

地铁隧道冻结法施工地层融沉研究进展及展望探讨

李晓芳

安徽文达信息工程学院 安徽 合肥 230032

[摘要]地铁是我国主要的交通工具之一,随着城市化进程的加快,我国地铁建设日益完善,尤其是北京、上海等大城市。人工冻结法的应用可使地层中的水冻结,将天然岩土变成冻土,起到增强其稳定性的作用。目前,人工冻结法已广泛用于地铁隧道施工中,且对环境的影响较小,能够有效解决地铁隧道施工难题。就另一方面而言,冻结引起的地层融沉对环境造成了一定的不利影响。本文基于地铁隧道施工工程,阐述了冻土融沉的机理,并分析了地铁隧道解冻期地层融沉的研究现状,希望为今后地铁隧道施工工程的开展提供参考价值。

[关键词]地铁隧道;冻结法;地层融沉

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.09.189

冻结法是利用人工制冷技术,使地层中的水冻结,将天然岩土变成冻土,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隧道的开挖。在20世纪80年代,多个国家将人工冻结法应用于地下工程建设中,如地铁隧道、人行隧道等。人工冻结法对地铁隧道工程的建设具有重要作用,与此同时,也面临一定的技术难题,先综述如下。

1、冻土融沉机理

人工冻结法的冻结原理包括盐水循环、氨循环、冷却水循环。盐水循环是指盐水吸收地层热量,在盐水箱内将热量向蒸发器中的液氨进行传递;氨循环是指液氨变成饱和蒸气氨,再被氨压缩机压缩成过热蒸汽进入冷凝器冷却,高压液氨从冷却器经贮氨器,经节流阀流入蒸发器液氨,并在其中气化吸收周围盐水热量;冷却水循环是指冷却水在冷却水泵,冷凝器和管路中的循环,可在大气内传递地热和压缩机产生的热量。冻结法具有诸多优势,其安全可靠性好,可将地下水进行有效隔绝;适应面广,在任何含有水量的松散岩土层具有适用性;且灵活性好,可在人为作用下控制冻结体的性状和扩展范围等优势。同时,冻结法也具有一定的缺点,其中包括融沉。随着冻层温度的升高,冻土中的冰晶和冰膜逐渐融化成水,土体出现热融沉降;在土体自重和荷载的作用下,融化区土体被排干固结,产生压实沉降。热融沉降与压力不具有相关联系,而压实沉降与冻结过程中形成的土壤颗粒结构的稳定性、冰融水释放的自由空隙空间和压力有紧密的关系。地体完全沉降称为冻土融化沉降,即为融沉。20世纪30年代,有研究在黏土与砂土上开展融土壤压缩的研究,并将孔隙指数变化规律与正融土和常规非冻土进行了比较,结果得出砂土的融沉特征远远低于黏土,并且无论是正融砂还是正融黏土,其孔隙比变化可分为平缓段、急降段和缓降段^[1]。然而,普通未冻土的孔隙比变化只有一个缓降段。在正融土中,沉降量与热融沉降的控制有关,而已融土沉降主要受排水固结引起的压实沉降控制。

2、地铁隧道解冻期地层融沉研究现状

随着我国地铁隧道建设的飞速发展,人工冻结技术的应用

率不断增高。但因地层融沉的影响,对周边建筑物也带来了一定的负面影响。因此,研究地铁隧道解冻期地层融沉规律,可为地层融沉控制技术的提出和应用具有促进作用。以下从解析法、数值模拟、模型试验及现场实测方面进行分析。

2.1解析法

1950年代后期,波兰学者J.Litwiniszyn提出了随机介质理论,最初是为研究煤矿开采中的地层和地表运动而提出的,他认为岩土是一种偶然的介质,地层活动引起地表沉降的过程是一种偶然的过程,他提出了五公理,即唯一性、同质性、叠加性、统一性和正值性^[2]。该统计理论可合理解释地层沉降的计算。该理论被广泛用于预测城市隧道建设中的地面运动。有学者根据随机介质理论,以隧道冻结法施工的解冻面积作为地表沉降的积分界限,引入融沉系数或地层的主要影响角,计算了隧道冻结法施工解冻时间内的地表沉降,进而推导出的预测曲线包括地表沉降、水平位移、倾斜、曲率变形等,有助于后续研究。另有学者应用随机介质理论预测上海地铁明珠线西藏南路至南浦大桥侧渠冻结工程地层融沉,对融沉程度进行了简单的模型计算,并给出了地表上升的变形、下降和水平运动的公式,该公式进一步丰富了随机介质理论在隧道连接通道冻结法施工中地层融沉预测的应用。还有学者将这一理论在北京地铁“复八”线“大北窑-热电厂”段隧道冻结工程的地表变形预测中进行应用,再次证明了随机介质理论的适用性。在研究地层运动和隧道排水引起的变形时,将Terzaghi固结方程引入随机介质理论,首次确立了隧道排水的构造。基于前苏联的一维沉降公式,有学者进一步完善了随机介质理论,建立了能够同时反映外载和熔体沉降系数对地表沉降影响的计算模型,能够成功预测无注浆地表沉降。在隧道冻结法设计中,冻结壁交圈前的换热过程符合单管冻结理论定律,冻结壁交圈后的换热过程符合平板结冰理论定律,解冻时间及锋面的平方根成正比,借助极坐标变换方法,将经典的冻土沉降公式替换为随机介质解冻半径的理论积分,以及自然解冻及强制解冻期地层解冻的二维历时预测模型。有学者应用随机介质理论对滨海某

拱形隧道连接通道结构层变形进行预测,将圆拱半径、拱底水平角、拱顶高度和宽度等参数引入其中,得到更准确的预测方法。

2.2数值模拟

冻土的构成部分包括土壤、冰、水和空气颗粒,在多年冻土融沉的研究中,数值模拟的关键问题主要是指多相多孔介质中固、液、气和热的耦合问题。由于解析方法难以计算二维或三维多场耦合条件下的冻土融沉量,因此,国内外研究人员提出了多种物理计算模型。例如,有专家提出了一种冻胀的一维半经验模型,冻土中水和热传递的流体动力模型,基于冻胀理论和冰分凝理论的刚性冰模型,从热力学理论角度提出的具有相变的水热场耦合物理模型,从热力学、质量守恒的角度提出了水-热-力场耦合的物理模型等。基于上述物理模型建立的数学协调方程,大量研究人员通过二次开发程序将其扩展到有限元软件中,进一步证实了地层温度场、位移场和应力场越来越符合工程实际。

2.3模型试验

室内模式试验可以全面还原地铁隧道冻结法施工全过程,是研究冻土帷幕发展过程、地层温度场、位移场最直观的方法。有专家利用自制的冻胀融沉试验设备对徐州典型黏土开展冻融循环模型试验,发现黏土的冻胀量远远低于融沉量。另有专家针对上海延安东路隧道,模拟整个隧道冻结法施工过程,发现地表沉降经历了三个阶段,包括缓慢变化期、位移突变期和位移稳定期,并且随着地层深度的增加,这种影响逐渐减弱。

2.4现场实测

在南京地铁一期旁通道中,监测了冻结法施工过程中的盐水温度、冻土温度、地表变形和隧道变形,以此确定了最佳的开挖时间。在上海轨道交通10号线二段国权路站至五角场站的旁通道施工中,针对冻结法施工过程进行实时监测,布置冻结孔70个、测温孔14个、卸压孔4个,分别通过卸压孔测得的压力值对冻壁内水的迁移情况进行判断,最终采用技术结合经济指标的控制方案。在广州地铁3号线天河站旁通道冻结法施工中,监测盐水温度、地温、地表变形、冻土压力和隧道衬砌变形,从而分析出冻结阶段和隧道开挖阶段等的表面变形特性,并提出了控制融沉的有利措施^[3]。

3、展望

随着层冻法在地铁隧道施工应用率的逐渐提升,针对人工冻土融沉以及对周边地区的影响越来越受到建设领域的关注。上述提到,国内外专家及学者采用理论分析、数值模拟、模型试验等多种方式,以此研究地铁隧道冻结法施工期地层融沉,同时取得了较为理想成果。从另一方面来说,也存在较多不足的地方。第一,针对冻土融沉机制的研究,现有的研究主要围

绕一维融沉问题进行的,天然冻土是其主要研究对象;人工冻结源于自然冻结,自然冻土融沉时可以看作是一个一维问题;但是,因人工冻结壁的形状与冷冻管的空间布置有较大的联系,所以人工冻结壁的融化过程应该被视为一个三维问题。第二,针对地层解析法的研究,有学者在考虑了冻结壁的融化时,利用随机介质理论构建了隧道自然解冻和强制解冻过程中地层融沉的二维预测模型;然而,在地铁隧道冻结过程中,只有对地层三维融沉变形的研究才能反映工程的实际情况。第三,在地层融沉数值模拟研究中,大部分研究者忽略了多年冻土融化时的水热耦合机制;而在现有的研究中,对土体固结沉降的数值模拟还没有得到有效的开展。第四,在地铁隧道冻结法施工常规模型的试验研究中,由于地面冻融问题,模型材料通常采用现场土体;在现有的地层融沉离心模型实验研究中,该模型只考虑了土体,不包括实验模型中的隧道结构和研究对象。对此,针对上述问题,关于地铁隧道施工冻结过程中地层融沉问题,需要在以下几个方面进一步研究。第一,应针对人工冻土三维融沉变形机制做深入研究,并根据地铁隧道冻结法的施工情况,基于地层三维解冻温度场的分析,对于地层三维融沉变形规律进行研究,并提出了地层融沉三维预测模型。第二,将冻土融化过程中温度场、应力场和水分场的耦合机制作为基础,充分考虑土体固结沉降情况,构建地铁隧道冻结法施工期地层融化的数值模拟方法。第三,在地铁隧道冻结过程施工中开展离心模型试验研究,研制出集人工冻融为一体的隧道离心模型试验装置,可完成全程模拟,包括冻结、施工和解冻。第四,加强地铁隧道冻结法施工现场地层融沉的监测,为地层融沉理论和试验研究提供有力的数据支持。综上所述,人工冻结法具有一定优劣势,因此在地铁隧道冻结法施工中应提前做好研究,以确保施工效果。

参考文献

- [1]洪荣宝,蔡海兵,鲁婵瑞.地铁隧道冻结法施工地层融沉研究进展及展望[J].建井技术,2020,41(3):13-20,52.
- [2]李亚汝,蔡海兵.地铁隧道冻结法施工地层冻胀的研究进展及展望[J].低温建筑技术,2019,41(1):76-80.
- [3]胡指南,孟祥飞,刘志春,et al.双线盾构扩建地铁车站的插管冻结法及施工力学特性研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(4):579-587.

作者简介:

李晓芳(1992.10.06-),女,汉族,安徽省六安市,讲师,硕士研究生,安徽文达信息工程学院,安徽省合肥市,方向地下结构工程。