

# 水工环地质条件下边坡稳定性分析评价

熊 升

湖北省城市地质工程院 湖北武汉 430051

**摘 要:** 水工环地质条件对边坡稳定性具有决定性影响,是工程安全评价的关键内容。本文围绕水工环地质背景下的边坡稳定性问题,系统分析水文地质、工程地质与环境地质等因素的作用机制,综合运用定性分析与定量方法开展稳定性研究。通过构建包含多类指标的评价体系,结合模糊综合评价与神经网络模型实现边坡稳定性分级预测。研究建立了敏感性分析方法,识别主导影响因素,并提出针对性防治措施,为边坡工程的安全设计与风险防控提供理论依据与技术支持。

**关键词:** 水工环地质;边坡稳定性;分析评价

边坡稳定性是岩土工程与地质工程中的重要课题,尤其在水工环地质条件下其复杂性显著增加。水文地质变化、岩土体工程特性及环境地质因素共同影响着边坡的长期稳定与安全状态。开展水工环地质背景下边坡稳定性的系统分析,对地质灾害防治与工程安全建设具有迫切现实意义。本文旨在基于水工环地质条件,构建科学有效的边坡稳定性评价模型与分析方法,揭示多因素耦合作用下的边坡失稳机制,并提出合理防治策略,为相关工程实践提供理论参考与技术指导。

## 一、水工环地质条件概述

### 1. 水文地质特征

水文地质特征是水工环地质环境的重要组成部分,其对边坡稳定性往往产生显著影响。地下水活动直接改变岩土体的物理与力学性质。孔隙水压力上升将减少颗粒间的有效应力,进而降低抗剪强度。含水层结构及地下水位的动态变化,会在边坡内部形成复杂渗流场。高水位及其季节性波动使岩土体在饱和与非饱和状态之间反复变化。这一过程造成土体重量增加和内摩擦角降低,对边坡稳定构成持续威胁。地下水的流动还可能带走细颗粒物质,引起潜蚀现象,损害岩土体结构完整性,逐步削弱边坡支撑能力,从而诱发滑坡等地质灾害。

### 2. 工程地质特性

工程地质特性涵盖岩土体类型、结构构造、风化程度和物理力学参数等多方面内容。岩土体材料在水工环地质环境中表现出较强多样性,增加了边坡稳定性分析的难度。完整坚硬的岩质边坡通常较为稳定,但长期风化与水的软化作用会使裂隙扩展、强度下降。土质边坡

的稳定性受颗粒组成、含水率和密实程度等因素影响显著。软弱夹层常常构成潜在滑动面,其在外力扰动或水文条件恶化时易引起滑坡。断层和节理等结构面破坏岩体完整性,导致边坡岩体显示出各向异性和非均质特性,进一步加大了稳定性评价的复杂性。

## 3. 环境地质因素

环境地质因素包括地形地貌、气象水文和人类工程活动等。陡峭地形使边坡具备较高势能,更易发生失稳。降雨是影响边坡稳定性的关键气象要素。强降水入渗不仅增加岩土体自重,还会抬高孔隙水压力,促使边坡沿潜在滑移面发生变形。持续暴雨可能激发泥石流等灾害,严重危害边坡及周边安全。人类活动如坡脚开挖、坡顶堆载和机械振动等,也会打破边坡自然平衡,触发失稳过程。各类环境地质因素与水工环地质条件共同作用,使边坡稳定性始终处于动态演变中。

## 二、边坡稳定性分析方法

### 1. 定性分析方法

#### 1.1 工程类比法

工程类比法依据相似性原理,将目标边坡与已有工程进行地质条件和稳定性表现的对比。通过总结类似案例中的成败经验,工程师可获取有关坡角设计、支护形式及地质缺陷处理的有益参考。该方法适用于前期快速评估,并为后续深入分析提供方向。但工程地质条件常存在差异,应用时需谨慎选择可类比案例,以保证结论可靠性。

#### 1.2 图解法

图解法以直观方式表现边坡和地质结构的空間关系,

常用方法包括赤平投影和实体比例投影。赤平投影可分析结构面与坡面之间的几何组合,判断是否存在不稳定的结构模式。实体比例投影按比例绘制边坡剖面,并标注地质界面与结构面,从而形象展示整体结构及可能破坏区域。尽管图解法无法给出定量安全系数,但能有效识别潜在失稳模式,为定量计算提供依据。

## 2. 定量分析方法

### 2.1 极限平衡法

极限平衡法假定边坡处于临界平衡状态,通过对滑体受力分析建立平衡方程求解安全系数。常用方法包括瑞典条分法和毕肖普法等。瑞典条分法忽略条块间作用力,计算简便,适用于初步评价。毕肖普法则考虑条间力,精度较高。该方法需合理确定滑动面位置和岩土强度参数,同时考虑水压、地震等附加荷载,以提升计算准确性。

### 2.2 数值模拟法

数值模拟法运用计算机技术模拟边坡在外载和地质条件下的响应过程。常用方法有有限元法、有限差分法和离散元法等。有限元法适用于连续介质应力应变分析,能够模拟弹塑性及渐进破坏行为。有限差分法擅长处理大变形和裂隙岩体问题。离散元法则基于颗粒单元,可有效模拟崩塌、碎屑流动等离散现象。数值模拟能够揭示边坡内部应力、应变和位移分布,展现潜在滑移面的发展过程。但其结果受模型参数、边界条件和网格质量影响较大,需经敏感性分析和实测验证方可采信<sup>[1]</sup>。

## 三、边坡稳定性评价指标体系构建

### 1. 评价指标的选取原则

科学合理的评价指标体系是准确评估边坡稳定性的基础。指标选取应遵循多项原则。全面性原则要求指标涵盖地质条件、水文环境、地形地貌及人类活动等主要影响因素,以综合反映边坡系统的真实状态。代表性原则强调应优先选用对稳定性变化敏感的主导指标,避免冗余信息干扰判断。可操作性原则指指标需便于实际获取与量化,保障评价工作的可行性。独立性原则要求尽量采用相互关联弱的指标,减少信息重叠,从而提高评价的准确性与有效性。

### 2. 主要评价指标的确定

基于上述原则,本文确立了一套适用于水工环地质条件的边坡稳定性评价指标体系。地质类指标包括岩土体类型与性质、结构面发育程度、软弱夹层的厚度及分布等。水文类指标涵盖地下水位埋深、流速和渗透系数。

地形地貌指标主要有边坡高度、坡度和坡向。外部环境指标考虑降雨量、地震烈度与人类活动强度等。这些指标从不同维度描述了边坡的地质背景和自身属性,为稳定性综合评价提供了多方面的信息支持。

## 3. 评价指标的权重赋值

为反映各指标在稳定性评价中的相对重要性,本研究借助层次分析法确定其权重。该方法通过构建层次模型,将评价系统划分为目标层、准则层与指标层,并邀请专家依据专业经验对同一层次元素进行两两比较,构造判断矩阵。通过求解矩阵特征向量,得出各指标权重。这一做法结合了专家主观判断与数学客观计算,既尊重专业经验,也符合科学要求。通过一致性检验的权重将用于后续综合评价,以增强结果的可信度与实际指导意义。

## 四、边坡稳定性综合评价模型建立与应用

### 1. 模糊综合评价模型

模糊综合评价模型以模糊数学为基础,适用于边坡稳定性这类不确定性强的问题。该模型将各项评价指标作为输入,借助隶属函数计算各指标属于不同稳定性等级的隶属程度。再结合指标权重,选用合适的模糊合成算子进行运算,最终得到边坡对应于各稳定性等级的综合隶属度。依据最大隶属度原则,判定边坡的稳定性类别。该方法考虑了影响因素的模糊性与复杂性,规避了传统二分法的局限性,使评价结论更贴近工程实际。

### 2. 神经网络评价模型

人工神经网络具备良好的非线性拟合与自学习能力,能够从大量样本中自动挖掘输入与输出间的内在联系。在边坡稳定性评价中,以历史案例中的地质参数作为输入,相应的稳定性状态作为目标输出,对网络进行训练。训练完成的模型可用于新边坡工程的稳定性预测。相比传统方法,神经网络无需预设数学关系,尤其适用于水工环地质条件下的复杂分析,在高维与非线性问题上表现优异。应该注意,网络性能很大程度上依赖于训练样本的代表性与数量。因此,实际应用中需搜集足够的高质量样本进行训练与测试,以提升模型的泛化能力与预测准确性。

### 3. 模型应用与效果验证

为检验所建模型的有效性与实用性,选择多个典型水工环地质边坡工程作为实例,开展应用验证。将实际地质参数输入模糊综合评价模型和神经网络模型,分别得出稳定性评价结果,并与现场监测数据及灾害记录进行比对。分析显示,两种模型均能较好预测边坡稳定状

态:模糊模型擅长处理不确定性信息,神经网络模型更善于捕捉复杂的非线性关系。通过持续优化模型参数与算法结构,可进一步提高评价精度,为边坡工程防护与治理提供可靠依据<sup>[2]</sup>。

## 五、边坡稳定性影响因素敏感性分析

### 1. 单因素敏感性分析

单因素敏感性分析是在固定其他参数条件下,依次调整单个评价指标,考察其对边坡稳定性的影响程度。通过分别对各指标开展敏感性试验,能够建立指标与安全系数之间的对应关系曲线,进而识别出对稳定性最敏感的因素。例如,某些情况下地下水位的轻微上升可能引起安全系数显著降低,表明其为高敏感性因素;而如植被覆盖度等部分次要因素的变动对稳定性影响较弱。该方法有助于明确边坡稳定中的主导因素,为工程设计与施工管控提供重点方向。

### 2. 多因素交互作用敏感性分析

在实际水工环地质环境中,各类影响因素往往存在相互关联与协同作用,因此除单因素分析外,还需进行多因素交互敏感性分析。可借助正交试验或均匀试验设计方法,系统安排多因素多水平的试验组合,构建全面可靠的试验方案。基于大量试验数据,可揭示不同因素间的交互效应及其对边坡稳定性的联合作用机制。例如,降雨与地下水位常表现出协同增强效应,二者共同作用时对稳定性的负面影响远超单因素独立作用。多因素交互分析有助于更全面理解边坡失稳机理,并为防控措施的制定提供科学依据。

## 六、边坡失稳防治措施研究

### 1. 削坡减载措施

削坡减载通过降低边坡上部岩土体重量,减小下滑力矩,从而提高整体稳定性。削坡设计需结合边坡高度、坡角、地质背景及周边环境条件,科学确定削坡幅度与坡度形态。一般对高边坡可采用缓坡结合平台设置的方式,以削弱水流冲刷及坡体荷载。削方所得土石需及时清运或合理堆放,避免增加坡脚压力。该工艺简便可行,但在复杂大型边坡中常需与其它支挡手段协同使用。

### 2. 支挡结构措施

支挡结构是用于抵抗边坡滑移的工程构筑物,主要包括挡土墙、抗滑桩和锚索框架等形式。挡土墙适用于低矮土质或碎裂岩质边坡,依托自重及基底摩擦发挥阻

滑作用;抗滑桩适用于岩体深部滑移,能将荷载传递至稳定基岩;锚索框架则通过预应力的锚索与格构梁联合作用,提供抗拉能力并增强坡面完整性。支挡结构选型应综合考虑地质条件、滑动机制与经济成本,以实现最优工程效果。

### 3. 排水措施

排水措施是减轻地下水对边坡稳定性负面影响的关键途径。地表排水依靠截水沟、排水沟等设施引导地表径流,减少雨水下渗;地下排水则采用盲沟、排水孔或排水井等方式降低内部孔隙水压力。特殊情况下还可应用电渗排水或虹吸排水等先进技术以提升排水效能。有效的排水能够显著改善岩土体物理力学性质,进而增强边坡稳定性。

### 4. 生态防护措施

生态防护属于环境友好型边坡治理手段,主要包括植被恢复、客土喷播及三维网植草等技术。植物根系可增强土体整体性与抗剪强度,调节表土温湿度,抑制干裂侵蚀。客土喷播通过喷射肥力客土并种植,促进坡面生态恢复;三维植被网则采用高分子网格固定土壤和种子,有效防控水土流失。生态防护在提升边坡稳定性的同时,亦有助于实现工程与生态的协调发展<sup>[3]</sup>。

## 结语

水工环地质条件下的边坡稳定性分析是一个多因素交织的系统工程,需从地质环境本质出发进行综合评价。本文通过构建指标体系和建立模糊综合与神经网络模型,实现了对边坡稳定状态的有效判别。敏感性分析进一步揭示了主导影响因素及其交互效应。结合削坡、支挡、排水与生态防护等综合治理手段,可提升边坡工程的长期稳定性与抗风险能力。研究成果对保障工程安全、防治地质灾害具备重要参考价值。

## 参考文献

- [1] 冯鹏程,何祥新,马丹丹.水工环地质条件下边坡稳定性分析评价[J].中国科学探险,2021,(01):107-109.
- [2] 杨晓花.水工环地质条件下边坡稳定性分析评价[J].低碳世界,2020,10(11):120-121.
- [3] 令狐荣霞.水工环地质条件概述及基坑边坡稳定性分析评价[J].世界有色金属,2019,(13):221-222.