

# 强风化岩填筑高路堤变形与失稳风险评估综述

陈浩<sup>1</sup>, 李聪<sup>1\*</sup>, 黄硕鑫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年7月28日; 发布日期: 2026年8月7日

## 摘要

强风化岩填筑高填方路堤因填料水敏、高填效应等易发生沉降变形和失稳。本文从风化岩填方路堤填料力学特性、失稳风险影响因素、风险评估方法及动态评估模型等方面综述了相关研究进展。分析表明, 风化岩填料湿化软化、湿陷、崩解特性会加剧路堤变形失稳; 路堤风险评估正由传统静态评估法向概率分析、监测耦合和综合评价方向发展, 动态评估呈现概率模型与实时监测分析结合的新趋势。最后指出了现有研究不足并提出未来研究方向。

## 关键词

强风化岩, 高路堤, 变形稳定性, 动态风险评估, 公路

# A Review on of Deformation Stability Analysis and Risks Evaluation of High Embankments Built with Strongly Weathered Rock

Hao Chen<sup>1</sup>, Cong Li<sup>1\*</sup>, Shuoxin Huang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>North China Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin

Received: July 6, 2026; accepted: July 28, 2026; published: August 7, 2026

## Abstract

The high embankment constructed with strongly weathered rock is prone to settlement deformation

\*通讯作者。

文章引用: 陈浩, 李聪, 黄硕鑫. 强风化岩填筑高路堤变形与失稳风险评估综述[J]. 土木工程, 2026, 15(8): 49-57.  
DOI: 10.12677/hjce.2026.158200

and instability due to the water sensitivity of the fill material and the high embankment effect. This paper reviews the research progress in aspects such as the mechanical properties of the fill material for weathered rock embankment, the influencing factors of instability risk, the risk assessment methods, and the dynamic assessment model. The analysis shows that the wetting, softening, settlement, and disintegration characteristics of the weathered rock fill material will aggravate the deformation and instability of the embankment. The risk assessment of the embankment is developing from the traditional static assessment method towards probability analysis, monitoring coupling, and comprehensive evaluation. The dynamic assessment presents a new trend of combining probability models with real-time monitoring analysis. Finally, the deficiencies of the existing research are pointed out and future research directions are proposed.

## Keywords

Weathered Rock, High Embankment, Deformation Stability, Dynamic Risk Assessment, Highway

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着山区高速公路建设逐步向丘陵、山地及沟谷区推进,高填方路堤已成为常见的路基结构形式。受就地取材、降低弃方运输和控制造价等因素影响,强风化片岩、花岗岩及其他强风化软弱岩体被广泛用作填料。与一般土质填料相比,该类材料具有结构疏松、压实成骨困难、遇水易软化和变形敏感性高等特征。并且在降雨、地下水波动、施工扰动和交通荷载共同作用下,更易产生沉降累积、裂缝扩展和边坡滑移等病害[1]-[5]。

2024年梅大高速茶阳段路堤垮塌事故[6]说明,强风化花岗岩高路堤在复杂地形和持续降雨作用下存在显著的湿化软化与整体失稳风险。目前关于强风化岩高路堤的研究,已在填料适宜性、沉降规律、边坡稳定分析和施工风险评价等方面取得一定进展,但是实际工程中存在应用效果不好、路堤塌方事故频发等问题。为了更好的评估强风化岩填方高路堤风险,本文对强风化岩填筑高路堤的填料力学特性、主要风险影响因素、风险评估方法以及失稳风险动态评估模型研究进展进行了综述,可为后续研究和工程应用提供参考。本文论述结构如图1所示。

## 2. 强风化岩高填方路堤的特点与风险影响因素

为了准确评估强风化岩高路堤的失稳风险,需明确强风化岩高路堤的特点与风险影响因素。

### 2.1. 风化岩填料力学特性与路堤变形特征

强风化岩填料的水敏性突出。降雨或地下水入渗会引起颗粒崩解、胶结减弱与吸力损失,导致抗剪强度下降、内部应力重分布以及局部软化区扩展。An [7]、He [8]、Liu [9]等通过试验证实了风化岩在干湿循环后会发​​生崩解或软化。刘新喜[5] [10]和张宝华[11]通过试验得到强风化软岩和云母片岩风化土湿化后内摩擦角分别降低 $1.7^{\circ}$ ~ $5.7^{\circ}$ 和 $2.0^{\circ}$ ~ $2.6^{\circ}$ ,粘聚力分别降低44.9%~54.8%和4.1%~6.3%。刘翔[12]和刘传正[6]分别通过实验发现花岗岩全风化土经湿化后内摩擦角分别降低 $1.35^{\circ}$ 和 $16^{\circ}$ ,粘聚力降低40%和35%。方迎潮[13]和Jun Du [14]分别通过实验发现风化残积砂土和泥质粉砂岩碎石填料湿化后摩擦角分别降低 $2.17^{\circ}$ 和 $18.94^{\circ}$ ,粘聚力降低82.1%和89.87%。郭志边[15]等认为,排水不畅和含水率增加是斜坡高

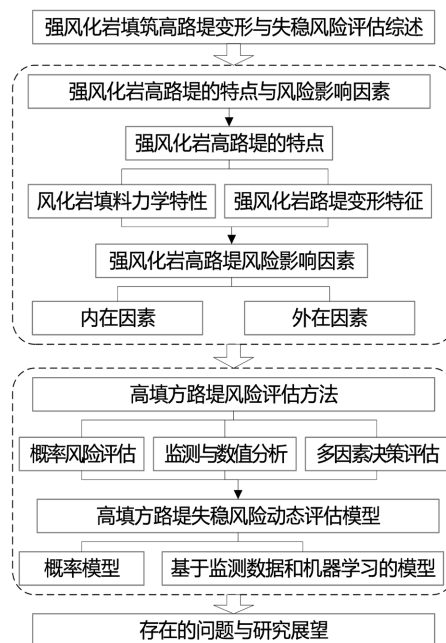


Figure 1. Hierarchical structure diagram of the paper

图 1. 论文结构层次图

填方路堤开裂与沉降的重要诱因。Rakshanda [16] 等关于压实路堤的研究也表明, 降雨入渗可显著改变饱和度分布和安全储备, 尤其对高填路堤浅层及坡面附近区域更为不利。

强风化岩高填方路堤的主要特点在于填料既具备“岩性残余特征”, 又具有“类土体变形特征”。张华[17]等研究发现提高压实度可以减小工后沉降, 而含水率的变化则会影响沉降发展趋势, 表明压实质量与含水状态共同决定高路堤的变形。许孝飞[18]和蒋正舜[19]等从风化花岗岩超高填方路堤的监测结果出发均发现沉降、侧移与填高呈较强相关性, 说明强风化岩高路堤的变形并非单纯竖向压缩, 而是受填高、压实、颗粒破碎和地基约束共同作用的三维响应过程。庄前兵[20]等在黄土高填方路堤监测中发现, 累计沉降在施工后较长时期内仍持续发展, 2 年左右可达到总沉降的大部分。刘忠祥[21]指出, 山区高填方路堤沉降通常经历快速发展、缓慢增长和逐步稳定三个阶段。对于强风化岩填料而言, 由于颗粒持续破碎、湿化劣化和局部结构重组并存, 其工后沉降的持续性与空间差异性会更为显著。

可以看出, 强风化岩填料水敏性突出, 遇水后强度下降明显; 湿化可导致摩擦角下降  $2\sim 6^\circ$ , 粘聚力下降  $30\%\sim 90\%$ 。强风化岩填料由于自身特性使得填筑的路堤具有独特的变形特征, 变形量主要与压实度、含水率、填方高度相关, 工后变形时间可长达 2 年, 具有明显的三维效应。

## 2.2. 强风化岩高填方路堤稳定性风险影响因素

### 2.2.1. 内在因素

内在因素主要为路堤自身及地基工程条件, 包括填料性质、地基条件、路堤几何形态和内部弱结构等。

强风化岩填料颗粒组成复杂。文成章[22]发现强风化云母片岩经改良后强度、承载力和压实性能均有所提高, 说明原状强风化岩填料自身强度储备不足, 容易成为路堤变形和失稳的基础原因。

地基条件和路堤几何形态也是重要内在因素。高填方路堤填筑高度大, 自重荷载高, 容易在坡脚、堤顶外侧和填挖交界处形成应力集中和位移集中。

内部弱结构则控制路堤失稳的发展路径。高填方路堤并不是完全均质体, 填筑过程中可能形成压实薄弱层、岩土接触界面、原地表斜坡面和层间软弱带等不利部位。王鹏等[23]认为, 岩土接触界面比填层内部更容易形成贯通滑移带。因此, 对强风化填料路堤进行稳定性分析时, 还应重视界面强度折减。

强风化岩高路堤失稳风险分析需重点关注的内在因素: 一是应关注填料干湿循环及含水率变化对黏聚力、内摩擦角和变形特性的影响; 二是填方高度、水文地质条件和弱结构等关键因素。

### 2.2.2. 外在因素

外在因素主要指降雨、地下水、施工扰动、交通荷载、排水防护和运营维护等外部作用。

外在因素中, 水的作用最为突出。降雨入渗会使路堤含水率升高、基质吸力降低、孔隙水压力增大, 从而削弱填料抗剪强度。Zhang [24]指出, 高填方边坡安全系数会因降雨而降低; 地下水活动、干湿循环及冻融作用会进一步加剧路堤性能劣化。地下水位升高或坡体内部滞水会增加孔隙水压力, 并在岩土界面、填挖交界面和压实薄弱层附近形成软化区。孙宏磊[25]发现, 干湿循环次数增加会使高填方路堤边坡安全系数持续降低。黄发明[26]也指出, 降雨、蒸发和冻融等环境条件会影响坡体稳定状态。

工程建设和运营管理也是重要外在因素。李泽霖[27]指出, 压实控制不足、含水率控制不当和分层碾压不均会导致高填方路基内部结构不连续, 并诱发差异沉降。

因此, 水的作用、压实质量等外在因素改变路堤含水状态、应力状态会削弱其稳定性。在路堤运营期需关注降雨入渗、排水状态、支护情况、监测维护等外在因素。

## 3. 高填方路堤风险评估方法

常见的高路堤风险评估方法主要有概率风险评估、监测与数值分析、多因素决策评估三类。

### 3.1. 概率风险评估方法

概率风险评估方法通过引入岩土参数随机性和模型不确定性, 对高填方路堤失稳概率或可靠度进行量化, 是对传统安全系数法的重要补充。蒋辽[28]等将蒙特卡洛模拟与 Geo-slope 分析结合后发现, 内摩擦角的不确定性对填方边坡稳定性的影响通常高于黏聚力。Waddell [29]则指出, 饱和假定、参数分布类型、空间相关性以及分析模型选择都会显著影响土石坝和填方路堤的确定性与概率分析结果。Rubi [30]等的综述进一步表明, 概率边坡稳定分析已由参数随机抽样逐步发展到考虑随机场和多源不确定性的阶段, 但样本依赖性和计算复杂性仍是应用瓶颈。

在极端荷载情形下, 概率方法优势更加明显。Das [31]等构建了地震诱发滑坡的贝叶斯网络概率模型, 可量化边坡和路堤在地震工况下的永久变形和失稳概率。Wu [32]等则从降雨诱发土坡失稳角度概括了稳定分析与概率评估技术的发展脉络。但对于强风化岩高路堤而言, 这类方法仍面临填料参数离散性大、现场样本不足和参数化取值难等问题。

总之, 概率法通常以失稳概率、可靠指标或超越概率给出评价结果, 理论上更接近工程风险本质; 但若现场调查、试验和监测资料不足, 会削弱结果可信度。对强风化岩高路堤这类材料离散性大、工程差异显著的对象, 后续研究需要更重视试验数据积累、参数反演和现场监测校准, 以提高概率分析的工程适用性。

### 3.2. 监测与数值分析方法

监测与数值分析相结合是当前高填方路堤研究和工程评价中应用最广的技术路线。该方法通过获取沉降、位移、孔压和降雨等现场数据, 结合有限元或有限差分法既可揭示路堤变形机理, 又可校核模型合理性。贺佳[33]、邓志刚[34]等分别通过高填方路基数值模拟与现场监测对比, 指出填筑材料物理力学



参数是控制沉降变形的关键因素，而模型经实测校核后可较好反映路基响应规律。Bao [35]等模拟了高填方在季节性地下水波动条件下的稳定性演变规律。Xue [36]等建立水力耦合数值模型，分析了梅大高速路堤在降雨径流作用下的稳定性。

对于复杂地基条件，高精度监测 - 模拟耦合分析更具必要性。杨校辉[37]等通过山区机场高填方边坡时空监测与稳定分析，识别出“后推式”滑移模式及软弱层控制作用。王智超[38]等利用有限元变形计算与强度折减法结合的方法，实现了多级挡墙高填方路堤的稳定安全系数及潜在滑移部位识别。Yang [39]等则将非线性回归与神经网络用于高路堤沉降预测，表明实测数据驱动模型可有效提升变形趋势预测能力。刘桂强[40]的研究表明，沉降和位移监测能够及时识别异常变形，为风险预警和动态处治提供依据。

此方法的优势在于机理清晰、结果可靠，适用重点路段精细化评估；不足则在于监测系统建设和维护成本较高，数值结果对本构模型和参数选取敏感，且不利于大范围快速筛查。因此，从工程适用性看，监测 - 数值方法更适用于高风险路段诊断、关键断面分析和治理方案比选。

### 3.3. 多因素决策评估方法

多因素决策评估方法通过建立指标体系并结合赋权、模糊判别或扩展评价模型，对高填方路堤风险进行分级。其优势在于可同时纳入地质、水文、材料、施工和运行管理等多类因素，适合工程前期、施工阶段、运营期的全过程风险管控。Yao [41]等基于在线监测系统和模糊综合评价实现了山区高速边坡稳定等级识别。Zhang [42]等提出改进拓展模型用于重载铁路高路堤综合性能评价。

在具体方法上，丁瑞力[43]、李瀚[44]和吴新栋[45]等分别从信息量法、模糊综合评价和专家调查法等角度开展了边坡或高填方工程风险分析，结果普遍表明，多因素综合评价能够较好反映工程实际，但评价结果会受到指标选择、权重设定和隶属函数构造的影响。为降低主观性，张军[46]、何韬[47]、和 Jin [48]等进一步引入组合赋权、风险矩阵和云模型等方法，提高了评价结果的稳定性与可解释性。

随着人工智能技术发展，综合评估开始向“机理 + 数据”融合模式演化。Deng [49]等提出的经验约束神经网络能够在保持可解释性的同时提高路基累积变形预测精度。总之对于强风化岩高路堤而言，如何把湿化软化、变形特征纳入综合评价体系需进一步研究。

### 3.4. 评估方法对比分析

围绕高填方路堤风险评估方法，对概率风险评估方法、监测与数值分析方法以及综合评估方法进行了归纳和比较。三类方法各有适用范围与优缺点。概率风险评估法的优点是得到不确定性结果符合实际情况，缺点是参数随机变量分布的确定较困难。监测 - 数值分析法的优点是评价结果较明确，缺点是成本高、技术要求高。多因素决策评估的优点是快速评价，能评价大量的实例；缺点是经验性较强，往往需要和人工智能模型结合才能较好应用。

因此，针对重要工点的路堤风险评估可采用基于可靠度理论的概率方法或监测 - 数值分析方法，针对区域性路堤风险筛查可采用多因素综合决策法。

## 4. 高填方路堤失稳风险动态评估模型

路堤风险评估正由传统静态评估法向动态评估发展。

### 4.1. 概率模型类

概率模型类动态评估方法是在传统可靠度分析基础上发展起来的，该方法将路堤风险看作随时间变化的状态过程。对于高填方路堤，施工填筑、降雨入渗、地下水波动和工后沉降都会使路堤受力状态和材料参数不断变化，因此风险状态也可能从“稳定”逐步转为“预警”甚至“失稳”。卢鑫月[50]等将

DBN 用于地铁隧道施工风险评估能够较好反映风险水平的阶段性变化;可以反映风险从一个阶段向下一阶段演化的可能性。Guo [51]等进一步提出模糊动态贝叶斯网络,以模糊数表达不确定环境下的概率信息,从而增强模型对专家经验和监测误差的适应性。柳彤晖[52]等基于马尔可夫链理论构建考虑土层变异性的边坡随机场模型,通过转移概率描述风险由低到高的演化趋势。

总体来看,概率模型类动态评估方法主要是考虑随机参量随时间变化特征,计算出随时间演变的风险结果。这类模型也存在局限,模型中随机变量概率分布的确定需要足够的试验、监测或工程经验支撑,难度较大。

## 4.2. 基于监测数据和机器学习的模型类

基于监测数据和机器学习的动态评估模型,更强调对路堤当前状态和短期变化趋势的识别,先获取现场变形、孔压等监测数据,再利用统计分析或机器学习方法判断路堤是否正在向不稳定状态发展。尹成[53]建立了多源动态监测体系,验证了风险识别与工程干预相结合的有效性。于凯凯[54]构建了高路堤变形监测及灾变智能分析平台,实现了灾变过程识别与演化重构。在动态管控层面,何训林[55]等认为无人机和云平台技术能够提升超高填路堤施工期风险管控的时效性与自动化水平。赵延林[56]和 Liu [57]等分别从联合预测模型和离心模型试验角度,为高填方路堤长期沉降预测提供了补充证据。刘冠男[58]等提出通过监测量测和回归迭代更新指标权重的方法,为高路堤构建“静态判别-动态修正”的风险模型提供了思路。Ahmad [59]等采用一种综合机器学习方法对某路堤边坡进行了风险评估与优化。Si [60]等提出一种新的机器学习框架,进行了铁路路堤概率地震作用下的风险评估。

总体来看,此类模型能真实反映路堤在施工期和运营期的实际变化,更适合用于动态评估。但是模型效果很大程度上取决于监测数据质量,如果监测设计不合理、数据质量差,风险评估结果容易失真。其次,机器学习模型虽然能较快给出结果,但不能解释确定风险结果的物理机制。

综上所述,高填方路堤失稳风险动态评估已逐步形成以概率更新和数据驱动识别为主的两类技术路线。前者可得到可更新的概率化风险结果,后者得到的结果来源于实际监测信息,评估结果更可靠,并预测短期趋势。

## 5. 存在的问题与研究展望

强风化岩填筑高路堤的变形和稳定主要受填料遇水软化、特殊水文地质、填方高度、降雨入渗和排水条件等影响。现有研究已对填料强度变化、路堤沉降、边坡稳定和 risk 评价方法进行了较多探讨,但仍存在一些不足。总结了目前存在的不足,并指出了相应的未来研究方向。

(1) 强风化岩填料遇水后的性能变化研究还不够充分。已有研究表明,强风化岩填料浸水或干湿循环后容易软化、崩解,强度参数会降低,并会产生湿化变形;但很多稳定性分析仍采用固定参数,强风化岩填料湿化后力学性能劣化的定量规律需要进一步研究。未来可开发标准化的,用于量化强风化岩在不同应力路径和干湿循环次数下的软化与变形试验方法,并建立适合工程使用的参数取值和折减方法。

(2) 对路堤变形发展过程的认识还不够具体。强风化岩高路堤失稳通常不是突然发生的,通常是由局部软化、沉降增大、坡脚位移和裂缝发展逐步形成的。尚无实际工程数据明确强风化岩高路堤失稳变形演化过程。建议将强风化岩填料遇水劣化规律、路堤变形机制和现场监测结果结合起来分析研究,给出强风化岩高路堤全生命期的变形演化特征。

(3) 现有路堤动态风险评估方法与工程现场结合不够,评估结果常出现与实际情况不符。概率分析、数值模拟和智能评价方法虽然较多,但实际工程中常使用单一方法进行风险评估,且未将风险评估与现场监测信息紧密结合起来,另外适用于区域路堤风险筛查的多因素决策法在动态评估方面的研究还不完

善,需进一步发展。未来可建立和完善风化岩填筑路堤动态风险评估多因素综合评估指标体系与方法,尤其是要考虑沟谷填筑路堤时可能诱发路堤失稳的地形与水文地质条件;并融合风险评估模型与现场监测信息来确定风险结果,以提高强风化岩高路堤风险评估结果的可靠性。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(52179110),武汉轻工大学博士科研启动项目(2021RZ028)。

## 参考文献

- [1] 张秀梅,邱华,耿福强. 风化岩路堤填料强度与变形特性研究[J]. 交通世界, 2023(9): 43-45.
- [2] 梅敏. 强风化花岗岩路用性质及高路堤稳定性分析研究[J]. 湖南交通科技, 2015, 41(1): 11-13, 67.
- [3] 杨帆,侯克鹏,谢永利. 强风化云母石英片岩力学参数确定方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(2): 29-33, 38.
- [4] Chen, X.Y., Yan, H.Z. and Liu, X.X. (2011) Study on Engineering Characteristics of Highly Weathered Weak Rock. *Advanced Materials Research*, **261**, 1309-1312. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.261-263.1309>
- [5] 刘新喜,夏元友,刘祖德,等. 强风化软岩路基填筑适宜性研究[J]. 岩土力学, 2006(6): 903-907.
- [6] 刘传正,赵信文,咎超予,等. 梅大高速路堤“5·1”塌方灾害链成因分析[J]. 工程地质学报, 2026, 34(1): 198-209.
- [7] An, W., Wang, L. and Chen, H. (2020) Mechanical Properties of Weathered Feldspar Sandstone after Experiencing Dry-Wet Cycles. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2020**, Article ID: 6268945. <https://doi.org/10.1155/2020/6268945>
- [8] He, X., Liu, C., Zhang, X., Wu, C. and Weng, Z. (2024) Disintegration Characteristics of Highly Weathered Granite under the Influence of Scouring. *Water*, **16**, Article 496. <https://doi.org/10.3390/w16030496>
- [9] Liu, W. and Zhang, Z. (2020) Experimental Characterization and Quantitative Evaluation of Slaking for Strongly Weathered Mudstone under Cyclic Wetting-Drying Condition. *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, Article No. 65 <https://doi.org/10.1007/s12517-019-5044-2>
- [10] 刘新喜,夏元友,蔡俊杰,等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007(8): 1705-1709.
- [11] 张宝华,尹中文,关宏涛,等. 云母片岩风化土路基填料湿化变形研究[J]. 路基工程, 2022(6): 60-67.
- [12] 刘翔,陈国兴,孙田. 花岗岩全风化土湿化变形及强度的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3313-3317.
- [13] 方迎潮,张垚,葛华,等. 风化残积砂土相对密实度及含水率对抗剪强度的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2024, 22(3): 100-108.
- [14] Du, J., Shen, X., Li, C., Zhu, W. and Feng, G. (2023) Effect of Dry-Wet Cycles on the Strength and Deformation of the Red-Bed Rockfill Material in Western Yunnan. *Frontiers in Earth Science*, **11**, Article 1192269. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1192269>
- [15] 郭志边,杨伟红,程乾. 斜坡高填方路堤开裂病害及稳定性研究[J]. 路基工程, 2022(4): 223-228.
- [16] Showkat, R., Mohammadi, H. and Babu, G.L.S. (2022) Effect of Rainfall Infiltration on the Stability of Compacted Embankments. *International Journal of Geomechanics*, **22**, Article ID: 04022104. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0002425](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002425)
- [17] 张华,张文颢,徐晨,等. 红层软岩高填方路堤工后沉降数值模拟[J]. 路基工程, 2022(6): 146-151.
- [18] 许孝飞,朱耀光,贺钰涛,等. 绢云母片岩土石混合料高填方路堤变形特征和规律研究[J]. 交通科技, 2023(5): 10-16.
- [19] 蒋正舜,张国才,段诚仕,等. 风化花岗岩超高填方路堤变形规律研究[J]. 粘接, 2025, 52(5): 131-134, 138.
- [20] 庄前兵,高飞,梁伟君,等. 黄土高填方路堤沉降影响因素及控制技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(4): 200-205, 23.
- [21] 刘忠祥. 山区高填方路堤沉降规律研究[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(11): 10-12.
- [22] 文成章. 新型固化剂改良云母片岩风化土的路用性能及机理研究[D]. [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [23] 王鹏,杨龙伟,李永勤,等. 高填方路堤滑坡成因分析及防护对策[J]. 地基处理, 2024, 6(S1): 95-102, 110.

- [24] Zhang, H., Zhang, C., Zheng, W., Wang, X. and Zhang, J. (2024) Analysis of the Stability of a High Fill Slope under Different Gradients and Precipitation Conditions. *Applied Sciences*, **14**, Article 7590. <https://doi.org/10.3390/app14177590>
- [25] 孙宏磊, 吕江, 赵晖, 等. 干湿循环对高填方路堤边坡稳定性影响研究[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(1): 66-71.
- [26] 黄发明, 陈杰, 杨阳, 等. 滑坡易发性相关致灾环境因子研究的综述与展望[J]. 地质科技通报, 2025, 44(2): 14-37.
- [27] 李泽霖. 山区公路高填方路基的稳定性分析[J]. 交通世界, 2025(Z1): 133-135.
- [28] 蒋辽, 喻兴, 刘林洁, 等. 基于蒙特卡罗模拟的填方边坡可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2): 693-697.
- [29] Waddell, P. (2023) The Impact of Assumptions on Deterministic and Probabilistic Analyses of Earth Fill Embankments. *Australian Geomechanics Journal*, **58**, 99-116. <https://doi.org/10.56295/agj5844>
- [30] Chakraborty, R. and Dey, A. (2022) Probabilistic Slope Stability Analysis: State-of-the-Art Review and Future Prospects. *Innovative Infrastructure Solutions*, **7**, Article No. 177. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00784-1>
- [31] Das, T. and Choudhury, D. (2024) Bayesian Network Based Probabilistic Modelling of Earthquake Induced Landslides: Slope, Embankment, Dams and Landfills. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, **10**, 372-377. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v10.os-2-04>
- [32] Wu, W. (2017) Lulu Zhang, Jinhui Li, Xu Li, Jie Zhang, Hong Zhu: Rainfall-Induced Soil Slope Failure: Stability Analysis and Probabilistic Assessment. *Acta Geotechnica*, **12**, 1175-1175. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0591-8>
- [33] 贺佳. 高填方路基沉降数值模拟与现场监测分析[J]. 北方交通, 2023(10): 26-29.
- [34] 邓志刚, 朱绍诚, 辛鹏, 等. 基于 FLAC3D 模型的高填方路基沉降变化规律分析[J]. 西部交通科技, 2025(6): 23-25, 65.
- [35] Bao, H., Liu, L., Lan, H.X., Peng, J.B., Yan, C.G., Tang, M., *et al.* (2024) Evolution of High-Filling Loess Slope under Long-Term Seasonal Fluctuation of Groundwater. *Catena*, **238**, Article ID: 107898. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107898>
- [36] Xue, Y., Chen, N.S., Tang, R.X., Yang, Z.Y., Jiao, M.J., Wen, T., *et al.* (2025) Slope Failure Mechanism of the “5·1” Meida Highway Collapse in Guangdong, China: Interaction between Multi-Source Water and Weathered Granite Soil. *Landslides*, **22**, 1199-1212. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02455-5>
- [37] 杨校辉, 朱彦鹏, 周勇, 等. 山区机场高填方边坡滑移过程时空监测与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3977-3990.
- [38] 王智超, 周芊好, 熊赆, 等. 高填方多级挡墙路堤变形及稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 980-988.
- [39] Yang, E., Wang, K., He, J., Liu, K., Wang, J., Zhang, H., *et al.* (2025) Settlement Prediction of a High Embankment Based on Non-Linear Regression and Neural Network Algorithm. *Transportation Geotechnics*, **50**, Article ID: 101443. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101443>
- [40] 刘桂强, 李宏文, 谭玲, 等. 基于实时位移监测的风化花岗岩边坡失稳风险动态调控技术[J]. 公路交通技术, 2020, 36(2): 14-19.
- [41] Yao, A., Gong, Y., Li, Y., Tian, T. and Xu, C. (2022) Mountain-Expressway Slope Safety Based on the Online Monitoring System and Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Journal of Testing and Evaluation*, **50**, 1906-1919. <https://doi.org/10.1520/jte20210423>
- [42] Zhang, Q., Su, Q., Liu, B., Pei, Y., Zhang, Z. and Chen, D. (2023) Comprehensive Performance Evaluation of High Embankments in Heavy-Haul Railways Using an Improved Extension Model with Attribute Reduction Algorithm. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **44**, 2673-2692. <https://doi.org/10.3233/jifs-222562>
- [43] 丁瑞力, 郭祺, 白雪, 等. 高速公路穿越煤矿采空区稳定性风险评价研究[J]. 现代信息科技, 2023, 7(13): 136-140, 144.
- [44] 李瀚, 左伟俊, 邢浩, 等. 基于模糊综合评价法的岩质边坡开挖施工风险评估[J]. 公路工程, 2024, 49(6): 79-86.
- [45] 吴新栋, 王文博, 杨玉莹. 基于模糊综合评价的隧道洞口边坡稳定性分析方法[J]. 工程技术研究, 2025, 10(2): 46-49.
- [46] 张军, 郑菁菁, 蒋恺. 高填方路堤工程施工安全专项风险评估方法研究[J]. 建筑安全, 2023, 38(11): 64-69.
- [47] 何韬. 基于博弈论组合赋权的高填方路基施工风险模糊综合评价研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2025.
- [48] Jin, L., Liu, P., Yao, W. and Wei, J. (2024) A Comprehensive Evaluation of Resilience in Abandoned Open-Pit Mine Slopes Based on a Two-Dimensional Cloud Model with Combination Weighting. *Mathematics*, **12**, Article 1213. <https://doi.org/10.3390/math12081213>



- 
- [49] Deng, Z., Xu, L., Su, Q., He, Y. and Li, Y. (2024) A Novel Method for Subgrade Cumulative Deformation Prediction of High-Speed Railways Based on Empiricism-Constrained Neural Network and Shapley Additive Explanations Analysis. *Transportation Geotechnics*, **49**, Article ID: 101438. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101438>
- [50] 卢鑫月, 许成顺, 侯本伟, 等. 基于动态贝叶斯网络的地铁隧道施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 492-501.
- [51] Guo, X., Ji, J., Khan, F., Ding, L. and Tong, Q. (2021) A Novel Fuzzy Dynamic Bayesian Network for Dynamic Risk Assessment and Uncertainty Propagation Quantification in Uncertainty Environment. *Safety Science*, **141**, Article ID: 105285. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105285>
- [52] 柳彤晖, 豆红强, 纪歆雅. 基于马尔可夫链理论考虑土层变异性的边坡随机场模型[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(3): 111-116.
- [53] 尹成. 连续强降雨作用下高速公路陡坡路堤变形动态监测及病害处治研究[J]. 西部交通科技, 2025(5): 63-66.
- [54] 于凯凯. 神朔铁路高路堤变形监测及灾变智能分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2025.
- [55] 何训林, 刘文劫, 潘世强, 等. 无人机和云平台技术在超高填路堤风险管控中的应用[J]. 公路工程, 2023, 48(4): 113-120.
- [56] 赵延林, 刘旭, 丁志刚, 等. 高填方路堤沉降的预测方法[J]. 黑龙江科技大学学, 2020, 30(4): 385-389.
- [57] Liu, S.H. and Han, W.X. (2022) Centrifugal Model Test on the Settlement of a High Embankment Fill. In: *Physical Modelling in Geotechnics*, Routledge, 737-740. <https://doi.org/10.1201/9780203743362-133>
- [58] 刘冠男, 王志朋, 王玉田, 等. 基于动态权重的隧道施工失稳风险评估方法研究[J]. 北方交通, 2022(12): 70-74.
- [59] Ahmad, F., Samui, P. and Mishra, S.S. (2024) Machine Learning-Enhanced Monte Carlo and Subset Simulations for Advanced Risk Assessment in Transportation Infrastructure. *Journal of Mountain Science*, **21**, 690-717. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8388-8>
- [60] Si, P., Tang, L., Tian, S., Ling, X. and Liu, Y. (2025) Stacked Machine Learning-Based Probabilistic Seismic Demand and Risk Assessment of Railway Embankments with Variable Slopes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **162**, Article ID: 112245. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112245>