

Engineering Geological Investigation and Prevention Technologies for Irrigation Projects in Seasonal Permafrost Regions

Xiao Ren

Shanxi Provincial Water Resources and Electric Power Survey and Design Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shanxi, 712000, China

Abstract

Irrigation projects in seasonal permafrost regions are significantly affected by freeze-thaw cycles, presenting unique complexities in both construction and operation. These projects are vital for ensuring stable agricultural irrigation and promoting sustainable agricultural development. This paper systematically outlines the key aspects of engineering geological investigation for such irrigation projects, comprehensively reviews current research on freeze-thaw disaster prevention technologies, and identifies core research areas including geological feature analysis of permafrost zones, mechanisms of freeze-thaw disasters, key investigation points, and the establishment of prevention technology systems. The study aims to provide scientific theoretical support and practical guidance for the safe construction and long-term operation of these irrigation projects, demonstrating significant engineering application value and practical significance.

Keywords

seasonal permafrost region; irrigation district engineering; geological survey; freeze-thaw disaster; prevention and control technology

季节性冻土区灌区工程地质勘察与防控技术

任晓

陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司, 中国·陕西 西安 712000

摘要

季节性冻土区灌区工程受冻融循环作用影响显著,其建设与运维兼具复杂性与特殊性,对保障区域农业灌溉稳定、促进农业可持续发展具有至关重要的意义。本文系统梳理季节性冻土区灌区工程地质勘察的核心要点,全面总结冻融灾害防控技术的研究现状,明确以冻土区地质特征解析、冻融灾害形成机制、勘察要点提炼及防控技术体系构建为核心的研究内容,旨在为该类灌区工程的安全建设、长效运维提供科学理论支撑与切实可行的实践指导,具备突出的工程应用价值与现实意义。

关键词

季节性冻土区; 灌区工程; 地质勘察; 冻融灾害; 防控技术

1 绪论

季节性冻土在我国东北、西北、华北北部及高海拔区域广泛分布,覆盖国土面积约53%,该类区域冬季严寒漫长、夏季短促,降水时空分配不均,农业生产高度依赖灌溉。灌区工程作为区域水资源调配与农业保障的核心基础设施,其建设直接关系粮食安全、生态保护与经济社会可持续发展,是破解冻土区资源约束、推动农业现代化的关键举措,建设必要性尤为突出。冻融循环引发的土体冻胀、融沉效应,会对灌区渠道、渠堤、闸坝等构筑物造成严重破坏:渠壁开裂渗漏、衬砌剥落、渠基不均匀沉降,导致输水效率骤降;渠堤滑坡坍塌、建筑物基础变形失稳,甚至引发工程失事。近年来极端气候频发,冻融灾害的突发性和破坏性加剧,已成

为制约冻土区灌区工程安全运行的核心瓶颈,亟需开展针对性防控研究,紧迫性日益凸显。

2 季节性冻土区灌区工程地质特征分析

2.1 季节性冻土的基本特性

季节性冻土物质组成以第四系松散堆积物为主,含粉粒、黏粒、砂粒及少量砾石,有机质含量多在1%~5%。结构上呈现孔隙-颗粒-冰体复合体系,冻结后形成粒状、蜂窝状或层状结构,冰体以孔隙冰、冰透镜体及冰夹层形式存在,其分布与含量直接决定冻土结构稳定性,黏粒含量越高,土体持水性越强,冰体发育越显著。

冻融循环分为降温冻结期、稳定冻结期与升温融化期三阶段:冻结期土体孔隙水逐步结冰,体积膨胀约9%;稳定冻结期冻深持续增加,土体力学性质趋于稳定;融化期冰体消融,土体含水率骤升。影响因素包括气候(年均温、冻结时长、温差幅度)、土体含水率(临界含水率为

【作者简介】任晓(1989-),男,中国山西运城人,硕士,从事水利工程地质勘察研究。

15%~25%)、地下水位(埋深 $< 3\text{m}$ 时影响显著)及工程扰动程度,极端气候会加剧循环强度与频次。

2.2 灌区工程区地质条件分布规律

灌区多分布于平原、河谷阶地及山间盆地,地形坡度平缓($< 5^\circ$),利于灌溉系统布局。地层岩性自上而下为耕植土(0.3~1.0m)、粉质黏土(1~5m)、粉土(3~8m)、砂层及砾石层(埋深5~15m),其中粉质黏土与粉土为主要冻融敏感层,砂层与砾石层渗透性强,冻融影响较轻微。地下水以潜水为主,部分区域发育承压水,潜水埋深1~5m,水位季节变化幅度1~3m,主要受大气降水、地表水补给,径流方向与地形一致,排泄以蒸发、侧向径流为主。承压水埋深 $> 10\text{m}$,水位稳定,对浅层冻土冻融过程影响有限,而潜水水位升高会显著增加土体含水率,加剧冻融灾害风险。

3 季节性冻土区灌区工程地质勘察要点

3.1 勘察工作总体要求与流程

勘察分为规划、可行性研究、初步设计、施工图设计四个阶段:规划阶段侧重区域冻土分布与地质条件概查,明确工程建设可行性;可行性研究阶段开展初步勘察,查明冻土类型、冻融深度及主要地质问题;初步设计阶段实施详细勘察,精准获取冻土物理力学指标与水文地质参数;施工图设计阶段进行补充勘察,针对性解决局部复杂地质问题,为施工方案制定提供依据。需严格遵循《冻土工程地质勘察规范》(GB 50324-2014)、《灌区工程地质勘察规范》(SL 188-2005)等国家标准与行业规范,结合区域气候特征与工程规模,明确勘察精度要求,确保勘察成果的科学性、准确性与适用性。遵循“先区域后局部、先宏观后微观、先地面后地下”原则,兼顾勘察效率与成本,优先部署在冻土敏感区、不良地质现象发育区及工程关键部位(如渠首、闸坝基础、渠堤边坡),确保勘察点布置均匀、重点突出,覆盖工程全部影响范围。

3.2 基础资料收集与现场调查要点

收集区域地质图、水文地质调查报告、气象资料(近30年气温、降水、冻结期数据)、冻土分布图及地下水位动态监测数据,重点梳理地层岩性分布、断层构造位置、地下水补径排规律及历史冻融灾害记录,为勘察方案制定提供基础支撑。实地调查地形地貌(坡度、坡向、微地貌单元)、冻土分布边界与冻融痕迹(冰丘、冻裂、融陷坑),记录已有工程(渠道、建筑物)的病害类型(开裂、沉降、渗漏)及分布特征,识别不良地质现象的发育规模与影响范围,初步判断冻融灾害风险等级。调研周边已建灌区的勘察设计资料、施工工艺、冻融防控措施及运行年限内的病害情况,分析不同防控技术的应用效果与适配性,总结成功经验与失败教训,为本次工程勘察与设计提供参考。

3.3 勘察成果整理与分析

报告应包含区域地质概况、冻土特性分析、水文地质条件、不良地质现象评价、冻融灾害风险预测、勘察技术总

结及工程建议等章节,附勘察点布置图、地层剖面图、冻土物理力学指标统计表等图表,确保内容完整、数据准确。构建包含冻土类型、冻胀等级、融沉等级、地下水位埋深、土体强度、不良地质发育程度等指标的评价体系,采用层次分析法确定权重,综合评定工程地质条件优劣等级(优、良、中、差)。基于勘察数据,结合冻胀率、融沉系数、土体含水率、地下水位等关键指标,采用GIS空间分析技术,将工程区划分为强敏感区、中敏感区、弱敏感区与不敏感区,明确不同分区的冻融灾害风险特征,为防控技术选型提供依据^[1]。

4 季节性冻土区灌区冻融灾害类型及形成机制

4.1 灌区主要冻融灾害类型

4.1.1 渠道冻胀开裂与渗漏

渠道作为灌区输水核心,受冻融作用影响最为显著。冬季土体孔隙水结冰膨胀,产生侧向冻胀力(可达100~300kPa),导致刚性衬砌(混凝土、浆砌石)出现纵向或横向裂缝,裂缝宽度0.5~5cm,严重时贯通渠壁;冻胀破坏还会导致衬砌与基土脱空,形成渗水通道,春季融化期渗漏量较完好渠道增加30%~80%,造成水资源浪费与渠基软化。

4.1.2 渠堤融沉变形与滑坡

渠堤多由粉质黏土、粉土回填压实而成,冻结期堤身土体膨胀隆起,融化期冰体消融后,土体结构松散、承载力下降,在自重与水压力作用下发生不均匀融沉,沉降量可达5~20cm,导致堤顶沉降、边坡鼓凸;当融沉引发边坡土体抗剪强度降至临界值,结合地下水渗透力作用,易引发顺层滑坡,滑坡体厚度多为1~5m,威胁渠堤整体稳定性。

4.1.3 建筑物基础冻害

泵站、闸坝、渡槽等建筑物基础多坐落于冻融敏感层,冻结期基础周边土体冻胀产生向上的冻胀力,融化期则因融沉产生向下的附加沉降,反复冻融导致基础出现不均匀沉降(沉降差 $\geq 2\text{cm/m}$),进而引发上部结构开裂、位移,严重时导致建筑物功能失效,甚至结构坍塌。

4.2 冻融灾害形成的影响因素

土体性质是核心内在因素,粉质黏土、粉土因颗粒级配适中、持水性强,冻胀融沉敏感性最高;土体含水率超过15%后,冻胀率显著上升,饱和土体冻胀危害最为剧烈;地下水位埋深 $< 3\text{m}$ 时,会持续为冻结层提供水源补给,加剧冰体发育,埋深每减小1m,冻胀强度增加20%~30%。

气候条件起主导作用,年均负温低于 -2°C 、冻结期超过120天的区域,冻融循环强度大;极端低温与温差剧变会加速土体结构破坏。工程设计中渠道断面形式不合理、衬砌厚度不足、基础处理不当,施工中冻土扰动、压实度不达标、防渗排水系统不完善,均会降低工程抗冻能力,诱发或加剧冻融灾害。

4.3 冻融灾害演化过程与机理分析

冻胀灾害遵循“水分迁移-冰体形成-体积膨胀-应力