

基于三维地质建模的山区水文地质调查与滑坡灾害治理协同研究

钱士勇

江苏省生态地质调查大队 江苏省南京市 210000

【摘要】我国山区广大,由于地质环境复杂,导致滑坡频繁发生,严重威胁着人民群众的生命财产安全。在传统水文地质调查过程中,与滑坡灾害防治存在信息碎片化、过程脱节的现象,难以对滑坡灾害的内在机理进行针对性的分析,无法制定相应的治理措施。因此,本文旨在探讨如何将三维地质建模技术应用在山区水文地质调查与滑坡灾害防治深度融合协调过程中,并在此基础上,该模型可进一步为水文地质数值进行建模,动态模拟降水和人类工程活动等地下水水位波动及滑坡稳定性的影响,从而为滑坡灾害风险评估、监测预警系统优化、治理方案(如排涝隧道布置、抗滑桩布置)的比较和效果预测提供相应的量化平台,另外通过阐述“调查-建模-仿真-治理”的全链条协同技术路线,为山区地质灾害的精准识别、滑坡灾害机理和防治措施提供有效的数据支持。

【关键词】三维地质建模;山区水文地质调查;滑坡灾害治理协同

Collaborative Research on Hydrogeological Survey and Landslide Hazard Mitigation in Mountainous Areas Based on 3D Geological Modeling

Qian Shiyong

Jiangsu Provincial Ecological Geological Survey Brigade, Nanjing City, Jiangsu Province 210000

【Abstract】 China has vast mountainous areas, where the complex geological environment leads to frequent landslides, posing a serious threat to the safety of people's lives and property. In the traditional hydrogeological survey process, there is a phenomenon of information fragmentation and process disconnection with landslide disaster prevention and control, making it difficult to conduct targeted analysis on the inherent mechanism of landslide disasters and impossible to formulate corresponding control measures. Therefore, this paper aims to explore how to deeply integrate and coordinate the application of 3D geological modeling technology in the hydrogeological survey and landslide disaster prevention and control process in mountainous areas. On this basis, the model can further model hydrogeological numerical values, dynamically simulate the impact of precipitation and human engineering activities on groundwater level fluctuations and landslide stability, thus providing a corresponding quantitative platform for landslide disaster risk assessment, monitoring and early warning system optimization, comparison and effect prediction of control schemes (such as drainage tunnel layout and anti-slide pile layout). Additionally, by elaborating on the full-chain collaborative technical route of "survey-modeling-simulation-control", it provides effective data support for precise identification of geological disasters in mountainous areas, mechanism analysis of landslide disasters, and prevention and control measures.

【Keywords】 3D geological modeling; hydrogeological survey in mountainous areas; collaborative landslide disaster mitigation

引言

山区本身具有水源涵养区和生态屏障的特点,在世界上许多国家和地区占据重要的地位,其水文地质条件直接关系到水资源的可持续供应、地质灾害发生频率和生态平衡的稳定。而山区地形凹凸不平,地质构造复杂,随着自然因素的因影响造成岩性多变,同时风化带、破碎带和断裂带相互交织,使得地下水系统的空间分布具有非均质性和各向异性的特点,而传统水文地质调查主要依靠地面勘探、钻井和物探技术,形成二维平面图和剖面图,传统测绘方法在测绘三维

地质及其内部的水系统时存在一定的局限性,研究人员无法形成整体、连续空间认识,从而无法准确判断含水层边界、地下水径流路径和富水模式等问题。基于此,构建滑坡灾害全生命周期治理协同研究平台,打破专业壁垒,实现数据共享和动态更新,对于推动地质灾害防治领域的技术进步具有重要意义。

1、山区水文地质调查的挑战与困境

山区常常伴有地形起伏较大、地质构造复杂、岩石类型

多变、地表覆盖物厚度不均匀(如风化壳、残坡沉积)等特点,与平原地区相比,山地水文地质系统具有高度的非均质性和各向异性,在强烈的地壳运动中形成了复杂褶皱、断裂和节理体系,同时岩体也会被切割成不连续的块体,导致含水层空间分布极不规律,显著提高了不同方向渗透率;地下水与地表水转换频繁,山区地形陡峭,地下水径流路径短,排放速度快,与地表水(河、溪、沟)紧密相连,形成了“山高水高”、泉水点众多的独特景观,这种转化方式使得水资源在评价过程中,必须将地表水和地下水作为统一的系统来进行评价;在地形勘察过程中,由于地形陡峭,交通不便不仅增加了钻探、物探等调查方法的成本,还增加了勘察的时间,造成观测点获得的数据有限,难以通过插值对区域水文地质条件形成进行准确勘察^[1]。

传统的调查结果大部分都以二维平面图、剖面图等形式展现,这些方法虽然可以宏观对图形进行认识,但无法展现出地质体在三维空间中的分布、切割和接触关系,也无法对裂缝介质的渗透率张量进行定量描述。因此,在山区水文地质调查与滑坡灾害治理过程中,要引进一种能够整合多源数据、并支持定量分析和模拟技术,提高山区水文地质调查的效率,而三维地质建模技术的应用,不仅展现了自身的特点,还展现出该技术在山区水文地质调查与滑坡灾害治理的重要性^[2]。在此背景下,三维地质建模技术应用,将海量、多源、多尺度的地质信息集成在一个统一的三维数字化平台上,并构建出可视化、可量算、可分析地质结构“透明体”。

2、三维地质建模的技术流程与山区特殊性

2.1 多源数据采集与融合

地形与遥感数据的高精度数字高程模型是构建模型地表和地形约束的基础,利用遥感影像(特别是高光谱影像和雷达影像)可以识别线性构造、岩性分带和植被异常的问题,间接对含水构造进行分析;地质测绘数据包括地表地层露出边界、断层轨迹、产状、节理裂隙等,也是控制模型格的核心平面数据;地球物理勘探技术在山区测绘的应用,主要利用物探技术中的“透视”对地下构造进行分析;对探测覆盖层厚度、基岩面起伏、断层位置、风化壳厚度以及潜在的富水低阻异常区可以利用电学方法(如高密度电法、音频地电磁法)、地震折射/反射法等进行探析,同时也是二维剖面数据的三维空间定位与联合解释是构建深部模型的重要途径。通过钻探技术为垂向上最直接、最可靠的地层岩性、水位、涌水量信息提供了最直接、最可靠的信息;而井泉数据主要是泉水出露点、流量和动态验证模型和反演水文地质条件的重要依据。山区勘探的成本高,地质复杂,与物探资料的相互验证和约束息息相关;水文气象与降水量、蒸发量、河流流量等相关,也是确定模型边界条件和源汇项的基础^[3]。

2.2 三维地质结构模型的构建

获取多源数据后,开始核心模型构建,目前剖面/图件的表面建模法和多源数据的离散光滑插值法属于建模的主流方法。表面建模法主要利用DEM生成地表模型,同时在地质图和剖面图的基础上,利用智能技术绘制各层界面和断层边界,然后通过三角网生成每个地质体的地表模型;最后将封闭曲面组合成三维实体模型,这种方法高度依赖地质人员经验,适用于地质规律比较明确、勘探程度比较高的地区;离散光滑插值法是一种更加数学化和自动化的方法,它将所有地质界面(如地层边界、断层)和地质结构属性(如岩性代码)视为三维空间中的散点约束,通过复杂的数学算法(如Cokriging方法)计算整个三维空间的属性分布,并以此生成光滑的地质界面^[4]。

2.3 水文地质调查分析

补给-径流-排放的关系,主要通过整合地形和地层模型,清晰地识别地下水补给区、主要径流路径(如沿基岩面和特定断裂带)和排泄区(如斜坡泉脚下和湿地)区域,这对判断滑坡哪个部位最先受到地下水影响比较重要。含水层的非均质性和各向异性模型能真实反映岩性变化和构造切割引起的渗透率空间变化,例如,某滑坡结构看似均质,其内部可能由于巨石、透镜体或古土壤的存在而在内部形成局部滞水体或优势流通道,在二维剖面中容易忽视这些问题,但在三维空间中可以有效地被识别出来^[5]。

2.4 滑坡水文地质机理的三维解析

滑动带富水机理主要是通过滑动带模型与地下水流场叠,分析地下水如何汇集并软化滑带,例如,该模型可以显示覆盖水层的地下水在滑带后缘向下渗流或在滑动带前缘因隔水底板隆起而溢出,从而精确定位滑坡失稳的关键水文地质因素;建立降雨入渗路径模型时,要结合地表岩性和裂缝发育程度,模拟“活塞效应”或“管道流”过程;多滑面滑坡的互动,对于具有多个滑带的滑坡,三维模型可以显示出不同滑带之间的水力联系,深层滑动体的活动可以改变浅层地下水的排泄基准面,从而诱发浅层滑坡,这种互动关系可以在三维模型中清晰展现^[6]。

3、滑坡治理全过程的协同工作机制构建分析

3.1 勘察与评价阶段协同

勘察与评价阶段的系统属于地质学家、制图工程师和建模师的核心,统一数据平台可以将所有调查数据(钻并测井、物探解释、调查点信息)上传到云协同平台,并自动与三维模型相连,当地质学家在对地层构造进行讲解时,可以直接在三维空间中进行标记,其诠释的结果可以实时可视化,避免了传统二维绘图的局限性;不确定性管理模型可以直观地呈现出,由于数据稀疏性引起的的不确定性区域(例如,通过置信区间或一组多个可能的模型来表示),同时也可以指导优化勘探方案,确定需要补充勘探的重点区域,降低成本

的投入;协同机制分析是基于统一的三维模型,地质学家和岩土工程师可以共同分析滑坡的形成机制,并通过模型的动画演示,清晰地显示出滑坡的空间形态以及地下水在滑带附近的渗流路径,从而定位滑坡类型(如推动型和牵引型)和稳定状态。

3.2 治理方案设计与比选阶段协同

参数化设计和仿真驱动,可以对治理方案中的三期为模型(如抗滑桩、挡土墙、锚索、排水隧道等)各种参数进行优化,设计人员可直接在模型上定义桩长、锚段位置、排水孔方向等位置,同时可以利用三维模型及其属性域直接导入有限元(FEM)、有限差分(FDM)或离散元(DEM)等数值仿真软件中,并计算稳定性和治理效果仿真;多方案可视化对比,可以对不同治理方案(如“抗滑桩+锚索”、“方切减载+排水”)在同一三维场景中进行对比,在对比过程中,可以要求各方同时在线,对每个方案的工程量、预期效果、周边环境的影响、项目成本等进行综合评估和讨论,标出优劣势,最终选择最佳方案;设计成果无缝传递,利用3D模型对选定的设计方案(包括结构几何尺寸、空间坐标、材料要求)进行建模,避免了二维模型中的不足。

3.3 工程施工与动态调控协同

在工程施工中,进行施工可视化交底,将复杂的三维模型分发给施工队,使一线工作人员能够直观快速地了解设计意图(特别是复杂结构的空间关系),大大减少图纸识别错误现象的发生;在施工过程中进行“动模”与“静模”互动,利用物联网技术实时传输监测数据(如深部位移、应力等),并将其整合到三维模型中,使模型由“静态”变为“动态”,同时该模型还能实时反映滑坡体在工程扰动作用下的响应,如果监测数据出现异常,模型将发出警告;当施工开挖暴露的地质条件与模型预测存在较大差异时,要对进行对设计方案进行优化,施工设计方案更新后,设计人员要根据的新的施工设计方案重新进行仿真分析,并重新建立三维模型,这种“勘察-设计-施工”的动态闭环管理,可以大大提高工程

的适应性和安全性;加强施工进度与安全管理,将施工进度计划与3D模型相连,并进行4D(3D+时间)施工模拟,优化施工工序,实现全过程的可视化管理。

3.4 地下水数值模拟集成与应用

模型转换和网格划分主要是将三维地质结构模型导入专业的地下水流模拟软件中并进行非结构化网格划分,网格的生成与地质界面相关,确保不同水文地质单元的边界。边界条件和源汇项设置,主要利用三维模型合理地设置边界条件,例如,该模型可以精确识别地表水体与含水层的接触关系,从而确定河流的边界,同时也可根据地形和流域位置设置固定水头或零通量边界,另外还可以利用也可根据不同的地表单元(如基岩裸露区、植被覆盖区)对降水入渗补给、蒸发排泄等进行区分赋值;模式校准与反演,主要利用长期观测的泉流量和钻孔水位动态资料,对数值模型进行校准,然后通过调整参数,对仿真结果与观测数据进行控制,通过校准和反演建立良好的三维地下水流动模型,对地下水的各种情景进行预测。

结束语

综上所述,三维地质建模在山区滑坡灾害治理协同研究,代表了信息化、智能化、协同化的全新治理范式,并通过构建高精度滑坡“数字孪生体”,打破勘察、设计、施工、运维等阶段的信息壁垒,为不同专业背景的参与者提供了统一的协同工作平台,该模型渗入分析了滑坡成因和机理,优化治理方案,实现施工过程中的动态调控和风险控制,从而提高治理的效率。随着先进技术的不断应用和生态系统的不断完善,这种协同模式将在地质灾害防治领域发挥着非常重要作用,为保障山区人民生命财产安全和工程项目顺利实施提供有力的技术支撑。

参考文献

- [1]李裕良,黎兴铨,文海珍. 试论山区公路桥梁施工技术难点及解决方案[J].时代汽车,2025,(16):160-162.DOI:CNKI:SUN:SDQE.0.2025-16-039.
- [2]魏来,曹聪,刘智,等. 岩溶山区三维地质建模及其在隧道规划中的三维评价应用[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),1-12[2025-10-09].<https://doi.org/10.11835/j.issn.2096-6717.2025.030>.
- [3]吕希奎,白娇娇,庄建杰,等. 铁路大范围复杂地质区域环境三维建模方法研究[J].铁道学报,2024,46(02):105-113.DOI:CNKI:SU N:TDXB.0.2024-02-012.
- [4]罗宇晨.龙门山前高密度三维地震采集的近地表建模优化[D].西南石油大学,2023.DOI:10.27420/d.cnki.gxssyc.2023.001137.
- [5]龚洲.基于航摄实景三维的地质灾害调查与稳定性分析研究[D].重庆交通大学,2023.DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.001211.
- [6]郝明.多元复杂地质结构城市地质三维建模技术研究及示范应用[D].中国地质大学,2023.DOI:10.27492/d.cnki.gzdzu.2023.000196.