

冻结法在甘肃新近系、古近系疏松砂岩地下工程中的应用

魏蒙恩^{1*}

兰州资源环境职业技术大学

摘要:近年来,在甘肃多个新近系、古近系地下引水工程、轨道交通工程中揭露了强度和稳定性极差的疏松砂岩地层,工程中涌水、突沙等被称为“世界性施工难题”,而冻结法的使用成为攻克此难题的关键技术之一。在总结多个疏松砂岩工程冻结法施工特点、地层基本特性的基础上,分析冻结法施工方法对地层工程地质特性的影响,为今后解决区域内疏松砂岩相应的工程技术难题提供有益的参考。

关键词:冻结法;疏松砂岩;地下工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.08.034

一、概述

冻结法又称冷冻法、人工冻结法,是人为干预下对目标地层进行降温,使其中的水冻结为冰,同时与周围岩土体胶结在一起形成加固的冻结体,并在冻结加固保护下进行开挖的一种岩土特殊施工方法,目前已经被广泛应用到矿山工程、桥梁工程、隧道地铁工程中^[1]。人工土冻结应用最早开始于英国、德国,并在基础和煤矿施工加固中取得成功;1955年我国首次使用冻结法凿井并获成功,之后便在全国推广使用;20世纪70年代初在北京地铁首次采用水平冻结法施工,此后沈阳、上海、广州地铁工程中探索并成功应用;2003年在南京地铁1号线首次采用垂直冻结法成功地进行了抢险修复^[1-2]。2013年初甘肃引洮一期工程7号隧洞疏松砂岩“卡脖子”段在多种方法尝试无果的情况下,尝试改用冻结法施工最终破解难题取得成功^[3-4]。2016年底,经过综合比选,兰州地铁1号线14工区五里铺至东部市场站区间联络通道红砂岩(即疏松砂岩)区域施工受阻,经多方论证后首次采冷冻法加固方式取得成功;此后兰州轨道1号线、在建的2号线多个红砂岩区段采用了冻结法^[5]。

疏松砂岩又称“第三系富水半成岩”或红砂岩,在甘肃古近系和新近系多个大型地下工程中均有出露,如已建引大入秦盘道岭隧洞,兰渝铁路兰州段桃树坪隧道和胡麻岭隧道等,且均为所在工程的“拦路虎”和“卡脖子”难点,被国内地质专家称为“世界性施工难题”^[6-8]。此类工程前期运用了明挖、TBM盾构法、矿山法等多重手段均无实质性进展,最终人工冻结法成为特殊区段破题的关键方法之一^[3-5]。根据兰州市城市轨道交通近期建设规划及已建工程经验,在建或拟建的3号~5号线在工程中,城关区范围内大部分为地下线路,预计区内将有近一半站点和线路会遇到疏松砂岩地层^[9-10]。因此,进一步研究如此特殊工程地质特性地层及施工难题,探索更有效的冻结法破解方案,具有重要

的理论和现实意义。

综上所述,基于已建和在建疏松砂岩地层,深入分析项目团队试验数据和已有文献可靠数据,梳理疏松砂岩地层基本参数,并总结冻结法施工特性,以期为今后区域内疏松砂岩地层冻结法施工选择提供有益的参考。

二、冻结法工程应用

近年来,冻结法积极加固、抢险修复,成为破解甘肃多个疏松砂岩重大施工难题关键方法之一。引洮一期引水隧洞2013年初尝试引入冻结法施工,利用新增竖井进行TBM解困及剩余洞段开挖,经过1年半的努力,完成了疏松砂岩洞段的施工,实现了引洮总干渠全线贯通。2016年底,经过综合比选,兰州地铁1号线14工区五里铺至东部市场站区间联络通道首次采冷冻法加固方式并取得成功。此后兰州轨道1号线、在建的2号线一期工程,共有6处联络通道继续采用了冻结法,其中近一半在疏松砂岩地层内,如1号线东岗西路某联络通道兼泵房,兰州地铁2号线定西五区间联络通道、东邮区间联络通道。

(一) 冻结工程地质问题相似

2010年甘肃引洮一期工程7号隧洞在疏松砂岩地层(新近系临夏组)施工时,遭遇我国水利史上罕见的涌水涌砂地质灾害,造成TBM两次卡机遇阻,加之隧洞属于深埋隧洞,工程一再停滞,成为制约整个工程的关键问题。2016年兰州地铁东方红广场地铁站在修建过程中,疏松砂岩地层(古近系野狐城组)问题再次出现,成为工程的“拦路虎”和“卡脖子”难点,此后在1号线西关站至五里铺站多个站点,甚至2号线多个站点均有揭露。

(二) 冻结工程目标不同

冻结法施工在引洮工程和兰州市地铁疏松砂岩地层中的工程类型、用途、长度、埋深、开挖截面、设施布置等均有差异。引洮工程中疏松砂岩冻结区域为超长超深引水,埋深超过200m、长度近约270m,开挖截面近似圆形,在较长区间内又新增几个竖井,不仅成功拆解了被埋TBM,也增加了开挖掌子面;工程区域地面虽具有一定坡度,但无建筑和管线,冷却塔置于地面。兰州市地铁4处疏松砂岩冻结区域为地铁线路区间联络通道,主要为地铁相邻梁隧道应急通道,埋深仅20m左右、长度较短,不超过50m,开挖截面近似马蹄形;但工程区域位于城区主干道,附件地面建筑群较多,地下各类管线较为复杂,经综合考虑,基本采用水平冻结技术,大部分的冻结工序均在已完成的地铁隧道线路内完成,无需过多影响占用地面空间。

(三) 冻结施工方法相似

(1) 主要施工方法

冻结法虽然成本较高,但属于“绿色”施工方法,对环境零污染,符合工程发展大趋势。在甘肃不同疏松砂岩冻结法施工中,均采用常规人工冻结法而未选用液氮冻结技术,在指定区域预先完成冻结孔施工,利用冷却塔中氨(NH₃)为制冷剂的冷冻设备,将冷却到-20~-30℃的氯化钙(CaCl₂)溶液通过冻结循环设备输送至制定地层区域,利用热交换原理,经低温盐水长时间循环吸取管外地层的热量,使周围地层冻结。甘肃已建在建5个工程中定点冻结目标区域常年地温14-20℃左右,积极冻结时间在40-50天左右,冻结后温度可保持在-24~28℃左右,施工期间维持冻结,工程施工基本结束后,逐步有序解冻。

(2) 关键工艺控制

冻结法可有效提高加固施工板结功效,大大降低施工风险。虽有地应力的作用,但是冻结过程中由于水的状态改变引起的提及变化,势必引起地层冻胀现象;在主体工程结束,地层解冻时冻结体的少量收缩,势必引起地层相应的融沉现象。但为了将冻胀融沉量控制到允许范围内,消除地层由于冻胀融沉对施工及相邻构筑物产生的不良影响,各个工程中均采用主动防治、实时监控、及时调整的施工原则。在主动冻结过程中,利用预先布置的泄压消减部分冻胀量,并严格控制冻结过程中的时间、温度等参数。解冻过程中利用预留的注浆孔,在遵循多次少量的原则下,进行注浆以补偿冻结帷幕融沉。

三、地层工程地质特性

根据甘肃工程揭露疏松砂岩施工难题,系统研究疏松砂岩地层工程地质特性至关重要。按照该地层与上下相邻地层接触关系来看,疏松砂岩可以称为“岩”,但其工程地质特性又类似于松散沙,因此称其为“岩”又不太合宜,故也称其为“半成岩”;该地层常呈砖红色、橘红色,故又称“红砂岩”,工程中常见于地下水位线以下,富水饱水状态,又称“富水红砂岩”。根据各工程揭露显示,疏松砂岩泥质胶结,扰动后常出现涌水、突泥、挤膏等现象,施工难度极大,分布情况、成分结构、物理性质及力学性质均比较相近。

(一) 分布接触情况

甘肃疏松砂岩主要分布在新近系和古近系地层,与上下时代底层呈不整合解除关系。在较大范围内无广泛分布的标志层,无层理或层理不明显,层厚、形状、成分及结构等在剖面上差异很小。其中引洮隧洞的主要位于新近系临夏组(N₂l),胡麻岭隧道的位于新近系(N^{Ms+SS})、古近系(E^{Ss+Cg}),桃树坪隧道的位于新近系地层(N₂)中,盘道岭隧道位于新近系地层(N₁)中,巴家咀水库下游露头的位于新近系地层(N₂l),兰州黄河北岸主要位于新近系(N₁~N₂),特别是咸水河组

(N₁x),兰州轨道交通1、2号线范围内位于古近系野狐城组(E₃y)。

(二) 物理性质

(1) 基本性质。疏松砂岩因含有铁质氧化物,不论整体、风化后粉末或涌土沙泥均呈红色基调,以砖红色、橘红色为主;无特殊气味,开挖洞内空气中也未检出瓦斯气体;粉细沙状结构,呈均匀松散的孔隙结构类型,扰动后极易风化成粉末状,似于沙土;矿物成分相对单一,以石英颗粒、Si元素为主,黏土矿物及钙质矿物含量很少;骨架颗粒呈单粒结构,紧密排列,泥质胶结,胶结物很少,连接微弱。

(2) 常规性质。根据以上提到的甘肃不同区域多个重大地下工程试样,按照《土工试验方法标准》获得的常规物理参数具有一定的相似性,差异性不大。按照粒度分析实验属于含细粒土砂、细粒土质砂,颗粒大小较为均匀,不均匀系数0.14~4.09之间,级配不良,分选良好,骨架颗粒具有一定的磨圆度;比重2.64左右,含水率8%~15%,饱和含水量约18%,天然密度2.198g/cm³,孔隙度大;土工渗透实验表明渗透系数主要在6.8×10⁻⁵~1.2×10⁻⁴cm/s之间,部分区域渗透系数偏小接近于2.6×10⁻⁸cm/s,属于弱透水性;开挖暴露后遇水极易崩解,部分因粘土含量较多呈泥糊状。骨架颗粒均匀且粘土颗粒少,使得颗粒之间填充不密实,存在较大的孔隙,这也和施工现场的疏松砂岩富水具有透水性一致。

(三) 力学性质

疏松砂岩地层施工难度大的最主要问题就在于其力学性质太差,常规施工方法难以推进。在对其物理性质研究的基础上,首先根据《土工试验方法标准》,将其看作“土体”进行力学试验,结果表明疏松砂岩属于低压缩性土,天然状态下,强度很低;尤其内聚力低小于70kPa,内摩擦角在30°~35°范围内。天然单轴抗压强度基本上不足1MPa,变形模量仅40~131MPa。其次将其按照“岩石”进行力学试验,对原状样尝试进行了常三轴实验,计算平均内聚力也仅2.09Mpa,内摩擦角在20°左右。以上力学试验数据和工程实际情况一致,在没有扰动情况下,还具有一定强度,扰动后,强度变化较大,在富水情况下涌沙冒泥,干燥情况下,用手即可轻松搓成粉末,地下工程施工难度大。

四、地层冻结特性分析

取引洮工程部分疏松砂岩试样,按照《冻土地区建筑地基基础设计规范JGJ-98》,进行冻结、融沉实验,并于兰州地铁工程文献数据对比,结果表明该地层具备优良的冻结特性和良好的温度特性。人工冻结后,疏松砂岩力学性能明显改善,尤其内聚力大幅度增加(10倍左右);当其解冻后,其力学性质大为劣化,且低于原状疏松砂岩。

(一) 冻融物理力学特性

(1) 原状样试验。取引洮工程冻结试样试验分析, 冻结后试样强度大大提高, 试样冻结解冻后密度略有降低, 但孔隙度显著加大, 渗透系数增大近10倍, 与电镜实验微观结构中对孔隙度变化的分析结果一致。这也间接表明地层经过冻结及解冻以后, 其结构发生一定的变化, 孔隙增大。

(2) 重塑样试验。查阅兰州地铁重塑样冻结试验文献数据, 取平均值12.18%的试样配制重塑样, 进行冻结实验, 当温度为 -10°C 时, 试样单轴抗压强度平均值增加至5.578MPa, 弯拉强度平均值增加至2.08MPa, 抗剪强度平均值增加至1.56MPa, 与引洮原状样实验结果一致, 冻结加固效果明显。

(二) 冻融工程地质特性

(1) 冻胀试验。按照《冻土地区建筑地基基础设计规范》, 取引洮疏松砂岩原状样, 封闭补水不加压情况下进行冻胀实验, 试验结果表明平均冻胀量不足1%, 冻结等级为I级, 属于不冻胀类别, 初步分析其融沉量也有限。

(2) 融沉试验。按照《冻土地区建筑地基基础设计规范》, 取引洮疏松砂岩冻结原状样在冷冻恒温情况下制样并转移至实验室后进行融沉实验, 根据融沉量计算试样融沉系数仅0.255%, 融沉等级为I级, 不融沉类别。

(3) 工程实际情况。与试验结果一致, 引洮工程及兰州地铁冻结法实践情况也的确显示疏松砂岩地层冻结法达到了预期加固效果, 冻胀、融沉现象均不明显, 在可控范围内。如兰州地铁1号线五气联络通道累计融沉注浆水泥用量仅20t左右, 融沉注浆过程中地表无明显沉降, 地层稳定性好。

五、总结

甘肃新近系、古近系含水疏松砂岩地层分布广泛, 大型地下工程中揭露的主要位于陇东区的兰州盆地内、陇中地区及其边缘地带。因其强度很低、围岩承载力极低、自稳能力极差、遇水易流变、易造成开挖面失稳, 常规加固方法无法达到开挖要求, 而冻结法发挥了独特的加固优势。虽然冻结法的成本较高, 且有一定的技术难度, 不是工程常规首要选择, 但在甘肃疏松砂岩重大地下工程中可以说是比较成功的选择。冻结法在我省疏松砂岩地层中的使用开创了省内水利工程领域、地铁隧道工程领域人工冻结法施工的先河。

(1) 在引洮工程冻结法施工中, 地层适应性强, 可有效增强疏松砂岩地层强度、降低施工风险, 为我省冻结法在水利工程领域的推广应用奠定了基础, 该洞段的顺利贯通也标志着引洮一期工程的全线贯通。

(2) 兰州地铁1号线五里铺东部市场区间联络通道也作为兰州市建筑施工中首次冻结法施工的完成, 为兰州市疏松砂岩地层施工瓶颈探索出一条成功路子。在此

基础上, 其他4处的联络通道施工进一步优化和完善, 加快了对施工各类难题的破解, 如无法进行地面加固等, 取得了不错的成绩。

(3) 冻结法可成功改良甘肃地区含水疏松砂岩地层的物理力学特性, 并在保证, 安全、绿色的前提下缩短了工期, 加固效果远比其他工法要好。

(4) 由于冻结加固方法设备及工艺复杂, 成本较高, 仅前期主动冻结就需要近50天左右, 后期施工时需要维持冻结, 并需要考虑对工程相邻关键部位冻融作用影响。因此线型工程较长距离疏松砂岩不建议使用冻结法, 但是对于疏松砂岩地层灾害严重的区段或长度适中的关键地段, 推荐首先考虑冻结法进行施工。

因此, 对于拟建和在建的兰州轨道交通3号线、4号线、5号线含水疏松砂岩地层, 地铁联络通道及关键区段建议优先考虑冻结法, 而其它地铁线路部分, 建议首先使用常规施工方法。

参考文献

[1] 陈瑞杰, 程国栋, 李述训等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. 岩土工程学报, 2000(01): 43-47.

[2] 奚家米, 熊元林, 马新民, 谢君泰. 地铁联络通道冻结法施工研究现状[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6720-6728.

[3] 魏蒙恩. 疏松砂岩工程地质特性研究[D]. 兰州大学, 2015.

[4] 徐崇锋. 甘肃引洮供水一期总干渠隧洞工程不良地质洞段处置与建设管理思考[J]. 中国水利, 2016(18): 40-43.

[5] 荆肇秦. 兰州市轨道交通区间联络通道冻结法施工风险管理研究[D]. 兰州交通大学, 2020.

[6] 刘高, 魏蒙恩, 谢裕江等. 甘肃新近系疏松砂岩成因[J]. 地质论评, 2015, 61(01): 139-148.

[7] 吴建政. 第三系富水半成岩砂岩段地铁车站深基坑地下水处理研究[D]. 兰州交通大学, 2018.

[8] 赵福登. 兰州地铁深基坑红砂岩崩解特性试验研究与分析[D]. 兰州理工大学, 2020.

[9] 兰州轨道交通. 兰州市城市轨道交通近期建设规划(2021-2026年)环境影响评价信息公示(第二次)[EB/OL]. 2020-06-16.

[10] 李宇杰. 兰州地区红砂岩分类方法及对应的基坑支护结构研究[D]. 兰州理工大学, 2020.

基金项目: 甘肃省教育厅2022年创新基金项目《兰州盆地疏松砂岩工程地质特性研究》(2022A-196); 兰州资源环境职业技术大学校级项目《兰州轨道交通疏松砂岩工程地质特性研究》(Y2021D-05)。

作者简介: 魏蒙恩(1990.01-), 男, 汉族, 甘肃兰州人, 硕士研究生学历, 讲师; 研究方向: 地质工程与地质灾害。