的实用性受到限制。对此问题进行研究的另一手段就是以相似理论为基础的物理模拟模型试验研究方法, 由于其比工程实测研究省时间、省经费, 且可重复进行试验, 是目前开展冻结壁与井壁相互作用研究比较符合实际的研究手段, 利用这一方法, 并结合理论分析和数值模拟计算等研究手段, 付厚利等对深厚表土中冻结壁融沉附加力沿井壁的变化规律进行了研究和探讨, 得到了冻结壁融沉附加力与土性、深度、冻结壁解冻时间等参数之间的关系; 给出了表土层中冻结壁最大融沉附加力的确定原则和计算方法, 并探讨了防止冻结壁解冻阶段井壁破裂的技术路线和措施。为特厚冲积层中冻结井外壁的设计及安全稳定性分析提供依据^[28]。以上研究不仅从理论上解释了在应用冻结施工法过程中井壁破裂原因和破裂特征, 而且为根本解决深立井在施工或冻结壁融化阶段破裂时, 选择预防与治理措

施提供了理论依据。

4 深土冻土力学研究所面临的主要问题

总的来说, 地下工程的兴建催生了对深土冻土力学的研究的热潮, 施工实践的需求或实践过程引领或带动着人工冻结技术向前发展, 而认识领域往往显得较为被动或滞后, 这也许是岩土工程这门实践性学科的特点。虽然我们可以对 600 m 甚至上千米的地层用人工冻结技术进行开挖, 但是我们对深部冻土的力学性质的认识却非常有限。这主要源于我们对深土本身的认识还不太清楚, 深土和深土冻土室内试验技术还不健全。归纳起来, 主要有以下 5 个方面:

(1) 深土冻土室内制样技术。深土是在长期地压作用下固结形成的, 所以 K_0 固结方法是较为理想的室内将深部土恢复至原始状态的方法。但是由于深土土质的不同, 其持水性能和完成固结的时间不同, K_0 固结方法的实用性受到一定的限制。对于砂土和粉土, 由于其颗粒相对较粗, 持水性差, 用 K_0 固结方法在较短时间, 即 1~2 d 内就可以完成固结, 达到深部状态下的物理参数指标, 所以目前对深土冻土的研究基本以砂土和粉土为研究对象。而对于大部分矿井开挖所遇到的黏土来说, 由于其颗粒较细、含水率低、持水性好, 所以, 用 K_0 固结的方法很难达到理想的效果。再加上这种土成分复杂、对于环境干湿交替和机械扰动的影响特别敏感, 胶结性差, 很难获得原状土样的密度。因此, 以上因素严重影响室内试验对深黏土和深黏土冻结后物理力学性质的深入研究。

(2) 室内深土冻土物理力学性质的测试技术问题。对深土物理性质的认识是进一步认识其力学特性, 最终建立深土冻土本构模型的基础。但是由于目前在冻土物理参数方面的研究手段都是针对常规土, 即无压土的, 要测定高压土的冻结课题, 将面临一系列亟待解决的技术难题。譬如说, 现有的温度传感器只适用于较低的压力环境, 无法测定高压状态土体中温度的变化; 加工试验罐的材料要具有很高的强度和低的导热性, 保证外部环境温度的变化不会影响到试验罐内部的温度; 为了测定高压土体在单向冻结过程中温度的变化, 必须将温度探头布置于试验罐体的不同位置, 所以在试样罐的设计方面, 要保证温度探头与试验罐体的紧密结合; 虽然时域反射仪、中子仪、脉冲核磁共振仪等都可以测定冻土的未冻水含量, 但无法应用与高压土体冻结后未冻水含量的测定。所有这一系列问题都严重制约着深土冻土力学研究的进一步发展。因此, 建立室内深土冻土物理力学性质测试体系

是进一步开展深土冻土研究的前提。

(3)大型模型模拟试验研究。对于岩土工程来说,虽然工程实测一直以来作为工程量化研究最主要最可靠的手段,但物理模拟在理论研究方面具有不可替代的地位。而深土冻土由于利用工程实测和室内土工试验都面临一定的困难,室内大型模型模拟试验不失为一个理想的选择,但对深土冻土来说,模型模拟需要较高的压力环境和低温环境,这将对测试探头和测试技术提出更高要求,从而导致深土冻土大型模型模拟试验成本很高。因此,深土冻土研究在这方面的研究非常有限。

(4)深土冻土力学的理论模型研究。所有岩土力学问题研究的最终归宿,就是建立能反映所研究目标发展变化规律的本构模型,就是用数学物理的方法解决实际问题。但是,由于目前深土冻土力学试验手段和测试方法的不完善,使得所获得的有关深土冻土力学参数非常有限。所以,有些学者着手从理论方面对深土冻土力学进行研究时,常常采用常规冻土的研究结果,导致所得结果不能完全反映深土冻土的力学本质。这种现象的长期存在必将影响深土冻土力学的发展。

(5)深土冻土力学研究的实用化问题。工程中遇到的深土冻土力学问题越来越多,随便借用常规冻土力学的方法,已不敷当前的需要。为此,建立一套较为实用的分析计算方法,已十分必要。这种方法既不是简单地参考常规土力学或者常规冻土力学的传统思路,也不是“始终停留在学院式研究的阶段”^[34],而是在认识深土冻土基本性状的基础上,通过试验研究、工程现场观测和验证、物理概念推理等充分考虑地压作用影响的情况下,建立的一套理论上正确、概念上明确无误、方法上不很繁琐、成果上有一定精度和可靠性的实用计算方法,以满足实际需要。

参考文献:

- [1] 崔广心, 杨维好, 吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998. (CUI Guang-xin, YANG Wei-hao, LÜ Heng-lin. The frozen soil wall and the shaft lining in deep alluvium[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 1998. (in Chinese))
- [2] 余力, 崔广心, 翁加杰. 特殊凿井[M]. 煤炭工业出版社, 1981. (YU Li, CUI Guang-xin, WENG Jia-jie. Special Shaft Sinking [M]. China Coal Industry Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [3] 崔广心. 深土冻土力学—冻土力学发展的新领域[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 97 - 100. (CUI Guang-xin. Mechanics of frozen soil for deep alluvium—a new field of frozen soil mechanics[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 97 - 100. (in Chinese))
- [4] 崔广心. 论深厚表土层中确定地下结构物外载的基础理论—深土力学[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 123 - 126. (CUI Guangxin. The basic theory for analyzing loads on underground structure in deep alluvium—mechanics of deep soil[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(2): 123 - 126. (in Chinese))
- [5] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 2854 - 2858. (HE Man-chao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 2854 - 2858. (in Chinese))
- [6] 陈湘生. 深冻结壁时空设计理论[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 13 - 16. (CHEN Xiang-sheng. Time space design theory for deep ice wall of short cylinder[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 13 - 16. (in Chinese))
- [7] 崔广心, 杨维好, 李毅. 受载荷的湿土结冰温度变化规律的研究[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 321 - 327. (CUI Guang-xin, YANG Wei-hao, LI Yi. A study on the relation between freezing point and load of wet soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(4): 321 - 327. (in Chinese))
- [8] 马巍, 吴紫汪, 常小晓, 等. 围压作用下冻结砂土微结构变化的电镜扫描分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17(2): 152 - 158. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao, et al. Analysis of microstructural changes in frozen sandy soil under confining pressure using scanning electronic microscope[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(2): 152 - 158. (in Chinese))
- [9] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Permafrost physics[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [10] 荣传新, 王秀喜, 程桦, 等. 冻结壁稳定性分析的黏弹塑性模型[J]. 力学与实践, 2005, 27: 68 - 72. (RONG Chuan-xin, WANG Xiu-xi, CHENG Hua, et al. A unified viscous-elastic-plastic constitutive model for stability analysis of frozen soil wall[J]. Mechanics and Engineering, 2005, 27: 68 - 72. (in Chinese))
- [11] 杨平, 陈明华, 张维敏, 等. 冻结壁形成及解冻规律实测研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 128 - 132. (YANG Ping,

- CHEN Ming-hua, ZHANG Wei-min, et al. Observation of the forming and thawing of frozen walls[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(2): 128 - 132. (in Chinese))
- [12] 蔡海兵, 程 桦, 荣传新. 深埋冻结壁变形特性的理论分析及数值模拟[J]. 西安科技大学学报, 2008, **28**(3): 439 - 444. (CAI Hai-bing, CHENG Hua, RONG Chuan-xin. Deformation characteristics of deep-buried frozen wall based on frozen soils rheological theory[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, **28**(3): 439 - 444. (in Chinese))
- [13] 汪仁和, 李栋伟, 王秀喜. 改进的西原模型及其在冻结壁上的应用[J]. 力学与实践, 2006, **28**(1): 58 - 60. (WANG Ren-he, LI Dong-wei, WANG Xiu-xi. Calculation of stress and displacement field of frozen wall by improved Nishihara Model[J]. Mechanics in Engineering, 2006, **28**(1): 58 - 60. (in Chinese))
- [14] 杨 平, 皮爱如. 高流速地下水流地层冻结壁形成的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(2): 167 - 171. (YANG Ping, PI Ai-ru. Study on the effects of large groundwater flow velocity on the formation of frozen wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(2): 167 - 171. (in Chinese))
- [15] 郭瑞平, 李广信. 冻结壁位移对冻结管断裂的影响[J]. 淮南矿业学院学报, 1997, **11**(3): 21 - 26. (GUO Rui-ping, LI Guang-xin. Influence of the displacement of frozen soil wall on the fracture of freezing pipe[J]. Journal of Huainan Institute of Technology, 1997, **11**(3): 21 - 26. (in Chinese))
- [16] 周晓敏, 王梦恕, 张绪忠. 渗流作用下地层冻结壁形成的模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2005, **30**(2): 196 - 201. (ZHOU Xiao-min, WANG Meng-shu, ZHANG Xu-zhong. Model test research on the formation of freezing wall in seepage ground[J]. Journal of China Coal Society, 2005, **30**(2): 196 - 201. (in Chinese))
- [17] 周国庆. 间歇冻结抑制人工冻土冻胀机理分析[J]. 中国矿业大学学报, 1999, **28**(5): 413 - 416. (ZHOU Guo-qing. Analysis of mechanism of restraining soil freezing swelling by using intermission method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, **28**(5): 413 - 416. (in Chinese))
- [18] 周金生, 周国庆, 马 巍, 等. 间歇冻结控制人工冻土冻胀的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, **35**(6): 708 - 712. (ZHOU Jin-sheng, ZHOU Guo-qing, MA Wei, et al. Experimental research on controlling frost heave of artificial frozen soil with intermission freezing method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, **35**(6): 708 - 712. (in Chinese))
- [19] 崔广心. 我国人工冻结工程研究现状及展望[C]// 第五届全国冰川冻土学大会论文集(下). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 843 - 851. (CUI Guang-xin. State of the art and prospects of the studies of the artificial freezing engineering in China[C]// Proceeding of the fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology (Vol.2). Lanzhou: Gansu Culture press, 1996: 843 - 851. (in Chinese))
- [20] 马金荣. 深层土的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000. (MA Jin-rong. Study on mechanical properties of deep soil[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2000. (in Chinese))
- [21] 马 巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力-应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 198 - 200. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 198 - 200. (in Chinese))
- [21] 马 巍, 常小晓. 加载卸载对人工冻结土强度与变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 563 - 566. (MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Influence of loading and unloading on strength and deformation of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 563 - 566. (in Chinese))
- [22] 马 巍, 常小晓. 两种不同试验模式下人工冻结土强度与变形的对比分析[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(2): 149 - 154. (MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Comparison of strength and deformation of artificially frozen soil in two testing manners[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(2): 149 - 154. (in Chinese))
- [23] WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Analyses of behaviour of stress-strain of frozen Lanzhou loess subjected to K_0 consolidation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **40**: 19 - 29.
- [24] WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Study on the resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, **42**(3): 194 - 200.
- [25] WANG Da-yan, MA Wei, WEN Zhi, et al. Study on strength of artificially frozen soils in deep alluvium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(4): 381 - 388.
- [26] WANG Da-yan, MA Wei, WEN Zhi, et al. Stiffness of frozen soils subjected to K_0 consolidation before freezing[J]. Soils

- and Foundations, 2007, **47**(5): 991 - 997.
- [27] 黄家会, 杨维好, 周国庆, 等. 特殊地层条件下井壁破裂机理与防治技术的研究(之三)[J]. 中国矿业大学学报, 1997, **26**(3): 10 - 13. (HUANG Jia-hui, YANG Wei-hao, ZHOU Guo-qing, et al. Mechanism and prevention technique of shaft lining fracture in the special strata(part three)[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, **26**(3): 10 - 13. (in Chinese))
- [28] 付厚利. 深厚表土中冻结壁解冻井壁数值附加力变化规律的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000. (FU Hou-li. Study on variation law of vertical additional force applied to the shaft lining during the thaw-subsidence of the freeze wall in thick alluvium[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2000. (in Chinese))
- [29] 王衍森, 薛利兵, 程建平, 等. 特厚冲积层竖井井壁冻结压力的实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 207 - 212. (WANG Yan-sen, XUE Li-bing, CHENG Jian-ping, et al. In-situ measurement and analysis of freezing pressure of vertical shaft lining in deep alluvium[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 207 - 212. (in Chinese))
- [30] 汪仁和, 张瑞, 李栋伟. 多圈管冻结壁形成和融化过程冻胀力实测研究[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(3): 538 - 542. (WANG Ren-he, ZHANG Rui, LI Dong-wei. Formation and thawing processes of a multi-coil pipes frozen wall[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(3): 538 - 542. (in Chinese))
- [31] 经来旺, 高全臣, 徐辉东, 等. 冻结壁融化阶段井壁温度应力研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(9): 1357 - 1362. (JING Lai-wang, GAO Quan-chen, XU Hui-dong, et al. Thermal stress analysis of shaft in melting stage of frozen wall[J]. Rock and Mechanics, 2004, **25**(9): 1357 - 1362. (in Chinese))
- [32] 经来旺, 张皓. 冻结壁融化阶段井壁破裂因素分析及防破裂措施研究[J]. 工程力学, 2003, **20**(1): 122 - 126. (JING Lai-wang, ZHANG Hao. Fracture analysis and prevention measures of fraction initiation in the melting stage of frozen shaft wall[J]. Engineering Mechanics, 2003, **20**(1): 122 - 126. (in Chinese))
- [33] 荣传新, 王秀喜, 程桦. 深厚冲积层冻结壁和井壁共同作用机理研究[J]. 工程力学, 2009, **26**(3): 235 - 239. (RONG Chuan-xin, WANG Xiu-xi, CHENG Hua. A study on interaction mechanism of frozen soil wall and shaft lining in deep alluvium[J]. Engineering Mechanics, 2009, **26**(3): 235 - 239. (in Chinese))
- [34] 沈珠江. 非饱和土力学实用化之路探索[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 256 - 259. (SHEN Zhu-jiang. Exploitation of practical use of unsaturated soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 256 - 259. (in Chinese))