

水利工程异常地质体地球物理探测分析与应用

何禹 康方平 郭海 李强

湖南省地质调查院

DOI:10.12238/gmsm.v7i12.2055

[摘要] 随着水利工程的建设规模不断扩大,工程安全性逐渐受到关注。异常地质体的存在对水利工程的稳定性及安全性带来了潜在威胁。地球物理探测技术作为一种高效的探测手段,能够对水利工程项目周边的地质体进行精准分析,为工程设计、施工和后期监测提供科学依据。本文对水利工程中异常地质体的地球物理探测方法进行分析,结合实例探讨其在实际应用中的优势和局限性,并提出相应的优化措施,为提高水利工程的安全性与可靠性提供参考。

[关键词] 水利工程; 异常地质体; 地球物理探测; 应用分析; 工程安全性

中图分类号: TV 文献标识码: A

Analysis and application of geophysical exploration of abnormal geological body in water conservancy engineering

Yu He Fangping Kang Hai Guo Qiang Li

Hunan Provincial Geological Survey Institute

[Abstract] With the continuous expansion of the construction scale of water conservancy projects, the safety of the project has gradually attracted attention. The existence of abnormal geological body brings a potential threat to the stability and safety of water conservancy project. As an efficient detection means, geophysical detection technology can accurately analyze the geological bodies around water conservancy projects, and provide scientific basis for engineering design, construction and later monitoring. This paper analyzes the geophysical exploration method of abnormal geological bodies in water conservancy projects, discusses its advantages and limitations in practical application, and puts forward corresponding optimization measures to provide reference for improving the safety and reliability of water conservancy projects.

[Key words] water conservancy engineering; anomalous geological body; geophysical exploration; application analysis; engineering safety

引言

水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分,在防洪、灌溉、水资源调配等方面发挥着重要作用。然而,水利工程的建设和运营过程中,异常地质体的存在可能对工程安全性造成隐患。异常地质体包括滑坡、断层、溶洞等,其在水利工程建设中可能引发沉降、滑移、渗漏等问题。因此,在水利工程的前期勘察阶段,采用有效的地球物理探测手段对地质情况进行全面评估,能够有效识别潜在的地质风险,保障工程的顺利推进。

1 异常地质体的分类与特点

在水利工程中,异常地质体的种类繁多且分布广泛,常见的异常地质体包括以下几类:

1.1 滑坡体

山地丘陵区域滑坡灾害普遍发生,不容忽视。此类滑坡灾害的诱因,往往与地质的脆弱性、大量的降水以及人类活动的频繁

性紧密相连,滑坡体的结构形式为松散岩土层与积水层等的结合,该结构物质特性以高流动性及低稳定性为显著标志。滑坡的形成与过量降水、土地开发、矿山开采、建筑作业等关键要素紧密相关,遭遇滑坡之际,土壤与岩石位移现象普遍显现。此类位移对土地造成了极大的破坏,也可能威胁周边基础设施、农业用地及居民生活安全。在水利工程过程中,若滑坡体存在,坝体可能产生滑动和沉降现象,若状况加剧坝体坍塌的可能性必须警惕,坝体安全风险较高^[1]。努力降低滑坡灾害的潜在风险等级,加强滑坡区监测、评估与防治措施执行力度,特别是对滑坡体周边稳定性分析与工程技术设计的深入分析与严格执行,确保水利设施在复杂地质条件下的安全运行能力。

1.2 断层

地壳运动及岩层应力变化诱发岩石层裂隙,断层带位移现象已出现。这种现象定义为断层,地质构造活跃区域广泛分布,

尤其是地震高发地带和板块边缘带，断层在板块边缘带普遍分布。根据断层特性及其运动方向进行划分，断层的性质与运动方向存在不同特点，断层性质与运动向度的差异，使得断层可细分为逆断、正断及走滑断等几类。断层活动对水利工程的稳定安全构成威胁，地基稳定性问题首当其冲，断层带周边地区，断层带周边的岩土层普遍存在物理力学特性的不均匀性。此类非均质性转变或许引起土层压缩、剪切等物理性质的关键性调整，进而显著改善建筑结构的承载状态。该区域地震活动频繁，当前水利设施正面临突发震动及破坏的威胁风险，在水利工程设计与施工过程中，需对区域断层进行详尽调研，详尽掌握其分布、特性及运动机制。以此为根据，科学规划地基与支撑结构布局，并实施必要的加固与抗震措施，确保工程安全与耐久性标准。

1.3 溶洞

岩溶地带，溶洞是其典型的地质标志，地下水化学溶蚀作用机制探讨，地下水化学溶解，赋予了可溶性岩石（如石灰岩、白云岩等）构成的地下空间独特形态，溶洞的诞生往往需经历漫长的岁月，地下水渗透岩石的缝隙，缓缓侵蚀，岩石与矿物质在地下水的侵蚀作用下不断溶解，终成空洞。溶洞在岩溶区域普遍存在，石灰岩地带的分布形态特别引人瞩目，形态多样规模丰富特征显著^[2]。水利工程面临溶洞的侵扰风险，可能诱发地基沉降、裂缝以及水流渗透等一系列不利后果。溶洞形成阶段内，一般会对土壤及岩层的密实度造成显著变化，进而引起地下水流动的不正常变化，或造成工程沉降及结构变形问题。地下水渗漏现象中，溶洞作为介质存在，可能对水利工程的水源稳定性构成干扰。洞窟研究及整治对于水利工程战略布局具有重要意义，应预防溶洞可能对工程建设带来的潜在隐患，施工区域地质勘探需精确深入，精确描述溶洞的分布形态，实施加固、填充与排水施工工程，巩固工程结构的稳定与安全特性。

2 地球物理探测方法及其原理

2.1 地震勘探法

此技术以人工震源为工具，激发出地震波的传播，分析地震波在地下介质中的反射和折射现象，以探查地下结构为目标。此技术依赖对地震波传播速度与路径的精确分析，精确体现地下结构变动趋势，地下介质的密度与弹性模量等物理性质，此速度与地震波传播紧密绑定。依托地震勘探技术，可迅速识别地下异常，能快速发掘地下异常地质情况，地质异常现象，断层、滑坡及溶洞等。在水利建设行业，采用地震探测法，地下地质构造的细节显现出来，借助断层和裂缝，设计施工团队可辨识潜在风险，维持工程安全水平。地震勘探技术借助反射波勘探与波形分析等辅助工具，大幅提高了探测的精确性与可靠性，对工程作业起到核心指导效能。

2.2 电磁法

电磁法借助地下介质感应电磁波的特性进行推断，探讨地下物质的组成与结构。电磁波在地层中蔓延，遭遇性质各异的地质体时，遭遇性质不同的介质，电磁波在穿越不同介质时，会出

现反射、折射及衰减现象，电磁波传播特性揭示了地层的电导率与磁导率等物理属性^[3]。水利工程地质勘探领域，电磁法应用成效明显，尤其是在识别高导电性地质结构时，探查含水层、盐水层等复杂地质结构，电磁法表现良好。该技术采用识别地下介质电导率波动的方式进行，此技术对地下介质电导率的变化有敏锐的识别能力，运用此技术，能揭露溶洞、裂缝等地质形态。电磁法在检测土壤湿度及岩层厚度等关键地质指标上具有非凡表现，地质信息获取是水利工程设计与施工的基础环节。电磁探测技术日新月异，探测深度及精度明显增强，电磁探测技术已跨越至水利、矿产和环境等行业，加强地质灾害防治的后盾力量。

2.3 重力与磁力探测法

地质勘探的得力助手——重力与磁力探测，依据地下物质密度与磁性差异这一条件，有效识别地质异常特征，重力法依据地下物质密度差异进行探测，分析重力场位移，进而辨别出地下岩层的构造异常区域。磁法则则依据地下岩石磁性的特性差异进行推断，深入分析地下磁性矿物的分布格局及构造异常的细节，在水利工程勘探技术这一专业范畴，这两种技术在水利工程勘探领域展现出了显著的成效。在探测工具不足之处，尤为显著，在深层地质识别阶段进行时，数据辅助作用。采用重力与磁力数据解析技术，精准定位地下溶洞、断层等地质结构的分布格局，促进水利工程规划及风险评估的实施步伐，重力磁力探测技术在深层探测表现上十分抢眼。在大区域高精度勘探方面，该技术表现尤为突出，技术对地下异常结构的研究产生了积极效果，此技术特别擅长应对大规模且结构繁复的地质勘探任务。

3 地球物理探测技术在水利工程中的应用

3.1 水坝地质勘察

水坝建设的基础是地质勘探，关乎其稳固与安全，基础之核心。水坝建设前，工程技术、坝址地质状况及潜在风险需进行双重审查，该流程普遍依赖地震、电磁、钻探、取样及地质雷达等多种勘探技术，全面揭示地质构造细节。地震勘探技术借助振动波发射及反射波解析技术，成功探测地质结构，可测定地下岩层的厚度及密度属性，还能揭示地下断层、裂缝等地质结构的分布图景。利用这些资料，工程师能分析坝址的地震活动特征，或许能探测到滑坡隐患的潜在风险源，电磁法探测，地下电磁场的变化为其助了一臂之力，探究地质材料的导电特性。电磁法作为一种非侵入性勘探技术，能够有效识别地下水、岩层变动等潜在威胁因素，从而帮助勘察人员提前发现坝体可能面临的隐患。通过对地下电磁场的变化进行监测，电磁法能够揭示地下结构的物理特性变化，进而识别水流路径、土壤湿度以及岩层的变化情况。这对于预测水库坝体的稳定性、评估水库周边环境的安全性具有重要意义。

水坝建设早期阶段，水坝建设初期，水坝建设早期，地质勘探主要借助钻探取样与地质雷达技术，钻探技术能够获取岩土样本，工程师对土壤、岩石性质和水分含量的分析变得简便，可估算地基的承载性能^[4]。地质雷达技术对地下岩层构造进行细致分析，借助地质雷达技术，能揭示常规手段不易发现的地下地

质问题,凭借尖端的高科技地质勘探技术,工程师对坝址地质状况了如指掌,了如指掌,工程师对坝址的滑坡、断层等风险源进行了细致分析,为水坝设计施工提供技术后盾,维护水坝地质稳定,水坝地质安全是水利工程稳定运行及防灾减灾的核心基础。

3.2 地下水文条件分析

水坝、隧道等水利项目的施工阶段,地下水分布与之紧密相扣,地下水对地基稳定性、施工安全及长期使用构成潜在威胁。地下水流动模式、含水层厚度及水位变化等关键参数,水利工程的安全正受潜在威胁的困扰。地下水分布的细节掌握是核心,这乃水利工程顺利实施的关键所在,地下水分布调查依赖地球物理探测技术的关键支持,执行电阻率测量、地震波探测与电磁法等地球物理探测方法,能精确分辨地下水流向及含水层深度与厚度等关键要素。电阻率法能区分地下岩土的电导率差异,助力识别含水层与干燥层的分布差异,展现地下水流动的行进轨迹,对地下水储存及流动特性进行评估,此方法特别恰当,此法对水坝、隧道等工程设施的设计给予了科学支持。

3.3 溶洞与裂隙检测

水利工程建设中,溶洞与裂隙普遍表现为地质异常,若未能及时洞悉,将严重威胁水利设施的安全与稳定,造成不良影响。洞穴结构的不稳定往往引起地下水流动的异常波动,可能对水坝及隧道的安全带来潜在风险。地壳变动与应力变化引发岩石裂缝,这些裂缝构成了地下水流动的路径网,进而导致水坝等工程出现渗漏及地基沉降等后果。洞裂分布与规模预测至关重要,关乎水利工程能否顺利推进,洞裂的精确认识与尺度量化是关键环节,洞裂的规模与位置判断,是水利工程顺利实施的核心要求。力求精确认识此类地质问题,现代水利设施勘查普遍采用电磁探测与地震勘探技术相结合的方式。电磁法借助地下电磁场波动开展探测工作,地质结构探测的技术实施路径,地质体的电磁性质各有差异。电磁法能辨别含水层、溶洞及裂隙等地质体的导电特性,本技术在地下水流和含水层的探测上表现非凡,可精确锁定溶洞、裂隙等地质异常体的具体位置及其分布格局。

地震勘探技术利用震波发射与反射波特性进行探测,描绘地下地质结构的分布图景,探讨地震波传播速度与反射信号的相互依存关系,有助于发现地质异常。诸如溶洞、裂隙等,的分布、深度和面积,在地质勘探的大规模实施阶段,在地质勘探中,

这项技术尤为突出,能精确描摹地下结构。采用此技术,设计人员在水坝与隧道施工中可安全绕行溶洞及裂隙密集带。电磁法与地震勘探技术相互配合,实现溶洞及裂隙的高精度探测目标,开展综合技术手段的勘探工作,详尽的地质信息助力工程设计。依托这些资料,设计者可对工程结构进行合理配置,实施加固施工步骤,维护水利设施的安全运行^[5]。该行动对施工风险管理起到了稳固的支撑效果,该行动有效降低了地质因素引起的工程事故风险。

4 总结

综上所述,地球物理探测技术在水利工程领域扮演着至关重要的角色,特别是在识别和分析那些异常地质体方面。这项技术通过运用多种地球物理探测手段,能够有效地揭示水利工程项目中潜在的地质风险,从而确保工程的顺利进行以及长期的运营安全。然而,尽管地球物理探测技术在水利工程中具有显著的应用价值,它仍然面临着数据处理复杂、适应性差等挑战。为了克服这些难题,未来的发展方向应当集中在技术创新和方法优化上,以期进一步提升地球物理探测技术在水利工程中的应用效果和效率。

【基金项目】

HNGSTP202521湖南省不同类型地热资源电磁模型构建与高效探测技术研究。

【参考文献】

- [1] 何灿高,王杰.水利工程异常地质体地球物理探测分析与应用[J].水利建设与管理,2024,44(3):19–23.
- [2] 尹剑,徐磊,陈爽爽,等.水利工程地球物理探测技术发展与展望[J].水利水电快报,2022,43(2):9.
- [3] 张向鹏,聂荣花.地震勘探技术在解释地质异常体的应用分析[J].工程地球物理学报,2013,10(4):7.
- [4] 张杨,周黎明,夏波.滇中引水工程隧洞综合超前地质预报分析及应用[J].长江科学院院报,2024,41(10):124–132.
- [5] 李根泽.高山地形下水利水电工程不良地质体快速探测识别研究[J].四川水利,2025,(45):35–37.

作者简介:

何禹(1983--),男,汉族,湖南长沙人,硕士研究生,地球物理勘查与遥感高级工程师,环境与工程地球物理方向。