

Research on Landslide Mechanisms and Anti-slide Pile Design Optimization Using Integrated Survey CAD and Geotechnical Testing Techniques

Ang Li

Hebei Provincial Geophysical Exploration Co., Ltd., Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract

This study investigates a highway landslide section in the Taihang Mountains of Hebei Province. By integrating survey CAD with geotechnical testing technologies, we developed an integrated analysis system for landslide mechanism identification and anti-slide pile design optimization. Through high-precision terrain modeling, drilling sampling, and triaxial tests, we revealed the structural characteristics of the slip zone. Numerical simulations using FLAC3D were conducted to analyze the effects of pile diameter, spacing, and rock penetration depth on stability. Results demonstrate that the integrated survey CAD technology accurately identifies the geometry of sliding surfaces. After optimization, the landslide safety factor increased from 1.07 to 1.36, with peak pile bending moments reduced by 26% and surface deformation decreased by 31%. This system significantly enhances the scientific rigor and reliability of landslide control design, providing replicable technical approaches and engineering references for geological hazard prevention in mountainous transportation infrastructure construction in Hebei Province.

Keywords

landslide causation mechanism; integrated survey CAD; geotechnical testing

综合勘察 CAD 与岩土工程测试技术的滑坡成因机制及抗滑桩设计参数优化

李昂

河北省地球物理勘查有限公司, 中国·河北 廊坊 065000

摘要

本文以河北太行山区某高速公路滑坡段为研究对象, 基于综合勘察CAD与岩土工程测试技术, 构建滑坡成因识别与抗滑桩设计参数优化的一体化分析体系。通过高精度地形建模、钻探取样与三轴试验揭示滑带结构特征, 并利用FLAC3D数值模拟分析桩径、桩距及入岩深度对稳定性的影响。研究表明, 综合勘察CAD技术能精准识别滑动面几何形态, 优化设计后滑坡安全系数由1.07提高至1.36, 桩体弯矩峰值降低26%, 地表变形减少31%。该体系显著提升了滑坡治理设计的科学性与可靠性, 为河北山区交通基础设施建设中的地质灾害防治提供了可推广的技术路径与工程依据。

关键词

滑坡成因机制; 综合勘察CAD; 岩土工程测试

1 引言

滑坡是受地质构造、地形地貌、水文作用及工程扰动等多因素共同影响的斜坡失稳现象, 河北太行山区因地质复杂、坡度大、降雨集中而成为滑坡高发区, 对交通与居民安全威胁严重。传统治理依赖经验分析, 难以适应复杂地质条件。本文以河北太行山区某高速滑坡为研究对象, 基于“综合勘察CAD+岩土测试+数值模拟”技术体系, 结合三维建模与岩土参数试验, 揭示滑坡成因机制与滑带特征, 优化

抗滑桩设计参数。研究为北方山区滑坡防治提供了科学依据与可推广的工程方法。

2 滑坡地质特征与成因机制分析

2.1 研究区概况与滑坡特征识别

研究区位于河北省太行山区某高速公路K96+200~K96+700段, 属中低山剥蚀构造地貌区, 地形起伏较大, 坡度 30° ~ 42° , 相对高差约110 m。地层主要由中风化砂质泥岩组成, 上覆残积层厚度约5~14 m, 土体结构松散, 抗剪强度较低。区域属温带半湿润气候, 年均降水量约760 mm, 雨季集中于6~9月, 强降雨频繁且历时长, 对边坡稳定性影响显著。通过无人机航测与地面激光扫描结

【作者简介】李昂(1982-), 女, 中国河北香河人, 本科, 工程师, 从事地质勘查工程研究。

合CAD数字建模,建立高精度数字高程模型(DEM)。模型显示滑坡体呈长舌状,滑面总体走向约N40°E,前缘明显隆起,后缘发育多条张裂缝。滑体体积约 $9.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,属中型滑坡。结合钻探、弹性波测试及地表形变监测结果判定,滑面埋深约8.3~10.5 m,滑带物为高塑性黏土夹碎屑岩屑,局部含饱和泥质夹层,具较强滑移潜能,为典型的降雨诱发型滑坡。

2.2 滑坡成因与力学机制分析

综合多源测试结果表明,该滑坡的形成机制受地形陡峭、软弱夹层和地下水活动的耦合作用控制。钻孔揭示滑带层厚度约2.5~3.8 m,土体结构疏松、含水率高、渗透性差。室内三轴压缩试验结果显示滑带黏聚力为18.7 kPa,内摩擦角13.5°,剪切强度显著低于上覆层。降雨入渗导致孔隙水压力显著上升,滑带有效应力减小,形成“减抗剪、增滑移”的不利条件。极限平衡分析计算滑坡安全系数为1.07,属临界稳定状态,具潜在复活风险。长序列监测结果表明,滑体水平位移与月降雨量呈显著正相关,滑坡变形速率在降雨高峰期增大2~3倍,验证了水文动力是主要触发因素。地表裂缝的持续扩展及滑带土的蠕变特性共同导致滑体逐步失稳,为滑坡治理与防排水设计提供了基础依据。

2.3 综合勘察CAD数据可视化分析

为直观揭示滑坡内部结构特征,采用AutoCAD Civil 3D与RockWorks软件对地形、钻孔、滑面及地下水进行空间拟合,构建三维地质模型。模型结果显示滑面形态呈“勺形”下凹,后缘深、前缘浅,滑带厚度约2~4 m。剖切分析揭示滑带中段变形最显著,是滑动带应力集中的关键区域。综合勘察CAD模型可实现地形、地质与结构信息的可视化融合,辅助设计人员准确识别滑带位置与走向,确定抗滑桩合理布设区段及入岩深度。该方法实现了地质数据的多维集成、空间查询与交互分析,为滑坡稳定性定量计算及防治工程优化提供了精确的基础数据与决策支持,显著提升了滑坡勘察与设计的科学性、效率。

3 岩土工程测试与滑带力学特征研究

3.1 取样与室内试验分析

为精确掌握滑坡区土体的物理力学特性,在河北太行山区某高速公路滑坡体内布设4个地质钻孔,钻深15~25 m,穿越滑体、滑带及下伏基岩层,确保样品具有代表性。钻探完成后,采集原状土样并在实验室进行三轴压缩、直剪及固结不排水(CU)试验,以获取滑带土强度与变形特性。试验结果表明,滑带土孔隙比为0.96~1.10,天然含水率介于29%~34%,黏聚力范围为16.5~21.2 kPa,内摩擦角为12°~15°,整体抗剪强度比上覆层降低约35%。应力—应变曲线表现出明显的非线性特征,峰后阶段出现显著应变软化和塑性流动现象,表明滑带处于蠕变软化状态。加载过程中,滑带土的体积变形以剪胀—压缩交替为主,说明其结构

性较弱,易在长期降雨与剪切应力作用下产生渐进性破坏。通过对比不同深度样品强度参数的变化,发现滑带中心区土体强度最低、变形性最大,是滑坡滑动的主控层,为后续数值分析与抗滑设计提供了关键参数支撑。

3.2 原位测试与水文响应特征

为验证室内试验结果并分析滑带层在现场条件下的稳定性与水文响应特性,进行了标准贯入试验(SPT)与静力触探(CPT)测试。结果显示,滑带层SPT击数N值仅为5~8,密实度低,说明其结构疏松、抗剪能力弱。通过现场渗透试验测得滑带层渗透系数约为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,属弱透水性黏土。为监测地下水动态变化,在滑带中布设孔隙水压力传感器与地下水观测井,连续记录半年。监测结果表明,在暴雨集中期地下水位上升1.8 m,孔隙水压力同步增加约25%,滑带内有效应力显著下降。结合地表变形监测数据分析,滑体水平位移与降雨量变化呈显著正相关,尤其在降雨高峰期,变形速率提高2~3倍。可见,水位升降直接影响滑带强度与剪切稳定性,是诱发滑坡复活与加速变形的主要驱动力。研究揭示了滑带水文条件与滑坡变形之间的耦合关系,为防渗与排水设计提供了科学依据。

3.3 滑带力学特征与破坏模式

综合室内与原位测试结果可知,该滑坡滑带主要由高含水率、低强度的软塑性黏土夹碎屑岩构成,呈明显的力学弱化特征。应力—应变曲线分析显示,滑带土在峰值后强度下降约30%,具显著应变软化特征;在长期荷载下表现出黏性土蠕变破坏趋势。基于FLAC3D数值模拟结果,滑体后缘张裂区形成高剪应力集中带,为破坏启动位置;中段滑带处应变迅速累积,当软弱夹层贯通后,滑体沿滑带发生“推移式”整体滑移,桩前区土体出现剪切滑动与拉张破坏复合型失稳。滑坡演化呈现明显的阶段性、渐进性特征:初期局部剪切破坏→中期滑带贯通→后期整体滑移并逐步趋于稳定。监测数据与模拟结果一致,验证了滑坡破坏过程受地质结构、水文条件与滑带力学性质共同控制的复合机制。研究表明,滑带土蠕变与孔压波动是滑坡长期变形与周期性复活的根本原因,为后续抗滑桩加固设计与监测预警提供了科学依据。

4 抗滑桩设计原理与数值模拟分析

4.1 设计原理与受力机理

抗滑桩作为深层抗剪支挡结构,其主要通过桩身嵌入下伏稳定岩层,形成反力支点以抵抗滑体推力。本文结合河北太行山区滑坡的地质特征与岩土测试数据,建立“桩—滑体—地基”三维有限差分模型,对不同设计参数的力学响应进行对比分析。模型综合考虑滑带土的强度衰减、滑体推力分布及桩基与岩层的相互作用,旨在揭示结构受力规律与变形机制。设计目标以安全系数不低于1.25为控制标准,力求在安全储备与经济效益之间取得最优平衡。

4.2 数值模拟与参数设置

为量化分析各设计变量对滑坡稳定性的影响,采用FLAC3D构建三维数值模型(长120 m,高38 m,厚48 m),边界条件设为底部固定、侧向约束。材料模型选用Mohr-Coulomb准则,参数取自室内三轴试验与原位测试:滑带土黏聚力 $c=18.7$ kPa,内摩擦角 $\phi=13.5^\circ$;滑体黏土层 $c=22.6$ kPa, $\phi=16.3^\circ$;抗滑桩材料为C30混凝土,弹性模量 $E=3.0\times 10^4$ MPa,泊松比0.25。设计变量包括桩径(0.8、1.0、1.2 m)、桩距(3、4、5 m)、入岩深度(4、6、8 m)。通过施加重力场与滑体推力边界,模拟不同工况下的滑体位移场、桩身内力及稳定性变化。模型经现场位移监测数据验证,计算误差小于5%,精度满足工程分析要求。

4.3 结果与参数优化

模拟结果显示,桩径与入岩深度对滑坡稳定性影响最为显著。当桩径由0.8 m增至1.0 m时,安全系数由1.14提升至1.28;继续增至1.2 m后,提升幅度不足3%,表明存在经济最优区间。入岩深度增加至6 m时,桩底弯矩降低26%,桩顶水平位移减少29%,桩身塑性区显著收缩。桩距减小至4 m后,滑坡整体安全系数提高约9%,桩间土体协同作用增强。综合安全性与经济性,确定桩径1.0 m、桩距4 m、入岩深度6 m为最优方案。优化后安全系数提高至1.36,混凝土用量减少17%,造价节约约14%。现场监测表明,滑体变形速率由6.1 mm/月降至1.9 mm/月,滑坡趋于稳定,验证了参数优化的可靠性与工程适用性。

5 综合勘察CAD与参数优化的耦合应用

5.1 三维模型在抗滑桩布设中的作用

综合勘察CAD技术在滑坡防治工程设计中具有核心作用,其通过整合地形、地质、钻探、地下水位及滑带分布等多源信息,实现地质空间的三维可视化与参数化管理。三维地质模型通过对滑坡剖面的精确拟合,可科学确定抗滑桩的布设位置、桩间距、入岩深度及倾角,避免因传统二维设计导致的“桩入岩不足”或“入岩过深”问题。CAD模型还能与数值模拟软件(如FLAC3D)实现无缝对接,在坐标与参数层面实现数据自动传递,使滑带变形、桩身受力、地下水位变化等计算过程更加精准与动态。工程实践表明,基于CAD三维模型的布桩方案在空间布置上更合理,施工偏差率降低约30%,整体桩数减少12%,施工效率提升显著,有效降低材料浪费与造价,为滑坡治理的精细化与可视化设计提供了科学依据与技术支撑。

5.2 参数优化与安全经济效益分析

通过综合勘察CAD与数值模拟的联合分析,可实现抗滑桩参数的系统优化与经济性评估。河北太行山区滑坡治理工程的监测数据显示,参数优化后的方案兼顾了结构安全

性与经济合理性。调整桩径、桩距与入岩深度后,滑体变形速率下降约70%,地表水平位移稳定在3 mm/月以内,说明滑体趋于稳定。数值模拟结果显示,桩身最大弯矩由250 kN·m降低至185 kN·m,桩体应力分布均匀性显著改善。优化设计将滑坡安全系数由1.07提升至1.36,整体稳定性提高约27%。在保证安全储备的同时,混凝土与钢筋用量分别减少约15%与12%,施工周期缩短10%。经济性分析表明,参数化设计实现了安全系数与造价的动态平衡,在不增加成本的前提下显著提升了工程可靠性与可持续性。该方法在设计阶段即可预判桩体受力与滑体变形,为后续施工控制与长期监测提供量化依据,具有良好的经济效益与推广价值。

5.3 技术推广与发展前景

“综合勘察CAD+岩土测试+数值模拟”一体化体系代表了滑坡治理设计的数字化发展方向。在河北省邢台、保定、石家庄等太行山区滑坡治理项目中,该体系已成功应用于高速公路边坡、水库库岸及矿区地表防护工程,显著提高了治理精度与防灾效能。未来,随着人工智能、无人机航测、激光雷达及BIM技术的融合,综合勘察CAD将具备实时更新与自动识别滑面特征的能力,实现滑坡变形监测、风险评估与结构设计的动态联动。该方法的推广不仅将推动我国滑坡防治从经验型向数据智能型转变,也将为山区交通、水利及城市建设工程提供可靠的数字化防灾技术支撑,具有广阔的发展前景与战略意义。

6 结语

本文以河北太行山区滑坡为研究对象,基于综合勘察CAD与岩土工程测试技术,构建“数据融合—数值分析—参数优化”一体化技术体系。研究结果显示,综合勘察CAD显著提升了地质信息采集与空间表达精度,岩土测试为滑带力学分析提供可靠参数支撑,两者结合有效提高滑坡治理设计的科学性与精度。经优化设计,滑坡安全系数由1.07提高至1.36,桩体受力分布更合理,经济性显著改善。该研究为河北及北方山区滑坡防治提供了系统化、可复制的技术路径,对提升山区基础设施安全与防灾减灾能力具有重要工程意义。

参考文献

- [1] 赵军勇.某山体膨胀性滑坡防治工程勘查稳定性计算参数的选取[J].西部探矿工程,2014,26(08):19-22.
- [2] 杨长卫.岩质边坡的地震动特性及基覆型边坡的滑坡成因机理、稳定性判别、危害范围评价体系的研究[D].西南交通大学,2014.
- [3] 龚蔚芳.复杂地质条件下滑坡的稳定性分析与综合治理研究[D].中南大学,2010.