

藏南某光伏场地季节性冻土冻融问题与致灾机理研究

潘冬, 单树成, 黄声林

(四川省第七地质大队, 四川 乐山 614000)

摘要 青藏高原高海拔地区光伏电站的快速发展, 对季节性冻土区的工程地质稳定性评价提出了迫切需求。本文以西藏山南市乃东区一座海拔 5 046 ~ 5 222 m 的光伏电场为研究对象, 通过现场地质调查、长期地温监测、路基变形测量及室内资料分析, 系统研究了该场区季节性冻土的发育特征、冻融过程及其对工程的潜在危害。本研究结论证实, 在类似乃东区的高寒、干旱、粗粒土广泛分布的地区, 季节性冻土并非光伏电站建设的限制性因素, 但需在设计中考虑其周期性变形特性。本研究旨在为青藏高原同类新能源建设的场址选择与地基设计提供有益参考。

关键词 光伏场区; 季节性冻土; 冻胀融沉; 高海拔工程

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.042

0 引言

青藏高原作为全球气候变化敏感区和我国重要的生态安全屏障, 同时也是清洁能源富集区。近些年, 高原光伏发电产业迅猛发展, 大量光伏电场建于高海拔山区, 这些区域广泛分布着季节性冻土。季节性冻土周期性的冻融作用通过冻胀和融沉效应^[1], 严重威胁着路基、边坡及建筑物基础的稳定性, 是寒区工程建设面临的核心地质问题之一。然而, 以往研究多集中于多年冻土区, 对于海拔超过 5 000 m、气候干旱、以粗粒碎石土为主的高山地区的季节性冻土研究相对薄弱。西藏山南乃东区某光伏场地海拔 5 046 ~ 5 222 m, 是研究此类特殊环境下季节性冻土问题的理想案例。前期工作初步认定该光伏场区冻土危害小, 但缺乏系统的学术分析与理论探讨, 本文通过详细的现场观测数据, 深入剖析该场区季节性冻土的冻融特性与灾害发育机制, 并综合评估其工程适宜性, 能够填补相关研究上的空白, 指导高原新能源基础设施的规划与建设, 具有一定的理论和实践意义。

1 研究区基本特征概述

1.1 工程属性

本次研究对象为光伏场区, 光伏场区阵列工程采用微孔灌注桩和螺旋钢管桩基础形式, 其长度为 2 m, 地上 0.3 m, 地下 1.7 m, 均按照原始地貌进行建设,

现已建成, 未破坏原始地形地貌。另外, 光伏场区施工道路工程现已建设完成。光伏场区整个场地地形平缓, 地势相对较高, 属于西藏高海拔地区新能源建设的典型工程。

1.2 地质概况

研究区出露地层主要为第四系全新统残坡积层碎石土和三叠系上统江雄组砂质板岩夹变质砂岩。其中浅表层为残坡积碎石土, 杂色, 松散状, 架空现象明显。粒径 $\Phi > 20$ mm 含量约占 56.6%; 角砾成分主要为板岩、变质砂岩等, 中~微风化, 棱角状; 无定向排列, 分选较差, 广泛分布于研究区。下覆基岩为江雄组砂质板岩, 深灰色, 主要成分为砂质板岩, 夹薄层变质砂岩等, 具中薄层板状构造, 层厚约 1 ~ 200 mm, 节理、裂隙较发育, 岩体破碎~极破碎状, 短柱状, 锤击声较清脆, 为 IV ~ V 类岩体。地层轻度变质, 广泛分布于研究区。

研究区域内三叠系上统江雄组变质砂岩、板岩等在附近褶皱、断裂构造的影响, 岩层整体发生倒转, 整体向南倾斜, 岩层产状 $180^\circ \sim 270^\circ \angle 20^\circ \sim 65^\circ$, 优势岩层产状为 $240^\circ \angle 35^\circ$ 。岩层中主要发育两组节理, L1 产状为 $34 \ 555$, 延长 0.5 ~ 10 m, 间距 0.1 ~ 0.3 m 不等, 少量泥质充填, L2 产状为 $8 \ 580$, 延长 0.5 ~ 5 m, 间距 0.1 ~ 0.3 m 不等, 少量泥质充填。

作者简介: 潘冬 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水文地质、工程地质与环境地质。

1.3 气象、水文特征

冻土首先是温度等于或低于摄氏零度时才可能产生^[2]。研究区地处内陆,冬、春季节水汽来源主要为中纬度偏西风的输送,但因喜马拉雅山脉屏障作用,低层气流难以直接到达,造成河谷区域水汽不足,干季水汽条件差,同海拔覆冰程度较盆地边缘山区及川西南地区显著减轻。

光伏场区位于青藏高原中部的乃东区南侧山顶,属高原温带半干旱气候。年平均气温介于 $6.0\sim 8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温达 $-18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,全年冻结期长达5个月(12月至次年4月)。场区海拔高,空气稀薄,太阳辐射强烈,昼夜温差大。据实地调查和历史资料考证,区内周边山上曾不同程度发生过树枝覆冰现象,覆冰类型为湿雪,沿线公路的电线或通信线上个别年份发生过薄冰现象,河谷内积雪深度不超过10 cm。研究区昼夜温差大,天气变化大,垂直分带明显,因此气象条件完全满足工程区冻土冻融地质灾害的形成。

光伏场区地下水类型主要为松散层孔隙水及基岩裂隙水,第四系松散岩类孔隙水主要赋存于角砾、碎石土中,属上层滞水,接受大气降雨、融雪及地表水体的补给。基岩内基岩裂隙水埋深较大,主要受到降雨、融雪补给。根据已有资料分析,研究区地下水埋深较大,超过约15 m,全年地下水位涨幅约 $1\sim 2\text{ m}$ 。

2 研究方法 with 成果分析

2.1 本研究采用的研究方法

本研究综合运用现成调查与测绘、长期原位监测与多源资料分析相结合的研究思路,系统性地探究光伏场区工程地质环境特征及其动态变化规律。

1. 现场调查与测绘。在光伏场区及其周边区域开展全面的野外实地调查与工程地质测绘工作,详细记录光伏场区地貌、地层、水文地质条件及光伏场区内施工道路的变形迹象^[3],如不均匀沉降、裂缝、鼓包等,并标注其位置、规模与形态特征,为后续分析提供详实的一手基础资料。

2. 长期原位监测。在光伏场区内布设监测点^[4],于2024年2月、5月、8月、11月四个典型时间点进行观测。监测内容:一是进行地温监测,主要记录地表及浅层地温变化;二是变形监测,采用水准测量方法,监测路基的垂直位移—冻胀与沉降情况^[5];三是进行含水率测试,在监测点附近的路基填料中采集未扰动的碎石土原状样品或按规定方法取代表性试样,随后采用烘干法或其他标准试验方法,测定其体积含水率。

3. 资料分析。结合《西藏自治区季节性冻土标准冻深分布图》及区域地质资料,进行综合分析。

2.2 季节性冻土基本特征

光伏场区冻土类型主要为季节性冻土,寒季冻结,暖季融化,土体在自身重力的作用下容易产生沉陷。结合《西藏自治区季节性冻土标准冻深分布图》(地矿眉山工程勘察院2016年)^[6],研究区季节性冻土的标准冻结深度为 $50.1\sim 100\text{ cm}$ 。现场调查表明,光伏场区及周边天然地表和已建道路未见明显的裂缝、鼓包、塌陷等冻融灾害现象,直观显示灾害发育微弱。

研究区光伏场地分布的冻土类型属于典型的季节性冻土,这类冻土对温度变化响应极为敏感,其核心特征是伴随年际气候节律发生周期性的相变循环^[7]:在寒季,当气温稳定低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土体中的孔隙水与地下水逐渐冻结形成冰晶体,导致土体体积膨胀、强度增高;进入暖季,随着气温回升,冰晶体融化,土体含水率升高、强度显著弱化,并在自身重力及外部荷载作用下发生固结排水,从而容易产生不均匀融沉。冻融过程的年复一年循环,是引发场地变形、构筑物破坏等一系列寒区工程地质灾害的根本原因。为定量评估本区域的冻融灾害潜势,研究引用了《西藏自治区季节性冻土标准冻深分布图》(地矿眉山工程勘察院,2016年)的权威数据。根据该图件的界定,研究区所处的季节性冻土标准冻结深度范围为 $50.1\sim 100\text{ cm}$ 。这一数据从理论上揭示了本场地具备发生显著冻胀与融沉变形的的基本气候条件。

然而,详细的现场调查结果显示,场地的实际冻融灾害发育程度与理论潜势存在明显差异。在光伏场区内部、周边天然地表以及已建设的场区道路范围内,均未见明显的地表裂缝、鼓包(冻胀丘)、塌陷(热融洼地)等典型的冻融灾害地表形态标志。这种宏观现象的缺失,直观地表明在当前自然条件下,研究区的冻融灾害发育程度整体微弱,尚未形成对地表结构与工程设施具有显著影响的地质灾害。

2.3 冻融变形监测结果

为进一步完成本次研究工作,研究小组于2024年2月8日、5月14日、8月2日和11月26日分别对光伏场区进行现场试验和监测,实验成果见图1。

图1中的监测数据揭示了清晰的冻融变形规律。在冻胀阶段,当地表温度降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下后,光伏场区内路基开始冻胀。冻胀量在严冬季节(2月)达到峰值,最大冻胀量为 1.2 cm 。在融沉阶段,春季气温回升,光伏场区内冻土层自上而下融化,产生融沉。至夏季(8月),融沉基本完成,最大融沉量为 0.5 cm 。总体来说,光伏场区内道路路基的沉降变形主要发生在道路建成后的第一个冻融周期内,随后趋于稳定。而冻胀变形

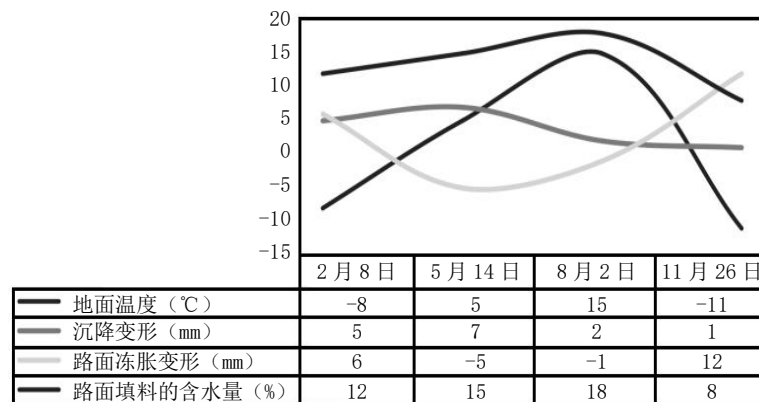


图1 试验成果

则呈现显著的年周期性,其幅度与冬季负温累积值和路基土体的含水率直接相关。

2.4 光伏场区冻融灾害发育条件分析

本研究从光伏场区冻融灾害形成的三个基本条件进行分析。一是冷源条件充分。光伏场区内漫长的冬季和 -18.3°C 的极端低温,为土体冻结提供了充足的冷源;二是水源条件匮乏。这是导致光伏场区冻融灾害不发育的关键制约因素。极大的地下水埋深(大于15 m)和透水性好、保水性差的碎石土地层,使得毛细水补给几乎不存在,土体天然含水量低,极大地限制了冻结过程中水分迁移和冰透镜体的形成,从而抑制了冻胀;三是土体条件有利。光伏场区内的浅层土体为粗颗粒的碎石土,其内部骨架为冻胀提供了内部空间约束,其本身冻胀敏感性远低于粉质黏土等细粒土。

3 讨论

3.1 灾害危害程度小的成因机制

本研究认为,乃东区该光伏场区季节性冻土危害程度小的根本原因在于强冷源与弱水源的耦合效应。尽管气候寒冷提供了强烈的冻结驱动力,但极度干旱的水文地质条件和非冻胀敏感性的碎石土地基,共同构成了抑制冻融灾害的天然屏障。这使得土体在冻结过程中缺乏水分迁移和成冰的物质基础,因此仅产生幅度有限(厘米级)的整体胀缩,而非破坏性的不均匀冻胀。

3.2 对光伏项目实践的启示

基于本次研究成果,对光伏场区类似工程得出三个方面的启示。一是本场区地基条件适宜,无需采取昂贵的换填、保温板等特殊防冻胀措施。光伏支架基础可采用浅基础,但需考虑其与碎石土地基的锚固性能;二是施工道路的路面结构应具备一定的柔性,以适应年度的冻融循环变形。在工程施工中,应重点应做好路面排水,防止外部地表水入渗增加路基含水量;

三是需进行长期监测工作,尽管当前危害程度小,适宜建设光伏工程,但在气候变化和工程活动背景下,建议建立长期监测系统,关注冻融动态的潜在变化。

4 结论

1. 研究区冻土类型属季节性冻土,冻结深度为 $0.5\sim 1.0\text{ m}$,综合判定为不冻胀、不融沉。

2. 研究区冻融灾害不发育的主控因素是光伏场区内极度干旱和地基土体为透水性好的碎石土,二者共同限制了冻胀所需的水分来源。

3. 现场监测表明,光伏场区冻融变形表现为年周期性,最大冻胀量 1.2 cm ,最大融沉量 0.5 cm ,属于可控的弹性变形范围,对工程稳定性不构成实质性威胁,适宜建设光伏工程。

4. 该案例表明,在高寒干旱、以粗粒土为主的高海拔地区,季节性冻土并非光伏电站建设的绝对限制因素,具备良好的工程适宜性。研究成果对青藏高原新能源基础设施的科学发展具有参考价值。

参考文献:

- [1] 李瑞涛,袁其华,范庆华,等.寒冷地区季节性冻土路基土强度与冻胀敏感性的关联规律研究[J].时代汽车,2025(20):19-21.
- [2] 何蓓蓓,雷文君,郑盐源.西藏阿里地区气候变化及其对季节性冻土的影响[J].陕西农业科学,2025,71(12):70-77.
- [3] 雷成林.季节性冻土区公路路基冻融病害机理及养护修复技术研究[J].运输经理世界,2025(36):111-113.
- [4] 李静,白利舫,刘辉,等.季节性冻土冻融周期多场地球物理探测与监测[J].地球物理学报,2025,68(08):3011-3024.
- [5] 苏玉涛.季节性冻土区路基主动保温层厚度优化设计与施工工艺[J].交通世界,2025(34):120-122.
- [6] 同[1].
- [7] 同[2].