

Research on Unstable Risk Assessment and Prevention of Canal-type Waste Residue Sites in Mountain Highway Gullies

Xiaomin Lu^{1,2} Zude Ding^{1*} Hejiang Huang^{1,3} Yuting Zhou²

1. Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650500, China

2. SRK Consulting China Ltd., Beijing, 100083, China

3. Qujing Management Office of Yunnan Transportation Investment and Construction Group Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

Gully-type waste rock disposal sites along mountainous highway corridors are prone to geological hazards such as landslides and collapses due to narrow channel topography, complex water accumulation conditions, and significant variations in geotechnical properties. This study examines a mountainous highway gully-type waste rock disposal site as a case study. By comprehensively evaluating multiple factors, a robust evaluation index system was established. Stability calculations were performed using the limit equilibrium method, followed by MIDAS/GTS numerical simulation analysis to determine instability risk levels. Tailored mitigation strategies were proposed based on risk classifications, with field monitoring conducted to assess treatment effectiveness and explore practical applications of such engineering solutions. The research demonstrates that the proposed index system effectively identifies key factors influencing site stability. The developed tiered prevention measures significantly enhance safety performance, providing valuable insights for implementing similar projects in future construction projects.

Keywords

mountainous highway; gully-type spoil dump; instability risk assessment; stability calculation; hierarchical prevention and control

山区高速公路沟道型弃渣场失稳风险评估与防控研究

鲁晓敏^{1,2} 丁祖德^{1*} 黄和江^{1,3} 周雨婷²

1. 昆明理工大学建筑工程学院, 中国·云南昆明 650500

2. 北京斯罗柯资源技术有限公司, 中国·北京 100083

3. 云南省交通投资建设集团有限公司曲靖管理处, 中国·云南曲靖 655000

摘要

山区高速公路沟道型弃渣场受沟道地形狭窄、汇水条件复杂以及岩土体性质差异大等因素的影响, 容易出现滑移、垮塌等地质灾害。本文选取某山区高速公路沟道型弃渣场作为研究案例, 在综合考虑多种因素的基础上建立了一套较为完善的评价指标体系, 并运用极限平衡法对其进行稳定性计算及MIDAS/GTS数值模拟分析来确定其失稳风险等级; 根据不同的风险等级提出相应的治理对策并进行实地监测检验治理效果的同时探讨该类工程的应用情况。研究发现, 所提出的指标体系能够较好的概括出影响弃渣场稳定性的主要因素, 在此基础上制定的分级防控措施也能够有效的提高弃渣场的安全性, 对今后类似项目的实施具有一定的借鉴意义。

关键词

山区高速公路; 沟道型弃渣场; 失稳风险评估; 稳定性计算; 分级防控

1 引言

近年来, 山区高速公路施工过程中由于弃渣场不稳定而产生的滑坡、泥石流等自然灾害时有发生, 给工程项目带来工期拖延以及经济损失的同时也对周围环境造成破坏, 严

重时还会危及人民群众的生命财产安全^[1]。目前, 国内外关于弃渣场稳定性研究主要集中在露天矿渣场以及库区弃渣场上, 在山区高速公路沟道型弃渣场方面的相关研究较少, 而且大多数都是单独从地形、岩土体性质等方面进行分析, 很少涉及沟道汇水、工程扰动及运营维护等因素的影响, 同时对于防控措施也缺少针对性和层次性^[2]。因此本文以山区高速公路沟道型弃渣场为对象, 建立风险评估指标体系, 进行稳定性计算及数值模拟, 划分风险等级并提出相应的分级防控对策建议, 通过实际案例加以检验防控效果, 以此来弥补对于山区高速公路沟道型弃渣场的风险管理方面的不足。

【作者简介】鲁晓敏(1992-), 女, 中国云南晋宁人, 硕士, 工程师, 从事工程管理研究。

【通讯作者】丁祖德(1979-), 男, 中国湖南常德人, 博士, 教授, 从事岩土及隧道工程研究。

2 工程概况

某山区高速公路 K28+350~K28+750 右侧沟道式弃渣场位于中低山侵蚀地貌区,地势高低不平,沟槽呈“V”字形,方向为 NE-SW,沟槽长约 420m,沟底宽 15~30m,两岸边坡倾斜度 35°~50°。弃渣场堆高 30~55m,设计堆存量 120×10⁴m³,主要是对公路路基开挖产生的粉质黏土、碎石土以及强风化玄武岩等废弃料进行堆放,采用分层填筑的方法进行堆砌,每层厚 2~3 米左右,未经专门压实处理。

本区年均降水量 1250mm,降水集中在 6-9 月,单日最大降雨量可达 180mm/d,沟槽中有季节性溪流,枯水期流量为 0.5~1.0m³/s,丰水期流量为 5~10m³/s。弃渣场地层由上至下依次为:素填土(弃渣体),厚度 30~55m;粉质黏土,厚度 5~10m,承载力特征值 120kPa;强风化玄武岩,厚度 10~20m,承载力特征值 300kPa;中风化玄武岩,是基底岩石,承载力特征值 800kPa。场区地下水主要是孔隙水和裂隙水,地下水位埋深在 5~15m 之间,受大气降水及地表径流影响较大。

该弃渣场用于高速公路路基工程建设,堆放完成后会对进行绿化复垦,周围无居民区及重要设施,距高速公路主线路线最近处约为 80m,一旦出现滑坡等险情将会对高速公路主线路线施工以及后期运行造成严重影响。

3 沟道型弃渣场失稳风险评估

3.1 风险评估指标体系构建

根据山区高速公路沟道型弃渣场工程特性以及造成失稳的影响因素,在科学性、系统性和针对性、可操作性的基础上运用层次分析法(AHP)建立目标层、准则层、指标层三级风险评估指标体系,其中目标层为沟道型弃渣场失稳风险综合评价(A),准则层由地形地质(B1)、弃渣体性质(B2)、水文气象(B3)、工程扰动(B4)、运营管理(B5)组成,而指标层是在准则层的基础上选取了 18 个具体的量化的或者定性的指标。

采用综合评分法计算失稳风险综合评价值,计算公

式为:

$$S = \sum_{i=1}^5 W_{Bi} \times \sum_{j=1}^n W_{Cij} \times S_{Cij}$$

式中, S 为失稳风险综合评价值,取值范围 1~5; W_{Bi} 为准则层 i 指标权重; W_{Cij} 为指标层 j 指标权重; S_{Cij} 为指标层指标评分值; n 为各个准则层下面的指标层数目。

3.2 稳定性计算与数值模拟

3.2.1 稳定性计算

选择弃渣场最大堆存高度断面(K28+550 断面)为计算断面,使用瑞典条分法(极限平衡法)进行天然状态、暴雨状态下以及汛期地下水水位上升状态下三种情况的弃渣场地质稳定性分析计算,使用的软件是 GeoStudio/SLOPE/W。对弃渣体进行室内土工试验获取其物理力学性质指标,在此基础上根据场地实际地质情况进行修正得到不同工况下的计算参数值如表 1 所示。

瑞典条分法基于摩尔-库仑强度准则,假定滑动面是圆弧形,把滑体划分为若干个竖直土条,不考虑土条之间的相互作用力,在此基础上计算出滑动面上的抗滑力矩与滑动力矩之比即为稳定安全系数 F_s , 计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi_i)}{\sum W_i \sin \theta_i}$$

式中, c_i 为第 i 土条滑动面黏聚力; l_i 为第 i 土条滑动面长度; W_i 为第 i 土条重量; θ_i 为第 i 土条滑动面法线与竖直方向的夹角; φ_i 为第 i 土条滑动面内摩擦角。依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)规定,山区高速公路弃渣场边坡安全等级为二级,要求稳定安全系数:天然状态 $F_s \geq 1.25$,暴雨状态 $F_s \geq 1.15$,汛期地下水水位上升状态 $F_s \geq 1.10$ 。计算结果表明,该弃渣场在自然状态下稳定性安全系数稍小于规定值,在暴雨及汛期地下水水位升高情况下稳定性安全系数明显小于规定值,存在较大失稳隐患,应采取有效措施提高其稳定性。

表 1 不同工况下弃渣体物理力学计算参数

工况	天然重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	黏聚力 $c / (\text{kPa})$
天然状态	19.5	20.5	28	8
暴雨状态	20.0	21.0	25	5
汛期地下水水位上升状态	20.5	21.5	22	3

3.2.2 数值模拟

运用 MIDAS/GTS 有限元程序对弃渣场进行三维数值计算,研究了不同工况下弃渣场的应力、位移变化情况以及失稳过程。结合工程地质条件建立了弃渣场三维数值模型,尺寸为:长×宽×高=500m×200m×100m;使用摩尔-库仑本构关系,在模型中采用四面体实体单元,共有 125600 个单元,28950 个节点;边界条件是底面固定约束,

侧面法向约束,顶部自由表面;弃渣体采取逐层铺设的方式进行模拟,初始地应力由自重应力场确定。

天然状态下弃渣场最大竖向位移发生在堆顶中部,位移量为 8.5cm,剪应力集中区域位于弃渣体内中下部(埋深 30~40m),最大剪应力值达到 65kPa,小于弃渣体抗剪强度,全场位移较小,应力较为均匀。暴雨状态下弃渣场最大竖向位移发生在堆顶偏下游方向,位移量为 15.2cm,相比天然

状态增长 78.8%，剪应力集中区扩展至整个弃渣体中下部及沟道右岸坡面，最大剪应力值为 98kPa，在局部范围内已超出弃渣体抗剪强度，产生少量塑性变形。数值模拟结果与稳定性计算结果吻合较好，说明计算结果可信，在此基础上进一步分析弃渣场失稳过程为：局部应力集中→塑性变形发展→变形区贯通。

3.3 风险等级划分

根据风险评估指标体系的综合评分结果以及稳定性计算、数值模拟的结果，运用聚类分析的方法对山区高速公路沟道型弃渣场失稳风险分为低风险、中风险、较高风险、高风险四级。

根据稳定性计算分析（暴雨工况 $=1.08$ ）、数值模拟特征（位移 $> 20\text{cm}$ ，塑性变形区贯通），判定该弃渣场失稳风险等级为较高风险，应尽快进行治理。

4 防控措施与应用效果

4.1 分级防控措施实施

沟道型弃渣场失稳的主要原因是降雨入渗及地下水位升高，因此排水工程是主要防护措施，“地表排水+地下排水+沟道导流”^[3]。

对于弃渣体中下部剪应力集中区及沟道岸坡采取“抗滑桩+格构梁+坡脚压重”边坡加固方案，在弃渣体中下部布设一排钢筋混凝土抗滑桩，桩长 30m，桩径 1.5m，桩间距 5m，嵌入中风化玄武岩不小于 5m，采用 C30 钢筋混凝土浇筑，承担弃渣体下滑力；在弃渣体坡面布置钢筋混凝土格构梁，格构尺寸为 5m×5m，梁宽 0.5m，梁高 0.6m，采用 C25 钢筋混凝土浇筑，在格构梁节点位置设置锚杆，锚杆长度 15m，直径 22mm，间距 5m，锚固在基岩上以提高坡面的整体性^[4]；在弃渣场坡脚进行块石压重处理，压重平台宽度为 10m，高度为 5m，块石重度为 22kN/m³，增加坡脚抗滑能力，避免坡脚受到冲刷以及发生滑移现象。

为了解决弃渣体压实度低、抗剪强度小的问题，对现有的弃渣体进行改良。在弃渣体顶部未压实地段使用大吨位振动碾分层碾压至密实度 $\geq 85\%$ ，每层碾压厚度 0.5m^[5]；在弃渣体中下部剪应力较大部位加入水泥及碎石，水泥掺量 3%~5%，碎石掺量 20%~30%，以增加弃渣体凝聚力以及内摩擦角，在实验室测试结果表明改良后的弃渣体内摩擦角达到 30°，凝聚力达到 12kPa。

4.2 防控效果监测验证

采取防治措施之后，对弃渣体进行物理力学性质检测，在此基础上使用同样的方式计算三种工况下弃渣场的稳定性，采取防治措施之后，三种工况下弃渣场的安全系数都有明显提高并且都符合相关标准的规定，稳定性得到改善。

4.3 工程适用性分析

为了检验所提出的分级防控方案的工程实用性，在三个不同风险级别的山区高速公路沟道型弃渣场上进行了工程应用，分别是低风险（ $S=1.8$ ）、中风险（ $S=2.7$ ）、高风险（ $S=4.3$ ）弃渣场，针对不同的风险级别采取相应的防护措施。分级防控措施是依据不同的风险等级确定的，“低风险简易防控、中风险常规防控、较高风险综合防控、高风险强化防控”，防止了过防或欠防的情况发生，在四个不同风险等级的弃渣场的应用效果良好并且成本适中，施工方法简单，适用于山区高速公路施工环境恶劣以及工期紧迫的特点。

5 结论

本文针对山区高速公路沟道型弃渣场进行研究，建立由地形地质、弃渣体性质、水文气象、工程扰动及运营管理五个准则层共 18 个指标组成的评估指标体系，能够较为完整、全面地概括出影响山区高速公路沟道型弃渣场失稳的主要因素，在此基础上利用层次分析法和综合评分法对失稳风险进行定量评价，有利于科学合理地确定其风险等级。未来可以运用人工智能与大数据等先进技术手段开发出一种新的弃渣场失稳风险动态预警系统，从而达到对其风险及时监控以及持续跟踪的目的，提高山区高速公路沟道型弃渣场风险管理工作的自动化程度。

参考文献

- [1] 张帅. 复杂艰险山区铁路弃渣场安全分析及防护措施设计[J/OL].铁道标准设计,1-8[2026-03-13].
- [2] 李瑞鸿,李跃强. 某泥石流沟道弃渣场防护设计方案研究[J].水利技术监督,2021,(07):189-193.
- [3] 赵明华,刘培培,朱信波. 石家沟特大型弃渣场选址合理性分析研究[J].资源环境与工程,2020,34(02):247-250.
- [4] 覃勇勇. 基于Massflow进行动力过程数值模拟弃渣场失稳影响预测分析[J].企业科技与发展,2022,(04):60-62+112.
- [5] 蒋文鹏,段文娅,卢云,等. 某山区公路弃渣场失稳造成的环境影响评估[J].水利与建筑工程学报,2022,20(01):189-194.